

Heavy Gauge H-Shapes “RIVER TOUGH” of the New TMCP Type for Building Structures



木村 達己

Tatsumi Kimura

技術研究所 厚板・条
鋼研究部門



奥井 隆徳

Takanori Okui

水島製鉄所 管理部条
鋼管理室 主査(掛長)



内田 清

Kiyoshi Uchida

水島製鉄所 管理部技
術サービス室 主査
(掛長)

要旨

新 TMCP (thermo-mechanical control process) 法は、VN によつてフェライト核生成を促進し、組織の微細化を図るものであり、圧延や冷却条件に制約のある極厚 H 形鋼の圧延に適した、従来にない組織制御法である。612×500×50×80 mm サイズの 355 MPa 級極厚 H 形鋼に適用した結果、組織が格段に微細化し、高強度でかつ高靱性を示した。開発鋼を柱に適用した柱・梁構造物の載荷試験の結果、高層建築物の柱材として十分な安全性をもつことを確認した。JIS 規格の SN490CTMC および SM520TMC を満足する、川崎製鉄独自規格の RIVER TOUGH325 および 355 極厚 H 形鋼を開発し、現在最大フランジ厚 80 mm まで工程的に製造している。

Synopsis:

Heavy gauge H-shapes, under the brand names of RIVER TOUGH 325 and 355, which satisfy to SM520CTMC and SN490CTMC of the JIS grades, have been developed. The microstructure of the developed heavy gauge H-shapes was refined by the new TMCP, indicating high strength and excellent toughness due to low carbon equivalent. The new TMCP mainly consists of the enhancement of ferrite nucleation rate through fine VN precipitates which encourage refinement of microstructure. According to the results of full-scale loading tests, carried out on a column-beam structure, in which the column consisted of the newly developed heavy gauge H-shape, the column proved to have sufficient deformation capacity and ensure safe structure as a material for high-rise buildings.

1 緒 言

極厚 H 形鋼は、厚板溶接組立ボックス柱に匹敵する大断面を有するため、高層建築物の柱材としての適用が増加している。この極厚 H 形鋼は、ボックス柱と比較して溶接箇所の減少による建築物の安全性向上や製造納期短縮などの長所をもつ。

しかし、その反面形状制御のための圧延条件や設備の制約から、高温加熱で、かつ軽圧下多パス圧延操業を余儀なくされるため、組織の微細化が不十分となり、厚板ミルによる TMCP (thermo-mechanical control process) 厚鋼板と同等の性能を得ことは困難であったり。

こうした極厚 H 形鋼の弱点を克服し、厚板製ボックス柱に匹敵する柱材を提供するためには、H 形鋼の製造プロセスに適した新しい TMCP 法を開発する必要がある。すなわち、組織微細化メカニズムの根幹を担う、変態駆動力の向上を圧延歪や冷却の制御によって行う従来の TMCP 法にかわって、他の方法によって組織の微細化を行なわなければならない。

本報告では、介在物からフェライトを析出させる介在物を利用した変態制御技術 (fine inclusion metallurgy: FIM) を導入した新

TMCP 法の冶金的特徴について述べるとともに、この新 TMCP 法を用いて製造した SM520MPa 級極厚 H 形鋼の母材性能、溶接性および継手特性を非 TMCP 極厚 H 形鋼と比較しながら紹介する。

2 極厚 H 形鋼製造プロセスに適した 新 TMCP 法の開発

2.1 極厚 H 形鋼の圧延

極厚 H 形鋼と TMCP 厚鋼板の製造条件の違いを Table 1 に示

Table 1 Hot rolling conditions of heavy gauge H-shape and thick plate

Item	Heavy gauge H-shape	Thick plate
Reheating temperature (°C)	≥ 1 150	ca. 1 150
Total reduction (%)	≤ 50	75
Reduction per pass in the recrystallization region (%)	5~10	10~15
Reduction in the non-recrystallization region (%)	0	ca. 30
Cooling condition	AC	ACC

