

(技術資料)

# 超高層ビル用高HAZ靱性TMCP鋼板

## TMCP Steel Plate with Excellent HAZ Toughness for High-rise Buildings



川野晴弥\*  
Haruya Kawano



柴田光明\*\*  
Mitsuki Shibata



岡野重雄\*\*  
Shigeo Okano



小林洋一郎\*\*  
Yoichiro Kobayashi



岡崎喜臣\*\*\*  
Yoshitomi Okazaki



畑野 等\*\*\*  
Hitoshi Hatano

Recently, improvement HAZ toughness under high heat input conditions for thick and high tensile steel plates for high-rise buildings has increased. Kobelco has developed an excellent new HAZ toughness technology based on Low-Carbon-Fine-Bainite. Based on this technology, KCL A325 and SA440 steel plates with excellent HAZ toughness under high heat input conditions (100kJ/mm) and excellent weldability were developed. These new steels will contribute to increased efficiency and safety in architectural construction.

まえばき = 阪神・淡路大震災における柱梁溶接部を中心にした鉄骨の脆性破断発生を契機として、鉄骨構造部材の脆性破壊に関する研究が進められ、梁端溶接部の必要靱性が提案されるなどの成果が報告されている<sup>1)</sup>。さらに、最近の超高層建築物設計においては、長寿命化の観点から梁端だけではなく柱の溶接部にも高い靱性値が要求される例が増えている<sup>2)</sup>。その理由として、長寿命設計においては供用期間中に遭遇する地震レベルとして、従来より再現期間の長い地震、すなわち、より大規模な地震を想定するため、鋼材にはより高い靱性値が求められる<sup>3)</sup>。

また、施工面では脆性破壊の起点になる溶接割れは絶対に防止しなければならず、建築工事標準仕様書(JASS6)やSA440の設計・溶接施工指針では、組立溶接のような低入熱溶接時のビード長の制約や予熱の実施、アークストライク部の補修などの管理が必要とされている。しかし、これらの管理は鉄骨製作の施工効率を低下させるため、その改善が求められている。

一方、超高層ビルにおいては、オフィスビルへの多様化するニーズに柔軟に対応するために無柱大空間の実現が必要となり<sup>2)</sup>、柱軸力の増大とともに使用する鋼材も厚肉・高強度化しており、板厚100mmに迫る厚肉の60キ口鋼を使用する例がある。

このような要求に対して、当社では厚肉・高強度と大入熱HAZ靱性および耐溶接割れ性の両立という難度の高い課題に取組み、全く新しいコンセプトによる組織制御技術を確立した。本報では、このコンセプトに基づいて開発した建築構造用490MPa級(KCL A325)および590MPa級(SA440)鋼板の特性を紹介する。

### 1. 開発目標

表1に母材特性の目標を示す。母材特性は、超高層建

表1 KCL A325 およびSA440 鋼板の目標特性  
Table 1 Target properties of KCL A325 and SA440 plates

Grade	Base metal properties					
	Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	EI. (%)	YR (%)	$v_{E_0}$ (J)
KCL A325	80	325 ~ 445	490 ~ 610	23	80	27
SA440	100	440 ~ 540	590 ~ 740	20	80	47

築物に使用される80mm以上の厚肉において、現行のKCL A325 およびSA440の規格を満足することを目標とした。

低入熱溶接時の耐溶接割れ性は、y型溶接割れ試験(JIS Z 3158に準拠)において予熱なしでも割れが発生しないことに加えて、JASS6で規定されている最小ビード長の40mm以下の溶接部でも、硬さが割れ発生防止の指標とされるHV350以下を目標とした。

溶接継手性能については、超高層建築物の柱部材に広く採用されている溶接4面ボックス柱角部のサブマージアーク溶接(SAW)、およびダイアフラム部のエレクトロスラグ溶接(ESW)を想定した。これらは、施工効率の点から60mm程度の厚鋼板を1パスで接合できる溶接として適用され、その入熱は100kJ/mmにも達し、造船や橋梁分野で適用されている溶接の2~10倍に相当する。継手靱性は、その溶接熱影響部において0でのシャルピ吸収エネルギーが、最近の高靱性要求として設定されることの多い70J以上を目標とした。

