

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.33 (2001) No.3

数値解析・形鋼特集号

溶接性に優れた極低炭素ベイナイト型 590 MPa 級極厚 H 形鋼

TS590 MPa Class Extremely-low Carbon Bainitic Heavy Gauge H-shapes Having an Excellent Weldability

木村 達己 (Kimura, T.) 天野 虔一 (Amano, K.) 田岡 啓造 (Taoka, K.)

要旨：

極低炭素ベイナイト鋼を適用することにより、溶接性に優れた 590 MPa 級極厚 H 形鋼を非調質で製造することに成功した。開発鋼は、建設省の SA440 規格を満足する母材性能をもつと同時に、耐低温割れ性および溶接熱影響部の耐硬化性に優れており、溶接時の予熱省略が可能である。また、実溶接施工を模擬した柱—柱および柱—梁継手は、SA440 規格に対して十分な強度と靱性を有していた。開発した 590 MPa 級極厚 H 形鋼は、川崎製鉄独自規格の RIVER TOUGH 440 として商品化し、晴海 1 丁目再開発プロジェクトの超高層建築物柱材として国内で初めて採用された。

Synopsis：

TS590MPa grade heavy gauge H-shapes having excellent weldability have been successfully developed by applying an extremely-low carbon bainitic steel. The developed H-shapes have high strength and high toughness, which satisfies the SA440 specification without any heat treatment. Because the steel has excellent cold cracking resistance and low hardenability in heat affected zone, no pre-heating is required at welding. Column to column and column to beam welded joints, in which the developed steel was used as a column material, showed sufficient strength and toughness in terms of SA440 specification. The developed heavy gauge H-shapes under a brand name of "RIVER TOUGH 440" were applied to the high-rise buildings as column materials at the HARUMI urban renewal project.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

溶接性に優れた極低炭素ベイナイト型 590 MPa 級極厚 H 形鋼*

川崎製鉄技報
33 (2001) 3, 137-142

TS590 MPa Class Extremely-low Carbon Bainitic Heavy Gauge H-shapes Having an Excellent Weldability



木村 達己
Tatsumi Kimura
技術研究所 厚板・条鋼・接合研究部門 主任研究員(掛長)



天野 慶一
Keniti Amano
技術研究所 厚板・条鋼・接合研究部門長・工博



田岡 啓造
Keizo Taoka
水島製鉄所 管理部条鋼管理室長

要旨

極低炭素ベイナイト鋼を適用することにより、溶接性に優れた590 MPa 級極厚 H 形鋼を非調質で製造することに成功した。開発鋼は、建設省の SA440 規格を満足する母材性能をもつと同時に、耐低温割れ性および溶接熱影響部の耐硬化性に優れており、溶接時の予熱省略が可能である。また、実溶接施工を模擬した柱—柱および柱—梁継手は、SA440 規格に対して十分な強度と靱性を有していた。開発した 590 MPa 級極厚 H 形鋼は、川崎製鉄独自規格の RIVER TOUGH 440 として商品化し、晴海 1 丁目再開発プロジェクトの超高層建築物柱材として国内で初めて採用された。

Synopsis:

TS590MPa grade heavy gauge H-shapes having excellent weldability have been successfully developed by applying an extremely-low carbon bainitic steel. The developed H-shapes have high strength and high toughness, which satisfies the SA440 specification without any heat treatment. Because the steel has excellent cold cracking resistance and low hardenability in heat affected zone, no pre-heating is required at welding. Column to column and column to beam welded joints, in which the developed steel was used as a column material, showed sufficient strength and toughness in terms of SA440 specification. The developed heavy gauge H-shapes under a brand name of "RIVER TOUGH 440" were applied to the high-rise buildings as column materials at the HARUMI urban renewal project.

