

(論文)

建築構造用高性能TS550MPa級厚鋼板および円形鋼管

550MPa Tensile Strength Class Steel Plates and Steel Pipes for Building Structures



小林克壮*

Yoshitake KOBAYASHI



塩飽豊明*

Toyoaki SHIWAKU

In recent years for the purpose of rational design and cost saving for steel building structures, various strength class steel plates and steel pipes are required. To meet the requirements, Kobe Steel developed 550MPa tensile strength class steel plates and steel pipes for building structures. The developed steel plates and pipes not only have higher strength, but also maintain low YR(Yield Ratio) and high toughness in HAZ (Heat Affected Zone) in relation to those of 520MPa strength class steel, by applying the advanced technology of TMCP(Thermo-Mechanical Control Process).

まえがき = 近年、首都圏をはじめとする大都市部においては、超高層建築物の建設需要が旺盛な状況にある。建築用高強度鋼材は、こうした建築構造物の大型化や空間の大スパン化、また使用鋼材重量の低減による建設トータルコスト縮減などのため、その適用実績は増加している。

これまでの建築用鋼材の強度区分は、引張強さ 400, 490, 520, 590MPa 級であったが、現在 520MPa 級と 590MPa 級の間強度である 550MPa 級鋼が注目されている¹⁾。その理由の一つは、強度クラスの多様化により建築設計の自由度が拡大できるからである。

そこで、当社は引張強さ 520MPa 級鋼²⁾の溶接性を維持したままで、高強度化と降伏比(以下、降伏比を YR という)の低減を両立した引張強さ 550MPa 級厚鋼板 KCL-A385、および KCL-A385-ST と円形鋼管 KSAT385 を開発した。

本報告では、制御圧延と加速冷却の組合せ技術である TMCP(Thermo-Mechanical Control Process) 技術を高度化することにより、高強度化と低 YR 特性を両立した技

術と、開発鋼(厚鋼板、円形鋼管)の母材特性と溶接性、および溶接継手特性を紹介する。

1. 厚鋼板および円形鋼管の目標特性

開発鋼の化学成分と機械的性質の規格値をそれぞれ表 1, 表 2 に示す。母材特性の特長は、引張強さ 520MPa 級鋼と比較して 30MPa 高強度であるにもかかわらず、従来と同じ 80% 以下(円形鋼管は 85% 以下)の低 YR 特性を有することである。また、優れた溶接性と溶接継手特性を確保することを目指した。そのため、化学成分は板厚 50mm 以下に対しては C_{eq} 0.40%, P_{CM} 0.26%, 板厚 50mm 超えについては、 C_{eq} 0.42%, P_{CM} 0.27% と設定した。

高 HAZ 靱性型厚鋼板(KCL-A385-ST(Super Toughness)) は、四面ボックス柱の角部サブマージアーク溶接や、柱と内ダイヤフラムのエレクトロスラグ溶接の超大入熱溶接部においても、 $\sqrt{E_0}$ 70J の高い HAZ 靱性確保を目標とした。

表 1 開発鋼の化学成分規格

Table 1 Specification for chemical compositions of developed steel plate and pipe

Brand name (Shape)	Thickness (mm)	Chemical composition (mass%)					C_{eq} (%) ^{*1}	P_{CM} (%) ^{*2}
		C	Si	Mn	P	S		
KCL-A385 (Steel plate)	19 ~ 100	0.20	0.55	1.60	0.020	0.008	0.40 ^{*3} 0.42 ^{*4}	0.26 ^{*3} 0.27 ^{*4}
KSAT385 (Steel pipe)		0.20	0.55	1.60	0.030	0.015	0.40 ^{*3} 0.42 ^{*4}	0.26 ^{*3} 0.27 ^{*4}

* 1 $C_{eq} : C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$ (mass%)

* 2 $P_{CM} : C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$ (mass%)

* 3 Plate Thickness 50mm

* 4 Plate Thickness > 50mm

表 2 開発鋼の機械的性質の規格値

Table 2 Specification for mechanical properties of developed steel and pipe

Brand name (Shape)	Thickness (mm)	Tensile properties *5				Impact properties σ_{E_0} (J)	Weldability Preheat temp. ()	Welded joint properties Tensile strength (MPa) Impact properties (J)
		YP (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	El. (%)			
KCL-A385 (Steel plate)	19 ~ 100	385 ~ 505	550 ~ 670	80	19*6 21*6	27	25	550 27, 70*7
KSAT385 (Steel pipe)	19 ~ 100	385	550 ~ 670	85	21	27	25	550 27

