

建築構造用高性能 590 N/mm² 級 TMCP 鋼板「HBL[®]440」

High Performance 590 N/mm² Class Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) Steel Plate “HBL[®]440” for Building Structure

大森 章夫 OHMORI Akio JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
中川 佳 NAKAGAWA Kei JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (副課長)
室田 康宏 MUROTA Yasuhiro JFE スチール 東日本製鉄所 (京浜地区) 商品技術部 主任部員 (課長)

要旨

従来の建築構造用 590 N/mm² 級鋼 SA440 の製造プロセスでは、建築構造用鋼として必要な低降伏比 (低 YR) 特性を確保するために 2 相域焼入を含む複数回のオフライン熱処理が必須であったが、JFE スチール独自のオンライン冷却設備を活用した TMCP (Thermo-mechanical control process) 技術を駆使することにより、2 相域焼入が省略可能な高性能 590 N/mm² 級 TMCP 鋼板「HBL[®]440」を開発した。板厚 19 mm から 100 mm の鋼板を製造し、SA440 と同等の機械的性質に加え、優れた溶接性と超大入熱溶接部靱性を達成した。また、本鋼材を用いた鉄骨部材が優れた塑性変形性能を有することも確認できた。

Abstract:

Conventional 590 N/mm² class steel for building structures, SA440, has been manufactured by a multiple off-line heat treatment processes involving intercritically reheated quenching, in order to achieve low yield ratio required for seismic resistance buildings. High performance 590 N/mm² class thermo-mechanical control process (TMCP) steel plate “HBL[®]440” for building structures, which can be manufactured without an intercritically reheated quenching, has been developed by applying the uniquely advanced JFE Steel’s on-line accelerated cooling system. The developed steel plates from 19 mm to 100 mm in thickness satisfy the specification of SA440 and exhibit excellent weldability and high heat affected zone (HAZ) toughness in welded joints with very large heat inputs. Furthermore members fabricated with the developed steel plates have achieved equivalent plastic behaviors to those of SA440.

1. はじめに

近年の高層建築物の大スパン化や、商業スペース、オフィス、ホテルなどの重層化などに伴い、鉄骨柱の厚肉化と大径化が進んでいる。1993 年に竣工したランドマークタワーでは、最大 100 mm 厚×1 000 mm 角の断面を有する大断面のボックス柱が使用された。このような鉄骨柱の大断面化による重量増加を抑制し、鋼材製造、鉄骨加工、運搬、建方など各過程での環境負荷とコストを低減するため、高強度鋼材の必要性が高まっている。

一方、地震が多発する我が国では、建築構造物の鉄骨部材には、大地震による倒壊を防ぐため、塑性変形によってエネルギーを吸収することが求められる。そのため、柱や梁などの建築鉄骨部材に用いられる鋼材には、多くの場合、降伏比 YR (Yield ratio, $YR = (\text{降伏強度}(YS)) / (\text{引張強度}(TS))$) が 80% 以下の低降伏比 (低 YR) 特性が要求される。しかしながら、一般的に鋼材強度の増加に伴って YR は上昇するた

め、高強度化と低 YR 化の両立は困難になる。1990 年代に開発された熱処理型の建築構造用 590 N/mm² 級鋼板 (SA440)¹⁾ では、多量の合金添加とともに、たとえば図 1 (a) に示すような 2 相域焼入を含む多段熱処理により低 YR 特性を確保している。このような複雑な熱処理は工期の長期化を、多量の合金添加は溶接性の低下をもたらし、SA440 の適用拡大を妨げる要因となっていた。