1 緒 言

フランジ厚が 40 mm を超える極厚 H 形鋼は、厚鋼板を溶接で組み立てるボックス柱に匹敵する大断面を有しており、高層建築物の柱材としての適用が増加している。これは、ボックス柱と比較して溶接箇所が少なく安全性の向上や製造納期が短いなどの長所があるためである。近年、フランジの厚肉化にともなう設計基準強度 (F 値) の低減が不要な加工熱処理 (thermo mechanical control process) 型極厚 H 形鋼¹⁾ や世界最大級のウェブ高さを有するウェブ高さ 700 mm、フランジ幅 500 mm サイズの極厚 H 形鋼が開発²⁾ され、H 形鋼の適用範囲は拡大している。しかし、現状の H 形鋼の強度レベルの限界は引張強さ 520 MPa 級であり、超高層ビルの柱材などへの適用拡大のためには、さらなる高強度化が必要である。

引張強さが 520 MPa を超える高強度建築用鋼材としては、1997 年建設省の大臣一般認定を取得した建築構造用高性能 590 MPa 級鋼材 (SA440B, C)³⁾ がある。この鋼材は、厚鋼板を 2 回焼入れ—焼もどし処理して製造されている。極厚 H 形鋼へこの熱処理プロセ

スを適用し、高強度化するためには、H 形鋼専用の熱処理炉が必要となるばかりでなく、短い納期やコスト競争力といった極厚 H 形鋼の本質的な優位性を損なうおそれがある。このため、590 MPa 級の高性能極厚 H 形鋼の開発には、圧延のまま (非調質) で必要性を満足させることが求められている。

当社では、炭素含有量を 0.02 mass% 程度まで低減させた極低炭素ベイナイト鋼に着目して、新たな材質制御方法を確立するとともに、非調質厚肉高強度厚板の開発に適用してきた^{5,6)}。この技術を H 形鋼の材質制御に適用し、圧延のままでも引張強さが 590 MPa 級の強度を有する高強度極厚 H 形鋼を開発した。

本報では、極低炭素ベイナイト鋼の冶金的な特徴について述べるとともに、開発鋼の母材性能、溶接性および継手特性について紹介する。

2 極低炭素ベイナイト鋼の特徴

建築材として一般に使用されている SM490 および極低炭素ベイナイト鋼の代表的な化学組成を Table 1 に示す。また、これらの鋼の連続冷却変態曲線を Fig. 1 に示す。SM490 鋼では、冷却速度が遅くなるにしたがって、マルテンサイト、ベイナイト、フェライト

* 平成13年4月24日原稿受付

Table 1 Chemical compositions of steels used

Steel	(mass%)					
	C	Mn	Cu	Ni	Nb	B
SM490 class steel	0.14	1.3	—	—	—	—
Extremely-low C bainitic steel	0.02	1.6	Micro-alloyed			

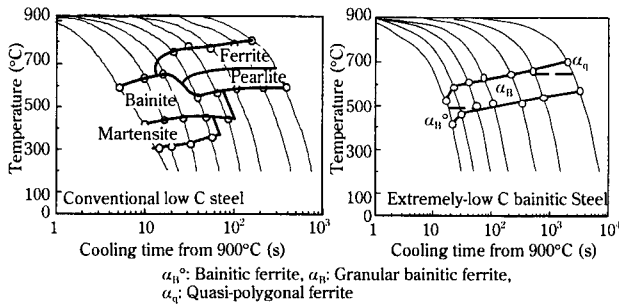


Fig. 1 Continuous cooling transformation curves (CCT) of SM490 and the extremely-low C bainitic steel

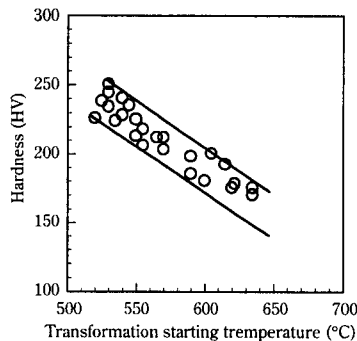


Fig. 2 Effect of the granular bainitic ferrite transformation starting temperature on hardness of the extremely-low C bainitic steels