*5 Test specimen for steel plate
 • Tensile test / t 50mm / JIS Z2201 No.1A t > 50mm / JIS Z2201 No.4
 • Charpy impact test / JIS Z2242 V-notch
 Test specimen for steel pipe
 • Tensile test / JIS Z2201 No.4 or No.12
 • Charpy impact test / JIS Z2242 V-notch
 *6 Tensile test specimen No.1A / 19% No.4 / 21%
 *7 KCL-A385 27J, KCL-A385-ST 70J

2. 開発課題と解決の考え方

2.1 開発課題

図 1 に引張強さ 520MPa 級厚鋼板 KCL-A355 の降伏点 (YP) と YR の関係を示す。KCL-A355 は YP355 ~ 375MPa の規格 YP 範囲内で YR 80% を達成できており、その金属組織はフェライトとベイナイトの混合組織である。

この組織の延長でベイナイト分率の増加により YP 385MPa に高強度化すればそのまま YR が上昇し、高 YP 域で YR 80% が達成できない。従来、高強度化と 80% 以下の低 YR 化という相反する特性を達成するには、590MPa 級鋼 (SA440) のように二相域熱処理を活用して複相組織化するのが一般的な手段であった³⁾。しかし、本開発鋼では、熱処理ではなく TMCP 技術の活用によって高強度と低 YR 化を達成することを技術課題とした。

2.2 高強度化と低 YR 特性の両立

YP - YR バランスを高強度かつ低 YR 側にコントロールするために、基本組織をベイナイトとした上でベイナイトとは異なる組織との複相組織化、つまりマルテンサイトや残留オーステナイトなどの硬質相に着目した⁴⁾。ただし硬質相の増加は、母材靱性劣化の要因となるため、それらをベイナイト中に微細に適量分散させることが必要となる。

組織制御の達成手段を図 2 に示す。高強度化のため

Ar3 より高温から高速度で冷却し、ベイナイト変態を促進させる。さらに低 YR 化のため、冷却終了温度を低温化して、マルテンサイトや残留オーステナイトなどの硬質相を生成させる。一方、靱性確保のため、冷却前の制御圧延の適正化による、変態前オーステナイト粒径の細粒化と変態核の増加によって、ベイナイトラスの微細化と硬質相のラス間微細分散を図った。

その結果、図 3 に示すとおり、開発鋼はベイナイトが主組織となり、KCL-A355 の低 YR を維持したまま、高強度化を達成した。

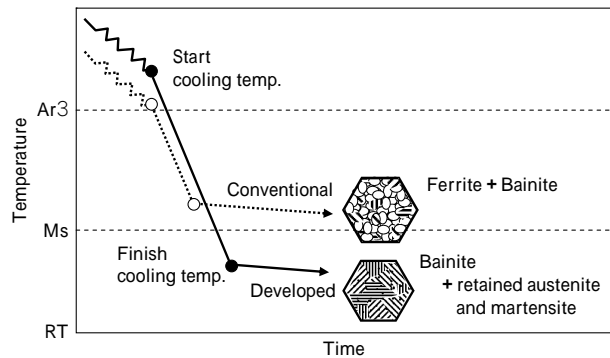


図 2 TMCP 条件と金属組織の模式図

Fig. 2 Schematic diagrams of relationship between TMCP conditions and microstructures

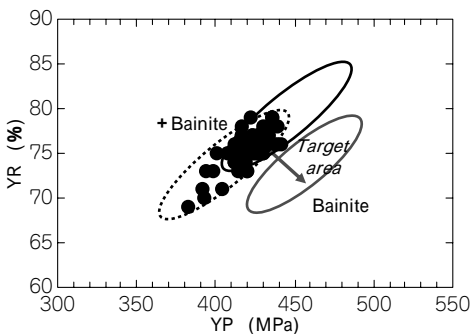


図 1 KCL-A355 の YP と YR の関係と開発鋼の狙い
 Fig. 1 Relationship between YP and YR of KCL-A355 and target area for the new steel

Steel	Conventional (KCL-A355)	Developed (KCL-A385)
Microstructure		
Mechanical properties	YP = 402, TS = 552, YR = 73%	YP = 438, TS = 597, YR = 73%