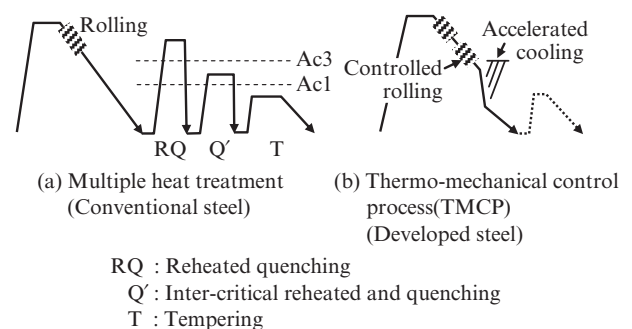


図 1 低 YR 590 N/mm² 級鋼の製造プロセス

Fig. 1 Manufacturing process of low yield ratio (YR) 590 N/mm² class steels

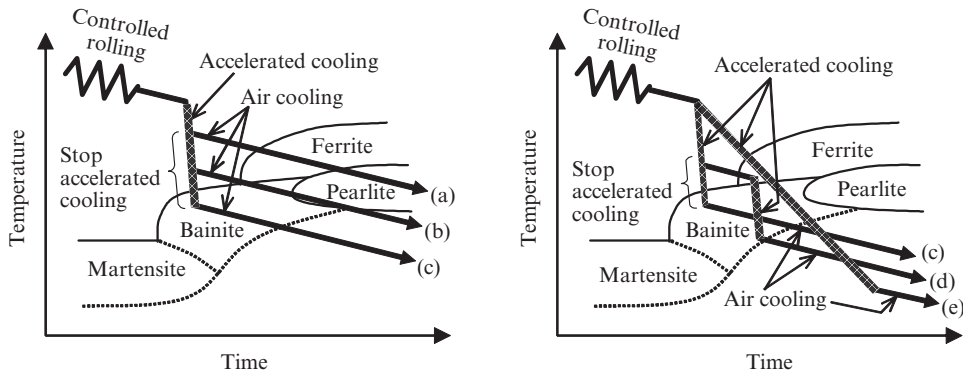
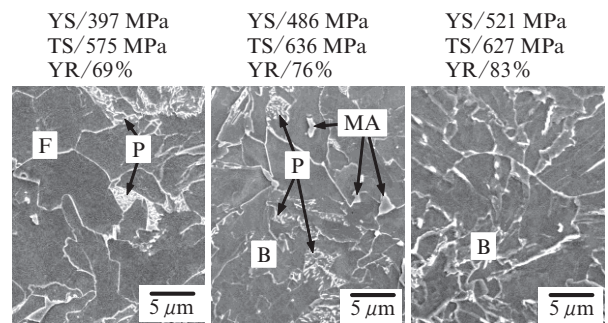


図2 加速冷却による複相マイクロ組織制御 (模式図)

Fig. 2 Schematic illustrations of controlling multi-phase microstructures with accelerated cooling

JFE スチールでは、オンライン (非調質) で材質を造り込むための TMCP (Thermo-mechanical control process : 加工熱処理) 技術を駆使することにより、図 1 (b) のような 2 相域熱処理を省略したプロセスで SA440 と同等の機械的特性を確保した。さらに、独自の溶接熱影響部高靱化技術との組み合わせにより、優れた溶接施工性と超大入熱溶接部靱性をも兼ね備えた建築構造用高性能 590 N/mm² 級 TMCP 鋼板「HBL[®]440」を開発し、2013 年 8 月に板厚 19~100 mm の範囲で国土交通大臣認定を取得した。本稿では、建築構造用鋼として必要な低 YR 特性および超大入熱溶接部靱性を高強度化と同時に達成するための基本指針と、開発鋼板の母材および溶接継手の基本性能、そして部材性能を紹介する。



(a) Low strength (Ferrite + Pearlite) (b) Appropriate (Bainite + Pearlite + MA) (c) High YR (Bainite)

YS : Yield strength TS : Tensile strength R = YS/TS

写真1 ミクロ組織例 (走査型電子顕微鏡)

Photo 1 Examples of SEM micrographs

2. 成分設計および TMCP の基本指針

2.1 低降伏比 (低 YR) 確保のための TMCP 技術

高強度鋼において低 YR 化を達成するための基本指針は、マイクロ組織を軟質相と硬質相からなる複相組織にすることである。590 N/mm² 級鋼では、軟質相と硬質相の組み合わせとして、フェライト+ベイナイト、フェライト+焼もどしマルテンサイト、ベイナイト+パーライト+MA (MA : Martensite-austenite constituent) などが用いられる。TMCP によってこのような複相組織を実現するには、化学成分、制御圧延条件、加速冷却条件を最適化する必要がある。

図 2 は、開発鋼のマイクロ組織に及ぼす加速冷却条件の影響を模式的な連続冷却変態線図 (CCT 図) を用いて示した図である。適正な温度で加速冷却を停止した (b) では、写真 1 (b) のようなベイナイト+パーライト+MA の複相組織が得られ、十分な強度と低 YR 特性を両立した所望の引張特性が得られる。しかし、条件 (a) のように冷却停止温度が高すぎると、写真 1 (a) のようにフェライト+パーライト組織となって強度が不足し、条件 (c) のように冷却停止温度が低すぎると、写真 1 (c) のように高 YR のベイナイト単相組織となる。図 3 に低 YR の複相組織 (b) と高 YR のベ