パーライトとマイクロ組織が大きく変化するが、極低炭素ベイナイト鋼では、冷却速度が変化してもマイクロ組織の変化が小さい特徴がある。冷却速度が顕著に大きい場合および小さい場合にはそれぞれ、一部 α_B (bainitic ferrite)⁷⁾ および α_Q (quasi-polygonal ferrite)⁷⁾ が形成されるが、主たる組織は α_B (granular bainitic ferrite: 以下、極低炭素ベイナイト組織)⁷⁾ である。 α_B 組織はフェライト-パーライト組織より強度が高いので、極低炭素ベイナイト鋼を適用することにより厚肉の鋼材でも高強度化と断面内の強度均一性の確保が可能である。

また、極低炭素ベイナイト鋼においては、変態温度を変化させることにより強度を容易に変化させることができる。0.02 mass% C に合金の添加量を種々変化した極低炭素ベイナイト鋼の変態開始温度と硬さの関係を Fig. 2 に示す⁸⁾。極低炭素ベイナイトの硬さは、変態開始温度により一義的に決定され、変態開始温度は合金元素の添加量に応じて制御することが可能である。

さらに、極低炭素ベイナイト鋼は Cu の self-aging を併用することにより、一層の高強度化も可能である。0.02 mass% C 鋼に Cu を 0.5~1.5 mass% まで変化した極低炭素ベイナイト鋼の硬さに及ぼす冷却速度の影響を Fig. 3 に示す^{8,9)}。冷却速度が 0.3°C/s 以下の比較的遅い冷却速度領域では、Cu 量が高くなるにしたがい軟化が抑制され、特に 1.5 mass% Cu 鋼では、0.1°C/s 付近の冷却速度で

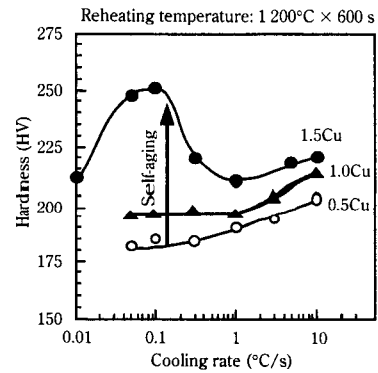


Fig. 3 Effect of Cu content and cooling rate after hot deformation on hardness of the extremely-low C bainitic steels

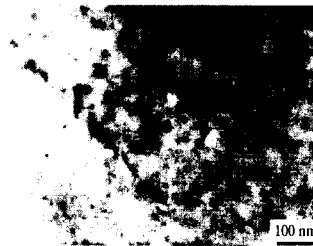


Photo 1 Typical TEM micrograph of 1.0 mass% Cu bearing extremely-low C bainitic steel after slow cooling with 0.1°C/s (thin film)

顕著な硬化を示す。この低い冷却速度領域では Photo 1 に示すように冷却時にベイナイト中に Cu の析出が認められることから、これらの挙動は Cu の析出強化によるものである。

従来、厚肉材の高強度化を図るためには、多量の合金添加が必要となり溶接割れ感受性が上昇するので、溶接部の低温割れを抑制するために予熱が必要であった。しかし、極低炭素ベイナイト鋼では、極低炭素化により HAZ 硬化性が小さくなることから低温溶接割れ感受性が向上し、予熱低減効果 (予熱フリー化)⁶⁾ が期待できる。また、この効果は、アークストライクのような極めて冷却速度が大きい非定常溶接においても発揮できる。さらに、島状マルテンサイト (M-A) の低減による HAZ 韌性の向上も期待できる⁵⁾。

