
土木建築構造用新高機能鋼材

High Performance Steels for Civil Engineering and Building Structure Uses

川端 文丸(Fumimaru Kawabata) 吉里 勉(Tsutomu Yoshizato) 谷川 治
(Osamu Tanigawa)

要旨：

土木建築構造用新機能鋼材として、低YR高張力鋼、極低降伏強度鋼、耐火鋼、低予熱型HT780鋼、TMCP極厚H形鋼およびテーパプレートについて材質とその実現のための組織制御を紹介した。低YR特性に代表される鋼材の機能は、降伏現象の制御によって実現されており、複合組織制御により600N/mm²級まで高張力鋼板が開発されている。また、780N/mm²を超える高強度鋼の実用を組んでいた溶接割れ感受性を低下する技術は、加工熱処理プロセス(TMCP)の有効かつ積極的な利用により実現されており、橋梁用HT780や極厚H形鋼に見られるように厚肉高強度化の要求に応えている。

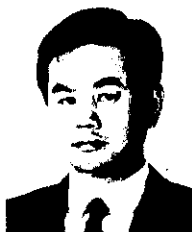
Synopsis：

Typical items of growing interest in civil engineering and building structures were reviewed in the light of specific mechanical properties and microstructure controls, which included the low YR high strength steel, the ultra-low yield steel, the fire resistant steel, the 780 N/mm² class steel of low preheat type and the heavy-wall H-shapes enhanced by TMPC and tapered plates. Low YR property is one of fundamental functions and materialized by the control of yielding behavior with a duplex microstructure and reached 600 N/mm² class. Thermo-mechanical control process (TMCP) has practically progressed the application of high strength steel of 780 N/mm² class by accomplishing the low preheat temperature below 50°C and fairly improved the weldability and toughness of the heavy-wall H-shapes.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

High Performance Steels for Civil Engineering and Building Structure Uses



川端 文丸

Fumimaru Kawabata
技術研究所 鋼材研究
部厚板・条鋼研究室
主任研究員(課長)・
工博



吉里 勉

Tsutomu Yoshizato
水島製鉄所 厚板・鋳
鍛部厚板・鋳鍛技術
室 主査(部長補)



谷川 治

Osamu Tanigawa
水島製鉄所 管理部厚
板・鋳鍛管理室 主査
(課長)

要旨

土木建築構造用新高機能鋼材として、低 YR 高張力鋼、極低降伏強度鋼、耐火鋼、低予熱型 HT 780 鋼、TMCP 極厚 H 形鋼およびテーパプレートについて材質とその実現のための組織制御を紹介した。低 YR 特性に代表される鋼材の機能は、降伏現象の制御によって実現されており、複合組織制御により 600 N/mm² 級まで高張力鋼板が開発されている。また、780 N/mm² を超える高強度鋼の実用を阻んでいた溶接割れ感受性を低下する技術は、加工熱処理プロセス(TMCP)の有効かつ積極的な利用により実現されており、橋梁用 HT 780 や極厚 H 形鋼に見られるように厚肉高強度化の要求に添えている。

Synopsis:

Typical items of growing interest in civil engineering and building structures were reviewed in the light of specific mechanical properties and microstructure controls, which included the low YR high strength steel, the ultra-low yield steel, the fire resistant steel, the 780 N/mm² class steel of low preheat type and the heavy-wall H-shapes enhanced by TMCP and tapered plates. Low YR property is one of fundamental functions and materialized by the control of yielding behavior with a duplex microstructure and reached 600 N/mm² class. Thermo-mechanical control process (TMCP) has practically progressed the application of high strength steel of 780 N/mm² class by accomplishing the low preheat temperature below 50°C and fairly improved the weldability and toughness of the heavy-wall H-shapes.