図 3 開発鋼と従来鋼の金属組織と機械的性質の比較

Fig. 3 Comparison of microstructure and mechanical properties of developed and conventional steels

3. 建築構造用 550MPa 級厚鋼板の特性

3.1 一般型 KCL-A385 の特性

KCL-A385 の化学成分、および機械的性質を表 3 に示す。化学成分は低強度である引張強さ 520MPa 級鋼と同レベルの C_{eq} と P_{CM} であるが、高強度化を達成している。また TMCP 技術を駆使することにより、板厚 19mm から厚肉 100mm の機械的性質は規格値を満足する良好な結果が得られている。

鋼板内の材質偏差を図 4 に示す。TMCP におけるスラブ加熱、熱間圧延、加速冷却の各工程において、鋼板内温度偏差を厳格管理することにより、鋼板内の材質は安定していることを確認した。

y 形溶接割れ試験結果を表 4 に示す。低化学成分設計により予熱温度 25 の室温においても、割れの発生はなく、良好な溶接性を有している。

3.2 高 HAZ 靱性型 KCL-A385-ST の母材特性と大入熱溶接特性

表 5 に KCL-A385-ST の化学成分と機械的性質を示す。大入熱溶接における HAZ 靱性を向上させるために、コーベスーパータフネス技術⁵⁾により低 C 化をベースとして、HAZ におけるオーステナイト()粒径の粗大化防止と、粒内組織のフェライト変態を促進させるための化学成分設計となっており、一般タイプである KCL-A385 と比較してさらに低 C_{eq} 、 P_{CM} 化を図っている。母材の機械的性質は、一般タイプと同様の TMCP 技術の適用により、規格値を満足する良好な結果が得られている。また、表 6、図 5 に四面ボックス柱における柱 - 内ダイヤフラム継手を模擬したエレクトロスラグ溶接 (ESW) 方法を示す。大入熱溶接継手特性は表 7 に示すとおり溶接入熱 80kJ/mm においても高い HAZ 靱性を達成できている。

表 3 開発鋼 KCL-A385 の化学成分および機械的性質

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of developed steel plate

Plate thickness (mm)	Chemical composition (mass%)								YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	$\sqrt{E_0}$ (J)
	C	Si	Mn	P	S	others	C_{eq}	P_{CM}					
19	0.14	0.36	1.35	0.008	0.001	Nb, Ti	0.39	0.22	461	605	23	76	267
35	0.14	0.37	1.36	0.008	0.001		0.39	0.22	490	629	22	78	288
50	0.14	0.36	1.36	0.008	0.001		0.39	0.22	473	609	25	78	302
80	0.13	0.35	1.36	0.007	0.001		0.38	0.21	443	603	31	73	224
100	0.12	0.36	1.46	0.009	0.002		0.39	0.21	438	595	32	72	263

表 4 y 形溶接割れ試験結果

Table 4 Result of y-groove weld cracking test

Plate thickness (mm)	Weld method	Welding consumable	Welding condition				Test result	
			Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)	Preheat temp. ()	Crack ratio (%)
50	GMAW Shielded gas CO ₂	MG-60 Wire Dia. ϕ 1.2mm	350	30	350	1.8	25	0, 0, 0
							50	0, 0, 0
							70	0, 0, 0

