

(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

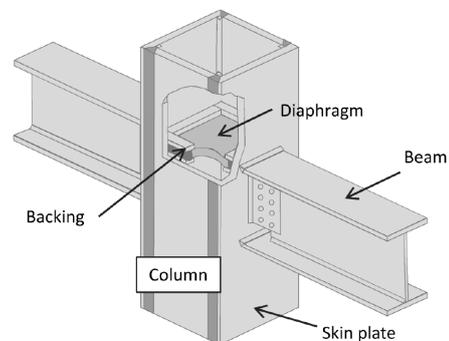


図1 建築鉄骨構造の模式図
Fig.1 Schematic diagram of architectural structure

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	J _{IC} (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			

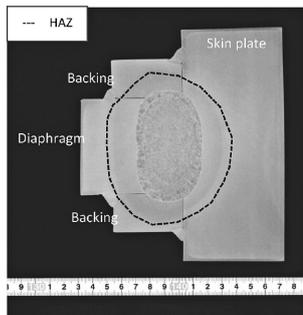


図2 ESWのマクロ組織

(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

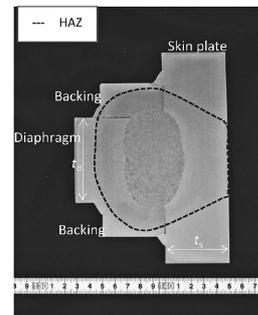


図3 ESWのマクロ組織

(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のほかにはセメントイト、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

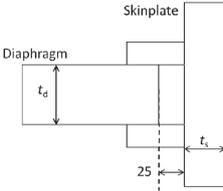
表7 Y形溶接割れ試験の溶接条件

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

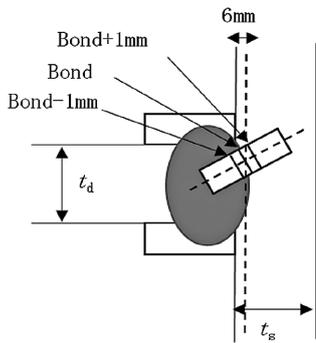


図4 シャルピー衝撃試験位置

Fig.4 Test positions for Charpy impact tests

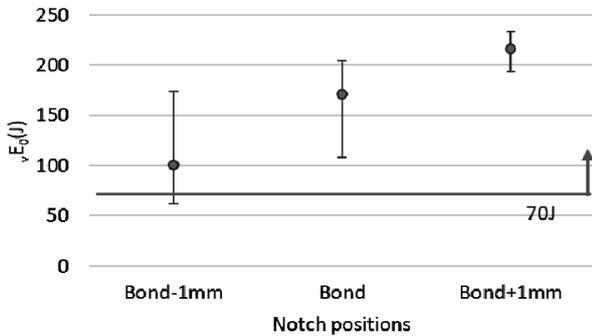


図5 シャルピー衝撃試験結果 (KCL A385C-ST)

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

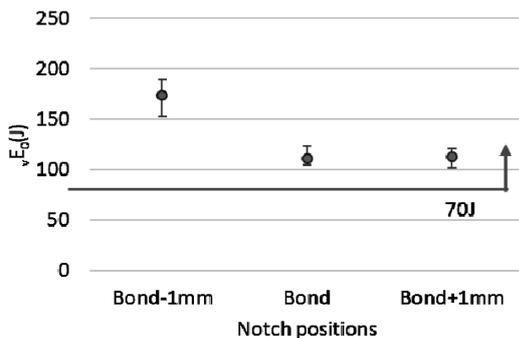


図6 シャルピー衝撃試験結果 (KCL A440C-ST)

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.