1 緒 言

市民生活の安全基盤を支える土木建築構造用鋼では、経済基盤に直結する輸送、エネルギー関連の鋼構造物用鋼とは目的と機能をやや異にした特有の機能追求が進められている。1981 年の耐震設計基準の見直しを機に倒壊防止のための終局塑性変形設計に対応する塑性変形機能^{1,2)}が鋼材に要求される³⁾ようになり、現在では SN 規格⁴⁾と通称される新しい JIS 規格として一般化されるに至っている。この他高温耐力を向上させた耐火鋼⁵⁾など、土木建築構造用鋼では防災性の向上ならびに加工性を第一目的とした機能追求が行われている。こうした特色は鋼材組織制御のありかたに大きく影響している。本論文では、さまざまに要求機能が進展する土木建築構造用鋼として開発された鋼材の新機能とそれを実現する金属学的制御上の特徴を述べるとともに、その工業的製造方法の特徴および機械的性質を紹介する。

2 土木建築構造用鋼における材質設計の特徴

現在の土木建築構造用の鋼材製品と要求特性、そしてそれを実現する金属学的制御項目を Table 1 に示す。建築分野においては、耐震、耐火性などの防災性向上のための鋼の降伏現象の制御が特徴的

な材質制御因子である。この材質制御は、軟質のフェライト母地と硬質の第 2 相で形成する組織の複合化技術、さらに炭化物の析出制御技術などによって実現される。

一方、橋梁分野では建設コスト低減がニーズの中で大きな比重を占め、溶接時の予熱負荷軽減ならびに溶接継手数を削減できる鋼材機能が求められている。これまでは、低温割れ感受性低下を柱とした機能向上が図られてきたが、求められる機能の実現には、加工熱処理(TMCP)技術⁶⁾を駆使した材質設計の極限追求に加え鋼板の形状制御も取り入れた斬新な技術が必要である。

こうした製品群は、厚板製品を初めとして形鋼、線棒、鋼管など多様な製品で構成されるが、代表的なものとして、低 YR 高張力鋼、極低降伏強度鋼、耐火鋼、予熱低減型橋梁用 HT 780 鋼、TMCP 極厚 H 形鋼、および橋梁用テーパプレートにつき以下に詳述する。

3 降伏現象を制御した新機能鋼材

3.1 低 YR 高張力鋼

鋼材を塑性変形させ地震エネルギーを吸収する構造設計は低降伏比(低 YR)を指標とした塑性変形能によりその効果を発揮する。潜在的な高張力化の要求とともに、降伏強さと引張強さを自在に制御する低 YR 高張力鋼の製造技術が必要とされている。

* 平成 7 年 11 月 13 日原稿受付

Table 1 Features of functional and microstructure control of steels for civil engineering and building structure uses

Category	Product			Application	Spec. "Brand name"
	Type or Steel	Function	Control factor		
Plates	○ Low YR HT steel	Low YS & HT	Yielding behavior	Anti-seismic bldgs. -Cost down	JIS G3136
	○ Ultra-low YS steel	Low YS & high elasticity	(Complex structure Dislocation mobility Precipitates)		—
	○ Fire Resistant (FR) steel	High YS at elevated temp.			"KSFR"
	○ HT780 steel low preheat type	Anti-cold cracking	Hardenability	Bridges -Cost down	HBS-G-3102
	○ Tapered plate	Variable moment of inertia	Dimension		—
Shapes	○ TMCP Heavy-wall H-shapes	Low C_{eq} & toughness	Refinement	High-rise bldgs.	JIS G3136 "River Tough"
	Anti-seismic FR H-shapes	High YS at elevated temp.	Yielding behavior	Cost down	JIS G3136
	Fixed Outer Dimension H-shapes	Constant height	Distortion	Bldgs.	"Super Hislend H"
	Deformed flange H-shapes	Anchoring	Profile in rolling	Steel-concrete struct.	—
	Ditched flat plate	High friction		Track base	—
Bars	HT bolt	Delayed crack resistance	Cleanliness & refinement	Bldgs. -Weight down	JIS B 1186 "F-T"
	HT steel bar	HT & elasticity	Yielding behavior		USD (being planned)

Note: (1) "HT" abbreviates "high tensile strength."

(2) Marked (○) products are referred herein.

