

特集：建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション

ページ

- 1 (巻頭言) 「建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション」特集の発刊にあたって
宮岡伸司
- 3 (解説) 建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション
高田武之
- 11 (技術資料) 大入熱溶接対応建築構造用780 N/mm²級鋼の開発
宮田亮太・山口徹雄・田畑晃人・山本貴大・栗山良平
- 16 (技術資料) 大入熱溶接対応建築構造用TMCP鋼板
森下史弥・川野晴弥
- 20 (技術資料) 建築構造用高性能490 N/mm²級および550 N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管
山口徹雄・伊藤冬樹・岡野重雄・高橋弘志
- 27 (技術資料) 橋梁用高降伏点圧延鋼材 SBHSシリーズ
久保田毅
- 32 (論文) 高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼板 エコビュー プラスTM
松林拓人・高橋佑輔・湯瀬文雄・松下政弘・田畑晃人・山口徹雄
- 38 (論文) 疲労抑制鋼板EX-FacterTMによる鋼床版デッキプレート・Uリブ溶接継手の疲労耐久性向上
伊藤孝矩・高嶋康人・杵淵雅男・松下政弘・田畑晃人・山口徹雄
- 44 (解説) KOBELCOグループの建築鉄骨向け溶接技術
鈴木励一
- 51 (解説) 建築鉄骨向け溶接材料の最新動向とラインナップ紹介
山本貴大・于航・井上有人・幸村正晴
- 59 (技術資料) 橋梁補修補強用RE-SETケーブル[®]システム
有路亮平・堀井智紀・荒木茂
- 65 (技術資料) 伝統木造建築向けステルスブレース
橋田優人
- 71 (技術資料) 床スラブの上フランジ拘束効果を活用した鉄骨梁の横座屈補剛工法
伊藤冬樹・高田武之
- 78 (論文) アンダーマッチ溶接による780 N/mm²級箱形断面柱継手の最大曲げ耐力評価
宮田亮太・山口徹雄・田畑晃人・松下政弘・田中剛
- 86 (論文) TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能
平野公大・高田武之・西村有司・田中剛
- 93 (解説) 建築鉄骨梁溶接向けの新しい自動化システムとCADデータ関係ソフトウェアの紹介
鹿勇氣・藤本泰成・浅野涼・新井敦士・田中伸明
- 97 (技術資料) 建築現場における横向柱継自動溶接の新制御方法
鈴木将史・河田純一・川崎博文・石崎圭人
- 103 (技術資料) 画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステム
河田純一・石崎圭人・松嶋幸平・小向航平・吉本達也
- 108 (技術資料) 地盤改良材としての鉄鋼スラグの利活用
陣内綾音・松元弘昭・唯井力造
- 115 神戸製鋼技報掲載 建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション 関連文献一覧表
(Vol.65, No. 1 ~ Vol.72, No. 2)

新製品・新技術

- 117 レーザドップラー振動計による非接触でのケーブル張力測定技術
福井康大
- 118 高耐食めっき鋼板「KOBEMAG[®]」
梅井健司・古田明・久野彰士
- 122 編集後記・次号予告

《FEATURE》 KOBELCO's Materials and Solutions for Architecture and Civil Engineering

- 1 On the Publication of Special Issue on KOBELCO's Materials and Solutions for Architecture and Civil Engineering
Shinji MIYAOKA
- 3 KOBELCO's Materials and Solutions for Architecture and Civil Engineering
Dr. Takeshi TAKADA
- 11 Development of 780 N/mm²-Class Structural Steel for Building Structures Suitable for High Heat Input Welding
Ryota MIYATA · Tetsuo YAMAGUCHI · Akito TABATA · Takahiro YAMAMOTO · Ryohei KURIYAMA
- 16 TMCP Steel Plate for Architectural Structures Compatible with High-Heat Input Welding
Fumiya MORISHITA · Haruya KAWANO
- 20 High-Performance Cold-Press-Formed Rectangular Columns (490 N/mm² and 550 N/mm² Grades) for Building Structures
Tetsuo YAMAGUCHI · Fuyuki ITO · Shigeo OKANO · Hiroshi TAKAHASHI
- 27 Higher Yield Strength Steel Plates for Bridges: SBHS Series
Tsuyoshi KUBOTA
- 32 Corrosion Resisting Steel Eco-view PlusTM, a Repaint Term Extension under High Humid Environment
Takuto MATSUBAYASHI · Dr. Yusuke TAKAHASHI · Dr. Fumio YUSE · Masahiro MATSUSHITA · Akito TABATA · Tetsuo YAMAGUCHI
- 38 Improving Fatigue Durability of U-rib to Deck Welded Joints of Orthotropic Steel Decks with EX-FacterTM Fatigue Crack Initiation Resistant Steel
Dr. Takanori ITO · Dr. Yasuhiro TAKASHIMA · Dr. Masao KINEFUCHI · Masahiro MATSUSHITA · Akito TABATA · Tetsuo YAMAGUCHI
- 44 Kobelco Group's Welding Technologies for Architectural Steel Frames
Dr. Reiichi SUZUKI
- 51 Latest Trends and Lineup of Welding Consumables for Structural Steel Column
Takahiro YAMAMOTO · Hang YU · Yuto INOUE · Masaharu KOMURA
- 59 RE-SET Cable[®] System for Repairing and Reinforcing Bridges
Ryohei ARIJI · Tomonori HORII · Shigeru ARAKI
- 65 Stealth Brace for Traditional Wooden Architecture
Yuto HASHIDA
- 71 Lateral Buckling Restraint Method for Steel Beams Using Stiffening Effect of Slab
Fuyuki ITO · Dr. Takeshi TAKADA
- 78 Ultimate Flexural Strength of Column Splices with Undermatching Welds in 780 N/mm² Class Columns
Ryota MIYATA · Tetsuo YAMAGUCHI · Akito TABATA · Masahiro MATSUSHITA · Dr. Tsuyoshi TANAKA
- 86 Structural Performance of Exposed Column Bases Using TS700 Anchor Bolts
Kimihiro HIRANO · Dr. Takeshi TAKADA · Yuji NISHIMURA · Dr. Tsuyoshi TANAKA
- 93 Introducing New Automation System and CAD-Linked Software for Architectural Steel Frame Beam Welding
Yuki SHIKA · Taisei FUJIMOTO · Ryo ASANO · Atsushi ARAI · Nobuaki TANAKA
- 97 New Control Method of Automatic Horizontal Column Joint Welding at Construction Sites
Masafumi SUZUKI · Junichi KAWATA · Hirofumi KAWASAKI · Keito ISHIZAKI
- 103 Compact Portable Welding Robot System with Vision Sensor
Junichi KAWATA · Keito ISHIZAKI · Kohei MATSUSHIMA · Kohei KOMUKAI · Dr. Tatsuya YOSHIMOTO
- 108 Utilization of Steel Slag as Soil Stabilizer
Ayane JINNOUCHI · Hiroaki MATSUMOTO · Rikizo TADAI
- 115 Papers on Advanced Technologies for KOBELCO's Materials and Solutions for Architecture and Civil Engineering in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.65, No.1~Vol.72, No.2)

(巻頭言)

「建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション」特集の発刊にあたって

宮岡伸司
取締役執行役員

On the Publication of Special Issue on KOBELCO's Materials and Solutions for Architecture and Civil Engineering

Shinji MIYAOKA



1. 中期経営計画における「魅力ある企業への変革」

当社グループが将来にわたって「お客様や社会にとってかけがえのない存在」であり続けるためには、2030年度には「未来に挑戦できる事業体」になっている必要があると考え、そこからバックキャストする形で2024～2026年度の中期経営計画を策定した。

今中期経営計画では、「稼ぐ力の強化」と「成長の追求」, 「カーボンニュートラルへの挑戦」の二つを最重要課題として取り組んでいる。またこれらを確実に実行するために、人的資本の有効活用や財務体質のさらなる基盤強化、当社が有する資本のかけ合わせにより「魅力ある企業への変革」を進めている。

この「魅力ある企業への変革」において、「KOBELCOらしさ」が重要となる。多様な事業領域において、社会やお客様の困りごとに対するソリューションを提供してきた中で培ってきた製品・技術・サービス、お客様や市場・社会とのつながり、そして多様な人材など、当社が有する様々な資本のかけ合わせによるKOBELCOらしい総合力を発揮した変革でなくてはならない。

2. KOBELCO-X ～KOBELCOらしい変革～

今中期経営計画では、「変革」=「X」を「未来へ挑戦できる事業体」の確立に必要な「手段・ドライバー」と位置づけ、AX～GXの七つの「X」を設定して「魅力ある企業への変革」を推進していく。さらに「X」には、「変革」だけではなく、技術×技術、市場×技術といったKOBELCOの総合力を発揮するための事業をまたいだ「かけ算」、また各変革の「交点」の意味も込めて、「KOBELCO-X」(コベルコ・エックス)と総称した。(図1)

このうちAXとGXは事業戦略の両輪と位置づけている。AXは「既存事業の深化」×「新たな事業機会の探索」という「両利きの経営」を意味し、今中期経営計画の重点課題のひとつである「稼ぐ力の強化」×「成長の追求」と同意である。とくに今後の当社グループの持続的成長には、外部環境変化を背景とした新たな需要の捕捉やコト売り・ソリューションビジネスなどによる事業領域拡大といった「新たな事業領域の拡充」がより一層重要となってくる。GXは「当社グループのカーボンニュートラルの実現」×「グリーン社会への貢献」=グリーン・トランスフォーメーションであり、こちらも今中期経営

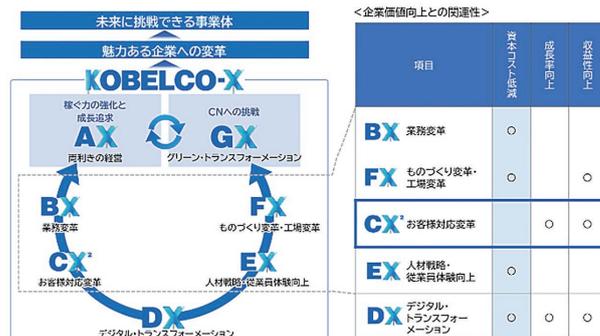


図1 KOBELCO-X
Fig.1 KOBELCO-X

計画のもうひとつの重点課題である「カーボンニュートラルへの挑戦」そのものである。

3. CX² ～お客様対応変革：事業をまたいだCXのかけ算～

このAXとGXを実現するための変革がBX, CX², EX, FXの四つのXである。中でも「KOBELCOらしさ」を実現していく上で重要な「X」となるCX²について述べたい。CX²:「お客様対応変革」(Customer Experience Transformation)は、当社独自の造語である。CX(お客様体験Customer Experience)は、様々な企業でも広く使われており、当社でも各事業や各製品においてCXの向上に努めている。

これに対し、CX²では、事業ごとのお客様ではなく、「KOBELCOのお客様」と考えて、我々のお客様対応を変革し、お客様体験を変革していこうという取り組みである。「各事業ユニットのCXとCXのかけ算(X)」により、「お客様体験(CX)を変革(Transformation)する」という2つの意味を込めてCX²とした。

CX²を推進するためには、事業間のかけ算による化学反応を誘発する環境を整えることが必要になる。そこでまずお客様情報の従来の事業ごとでの管理を廃止し、全事業をまたいだ一元管理に切り替えるという大きな変革を行った。2023年度に経営審議会の直下に「お客様対応変革プロジェクト」を立上げ、「お客様情報共通基盤」としてSFA^{注)}を構築した。2024年度から切り換えたこ

脚注) Sales Force Automation. 営業活動やお客様情報の管理を支援するシステムツールのこと。

とで多くの情報が蓄積され、今ではどの事業部門も他の事業部門のお客様情報を見ることができるようになった。現在は事業をまたいだ情報の利活用を進めていく段階にある。

このような全事業をまたいだ「長い横串」のCX²は新たな取り組みであるが、特定の市場軸・お客様軸で複数事業をまたいだ「短い横串」の取り組みは今までも行ってきた。その一つには「全社自動車プロジェクト」がある。代表的な取り組みとしては、鉄鋼アルミ事業部門、素形材事業部門、溶接事業部門、技術開発本部で連携し、超ハイテンやアルミ板、アルミ部品とその接合や加工のソリューションを組み合わせたマルチマテリアル構造での車体軽量化提案などを行い、お客様へ多くの価値提供を行ってきた。

このような取り組みが「全社お客様情報共通基盤」やCX²の考え方のもとで全事業をまたいだ「長い横串」の活動へ拡大・発展し、さらなる新しい価値をお客様へ提供することをKOBELCO-Xでは目指している。

4. 「建材WG」～建築・土木分野での取り組み～

特定の市場軸・お客様軸で複数事業をまたいだ「短い横串」であるワーキンググループ（WG）やプロジェクト活動が複数あり、その一つが「建材WG」である。

「建材WG」は、「お客様へKOBELCOとして、建築・土木の専門技術を用いたソリューションを継続的に提供できている状態」を目指し、本社/事業開発部 建材企画グループが主導する形で企画・運営している。

多様な事業を有する当社グループの強みを生かすため、鉄鋼アルミ事業部門、素形材事業部門、溶接事業部門、コベルコ建機㈱、グループ会社など建築・土木分野へ製品・サービスを提供している事業主体の商品技術や営業が参画している。ここに技術開発本部や本社/建設技術部の建築・土木専門技術者、さらに営業企画を加えた編成とした。「建材WG」では、建築・土木分野における市場動向・技術動向などの情報共有や、合同でのお客様との技術交流会に取り組むことで、各事業の製品・サービスを通じたソリューション提供を推進している。

現在は、外部機関も活用した将来市場動向予測、3章で述べた「お客様情報共通基盤」活用によるお客様の潜在的な課題把握など、事業をまたいだ情報のかけ算から、新たな事業機会を見出し、活動を拡げていくステージにある。

5. 建築・土木分野における技術開発の重要性和取り組み

4章で述べたように、「建材WG」で事業をまたいだかけ算で化学反応を起こし、お客様へ新たな価値を提供していくという「KOBELCOらしさ」でCX²を実現する風土や仕組みは整いつつある。

しかしながら当社グループが有するおのこの技術・製品が優れていなければ、かけ算の価値は発揮されない。かけ算の前に、おのこの技術・製品を磨き、高めていく点で研究開発・技術開発が極めて重要であること

に変わらない。

その点でも当社は多様な優れた技術・製品を有している。

まず材料・部材としては、当社はグループ会社も含め、建築・土木向けに各種特性（高強度、耐疲労特性、耐食性など）に優れた鋼材（厚板、線材、薄板）を有し、それらを鋼製部材に加工するソリューションとのかけ算により、お客様でのライフサイクルコスト低減などへ貢献している。また当社は日本初の低CO₂高炉鋼材であるKobenable[®] Steelを商品化済みであり、建築・土木向けのすべての鋼材においてグリーンスチールとしての提供も可能である。すでに複数の案件に適用され、お客様でのカーボンニュートラルへ向けた取り組みへも貢献している。

また鋼製部材を接合する溶接材料と溶接システムのかげ算による接合ソリューションの提供により、お客様での施工工数の低減、溶接技術者不足といったお客様の課題解決へ貢献している。

コベルコ建機㈱では、油圧ショベルやクローラクレーンなど建設機械のモノ売りに加え、デジタル技術を活用したコト売りの拡大に取り組んでいるが、これらは建設現場での担い手不足などの課題を解決するためのソリューションである。

これら各事業主体での技術開発・製品開発に加え、技術開発本部でも、建築・土木分野に貢献可能な要素技術開発にも取り組んでいる。

6. まとめ～本特集の意義・期待～

本特集では、建築・土木分野の課題解決に貢献しうる当社グループの製品・技術について、当社グループが取り組むマテリアリティ（重要課題）に沿って紹介する。

KOBELCO-X、そしてCX²の取り組みのもと、「建材WG」においても、「お客様情報共通基盤」を活用し、全事業を横断してお客様の困りごとを把握し、建築・土木分野のお客様へ今まで以上の新たな価値提供へつなげる検討を始めている。

素材系にとどまらない多様な事業分野を有する当社の特徴を活かし、建築・土木分野のお客様の課題を広く把握できることはKOBELCOらしい当社の強みであるが、課題把握だけでは意味がない。

事業をまたいだ技術のかけ算で化学反応を起こし、お客様や社会の課題解決や当社の事業成長につなげるには、やはり優れた技術・製品が必要である。競争力のある技術同士を掛け合わせることで初めて驚くような化学反応が起こる。

そしてその技術のかけ算も、目的にあった化学反応を起こすためにはお客様との密な対話が必須であり、また時には当社グループ内の技術同士のかけ算だけでなく、外部の他企業の技術との掛け合わせも必要であると考えている。

本特集が、様々なステークホルダの皆様が当社の材料やソリューション技術を知っていただき、お客様との対話やパートナーとなり得る他企業との対話を始めるきっかけとなることを願う。そしてその先には建築・土木分野でのお客様対応変革CX²につながることを期待したい。

(解説)

建築・土木を支える KOBELCO の材料およびソリューション

高田武之^{*1} (博士(工学))

KOBELCO's Materials and Solutions for Architecture and Civil Engineering

Dr. Takeshi TAKADA

要旨

建築・土木分野における喫緊の社会課題として、頻発する自然災害への対応、少子高齢化による担い手不足、温室効果ガス削減が挙げられる。これら社会課題の解決に向けKOBELCOグループは5つのマテリアリティ（重要課題）を特定し、解決に向けた取り組みを推進している。幅広い事業を展開する当社グループは、それぞれの事業領域で培った技術の提供に加え、事業領域を超えて技術をかけ合わせることで多くのシナジーを生み、社会に貢献している。

本稿では、当社グループが有する建築・土木分野の材料およびソリューションを、マテリアリティに沿って広く紹介する。

Abstract

The architecture and civil engineering sectors face a range of pressing social challenges, including the need to respond to increasingly frequent natural disasters, a shrinking workforce caused by a declining birthrate and aging population, and the urgent task of reducing greenhouse gas emissions. To address these challenges, the KOBELCO Group has identified five materialities (key issues) and is actively pursuing initiatives to resolve them. The Kobe Steel Group operates a diverse range of businesses, and in addition to leveraging the technologies cultivated in each field, KOBELCO Group contributes to society by integrating expertise across its business areas to generate powerful synergies. This article introduces the materials and solutions that the KOBELCO Group provides for the architecture and civil engineering sectors, organized according to these key materialities.

検索用キーワード

建築, 土木, 自然災害, 少子高齢化, 温室効果ガス, カーボンニュートラル, DX

まえがき = 1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)から30年の節目を迎えた。KOBELCOグループは阪神・淡路大震災により甚大な被害を受け、災害の脅威と復旧の困難さを身をもって経験した。阪神・淡路大震災以降、最大震度7を記録した地震だけでも2004年の新潟県中越地震、2011年の東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)、2016年の熊本地震、2024年能登半島地震など¹⁾、激甚化する自然災害に対する安心・安全の確保は我が国にとって最重要課題となっている。加えて、急速な少子高齢化に伴う担い手不足対策や、2050年カーボンニュートラルの実現に向けた温室効果ガス削減といった喫緊の課題に直面している。

当社グループは、2021年にグループ企業理念を起点とし、中長期的な時間軸の中で社会課題の解決や価値創造を通じて、当社グループが持続的に成長することで、社会にとってかけがえのない存在となるために、取り組むべき5つのマテリアリティ(重要課題)を特定した。

本稿では、当社グループが取り組むマテリアリティのうち、これまでに述べた社会課題に関連性の高いものを取り上げ、マテリアリティに沿って建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューションを幅広く紹介する。

1. 建築・土木分野における社会課題

1.1 激甚化する自然災害

地震国である日本において、最大震度7を記録した地震についてはすでに述べたが、1995年以降最大震度6弱の地震は2018年の大阪府北部を震源とする地震など10回、最大震度6強は2007年の新潟県中越沖地震など6回を記録している¹⁾。さらに今後30年以内に70%~80%の確率で発生が予測される南海トラフ地震は、最大震度7に加え、最大津波高さは10m以上が推定され²⁾、広域かつ甚大な人的被害、建物被害、ライフライン・インフラの被害が想定されている。

地震以外にも、気候変動の影響とみられる豪雨や台風による自然災害が頻発化している。2020年7月の熊本豪雨では、広範囲にわたる長期間の大雨河川氾濫や土砂災害に加え、橋梁10橋が流出するなど、道路交通網が甚大な被害を受けた³⁾。

このように、激甚化する自然災害に対し、社会インフラにおいては、点検・補修によるインフラの長寿命化、安全対策を行った構造物の提供、老朽化したインフラの更新などにより、安心・安全な社会の実現、すなわち国土強じん化が強く求められている。

*1 事業開発部

1.2 少子高齢化に伴う担い手不足

我が国における総人口は2004年12月に1億2,784万人のピークを迎え、以降減少傾向にあり、2030年には1億1,522万人（ピーク時の90.1%）となることが予想されている。さらに2048年ごろ1億人を下回り、2050年には9,515万人（同74.4%）となる見込みである。いっぽう、65歳以上の人口の割合である高齢化率については、2004年に19.6%であったが、2030年には31.8%、2050年には39.6%となることが予想され⁴⁾、急激な少子高齢化は、社会や産業を支えるために必要な労働力や後継者が足りなくなる担い手不足につながり、深刻な課題となっている。

これらの対策として、国土交通省ではi-Constructionの推進を主導している⁵⁾。建設現場などにおいてICTを導入し、建設機械の遠隔操作や自動化を実現することで、生産性の大幅な向上を目指している。また、設計から施工・維持管理までのプロセスをデジタルで一元管理できるBIM/CIMの活用は、今後さらなる発展が期待されている。

1.3 温室効果ガス削減

2020年10月の臨時国会において「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言された。我が国の2023年度のCO₂排出量は約9億8,871万トンとなり、このうち産業部門が34.3%を占め、最も多い。さらに、産業部門では38.7%を鉄鋼業が占め⁶⁾、カーボンニュートラルの達成に向けて、製鉄プロセスのCO₂排出削減技術の創出が不可欠である。また、建設業においては、建物の脱炭素化、建設資材の脱炭素化、建設現場におけるCO₂排出削減、デジタル技術の活用による施工の効率化のような様々な取り組みがすでに進行している。

2. KOBELCOグループのマテリアリティ

表1に当社グループの5つのマテリアリティを示す⁷⁾。ここに挙げるマテリアリティは、STEP1：社会課題を網羅的に抽出、STEP2：重要課題をマッピングし、当社グループの重要課題を抽出、STEP3：共通する重要課題を統合し類似課題を集約、という3つのプロセスを経て特定している。

以降は、1章で述べた社会課題について、とくに関連

性が高い、安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献、人と技術で繋ぐ未来へのソリューション提供およびグリーン社会への貢献の3つのマテリアリティを取り上げる。

3. 建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション

当社グループは、鉄鋼アルミ・素形材・溶接の「素材系事業」、機械・エンジニアリング・建設機械の「機械系事業」、さらに、製鉄所の自家発電操業で永年培った技術・ノウハウを活かした「電力事業」の3つの事業領域を柱としてお客様・社会の課題解決に貢献している。建築・土木分野に絞った各事業領域の製品を表2で紹介する。

それぞれの事業領域で磨かれた技術は、規模ではなく、希少性の高い独自の価値観・戦略を生み出し、国内外でトップシェアを獲得する多くの技術・製品・サービスにつながっている。また、事業領域を超えて、これらの事業を掛け合わせることで多くのシナジーを生み、イノベーションの種となっている。現在も、鉄鋼と溶接技術を組み合わせた技術開発や、鉄鋼とエンジニアリングの技術を融合した低炭素な製鉄技術などをはじめとして、多くの新しい価値を創出している。

表3に建築・土木を支えるKOBELCOの材料を示す。各種鉄鋼材料や溶接材料に加え、鉄粉、スラグ製品、ボルト、アルミを製造している。また、建設機械や産業用機械のこん包技術を活用し、近年は造作家具の製作にも取り組んでいる。

表4には建築・土木を支えるKOBELCOのソリューション（機械・システムを含む）を示す。鉄鋼製品の利用技術では、柱梁接合部設計法や梁横座屈補剛工法を開発し、より安全で合理的な鋼構造物の実現に寄与している。また、各種溶接ロボットは、鉄骨製作工場内や現場溶接施工の効率化・合理化に向け、すでに多くのお客様のもとで活躍している。さらに、直接還元鉄プラントなどのエンジニアリング、各種建設機械や各種材料の分析・解析・構造実験などにも取り組んでいる。

以降では、「素材系事業」および「機械系事業」が有している建築・土木分野の最新技術について、マテリアリティに沿って紹介する。

表1 KOBELCOグループのマテリアリティ
Table 1 KOBELCO's Materiality

Materiality	Indicators
Contributing to a green society	Response to climate change / Response to resource recycling
Ensuring safety and security in community development and manufacturing	Supplying energy focused on S+3E Providing materials and machinery that meet needs
Providing solutions for the future connecting people and technology	Reforms in manufacturing and operations through digital transformation (DX) Integration and innovation of diverse intellectual assets
Promoting active participation of diverse human resources	Diversity and Inclusion (D&I) / Work style reform Human resources development
Pursuing governance that supports sustainable growth	Compliance and risk management / Human rights Safety and health / Quality assurance / Corporate governance

表2 KOBELCOグループの建築・土木に関する事業
Table 2 KOBELCO's Businesses for architecture and civil engineering

Businesses		Products
Materials businesses	Steel & Aluminum	Wire rods and bars, steel sheets (hot-rolled, cold-rolled, surface treated), steel plates, slag products
	Advanced materials	Steel castings and forgings, steel powder
	Welding	Welding materials (covered welding electrodes, wires for automatic and semi-automatic welding, fluxes), welding robots, welding power supplies, robotic welding systems, welding-related testing, analysis, and consulting
Machinery businesses	Machinery	Various plants (steel rolling, nonferrous metals, etc.), analysis and evaluation of various materials
	Engineering	Various plants (direct reduction ironmaking, waste treatment, etc.), civil engineering, urban transit systems
	Construction machinery	Hydraulic excavators, mini excavators, environmental recycling machinery, crawler cranes, wheel cranes, DX Solution
Electric Power Business		Electric power supply, heat supply

表3 建築・土木を支えるKOBELCOの材料
Table 3 Materials by KOBELCO supporting architecture and civil Engineering

item	Materials
Steel plates for buildings ²²⁾	TMCP Steel plate for building structures / 780 N/mm ² -class steel plate for building structures
Circular steel tube ²²⁾	Circular steel tube for building structures
Rectangular steel tube ²²⁾	Rectangular steel tube for building structures 590 N/mm ² -class rectangular steel tube for building structures
Steel plates for bridges ²³⁾	Corrosion resisting steel Eco-view Plus™, a repaint term extension under high humid environment Crack initiation resistant steel "EX-Facter™"
Welding materials ²⁴⁾	Gas shielded arc welding materials / Submerged arc welding materials Electroslag welding materials
Anchor bolts sets	TS700 anchor bolts
High-strength reinforcing bars	High-strength shear reinforcing bars ²⁵⁾
High-strength bolts	Shinko high-strength bolts
Wire rods and bars	PC steel products / Steel wires Earthquake-resistant cable braces* / Stealth brace for traditional wooden buildings RE-SET cables / Cable inspection and repair
Steel sheets	Highly corrosion-resistant hot-dip coated steel sheet KOBEMAG®
Steel slag	Ground granulated blast-furnace slag Steel slag as a ground improvement material / Steel slag as marine environment restoration
Steel powder	Steel powder for purifying soil and groundwater ECOMEL™ ²¹⁾
Aluminum	Aluminum honeycomb panels ²⁶⁾
Wooden furniture(Fig.14)	Custom-made wooden furniture ²⁷⁾

表4 建築・土木を支えるKOBELCOのソリューション（建設機械・各種システムを含む）
Table 4 Solutions by KOBELCO supporting architecture and civil engineering

item	Solutions
Design and construction method	Design technology for column to beam connection of circular hollow section steel columns Design technology for column to beam connection of square hollow section CFT steel columns Lateral buckling restraint method for steel beams using the stiffening effect of the slab Structural performance of exposed column bases using TS700 anchor bolts
Direct reduced iron field process	MIDREX® Process
Welding system ²⁴⁾	Structural steel welding robot system ARCMAN™ Compact portable welding robot ARCMAN™ PORTABLE
Construction machinery	Hydraulic excavators / Crawler cranes Telework system for construction sites K-DIVE® Revit® Add-in software for crane construction planning K-D2PLANNER Drone-based inspection solution K-AIR REAL
Structural evaluation	Structural evaluation, evaluation of structural components, various structural analyses ^{28) 29)}

4. 安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献

本章では、1.1節で述べた社会課題に対し、安心・安全な社会の実現や国土強じん化に寄与する材料について紹介する。

4.1 建築構造用厚鋼板・角形鋼管・円形鋼管

高層ビルなどの大型建築物で使用される厚鋼板は、引張強度490 N/mm²から780 N/mm²級まで幅広くラインナップしている（図1）。とくに近年、構造物の大型化が進んでおり、高層ビル/超高層ビルに適用される鋼板の厚肉化・高強度化が進んでいる。当社は、溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部に要求される高いHAZじん性や溶接金属の強度確保のため、厚板ユニットと溶接事業部門が連携して技術開発に取り組むことにより、より高い品質の溶接接合部を提供している。

角形鋼管・円形鋼管については、国内最大級の15,000トンプレス機を有する佐々木製罐工業(株)とともに商品化に取り組んでいる。角形鋼管は引張強度490 N/mm²から590 N/mm²級までを、円形鋼管については引張強度490 N/mm²から780 N/mm²級まで幅広くラインナップしている（図1）。また、角形鋼管および円形鋼管を用いた利用技術にも取り組んでおり、後述する。

4.2 橋梁用厚鋼板

当社は、汎用的に使用されている鋼材に加え、橋梁のライフサイクルコスト低減や鋼橋の長寿命化に寄与する鋼板を開発・商品化している。

塗装とのマッチング機能を具備させた高湿潤環境対応型耐食鋼板「エコビュー プラス™」を業界で当社が初めて開発・商品化した。2024年2月20日付けで国土交通省の新技术情報提供システム（NETIS）にも登録を完了している。（本号p.32, 「高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼板 エコビュー プラス™」参照）

2023年10月には、厚鋼板に疲労き裂の発生を抑制する機能を付加し、疲労き裂発生寿命を改善した疲労抑制鋼板「EX-Factor™」を商品化した。鋼床版の部材点検時に発見が困難な疲労き裂発生部位などへの適用を期待

しており、今後普及を推進していく予定である。（本号p.38, 「疲労抑制鋼板EX-Factor™による鋼床版デッキプレート・Uリブ溶接継手の疲労耐久性向上」参照）

4.3 溶接材料

当社は、建築鉄骨製作に使用されるガスシールドアーク溶接、サブマージアーク溶接、エレクトロスラグ溶接の鋼材強度クラスに応じた溶接材料をラインナップしている。また、さらなる生産性や溶接品質の向上のニーズに応えるべく、建築鉄骨向けロボットシステムと専用溶接ワイヤの開発、さらに引張強さ780 N/mm²級鋼を含めた各強度クラスの鋼材に対応する溶接材料の開発に取り組んでいる。（本号p.51, 「建築鉄骨向け溶接材料の最新動向とラインナップ紹介」参照）

4.4 PC鋼線/ケーブル

神鋼鋼線工業(株)は、コンクリートの弱点を補い強度を高めるため、橋梁や建築物で使用されるPC鋼材/ケーブルを幅広くメニュー化している。プレストレストコンクリート（PC）工法が日本に導入された当初から研究に取り組み、以来、PC鋼材の品質改良、量産化、新製品開発に注力している。

文化財建造物は観光資源としての活用が進められており、不特定多数が利用することから、安全性の確保が不可欠である。高強度の垂鉛めっき鋼線を用いた伝統木造建築向けφ7 mmステルスブレース®は、耐震性の向上と文化財としての価値を両立させた技術である。（本号p.65, 「伝統木造建築向けステルスブレース」参照）

高強度のPC鋼より線を使用した耐震ケーブルブレース®は、一般的なブレースと比べ、軽量で柔軟性に富むことから（図2）、仮設足場の大幅な削減や施工期間の短縮に寄与する技術であり、2013年の販売開始より、200件以上の採用実績がある。

橋梁分野では、橋梁の老朽化や設計荷重増加により、補強対策が必要な橋梁が増加している。（本号p.59, 「橋梁補修補強用RE-SETケーブル®システム」参照）

4.5 高耐食めっき鋼板

高耐食めっき鋼板KOBEMAG®を当社は2017年から

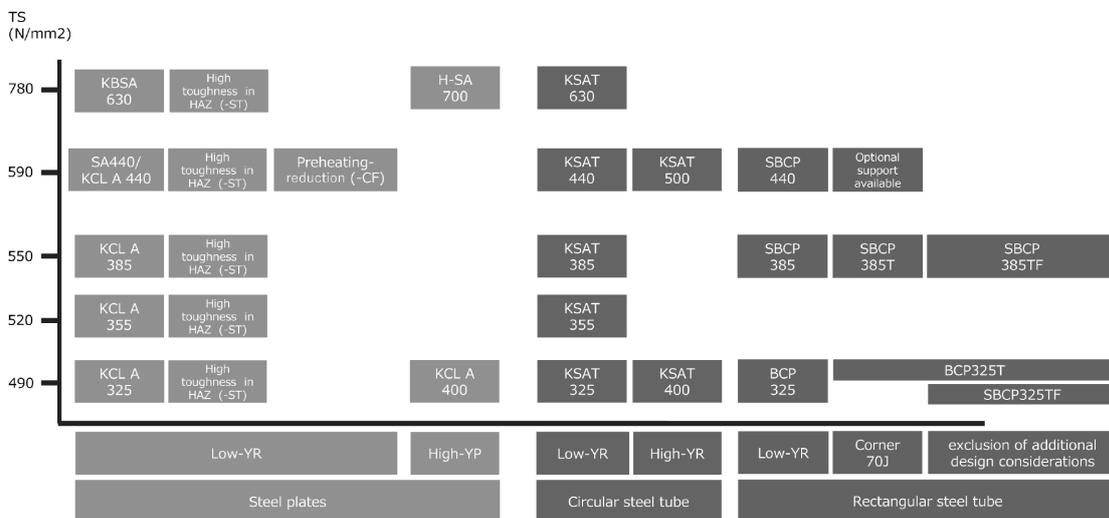


図1 建築構造用厚鋼板・角形鋼管・円形鋼管ラインナップ
Fig.1 Steel plates, Circular steel tubes, Rectangular steel tubes for Buildings



図2 耐震ケーブルブレース
Fig.2 Earthquake-resistant cable brace

製造販売している。住宅や鉄骨二次部材に加え、シャッターのスラットや有孔鋼板にて適用されるなど、その用途は拡大中である。現状の製造工程は、薄鋼板の熱間圧延までを当社が、酸洗・めっき工程は日本製鉄(株)および日鉄鋼板(株)に製造委託しているが、2024年11月に「KOBEMAG®」を自社一貫生産化するため、加古川製鉄所の既存溶融亜鉛めっき鋼板設備の改造を中心とした設備投資を実施することを決定し、2029年度に自社一貫生産を開始する計画としている。

5. 人と技術で繋ぐ未来へのソリューション提供

本章では、1,2節で述べた社会課題に対し、施工の効率化・合理化に寄与する技術に加え、鉄鋼製品の設計法といった利用技術や、インフラメンテナンスなどに関連するソリューション技術について紹介する。

5.1 鉄鋼製品の設計法・工法

厚鋼板を活用した利用技術として、床スラブの上フランジ拘束効果を活用した鉄骨梁の横座屈補剛工法を開発し、(一財)日本建築総合試験所において性能証明を取得した。(本号p.71,「床スラブの上フランジ拘束効果を活用した鉄骨梁の横座屈補剛工法」参照)

また、780 N/mm²級厚鋼板の普及を目指し、溶接組立箱形断面柱に780 N/mm²級厚鋼板を適用した時の柱-柱溶接接手において、アンダーマッチ溶接を適用した時の継手耐力に関する研究に取り組んでいる。(本号p.78,「アンダーマッチ溶接による780 N/mm²級箱形断面柱継手の最大曲げ耐力評価」参照)

鋼管を活用した利用技術としては、ダイアフラムを省略することができるノンダイアフラム形式円形鋼管柱梁接合部(図3)や、従来の外ダイアフラムの出幅を大きく抑えることができる外リングダイアフラム形式コンクリート充填角形鋼管柱梁接合部設計法(図4)をこれまで商品化し、すでに多くの実績を積んでいる⁹⁾。

当社は基準強度を490 N/mm²としたTS700アンカーボルトの国土交通大臣認定を業界で初めて取得した。さらに本アンカーボルトを用いた露出柱脚の耐力や剛性を確認するため、構造性能に関する研究も実施している。高強度アンカーボルトを用いた露出柱脚の設計の一助となれば幸いである。(本号p.86,「TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能」参照)

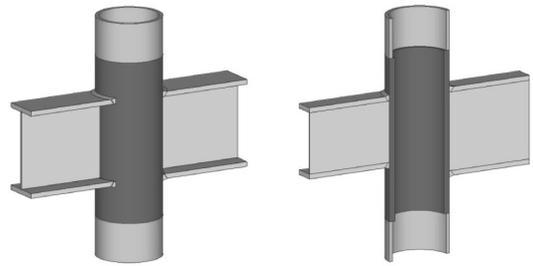


図3 ノンダイアフラム形式円形鋼管柱梁接合部
Fig.3 Design Technology for Column to Beam Connection of Circular Hollow Section Steel Columns

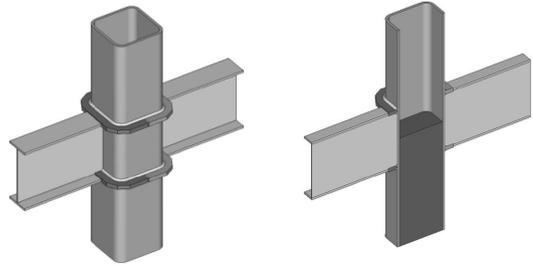


図4 外リングダイアフラム形式コンクリート充填角形鋼管柱梁接合部設計法
Fig.4 Design Technology for Column to Beam Connection of Square Hollow Section CFT Steel Columns



図5 小型可搬型溶接ロボット 石松™
Fig.5 Compact portable welding robot ISHIMATSU™

5.2 溶接システム

近年、担い手不足の社会課題からロボット化による自動化ニーズが強まっており、アーク溶接大型ロボットシステムの鉄骨製作工場への適用拡大、さらに可搬型アーク溶接ロボットの現地への適用の動きが顕著である。当社グループは、鉄骨溶接ロボットシステム ARCMAN™をはじめとした幅広いシステムを提供している。優れた溶接システムを構築し、さらに溶接材料との最適な組み合わせにより、溶接施工の効率化・合理化に貢献することで業界をリードしている。

小型可搬型溶接ロボット 石松™シリーズ(図5)は、鉄骨製作工場での溶接施工に加え、建設現場においても多層盛・長尺溶接の幅広い溶接部位に対応できるシステムである。本体約6 kgと業界で例のない軽さと、フルオート溶接機能による一人複数台の操作などで、すでに多くの建設現場で活躍している¹⁰⁾。

小型可搬型ロボットの展開として、画像センサをロボットに搭載し、溶融池映像中の特徴量を認識・適切に制御する技術開発に取り組んでいる。(本号p.103,「画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステム」および本



図6 K-DIVE®
Fig.6 K-DIVE®



図8 K-AIR REAL
Fig.8 K-AIR REAL



図7 K-D2 PLANNER®
Fig.7 K-D2 PLANNER®

号p.93,「建築鉄骨梁溶接向けの新しい自動化システムとCADデータ連携ソフトウェアの紹介」参照)

5.3 建設機械のDX

コベルコ建機㈱は、油圧ショベルやクローラクレーンといった建設機械において幅広いラインナップを有している。さらに、近年、担い手不足といった社会課題や働き方改革の環境変化に対し、さまざまなDX技術開発に取り組み、社会に貢献している。

K-DIVE® (図6)¹¹⁾は、重機の遠隔操作システムをベースに、人、重機、現場を常時つなぐことで、現場のDXを可能にするシステムである。具体的には、建設現場から離れた場所に設置したコックピットにより重機を遠隔操作することができる。1台のコックピットで複数重機へ切り替えての遠隔操作が可能であり、待機や現場移動の時間を省き、人員配置や工程管理の効率化に貢献することができる。

クレーン施工計画ソフトK-D2 PLANNER®(図7)¹²⁾は、BIMソフトであるRevit (Autodesk, Inc.の登録商標)のアドイン型ソフトである。施工計画においてBIMモデルにクレーンを配置することにより、シミュレーションができるだけでなく、最適クレーンの選定といった様々な機能により、効率的な施工計画の立案が可能である。

ドローンを活用した移動式クレーンの点検ソリューションK-AIR REAL (図8)¹³⁾は、ドローンの自動飛行機能を活用し、移動式クレーンの撮影・点検を行うことができるソリューションである。クレーンの作業姿勢・休車姿勢など、複雑な形状に柔軟に対応でき、ブームを下ろすことが難しい狭隘な現場においても、高画質・短時間で撮影・確認ができる。また、本ソリューションは、移動式クレーンに限らず、様々な設備の点検などへの展開も期待できる。

6. グリーン社会への貢献

本章では、1.3節で述べた社会課題に対し、建物の脱炭素化や建設資材の脱炭素化など、CO₂排出削減に寄与する材料およびソリューションについて紹介する。

6.1 低CO₂高炉鋼材“Kobenable® Steel”¹⁴⁾

当社は、高炉工程におけるCO₂排出量を大幅に削減した低CO₂高炉鋼材“Kobenable® Steel”を国内で初めて商品化した。エンジニアリング事業のMIDREX®プロセスを用いて製造したHBI (Hot Briquetted Iron (熱間成形還元鉄)、図9)を加古川製鉄所の高炉に多量に装入することで、高炉からのCO₂排出量を大幅に削減している。創出した削減量は、マスバランス方式を適用して任意の鋼材に割り当てており、CO₂を100%削減した高炉鋼材はプレミア、50%はハーフとしている。すでに多数の採用実績を有しており、建築・土木分野向けでも多くのお客様にご採用いただいている。なお、アルミ製品についても同様の取り組みを進めている¹⁵⁾。

6.2 MIDREX®プロセス¹⁶⁾

高炉によらない製鉄法としては、天然ガスを改質した水素リッチな還元ガスや水素そのものを還元ガスとして使用することで、鉄鉱石を直接還元する還元鉄製造プロセスがある。直接還元製鉄は、高炉のように大規模ではなく、コークスも不要なため、従来から天然ガスを産出する国々で利用されてきた。近年は、スクラップ代替の清浄鉄源として、またCO₂排出量の少ない製鉄法として需要が高まっている。当社は、この直接還元製鉄プロセスにおいて、世界の約8割のシェア(天然ガスベースの直接還元鉄)を持つMIDREX®プロセスのライセンスを保有し、世界中に展開している(MIDREX社は当社100%子会社)。MIDREX®プラントを図10に示す。従来の天然ガスを利用したMIDREX NG™に加え、還元剤を天然ガスから100%水素まで柔軟に置換することができるMIDREX Flex™、還元剤として水素を100%使用するMIDREX H2™など、水素転換の様々なステージにおいてソリューションを提供することが可能である。

6.3 高速炭酸化技術 Carbonel®によるCO₂固定化・資材化技術¹⁷⁾

㈱神鋼環境ソリューションでは、高速炭酸化技術Carbonel®の開発に取り組んできた。燃焼灰や飛灰、スラグにおけるカルシウム(Ca)やカリウム(K)、マグネシウム(Mg)などを含む産業副産物を原料としてお

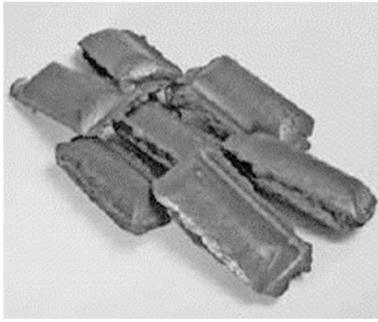


図9 HBI (Hot Briquetted Iron)
Fig.9 HBI (Hot Briquetted Iron)



図10 MIDREX® プラント
Fig.10 MIDREX® PLANT



図11 炭酸化物（造粒物）
Fig.11 Carbonated granulated product

り、わずかな水が存在する条件下でCO₂と反応させることで、炭酸カルシウム (CaCO₃) などの炭酸塩としてCO₂を固定化する技術である。本技術の展開として木質バイオマス灰などへの炭酸化適用および資材化検討に取り組んでいる。炭酸化物 (図11) はコンクリート材料としての利用が期待され、Carbonel®の標準ユニット (図12) の販売を開始している。また、本技術を適用したコンクリート資材は、2025年日本国際博覧会 (大阪・関西万博) のシグネチャーパビリオン「いのちめぐる冒険」(河森館) の外装材用HPC®製パネルの原料として採用され¹⁸⁾、今後の普及が期待される。

6.4 水素燃料電池ショベル

当社およびコベルコ建機株式会社は、カーボンニュートラルに向けた取り組みとして、水素関連技術の研究開発と、水素を利活用した製品化、事業化に取り組んでいる。その一環として、コベルコ建機株式会社は水素を駆動源とした燃料電池式電動ショベルの実用化に向けた取り組みを2021年から進めてきており、2023年3月に試作機を完成させ、基礎評価を続けてきた¹⁹⁾。すでに神戸製鋼所 高砂製作所では、水素燃料電池ショベル (図13) の高圧水素充填設備の整備を完了している。今後、2026年度に



図12 炭酸化・資源化実証設備
Fig.12 Demonstration Plant for Carbonation and Mineralization



図13 水素燃料電池ショベル
Fig.13 Fuel Cell Excavator



図14 造作家具
Fig.14 Wooden furniture

国内で行われる実証実験での活用に向けて、2025年3月以降、高砂製作所にて連続掘削作業など本格稼働評価を行い、水素燃料電池ショベルの現場導入に向けた取り組みを推進していく²⁰⁾。

6.5 鉄鋼スラグ

鉄鋼スラグ製品は、省資源、省エネルギー、CO₂削減の観点から、環境負荷を低減させる資材として高く評価されている。主な製品としては、高炉スラグ微粉末、路盤材、土木用材料、肥料などが商品化され有効利用されている。近年は、製鋼スラグを活用した地盤改良工法を実用化している。(本号p.108、「地盤改良材としての鉄鋼スラグの利活用」参照)

6.6 土壌・地下水浄化用鉄粉エコメル^{®21)}

エコメル[®]は、鉄粉の表面で起こる化学反応を利用して、各種重金属の吸着や各種有機塩素化合物 (VOC) の分解が可能な土壌・地下水浄化用鉄粉である。主な用途は、都市再開発時の土壌浄化やトンネル掘削時の汚染

土壌の処理、地下水汚染の抑制など、幅広い土木分野で使用されている。

むすび = 本稿では、社会が直面する課題のうち、激甚化する自然災害、少子高齢化に伴う担い手不足および温室効果ガス削減を取り上げた。そのうえで、KOBELCOグループのマテリアリティに沿って、建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューションについて紹介した。

ここに挙げた社会課題は今後ますます深刻化・複雑化することが見込まれる。KOBELCOグループの強みである幅広い事業領域を生かし、社会課題の解決に取り組むとともに、さらなる価値創造と社会貢献を実現し、持続可能な社会の実現に向けて一層の貢献を果たしていく所存である。

参考文献

- 1) 内閣府. 最近の主な自然災害について. <https://www.bousai.go.jp/updates/shizensaigai/shizensaigai.html>. (参照2025-09-01).
- 2) 内閣府. 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループにおける検討状況について. https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg_02/pdf/wg_02kentojokyo1-11.pdf. (参照2025-09-01).
- 3) 国土交通省. 令和2年の災害と対応. 2020-11-11 https://www.zenkokubousai.or.jp/download/201111_kokudo.pdf. (参照2025-09-01).
- 4) 総務省. 我が国における総人口の長期的推移. https://www.soumu.go.jp/main_content/000273900.pdf. (参照2025-09-01).
- 5) 国土交通省. i-Construction. <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>. (参照2025-09-01).
- 6) 環境省. 2023年度の我が国の温室効果ガス排出量及び吸収量について. 2025-04-25, https://www.env.go.jp/press/press_04797.html. (参照2025-09-01).
- 7) ㈱神戸製鋼所. サステナビリティ経営推進のためのマテリアリティに対応した取組み. <https://www.kobelco.co.jp/sustainability/materiality/>. (参照2025-09-01).
- 8) 神鋼鋼線工業㈱. 耐震ケーブルブレース®. <https://www.shinko-wire.co.jp/products/engineering/cablebrace>. (参照2025-09-01).
- 9) 松下政弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.20-27.
- 10) 神戸製鋼所. 小型可搬型溶接ロボット 石松™シリーズ. <https://www.kobelco.co.jp/products/welding/kobelco-robotix/>. (参照2025-09-01).
- 11) コベルコ建機㈱. 重機遠隔操作システム K-DIVE®. <https://www.kobelco-kenki.co.jp/dx/kdive.html>. (参照2025-09-01).
- 12) コベルコ建機㈱. クレーン施工計画ができるRevit®アドイン型シ

- ミュレーションソフト K-D2 PLANNER®. https://www.kobelco-kenki.co.jp/pickup/K-D2_planner/. (参照2025-09-01).
- 13) コベルコ建機㈱. ドローンを活用した移動式クレーンの点検ソリューション K-AIR REAL. https://www.kobelco-kenki.co.jp/dx/k-air_real.html. (参照2025-09-01).
 - 14) ㈱神戸製鋼所. 2022-05-17. https://www.kobelco.co.jp/releases/1210184_15541.html. (参照2025-09-01).
 - 15) ㈱神戸製鋼所. 2024-11-20. https://www.kobelco.co.jp/releases/1215527_15541.html. (参照2025/11/12).
 - 16) ㈱神戸製鋼所. MIDREX®プロセス <https://www.kobelco.co.jp/products/engineering/ironunit/dri.html>. (参照2025-09-01).
 - 17) 前田有貴ほか. 神鋼環境ソリューション技報. 2024, Vol.21, No.1, p.2-8.
 - 18) ㈱神鋼環境ソリューション. 2025-04-11 <https://www.kobelco-eco.co.jp/topics/news/2025/20250411-1.html>. (参照2025-09-01).
 - 19) コベルコ建機㈱. 2024-05-22 <https://www.kobelcocm-global.com/jp/news/2024/240522.html>. (参照2025-09-01).
 - 20) ㈱神戸製鋼所. 2025-02-18 <https://www.kobelco.co.jp/releases/2025/20250218-01.html>. (参照2025-09-01).
 - 21) ㈱神戸製鋼所. 土壌・地下水浄化用鉄粉 エコメル®. <https://www.kobelco.co.jp/products/advanced-materials/powder/ecomel.html>. (参照2025-09-01).
 - 22) ㈱神戸製鋼所. 国土交通大臣認定の建築構造用鋼材一覧. <https://www.kobelco.co.jp/products/steel-aluminum/plate/construction/mlit.html>. (参照2025-09-01).
 - 23) ㈱神戸製鋼所. 橋梁. <https://www.kobelco.co.jp/products/steel-aluminum/plate/bridge/>. (参照2025-09-01).
 - 24) ㈱神戸製鋼所. 溶接. <https://www.kobelco.co.jp/products/download/welding/>. (参照2025-09-01).
 - 25) ㈱神戸製鋼所. 高強度せん断補強筋(デーフープ). <https://www.kobelco.co.jp/products/industry/engineering/pdf/sb047.pdf>. (参照2025-09-01).
 - 26) 神鋼ノース㈱. アルミハニカムパネル(建材). <https://www.kobelco-north.co.jp/products/honeycomb-panel-building-materials/>. (参照2025-09-01).
 - 27) コベルコシンワ㈱. 造作家具事業. <https://www.kobelcoshinwa.com/enterprise/furniture/case/>. (参照2025-09-01).
 - 28) 神鋼鋼線工業㈱. ケーブルの点検・調査 <https://www.shinko-wire.co.jp/products/engineering/cable-maintenance.html>. (参照2025-09-01).
 - 29) ㈱コベルコ科研. 事業概要. <https://www.kobelcokaken.co.jp/contract/business-field/experiment-research/civilengineering-construction/>. (参照2025-09-01).

(技術資料)

大入熱溶接対応建築構造用780 N/mm²級鋼の開発

宮田亮太*1・山口徹雄*1・田畑晃人*2・山本貴大*3・栗山良平*3

Development of 780 N/mm²-Class Structural Steel for Building Structures Suitable for High Heat Input Welding

Ryota MIYATA・Tetsuo YAMAGUCHI・Akito TABATA・Takahiro YAMAMOTO・Ryohei KURIYAMA

要旨

建築鋼構造物の大型化にともない、780 N/mm²級鋼の溶接組立箱形断面柱への適用が期待されているが、大入熱溶接を施工すると溶接継手の強度やじん性の確保が困難であった。そこで、脆い硬質相である島状マルテンサイトの生成をCrおよびMoの増加と、C、Si、Mnの低減により抑制することで、大入熱溶接熱影響部のじん性を改善した鋼板を開発した。母材およびエレクトロスラグ溶接・サブマージアーク溶接継手の機械的特性評価により、強度・じん性・溶接性のいずれも良好な結果を確認し、高効率施工への適用が可能である。

Abstract

As steel building structures become taller, there are high hopes for the use of 780 N/mm²-class steel for welded box columns. However, it has been difficult to ensure the strength and toughness of welded joints when using high-heat input welding. To counter this, Kobe Steel has developed a steel plate that improves the toughness of the heat-affected zone in high-heat input welding by suppressing the formation of the M-A constituent (island martensite), a brittle hard phase, through increased Cr and Mo and reduced C, Si, and Mn. Evaluation of the mechanical properties of the base material, electros slag, and submerged arc welded joints confirmed favorable results in terms of strength, toughness, and weldability, making this plate suitable for high-efficiency construction.

検索用キーワード

建築構造用鋼, 溶接組立箱形断面柱, サブマージアーク溶接, エレクトロスラグ溶接, 高張力鋼, 溶接熱影響部

まえがき = 近年、建築鋼構造物の大型化、高層化にともない、溶接組立箱形断面柱（以下、BOX柱）への780 N/mm²級鋼の適用拡大が期待されている。BOX柱の製作では、施工効率の観点から内ダイアフラム部にはエレクトロスラグ溶接（以下、ESW）、角部にはサブマージアーク溶接（以下、SAW）が一般的に用いられる。これらは1パスで高能率な大入熱溶接施工であり、従来は590 N/mm²級鋼以下のBOX柱に適用されてきた。いっぽう、これまでの780 N/mm²級鋼では大入熱溶接を適用すると溶接継手の強度やじん性の確保が困難であるため、施工効率の低い小入熱多パス溶接での施工が一般的であった。そのため、780 N/mm²級鋼の採用には鉄骨製作に多大な工数が必要となり、採用案件は少ないのが実態であった。

そこで当社は、780 N/mm²級鋼をBOX柱に適用した場合の溶接施工効率改善を目的として、大入熱溶接時の強度、じん性を確保し得る鋼板の開発を進めてきた。

本稿では、780 N/mm²級鋼における大入熱溶接熱影響部の高じん化技術を述べる。あわせて、開発鋼板の母材特性、および、内ダイアフラム部を想定したESW継手と、角部のSAW継手の特性を紹介する。

造用780 N/mm²級鋼（KBSA630C^注）の成分規格値と母材特性の規格値をそれぞれ表1と表2に示す。開発鋼の機械的性質は、当社の建築構造用高性能780 N/mm²級鋼の規格値を満足させることを前提に、内ダイアフラム部と角部の溶接熱影響部（Heat-Affected Zone：以下、HAZ）を含めた大入熱溶接部のじん性を改善することを目指した。

内ダイアフラム部においてはじん性が低下した熱影響部からの脆性破壊の懸念があり、490 N/mm²級鋼を対象とした過去の研究では、脆性破壊防止の観点で検討がな

表1 KBSA630Cの要求特性（成分）

Table 1 Specification for chemical compositions of KBSA630C

Steel	Chemical compositions (%)					P _{CM} (%)
	C	Si	Mn	P	S	
KBSA630C	≤0.13	≤0.55	≤2.50	≤0.015	≤0.008	≤0.30

P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

表2 KBSA630Cの要求特性（機械的性質）

Table 2 Mechanical properties of KBSA630C

Steel	Tensile properties				Impact properties E ₀ (J)
	YP or 0.2%YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El. (%)	YR (%)	
KBSA630C	630-750	780-930	17≧	≧85	47≧

Tensile test specimen: JIS Z2241 No.4-1/4t-Transverse
Charpy impact test specimen: JIS Z2242 Full size-1/4t-Longitudinal

1. 開発目標

当社の製品ラインナップにある大入熱溶接対応建築構

脚注) KBSAは当社の登録商標（第4936432号）である。

*1 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 *2 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部
*3 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

表3 従来鋼の化学成分

Table 3 Base chemical compositions of conventional steel

Table 3 Base chemical compositions of conventional steel (%)						
C	Si	Mn	P	S	Others	P _{CM}
0.05	0.27	2.00	0.008	0.002	Cr, Mo, etc.	0.28

され、内ダイアフラムの490 N/mm²級鋼材の基準強度(325 N/mm²)以上を満足するために溶接部のシャルピー衝撃特性は47 J以上が望ましいとされている¹⁾。いっぽう、490 N/mm²を超える強度クラスの鋼材に対する検討では、柱に780 N/mm²級鋼と梁に建築構造用高性能590 N/mm²級鋼(SA440)(以下、SA440)を想定したESW部の必要性能を確認する研究²⁾において、780 N/mm²級鋼の柱の場合でも、490 N/mm²級鋼の柱の場合¹⁾やSA440の柱の場合と同様の傾向が得られていることが報告されている。したがって、780 N/mm²級鋼を用いた柱のESW部で、内ダイアフラムの基準強度を確保するため、開発鋼の溶接部のシャルピー衝撃特性は47 J以上を目標とした。

2. 780 N/mm²級鋼における大入熱溶接熱影響部高じん化技術

HAZは、溶接金属との境界近傍では、高温にさらされることでオーステナイト(γ)単相組織となる。溶接入熱量の増大にともない、高温にさらされる時間は長時間化し、冷却速度も緩やかとなる。このため、一般的に大入熱溶接時のHAZでは粗大化した γ から変態することにより最終組織が粗大化しやすい。また、冷却途中の未変態 γ は緩やかな冷却によりCが濃縮することで安定化し、脆い硬質相である島状マルテンサイト(以下、MA)が生成しやすくなりHAZは低じん化する。

これに対して、 γ の粗大化については鋼中に酸化物を微細分散させ、酸化物によるピン止め効果によりHAZの γ の粗大化を抑制した報告³⁾がある。また、Si元素を低減することでMA生成を抑制する報告⁴⁾があり、これらは590 N/mm²級鋼以下の強度クラスでの大入熱溶接対応鋼として適用されている。

また、HAZの組織がベイナイトとなる590~780 N/mm²級鋼において、弱炭化物生成元素によりHAZのベイナイト組織の多方位化による組織微細化とC添加量を低減することにより、MA生成を抑制する微細低炭素ベイナイト技術(低カーボン多方位ベイナイト)⁵⁾が報告されている。

BOX柱に適用されるESWでは溶接入熱は1,000 kJ/cmにもなるため、従来、780 N/mm²級鋼で適用されてきた溶接入熱と比較するとHAZはより緩やかな冷却となる。また、従来ESWが適用されてきた590 N/mm²級鋼以下の強度クラスの鋼板と比較して、780 N/mm²級鋼では母材強度確保の観点から多くの合金元素の添加が必要となる。このため、HAZの γ は安定化しやすく、大入熱溶接適用時は緩やかな冷却もあいまってMAがさらに生成しやすくなる。

以上より、本開発では780 N/mm²級鋼でのESW適用

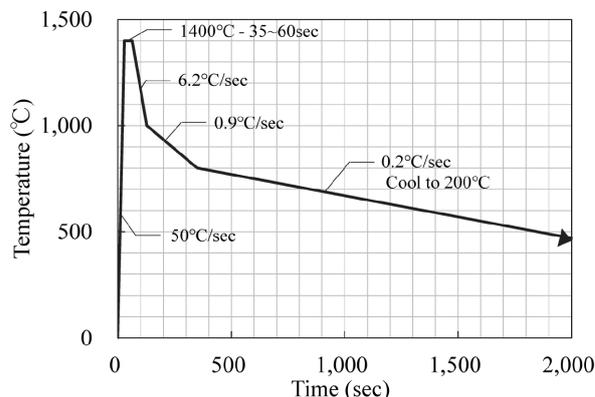


図1 ESWを想定した熱履歴

Fig.1 Thermal history assumed for ESW

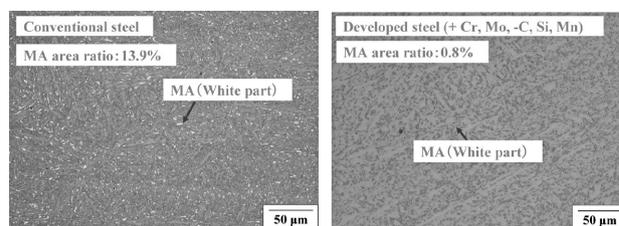


図2 CrおよびMoの増加とC, Si, Mnの減少がMA抑制に与える影響

Fig.2 Effect of increased Cr and Mo and reduced C, Si, and Mn on MA suppression

を目標にMA生成のさらなる抑制を志向して鋼板成分を検討した。従来鋼の成分(表3)を基本組成として、Cr, Mo, C, Si, Mnの各元素を変化させた供試鋼から採取した12.5 mm × 33 mm × 55 mmの角状試験片を使用した。大入熱溶接時のHAZ組織を一様に再現するために再現熱サイクル装置を使用して、ESWのボンド部の熱履歴を想定した単サイクル(図1)を付与した。熱サイクル付与後に組織観察を行い、各元素添加量がMA生成に及ぼす影響を調査した。その結果、Cr, Moを増加、C, Si, Mnを低減させた成分でMA生成が抑制されることを確認した(図2)。2章の冒頭で述べたように、MAは、 γ からの変態の過程で未変態 γ へCが濃縮することで γ が安定化した結果、生成されると言われている。Cr, Moの増加は γ を熱的に安定化させずに低温変態組織を形成することでMA生成を抑制したものと考えられる。また、C, Si, Mnの低減は未変態 γ へ濃縮するCそのものの低減効果に加え、鉄炭化物生成の促進による未変態 γ からのMA生成抑制に寄与したと考えられる。

3. 開発鋼の特性

3.1 成分および母材特性

開発鋼の成分を表4に示す。開発鋼の成分は、2章の検討結果をもとに、供試鋼からCr, Moを増加させ、C,

Si, Mnを低減した。

開発鋼はTMCP (Thermo Mechanical Control Process; 熱加工制御) 技術を活用して製造した。製造した開発鋼に対して引張試験, シャルピー衝撃試験を実施した(表5)。引張特性, シャルピー衝撃特性ともに目標とする780 N/mm²級鋼材 (KBSA630) の規格値を十分満足している。

3.2 溶接性

開発鋼に対してy形溶接割れ試験を実施した。溶接条件および試験結果をそれぞれ表6および表7に示す。評価には, 780 N/mm²級に加えて590 N/mm²級の溶接材料を用いた。いずれも良好な溶接性を有する。

3.3 溶接継手特性

3.3.1 ESW継手特性

内ダイアフラム溶接継手を想定した高効率な大入熱1パスESWの継手特性を評価した。溶接条件を表8に示す。内ダイアフラムには, 590 N/mm²級鋼を用いた。

施工後の継手部から, 建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準マニュアル⁶⁾の要領で, 溶接金属引張試験片はJIS Z 3111 A1号にて採取した。シャルピー衝撃試験片はJIS Z2242 Vノッチ試験片とし, Weld Metal (Bond-1 mm), Bond, HAZ (Bond+1 mm)にてシャルピー衝撃試験片を採取した。試験片の採取位置を図3に示す。

図4に継手マクロ写真を示す。十分な溶け込み幅が得られている。表9に示すとおり, ESW溶接金属は内ダイアフラムの590 N/mm²級鋼母材規格下限値 (0.2%耐力 \geq 440 N/mm², 引張強さ \geq 590 N/mm²) を満足している。シャルピー衝撃特性は, 84~193 Jであった。同様の溶接方法にて施工した従来鋼 (表3) に対し改善しており, 開発目標である0℃で47 J以上を満足していることを確認した。

3.3.2 SAW継手特性

角継手を想定した高能率な大入熱1パスSAWの継手特性を評価した。溶接材料および溶接条件を表10に示す。

表4 開発鋼の化学成分例

Table 4 Representative chemical composition of the developed steel (%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Others	P _{CM}
Developed steel	0.04	0.03	1.42	0.004	0.002	Cr, Mo, etc.	0.28

表5 開発鋼の機械的性質

Table 5 Mechanical properties of the developed steel

Thickness (mm)	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	YR (%)	vE ₀ (J)
25	712	886	23	80	238
50	708	889	22	80	219
85	690	869	21	79	254
KBSA630C	630-750	780-930	17 \leq	\leq 85	47 \leq

表6 y形溶接割れ試験の溶接条件

Table 6 Welding conditions for Y-groove weld cracking test

Thickness (mm)	85
Welding consumables	JIS Z3312 G59JA1UC3M1T MG-60(1.2φ) JIS Z3312 G78A2UCN4M4T MG-80(1.2φ) JIS Z3312 G78A2UCN4M4T MG-82(1.2φ)
Heat input (kJ/cm)	17.0
Preheating temperature (°C)	5
Testing atmosphere	5°C, humidity-60%

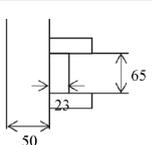
表7 y形溶接割れ試験結果

Table 7 Results of Y-groove cracking test

Welding consumables	Cracking ratio (%)	
	Surface	Root
MG-60(1.2 φ)	0	0
	0	0
	0	0
MG-80(1.2 φ)	0	0
	0	0
	0	0
MG-82(1.2 φ)	0	0
	0	0
	0	0

表8 ESW条件

Table 8 Condition of ESW

Thickness (mm)	Groove shape	Welding consumables	Welding conditions
Skin plate: 50 mm (developed steel) Diaphragm: 65 mm (590 N/mm ² steel)		Wire: JIS Z3353 YES602-M Flux: JIS Z3353 FES-CS	380 A-52 V Welding speed: 1.02 cm/min Heat input: 1,146 kJ/cm

す。溶接材料は開発SAW材料⁷⁾である。

図5に断面マクロを示す。良好な溶け込みが得られている。図6に試験片採取位置を示す。建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準マニュアル⁶⁾の要領で、引張試験片はJIS Z 3111 A1号とし、母材表層から10 mm位

置のDEPO中央で試験片を採取した。シャルピー衝撃試験片はJIS Z2242 Vノッチ試験片とし、母材裏面から7 mm位置のWeld Metal, フランジ側Bond & HAZ, さらにBond & HAZからHAZ側1 mm位置のBond & HAZ +1 mmで試験片を採取した。

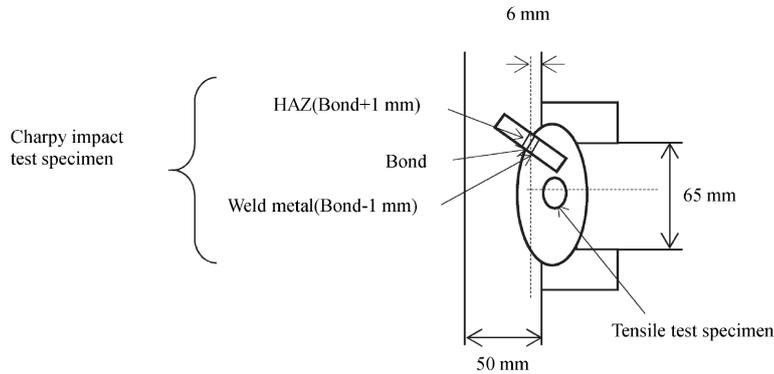


図3 試験片採取位置 (ESW)
Fig.3 Test specimen sampling position (ESW)

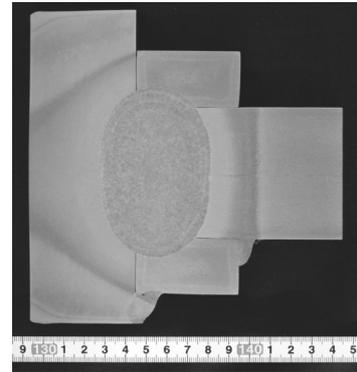
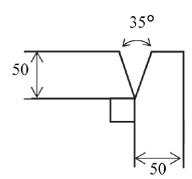


図4 ESW継手のマクロ写真
Fig.4 Cross-sectional macrostructure (ESW)

表9 ESW継手の機械的性質
Table 9 Mechanical properties of ESW joint

Steel	Tensile test of weld metal		Charpy impact test, vE ₀		
	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	Weld metal (Bond-1 mm) (J)	Bond (J)	HAZ (Bond+1 mm) (J)
Developed steel	497	698	84	86	193
Conventional steel	-	-	-	15	-
590 N/mm ² steel	440 ≤	590 ≤	47 ≤	47 ≤	47 ≤

表10 SAW条件
Table10 Condition of SAW

Thickness (mm)	Groove shape (mm)	Welding consumables	Welding conditions
Skin plate: 50 mm (developed steel)		Wire: JIS Z3351 YS-NM6 6.4 mmΦ Flux: JIS Z3352 SACG-I1	L: 2050A-40V T: 1500A-48V Welding speed: 20 cm/min Heat input: 462 kJ/cm

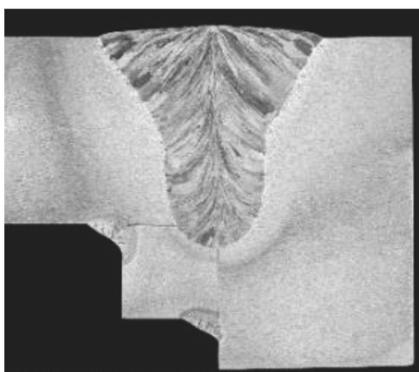


図5 SAW継手のマクロ写真
Fig.5 Cross-sectional macrostructure (SAW)

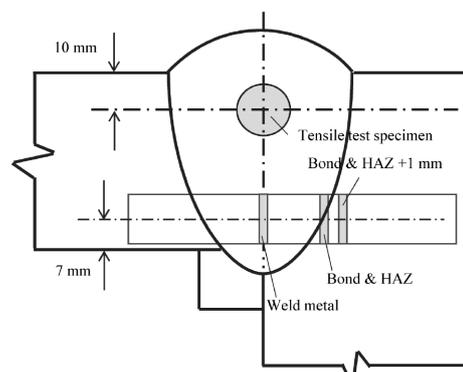


図6 試験片採取位置 (SAW)
Fig.6 Test specimen sampling position (SAW)

表 11 SAW 継手の機械的性質
Table11 Mechanical properties of SAW joint

Steel	Tensile test of weld metal		Charpy impact test, vE ₀		
	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	Weld metal (J)	Bond&HAZ (J)	Bond&HAZ+1 mm (J)
Developed steel	652	829	46	55	51
Conventional steel	-	-	-	20	-

表 11 に SAW 継手の機械的性質を示す。溶接金属部の引張特性は 780 N/mm² 級鋼の母材規格下限値 (0.2% 耐力 \geq 630 N/mm², 引張強さ \geq 780 N/mm²) を十分満足することを確認した。シャルピー衝撃特性は 46~55 J であり, 同様の溶接方法にて施工した従来鋼 (表 3) に対し改善していることを確認した。

むすび = 本開発鋼は, 780 N/mm² 級鋼における大入熱 1 パス溶接施工に対しても, 優れた母材特性および溶接継手特性を有し, 従来課題であった施工効率と性能確保の両立を実現できることが確認された。今後は, 実構造物への適用を見据えたさらなる検証を進めるとともに, 建

築鋼構造物の高性能化・高効率化に貢献する材料としての展開を図っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会. 内ダイアフラム エレクトロスラグ溶接部の脆性的破断防止ガイドブック. 2016.
- 2) 日本鋼構造協会. 高強度鋼材の各種溶接部の必要性能の明確化に関する研究報告書. 2023, p.27-52.
- 3) 児島明彦ほか. 新日鉄技報. 2004, No.380, p.2-5.
- 4) 大森章夫ほか. JFE技報. 2014, No.33, p.25-33.
- 5) 畑野 等ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.2, p.105-109.
- 6) 日本鋼構造協会. 建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準試験マニュアル ~引張試験・シャルピー衝撃試験~ JSS IV 13. 2016.
- 7) 山本貴大ほか. 溶接学会全国大会講演概要第115集. 2024, p.194-195.

(技術資料)

大入熱溶接対応建築構造用TMCP鋼板

森下史弥*¹・川野晴弥*¹

TMCP Steel Plate for Architectural Structures Compatible with High-Heat Input Welding

Fumiya MORISHITA・Haruya KAWANO

要旨

大入熱溶接におけるHAZじん性と溶接性に優れた建築構造用550 N/mm²級TMCP鋼「KCL A385C-ST」、同590 N/mm²級TMCP鋼「KCL A440C-ST」の設計コンセプトと特性を紹介する。

本商品はTMCP技術を最大限に活用するとともに、当社独自に確立したHAZ組織制御技術により、HAZじん性と溶接性の両立を実現している。

これにより、幅広い板厚で母材特性を満たす。また、溶接後の冷却速度が遅くHAZじん性に不利なスキンプレートと内ダイアフラムの板厚組み合わせのESWでも70 J以上のHAZじん性を満足している。

Abstract

This paper introduces the design concept and properties of the 550 N/mm² class TMCP steel, "KCL A385C-ST," and the 590 N/mm² class TMCP steel, "KCL A440C-ST," for architectural structures, which have excellent HAZ toughness and weldability in high-heat input welding. These products fully exploit TMCP technology to achieve both HAZ toughness and weldability, leveraging Kobe Steel's proprietary HAZ structure control technology. They meet the required base material characteristics for a wide range of plate thicknesses. In addition, a HAZ toughness of 70 J or greater has been achieved, even in electroslag welding (ESW), through combined thicknesses of skin plate and inner diaphragm, where the post-welding cooling rate is slow and not conducive to HAZ toughness.