これらの特徴を持つ極低炭素ベイナイト鋼を高強度極厚 H 形鋼に適用した。

3 開発鋼の特徴

3.1 化学組成

開発した極厚 H 形鋼の代表的な化学組成を Table 2 に示す。開発鋼の母材性能として、建築構造用高性能 590 MPa 級鋼材 (SA440B, C) の規格⁹⁾ を満足することを目標とした。この目標を満足するために、C を 0.02 mass% とした上で、Cu やその他の合金添加により、極低炭素ベイナイト変態温度と軟化抵抗を調整した。また、炭素当量および P_{cm} はそれぞれ 0.267% および 0.156% に抑制することができ、溶接性の向上も期待できる。転炉、RH 脱ガス、連続鋳造プロセスで溶製した前記スラブを、鋼片圧延にてビームブランク状に中間圧延を行い、その後ユニバーサル圧延を行いウェブ高さ 582 mm、フランジ幅 510 mm、ウェブ厚 60 mm、フランジ厚

Table 2 Typical chemical composition of the developed H-shapes

(mass%)									
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Others	Ceq*	Pcm**
0.02	0.30	1.25	0.010	0.003	0.030	0.87	Ni, Nb, B, Ti	0.267	0.156

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

**Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

Table 3 Mechanical properties at various portions of the developed H-shapes

Steel	Spec. and size	Portion	Dir.	YP (0.2%YS) (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	vEo (J)
	SA440	F1/4-1/4t	L	440-540	590-740	<80	>47
Developed H-shape	582 × 510 ×	F1/4-1/4t	L	487	636	77	212
	60 × 65 mm	W1/4-1/4t	L	458	632	72	153

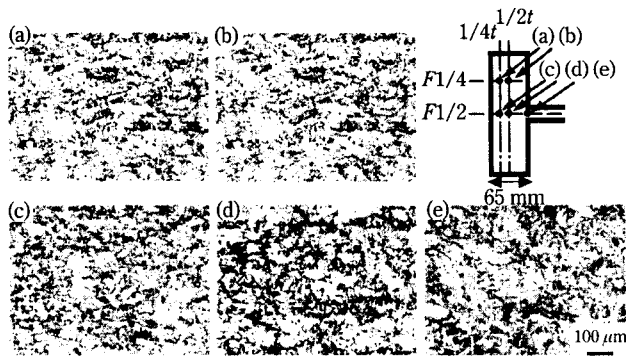


Photo 2 Microstructures of the developed H-shape at various portions

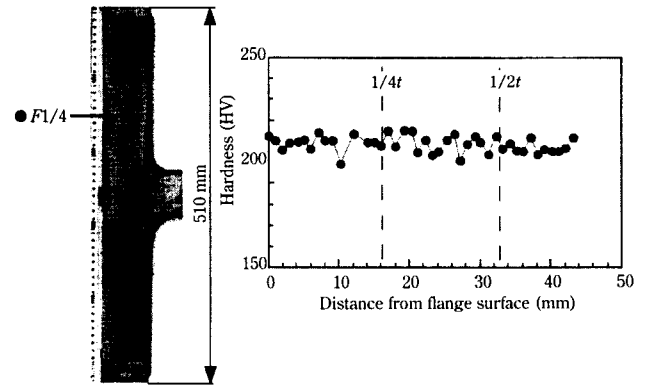


Fig. 4 Macrostructure and hardness distribution of developed H-shapes at flange portion

65 mm の極厚 H 形鋼を製造した。

3.2 母材の性能

開発鋼の機械的性質およびシャルピー衝撃特性を SA440 の規格値と比較して Table 3 に示す。開発した極厚 H 形鋼は、圧延のままで規格値を満足する高強度が得られ、また、シャルピー衝撃特性も規格値を十分満足した。

開発鋼の各部分のマイクロ組織を Photo 2 に示す。いずれの部位においても極低炭素ベイナイト組織であり、マイクロ組織には差異は認められない。さらに、フランジ幅 1/4 部分の断面硬さ分布を Fig. 4 に示す。板厚方向の硬さの変化はほとんど認められず、均一な分布を示した。