### 2. 開発の考え方

従来の高強度鋼の超大入熱溶接の熱影響部(HAZ: Heat Affected Zone)においては、入熱量の増大ともなう高温滞留時間の増加とその後の冷却速度の低下により生じる硬質の島状マルテンサイト(MA: Martensite-

\*鉄鋼部門 加古川製鉄所 厚板部 \*\*鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター \*\*\*技術開発本部 材料研究所

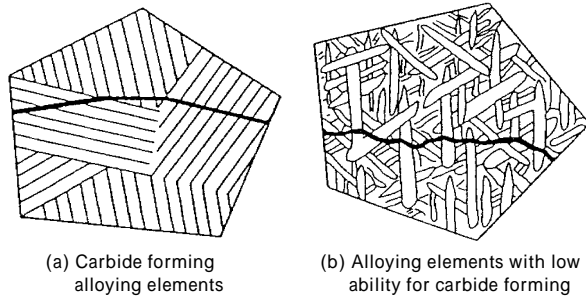


図 1 HAZ 組織に及ぼす添加元素の影響の模式図

Fig. 1 Schematic illustration showing the effect of alloying elements on microstructure in HAZ

Austenite constituent) の増加, およびベイナイト組織の著しい粗大化に起因して靱性が著しく劣化し, 前述した要求に対応することが容易ではなかった。従って, 超大入熱 HAZ 靱性改善には MA 低減およびベイナイト組織の微細化が有効と考えられる。

MA は上部ベイナイト生成時に未変態オーステナイト ( ) 中への炭素の濃化によって生成するため, 炭素量を低減することが MA 量の低減には有効である。また, 溶接割れ防止の点からも, 低炭素化は低入熱溶接熱影響部の硬化抑制に有効な手段である。

一方, ベイナイト組織の粗大化抑制の手段としては, 微細な TiN の分散による溶接時の 結晶粒の粗大化抑制が有効であるが<sup>4)</sup>, 前述のような超大入熱溶接部においてはその効果を十分に得られない。これまでに, 我々は強度確保のために添加する合金元素に着目し, その種類の選択により旧 粒内部の変態組織を制御し, HAZ 靱性を改善できることを見出している<sup>5)-7)</sup>。図 1 にその組織の違いを模式的に示す。具体的には, Nb, V, Mo などの炭化物生成能の強い元素(強炭化物生成元素)の添加は, 低炭素系においては方位の揃った粗大なベイナイト組織を生成する傾向があるが, Mn, Cu, Ni, Cr などの炭化物生成能の弱い元素(弱炭化物生成元素)はその傾向が小さく, 多数の方位の異なる微細なベイナイトブロックに分割されることを明らかにしている。そこで本開発では, 低炭素化に加えて, 弱炭化物生成元素を添加する微細低炭素ベイナイト組織(低カーボン多方位ベイナイト)

の活用による大入熱 HAZ 靱性と耐溶接割れ性改善を開発コンセプトとした。

さらに, 従来の製造方法では, 上記のような手段を用いて成分設計をしても強度低下は避けられないため, TMCP における冷却を最大限に活用し, 目標の母材強度を確保することとした。

### 3. 開発鋼の特性

上述の微細低炭素ベイナイト組織の活用による大入熱 HAZ 靱性の改善の考えに基づき, KCL A325 および SA440 鋼板を製造した。以下に, 開発鋼の母材性能, 耐溶接割れ性および超大入熱溶接継手性能を評価した結果を述べる。

#### 3.1 化学成分および製造方法

開発鋼の化学成分を表 2 に示す。開発鋼は, 従来鋼にくらべて炭素量を KCL A325 では半減, SA440 では 1/4 まで大幅に低減することにより, MA 低減と耐溶接割れ性の向上を図っており, 溶接割れ感受性の指標である  $P_{CM}$  はいずれも低下している。さらに, 前述したコンセプトに基づき, Mn, Cu, Ni, Cr などの弱炭化物生成元素を添加して強度確保を図っている。KCL A325 は熱間圧延・加速冷却を行い板厚 60, 80mm の鋼板を, SA440 は圧延・加速冷却に加えて二相域熱処理を含む熱処理を施し板厚 60, 100mm の鋼板を製造した。