3.1.1 低 YR 高張力鋼の組織制御

硬質相と軟質相からなる複合組織の場合には、材料の降伏挙動は降伏強さの低い軟質相に依存する。Fig. 1 に、軟質フェライト (F) 相と硬質マルテンサイト (M) 相からなる複合組織鋼の相体積率を変えた場合の実際に観測される降伏強さ (YS)、引張強さ (TS) および降伏比 (YR) と、混合則で計算した (F+M) 複合組織鋼のそれら (破線) とを比較して示す。複合組織鋼の TS はほぼ混合則にしたがう

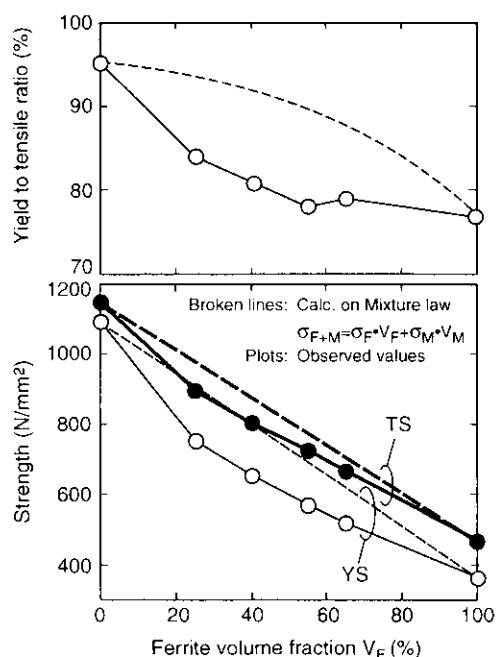


Fig. 1 Control of yield to tensile ratio by varying ferrite volume fraction of ferrite-martensite structures

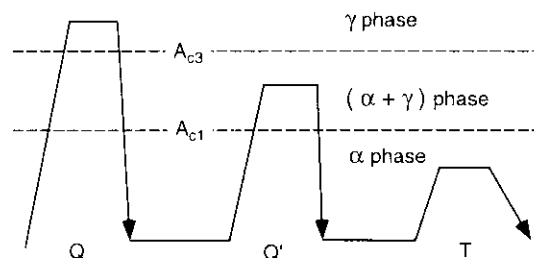
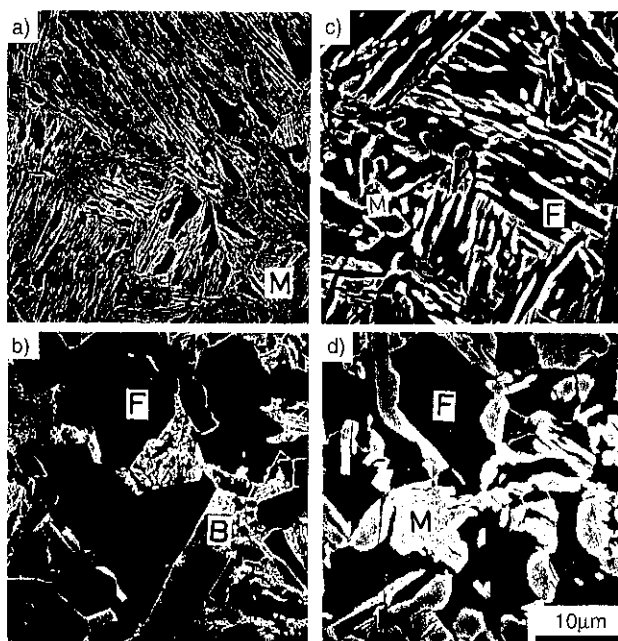


Fig. 2 Specific three-stage heat treatment for duplex microstructure consisting of soft- and hard phases

が、YS および YR は混合則値よりも低くなる。硬質相の拘束を受けながら軟質相が優先的に降伏するためである。さらに硬質相の分布を粗くし軟質相に対する拘束を弱めることによって、複合組織鋼の YS はいっそう低下することがわかっている。また、硬質相の強さを高めると、拘束が強くなり YS は若干上昇するが、TS も上昇するため YR の上昇は抑制できる。このように、複合組織鋼の軟質相と硬質相の体積率、分布、強さにより、鋼材の降伏現象は制御することができる。