3.3 低温溶接割れ感受性

溶接割れ感受性を評価するために JIS Z 3158 に準拠して y 形溶接

割れ試験を行った。フランジ幅 1/4 部より試験片を切出し、板厚を 40 mm に減厚加工した試験片を採取し、実験に供した。試験条件およびその結果の一覧を Table 4 に示す。製造した極厚 H 形鋼は、室温 (25°C) においても割れはまったく生じなかったことから、熱処理タイプの 590 MPa 級厚鋼板 (SA440) と比較しても、さらに一層優れた低温溶接割れ感受性を有している。拘束の厳しいこの試験において室温で割れが発生していないことから、実溶接時の予熱フリー化が可能と推測する。

3.4 HAZ 硬化性

HAZ 硬化性を調べる目的で、溶接熱影響部の最高硬さ試験を JIS Z 3101 に準じて行った。ビード長さは JIS 規格の 125 mm の他に、ショートビードを想定した 60 mm および点付け溶接を想定したアーク時間 1 s のアークストライク条件で実施した。その結果を熱処

Table 4 Results of y-groove weld cracking test according to JIS Z 3158

Thickness (mm)	Welding electrode	Welding conditions			Pre-heat temperature (°C)	Cracking ratio (%)		
		Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/s)		Surface (%)	Cross section (%)	Root section (%)
40	JIS Z 3212 D6216 (KSA86) 4 mmφ	170	25	2.5	25	0.0	0.0	0.0
						0.0	0.0	0.0
						0.0	0.0	0.0
					50	0.0	0.0	0.0
						0.0	0.0	0.0
						0.0	0.0	0.0

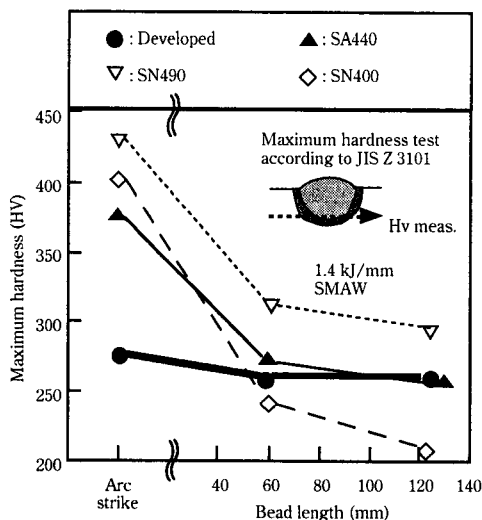


Fig. 5 Maximum hardness observed for unsteady-state welding of short bead length and arc-strike

理タイプの 590 MPa 級厚鋼板 (SA440) や SM400 級鋼および SN490 級鋼と比較して Fig. 5 に示す。開発鋼では、炭素量を 0.02% まで低減したことによりマルテンサイト生成が抑制され、硬さに対するビード長の影響が極めて小さい。アークストライク条件における最高硬さは HV270 と低く、SA440 厚鋼板の HV380 と比較して優れた耐 HAZ 硬化性をもつ。

4 実溶接施工を想定した継手性能試験

実機柱材への適用を検討するために、実際に施工される条件を想定した柱-柱溶接および柱-梁溶接を行い、それらの継手性能を評価した。

4.1 溶接条件

溶接は、半自動炭酸ガス溶接で行った。その溶接条件および溶接接合状況をそれぞれ Table 5 および Fig. 6 に示す。柱-柱継手の場合には、製造した極厚 H 形鋼を圧延方向に分割し、それらを 590 MPa 級の通常の溶接材料 (KC60: JIS 規格 YGW21) を用いて、継手を作製した。柱-梁継手の場合には、梁材として SN490B 級のフランジ厚 28 mm の H 形鋼を用いて、溶接材料には (KC50: JIS 規格 YGW11) を用いた。作製した継手から、硬さ分布、継手引張試験および溶接金属 (WM)、ポンド部 (bond) およびポンドから 1 mm 離れた HAZ 部のシャルピー衝撃特性を調べた。