#### 3.2 母材特性

開発鋼の母材の機械的特性を表 3 に示す。KCL A325 および SA440 鋼板とも厚肉において十分な引張強度を有すると同時に, 衝撃特性についても 0 のシャルビ吸収

表 3 開発鋼板の機械的特性の一例

Table 3 Examples of mechanical properties of developed steel plates

Grade	Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	$\sqrt{E_0}$ (J)
KCL A325	60	399	551	34	72	390
	80	408	557	34	73	321
	Spec.	325 ~ 445	490 ~ 610	23	80	27
SA440	60	485	636	32	76	313
	100	461	625	32	74	294
	Spec.	440 ~ 540	590 ~ 740	20	80	47

表 2 開発鋼板の化学成分の一例

Table 2 Examples of chemical compositions of developed steel plates

Grade	Steel	Thickness (mm)	Chemical composition (wt%)							$C_{eq}^{1)}$	$P_{CM}^{2)}$
			C	Si	Mn	P	S	Others			
KCL A325	Developed	60	0.07	0.15	1.35	0.007	0.002	Cu, Ni, Ti, B	0.32	0.17	
		80	0.07	0.15	1.54	0.007	0.002		0.35	0.18	
	Conventional	0.14	0.25	1.25	0.007	0.001	Nb, Ti	0.36	0.21		
	Spec.	> 50	0.20	0.55	1.60	0.035	0.035	-	0.40	0.26	
SA440	Developed	60	0.03	0.09	1.44	0.007	0.002	Cu, Ni, Cr, Ti, B	0.44	0.21	
		100	0.03	0.11	1.44	0.006	0.003		0.44	0.21	
	Conventional	0.12	0.24	1.44	0.007	0.001	Cu, Ni, Mo, V, Nb	0.42	0.23		
	Spec.	> 40	0.18	0.55	1.60	0.020	0.008	-	0.47	0.30	

<sup>1)</sup> $C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$  (%)

<sup>2)</sup> $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$  (%)

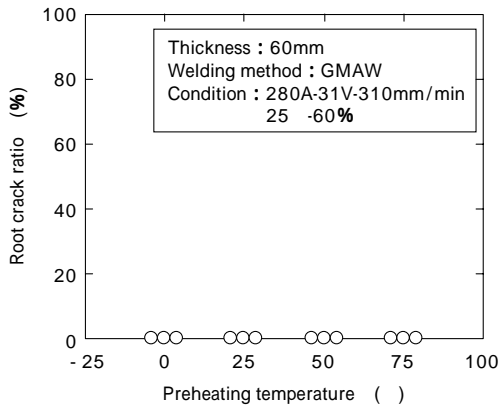


図2 SA440 開発鋼のy型溶接割れ試験結果

Fig. 2 y-groove cracking test results of developed SA440 steel plate

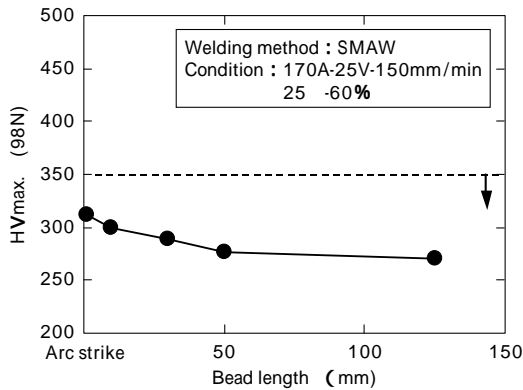


図3 SA440 開発鋼の最高硬さに及ぼすビード長の影響

Fig. 3 Effect of bead length on maximum hardness of developed SA440 steel plate

エネルギーは 290J 以上と良好な値を示している。

### 3.3 耐溶接割れ性

SA440 鋼板の y 型溶接割れ試験結果を図 2 に示す。従来の SA440 における組立溶接などの低入熱溶接では、低温割れ防止の観点から予熱が必要であったが、開発鋼は、予熱温度 0 でもルート割れの発生は防止できており、良好な耐割れ性を有している。SA440 鋼板の最高硬さ試験結果を図 3 に示す。溶接長を変化させて最高硬さ (JIS Z 3101 に準拠) を調査したところ、最も急熱急冷になるため硬化が大きいアークストライク条件でもピッカース硬さは HV312 と、目標とする HV350 よりも十分低い値であり、耐割れ性に優れていることが確認できた。