* 平成 10 年 9 月 29 日原稿受付

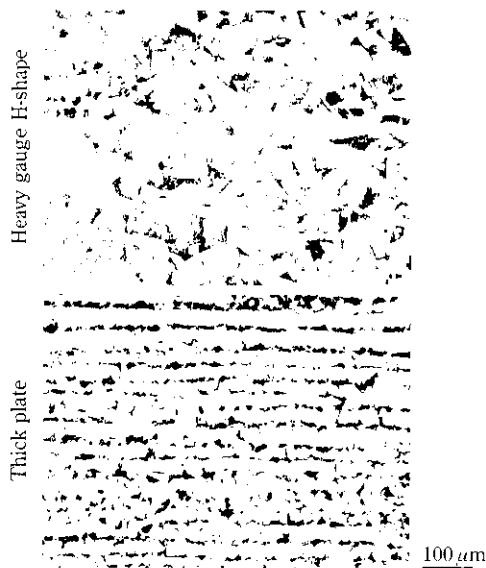


Photo 1 Microstructures of heavy gauge H-shape and thick plate

す。極厚H形鋼の圧延は、TMCP 厚鋼板よりも高温加熱が必要で、累積圧下量や制御圧下量も極めて少ない。このため、初期の γ 粒が粗大で、圧延にともなう再結晶細粒化が少なく、かつ加工歪の導入が小さい。また、圧延後の冷却において、全断面を均一に加速冷却することは困難であり、空冷を主体としている。極厚 H 形鋼と TMCP 厚鋼板のミクロ組織の比較を **Photo 1** に示す。前述した圧延、冷却法の違いによって、極厚H形鋼は、TMCP 厚鋼板と比較して、組織微細化が不十分であり、高強度と強靱化を図るうえで大きな制約となっていた。したがって、極厚H形鋼の組織微細化には、圧延、冷却条件に依存している従来の TMCP 法にかわって、新しい TMCP 法を開発する必要がある。

2.2 各種介在物のフェライト生成能

近年、鋼中へ分散させた微細析出物や介在物をフェライト核生成サイトとして積極的に利用する、新たな組織微細化法 (FIM) が注目されている²⁻⁷⁾。フェライトの核生成能は、介在物/フェライト界面の格子整合性から決定される界面エネルギーが重要な要因であることが指摘されている⁸⁾。**Fig. 1** は各種介在物による界面エネルギーとフェライト生成の駆動力の変化を示す。VN は TiN とならんで高いフェライト核生成能をもつ。さらに、VN はフェライト中へ

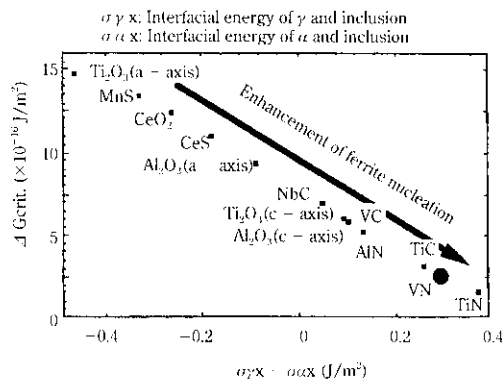


Fig. 1 Change in interfacial energy and driving force for nucleation of ferrite at various inclusions

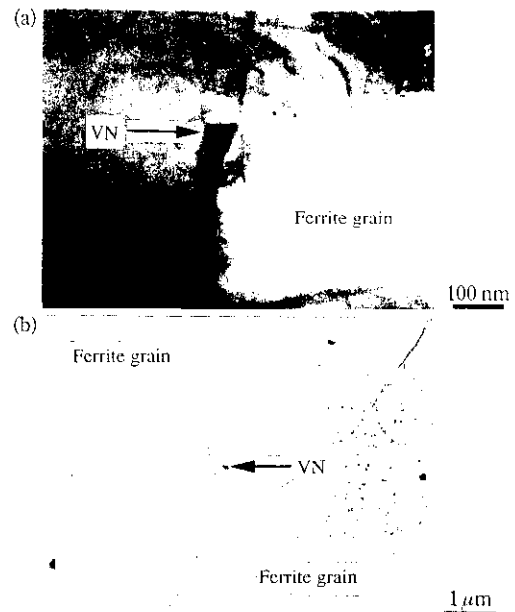


Photo 2 Electron micrographs of ferrite transformation through VN precipitates; (a) cooled at a rate of 0.1°C/s from 950°C to 630°C and then quenched at 630°C to a room temperature (thin film), (b) cooled at a rate of 0.1°C/s from 950°C to a room temperature (carbon extrusion replica)

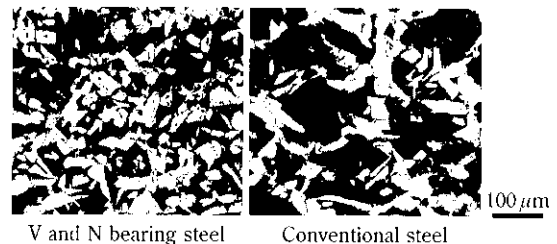


Photo 3 Microstructure change of V and N bearing steel compared with conventional steel; cooled at a rate of 0.1°C/s from 950°C to 630°C and then quenched at 630°C to a room temperature