検索用キーワード

TMCP, 高HAZじん性, 大入熱溶接, スキンプレート

まえがき = 建築向け厚鋼板は建築構造物において柱・梁(はり)などに使用されている。近年、建築構造物の設計条件や施工環境の変化により、厚鋼板に要求される性能が多様化している。

首都圏を中心にしゅん工・計画されている建築構造物では、空間の有効利用を目的として高層かつ柱間隔(スパン)が大きい設計が採用されている¹⁾。高層かつ大スパンの建築構造物では柱・梁にかかる荷重が大きくなるため、使用される鋼材が高強度化・厚肉化される傾向にある。建築構造用鋼板として初めて規格化されたSN材(JIS G 3136, 1994年)の強度クラスは400 N/mm²級、490 N/mm²級である。その後、高強度の建築構造用鋼板として590 N/mm²級が規格化され、近年では780 N/mm²級の適用も進んでいる。これに伴い、鋼板の母材特性や継手特性に関する報告も増えている^{2)~4)}。

建築構造物の安全性確保には、南海トラフ巨大地震や首都直下型地震など、将来予想される大地震への備えが必要である。図1に溶接により製作された溶接組立箱形断面柱(BOX柱)の模式図を示す。BOX柱では阪神淡路大震災で柱/梁端溶接部からの破断が生じた事例が報告されている⁵⁾。また、BOX柱の外殻であるスキンプレートと柱内部で柱/梁の応力伝達を担う内ダイアフラムとの溶接部において、裏当て金とスキンプレートの間

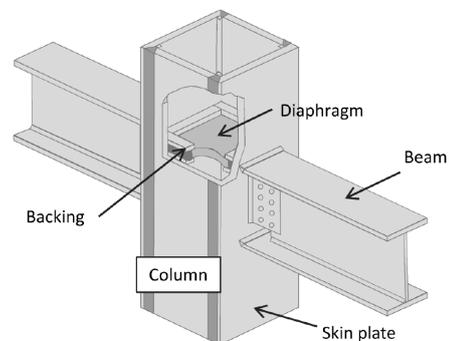


図1 建築鉄骨構造の模式図
Fig.1 Schematic diagram of architectural structure

間(スリット)先端部からの脆性(ぜいせい)破壊⁶⁾が確認されている。このように、溶接部が破壊の起点となることが明らかになっており、鋼板に対しては安全性確保に必要な溶接熱影響部(HAZ)じん性の要求が高まっている。

また、少子高齢化や労働力不足、働き方改革による設計・施工工期の長期化、さらに地球温暖化による作業環境の悪化が懸念されている。これらの課題に対し、溶接時の施工効率向上やエネルギー消費量の低減の観点から、予熱なしで溶接できることが鋼材に求められている。

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部

そこで、当社ではこれらのニーズにこたえるため、溶接性、およびHAZじん性に優れた建築構造用の高強度TMCP鋼をメニュー化している。本稿では、引張強さ550 N/mm²級のKCL A385C-ST^{注)}および590 N/mm²級のKCL A440C-STを取り上げて、設計コンセプト、機械的特性、および継手特性を紹介する。

1. 大入熱対応TMCP鋼の要求特性

表1に成分規格値を示す。溶接性を確保するために炭素当量 (Ceq) および溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) を低減した成分規格となっている。

表2に母材特性の規格値を示す。継手特性としては、BOX柱のスキンプレート/内ダイアフラムの接合部で適用されるエレクトロスラグ溶接 (ESW) において、試験温度0℃でのHAZじん性70 J以上が求められている。これは高い安全性を確保するための重要な要求性能である⁷⁾。

本鋼板が適用されるBOX柱では、柱内部にコンクリートを充填するCFT (Concrete Filled Tube) 構造の採用が進んでいる。CFT構造を採用すると軸方向の圧縮座屈耐力が増加し、スキンプレートを薄肉化できる⁸⁾。その結果、スキンプレートと内ダイアフラムとの板厚差が大きい構造が増加している。

板厚差が大きくなるとスキンプレートからの熱放射が

小さくなる。その結果、図2および図3に示すように、スキンプレートにおけるHAZが大きくなる。内ダイアフラム厚 t_d に対するスキンプレート厚 t_s (板厚比: t_s/t_d) が小さいほど、スキンプレートへの熱放射が律速となり、溶接後の冷却速度は遅くなる。下村らの解析結果⁹⁾によれば、板厚比が0.7程度までは板厚比が小さくなるほど冷却速度は遅くなっている。

本鋼板は、冷却速度が遅い板厚比0.7程度の条件でも、HAZじん性70 J以上を確保できるように設計した鋼板である。

2. 大入熱対応TMCP鋼のコンセプト

ESWの特徴は角継手や柱/柱継手など他部位の溶接法に比べて溶接入熱が大きいことである。溶接入熱が大きいほどHAZが溶融温度近傍の高温にさらされる時間が長く、溶接後の冷却速度が低下する。その結果、ESW部のHAZ組織は旧オーステナイト (γ) 粒が粗大化する¹⁰⁾とともに、粒界フェライトや上部ベイナイト、硬質なM-A (Martensite-Austenite constituent) が形成される¹¹⁾。M-Aは脆性き裂の起点として作用するため、また粗大な粒界フェライトや上部ベイナイトはき裂伝播 (でんば) に対する抵抗が小さいため、HAZじん性が低下する。

そこで、本商品では冷却速度が遅い板厚比0.7程度の

表1 KCL A385C-STおよびKCL A440C-STの要求特性 (成分)
Table 1 Specification for chemical composition of KCL A385C-ST and KCL A440C-ST

Grade	Plate thickness (mm)	Chemical composition (mass%)					Ceq(%)*1	P _{CM} (%)*2
		C	Si	Mn	P	S		
KCL A385C-ST	19 ≤ t ≤ 50	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.008	≤ 0.40	≤ 0.26
	50 < t ≤ 100						≤ 0.42	≤ 0.27
KCL A440C-ST	19 ≤ t ≤ 40	≤ 0.12	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.008	≤ 0.44	≤ 0.22
	40 < t ≤ 100						≤ 0.47	

*1 Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

*2 P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

表2 大入熱溶接対応TMCP鋼の要求特性 (母材)
Table 2 Specification for mechanical properties of KCL A385C-ST and KCL A440C-ST

Grade	Plate thickness (mm)	Tensile properties					Impact properties	
		Types of test pieces	YP or 0.2%YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El. (%)	YR (%)	Types of test pieces	∫E ₀ (J)
KCL A385C-ST	19 ≤ t ≤ 32	JIS Z2241 No.1A	385~505	550~670	≥ 15	≤ 80	JIS Z2242 No.4	≥ 70
	32 < t ≤ 100	JIS Z2241 No.4			≥ 20			
KCL A440C-ST	19 ≤ t < 20	JIS Z2241 No.5	440~540	590~740	≥ 29	≤ 80	JIS Z2242 No.4	≥ 70
	20 < t ≤ 100	JIS Z2241 No.4			≥ 20			

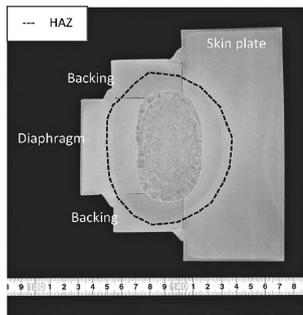


図2 ESWのマクロ組織

(スキンプレート厚70 mm, 内ダイアフラム厚70 mm)

Fig.2 Macro structure of ESW joint for $t_s=70$ mm and $t_d=70$ mm

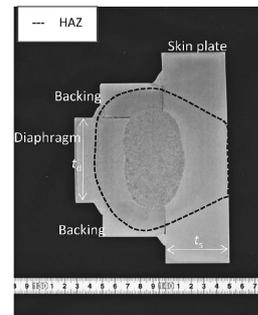


図3 ESWのマクロ組織

(スキンプレート厚50 mm, 内ダイアフラム厚70 mm)

Fig.3 Macro structure of ESW joint for $t_s=50$ mm and $t_d=70$ mm

脚注) KCLは当社の登録商標 (第2040156号) である

条件でも優れたHAZじん性を満足すべく、脆性き裂の発生と伝播に着目した組織制御をはかることとした。

まず、き裂発生の抑制に対しては、起点となるM-Aの低減が有効である。M-Aは冷却過程で未変態の γ がC濃縮により熱的に安定化し、低温でマルテンサイトに変態することで形成される。本鋼板では従来鋼に対してC量を低減し、 γ の熱的安定性を抑制している。くわえて、未変態 γ からセメントイトとフェライトへの変態を促進することで、低温で残留している未変態 γ を低減することも有効である。 $\gamma \rightarrow$ セメントイト、フェライト変態はCのほかにもセメントイト、フェライトに濃化する元素も拡散することで進行する。本鋼板ではフェライトへの濃化度合いが大きく、セメントイト析出を抑制する元素であるSiの添加量を低減することで未変態 γ からのセメントイト析出を促進し、M-Aの生成を抑制した。Cやその他添加元素は強度の確保に必要であるが、添加量の低減に対してTMCP技術を活用することでM-Aの低減と母材強度の両立が可能となっている。

また、き裂伝播抵抗の向上に対してはHAZ組織の微細化が必要である。HAZ組織を微細化するためには旧 γ の粗大化を抑制すること、および旧 γ から形成される変態組織を微細化することが有効であり、種々元素の活用によりこれらを実現している。

旧 γ 粒の粗大化については、TiNの微細分散を活用した¹²⁾。いっぽう、変態組織の微細化についてはKCL A385C-STとKCL A440C-STで異なる組織制御技術を活用した。KCL A385C-STはフェライト主体のHAZ組織

であることから、フェライトの生成頻度を高めるためにTiN、BNを核生成サイトとして分散析出させている。KCL A440C-STは上部ベイナイト主体のHAZ組織であり、ベイニティックフェライトの核生成頻度を大きくするためにCu、Cr、Niの弱炭化物生成元素を添加した¹³⁾。

3. 大入熱対応TMCP鋼の特性

3.1 母材特性

表3および表4にKCL A385C-STおよびKCL A440C-STの成分例を示す。いずれも溶接性確保に必要な C_{eq} および P_{CM} の基準を満たしている。表5および表6にKCL A385C-STおよびKCL A440C-STの母材特性を示す。TMCPの活用により高強度・低降伏比(YR)を両立している。

3.2 溶接性

溶接性を評価するため、y形溶接割れ試験を実施した。表7に示した試験条件にて予熱なし(試験温度0℃)でも断面割れは確認されなかった。

3.3 継手特性

表8にESWの開先形状および溶接実績を示す。HAZじん性に不利な組み合わせとして、KCL A385C-STではスキンプレート厚40mm(板厚比0.67)、KCL A440C-STでは同45mm(板厚比0.69)の試験体を製作した。

つぎに、当該試験体よりJSSC建築鉄骨溶接部の機械的性質のマニュアル¹⁴⁾に準拠してESW部のHAZじん性を評価した。シャルピー衝撃試験片を図4のとおり採取し、試験温度0℃での平均吸収エネルギーを評価し

表3 KCL A385C-STの化学成分の一例
Table 3 Example of chemical composition of KCL A385C-ST

Grade	Chemical composition (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	others	C_{eq}	P_{CM}
KCL A385C-ST	0.07	0.36	1.52	0.006	0.001	Ti,B	0.34	0.17
Spec.	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.008	-	$\leq 0.40^{*1}$ $\leq 0.42^{*2}$	$\leq 0.26^{*1}$ $\leq 0.27^{*2}$

*1 Plate thickness ≤ 50 mm

*2 Plate thickness > 50 mm

表4 KCL A440C-STの化学成分の一例
Table 4 Example of chemical composition of KCL A440C-ST

Grade	Chemical composition (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	others	C_{eq}	P_{CM}
KCL A440C-ST	0.04	0.10	1.49	0.005	0.001	Cu,Ni,Cr,Ti,B	0.38	0.21
Spec.	≤ 0.12	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.008	-	$\leq 0.44^{*1}$ $\leq 0.47^{*2}$	≤ 0.22

*1 Plate thickness ≤ 40 mm

*2 Plate thickness > 40 mm

表5 KCL A385C-STの母材特性
Table 5 Mechanical properties of KCL A385C-ST

Plate thickness (mm)	Tensile properties				Impact properties
	YP or 0.2%YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El. (%)	YR (%)	vE_0 (J)
19	454	594	23	76	268
40	435	594	33	73	281
65	452	623	29	73	256
100	422	565	31	75	244
Spec.	385~505	550~670	$\geq 15^{*1}$ $\geq 20^{*2}$	≤ 80	≥ 70

*1 Plate thickness 19mm

*2 Plate thickness 40,65,100mm

表6 KCL A440C-STの母材特性
Table 6 Mechanical properties of KCL A440C-ST

Plate thickness (mm)	Tensile properties				Impact properties
	YP or 0.2%YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El. (%)	YR (%)	vE_0 (J)
19	469	656	38	71	261
32	461	662	31	70	281
45	478	628	33	76	289
100	481	639	32	75	273
Spec.	440~540	590~740	$\geq 29^{*1}$ $\geq 20^{*2}$	≤ 80	≥ 70

*1 Plate thickness 19mm

*2 Plate thickness 32,45,100mm

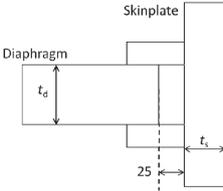
表7 Y形溶接割れ試験の溶接条件

Table 7 Welding conditions for Y-groove weld cracking test

Grade	Plate thickness (mm)	Welding method	Welding material	Welding conditions				
				Pre-heating temperature (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/cm)
KCL A385C-ST	100	GMAW(CO ₂)	JIS Z3312 YGW18	none	280	30	30	16.8
KCL A440C-ST	100	GMAW(CO ₂)	JIS Z3312 G 59J A 1 U C 3M1T	none	280	30	30	16.8

表8 溶接条件および開先形状

Table 8 Welding conditions and groove shape

Grade	Plate thickness (mm)	Welding method	Preheat	Groove shape	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/cm)
KCL A385C-ST	Skinplate:40 Diaphragm:60 $t_s/t_d=0.67$	JIS Z3353 YES560-S /JIS Z3353 FES-CS	none		380	51	14.5	802
KCL A440C-ST	Skinplate:45 Diaphragm:65 $t_s/t_d=0.69$	JIS Z3353 YES600-S /JIS Z3353 FES-CS	none		380	52	15.0	790

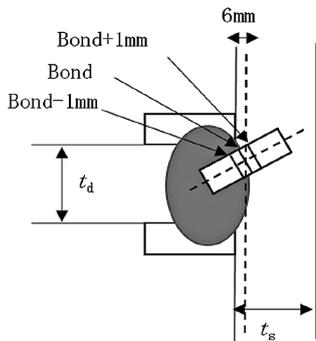


図4 シャルピー衝撃試験位置

Fig.4 Test positions for Charpy impact tests

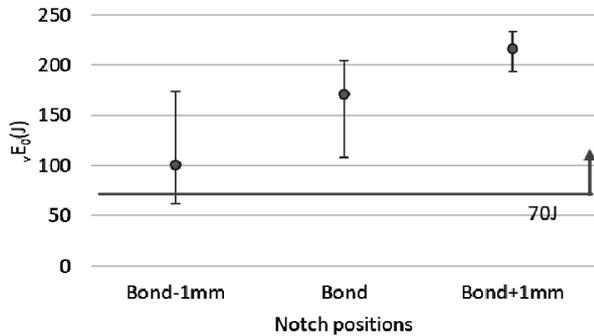


図5 シャルピー衝撃試験結果 (KCL A385C-ST)

Fig.5 Results of charpy impact test for KCL A385C-ST ($t_s = 40\text{mm}$ and $t_d = 60\text{mm}$)

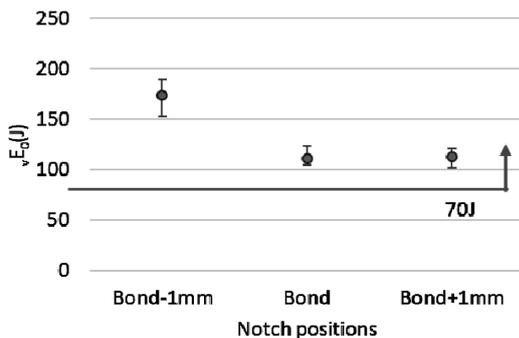


図6 シャルピー衝撃試験結果 (KCL A440C-ST)

Fig.6 Results of charpy impact test for KCL A440C-ST ($t_s = 45\text{mm}$ and $t_d = 65\text{mm}$)

た。その結果を図5および図6に示す。いずれのノッチ位置においても平均で70 J以上のHAZじん性を示した。

むすび = 本稿では、HAZじん性および溶接性に優れた大入熱溶接対応TMCP鋼KCL A385C-STおよびKCL A440C-STの設計コンセプトおよび特性を紹介した。き裂の発生抑制に対しては未変態 γ の熱的安定性を低下させ、マルテンサイト変態を抑制する成分設計により、M-Aの生成を抑制した。き裂の伝播抵抗の向上に対しては、粒内での核生成頻度を高める成分設計により変態組織の微細化を実現した。その結果、HAZじん性に不利とされている条件のESWでも70 J以上の優れたHAZじん性を示した。また、母材特性についてもTMCP技術を最大限活用することで、高強度かつ低降伏比(YR)の両立を実現した。

当社では今後もお客様のニーズに応える商品を開発・提供することで安全・安心な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 鉄構技術. 2024, Vol.37, No.437, p.54-55.
- 2) 小林克壮ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.47-51.
- 3) 川野晴弥ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.2, p.110-113.
- 4) 安部研吾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.26-29.
- 5) 中込忠男. 溶接学会誌. 1997, Vol.66, No.6, p.447-451.
- 6) 高嶋康人ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2016, 98, p.208-209.
- 7) 日本溶接協会. WE-COMマガジン 建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準試験 (日本鋼構造協会JSSIV13-2016). https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_40/sec_1/1-1.pdf
- 8) 津田憲吾. コンクリート工学. 2014, Vol.52, No.1, p.65-p.70.
- 9) 下村竜哉ほか. 2023年度日本建築学会関東支部研究報告集 I. p.117-120.
- 10) 井川 博ほか. 溶接学会誌. 1977, Vol.46, No.9, p.636-641.
- 11) 笠松 裕ほか. 鉄と鋼. 1979, Vol.65, No.8, p.1222-1231.
- 12) 加藤 拓ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.32-35.
- 13) 畑野 等ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.1, p.49-53.
- 14) 一般社団法人 日本鋼構造協会. JSS IV 13-2016.

(技術資料)

建築構造用高性能490 N/mm²級および550 N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管

山口徹雄^{*1}・伊藤冬樹^{*2}・岡野重雄^{*3}・高橋弘志^{*4}

High-Performance Cold-Press-Formed Rectangular Columns (490 N/mm² and 550 N/mm² Grades) for Building Structures

Tetsuo YAMAGUCHI・Fuyuki ITO・Shigeo OKANO・Hiroshi TAKAHASHI

要旨

本稿では、490 N/mm²級 (SBCP325TF) および550 N/mm²級 (SBCP385TF) の高性能冷間プレス成形角形鋼管の開発とその特性を紹介する。本鋼管の開発では角部および溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) におけるじん性の安定確保を、TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) の適用による素材鋼板の高じん性化と低_{f_{HAZ}}管理とした化学成分により達成した。これにより、従来必要とされた脆性 (ぜいせい) 破壊防止溶接積層法を適用せずに告示で要求される設計付加事項を除外可能とした。構造性能 (短柱圧縮・部材曲げ) においても優れた結果を示し、大臣認定および日本建築センター評定を取得している。既に実物件への適用も進行中である。

Abstract

This paper presents the development and characteristics of high-performance cold-press-formed rectangular columns, SBCP325TF (490 N/mm² grade) and SBCP385TF (550 N/mm² grade). To ensure stable toughness in the corners and heat-affected zones (HAZ), the thermo-mechanical control process (TMCP) has been applied to enhance the toughness of the base steel plate, while the chemical composition has been optimized to achieve a low _{f_{HAZ}} index. As a result, the additional design requirements specified in the public notice can be omitted, eliminating the need for the previously required non-brittle-fracture welding. Furthermore, both short-column compression and member bending tests confirmed excellent structural performance, and these achievements led to ministerial approval and certification by the Building Center of Japan. These columns are already being used in actual buildings.

検索用キーワード

490 N/mm²級鋼材, 550 N/mm²級鋼材, 冷間成形角形鋼管, TMCP, 溶接部性能, 短柱圧縮試験, 塑性変形性能

まえがき = 冷間成形角形鋼管は、柱梁接合部を通しダイアフラム形式とし、その溶接にロボット溶接を適用することで鉄骨生産性が高く、広く普及している。しかし、冷間プレス成形角形鋼管は角部が冷間加工されて鋼管角部のじん性は低下しやすいことが一般的に知られている。また、通しダイアフラム溶接の溶接熱影響部 (Heat Affected Zone, 以下、HAZ) からの早期の脆性 (ぜいせい) 破壊も懸念される。これらを防止するため、冷間プレス成形角形鋼管を柱に用いる場合、溶接組立箱形断面柱には適用されない設計付加事項による安全率が告示により課されている (昭和55年建設省告示第1791号第2、平成19年国土交通省告示第594号第4)。

従来から、冷間プレス成形角形鋼管の合理的な設計の観点において告示により課される設計付加事項を除外するために、冷間曲げ加工によりじん性が低下する角部でのじん性確保と、通しダイアフラム溶接部のHAZのじん性改善が求められていた。これらの要求に沿う十分な角部じん性を有し、脆性破壊防止溶接積層法を適用することで通しダイアフラム溶接部のHAZじん性が確保された冷間プレス成形角形鋼管が開発されBCP325Tとして知られている^{1),2)}。BCP325Tは告示により課される

設計付加事項を除外可能であり、設計上の取り扱いを溶接組立箱形断面柱と同条件とすることが可能である。しかしながら、脆性破壊防止溶接積層法の適用が不可欠であったため、その施工に必要なビードサイズや位置の管理などの手間が大きく、ファブリケーターからはさらなる改善が求められていた。

そこで、当社では脆性破壊防止溶接積層法の適用が不要で、従来、告示により課されてきた設計付加事項を除外できる冷間プレス成形角形鋼管を、佐々木製罐工業株式会社と共同で開発した^{3)~7)}。本稿では、建築構造用高性能490 N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管SBCP325TF^{注1)}、550 N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管SBCP385TFについて紹介する。

1. 開発コンセプト

SBCP325TFとSBCP385TFでは鋼管角部のじん性の安定確保は、熱加工制御 (Thermo-Mechanical Control Process : 以下、TMCP) 技術を活用した素材鋼板製造時の温度の厳格管理により素材鋼板を高じん性化するこ

脚注) SBCPは佐々木製罐工業(株)の登録商標(第5926438号)である。

^{*1} 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 ^{*2} 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部

^{*3} 元 佐々木製罐工業株式会社 技術部 ^{*4} 佐々木製罐工業株式会社 技術部

とを前提とした。これをもとに、合金設計の最適化によりHAZじん性の向上を図ることとした。

マグ溶接熱影響部靱性指標である f_{HAZ} が高く、Ti・N管理がなされていない従来の鋼材成分では、一般的には単層溶接のHAZ組織は粗粒化しぜい化する⁸⁾。そこで、本開発鋼管では、低合金化、および低P・S化とTi・Nの成分管理により低 f_{HAZ} 化(0.46%以下)した成分設計としている。古谷らの報告⁸⁾にある単層溶接と同等条件にて溶接施工(入熱40 kJ/cm, パス間温度350℃)して作製したサンプルのマイクロ組織写真を図1に示す。本開発鋼管においては、従来、脆化しやすかった単層溶接のHAZ組織においても、一般的にHAZのじん性が良好

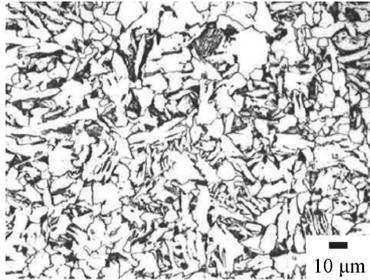


図1 ミクロ組織例(SBCP385TF)

Fig.1 Example of microstructure (SBCP385TF)

な多層溶接と同程度の微細なフェライト状組織となっている。これにより、HAZじん性の安定確保を図った。

2. 開発鋼管の特性

2.1 成分および鋼管母材特性

表1、表2に鋼管母材の化学成分と機械的性質の一例、およびその規格を示す。化学成分は1章の開発コンセプトのとおり低 f_{HAZ} 化を達成する成分設計としている。機械的性質の評価における引張試験片は、平板部では圧延直角方向に、角部は管軸方向に採取した。平板部の引張特性は十分にスペックを満足している。角部では冷間加工の影響によって、平板部より降伏点・引張強さとも上昇が認められる。シャルピー衝撃試験片は、管軸方向にて平板部では表面から $t/4$ を、角部では外表面から6 mm内側の位置を中心として採取した。角部のシャルピー吸収エネルギーは平板部より若干低下するものの、TMCP技術を活用した高じん性な素材鋼板を用いることで、角部・平板部ともに70J(試験温度:0℃)を超える安定した値を実現している。

2.2 溶接部特性

角形鋼管柱と通しダイヤフラムの溶接部を模した試験体を用いて溶接部の特性を確認した。本鋼材の通しダイ

表1 化学成分
Table 1 Chemical compositions

Type symbol	Size (mm)	Chemical composition(%)									
		C	Si	Mn	P	S	Ti	N	C _{eq}	P _{CM}	f _{HAZ}
SBCP325TF	□400×16	0.14	0.35	1.23	0.007	0.001	0.011	0.0042	0.36	0.22	0.35
	□600×25	0.14	0.34	1.22	0.007	0.001	0.011	0.0035	0.36	0.21	0.34
	□550×40	0.14	0.35	1.23	0.007	0.001	0.011	0.0042	0.36	0.22	0.35
	Spec.	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.005	0.005≤ ≤0.025	0.002≤ ≤0.006	≤0.38	≤0.24	≤0.46
SBCP385TF	□600×19	0.14	0.32	1.21	0.007	0.001	0.011	0.0043	0.36	0.21	0.35
	□550×25	0.14	0.32	1.21	0.007	0.001	0.011	0.0043	0.36	0.21	0.35
	□450×28	0.14	0.35	1.26	0.007	0.001	0.012	0.0041	0.37	0.22	0.35
	□450×40	0.14	0.32	1.21	0.007	0.001	0.011	0.0043	0.36	0.21	0.35
	□650×60	0.13	0.35	1.48	0.012	0.001	0.013	0.0047	0.40	0.22	0.40
	Spec.	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.005	0.005≤ ≤0.025	0.002≤ ≤0.006	≤0.40	≤0.26	≤0.46

$$C_{eq}=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$$

$$P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$$

$$f_{HAZ}=C+Mn/8+6(P+S)+12N-4Ti \quad (\text{Set } Ti = 0 \text{ when } Ti \leq 0.005)$$

表2 機械的性質
Table 2 Mechanical properties

Type symbol	Size (mm)	Flat section					Corner section				
		YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	YR (%)	vE ₀ (J)	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	YR (%)	vE ₀ (J)
SBCP325TF	□400×16	396	517	29	77	296	517	597	23	87	253
	□600×25	364	504	28	72	309	481	565	25	85	261
	□550×40	397	525	33	76	257	506	560	26	90	245
	Spec.	325≤ ≤445	490≤ ≤610	21≤	≤80	70≤	—	—	—	—	70≤
SBCP385TF	□600×19	442	599	22	74	261	594	678	19	88	223
	□550×25	449	581	26	77	261	566	654	20	87	230
	□450×28	442	586	27	75	295	564	641	17	88	254
	□450×40	422	589	29	72	244	586	661	21	89	212
	□650×60	447	589	35	76	286	615	688	21	89	228
	Spec.	385≤ ≤505	550≤ ≤670	19≤ 21≤	≤80	70≤	—	—	—	—	70≤

Tensile test specimen from flat section: JIS Z 2241 No.1A (t≤40), No. 4 (40<t)-1/4t, transverse

Tensile test specimen from corner section: JIS Z 2241 No.14

Charpy impact test specimen from flat section: JIS Z2242 full size-1/4t-longitudinal

Charpy impact test specimen from corner section: JIS Z2242 full size-surface- longitudinal

表3 通しダイアフラム溶接部の入熱・パス間温度管理条件

Table 3 Heat input and interpass temperature control conditions for through diaphragm welds

Type symbol	Welding consumables	Pre-heating	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)
SBCP325TF	YGW18 (MG-56R)	None	≦ 30	≦ 250
SBCP385TF	G59JA1UC3MIT (MG-60)	None	≦ 30	≦ 250

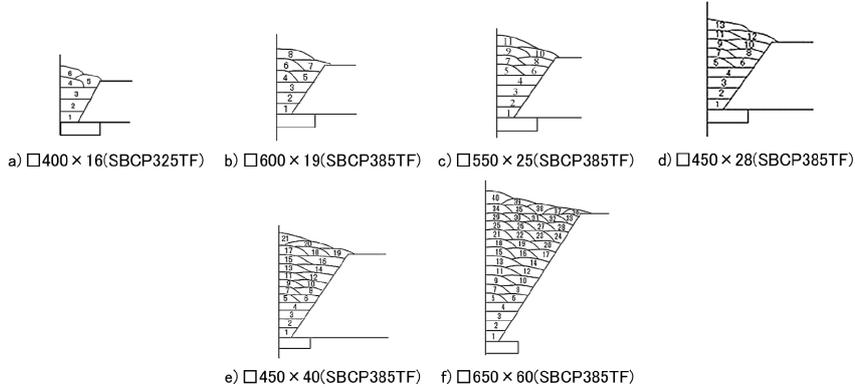


図2 溶接積層図の例

Fig.2 Examples of weld build-up diagram

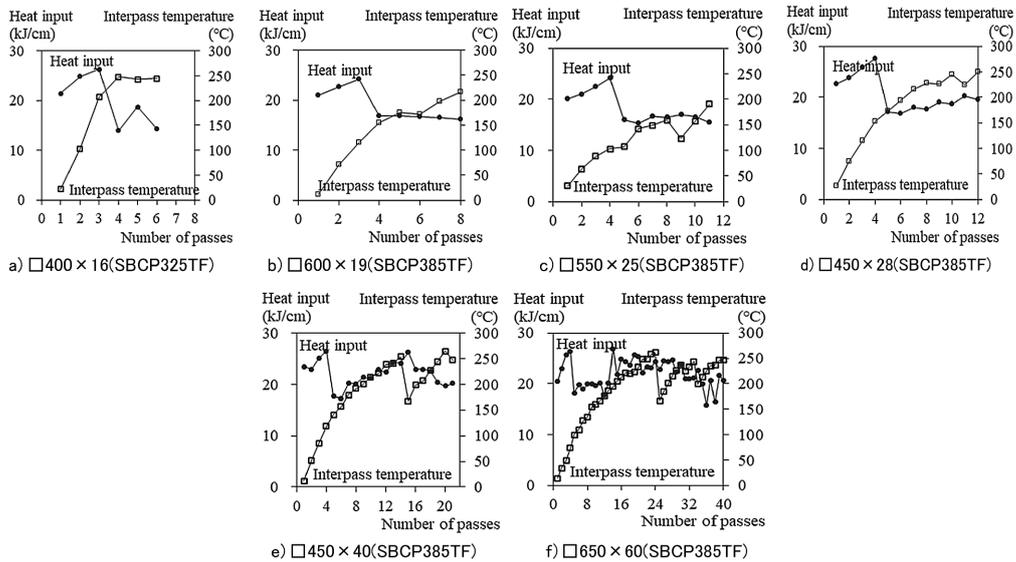


図3 入熱・パス間温度実績例

Fig.3 Examples of heat input and interpass temperature records

アフラム溶接部の入熱・パス間温度管理条件を表3に示す。溶接材料は角部の強度上昇を考慮してSBCP325TFには550 N/mm²級を, SBCP385TFには590 N/mm²級を用いた。また, 通しダイアフラムはSBCP325TFには490 N/mm²級鋼材を, SBCP385TFには550 N/mm²級TMCP鋼材を用いた。

溶接施工はロボットにて実施した。積層計画を図2に示す。16 mm厚では5層6パス, 19 mm厚では6層8パス, 25 mm厚では8層11パス, 28 mm厚では9層13パス, 40 mm厚では12層21パス, 60 mm厚では16層40パスである。入熱・パス間温度実績の一例を図3に示す。パス間温度は平板部で測定している。28 mm厚, 40 mm厚および60 mm厚では, 一部のパス間温度で250°Cに近い実績も見られている。図4に断面マクロの一例を示すが, 図2の積層図の通り溶接され, 溶接欠陥も見られな

かった。

表4に, 溶接部特性の一覧を示す。パス間温度が高いと冷却速度は遅くなり, 溶接金属強度やHAZじん性の低下が考えられる。28 mm厚, 40 mm厚, 60 mm厚のパス間温度は250°Cに近かったが, 溶接金属引張試験では鋼管母材より1グレード高い強度クラスを満足することを確認した。加えて, 継手引張試験においても平板部, 角部のいずれも母材で破断し鋼管母材の引張強さの下限を満足することを確認した。シャルピー衝撃試験では, 1章の開発コンセプトのとおり低 f_{HAZ} 管理とした角形鋼管母材を用いることにより, パス間温度が250°Cに近い試験体のBOND位置も含め, いずれの試験位置においても70J(試験温度: 0°C)を超える安定した値が確保できていることを確認した。

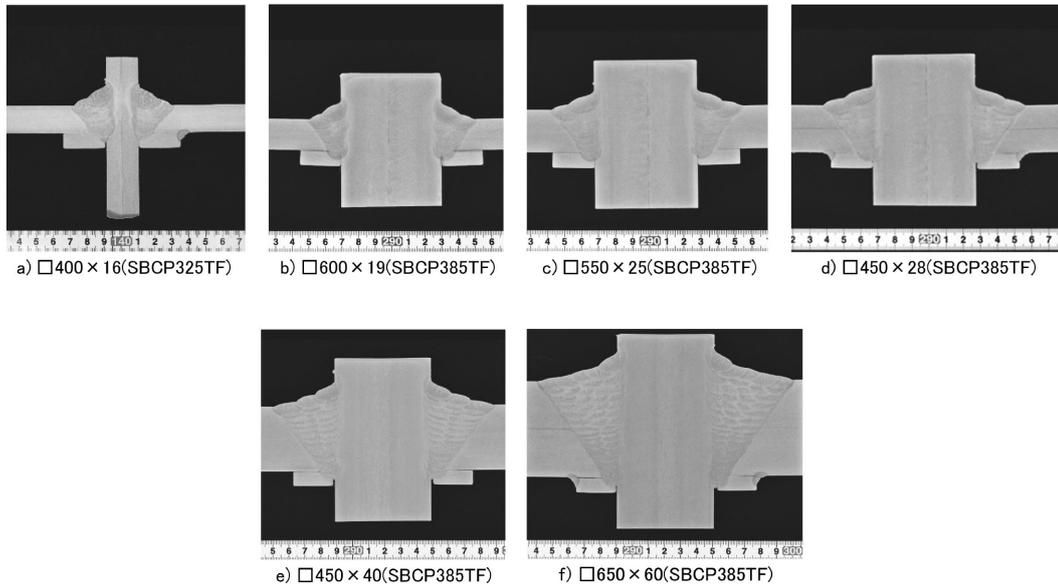


図4 断面マクロ写真例(平板部)

Fig.4 Examples of cross-sectional macrograph (flat plate section)

表4 溶接継手および溶接金属の引張試験, 溶接部のシャルピー衝撃試験結果
Table 4 Results of tensile tests on welded joints and weld metal, and Charpy impact test of weld zone

	Size (mm)	Tensile test of welded joint ^{*1}				Tensile test of weld metal ^{*2}		Charpy impact test of welded joints (0°C,J)					
		Flat section		Corner section		Flat section		Flat section			Corner section		
		TS (N/mm ²)	Fracture position	TS (N/mm ²)	Fracture position	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	DEPO	BOND	BOND+1mm	DEPO	BOND	BOND+1mm
SBCP325TF	□400×16	514	Base metal	630	Base metal	531	620	106	219	288	89	225	281
	□600×25	512	Base metal	608	Base metal	558	620	187	193	219	175	180	227
	□550×40	533	Base metal	625	Base metal	540	609	189	261	288	204	215	232
SBCP385TF	□600×19	599	Base metal	713	Base metal	653	678	182	237	252	188	218	262
	□550×25	579	Base metal	660	Base metal	621	659	181	246	222	195	206	215
	□450×28	585	Base metal	659	Base metal	575	633	169	249	233	175	216	236
	□450×40	570	Base metal	664	Base metal	584	630	80	177	173	89	191	229
	□650×60	558	Base metal	660	Base metal	541	605	126	185	223	156	191	226

*1 JIS Z 3131 No.4

*2 JIS Z 3111 No.A1 φ12.5mm

3. 構造性能

3.1 短柱圧縮試験 (SBCP385TF)

一般的に, 柱材では構造耐力上支障のある局部座屈を生じさせないために昭和55年建設省告示第1791号第2, 同第1792号第1および第3に示される幅厚比制限値が適用される。しかしながら, その適用強度クラスは基準強度で235~375 N/mm²となっている。SBCP385TFは, 基準強度375 N/mm²を超えるため, 短柱圧縮試験を行い, 局部座屈に対する塑性変形性能を確認した。

試験体と実験結果の一覧を表5に示す。試験体は16 mm厚と12 mm厚の鋼板から冷間プレスにより成形した幅厚比をパラメータとした計3体である。鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究⁹⁾にある短柱圧縮試験と同様に, 試験体高さ(H)は, 辺長(D)の3倍とした。

応力-ひずみ関係を図5に, 短柱圧縮試験後の外観例を図6に示す。いずれの試験体においても最大荷重を経過後に局部座屈が進行し終局した。D/tが小さくなるに従い, 局部座屈の発生するひずみは大きくなり, 塑性

変形倍率・応力上昇率とも大きくなる結果を得た。限界状態設計指針¹⁰⁾に示される幅厚比ランクごとの目標値との比較を図7に示す。本鋼管は幅厚比ランクごとの目標値を満足する塑性変形能力を有していることが分かる。

これらの結果より, 基準強度が385 N/mm²である本鋼管においても, 昭和55年建設省告示に示される幅厚比制限値を適用しても問題ないことを確認し, 日本建築センター評定を得ている。

3.2 部材曲げ実験

3.2.1 実験計画

角形鋼管柱-通しダイアフラム溶接部の柱部材としての塑性変形能力確認のため, 部材曲げ実験を実施した。部材曲げ実験に用いた鋼管, ダイアフラム, 溶接材料および溶接条件は, 短柱圧縮試験で適用した条件と同一である。試験体は図8に示すように, 中央部に2枚の通しダイアフラムを溶接したものを用いた。試験体一覧を表6に, 試験載荷状況を図9に示す。通しダイアフラム溶接部からの破断による塑性変形能力を評価するため, 断面の幅厚比ランクは座屈が生じないようにFAランクと

表 5 短柱圧縮試験体一覧

Table 5 List of stub column compression test specimens

Specimen	Width D (mm)	Thickness t (mm)	Yield strength σ_y (N/mm ²)	Generalized width-to-thickness ratio	rank
FA	285	16	427	0.81	FA
FB	295	12	442	1.14	FB
FC	350			1.35	FC

Generalized Width-to-Thickness Ratio; $D/t \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)}$

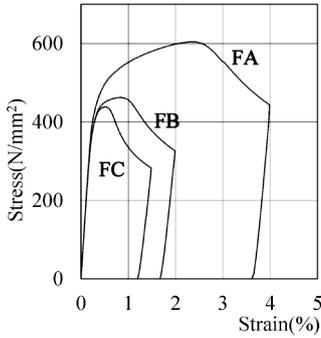


図 5 応力-ひずみ関係

Fig.5 Stress-strain relationship



図 6 短柱圧縮試験後の外観 (試験体FB)

Fig.6 Appearance after stub column compression test

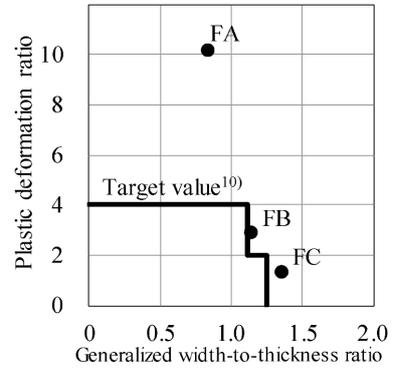


図 7 塑性変形倍率-一般化幅厚比関係

Fig.7 Plastic deformation ratio-generalized width-to-thickness ratio relationship

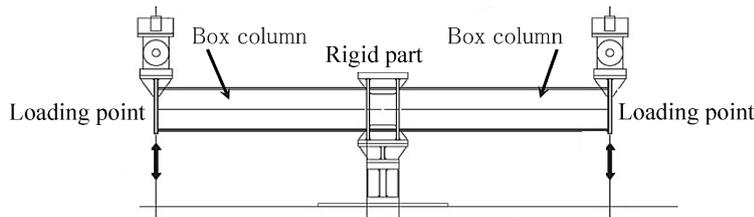


図 8 部材曲げ試験体セットアップ

Fig.8 Configuration of bending test specimen for structural component

表 6 部材曲げ実験 試験体一覧

Table 6 List of specimens for bending test

	Size (mm)	length (mm)	Loading direction (deg)	Width-to-thickness ratio	Equivalent width-to-thickness ratio
SBCP325TF	□600×25	3,900	45	24.0	0.99
	□550×40			13.8	2.77
SBCP385TF	□550×25	3,160	45	22.0	0.91
	□450×40			11.3	3.84

Equivalent width-to-thickness ratio; $E/\sigma_y \cdot (t/D)^2$



図 9 試験载荷状況

Fig.9 Loading condition in member bending test



図10 SBCP385TF (□450×40) 実験終了時の破断面外観
 Fig.10 Fracture appearance at the end of the test for SBCP385TF (□450×40)

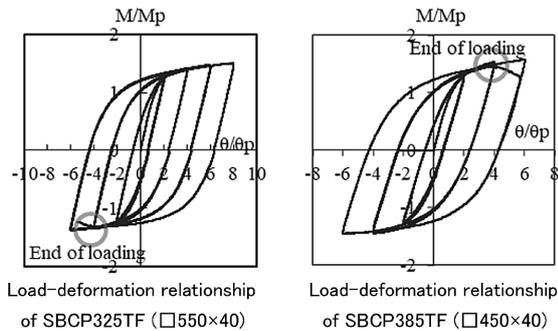


図11 M-θ関係の例
 Fig.11 Examples of M-θ relationship

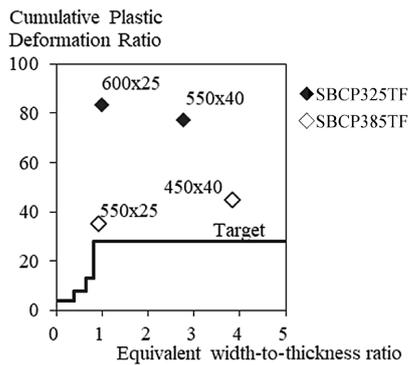


図12 幅厚比-累積塑性変形倍率関係
 Fig.12 Width-to-thickness ratio-cumulative plastic deformation

し、SBCP325TF、SBCP385TFとも幅厚比を変化させて2体ずつ実験を行った。载荷方向は45°とした。

载荷は、全塑性耐力の計算値 M_p に対応する弾性部材角 θ_p に対して、 $\pm 0.5\theta_p$ で予備载荷した。その後、 $2\theta_p$ 、 $4\theta_p$ 、 $6\theta_p$ 、…の変形量を正負各2回ずつ与える正負交番漸増繰返し载荷とした。荷重が最大荷重の90%まで低下した時点で载荷終了とした。

3.2.2 実験結果

部材曲げ実験終了後の試験体の破断面外観写真を図10に、曲げモーメント-部材角関係の一例を図11に示す。図11の縦軸の曲げモーメントは M_p で、横軸の部材角は θ_p で無次元化している。SBCP325TF、SBCP385TFの計4体のいずれも終局サイクルで延性き裂の進展により荷重が低下し、実験を終了した。

図12には、幅厚比と累積塑性変形倍率の関係を示しており、今回の部材曲げ実験で得られた各試験体の結果(プロット)と「各ランクの柱に必要とされる累積塑性

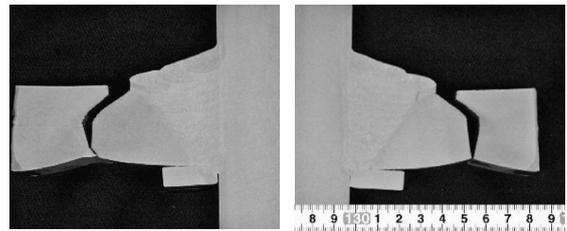


図13 破断サイクル後の破断角部 断面マクロ写真 (SBCP385TF □450×40)
 Fig.13 Cross-sectional macrograph of fractured corner after failure cycle (SBCP385TF □450×40)

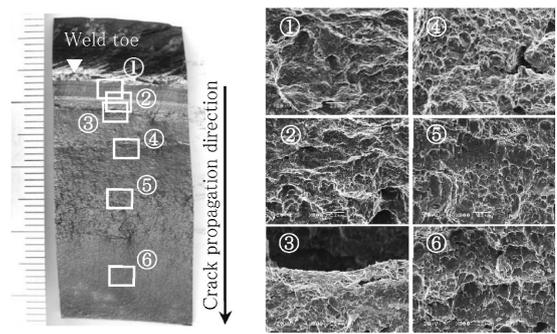


図14 破断面のSEM観察写真 (SBCP385TF □450×40)
 Fig.14 SEM images of fracture surface (SBCP385TF □450×40)

変形倍率¹¹⁾」との比較を示している。破面性状も確認しており、図13に破断部の断面マクロ写真を、図14に破面のSEM観察の一例を示すが、延性的に破断していた。これらの結果から、鋼管角部とHAZのじん性を向上させることで、早期の脆性的な破断を防止し、柱に必要なとされる累積塑性変形倍率を安定して上回っていることを確認した。

4. 角形鋼管の製造可能範囲と製造実績

製造可能範囲と製造実績について紹介する。表7および表8に製造可能寸法表を示す。SBCP325TFは最大で□1000 mm×40 mm、SBCP385TFは最大で□1400 mm×60 mmの大径厚肉サイズまでの製造が可能である。

SBCP325TF、SBCP385TF製造の角部じん性の実績を図15および図16に示す。角部のシャルピー衝撃試験片は、管軸方向にて外表面から6 mm内側の位置を中心として採取したものである。これまで多くの製造実績があるが安定したじん性を確認している。

表7 SBCP325TF直管製造寸法表

Table 7 Fabrication dimension table for straight columns in SBCP325TF

		Thickness t (mm)				
		16 ≤ t < 25	25 ≤ t < 28	28 ≤ t < 36	36 ≤ t < 40	40
Side length D (mm)	350 ≤ D < 400	○	—	—	—	—
	400 ≤ D < 450	○	○	—	—	—
	450 ≤ D < 500	○	○	○	—	—
	500 ≤ D < 550	○	○	○	○	—
	550 ≤ D ≤ 1000	○	○	○	○	○

Note 1: The above table refers to square cross-sections.

Intermediate sizes listed in the table are also available for production.

Note 2: In the case of rectangular cross-sections, production is possible as long as both the shorter and longer sides fall within the range specified in the above table.

表8 SBCP385TF直管製造寸法表

Table 8 Fabrication dimension table for straight columns in SBCP385TF

		thickness t (mm)					
		19 ≤ t < 40	40 ≤ t < 45	45 ≤ t < 50	50 ≤ t < 55	55 ≤ t < 60	60
Side length D (mm)	400 ≤ D < 450	○	-	-	-	-	-
	450 ≤ D < 500	○	○	-	-	-	-
	500 ≤ D < 550	○	○	○	-	-	-
	550 ≤ D < 600	○	○	○	○	-	-
	600 ≤ D < 650	○	○	○	○	○	-
	650 ≤ D ≤ 1400	○	○	○	○	○	○

Note 1: The above table refers to square cross-sections.

Intermediate sizes listed in the table are also available for production.

Note 2: In the case of rectangular cross-sections, production is possible as long as both the shorter and longer sides fall within the range specified in the above table.

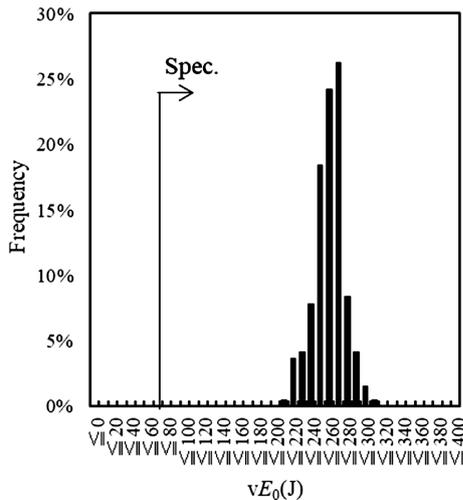


図15 SBCP325TFの角部じん性実績
Fig.15 Corner toughness performance of SBCP325TF

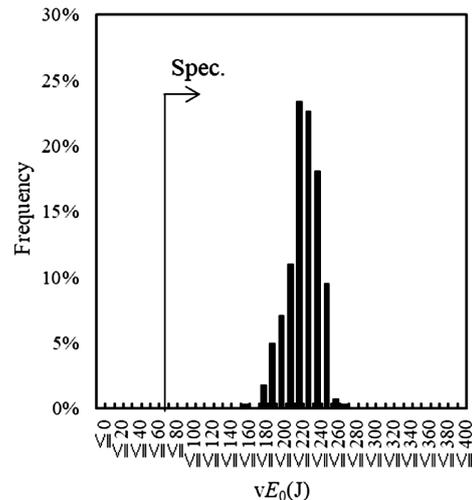


図16 SBCP385TFの角部じん性実績
Fig.16 Corner toughness performance of SBCP385TF

むすび = 高性能冷間プレス成形角形鋼管SBCP325TF、SBCP385TFは、角部も含めた良好な母材特性および溶接部特性を有するとともに、優れた構造性能を有することを確認した。2020年6月に大臣認定を取得するとともに、脆性破壊防止溶接積層法の適用なく溶接組立箱形断面柱には課されない設計付加事項を除外できる設計上の取り扱いについて、日本建築センターの評定を取得している。

既に実物件での適用も進んでおり、今後も適用の拡大が期待される。

参考文献

1) 形山忠輝ほか. 鋼構造論文集. 2004, Vol.11, No.41, p.1-9.
2) 石井 匠. 溶接学会誌. 2011, Vol.80, No.6, p.546-552.

3) 高橋弘志ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東). 2020, p.991-992.
4) 伊藤冬樹ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東). 2020, p.993-994.
5) 高橋弘志ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海). 2021, p.831-832.
6) 岡野重雄ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海). 2021, p.833-834.
7) 佐々木製鐵工業株式会社・株式会社神戸製鋼所. 鉄構技術. 2021, vol.34, No.401, p.21-24.
8) 古谷仁志ほか. 鋼構造論文集. 2000, Vol.7, No.27, p.23-37.
9) 建設省建築研究所. 社団法人鋼材倶楽部. 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究 委員会報告書. 2002, p.36-39.
10) 日本建築学会. 鋼構造限界状態設計指針・同解説. 2010, p.124-133.
11) 建設省建築研究所. 社団法人鋼材倶楽部: 角形鋼管設計研究会研究報告書. 1993, p.145-149.

(技術資料)

橋梁用高降伏点圧延鋼材 SBHSシリーズ

久保田毅*¹

Higher Yield Strength Steel Plates for Bridges: SBHS Series

Tsuyoshi KUBOTA

要旨

SBHSシリーズの厚鋼板について、鋼種設計の考え方とその特性について紹介する。SBHS500はフェライトやMAの生成を抑制した微細ベイナイト組織を形成させることで、優れたじん性と高YPを実現した。SBHS700はMAを含まない上部ベイナイト組織に粒子分散強化を活用することで高YP化を実現した。また、それを実現させるためのプロセス条件として加速冷却条件を適正化することで、平坦度確保と両立した。開発鋼はいずれも母材特性の規格値を満足しており、十分な溶接性および溶接継手特性を有している。

Abstract

This article introduces the design concept and key characteristics of the thick steel plates of the SBHS series. The SBHS500 exhibits excellent toughness and a high yield point (YP) thanks to the formation of a fine bainitic microstructure, which suppresses the formation of ferrite and martensite-austenite constituents(MA). On the other hand, the SBHS700 attains a high YP by employing particle dispersion strengthening within an upper bainite microstructure that is free of martensite-austenite constituents(MA). The steel also achieves excellent flatness by optimizing the accelerated cooling process conditions. All steels developed in the SBHS series satisfy the base material specifications and exhibit sufficient weldability along with favorable welded joint properties.

検索用キーワード

橋梁用高降伏点圧延鋼材, SBHS, ベイナイト, MA, 加速冷却, 溶接継手特性

ま え が き = 橋梁構造物における高性能化・長寿命化・施工合理化のニーズが高まる中、鋼材に求められる性能も年々高度化している。こうした社会的要請に応えるべく、当社は一般社団法人日本鉄鋼連盟「橋梁用鋼材研究会」における産学連携研究プロジェクトに参画し、SBHS (Steels for Bridge High Performance Structure) のJIS規格化 (JIS G 3140) に貢献した。SBHSは、これまで橋梁用鋼材として使用されてきた溶接構造用圧延鋼材 (SM鋼材, JIS G 3106) と比較して、同じ引張強さでも高降伏点 (高YP) の規格となっている。また、じん性および溶接性においても、より優れた性能を有している¹⁾。そのため、現時点での汎用的な橋梁用鋼材の中で高性能な鋼材であるといえる。SBHSはその強度クラスごとにSBHS400 (YP $\geq 400\text{N/mm}^2$), SBHS500 (YP $\geq 500\text{N/mm}^2$), SBHS700 (YP $\geq 700\text{N/mm}^2$) の3グレードがあり、耐候性タイプ (W) も加えてJIS規格化されている (表1)。従来SM鋼材に対して高YPであるSBHSの適用は高強度化による鋼橋の鋼重削減に有効である。加えて、溶接作業の効率化 (SBHS400, 500は予熱不要, SBHS700は予熱温度: 100~120℃から50℃に低減) による製作性の向上など、鋼橋の建設コスト縮減も期待される (表2)。

当社はSBHSシリーズの開発・商品化を完了しており、

適用実績を着実に伸ばしている状況である。本稿では、当社開発鋼のうち、まずSBHS500について鋼種設計の考え方とその特性について紹介する。より高強度なSBHS700については、鋼種設計の考え方および平坦度確保のためのプロセス条件の検討内容と特性について報告する。

1. SBHS500の鋼種設計の考え方と特性

1.1 SBHS500の鋼種設計の考え方

優れた靱性と高YPを実現するために、フェライトやMA (Martensite-Austenite constituent) の生成を抑制した微細ベイナイトを目標マイクロ組織とした。図1に連続冷却変態図の概念図を示す。Nbを添加しフェライト析出を抑制し、かつフェライトノーズにかからない適切な冷却速度で冷却することでフェライト析出を抑制した。また、Mn, Cu, Niといったオーステナイト (γ) 安定化元素を添加することで変態温度を低下させている。加えて、未再結晶域圧下により粒内からの変態を促進し、結晶粒微細化を図った。

1.2 SBHS500の特性

1.2.1 母材特性

表3および表4に開発鋼の成分および機械的特性を示す。開発鋼はC添加量を抑制することで溶接割れ感受

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部

性組成 $P_{CM} \leq 0.20$ を満足しているとともに、要求特性にも十分適合している。また、道路橋示方書・同解説で規定された冷間曲げ加工の内側半径を板厚の5倍以上を想定した場合のシャルピー吸収エネルギー200 J以上²⁾も満足している。

1.2.2 溶接性および溶接継手特性

開発鋼に対して、y形溶接割れ試験を実施した溶接条

件および試験結果を表5に示す。 $P_{CM} \leq 0.20$ のため、予熱なしでも割れは発生しなかった。

橋梁製作のフランジ同士の板継ぎ溶接を模擬して、SAW (Submerged Arc Welding) 後の特性を評価した。開先形状および断面マクロ結果を図2、図3に示す。表6に溶接条件および継手特性を示す。パス間温度250℃以下で引張、衝撃特性ともに十分な特性を有している。

表1 SBHSシリーズの機械的特性
Table 1 Mechanical Properties of SBHS series

Steel	Tensile test		Charpy impact test	
	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	Test temp. (°C)	Energy (J)
SBHS400 SBHS400W	≧ 400	490~640	0	≧ 100
SBHS500 SBHS500W	≧ 500	570~720	-5	
SBHS700 SBHS700W	≧ 700	780~930	-40	

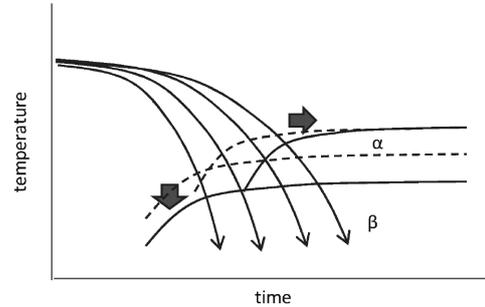


図1 CCT曲線の概念図
Fig.1 Conceptual diagram of CCT curve

表2 P_{CM} と予熱温度の比較
Table 2 Comparison of P_{CM} and preheating temp.

Strength	Steel	Classification	Thickness(mm)			
			t ≦ 25mm	25 < t ≦ 40	40 < t ≦ 50	50 < t ≦ 100
490N/mm ²	SM490Y SMA490W	P_{CM}	SM490Y		0.26(80°C)	
		(Preheating temp.)	SMA490W	0.26(-)	0.27(80°C)	0.29(100°C)
	No preheating required P_{CM}	-	0.24	0.22		
570N/mm ²	SM570	P_{CM} (Preheating temp.)	0.26(-)	0.27(80°C)	0.29(100°C)	
		No preheating required P_{CM}	-	0.24	0.22	
	SBHS500(W)	P_{CM} (Preheating temp.)	≦ 0.20(-)			
780N/mm ²	HT780	Minimum preheating temp.	100		120	
	SBHS700(W)	Minimum preheating temp.	50			

表3 開発鋼の化学成分の一例 (SBHS500)
Table 3 Example of chemical compositions of developed steel (SBHS500)

Steel	Chemical composition(mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	N(ppm)	Others	P_{CM}
Developed Steel	0.04	0.32	1.93	0.004	0.001	40	Cu, Ni, Nb, Ti	0.17
Spec.	≦ 0.11	≦ 0.55	≦ 2.00	≦ 0.020	≦ 0.006	≦ 60	-	≦ 0.20

表4 開発鋼の機械的特性の一例 (SBHS500)
Table 4 Example of mechanical properties of developed steel (SBHS500)

Thickness (mm)	Tensile test		Charpy impact test
	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	vE ₅ (J)
6	551	627	-
25	588	632	365
50	574	652	338
80	538	620	328
100	546	636	318
Spec.	≧ 500	570~720	≧ 100

表5 y形溶接割れ試験結果 (SBHS500)
Table 5 Results of y-groove weld cracking test (SBHS500)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Welding condition	Heat input (kJ/mm)	Crack(%)			
					Preheating temperature(°C)	Surface	Root	Section
50	SMAW	Wire : LB-62UL	170A-24V -150mm/min	1.6	5	0	0	0
					25	0	0	0

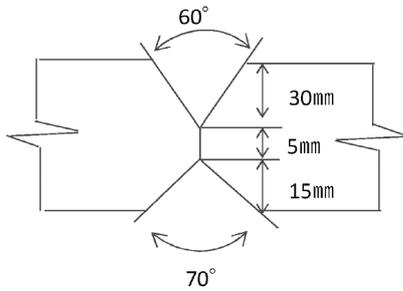


図2 SAWの開先形状 (SBHS500)
Fig.2 Tip shape of SAW (SBHS500)

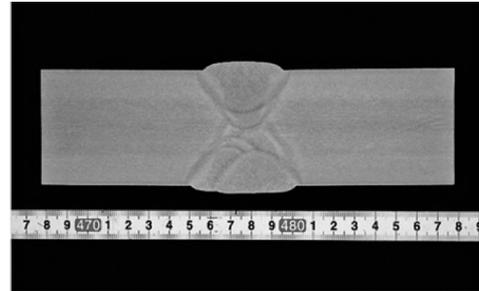


図3 SAWの断面マクロ写真 (SBHS500)
Fig.3 Macroscopic photograph of SAW (SBHS500)

表6 溶接条件および継手特性 (SBHS500)
Table 6 Welding conditions and mechanical properties of welded joint (SBHS500)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Preheating temperature(°C)	Interpass temperature(°C)	Heat input (kJ/mm)	Tensile test		Charpy impact test				
						TS (N/mm ²)	Fracture Area	vE ₅ (J)				
								Position	Depo	Fusion line	FL+1mm	FL+3mm
50	SAW	Wire : US-40 Flux : MF-38	-	~250	~9.2	640	Base Metal	t/4	97	116	248	373
Spec.						≧570	-	≧47				

2. SBHS700の鋼種設計の考え方と特性

2.1 SBHS700の鋼種設計の考え方

2.1.1 鋼種設計の課題

表7に当社溶接構造用高張力鋼板K-TENTM780とSBHS700機械的特性規格値を示す。SBHS700の特徴として、K-TENTM780と引張強度は同じであるがYPが異なる(すなわち高YP化が必要である)ことが特徴である。780 N/mm²級の強度を確保するには上部ベイナイト組織を活用することが一般的である。しかし、MAを含むとYPが低下するため³⁾、MAを含まない上部ベイナイト組織を目標組織とし、粒子分散強化による高YP化を図った。それを実現するプロセス条件として、加速冷却時の冷却速度と冷却停止温度を適正化した。

また、今後、SBHS700は道路橋示方書・同解説に追記される予定のため、平坦度基準はJISより厳しい道路橋示方書・同解説で規定された値を満足させることを目標とし加速冷却時の水量条件の適正化を図った。

以上、SBHS700開発における二つの課題(高YP化、平坦度確保)に対し、強化機構およびプロセス条件について検討した。

2.1.2 高YP化のための強化機構の検討

上部ベイナイト変態では、ベイニティックフェライトが析出した後に、未変態 γ へ吐き出されたCが濃縮しセメンタイトが析出する。そして、その析出形態は冷却速度に依存することが知られている⁴⁾。そのため、過去知見から最大厚75mmでも5°C/sec.以上の冷却速度を確保した。いっぽうで、冷却停止温度の影響は不明確なため、セメンタイト析出挙動に及ぼす冷却停止温度影響を評価した。図4に、ベイナイト組織におけるセメンタイト形成過程の模式図を示す。前述のように、ベイナイト変態はベイニティックフェライト析出後に排出されたCの拡散を伴いセメンタイトが形成される。この際、十分に速い冷却速度で変態開始温度(Bs)から終了温度

表7 SBHS700とK-TENTM780の機械的特性
Table 7 Mechanical properties of SBHS700 and K-TENTM780

Steel	Thickness (mm)	Spec.	
		YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)
SBHS700	≦100	≧700	780~930
K-TEN TM 780	≦50	≧685	780~930
	50 < t ≦ 100	≧665	

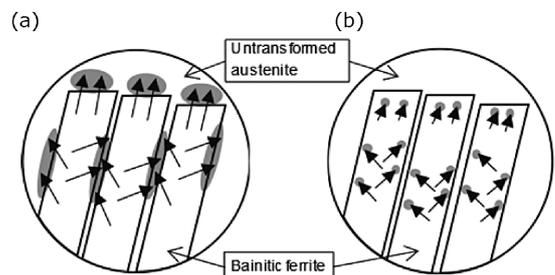


図4 セメンタイト形成過程の模式図
(a) 拡散距離が長い (b) 拡散距離が短い
Fig.4 Schematic diagram of cementite formation process
(a) Long diffusion distance (b) Short diffusion distance

(Bf)の間まで連続的に冷却を行えば、Cの拡散距離が短くなりセメンタイトは粒内に微細に析出する。いっぽう、加速冷却をBf以上で停止しその後空冷した場合、Cの拡散が可能となり、セメンタイトはベイニティックフェライト粒界に析出すると考えられる。図5に示すように、セメンタイト分散状態は加速冷却停止温度に影響を受けることが分かった。そこで、Bs~Bf間のC拡散度合いを図6に示す冷却温度履歴中の斜線部の温度と時間を積分し下記式にて算出したC拡散距離とYPの関係を整理した。

$$C \text{ 拡散距離} = \int_0^t D dt \dots\dots\dots (1)$$

図7にC拡散距離とセメンタイト粒子間距離、図8にセメンタイト粒子間距離とYPの関係を示す。Bs~Bf間のC拡散距離が短いほどYPが高くなることが分かった。

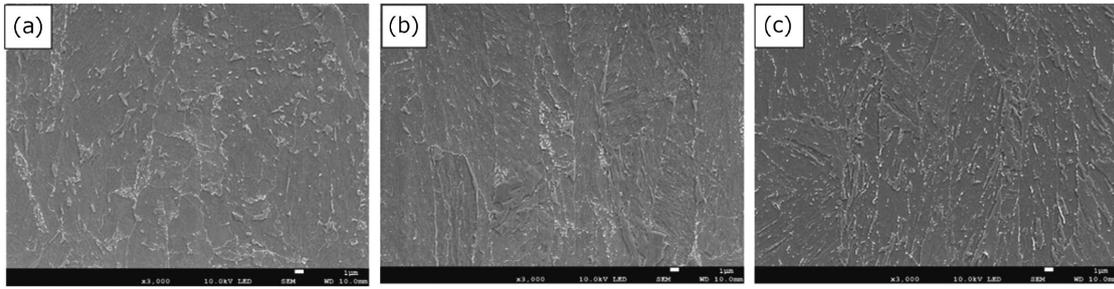


図5 SBHS700のセメンタイトの分散状況 ((a) 500°C停止 (b) 410°C停止 (c) 270°C停止)

Fig.5 Cementite dispersion of SBHS700 ((a) 500°C stop (b) 410°C stop (c) 270°C stop)

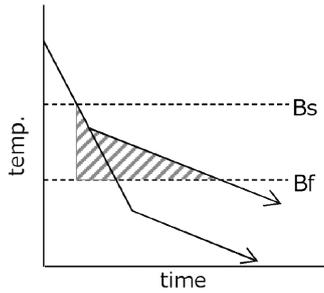


図6 C拡散度合いの模式図
Fig.6 Schematic diagram of carbon diffusion

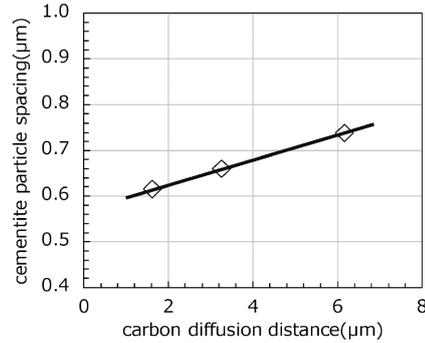


図7 C拡散距離とセメンタイト粒子間距離の関係
Fig.7 Relationship between carbon diffusion distance and cementite particle spacing

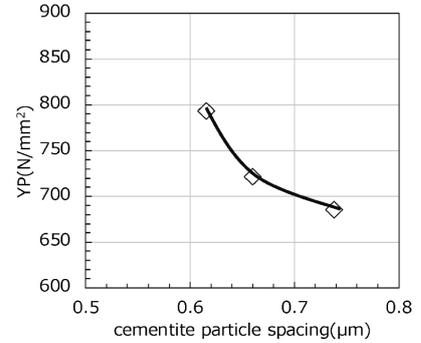


図8 セメンタイト粒子間距離と降伏強度の関係
Fig.8 Relationship between cementite particle spacing and YP

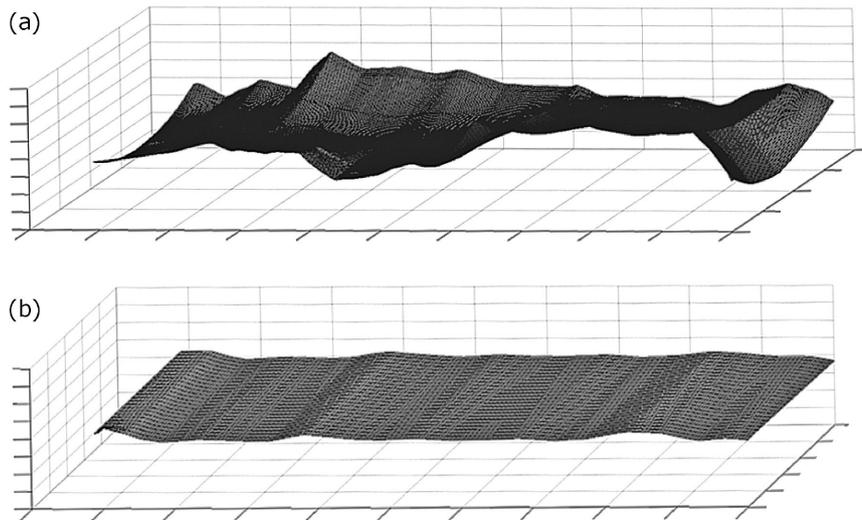


図9 SBHS700の加速冷却後形状のFEM解析結果 ((a) 水量調整前 (b) 水量調整後)

Fig.9 FEM analysis results of shape after accelerated cooling of SBHS700

((a) Before adjusting the water flow rate (b) After adjusting the water flow rate)

以上の結果から、既定のYPを確保するためのセメンタイト粒子分散強化を活用するためには、加速冷却停止温度をBf以下とする必要があることが分かった。

2.1.3 平坦度確保のためのプロセス条件検討

2.1.2項で述べたようにMAを含まない上部ベイナイト組織を形成し所定のYPを満足させるためにはBf以下の加速冷却停止温度とする必要がある。したがって、加速冷却直後のホットレバラー矯正は活用できず、冷却ままでの平坦度制御が必要となる。一般的に加速冷却後の平坦度不良の原因として遷移沸騰冷却があげられる。加えて、長手方向温度偏差に起因する圧縮熱応力Pが臨界座

屈応力 P_{cr} (\propto 鋼板の剛性)を上回って発生する座屈現象も知られている⁵⁾。そのため、熱応力による座屈を抑制する必要がある。

$$P > P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{W^2} \dots\dots\dots (2)$$

熱応力は、冷却中の鋼板長手温度勾配に起因すると考えられるため、FEM解析により座屈の発生しない温度勾配を算出した。それとともに、加速冷却バンク水量の影響を評価した結果、座屈が生じない適切な水量条件を見出した(図9)。以上の技術を活用することで、SBHS700としての機械的特性と平坦度を両立させるこ

表8 開発鋼の化学成分の一例 (SBHS700)

Table 8 Example of chemical compositions of developed steel (SBHS700)

Steel	Chemical composition(mass%)										
	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	B(ppm)	N(ppm)	Others	P _{CM}
Developed Steel	0.05	0.24	1.97	0.004	0.001	0.39	0.002	11	40	Cu,Ni,Ti	0.27
Spec.	≦0.11	≦0.55	≦2.00	≦0.020	≦0.006	≦0.60	≦0.05	≦50	≦60	-	≦0.30

表9 開発鋼の機械的特性の一例 (SBHS700)

Table 9 Example of mechanical properties of developed steel (SBHS700)

Thickness (mm)	Tensile test		Charpy impact test
	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	vE ₋₄₀ (J)
6	784	831	-
12	748	853	-
32	851	874	159
75	796	845	129
Spec.	≧700	780~930	≧100

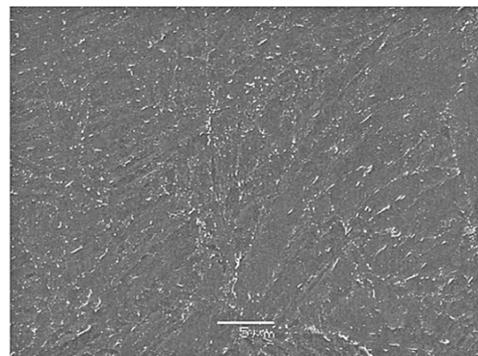


図10 開発鋼のSEM像 (SBHS700)

Fig.10 SEM image of developed steel (SBHS700)

表10 y形溶接割れ試験結果 (SBHS700)

Table10 Results of y-groove weld cracking test (SBHS700)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Welding condition	Heat input (kJ/mm)	Crack (%)			
					Preheating temperature(°C)	Surface	Root	Section
32	GMAW	Wire : MG-S80J	280~300A-30~31V -300~330mm/min	1.7	50	0	0	0
75					50	0	0	0

表11 溶接条件および継手特性 (SBHS700)

Table11 Welding conditions and mechanical properties of welded joint (SBHS700)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Preheating temperature(°C)	Interpass temperature(°C)	Heat input (kJ/mm)	Tensile test		Charpy impact test				
						TS (N/mm ²)	Fracture Area	vE ₋₄₀ (J)				
								Position	Depo	Fusion line	FL+1mm	FL+3mm
32	SAW	Wire : US-80LT Flux : PFH-80AK	100	95~180	5.0	891	Weld Metal	t/4	150	252	259	260
Spec.						≧780	-	≧47				

とが可能となった。

2.2 SBHS700の特性

2.2.1 母材特性

表8に示す化学成分の鋼を用い、2.1節で述べた指針に基づき制御圧延後、Bf以下の加速冷却を実施し焼き戻しを実施した。表9にその母材機械的特性を示す。機械的特性は引張特性、衝撃特性の規格値を満足している。図10にSEM組織を示すが、セメントタイトが微細分散した上部ベイナイト組織であった。

2.2.2 溶接性および溶接継手特性

表10に、y型溶接割れ試験条件と結果を示す。予熱50°Cでも母材に割れが無いことを確認した。表11に溶接条件および溶接継手特性を示す。入熱5kJ/mmで引張、衝撃特性ともに十分な特性を有している。

むすび=今回、橋梁用高降伏点圧延鋼材であるSBHSシリーズについて、当社の鋼種設計の考え方と特性の一例を紹介した。SBHS400(W)、SBHS500(W)の適用実績も増加する中、今後、SBHS700に関しても、特性を踏まえた最適な適用を期待したい。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本鉄鋼協会、「橋梁用高性能鋼材(SBHS)」～一般橋梁から長大橋にいたるまで建設コスト縮減に寄与する～、2019, p.5.
- 2) 公益社団法人 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 鋼橋・鋼部材編. 2017, p.6.
- 3) 山口徹雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.16-19.
- 4) 牧 正志. までりあ. 2007, Vol.46, No.5, p.321-326.
- 5) 吉原直武. 鉄と鋼. 1990, Vol.76, No.6, p.886-893.

(論文)

高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼板 エコビュー プラス™

松林拓人*1・高橋佑輔*1(博士(工学))・湯瀬文雄*2(博士(工学))・松下政弘*3・田畑晃人*4・山口徹雄*5

Corrosion Resisting Steel Eco-view Plus™, a Repaint Term Extension under High Humid Environment

Takuto MATSUBAYASHI・Dr. Yusuke TAKAHASHI・Dr. Fumio YUSE・Masahiro MATSUSHITA・Akito TABATA・Tetsuo YAMAGUCHI

要旨

橋梁など交通インフラは建設から架け替えまでにかかるライフサイクルコストの縮減が求められるなか、鋼橋においては桁端部のような厳しい腐食環境にさらされる箇所における塗膜下腐食対策が課題である。塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス」は鋼材中に含まれる Ta, Mg, REM (希土類元素) がそれぞれ、介在物の耐食性向上による鋼材の高耐久化、ジンクリッチペイントの Zn さび形成促進による腐食環境の遮断、ならびに塗膜-鋼材界面の保護機能をそれぞれ付与し、一般鋼材と比較して塗膜膨れの成長に要する期間を2倍程度延長する効果を有することから、橋梁端部に適用することで鋼橋のライフサイクルコスト縮減が期待できる。

Abstract

In transportation infrastructure such as bridges, there is demand for reduction of life-cycle costs from construction through to rebuilding. For steel bridges, a key challenge is addressing corrosion under paint coatings, particularly in areas exposed to harsh environments, such as girder ends and edges. "Eco-view Plus" is a corrosion-resisting steel that contains Ta, Mg, and rare earth metals (REM) which improve the steel's corrosion resistance under painting by enhancing the corrosion resistance of inclusions, and promoting the formation of zinc rust by zinc-rich paint which shields steel surface and the coating-steel interface from corrosive environments. Eco-view Plus can extend the time for the growth of coating blisters to approximately twice than that of conventional steel materials. Its application to girder ends and edges is therefore expected to significantly reduce the life-cycle cost of steel bridges.