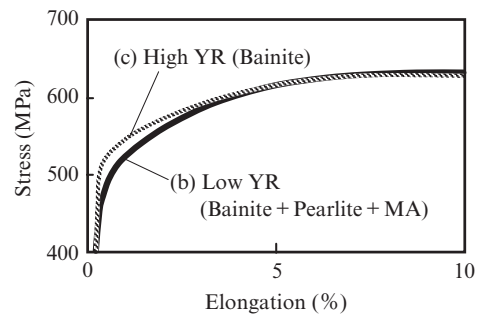


図3 応力-ひずみ曲線の例

Fig. 3 Examples of stress-strain curves

イナイト単相組織 (c) の応力-ひずみ曲線の例を示す。MA の存在は YS の低下と TS の増加を同時にもたらし、低 YR 化への寄与が特に大きい。

このようなマイクロ組織の複相化制御による高強度と低 YR 特性の両立は、図 2 (d) のように加速冷却を途中で中断してフェライトを析出させたり、(e) のような連続冷却中にフェライトを析出させる冷却速度制御によっても実現できる。また、Mn, Cr, Mo, Nb などの合金添加によって MA の生成量が増加することが知られており²⁾、これらの合金元素添加

量の最適化も重要である。

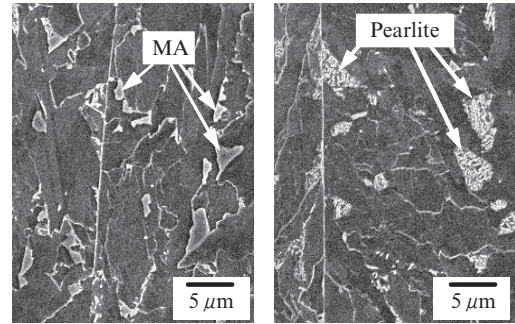
開発鋼では、高精度かつ自在な冷却パターンを可能にする JFE スチール独自の鋼板水冷装置 Super-CR³⁾ と Super-OLAC^{®4)} を活用するとともに、Cr, Mo, V, Nb の添加量を最適化することによって、適正なマイクロ組織と機械的性質を達成した。

2.2 超大入熱溶接熱影響部高靱化技術

高層ビルの鉄骨柱として使用される四面溶接組立ボックス柱の製作には、エレクトロスラグ溶接 (ESW) や多電極サブマージアーク溶接 (SAW) など入熱量が 500 kJ/cm を超える超大入熱溶接が適用され、熱影響部 (HAZ) の著しい脆化が問題となる。

これまでの大入熱 HAZ 靱性向上手法としては、(1) TiN や酸化物など高温でも安定な微細粒子分散によるオーステナイト (γ) 細粒化、(2) 低 C または低 C_{eq} 化 (Nb 低減も含む) による焼入性低下、(3) 微細分散粒子活用による γ 粒内フェライト生成促進など、比較的焼入性の低い成分設計で HAZ 組織をフェライト主体とすることにより、MA を含む上部ベイナイトなど低靱性組織の生成を抑制することが基本であった⁵⁾。

一方、本開発鋼は、強度確保とオンライン製造での低降伏比化のために Mo などの合金元素を添加し、従来より焼入性がやや高い成分設計としている。このため、ボックス柱用など大入熱溶接部靱性が特に要求される仕様に対応する際には、大入熱溶接 HAZ での上部ベイナイトの生成を許容したうえで、上部ベイナイト中の MA 生成を極力抑えることによる靱性改善を志向した。Si 低減により大入熱 HAZ に生成する MA が減少することは従来から知られているが⁶⁾、Si と同時に P を低減することにより、さらに MA 量は減少して HAZ 靱性が向上する。写真 2 は、入熱 1000 kJ/cm の ESW 溶接 Bond 部近傍を模擬する熱サイクル (1400℃加熱、



(a) Conventional (0.25Si-0.010P) vE_{0C} = 13 J
 (b) Developed (0.06Si-0.004P) vE_{0C} = 42 J
 MA : Martensite-austenite constituent
 vE_{0C} : Absorbed energy

写真 2 ESW 相当の再現 HAZ 組織

Photo 2 Microstructures of synthetic heat affected zone (HAZ) simulating electroslag welding (ESW)