析出することによって強度上昇も期待できるので、今回、極厚H形鋼の組織微細化に対して、この VN に着目した。

2.3 FIM 適用による組織微細化と高強度、強靱化

フェライト変態途上の V と N を添加した VN 鋼の電子顕微鏡による組織観察結果を **Photo 2** に示す。VN 鋼では、 γ 中へ析出した VN を核としてフェライト変態が生じている。VN 鋼と従来鋼のフェライト変態挙動の比較を **Photo 3** に示す。VN 鋼は、フェライト変態過程で、 γ 粒内に生成するフェライトが増加しており、さらに粒界フェライト数も増加する⁹⁾。

極厚 H 形鋼へ適用した際のミクロ組織微細化効果を確認するために、実機条件を想定した圧延を行い、ミクロ組織変化とそれにもなう機械的性質への影響を調べた。フェライト粒数密度に及ぼす未再結晶域圧下量の影響を **Fig. 2** に示す。VN 鋼は従来の Nb 鋼と比較して、未再結晶域圧下量の低い領域で顕著にフェライト粒が微細化する。VN 鋼と従来鋼の降伏点とシャルピー吸収エネルギーの関係を **Fig. 3** に示す。VN 鋼はミクロ組織が微細化することにより、

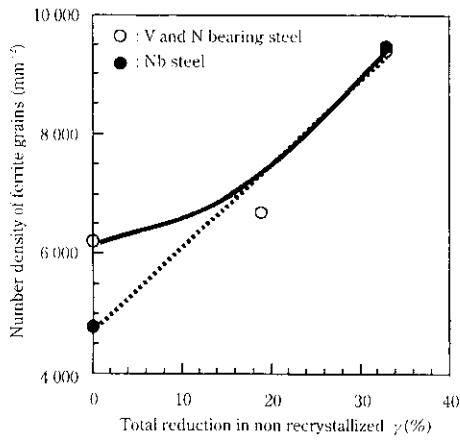


Fig. 2 Relation between the reduction in the non-recrystallization region and the number density of ferrite grains

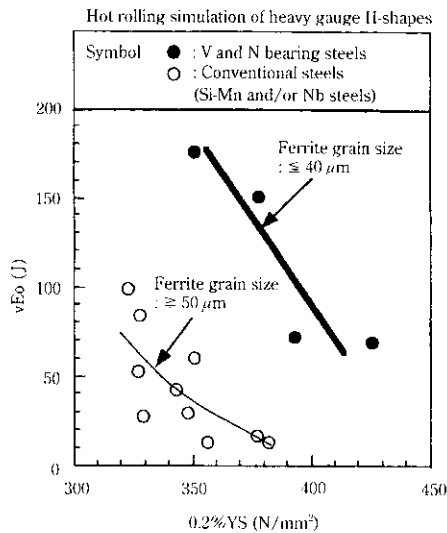


Fig. 3 Improvement of strength and toughness for V and N bearing steels

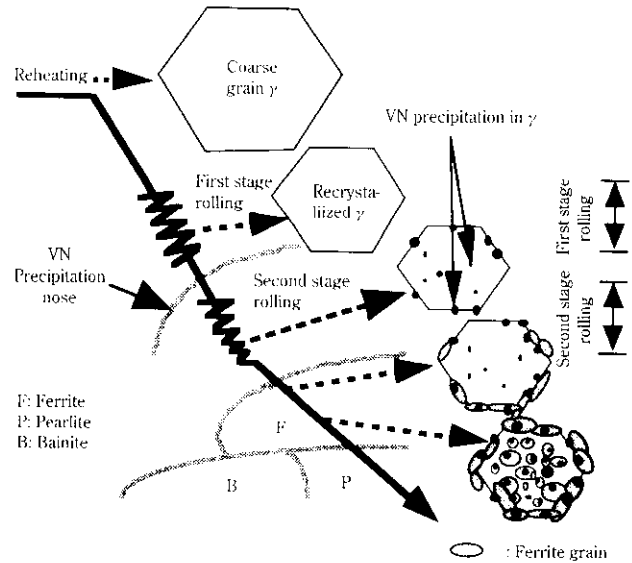


Fig. 4 Microstructure control of the new TMCP for heavy gauge H-shape

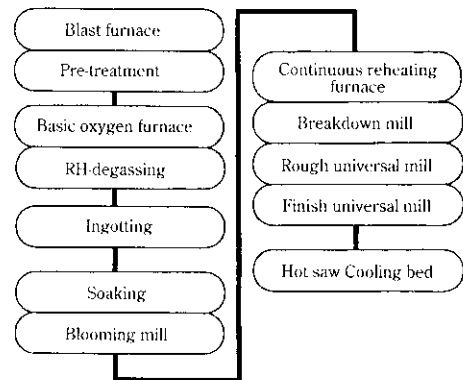


Fig. 5 Manufacturing process of heavy gauge H-shape

強度および靱性がともに向上する。

2.4 極厚 H 形鋼に適した新 TMCP 法

新 TMCP 法を Fig. 4 に示す。新 TMCP 法では、V と N を適量添加した鋼について、 γ を再結晶するように圧延する第 1 段階圧延と、続いて γ 中への VN 析出を促進させるための第 2 段階圧延とからなる。これらを終了後の冷却中に析出した VN を核として、 γ 粒界および粒内のフェライト変態が活発に生じ、最終組織が微細化される。新 TMCP 法では、比較的高温域での圧延で微細化効果が発揮されるので、H 形鋼圧延にとって極めて適切な圧延方法である。