4.2 断面硬さ分布

柱-柱および柱-梁継手部の断面硬さ分布を Fig. 7 に示す。HAZ 部には、顕著な HAZ 硬化や軟化は認められなかった。

4.3 継手引張試験

継手引張試験の結果を Table 6 に示す。柱-柱継手の場合には極厚 H 形鋼の母材で破断し、引張強度は 631 MPa であった。一方、

Table 5 Welding conditions for column to column and column to beam structures

Item	Welding	Method	Welding electrode	Preheating temperature	Inter-pass temperature	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (mm/s)	Heat input (kJ/mm)
Column to column	CO ₂ gas welding	Multi-layer	JIS Z 3312 YGW21 (KC-60)	≧100°C	≧80°C	290	35	5.8	1.7
Column to beam and stiffener	CO ₂ gas welding	Multi-layer	JIS Z 3312 YGW11 (KC-50)	≧100°C	≧80°C	330	35	5.0	2.3

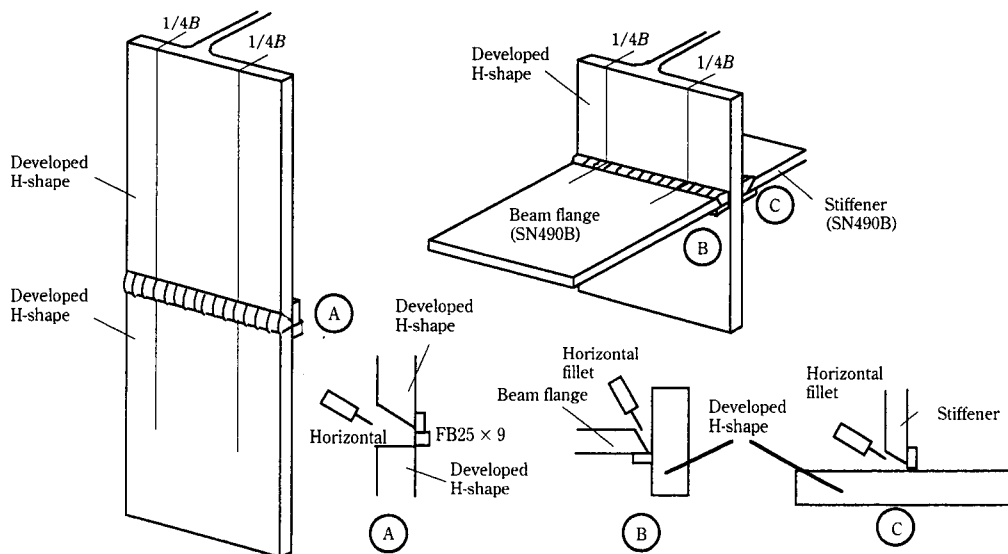
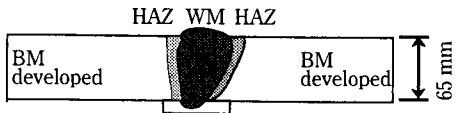
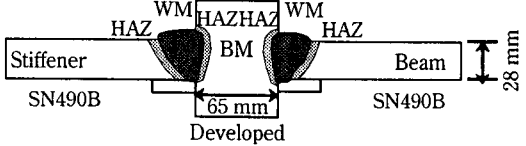


Fig. 6 Welding details of the column to column and the column to beam structures simulated by an actual construction method

Table 6 Tensile test results of welded joints

Item	TS (MPa)	Fracture position	Illustration of welded joints
Column to column	631	Column (Base metal)	
Column to beam and column to stiffener	526	Beam (Base metal)	