800~500℃冷却時間 1000 s) を付与した再現 HAZ のマイクロ組織写真である。従来成分の SA440 (高施工型 SA440-U⁷⁾) では MA が認められるのに対し、Si と P を同時に低減した低 Si—低 P 成分では、MA は顕著に減少してパーライト組織に変化した。それにともない、開発鋼の再現 HAZ 靱性は上部ベイナイト主体のマイクロ組織であるにもかかわらず改善された。

3. 開発鋼板の特性

3.1 母材特性・溶接性

表 1 に開発鋼の化学成分の目標範囲 (HBL[®]440 規格) と実機出鋼成分 (製品分析値) を示す。C 含有量を 0.10% 未満に低減して溶接低温割れ感受性を抑えたうえで、母材および大入熱 HAZ において強度と靱性のバランスに優れたベイナイト主体のマイクロ組織が得られるように、Cr, Mo, V,

表 1 開発鋼の化学成分

Table 1 Chemical compositions of developed steels

	Thickness (mm)	Chemical compositions (mass%)					Others	Ceq ^{*1}	P _{CM} ^{*2}
		C	Si	Mn	P	S			
Developed steels	19	0.06	0.21	1.47	0.008	0.002	Cr, Mo, Nb, V, Ti	0.42	0.17
	25	0.06	0.21	1.45	0.010	0.002		0.41	0.17
	40	0.05	0.21	1.46	0.009	0.001		0.41	0.16
	50	0.05	0.21	1.47	0.010	0.001		0.41	0.16
	60	0.09	0.06	1.50	0.005	0.002		0.45	0.20
	80	0.09	0.07	1.46	0.004	0.002		0.45	0.20
	100	0.08	0.07	1.49	0.005	0.002		0.45	0.20
Target of HBL440	t ≤ 40	≤ 0.12	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.030 ^{*3}	≤ 0.008	as necessary	≤ 0.44	≤ 0.22
	≤ 0.020 ^{*4}				≤ 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

^{*3}HBL440B, ^{*4}HBL440C

表 2 開発鋼の機械的特性

Table 2 Mechanical properties of developed steel plates

	Thickness (mm)	Specimen	Tensile properties				Impact properties	
			YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	El (%)	vE _{0°C} (J)	vTrs (°C)
Developed steels	19	JIS 1A	490	619	79	18	358	-95
	25		487	613	79	21	371	-65
	40		485	614	79	27	364	-45
	50	JIS 4	484	612	79	31	380	-105
	60		482	631	76	29	347	-50
	80		471	601	78	27	348	-85
	100		471	603	78	28	340	-80
Target of HBL440	19 ≤ t ≤ 32	JIS 1A	440~540	590~740	≤ 80	≥ 15	≥ 70	—
	32 < t ≤ 40					≥ 16		
	40 < t ≤ 100	JIS 4				≥ 20		

YS: Yield strength TS: Tensile strength YR = YS/TS El: Elongation
vE_{0°C}: Absorbed energy vTrs: Brittle to ductile transition temperature

表 3 y 形溶接割れ試験結果

Table 3 Results of y-groove weld cracking test

Thickness (mm)	Welding method	Test conditions		Cracking ratio (%)		
		Consumable Welding conditions	Pre-heating	Surface	Section	Root
100	GMAW (CO ₂)	MG-60, φ1.2*	no (5°C)	0	0	0
		250A-30V-26cm/min (17 kJ/cm) Atmosphere: 5°C, 60%		0	0	0

* Kobe Steel, Ltd.

Ti などの元素を添加した。板厚 60 mm 以上の鋼板はボックス柱用途を想定し、大入熱溶接 HAZ 靱性を考慮した前述の低 Si—低 P 系成分とした。

表 2 には鋼板母材の引張特性およびシャルピー衝撃特性を示す。いずれも目標(HBL[®]440 規格)を満足している。シャルピー破面遷移温度 (vTrs) は -40°C 未満であり、優れた母材靱性を示した。

表 3 には板厚 100 mm の y 形溶接割れ試験結果を示す。CO₂ 溶接 (GMAW) による予熱なし (5°C) の試験で割れは発生しなかった。従来の SA440 規格 (P_{CM} ≤ 0.28)¹⁾ に対して大幅に溶接性が向上しており、高施工型 SA440 (P_{CM} ≤ 0.22)⁷⁾ と同等以上の優れた溶接性を有する。