3 FIM を利用した新 TMCP 法による極厚 H 形鋼の性能

3.1 製造方法

FIM を利用した新 TMCP 法を適用して、SM520CTMC 級の極厚 H 形鋼を実機製造した。製造プロセスを Fig. 5 に示す。鋼塊を溶製、造塊後、鋼片圧延を行いビームブランクを製造した。このビームブランクを再加熱後、形鋼圧延を行い、 $612 \times 500 \times 50 \times 80$ mm サイズの極厚 H 形鋼を製造した。大形圧延にあたっては、加熱抽出温度や圧延中の温度管理を厳密に行った。開発鋼の代表的な化学組成を Table 2 に示す。0.12% C-1.35% Mn-0.065% V 鋼に適正量の Cu, Ni, N を添加しており、炭素当量を 0.39% まで低減している。

Table 2 Typical chemical compositions of the new TMCP type heavy gauge H-shape and conventional one

Steel	C	Si	Mn	Al	V	Others	Ceq	Pcm
Developed	0.13	0.38	1.38	0.028	0.066	Cu, Ni, N	0.39	0.25
Conventional	0.15	0.38	1.50	0.030	0.060	Cu, Ni	0.43	0.27

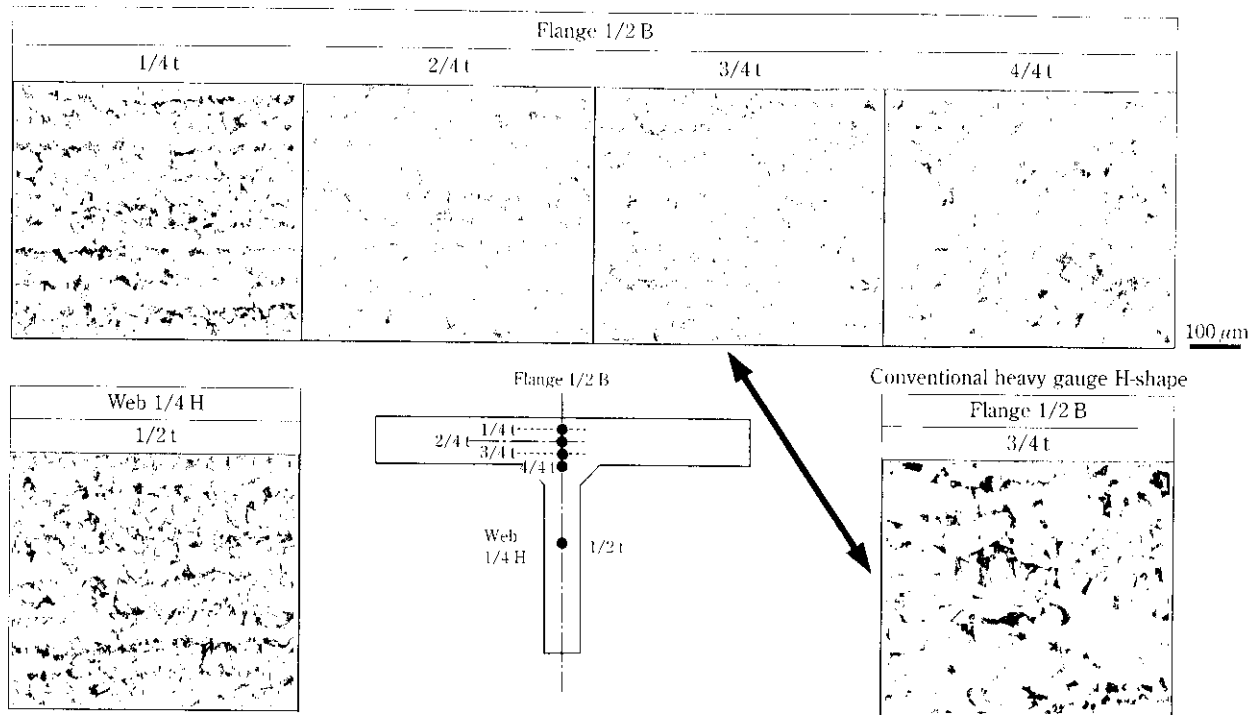


Photo 4 Microstructures of the new TMCP type heavy gauge H-shape at specific portions