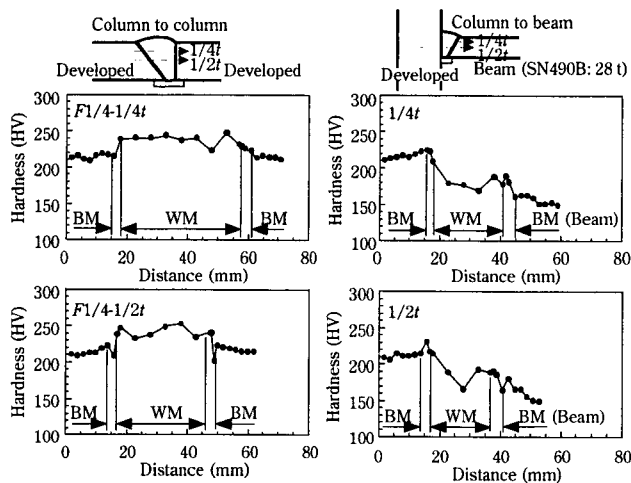


Fig. 7 Hardness distributions of the column to column and the column to beam joints

柱-梁継手では、梁材 (SN490B) 母材破断であり、引張強度は 526 MPa であった。このことは、実施工条件で溶接施工を行った柱-柱および柱-梁継手が十分な継手強度を有していることを示している。

4.4 衝撃特性

溶接金属 (WM)、ボンド部 (bond) およびボンドから 1 mm 離れた HAZ 部のシャルピー衝撃特性の結果を Table 7 に示す。極厚 H 形鋼のフランジ面に対して、柱-柱継手では L 方向、柱-梁継手で

は Z 方向から試験片を採取している。ボンドおよび HAZ 部の 0°C におけるシャルピー吸収エネルギーはいずれも 200 J 以上と高く、十分な靱性を有していた。WM でも 100 J 以上の値であった。また、試験片採取方向の影響 (柱-柱が L 方向、柱-梁が Z 方向) は認められず、継手は極めて良好な靱性を有していた。

これらの結果、開発した極厚 H 形鋼は建築構造用の柱材として十分な母材性能および継手性能を有すると判断できる。

5 設計メリットおよび製造実績


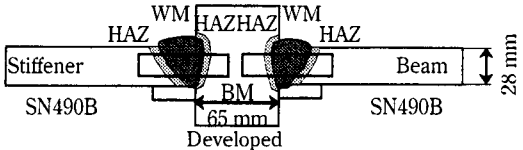
建築鋼構造の設計では、(1) 式に示すように軸力と曲げ応力の応力度比の和を 1 以下としなければならない¹⁰⁾。

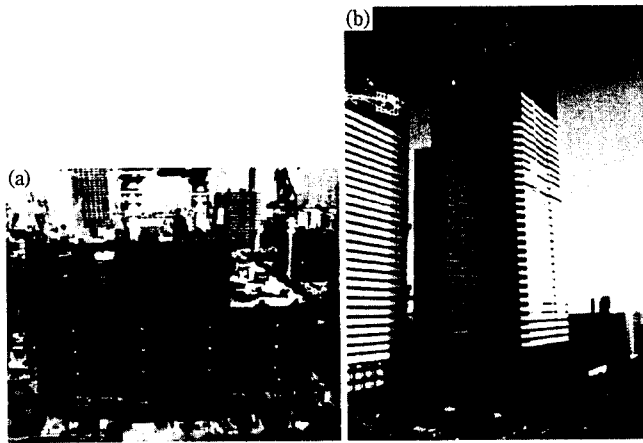
$$\sigma_c/F_c + \sigma_b/F_b \leq 1 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ_c は平均圧縮応力度、 F_c は許容圧縮応力度、 σ_b は平均圧縮曲げ応力度、 F_b は許容曲げ応力度である。許容応力度を導出する際の鋼材の設計基準強度 (F 値) は鋼材の降伏強度に依存しており、490 MPa 級極厚 H 形鋼の F 値は 3.3 t/cm² (325 MPa) に対して、今回開発した 590 MPa 級極厚 H 形鋼のそれは 4.5 t/cm² (440 MPa) となり、36% 上昇する。その結果、柱材の高強度化により F 値が上昇するために応力度比 (σ_c/F_c 、 σ_b/F_b) が低下し、高い軸力が作用する超高層建築物下層柱材への適用など、これまでよりも極厚 H 形鋼の適応範囲を拡大させることが可能となった。