3.2 溶接継手特性

サブマージアーク溶接 (SAW), エレクトロスラグ溶接による大入熱溶接継手を作製し、シャルピー衝撃試験を行なった。溶接条件と継手概要を表 4 に、シャルピー試験片の採取位置と試験結果をそれぞれ図 4, 5 に示す。入熱 500 kJ/cm 以上の超大入熱溶接継手においても、平均 70 J 以上の優れたシャルピー特性を示した。

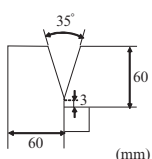
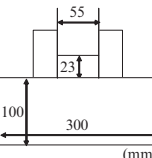
3.3 部材性能

3.3.1 局部座屈に対する性能

井上ら⁸⁾ は、後に SA440 規格になったと考えられる低降

表 4 溶接条件

Table 4 Welding conditions

Welding method	Thickness (mm)	Pre-heating	Groove shape	Consumable	Heat input (kJ/cm)
				Welding conditions	
Submerged arc welding (SAW)	60	no (17°C)		Wire (L): KW-101B* Wire (T): KW-101B* Flux: KB-551* (L): 2 300 A-38 V (T): 1 800 A-52 V 19 cm/min	572
Electroslag welding (ESW)	100	no (8°C)		Wire: KW-60AD* Flux: KF-100AD* 380 A-52 V 1.2 cm/min	960

* Kobe Steel, Ltd.

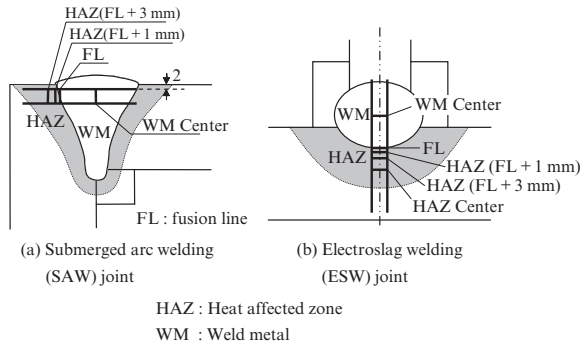


図4 溶接継手シャルピー試験片採取位置

Fig. 4 Positions of Charpy impact test specimens for the welded joints

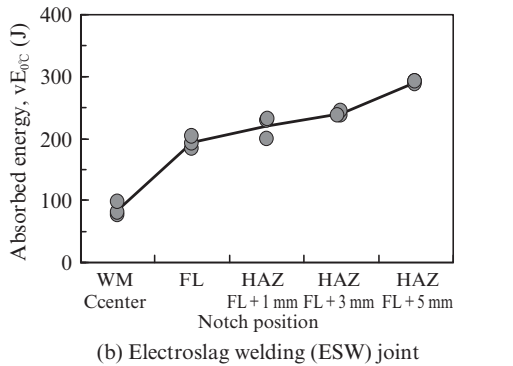
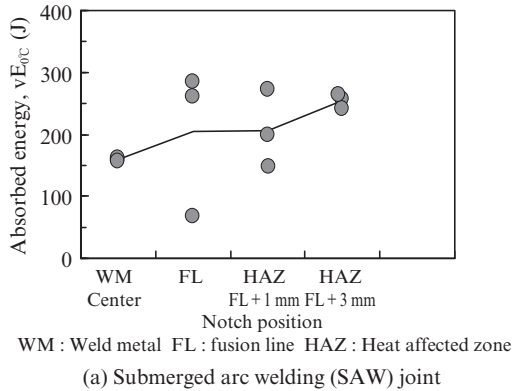


図5 溶接継手シャルピー試験結果

Fig. 5 Results of Charpy impact tests for the welded joints

伏比 590 N/mm² 級鋼材の短柱圧縮実験を実施している。本節では開発鋼 HBL[®]440 の短柱圧縮実験の結果を井上ら⁸⁾ の短柱圧縮実験の結果と比較し、局部座屈に対する性能を

考察する。

図6に短柱圧縮実験の概要を示す。文献⁹⁾に従い、断面に均等に荷重がかかるように鉛直下方に鉛直载荷した。

表5には試験体の詳細を示す。試験体は溶接組立箱形断面の短柱、全2体でFA-FB境界、FB-FC境界を狙って設定した。ともに公称板厚 19 mm の鋼板を利用した実物サイズである。