検索用キーワード

橋梁, ライフサイクルコスト, 塗膜下耐食鋼 エコビュー, エコビュー プラス

まえがき = 持続可能な社会の実現に向け、橋梁などの道路インフラにおいては建設・維持管理・補修・架け替えまでにかかる人的負荷、財政面を考慮したライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, 以下LCC) が重要視されている。鋼橋においては鋼材の腐食が代表的な損傷原因であることから、LCC縮減対策として鋼材の高耐食化や塗装による防食処理が不可欠である^{1), 2)}。とくに図1に示すような桁端部では路面からの雨水や土砂が流入し、加えて風通しの悪い閉塞的な構造により水分や塩分など

の腐食因子が長時間滞留するためほかの箇所よりも厳しい腐食環境となり、鋼板と塗装の界面で塗膜下腐食が発生しやすい³⁾。その結果塗装による防食機能が低下するため一定の周期で塗替えを行う必要があり、維持管理コストがかさむ要因となっていることから、各種対策が検討されている^{4)~6)}。このような厳しい腐食環境にさらされる箇所に塗膜下腐食に対する耐久性に優れた鋼材 (以下、塗膜下耐食鋼) を用いることで、塗装塗替えまでにかかる期間を延長できればLCC縮減が期待できる⁷⁾。

これまで当社は塗装塗替え周期延長を指向した塗膜下耐食鋼の開発にいち早く取り組み、鋼材に塗膜下腐食抑制の機能を付与した「エコビュー」の商品化により橋梁のLCC縮減に貢献してきた^{8), 9)}。さらに今般、橋梁のなかでも塗装が薄くなる板端部や腐食環境の厳しい桁端部におけるさらなる耐食性向上を目指し、鋼材自身の耐食性能と塗装のもつ防食機能それぞれを強化する効果を併せ持つ塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス^{注)}」を開発した。本製品は橋梁機能の維持に必要な塗装塗替え周期延長効果に優れ、とくに飛来塩分量の多い沿岸部や凍結防止剤を多用する豪雪地帯などの腐食環境の厳しい地域

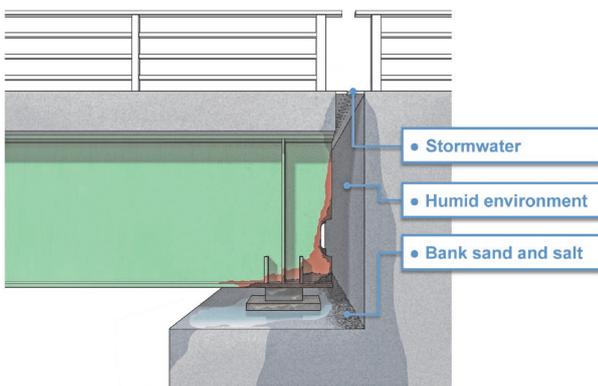


図1 橋梁端部における腐食環境イメージ

Fig.1 Image of corrosion environment at bridge abutment

脚注) 登録商標第6769816号

*1 技術開発本部 材料研究所 *2 (株)コベルコ科研 材料ソリューション事業部 腐食防食評価部 *3 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部
*4 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部 *5 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部

における橋梁のLCC縮減効果が期待できる¹⁰⁾。また溶接施工性や溶接継手における引張特性、耐衝撃性も良好であり、橋梁向け溶接構造用圧延鋼材のJIS SMおよびSBHSの母材規格も満たしていることから、従来鋼と同様に扱うことができる¹¹⁾。本稿では、エコビュープラスの特徴である塗膜下耐食機能発現のメカニズム、および塗装塗替え周期延長効果について紹介する。

1. エコビュープラスの特徴

エコビュープラスはエコビューの成分系であるCu-Ni-Ti系を継承しつつ、さらにTa, Mg, REM (Rare Earth Metal; Ce, La) を適量添加することで、鋼材の表面を腐食環境から保護し、耐食性を高めているのが特徴である。一般的な鋼材の塗膜下腐食発生メカニズム、およびエコビュープラスにおける塗膜下腐食抑制メカニズムを図2に示す。なお、塗装系は近年主流とされている重防食塗装を想定している¹²⁾。塗装鋼材は角部や端部で塗膜むらや欠陥部が存在し、これらを起点として水分などの腐食促進因子が鋼材表面に侵入して腐食が発生する。通常の鋼材は腐食に伴い塗膜下でFeを主成分とするさびが成長することで塗膜に膨れや割れが生じ腐食が進行する。いっぽうエコビュープラスは添加成分の働きによりFeさびの発生を抑えつつ、ジンクリッチペイントの持つZnさび生成と鋼材表面の保護機能を促進することで塗装の持つ防食機能を高め、塗膜下腐食を抑制することが特徴である。

本章ではTaおよびMgの添加による鋼材の塗膜下耐食性向上コンセプトの検証およびメカニズムについて紹介する。

1.1 腐食発生起点の無害化による鋼材の高耐食化

一般的に鋼材中には母材に含まれる微量成分から成る介在物が存在し、これらが鋼材自身よりも溶解しやすいと腐食の発生起点となることが知られている¹³⁾。このような介在物を起点とする腐食の抑制対策として、鋼材中の添加元素により介在物を改質し、電気化学的に安定化させることが有効であると報告されている^{14)~16)}。そこでJIS G3106溶接構造用圧延鋼材 (SM) を基準鋼として腐食起点となる介在物を不溶化する元素の探索を行った。

表1に示すとおり基準鋼の表面にはSやC, Mnなどから成る介在物が見られた。いっぽう基準鋼にTiを添加したTi添加鋼では介在物表面にTiを主成分とする化合物が析出した。またTiとTaを複合添加したTi-Ta添加鋼でもTi添加鋼と同様に、TiやTaを主成分とする化合物が介在物表面に析出している様子が確認された。この結果から、介在物の被覆にはTiやTaの添加が有効であることが示唆された。

続いてTiやTaの添加による介在物の耐食性向上効果を確認するため、分極試験にて各鋼材の腐食発生電位の測定を行った。試験はステンレス鋼の孔食発生電位測定法JIS G0577を参考に0.15M H₃BO₃-0.0375M Na₂B₄O₇-0.010M NaCl水溶液中25℃にて行い、アノード分極中の電流密度が10⁻⁵ A/cm²を超えた時点の電位を鋼材の腐食発生電位 (Vc) とした。図3に示すとおり、基準鋼のVcは-0.024 Vであるのに対し、Ti添加鋼では0.056 Vとなり腐食発生電位の上昇がみられた。またTi-Ta添加鋼のVcは0.55 Vとなり鋼材の耐食性が大幅に向上していることが示唆された。これらの結果からTiやTaの添加は介在物表面の被覆による電気化学的安定化に有効であり、とくに両者の複合添加によりその効果が大きいことがわかった。

図4に鋼材へのTa添加量に対するVcを5回測定した

表1 各鋼材中の介在物のSEM像および元素組成
(a) 基準鋼, (b) Ti添加鋼, (c) Ti-Ta添加鋼

Table 1 SEM image and elemental composition of inclusions on (a) SM, (b) Ti-SM, (c) Ti-Ta-SM

SEM image									
(a) SM	(b) Ti-SM	(c) Ti-Ta-SM							
Elemental composition (at%)									
Point	C	N	Al	S	Ca	Ti	Mn	Fe	Ta
a	30	-	-	21	2	-	21	25	-
b	18	20	2	1	1	50	-	8	-
c	35	6	-	-	-	20	-	24	15

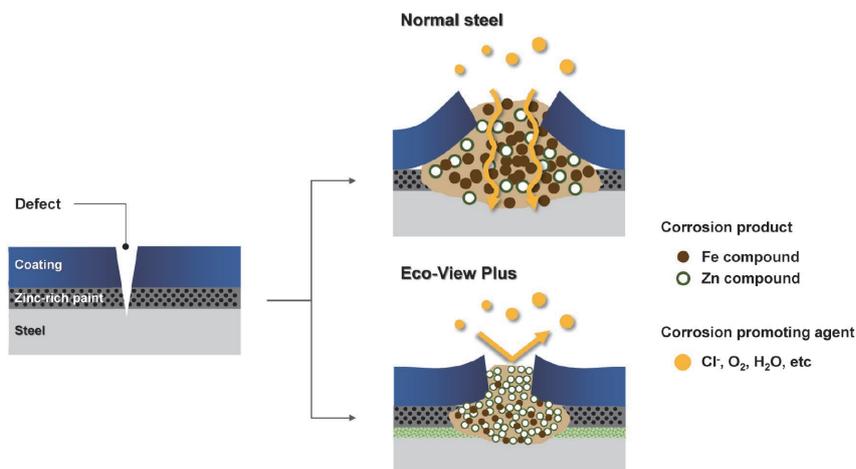


図2 エコビュープラスの塗膜下腐食抑制メカニズム
Fig.2 Inhibition mechanism of under-film corrosion of Eco-View Plus

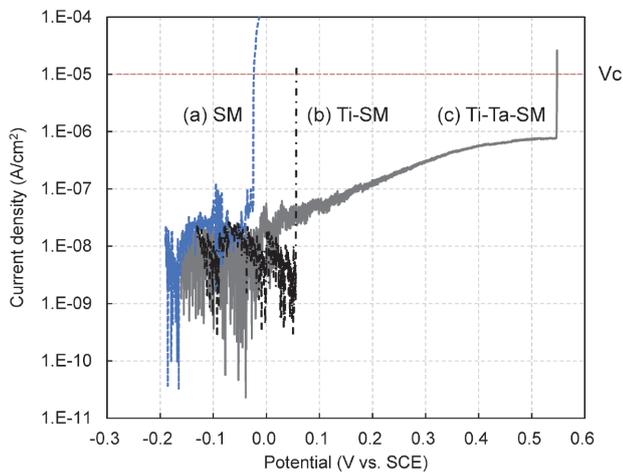


図3 各鋼材のアノード分極測定結果
(a) 基準鋼, (b) Ti添加鋼, (c) Ti-Ta添加鋼

Fig.3 Anodic polarization curves of (a) SM, (b) Ti-SM, (c) Ti-Ta-SM

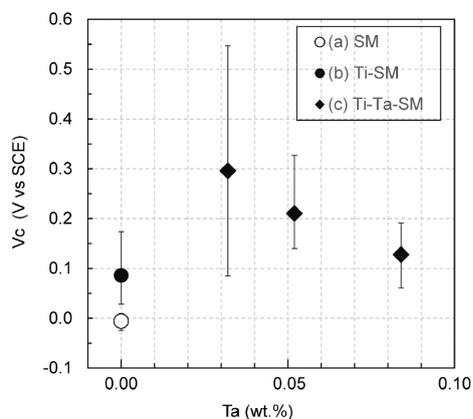


図4 Ta添加量に対する鋼材のVc
(a) 基準鋼, (b) Ti添加鋼, (c) Ti-Ta添加鋼

Fig.4 Plot of Vc with Ta content of steels
(a) SM, (b) Ti-SM, (c) Ti-Ta-SM

平均値を示す。Taの添加量が0.03%のTi-Ta添加鋼ではVcが基準鋼やTi添加鋼と比較して増加しており、耐食性が向上した。いっぽう添加量をそれ以上増加させても耐食性の向上は見られなかった。図5はTa添加量の異なるTi-Ta添加鋼の介在物観察結果を示しており、Ta添加量の増加に伴いTa系化合物の析出量も増加していることがわかった。これらの結果からTa添加による介在物被覆の効果には一定の上限があり、過剰に添加しても介在物被覆に関与しないTa化合物が析出するため、耐食性に与える影響が飽和すると考えられる¹⁴⁾。

以上の結果からTiおよびTaを適量添加することにより腐食起点となる介在物を被覆し、鋼材の耐食性を改善できることがわかった。

1.2 塗装成分とのマッチングによる腐食環境の遮断

近年橋梁の下地塗装として主流になりつつあるジンクリッチペイントは塗膜中に含まれる金属亜鉛粒子が腐食環境中で鋼材に対して犠牲防食能を示す。また溶出した亜鉛は腐食生成物(Znさび)を形成して鋼材表面を覆い腐食環境から遮断する保護効果を有している。とくにMgなどの塩基性化合物共存化で生成する塩基性Znさびは結晶が緻密で化学的に安定なため、保護効果に優れ

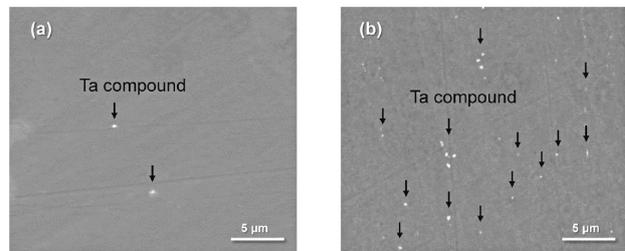


図5 Ta量の異なるTi-Ta添加鋼の介在物SEM像
(a) Ta 0.03wt%, (b) Ta 0.08wt%

Fig.5 SEM image of inclusions in Ti-Ta-SM with different Ta content
(a) Ta 0.03wt%, (b) Ta 0.08wt%

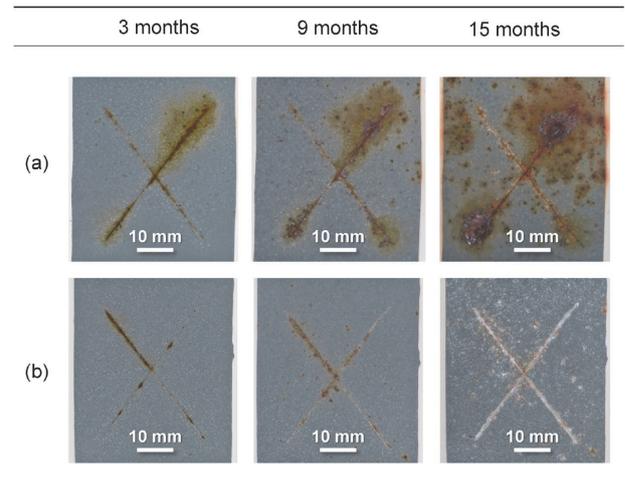


図6 (a) 基準鋼と (b) Mg添加鋼の塗装後、宮古島暴露試験における外観変化

Fig.6 Appearance of painted steels of (a)SM and (b)Mg-SM during exposure test at Miyakojima

ることが報告されている¹⁷⁾。そこでジンクリッチペイント塗膜下で生成するZnさびの環境遮断効果におよぼす鋼板へのMg添加の影響を調査した¹⁸⁾。

基準鋼、およびMg添加鋼(Mg-SM)にジンクリッチペイントを下塗り(塗膜厚 $35\mu\text{m}$)したあとポリウレタン塗装を上塗りし(塗膜厚 $25\mu\text{m}$)、塗装時の傷や薄膜部を模擬するため塗膜にカッターナイフでクロスカットを入れ、沖縄県宮古島の一般財団法人日本ウエザリングテストセンターにて1.5年間の屋外暴露試験に供した。なお塗膜下で生じる腐食生成物の外観観察のため上塗りにはクリア塗装とした。

図6に基準鋼とMg添加鋼の暴露試験中における外観変化を示す。基準鋼では暴露開始3箇月後にはクロスカット部周囲に赤褐色のFeさびが発生した。いっぽうMg添加鋼ではFeさびの発生は基準鋼と比べて抑制されていた。9箇月後、基準鋼ではクロスカット以外の塗装健全部からもFeさびが発生していたのに対し、Mg添加鋼ではクロスカット部に白色のZnさびの生成が確認された。15箇月後では基準鋼のほぼ全面にFeさびが広がっており塗装の膨れや剥離が多数みられた。Mg添加鋼でも塗装健全部からさびが成長しているものの、そのほとんどがZnさびであり、腐食生成物に顕著な違いが見られた。

暴露試験終了後の試験片の傷部周辺の断面観察、および成分分析結果を図7に示す。基準鋼ではZnさびと母

材の間にFeさびが厚く成長しており、ClがFeさびの内部まで侵入している様子が確認された。いっぽうMg添加鋼ではZnさびが鋼材表面を覆うように成長し、Feさびの生成が抑制されていた。またClのほとんどはZnさびの表面に濃化しており、さびの内部には侵入していないことがわかった。

試験片表面に生成した腐食生成物の結晶相、および結晶子サイズをX線回折法にて同定した結果を表2に示す。Mg添加鋼では基準鋼と異なりFeさびの主成分であるFeOOH系化合物が検出されず、代わりにSimonkolleiteやGordaititeなどの塩基性亜鉛化合物の構成比率が高く、Gordaititeについては結晶子が基準鋼と比べて微細化していることがわかった。以上の結果から、鋼材にMgを追加することで腐食環境中における塩基性Znさびの生成が促進され、高い防食機能が得られることがわかった。

1.3 塗膜－鋼材界面の保護

REMは水と反応して緻密な水和酸化物の沈殿を形成し、鋼材の表面に保護性の被膜を形成して耐食性を向上させることが知られている¹⁹⁾。従って鋼材にREMを追加することで、塗膜－鋼材界面に侵入した水分と鋼材中のREMが反応し、鋼材表面に緻密な被膜を形成するこ

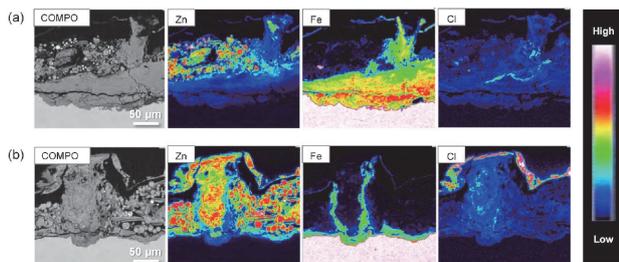


図7 暴露試験後の(a)基準鋼および(b)Mg添加鋼のクロスカット近傍における腐食生成物の断面分析結果

Fig.7 Cross-sectional images of corrosion product of (a)SM and (b) Mg-SM after exposure test

表2 暴露試験後の腐食生成物の組成および結晶子径

Table 2 Composition and crystallite diameter of corrosion product of steels after exposure test

Corrosion products	SM		Mg-SM	
	Fraction (%)	Crystallite diameter (nm)	Fraction (%)	Crystallite diameter (nm)
Fe based compound	α -FeOOH (Akaganeite)	31.6	20.7	-
	β -FeOOH (Goethite)	19.3	27.6	-
Zn based compound	$Zn_2(OH)_2Cl_2 \cdot H_2O$ (Simonkolleite)	-	-	20.6
	$NaZn_2(SO_4)Cl(OH)_6 \cdot (H_2O)_6$ (Gordaitite)	8.9	95.4	26.1
	ZnO (Zincite)	35	36.7	45.2
	Metal Zn	5.2	-	8.0

とで鋼材と塗膜界面の保護性を向上させることが期待できる。なお、REMの効果については本稿でこれ以上詳しく触れないがREM水溶液中の分極試験において鋼材の腐食電位上昇効果を確認しており、別の機会に紹介したい。

2. エコビュー プラスの開発

1章で紹介したとおり、TaやMgはそれぞれ異なるメカニズムにより鋼材の耐食性改善、および腐食環境遮断効果があることが確認された。そこで当社塗膜下耐食鋼であるエコビューにこれら元素およびREMを複合添加することで、橋梁桁端部など厳しい腐食環境下においても高耐久化が期待できる。これらの考え方をもとに高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス」を開発した。本章ではエコビュー プラスの塗膜下耐食性評価結果、および本製品の適用によって期待される塗装塗替え周期延長効果について紹介する。

2.1 複合サイクル試験による塗膜下耐食性の評価

表3に示す組成の基準鋼、およびエコビュー プラスの塗膜下耐食性を複合サイクル試験 (Cyclic Corrosion Testing, 以下CCT) にて評価した。塗装仕様は現在橋梁で主流であるC5塗装系を想定し、防食下地をジンクリッチペイント、中塗りをエポキシ系塗装、上塗りをフッ素系塗装とした三層構造とし、試験期間短縮のため塗膜厚を通常よりも薄めの仕様とした²⁰⁾。各鋼材を塩水噴霧-湿潤-乾燥の環境に繰り返し暴露させ、2週間ごとにクロスカット部周囲で生じる塗膜膨れ幅、および面積を評価した。なおCCT試験条件は橋梁桁端部の環境を模擬するため、JIS K 5600-7-9 Cycle Dの条件をベースに、実際の橋梁端部での環境モニタリング結果に基づき表4のとおりに設定した。²¹⁾

図8に複合環境サイクル試験16週目のクロスカット部の外観を示す。基準鋼のクロスカット部近傍では茶褐色を呈するFeさびが発生し、さらに塗膜下腐食に伴い生成したさびの体積膨張により塗膜膨れが生じた。いっぽうエコビュー プラスでは1.2節で紹介した暴露試験と同様、クロスカット部近傍は白色を呈しており、Znさびの生成とFeさびの成長抑制効果が確認された。また、塗膜の膨れ幅、膨れ面積ともに基準鋼よりも小さくなった。

2.2 塗装塗替え周期延長効果

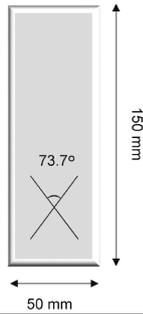
図9に各鋼の傷部における膨れ幅、および膨れ面積の経時変化を示す。エコビュー プラスは基準鋼に比べ膨れ幅、膨れ面積ともに増加が抑えられる傾向にあり、例えば一定の膨れ幅 (5.0 mm) に達するまでに要する

表3 基準鋼およびエコビュー プラスの組成

Table 3 Chemical compositions of SM and Eco-View Plus

Steel	Elemental composition (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti	Others
SM (JIS G3106)	0.17	0.36	1.38	0.015	0.003	0.01	0.04	0.01	0.001	-
Eco-View plus	0.05	0.30	1.24	0.010	0.001	0.70	<0.01	0.48	0.05	Ta, REM, Mg

表4 複合サイクル試験条件
Table 4 Cyclic corrosion test (CCT) conditions

Sample image	Surface preparation	CCT process	Environment	Time
	Sand blast • ISO Sa2 1/2 <hr/> Coating • Inorganic zinc 35 μm • Epoxide (Clear) 20 μm • Fluoride (Clear) 20 μm	Salt spray	30°C ± 2°C 5% NaCl	0.5 h
		Condensation humidity	30°C ± 2°C 95 ± 3%RH	2.5 h
		Air drying 1	50°C ± 2°C 20 ± 3%RH	1.5 h
		Air drying 2	30°C ± 2°C 20 ± 3%RH	1.5 h

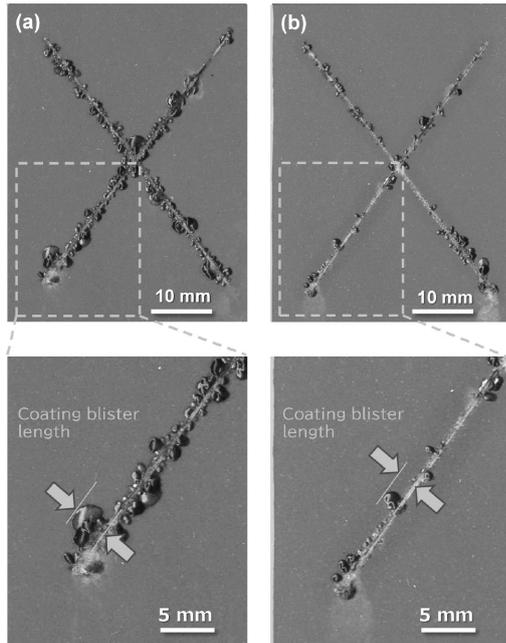


図8 複合サイクル試験16週目の塗装試験片外観
(a) 基準鋼, (b) エコビュー プラス
Fig.8 Appearance of painted steels of
(a) SM and (b) Eco-View Plus after 16 weeks of CCT

時間は、基準鋼、エコビュー プラスでそれぞれ10.3週、15.5週となり約1.5倍の時間を要する結果となった(図9(a))。

鋼板の塗装寿命については、塗膜膨れ面積の経時変化を塗膜劣化曲線で回帰し、一定の劣化面積に達するまでの期間を予測する方法が種々提唱されている²²⁾。今回のような初期段階の塗膜劣化結果から長期間の劣化挙動を推定する場合にはGompertz曲線を用いた方法²³⁾が適用できることから、(1)式に示すGompertz曲線により塗装塗替えまでに要する期間の見積もりを行った。

$$y(t) = K \cdot a^{bt} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $y(t)$: 塗膜の膨れ面積 (mm²)
 K : 評価部の面積 (mm²)
 t : 試験時間 (week)
 a, b : 定数 ($0 < a, b < 1$)

なお、 $y(t)$ は鋼材の劣化面積を意味することからFeさび面積と定義し、 K の値は表4に示すクロスカット部が全て含まれるよう2,000 mm² (縦50 mm × 幅40 mm)

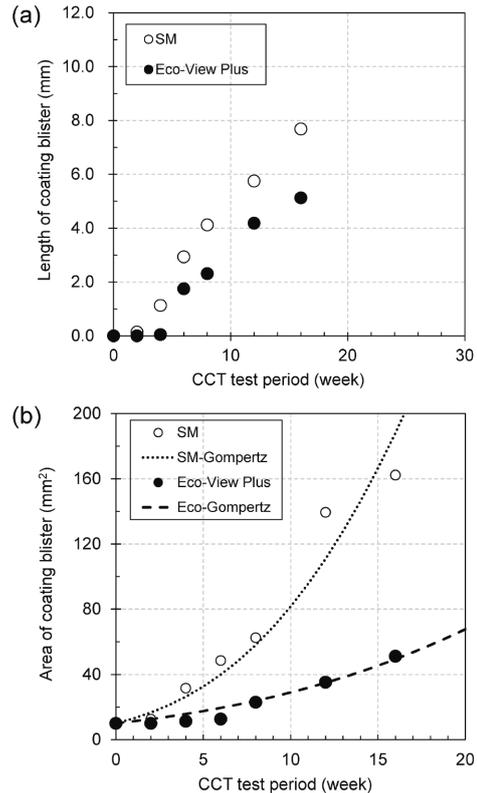


図9 各種鋼材のCCT試験中における塗膜膨れの
(a) 最大幅, および (b) 面積の経時変化
Fig.9 Changes in (a) maximum length and (b) total area of coating blister on steels during CCT

表5 Gompertz曲線回帰による鋼板の塗装塗替え周期予測結果
Table 5 Prediction results of repainting cycles on steels with Gompertz curve

Steel	K (mm ²)	a	b	Correlation coefficient	t _{6.6} (week)
SM	2,000	0.005	0.9982	0.94	14
Eco-View Plus	2,000	0.005	0.9992	0.89	29

とした。また初期劣化面積率 ($t=0$ における a)を0.5%とした。図9(b)および表5に膨れ面積の経時変化をGompertz曲線で回帰した結果を示す。塗装塗替え周期の目安は、膨れ面積が塗装面全体の6.6~36.8%に達するまでの期間と考えられており²³⁾、最短の6.6%、すなわち $y = 132 \text{ mm}^2$ に達するまでに各鋼が要する時間 ($t_{6.6}$)

を算出すると、基準鋼、エコビュー プラスでそれぞれ14週、29週となった。このことから、エコビュー プラスは基準鋼と比べ、橋梁桁端部を模擬した環境において約2倍の塗装塗替え周期延長効果を有するものと考えられる。

むすび = 橋梁端部における厳しい腐食環境でも高い耐食性を発揮する高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス」を開発した。エコビュー プラスは Ta, Mg, REMの複合添加により①Taによる鋼材の高耐食化、②Mgと塗装成分との機能マッチングによる腐食環境の遮断、ならびに③REMによる塗装-鋼材界面の保護機能を付与し、高湿潤・高塩分環境における鋼板の塗膜下腐食を抑制する。本製品を橋梁の中でも塗装寿命の短い端部に適用することで塗装塗替え周期を延長し、橋梁機能の維持に必要な管理・メンテナンスコストを抑え、LCC縮減に貢献できると考えている。

謝辞：本研究および製品開発にあたり宮城県大河原土木事務所、山形県県土整備部道路整備課の皆様には多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 玉越隆史. 国土技術政策総合研究所資料. 2008, No.482, p.47-68.
- 2) 日本橋梁建設協会技術短信. 2009, No.10.
- 3) 玉越隆史ほか. 国土技術政策総合研究所資料. 2006, No.294, p.1-56.
- 4) 日本橋梁建設協会技術短信. 2011, No.11.
- 5) 玉越隆史ほか. 国土技術政策総合研究所資料. 2012, No.684, p.1-94.
- 6) 細井章浩ほか. 構造工学論文集. 2011, Vol.57A, p.669-680.
- 7) 松本剛司ほか. DNTコーティング技報. 2005, No.5, p.17-22.
- 8) 古川直宏ほか. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.1, p.47-52.
- 9) 湯瀬文雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.1, p.6-10.
- 10) 湯瀬文雄ほか. 土木学会全国大会第78回年次学術講演会. 2023, V-261.
- 11) 田畑晃人ほか. 土木学会東北支部技術研究発表会. 2023, I-21.
- 12) 重防食塗装ガイドブック第4版, 社団法人日本塗料工業会, 2020, p.84-96.
- 13) I. Muto et al. J. Electrochem. Soc. 2009, Vol.156, C395.
- 14) 河盛 誠ほか. 材料と環境. 2015, Vol.64, No.7, p.320-323.
- 15) M. Kawamori et al. Mater. Trans. 2021, Vol.62, No.9, p.1359-1367.
- 16) 西澤夏来ほか. 材料と環境. 2015, Vol.64, No.7, p.324-327.
- 17) 小松厚志ほか. 鉄と鋼. 2000, Vol.86, No.8, p.534-541.
- 18) 湯瀬文雄ほか. 関西土木工学交流発表会. 2023, I-30.
- 19) 荒牧國次. 材料と環境. 2007, Vol.56, No.7, p.292-300.
- 20) 日本道路協会. 鋼道路橋防食便覧. 2014.
- 21) 湯瀬文雄ほか. 土木学会東北支部技術研究発表会. 2022, I-31.
- 22) 藤原 博ほか. 土木学会論文集. 2002, No.696/I-58, p.111-123.
- 23) 伊藤義人ほか. 土木学会論文集. 2004, No.766/I-68, p.291-307.

(論文)

疲労抑制鋼板 EX-Facter™ による鋼床版デッキプレート・Uリブ溶接継手の疲労耐久性向上

伊藤孝矩*¹(博士(工学))・高嶋康人*¹(博士(工学))・杵渕雅男*¹(博士(工学))・松下政弘*²・田畑晃人*³・山口徹雄*⁴

Improving Fatigue Durability of U-rib to Deck Welded Joints of Orthotropic Steel Decks with EX-Facter™ Fatigue Crack Initiation Resistant Steel

Dr. Takanori ITO · Dr. Yasuhito TAKASHIMA · Dr. Masao KINEFUCHI · Masahiro MATSUSHITA · Akito TABATA · Tetsuo YAMAGUCHI

要旨

鋼床版のデッキプレート・Uリブ溶接継手に発生するデッキプレート貫通型疲労き裂の抑制を目的に、固溶強化元素 (Si, Cu, Ni, Cr) を最適添加した疲労抑制鋼板 EX-Facter の疲労寿命延長効果を検証した。対象の疲労き裂は、母材と溶接金属の境界近傍に存在する溶接熱影響部 (HAZ) において発生する。そのため、HAZ の疲労強度向上が疲労寿命の改善において重要である。まず、熱サイクル試験で再現した HAZ 組織を用いた疲労試験により、汎用鋼と比べて EX-Facter の疲労強度が大きく向上することを確認した。さらに、継手模擬材を用いた検証でも有効性を実証し、橋梁構造物の長寿命化に寄与する鋼板である可能性を示した。

Abstract

The fatigue life extension effect of the EX-Facter, a fatigue crack initiation resistant steel plate with an optimal addition of solid solution strengthening elements (Si, Cu, Ni, Cr), has been investigated to suppress fatigue cracks that occur in U-rib to deck welded joints of orthotropic steel decks. These fatigue cracks appear in the heat-affected zone (HAZ) of welding, which is the region of the base metal adjacent to the weld metal. Therefore, improving the fatigue strength of the HAZ is vital for improving the fatigue life. First, fatigue tests using HAZ structures simulated by heat cycle tests have confirmed that the fatigue strength of the EX-Facter has been significantly improved compared with conventional structural steels. Furthermore, its effectiveness has been verified using joint-simulation specimens, and it has been shown that the EX-Facter is a steel plate that can contribute to the extension of the fatigue life of bridge structures.

検索用キーワード

疲労, 疲労寿命, 疲労き裂発生, 固溶強化, 溶接熱影響部, 鋼床版, 溶接継手

まえばき = 橋梁は、社会インフラを構成する重要な構造物であり、生活基盤や経済活動を支える役割を担っている。しかし、日本では高度経済成長期に建設された多くの橋梁が耐用年数を迎え、老朽化が顕在化している¹⁾。例えば、長大橋や都市部の高架橋などで使用される鋼橋においては軽量化のために鋼床版形式が多く採用されるが、車両の繰り返し走行に起因する疲労損傷が大きな問題となっている。鋼床版は図1に示すように鋼製の床板(デッキプレート)と橋軸方向および橋軸垂直方向の補剛材である縦リブ(Uリブ)と横リブから主に構成される。鋼床版の疲労損傷²⁾のなかでも、デッキプレートとUリブ溶接のルート部を起点に発生し、デッキプレートを貫通するき裂(以下、デッキ進展き裂)は、路面変状を引き起こす危険があるため、とくに問題視されている^{3)~5)}。デッキ進展き裂は、定期点検で実施される鋼床版下部からの目視点検では発見が難しく、路面上部から一度舗装を除去して確認する必要がある⁶⁾。そのため、交通規制を伴う点検および補修が不可避であり、通行止めや車線規制による交通渋滞、物流遅延といった社会的影響が生じる。

このような溶接部の疲労損傷に対しては、一般的に以

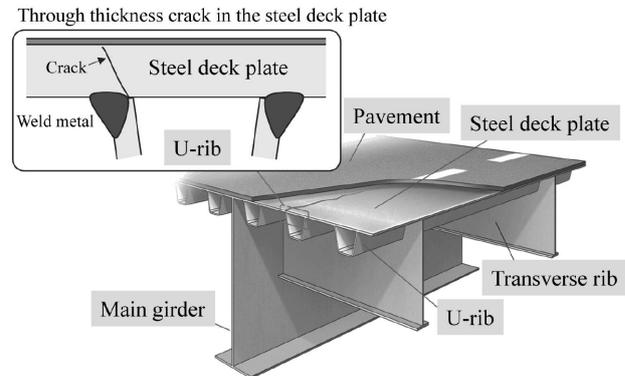


図1 鋼床版の模式図

Fig.1 Schematic diagram of an orthotropic steel deck

下の対策の適用が検討される。すなわち、①作用応力の低減、②溶接止端形状の改善、③引張残留応力の除去が講じられることが多い。①は、同一外力条件に対して、厚肉化などにより応力を低減する。②は、応力集中箇所である溶接止端をグラインダーなどにより滑らかにすることで、応力集中を防ぎ、き裂の発生を抑制する⁷⁾。③は、ピーニング処理などにより溶接部に圧縮応力を導入することで、引張残留応力によるき裂の発生を抑える⁸⁾。

*¹ 技術開発本部 材料研究所 *² 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部 *³ 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部
*⁴ 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部

①～③は構造設計および後工程の工夫で疲労損傷軽減を図るものであり、一定の効果が見込まれる。しかしながら、デッキプレート・Uリブ溶接継手のルート部に②や③を適用するのは難しく、①も鋼重全体の増加を招き、鋼床版のメリットである軽量性が損なわれる。そこで、疲労特性の向上を実現するためには、設計や工程処理以外のアプローチも検討する必要がある。当社では、固溶強化元素を活用した疲労き裂発生抑制技術を駆使して、それを厚鋼板で実現し、疲労抑制鋼板としてEX-Facter[®] (EXcellent Fatigue Crack Initiation Resister, 以下、開発鋼と呼ぶ)を開発した⁹⁾。開発鋼を溶接構造物に適用するには、溶接継手における疲労寿命延長効果を明らかにする必要がある。本稿では、開発鋼の設計思想について述べるとともに、デッキプレート・Uリブ溶接継手における疲労改善効果を検証した結果について報告する。

1. 疲労抑制鋼板EX-Facterのコンセプト

1.1 疲労寿命改善に向けたこれまでのアプローチ

金属疲労は、材料に繰り返し応力が作用することで、材料表面で発生した微視的き裂が成長し、最終的に破断へと至る現象である。この過程は、疲労き裂の発生、疲労き裂の進展、終局破壊の三つの段階に分けられる。橋梁などの溶接構造物では、溶接時の急速な加熱・冷却によって材料内部に局所的な引張残留応力を形成する場合があります。き裂発生の駆動力となり得る。さらに、溶接止端部などでの応力集中部では外力により塑性変形が発生しやすく、その結果、き裂の発生が促進される。すなわち、供用時の周期的な応力によって、残留応力や応力集中が存在する部位でき裂が発生し、材料内部に進展する。疲労寿命の延長には、き裂発生を抑制あるいは、き裂進展速度を遅延させることが重要である。これに対応するアプローチの一つとして、き裂進展抵抗を高めた耐疲労鋼^{10)~12)}が開発された。これらの耐疲労鋼は、軟質相中に硬質相を微細分散させた組織設計となっている。材料中を進展する疲労き裂が硬質相に到達することで、進展経路に変化が生じ、一時的な停留や進路の迂回が引き起こされる。これにより、き裂進展速度が低下し、疲労寿命の向上に寄与することが報告されている^{13), 14)}。

1.2 疲労き裂発生に着目したEX-Facterの開発

開発鋼は、疲労き裂発生までの損傷に着目し、き裂発生を抑制することに重点を置いている。従来技術が、疲労き裂発生後の進展を抑制することを主な目的としてい

るのに対し、当社の技術は添加元素による疲労き裂の発生を防ぐことを目的としている点で、明確な違いがある。添加元素であるSiやCuなどのマトリックスへの固溶は、疲労中の転位組織に影響を与え、疲労特性を改善することが報告されている^{15), 16)}。開発鋼では、これらの固溶強化元素に着目し、Si, Cu, Ni, Crの添加量を最適化した。代表的な化学組成と機械的性質を表1¹⁷⁾に示す。今回、開発鋼の疲労強度を検討するために、開発鋼 (Developed) と同等強度の汎用鋼 (Conventional) を用意した。両鋼板の組織は、フェライトを主体とする組織であり、引張強度は490 MPa級に分類される。汎用鋼と開発鋼のき裂発生寿命とき裂進展寿命を調査した結果を図2 (a)⁹⁾に示す。ここでは、試験開始からき裂発生までのサイクル数をき裂発生寿命、それ以降の破断までのサイクル数をき裂進展寿命と定義している。疲労試験は応力比R (繰り返しの最小応力/最大応力) が-1の同じ大きさの引張と圧縮の応力を交互に繰り返し与える両振りを実施した。いずれの応力条件においても、汎用鋼に比べて開発鋼のき裂発生寿命が改善していた。図

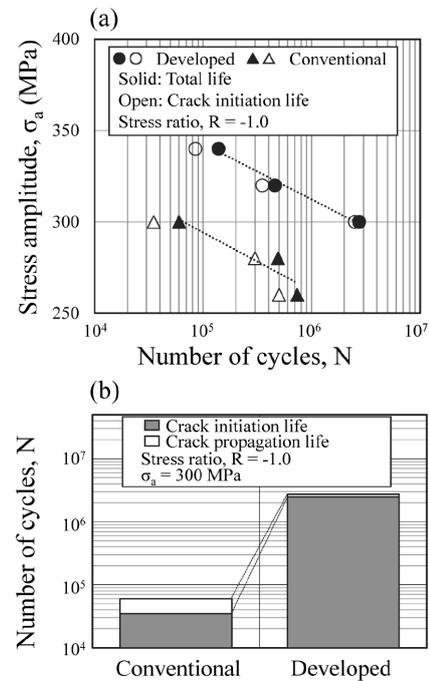


図2 (a) 汎用鋼と開発鋼の疲労試験結果
(b) $\sigma_a=300$ MPaでのき裂発生寿命とき裂進展寿命の比較
Fig.2 (a) Fatigue test results of conventional and developed steel
(b) Comparison of crack initiation life and crack propagation life at a stress amplitude of 300 MPa

表1 鋼材の代表的な化学組成と機械的性質

Table 1 Typical chemical composition and mechanical properties of steels

	Chemical composition / mass%						Mechanical properties	
	C	Mn	P	S	Si + Cu + Ni + Cr	Others	YS (MPa)	TS (MPa)
Conventional	0.15	1.01	0.016	0.003	0.20	-	476	529
Developed	0.05	1.56	0.007	0.001	0.97	Nb, Ti	554	571

脚注) EX-Facterは当社の登録商標 (第6676446号) である。

2 (b)⁹⁾ に応力振幅が300 MPa での疲労寿命を比較した結果を示す。疲労寿命に占めるき裂発生寿命の割合は汎用鋼と開発鋼でそれぞれ58%, 91%であり, 半分以上をき裂発生寿命が占めていた。き裂発生寿命に着目すると, 開発鋼は汎用鋼の約70倍であり, 著しく改善していることが示された。また, 汎用鋼と開発鋼の疲労寿命はそれぞれ 6.4×10^4 回, 2.7×10^6 回であった。したがって, 開発鋼は, 汎用鋼よりもき裂発生寿命が改善し, 長寿命化していることが明らかとなった。

2. 溶接ルート部の再現組織を用いた疲労特性評価

2.1 再現HAZ組織の作製と評価方法

デッキ進展き裂の発生起点となる溶接ルート部付近は, すみ肉1パス溶接による熱影響を受けている。すみ肉1パス溶接は, ほぼ直行する部材のすみ部分に対し, 1回で溶接する方法である。この溶接により, 溶接金属の周囲には熱影響部 (Heat Affected Zone, 以下, HAZ) が形成される。

図1で述べたようにルート部の疲労き裂は, 主にHAZから発生するため, HAZでのき裂発生を抑制することが重要となる。今回の強度クラスの鋼材では溶接熱により, 溶接部に隣接する母材組織がオーステナイト域まで加熱・急冷されるため, 母材組織がフェライトからベイナイト主体の組織に変化する。固溶強化元素によりき裂発生までの疲労損傷を遅らせる開発鋼では, 組織が変化したとしてもマトリックス中に含まれる固溶元素は変わらないと考えられるため, デッキプレート・Uリブ溶接継手の疲労耐久性の向上が期待できる。いっぽうで, 溶接継手には溶接金属を含め様々な組織が混在している¹⁸⁾ため, 評価対象のHAZ組織におけるき裂発生抑制効果の検証が困難である。加えて, 溶接継手は溶接止端などでの応力集中や残留応力の影響があるため, 組織単独の評価をすることが難しい。そこで, 継手形式での評価前に, 溶接熱を模擬した再現熱サイクル試験装置を用いてHAZ相当の組織を再現し, 固溶強化元素を活用した開発鋼の疲労改善効果が発現するか調査した。

表1¹⁷⁾で示した汎用鋼と開発鋼から11.5 mm × 33 mm × 70 mmの試験材を採取した。溶接部の熱履歴を模擬可能な再現熱サイクル試験装置を用いて, すみ肉1パス溶接時に想定される熱影響を試験片に付与した。図3¹⁷⁾に付与した熱サイクルを示す。すみ肉1パス溶接の温度履歴に近い条件A, Bと, 結晶粒径の変化を狙った条件C, Dを用意した。ただし, 汎用鋼では条件Dでの試験は実施していない。熱サイクル後の試験材から, 図4 (a)に示す直径4 mmの丸棒試験片を採取した。試験片表面はエメリー紙で#1200まで順次研磨を施し, 平滑に仕上げた。その後, 電気油圧サーボ疲労試験機を用いて, 荷重制御下での軸力疲労試験を実施した。なお, 平均応力 (最大応力と最小応力の平均値) の影響を除外し, 材料単独の影響を見るために, 応力比Rは-1とした。

また, 15 mm × 80 mm × 75 mmの大型の試験材も採取した。その後, 条件Bでの再現熱サイクル試験を実施し, 図4 (b)に示すCT試験片に加工した。電気油圧

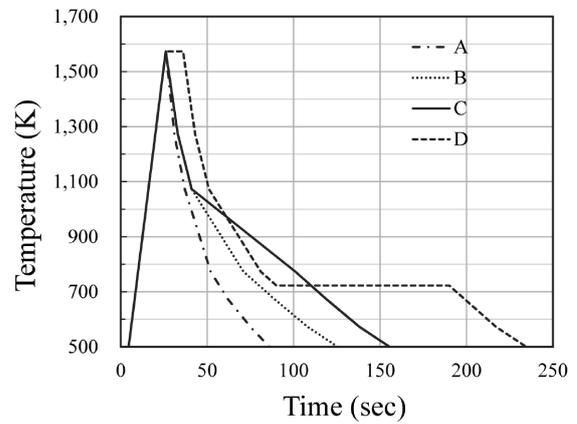


図3 再現熱サイクル試験の熱履歴

Fig.3 Thermal profile of the simulated thermal cycling test

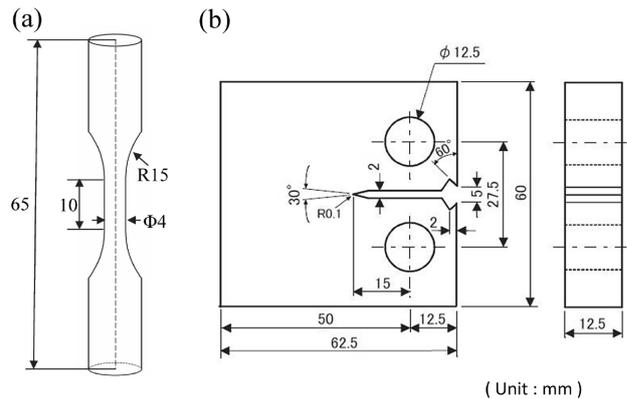


図4 (a) 丸棒疲労試験片と (b) CT試験片の形状

Fig.4 Shape of (a) round bar specimens and (b) compact tension (CT) specimens for fatigue testing

サーボ式疲労試験機を使用し, 応力比Rは0.1としてき裂進展試験に供した。今回, コンピュータ制御により自動的に荷重を減少させる荷重漸減法により疲労き裂進展試験を行った。き裂進展試験中の最大応力での応力拡大係数と最小応力での応力拡大係数の差を応力拡大係数範囲 (ΔK) として算出した。また, 1回の応力振幅によりき裂が進展する大きさを表すき裂進展速度 (da/dN) も測定した。

組織観察はナイタルでエッチングした組織を, 光学顕微鏡にて観察した。加えて, 走査型電子顕微鏡に搭載された後方散乱電子線回折 (EBSD) を用いた結晶方位解析を行い, 平均結晶粒径 \bar{d} を測定した。

2.2 再現HAZ組織と疲労特性

鋼床版のデッキプレート・Uリブ溶接継手を模擬した試験体のすみ肉1パス溶接部の組織写真を図5 (a)に示す。デッキプレートには開発鋼を使用している。図中の点線は溶融線を示しており, この線を境にHAZと溶接金属 (WM) が存在している。溶融線に隣接する領域は粗粒HAZに相当し, ベイナイト組織が形成されていた。粗粒HAZの平均結晶粒径 (\bar{d}) は $20 \mu\text{m}$ であった。再現熱サイクル試験の条件Aにより得られた組織を図5 (b)に示す。組織は粗粒HAZに酷似しており, 平均結晶粒径は $23 \mu\text{m}$ であった。再現熱サイクル試験片の組織 (以下, 再現HAZ組織) は, すみ肉溶接に実際に形成されるHAZ組織と形状・平均結晶粒径が同等である

と判断した。

図6に汎用鋼および開発鋼の再現HAZ組織におけるき裂進展速度 (da/dN) と応力拡大係数範囲 (ΔK) の関係を比較した。両鋼ともに、き裂進展速度は ΔK の減少とともに急激に低下し、ある ΔK 値を下回るとき裂が進展せずに停止する。この時の ΔK は、 ΔK_{th} (下限界応力拡大係数範囲) と呼ばれ、き裂進展が始まるかどうかの指標となる。本研究では、 da/dN が 1.0×10^{-10} m/cycleに到達した時点の ΔK を ΔK_{th} と設定し、汎用鋼では $4.0 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 、開発鋼では $4.1 \text{ MPa}\sqrt{m}$ という測定結果が得られた。図中にも示すとおり、両者の ΔK_{th} および ΔK_{th} 近傍の da/dN に大きな差異は認められなかった。したがって、き裂進展抵抗に関しては両鋼とも同等の特性を示すことが確認された。

つぎに、再現HAZ組織材の平滑丸棒疲労試験結果を図7¹⁷⁾に示す。試験は条件A~Dの異なる熱履歴を付与した試験体で実施した。破断材のプロットから算出した対数近似線から100万回強度を求め、疲労強度 (σ_w) と定めた。

開発鋼は、熱サイクル条件に関わらず、汎用鋼と比較して σ_w が高い傾向を示した。また、両鋼ともに熱サイクル条件に起因する σ_w の差が見られ、熱サイクル条件ごとの強度や組織変化が疲労寿命に影響を及ぼしていることが示唆された。一般に、疲労強度は材料の強度、と

くに引張強度に大きく依存することが知られている¹⁹⁾。本研究においては引張試験が困難であったため、代替手法として、引張強度と相関性の高いビッカース硬さ (HV) を用いて材料強度の指標とした。

σ_w をビッカース硬さで整理した結果を図8に示す。図中の点線は、 σ_w とビッカース硬さの比例関係の直線であり、傾きが1.2から1.9の範囲で描いた。熱サイクル条件の違いによらず、汎用鋼および開発鋼はそれぞれ傾きが1.5もしくは1.8程度の直線関係になった。両鋼の各熱サイクル条件における疲労強度の差は、主にビッカース硬さの違いに起因することが明らかとなった。いっぽうで、汎用鋼と開発鋼の疲労強度の違いは硬さだけでは説明できないことがわかった。金属材料における疲労特性は材料強度だけではなく、微細組織の状態にも依存する。たとえば、結晶粒径は材料の強度と相関があるだけでなく、結晶粒界からき裂発生する^{15), 20)}など強度以外の影響も示唆されている。疲労強度と結晶粒径の関係はHall-Petch則に類似し、 \sqrt{a} の逆数に比例するとされる²¹⁾。また、疲労限度を引張強度で規格化した指標は疲労限度比と呼ばれ、強度の異なる材料間の比較に使われる。ここでは、 σ_w をビッカース硬さで規格化した値を疲労限度比 (σ_w/HV) として用いた。 σ_w/HV と \sqrt{a} の逆数の関係を図9¹⁷⁾に示す。汎用鋼、開発鋼ともに \sqrt{a} が変化しても疲労限度比はほとんど変わらなかった。一般的に、結晶粒径微細化により材料強度は増加する。すなわち、結晶粒径の微細化は、材料の硬さ増加により

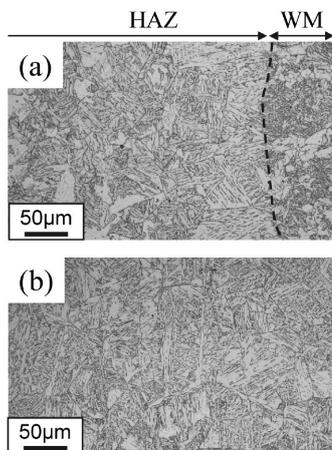


図5 (a) すみ肉溶接ルート部における溶接金属近傍のHAZ組織 (b) 再現熱サイクル試験片の組織
Fig.5 (a) Microstructure of the HAZ adjacent to the weld metal at the root of the fillet weld (b) Microstructure of the simulated thermal cycling specimens

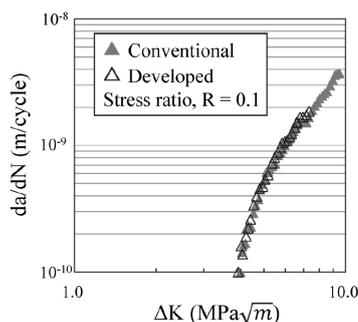


図6 下限界応力拡大係数範囲近傍の亀裂進展挙動
Fig.6 Crack propagation behavior near the threshold stress intensity factor range (ΔK_{th})

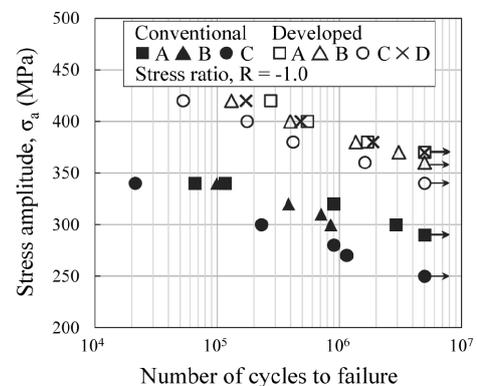


図7 汎用鋼および開発鋼の再現熱サイクル片における疲労試験結果
Fig.7 Fatigue test results of simulated thermal cycling specimens for conventional and developed steel

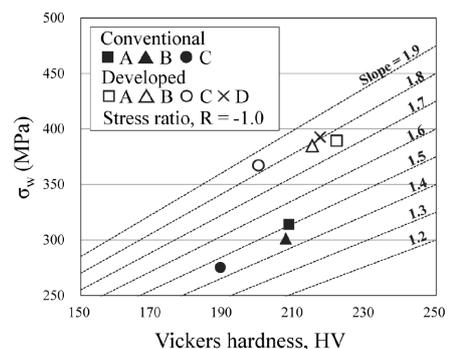


図8 100万回疲労強度とビッカース硬さの関係
Fig.8 Relationship between fatigue strength at one million cycles and Vickers hardness

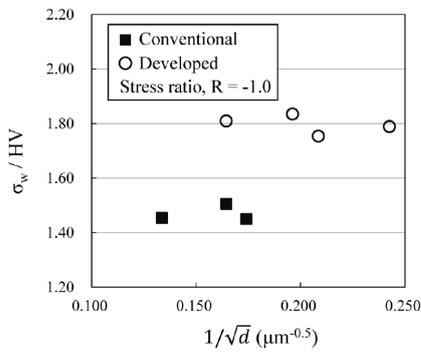


図9 汎用鋼および開発鋼の疲労限度比と結晶粒径の関係

Fig.9 Relationship between fatigue limit ratio and grain size for conventional and developed steel

疲労限度に影響を与えたのみであり、それ以外の影響は認められなかった。また、汎用鋼に比べて、開発鋼の方が疲労限度比は高く、この違いは結晶粒径の影響でも説明できなかった。

以上のことから、開発鋼は組織や硬さが異なる再現HAZ組織においても、汎用鋼に対して優れた疲労特性を示しており、固溶強化によって疲労特性が改善したと考えられる。

3. 溶接継手における疲労特性評価

3.1 デッキプレート・Uリブの溶接継手を模擬した試験体の作製と評価方法

前章の検討により、溶接工程を模擬した熱サイクル試験で作製した再現HAZ組織においては、開発鋼が疲労特性に優れていることを確認できた。そこで本章では、開発鋼の効果をさらに実構造に近い条件下で検証した。評価には図10に示す対象溶接継手を模擬した試験体を用意した。疲労試験はデッキプレートには板厚16mmと25mmの400~490MPa級鋼を用いた。溶接は軟鋼用フラックス入りワイヤを用いてすみ肉1パス溶接を実施した。この時、Uリブ板厚方向に対して溶け込み深さが板厚の75%以上となるようにした。デッキプレート端上部に設置された可搬型アクチュエータを用いて片持ち曲げ方式で実施した。図10の矢印部で応力比 $R=0.1$ で繰り返し荷重を荷重し、打ち切り回数は1,000万回に設定した。ただし、結果には100~500万回程度で中断したデータも含まれる。横リブ交差の影響の無い一般部(図10中のa, bまたはe, f)のひずみ勾配を用いて、模擬Uリブ位置まで線形外挿した値を公称応力範囲 $\Delta\sigma$ と定義した。また、き裂発生の検知は、山田らの検討²²⁾を参考にして、リブ近傍のひずみゲージ(図10中のd)で測定し、ひずみ変動範囲が初期値から5%低下したときの繰り返し数を疲労き裂発生寿命 $N_{5\%}$ と定義した。

3.2 継手模擬試験体の疲労特性

疲労試験の公称応力範囲 $\Delta\sigma$ と疲労き裂発生寿命 $N_{5\%}$ の関係について、デッキプレートに汎用鋼を用いた継手の結果を図11に示す。板厚25mmの継手における $N_{5\%}$ は、板厚16mmの継手における $N_{5\%}$ と明確な差はなかった。図中の破線は、き裂発生した全ての結果に対して、JSSC疲労設計曲線($\Delta\sigma^m \cdot N_{5\%} = C_0$)²³⁾を参考に傾き $m=3$ と

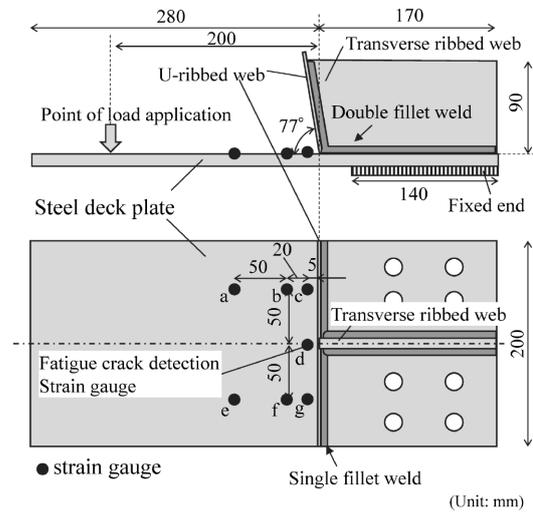


図10 デッキプレート/Uリブ溶接部を模擬した継手試験体

Fig.10 Joint specimen reproducing the deck plate/U-rib welded joint

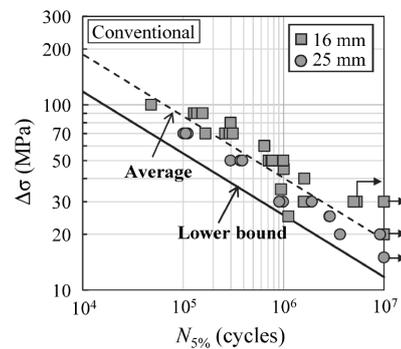


図11 汎用鋼を用いた継手疲労試験結果

Fig.11 Fatigue test results of joints specimens using conventional steel

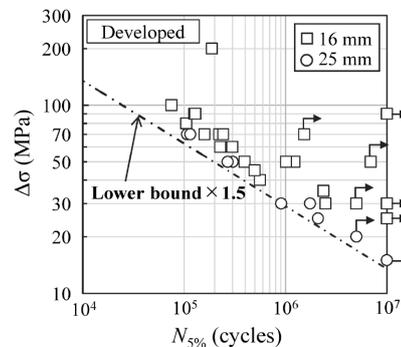


図12 開発鋼を用いた継手疲労試験結果

Fig.12 Fatigue test results of joints specimens using developed steel

して両対数で直線回帰した平均線(以下、 $S-N_{5\%}$ 線とする)を表す。標準偏差 σ を用いて、平均 -2σ (97.5%下限)を寿命下限と定義し、実線で示した(以下、 $S-N_{5\%}$ 下限線とする)。つぎに、デッキプレートに開発鋼を用いた場合の疲労試験結果を図12に示す。汎用鋼の場合と同様に、板厚による $N_{5\%}$ の違いは見られなかった。図中における一点鎖線は汎用鋼継手の $S-N_{5\%}$ 下限線の1.5倍の寿命を表している。各応力での開発鋼の寿命は $S-N_{5\%}$ 下限線の1.5倍以上となっていることがわかった。

以上の結果から、高いき裂発生抵抗を有する開発鋼を用いることで、デッキプレート・Uリブ溶接継手における疲労耐久性が向上した。本稿では、デッキプレート・

Uリブ溶接継手に関する取り組みを報告したが、開発鋼は板厚12 mmのグラインダー処理を施した面外ガセット継手での疲労耐久性向上にも効果があることが報告されており¹⁷⁾、汎用鋼に比べて疲労限度が高くなることが明らかとなっている。これにより、たとえば垂直補剛材との溶接部などにおける疲労き裂発生を抑制することも期待される。

むすび = 疲労き裂の発生抑制をコンセプトとするEX-Facterを開発し、鋼床版のデッキ進展き裂を題材に疲労改善効果を検証した。再現HAZ組織材の検討から、溶接熱影響により組織が変化した場合でも、汎用鋼に対するEX-Facterの優位性が確認された。EX-Facterの高い疲労特性は、材料強度や結晶粒径の違いによるものではなく、固溶強化元素の影響によると考えられる。また、デッキプレート・Uリブ溶接継手を模擬した継手試験体での試験から、継手の疲労特性も改善することが明らかとなった。

本研究を遂行するにあたり、鋼床版の溶接部を模擬した継手の評価に関して多大なる技術的助言を頂いた関西大学 石川敏之教授に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省. 令和4年版国土交通白書 第2部第2章.
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/pdfindex.html>, (参照2025-04-15)
- 2) 公益社団法人土木学会. 鋼橋の疲労対策技術, 丸善出版, 2013, p.39-52.
- 3) 山田健太郎. 土木学会鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集. 2007, Vol.10, p.11-18.
- 4) 平林泰明ほか. 土木学会鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集. 2007, Vol.10, p.39-53.
- 5) 田畑晶子ほか. 阪神高速グループ技報. 2006, Vol.23.
- 6) 柿崎捷吾ほか. 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集. 2020, p.109-114.
- 7) 平山繁幸ほか. 鋼構造論文集. 2005, Vol.12, No.45, p.111-121.
- 8) 丹下 彰ほか. 圧力技術. 2000, Vol.38, No.4, p.216-223.
- 9) 伊藤孝矩ほか. 日本機械学会第30回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2023). 2023-9-27/29, 日本機械学会, 2023.
- 10) 誉田 登ほか. まてりあ. 2004, Vol.43, No.2, p.148-150.
- 11) 中島清孝ほか. 溶接学会論文集. 2009, Vol.27, No.1, p.21-27.
- 12) 伊木 聡ほか. JFE技報. 2004, No.5, p.13-18.
- 13) 伊木 聡ほか. JFE技報. 2014, No.33, p.55-61.
- 14) 徳力 健ほか. 鋼構造論文集. 2011, Vol.18, No.69, p.9-16.
- 15) 潮田浩作ほか. 鉄と鋼. 2008, Vol. 94, No.8, p.321-330.
- 16) T. Yokoi et al. Journal of Materials Science. 2001, Vol.36, p.5757-5765.
- 17) 田畑晃人ほか. 構造工学論文集. 2025, Vol.71A, p.449-457.
- 18) 一般社団法人溶接学会. 溶接・接合, 産報出版, 2015, p.154-163.
- 19) 長谷川典彦ほか. 材料. 1990, Vol.39, No.442, p.859-863.
- 20) 兼子佳久ほか. 金属疲労の基礎とメカニクス 結晶学と力学から読み解く金属の疲労, 内田老鶴圃, 2024, p.111-116.
- 21) 横幕俊典ほか. 材料. 1991, Vol. 40, No.458, p.1415-1421.
- 22) 山田健太郎ほか. 構造工学論文集. 2008, Vol.54A, p.675-684.
- 23) 社団法人日本鋼構造協会. 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例 -, 技報堂出版, 2014, p.25.

(解説)

KOBELCO グループの建築鉄骨向け溶接技術

鈴木 励一*¹ (博士 (工学))

Kobelco Group's Welding Technologies for Architectural Steel Frames

Dr. Reiichi SUZUKI

要旨

建築鉄骨の製造・組立において、接合は最も重要な生産技術である。KOBELCOグループは、長きにわたって高力ボルトやアーク溶接技術によって建築業界の発展に貢献してきた。近年は人材不足の課題からロボット化による自動化ニーズが強まっており、アーク溶接大型ロボットシステムの鉄骨製作工場への適用拡大、さらに可搬型アーク溶接ロボットの現地への適用の動きが顕著である。また、貴重となりつつある溶接士に対して、実技とバーチャルの両手段の組合せによって、その育成の敷居を下げる取組を行っている。

Abstract

Joining is the most important production technology in the manufacturing and assembly of architectural steel frames. The Kobelco Group has long contributed to advancement of the construction industry through its high-tension bolts and arc welding technologies. Recent labor shortages have increased the need for automation by robotization. This has led to a notable trend toward the expansion of large-scale arc welding robot systems in steel frame manufacturing factories, as well as the adoption of portable arc welding robots on-site. In addition, efforts are being made to lower the barriers to training for welders, who are becoming increasingly rare, by combining practical and virtual training methods.

検索用キーワード

建築, 鉄骨, 構造, 柱, 梁, アーク溶接, ロボット, 自動化, 技量訓練, バーチャル

まえがき = 日本は地震国である。これまで何度も大きな震災が発生し、人的・物的損害を被ってきた。そのため、古代の五重塔に代表される高層木造建築物から現代の超高層鉄骨ビルに至るまで、耐震性向上に関する材料・構造・接合方法といった技術開発が進められてきた。

KOBELCOグループとしても強靱（きょうじん）な建築構造物を構成するための多くの技術を開発・提供し、国土強靱化に貢献している。その中でも鋼のアーク溶接に関する技術や商品に強みを持つことが特徴であり、近年ますますその重要性は高まっている。

本稿では、鉄骨様式と接合法の関係を中心に、KOBELCOグループの特徴ある高品質化・高能率化・自動化ソリューションを広く紹介する。

1. 建築物に適用される素材¹⁾

一般的に建築物の主要構造部に適用される素材は、木、コンクリート、鉄が多数を占め、これらの素材を用いた構造として①鉄筋コンクリート造（RC造）、②鉄骨・鉄筋コンクリート造（SRC造）、③鉄骨造（S造）などがある。また鋼管柱にコンクリートを充填した④コンクリート充填鋼管造（CFT造）や、木と鉄を組み合わせたハイブリッド構造など多岐にわたる（図1）。

近年、構造物の大型化・高層化が進んでいるが、高層

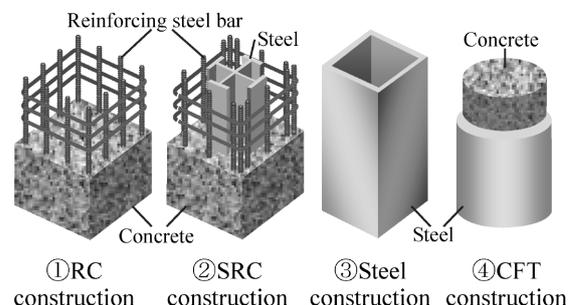


図1 大型建築物における柱の様式
Fig.1 Column styles in large buildings

マンションにおいては居住性を重視しRC造が多く適用され、高層オフィス・ホテルや生産施設についてはS造やCFT造が多く適用されるなど、建築物の用途に応じて最適な構造を選択している。とくにS造やCFT造については建築物の耐震性能などを十分に発揮するため、鋼材には高い強度やじん性が要求され、接合部に対しても高い応力伝達能力が求められる。

2. S造における柱と梁の接合形式

S造には柱と梁を剛接合としたラーメン構造が多く用いられ（図2）、剛接合部分では、梁に対して分割した柱を取り付ける（a）梁（はり）貫通形式、柱に対して

*¹ 溶接事業部門 技術センター

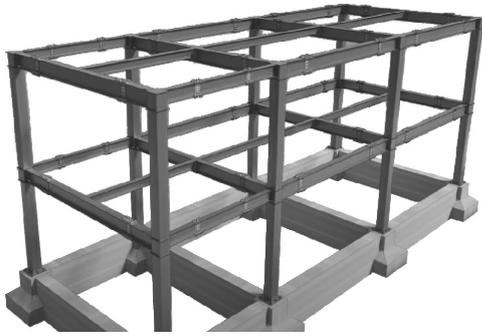


図2 鉄骨ラーメン構造のイメージ
Fig.2 Image of steel rahmen structure

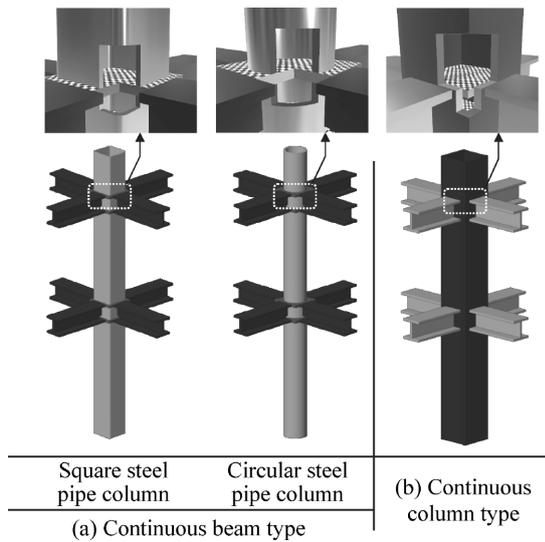


図3 柱と梁の接合形式
Fig.3 Types of column and beams connection

分割した梁を取り付ける (b) 柱貫通形式がある (図3)。

(a) は通しダイヤフラム形式とも呼ばれ、とくに日本で発展している。世界的にみると独特な形式であるが、アーク溶接ロボットとの相性が良く、品質の安定化と省人化に適した大きな利点があり、本形式が普及した要因となっている。(b) は国内で超高層建築物の溶接組立箱形断面柱に多く用いられ、内ダイヤフラム形式が適用される。

3. 接合方法の大分類と当社の取組

金属の接合方法は、(1) 機械的接合、(2) 冶金的接合、(3) 化学的接合に分類される。(1) はボルト・ナット、リベット、釘など、(2) はアーク溶接、抵抗溶接、レーザー溶接、圧接、ガス溶接など、(3) は接着剤が主な種類である。建築鉄骨では、高い接合強度と長期信頼性、耐火性、能率、汎用性などの点から、(1) (2) の代表であるボルト・ナットとアーク溶接が用いられている (図4)。

ボルト・ナットの長所は、(a) 接合部のギャップ対応範囲が大きい (締め潰せる)、(b) 材質劣化が起きにくい、(c) 技量負荷が小さい、(d) 欠陥が発生しにくい、(e) 不良を検出しやすい、(f) 作業の安全性が高いことである。いっぽう短所は、(a) 長期的に緩みが生じる可能性がある、(b) 継手形状や板厚に適用範囲の制限がある、

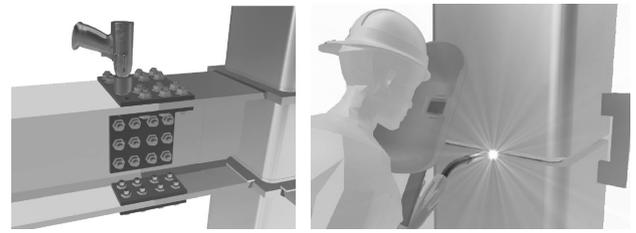


図4 ボルト・ナット接合とアーク溶接 (イメージ)
Fig.4 Images of nuts & bolts joining and arc welding

(c) 自動化に不適、(d) 鋼板に断面欠損が発生する、(e) 部分接合であるといった点が挙げられる。

また、アーク溶接の長所は、(a) 継手形状によらず接合可能、(b) 強度・じん性の信頼性が高い、(c) 自動化しやすい、(d) 高能率、(e) 低コストなどが挙げられる。いっぽう短所としては、(a) 周辺母材も含め材質的な劣化が起きやすい、(b) 高い技量を必要とする、(c) 内部欠陥が起きやすく、かつ検出しにくい、(d) 火花 (スパッタ)、光、煙、高熱といった安全・衛生面の懸念が挙げられる。

このように接合方法にはそれぞれ長所・短所があり、特徴を勘案して適材適所で適用されている。KOBELCOグループでは、ボルト・ナットを神鋼ボルト(株)、アーク溶接を当社溶接事業部門とコベルコ溶接テクノ(株)、コベルコROBOTiX(株)などが各種商品やソリューションを提供している。また、ボルト・ナット用の高性能線材や溶接性に優れた厚鋼板を当社鉄鋼アルミ事業部門が提供している。

4. アーク溶接

アーク溶接は、鋼管や形鋼を用いた建築鉄骨製作における工場溶接に加え、建設現場での鉄骨建方における現場溶接など幅広く適用されている。アーク溶接には、実用化の歴史順に①被覆アーク溶接、②サブマージアーク溶接、③エレクトロスラグ溶接 (※厳密にはアーク溶接ではないが、近縁としてここでは含める)、④ノーガス溶接、⑤ガスシールドアーク溶接、⑥エレクトロガスアーク溶接などの種類がある。当社の溶接事業部門はこれらに必要な溶接材料を市場に提供しており、1940年の事業開始以降、建築インフラの構築、高度化に貢献してきた。

また、高い技量が必要とされるアーク溶接の普及を目指し、1960年代初頭には教習所を備えて溶接士の技能訓練事業も開始し、高品質な溶接を日本各地で実現するための優秀な人材を育成してきた。

さらには、自動化・高能率化・高品質化に有効な溶接装置事業にも力を入れ、1980年代半ばに発展させた鉄骨建築向け溶接ロボットシステムは、鉄骨製作工場や現場建方において、多くご利用いただいている。

4.1 RC造, SRC造の溶接技術

RC造やSRC造では異形鉄筋同士の接合が必須である。当社は1960年代に、これに適した溶接法として当社は「KEN (Kobe Steel's Encluse Narrow-gap) 法」を開発し、市場に広めた²⁾。接合部を銅板で覆い、内部を溶接金属

で充填する方法である。適用する溶接材料は被覆アーク溶接棒であった。さらに1989年には、これを炭酸ガスシールドアーク溶接で実施する発展型の「KEN-SH (Kobe Steel's Enclose Narrow-gap Welding-Semiautomatic High- Performance Process) 法」を開発した³⁾ (図5)。

これらの技術指導は、コベルコ溶接テクノ(株)の前身企業である神鋼溶接サービス(株)で実施していたが、2010年に(公社)日本鉄筋継手協会に事業移管し、名称も「JCe」工法に変更された。現在は協会認定工法として、鉄筋業で実施されている⁴⁾。

4.2 S造一柱貫通形式の溶接技術

柱貫通形式に用いられる柱材には、H形鋼、H形鋼を組み合わせた十字柱、溶接組立箱形断面柱などの種類があるが、ここでは最も代表的な溶接組立箱形断面柱を取り上げる。この柱材は四面BOX柱とも呼ばれる。

構造は、4枚のスキムプレートと呼ばれる鋼板と補強のための複数枚の内ダイアフラムで構成され、それぞれ全線が溶接される。向き転換を除けば、工程は主に2工程で、別種の溶接法が用いられる(図6)。

プレート同士が柱の長手方向に接合される部分は角継手と呼ばれており、鋼板を最小1パスで溶接できる大電流サブマージアーク溶接法が用いられ(図7)、2電極を

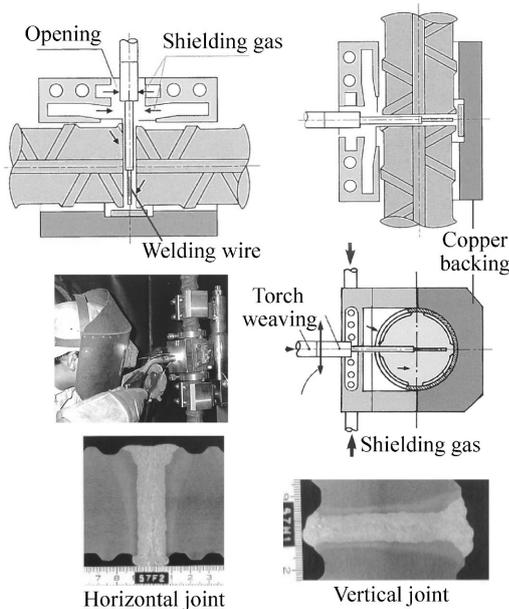


図5 異形鉄筋溶接法「KEN-SH」

Fig.5 Reinforcing steel bar welding method "KEN-SH"

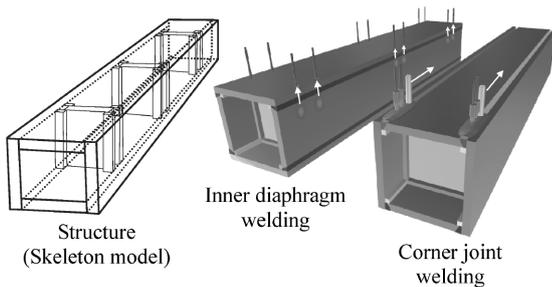


図6 溶接組立箱形断面柱の構造と組立溶接法

Fig.6 Structure and assembly welding methods of built-up box section column

直列に並べたタンデム式となることが多い。板厚約60 mmを超えると1パスでは溶接困難となり、その場合は炭酸ガスアーク溶接で下盛溶接した後、サブマージアーク溶接により全2パス以上で溶接を行う(図8)。最近の超高層ビルでは最大で鋼板の板厚100 mmにも及ぶ物件も登場しており、下盛溶接をすると能率低下が生じるため、サブマージアーク1パス板厚限界の向上、あるいは複数パスサブマージアーク溶接施工が日々研究されている。