Test method : JIS Z3158

Welding atmosphere : temp.25 / moisture content 60%

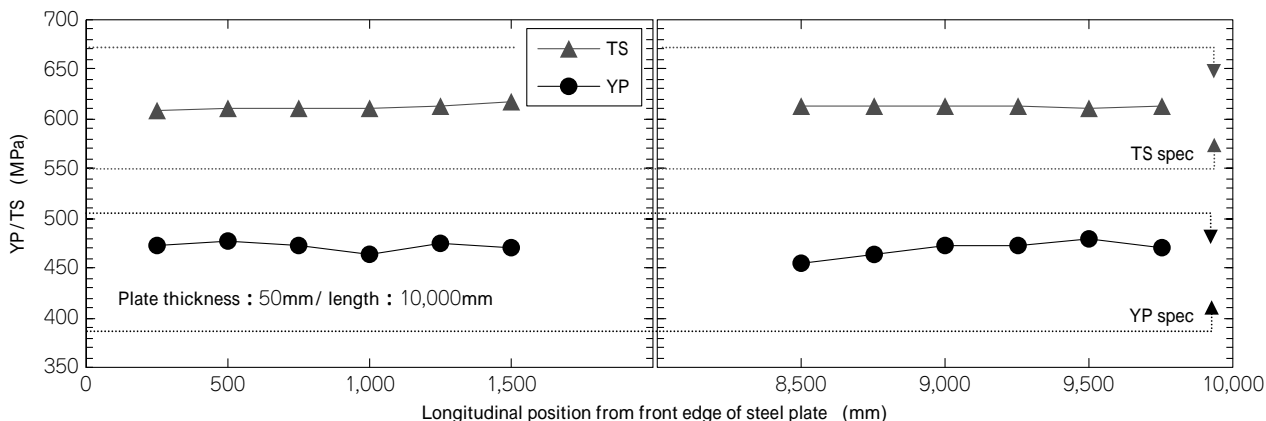


図 4 鋼板内の強度分布

Fig. 4 Yield and tensile strength distribution in developed steel plate

表5 開発鋼 KCL-A385-ST の化学成分および機械的性質

Table 5 Chemical compositions and mechanical properties of developed steel plate

Plate thickness (mm)	Chemical composition (mass%)								YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	$\sqrt{E_0}$ (J)
	C	Si	Mn	P	S	others	C _{eq}	P _{CM}					
19	0.07	0.17	1.56	0.009	0.001	Cu, Ni, Ti, B	0.35	0.18	473	609	22	77	314
35	0.07	0.16	1.57	0.010	0.001		0.35	0.18	446	580	26	77	322
50	0.07	0.16	1.55	0.009	0.001		0.35	0.18	443	612	31	72	346
80	0.06	0.15	1.53	0.008	0.001		0.34	0.19	467	599	30	78	283
100	0.06	0.15	1.53	0.008	0.001		0.34	0.19	431	564	32	76	260

表6 ダイアフラムとスキンプレートのエレクトロスラグ溶接条件

Table 6 Welding condition of ESW

Steel Plate	Weld method	Welding consumable	Welding condition			
			Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
KCL-A385-ST	1pass ESW	ES-60ST / MF-38	380	52	14	85

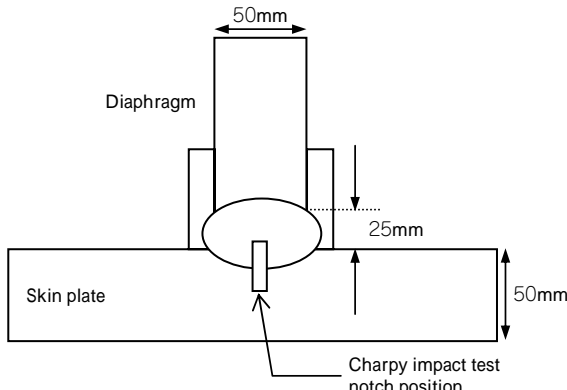


図5 エレクトロスラグ溶接継手形状

Fig. 5 Shapes and dimensions of groove (ESW)

表7 エレクトロスラグ溶接継手のシャルピー衝撃特性

Table 7 Charpy impact test results of welded joint (ESW)

Charpy impact test (Skin plate side)	
V-notch position	Charpy absorbed energy $\sqrt{E_0}$ (J)
Weld metal	Ave. 85
Fusion line	Ave. 184
FL + 1mm	Ave. 190

Test specimen : JIS Z2242 V-notch

4. 建築構造用高性能 550MPa 級鋼管 KSAT385 の特性

建築構造用厚鋼板 KCL-A385 を素材とした KSAT385 の鋼管特性を表 8 に示す。

円形鋼管についても板厚 19~100mm において、良好な特性を有している。また、円形鋼管を製作する上で、欠かすことのできないシーム方向のサブマージアーク溶接方法を表 9、図 6 に、また溶接継手の性能と断面マクロ組織写真をそれぞれ表 10、図 7 に示す。溶接入熱が最大約 9kJ/mm という大入熱溶接においても、良好な溶接継手性能を有しており、また溶接金属の溶込み形状も良好である。