これらの特徴により、開発した 590 MPa 級極厚 H 形鋼 (商品名: RIVER TOUGH 440) は、Photo 3 に示す晴海 1 丁目再開発事業 (トリトンスクエア) の超高層建築物柱材として国内で初めて採

Table 7 Charpy impact test results of welded joints

	Position	Direction	V-Notch position	vE ₀ (J)	Illustration of welded joints
Column to column	F1/4B	L	HAZ	316	
		L	Bond	255	
		L	W.M.	143	
	F1/2B	L	HAZ	339	
		L	Bond	242	
		L	W.M.	111	
Column to beam and stiffener	F1/4B	Z	HAZ	286	
		Z	Bond	232	
		Z	W.M.	164	
	F1/2B	Z	HAZ	263	



(a) The lower layer structure using the RIVER TOUGH 440 as column materials
(b) The exterior of the renewal project

Photo 3 Construction landscapes of the Harumi urban renewal project

用され、1300 t を製造、納入した。このプロジェクトでは、本 590 MPa 級極厚 H 形鋼とともに当社が 1995 年に開発した 490 MPa 級 TMCP 極厚 H 形鋼 (RIVER TOUGH 325) も 5500 t 採用された。

6 結 言

極低炭素ベイナイト鋼を適用することで、溶接性に極めて優れた 590 MPa 級極厚 H 形鋼を非調質で製造することに成功し、実用化した。開発鋼の母材および継手性能は以下の通りである。

- (1) ウェブ高さ 582 mm、フランジ幅 510 mm、ウェブ厚 60 mm、フランジ厚 65 mm の極厚サイズにおいても、圧延のままで高性能鋼 (SA440) の規格を満足する高強度でかつ高靱性を有する。
- (2) 開発鋼は、低温割れ感受性やアークストライク時の HAZ 硬化性が極めて低い、優れた溶接性を有する。
- (3) 実溶接施工を模擬した柱—柱および柱—梁継手を作製し、その継手性能を評価した結果、継手には十分な継手強度と靱性を有することが確認できた。
- (4) 開発した 590 MPa 級極厚 H 形鋼は、川崎製鉄独自規格の RIVER TOUGH 440 として商品化し、東京の再開発プロジェクトの超高層建築物柱材として国内で初めて採用された。

住友商事(株)殿より RIVER TOUGH が適用された構造物の建造中の貴重な写真を提供いただきました。ここに、記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 木村達己, 奥井隆徳, 内田 清: 川崎製鉄技報, **30**(1998)4, 215-221
- 2) 石井 匠, 藤澤一善, 斎藤晋三: 川崎製鉄技報, **30**(1998)1, 21-26
- 3) 三浦啓徳, 藤沢清二, 笹田幹雄: 川崎製鉄技報, **33**(2001)3, 132-136
- 4) 建設省東住指発第 567 号: 建築構造用高性能 590 N/mm² 鋼材 (SA440B, C) の基準強度, 1997. 9. 24
- 5) 岡津光浩, 天野慶一, 林 透: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 131-136
- 6) 田畑裕次, 吉村修身, 工藤純一: 川崎製鉄技報, **32**(2000)2, 119-124
- 7) 日本鉄鋼協会: ベイナイト調査研究部会編: 「鋼のベイナイト写真集-1」, (1992), 4, [日本鉄鋼協会]
- 8) K. Hase, T. Hoshino, and K. Amano: Int. Symp. on Steel for Fabricated Structures, Conf. Proc. from Materials Solutions '99, Ohio (USA), (1999) November
- 9) M. Okatsu, F. Kawabata, K. Amano, M. Sato, and T. Okui: Int. Symp. on Steel for Fabricated Structures, Conf. Proc. from Materials Solutions '99, Ohio (USA), (1999) November
- 10) 日本建築学会: 「鋼構造設計規準 (Design Standard for Steel Structures)」, (1973 年 5 月改訂)