図7に実験で得た塑性変形倍率 R_m の結果を SA440 の結果⁸⁾と重ねて示す。ここで、 R_m は次式で定義される。

$$R_m = \epsilon_{max} / \epsilon_y - 1$$

ϵ_{max} : 実験最大耐力時の圧縮ひずみ ((試験体の縮み)/(初期高さ))

ϵ_y : 降伏ひずみ ($= \sigma_y / E$)

σ_y : 試験体鋼材の引張試験による降伏耐力(N/mm²)

E : ヤング係数 ($= 205\,000$ N/mm²)

また、横軸は、幅厚比 B/t に $(\sigma_y/E)^{1/2}$ を乗じた一般化幅厚比を用いており、 σ_y で基準化した幅厚比となっている。

図7によれば、開発鋼は SA440 と同等の性能を有していることが分かる。また、開発鋼は「鋼構造限界状態設計指針¹⁰⁾」に示される目標値も達成している。これらより、局部座屈を支配する指標、幅厚比ランクについて開発鋼は SA440 と同様に設定してよいと考えられる。

3.3.2 柱梁接合部の性能

図8に示すように、開発鋼の柱梁接合部の構造性能を評

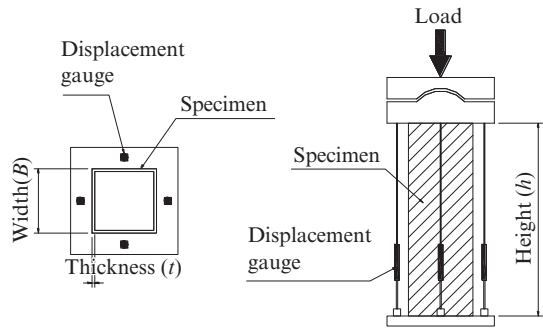


図6 短柱圧縮実験概要

Fig. 6 Set-up of stub-column test

表5 単柱圧縮試験体詳細

Table 5 Specimens of stub-column test

Specimen	B (mm)	t (mm)	B/t	$(B/t) (\epsilon_y)^{1/2}$	A (mm)	h (mm)	σ_y		σ_y / σ_u	EL (%)
							(N/mm^2)			
BOX 1	455.3	19	24.1	1.18	32 990	1367	495	621	0.80	43
BOX 2	512.2	19	27.1	1.30	37 296	1538	472	612	0.77	44

B : Width, t : Thickness, ϵ_y : σ_y/E , E : Young modulus = 205 000 (N/mm²), A : Area, h : Height, σ_y : Yield strength, σ_u : Tensile strength, EL: Elongation, (σ_y , σ_u and EL are from coupon tensile test, JIS No. 5)

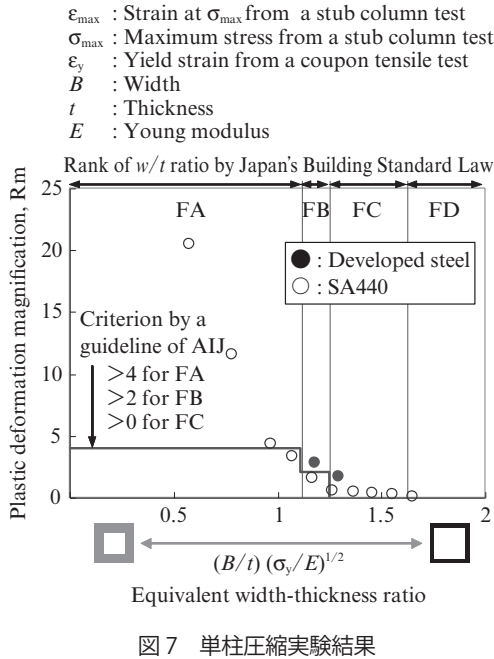


図7 単柱圧縮実験結果
Fig. 7 Result of stub-column test

価するために繰返し荷重実験を実施した。試験体は全2体で、**図9**に示すように接合部のディテールが実験変数となっている。すなわち、梁ウェブをボルト接合し梁フランジはスカラップを作って溶接する「現場溶接型」と、梁ウェブを隅肉溶接し梁フランジはスカラップを作らずに溶接する「工場溶接型」である。梁端フランジの溶接では、ともに、溶接材料 JIS Z 3312 G59JA1UC3M1T(1.2φ)を用い、入熱 30 kJ/cm 以下、パス間温度 350℃以下で管理した。