当社は、溶接組立箱形断面柱の角継手を高効率で溶接するための多電極サブマージアーク溶接システムをかねてから開発、販売しており^{5), 6)}、最近の溶接システムの外観を図9に示す。

いっぽう、内ダイアフラムの溶接には、エレクトロスラグ溶接法が用いられる。側面スキムプレート、ダイアフラム、裏当て材2枚を使って図10のように閉鎖空間を作り、その中に溶接ワイヤを導入するためのノズルを上面スキムプレートに設けた穴から差し込み、垂直に引

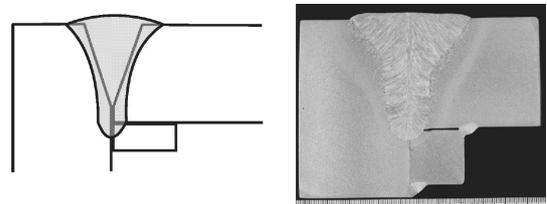


図7 2電極サブマージアーク溶接法による1パス積層角継手の断面の例(板厚50 mm)

Fig.7 Example of cross section of single pass corner welding joint by double electrodes submerged arc welding method (Steel thickness: 50 mm)

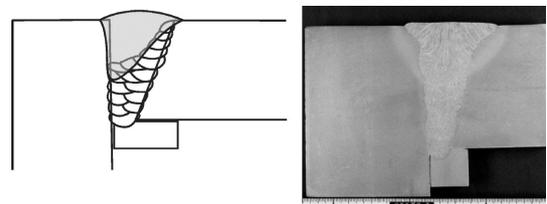


図8 炭酸ガスアーク下盛+2電極サブマージアーク溶接による混用溶接継手の断面の例(板厚80 mm)

Fig.8 Example of cross section of multi-pass corner welding joint by CO₂ arc welding and double electrodes submerged arc welding mixed method (Steel thickness: 80 mm)



図9 当社製溶接組立箱形断面柱の角継手用多電極サブマージアーク溶接システムの例(納入先: (株)オーエーテック様)

Fig.9 Example of Kobe steel's multi electrodes submerged arc welding system for corner joints of built-up box section column (Delivered customer: OATEC corporation)

き揚げながら溶接を行うものである。溶接というよりも
 鋳造といったほうがイメージ的に近い。本溶接法は非常
 に高能率であるが、極めて入熱が大きく、かつ溶接時に
 生じる熱の逃げ道が乏しいことから、溶接部の冷却速度
 が遅く、溶接部周辺の材質劣化が懸念されるケースがあ
 る。そこで、高強度・高じん性を得るためのエレクトロ
 スラグ溶接材料の開発はもちろん、本法に好適な大入熱
 対応鋼板が開発されている。高HAZじん性鋼とも呼ば
 れ、1フロア当たりの柱本数を減らして有効面積を増や
 すために必要となる大断面柱のニーズが高まる中、当社
 でも大入熱対応高強度鋼板を開発している（本号p.11
 「大入熱溶接対応建築構造用780 N/mm²級鋼の開発」
 およびp.16「大入熱溶接対応建築構造用TMCP鋼板」
 を参照）。

4.3 S造—梁貫通形式の溶接技術

近年最も発達し、主流となった接合形式は、厚板を用
 いて角形もしくは円形断面を冷間プレスにより成形し、
 柱の長手方向に1箇所もしくは2箇所を溶接した鋼管柱
 を用いた梁貫通形式である。鋼管製造に用いられる溶接
 法は主にサブマージアーク溶接であり、まれに炭酸ガス
 アーク溶接が組み合わされることがある。狭あい箇所
 である内面の溶接には、ブームウエルダと呼ばれる特殊な
 サブマージアーク溶接システム装置が用いられる⁷⁾
 (図11)。

梁貫通形式は、鋼管メーカーの成形技術と能力の向上に
 より、高強度かつ大きな板厚の鋼管が製造できるよう
 になった。また、溶接組立箱形断面柱よりも製造工程がシ
 ンプルであり、コスト競争力が高いことから、次第に本
 形式へ置き換わってきている。

鉄骨製作会社における組立工程を図12に示す。鋼管
 柱と梁との接合部に、短尺の鋼管とダイアフラムを周
 溶接したコア部材（通称:サイコロ）が始めに作られる。

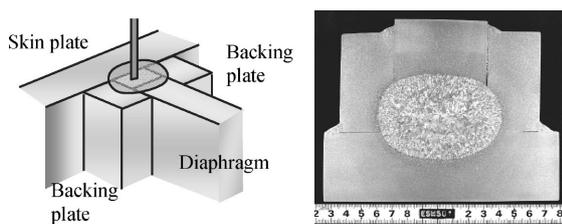


図10 エレクトロスラグ溶接によるダイアフラムとスキンプレート
 継手の構造と溶接部断面の例

Fig.10 Example of cross section and structure of diaphragm with
 skin-plate joint by electroslag welding

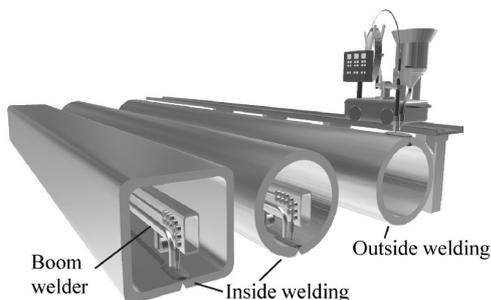


図11 プレス成形鋼管のシーム溶接（イメージ）

Fig.11 Seam welding image of press forming pipes

さらに、そのコア部材に、現場建方でボルト・ナット接
 合せさせるための短尺H形鋼（通称：仕口またはブラケッ
 ト）をダイアフラムに溶接する。これをさらに長尺の鋼
 管に複数個溶接して、工場製作の最終形態となる。なお、
 現場建方において、梁との接合をボルト・ナットではな
 く、溶接によって接合する場合は、ブラケットの取付は
 省略される。ノンブラケット方式は梁の出っ張りがな
 いため、工場から現場への輸送するためのトラック1台
 当たりの積載本数が増え、高能率かつコストダウンになる
 長所がある。しかしながら、現場建方の溶接工程は工場
 と異なり、溶接姿勢の制限が生じるため、溶接部周辺
 のディテールの違いが発生して、結果的に耐震性能確保
 の点で課題があるとされる。ただし、この現場溶接特有
 の問題も数多くの解決研究と実践適用が図られつつある。
 当社は、耐震性に優れた現場溶接部とするため、アーク
 溶接を利用した応力集中緩和手段による施工開発を行っ
 ているが、本稿では省略する^{8)~10)}。

さて、図12に示した炭酸ガスアーク溶接は従来、人
 手による作業であったが、現在は多関節ロボット、ロボ
 ット平行移動用スライダ、溶接ワークポジショナなどで
 構成される溶接ロボットシステムが担うようになってい
 る。昼夜連続の長時間運転も可能であり、鉄骨製作工場
 の姿を一変させた。ラインナップとしては、図13に示
 すように、①コア溶接を主に行うための省スペース型鉄
 骨コア・仕口兼用溶接システム、②複数のコア溶接を連
 続的に行うための鉄骨コア連結溶接システム、③複数の
 仕口溶接を連続的に行うための鉄骨仕口溶接システム、

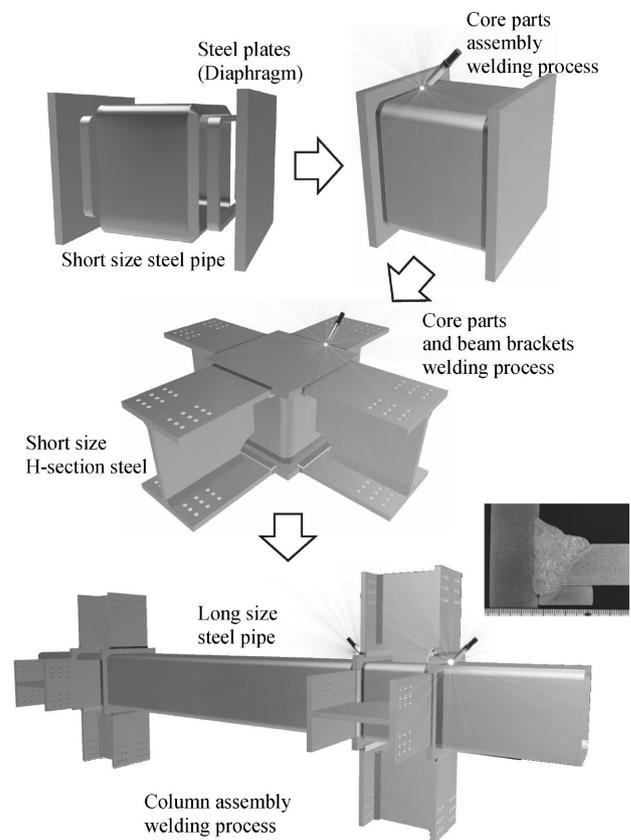


図12 梁貫通形式の代表的な溶接組立工程と溶接部断面の一例
 Fig.12 Welding assembly typical process of continuous beam type
 column and an example of weld joint cross section

④長尺の柱を搭載できる柱大組立溶接システムがある。

また、溶接部の品質改善に貢献した技術として、溶接電源の機能によって電流・電圧の波形制御を行い、炭酸ガスアーク溶接の短所であったスパッタ発生を大幅削減する「REGARC™」プロセスが挙げられる^{11)~14)}。当社のアーク溶接電源「SENSARC™」シリーズ(図14)のみで実現可能な独自技術である。当技術により溶接ワークへのスパッタ付着が削減され、溶接の後工程である超音波探傷試験に必要なスパッタ除去作業の手間と時間が大幅に減り、コストダウンに貢献した(図15)。

REGARC™は2008年に実用化し、2021年にはNew REGARC™としてバージョンアップすることで、さらなる低スパッタ化を図っている。

4.4 梁部材の溶接技術

梁部材の基本素材はH形鋼である。H形鋼には圧延で形状を作り出す通称“ロールH”，溶接で作る通称“ビルドH”の2種があり、大型サイズや規格外形状はビルドHとなる。ビルドHでは、ウェブとフランジの当接部をすみ肉溶接され、溶接法はサブマージアーク溶接法が多く用いられる(図16)。

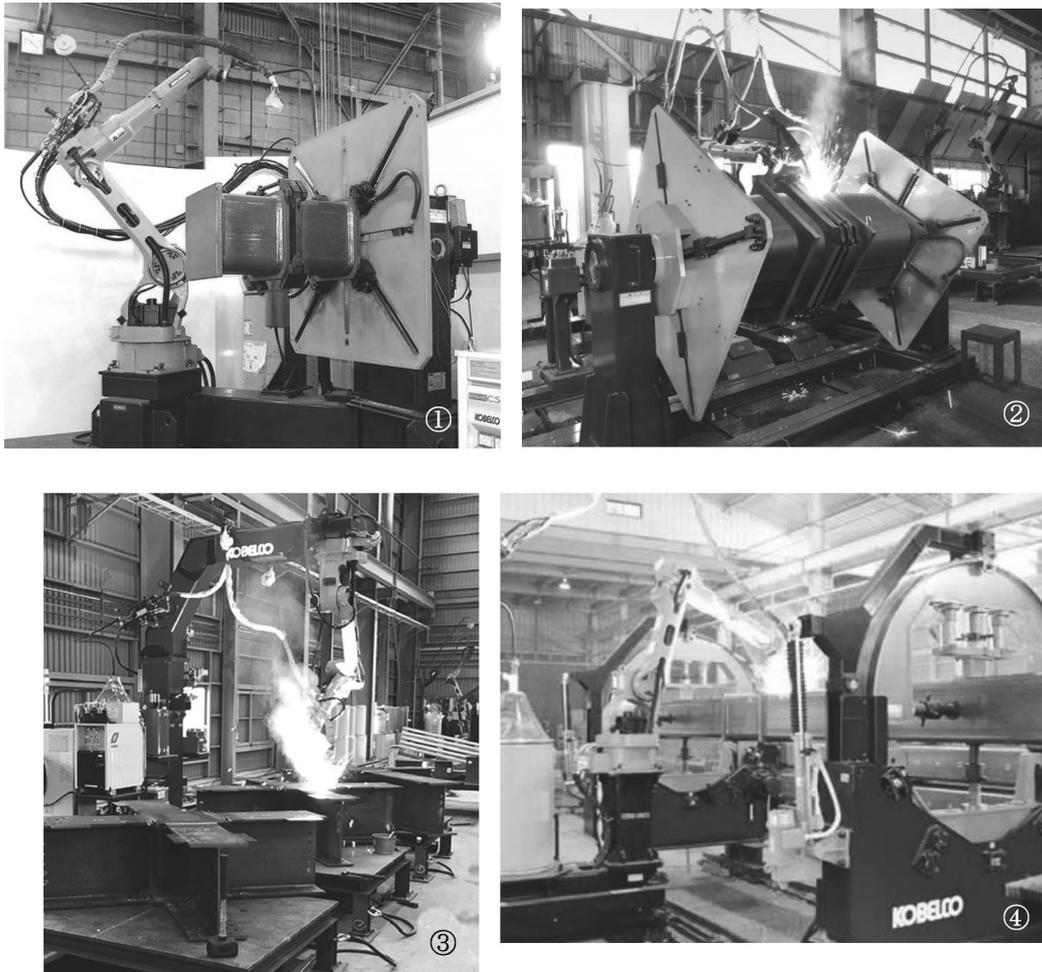


図13 柱部材用 ARCMAN™ 鉄骨溶接ロボットシステム
Fig.13 “ARCMAN™” steel frame welding robot systems for column assembly

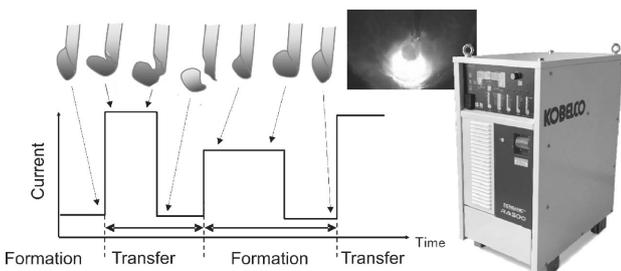


図14 低スパッタCO₂アーク溶接プロセス「REGARC™」の基本電流波形と、当機能を有するアーク溶接電源SENSARC™シリーズの最新機種RA500

Fig.14 Basic current wave form of low spatter CO₂ arc welding process “REGARC™”, and the latest model of “SENSARC™” series generates this function “RA500”



図15 一般的な炭酸ガスアーク溶接とREGARC™プロセスでのスパッタ付着状態の比較

Fig.15 Comparison of spatter adhesion states with conventional CO₂ arc welding and REGARC™ process

梁材に加工するには、穴あけのほか、スティフナと呼ばれる補強材や穴周りの補強材などの溶接取付作業が必要となる。柱用途に続き、近年、梁材溶接用のロボットシステムも本格実用化段階に入った(図17)。

4.5 現場建方の溶接技術

建築現場では、工場で作られた柱と梁などの部材をクレーンにより楊重し、高力ボルト接合とアーク溶接の両方を使い、順次組み建てながら階層を上げていくが、近年、現場建方の熟練溶接士が不足しつつあるとの課題が建設業界などから発せられる。この課題に対して当社では、小型可搬型溶接ロボット「石松™」によって貢献する。石松™は本体重量約6kgという超軽量を最大の特徴とし、安全柵の設置も不要であり、直線状もしくは鋼管に合わせた走行レール上に取り付けることで運用する。ロボット外観と現場適用イメージを図18に示す。石松™は下向、横向、上向と姿勢を選ばず適用できるが、難易度の高い上向姿勢自動溶接の適用イメージと溶接部の断面写真を図19に示す。当技術はロボットだけでなく、当社の特殊フラックス入り溶接ワイヤ「Familiarc

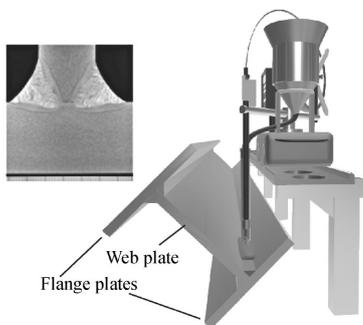


図16 ビルドH形鋼組立用サブマージアーク下向すみ肉溶接のイメージと断面一例

Fig.16 Image of flat position fillet submerged arc welding of build H-shape steel assembly and an example of weld joint cross section

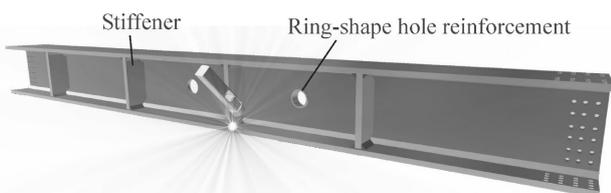


図17 梁部材の溶接イメージと ARCMAN™ 鉄骨天吊梁溶接ロボットシステム

Fig.17 Welding image of beam parts and "ARCMAN™" steel frame welding robot system for H-beam assembly

DW-1ST、-55ST」の特性を活かした工法である¹⁵⁾。溶接士による上向姿勢溶接は労働負荷が極めて高く、時間制約が生じるが、ロボットではその制約がない。いっぽう、最も適用頻度が高い柱同士の横向溶接については、制御の工夫による高品質化が図られている(本号p.97「建築現場における横向柱継自動溶接の新制御方法」参照)。

石松™に類似したロボットは世界的にも少なく、汎用性も高いことから、海外の鉄骨製作会社からも好評を得ている。なお、海外では商品名称を「ARCMAN™ PORTABLE」として展開している。

4.6 その他

各種溶接材料の技術については本号p.51「建築鉄骨向け溶接材料の最新動向とラインナップ紹介」を参照願いたい。阪神淡路大震災の後、耐震性向上を目的として、(一社)日本建築学会を中心に検討が行われて溶接材料の性能向上も要望された。当社は溶接材料のトップメーカーとして、(一社)日本溶接協会の中で高強度・高じん性溶接材料や熱的管理指標などのJIS規格追加の作業を先導した^{16), 17)}。

また、溶接ロボットについても、同協会や(一社)ロボット工業会などでその普及を目指し、ロボット型式認証制度と建築鉄骨ロボットオペレータ制度の整備を先導した。これらの業界活動は現在根付き、今となっては必然のものとなっている。

現在の建築鉄骨の溶接は自動化が最大のニーズであり、トレンドであるが、全てをロボット化することは現実的ではない。人による溶接作業は必ず残るため、その技量向上もまた重要であり続ける。4章冒頭に記載のとおり、当社は溶接士の技能向上にも力を入れている¹⁸⁾(図20)。

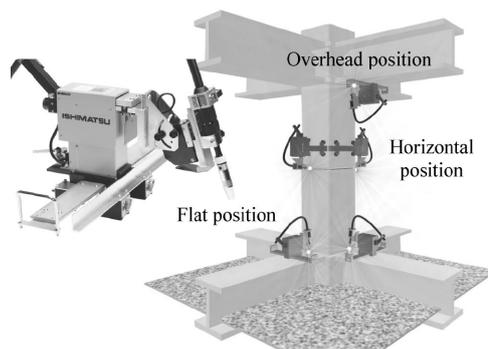


図18 可搬型溶接ロボット「石松™」とその現場適用イメージ
Fig.18 Portable welding robot "ISHIMATSU™" and application image at on-site

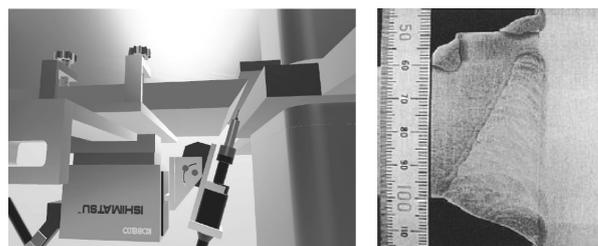


図19 「石松™」を使った現場上向柱/板厚40mm梁継手溶接
Fig.19 Column and 40 mm thickness beam joint overhead welding applied "ISHIMATSU™" robot at on-site¹⁷⁾

最近、実技訓練だけでなく、溶接未経験者や初心者を対象とした、バーチャル溶接トレーニングシステム「ナップ溶接トレーニング」^{19), 20)}も事業化した(図21)。

実技訓練を行う溶接研修センターは、神奈川県の本社藤沢事業所で60年以上の長きに渡り運営しているが、この度、建替によるリニューアルを図ることになった。2025年10月7日に開所した(図22)。引き続き溶接士やロボットオペレータの人材育成と業界発展に貢献していく所存である。

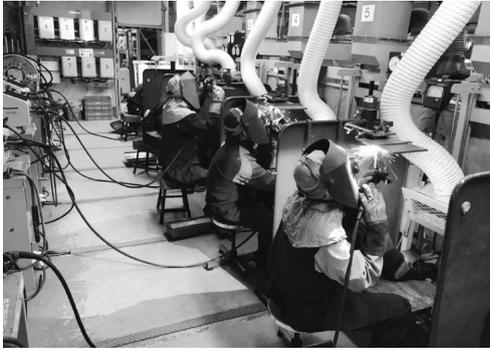


図20 藤沢事業所溶接研修センター内での技能訓練の様子
Fig.20 Skills training at the Welding Training Center in Fujisawa industrial operations



図21 バーチャル溶接トレーニングシステム「ナップ溶接トレーニング」
Fig.21 Virtual welding training system "NAP welding training"



図22 藤沢事業所 新研修センター
Fig.22 New Welding Training Center in Fujisawa industrial operations

むすび= 建築構造物が大変形時に破壊する箇所は接合部となることが多い。日本が地震国である限り、人命と建物を守るために、鉄骨建築物の溶接・接合部の品質は高いレベルで確保されなければならない。いっぽう、建設業の人材不足問題も喫緊の課題である。この両課題の解決のために、KOBELCOグループは溶接を核とした各種技術開発と実用化によって貢献していく。

参考文献

- 1) 鈴木励一. (一社)日本溶接協会 溶接情報センター. 2016. https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_19/sec_4/4-1.jsp. (参照 2005-05-19).
- 2) 林 邦秋. 神鋼溶接事業部門誌-ほうだより. 1968, Vol.98, No.8, p.5-10.
- 3) 中野俊明. 神鋼溶接事業部門誌-技術がいと. 1989, Vol.29, No.232, p.16-23.
- 4) (公社)日本鉄筋継手協会ホームページ. https://jrji.jp/pdf/certification/kohonintei_ichiran.pdf. (参照 2025-05-19).
- 5) 長谷 薫. 神鋼溶接事業部門誌-技術がいと. 1989, Vol.29, No.231, p.18-23.
- 6) 大久保宜正. 神鋼溶接事業部門誌-技術がいと. 1989, Vol.29, No.232, p.1-5.
- 7) 神鋼溶接事業部門誌-ほうだより. 1974, Vol.176, No.7, p.28-29.
- 8) 河西 龍ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.1, p.21-27.
- 9) 鈴木励一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.1, p.28-34.
- 10) 鈴木励一. 信州大学博士(工学)論文. 2015.
- 11) 山崎 圭ほか. 溶接技術. 産報出版. 2010, No.5, p.80-84.
- 12) 横田順弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.42-47.
- 13) 戸川貴雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.27-32.
- 14) 清水弘之. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.98-104.
- 15) 横田順弘ほか. 鉄構技術. 2003, No.5, p.40-45.
- 16) 向井昭義ほか. (一社)日本鋼構造協会 鋼構造論文集. 2000, Vol.7, No.26, p.13-25.
- 17) (一社)日本溶接協会溶接棒部会技術委員会. 鉄構技術. 2002, No.1, p.32-37.
- 18) 原田和幸. 神鋼溶接事業部門誌-ほうだより技術がいと. 2017, Vol.494, No.4, p.6-10.
- 19) 青山雄一郎. 溶接技術. 産報出版. 2025, No.4, p.34-37.
- 20) 神鋼溶接事業部門誌-ほうだより技術がいと. 2024, Vol.521, No.4, p.7.

(解説)

建築鉄骨向け溶接材料の最新動向とラインナップ紹介

山本貴大*1・于航*2・井上有人*1・幸村正晴*3

Latest Trends and Lineup of Welding Consumables for Structural Steel Column

Takahiro YAMAMOTO・Hang YU・Yuto INOUE・Masaharu KOMURA

要旨

建築鉄骨製作に使用されるガスシールドアーク溶接材料、サブマージアーク溶接材料、エレクトロスラグ溶接材料の最新動向、ならびに、鋼材強度クラスに応じた溶接材料のラインナップを紹介する。

Abstract

This paper presents the latest trends in consumables for gas shielded arc welding, submerged arc welding, and electroslag welding, which are commonly used in the construction of structural steel column. Also introduced is the lineup of welding consumables, which is tailored to the strength class of the steel.

検索用キーワード

建築鉄骨、ガスシールドアーク溶接、ソリッドワイヤ、フラックス入りワイヤ、サブマージアーク溶接、エレクトロスラグ溶接、590 MPa級鋼用溶接材料、780 MPa級鋼用溶接材料

ま え が き = 2025年現在、高さ325 mの日本一高い超高層ビルとなる麻布台ヒルズ森JPタワーや、2028年に竣工予定の高さ385 mとなるTOKYO TORCHが注目を集めており、首都圏を中心に建築需要が拡大している。近年の高層ビルや商業施設などは、空間の確保や経済効率の向上などを目的として、柱と柱の間隔を広げる大スパン化や柱の大型化などの傾向が強まっている。これに伴い、使用される鉄骨は厚肉化や大断面積化が進んでいるが、鉄骨重量の増加により加工や運搬コストの増加が課題となる。この課題を解決する手段の一つとして鋼材の高強度化が挙げられ、近年では、引張強さ550 MPa級鋼や590 MPa級鋼といった高強度鋼材の適用が拡大し、さらに、引張強さ780 MPa級鋼も超高層建築物に適用され始めている¹⁾。

建築鉄骨分野の溶接工程は、溶接技能者不足が課題となるいっぽうで、生産性向上や溶接品質の向上が求められている。鉄骨ファブリケータ工場内では、冷間成形角形鋼管の溶接に垂直多関節型ロボットを用いた自動溶接が普及しており、溶接組立箱形断面柱（以下、BOX柱という）では多電極サブマージアーク溶接やエレクトロスラグ溶接などの大入熱施工法が適用されている。

当社は、さらなる生産性や溶接品質の向上のニーズに応えるべく、建築鉄骨向けロボットシステムと専用溶接ワイヤの開発、さらに引張強さ780 MPa級鋼を含めた各強度クラスの鋼材に対応する溶接材料の開発を進めている。本稿では、建築鉄骨製作に使用されるガスシールド

アーク溶接材料、サブマージアーク溶接材料、エレクトロスラグ溶接材料の鋼材強度クラスに応じた溶接材料のラインナップを紹介するとともに、各溶接材料の最新動向について紹介する。

1. 炭酸ガスアーク溶接用ソリッドワイヤ

1.1 鋼材強度クラスに応じた溶接材料のラインナップ

鋼材強度クラスに応じた建築鉄骨向けソリッドワイヤのラインナップを表1に示す。

建築鉄骨で使用される代表的な柱材として鋼板を冷間加工にて成形した建築構造用冷間成形角形鋼管（以下、コラムという）が挙げられる。コラムは、冷間成形による加工硬化により、素材である鋼板の強度よりも上昇しているため、溶接材料は加工硬化の影響を考慮して選定する必要がある²⁾。例えば、引張強さ590 MPa級コラムには、690 MPa級鋼用炭酸ガスアーク溶接用ソリッドワイヤであるTRUSTARCTM注1) MG-70およびTRUSTARCTM MG-70R (N)を選定する必要がある。

鉄骨ファブリケータ工場内では、コラムの溶接に垂直多関節型ロボットを用いた溶接ロボットシステムが広く使われている。当社の建築鉄骨向け溶接ロボットシステムには、高能率化や低スパッタを実現するREGARCTM注2) プロセスを搭載しており、このプロセス専用ワイヤが

脚注1) TRUSTARCは当社の登録商標である。

脚注2) REGARCは当社の登録商標である。

*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部 *2 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部 (現 溶接事業部門 品質マネジメント部)

*3 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部

表 1 建築鉄骨向け炭酸ガスアーク溶接用ソリッドワイヤの一覧
Table 1 List of CO₂ solid wires for building structures

Grade of steel plate		TS ^{※1} 400 MPa / YP ^{※2} 235 MPa	TS 490 MPa / YP 325 MPa	TS 520 MPa / YP 355 MPa	TS 550 MPa / YP 385 MPa	TS 590 MPa / YP 440 MPa	TS 780 MPa / YP 630 MPa
Welding joint	Column type						
Column-Column (for robot welding)	Square pipe column	FAMILIARC™ MG-50R			TRUSTARC™ MG-60R	TRUSTARC™ MG-70	
		FAMILIARC™ MG-50R(N)			TRUSTARC™ MG-60R(N)	TRUSTARC™ MG-70R(N)	
		FAMILIARC™ MG-50R(A)			TRUSTARC™ MG-60R(A)		
		FAMILIARC™ MG-56R					
		FAMILIARC™ MG-56R(N)					
		FAMILIARC™ MG-56R(A)					
	Circular pipe column	FAMILIARC™ MG-50R		TRUSTARC™ MG-60R			TRUSTARC™ MG-80
		FAMILIARC™ MG-50R(N)		TRUSTARC™ MG-60R(N)			TRUSTARC™ MG-82
		FAMILIARC™ MG-50R(A)		TRUSTARC™ MG-60R(A)			
		FAMILIARC™ MG-56R					
		FAMILIARC™ MG-56R(N)					
		FAMILIARC™ MG-56R(A)					
Column-Beam, Beam-Beam, Column-Column (for semi-auto welding)	FAMILIARC™ MG-50					TRUSTARC™ MG-80	
	FAMILIARC™ MG-56					TRUSTARC™ MG-82	
			TRUSTARC™ MG-60				

※1 TS : Tensile Strength
※2 YP : Yield Point

(N) シリーズ, (A) シリーズである。(N) シリーズは REGARC™, (A) シリーズは NEW REGARC™, それぞれのプロセス専用溶接ワイヤである。

1.2 NEW REGARC™ 溶接専用ソリッドワイヤ FAMILIARC™^{注3)} MG-56R (A)

NEW REGARC™ プロセスは, 従来の REGARC™ プロセスの波形制御をさらに最適化し, グロビュール領域における溶滴移行形態の安定性向上およびスパッタ低減を実現しており, 最大ワイヤ送給速度は従来の 16.4 m/min から 18.0 m/min, 最大溶接電流は 320 A から 340 A に拡大している。ワイヤ送給速度の増加に伴い, 送給経路の内面からワイヤに与える反力は上昇する。したがって, ワイヤ表面の銅めっきなどが脱落しやすくなり, 送給経路内の部位であるライナー, インナーチューブ, チップに固形物が堆積することで, 安定したワイヤ送給が阻害される³⁾。そこで, 当プロセスに適用する専用溶接ワイヤとして, 特殊な表面処理を施すことで安定したワイヤ送給性と詰まり量を軽減した (A) シリーズを開発した。

(A) シリーズの FAMILIARC™ MG-56R (A) について, FAMILIARC™ MG-56R (N) を比較に NEW REGARC™ プロセスにおけるライナー, インナーチューブ, チップに堆積する固形物詰まり量を評価した。溶接電流 350 A で 5 時間の溶接を実施し, ワイヤ 10 kg 当たりの送給経路内固形物詰まり量の測定例を図 1, チップ付根の外観写真を図 2 にそれぞれ示す。FAMILIARC™ MG-56R (A) は, ワイヤ表面とコンジットライナーあるいはインナーチューブとの摺動(しゅうどう)摩擦抵抗が低減したことで, 送給経路内でワイヤ表面の銅めっきが脱落しにくかったと考えられる。

溶接継手性能は, コラム (490 MPa 級コラム, 板厚 32 mm) と通しダイアフラム (JIS G 3136 SN490B, 板

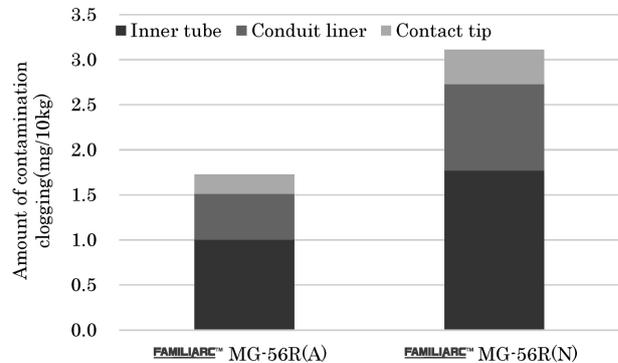


図 1 送給経路内 固形物詰り量の一例
Fig.1 Example about amount of contamination clogging in wire feeding route parts

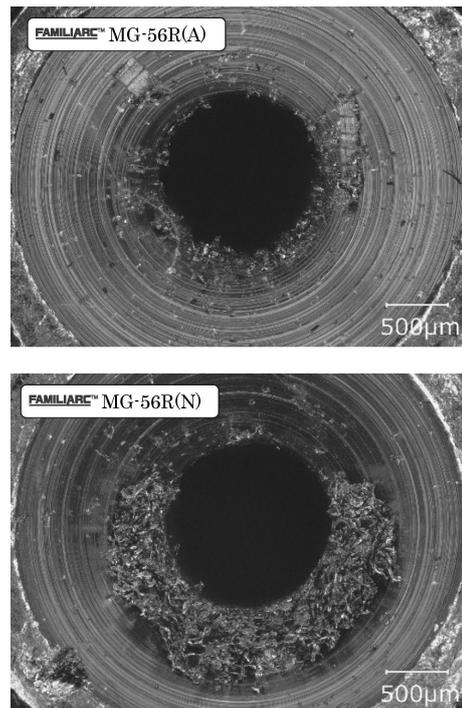


図 2 チップ付根の堆積物
Fig.2 Contamination clogging at base of the contact tip

脚注 3) FAMILIARC は当社の登録商標である。

厚36 mm) の溶接で評価した。溶接入熱 35 kJ/cm 以下、パス間温度 250℃ 以下とし、ルートギャップ 4 mm、10 mm の二つの継手を作製した。平板部および角部の断面マクロと積層要領を図 3、ルートギャップ 10 mm の溶接金属の機械的性質を表 2 に示す。なお、シャルピー衝撃試験片はコラム上面から板厚方向へ深さ 7 mm の位置で採取した。断面マクロから、溶込みやビード表面は良好な形状を示しており、溶接金属の強度とシャルピー吸収エネルギーも建築鉄骨で求められる基準を十分に満たしていることが確認された。

1.3 780 MPa 級鋼用ソリッドワイヤ TRUSTARC™ MG-82

建築鉄骨の工場および現場における半自動溶接においても、高能率な溶接施工が求められる。溶接材料に求められる性能として、溶接金属の機械的性質だけでなく、溶接作業の前後工程を効率化する溶接作業性についても改善ニーズがある。とくに、スパッタ、ワイヤ送給性の改善が求められており、当社はこれらのニーズに対応する技術開発を行っている。表面処理技術によるワイヤ送給性の改善はその一つであり、高張力鋼用ソリッドワイヤにもこの技術を適用させている。780 MPa 級鋼用ソリッドワイヤ TRUSTARC™ MG-82 の事例を紹介する。

TRUSTARC™ MG-82 の改良品は、製造過程でワイヤに表面処理を施すことにより、従来品と比較して優れたワイヤ送給性やアーク安定性を実現している。過酷な条件でワイヤ送給性を評価するため、図 4 の概念図で示

すとおり 6 m の長尺トーチケーブルの一部を直径 300 mm の送給経路とし、溶接時の溶接電流、アーク電圧、送給抵抗を評価した。ワイヤ径 1.2 mm、溶接条件 300 A、36 V、30 cm/min で溶接を実施した結果を図 5 に示す。改良品は従来品と比較して、ワイヤ送給抵抗の変動が小さく、安定していることが分かる。ワイヤ送給

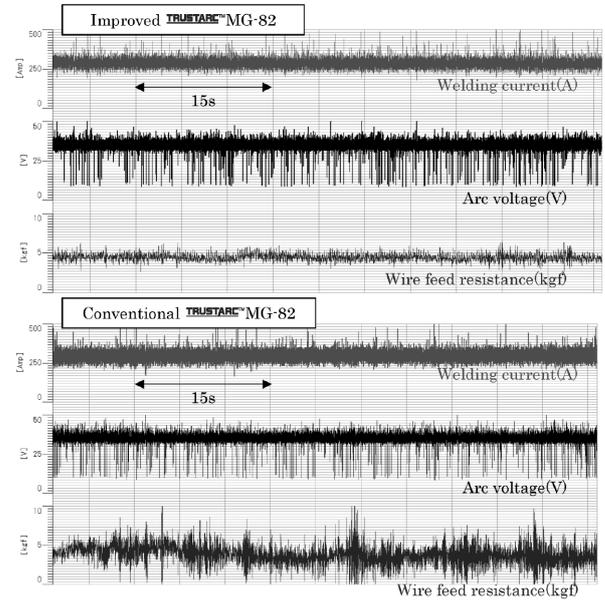


図 5 TRUSTARC™ MG-82 改良品と従来品を用いた溶接電流、アーク電圧、送給抵抗の変動

Fig.5 Fluctuation of welding current, arc voltage and wire feed resistance of improved and conventional [T] MG-82

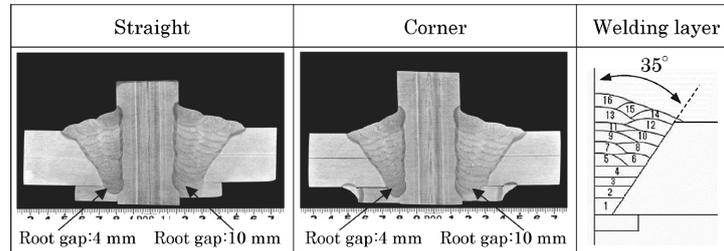


図 3 FAMILIARC™ MG-56R (A) 溶接継手の平板部及び角部の断面マクロと積層要領
Fig.3 Cross-sectional macro comparison [F] MG-56R(A) welded joint and welding layer

表 2 FAMILIARC™ MG-56R (A) 溶接金属の機械的性質
Table 2 Mechanical properties of weld metal by [F] MG-56R(A)

		YP(MPa)	TS(MPa)	vE ₀ (J)
FAMILIARC™ MG-56R(A)	Straight	567	645	Avg. 108
	Corner	-	-	Avg. 124
Spec.(490 MPa Grade)		≥ 325	≥ 490	≥ 27

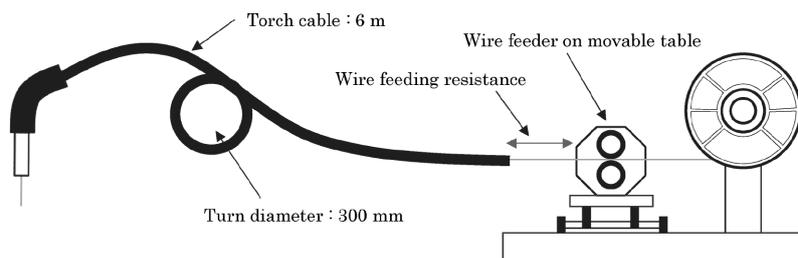


図 4 ワイヤ送給経路の概念図
Fig.4 Schematic illustration of wire feeding route

抵抗の変動はアーク安定やスパッタ発生に影響を与えるだけでなく、半自動溶接時のトーチ振動に対しても影響を与えることから、改良品は安定した溶接作業性だけでなく、溶接作業時の疲労感低減効果も期待できる。

2. サブマージアーク溶接材料

2.1 BOX柱角継手用溶接材料のラインナップ

BOX柱の模式図を図6に示す。角継手溶接部は、サブマージアーク溶接（以下、SAWという）による大入熱1パス施工が広く適用されている。鋼材強度クラスに応じたBOX柱角溶接用のSAW材料のラインナップを表3に示す。

最近では、780 MPa鋼用溶接材料や1層1パス施工で

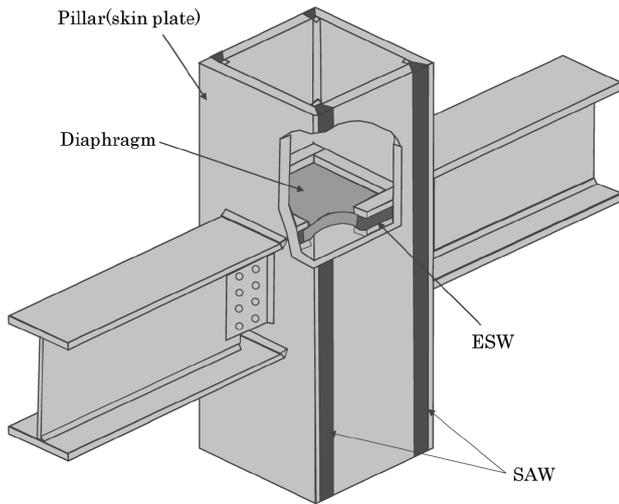


図6 BOX柱における溶接継手部
Fig.6 Weld joints in Box-Columns

は対応が困難な高強度極厚対応として2層2パス施工用溶接材料が新たに加わっている。各種諸性能については次節で紹介する。

2.2 550 MPaおよび590 MPa級鋼用極厚鋼板角継手2パス溶接材料

建築物の高層化・大型化に伴いスキンプレートの厚肉化が進んでおり、高能率施工法のニーズは高い。BOX柱角溶接用SAW材料は、板厚60 mmまで1層1パスの大入熱施工においても安定した溶接品質が確保できるように設計されている。いっぽう、板厚60 mm超ではビード形状や溶込み深さが安定しにくく、極厚鋼板の高能率施工ニーズに対応できない課題がある。この課題に対して、比較的大入熱条件を用いた3層4パスや2層3パスの溶接施工が検討されるが、2度の熱サイクルを受けた溶接金属は微細な割れが生じることが経験上知られている。2層2パスであれば1度の熱サイクルであり、高能率かつ溶接品質の安定性が期待できると判断し、専用の従来ワイヤTRUSTARC™ US-49と組み合わせる新たなフラックスTRUSTARC™ PF-I60Kを開発した。TRUSTARC™ PF-I60K/TRUSTARC™ US-49の諸性能を以下に紹介する。

スキンプレートには、KCL A385C (75 mm) とSA440C-ST (80 mm) のそれぞれについてBOX角部を模擬したL型の試験体を作製した。表4に示す溶接条件で得られた溶接金属の機械的性質を表5、各種試験片の採取要領を図7にそれぞれ示す⁴⁾。溶接金属の引張性能は鋼材の規格を十分満足し、シャルピー吸収エネルギーについても個々値、平均ともに27 J以上を十分に満足することが確認された。

表3 BOX柱角溶接用SAW溶接材料の一覧
Table 3 List of recommended SAW consumables for Box-Columns

Grade of steel plate	TS 400 MPa / YP 235 MPa	TS 490 MPa / YP 325 MPa	TS 520 MPa / YP 355 MPa	TS 550 MPa / YP 385 MPa	TS 590 MPa / YP 440 MPa	TS 780 MPa / YP 630 MPa
1layer-1pass	FAMILIARC™ PF-I53ES / FAMILIARC™ US-36L					TRUSTARC™ PF-I80ES ^{※1} / TRUSTARC™ US-80SP
	FAMILIARC™ PF-I53ES / TRUSTARC™ US-49					
	FAMILIARC™ PF-I55ES / FAMILIARC™ US-36L					
2layers-2 passes	FAMILIARC™ PF-I55ES / TRUSTARC™ US-49					
	TRUSTARC™ PF-I60K ^{※1} / TRUSTARC™ US-49					

※1 : New lineup

表4 溶接条件
Table 4 Welding condition

Pass	Electrode (6.4φ)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Preheating · inter pass temperature (°C)	Groove shape
1	L	2,250	38	16	618	RT.	
	T	1,650	48				
2	L	2,000	42	24	396	≤ 250	
	T	1,550	48				

表 5 溶接金属の機械的性質
Table 5 Mechanical properties of weld metal

Specification (thickness)	Specimen location	Tensile test ^{※1}			Charpy impact test ^{※2}		
		YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	vE _{0C} (J)		
KCL A385 (75 mm)	Face	459	626	26	106	111	100
	Back	533	654	26	97	121	142
Spec.		≥ 385	≥ 550		≥ 27		
SA440C-ST (80 mm)	Face	471	641	24	120	97	123
	Back	506	648	25	143	121	144
Spec.		≥ 440	≥ 590		≥ 27		

※1 Size of tensile specimen: Dia. = 12.5 mm, G.L. = 50.0 mm
 ※2 10×10 mm, 2 mm V notch

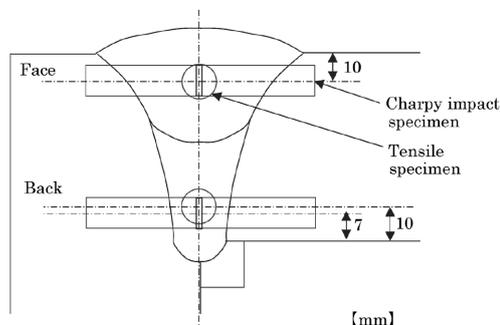


図 7 試験片採取位置
Fig.7 Specimen location

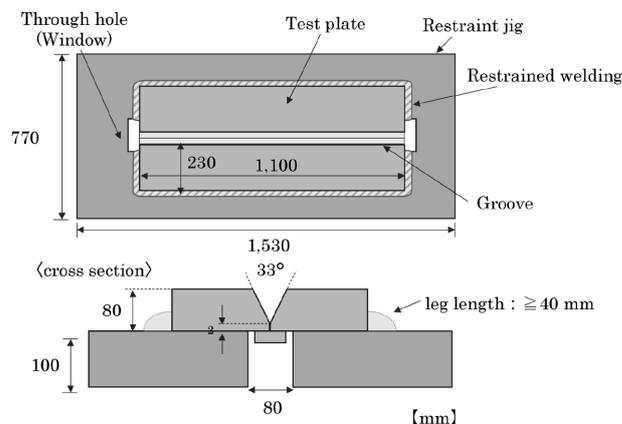


図 8 窓形拘束溶接割れ試験
Fig.8 Schematic illustration of layout of both restraint and test plate

表 6 TRUSTARC™ PF-I60K / TRUSTARC™ US-49 溶着金属の機械的性質一例
Table 6 Mechanical properties of [T] PF-I60K / [T] US-49 deposit metal

Wire /Flux	Tensile test			Charpy impact test	Diffusible hydrogen content(ml/100g)
	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	vE _{.5C} (J)	
TRUSTARC™ PF-I60K / TRUSTARC™ US-49	606	686	26	120, 105, 132 Avg.119	Avg. 4.4
JIS Z3183 S621-H4	≥ 500	≥ 610	≥ 17	≥ 27	≤ 8.5

極厚鋼板の多層溶接であり、耐低温割れ性に懸念があることから、予熱・パス間温度条件を窓形拘束溶接割れ試験から確認した。図 8 に窓形拘束溶接割れ試験の試験体を示すが、試験板の適用鋼種は溶接金属の溶接割れ感受性が高くなるように、比較的Pcmの高いJIS G 3106 SM490Aを採用した。溶接施工条件は、表 4 の溶接条件とし、1パス目は予熱無し(約15℃)、2パス目のパス間温度を150℃とした。溶接完了後、48時間室温に放置した後、拘束板から試験板を取り外し超音波探傷試験(以下、UTという)を実施した。UTは、基準感度+10 dBとし、さらに研削された溶接ビード直上に探触子を置いて実施した。試験の結果、検出レベル以上のエコーは認められず、実用的な予熱無し・パス間温度150℃以上(250

℃以下)で耐低温割れ性に問題が無いことを確認した。

建築鉄骨に使用する溶接材料は、JIS Z 3183に準拠した溶着金属区分が必要とされる。TRUSTARC™ PF-I60K/TRUSTARC™ US-49の組み合わせで溶着金属の引張および衝撃試験、拡散性水素試験を実施した。表 6 に各種試験結果を示す。溶着金属の品質区分は「JIS Z 3183 S621-H4」に分類でき、590 MPa級鋼の高張力鋼に使用できることを確認した。

2.3 780 MPa級鋼 BOX 柱角継手 1パス溶接材料

近年、鋼材の高強度化によるスキンプレートの薄肉化の流れもあり、780 MPa級鋼が適用され始めている。590 MPa級鋼までのBOX柱角継手溶接は、サブマージアーク溶接による1パス施工が広く適用されているが、

表7 溶接条件
Table 7 Welding condition

Flux / Wire	Electrode (6.4φ)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Groove shape
TRUSTARC™ PF-I80ES / TRUSTARC™ US-80SP	L	2,050	40	20	462	
	T	1,500	48			

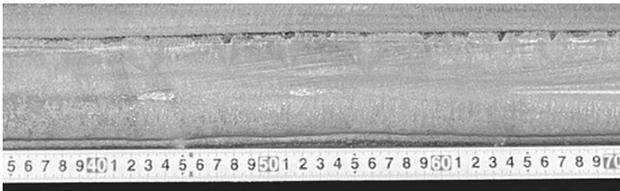


図9 TRUSTARC™ PF-I80ES / TRUSTARC™ US-80SP 溶接継手のビード外観

Fig.9 Bead appearance of [T] PF-I80ES/ [T] US-80SP welded joint

表8 溶接金属の機械的性質
Table 8 Mechanical properties of welded metals

Flux / Wire	Tensile test			Charpy impact test
	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	vE _{0c} (J)
TRUSTARC™ PF-I80ES/ TRUSTARC™ US-80SP	644	822	19	Avg. 79
Spec.(780MPa Grade)	≥630	≥780	-	≥27

780 MPa級鋼は施工効率の低い小入熱の多パス溶接が主流である。780 MPa級鋼の溶接金属は低温割れ感受性が極めて高く、予熱やパス間温度を厳格に管理する必要がある。また、小入熱の多パス溶接ではアークタイムも長いことから施工負担が大きい。本節では、780 MPa級鋼BOX柱の角継手に対し1パス溶接が可能なサブマージアーク溶接材料であるフラックス TRUSTARC™ PF-I80ES、ワイヤ TRUSTARC™ US-80SP の諸特性について紹介する。

溶接材料の規格について、ワイヤは「JIS Z 3351 YS-NM6」、フラックスは「JIS Z 3352 SACG-II」、JIS Z 3183 に基づいた溶着金属の品質区分は「JIS Z 3183 S804-H4」に分類される。溶接継手性能は、スキンプレートに大入熱仕様780 MPa級鋼（板厚50 mm）を用いて表7の溶接条件で評価した。ビードの外観を図9、断面マクロを図10に示す。溶接作業性は、590 MPa級以下の鋼板に適用される溶接材料と同等程度であり、溶込み形状も良好である。溶接金属の機械的性質を表8に示す。引張試験片は母材表層から10 mm位置の溶接金属中央、シャルピー衝撃試験片は母材裏面から7 mm位置で採取した。溶接金属の引張性能は、スキンプレート母材規格を満足し、シャルピー吸収エネルギーについては、平均で27 J以上を満足することが確認された。

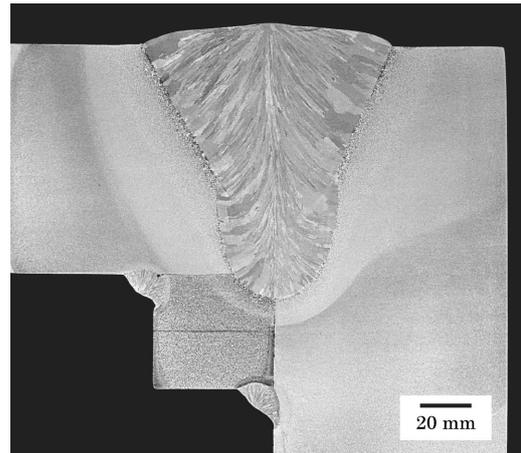


図10 TRUSTARC™ PF-I80ES / TRUSTARC™ US-80SP 溶接継手の断面マクロ

Fig.10 Cross-sectional macro comparison of [T] PF-I80ES / [T] US-80SP welded joint

3. エレクトロスラグ溶接材料

3.1 鋼材強度クラスに応じた溶接材料のラインナップ

エレクトロスラグ溶接（以下、ESWという）は、主に厚板の立向溶接に適用される高能率溶接プロセスである。開先内に形成された溶融スラグ浴の中にワイヤを連続的に送給し、ワイヤから通電される電流により発生する溶融スラグの抵抗発熱を利用してワイヤと母材を溶融する溶接法である⁵⁾。建築鉄骨分野では、図6に示すBOX柱におけるスキンプレートと内ダイアフラムの接合部に広く適用されている。表9に鋼材強度クラスに応じたラインナップを示す。図11には代表的な溶接部の断面マクロを示しており、溶込み寸法も記載している。これにより、十分な溶込みが得られていることが確認できる。

ESWは、広範囲な板厚に対して1パスでの溶接が可能であり、スパッタの発生がほとんどないうえ、溶着効率はほぼ100%であるという特長がある。いっぽうで高い入熱量を伴うプロセスであるため、安定した溶接継手性能の確保は重要な課題となる。当社では、これらの課題に対応する、建築鉄骨向けESW用ワイヤの開発に取り組んでいる。

3.2 550 MPaおよび590 MPa級鋼用フラックス入りワイヤ

最近の高強度厚肉化対応では、溶接入熱の増大により溶接継手性能の確保にはワイヤから添加する合金成分を増加させる必要があるもののソリッドワイヤの場合は、ワイヤが硬くなり製造上に課題が生じる懸念やワイヤ送給性に悪影響をおよぼすリスクが想定される。これらを背景に合金成分設計が容易なフラックス入りワイヤをベースとした550 MPaおよび590 MPa級鋼に対応するワイヤ

イヤ FAMILIARC™ EM-56ST および TRUSTARC™ EM-60STを開発している。FAMILIARC™ EM-56STは「JIS Z 3353 YES560-M」、TRUSTARC™ EM-60STは「JIS Z 3353 YES600-M」に分類される。

JIS Z 3353準拠の溶接試験における溶接金属の機械的性質試験結果の一例を表10に示す。いずれのワイヤも直径1.6 mmであり、フラックスはFAMILIARC™ EF-38フラックスと組み合わせて使用される。

溶接継手性能は、実物件で頻繁に使用される板厚において、より大入熱となるダイアフラムとスキンプレーットの組み合わせとして60 mm × 40 mmと65 mm × 45 mmを選定し、BOX柱内ダイアフラムを想定したT型簡易継手試験を実施した。鋼材の組み合わせを表11、溶接条件および開先形状を表12にそれぞれ示す。

溶接継手の機械的性質を表13に示す。いずれの溶接継手における引張性能およびシャルピー衝撃性能は規定されたスペックを十分に満足することが確認された。シャルピー衝撃性能に関して、溶接金属のみならず、ESW溶接部に要求される母材特性であるBondおよびHAZ (Heat Affected Zone, Bond+1 mm)においても、スペックを十分に満足することが確認された。

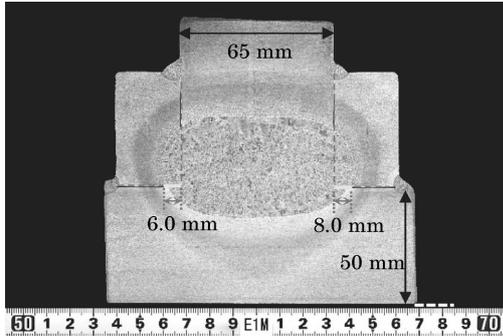


図11 ESW断面マクロ例
Fig.11 Example of ESW cross-section macro

表9 建築鉄骨向けエレクトロスラグ溶接材料の一覧
Table 9 List of Electroslag Welding Materials for building structures

Grade of steel plate	TS 400 MPa / YP 235 MPa	TS 490 MPa / YP 325 MPa	TS 520 MPa / YP 355 MPa	TS 550 MPa / YP 385 MPa	TS 590 MPa / YP 440 MPa
Solid wire (Flux / Wire)	FAMILIARC™ EF-38 / FAMILIARC™ ES-55			FAMILIARC™ EF-38 / TRUSTARC™ ES-60ST	
	FAMILIARC™ EF-38 / FAMILIARC™ ES-55ST				
				FAMILIARC™ EF-38 / FAMILIARC™ ES-56ST	
Flux cored wire (Flux / Wire)	FAMILIARC™ EF-38 / FAMILIARC™ EM-56ST ※1			FAMILIARC™ EF-38 / TRUSTARC™ EM-60ST ※1	

※1: New lineup

表10 JIS Z 3353に準拠する溶接金属の機械的性質
Table 10 Mechanical properties of the weld metal in compliance with JIS Z 3353

Grade of steel (thickness)	Flux	Wire	Tensile test (center)			Charpy impact test (center)	
			YP(MPa)	TS(MPa)	El.(%)	vE _{5C} (J)	vE _{0C} (J)
550 MPa (25 mm)	FAMILIARC™ EF-38	FAMILIARC™ EM-56ST	483	657	26	—	51, 73, 57 Avg.60
JIS Z 3353 YES560-M			≥ 400	≥ 550	≥ 20	—	—
590 MPa (25 mm)	FAMILIARC™ EF-38	TRUSTARC™ EM-60ST	556	737	23	126, 111, 115 Avg.117	—
JIS Z 3353 YES600-M			≥ 450	≥ 590	≥ 20	—	—

※SESNET®^{註4)}, GAP:23 mm, DCEP, 1 layer:1 pass, 380 A-48 V

表11 溶接材料および鋼材
Table 11 Welding consumables and steel plate

No.	Flux	Wire	Skin plate	Diaphragm	Backing bar
1	FAMILIARC™ EF-38	FAMILIARC™ EM-56ST	KCL A385C-ST (t: 40 mm)	KCL A385C (t: 60 mm)	JIS G 3136 SN490B
2		TRUSTARC™ EM-60ST	KCL A440C-ST (t: 45 mm)	KCL A440B (t: 65 mm)	

脚注 4) SESNETは日鉄溶接工業株の登録商標である。

表12 溶接条件および開先形状
Table12 Welding conditions and groove shape

No.	Welding conditions		Groove shape
1	380A-50V Wire feed speed:9 m/min	H.I. : 861 kJ/cm	
2		H.I. : 964 kJ/cm	

表13 溶接金属の機械的性質
Table13 Mechanical properties of the weld metal

No.	Tensile test (center)				Charpy impact test vE _{0°C} (J)		
	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	RA (%)	Weld metal (Bond+1 mm)	skin plate side	
						Bond	HAZ (Bond+1 mm)
1	460	659	26	70	119, 84, 128 Avg.110	141, 122, 83 Avg.115	117, 120, 127 Avg.121
Spec.	≥ 385	≥ 550	—	—	≥ 27J		
2	481	700	25	70	167, 114, 166 Avg. 149	115, 68, 109 Avg.97	124, 111, 108 Avg.114
Spec.	≥ 440	≥ 590	—	—	≥ 27J		

むすび = 建築鉄骨製作における高能率化や建築鉄骨用鋼板の高強度化および厚肉化などの市場のニーズに対し、溶接材料、溶接施工の面で技術開発を行ってきた。今後も開発を継続し、お客様の課題を解決していくことで、安全・安心なまちづくり・ものづくりに貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 松本修一ほか. 大成建設技術センター報. 2013, 第46号.
- 2) 国立研究開発法人建築研究所. 2018年版 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル. 第1版, 2018, p.148-149.
- 3) 戸川貴雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.28-30.
- 4) 一般社団法人 日本鋼構造協会. 建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準試験マニュアル～引張試験・シャルピー衝撃試験～ JSS IV 13 -2025. 2025, p.57.
- 5) 溶接学会・日本溶接協会編. 溶接・接合技術総論. 第7版, 産報出版株式会社, 2023, p.56-58.

(技術資料)

橋梁補修補強用 RE-SET ケーブル[®] システム

有路亮平*¹・堀井智紀*²・荒木 茂*¹

RE-SET Cable[®] System for Repairing and Reinforcing Bridges

Ryohei ARIJI・Tomonori HORII・Shigeru ARAKI

要旨

橋梁の老朽化や設計荷重の増加により、補強対策が必要な橋梁が増加している。そのような中、橋梁補修補強方法の一種である外ケーブル補強工法についても需要が増加しており、新たに指針が整備され、高性能かつ高耐久な外ケーブル工法が求められている。今回、耐久性および施工性に優れた新たな外ケーブルを開発したことから、その防せい性能や疲労性能を確認した試験結果について報告する。また、実橋梁でのケーブルやその周辺部材の取り扱い、緊張方法などの施工状況についても報告する。

Abstract

The number of bridges that require reinforcement measures is increasing due to the aging of the structures and the increase of design loads. In view of this situation, there is also a growing demand for the external cable reinforcement method, a type of bridge repair and reinforcement method, and new guidelines calling for high-performance and high-durability external cable construction methods have been established. In connection with this, a new external cable has been developed, which excels in both durability and construction. This paper reports on test results that confirm its effectiveness in preventing rust and enhancing fatigue performance. The paper also reports on the construction situation, including the handling of cables and their surrounding materials in an actual bridge, and the tensioning method.

検索用キーワード

橋梁, 補修補強, 老朽化対策, 外ケーブル補強工法, 高耐久, 施工性

まえがき = 日本国内におけるプレストレストコンクリート（以下、PC）橋は1950年代より建設が開始され、1960年代から急激に増加し、1990年代をピークにこれまで数多く建設されてきた。近年、PC橋の劣化が顕在化しており、PCグラウトの充填不足、雨水や塩化物イオンを起因としたPC鋼材の腐食や破断などが確認されている。いっぽう、1993年の道路構造令の改正により通行車両の大型化対策として橋梁、高架道路の設計自動車荷重が引き上げられており、旧基準で建設された橋梁については耐荷力不足が問題となっている。このような状況下において、外ケーブルによる補修・補強のニーズが高まっているが、補強用外ケーブルに関する基準類は新設で用いられる外ケーブルに比べ充実していないという問題があった。これらの問題に対し、補修・補強に関する具体的な性能照査方法や仕様に関する技術指針として2022年にプレストレストコンクリート工学会より「既設PCポストテンション橋保全技術指針」が刊行された。

このような背景から、新たな指針に則した耐久性および施工性に優れた外ケーブル補強工法向けのPCケーブルおよび定着システムを開発した。本稿では、開発したケーブルと定着システムの概要、各種性能確認試験の内容および施工について報告する。

1. 開発品の概要

1.1 開発コンセプト

外ケーブル補強工法は、一般に桁外などの厳しい環境下で使用されるため、施工から供用にかけて荷重や衝撃に対して所要の強度や十分な防せい性能を有し、さらに経年劣化が少なく耐久性・耐疲労特性に優れる必要がある。また、外ケーブル補強工法は、初期緊張力を低く設定して状況に応じた追加緊張、災害などにより損傷したケーブルシステムの交換、橋梁解体時の撤去など様々な場面に対応できるように、再緊張や緊張力開放といった機能を有していることが望ましい。

以上から、設計コンセプトを高疲労特性（疲労特性に優れたくさび式）、高耐食性（被覆ケーブル、金具表面処理、内部完全充填）、再緊張・取替更新（張力調整可能なねじ式定着具）が可能な仕様とした。以下に詳細な構成について示す。

1.2 構成

1.2.1 ケーブル

ケーブル外観を図1、ケーブル断面を図2に示す。ケーブルは、多重防せい（マルチレイヤプロテクション）の考え方を採用した。ケーブルの緊張材は「亜鉛めっきPC鋼より線（以下、GPS）」と「内部充てん型エポキシ

*¹ 神鋼鋼線工業(株) 生産本部 加工品技術部 *² 神鋼鋼線工業(株) 新事業企画開発部

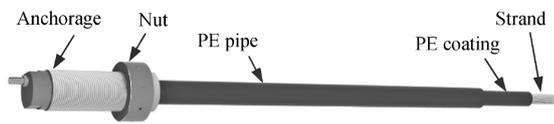


図1 RE-SETケーブル®
Fig.1 RE-SET cable

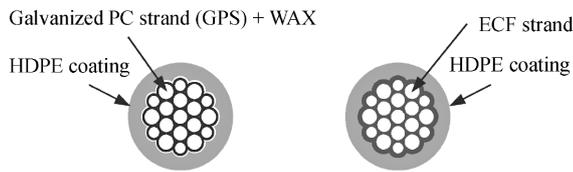


図2 ケーブル断面
Fig.2 Cross section of tendon

樹脂被覆PC鋼より線（以下、ECFストランド）」の2種類があり、外周被覆材（以下、PE被覆）は耐候性や耐薬品性に優れた高密度ポリエチレンを使用した。防せい層の数は、GPSが「亜鉛めっき・防せいワックス・高密度ポリエチレン」による三重防せい、ECFストランドが「エポキシ樹脂・高密度ポリエチレン」による二重防せいになっている。

1.2.2 定着具

定着具の概要を図3に示す。定着具は、くさび方式を採用し、亜鉛めっきやエポキシ樹脂の上から定着する方法とした（PE被覆は除去した状態）。くさび方式はテーパ形状の受けを持った金具（スリーブ）と、内側に歯を設けたくさびによりPC鋼材を固定（定着）する。PC鋼材が引っ張られること（緊張）によりくさびがスリーブに入り込み、PC鋼材を挟み込むようになっている。定着具の先端にはブッシュを配置しており、桁のたわみに伴うくさび部の繰り返し曲げ応力に対する耐久性を向上させている。機能面では、外周ねじ加工のスリーブとリングナットで構成することで再緊張や緊張力開放が可能な定着具とした。防せい面では、定着具に複合皮膜処理を採用するとともに、最も重要な箇所である「くさび周辺の空間」をポリブタジエンゴムで充填する完全密閉構造にすることで、供用中の腐食因子の侵入を防止する仕様とした。なお、くさび方式は、配線時のケーブル端部に定着金具がなく軽量、貫通孔の径が小さくできる、長さ管理が緊張後の余長切断で調整できるといった利点がある。

1.2.3 緊張システム

PC鋼材はプレストレスを導入するため、ジャッキを使用して緊張を行う。くさび式の定着具のため、緊張・定着時にはセット量を考慮する必要がある。セット量とは、定着時にPC鋼より線がくさびと一体となって内方へ引き込まれる量であり、PC鋼材がセット量分内方へ引き込まれると、場合によってはその分ジャッキで導入した張力がロスする。再度緊張してリングナットなどで張力を調整するが、このような作業を簡易に実施するために、緊張ジャッキに特殊ノーズを採用している。特殊ノーズは、切り替えリングを回すことによりジャッキの支圧位置を定着具から支圧板へ切り替えることができる

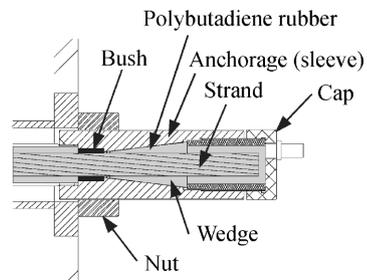


図3 定着具の概要
Fig.3 Overview of anchorage

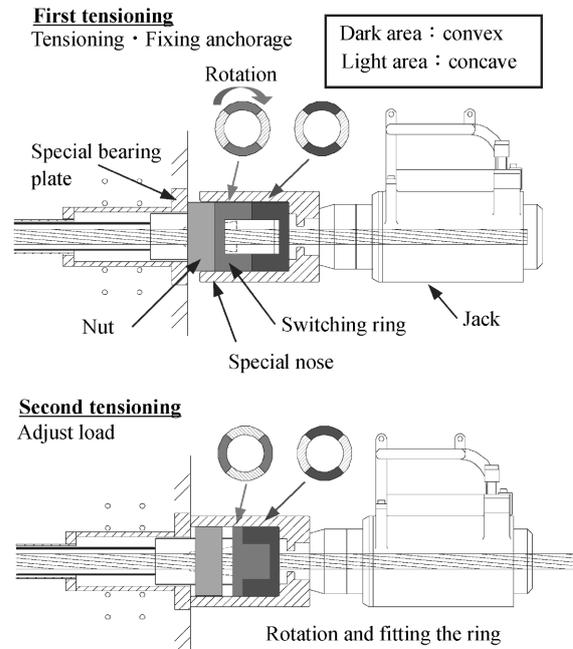


図4 特殊ノーズによる緊張方法の概要
Fig.4 Overview of tensioning methods with special nose

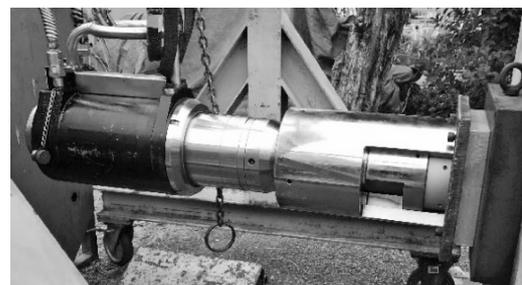


図5 緊張ジャッキ
Fig.5 Jack with special noses

ものとした。これにより、一般的にセット量補正作業で必要となるラムチェア設置やジャッキの取り外し工程を省略できる（図4、図5）。

2. 性能確認試験

2.1 定着具の防せい性能

PC鋼材の定着具は高強度材かつ高応力下で使用されるため、酸洗いを伴う溶融亜鉛めっきで防せいすると水素脆化などのリスクがある。また、最外周部がネジ部となるため、ネジかん合の観点から一般的な塗装は事前に行うことができない。そこで水素脆化のリスク低減およびネジかん合が可能となる防せい方法として、酸洗いや

電解工程なしで処理する複合皮膜処理（亜鉛アルミを含有するベースコートとアルミと有機系樹脂を主成分とするトップコートの2層で形成される被膜）を採用している。定着具における本被膜処理の防せい性能を評価すべく中性塩水噴霧試験（5%NaCl噴霧・1,000時間）を実施した。なお、比較のため溶融亜鉛めっき処理品（HDZT77）も同時に実施した。

試験結果を図6に示す。溶融亜鉛めっき品は306時間後に全面に赤さびが発生したが、複合皮膜処理品は1,000時間後でも表面およびねじ部に塗膜の膨れ、さび、断面欠損は確認されなかった。

2.2 フレッシング疲労試験

GPS, ECFストランドの各タイプの最大サイズについてフレッシング疲労試験を実施した。本稿ではGPSの試験結果を報告する。

試験概要図を図7に示す。フレッシング疲労試験は実際の橋梁における偏向部を模擬し、ケーブルに所定の緊張力を与えた後に、ケーブル中央部をアクチュエータによって上下させる試験である。両端部は型枠に支圧板、補強筋を配してコンクリートを流し込み、固めたコンクリートブロック定着体、ケーブル中央部にはデビエータを模擬したコンクリート製の荷重ブロックを設置する。荷重ブロックには所定の曲げ半径となるように偏向管を使用し、荷重ブロック上面にアクチュエータが接続される。ケーブルの荷重はロードセルを用いて計測した。

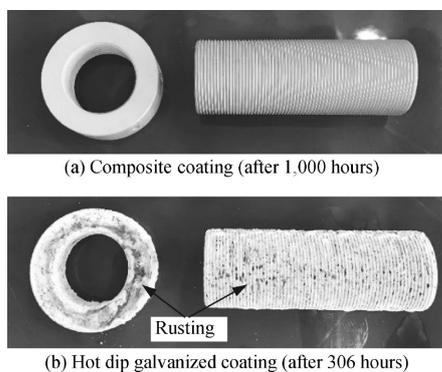


図6 塩水噴霧試験結果

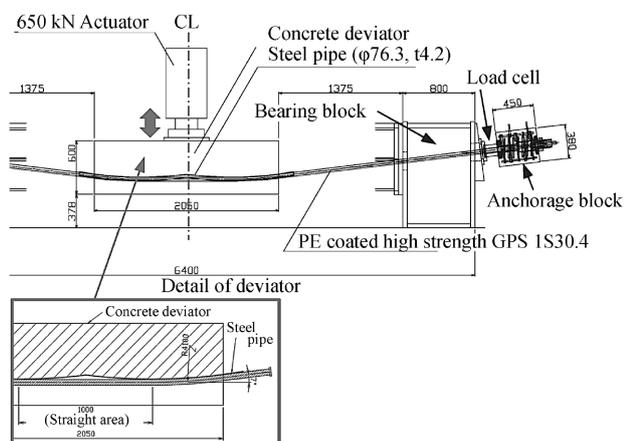


図7 フレッシング疲労試験概要

試験条件は指針¹⁾に倣い、ケーブルの荷重を上限荷重-最大試験力の65%、変動応力 -50 N/mm^2 とした。支間長約100 m規模の橋梁の外ケーブルの応力変動幅は支間中央部の設計活荷重最大時で約 20 N/mm^2 程度と算出されている。試験条件はそれよりも安全側の評価となるように設定した。繰り返し回数200万回、試験速度1.95 Hzでアクチュエータ制御により载荷した。判定は試験後に試験材の素線に破断がないこととした。

試験後のケーブルを確認したところ、素線破断はなかった（図8 (a)）。また、定着具には、破損や定着具内での素線破断もなく（図8 (b)）、十分な耐曲げ疲労性能を有することが確認できた。なお、試験後の定着具のブッシュには、図8 (c)のようにブッシュ内径部に緊張材の圧痕が確認されており、ブッシュによりくさび部近傍の曲げモーメント発生箇所が半固定となり、くさび部に生じる曲げ応力が緩和したと推察される。定着部のブッシュが疲労特性に有効的に機能したと考えられる。

2.3 定着部荷重伝達試験

本システムは取替え可能なシステムとするため、伸びを開放できるようにする必要がある。定着スリーブがアンカープレート内に納まるように設定した（図9）。具体的には、支圧板の穴径を大きくすることとしたが、その場合、支圧面積が小さくなり、支圧板と支承コンクリートを大きくする必要があった。限られたスペースで定着部を大きくすることを避けるため、緊張力開放に必要な

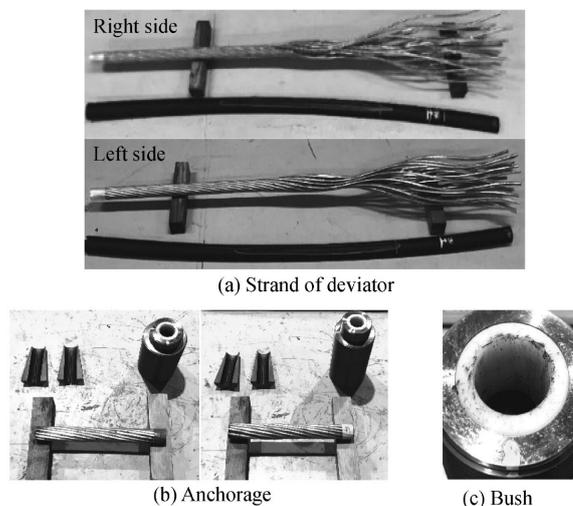


図8 試験後の詳細調査

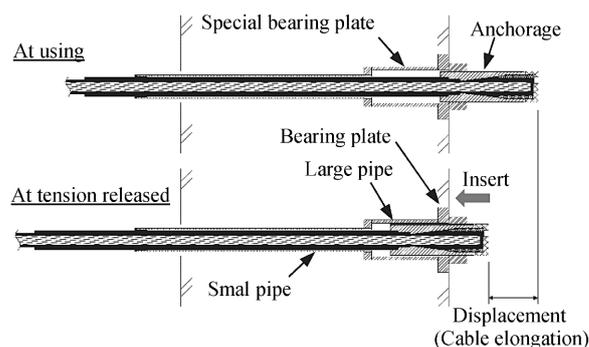


図9 張力解放時の定着部

な区間のみ太径鋼管、それ以外は細径鋼管とし、その段差部に支圧面を設けて支圧面積を確保する二段式アンカープレートで小型の定着部とした(図10)。

この二段式アンカープレートによる定着部の耐荷性能を確認するために、載荷試験を実施した。試験は二段式アンカープレートと所定の鉄筋を設置したコンクリートブロックを製作し、圧縮試験機でアンカープレート支圧面を圧縮することで、ケーブルの荷重を模擬した。プレストレスによる有害なひび割れがないことを確認するため、各荷重段階の定着部コンクリートの状態を確認した(試験時コンクリート強度は $30 \pm 3 \text{ N/mm}^2$) (図11)。