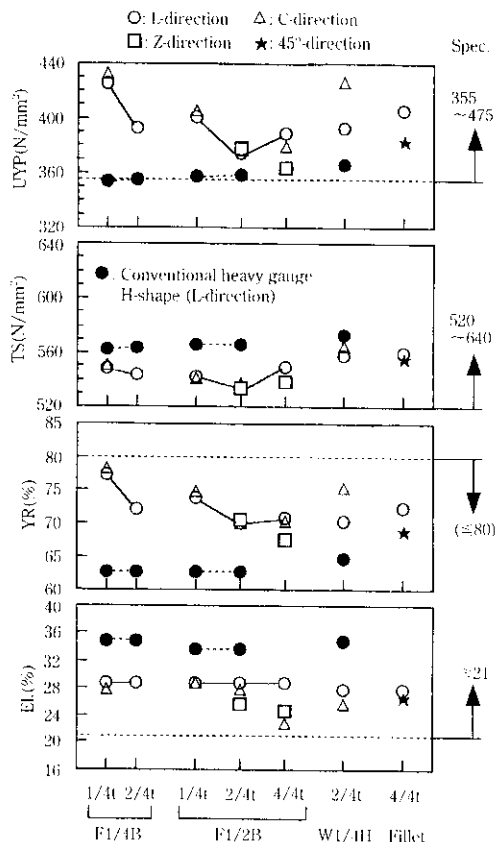


Fig. 6 Mechanical properties of the new TMCP type heavy gauge H-shape at specific portions compared with conventional one

3.2 開発した極厚 H 形鋼の母材性能

開発した極厚 H 形鋼の各種母材性能について以下に示す。まず、

開発した極厚 H 形鋼の F1/2B 部の板厚方向のミクロ組織変化を Photo 4 に示す。炭素当量が 0.43% の従来の極厚 H 形鋼を比較のため写真中に示しているが、これに比べて、格段に組織が微細化している。また、板厚方向の組織変化も小さく、フィレット部に近い 4/4t 部においても微細なフェライト・パーライト組織を呈している。

各部の引張特性を Fig. 6 に示す。開発した極厚 H 形鋼は、ミクロ組織の微細化によって、目標の 355 MPa 以上の高い降伏強度が、全断面において得られている。降伏比は 80% 以下の低降伏比となっており、伸びも 21% 以上が得られている。各部から L、C および Z 方向の試験片を採取し、衝撃特性を調査した結果を Fig. 7 に示す。開発した極厚 H 形鋼の破面遷移温度は、従来鋼よりも約 40°C 低温側へ移行しており、優れた靱性を示している。また、Z 方向の吸収エネルギーも 0°C で 50J 以上と高く、この結果は TMCP 厚鋼板と同等の性能である。各部位の断面硬さ分布を調べた結果を Fig. 8 に示す。中心部と表層の硬度差は HV25 と小さく、かつ各部位における硬さ変化も認められず、均一な硬度分布を示している。

3.3 溶接性

溶接性の評価として最高硬さ試験および y 形溶接割れ試験を行った結果を、それぞれ Fig. 9 および 10 に示す。従来の極厚 H 形鋼と比較して、溶接部最高硬さは HV280 と低い。また、y 形溶接割れ試験では、室温においても溶接割れは認められず、従来にはなく良好な溶接性を示していることがわかる。

3.4 継手性能

柱・梁および柱・柱溶接部の継手性能を調査するため、実施工時の溶接法を想定して半自動 CO₂ 溶接により試験体を作製した。溶接施工条件を Table 3 に示す。梁材には板厚 40 mm の SN490A 厚鋼板を用いた。これらの継手より、全厚の継手引張試験片およびシャルピー衝撃試験片を採取し、継手特性を評価した。溶接継手引張特性を Table 4 に示す。破断位置は、梁母材あるいは極厚 H のフラ