柱と梁は**図8**に示したサイズの溶接組立 H 形鋼であり、破壊を想定している梁に板厚 19 mm および 25 mm の開発鋼を用いた。これらの鋼板の機械的性質を**表6**に示す。80%以下の降伏比と 290~379 J の高い靱性を有している。

図10に梁端のモーメント-回転角関係を全塑性モーメント時の値で基準化して示す。スカラップを有する試験体 S では、変形が進むにつれ、梁フランジとスチールタブのスリット部を起点とした延性き裂と、スカラップ底から発生した延性き裂がそれぞれ進展し、これらがつながる形で脆性破壊した。一方、スカラップがない試験体 NS では、梁フランジとスチールタブのスリット部から延性き裂が発生し、溶接熱

影響部に沿って進展した後、母材側への脆性破壊となった。試験体 S は塑性率(=θ/θ_p)で3以上、試験体 NS は塑性率で6以上の変形に耐えており、ともに、塑性化後も大きく変形し、耐力は全塑性モーメント M_p から 15%以上上昇した。

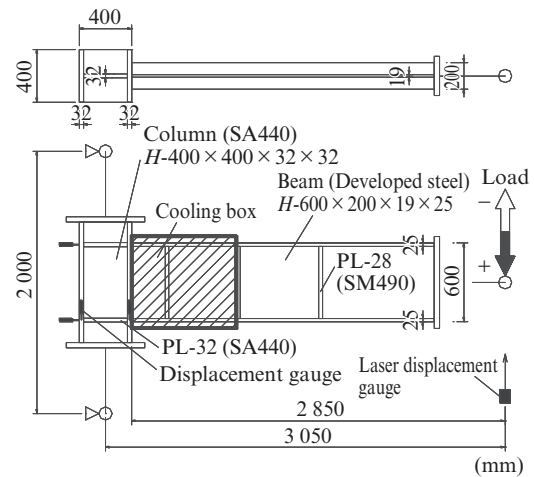
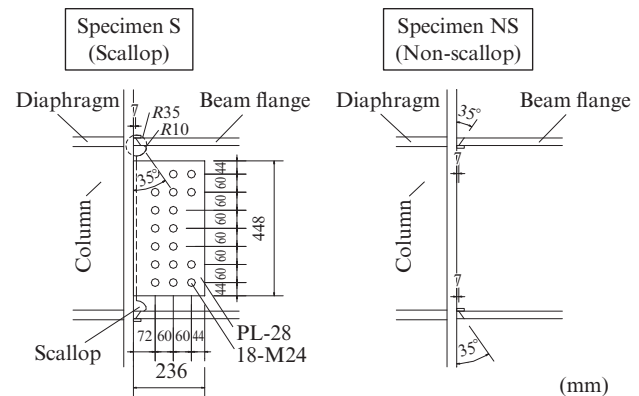


図8 柱梁接合部繰返し荷重実験の概要
Fig. 8 Set-up of cyclic loading test of connection



Welding conditions of both specimens
 Welding material : JIS Z 3312 G59JA1UC3M1T
 Heat input : Not more than 30 kJ/cm
 Interpass temperature : Not more than 350℃
 End tabs : SM490A (Steel in JIS G 3106)

図9 柱梁接合部の詳細
Fig. 9 Details of connections

表6 柱梁接合部繰返し荷重試験体を用いた開発鋼板の機械的特性

Table 6 Mechanical properties of the developed steel plates for specimens of welded beam-to-column connections

Specimen	Column flange and web					Beam flange					Beam web				
	σ_y	σ_u	σ_y/σ_u	EL (%)	vE _{0°C} (J)	σ_y	σ_u	σ_y/σ_u	EL (%)	vE _{0°C} (J)	σ_y	σ_u	σ_y/σ_u	EL (%)	vE _{0°C} (J)
	(N/mm ²)					(N/mm ²)					(N/mm ²)				
S (Scallop)	499	641	0.78	48	316	494	631	0.78	47	290	496	630	0.79	43	379
NS (Non-scallop)															

σ_y : Yield strength, σ_u : Tensile strength, EL: Elongation, (σ_y , σ_u , and EL are from coupon tensile test, JIS No. 5)
 vE_{0°C}: Charpy absorbed energy at 0°C