試験結果を表1に示す。全サイズで判定基準「規格最大試験力に達する前に破壊しないこと」を満足した。また、使用荷重下 $0.85 P_y$ では $\phi 28.6$ のみマイクロクラックが発生したが、ほかのサイズはクラックがなく、必要な耐荷性能を有することが確認できた。規格最大試験力 P_u でのひび割れ幅も最大 0.15 mm と小さかった。ケーブル自体の終局状態においても定着部(コンクリート部)は有害な変形や破壊することはなく、必要な耐荷性能を有することを確認した。

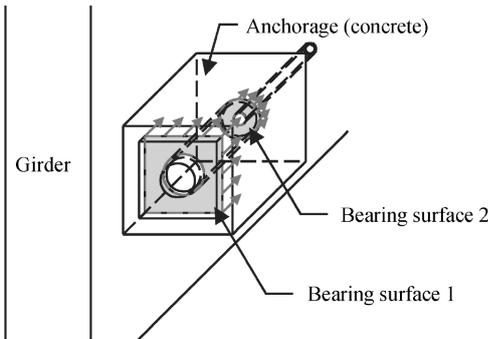


図10 二段式アンカープレート
Fig.10 Special bearing plate



図11 定着部荷重伝達試験試験状況
Fig.11 Condition of load transfer test

表1 定着部荷重伝達試験結果
Table 1 Result of load transfer test (crack width)

Load step	PC strand size (mm)					
	15.2	17.8	19.3	21.8	28.6	30.4
0.85Py	-	-	-	-	≤ 0.05	-
1.1×0.85Py	-	-	-	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
Py	-	-	-	0.05	0.05	0.05
Pu	-	-	-	0.05	0.10	0.15

Note) Py : Minimum 0.2% proof load,
Pu : Minimum breaking load

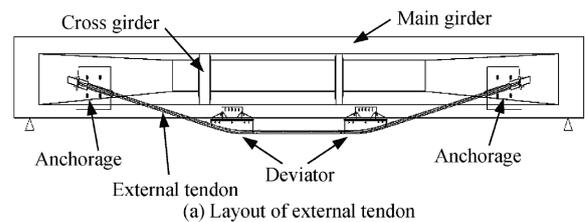
3. 施工報告

3.1 偏向具の構築について

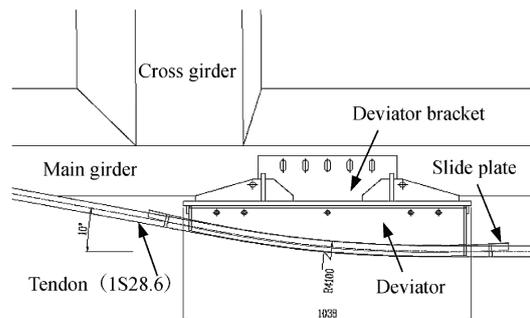
外ケーブル補強ではプレストレスによる補強効果を得るため、ケーブルは屈曲して配置されることから、偏向装置が用いられる。偏向装置はケーブルの緊張力を桁へ伝達しており、既設橋に設置されるため、桁中間部に新たに構築する必要がある(図12(a))。偏向装置は主に偏向具、スライドプレート、偏向具受け台で構成され、偏向具は橋梁の条件などで様々な形式、形状、材質があるが、ケーブルとのしゅう動性や加工性、実績などから主に樹脂製が多く用いられている。スライドプレート(鋼製)は、緊張力導入時にケーブルの移動をより円滑にするため、偏向具とケーブルとの間に用いられる。偏向具受け台は、偏向具と桁をつなぐ機能を有する(図12(b))。

本稿では、偏向装置の一例としてケーブル2本(1縦桁)に対して1つの偏向具受け台とすることで、既設主桁に直接設置でき偏向部のコンクリート構築を不要とした事例を紹介する。

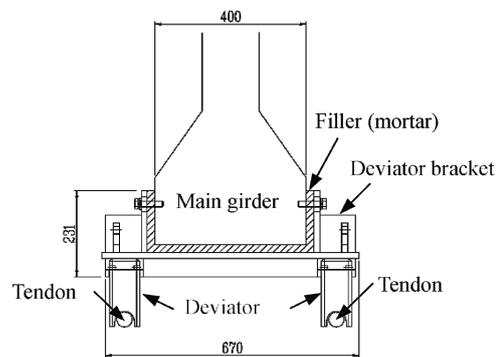
偏向具受け台は主桁下面に受けるようにコの字形状とし、そこから張り出したプレートでケーブルおよび偏向具を受ける形状とした(図12(c))。偏向具受け台と桁との間には間詰材としてモルタルを充填し、さらにアン



(a) Layout of external tendon



(b) Side view



(c) Cross section view

図12 偏向装置詳細図
Fig.12 Detail of deviator

カーボルトで桁と偏向具受け台を接続した（図13）。

3.2 配線・施工手順

外ケーブル補強用RE-SETケーブル[®]が実際に採用された事例を基に、ケーブルの配線・施工状況を図14、図15に示す。ケーブルは橋梁現場へコイル状に巻かれた状態で搬入される。ターンテーブルと呼ばれる配線機材にケーブルを入れて1本ずつ引出し、架設現場の状況にもよるが、ケーブルを一度足場などに展開する。定着部コンクリートに設置されている鋼管に鋼管用パッキンとPE管を通し、定着具を支圧面にセットしたあとに人力によってケーブルを所定箇所へ配線する。ケーブル端部は最外層のポリエチレン被覆をあらかじめ工場除去しているため、基本的には架設現場で被覆を除去する必要がない。

ケーブルを定着具に通し、所定位置となるように調整し、サグを低減した状態でウェッジを取付けて仮止めする。偏向具をセット後、ジャッキをセットして緊張作業を行う。緊張作業は図4に示すように、まず一次緊張し定着する。その後、かん合リングをはめ合わせ二次緊張



図13 偏向装置設置状況
Fig.13 Deviator at construction site

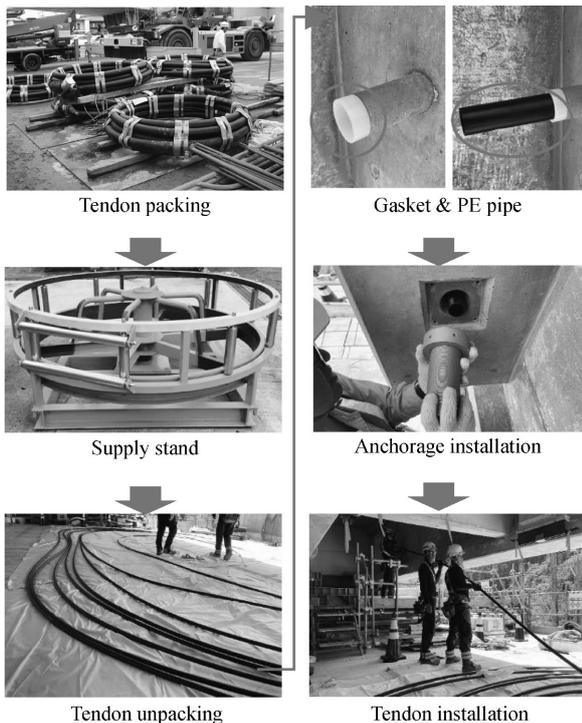


図14 施工状況1
Fig.14 Conditions of construction 1

を行い、リングナットが支圧面から浮いた分の隙間（セット量）がなくなるようにリングナットを回し、セット量を補正する。緊張完了後に専用治具（切断保護カバー）を用いてケーブル余長部を切断、ウェッジ押え、キャップを取り付ける。

3.3 ポリブタジエンゴムの注入

前述のように、定着具を含むケーブル全体に高い防食性能が求められる。RE-SETケーブル[®]は最外層にPE被覆を有しているが、端部は定着や緊張を可能にするためPE被覆を除去している。緊張後、PE被覆除去部は保護のためPE管を配置している。さらに内部空隙に充填材としてポリブタジエンゴムを注入し、定着部と同様に完全に内部を充填した仕様となっている（図16）。多くの場合は定着部が上部になることから、PE管に注入口、

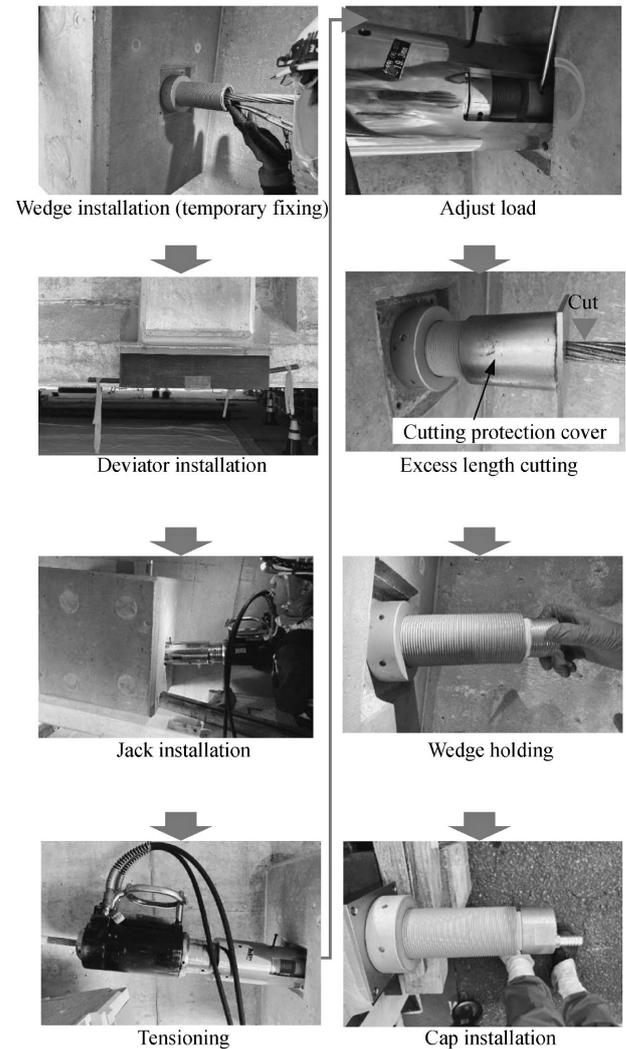


図15 施工状況2
Fig.15 Conditions of construction 2

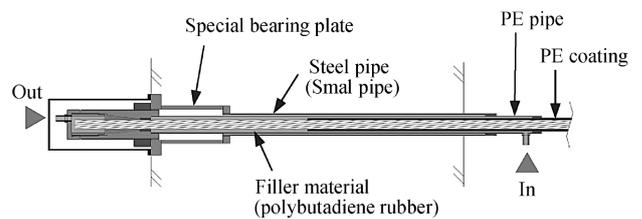


図16 充填材充填範囲
Fig.16 Filler area

キャップ側に排出口を設け、排出口からオーバーフローするまで注入を実施する。PE管や定着部内部などの狭い空間に注入する必要があることから、注入試験を実施した。注入作業は電動ポンプなどを使用せず、人力によるハンドポンプを用いて注入を行った。試験では注入口から注入した充填材は排出口よりオーバーフローすることを確認し、硬化後の試験体をカットしてケーブル部および定着部の充填状況を調べた結果、いずれも充填されていた（図17）。

実際の施工現場においても注入作業を実施したが、注入試験結果と同様に充填できていることが分かった（図18）。

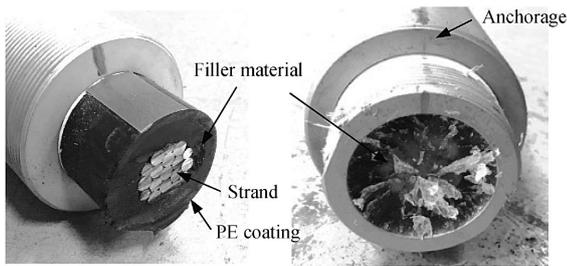


図17 注入試験状況
Fig.17 Result of injection test



図18 施工現場での作業状況
Fig.18 Condition at construction site

むすび = 道路橋は建設後50年以上経過した橋梁の割合が2030年には50%を超える状況であり、橋梁の補強需要が本格化するといわれている。外ケーブル補強が採用される既設橋梁は橋梁ごとに条件が変わるため、新設橋梁に比べ様々な制約条件も多く、技術的、施工的なハードルも高くなる傾向がある。今後も多様化するニーズに対応し、インフラ構造物の長寿命化、施工性の向上などによる工事期間の短縮などに寄与し、社会やサステナビリティへ貢献できる製品開発を推進していく。

参考文献

- 1) 公共社団法人プレストレストコンクリート工学会, 既設PCボストテンション橋保全技術指針, 令和4年1月

(技術資料)

伝統木造建築向けステルスブレース

橋田優人*¹

Stealth Brace for Traditional Wooden Architecture

Yuto HASHIDA

要旨

近年、地震被害により伝統木造建築の倒壊や損壊が増加している。これらの建物は壁が少なく開放的な造りが多いため、耐震補強が難しい。本稿では、要求される耐震性能に対して十分な降伏耐力、靱性（じんせい）、剛性を有する高強度の亜鉛めっき鋼線を用いた耐震補強方法を提案する。鋼線の両端部にはボタンヘッドと呼ばれる加工が施されており、引張荷重時にはボタンヘッドを介して鋼線が応力を負担する。圧縮荷重時には鋼線端部が抜け出すことにより、応力を負担せず、定着金具本体および柱梁部材に発生する応力の低減が期待できる。水平載荷試験の結果、提案する補強方法が十分な耐力と靱性を有することが確認された。今後、配置角度や定着金具をパラメーターとして、適用範囲の拡大を図る。

Abstract

In recent years, there has been an increasing incidence of traditional wooden architecture collapsing or suffering damage as a result of earthquakes. These buildings often have open structures with few walls, making their seismic reinforcement challenging. This paper proposes a seismic reinforcement method utilizing high-strength, Galvanized steel wire, which possesses sufficient yield strength, toughness, and rigidity to meet the required earthquake resistance performance. Both ends of each steel wire are processed with so-called button heads, allowing the steel wire to bear the stress through the button heads when a tensile load is applied. When a compressive load is applied, the steel wire-end escapes to avoid bearing stress. Therefore, it is expected that the stress generated in the metal-fitting body or column/beam members will be reduced. A horizontal load test has confirmed that the proposed reinforcement method yields sufficient strength and toughness. Going forward, the arrangement angle and fixing anchoring fittings will be employed as parameters to expand the scope of application.

検索用キーワード

伝統木造建築, 耐震補強, 亜鉛めっき鋼線, ピン接合, ボタンヘッド, 水平載荷試験, $\phi 7$ ステルスブレース[®]

まえがき = 日本は地震が頻発する国であり、1981年に導入された新耐震基準により、建築物の耐震性向上が求められてきた。しかし、それ以前に建てられた木造の重要文化財は耐震性能が不足し、大地震時の倒壊リスクが高い。過去の震災でも多くの伝統木造建築が被害を受け、その歴史的価値が失われる事例が報告されている。

現在、日本には約5,500棟の重要文化財建造物、約14,000棟の登録文化財建造物が存在し、これらの適切な保存と耐震補強が課題となっている。いっぽうで、文化財建造物は観光資源としての活用が進められており、多くの来訪者を迎えることから、安全性の確保が不可欠である。このため、文化財建造物の耐震補強の需要は今後も増加する見込みである。

しかし、文化財建造物の耐震補強には多くの課題がある。まず、補強設計およびその実施の認可には長期間を要し、迅速な対応が難しい傾向にある。旧有備館¹⁾のように、補強設計が完了していたにもかかわらず震災により倒壊した例もあり、迅速な対策の必要性が指摘されている。また、壁の少ない開放的な構造を持つ江戸時代後期の建築物などでは、景観や意匠を損なわずに耐震補強を行うことが困難である。既存の補強方法の一例とし

て、開口部の一部を犠牲にし、耐力壁を設置する方法や、面格子状の壁、鉄骨柱を用いる方法などがある。これらは建物の景観や意匠に影響をおよぼす可能性があり、文化的価値の保持との両立が難しい状況にある。このように、文化財の保存と耐震性能の確保を両立することが大きな課題となっている。この課題を解決するため、近年、新たな耐震補強技術の開発を進めている。その一例として、高強度の亜鉛めっき鋼線を用いた耐震補強方法である $\phi 7$ ステルスブレース[®]を紹介する。細径の鋼線を使用することで、設置に必要となる既存部材への削孔などの損傷を最小限に抑えつつ、狭い空間でも施工が可能である。また、鋼線の特性を活かし、引張荷重時に応力を負担して、圧縮荷重時には座屈による部材の損傷を防ぐ機構を備えている。

本稿では、提案する補強方法の基本的な力学特性を把握するため、実規模の試験体を用いた水平載荷試験を実施し、その有効性を報告する。本技術は、開放的な建築の特性を保ちつつ耐震性能を高め、文化財建造物の安全性向上と文化的価値の継承に寄与する新たな選択肢とし

脚注) $\phi 7$ ステルスブレースは神鋼鋼線工業(株)の登録商標である。

*¹ 神鋼鋼線工業(株) 生産本部 加工品技術部

て期待される。

1. 提案する補強方法

鋼線および接合金物（端末金具と定着金具）により構成されている。補強方法の概要を図1に示す。定着金具と土台の木材とは、コーチスクリュー・ボルトを用いて固定する。端末金具の挙動を図2に示す。圧縮荷重時には、鋼線端部が抜け出し荷重を負担しない構造となり、鋼線の直線性を保持することで面外へのはらみ出しを抑制する。障子や躯体（くたい）の損傷回避が期待され、地震時などの引張力に対して効果的に働く構造となる。また、高角度での圧縮時には、端末金具が鋼線とともに飛び出す場合があるため、端末金具にテーパ加工を施し、復元性を確保している。

本稿で提案する補強方法は、構造形式に応じて3種類に分類される。それぞれの定着金具の構造を図3²⁾、図4²⁾、図5²⁾に示す。

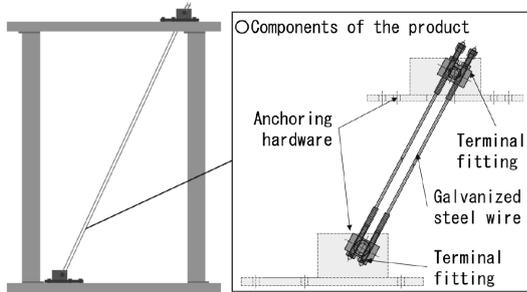


図1 補強方法概要図
Fig.1 Overview of reinforcement methods

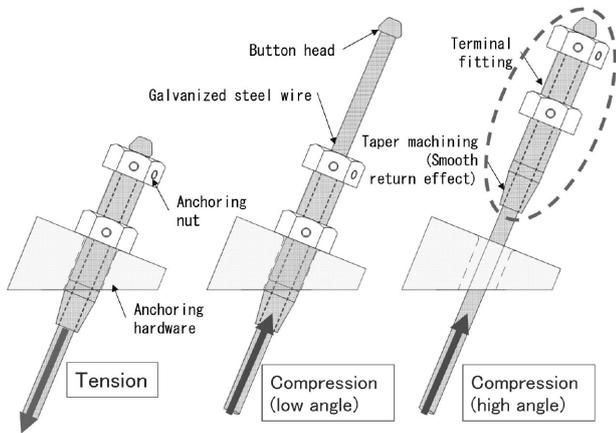
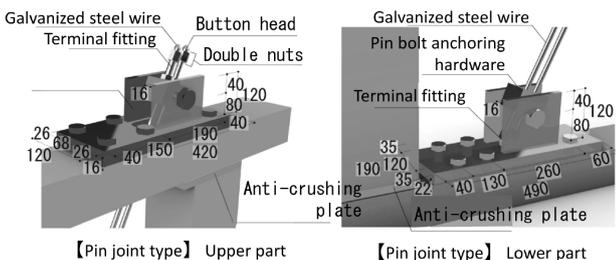


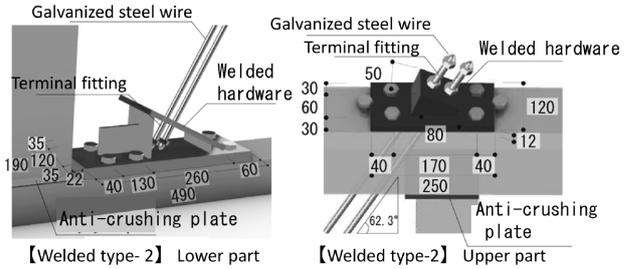
図2 引張および圧縮荷重下における端末金具の挙動
Fig.2 Behavior of terminal hardware under tensile and compressive conditions



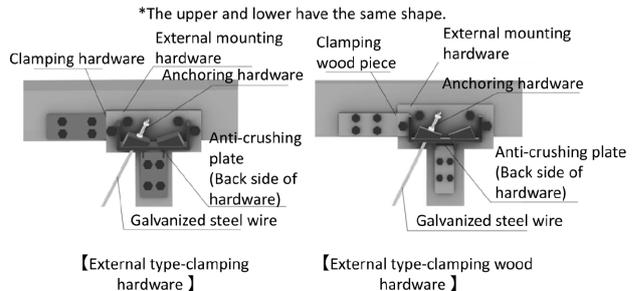
【Pin joint type】 Upper part 【Pin joint type】 Lower part
図3 定着金具形状【ピン接合型】
Fig.3 Shapes of Anchorage Fittings【pin joint type】

1.1 亜鉛めっき鋼線の特徴

補強材として用いる亜鉛めっき鋼線は、通常、複数本を束ねて斜張橋などの橋梁ケーブルに使用されている実績のある製品である。今回はこれを1本単位で用いる構法とし、その優れた機械的性能を活かすものである。鋼線の応力-ひずみ曲線を図6に、機械的特性を表1に示す。降伏荷重はSS400の約5倍、引張強さはSS400の約4倍を示し、破断伸びは約4%であり、木材の変形にも追従可能である。



【Welded type-2】 Lower part 【Welded type-2】 Upper part
図4 定着金具形状【溶接型-2本】
Fig.4 Shapes of anchorage fittings【welded type - 2 wires】



*The upper and lower have the same shape.
【External type-clamping hardware】 【External type-clamping wood hardware】
図5 定着金具形状【面外型-金具押え】、【面外型-木片押え】
Fig.5 Shapes of anchorage fittings【External type - clamping hardware】、【External type - clamping wood hardware】

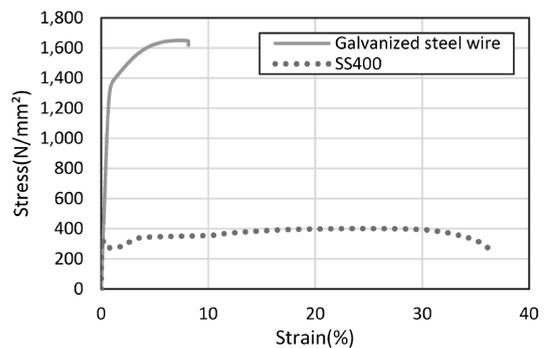


図6 応力-ひずみ曲線
Fig.6 Stress - strain curve

表1 亜鉛めっき鋼線の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of galvanized steel wire

Property	Value	
Nominal cross-sectional area (mm ²)	38.48	
Unit mass (kg/km)	301	
Tensile strength	Tensile load (kN)	(60.3)
	Tensile stress (N/mm ²)	1,570
Yield strength	Yield load (kN)	(44.5)
	Yield stress (N/mm ²)	1,160
Elongation at break	Elongation (%)	4.0
	Gauge length (mm)	250
Elastic modulus (N/mm ²)	(196,000)	

また、鋼線端部の定着方法には「ボタンヘッド加工(図7)」を採用している。これは冷間加工により突起(ボタンヘッド)を形成し、その部分で支圧定着するものである。この方式により、端末金具との圧着が不要となり、引張荷重時のみ機能する合理的な定着構造となる。

1.2 ピンボルト接合を用いた補強方法

2本の鋼線および定着金具により構成される。2本の鋼線は上方で横架材を貫通し、ピン機構を有する定着金具に接合することで、変形時も軸方向力のみを負担する。本補強方法を【ピン接合型】と称する。

1.3 溶接金具を用いた補強方法

定着金具は、鋼線の初期角度(本稿では 62.3°)に合わせて傾斜した金具を、溶接により一体化し、横架材との接合は【ピン接合型】と同様とした。【ピン接合型】と比較して、金具サイズと重量が約60%程度に抑えられる。

鋼線は上方で横架材を貫通し、金具に固定されている。本補強方法を【溶接型】と称する。

1.4 面外取付金具を用いた補強方法

本方法は、既存部材への加工を最小限とし、簡易な施工性能を追求するため、横架材に鋼線を貫通させず、躯体の面外に取り付けることのできる形状とした。1本の鋼線および面外定着金具を用いて構成され、横架材および土台の側面に金具が取り付けられている。鋼材が横架材を貫通しないため、既存部材の加工は最小限に抑えられる特徴を有する。また、金具または木片を定着金具に添えることで、せん断力に抵抗する機構とした。本補強方法をそれぞれ【面外型-金具押え】、【面外型-木片押え】と称する。

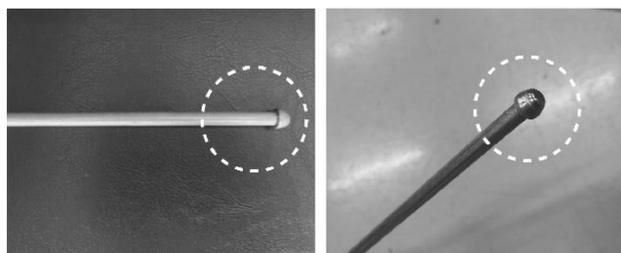


図7 ボタンヘッド
Fig.7 Button head

2. 水平載荷試験

2.1 試験方法

本稿では、提案する補強手法の構造的挙動を確認する目的で、木造軸組架構を対象とした水平載荷試験を実施した。試験時の補強方法概要図を図8²⁾、試験体の高さおよび幅を表2²⁾、材料寸法を表3²⁾に示す。鋼線の本数は、構造安定性や応力分散の観点、本数による挙動の違いを把握する目的から、補強形式ごとに選定した。【ピン接合型】では安定性確保のため2本構成とし、【溶接型】では鋼線本数による違いを検証するため、1本および2本で試験を実施した。【面外型-金具押え】および【面外型-木片押え】では、構造保持の限界を考慮し、1本構成での試験に留めた。

試験体は、ピン接合型が3体、その他はそれぞれ1体ずつ製作した。試験は『木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017年度版)』に準拠し、タイロッド方式による荷重の加え方を採用した。

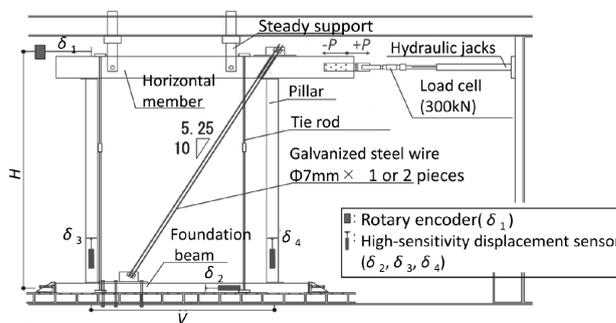


図8 補強方法概要図

Fig.8 Overview of reinforcement methods

表2 試験体寸法一覧

Table 2 Dimensions of test specimens

	H (mm)	V (mm)
【Pin joint type】	2,760	1,820
【Welded type-1】	2,730	1,820
【Welded type-2】	2,760	1,820
【External type-clamping hardware, clamping wood hardware】	2,730	1,177

表3 材料寸法

Table 3 Material dimension

	【Pin joint type】	【Welded type-1】 / 【Welded type-2】	【External type-clamping hardware, clamping wood hardware】
Foundation beam (Douglas fir/E110)	120 × 120 × 2,180		120 × 120 × 1,897
Horizontal member (Douglas fir/E110)	210 × 270 × 3,000	210 × 210 × 3,000 210 × 270 × 3,000	210 × 210 × 2,357
Right pillar (Cedar wood/E70)	120 × 120 × 2,561		120 × 120 × 2,685
Left pillar (Cedar wood/E70)	120 × 120 × 2,541		
Galvanized steel wire	φ 7-3,280 × 2	φ 7-3,126 × 1 φ 7-3,207 × 2	φ 7-2,926 × 1

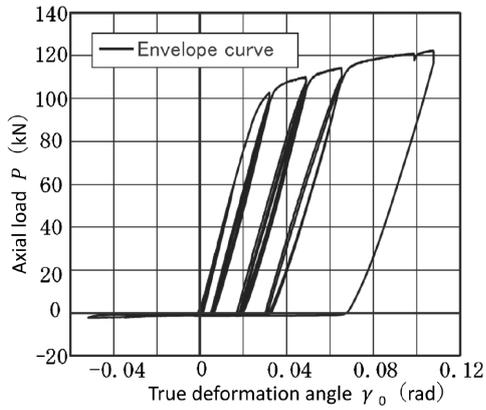


図9 ピン接合型 履歴性状

Fig.9 Pin joint type hysteresis characteristics

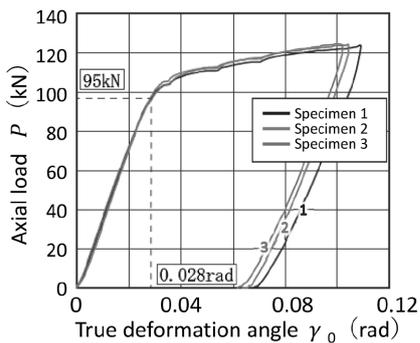


図10 ピン接合型 包絡線

Fig.10 Pin joint type envelope curve

荷重は、変形角 γ を1/450から1/15までの8段階で鋼線に引張力が発生する方向を「正方向」と定義し正負交番荷重を各ステップで3回ずつ繰り返して行った。これに続き、1/10 radに至るまで、正方向への単調荷重を実施した。

また、鋼線を2本使用する試験体については、横架材の割裂を防ぐ目的で梁成（はりせい）を210 mmから270 mmに増加させた。

2.2 試験結果および考察

【ピン接合型】の履歴性状を図9²⁾、【ピン接合型】、【溶接型】、【面外型】の包絡線を図10²⁾、図11²⁾、図12²⁾に示す。各補強方法において、それぞれの試験結果を比較・整理した結果、以下の共通した挙動および特性が確認された。

いずれの補強方法においても、荷重初期には線形的な荷重-変形関係を示し、鋼線の降伏荷重に達するまで明瞭な剛性を有することが確認された。具体的には、【ピン接合型】では約95 kN（2本）、【溶接型】では約45 kN（1本）、約98 kN（2本）となった。【面外型】では約45 kN（1本）で降伏が確認されており、降伏荷重まではほぼ直線的に荷重が増加していることが明らかとなった。

つぎに、鋼線の降伏後には各試験体ともに剛性の低下が見られ、塑性挙動への移行が生じていた。しかし、いずれの場合においても急激な耐力の低下や、局所的な破壊に伴う構造性能の著しい損失は認められなかった。このことから、各補強方法は降伏以降も一定の荷重を負担

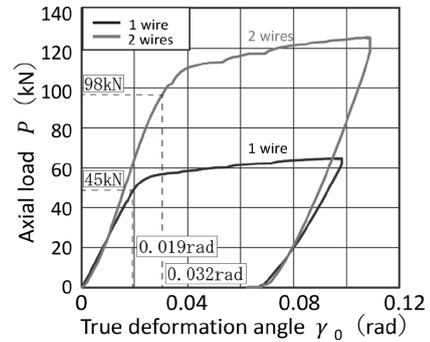


図11 溶接型（1，2本）包絡線

Fig.11 Welded type (1, 2 Wires) envelope curve

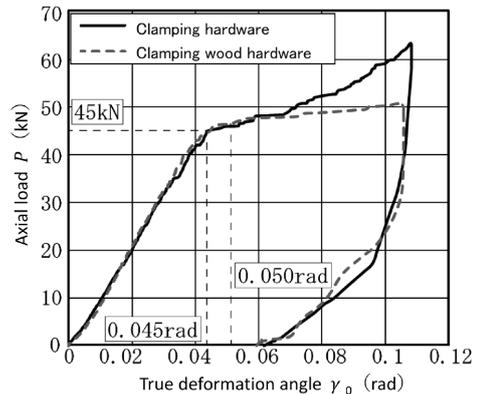


図12 面外型（金具押え，木片押え）包絡線

Fig.12 External type (clamping hardware, clamping wood hardware) envelope curve

し続ける能力を有しており、延性に富んだ靱性能（変形性能）が確保されていることが示された。

さらに、最大荷重に至る過程において、鋼線の規格破断荷重付近に達しても、端末金具や定着金具、木部（柱梁材）において著しい損傷や破壊は確認されず、十分な構造安全性を保持していた。また、圧縮側荷重時における挙動として、各補強方式とも定着部で鋼線やボルトが接合部から抜け出す傾向が見られた。この現象によって鋼線が荷重を負担しなくなることが明瞭に把握されており、補強部材の作用メカニズムに関する知見が得られた。

以上のことから、3種類の補強方法はいずれも、荷重初期の明瞭な剛性、鋼線の明確な降伏挙動、および降伏後の高い靱性能を有していることが判明した。

3. 各補強方法の特性値の算出と評価

3.1 特性値の算出方法および概要

水平荷重試験の結果から作成したバイリニア型のモデル化³⁾と置換結果を図13²⁾に示し、短期基準せん断耐力および各特性値の算出結果を表4に示す。

3.2 特性値に関する考察

図13より【ピン接合型】および【溶接型】と【面外型】の組み合わせでは、それぞれに類似した挙動が見られることが確認されたので、以下に示す。

終局変位はいずれの構造形式も1/20 (rad) から1/10 (rad) の範囲内であることが確認され、これは「極めてまれに発生する地震（大地震）」時の安全限界（層間変

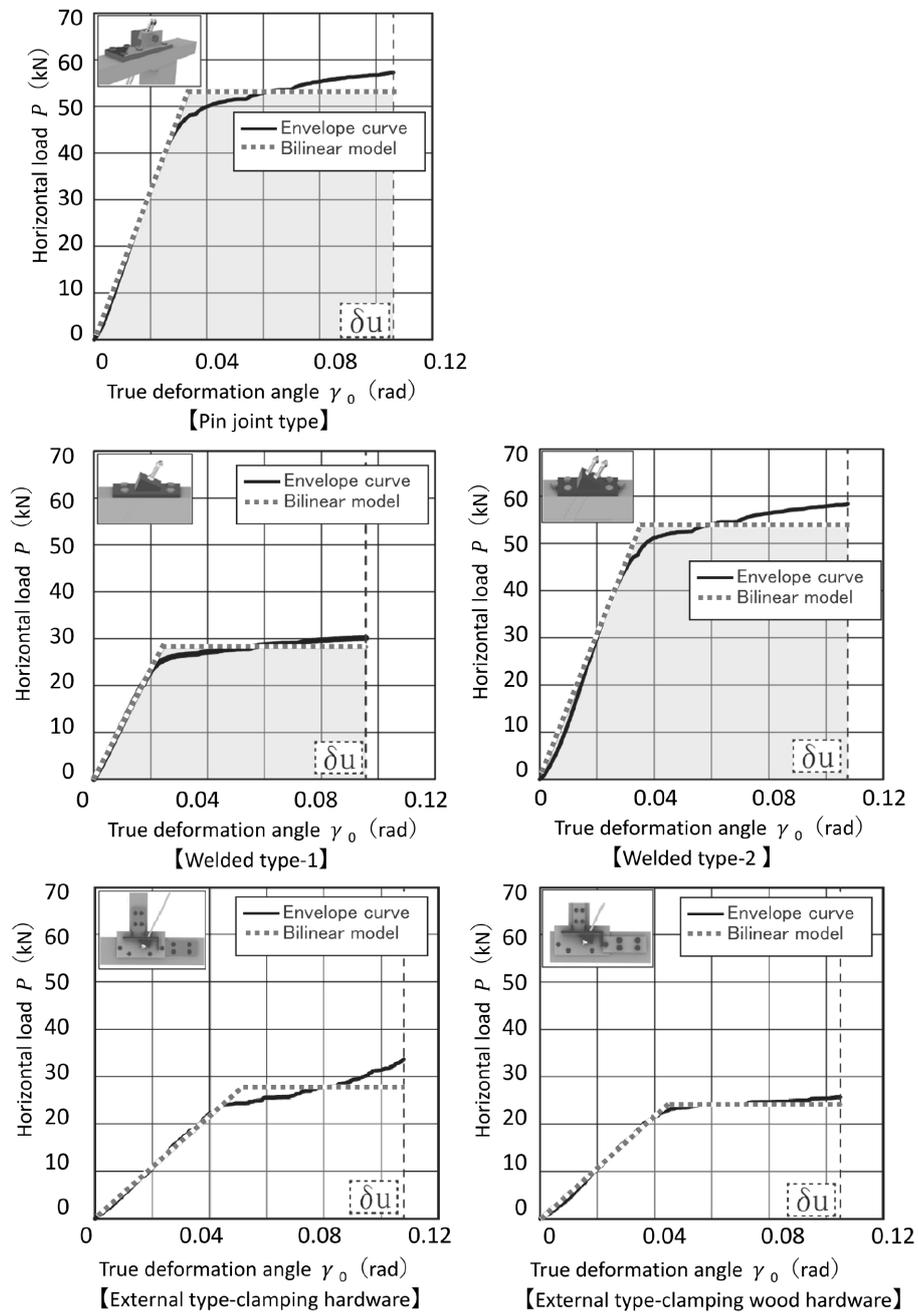


図13 バイリニア型のモデル化と置換結果 (P- δ 関係)
 Fig.13 Bilinear model and substitution results (P- δ relationship)

表4 特性値の算出結果
 Table 4 Calculation of characteristic values

	【Pin joint type】			【Welded type】		【External type】	
	First unit	Second unit	Third unit	1 wire	2 wires	Clamping hardware	Clamping wood hardware
Initial stiffness K (kN/mm)	0.547	0.549	0.539	0.415	0.529	0.190	0.190
Yield strength P_y (kN)	42.15	39.68	40.60	22.81	39.43	23.08	19.17
Yield displacement δ_y (rad)	0.027	0.025	0.026	0.020	0.026	0.043	0.036
Ultimate strength P_u (kN)	53.20	53.58	53.54	28.23	53.97	27.73	24.19
Ultimate displacement δ_u (rad)	0.106	0.098	0.104	0.096	0.108	0.108	0.105
Plasticity ratio μ	3.163	2.914	3.040	3.924	3.050	2.099	2.340
Structural characteristic coefficient D_s	0.433	0.455	0.444	0.382	0.443	0.559	0.521
Short-term standard shear strength P_0 (kN)	8.613			7.699	6.697	3.138	2.723

* The gray shading indicates the test of a single steel wire.

形角 $1/30\sim 1/20$ rad)を満たしていることを意味する。したがって、ある程度の損傷を許容したうえで、補修による再利用が可能であると考えられる。

とくに【面外型】はほかの形式と比較して、初期剛性および短期基準せん断耐力が相対的に低い傾向を示した。この原因としては、金具の取り付け部や押え材付近における初期変形角からの局所的なめり込み、さらに上部横架材(上台梁)のねじれおよび偏心による影響が考えられる。しかしながら、 $1/10$ radの変形時点においても明確な耐力低下は確認されず、変形への追従性が高く、靱性(変形性能)のある構造特性を有している。このことから、既存の木造躯体における局所的な破損の抑制を目的とした補強手法として有効性が認められる。

4. 適用事例(好文亭)

水戸偕楽園内に建つ好文亭⁴⁾は江戸時代後期に徳川斉昭によって設計された歴史的建築物である。図14に外観写真を示す。千波湖や筑波山に近接しており、三階からは風光明媚な景観が望める、開放的な構造と繊細な意匠が特徴である。本建築物は、開口部が多いため壁量が少なく、大地震時に倒壊の恐れがあると判定され、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]での耐震補強が実施された。本物件での、面格子で耐震補強した場合のイメージ図と、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]の設置写真を図15に示す。 $\phi 7$ ステルスブレース[®]の使用により、建設当時の景観を保ちながら、耐震補強がなされていることがわかる。2021年度に耐震補強が完了し、利用者の安全が確保されたことにより、現在は通年型での「呈茶サービス」が提供可能となっている。現在、同様の角度にて設計織込がなされている物件が2件あり、文化財建築への利用が広がりつつある。



図14 好文亭の外観
Fig.14 Exterior of the Kobuntei

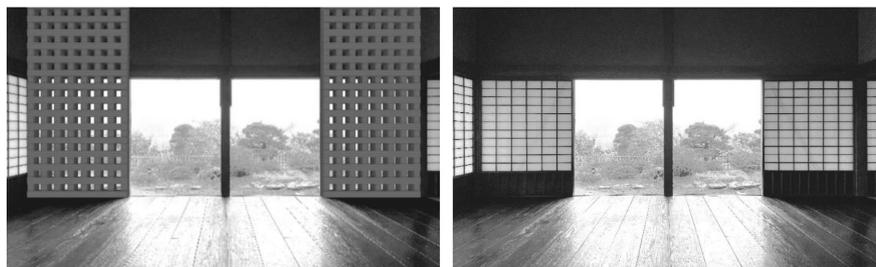


図15 好文亭における補強方法による景観
・左：面格子(イメージ図) ・右： $\phi 7$ ステルスブレース[®](設置写真)
Fig.15 Landscape of reinforcement methods at Kobuntei
left: Lattice window (image) right: $\phi 7$ stealth brace[®] (installation photo)

5. 結論

本稿では、3種類の補強方法について水平載荷試験を実施し、いずれも初期剛性、降伏挙動、靱性能に優れた構造特性を有することを確認した。これらの結果は、文化財建築における耐震補強の新たな選択肢として有効であることを示している。

一般的に行われている耐震補強の手法としては、開口部の一部を犠牲にして耐力壁を設置する方法や、採光や通風を確保しつつ補強できる面格子状の壁や鉄骨柱を用いる方法などが知られている。しかし、これらの手法では、建築の意匠に何らかの影響をおよぼすことは避けがたい。いっぽうで、障子は全面的な開口を持ちながらも、開けた際には2枚が重なって片側に寄せられる。この特性を活かし、2枚の障子の隙間に補強材を配置することで、従来の景観を損なうことなく耐震性能の向上を図ることも可能となる。実際に好文亭では、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]を用いて、建設当時の景観を保ちながらの耐震補強がなされた。

むすび=以上の結果を踏まえ、今後の展開として以下の取り組みを予定している。まず、梁スパンの変更により生じる各種角度に対して追加確認試験を実施し、製品の対応可能範囲の拡大を図る。併せて、得られた結果をもとに標準化を進めるとともに、製品特性を分かりやすく整理したリーフレットを作成する。また、設計事務所や文化財保護機関などへの情報提供を行うことで、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]の認知度向上と採用促進を目指す。

参考文献

- 1) (株)文化財保存計画協会. 史跡及び名勝「旧有備館および庭園」災害復旧事業(保存修理工事)報告書. 2016, 大崎市教育委員会, 169p.
- 2) 岩田あすかほか. 2022年度第93回日本建築学会関東支部研究報告集. 2023-03, p.361-364.
- 3) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計改訂委員会. 木造軸組工法住宅の許容応力度設計. 第1版, 公財 日本住宅・木材技術センター, 2017, p.295-304.
- 4) 茨城県土木部. なるほど公共事業(令和4年度版). 2023-03. <https://www.pref.ibaraki.jp/doboku/kanri/kikaku/naruhodo/2022.html>, (参照2025-05-16)

(技術資料)

床スラブの上フランジ拘束効果を活用した鉄骨梁の横座屈補剛工法

伊藤冬樹*1・高田武之*2 (博士(工学))

Lateral Buckling Restraint Method for Steel Beams Using Stiffening Effect of Slab

Fuyuki ITO・Dr.Takeshi TAKADA

要旨

鉄骨梁の上フランジが床スラブによる拘束を受けている場合、純鉄骨梁と比較し横座屈が生じにくいことが既往研究で確認されている。当社では、あらたに実験や解析をおこない、床スラブ付き鉄骨梁の塑性変形能力評価手法を構築した。構築した評価手法は、「神戸製鋼所の横座屈補剛工法」として、(一財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得している。

本工法の特長は、頭付きスタッドが梁幅方向に複数行配置される場合の剛性を設計に反映できること、および、崩壊形式(横座屈または局部座屈)に応じた塑性変形能力評価が可能なことなどである。

本稿では、開発にあたり実施した実験・解析について述べる。本工法で予測される塑性変形能力は、実験・解析の結果と良い対応を示していた。

Abstract

Previous research has confirmed that when the upper flange of a steel beam is restrained by a floor slab, lateral buckling is less likely to occur than in a steel beam. Kobe Steel has conducted new experiments and analyses to establish a method of evaluating plastic deformation capacity for steel beams with floor slabs. This evaluation method has been certified by the General Building Research Corporation of Japan (GBRC) as "Kobe Steel's Lateral Buckling Restraint Method" under its "Assessment of Technology for Building Construction" program. The features of this method include its ability to reflect the rigidity of multiple-line layouts of headed studs across the beam width in the design, and its ability to evaluate plastic deformation capacity in accordance with the collapse mode (lateral buckling or local buckling). This paper describes the experiments and analyses conducted during its development. The plastic deformation capacity predicted by this construction method shows a good agreement with the experimental and analytical results.

検索用キーワード

横座屈, 合成梁, 頭付きスタッド, 載荷実験, 有限要素法解析, 崩壊形式, 塑性変形能力

まえがき = 鋼構造建築物に使用される鉄骨梁には、塑性変形能力が求められる。梁が地震などの荷重を受けた際に、上フランジが圧縮され座屈すると、梁が梁材軸の直交方向へはらみだす現象が発生することがある(図1)。この現象は横座屈と呼ばれている。横座屈が発生すると、耐力が急激に低下するため、必要な塑性変形能力を確保することができない。そのため、梁には必要に応じて、横座屈を防止するための補剛材が設けられている。

いっぽうで、梁にはコンクリート床(以下、床スラブという)が頭付きスタッド(以下、スタッドという)により接合されていることが一般的である。床スラブによって、上フランジが拘束されることで、上フランジの構面外方向の変形および梁材軸まわりの回転が拘束され、横座屈が発生しにくくなる(図2)。この横座屈補剛効果を定量的に見込むことができれば、補剛材を省略することが可能になる。

床スラブの横座屈補剛効果については、これまで種々の研究が行われている(例えば文献1)。しかしながら、

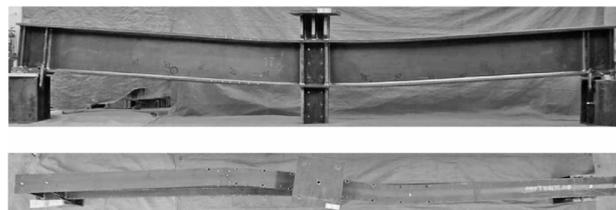


図1 鉄骨梁の横座屈

Fig.1 Lateral buckling of steel beam

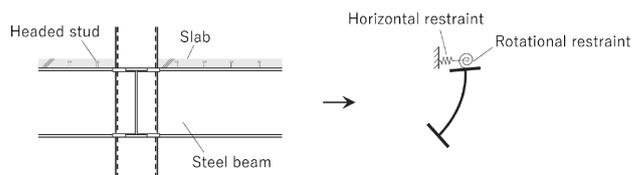


図2 床スラブの上フランジ拘束効果

Fig.2 Stiffening effect of the slab

*1 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部 *2 事業開発部

超高層建築物で適用される大断面梁など梁幅方向に複数行のスタッドが配置される場合の検討例は少ない。また、崩壊形式（横座屈または局部座屈）の判定が可能で、崩壊形式に応じた塑性変形能力が評価可能な手法の提案例は少ないと言える。

そこで、当社は、聲高ら²⁾ および五十嵐ら^{3)~6)} の研究を参考にし、あらたに床スラブの補剛効果確認のための梁-床スラブ接合部の要素実験、架構実験および有限要素法解析を実施して、梁の塑性変形能力予測手法を構築した。構築した評価手法は、「神戸製鋼所の横座屈補剛工法」として、2022年12月に（一財）日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得した。

本工法の特長は、(1)スタッドが梁幅方向に複数行配置される場合の剛性を設計に反映できること。(2)崩壊形式（横座屈または局部座屈）に応じた塑性変形能力評価が可能なことなどである。

床スラブの上フランジ拘束効果を活用した横座屈補剛工法により補剛材の省略が可能となると、補剛材に伴う製作や施工の合理化につながり、建築業界の生産性向上の一助になると考えている。

本稿では、本工法の開発にあたり実施した梁-床スラブ接合部の実験、架構実験、有限要素法解析について述べる。

1. 横座屈補剛工法の概要

本章では、本工法の開発にあたり参考とした研究および本工法の概要について述べる。

文献2では、床スラブによる上フランジの拘束効果が検討されている。短い梁と床スラブだけからなる試験体の要素実験を行っている。剛性や最大耐力に関する既往の評価式と実験結果の比較を行い、あらたな評価式を提案している。

文献3では、上フランジを梁材軸まわりに対して連続完全拘束された梁の弾性座屈性状についてエネルギー法を用いて理論的に解析している。また、梁両部材端の境界条件やモーメント勾配を考慮した弾性横屈耐力評価式を提案するとともに、横座屈と局部座屈の連成座屈の弾性座屈耐力算定法を掲示している。文献4では、上フランジが連続完全拘束された場合の横座屈耐力上昇を整理できる新たな断面形状指標Tsを提案している。さらに、上フランジに対する拘束が相対的に弱く、梁構面外方向の水平変位や梁材軸まわりの回転が発生する場合を対象として、連続完全拘束時からの拘束度合の低下を反映した弾性横座屈耐力算定法および塑性変形性能に応じた必要補剛力を掲示している。文献5では、梁の繰返し載荷実験を実施し、上フランジに対する拘束が梁の弾塑性挙動および崩壊形式に与える影響を明らかにするとともに、塑性変形性能の評価手法を提案している。文献6では、無拘束で崩壊形式が局部座屈となる梁の塑性変形性能について幅厚比指標WFを用いて評価する方法を提案している。

本工法における床スラブの補剛効果の評価方法は、文献2に基づいている。開発にあたり、超高層建築物など

で適用される大断面梁も工法の適用対象とするため、梁幅方向に複数行のスタッドを配置した場合の実験を追加で行った。

床スラブの補剛効果に応じた弾性横座屈耐力の算定、塑性変形能力確保に必要な補剛量の考え方は、文献3および文献4に基づいている。本工法の弾性横座屈耐力は、式(1)で算定する。

$$M_{cr} = \beta_R (\alpha_1 M_{cre} + \alpha_2 M_{crm}') \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- M_{cr} : 本工法を適用する梁の弾性横座屈耐力 (kNm)
- M_{cre} : 無拘束時弾性横座屈耐力 (kNm)
- M_{crm}' : 上フランジを連続完全拘束されたH形鋼の弾性横座屈耐力の最小値 (kNm)
- α_1, α_2 : 境界条件や応力勾配で決まる定数
- β_R : 低減係数

崩壊形式の判定、崩壊形式ごとの塑性変形能力の評価は、文献5および文献6を参考とした。架構実験、有限要素法解析の結果より、崩壊形式は、 WF/λ_b が1.4以下の場合には横座屈、1.4超は局部座屈となる。それぞれの崩壊形式における塑性変形能力は式(2)、(3)で求める。

$$\text{横座屈の場合} : R = 110 (0.65 - \lambda_b)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{局部座屈の場合} : R = 32 (1.0 - WF)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- R : 塑性変形倍率（最大耐力を超え全塑性モーメントまで耐力が低下した時点）
- λ_b : 一般化細長比
- WF : 幅厚比指標

2. 構造実験による検証

本章では、本工法の開発にあたり実施した構造実験について述べる。

2.1 梁-床スラブ接合部の要素実験

文献2では、鋼梁と床スラブの接合部のみを取り出した要素実験を行い、主に梁幅方向に1行のスタッドを配置した場合の力学的挙動を確認している。しかし、大断面梁においては梁幅方向に複数行のスタッドを配置することが多く、この場合についての検討は不十分である。

本工法の開発にあたって、スタッドの配置を主なパラメータとした梁-床スラブ接合部の要素実験を行い、モーメント-回転角関係における弾性剛性と最大耐力に関して、梁幅方向に複数行のスタッドが配置された場合にも適用できるように文献2の算定法を修正した。

なお、本検討結果の詳細は、文献7にまとめているため、そちらも参考にされたい。

試験体は、図3に示すように梁と床スラブをスタッドで結合したもので、表1に示す34体である。表1中のGr.番号に対応して以下の6グループのパラメータを設定した。

【1】梁幅方向のスタッドの配列

梁幅方向のスタッド本数と位置の影響を確認

- [2] デッキプレートの形状と向き
合成デッキとフラットデッキを用いた試験体とし、その影響を確認。合成デッキについては梁材軸に対する合成デッキの溝の向きの影響を確認
- [3] 片側スラブのへりあき距離
片側スラブを模した試験体とし、片側スラブのへりあき距離の影響を確認
- [4] 梁材軸方向のスタッドの配列
梁材軸方向のスタッドのピッチの影響を確認
- [5] 片側スラブ+梁材軸方向のスタッドの配列
片側スラブのへりあき距離と梁材軸方向のピッチの影響の確認
- [6] コンクリートの種類
普通コンクリートを用いた試験体とし、1種軽量コンクリートとの差異を確認

スタッドの寸法はφ19 mm×100 mmであり、配置は図4に示すように梁幅方向に最大4行、梁材軸方向に最大2列としている。コンクリートは、1種軽量コンクリートを基本としているが、1体(1c×1_NC試験体)のみ普通コンクリートとしており、設計基準強度はともに18 N/mm²である。梁はすべての試験体で共通とし、ウェ

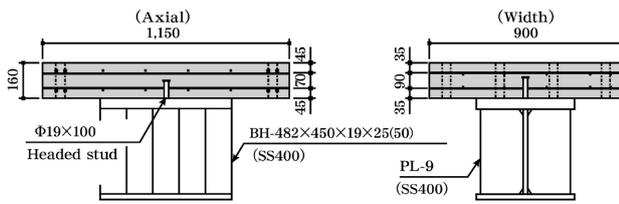


図3 試験体形状
Fig.3 Test specimen

ブとフランジの面外変形を拘束するためにフランジ厚を50 mmとし、さらに厚さ9 mmのスチフナを100 mm間隔で設けている。

試験体は、図5に示すように上下を反転させ、ボルトによって床スラブを反力床に固定する。反転させた試験体の上に、スチフナを有するH形鋼ジグを高力ボルト

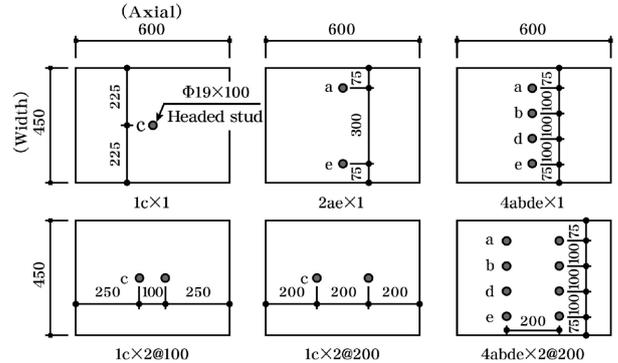


図4 スタッドの配置の例
Fig.4 Examples of stud layout

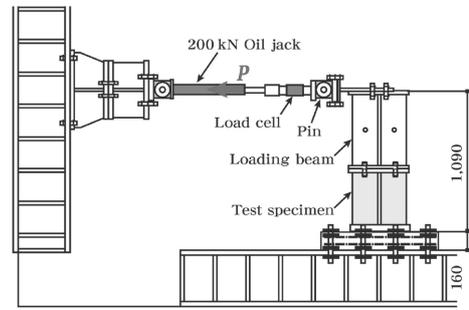


図5 試験体および試験装置
Fig.5 Test specimen and test set-up

表1 試験体一覧
Table 1 List of test specimens

Gr.	Test specimens	Slab	
		Deck plate	Layout
【1】	1a×1	-	-
	1b×1		
	1c×1		
	1d×1		
	1e×1		
	2bd×1		
	2ae×1		
	4abde×1		
	【2】		
1c×1_P		Composite	
1c×1_F		Flat	
2bd×1_O		Composite	
2bd×1_P			
2ae×1_O			
2ae×1_P			
2ae×1_F		Flat	
4abde×1_O		Composite	
4abde×1_P			
【3】	1c×1_e75	-	Single
	1c×1_e100		
	1c×1_e125		
	1c×1_e250		
	2bd×1_e75		
	2ae×1_e75		
	4abde×1_e75		
【4】	1c×2@100	-	Both
	1c×2@200		
	1c×2@400		
	2bd×2@200		
	2ae×2@200		
【5】	2bd×2@200_e75	-	Single
	2ae×2@200_e75		
【6】	1c×1_NC	-	Both

・2bd×2@200_e75 Edge distance of single-side slab

Number and layout of headed studs in the beam width direction

Number and pitch of headed studs in the beam axis direction

・1c×1_O Layout of deck (Orthogonal, Parallel), Flat deck

で緊結することで、上フランジ表面から水平力を与える油圧ジャッキ芯までの距離（梁せいに相当）を1.09 mとしている。

回転剛性に関して、文献2の算定方法を修正した計算結果と実験結果の比較を示す。修正した算定方法は式(4)である。梁幅方向に複数行のスタッドを有する場合の回転剛性 K_{sc} は、スタッドのコーン状破壊面の有効水平投影面積 A_{ci} の欠損を考慮することで算定することとしている(図6)。

$$K_{sc} = \sum_{i=1}^n (K_{si}^{-1} + K_{ci}^{-1})^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

$$K_{si} = E \cdot A_s \cdot b_{si}^2 / l_s$$

$$K_{ci} = E_e \cdot A_{ci} \cdot b_{si}^2 / 40 \cdot l_s$$

ここで、

- K_{si} : i 番目の頭付きスタッドの伸びによる回転剛性
- K_{ci} : i 番目の頭付きスタッドのコンクリートの変形による回転剛性
- E : 鋼材のヤング係数

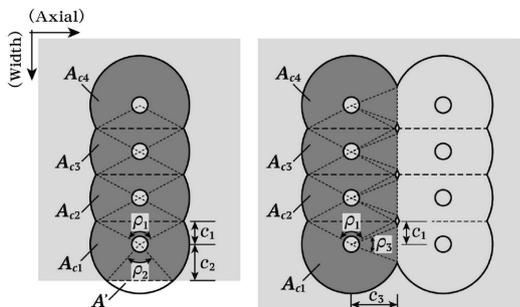


図6 コーン状破壊面の有効水平投影面積

Fig.6 Effective horizontal projected area of cone-shaped failure

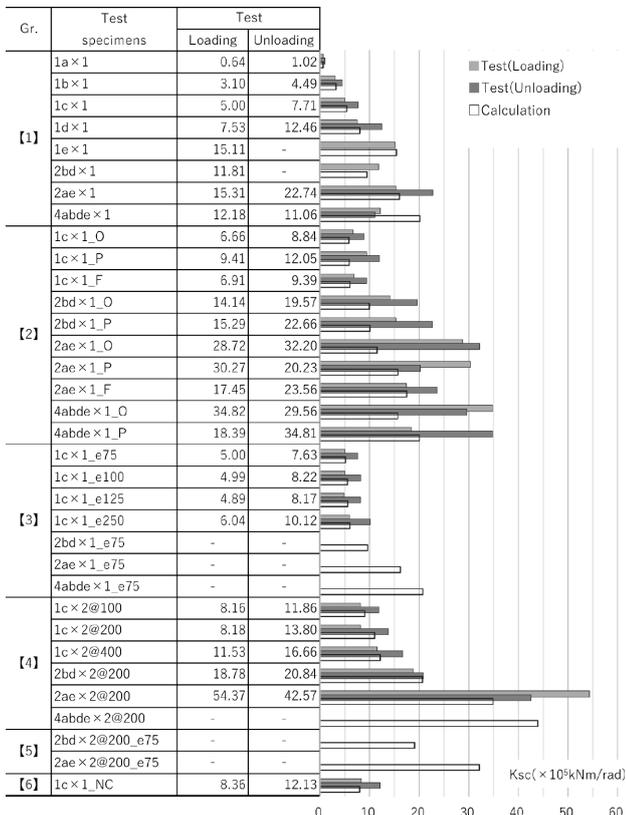


図7 回転剛性 K_{sc} の比較
Fig.7 Comparison of K_{sc}

- A_s : 頭付きスタッドの軸部断面積
- b_{si} : 回転中心から梁幅方向 i 行目の頭付きスタッド中心までの距離
- l_s : 頭付きスタッドの首下長さ
- E_e : コンクリートのヤング係数
- A_{ci} : 梁幅方向 i 行目の頭付きスタッドのコーン状破壊面の水平投影面積

図7に、回転剛性の実験結果と式(4)の計算結果を比較して示す。図7中の一部で、実験結果の記載がないものは、回転剛性が負値を示したことや、初期サイクルで最大耐力を迎えたことで剛性を算定できないためである。図7より、計算結果は実験結果とおおむね良い対応を示していることが分かる。

2.2 架構実験

崩壊形式の判定、崩壊形式ごとの塑性変形能力の評価の妥当性検証のため、架構実験を実施した。

図8に試験装置および試験体を示す。試験体は、全塑性モーメントに達した後に終局をむかえるように弾性範囲では横座屈または局部座屈しない部材断面に設定した。実大寸法の1/2.5程度を想定した縮小試験体であり、柱の反曲点間を想定した1層1スパンの直交梁付きの部分骨組架構である。試験体に設ける床スラブは鉄骨梁および直交梁の上フランジと頭付きスタッドで接合した。

表2に試験体一覧を示す。実験因子は一般化細長比 λ_b (0.42~0.59) およびスタッド間隔 (80 mm, 200 mm, 400 mm) とした。ここで λ_b は文献3に基づき算定しており、梁せい (400 mm, 600 mm) および梁フランジ幅 (130 mm, 150 mm, 180 mm) を変化させることで対応

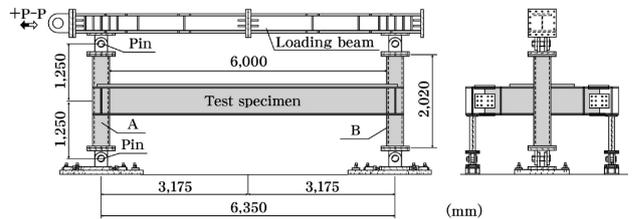


図8 試験体および試験装置
Fig.8 Test specimen and test set-up

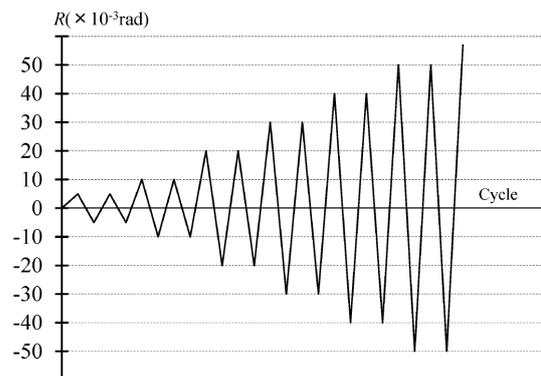


図9 載荷プログラム
Fig.9 Loading program

した。また λ_b は文献3に示される幅厚比指標 WF を加味し、文献5に基づく崩壊形式が横座屈(AC59-200, AC59-400, AA42-80)もしくはは局部座屈(AC45-200, AC45-80)となる部材断面を選定した。400 mmと200 mmのスタッド間隔は、文献8に示される合成率が、それぞれ0.5程度、1.0程度となるよう設定した。またスタッド間隔を80 mmとした試験体は、実大構造物における一般的なスタッド間隔の1/2.5とすることを意図して設定した。

床スラブは厚さ60 mmで軽量1種コンクリート(目標圧縮強度21 N/mm²)を用い、溶接金網($\phi 3.2@50$, SWM-P)を1段配筋とした。スタッドは径10 mm、長さ40 mmとした。表3に材料試験結果を示す。

試験は、試験体の柱下端をピン支持し、柱上端とピンで接合した加力梁に水平方向の変位を与える方法とした。試験体の構面外の変形と柱のねじれ防止のために、直交梁の先端に直交梁接続用治具を配置し、柱下端ピン位置と同一レベル位置でピン支持した。

図9に荷重プログラムを示す。 $R=(5, 10, 20, 30, 40, 50) \times 10^{-3}$ radで2回ずつ漸増繰返し荷重を行った後、単調に正方向に水平力を与えることを原則としたが、試験体の損傷状況を考慮しながら適宜サイクルを省略し、崩壊形式を確認した。

図10に、正側荷重時に下フランジに圧縮力が作用するA柱側(図8左側)の梁端曲げモーメント M_{ab} と回転角 θ_a の関係を示す。また、表4に実験結果一覧を示す。表の R_{max} は M_{max} 時点での θ_b を梁の全塑性モーメント M_p 時の変形角 θ_p で除して1を減じて算定した塑性変形倍率であり、 R は M_p を超えた後に再び M_p まで低下した時点での塑性変形倍率である。なお θ_b は骨格曲線における梁端回転角である。

表4に示すとおり、床スラブの上フランジ拘束効果により、最大耐力は5体の中で λ_b が最大($\lambda_b=0.59$)であるAC59-200およびAC59-400の負曲げ側でも M_p に達した。そのほかの試験体では M_{max}/M_p は1.13~1.31となった。なお、表中には圧縮材の細長比 λ_y を付記する。

塑性変形倍率 R は、AC59-200およびAC59-400のA柱とB柱の平均値で1.37, 1.09であり、スタッド本数の増加に伴い塑性変形能力が向上していた。AC45-200およびAC45-80の比較でも同様の傾向がみられた。AC45-200, AC45-80およびAA42-80では R は2を超えていた。

図11に本工法で崩壊形式が横座屈と区分されるものの塑性変形能力評価式、式(2)と実験結果の比較を、同様に図12には、崩壊形式が局部座屈と区分されるものについて、式(3)との比較を示す。評価式と実験結果は良い対応を示している。

表2 試験体一覧
Table 2 List of test specimens

Test specimens	Steel beam				Headed stud			λ_y	θ_b ($\times 10^{-3}$ rad)	λ_b	WF
	Size (mm)	Depth-thickness ratio		Length (mm)	Number	Pitch (mm)	Composite ratio				
		Flange	Web								
AC45-200	BH-600×180×10×16	5.6(FA)	56.8(FC)	6,000	29	200	0.97	162	7.13	0.45	0.66
AC59-200	BH-600×130×10×16	4.1(FA)			15	400	0.94	245	7.37	0.59	0.61
AC59-400		5.6(FA)			75	80	2.73	162	7.00	0.45	0.65
AA42-80	BH-400×150×10×16	4.7(FA)					36.8(FA)	2.71	184	10.58	0.42

表3 材料試験結果
Table 3 Mechanical properties

Test specimens	Steel(SN490B)				Concrete		
	Flange thickness 16 mm		Web thickness 10 mm		Age (Day)	Compressive strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)
	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)			
AC45-200	374	531	387	547	42	18.9	1.81
AC59-200					35	20.3	1.72
AC59-400					28	19.7	1.81
AC45-80	365	523	385	542	28	15.5	1.59
AA42-80	374	531	382	541	39	16.5	1.84

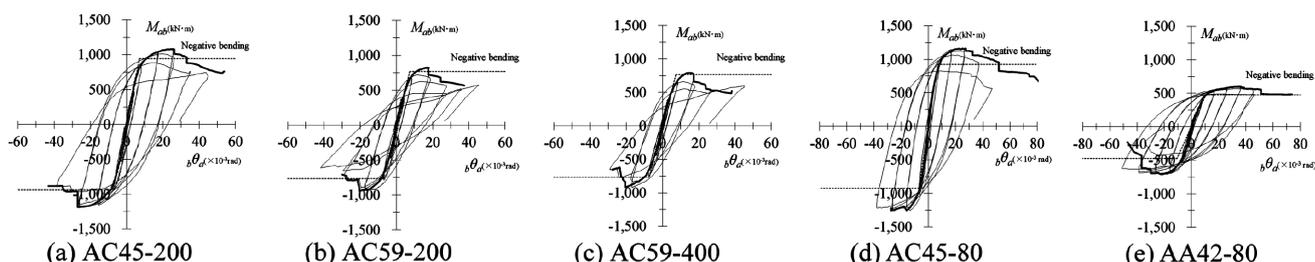


図10 梁端モーメント-回転角関係
Fig.10 M- θ

表4 実験結果
Table 4 Test results

Test specimens		M_{max}/M_D		R_{max}		R	
		Positive bending	Negative bending	Positive bending	Negative bending	Positive bending	Negative bending
AC45-200	A	1.26	1.15	2.79	2.57	3.88	3.65
	B	1.29	1.13	2.65	1.86	4.28	3.43
AC59-200	A	1.23	1.07	1.78	1.26	2.76	1.38
	B	1.25	1.02	1.33	1.12	1.38	1.35
AC59-400	A	1.20	1.04	1.80	1.02	2.06	1.34
	B	1.21	1.00	1.28	0.83	1.68	0.84
AC45-80	A	1.36	1.25	2.93	2.84	-	6.42
	B	1.34	1.26	2.55	2.16	3.30	5.93
AA42-80	A	1.49	1.27	1.10	2.44	2.46	-
	B	1.55	1.31	1.03	2.64	-	5.23

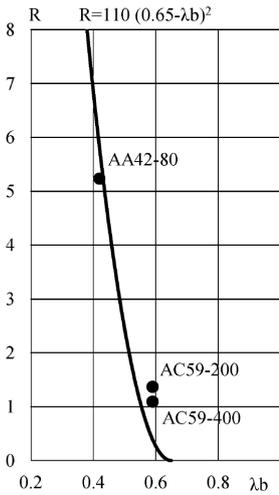


図11 R- λ_b
Fig.11 R- λ_b

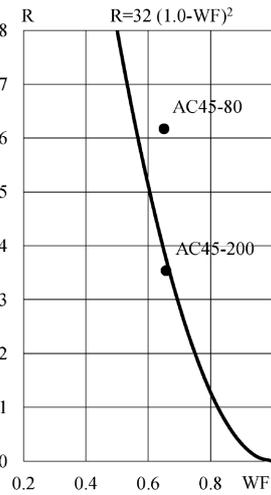


図12 R-WF
Fig.12 R-WF

3. 有限要素法解析による検討

本章では、前章で述べた構造実験を再現する解析モデルの検討について述べる。また、実構造を想定した網羅的な解析検討の一例を示す。

3.1 架構実験の再現解析

本節では、AC59-400およびAA42-80の再現解析について示す。解析モデルを図13に示す。解析モデルは試験体と同じ形状寸法とするが、柱・直交梁・荷重装置類を省き、梁の内法スパン部分のみをモデル化した。梁と床スラブはシェル要素でモデル化した。回転バネの剛性には、スタッド抜きおよびフランジ面外変形を考慮した値を用いた。また、スタッドのコーン状破壊を想定し、回転バネの回転角が所定の値に達すると曲げ耐力が0となるバネモデルを用いた。梁フランジと梁ウェブの材料特性には実験と同様の繰返し荷重を精度よく再現できるような橋口モデルを用いた。

初期不整形は、逆対称曲げとなる強制回転変位を与えた座屈固有値解析を行い、得られたモード形状に基づ

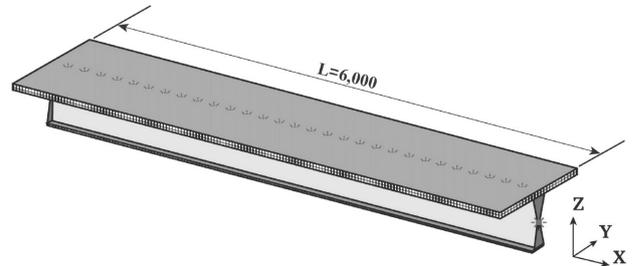
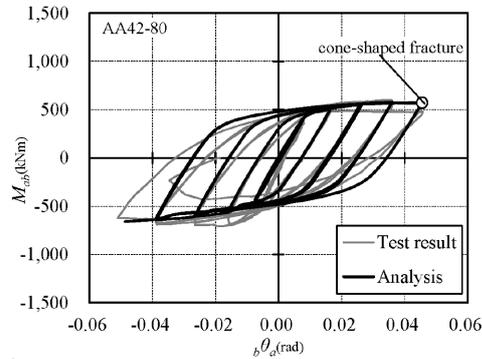
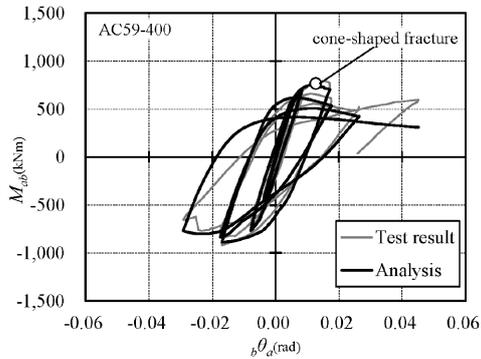
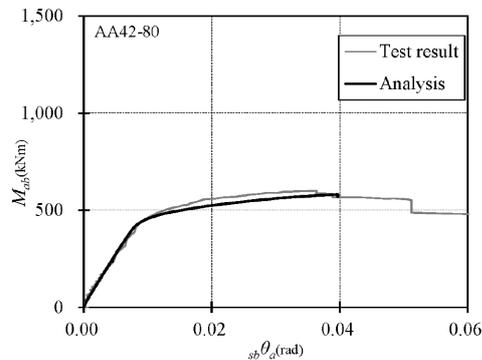
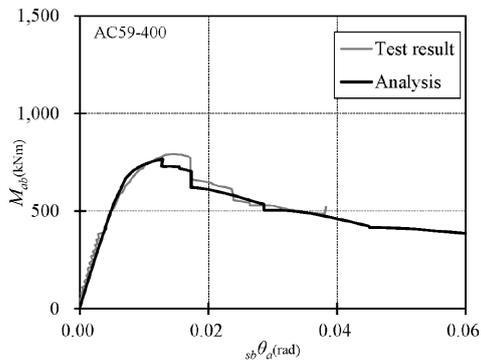


図13 解析モデル
Fig.13 Analysis model



(a)M- θ



(b)Skeleton curve

図14 梁端モーメント-回転角関係
Fig.14 M- θ

表5 解析一覧
Table 5 List of analysis case

Case	Size (mm)	Grade	Length (mm)	Slab width (mm)	Headed stud Line	λ_b	WF	κ	
No.1	1,000 × 300 × 16 × 25	490	10,800	2,300	2	0.45	0.64	1.41	
No.2			14,400	2,600		0.53	0.64	1.21	
No.3	1,100 × 350 × 19 × 28		10,800	2,400	3	0.40	0.62	1.53	
No.4			18,000	4,000		0.53	0.62	1.17	
No.5	1,200 × 400 × 16 × 32		14,400	2,700	3	0.45	0.74	1.63	
No.6			18,000	4,100		0.52	0.74	1.43	
No.7			21,600	4,600		0.57	0.74	1.30	
No.8	1,000 × 300 × 16 × 25		550	14,400	2,600	2	0.58	0.70	1.21
No.9			400				0.45	0.54	1.21

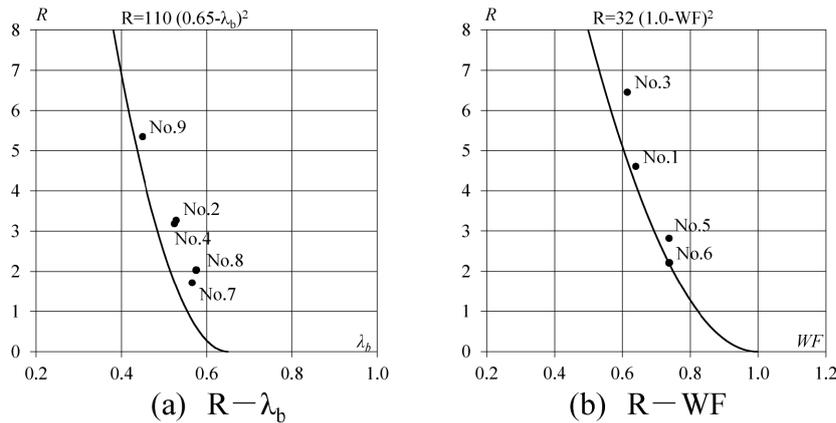


図15 解析結果
Fig.15 Results

いて与えた。繰り返し載荷であるため、負側のモード形状についても考慮し、モード形状を正負重ね合わせた形状を初期不整形として用いた。大きさは、面外変形が最大となる下フランジ中央の節点において、面外変形が $L/1000$ となる大きさとした。

図14に解析より得られた負曲げ側の梁端モーメント-回転角関係を実験結果と合わせて示す。実験結果と解析結果は良い対応を示している。

3.2 解析によるパラメトリックスタディ

架構実験を再現可能な解析モデルにて、実構造を想定したパラメトリックスタディを行い、塑性変形能力の評価手法の妥当性を検討した。本節では、その一例を示す。解析一覧を表5に示す。解析モデルは、9ケースであり、一般化細長比 λ_b と幅厚比指標WF、梁の鋼種をパラメータとしたものを示す。

解析結果と変形能力評価式の関係を図15に示す。(a)には崩壊形式が横座屈となる場合のRと λ_b の関係を、(b)には、崩壊形式が局部座屈となる場合のRとWFの関係を示している。No.4の梁形状の場合、補剛材の一般的な必要間隔は9 m程度である。No.4の梁長さは18 mであるが、床スラブの上フランジ拘束効果により、 $R:3.2$ を確保することが可能となっている。また、本工法の変形能力評価式、式(2)、(3)は解析結果を安全側に評価することができていることが分かる。

むすび = 鉄骨梁の横座屈補剛工法の開発にあたり実施した実験および解析について述べた。本工法で予測される塑性変形能力は、実験や解析の結果と良い対応を示すことが確認された。

鉄骨梁の横座屈補剛工法が今後の鉄骨の製作および施工の合理化の一助となれば幸いである。

本研究を進めるにあたり、五十嵐規矩夫教授、三井和也准教授（以上、東京科学大学）、聲高裕治教授（京都大学）、小野潤一郎氏、吉田和彦氏、木村征也氏、内田衛氏、平井健太氏（以上、㈱日建設計）より貴重なご助言を賜った。ここに深く感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 伊賀はるなほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2015, p.897-900.
- 2) 聲高裕治ほか. 鋼構造論文集. 2018, 第25巻, 第97号, p.47-59.
- 3) 五十嵐規矩夫ほか. 日本建築学会構造系論文集. 2014, 第79巻, 第706号, p.1899-1908.
- 4) 五十嵐規矩夫ほか. 日本建築学会構造系論文集. 2018, 第83巻, 第749号, p.1063-1073.
- 5) 五十嵐規矩夫ほか. 日本建築学会構造系論文集. 2018, 第83巻, 第745号, p.491-501.
- 6) 五十嵐規矩夫ほか. 日本建築学会構造系論文集. 2011, 第76巻, 第668号, p.1865-1872.
- 7) 上野朋也ほか. 鋼構造論文集. 2024, 第31巻, 第121号, p.1-16.
- 8) 日本建築学会編. 各種合成構造設計指針・同解説. 日本建築学会, 2023年.