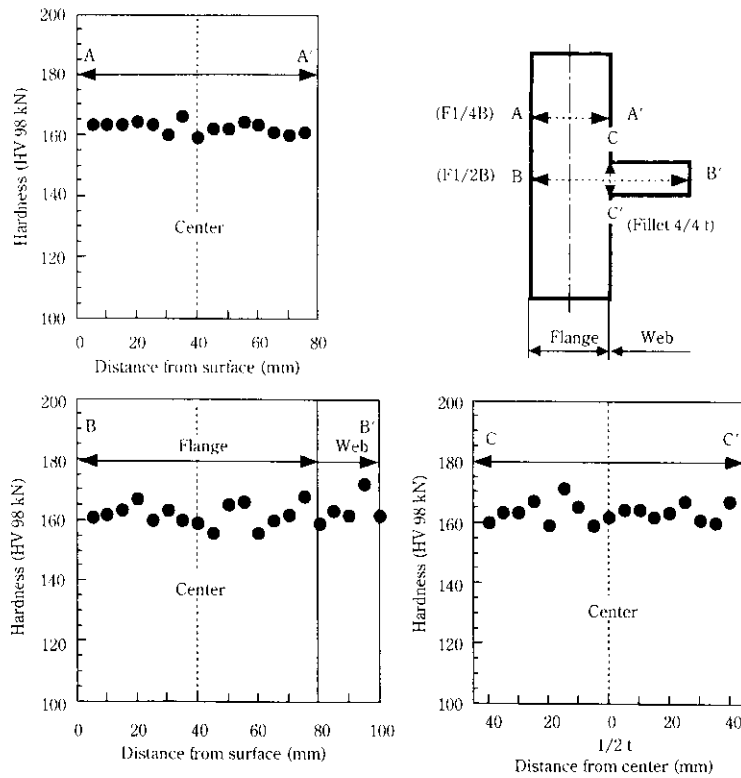


Fig. 8 Hardness distributions for the new TMCP type heavy gauge H-shape

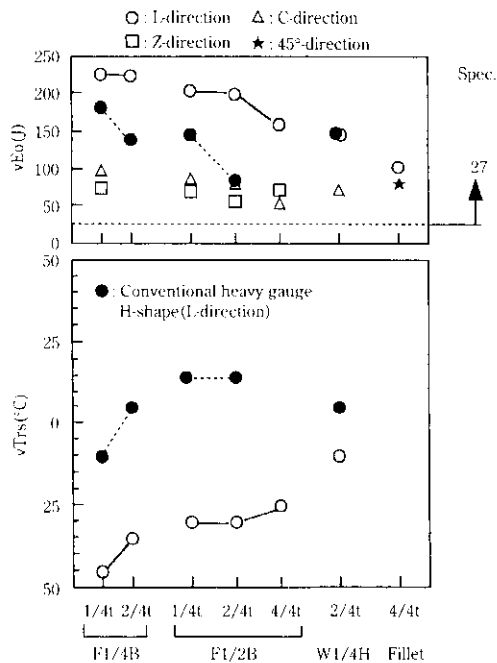


Fig. 7 Charpy impact test results of the new TMCP type heavy gauge H-shape at specific portions compared with conventional one

ンジ母材部であり、溶接部からの破断はみられなかった。溶接継手部の衝撃試験結果を Fig. 11 に示す。柱-梁継手では Z 方向、柱-柱継手では L 方向の衝撃試験である。柱-梁継手の HAZ および Bond 部は、柱-柱継手と比較してやや衝撃特性は低下する傾向にあるが、0°C における吸収エネルギーはそれぞれ 89J および 84J、脆性破面率は 50% 以下になっており、継手靱性も良好な値である。

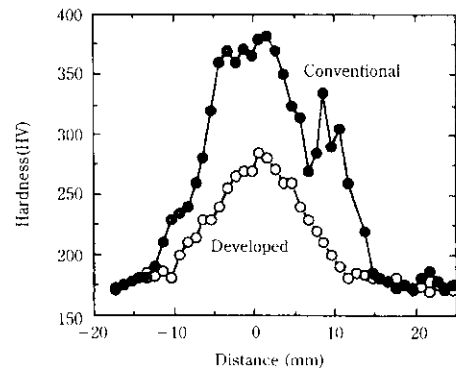


Fig. 9 Maximum hardness test results of the new TMCP type heavy gauge H-shape

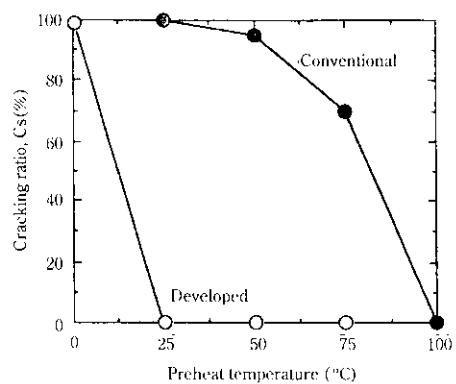


Fig. 10 Results of y-groove weld cracking test for the new TMCP type heavy gauge H-shape

Table 3 Welding conditions of various welding

Welding joint	Position	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
Column to beam	Horizontal-fillet (uphill)	16~24	290~330	37	31~56	12~23
Column to column	Horizontal-uphill	61~68	270~300	34~35	32~59	10~19

Welding method: CO₂ gas welding, Preheat temp.: $\geq 100^{\circ}\text{C}$, Inter-pass temp.: $105\sim 205^{\circ}\text{C}$, Welding electrode: KC-50