### 3.4 超大入熱溶接継手特性

板厚 60mm の各鋼板に対し、ボックス柱角部の SAW

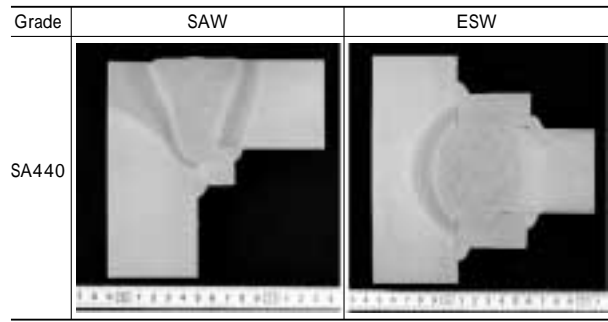


写真1 溶接継手の断面マクロ組織の一例

Photo 1 Examples of cross section macrostructure of welded joints

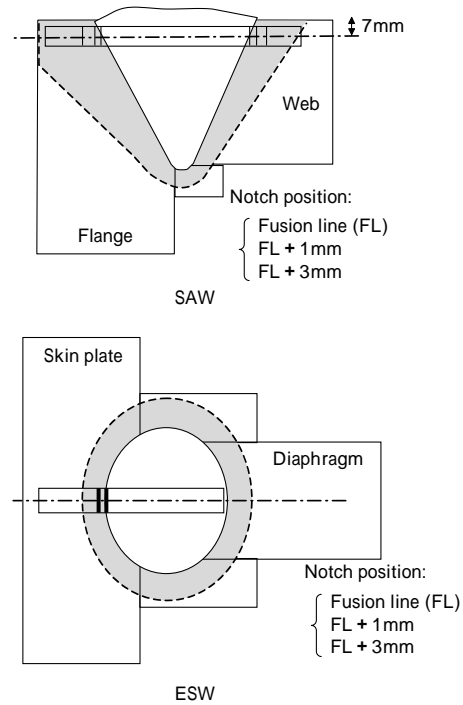


図4 溶接継手部のシャルピ衝撃試験位置

Fig. 4 Test positions for Charpy impact tests from welded joints

溶接およびダイアフラム部の ESW 溶接を行い、継手部の特性を確認した。表 4 に溶接条件を示す。溶接入熱は、SAW 溶接で 55kJ/mm 程度、ESW 溶接で 100kJ/mm 程度の超大入熱溶接となっている。

継手マクロ組織の一例を写真 1 に示す。ビード形状は良好であり、また、有害な欠陥は認められなかった。

各溶接継手部のシャルピ衝撃試験位置を図 4 に、各部位ごとの靱性分布を図 5 に示す。すべてのノッチ位置で

表4 溶接条件

Table 4 Conditions of welding

Welding method	Grade	Thickness (mm)	Welding consumable	Pass number	Heat input (kJ/mm)
SAW	KCL A325	60	Wire : US-55ST Flux : PFI-55ST	1	56
	SA440		Wire : US-60ST Flux : PFI-60ST		54
ESW	KCL A325 (Skin plate) × KCL A325 (Diaphragm)		Wire : ES-55ST	1	97
	SA440 (Skin plate) × KCL A325 (Diaphragm)		Wire : ES-60ST		99