表8 円形鋼管 KSAT385 の機械的性質

Table 8 Mechanical properties of KSAT385

Plate thickness (mm)	D/t	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	$\sqrt{E_0}$ (J)
19	10	419	579	31	72	Ave. 247
40	10	496	617	29	80	Ave. 254
65	10	473	589	30	80	Ave. 203
80	10	473	589	30	80	Ave. 164
100	10	519	617	28	84	Ave. 156
Spec		385	550~670	21	85	27

D/t : Diameter of steel pipe / Wall thickness (mm)

表9 シーム溶接条件

Table 9 Welding condition of seam welded joint

Steel pipe	Wall thickness (mm)	Degree of bending	Welding procedure	Welding condition			
				Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
KSAT385	100	D/t : 15	2-electrode SAW Both side multi-pass in each side	L : 830 ~ 1,000 T : 850 ~ 900	L : 28 ~ 36 T : 38 ~ 42	410 ~ 630	6.3 ~ 8.6

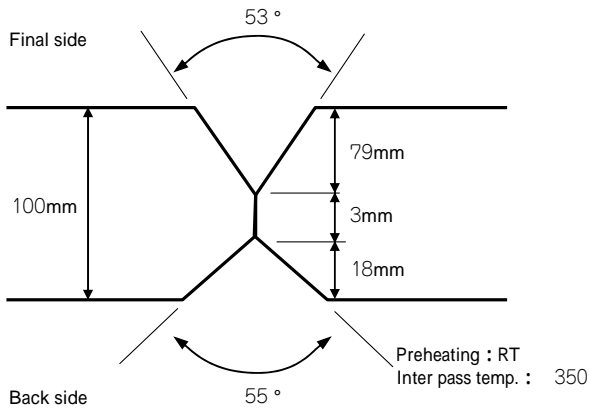


図6 開先形状
Fig. 6 Groove profile

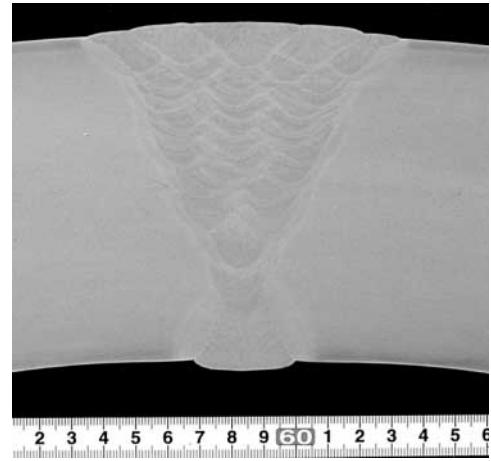


図7 シーム溶接部の断面マクロ組織
Fig. 7 Macro structure of seam welded joint

表10 サブマージアークシーム溶接継手性能
Table 10 Mechanical properties of seam welded joint (SAW)

Tensile test		Charpy impact test	
Tensile strength	Fracture position	V-notch position (1/4t from surface final side)	Charpy absorbed energy ,E ₀ (J)
647 641	Base metal Base metal	Weld metal	Ave. 123
		Fusion line	Ave. 136
		FL + 1mm	Ave. 246

Test specimen : Tensile test / JIS Z3121 No.1
Charpy impact / JIS Z2242 V-notch

むすび = 建築構造用の鋼材として、引張強さ 520MPa 級鋼と同等の良好な溶接性と溶接継手特性を有する一般部材向け厚鋼板 KCL-A385 と、当社独自の技術を駆使することにより、超大入熱溶接施工においても、良好な靱性を有する高 HAZ 靱性型厚鋼板 KCL-A385-ST を開発した。

また、品質の安定性を確認している厚鋼板 KCL-A385 を素材とした高性能円形鋼管 KSAT385 を開発した。

厚鋼板、円形鋼管ともに国土交通大臣認定を取得したことにより、当社の建築向け引張強さ 550MPa 級のメニ

ューが揃い、建築構造物の合理的な設計や建設コストの低減に寄与できるものと確信している。

参考文献

- 1) 林 謙次ほか：JFE 技報，No.5 (2004) p.45.
- 2) 岩井 清ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.42, No.3 (1992) p.2.
- 3) 岡野重雄ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.42, No.3 (1992) p.6.
- 4) 塩飽豊明ほか：材料とプロセス，Vol.71, No.5 (1985) p.S663.
- 5) 笠松 裕ほか：鉄と鋼，Vol.65, No.8 (1979) p.1232.