Table 4 Tensile test results of flange and beam welded joints

Sample	T.S. (N/mm ²)	Fracture position
Convex test piece	592	Plate
	592	Plate
No convexity	540	H-shape
	553	H-shape

力の比をおよそ 0.6 とした試験体では、最大耐力 (Qmax.) 1799~1836kN、パネルの降伏耐力に対する最大耐力の比 (Qmax./Qpy) 1.45~1.48、累積塑性変形倍率 (η_f) 19.9~27.7 と十分な耐力、塑性変形能力を示した⁹⁾。最終的には梁の座屈により構造体試験は終了したが、極厚 H 形鋼柱には、き裂や局部座屈などの損傷は全く認められなかった。この結果は、開発した新 TMCP 極厚 H 形鋼が、高層建築物の柱材として十分な安全性をもつことを示している。

Sample (direction)	Position	Absorbed energy, vEo (J)		
		HAZ*	Bond	WM
Column to beam (Z)	(A)	89 (45)	84 (43)	123 (28)
Column to column (L)	(B)	224 (13)	220 (5)	134 (15)

*HAZ: 1 mm from F.I.

() : B.A. (%)

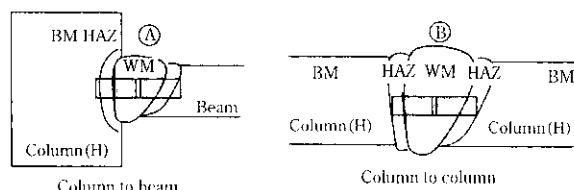


Fig. 11 Charpy impact test results of welded joints

3.5 構造物性能

新 TMCP 極厚 H 形鋼を高層建築物の柱材として用いた際の安全性を確認するために、スカラップを有する現場施工を想定した構造物を作製し、載荷実験を行った。柱の降伏耐力に対する梁の降伏耐

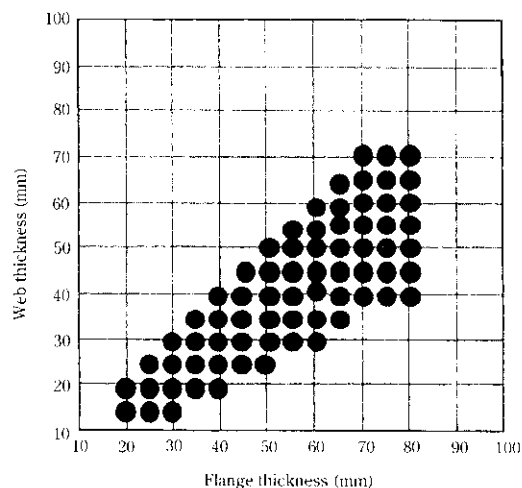


Fig. 12 Available thickness combinations of RT325 and RT355 (H500 x 500 series)

Table 5 Application of the new TMCP type heavy gauge H-shape "RT325, RT355"

No.	Project	Designer	Scale	Details		
				Spec.	Max. thickness (mm)	Delivery
1	Doujima Avanza	Nikken Sekkei Ltd.	2B-24F 95 000 m ²	RT-325B (SN490B) TMC	75	'96.9~
2	Kobe International House	Nikken Sekkei Ltd.	3B-22F 56 540 m ²	RT-325B (SN490B) TMC	80	'97.2~
3	Meiji Seimei Aoyama	Takenaka Co.	B3-13F 41 680 m ²	RT-355B (SN520B) TMC	70	'97.2~
4	Harumi 1 Chome Urban Renewal Project (Z Build.)	Nikken Sekkei Ltd. Kume Sekkei Co. Ltd Yamashita Sekkei Inc.	B4-33F 100 800 m ²	RT-325B	65	'97.11~
5	Harumi 1 Chome Urban Renewal Project (X Build.)	Nikken Sekkei Ltd. Kume Sekkei Co. Ltd Yamashita Sekkei Inc. Takenaka Co.	B4-44F 130 000 m ²	RT325C (SN490C) TMC	70	'98.2~