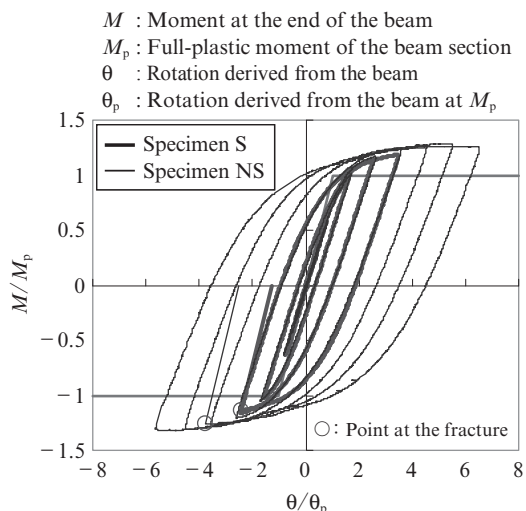


図 10 柱梁接合部繰返し載荷試験結果

Fig. 10 Result of cyclic loading test of connection

これらの結果は、同条件の SA440 の柱梁接合部の繰返し実験¹¹⁻¹³⁾ とほぼ同等の性能であり、開発鋼が十分な塑性変形性能を有することを示している。

4. おわりに

開発鋼「HBL[®]440」は、TMCP 技術を駆使することにより、従来の建築構造用 590 N/mm² 級低 YR 鋼板 (SA440) に必須であった 2 相域熱処理を省略して、同等の機械的性質と優れた溶接性を実現した鋼板である。本開発鋼板を用いた鉄骨部材が SA440 と同等の性能を有することも部材試験により確認できた。溶接組立 H 形鋼、角形鋼管(プレスコラム)、円形鋼管、四面溶接組立ボックス柱などの建築鉄骨部材への適用が期待される。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟. 高性能鋼利用技術小委員会編. 建築構造用高性能 590 N/mm² (SA440) 鋼設計・溶接施工指針. 2004, 47 p.
- 2) 平井征夫. 高張力鋼の M-A Constituent (島状マルテンサイト) とじん性. 溶接学会誌. 1981, 50, p. 37-48.
- 3) JFE スチール. プレスリリース「厚板ハイテン製造プロセスに革新」. 2011-07-06. <http://www.jfe-steel.co.jp/release/2011/07/110706.html>.
- 4) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘. 高度な製造技術で応える高品質高性能厚鋼板. NKK 技報. 2002, no. 179, p. 57-62.
- 5) 木村達己, 角博幸, 木谷靖. 溶接部靱性に優れた建築用高張力鋼と溶接材料. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 38-44.
- 6) 伊藤慶典, 邦武立郎, 池田允彦, 大谷泰夫, 小溝裕一. 低シリコン高張力鋼の特性. 住友金属. 1977, 29, p. 395.
- 7) 石井匠, 藤沢清二, 大森章夫. 超高層ビル向け建築構造用鋼材の概要と適用例. JFE 技報. 2008, no. 21, p. 1-7.
- 8) 井上哲郎, 桑村仁. 降伏棚のある低降伏比 60 キロ高張力鋼短柱の応力-ひずみ特性(十字形および箱形断面). 日本建築学会構造工学論文集. 1991, 37 B, p. 225-238.
- 9) 建築研究所. 日本鉄鋼連盟編. 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究委員会報告書. 2002, 221 p.
- 10) 日本建築学会編. 鋼構造限界状態設計指針・解説. 2002, p. 121-124.
- 11) 藤牧勇太, 中込忠男, 崎野良比呂. SA440 鋼を用いた柱梁溶接接合部の破壊及び変形能力に関する実験的研究. 日本建築学会構造系論文集. 2011, 666, p. 1499-1506.
- 12) 植木卓也, 中川佳, 大森章夫, 中川郷司, 石井匠, 加村久哉. 「建築構造用高性能 590 N/mm² TMCP 鋼材の部材性能その 1」. 日本建築学会大会学術梗概集構造Ⅲ. 名古屋, 2012-9-12-14, 日本建築学会, 2012, p. 1249-1250.
- 13) 中川佳, 植木卓也, 中込忠男, 石井匠, 中川郷司, 加村久哉. 「建築構造用高性能 590 N/mm² TMCP 鋼材の部材性能その 2」. 日本建築学会大会学術梗概集構造Ⅲ. 名古屋, 2012-9-12-14, 日本建築学会, 2012, p. 1251-1252.



大森 章夫



中川 佳



室田 康宏