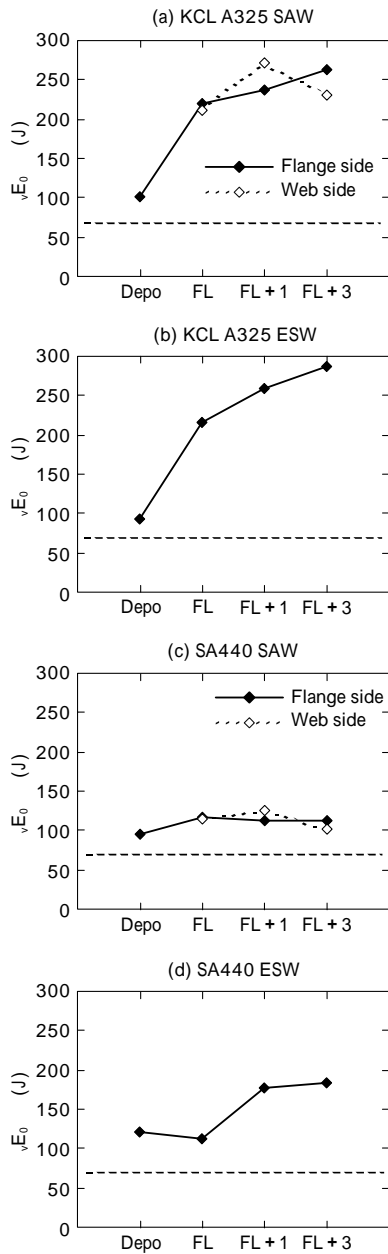


図5 溶接継手部の衝撃試験結果  
Fig. 5 Impact test results of welded joints

0 におけるシャルピ吸収エネルギーは70J 以上であり、継手靱性は十分に目標を満足している。

ダイアフラム溶接部の継手強度を確認するため、梁フランジをスキンプレートに接合した十字継手を作製した。梁フランジの接合は多層盛りりのCO<sub>2</sub> 溶接を行った。十字継手引張試験片の形状を図6 に、十字継手引張試験結果を表5 に示す。いずれもダイアフラムの熱影響部で破断しているが、継手強度はダイアフラムおよび梁フランジに使用したKCL A325 の規格を十分に満足していた。

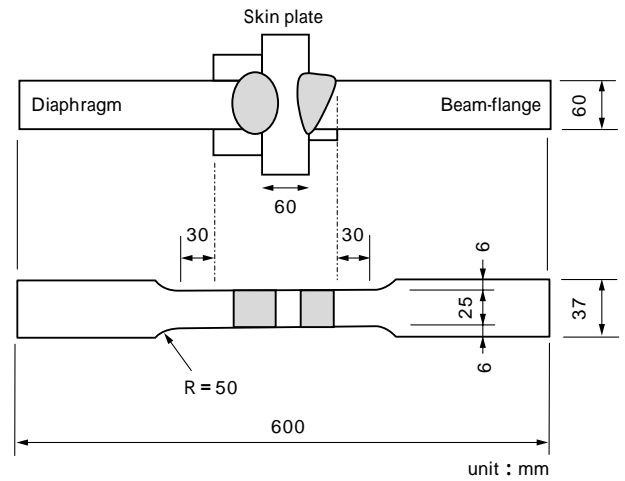


図6 十字継手の引張試験片  
Fig. 6 Tensile test specimen of cross-shaped welded joints

表5 十字継手の引張試験結果

Table 5 Tensile test results of cross-shaped welded joints

Grade	Heat input (kJ/mm)	TS (MPa)	Fracture position
KCL A325	97	499	Diaphragm HAZ
		507	Diaphragm HAZ
SA440	99	530	Diaphragm HAZ
		534	Diaphragm HAZ

むすび= 超高層建築物に適用されるボックス柱の高靱性要求に応えるため、「低カーボン多方位ペイナイト」という全く新しいコンセプトにより、溶接入熱100kJ/mm もの超大入熱溶接でも十分なHAZ靱性を確保できると同時に、低入熱溶接部の硬化を大幅に低減した建築構造用KCL A325 およびSA440 鋼板を開発した。これらの鋼板により、建築構造部材の施工効率向上、建築構造物の安全性向上に貢献していきたい。

#### 参考文献

- 1) 豊田政男：日本溶接協会鋼構造骨組の耐震性と溶接シンポジウム資料，10 (1998) p.97.
- 2) 稲田達夫ほか：材料とプロセス，Vol.16, No.2 (2003) p.340.
- 3) 稲田達夫：鉄構技術，8 (2001) p.32.
- 4) 笠松裕ほか：鉄と鋼，Vol.65, No.8 (1979) p.102.
- 5) 畑野等ほか：材料とプロセス，Vol.15, No.3 (2002) p.600.
- 6) 川野晴弥ほか：材料とプロセス，Vol.15, No.3 (2002) p.601.
- 7) 畑野等ほか：溶接構造シンポジウム2002 講演論文集 (2002) p.323.