(論文)

アンダーマッチ溶接による780 N/mm²級箱形断面柱継手の最大曲げ耐力評価

宮田亮太*¹・山口徹雄*¹・田畑晃人*²・松下政弘*³・田中 剛*⁴(博士(工学))

Ultimate Flexural Strength of Column Splices with Undermatching Welds in 780 N/mm² Class Columns

Ryota MIYATA・Tetsuo YAMAGUCHI・Akito TABATA・Masahiro MATSUSHITA・Dr.Tsuyoshi TANAKA

要旨

近年、引張強さ780 N/mm²級の高張力鋼が開発されているが、溶接部の強度を母材と同等に確保するためには、多大な労力およびコストを要するのが現状である。これに対して、現場における柱継手にアンダーマッチ溶接が適用可能になれば、溶接作業にともなう諸問題を大幅に軽減することが期待される。本稿では、アンダーマッチ溶接を用いた柱継手の最大曲げ耐力の推定式を提案する。アンダーマッチ溶接を用いた柱継手を有する溶接組立箱形断面柱部材に対して有限要素解析と曲げ試験を実施し、その結果に基づいて柱継手の最大曲げ耐力評価を行い、提案式の妥当性を確認した。

Abstract

High-strength steels with tensile strengths in the region of 780 N/mm² have recently been developed. However, achieving welded joints with strength equivalent to the base material still requires considerable effort and cost. In contrast, applying undermatching welding to column splices in the field has the potential to significantly reduce the challenges associated with welding operations. This report presents a formula for estimating the ultimate flexural strength of column splices using undermatching welds. Finite element analyses and bending tests have been conducted on box-column members with undermatching-welded splices. Based on the results of these analyses and tests, the ultimate flexural strength of the column splices has been evaluated, and the validity of the proposed formula has been verified.

検索用キーワード

780 N/mm²級鋼材、柱継手、アンダーマッチ溶接、載荷実験、最大曲げ耐力

まえがき = 近年、鋼構造建築物の高層化および大型化にともなう、柱部材の厚肉化および高強度化が進む中、780 N/mm²級鋼の適用が期待されている。しかし、780 N/mm²級鋼への同強度溶接材料での溶接では、低温割れ防止のための予熱および後熱と強度確保のための厳しい入熱量およびパス間温度の管理が必要となり¹⁾、施工難度が高く、また、施工能率も低いため、780 N/mm²級鋼適用のネックの一つとなっている。

いっぽう、溶接組立箱形断面柱の角溶接を対象として、溶接金属の強度が母材の強度を下まわるアンダーマッチ溶接に関する研究成果が公表されており、アンダーマッチ溶接は、溶接施工条件を緩和できる可能性が示されている²⁾。一般に、工事現場における柱継手位置は、作業性を考慮し床面から1 m程度の高さに設けられる。水平荷重時の柱の曲げモーメント分布を考えると、柱継手位置の曲げモーメントは柱端位置の曲げモーメントに比べて小さい。そのため、アンダーマッチ溶接による柱継手の設計は可能であると考えられる。同様の観点から柱継手を部分溶込み溶接とした研究³⁾が行われており、設計方法が鋼構造接合部設計指針⁴⁾に示されている。

通常、柱継手はオーバーマッチ溶接となるように溶接材料および溶接条件が設定される。オーバーマッチ溶接

の場合、完全溶込み溶接された柱継手の耐力は母材耐力を上回ることになるので、とくに継手の設計を必要としない。いっぽう、アンダーマッチ溶接の場合では、柱継手の耐力を算定し、設定する要求性能を満足させる必要がある。また、アンダーマッチ継手の強度は、母材による塑性拘束の影響を受け、継手の強度が溶接金属の強度よりも上昇することが古くから知られている⁵⁾ことから、塑性拘束の影響も考慮する必要がある。

本稿は、780 N/mm²級溶接組立箱形断面柱を対象として、アンダーマッチ溶接を用いた場合の柱継手の弾塑性挙動を明らかにし、最大曲げ耐力の推定式とその妥当性について柱部材の繰返し水平載荷実験により確認した結果について述べる。

2. アンダーマッチ溶接を用いた場合の柱継手の最大曲げ耐力の推定式

2.1 軸力が作用しない場合

2.1.1 曲げ耐力の計算値

軸力が作用しない場合の柱継手の最大曲げ耐力 M_u を以下のストレスブロックの仮定に基づき推定する。なお、算定に当たっては、鋼管幅 B に比べて板厚 t が十分に小さいと仮定した。

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 *² 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部 *³ 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部
*⁴ 国立大学法人神戸大学 大学院工学研究科 建築学専攻

(i) 0°方向載荷

図1(a)に示すようにフランジについては溶接金属の引張強さ $w\sigma_u$ 、ウェブについては溶接金属の降伏点 $w\sigma_y$ のストレスブロックが形成されると仮定した。このとき、 jM_u は、次式により表される。

$$jM_u = \frac{1}{2}t(B-t)^2(1+2\beta)w\sigma_y \dots\dots\dots (1)$$

ここで β は溶接金属の降伏比の逆数($w\sigma_u/w\sigma_y$)を表す。

(ii) 45°方向載荷

図1(b)に示すように外縁側の断面積の半分が $w\sigma_u$ に到達し、残りの領域が $w\sigma_y$ に留まるストレスブロックが形成されると仮定した。このとき、 jM_u は、次式により表される。

$$jM_u = \frac{1}{2\sqrt{2}}t(B-t)^2(1+3\beta)w\sigma_y \dots\dots\dots (2)$$

(iii) 角継手がアンダーマッチ溶接の場合

図2に、45°方向載荷の場合を示す。角継手に接する領域が角継手の溶接金属の引張強さ $c\sigma_u$ となると仮定すると、 jM_u は、次式により表される。

0°方向

$$jM_u = \frac{1}{2}t(B-t)^2(1+2\beta)w\sigma_y - 2a(B-t) \cdot (w\sigma_u - c\sigma_u) \dots (3)$$

45°方向

$$jM_u = \frac{1}{2\sqrt{2}}t(B-t)^2(1+3\beta)w\sigma_y - \sqrt{2}a(B-t) \cdot (w\sigma_u - c\sigma_u) \dots (4)$$

ここで、 a は角継手の溶接溶込み断面積である。

2.1.2 高強度母材の塑性拘束による強度上昇率の算定

アンダーマッチ継手では降伏が先行する溶接金属の塑性変形を高強度側の母材が塑性拘束し、溶接金属が多軸応力状態となり継手強度があがるのが古くから知られ

ており⁵⁾、その最大曲げ耐力は、溶接金属の強度に基づく計算値を上回ることが期待される。本項では、すべり線を用いた極限解析に基づき導出した耐力評価式について述べる。

2.1.2.1 有限要素数値解析

溶接金属の塑性変形状態を単純化して捉えることを目的として、材料を完全弾塑性材とした有限要素数値解析(FEA)を行った。解析モデルを図3に示す。図7に示す試験体にあわせて上柱を板厚12 mm、下柱を板厚24 mmとし、溶接部も含めてモデル化した。解析モデルは、対称性を利用した1/2モデルとし、ソリッド要素を用いて作成した。柱下端は完全固定とし、柱頂部を自由端として強制変位を与えた。解析には、汎用有限要素数値解析ABAQUS(Ver6.14)を用いた。塑性域の降伏条件および構成方程式は、von Misesの降伏条件、Prandtl-Reussの流れ則および等方硬化則に基づいている。材料特性には、溶接金属および母材の降伏点を用いた完全弾塑性型の応力-歪関係を入力した。

$\theta=4\theta_p$ 時の柱継手位置における相当塑性歪の分布と変形状態の例を図4に示す。ここで、 θ は柱部材角であり、柱継手に生じる曲げモーメントが上部箱形断面の全塑性モーメント M_p に達する弾性柱部材角 θ_p を基準としている。なお、図4は同図に示すa-a'断面のものである。0°および45°方向載荷のいずれにおいても、イーブンマッチ継手では、溶接金属および母材に塑性化が生じるのに対して、アンダーマッチ継手では、開先面に沿って溶接金属側が顕著に塑性変形するすべり変形が生じていることがわかる。

2.1.2.2 極限解析

2.1.2.2.1 有限要素数値解析の解析結果よりアンダーマッ

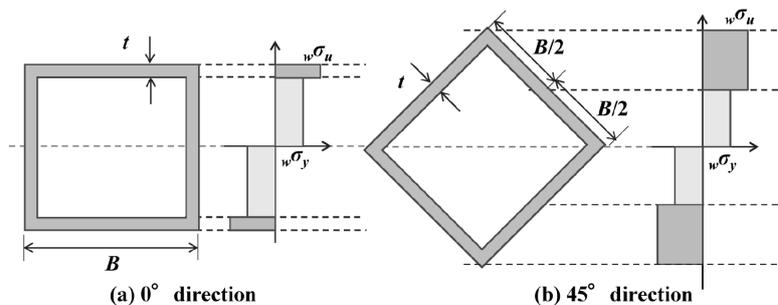


図1 応力分布
Fig.1 Stress distribution

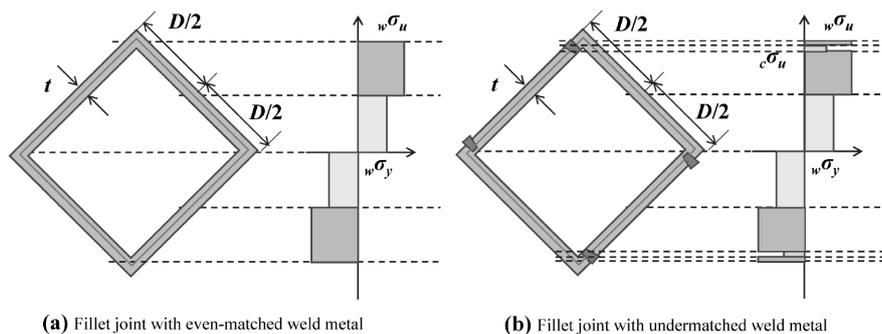


図2 角継手強度の異なる柱継手の応力分布 (a) イーブンマッチ角継手 (b) アンダーマッチ角継手
Fig.2 Stress distribution in column splices with different fillet weld strengths
(a) Fillet joint with even-matched weld metal (b) Fillet joint with undermatched weld metal

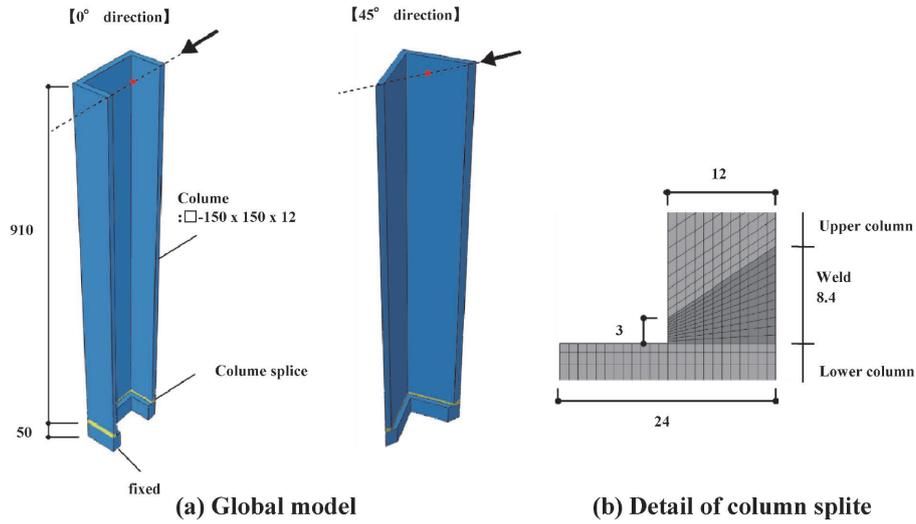


図3 FEAモデル
Fig.3 FEA model

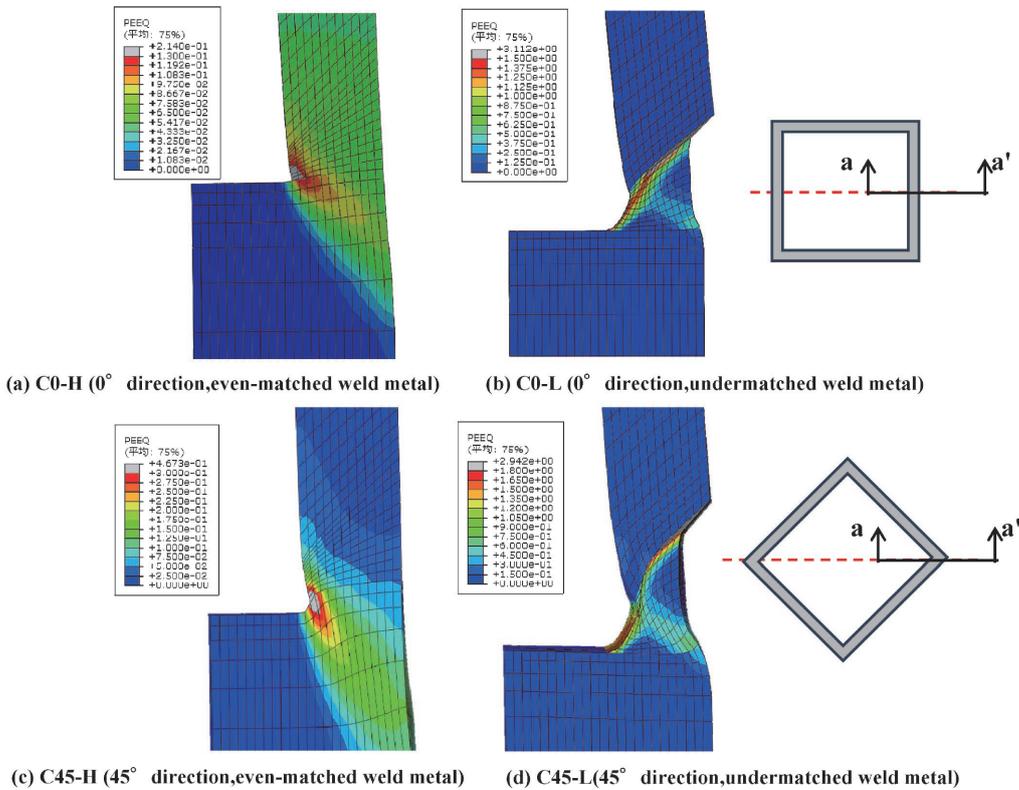


図4 a-a'断面の相当塑性ひずみの分布
Fig.4 Distribution of equivalent plastic strain of a-a' section

チ継手では開先面に沿うすべり変形が塑性挙動を支配していることが明らかとなった。そこで、アンダーマッチ継手の強度推定式を得る目的で、すべり線に基づく極限解析を行う。溶接金属が母材により塑性拘束されていると仮定すると平面歪状態とみなすことができる。溶接金属を完全剛塑性材とし塑性変形にともなう体積変化を0(非圧縮性)と仮定すると、降伏線にはすべりだけが許容されることになる。開先面にすべり線を設けた崩壊機構を図5に示す。

単位幅当りの崩壊荷重を p_p とすると、外力仕事 W_o は次式で表される。

$$W_o = p_p \cdot \delta \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 δ は母材の鉛直方向の仮想変位を表す。すべり線で成される内力仕事 W_i は、降伏せん断応力、すべり量およびすべり線の長さ(t :母材の板厚)の積で表される。すなわち、

$$W_i = \frac{w\sigma_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta}{\sin 35^\circ} \cdot \frac{t}{\cos 35^\circ} \dots\dots\dots (6)$$

W_o と W_i を等値すると p_p が得られる。

$$p_p = 1.23t \cdot w\sigma_y \dots\dots\dots (7)$$

アンダーマッチ継手の降伏耐力は、母材からの塑性拘

束の影響を受け、溶接金属の降伏点の1.23倍となる。

2.1.2.3 継手強度

2.1.2.2 極限解析で求めた p_p は降伏耐力に相当し、最大耐力については降伏点を引張強さに置き換えて算定する方法が考えられる。しかし、柱継手が最大耐力となる状態では、母材の塑性化の程度に応じて強度上昇率が1.23より低下することが考えられる。そこで、継手の最大耐力および降伏耐力を次式で表し、以下に示す三つの場合に分けて強度上昇率 ω を算定する。

$$p_u = \omega \cdot t \cdot \omega \sigma_u \quad \dots\dots\dots (8)$$

① $\omega \sigma_u \leq \beta \sigma_y$ の場合

柱継手の溶接金属の引張強さ $\omega \sigma_u$ に到達するまで母材の降伏強さ $\beta \sigma_y$ に留まる場合で、最も塑性拘束の程度が大きいと考えられる。この場合は、 $\omega = 1.23$ を用いる。

② $\omega \sigma_u \geq \beta \sigma_u$ の場合

イブンマッチ継手以上の場合であり、母材側の塑性化が進展するため、塑性拘束の影響が表れないと考えられる。この場合は、 $\omega = 1$ とする。

③ $\beta \sigma_y \leq \omega \sigma_u \leq \beta \sigma_u$ の場合

①と②の間の場合で $\omega \sigma_u$ が母材の引張強さ $\beta \sigma_u$ 以下の場合である。ここでは、①と②の境界値を線形補間する次式により ω を与える。

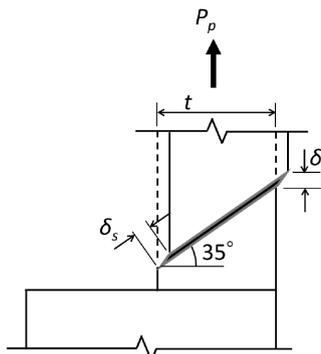


図5 崩壊機構
Fig.5 Collapse mechanism

$$\omega = \frac{1.23 - 0.23S_r - \beta YR}{1 - \beta YR} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 βYR は母材の降伏比、 S_r は母材に対する柱継手の軟質度 ($\omega \sigma_u / \beta \sigma_u$) を表す。

2.1.1項で算定した曲げ耐力式に対して、本項で算定した ω を柱継手における溶接金属の引張強さ $\omega \sigma_u$ 、降伏点 $\omega \sigma_y$ に乘じ、 $\omega \omega \sigma_u$ 、 $\omega \omega \sigma_y$ に置き換えることで、塑性拘束を考慮した jM_{uc}^* を導出可能である。

2.2 軸力が作用する場合

冷間成形角形鋼管設計施工マニュアル⁶⁾では、全塑性曲げモーメントに及ぼす軸力の影響について、軸力比に応じた近似式を用いて評価している。本節では、同様の手法を用い、柱継手の最大曲げ耐力について軸力比に応じた耐力評価式を提示する。

箱形断面柱部材が曲げと軸力を受ける場合、軸力の大きさによって最大曲げ耐力は低減し、中立軸の位置も移動する。本節では、図1で仮定した軸力の無い場合のストレスブロックを基に、軸力による低減効果を考慮した柱継手の最大曲げ耐力 jM_{uc}^* を算定する。

(i) 0°方向載荷

① $0 \leq n_w \leq 0.5$ の場合

中立軸が降伏応力のブロック内にある場合であり、継手強度の上昇を考慮した応力状態は図6 (a)と仮定する。応力分布より算定される最大曲げ耐力 jM_{uc}^* は次式で近似できる。

$$\frac{jM_{uc}^*}{jM_u^*} = 1 - \frac{4}{2\beta + 1} n_w^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、軸力比 n_w は溶接金属の降伏点に基づく柱継手の降伏軸力 ($= A \cdot \omega \sigma_y$) を基準としている。

② $0.5 \leq n_w \leq 0.5(\beta + 1)$ のとき

中立軸が引張強さのブロック内にある場合であり、応力状態は図6 (b)と仮定する。応力分布より算定される最大曲げ耐力 jM_{uc}^* は次式で近似できる。

$$\frac{jM_{uc}^*}{jM_u^*} = \frac{2}{2\beta + 1} \{(\beta + 1) - 2n_w\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

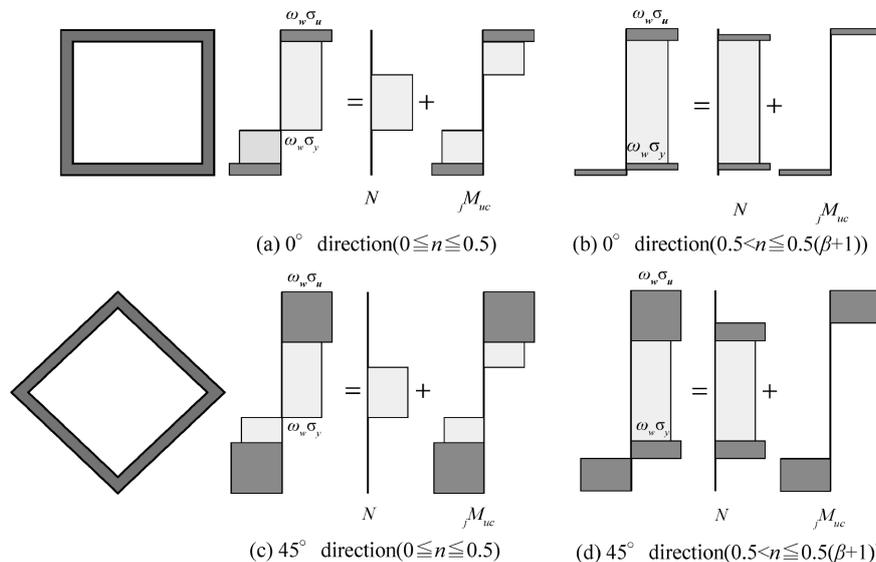


図6 応力分布
Fig.6 Stress distribution

(ii) 45°方向載荷

① $0 \leq n_w \leq 0.5$ のとき

中立軸が降伏応力の応力ブロック内にある場合であり、応力状態は図6(c)と仮定する。応力分布より算定される最大曲げ耐力 jM_{uc}^* は次式で近似できる。

$$\frac{jM_{uc}^*}{jM_u^*} = 1 - \frac{4}{3\beta + 1} n_w^2 \dots\dots\dots (12)$$

② $0.5 \leq n_w \leq 0.5(\beta + 1)$ のとき

中立軸が引張強さの応力ブロック内にある場合であり、応力状態は図6(d)と仮定する。応力分布より算定される最大曲げ耐力 jM_{uc}^* は次式で近似できる。

$$\frac{jM_{uc}^*}{jM_u^*} = \frac{4}{3\beta + 1} \left[\beta - \frac{1}{\beta} \left\{ n - \frac{1}{2}(1 - \beta) \right\}^2 \right] \dots\dots\dots (13)$$

3. 柱部材の繰返し水平載荷実験

前章までで導出したアンダーマッチ継手の最大曲げ耐力推定式の妥当性を検証するため、建築構造用高性能780 N/mm²級鋼材 (KBSA630C^{注)}) を対象として片持ち柱形式の載荷実験を行った。

3.1 試験体

試験体一覧を表1に示す。試験体IとII、試験体IIIとIVの試験体形状の例をそれぞれ図7および図8に示す。試験体は、柱と下部固定治具からなるT字形である。

本実験では、780 N/mm²級箱形断面□-150×150×12と□-150×150×24に柱継手を設ける。柱継手で破壊させ、柱継手の最大耐力を知るため、柱下端から50 mmの位置に柱継手を設けた。実験因子は、軸力有無、溶接金属強度および載荷方向である。溶接金属強度については3水準とし、載荷方向については0°および45°方向の2種類とする。柱継手の詳細を図7に示す。ルートギャップを3 mm、開先角度35°とし、セラミック製の裏当て材を用いて裏波溶接による完全溶込み溶接を行った。裏波溶接とした理由は、本実験に用いた板厚は12

mmと小さく、これに板厚9 mmの裏当て金を使用すると試験体と裏当て金の板厚差が小さく裏当て金を介しての応力伝達などにより、最大耐力に影響を及ぼす可能性があるためである。表1に示す溶接ワイヤ(φ-1.2 mm)を用い、下向姿勢により溶接を行った。溶接積層は4層4パスである。

角継手の詳細を図7に示す。ルートギャップ5 mm、開先角度35°とし、裏当て金を用いて完全溶込み溶接を行った。溶接ワイヤとして、JIS Z3312 G78Aクラスを使用したものは、柱継手では予熱温度・パス間温度とも100℃、角継手では予熱温度75℃、パス間温度125℃狙いとして溶接した。なお、後熱は実施していない。

また、低強度溶接ワイヤについては、柱継手、角継手とも溶接金属の冷却速度を遅くし、目標とする溶接金属強度を得ることを目的に予熱温度、パス間温度ともに200℃狙いとして溶接した。

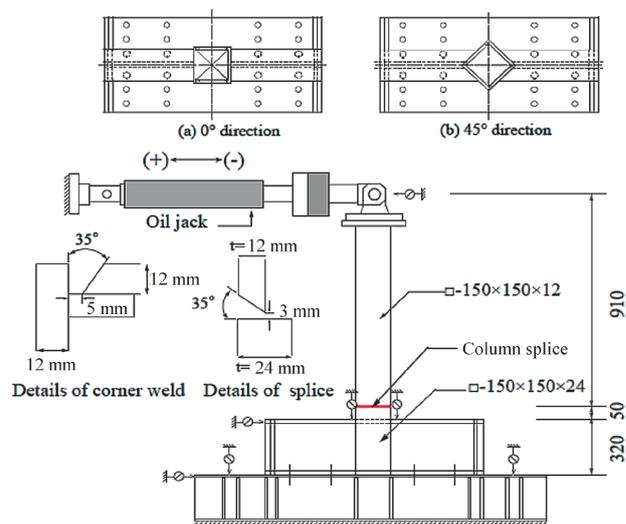


図7 試験体およびセットアップ(試験体シリーズI, II)
Fig.7 Test specimens and set-up (test series I and II)

表1 試験体一覧
Table 1 Test specimens

Specimen	Axial load ratio n	Loading direction	Column splice		Corner joint	
			Welding consumables (JIS Z 3312)	Softness ratio S_r	Welding consumables (JIS Z 3312)	Softness ratio r
I	0	0°	G78 A 2 U C N4M4T	1.03	G78 A 2 U C N4M4T	1.03
			G59J A 1 U C 3MIT	0.84		
			G43 A 0 C 16	0.61		
			G78 A 2 U C N4M4T	1.03		
			G59J A 1 U C 3MIT	0.84		
			G43 A 0 C 16	0.61		
II	0	45°	G59J A 1 U C 3MIT	0.8	G59J A 1 U C 3MIT	0.79
					G43 A 0 C 16	0.64
III	0	0°	G59J A 1 U C 3MIT	0.8	G78 A 2 U C N4M4T	1.03
					G59J A 1 U C 3MIT	0.81
IV	0	45°	G59J A 1 U C 3MIT	0.78	G59J A 1 U C 3MIT	0.81
	0.3					
	0.6					

脚注) KBSA は当社の登録商標 (第4936432号) である。

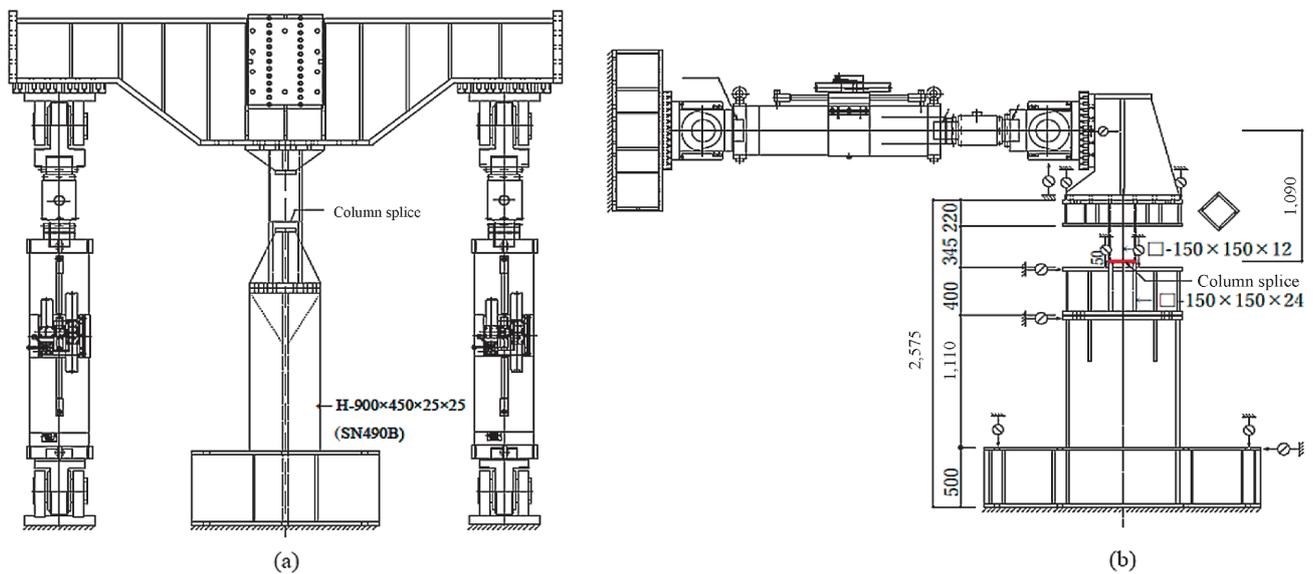


図8 試験体およびセットアップ (試験体シリーズⅢ, Ⅳ)
Fig.8 Test specimens and set-up (test series Ⅲ and Ⅳ)

表2 材料の機械的性質
Table 2 Mechanical properties

Component	Material	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	YR (%)	El (%)					
Base metal	PL-12	719	876	82	22					
	PL-24	664	861	77	15					
Weld metal	Column splice	II	G78A	720	906	79	20			
			G59JA	590	734	80	28			
			G43A	360	529	68	33			
	Corner joint	III	III	G59JA	554	699	79	32		
				IV	G59JA	562	686	82	31	
				IV	III	G78A	720	906	79	20
						G59JA	567	689	82	33
	G43A	399	563			71	28			
	IV	G59JA	590	707	83	31				

YR= σ_y/σ_u

El : Elongation

The weld metal material is indicated by the abbreviations of welding consumables shown in Table 1.

PL-12: □-150×150×12

PL-24: □-150×150×24

試験体に使用した母材および溶接金属の引張試験結果を表2に示す。なお、降伏点は0.2%オフセット法より算定した。引張試験片の形状は、柱母材ではJIS 5号、溶接金属ではJIS A2号を用いた。試験片の採取位置は柱母材では全厚、溶接部では溶接金属中央とした。

得られた結果より計算した軟質度 S_f を表1に示す。

3.2 荷重方法・計測方法

荷重方法は、正負漸増交番繰返し荷重とし、柱継手に生じる曲げモーメントが上部箱形断面の全塑性モーメント M_p に達する時の弾性柱部材角 θ_p を変形の基準値として、 $\pm\theta_p$, $\pm 2\theta_p$, $\pm 3\theta_p$ …で各2回ずつ破壊モードが確定するまで行う。なお、0°および45°方向荷重試験体の M_p は、それぞれ、254 kNmおよび239 kNmである。

軸力のない試験体シリーズⅠおよびⅡでは図7に示すように変位計をセットし、柱部材角 θ を計測した。軸力を変化させた試験体シリーズⅢおよびⅣでは図8に示す

表3 実験結果一覧
Table 3 Experimental results

Sample	M_p (kNm)	eM_{max} (kNm)	eM_{max}/M_p	Number of cycle
C0-H	254	332	1.31	$5\theta_p(+1)$
C0-M		312	1.23	$3\theta_p(-2)$
C0-L		250	0.99	$2\theta_p(+1)$
C45-H	239	307	1.28	$4\theta_p(-2)$
C45-M (C45-M-H)		291	1.22	$3\theta_p(-1)$
C45-L		224	0.94	$2\theta_p(+1)$
C45-M-M	239	268	1.12	$3\theta_p(+1)$
C45-M-L		250	1.04	$2\theta_p(-2)$
CN-0	239	281	1.18	$3\theta_p(+2)$
CN-0.3	218	266	1.22	$3\theta_p(-2)$
C45-0	239	277	1.16	$3\theta_p(-1)$
C45-0.3	218	254	1.17	$3\theta_p(+1)$
C45-0.6	153	193	1.26	$3\theta_p(+1)$

ように鉛直ジャッキにより柱軸力を導入した後、水平荷重を行った。なお、軸力の影響を考慮した上部箱形断面の全塑性モーメント M_{pc} は、冷間成形角形鋼管設計施工マニュアル⁶⁾の考え方にに基づき算定した。

3.3 実験結果

実験結果一覧を表3に示す。表中の eM_{max} は柱継手に生じた最大曲げモーメントを示す。破断サイクルの $5\theta_p(+1)$ は $5\theta_p$ の荷重サイクルの正側1サイクル目に破断したことを示す。

各試験体の荷重-変形関係を図9~図12に示す。溶接金属強度が低くなるに従い、最大曲げモーメントが低下し、破断時期が早くなる。ただし、軸力の有無、角継手がアンダーマッチ溶接であっても、柱継手の軟質度 $S_f = 0.8$ 程度の試験体は、 eM_{max}/M_p は1.1を超えており、いずれの試験体においても母材の塑性化を確認した。

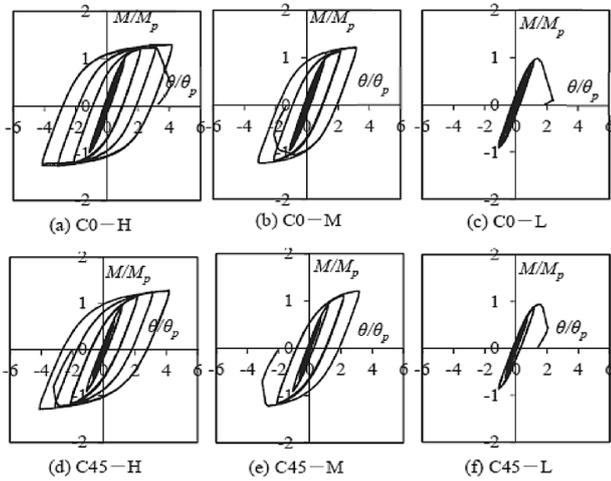


図9 荷重—変形関係 (試験体シリーズ I)
Fig.9 Load-deformation relationships (test series I)

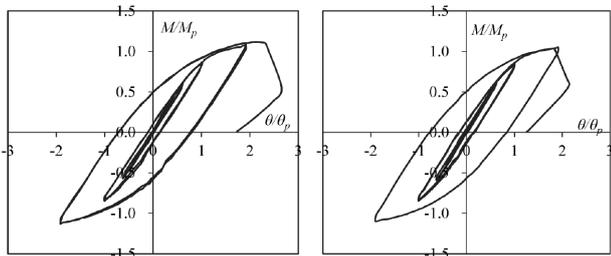


図10 荷重—変形関係 (試験体シリーズ II)
Fig.10 Load-deformation relationships (test series II)

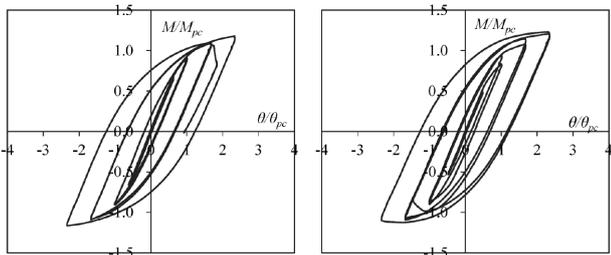


図11 荷重—変形関係 (試験体シリーズ III)
Fig.11 Load-deformation relationships (test series III)

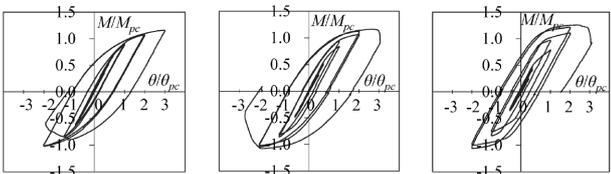
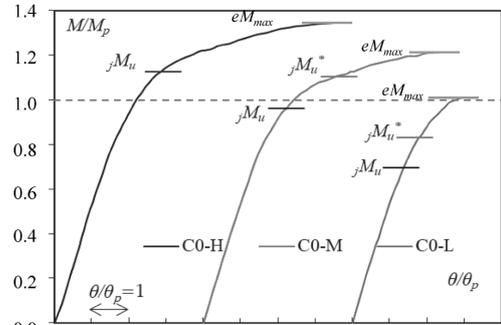


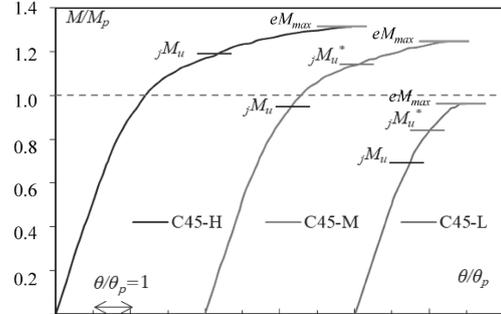
図12 荷重—変形関係 (試験体シリーズ IV)
Fig.12 Load-deformation relationships (test series IV)

4. 実験結果と最大曲げ耐力の推定式の比較

試験体シリーズ I について、実験により得られた破断側の骨格曲線と計算値の比較を図13に示す。実験値と計算値の比 eM_{max} / jM_u^* は、試験体 C0-H および C45-H では、1.15 および 1.10 である。試験体 C0-M および C45-M では、1.33 および 1.29 であり、試験体 C0-L および C45-L では、1.55 および 1.42 である。これより、軟質硬度 S_v が小さくなるに従い、計算値は実験値を過小評価して



(a) 0° direction



(b) 45° direction

図13 荷重—変形関係 (試験体シリーズ I)
Fig.13 Load-deformation relationships (test series I)

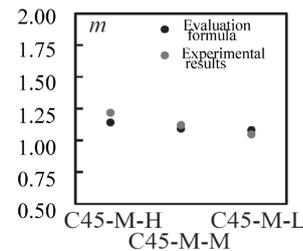


図14 実験結果と評価式の比較 (試験体シリーズ II)
Fig.14 Comparison of experimental results and evaluation formula (test series II)

いくことが分かる。

いっぽう、図1に示したストレスブロックの溶接金属の降伏点および引張強さを ω 倍することにより算定した最大曲げ耐力 jM_u^* と比較する。 eM_{max} / jM_u^* は、アンダーマッチ継手である試験体 C0-M および C45-M では、1.10 および 1.07 となる。試験体 C0-L および C45-L では、1.26 および 1.15 となる。イーブンマッチ継手である試験体 C0-H および C45-H では $\omega = 1$ であり、2.1.1 項に示した jM_u から変化しない。すべての試験体に対して eM_{max} / jM_u^* は、1.07~1.26 の範囲となり、 jM_u^* により最大曲げ耐力を安全側に推定することができる。

角継手をアンダーマッチ溶接とした試験体シリーズ II の実験結果と評価式を比較した結果を図14に示す。グラフの値は全て無次元化しており、 m は柱継手の最大曲げ耐力を母材の全塑性モーメントで、いずれも角軟質硬度 r の変化にともなう実験最大耐力の変化の傾向をとらえている。

つぎに、軸力が作用した試験体シリーズ III について実験結果より得られた最大曲げ耐力 eM_{max} および最大曲げ耐力計算値の比較を図15に示す。 n は軸力を母材の降伏

軸力で、それぞれ除したものである。また、軸力を作用させ、かつ、角継手がアンダーマッチ溶接の場合の試験体シリーズⅣについて実験結果と評価式の比較を図16に示す。グラフの m と n は、図14と図15と同様の無次元化をしている。評価式はいずれの場合でも実験結果の傾向と一致し、 ${}_jM_{uc}^*$ により最大曲げ耐力を推定することができるといえる。

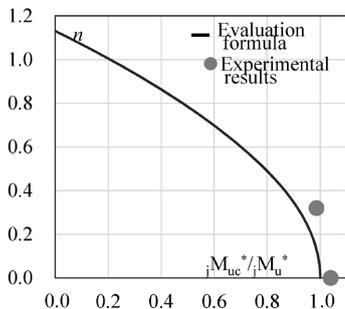


図15 荷実験結果と評価式の比較（試験体シリーズⅢ）

Fig.15 Comparison of experimental results and evaluation formula (test series III)

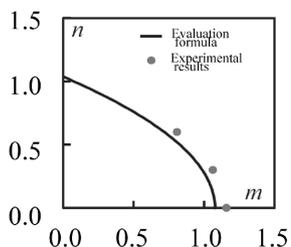


図16 実験結果と評価式の比較（試験体シリーズⅣ）

Fig.16 Comparison of experimental results and evaluation formula (test series IV)

むすび=本稿では、780 N/mm²級溶接組立箱形断面柱の柱継手に施工効率向上に有効なアンダーマッチ溶接を適用した場合の最大曲げ耐力について検討した。母材による塑性拘束効果を考慮した評価式を導出し、軸力の有無や載荷方向を含む多様な条件下での繰返し載荷実験を行うことにより、その妥当性を確認した。本検討の活用を通じた780 N/mm²級鋼の溶接施工負荷低減により、今後、780 N/mm²級鋼の実構造物適用のさらなる拡大を期待する。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 建築構造物用高強度780 N/mm²鋼材 (H-SA700) 鋼材規格および溶接施工要領. 2012.
- 2) 一般社団法人 日本鋼構造協会. JSSCテクニカルレポート. 2021, No.123.
- 3) 矢部喜堂ほか. 日本建築学会構造系論文集. 1994, No.459, p.153-161.
- 4) 一般社団法人日本建築学会. 鋼構造接合部設計指針 (第4版). 2021, p.108-109.
- 5) 佐藤邦彦ほか. 日本造船学会論文集. 1972, No.132, p.381-393.
- 6) 一般財団法人日本建築センター. 2018年版 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル. 2018.

(論文)

TS700 アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能

平野 公大*¹・高田 武之*²(博士(工学))・西村 有司*¹・田中 剛*³(博士(工学))

Structural Performance of Exposed Column Bases Using TS700 Anchor Bolts

Kimihiro HIRANO・Dr. Takeshi TAKADA・Yuji NISHIMURA・Dr. Tsuyoshi TANAKA

要旨

当社は基準強度490 N/mm²であるTS700アンカーボルトの国土交通大臣の認定を取得しており、大型鋼構造物の露出柱脚などへの採用実績を有している。

鋼構造建築物の露出柱脚は、一般的に「鋼構造接合部設計指針(日本建築学会)」に基づき設計される。露出柱脚に用いるアンカーボルトの指針における適用範囲は基準強度325 N/mm²までであり、TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚への現行指針の適用には個別の検討が必要である。

そこで、TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の耐力および剛性の評価式を確立することを目的とした載荷実験を行い、実験結果が既往の評価式とおおむね良い対応を示すことを確認した。

Abstract

Kobe Steel has obtained certification from the Minister of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism for its TS700 anchor bolts, which have a standard strength of 490 N/mm², and has a proven track record of using these bolts in exposed column bases in large steel structures. Exposed column bases in steel structures are generally designed on the basis of the Architectural Institute of Japan's "Recommendation for Design of Connections in Steel Structures". However, the scope of application of the guidelines for anchor bolts used in exposed column bases is limited to a standard strength of 325 N/mm². Therefore, the application of these guidelines to exposed column bases using TS700 anchor bolts requires individual consideration. To that end, load tests have been conducted to establish evaluation formulas for the strength and rigidity of exposed column bases using TS700 anchor bolts. The results of these tests have confirmed a generally favorable response to previous evaluation formulas.

検索用キーワード

アンカーボルト, 高強度, 露出柱脚, 曲げ実験, かき出し定着破壊, 接合部パネル

まえがき = 地震国である日本において、耐震設計された鋼構造建築物や鋼製機械設備架構の骨組は、柱端部に溶接されたベースプレートおよびアンカーボルトにより鉄筋コンクリート造の基礎と接合される。当該接合部は柱脚と呼ばれ、ベースプレートおよびアンカーボルトが露出した露出柱脚、柱下端部分を鉄筋コンクリートで囲んだ根巻き柱脚、柱下端部分を完全に鉄筋コンクリート基礎に埋め込んだ埋込み柱脚がある(図1)。

この中で露出柱脚は、地震時において柱からの曲げモーメントなどに対しアンカーボルトを積極的に降伏させることで地震エネルギーを吸収させる方法が最も多く用いられている。このため、アンカーボルトには高い変形性能が求められ、設計においては露出柱脚の耐力や剛性について慎重な検討が行われている。

近年、建築物や設備架構の大型化に伴い鉄骨骨組に加えアンカーボルトについても高強度化のニーズが高まっ

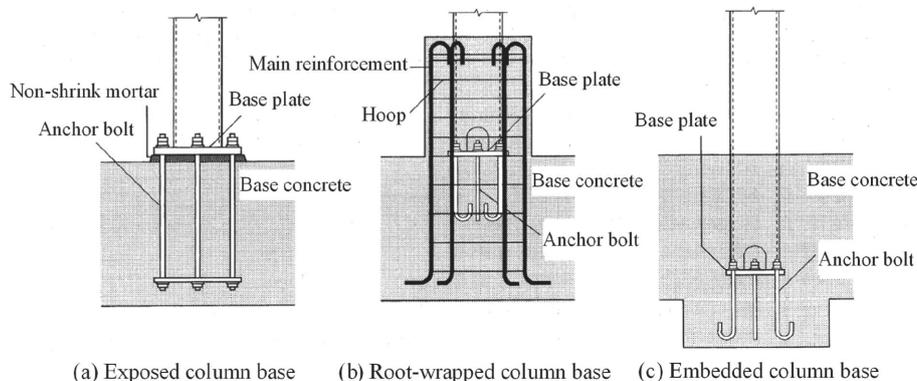


図1 柱脚¹⁾
Fig.1 Column base type¹⁾

*¹建設技術部 *²事業開発部 *³国立大学法人神戸大学 大学院工学研究科 建築学専攻

ている。当社はテックモ(株)とともに、基準強度を490 N/mm²とすることができる「建築構造用700 N/mm²アンカー用ボルト、ナット、座金のセット（以下、TS700アンカーボルト）」の国土交通大臣の認定を取得した。

いっぽう、「鋼構造接合部設計指針¹⁾」に示されている構造用アンカーボルトの材料はSNR400A、BおよびSNR490Bのみであり、高強度タイプのアンカーボルトは同指針の適用範囲外となる。

当社はTS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の耐力および剛性の評価方法を確立するため、神戸大学大学院鋼構造研究室と共同で露出柱脚の載荷実験を行った。本稿ではその実験結果および既往の算定方法との対応を報告する。

1. TS700アンカーボルトの概要

1.1 建築構造用アンカーボルトセットの概要

建築構造用アンカーボルトセットは、両端に所定のねじを設けたアンカーボルト1本、ナット4個および座金1枚で構成される（図2）。ねじの加工は切削加工および転造加工に大別され、切削加工はアンカーボルト素材のねじ部においてねじ山を削り出すように形成し、基準軸径=ねじ山部の径となる。いっぽう転造加工は、アンカーボルト素材を転造ダイス間で回転させ、ねじ山を盛り上げるような塑性加工を施すことでねじ山を形成するため、基準軸径<ねじ山部の径となり、切削ねじと比較

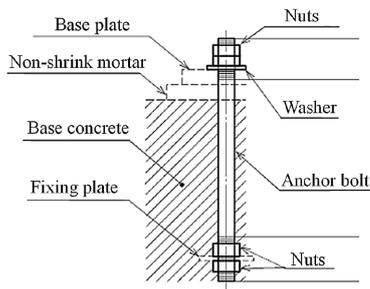


図2 アンカーボルトセットの構成
Fig.2 Configuration of anchor bolt set

し同一軸径でねじ部有効断面積を大きくとることができる（図3）。また転造ねじでは加工に伴う切粉が発生しないため素材を無駄なく使用でき環境にも優しい。

表1にJIS B 1220に規定される構造用両ねじアンカーボルトセットの構成を示す。ねじの加工について、ABMはねじを切削加工により、ABRは転造加工により製造される。ねじの呼びはABM400およびABRではM48まで、ABM490ではM100まで規格化されている。ボルトの材料について、ABM400/ABR400にはJIS G 3138で規定される建築構造用圧延棒鋼SNR400Bが、ABM490/ABR490には同SNR490Bが適用されている。

表2にボルト材料の機械的性質を、表3に建築基準法に基づくボルトの基準強度を示す。ここでABMおよびABRの基準強度は建築構造用圧延棒鋼SNR400BおよびSNR490Bの値を示す。

SNR400B/SNR490Bでは基準軸径が40 mmを超えると降伏点または0.2%耐力の値が低減され、合わせて基準強度も低減される。また降伏比はABRでは80%以下、ABMでは75%以下を規格値としている。

1.2 TS700アンカーボルトの特長

TS700アンカーボルトのセットの構成、ボルト材料の機械的性質および基準強度を同表1、2および3に示す。

TS700アンカーボルトはABRと同様に転造加工により製造されており、切削加工と比較し前節で示したような利点がある。またABRはねじの呼びがM48までしか

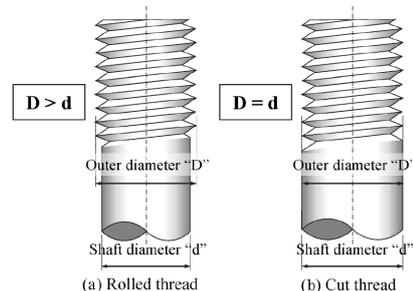


図3 転造ねじおよび切削ねじ
Fig.3 Rolled thread and cut thread

表1 アンカーボルトセットの構成
Table 1 Configuration of anchor bolt set

Type of anchor bolt set		Bolt thread processing	Nominal designation of thread	Material used	Nut	Washer
JIS B 1220 Set of anchor bolt for structures	ABM400	Cutting thread processing	M24~M48	SNR400B ^{*1)}	Vickers hardness (HV) 146~319	Vickers hardness (HV) 200~400
	ABM490		M24~M100	SNR490B ^{*1)}		
	ABR400	Rolling thread processing	M16~M48	SNR400B ^{*1)}		
	ABR490			SNR490B ^{*1)}		
TS700 anchor bolt set (MLIT Certification Number MBLT-0227)			M22~M100	KTR700 ^{*2)}	Rockwell hardness (HRC) 31 ± 5	Vickers hardness (HV) 200~300

*1) Rolled steel bars for building structures as specified in JIS G3138

*2) Special material developed by Kobe Steel, Ltd. for the TS700 anchor bolt

表2 ボルト材料の機械的性質
Table 2 Mechanical properties of bolt material

Material used	Shaft diameter (mm)	Yield or 0.2% strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)
SNR400B	≤40	235 ≤ ≤355	400 ≤ ≤510	ABM400/ABM490, ≤75 ABR400/ABR490, ≤80
	40 <	215 ≤ ≤335		
SNR490B	≤40	325 ≤ ≤445	490 ≤ ≤610	
	40 <	295 ≤ ≤415		
KTR700	20.2(M22) ≤ ≤96.0(M100)	490 ≤ ≤650	700 ≤ ≤950	≤75

表3 基準強度
Table 3 Design strength of bolt

Type of anchor bolt set			Shaft diameter (mm)	Design strength (N/mm ²)
JIS B 1220	ABM400	(SNR400B)	≤40	235 ^{*1)}
	ABR400		>40	215 ^{*1)}
Set of anchor bolt for structures	ABM490	(SNR490B)	≤40	325 ^{*1)}
	ABR490		>40	295 ^{*1)}
TS700 anchor bolt set			20.2 (M22) ≤ ≤96.0 (M100)	490

*1) Design strength of SNR400B and SNR490B based on Notification 2464 of the Building Standards Act

規格化されていないのに対し、TS700アンカーボルトはM100まで対応している。

TS700アンカーボルトの材料には当社が同ボルトのために開発した独自規格「建築構造用700 N/mm²アンカー用ボルト用鋼（以下、KTR700）」を使用している。SNR400B/SNR490Bではボルトの基準軸径が40 mmを超えると基準強度を低減する必要があるのに対し、KTR700は全ての径において基準強度を490 N/mm²としているため、ボルト径にかかわらず一定の基準強度で設計が可能である。またKTR700は降伏比75%以下を規格値としているため、降伏後の変形性能を十分に確保できる。

2. 露出柱脚の設計

2.1 柱脚の耐力

柱脚は建築物または設備架構上部から伝達される軸方向力、せん断力、曲げモーメントを基礎に確実に伝達する必要がある。鋼構造接合部設計指針¹⁾によると露出柱脚の設計において柱脚の塑性変形に期待する場合には、コーン状破壊耐力がアンカーボルトの最大引張耐力を下回らないように設計するとある。ここで、アンカーボルトの最大引張耐力については鋼構造接合部設計指針¹⁾により、コーン状破壊耐力については同指針が参考にして「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説²⁾」におけるかき出し定着破壊耐力を用いることとし、以降コーン状破壊耐力はかき出し定着破壊耐力と呼ぶ。

2.2 柱脚の剛性

柱脚の弾性剛性について、根巻き柱脚および埋込み柱脚ではコンクリートを無視した鋼断面からなる剛接柱として評価するが、露出柱脚はアンカーボルトの軸変形などを考慮し弾性回転ばねとして評価する。鉄骨骨組に水平力が作用する場合、柱脚での回転拘束度の違いによ

てとくに第一層の柱に作用する曲げモーメント分布が顕著に変化することから、露出柱脚の設計においてその弾性剛性を適切に評価することが重要である。鋼構造接合部設計指針¹⁾には露出柱脚の弾性剛性の評価方法が紹介されており、本稿においても同指針に基づき算定することとした。

2.3 適用範囲

これまで述べた各耐力・弾性剛性の評価方法はいずれも基準強度が325 N/mm²までのアンカーボルトセットを適用範囲としている。次章以降では各評価方法のTS700アンカーボルトへの適用可能性について実験的に確認した結果を述べる。

3. 実験計画

3.1 試験体

実験では逆T字型の中柱試験体を4体、L字型の外柱試験体を2体の計6体を用意した。表4に実験パラメータおよび各耐力計算値 ${}_aQ_p$ 、 ${}_LQ_u$ の一覧を、図4に試験体形状を示す。ここで、 ${}_aQ_p$ 、 ${}_LQ_u$ はそれぞれ柱脚の全塑性曲げモーメントおよびコンクリート基礎のかき出し定着破壊耐力によって決定する柱せん断力の値を示す。なお、表4に示す耐力の計算における材料強度には、鋼材、コンクリートともに規格値を用いた。

今回の実験において、アンカーボルト強度による比較を行うため、アンカーボルト降伏に先行してコンクリート基礎のかき出し定着破壊が生じてはならない。よって、I-A-375、I-T-375、およびO-A-450、O-T-450はそれぞれかき出し定着破壊耐力が露出柱脚の全塑性曲げ耐力を上回るよう、アンカーボルトの埋込み長さを決定した。また中柱形式においてはかき出し定着破壊の挙動も確認するため、同耐力と露出柱脚の全塑性曲げ耐力が同等となるよう埋込み長さを短くした試験体も2体用意した。

かき出し定着破壊耐力 T はコンクリートの寄与分 T_c と

補強筋の寄与分 T_w の和で式 (1) のように表される²⁾。

$$T = k_n(T_c + T_w) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k_n は柱圧縮応力度の効果を表す係数であり、本実験では柱軸力を考慮しないため、 $k_n=1$ とする。

本稿では、アンカーボルトの埋込み長さを定着長さと考え、式 (1) によりかき出し定着破壊耐力 T を算定し、その時の柱せん断力 ${}_LQ_u$ を求めた。

表 5 に各材料の機械的性質を示す。アンカーボルトには、KTR700 (M22) および SNR490B (M27) を使用し

表 4 試験体一覧

Table 4 List of test specimen

Specimen	Column type	Anchor bolt type	Bolt shaft diameter (mm)	Embedded length of bolt L_a (mm)	Fully plastic bending strength of column base ${}_aQ_p$ (kN)	Anchorage strength ${}_LQ_u$ (kN)
I-A-375	Inner column	ABR490	24.9	375	183	302
I-T-375		TS700	20.2		182	
I-A-250		ABR490	24.9	250	183	195
I-T-250		TS700	20.2		182	
O-A-450	Outer column	ABR490	25.1	450	186	374
O-T-450		TS700	20.4		186	

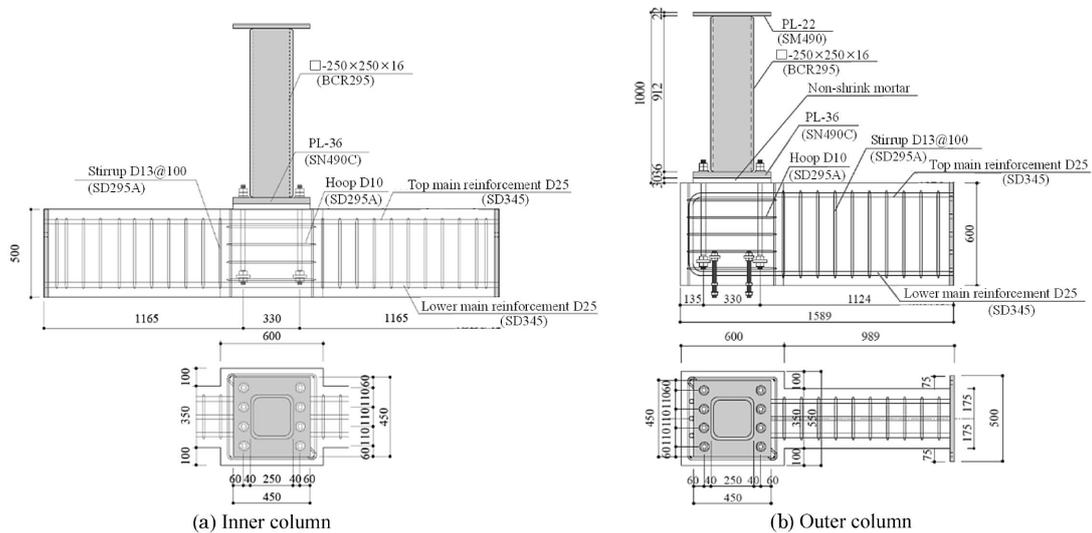


図 4 試験体形状

Fig. 4 Overview of test specimen

表 5 材料の機械的性質

Table 5 Mechanical properties of materials

(a) Inner column

Anchor bolt			
Steel type	Nominal diameter	T_p (kN)	T_u (kN)
SNR490B	M27	185	256
KTR700	M22	183	266

Reinforcement				Concrete
Steel type	Nominal diameter	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)
SD345	D25	373	552	40.0
SD295A	D13	336	465	
	D10	346	489	

(b) Outer column

Anchor bolt			
Steel type	Nominal diameter	T_p (kN)	T_u (kN)
SNR490B	M27	176	252
KTR700	M22	177	261

Reinforcement				Concrete
Steel type	Nominal diameter	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)
SD345	D25	371	565	36.6
SD295A	D13	340	487	
	D10	332	467	

T_p : Yielding axial force T_u : Tensile axial force
 σ_y : Yield strength σ_u : Tensile strength σ_B : compressive stress

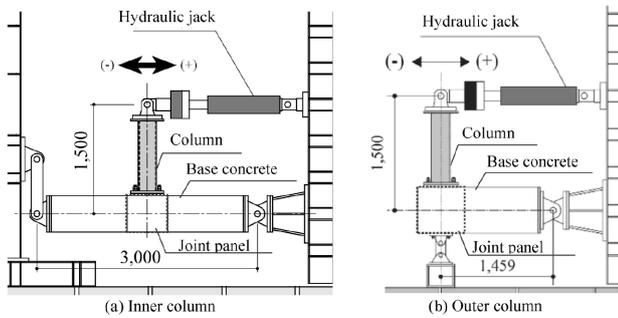


図5 荷重方法
Fig.5 Loading method

た。なお、アンカーボルト軸径はおおのこの降伏軸力 T_p および引張軸力 T_u が概ね同一となるよう決定した。

3.2 荷重方法

図5に示すように柱上端に取り付けた油圧ジャッキにより水平方向に正負交番の漸増繰返し荷重を行った。荷重履歴は層間変形角 $R=1/400$ rad, $1/200$ rad, $1/100$ rad, $2/100$ rad, $3/100$ rad, $4/100$ rad を正負各2回ずつ荷重し、その後、正方向に $R=1/10$ rad まで単調荷重した。

4. 実験結果と考察

4.1 破壊状況および最大耐力

図6に各試験体の破壊状況を、図7に荷重-層間変形関係を示す。なお、図7中の破線はアンカーボルトの降伏により決定する露出柱脚の全塑性曲げ耐力の計算値 ${}_aQ_p$ を、○印は最大荷重を示す。

中柱形式、外柱形式いずれもアンカーボルト強度による破壊性状および最大荷重の大きな差異は見られなかった。

埋込み長さが大きい中柱試験体 I-A-375, I-T-375 および外柱試験体 O-A-450, O-T-450 はいずれも $R=1/200 \sim 1/100$ rad で接合部パネル（図6中の破線で囲われた部分）に斜めひび割れが発生したが、その後も荷重は増加し続けた。その後中柱試験体は $R=1/100$ rad の変形時にアンカーボルト降伏した後、最終的には接合部パネルのせん断破壊に至った。外柱試験体は正荷重時に試験体の下部コンクリートに破壊が生じた。これは図8に示すように、本実験の正荷重時では接合部に鉛直方向の引張軸力が導入され、接合部パネルの斜めひび割れの進展に伴い、引張軸力に抵抗できなくなったためである。

アンカーボルトの埋込み長さが小さい中柱試験体 I-A-250, I-T-250 では $R=1/200$ rad で接合部パネルに斜めひび割れが生じた。その後、パネルのひび割れが梁上側へと伸展し、かき出し定着破壊に至った。

中柱試験体において、I-A-375, I-T-375 では最大荷重が ${}_aQ_p$ を上回り、I-A-250, I-T-250 では最大荷重が ${}_aQ_p$ をやや下回る。外柱試験体においては、いずれも正荷重側では最大耐力が ${}_aQ_p$ を上回っている。

埋込み長さの小さい I-A-250, I-T-250 では、最大荷重到達後の繰返し荷重において、荷重が顕著に低下している。これは、コンクリート基礎のかき出し定着破壊により、アンカーボルトの引抜きに対する抵抗力を失ったた

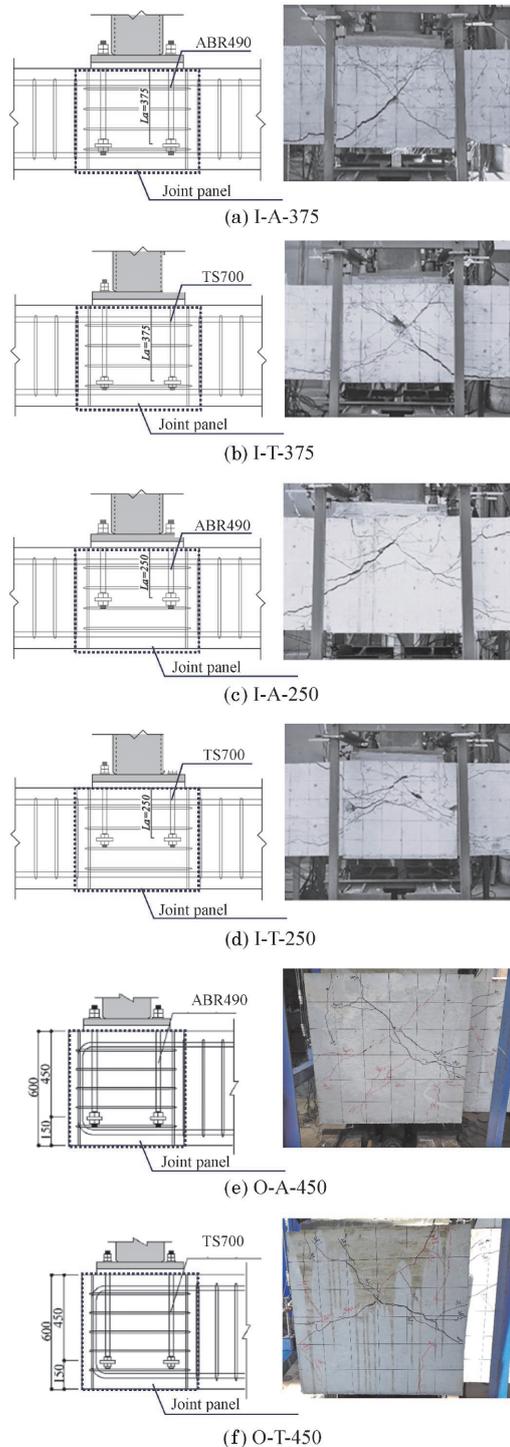


図6 破壊状況
Fig.6 Destruction status

めと考えられる。

4.2 柱脚の弾性剛性

図9に各試験体の柱せん断力 Q と層間変形角のベースプレート回転成分 R_{bp} の関係を示す。図中の破線は露出柱脚の弾性剛性の計算値 K_{BS} およびアンカーボルトの降伏により決定する露出柱脚の全塑性曲げ耐力の計算値 ${}_aQ_p$ を示す。また図中の○印は接合部パネルのせん断ひび割れ発生点を示す。

鋼構造接合部設計指針¹⁾によると、露出柱脚の弾性剛性 K_{BS} は式(2)による。

$$K_{BS} = E \cdot n_f / A_b (d_f + d_c)^2 / 2l_b \dots\dots\dots (2)$$

- E : アンカーボルトのヤング係数
- n_t : 引張側アンカーボルト本数
- A_b : アンカーボルト軸部断面積
- d_t : 柱断面図芯より引張側アンカーボルト群図芯までの距離
- d_c : 柱断面図芯より圧縮側柱フランジ外縁までの距離
- l_b : アンカーボルトの長さ (図10参照)

接合部パネルのせん断ひび割れ発生点までの荷重-変形関係の履歴と露出柱脚の弾性剛性の計算値 K_{BS} とを比較すると、いずれの試験体においても計算値は実験値を安全側に評価しており、とくに外柱試験体ではそれが顕著である。よって、本実験の範囲では、TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚においても、弾性剛性は鋼構造接合部設計指針¹⁾に基づいた設計式により安全側に評価することができる。

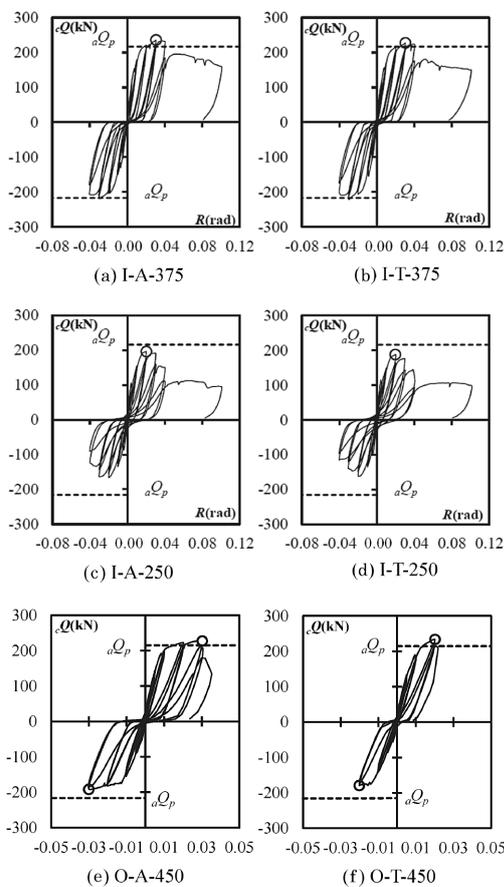


図7 荷重-層間変形角関係

Fig.7 Relationship between load and story deformation angle

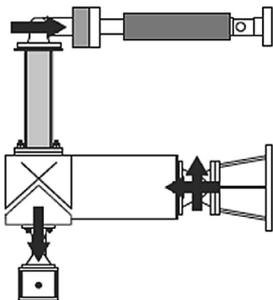


図8 柱脚下部コンクリートの破壊例

Fig.8 Example of destruction of concrete at the bottom of column base

5. 柱脚の耐力評価

5.1 終局耐力の評価式

本章では、正載荷側の最大荷重時における柱せん断力 cQ_{ue} に対して耐力評価を試みる。

アンカーボルト降伏による露出柱脚の全塑性曲げ耐力 aQ_p およびかき出し定着破壊によって決定する耐力 LQ_u 、接合部のせん断破壊によって決定する耐力 Q_u を算定し、実験値との比較を行った。なお、本計算における材料強度には材料試験に基づき得られた値を用いた。

中柱形式の露出柱脚接合部は、アンカーボルトを機械式定着とした梁主筋とみなすと、RC造におけるT形接合部を90°回転させた形状と同じものになり、また外柱形式の場合も同様に、RC造のL形接合部を90°回転させたものと同じ形状となる。既往の研究^{3), 4)}では、梁主筋を機械式定着としたT形接合部の終局せん断耐力は、定着長さ、梁の上下主筋の中心間距離および接合部の有

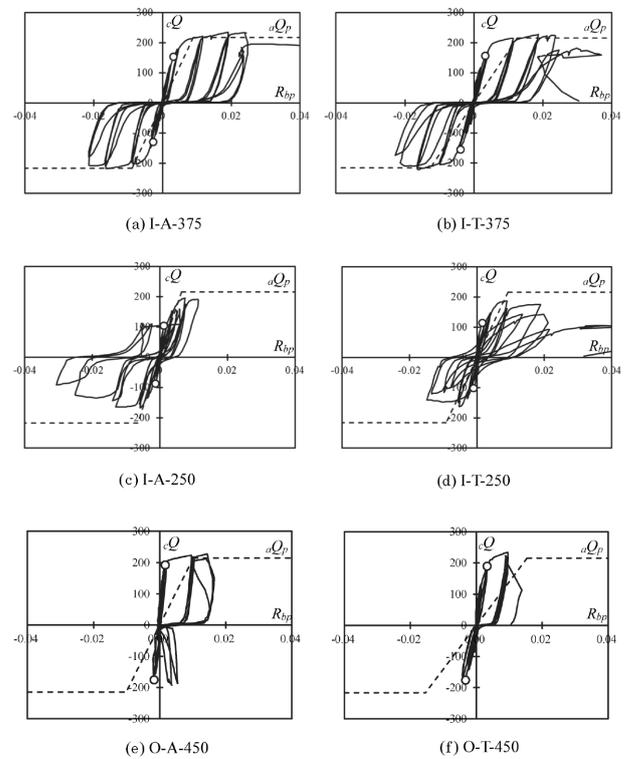


図9 荷重-ベースプレート回転角関係

Fig.9 Relationship between load and base plate rotation angle

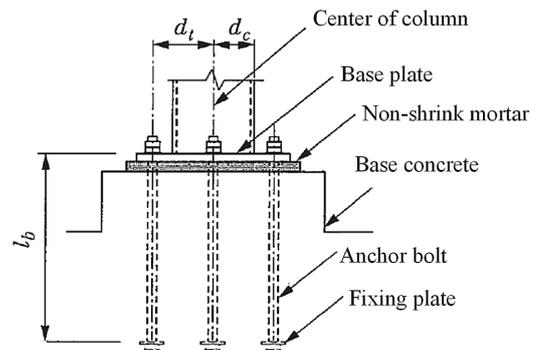


図10 柱脚関係寸法図¹⁾

Fig.10 Column base dimensions¹⁾

効幅を用いて鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説²⁾に基づき算定できることが示されている。そこで、本稿ではアンカーボルトの埋込み長さを定着長さと考え、式(3)により接合部せん断耐力 jV_u を算定し、その時の柱せん断力 jQ_u を求めた。

$$jV_u = \kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot L_a \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 κ ：接合部の形状による係数（ト形接合部： $\kappa=0.7$ 、L形接合部：正載荷時 $\kappa=0.6$ 負載荷時 $\kappa=0.4$ ）⁴⁾

ϕ ：直交梁の有無による補正係数（ $\phi=0.85$ ）

F_j ：接合部せん断強度の基準値； $F_j=0.8\sigma_B^{0.7}$

b_j ：接合部有効幅

L_a ：アンカーボルトの埋込み長さ

表6にそれぞれの耐力評価式の計算値を、図11に実

表6 各耐力の計算値一覧
Table 6 List of calculated values for each strength

Specimen	Maximum Load cQ_{uc} (kN)	Fully plastic bending strength of column base aQ_p (kN)	Anchorage strength iQ_a (kN)	Shear fracture strength of joint panels jQ_u (kN)
I-A-375	236	218	375	281
I-T-375	227	217	375	281
I-A-250	196	217	211	187
I-T-250	187	217	211	187
O-A-450	228	215	354	189
O-T-450	234	216	354	189

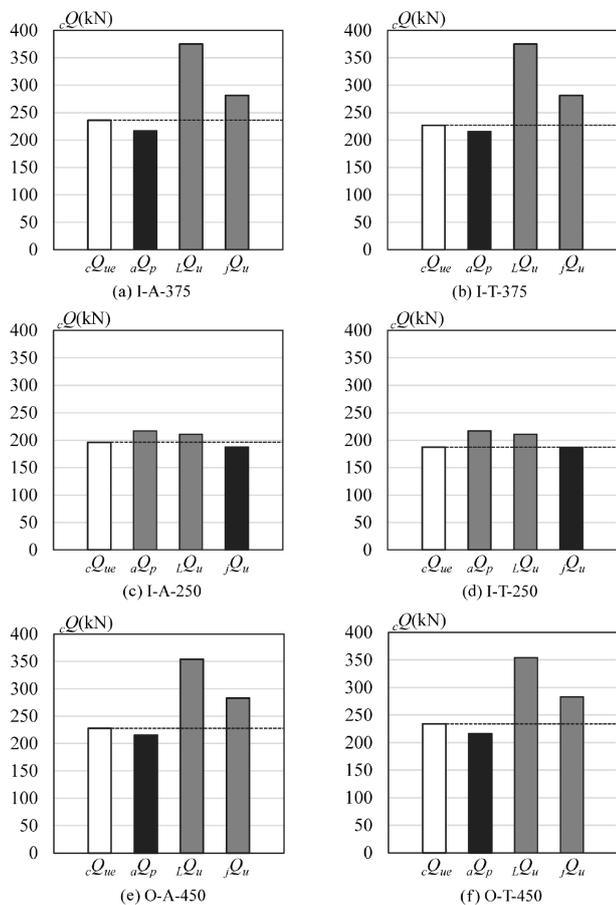


図11 実験値と各耐力評価式との比較

Fig.11 Comparison of experimental values with each strength evaluation formula

験値 cQ_{uc} と各計算値との比較を示す。

中柱形式および外柱形式いずれの試験体も、実験値は露出柱脚の全塑性曲げ耐力 aQ_p の値と良い対応を示す。

埋込み長さの大きい中柱試験体I-A-375, I-T-375および外柱試験体O-A-450, O-T-450において、各耐力の計算値は露出柱脚の全塑性曲げ耐力の値が最も小さく、接合部パネルのせん断耐力、かき出し定着破壊耐力の順に大きくなる。これらの試験体はアンカーボルトの降伏が先行した後、最大荷重に到達し、最終的には接合部パネルがせん断破壊した。接合部パネルのせん断耐力および基礎コンクリートのかき出し定着破壊耐力に余裕があったため、 $R=4/100$ radまで荷重低下が小さかったと考えられる。

埋込み長さが比較的小さい中柱試験体I-A-250, I-T-250においては、各耐力の計算値は接合部パネルのせん断耐力が最も小さく、露出柱脚の全塑性曲げ耐力とかき出し定着破壊耐力がほぼ等しい値となっている。これらの試験体はアンカーボルトが降伏した後、最大荷重に到達し、最終的には基礎コンクリートのかき出し定着破壊が生じた。接合部パネルのせん断耐力およびかき出し定着破壊耐力が小さいため、 $R=3/100$ rad以降の荷重において、荷重低下が著しくなったと考えられる。

むすび = TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の実験的研究の結果、得られた知見を以下に述べる。

①露出柱脚の荷重実験において、ABR490を用いた試験体とTS700アンカーボルトを用いた試験体はおおむね同様の挙動を示した。すなわちアンカーボルトの基準強度を 325 N/mm^2 から 490 N/mm^2 に増加させても柱脚の全塑性曲げ耐力が同程度ならば、各試験体の破壊性状および最大荷重に与える影響は小さい。

②本実験において、露出柱脚の全塑性曲げ耐力は鋼構造接合部設計指針¹⁾に、かき出し定着破壊耐力は鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説²⁾に基づいて算定したが、実験結果は評価式とよい対応を示す。また、露出柱脚の弾性剛性は鋼構造接合部設計指針¹⁾に基づいて算定したが、試験体のアンカーボルト強度および埋込み長さにかかわらず、実験の荷重履歴から読み取れる剛性を十分に安全側に評価する。

謝辞

本実験のアンカーボルトの製作についてはテックモ(株)の協力を賜りました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会. 鋼構造接合部設計指針. 2021-02.
- 2) 日本建築学会. 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説. 1999-08-01.
- 3) 益尾 潔ほか. 日本建築学会構造系論文集. 2005, 70巻, 第590号, pp.87-94.
- 4) 建築構造技術支援機構. SABTEC機械式定着工法設計指針. 2014-06.

