

(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

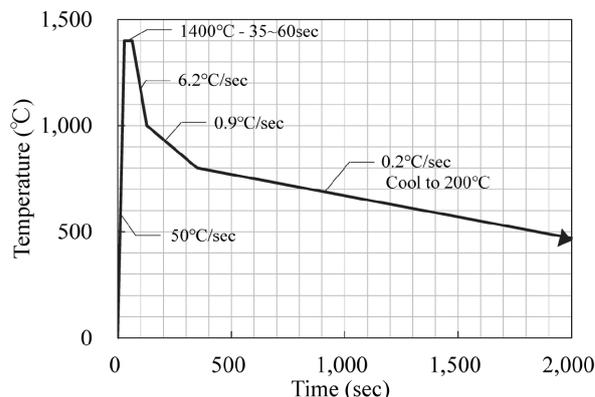


図1 ESWを想定した熱履歴

Fig.1 Thermal history assumed for ESW

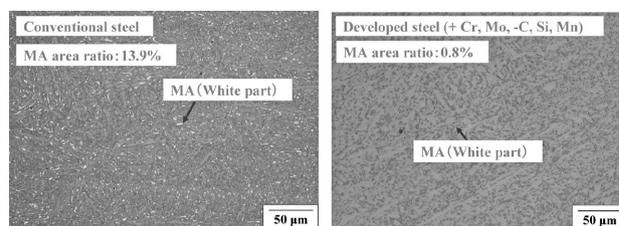


図2 CrおよびMoの増加とC, Si, Mnの減少がMA抑制に与える影響

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%

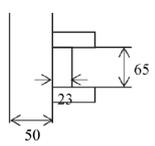
表7 y形溶接割れ試験結果

Table 7 Results of Y-groove cracking test

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

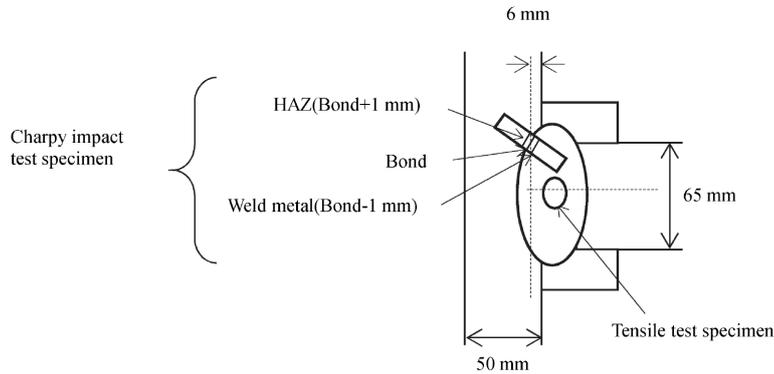


図3 試験片採取位置 (ESW)
Fig.3 Test specimen sampling position (ESW)

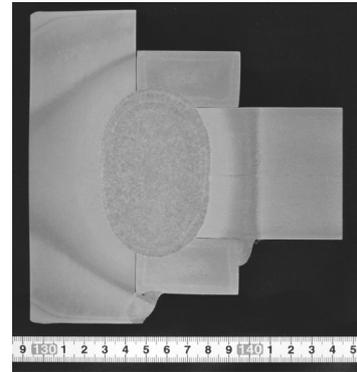
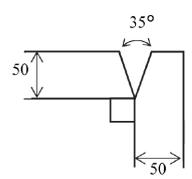


図4 ESW継手のマクロ写真
Fig.4 Cross-sectional macrostructure (ESW)

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

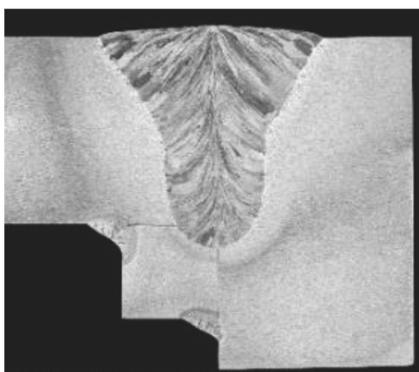


図5 SAW継手のマクロ写真
Fig.5 Cross-sectional macrostructure (SAW)

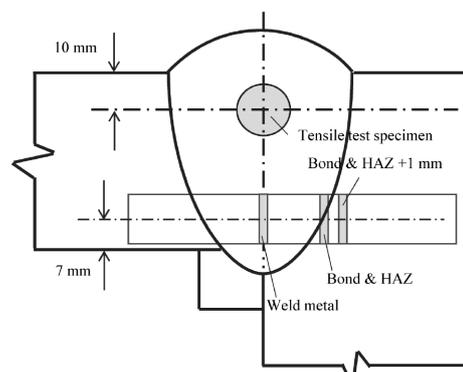


図6 試験片採取位置 (SAW)
Fig.6 Test specimen sampling position (SAW)

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.