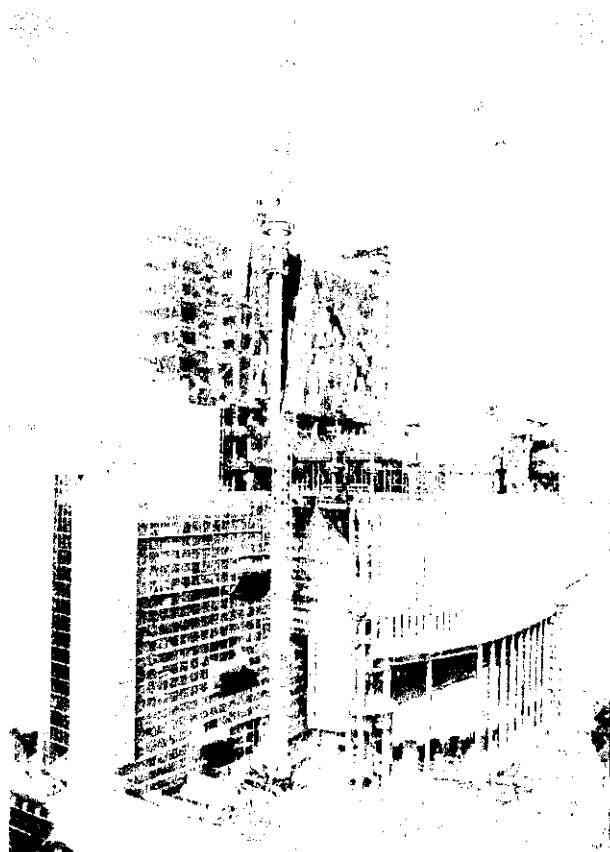


Photo 5 Kobe International House

4 新 TMCP 製極厚 H 形鋼のラインアップと製造実績

4.1 製造可能サイズの範囲とグレード

FIM を利用した新 TMCP 極厚 H 形鋼は、川崎製鉄独自規格の RIVER TOUGH325 (RT325)、RIVER TOUGH355 (RT355) シリーズとして商品化されている。これらは、JIS 規格の SN490CTMC、

SM520CTMC 相当の特性を保証している。その製造可能サイズを Fig. 12 に示す。最大フランジ厚は 80 mm まで工程的に製造可能であり、これまでの製造実績を物件ごとに Table 5 に、RIVER TOUGH の適用例を Photo 5 に示す。RIVER TOUGH は、現在まですでに 5 物件、数千トン規模で製造しており、フランジ板厚に関わらず安定的に高強度で高い靱性が得られている。

5 結 言

極厚 H 形鋼の圧延では、設備制約から高温加熱、多パス軽圧下となり、従来の TMCP 法の適用が困難であった。このため、圧延、冷却条件に依存しない新しい TMCP 法として、微細析出物による組織制御法 (FIM) を開発し、実機へ適用した。

- (1) 高いフェライト核生成能をもつ介在物である VN に着目し、組織微細化挙動と実用性を見極め、極厚 H 形鋼に適した新 TMCP 法を開発した。
- (2) 612 × 500 × 50 × 80 mm サイズの 355MPa 級極厚 H 形鋼に適用した結果、格段に組織が微細化し、高強度でかつ高靱性を示した。特に、フランジ厚中心の F1/2 部やフィレット部、Z 方向の靱性も良好な値を示した。
- (3) 開発鋼は高い溶接性や継手性能を有することを確認した。さらに、構造物載荷試験の結果、開発鋼は、高層建築物の柱材として十分な安全性をもつことを確認した。
- (4) JIS 規格の SN490CTMC、SM520TMC を満足する、フランジ厚肉化にともなう設計基準強度 (F 値) の低減が不要な、川崎製鉄独自規格の RT325、RT355 の新 TMCP 極厚 H 形鋼を開発し、最大フランジ厚 80 mm まで工程的に製造している。現在まですでに 5 物件、数千トンの製造実績があり、客先において高い評価を得ている。

今後は、さらに高強度の TMCP 極厚 H 形鋼の開発などを推進し、お客様のニーズに対応した商品、品揃えを充実させる予定である。

6 謝 辞

(株)竹中工務店殿より 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) 加藤 勉、森田耕次：日本建築学会論文報告集、**156**(1969)2、1-10
- 2) 大森章夫、大井健次、川端文丸、大野豊一：鉄と鋼、(投稿中)
- 3) E. Ishikawa, T. Takahashi, and T. Ochi: Metall. & Mater. Trans., **A25A**(1994), 929-936
- 4) S. Zhang, N. Hattori, M. Enomoto, and T. Tarui: *ISIJ Int.*, **36**(1996), 1301-1309
- 5) S. Zhang, C. Hosoda, M. Enomoto, and T. Tarui: *CAMP-ISIJ*, **8**(1995), 1494
- 6) T. Ochi, T. Takahashi, and H. Takada: I & SM, Feb.(1989), 21-28
- 7) 森田 康、大井健次、川端文丸、大野豊一：鉄と鋼、**84**(1998)7、510
- 8) 鋼中介在物による組織と材質制御の現状と制御メカニズムの検討：(社)日本鉄鋼協会基礎検討会、「鋼中介在物利用による組織と材質の制御研究部会」編、(1995)
- 9) 石井 匠、藤澤 一善、斎藤晋三：川崎製鉄技報、**30**(1998)1、21-26