(解説)

建築鉄骨梁溶接向けの新しい自動化システムとCADデータ 関係ソフトウェアの紹介

鹿 勇気*1・藤本泰成*1・浅野 涼*1・新井敦士*1・田中伸明*2

Introducing New Automation System and CAD-Linked Software for Architectural Steel Frame Beam Welding

Yuki SHIKA・Taisei FUJIMOTO・Ryo ASANO・Atsushi ARAI・Nobuaki TANAKA

要旨

鉄骨ファブリケータでは技能者不足や生産性向上の課題に直面しており、これを解決するための自動化が求められている。当社は、梁溶接を対象とし鉄骨設計CADデータと連携するソフトウェアと本溶接の前工程である組立工程を自動化するシステムを開発した。このソフトウェアは鉄骨設計CADデータからシステムの動作プログラムを自動生成することができる。組立工程を自動化するシステムは、鉄骨梁や柱における様々な形状の自動組立および溶接への対応が可能である。これにより、工程自動化による脱技能化や製品の組立精度向上が図られるとともに高品質な溶接を実現でき、鉄骨ファブリケータの課題解決に貢献する。

Abstract

Steel frame fabricators are facing challenges such as shortages of skilled workers and the need to improve productivity, driving demand for automation solutions. Kobe Steel has developed beam welding software that integrates with steel frame design CAD data and has also created a system that automates the assembly process, which is the process before beam welding. The developed software automatically generates operating programs for the system directly from the CAD data of the frame design. The automated assembly system supports a wide variety of beam and column shapes, enabling automated assembly and welding. This facilitates deskilling and improved assembly precision, while also achieving high-quality welding, which helps resolve the challenges faced by steel frame fabricators.

検索用キーワード

溶接ロボットシステム、建築鉄骨、自動化、CAD関係、部材認識、ポジショナ、組立溶接

まえがき＝足元、国土交通省の建築着工統計から算定した2024年度の推定鉄骨需要量は365万トンと2年連続の400万トン割れとなった¹⁾。首都圏再開発などの大型案件はあるものの、人手不足による工事見直しや資材高騰などの影響もあり鉄骨需要量は低位である²⁾。

そのような中においても、鉄骨ファブリケータでは、生産性向上や製品品質向上、そして近年深刻化する人手不足への対応のため、溶接に限らずあらゆる工程を自動化する必要に迫られている。とくに鉄骨梁は、鉄骨柱と比較して自動化の進展が遅れており、そのことが新たな課題として顕在化してきている。

本稿では、CADデータと連携して溶接情報を自動作成するソフトウェア「SMART TEACHINGTM注1)と、本溶接前の組立工程を自動化する「鉄骨梁自動組立溶接システム」について紹介する。

1. 開発の背景

建築鉄骨向け溶接の自動化は、これまで溶接時間が長く、アーク発生率の高いコラム構造の部材への適用が中心であり、鉄骨柱が主な対象となっていた。しかし、現

在では作業者の高齢化が進行しており、今後さらに鉄骨ファブリケータにおける人手不足が懸念される。さらに、2024年からは労働時間の上限規制が適用され、従来の生産能力を維持することも難しくなっている³⁾。

こうした背景から、鉄骨ファブリケータでは、これまで人手に依存していた作業領域においても、自動化の導入が一層進むと見込まれている。溶接作業においても、溶接ロボットによる適用部材の拡大により、人手不足を補いながら、高品質な溶接作業を安定して行うことが可能となる。とくに鉄骨梁は、鉄骨柱と比較して溶接時間が短いにもかかわらず、部品形状の多様性や自動化の難易度の高さといった要因から、溶接の自動化が進みにくい状況にあった。そのため、近年では鉄骨梁向けの溶接自動化システムに対する需要が高まっている。

さらに、建設業界ではデジタルトランスフォーメーション(DX)を推進しており、生産性の向上を目的に建築物の3Dモデルを活用したBIM(Building Information Modeling)の導入が進められている。BIMの概念を持つ鉄骨設計CADの導入により、設計から施工までの一貫したデータ管理が可能となり、各工程でのミス低減や業務の効率化が期待される。

また海外では、国内と同様に人手不足が発生してお

脚注1) SMART TEACHINGは当社の登録商標である。

*1 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部 *2 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部 (現 溶接事業部門 企画管理部)

り、とくに北米では溶接工の深刻な不足に加えて人件費も比較的高いことから、今まで進んでいなかった組立・溶接工程の自動化が進みつつある。北米を含む海外では地震が少ないこともあり、高層ビルの柱であっても日本で使われているコラムやパイプ構造・SRC構造でなく、梁と同じくH型構造の柱が多く採用されているため、H形鋼向けの自動化システムを広く適用できる。

これらの背景から、鉄骨設計CADデータと連携するSMART TEACHING™と、鉄骨梁自動組立溶接システムを開発した。これにより、施工の効率化と品質の向上が図られ、システムを導入した鉄骨ファブリケータにおける生産性の向上および競争力の強化が見込まれる。

2. 組立溶接施工における課題と、開発したシステムおよびソフトウェアの概要

鉄骨構造では、H形鋼やコラム形鋼の梁・柱といった主材には、様々な部材が取り付けられる。これらの部材は、主材の補強や主材同士および床などの構造物との接合を目的として配置される。図1に従来の組立工程の概略を示す。部材の組立工程では、作業者が図面から各部材の取り付け位置を読み取り、指定の位置に部材を位置合わせして組立溶接を行っているが、多くの課題がある。まず、図面から正確に寸法を読み取り、指定の位置に部材を位置合わせする工程は高度な技能が必要であり、これにより作業できる人員の確保が困難になっている。またこの工程は、熟練作業者が行っても時間がかかり、作業効率の面で改善の余地がある。製品の品質面では、作業者の技能に依存するため、溶接品質にばらつきが生じる可能性がある。さらに、寸法の読み取り間違いや位置合わせの精度が低い場合、本溶接時や建設現場で

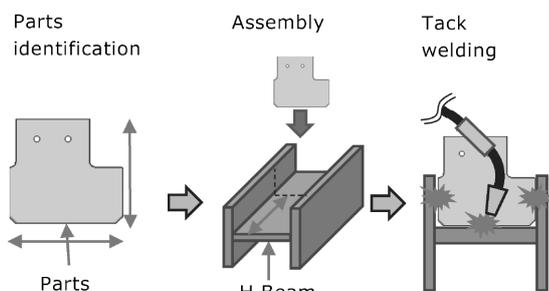


図1 組立工程の概略
Fig.1 Assembly process

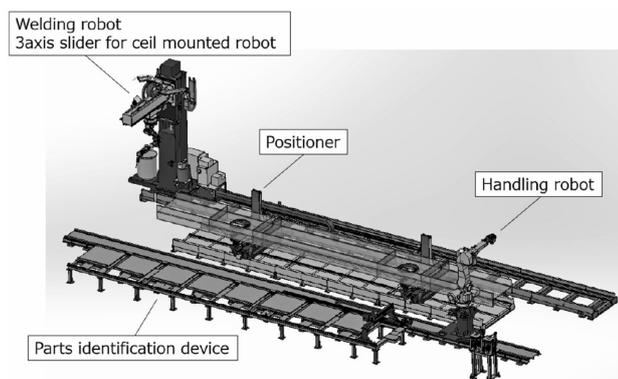


図2 鉄骨梁自動組立溶接システム
Fig.2 Structural steel beam auto assembly welding system

の組立実施時に手直しの発生など悪影響を及ぼすことが懸念される。

これらの課題解決を目的に開発されたのが本システムである。システムの外観を図2に示す。本システムは、部材識別装置、ハンドリングロボットおよびその移動装置、反転式ポジショナ、溶接ロボットおよびその移動装置によって構成される。また鉄骨設計CADと連携するソフトウェア「SMART TEACHING™」をインストールしたPCを含む。

本システムでの作業および動作の流れと各装置の役割は以下のとおりである。まず作業者が、SMART TEACHING™によりCADデータから組立溶接に必要な情報を作成し、各装置に入力する。その後作業者は、反転式ポジショナへの主材搭載と部材識別装置への部材の配置を行い、自動運転を開始する。自動運転中、部材識別装置が部材の形状判定を行い、部材の組立可否判定や位置認識を行う。そして、部材を把持するツールを備えたハンドリングロボットが部材識別装置から部材を取り出し、各部材の位置決め位置まで移動して反転式ポジショナ上の主材に部材を位置決めする。ハンドリングロボットはツール交換機能を備えており、様々な形状の部材に対応可能である。ハンドリングロボットによる部材の位置決め完了後、溶接ロボットにより組立溶接を行う。前述の部材識別、部材位置決め、組立溶接を繰り返すことで部材の組立を行っていく。主材の裏側など別の面に組立を行う場合は、反転式ポジショナにより主材の姿勢変更を行う。これらの動作による部材組立の完了後、溶接ロボットと反転式ポジショナにより本溶接が行われる。

本システムの特長は、鉄骨設計CADデータを基に、組立工程と本溶接工程の溶接データやシステム動作プログラムを自動で作成し、工程を自動化できることである。次章以降において、SMART TEACHING™およびそれぞれの装置の詳細について述べる。

3. CAD関係ソフトウェアSMART TEACHING™の特長と運用について

従来の鉄骨溶接システムにおいては、オペレータがワーク寸法や溶接情報を図面から抽出、また必要に応じワークの実測を行い、システムのソフトウェアに手作業で入力を行う。これに対し、SMART TEACHING™では鉄骨設計CADデータと連携する機能を備え、CADデータから組立・溶接に必要な情報を自動で取得する。これにより、オペレータの入力作業の省略に加え、入力ミス防止にもつながる。SMART TEACHING™は事務所と現場でそれぞれ運用する。

事務所での運用を図3に示す。事務所においては、まずは取り付ける部材やシステムの稼働時間などを考慮し、自動化の範囲を判断する。システムで組立・溶接を行うと判断した場合、建物一棟分の情報を含んだCADデータであるIFCファイルを読み込ませることで、SMART TEACHING™が溶接対象の主材ごとにSTファイルを自動生成する。STファイルとは当社独自のフ

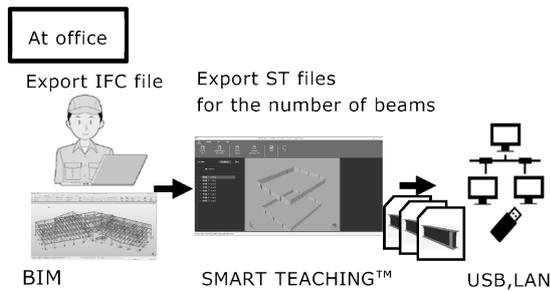


図3 事務所でのCAD連係ソフトウェアの運用
Fig.3 Operation of SMART TEACHING™ software in the office

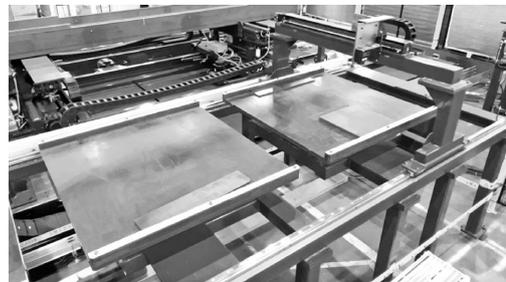


図5 部材識別装置
Fig.5 Parts identification device

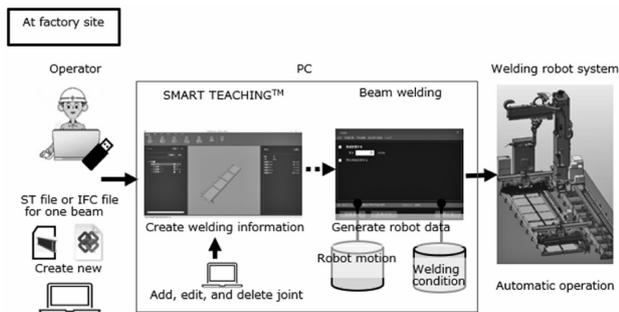


図4 現場でのCAD連係ソフトの運用
Fig.4 Operation of SMART TEACHING™ software at factory site



図6 反転式ポジショナ
Fig.6 Positioner

ファイルであり、一本の主材と溶接対象部材の寸法情報が含まれたXML形式のファイルである。またSTファイルが用意できない場合は、BIMソフトウェアから主材一本分の設計情報をIFCファイルとして書き出すことでも対応できる。このように作成したSTファイルやIFCファイルをUSBあるいはLAN経由で現場PCに送り、事務所での事前準備が完了する。

つぎに、現場での運用を図4に示す。現場では事務所で作成した主材一本分のSTファイルまたはIFCファイルをSMART TEACHING™に読み込ませると、主材のビューワとともに主材番号や部材サイズ・形状、脚長や溶接残し長さなどの溶接情報が現場PCの画面上で確認でき、実ワークとの比較が可能である。必要に応じて部材の追加・削除・編集も可能である。このように、現場で実物とシステム上のデータを照合することで、溶接ミスや認識違いによる機器の破損を未然に防ぐことができる。オペレータは問題ないことを確認した後、生成した動作プログラムを溶接ロボットに送信し、自動溶接を開始する。

4. 鉄骨梁自動組立溶接システムの各装置の特長

組立の自動化を目的として新たに開発したアイテム、技術を以下に紹介する。

部材の自動組立において、様々な形状の部材やその取付方法に対応するため、ハンドリングロボット用に複数のハンドリングツールを開発した。一つは、スチフナーやガセットプレートを把持するマグネット吸着式のツール、もう一つは直動機構や近接センサなどを駆使し、貫通穴を補強する大小様々なリング部材の把持が可能ツールである。

部材識別装置(図5)は、部材を並べるパレット部と、

部材形状を計測する機構で構成されている。計測機構にはプロファイルセンサと呼ばれる計測器が備わっており、対象物の高さを3次元的に計測でき、その計測分解能は0.1 mmである。このセンサをスライド機構を持った門型装置に搭載し、パレット上を高精度に移動させることで、部材の厚みも含めた形状データを取得する。取得した正確な形状データにより、主材への組立可否判断や、部材を把持するためのハンドリングロボットの位置決め位置の算出を行っており、総合誤差±1.0 mmの位置決めを達成している。

本システムでは、溶接ロボットの移動装置と、ワーク搭載用のポジショナについても開発を行った。移動装置は3軸動作が可能な天吊型を採用している。トーチケーブルをロボット旋回部に内蔵することで、装置やワークとの干渉を減らし適用性を向上した。溶接品質を確保するためには、溶接ロボットのウィービング精度が大切であるが、その精度確保を実現した。

ポジショナは最大8 tのH形鋼ワークを搭載できる反転式ポジショナ(図6)を開発した。反転式ポジショナは、油圧駆動の二対のアームを連動させて主材を反転させる。適用可能な梁成(はりせい)は最大1,200 mmであり、当社従来製品のリング式ポジショナの最大1,000 mmよりも大きなサイズのワークも搭載可能とした。また、反転式ポジショナの最大の特長として適用性が高いことが挙げられる。従来のコラム柱・丸パイプの搭載を主とするリング式ポジショナでは、ワークをリング機構で把持するため、把持部の溶接ロボットとの干渉により、最大で主材の4,400 mm範囲で組立・溶接残しが発生してしまう。残し部分をロボットで行うためには、主材をずらして載せ替えることが必要となる。これに対し、反転式ポジショナは主材を下から支持する構造を採用しており、主材把持機構との干渉によって生じていた

部材の適用除外という課題を解決した。下から支持する構造としたため、主材を把持する作業も無くなり、省力化および生産効率向上にも貢献している。いっぽう、この反転方式で課題となるのは主材を反転する動作が従来のリング式ポジションナに比べ時間がかかることである。二対の油圧駆動のアームを同期し、重量物を支えながら反転を行うため、ワークが落下しないよう速度を制限して慎重に動作させる必要があった。この課題に対し、当社の反転式ポジションナは、油圧センサによる負荷監視と油の流量制御を行い、ワークの重量を十分支えつつアームの動作速度を上げる制御方法を開発し、反転時間の約2割削減を実現した。

5. 組立溶接施工による施工対象の拡大

当社はこれまで本溶接の能率向上、品質向上を目指し溶接施工技術の開発に取り組んできた。本システムの開発においては、本溶接とは施工技術が異なる組立溶接のロボット施工にも取り組み、技術を確立した。

梁に溶接される部材は多品種で、サイズや形状も多様である。それらに対し、様々な組立溶接技術を確立した。組立溶接においても、水平溶接姿勢に加え、立向き溶接姿勢でもJASS6で指定されている脚長やビード長さを満たした組立溶接を実現した(図7(a), 図7(b))。さらに、本システムでは反転式ポジションナと天吊型移動装置を組み合わせることで、当社従来製品ではこれまで対応できていなかったOSリング^{注2)}のようなリング部

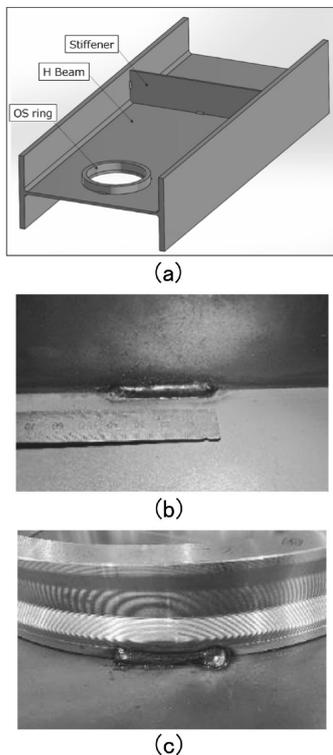


図7 組立溶接の外観 (a) ワークの3Dモデル, (b) ウェブとスチフナー組立溶接, (c) OSリングとウェブ組立溶接

Fig.7 Appearance of welded assembly (a) Sample 3D model, (b) Web and stiffener assembly welding, (c) OS ring and web assembly welding

脚注2) OSリングは岡部㈱の登録商標である。

脚注3) FAMILIARCは当社の登録商標である。

材の溶接も可能となった(図7(a), 図7(c))。

6. システムの導入効果

本システムは、国内で自動化が進んでいない鉄骨梁組立工程を含めた自動化を実現し、鉄骨ファブリケータの様々な課題の解決が期待される。

まず、人手不足の解消と生産性の向上が挙げられる。ロボットによる自動化により、組立工程の省人化が図られ、人手不足を緩和する。また、自動化により組立作業や溶接技術の技能レス化が進むことで、熟練工不足の課題も解決される。さらに、自動化システムは24時間稼働可能となるため、生産性が大幅に向上する。

つぎに、製造品質の向上である。ロボット化により組立作業や溶接作業について高度な技術を持つ熟練工がいなくても高品質な製品製造が可能となる。加えてCADデータと連携したことにより、オペレータの入力作業による製作ミスが減少し、歩留まり向上も期待できる。

本システムにおいて推奨されるFAMILIARC^{TM注3)} MX-Z200MPを使用することでより良好なスラグ密着性と光沢のあるビードが得られ、梁溶接に多いすみ肉溶接に対して品質の高い継ぎ手を得ることができる。また、後工程の作業面では発生するスパッタの量が減少するため、清掃や仕上げ作業の手間が省け、作業時間の短縮によるコスト削減も期待できる。

最後に、安全性や作業環境の向上である。大型の製品へ部材を取り付ける場合でもクレーンレスでの製造が可能となり、作業環境が安全に保たれる。作業者の安全が確保されることで事故のリスクは低減する。ロボットによる自動化が進むことで、作業者の負担を軽減することが可能となる。

本システムの導入により、鉄骨ファブリケータが抱える人手不足や生産性向上の課題を解決することが可能となる。省力化、省人化、安全作業、製作期間の短縮、技能レス化、そしてCAD連携による一貫したプロセスの実現により、効率的で高品質な製作を実現する。本システムの導入により、企業の競争力が向上し、持続的な成長が期待できる。

むすび=本稿では、SMART TEACHINGTMおよび鉄骨梁組立溶接システムの技術・特長について紹介した。現在は、適用可能部材の拡大や主材や部材の搬送自動化などに取り組んでおり、さらなる適用率拡大や溶接前工程自動化を実現する。

今後も、溶接技術向上や溶接前後工程の自動化技術開発により、ユーザの自動化ニーズを満たす商品を開発していく所存である。

参考文献

- 1) 株式会社鋼構造出版. TOPICS記事詳細.
<https://www.kokozo.co.jp/pickup/11639/>. (参照2025-05-12).
- 2) 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 2025年度の鉄鋼需要見通し.
<https://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/2025tekkoujyuyoumitoshi.pdf>. (参照2025-07-07).
- 3) 池田雄一ほか. 大林組技術研究所報. 2023, No.87.

(技術資料)

建築現場における横向柱継自動溶接の新制御方法

鈴木将史*1・河田純一*1・川崎博文*2・石崎圭人*1

New Control Method of Automatic Horizontal Column Joint Welding at Construction Sites

Masafumi SUZUKI・Junichi KAWATA・Hirofumi KAWASAKI・Keito ISHIZAKI

要旨

建築現場では将来的な人手不足が懸念されており、現場溶接の自動化ニーズは高く、大手建設会社らを筆頭に自動化技術の開発が進められている。小型可搬型溶接ロボットはその特徴から、現場溶接でも適用が広がっており、角形鋼管柱の突合せ溶接では専用のレールを用いて自動溶接を行う。しかし、板厚やコーナ部の曲率半径が異なる角形鋼管柱への適用は、ビード形状の不整や融合不良欠陥の発生といった溶接品質の課題がある。また、専用レールの設置に要する作業時間の増加も人手不足の観点で課題となっている。本稿では、これらの課題を解決することを目的として開発したロボットの新しい制御方法と周辺機器について紹介する。実験室での検討後、実際の建築現場へ適用し、これらの課題解決に効果的であることを確認した。

Abstract

Concerns over future labor shortages at construction sites have heightened the need for automation in on-site welding, with development efforts being spearheaded by major general contractors. Thanks to their unique features, compact, portable welding robots are increasingly being applied to on-site welding tasks, including automatic welding on dedicated rails for butt joint welding of square steel pipe columns. However, when applied to square steel pipe columns with varying plate thicknesses and corner radii, challenges arise in welding quality, such as irregular bead shapes and incomplete fusion defects. Additionally, the labor-intensive installation of special rails contributes to longer work times, exacerbating labor shortages. This paper introduces a new robot control method and peripheral equipment developed to address these issues. Laboratory studies, followed by field application on actual construction sites, have confirmed the effectiveness of this solution in overcoming the challenges faced during welding operations.

検索用キーワード

建築現場, 横向柱継溶接, 小型可搬型溶接ロボット, 自動化, ソリッドワイヤ, トーチ角補正, 速度制御

まえがき = 溶接を取り巻く環境は、少子高齢化、若年層の入職率低下に加え、政府が推進している働き方改革の影響を受けて大きく変化しており、その結果、溶接工不足が大きな社会課題となっている。建設業の溶接においても同様であり、とくに現場溶接では、溶接技能者の確保が年々難しくなっており、技能継承の遅れや溶接部の品質安定性の低下が懸念されている。そのため、現場溶接ではロボット適用による能率化、省力化、品質安定化が検討されている。なかでも冷間成形角形鋼管（以下、コラムという）の周囲に、曲率のついたロボット走行用のガイドレール（以下、レールという）を設置し、小型可搬型溶接ロボットを用いた柱継自動溶接を行う例がある¹⁾。いっぽう、当社の検討では、レールの曲率中心と、コラムの曲率中心が異なる非同心条件では溶接品質が確保できない場合があることを確認しており、その課題解決に取り組んだ。

1. 現場柱継溶接の自動化技術

1.1 技術課題

図1は現場柱継溶接において、小型可搬型溶接ロボットを複数台使用した際の適用イメージである。コラム

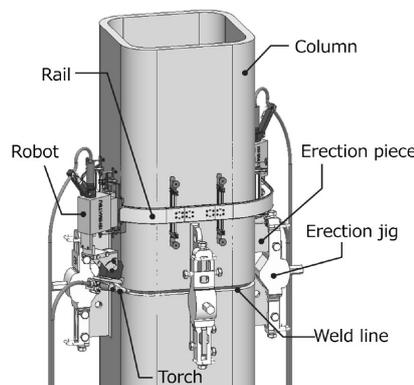


図1 現場柱継溶接イメージ

Fig.1 Image of column joint welding at construction sites

柱は図面どおりの精度を得るため、溶接などによる固定が完了するまでの間、エレクトロニクスピースおよび建方治具を用いて仮固定されている。ロボット適用時は、溶接線から一定の距離に平行となるようにレールを設置し、そのレール上をロボットが走行することで溶接が可能となる。溶接時には熱ひずみによる変形を軽減するため、ロボットを複数台設置し、対面で同時に溶接することが多い。

*1 溶接事業部門 技術センター *2 コベルコ ROBOTiX (株) 第二事業部

図2はレールの設置状況（コーナ部の一部）を上面から見た模式図である。レールをコラム柱に設置する場合、一般的には図2(a)に示すように、レールコーナ部の曲率中心とコラムコーナ部の曲率中心が一致する、同心条件となるように設置する。この場合、レールとコラム表面までの距離は常に一定となる。さらに、溶接速度（=ワイヤ先端速度）を一定とする場合、レールコーナ部走行時のロボット走行速度はコラムコーナ部の曲率半径とレールコーナ部の曲率半径の比で算出される。そのため、ロボット走行速度を制御しやすく、良好な溶接品質が得やすい。建築構造用冷間プレス成形角形鋼管の一つであるBCP325のコラムコーナ部の曲率半径は、板厚を*t*として3.5*t*と規定²⁾されている。そのため、板厚が変わると、コラムコーナ部の曲率半径が変化し、同じ幅のコラムであれば曲率中心位置が変化する。したがって、同心条件でレールを設置する場合には、レールの曲率半径もしくは直線部の長さなどを変化させた複数の種類のレールを用意する必要がある。また、板厚が小さい場合、コラムコーナ部の曲率半径も小さくなり、レールの曲率半径との比が大きくなる。その結果、ロボットがレールコーナ部を走行する際の速度が上昇し、速度限界が問題になる場合がある。

前述したレール設置の煩雑さや速度限界の懸念の解消を目的に、図2(b)に示すような非同心条件でレールを設置する方法が考えられる。一般的に、均一な溶込みやビード形状を得るためにはトーチとコラムのなす角は一定とした方がよい。同心条件の場合には、上面から見た時のトーチ角度はコラムに対して常に垂直となるが、図2(b)の場合、ロボットがレールコーナ部に滞在する区間において、トーチ角度が後進角、前進角に変化する。それにより、ワイヤ先端の溶接速度や狙い位置、アークの指向性が変化し、溶込みやビード形状が不均一となる。その結果、図3に示すような凹凸や垂れといったビード形状の不整が発生し、ひいては融合不良などの欠陥発生可能性がある。

1.2 角度補正技術

非同心条件での設置では、ロボットがレールコーナ部へ進入した時からコラムに対してトーチ角度が垂直でなくなる。1.1節で述べたトーチ角度による影響を解消す

るため、まずトーチ角度をコラムに垂直にする補正方法を検討した。なお、使用したロボットはトーチ角度を溶接線方向に沿って傾け、前進角・後進角と変化させる機構を有しており、トーチ角度の補正に利用した。

コラムの板厚・サイズの情報およびレールとの位置関係などの情報を基に、特定のロボット位置におけるトーチとコラムに垂直な方向との角度差を幾何学的に算出し、角度補正式を導出した。なお、説明にあたり、レールの曲率中心を原点としたXY座標系を用いる。

まず、図4(a)に示すように、ロボットがレールコーナ部に位置し、かつ、ワイヤ先端がコラムの直線部に位置する場合を領域Ⅰとし、ロボットが領域Ⅰ内のA点に位置する場合を考える。この場合、錯角の関係から、ロボットのレール上の回転角分（以下、レール回転角という）、トーチを前進角方向へ補正すればよい。レール回転角を θ_r 、トーチ角補正量を θ_c と置くと、

$$\theta_c = \theta_r \dots\dots\dots (1)$$

と表される。

つぎに、図4(b)に示すように、ロボットがレールコーナ部に位置し、かつ、ワイヤ先端がコラムコーナ部に位置する場合（領域Ⅱとする）を考える。ロボットがB点に位置する場合、コラム曲率中心とレール曲率中心の差分（オフセット距離と定義）をそれぞれ d_1 、 d_2 、レールの曲率半径を*r*とすると、トーチ角補正量 θ_c は、

$$\theta_c = \tan^{-1} \frac{\tan \theta_r - \left(\frac{r \sin \theta_r - d_2}{r \cos \theta_r - d_1} \right)}{1 + \tan \theta_r \left(\frac{r \sin \theta_r - d_2}{r \cos \theta_r - d_1} \right)} \dots\dots\dots (2)$$

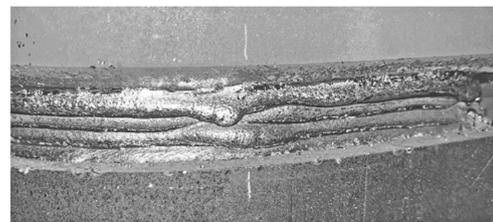


図3 ビード形状の不整
Fig.3 Irregularity of weld bead

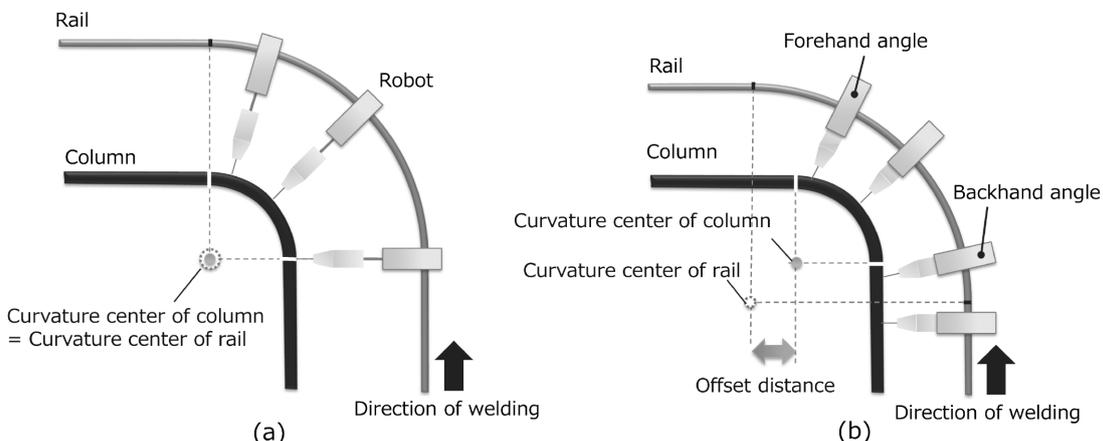


図2 レール設置状況の模式図 (a) 同心条件, (b) 非同心条件
Fig.2 Schematic illustration of rail installation (a) Concentricity condition, (b) Unconcentricity condition

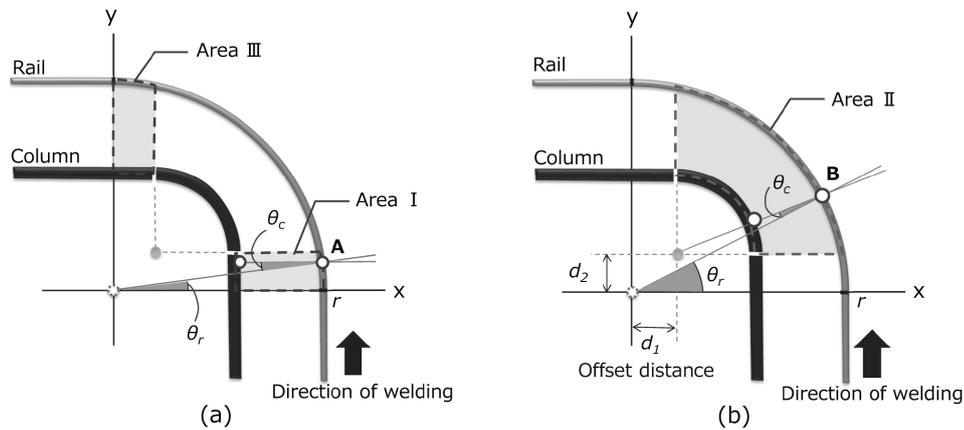


図4 角度補正量の算出 (a) コラム直線部 領域Ⅰ、Ⅲ, (b) コラムコーナ部 領域Ⅱ
 Fig.4 Calculation of angle compensation (a) Column straight section Area I and III, (b) Column corner section Area II

と表され、ロボットがコーナ部の中央を超えてからも領域Ⅱに滞在する場合は式(2)の補正式を用いる。

さらに、ロボットがレール上を前進し、再びワイヤ先端がコラム直線部へと進入した際(領域Ⅲとする)には、式(1)と同様の考え方から、トーチ角補正量 θ_c は

$$\theta_c = \theta_r - 90^\circ \dots\dots\dots (3)$$

と表される。

図5は、22mm \times 700mm \times 700mmのコラムに曲率半径250mmのレールをコラム表面(直線部)から86.5mm離して設置し、溶接速度が一定(300mm/min)とした際のトーチ角補正量を示す。領域Ⅰではトーチを前進角方向へ補正し、その後、領域Ⅱに進入した時点より、トーチ角補正量はマイナス、すなわち後進角方向へと変化する。ちょうどコーナ中央部で補正量はゼロとなるが、トーチを垂直に維持するため、後進角の補正を行う。このようにトーチ角度をコラムに常に垂直となるように補正させることで、不均一となりやすいコーナ部における溶接金属の形成を均一化している。

1.3 走行速度制御技術

溶接後のビード形状を均一にするためには、溶接速度も重要な要素である。1.2節で述べたトーチ角補正を導入した場合、ロボットの走行速度を従来と同一とすると、トーチ角補正を実施している区間において溶接速度が変化してしまう。したがって、トーチ角補正によるワイヤ先端の移動量も考慮し、ロボットの走行速度を制御する必要がある。

図5と同条件にてトーチ角補正を実施した際のロボットの走行速度を図6に示す。直線部では、ロボット走行速度=溶接速度(300mm/min)で走行する。領域Ⅰではトーチ角は前進角方向の変化となるため、ワイヤ先端速度は増加する傾向となる。したがって、領域Ⅰではロボット走行速度を減少させている。また、領域Ⅱでは、トーチ角補正が後進角方向の補正をする影響に加え、ロボットは溶接線より外側を移動するため、ロボットの走行速度は大きく変化させる必要がある。

このようにトーチ角補正制御とロボットの走行速度を制御することにより、非同心条件においても、トーチ角がコラムに垂直な状態かつ一定の溶接速度となり、良好

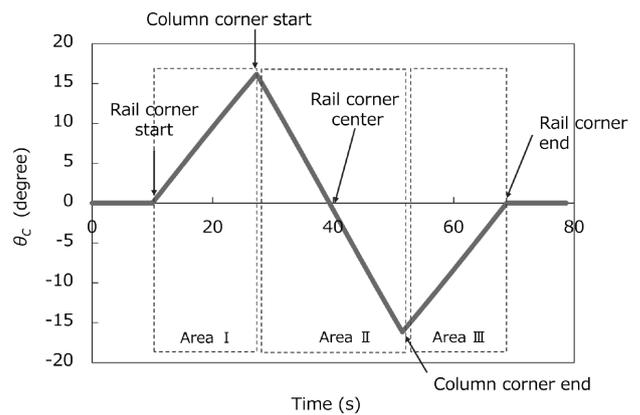


図5 トーチ角補正量
 Fig.5 Torch angle correction amount

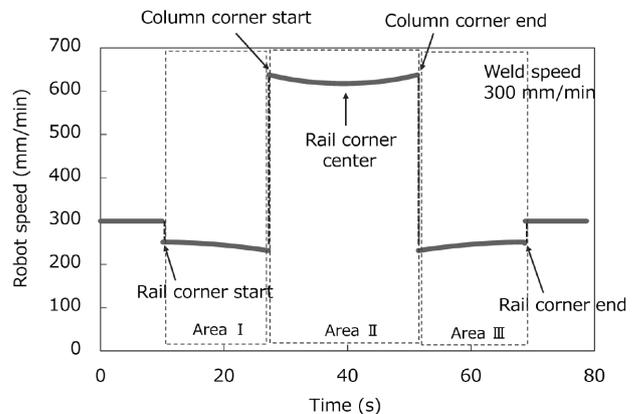


図6 ロボット走行速度
 Fig.6 Robot speed

な溶接品質が得られる。

補足として、レールコーナ部においては、レールとコラム表面との距離は逐次変化する。しかし、ロボットに位置を教示するセンシング動作時にその距離を計測し、補正しており、溶接時の突出し長さはおおよそ一定となる。

1.4 溶接試験結果

トーチ角補正および走行速度制御技術(以下、本技術という)を搭載したロボットを用いて、実験室で板厚の異なる複数の試験体に溶接を行った。表1に試験条件を示す。

図7に36mm t の溶接後ビード外観を示す。図3に示

表1 試験条件 (実験室)
Table 1 Test conditions (Lab.)

Column thickness	22 (mmt)	36 (mmt)
Column curvature radius	77 (mm)	126 (mm)
Shielding gas [flow]	100%CO ₂ [25(L/min)]	
Wire	JIS Z 3312 YGW18 (1.2 mm)	
Current/ Voltage	220~250 (A) / 25~29(V)	
Welding speed	200~400 (mm/min)	
Extension	20 (mm)	
Groove	Single bevel 35 (°) Gap 7 (mm)	
Rail radius	250 (mm)	
Distance between rail and column*	86.5 (mm)	
Offset distance	86.5 (mm)	37.5 (mm)

*Actually between rail straight section and column straight section



図7 本技術適用後ビード外観の一例 (36 mmt)

Fig.7 Examples of bead appearance after application of this technology (36 mmt)

したようなビード不整は発生せず、凹凸感の少ないビードが得られた。いっぽうで、長手方向の溶着量の不均一が確認された。実際にはレールの加工精度、設置精度、ロボットをレールに連結するための台車の車輪による影響などがあり、溶着量が不均一となる場合がある。それらの要因を整理し、実験室での溶接結果との比較から、ロボットの速度変化に関するパラメータを計算し、適正化することで、全体的な溶着量の均一化を図った。適正化後のパラメータを用いて、表1と同等の試験条件にて溶接した結果を図8 (a) (b) に示す。レールコーナ部の前後領域について、ビードが均一となり、美しいビード外観を得た。

さらに、コーナ部のロボット走行速度に関して、ロボットの機械的な速度限界も考慮が必要である。1.1節で述べたように、コラムからの距離が離れるほどロボット走行速度は上昇する。ロボットが速度限界を超過すると、指示どおりに速度が出ず、溶着量が増加傾向となり、場合によってはビードの垂れなどが生じる。しかし、本技術を用いて非同心条件で設置することで、従来法と比較してレールをコラムに近づけることが可能となるため、ロボット走行速度限界に対する裕度を得られる。パラメータの調整にはロボット走行速度も含まれており、コーナ部の一部で速度を増加させる制御も導入している。部分的にロボット走行速度上限に達する可能性があるが、レールとコラムとの距離を小さくしたことによって得られた裕度範囲内でパラメータを調整し、速度限界以下で施工できるようにした。図9に速度調整後のロボット走行速度を示す。とくに溶着量の不均一が発生し

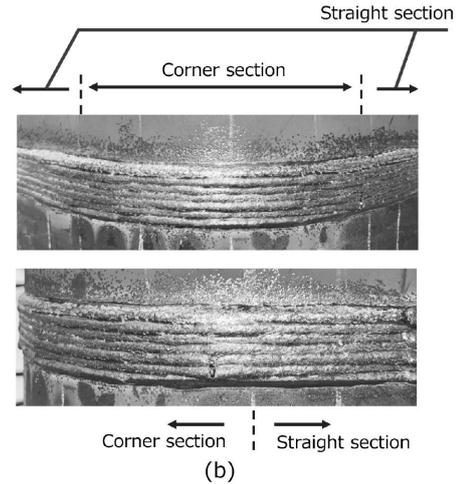
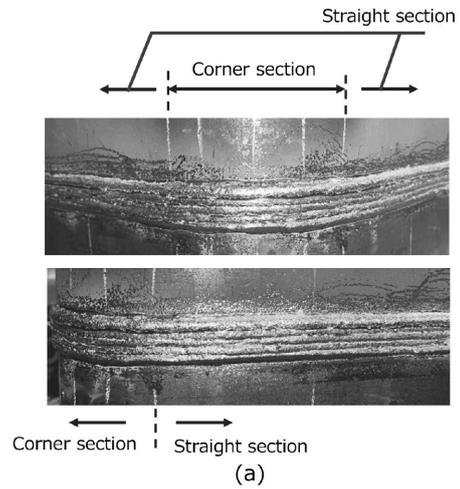


図8 パラメータ適正化後のビード外観
(a) 板厚 22 mmt, (b) 板厚 36 mmt

Fig.8 Bead appearance after parameter optimization
(a) Colum thickness 22 mmt, (b) Colum thickness 36 mmt

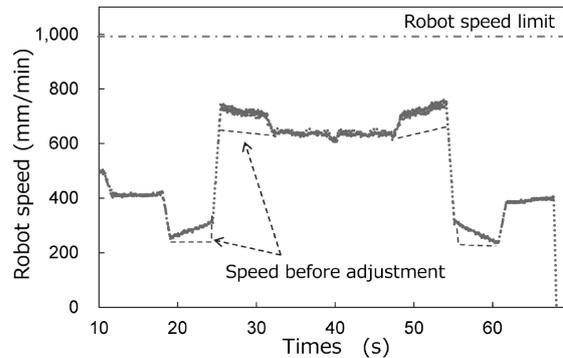


図9 ロボット走行速度のログデータ

Fig.9 Log data of robot speed

やすいレールコーナからコラムコーナの前後領域について、速度を変化させている。図8 (a) で示した22 mmtと同等の試験体に対して、溶接品質の確認を実施した。超音波探傷試験³⁾では溶接線全線に欠陥は検出されず、図10に示すマクロ観察でも、コーナ部、直線部に欠陥なく十分な溶込みが得られた。また、直線部において、シャルピー衝撃試験および硬さ試験にて性能を確認した結果を表2に示す。平均吸収エネルギーは171 J、ピッカース硬さから算出した推定引張強さは706 MPaであり、いずれも建築鉄骨溶接部の機械的性質²⁾を満足することを確認した。

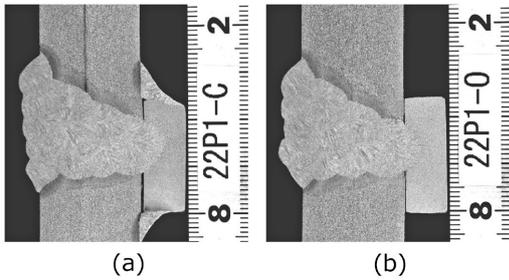


図10 マクロ写真 (a) コーナ部, (b) 直線部
Fig.10 Macrostructure (a) Corner, (b) Straight

表2 22 mm t 試験体直線部における機械的性質
Table 2 Mechanical properties of 22 mm t test piece in straight section

Item	Absorbed energy (Test temperature: 0°C)	Vickers hardness
Section	Straight	
Ave.	171 (J)	223 (HV)
Converted TS	-	709 (MPa)

2. 本技術の適用範囲

本技術を適用可能なコラムの板厚とサイズを表3に示す。コラム種に応じて、それぞれBCR (建築構造用冷間ロール成形角形鋼管) は板厚 16 mm t ~ 25 mm t, BCP は板厚 16 mm t ~ 40 mm t まで適用可能である。従来技術の場合、板厚の変化によってコラムの曲率半径が変化するため、板厚毎に複数のレールが必要であるが、本技術であればオフセット距離が変化することで一つのレールで複数の板厚へ適用可能である。同じサイズのコラムであれば、適用範囲内の板厚に対して二種類のレールのみでカバー可能となる。現在はR200のレールが一般的であるが、サイズの大きいR250のレールを用いることで、40 mm t の板厚まで適用可能となる。ただし、表3は、

表3 本技術の適用範囲
Table 3 Applicability range of this technology

Thickness (mm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1,000
12												
16												
19												
22												
25												
28												
32												
36												
40												

BCR・BCP Production range⁴⁾
 BCP Production range⁴⁾
 Applicability range

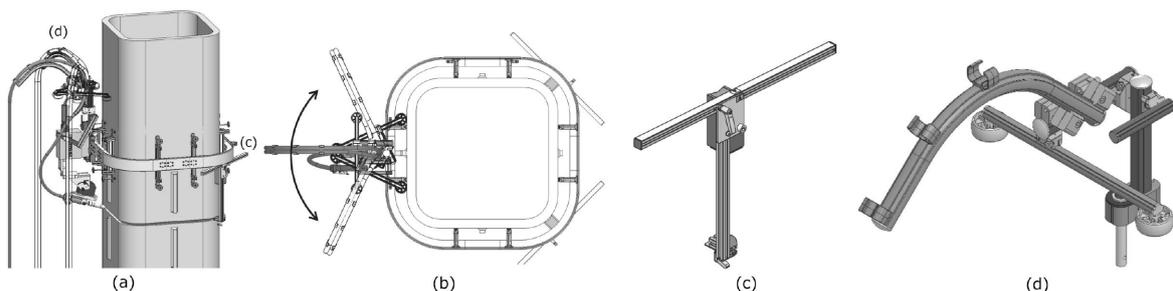


図11 周辺機器一例 (a) 使用時イメージ, (b) 上面図, (c) レール設置簡易治具, (d) ケーブルサポート治具
Fig.11 Example of Peripherals (a) Image when used, (b) Top view, (c) Rail installation jig, (d) Cable support jig

現場でコラムの固定用に用いられるエレクションピースや建方治具などとの干渉を考慮しておらず、セッティングとして実現可能な範囲を示しているため、実際に現場適用可能な範囲とは異なる場合がある。

3. 周辺機器の開発

生産性向上のためには柱当たりの溶接に要する時間を短くすることが有効である。大型の多関節ロボットを建築現場で用いる際には、レールの設置などに多くの人手と時間が必要となることが多く、自動溶接の課題となっている。小型可搬型の溶接ロボットにおいても、少しでも付帯作業に要する時間を削減するための治具を新たに製作した。さらに現場環境で起こりやすいケーブルの引っ掛かりなどによる外乱を軽減できる治具も合わせて製作した。図11 (a) に製作した周辺機器の使用イメージを示す。また、図11 (b) に設置状態での上面図を示す。後述するレール設置簡易治具はレール設置時、ケーブルサポート治具は溶接時に使用するが、説明の都合上同時に示している。

3.1 レール設置簡易治具

図11 (c) に開発したレール設置簡易治具を示す。治具下方の爪部を開先にかけて、マグネットでコラムに固定することで、レール高さの位置決めをする。この治具をコーナ部4か所すべてに設置し、その後コの字型などに分割したレールを載せ、再度連結し、レールをコラムに固定する。固定後は治具を取り外して完了となる。従来の治具では直線部ごとに二つ (合計八つ) 設置が必要であったが、設置個所をコーナ部とすることで、必要数を削減でき、従来より設置時間の短縮を可能とした。さらにレールの安定性が増すため、作業人員の削減効果も期待できる。

3.2 ケーブルサポート治具

一般的にロボットに接続されているトーチケーブルはロボット把持部から地面に垂れるように接続されていることが多い(図1)。現場環境では、床面の突起部などにケーブルが引っかかり、その振動や張力がワイヤ先端に伝わることで溶接線が振れ、品質低下につながる場合がある。そこで図11(d)に示すケーブルサポート治具を考案した。本治具は、トーチケーブルをロボット上部へ迂回させる構造とし、さらに上部ケーブル保持部が滑らかに回転するため、外力が加わった際に、ケーブルへの負荷が軽減され、ワイヤ先端への影響を抑えることができる。

4. 本技術の現場適用例

建築現場にて、BCP325 16 mm t × 600 mm × 600 mm のコラム柱へ本技術を適用した例を紹介する。なお、本技術の効果を確認するため、先行溶接は従来施工とし、後行溶接にのみ本技術を適用した。さらに適用時には3章で紹介した周辺機器を用いた。

4.1 溶接施工条件

溶接条件を表4に示す。

4.2 施工方法

今回適用した現場での施工手順について図12に示す。初めに先行溶接として、従来の施工法においてコラム柱の対面2角のコーナ部(①)へ溶接を実施し、その後残部(②)へ本技術を適用し、後行溶接を行った。なお、エレクションピースおよび建方治具は先行溶接後に取り除いた。

表4 試験条件(現場)
Table 4 Test conditions (Field)

Column thickness	16 (mm t)
Column curvature radius	56 (mm)
Shielding gas [flow]	100%CO ₂ [45 (L/min)]
Wire	JIS Z 3312 YGW18 (1.2 mm)
Current/ Voltage	220~260 (A)/25~31 (V)
Welding speed	200~400 (mm/min)
Extension	20 (mm)
Groove	Single bevel 35 (°) Gap 7(mm)
Rail radius	200 (mm)
Distance between rail and column*	86.5 (mm)
Offset distance	57.5 (mm)

*Actually between rail straight section and column straight section

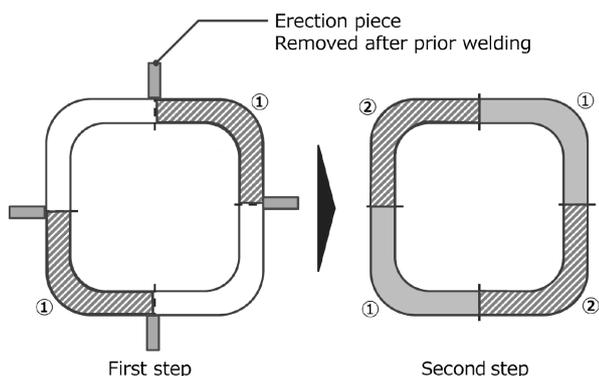


図12 適用現場における施工手順
Fig.12 Construction procedures at the application site

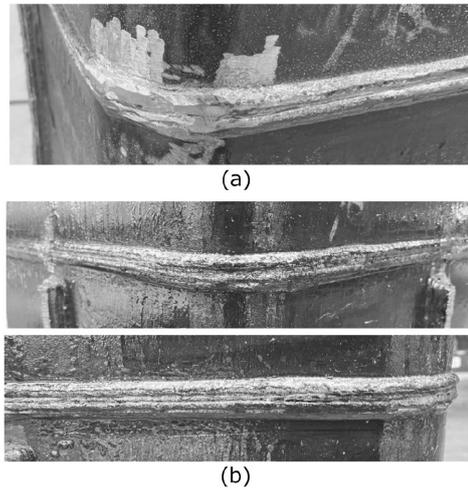


図13 現場適用時のビード外観 (a) 従来施工, (b) 本技術適用
Fig.13 Bead appearance at construction site
(a) Conventional construction, (b) Application of this technology

4.3 溶接結果

従来施工でのビード外観を図13(a)に示す。コーナ部で余盛過大となり、グラインダなどでの手直しが必要であった。いっぽう、図13(b)に示す本技術適用後のビード外観は、コーナ部直線部境界でのビードは均一であり、全体として美しいビード外観を得た。

従来施工のように、16 mm t という薄い板厚へ同心条件で設置する場合、コラムとレールとの距離は150 mmとなり、1.1節で述べたようにロボットの速度限界に達している可能性がある。本技術適用をすることで、その距離を狭めた設置ができ、安定した溶接が実現できる。本技術を用いた溶接後のビードは、グラインダによるビード成形は不要と判断され、超音波探傷試験³⁾、外観検査も合格であった。

現場溶接においても安定した溶接品質が得られ、さらには美しいビード外観により、作業者の負担軽減、作業時間の低減効果が期待される結果を得た。

むすび=本稿では、ロボットを用いたコラム柱の現場柱継溶接におけるコーナ部の品質安定化および作業効率化を目的に新たに開発した制御手法および周辺機器類を紹介した。本技術を用いることで、非同心条件においても溶接線全体において良好なビード外観が得られ、従来施工で発生していたコーナ部の補修作業の削減が期待できる。さらには周辺機器の使用により、作業効率を向上させる効果が期待される。お客様現場での試用も開始しており、本技術の適用実績を積み上げ、溶接工不足という社会課題の解決に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 浅井英克ほか. 大林組技術研究所報. 2017, No.81.
- 2) 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 日本鉄鋼連盟製品規定. 建築構造用冷間プレス成形角形鋼管(BCP235, BCP325). MDCR 0003-2017.
- 3) 一般社団法人日本建築学会. 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説. 2018.
- 4) 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 建築構造用冷間成形角形鋼管BCRとBCP. 2020-08.

(技術資料)

画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステム

河田純一*1・石崎圭人*1・松嶋幸平*1・小向航平*2・吉本達也*3 (博士(工学))

Compact Portable Welding Robot System with Vision Sensor

Junichi KAWATA・Keito ISHIZAKI・Kohei MATSUSHIMA・Kohei KOMUKAI・Dr. Tatsuya YOSHIMOTO

要旨

溶接分野では、溶接工不足の問題や生産性向上ニーズの高まりを受け、溶接ロボットの適用拡大が進んでいる。いっぽう、ロボット溶接適用が難しい高難度溶接に対しては、画像センサを用いた研究が検討されている。本稿では、画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステムを用いて横向初層裏波溶接の自動化に取り組んだ内容を報告する。本システムは、画像センサを小型可搬型溶接ロボットに搭載することで溶接自動化を実現している。初層溶接においては、溶融池特徴点を認識しウイーピング制御に反映させることで、ルートギャップ変化追従・溶接線做いを実現する自動溶接技術となっている。2層目以降は、初層で取得した開先情報を元に積層条件を更新し、最終層までの自動溶接を実現する。

Abstract

The use of welding robots in the welding field is on the rise, driven by a shortage of skilled welders and the growing demand for higher productivity. Concurrently, research involving vision sensors is being explored to address complex welding tasks that are difficult to handle with traditional robotic systems. This paper presents our work on automating horizontal first-layer penetration welding using a compact, portable robotic welding system equipped with a vision sensor. The system achieves welding automation by integrating a vision sensor with a portable robot. During first-layer welding, the system automatically tracks variations in the root gap and follows the welding path by identifying key features of the molten pool, adjusting the weaving motion as needed. From the second layer onward, the system updates the build-up parameters based on groove information acquired during the first layer, enabling fully automated welding through to the final layer.

検索用キーワード

画像センサ, 小型可搬型溶接ロボット, AI画像認識, 溶融池監視, 現場横向溶接, 自動化

まえがき=溶接は、製造業を中心としたものづくりに欠かせない技術の一つであるが、少子高齢化や若年層の入職率低下に伴い、溶接工不足が大きな社会課題となっている。とくに裏波溶接は熟練の技量が求められ、自動化が困難な溶接である。

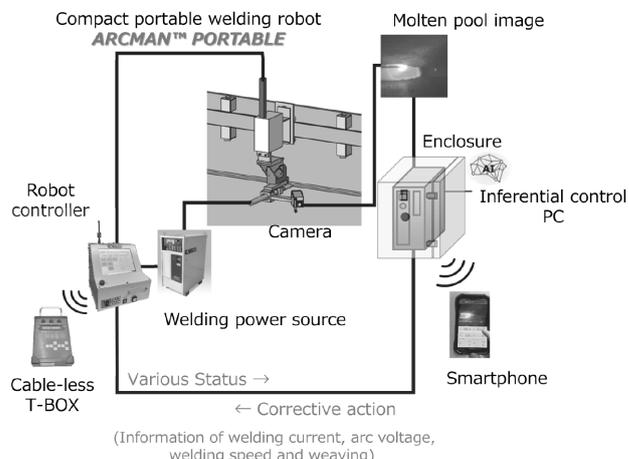
そこで当社は、溶融池映像中の特徴量についてディープラーニング（以下、AI）を用いた画像センサ（以下、カメラ）により認識し、適切に制御することで、ルートギャップ（以下、RG）変化に追従する適正な裏波溶接技術や溶接中の外乱などで発生する異常を検知する技術を開発してきた^{1)~7)}。

本稿では、これらの技術を小型可搬型ロボットへ搭載した画像センサシステム〔呼称：AIWelderTM注1)〕搭載ARCMANTM注2) PORTABLE（以下、本システム）〕について紹介する。また、高難度溶接の例として、横向継手を想定し、セラミック裏当て材を用いた横向初層裏波溶接の自動化を検討した内容を報告する。

1. 本システムの概要

本システムのハード構成を図1に示す。小型可搬型

溶接ロボットのトーチ部に画像センサを搭載している。カメラが取得した溶融池映像データを推論制御用コンピュータ（以下、PC）に取り込み、リアルタイムで特徴点を抽出し、制御補正量を演算する。その制御補正量をロボットコントローラへ送信し、補正指示値に基づきあらかじめ構築した運棒制御データベースを参照し、ロボット動作を制御し溶接が実行される。



脚注1), 2) AIWelder, および, ARCMANは当社の登録商標である。

*1 溶接事業部門 技術センター *2 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部 *3 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

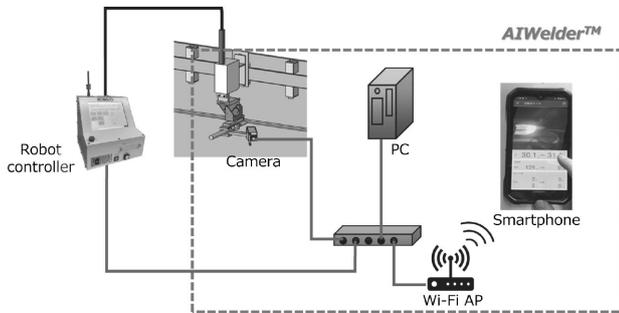


図2 AIWelder™の概要
Fig.2 AIWelder™ overview

1.1 AIWelder™

本システムでは、カメラで溶融池映像を撮影しPCでその映像をもとにAI認識を行い、ロボットの制御を行う。同時に、撮影した映像と溶接情報をAndroid^{注3)}スマートフォン上に表示する。このカメラ・PC・スマートフォンの構成をAIWelder™と呼称する。図2にAIWelder™の構成を示す。

高品質な溶接施工において重要となるのは、溶融池の形状に合わせて運棒を変化させることである。AIWelder™では溶融池を見る眼をカメラで、溶融池形状を解釈する頭脳をAIで、その溶融池に適した運棒をPCが制御することで、熟練溶接工に類似した溶接を可能とした。

まず眼となるカメラは、通常カラーカメラで溶融池を撮影すると、アーク光の光量が強力であるため取得映像が白飛びするか、光量を絞すぎた場合、溶融池形状が分からないかのどちらかになってしまう。そこで、明るさの異なる複数フレームを結合したHDR (High Dynamic Range) 技術を使用することで、鮮明な溶融池映像を撮影できるようにした。

つぎに頭脳となるAIの詳細は4.1節で述べるが、AIに様々な溶融池映像を学習させることで、溶融池映像からRGの推定のみならず、溶接速度やワイヤ狙い位置の調整も可能とした。

そしてPCは、溶融池映像を取得してAI画像認識モデルによる演算を実行し、ロボット制御に必要な補正量を算出してコントローラに送信している。同時に、コントローラから溶接電流・アーク電圧・溶接速度などの各種ステータスを取得することで、施工記録の作成を行う。パスごとにこれらの各種ステータスや、AIの認識結果をもとにした溶接異常有無をレポート形式で記録している。あわせて、溶融池映像を動画形式で保存している。さらに、最終パスの溶接完了時には、全パスの施工記録をまとめた最終施工レポートの作成を行っている。このレポートを使用することで、施工記録の管理が容易となる。

1.2 基本的制御

ロボット溶接における溶接位置の一般的な制御方法として、溶接中に計測した溶接電流から開先とワイヤ先端の位置関係を検出し、この検出結果を使用してワイヤ先

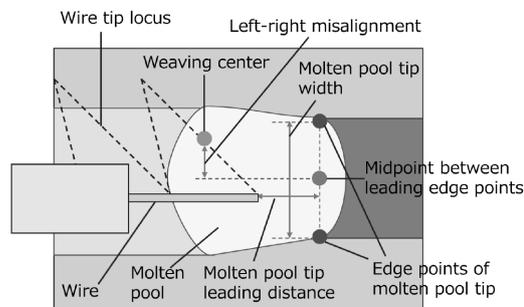


図3 溶融池の計測
Fig.3 Measurement of molten pool

端を開先に追従させる方法（アークセンサ）が挙げられる^{8), 9)}。

この方法に対し、本システムにおける溶接制御では、PCから受け取った溶融池映像の特徴点座標情報から、開先とワイヤ先端の位置関係を直接算出し、ワイヤ先端位置の制御を行っている。溶融池先端の両端位置からRG相当量となる「溶融池先端幅」、ワイヤ先端と溶融池先端の両端位置との位置関係である「左右ずれ量」、さらに、ワイヤ先端から溶融池先端までの長さ「溶融池先端距離」を計測している（図3）。これらを計測した後、溶融池先端幅に応じて、ウィービング幅、基準溶接速度、溶接電流・アーク電圧、ウィービングの傾き角度などの溶接条件を常に変化させている。つまり、これにより、RGごとに最適な溶接条件で溶接が行える。また、溶融池先端距離に応じた溶接速度の微調整や、左右ずれ量に応じた溶接位置の微調整を実施している（4.2節参照）。

2. 市場ニーズと対象継手

本システムについて、国際ウエルディングショーでのアンケートやお客様へのヒアリングを重ね、市場ニーズを調査した。その結果、多くの企業にとって熟練溶接工不足が近い将来の大きな課題となると認識していること、および、本システムの溶接姿勢としては下向・横方向への適用ニーズが高いことが判明した。とくにセラミック裏当て材を使用する横方向姿勢での初層裏波溶接はRGが長手方向に変動していることが多く、かつ、溶接難度も高いため自動化できていないことなどを把握した。なお、具体的に本システムの適用が想定される構造物としては、橋梁（きょうりょう）分野における鋼橋主塔部の横方向継手や造船分野における船側外板の横方向継手などがあることを見出している。

3. 施工法コンセプト

図4に示すように、本システムの施工法コンセプトは三つの主要な構成要素から成り立っている。

一つ目の構成要素は「溶接前のセンシングについて開始点近傍の1点センシングのみで完了する点」である。通常の小型可搬型溶接ロボットでは、多点センシング動作を基本としており、溶接長が数mにおよぶ溶接線では数十点のセンシングが必要となることもある。いっぽう、本システムでは上記のセンシング動作により得られるRGや溶接線などの情報を、カメラを用いることで溶

脚注3) Androidの商標はGoogle LLCの所有物である。

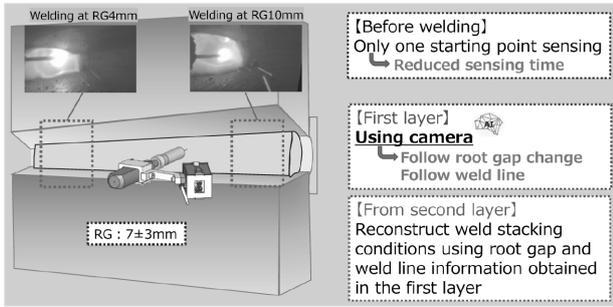


図4 溶接施工コンセプト
Fig.4 Welding method concepts

接中に取得することができる。よって、溶接前のセンシングはスタート位置の1点のみとすることができ、センシング時間を大幅に削減できる。

二つ目の構成要素は「初層溶接時はカメラからAI画像認識モデルによって取得した情報を元にRGや溶接線倣いを実行する点」である。通常の多点センシングによる溶接では、センシング間の開先情報は取得できないため両点の線形補間などにより計算された情報に基づいて溶接が実行される。いっぽう、カメラを用いることで、初層の全ての溶接線領域に対してRGや溶接線情報をオンタイムで取得し、運棒制御することができる。結果、熟練工による緻密な半自動溶接に近い施工となり、溶接品質向上に寄与する。

三つ目の構成要素は「2層目以降の溶接については初層で得たRG情報などを反映して積層要領を再構成する点」である。本機能により、初層から最終層までの自動溶接を実現する。本機能の詳細は4.3節で説明する。

4. 必要な要素技術

本章では、本システムに必要な要素技術を「AI画像認識」、「運棒制御構築」、「積層条件更新機能」、「異常検知機能」、「専用溶接材料」の五つに分けて紹介する。

3章にて述べた、主要構成要素との関係性は以下のとおりである。『1点センシング』は、『初層溶接時のRGや溶接線倣い』が実現することで同時に実現可能となっているといえる。その『初層溶接時のRGや溶接線倣い』は、「AI画像認識」と「運棒制御」に加えて「異常検知機能」と「専用溶接材料」の各技術から実現している。いっぽうで、『2層目以降の積層要領再構成』は、「積層条件更新機能」技術にて実現しているといえる。

4.1 AI画像認識

RGの変化や溶接線に追従してロボットを制御するために、本システムではAIによる画像認識を用いて溶融池映像上の特徴点認識を行っている。認識させたいうえで制御に用いている特徴点は、ワイヤ先端・溶融池先端上・溶融池先端下の3点である（図5参照）。

これらの特徴点からRGに相当する溶融池先端幅や溶接線に相当する溶融池先端中心、適切な溶接速度を決めるための溶融池先端距離を算出する。一般的に、ある入力データから何らかの数値を予測したい場合は数値を出力可能な回帰モデルを用いる。溶融池認識においては画像データを入力として各特徴点の座標値を予測するモデ

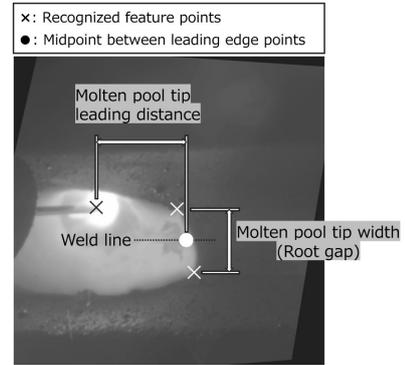


図5 AIが認識する特徴点
Fig.5 Feature points recognized by AI

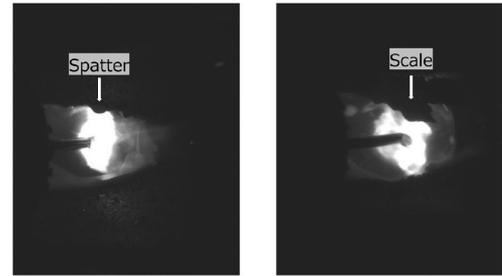


図6 開先内のスパッタやスケールの例
Fig.6 Example of spatter and scale in groove

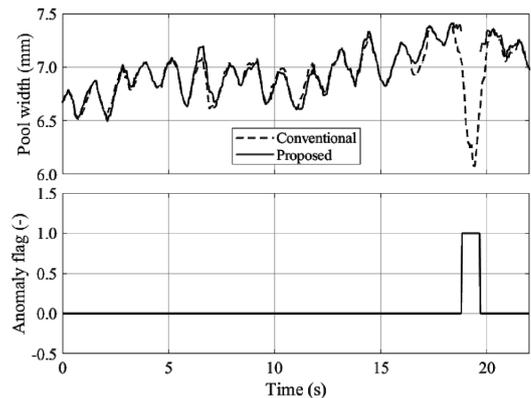


図7 異常検知フィルタによるフィルタリング結果
Fig.7 Filtering results by anomaly detection filter

ルを構築する方法が考えられるが、本システムでは特徴点が存在する確率マップを出力するAIモデルを使用している。確率マップでは予測結果の信頼性を考慮することが可能となり、信頼性の高い予測結果のみを使用することで、安定した制御を行うことができる。

以上で述べたモデルに対して様々な条件の画像データを約2万3千枚用いて学習させることで、高精度で安定した特徴点認識を実現している。

しかし、高精度な認識率を実現できたとしても、図6に示すように大粒のスパッタや開先に存在するスケールが溶融池の一部に覆いかぶさるような状況で起きる認識ミスは完全には防げない。誤った位置を特徴点として認識した場合、溶融池先端幅などロボット制御に利用される数値が異常な値となり、ロボットの追従性低下を引き起こす可能性がある。そこで溶融池先端幅などの数値を常にモニタリングし、Hampel識別子に基づく異常検知フィルタによりフィルタリングを行っている。図7は、

算出した溶融池先端幅の時系列データにおいて、一般的なローパスフィルタの一種である移動平均フィルタと提案手法を比較した図である。提案手法では認識ミスによる値の急な乱れを除去（無視）できていることが分かる。異常が起きた場合は、異常が起きる直前の値をホールドし、異常状態から回復すると通常の制御を再開する仕組みとなっており、これにより認識異常を引き起こすような外乱に対して頑健なシステムとなっている。

4.2 運棒制御

4.1節で述べたAI画像認識モデルによって認識する特徴点を用いて制御される初層溶接における運棒の各種制御指針を三つ紹介する。

一つ目は、「斜め振り運棒・端停止条件」である。本プロセスでは初層溶接時の架橋性を向上させるため、斜め振り運棒を採用している。溶融池映像より算出された溶融池先端幅を元に運棒制御データベースより、斜め振り運棒における角度・幅・上端/下端時の端停止条件（時間・溶接電流・アーク電圧のオフセット値）を制御している。本制御によりRGごとの適正な運棒軌跡を実現している。

二つ目は、「溶接速度」である。溶融池先端幅をもとに運棒制御データベースより溶接速度を制御している。同時に、溶融池先端距離を算出し、基準値より変動する場合は上記速度に対して増減制御を加えている。本制御により溶融池先端とワイヤ先端の距離を一定に保ち続けることで、安定した裏波形状の確保、および、突き抜けの防止を実現している。

三つ目は、「溶接線倣い」である。ワイヤ先端を監視し、溶融池先端幅の中央にウィービング中心が位置するように制御している。本制御により、溶接線がロボットの走行軸に対して傾いている、もしくは、蛇行しているような状態であっても追従可能な溶接を実現している。

4.3 積層条件更新機能

初層の溶接は、4.1節に示したように、AI画像認識モデルによる計測値を使用して溶接を制御することで、開先形状の変化に合わせた溶接が可能である。

いっぽう、2層目以降の溶接ではAI画像認識モデルによる特徴点を用いた計測をしていない。2層目以降は、初層の計測結果を使用して溶接位置・溶接速度を制御し、自動溶接を実現している。初層の溶接開始の段階で、基準となる積層条件（基準積層条件）を作成する。この基準積層条件は、事前に設定したパラメータの値や、センシングで検出した開先形状から自動で作成される。基準積層条件作成後に初層を溶接する。この初層溶接時は、4.2節に示した制御により溶接を実行する。初層溶接中は、一定距離溶接するごとに、またRGもしくは開先中心位置が一定値以上変化するごとに、それぞれの位置における開先両端の位置を記録する（図8）。2層目以降は、この初層溶接時に記録された開先両端位置に合わせて、狙い位置、溶接速度を基準積層条件の値をもとに調整し、開先全体の盛高さが一定となるように溶接する（図9）。この制御により、変化のある開先の多層盛り溶接の自動化を実現している。

4.4 異常検知機能

これまで初層片面裏波の自動溶接および初層の開先情報を2層目以降の溶接へ反映し、積層条件を再構成する技術について述べた。しかし、実適用時は、管理範囲外の開先形状・状態や、外乱による溶接トラブルの発生も考えられる。本システムではカメラで溶融池状態をモニタリングしており、例えば溶融池先端幅がRGの管理範囲を超えた場合などの異常が確認されると溶接を停止、あるいは端末（スマートフォン）へ警告を通知する機能を有する。

4.5 専用溶接材料

本システムは高難度溶接である横向姿勢での初層溶接において、RG4~10mmの裏波を安定して確保することが必要であるため、とくに広い側のRGにおける架橋性を有することが課題となる。そのほか、融合不良低減・耐割れ性向上などの溶接欠陥の抑制を課題として、専用ワイヤの開発に取り組んだ。

一般的軟鋼フラックス入りワイヤ（以下、FCW）の成分系をベースとし、熱力学的平衡状態予測ソフトによるシミュレーション、および、スラグ流動性の実測評価を行い、溶接金属成分とスラグ形成成分の調整を実施した。その結果、RG4~10mmにおいて架橋性が問題なく、良好な裏波形状を形成するワイヤ成分系を抽出した。併せて、表ビード形状がフラットに付きやすい成分系とすることで、スラグ除去しきれずに残ってしまうことによる2層目溶接時の融合不良発生を抑制することができている。また、本成分系は、溶融池先端が垂れにくい特性を有している。その結果、溶融池先端距離を安定させることが可能となり、AI画像認識モデルを活用した運棒制御の安定に寄与している。一般的軟鋼FCWと専用FCWにおける比較結果を図10に示す。そのほか、高温割れ感受性および低温割れ感受性の各組成式における元素の影響を考慮し、耐割れ性に有害とされる元素の低減を図り、適正化した。これら各種検討により、専用ワイヤの開発を完了させた。

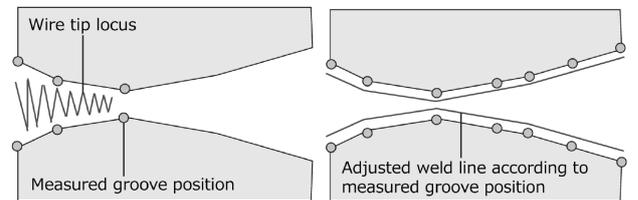


図8 初層のプロセス
Fig.8 Process of first layer

図9 2層目以降のプロセス
Fig.9 Process from second layer

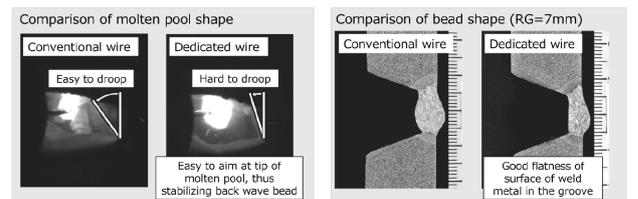


図10 従来FCWと専用FCWの比較
Fig.10 Comparison of conventional and dedicated FCW

表 1 溶接継手条件一覧

Table 1 List of welding conditions for joint

Base metal groove shape	Single bevel groove 35°
Welding position	Horizontal
Root gap (mm)	4⇒10 Taper shape
Welding line	5 mm upward displacement from rail parallel height
Shielding gas	100%CO ₂
Wire extension (mm)	21
Backing material	Ceramic

Using wire	Layer-Path	Welding current (A)	Arc voltage (V)
Dedicated wire φ1.2 mm	1-1	170-180	22.5-23.5
	2-2,2-3	280	31
	3-4~	260	29
	(Final layer)	240	27
	(Final path)	220	26

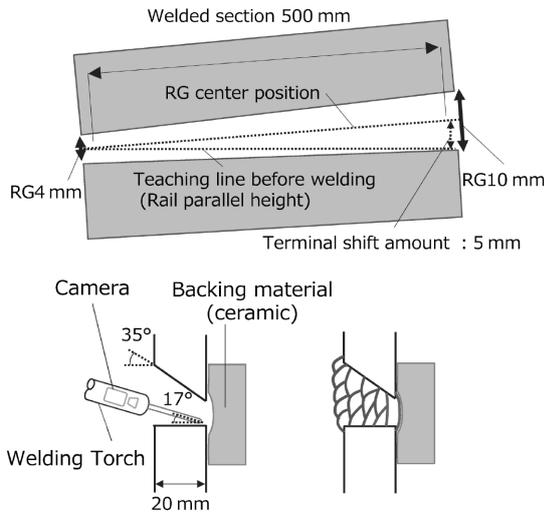


図 11 試験板形状および層パス条件

Fig.11 Test plate shape and layer pass conditions

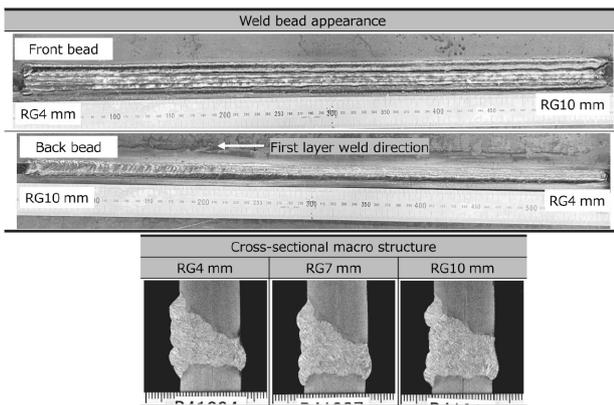


図 12 溶接継手のビード外観と断面マクロ

Fig.12 Bead appearance and cross-sectional macro structure in welded joint

表 2 溶接継手の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of welded joint

Tensile properties*1			Notch toughness*1
0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J) @0°C
615	667	24	49, 63, 65 Avg.59

*1 Tensile test specimen: round tensile specimen, Dia.=10.0 mm, G.L.=50 mm
Impact test specimen: 10 x 10 mm square shape, 2 mm Vnotch based on AWS B4.0

5. 継手試験

本システムを用いて溶接を実施した結果を以下に示す。溶接条件は表 1, および, 図 11 に示すとおりである。母材は SM490A (JIS G 3106) を使用した。RG は 4 mm から 10 mm までテーパ状に広がる形状とし, 溶接線はロボットのレール (走行軸) に対して終端で 5 mm ずらして設置した (傾斜勾配: 1.0% に相当)。

溶接後のビード外観, 断面マクロを 図 12 に示す。RG に追従して溶接速度およびビード幅が変化しており, 溶接線倣いも実行できていることを確認した。ビード外観は表裏ともに良好であり, 各 RG での断面マクロも良好な溶込み形状であった。超音波探傷試験も実施しており, きずなしの結果であった。なお, 超音波探傷試験は JIS Z 3060 (2015) の規格に準拠して実施しており, 探傷感度は RB-41B 標準穴からのエコーを H 線に合わせ, 検出レベルは L 線とした。また, 本試験と同じ形状の溶接試験体を作製し, 機械的性質を確認した結果を表 2 に示す。機械的性質の値について問題ないことを確認した。以上の結果から, 本システムによる初層から最終パスまでの自動溶接施工が可能であることを確認した。

むすび = これまで, 溶接工不足という社会課題に対し, 熟練の技量が求められる片面裏波溶接の自動化に取り組んできた。本稿では, 横向姿勢への適用を目指し, カメラ, および, AI 画像認識モデルを用いて溶接運棒を適切に制御することで, RG 変化や溶接線に追従し, 適正な裏波ビードを形成する溶接技術, さらには溶接における外乱などで発生した異常を検知する技術を紹介した。

当社は, 変革 (KOBELCO-X) を通じたサステナビリティ経営の強化を掲げており, AX~GX の七つの「X」を設定して「魅力ある企業への変革」を推進している。本稿で紹介した技術も, これら「X」のかけ算により創出され, お客様の困りごとを解決できる溶接ソリューションであると言える。今後, 開発技術の実用化を推進し, 溶接工不足という社会課題解決への貢献を図って行く。

参考文献

- 1) 芦田 強ほか. 溶接全国大会講演概要. 2017, 第101集, p.450-451.
- 2) 芦田 強ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.63-66.
- 3) 尾崎圭太ほか. 溶接全国大会講演概要. 2020, 第107集, p.236-237.
- 4) 岡本 陽ほか. 溶接技術. 2021年2月号, p.48-53.
- 5) 岡本 陽. WE-COMマガジン. 2021年10月, Vol.42 (2) https://www-itjwes.or.jp/we-com/bn/vol_42/sec_1/1-2/1-1.jsp (参照2025-06-03).
- 6) 尾崎圭太ほか. 溶接学会論文集. 2021, 第39巻, 第4号, p.309-321.
- 7) 吉本達也ほか. 溶接全国大会講演概要. 2023, 第112集, p.40-41.
- 8) 杉谷祐司. 溶接学会誌. 2000, Vol.69, No.2, p.140-144.
- 9) 重吉正之ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, pp.12-16.

(技術資料)

地盤改良材としての鉄鋼スラグの利活用

陣内綾音*1・松元弘昭*1・唯井力造*1

Utilization of Steel Slag as Soil Stabilizer

Ayane JINNOUCHI・Hiroaki MATSUMOTO・Rikizo TADAI

要旨

鉄鋼スラグは、環境負荷の低減および資源循環の観点から注目される建設資材であり、近年では地盤改良材としての適用実績が拡大している。本稿では、鉄鋼スラグの物理的・化学的特性を概説するとともに、地盤の支持力向上に寄与する二つの効果——締固め性の向上による内部摩擦角 (ϕ) の増大と、水硬性による粘着力 (c) の増大——に着目した地盤改良技術を紹介する。さらに、実際の現場での適用事例を通じて、スラグ混合率の最適化や強度発現の経時変化、環境安全性について検討したうえで、今後の課題と展望を示す。

Abstract

Steel slag is a construction material that has garnered attention for its potential to reduce environmental load and enhance resource circulation. In recent years, its use as a soil stabilizer has been expanding. This paper outlines the physical and chemical properties of steel slag. It introduces a soil stabilization technology that focuses on two effects that contribute to improving the bearing capacity of the ground: an increase in the internal friction angle (ϕ) thanks to improved compaction, and an increase in adhesion (c) owing to hydraulicity. Furthermore, through application examples from actual sites, the optimization of the slag mixing ratio, changes in the strength expression over time, and environmental safety are examined to identify future challenges and prospects.

検索用キーワード

鉄鋼スラグ, 地盤改良, 締固め特性, 水硬性, CBR 試験, 一軸圧縮試験

まえがき=我が国は、急しゅんな地形とぜい弱な地質が広く分布していることに加え、梅雨や台風など湿潤な気候の影響により、従来から自然災害による甚大な被害に見舞われてきた。近年では地球温暖化による集中豪雨の増加など気候変動の進行により、土砂災害の発生リスクが一層高まっている。こうした災害の激甚化・頻発化に対応するためには、より強くしなやかな地盤の形成が求められている。

このような背景のもと、鉄鋼スラグは、軟弱な地盤を強化する有効な材料として注目されており、これまでさまざまな改良技術の開発^{1)~6)}が進められ、実績を積み重ねてきた。

本稿では、鉄鋼スラグの物理的・化学的特性や地盤改良技術の概要を紹介するとともに、当社の適用事例について述べる。

1. 鉄鋼スラグの特性と用途

1.1 鉄鋼スラグの特性

鉄鋼スラグは、製造工程により高炉スラグと製鋼スラグに大別される(図1)。

高炉スラグは、鉄鉱石から鉄を取り出す高炉から生成するスラグであり、熔融状態からの冷却・固化方法の違いにより、高炉水砕スラグと高炉徐冷スラグに分類され

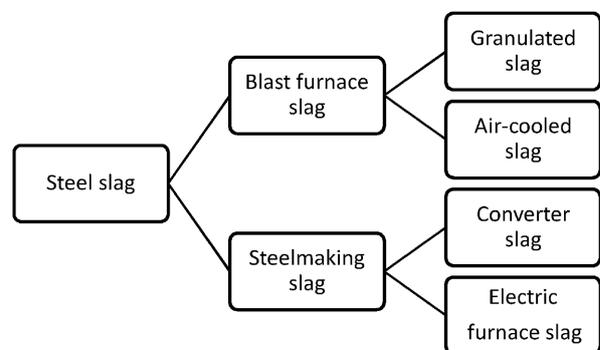


図1 鉄鋼スラグの種類
Fig.1 Classification of steel slag

る。高炉水砕スラグは、加圧水によって熔融状態から一気に冷却され、ガラス質で粒状となる。高炉徐冷スラグは、ヤードに流し出されてゆっくりと冷却され、結晶質の岩石状となる。

いっぽう、製鋼スラグは、鋼を製造する製鋼工程で生成するスラグであり、転炉をはじめ複数の精錬炉から生成する転炉系スラグと、スクラップを原料とする電気炉製鋼工程で生成する電気炉スラグに分類される。転炉系スラグは、高炉徐冷スラグと同様の冷却方法により、結晶質の岩石状になる。鉄分を多く含むため、天然砕石に比べ粒子密度と硬度が高く耐摩耗性に優れる点が特徴で

*1 鉄鋼アルミ事業部門 資源化推進部

ある。なお、本稿で対象とする製鋼スラグは、転炉系スラグに限定し、電気炉スラグは対象外とする。

表1にそれぞれの化学組成を示す⁷⁾。鉄鋼スラグは、酸化カルシウム (CaO) と二酸化ケイ素 (SiO₂) を主成分とし、その他の成分として、高炉スラグは、酸化アルミニウム (Al₂O₃) や酸化マグネシウム (MgO)、少量の硫黄 (S) を含み、製鋼スラグは、酸化鉄 (FeO) や酸化マグネシウム (MgO) を含む。高炉スラグは、セメントと同様の化学成分を有することが特徴である。

鉄鋼スラグは、それぞれが持つ物理的・化学的特性を活用した多様な用途が開発され、建設資材としてさまざまな場面で利用されている⁷⁾。以下に鉄鋼スラグの主要な用途を示す。

1.2 用途

1.2.1 セメント・コンクリート用

高炉スラグは、その約90%がセメント・コンクリート用途に利用されている。当社では、高炉水砕スラグを粉砕し、石こうを添加した高炉スラグ微粉末（製品名：ケイメント[®]）を製造・販売しており、これは主に高炉セメントの原料として用いられている。

高炉セメントは、ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混合したセメントであり、高炉スラグの含有率に応じてA種（5%超～30%以下）、B種（30%超～60%以下）、C種（60%超～70%以下）に分類される。国内で最も流通している高炉セメントはB種である。

表2にセメント1tあたりのCO₂排出量を示す⁷⁾。ポルトランドセメントのCO₂排出量のほとんどは、製造過程で石灰石を焼成することにより発生する。いっぽう、高炉スラグ微粉末は、焼成工程がなく、乾燥および粉砕プロセスで製造できるため、ポルトランドセメントに比べCO₂排出量が少ない。そのため、高炉セメントB種は、ポルトランドセメントと比較してCO₂排出量を42%削減することができる⁷⁾。

1.2.2 道路用

製鋼スラグは、その約50%が道路用路盤材として利用されている。道路用路盤材として販売される鉄鋼スラグ製品は、JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」に規格されており、その品質が保証されている。代表的な鉄鋼スラグ路盤材である水硬性粒度調整スラグ (HMS-25) は、同じ耐久性や強度を実現するために必要なスラグの置換割合を示す等値換算係数が0.55と高く、一般的な碎石（粒度調整碎石）の0.35と比較して、より少ない量で同等の性能を発揮できる。これにより、路盤の断面を薄くすることが可能となる。また、施工後の長期的な水硬性発現により、高い耐久性を保持し、インフラのライフサイクルコストの低減に貢献することができる。このことから、鉄鋼スラグ混入路盤材は、グリーン購入法における特定調達品目に指定されており、環境保全に資する材料としても広く認知されている。

1.2.3 地盤改良用

製鋼スラグは道路用路盤材のほか、地盤改良材として利用されている。これまでの研究により、製鋼スラグを軟弱な土に適切な割合で混合することで、地盤の強度が増大することが報告されている^{1)~6)}。2021年10月には、兵庫県の土木請負工事必携に、「鉄鋼スラグ混合土を用いた軟弱土改良の設計施工マニュアル⁸⁾」が示され、公共工事における鉄鋼スラグ混合土の適用促進が進められている。このような取り組みにより、近年、実際の工事における地盤改良工法の適用件数が着実に増加している。

2. 鉄鋼スラグによる地盤改良

2.1 地盤改良の概要

2.1.1 地盤改良の目的

軟弱な地盤に構造物を構築した場合、地盤の変形や沈下などにより、構造物に傾斜などの影響をおよぼす可能

表1 鉄鋼スラグの化学組成例
Table 1 Chemical composition of steel slag and other materials

	(mass %)		
	Blast furnace slag	Steelmaking slag	Ordinary portland cement
CaO	41.7	45.8	64.2
SiO ₂	33.8	11.0	22.0
T-Fe	0.4	17.4	3.0
MgO	7.4	6.5	1.5
Al ₂ O ₃	13.4	1.9	5.5
S	0.8	0.06	2.0
P ₂ O ₅	<0.1	1.7	—
MnO	0.3	5.3	—

表2 セメント1tあたりのCO₂排出量の一例
Table 2 Example of CO₂ emissions per ton of cement

Emission source	Ordinary portland cement (g)	Blast furnace cement type B (g)	Reduction (g)	Reduction Rate (%)
Limestone calcination	476	270	206	43
Other process energy	283	170	113	40
total	759	440	319	42

性がある。そのため、地盤改良は、地盤の支持力を高めて構造物を安全かつ安定して支えるために行われる。地盤の支持力は、土の構造や性質に大きく影響される。

以下に土の構造と支持力について述べる。

2.1.2 土の構造

土は、種々の粒径を持つ土粒子の集合からなり、固体(土粒子)、液体(水)、気体(空気)の3相からなっている。土粒子は、粒径の違いによって、0.075 mmから75 mmまでの粗粒分、0.075 mm以下の細粒分に分類され、それぞれ、粗粒分の質量が全体の50%以上を占める土を粗粒土、細粒分の質量が全体の50%以上を占める土を細粒土と呼ぶ。

土の力学的性質は、主として①土粒子の形状と大きさ、②土粒子の詰まり具合、③水、空気の量やそれらの性質、④土粒子同士の相互作用、および⑤土粒子と水・空気との相互作用などに支配される。また、これらの要素は土の構造と深い関係がある。

粗粒土は、粒径が大きいので、土粒子が重力の作用で互いにかみ合う単粒構造を形成する(図2)⁹⁾。大きな粒子から小さな粒子まで一様に混合していると密な状態になるが、同じ大きさの粒子ばかりだと間隙が多くゆるい状態になる。

いっぽう、細粒土は、土粒子の比表面積が大きく、その表面に電荷を帯び、水分子やイオンを吸着する。このため、土粒子間に粘着力が働き、堆積中にはちの巣構造を形成する(図3)⁹⁾。はちの巣構造は、単粒構造に比べ、間隙が大きいので、外的な力の作用を受けると、土粒子が不安定になり、軟弱な土になりやすい。

2.1.3 地盤の支持力

地盤に求められる支持力は、構築する構造物の形式、規模あるいは重要性によって決まり、土のせん断強さで

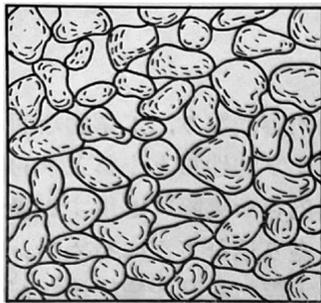


図2 単粒構造
Fig.2 Single-grained structure

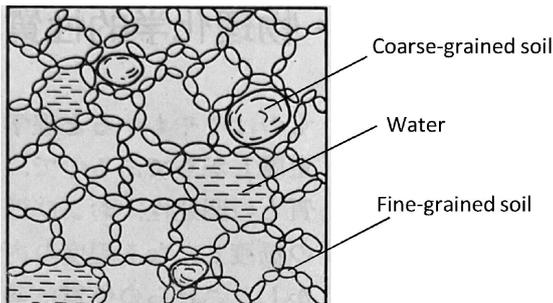


図3 はちの巣構造
Fig.3 Honeycomb structure

評価される。土は引張力や曲げに抵抗する強さはほとんどないため、圧縮力のみで抵抗する材料として取り扱う。圧縮力による土の破壊現象は、破壊面がすべり面を形成し、せん断破壊する。せん断破壊しないように抵抗する力がせん断強さであり、以下のクーロンの式で表される⁹⁾。

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

ここに、

s: 土のせん断強さ (kN/m²)

c: 粘着力 (kN/m²)

σ : せん断面上に働く垂直応力 (kN/m²)

ϕ : 内部摩擦角 (°)

粘土や固結した土のように自立可能な土は、垂直応力がゼロでも粘着力(c)によりせん断強さを持つ。いっぽう、乾燥した砂などの粗粒土は、粘着力(c)がほとんどなく、内部摩擦角(ϕ)によってせん断強さが決まる。したがって、地盤のせん断強さを増大するためには、内部摩擦角(ϕ)または粘着力(c)のいずれか、あるいは両方を増大させる必要がある。

2.1.4 地盤改良工法

内部摩擦角(ϕ)または粘着力(c)を増大させる工法として、以下の二つが挙げられる。

(1) 締固めによる密度の増大(ϕ の増大)

土の工学的性質は、土粒子の詰まり具合、すなわち土の密度に大きく依存する。土粒子を密に詰めると粒子間のかみ合わせが増えるため、土の強度や剛性は増加する。また、間隙が減少することで、透水性が低下し、遮水性能が向上する。このように外力を加えて土粒子を強制的に密に詰めることを「締固め」といい、内部摩擦角(ϕ)の増大を目的とする。

(2) 固化によるせん断強さの増大(cの増大)

固化材を土の間隙に注入する、または混合することで土を固化させるものである。これは、粘着力(c)の増大を目的とする。一般的に固化材にはセメント系固化材や石灰系固化材などが用いられている。

鉄鋼スラグによる地盤改良は、①粒度分布の改善による締固め特性の向上(ϕ の増大)、②スラグの水硬性による固化効果(cの増大)があり、上記の二つの効果を併せ持つことが特徴である。

以下にそれぞれの評価方法を示す。

2.1.5 評価方法

(1) 締固め特性の評価

締固め特性は、締固め試験(JIS A 1210)で得られる締固め曲線から判断できる。締固め特性は、土の種類により大きく異なる。図4に土の粒径加積曲線を図5にそれらに対応する締固め曲線の関係を示す¹⁰⁾。粒径加積曲線において、さまざまな粒径を含む土は粒度分布が良好であるとされ、①に近づくほど粒度分布は良好である。とくに砂質系の土がこれに該当する。また、締固め曲線は、一般に細粒分が多い土ほどなだらかな形状を示し、右下方に位置する傾向がある。これは、含水比が高く、乾燥密度(土の体積に対する土粒子部分の割合)が低い状態を示している。これに対して、粒度分布の良い

砂質系の土ほど締固め曲線は鋭く立った形状を示し、左上方に位置する。これは、含水比が低く、乾燥密度が高い状態を表す。すなわち、粒度分布が良い土ほど、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) が高く、最適含水比 (W_{opt}) が低くなる傾向がある。このような土は締固めする際に水分管理がしやすく、締固め性に優れた土であるといえる。

また、締め固めた土の強度、剛性、変形性などの力学特性は、一般的にCBR (California Bearing Ratio) 試験 (JIS A 1211) を用いて評価する。CBR試験では、粒径37.5 mm以下の改良土を用い、モールドに成形・締固めた供試体を作製する。必要に応じて4日間の浸水養生を行い、直径50 mmのピストンを1.25 mm/minで貫入させ、2.5 mmと5.0 mmの深さでの荷重を測定し、標準碎石との比較によりCBR値 (%) を算出する。CBR試験は、主に道路の舗装設計における路床・路盤の支持力を求めるための試験である。CBRが3%未満の場合、または路床のCBRが目標とする値を下回る場合には、改良を行う必要がある¹¹⁾。

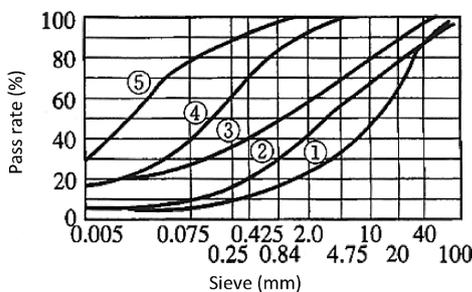


図4 粒径加積曲線
Fig.4 Grain size distribution curve

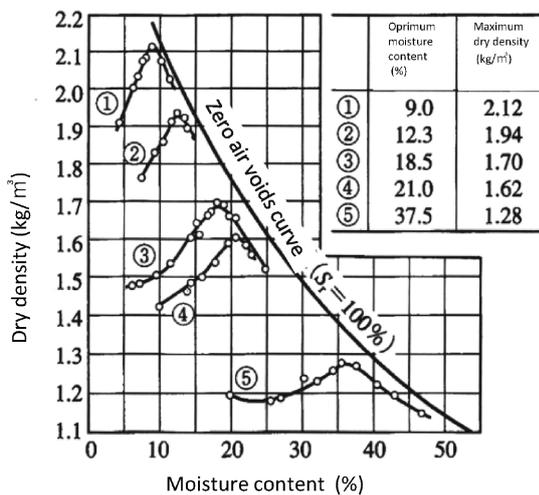


図5 締固め曲線
Fig.5 Compaction curve

表3 原土および鉄鋼スラグの物理的特性
Table 3 Physical characteristics

	On site soil	Steelmaking slag
Soil particle density (Mg/m³)	2.6	3.14
Maximum grain size (mm)	37.5	37.5
Uniformity coefficient	-	15
Classification name of geomaterials	Gravelly fine-grained soil mixed with sand	Gravel mixed with sand

(2) 固化強度の評価

固化強度 (粘着力) は、一軸圧縮試験 (JIS A 1216) を用いて評価する。一軸圧縮試験では、改良土を9.5 mmふるいにかけて、直径50 mm、高さ100 mmの供試体を作製する。改良後は7日、14日、28日などの養生期間を経て試験を実施する。供試体に一定速度で圧縮荷重を加え、最大荷重を断面積で割って一軸圧縮強度を算出する。一軸圧縮強さは、主に構造物基礎地盤の支持力や土圧、斜面の安定などの安定性評価に用いられる。

以下に、上述したそれぞれの改良効果に着目して改良した事例を示す。

2.2 鉄鋼スラグによる地盤改良

2.2.1 締固め特性の改善 (道路路床用途の事例)

締固め特性を改善し、道路路床として使用した事例を示す。本事例では、道路路床としてCBR = 20%が目標強度であったが、原土では強度を満たせなかったため、鉄鋼スラグを用いた地盤改良が検討された。そこで、目標強度を確保するために必要なスラグの適切な混合率について検討を行った。

(1) 原土と鉄鋼スラグ物理的特性

表3および図6に原土と鉄鋼スラグの物理的特性と粒径加積曲線を示す。鉄鋼スラグに比べ、原土は細粒分の割合が多いことを示している。

また、図7は地盤材料の三角座標による分類である。地盤材料の三角座標では、左斜辺がれき分、底辺が砂分、右斜辺が細粒分のそれぞれ含有率を表し、左下に位置するほど、れき分が多いことを示す。鉄鋼スラグの混合比が増加するに従い、細粒分が低下して左下に移動する。

(2) 混合率の決定

図8にこれまでさまざまな原土に対して行ってきたCBR試験の結果を示す。細粒分含有率とCBR値には相関が見られ、細粒分が少ない、すなわち、粗粒分が多いほどCBR値は高くなることがわかる。この関係より、今回の目標強度CBR = 20%以上を達成するには、細粒分含有率を原土の64%から、おおよそ40%程度まで低減する必要があると推定された。

CBR試験の結果を図9に示す。実際に、鉄鋼スラグを33%混合することで、目標強度を達成することが確認でき、この混合率に決定した。

また、CBR試験は、JIS A 1211に基づいて実施し、供試体は水中で4日間養生している。そのため、水和反応は十分に進行していないと考えられるため、強度発現機構は主に内部摩擦角 (ϕ) の改善によるところが大きい

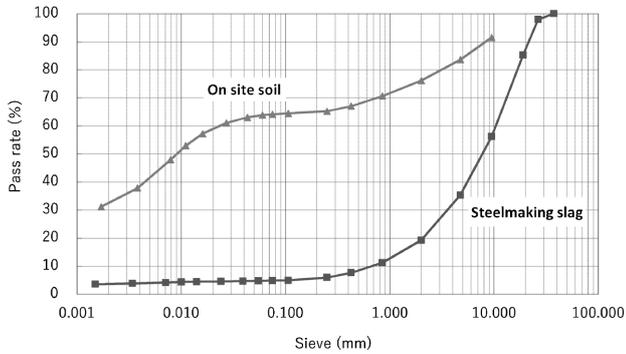


図6 粒径加積曲線
Fig.6 Grain size distribution curve

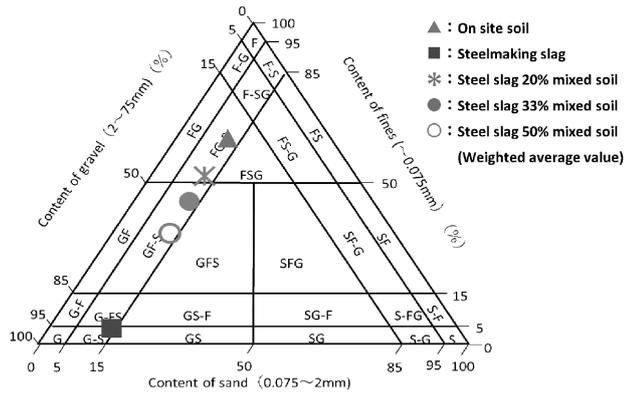


図7 原土および鉄鋼スラグの三角座標による分類
Fig.7 Classification of soils for engineering purposes

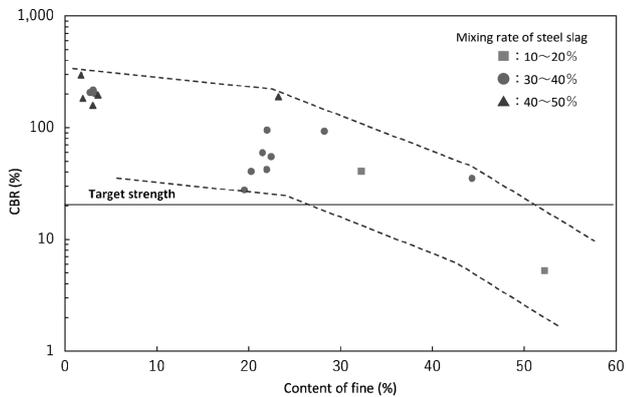


図8 CBRと細粒含有率の相関
Fig.8 Relationship between CBR and fines content

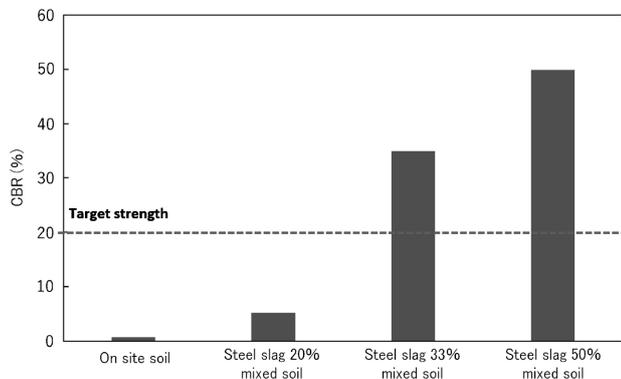


図9 室内CBR試験結果
Fig.9 Indoor CBR test results

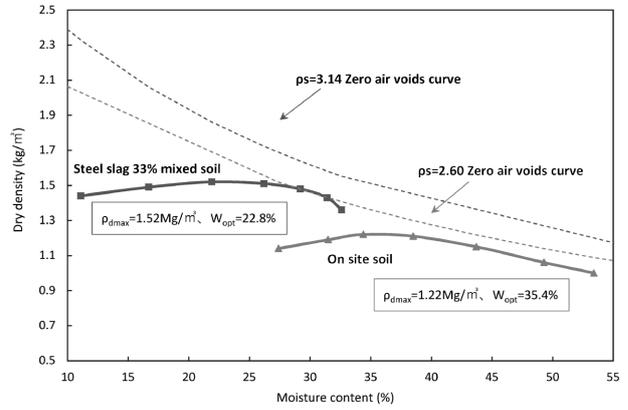


図10 締固め曲線
Fig.10 Compaction curve

と考えられる。

(3) 改良土の締固め性評価

原土に鉄鋼スラグを体積比で33%混合した改良土の締固め曲線を図10に示す。鉄鋼スラグ33%混合土は、原土と比較して最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) が高く、最適含水比 (W_{opt}) が低くなっていることがわかる。鉄鋼スラグを33%混合することで、粒度分布が改善され、締固め性が向上することが示された。

2.2.2 固化強度の改善 (仮設道路用途の事例)

つぎに、固化強度を改善し、仮設道路に使用した事例を示す。本事例では、仮設道路用の地盤として、一軸圧縮強さ = 200 kN/m^2 が目標強度であったが、原土およびセメント改良では強度を満たせなかったため、鉄鋼スラグを用いた地盤改良が検討された。そこで、目標強度を確保するために必要なスラグの適切な混合率について検討を行った。

(1) 原土と鉄鋼スラグの物理的・化学的特性

表4および図11に、原土と鉄鋼スラグの物理的特性と粒径加積曲線を示す。鉄鋼スラグに比べ、原土は細粒分の割合が多いことを示している。

また、図12に原土と鉄鋼スラグ混合土の三角座標による分類を示す。原土は砂まじり細粒土 (F-S)、鉄鋼スラグは、砂質れき (GS) に分類され、鉄鋼スラグを混合することで、左下 (れき側) に近づくが、原土の細粒分は86%と非常に高く、仮に鉄鋼スラグを33%混合しても細粒分は59%程度の低減に留まる。このため、内部摩擦力による改善は限定的であり、固化強度の改善が求められる。

図13は実際に改良した地盤の断面である。下層が改良前の原土、上層が原土とスラグを混合した改良土である。ここで用いた原土は、九州地方に広く分布する黒ぼくである。黒ぼくは火山灰土と腐植物質で構成され、有機物の含有量が高い。また含水率が高い特徴を有しており、その性質から特殊土に分類され、セメント系改良材による改良効果が得られにくい土質として知られている¹²⁾。これは、黒ぼくが腐植物質を含んだ有機質土壌であり、フミン酸やフルボ酸などを多く含むことに起因する。これらの有機酸は、セメントの水和反応に必要なカルシウムイオン (Ca^{2+}) と反応し、不溶性の有機カルシウム塩を形成する。その結果、水和反応が進まず、セメ

表 4 原土および鉄鋼スラグの物理的特性
Table 4 Physical characteristics

	On site soil	Steelmaking slag
Soil particle density (Mg/m ³)	2.43	3.17
Moisture content (%)	109.3	6.2
Maximum grain size (mm)	9.5	37.5
Uniformity coefficient	—	25
Classification name of geomaterials	Fine-grained soil mixed with sand	Sand and gravel

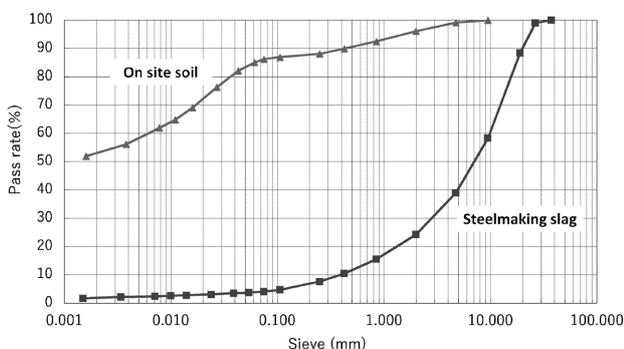


図11 粒径加積曲線
Fig.11 Grain size distribution curve

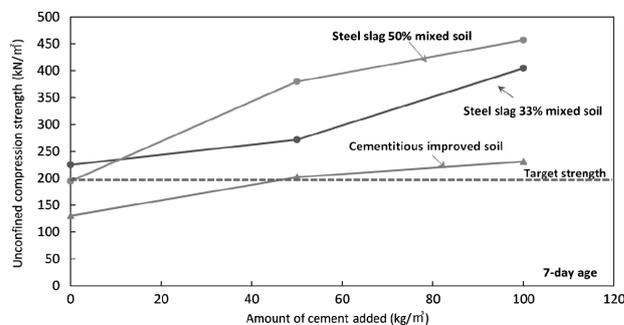


図14 一軸圧縮試験結果
Fig.14 Unconfined compression test results

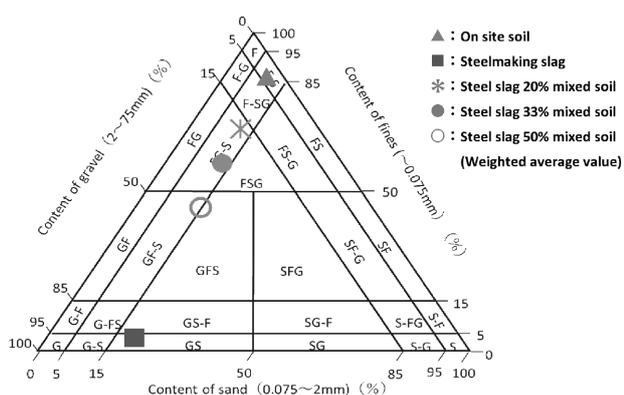


図12 原土および鉄鋼スラグの三角座標による分類
Fig.12 Classification of soils for engineering purposes

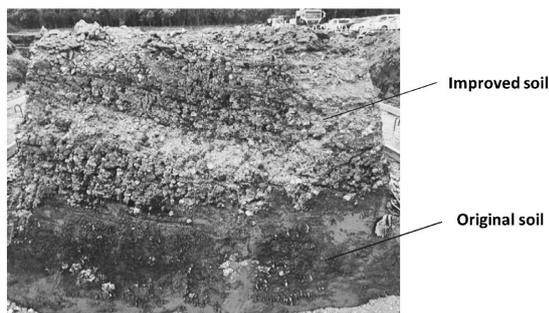


図13 改良した地盤の断面
Fig.13 Cross-section of improved ground

ントの主な強度発現成分である水和物 (C-S-H) のゲルが生成されにくくなる¹³⁾。いっぽう、鉄鋼スラグはアルカリ性を呈するため、土壌中の有機酸を中和するとともに、腐植のカルシウムイオン (Ca²⁺) との反応を抑制し、水硬性を発現するための水和反応を促進する。

(2) 混合率の決定

図14にセメントによる改良土およびセメントと鉄鋼

スラグを併用した改良土の一軸圧縮試験の結果を示す。

セメントのみの改良では、目標とする一軸圧縮強さ 200 kN/m² を達成するためには、50 kg/m³ が必要であったが、鉄鋼スラグを33%以上混合することで、セメントを配合せずとも材齢7日時点で目標強度を達成することを確認した。この結果から、鉄鋼スラグの混合率を33%に決定した。

今回の一軸圧縮試験に用いた供試体の材齢は7日である。そのため、水和反応は比較的進行していると考えられ、強度発現には内部摩擦角 (ϕ) に加え、粘着力 (c) の改善による効果も寄与していると考えられる。

さらに、鉄鋼スラグを配合した場合には、セメント配合比の増加に伴い、圧縮強度の向上効果が大きくなっている。これは、鉄鋼スラグを混合することにより、改質土のpHが改善され、セメントの水和反応が進行しやすくなったためと考えられる。

(3) 改良土の締固め性評価

原土に鉄鋼スラグを33%混合した改良土の締固め曲線を図15に示す。鉄鋼スラグ33%混合土は、原土と比較して最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) が高く、最適含水比 (W_{opt}) が低くなっていることがわかる。これは、細粒分の多い原土に対して、粗粒を多く含む鉄鋼スラグを混合することで、粒度分布が改善されたことに加え、鉄鋼スラグの水和反応による固化により、粒子同士がより強く固化し、締固め性が改善された結果と考えられる。

以上のことから、鉄鋼スラグはセメントでは改良が難しい黒ぼくのような特殊土に対して、物理的・化学的両面から有効に作用する改良材といえる。

2.2.3 長期強度特性

鉄鋼スラグには遅延反応性があり、材齢7日以降も時間とともに水酸化カルシウムやケイ酸カルシウムなどの反応生成物が増加し、長期的に固化が進行して強度の増

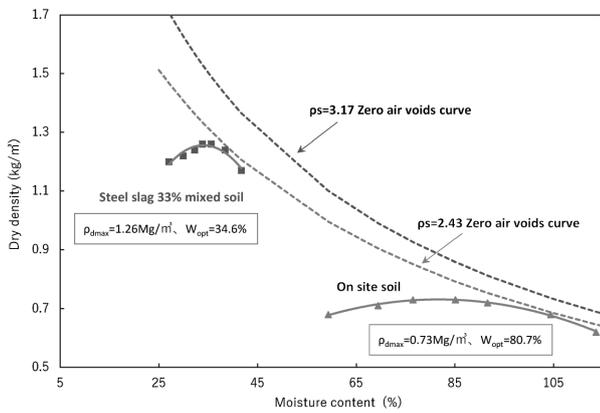


図15 締めめ曲線
Fig.15 Compaction curve

進が期待される。図16に原土に対し、4種類の製鋼スラグを体積比で50%混合した混合土の一軸圧縮強さの経時変化を示す。いずれの試料も、7日、28日と材齢の進行に伴い強度が増加することが確認された。この強度発現は、鉄鋼スラグに含まれる石灰分 ($f\text{-CaO}$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) が土中のシリカなどと反応することによるものである。材齢7日までの強度発現は、アルミネート相 (C_3A) およびエーライト (C_3S) から放出されるカルシウムイオン (Ca^{2+}) が、ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H ゲル) およびアルミン酸カルシウム水和物を形成することによると考えられる¹⁴⁾。さらに、長期的な強度発現には、水和反応で生成される水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) と土中成分とのポゾラン反応が寄与していると考えられる¹⁴⁾。

2.2.4 環境安全性

製鋼スラグを混合した際に、水和反応で生成される水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) は、水中でカルシウムイオン (Ca^{2+}) と水酸化物イオン (OH^-) に解離することでpHが12以上となり、改良土はアルカリ性を呈す。改良土表面のpHの経時変化を図17に示す。

pHは28日経過すると原土とほぼ同じpH9程度まで低下することがわかる。これは、改良土表面の水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) が空気中の炭酸ガス (CO_2) の作用により、炭酸化するためと考えられる。

2.3 今後の課題

改良土の強度発現には、原土の性状、スラグの性状、および改良土の養生条件が大きく影響する。原土の性状としては、含水比、細粒分含有率、有機分含有量、さらには組成・成分が関与しており、これらの要素が改良の効果を左右する重要な因子となる。スラグの性状においては、Ca含有量や粒度分布が強度発現に影響をおよぼし、適切な調整が求められる。また、原土とスラグの混合量や混合後の改良土の養生温度も重要な因子であり、適切な養生条件の設定が強度の向上に寄与する。今後は、これらの因子が強度発現におよぼす影響を詳細に検討し、その関係性を明らかにすることが、地盤改良のさらなる普及に向けた重要な課題となる。

むすび 鉄鋼スラグは、省資源・省エネルギー・ CO_2 削減の観点から、環境負荷の低減に寄与する建設資材とし

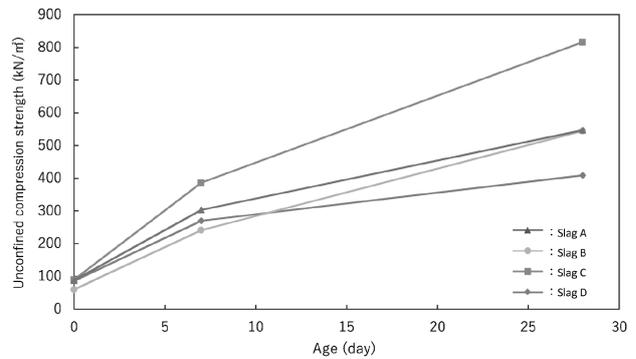


図16 一軸圧縮強さの経時変化
Fig.16 Change over time in unconfined compression strength

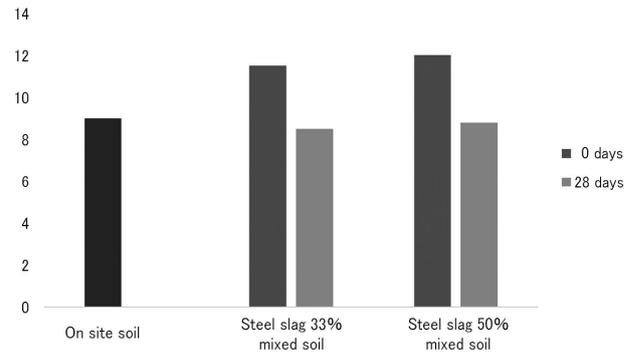


図17 pHの経時変化
Fig.17 Change over time in pH

て重要な役割を果たしている。とくに、国土強じん化対策においては、その特性を活かした地盤改良材としての利用が期待される。鉄鋼スラグの利活用を促進することで、国土強じん化の推進に加え、天然資源の保全や循環型社会のさらなる発展にも寄与し、持続可能な社会の構築に貢献することができる。今後も、鉄鋼スラグの利用拡大に向けて、さらなる研究・開発の推進と実用化に向けた取り組みを継続していくことが求められる。

参考文献

- 植松尚大ほか. 第50回地盤工学研究発表会発表講演集. 2015, p.641-642.
- 片岡沙都紀ほか. Kansai Geo-Symposium 2015 論文集. 2015, p.25-30.
- 片岡沙都紀ほか. 第13回地盤改良シンポジウム論文集. 2018, p.59-64.
- 李俊憲ほか. 第58回地盤工学研究発表会発表講演集. 2023, ROMBUNNO. 13-12-4-03.
- 片岡沙都紀ほか. 地盤改良シンポジウム論文集(CD-ROM). 2022, ROMBUNNO. 03-02.
- 堀田崇由ほか. 第60回地盤工学研究発表会. 2025.
- 鉄鋼スラグ協会. 環境資材 鉄鋼スラグ. <https://www.slg.jp/>. (参照 2025-06-23).
- 兵庫県. 鉄鋼スラグ混合土を用いた軟弱土改良の設計施工マニュアル. 2021.
- 社団法人土質工学会. 土質工学ハンドブック. 1982.
- 公益社団法人地盤工学会. 土の締めめ. 2012.
- 公益社団法人日本道路協会. 舗装設計便覧. 2006.
- 原田正之ほか. 土木学会論文集 E1 (舗装工学). 2013, Vol.69, No.3, I-215~I-219.
- 一般社団法人セメント協会. セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第4版). 2012.
- 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 「転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法」技術資料. 2008.

R&D 神戸製鋼技報掲載 建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション 関連文献一覧表 (Vol.65, No.1～Vol.72, No.2)

Papers on Advanced Technologies for KOBELCO's Materials and Solutions for Architecture and Civil Engineering in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.65, No.1～Vol.72, No.2)

	卷/号
●KOBELCOグループのグリーン社会への貢献を支えるコア技術…………… 出浦哲史	72/2
Core Technologies Supporting Kobelco Group's Contributions to Green Society	Dr. Tetsushi DEURA
●安全・安心なまちづくり・ものづくりに貢献するコア技術…………… 岡崎喜臣	72/2
Core Technologies Ensuring Safety and Security in Community Development and Manufacturing	Yoshitomi OKAZAKI
●未来へのソリューション提供とコア技術…………… 梶原 桂	72/2
Kobelco Group's Core Technologies: Providing Solutions for Future Society	Dr. Katsura KAJIHARA
●安全・安心で持続可能な社会を支える新素材の創出に貢献する金属組織制御技術…………… 村上俊夫	72/2
Metallographic Structure Control Technology Contributing to Development of New Metallic Materials to Meet Social Demands	Dr. Toshio MURAKAMI
●還元鉄製造技術を活用したグリーン社会への貢献…………… 王 昌麟	72/2
Utilizing Reduced-Iron Manufacturing Technology to Contribute to Green Society	Shourin OH
●中厚板向け溶接ロボットシステムと前工程自動化新技術…………… 長島 稔ほか	72/1
Medium-to-thick Plate Welding Robot System and New Automated Pre-process Technology	Minoru NAGASHIMA et al.
●溶接ロボットシステム導入を推進するDX技術 …………… 福永敦史ほか	72/1
Digital Transformation (DX) Technology to Promote Adoption of Welding Robot Systems	Atsushi FUKUNAGA et al.
●鉄骨溶接ロボットシステムの新商品紹介…………… 戸川貴雄ほか	72/1
Robotic Welding System with New Equipment for Steel Structures	Takao TOGAWA et al.
●厚肉角形鋼管のロボット溶接部の品質確認…………… 伊藤冬樹ほか	72/1
Characteristics of Robot Welding Joint with Heavy-thickness Press Columns	Fuyuki ITO et al.
●建築用予熱フリー型KCLA440鋼の性能 …………… 安岡佑樹	72/1
Performance of Preheating-free Type KCLA440 Steel for Construction	Yuki YASUOKA
●鋼板溶接熱影響部の相変態モデル構築とじん性予測…………… 井元雅弘ほか	71/1
Construction of Phase Transformation Model for Heat-affected Zone of Steel Plate Welds and Toughness Prediction	Masahiro INOMOTO et al.
●ミドレックスプロセス－その進化と脱炭素製鉄への展望－…………… ビンセント シェヴリエほか	70/1
MIDREX [®] Process: Bridge to Ultra-low CO ₂ Ironmaking	Dr. Vincent CHEVRIER et al.
●ジオポリマによる放射性廃棄物の固化技術の開発…………… 宮田賢作ほか	70/1
Geopolymer Technology for Solidifying Radioactive Waste	Kensaku MIYATA et al.
●加古川製鉄所における資源循環への取組…………… 山中量一ほか	69/2
Effective Utilization of Byproducts at Kakogawa Works	Ryoichi YAMANAKA et al.
●溶接ロボットシステムにおけるICT活用…………… 小池 武ほか	68/2
Applications of ICT to Robot Welding System	Takeshi KOIKE et al.
●ハイブリッドショベル用電動機の損失解析…………… 筒井 昭ほか	68/1
Loss Analysis of Electric Motors in Hybrid Excavator	Akira TSUTSUI et al.
●排出ガス規制に伴うショベル、クレーンの開発…………… 岡 秀和	68/1
Development of Hydraulic Excavators and Cranes Meeting New Exhaust Emission Regulations	Hidekazu OKA
●油圧ショベルを応用した商品開発への取り組み…………… 山崎隆典	68/1
Approach for Developing Products Applying Hydraulic Excavators	Takanori YAMASAKI

●20t級ハイブリッドショベルSK200H-10の開発	山崎洋一郎ほか	68/1
Development of 20-tonne Class Hybrid Excavator, SK200H-10	Yoichiro YAMAZAKI et al.	
●10型重機ショベルの省エネ技術	南條孝夫ほか	68/1
Energy Saving System for Heavy-duty Hydraulic Excavator, Series-10	Takao NANJO et al.	
●溶接材料およびロボットシステムの展望	清水弘之ほか	67/1
Prospects for Welding Consumables and Robot Systems	Hiroyuki SHIMIZU et al.	
●建築市場の需要に対応した溶接材料の展開	横田泰之	67/1
Development of Welding Consumables Responding to Demand in Construction Market	Yasuyuki YOKOTA	
●鉄骨H柱溶接ロボットシステム	岸川浩久ほか	67/1
Robot System for Welding H-beam Steel Frames	Hirohisa KISHIKAWA et al.	
●中厚板向け溶接ロボットシステムの紹介	武富康宏ほか	67/1
Robotic Welding System for Mid-to-heavy Gauge Plate Structures	Yasuhiro TAKETOMI et al.	
●大入熱サブマージアーク溶接装置の最新技術	安原拓也ほか	67/1
Latest Technology in Welding Equipment for High-heat-input SAW	Takuya YASUHARA et al.	
●新型アーク溶接ロボット	湊 達治ほか	67/1
New Arc Welding Robots	Tatsuji MINATO et al.	
●インフラ鋼材の耐食性評価解析技術	中山武典	65/1
Advanced Techniques for Analyzing Corrosion Resistance of Steels for Infrastructure	Dr. Takenori NAKAYAMA	
●ロングライフ塗装用鋼板 (エコビュー™)	湯瀬文雄ほか	65/1
Steel Plate with Long-life for Painted Bridges (Eco-View)	Dr. Fumio YUSE et al.	
●疲労き裂の進展抑制による鋼構造物の延命化技術	河本恭平ほか	65/1
Technology for Prolonging Life of Steel Structures by Restraining Fatigue Crack Growth	Dr. Kyohei KAWAMOTO et al.	
●溶接継手疲労強度改善溶接施工法と溶接材料	宮田 実ほか	65/1
Welding Process and Consumables Aimed at Improving Fatigue Strength of Joints	Minoru MIYATA et al.	
●バックングレス・裏波延長による鉄骨用耐震性向上溶接工法	河西 龍ほか	65/1
New Welding Method for Improving Earthquake Resistance by Backingless and Extended Penetration Bead Welding	Ryu KASAI et al.	
●スカラップ底補強による鉄骨用耐震性向上溶接施工法	鈴木励一ほか	65/1
New Welding Method for Improving Earthquake Resistance by Reinforcing Around Toe of Scallops	Reiichi SUZUKI et al.	
●重金属浄化用鉄粉「エコメル™」53NJの性能	飯島勝之ほか	65/1
Adsorptive Properties of "ECOMEL™" 53NJ for Heavy Metal Compounds	Katsuyuki IJIMA et al.	

レーザドップラー振動計による非接触でのケーブル張力測定技術

福井康大*1

*1 神鋼検査サービス(株) 技術部

まえがき = 昨今、道路やトンネル、橋梁などの社会インフラ設備の老朽化が深刻な問題となっている。とくに高度経済成長期に集中的に整備されたインフラが、今後急速に老朽化することが懸念されている¹⁾。ケーブルで橋桁を支える斜張橋や吊り橋は、ケーブル張替えに多大なコストが発生することや、高所であるがゆえに近接目視点検が困難な箇所があることなどが課題として挙げられている。また、国内には約1,000橋²⁾が存在し、建設後20年以上経過したものは約500橋³⁾存在しているため、検査計測や保守、長寿命化への取り組みが求められている。このようなニーズの高まりに応えるために、当社(神鋼検査サービス株式会社)では新たな手法として、レーザドップラー振動計を利用した非接触型のケーブル張力測定技術を提案している。本技術を用いることで、斜張橋の点検において、ケーブルの劣化状況を問わずケーブル張力の計測が可能となる。よって、本技術は橋梁全体の状態やケーブルの変状を把握する一助としてお客様に活用いただくことができる。

1. 測定原理

本技術は、斜張橋のケーブルやPC橋の外ケーブルなどのケーブルに対して、レーザドップラー振動計(図1)を用いている。この振動計は離れた場所からケーブルに接触せずにケーブルの振動を計測できる。そのデータをもとにFFT解析を行い、ケーブル固有振動数を算出する。張力算出は、株式会社神戸製鋼所が開発した以下の張力算出式を適用する³⁾。

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2$$

ここに、 i : モード次数、 f_i : 固有振動数、 EI : 曲げ剛性、 T : 張力、 ρA : 単位重量、 L : ケーブル長さである。これにより得られた複数の固有振動数とその次数、既知のケーブルの長さ、単位重量からケーブル張力を求めることができる。

2. 特徴

従来では、ケーブルに加速度計を取り付けることで振動を計測していた。また、ハンマーなどによりケーブルに打撃を加えて振動を強制的に発生させる方法が使われている。本技術はレーザドップラー振動計を用いて非接触での計測を行うことが可能であり、ケーブルに



図1 レーザドップラー振動計 (短距離タイプ)



図2 レーザドップラー振動計 (長距離タイプ)

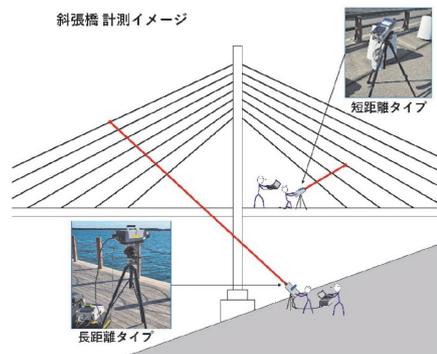


図3 計測イメージ

加速度計を取り付ける必要がない。また、車両の通行や風による橋梁の常時微動での計測を行うことができる。以上のことから、加速度計の取り付けや強制加振のための車線規制など手間を省くことが可能となった。

また、レーザドップラー振動計には2種類あり、短距離タイプ(図1)は最大15 m、長距離タイプ(図2)は最大550 mの距離まで離れて計測可能である。短距離タイプは橋の歩道や中央分離帯などからケーブルにレーザを当てる方法である。長距離タイプは橋全体を見渡せる河川敷や港の埠頭など離れた場所から計測ができる方法である(図3)。よって、長距離タイプは災害時の安全確認にも有効な手法と言える。

参考文献

- 1) 国土交通省. 社会資本の老朽化対策情報ポータルサイト インフラメンテナンス情報, 2016. https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html. (参照2025-05-16)
- 2) 国土交通省. 道路統計年報2024 橋梁の現況. <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2024/nenpo03.html>. (参照2025-05-16)
- 3) 山極伊知郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.2, p.12-15.

脚注) 一般社団法人 日本橋梁建設協会「橋梁年鑑データベース2024」から推定した数である。

高耐食めっき鋼板「KOBEMAG®」

梅井健司*1・古田 明*2・久野彰士*2

*1 鉄鋼アルミ事業部門 自動車板材商品技術部

*2 鉄鋼アルミ事業部門 薄板ユニット 薄板商品技術室

1. はじめに

近年、建築・土木における構造用部材をはじめ、自動車、電機など幅広い分野にて、製品の高耐久化、長寿命化を目的に優れた耐食性能を有する溶融Zn-Al-Mg合金めっき鋼板の採用が進んでいる。当社は、2017年度に日新製鋼株式会社（当時。以下、日新製鋼という）が生産する溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板（日新製鋼製品名「ZAM®」）について、OEM製品販売、およびその後のめっき委託加工に関する契約を日新製鋼と締結し、本製品を当社ブランド「KOBEMAG®」として販売開始した。本稿では「KOBEMAG®」の特徴と耐食性能について紹介する。

2. 製品の特徴

「KOBEMAG®」は、Zn-6%Al-3%Mgの合金めっき層を持つ高耐食めっき鋼板である（図1）。「KOBEMAG®」は神戸製鋼加古川製鉄所にて熱間圧延工程まで製造され、その後日本製鉄株式会社・日鉄鋼板株式会社にて酸洗、冷間圧延、めっき工程を行うことにより製造されている（図2）。したがって、めっきの物理特性、耐食性などの性

質・性能に関しては、日本製鉄株式会社が「ZAM®」として製造販売する製品と同等である¹⁾。また、「KOBEMAG®」としても、JIS認証および「建築基準法第37条第二号」の国土交通大臣認定（表1）を取得している。

3. 耐食性能

「KOBEMAG®」と溶融亜鉛めっき（GI）の平面部の塩水噴霧試験2,500時間後の表面外観を図3²⁾に示す。溶融亜鉛めっき（GI）は全面に赤錆（さび）の発生が認められるが、「KOBEMAG®」はめっき層からの白錆発生しか認められない。また、図4³⁾に一般環境、海岸環境における暴露試験の結果を示す。一般環境、海岸環境ともに暴露5年後の「KOBEMAG®」のめっき層の腐食減量は溶融亜鉛めっき（GI）の3分の1程度となっており、優れた耐食性能を示している。「KOBEMAG®」のめっき表面には、微細で緻密なAlとMgを含む亜鉛腐食生成物が長期間安定に存在し、かつ保護性に乏しいとされるZnOの生成が抑制されることにより、優れた耐食性能を発現することが報告されている⁴⁾。

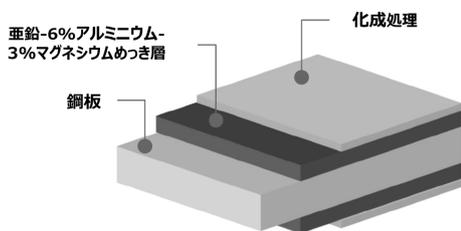


図1 製品構成

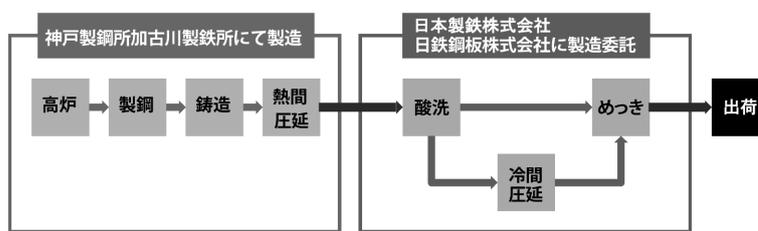


図2 製造工程

表1 「建築基準法第37条第二号」認定

規格名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	基準強度 (N/mm ²)	めっきの付着量 表示記号	認定番号	認定取得日
KMAG-H400-K	1.6 ≤ t ≤ 6.0	600 ≤ w ≤ 1325	280	K06~190	MSTL-0536	令和2年2月26日
KMAG-H490-K	1.6 ≤ t ≤ 3.2	600 ≤ w ≤ 1325	345	K06~190	MSTL-0538	令和2年2月26日
KMAG-C400-K	0.8 ≤ t ≤ 2.3	600 ≤ w ≤ 1325	280	K06~190	MSTL-0535	令和2年2月26日
KMAG-C490-K	1.6 ≤ t ≤ 2.0	600 ≤ w ≤ 1325	345	K06~190	MSTL-0537	令和2年2月26日

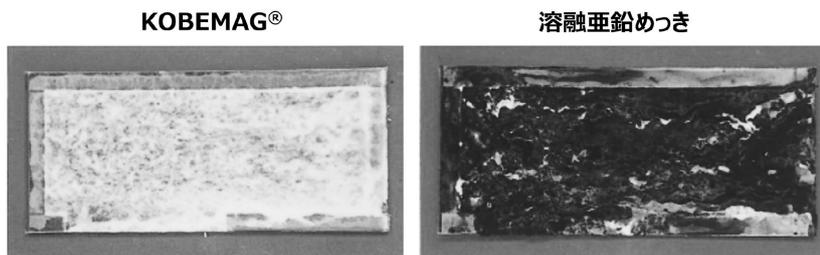


図3 平面部の耐食性試験結果 (塩水噴霧試験2,500時間後) めっき付着量: 90/90 (g/m²)

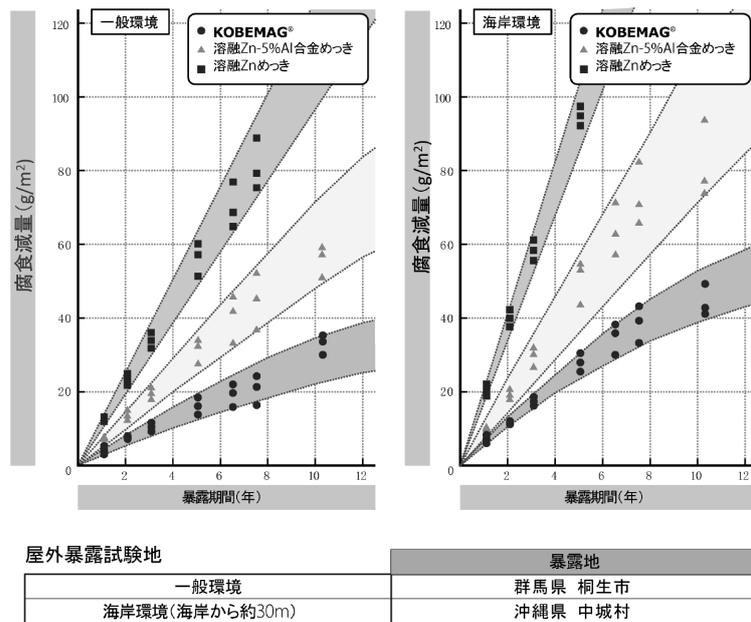


図4 屋外暴露試験結果

4. おわりに

「KOBEMAG[®]」は、優れた耐食性能を有するとともに耐疵付き性、高加工性といった特長も有することより、住宅、建築、土木における構造用部材をはじめ、電機、自動車など幅広い分野の製品への適用拡大が期待されている。当社は、「KOBEMAG[®]」の自社一貫生産を2029年度に開始する計画として、加古川製鉄所の既存溶融亜鉛めっき鋼板設備の改造を中心とした設備投資の実施を2024年11月に決定した⁵⁾。

参考文献

- 1) 日本製鉄株式会社. 「溶融Zn-Al-Mg合金めっき鋼板ZAM[®]」総合カタログU110_09_202505f (2025年05月発行). https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/U110.pdf
- 2) 神戸製鋼所. KOBEMAG[®] 製品紹介サイト. <https://kobemag.kobelco.co.jp/about.html#a01> (参照2025-05-16)
- 3) 神戸製鋼所. KOBEMAG[®] 製品紹介サイト. <https://kobemag.kobelco.co.jp/quality.html#a05> (参照2025-05-16)
- 4) 浦中将明ほか. 日新製鋼技報. 2011, No.92, p.9-19.
- 5) 神戸製鋼所. 加古川製鉄所におけるKOBEMAG[®]の自社一貫生産化を目的とした設備投資について. https://www.kobelco.co.jp/releases/1215535_15541.html, (参照2025-04-22)



Business Field

■ Steel & Aluminum

- Steel Sheets
- Aluminum Flat Rolled Products
- Wire Rods and Bars
- Steel Plates

■ Advanced Materials

- Steel Casting and Forging
- Aluminum Castings and Forgings
- Titanium
- Aluminum Extrusions
- Suspensions
- Copper Sheets
- Steel Powder

■ Welding

- Robots and Welding Power Sources
- Welding Materials

■ Machinery

- Isostatic Pressing (IP) Equipment
- PVD Coating Equipment
- Tire and Rubber Machinery
- Plastic Processing Machinery
- Steelmaking Machinery & Rolling Mills Plant
- Non-Standard Compressors
- Heat Exchangers & Vaporizers
- Standard Compressors & Chillers

■ Engineering

- Direct Reduced Iron field
- Advanced Urban Transit System
- Environmental Engineering

■ Construction Machinery

■ Electric Power

URL : Kobe Steel, Ltd Website, "Products"
<https://www.kobelco.co.jp/english/products/>

QR code :



“QR Code” is a registered trademark of DENSO WAVE INCORPORATED.



主要事業内容

■鉄鋼アルミ

- 薄板
- アルミ板
- 線材・条鋼
- 厚板
- 鉄鋼スラグ

■素形材

- 鋳鍛鋼
- アルミ鋳鍛
- チタン
- アルミ押出
- サスペンション
- 銅板
- 鉄粉

■溶接

- 溶接システム
- 溶接材料

■機 械

- 等方圧加圧装置（IP：Isostatic Press）
- PVDコーティング装置（高機能商品）
- タイヤ・ゴム機械
- 樹脂機械
- 鉄鋼・非鉄用機械
- 非汎用圧縮機（回転機）
- 熱交換器／気化器（機器）
- 汎用圧縮機／冷熱機器

■エンジニアリング

- 直接還元鉄関連分野
- 原子力プラント関連
- 都市交通システム
- エネルギー・化学プラント
- 水処理
- 廃棄物処理・リサイクル
- 医薬・ファインケミカル機械
- 冷却塔
- 水電解式高純度水素発生装置

■建設機械

■電 力

URL： 神戸製鋼ホームページ 技術・製品情報
<https://www.kobelco.co.jp/products/>

QRコード：



QRコードはデンソーウェーブの登録商標です。

編集後記

<特集：建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション>

*社会が大きく変化し、そのスピードが増すなか、とりわけ建築・土木分野においては、頻発する自然災害への対応、少子高齢化による担い手不足、温室効果ガス削減といった課題が立ちはだかっています。本号では、これらの課題に立ち向かう最新技術について、当社グループが掲げるマテリアリティ（重要課題）に沿って紹介しました。

*当社グループは、鉄鋼アルミ・素材系・溶接の「素材系事業」、機械・エンジニアリング・建設機械の「機械系事業」、さらに、製鉄所の自家発電操業で永年培った技術・ノウハウを活かした「電力事業」の三つの事業領域を柱としています。本号の編集を通じて、当社グループの素材やソリューションが多岐にわたり、多くのお客様を通じて社会の課題解決に貢献していることを改めて認識しました。本号で紹介した技術を簡単に振り返ります。

*マテリアリティ＝安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献では、各種TMCP鋼・780 MPa級鋼材の大入熱溶接技術、高降伏点圧延鋼材SBHSシリーズ、高湿潤環境対応型耐食鋼板『エコビュープラス[®]』、耐疲労鋼板『EX-FacterTM』を紹介しました。薄鋼板では高耐食めっき鋼板『KOBEMAG[®]』、鋼線では伝統木造建築向け『ステルスプレース[®]』、橋梁の補強対策として外ケーブル工法『RE-SETケーブルシステム』を紹介し

ました。接合技術では、各種溶接材料のラインナップを取り上げました。

*マテリアリティ＝人と技術で繋ぐ未来へのソリューション提供では、鉄骨梁の横座屈補剛工法、アンダーマツチ溶接による780 N/mm²級箱形断面柱継手の耐力評価、700 N/mm²級アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能を紹介しました。また溶接技術では画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステム、溶接システムではBIM/CADデータ連携による自動化溶接の取り組みなどを紹介しました。

*マテリアリティ＝グリーン社会への貢献では、環境負荷低減および資源循環を目的に地盤改良材としての鉄鋼スラグの利活用技術などを紹介しました。

*過去のR&D神戸製鋼技報を振り返ると、建築・土木分野としての特集は本号が初めてであり、土木分野に特化したVol.65, No.1 / Apr. 2015通巻第234号 インフラ系～安全・安心を求めて～からも10年が経過しています。当社グループでは、建築・土木分野における横串活動を強化するため建材WGを設置し、「お客様へKOBELCOグループとして、建築・土木の専門技術を用いたソリューションを継続的に提供できている状態」を目指して取り組みを進めています。今後、建材WGの活動をさらに強化し、継続的に建築・土木分野における最新技術を発信していきたいと考えています。

(高田武之)

次号予告

<特集：鉄鋼アルミ素材におけるKOBELCOのCO₂削減貢献技術・製品>

*当社グループは、鉄鋼アルミ・素材系・溶接の「素材系事業」、機械・エンジニアリング・建設機械の「機械系事業」、さらに、製鉄所の自家発電操業で永年培った技術・ノウハウを活かした「電力事業」の三つの事業領域を柱としてお客様・社会の課題解決に貢献しています。

*とくに温暖化問題が世界的・社会的課題として深刻かつ大きくクローズアップされる中、カーボンニュートラル（以下、CNという）に対するモメンタムが急激に拡大しており、KOBELCOグループでは、CN達成に向けて鉄鋼事業を中心とした「生産プロセスにおけるCO₂削減」と、ハイテン・特殊鋼・厚板、アルミ、溶接、機械、エンジニアリングなど独自の「技術・製品・サービスによるCO₂排出削減への貢献」の両側面から2030年目標、2050年ビジョンを設定して、これらの実現に取り組んでいます。

*2030年が目前に迫る中、お客様および社会に対してKOBELCOのCN貢献への取り組みを総括し、ご認識をいただく重要な時期にあると考え、次号では当社グループの「製鉄プロセス」と「技術・製品・サービス」におけるCNに向けた技術の取り組みを中心に紹介致します。

*具体的には、MIDREX[®]プロセスにおける直接還元鉄製造法をはじめ、高炉へのHBI超多配合装入操業技術や製鋼工程におけるリサイクル利用拡大技術、環境負荷低減および資源循環を目的とした鉄鋼スラグの利活用技術によるCO₂削減への貢献を紹介致します。またアルミでは、リサイクル技術の高度化によるCO₂削減への貢献を紹介致します。

*つぎに、当社では低CO₂高炉鋼材“Kobenable[®] Steel”と低CO₂アルミ製品“Kobenable[®] Aluminum”の商品化とブランドディングを手掛けており、ハイテン・特殊鋼やアルミの高強度化による自動車部品の軽量化を通じたCO₂削減への貢献を紹介致します。そして船舶・エネルギー分野ではCO₂や液体アンモニアの搬送・貯蔵が目ざされており、低温タンク向け大入熱溶接対応9%Ni鋼をはじめ、低温低圧仕様タンクに合致した溶接材料、液体アンモニア環境下でのSCC感受性低減や溶接施工性向上を目的とした溶接材料について紹介致します。

*上述のとおり、次号では鉄鋼・アルミ素材におけるCN課題に対し、当社グループが取り組む最新技術について紹介いたします。どうぞご期待ください。

(永濱睦久)

<<編集委員>>

委員長	西野都
副委員長	杵淵雅男
委員	池田英生
	佐藤統宣
	佐成弘毅
	杉立宏志
	鈴木一也
	高久真也
	高田武之
	出浦哲史
	中久保昌平
	永濱睦久
	本家浩一
	山本兼司
	渡辺憲一
	<五十音順>
本号特集編集委員	高田武之

R&D[®] 神戸製鋼技報

第74巻・第2号（通巻第253号）

2025年11月28日発行

年2回発行

非売品 <禁無断転載>

発行人 西野 都

発行所 株式会社 神戸製鋼所
技術開発本部 企画管理部
〒651-2271
神戸市西区高塚台1丁目5-5

印刷所 福田印刷工業株式会社
〒658-0026
神戸市東灘区魚崎西町4丁目
6番3号

お問合わせ先 コベルコビジネスパートナーズ(株)
R&D神戸製鋼技報事務局
〒651-0073
神戸市中央区脇浜海岸通2丁目2-4
(株)神戸製鋼所 神戸本社ビル
FAX(078)261-7843
rd-office@kobelco.com

2025年 11月 28日

各 位

(株)神戸製鋼所
技術開発本部

「R & D神戸製鋼技報 Vol.74, No.2」お届けの件

拝啓、時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

また平素は、格別のご高配を賜り厚くお礼申し上げます。

このたび、「R & D神戸製鋼技報 Vol.74, No.2」を発行しましたのでお届け致します。
ご笑納のうえご高覧いただきましたら幸甚です。

なお、ご住所・宛先名称などの訂正・変更がございましたら、下の変更届に必要な事項を
ご記入のうえ、FAXあるいはE-mailにてご連絡いただきますようお願い申し上げます。

敬 具

コベルコビジネスパートナーズ(株)
R&D神戸製鋼技報事務局 行
FAX (078)261-7843
rd-office@kobelco.com

本誌お送り先変更届

	変 更 前	変 更 後
貴社名		
ご所属		
ご住所	〒	〒
宛名シール 番号	No. _____ ←(封筒の宛名シール右下の番号をご記入下さい)	
備 考		
本紙記入者	お名前：	E-mail： TEL：

RE: Delivery of R&D Kobe Steel Engineering Reports, Vol.74, No.2

Dear Sir or Madam,

We would like to express our sincere gratitude for your continued support and cooperation.

Attached please find Vol.74, No. 2 of the R&D Kobe Steel Engineering Reports.

If there is any correction or change of address, contact name, etc., please fill in the required information in the change notification below and contact us by fax or by e-mail.

Best wishes for your continued success,

Attention:

R&D Office, Kobe Steel Engineering Reports

Kobelco Business Partners Co., Ltd.

FAX: +81-78-261-7843

E-mail: rd-office@kobelco.com

Change Notification

	Before change	After change
Company name		
Department		
Address		
Address sticker number	No. _____ ← (Please fill in the right lower number on the address sticker)	
Remarks		
Person making this entry	Name :	E-mail :