このような複合組織の制御には、Fig. 2 に示す 3 段階熱処理が適している。フェライトとオーステナイトが共存する 2 相域に加熱する熱処理 (以降 Q' と称する) では、相分離を起こしてフェライト地にオーステナイトが一部析出し、この温度域での保持により γ 相では C および Mn の濃化が、また一方 α 相では C と Mn の希釈と高温焼もどしが起こる。この状態から焼入れすることで γ 相は著しく硬化した硬質第 2 相を、また α 相は極めて軟化した軟質相を形成して、低 YR 化に適した複合組織を得ることができる。Q' 後の硬質相の分布制御はその前組織である 1 段階目の焼入れ処理 (以



a) After Q at 50°C/s
b) After Q at 0.5°C/s
c) After Q and Q' at 50°C/s
d) After Q and Q' at 0.5°C/s

Photo 1 Examples of duplex microstructures; influence of morphology of prior structure after Q process on final one through Q' treatment

降はQと称する)の組織により、またCの濃化による硬質相の体積率および硬さの制御は2段目のQ'の保持温度の変化によって可能である。3段目の焼きもどし処理は、硬質相の延性を高めることによりいっそう変形能を高める。

Photo 1は、Q'後の組織に及ぼすQ'前すなわちQ後組織の影響を示す。高冷却速度のQにより微細なマルテンサイト(M)主体とした場合にはQ'後の硬質相は微細に針状分散するが、Qが低冷却速度でQ'前組織がフェライト(F)とベイナイト(B)で構成される場合にはQ'後の硬質相は網状に粗大分散する。このように、結晶粒界およびラス境界は2相域再加熱時の γ の析出サイトとなるため、Q'では前組織の制御により硬質相の分布を変えることができる。現在開発されている低YR 590 N/mm²級高張力鋼は、Photo 1(c)に示す軟質F地に微細な硬質相が分散した複合組織であり、軟質相を含まないM主体の硬質単相組織(Photo 1(a))の従来鋼に対し大きく異なる。

3.1.2 低YR高張力鋼の機械的性質

上述の組織制御によって得られたSN 590級開発鋼の機械的性質をTable 2に従来鋼と比較して示す。Q-Q'-Tプロセスによる開発鋼は、従来鋼よりもYRが極めて低くかつ高いTSと大きい ϵ 一様伸びを有している。

Table 2 Mechanical properties of developed low-yield-ratio and high-strength SM590 class steel

Steel	Thick. (mm)	Heat treatment	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	ϵ El (%)	ϵ E _{0.2} (J)
Developed	60	Q-Q'-T	495	660	75	16	214
Conventional	60	Q-T	520	607	86	12	245

3.2 極低降伏強度鋼

3.2.1 振動エネルギー吸収性能

地震時の振動エネルギーを吸収するための構造設計では補助部材の塑性変形機能を利用する場合がある。この設計は主構造部材の損傷を最小限に食い止めることを目的としており、鋼材には(1)極めて低い降伏強度(低歪域からの塑性変形能)および(2)降伏後の大きい塑性変形能力(大きな伸びと延性)の二つの特殊な機能が要求される。

これら機能を有する鋼材を実現するには、塑性変形に伴って増殖する転位の移動を容易にする必要があり、転位の固着源となる固溶Cや固溶Nを低減するとともに、転位の集積する粒界の面積をできる限り減少することが有効である。こうした組織制御は、TiやNb等の炭窒化物形成元素の添加による固溶Cや固溶Nの固定と適切な圧延および熱処理条件の組み合わせによる結晶粒の粗大化により達成することができる。

3.2.2 極低降伏強度鋼を用いた耐震壁

当社では、耐震壁部材として厚板を、耐震ブレース部材として厚板および鋼管を開発し振動エネルギー吸収構造の実用化試験を実施中である²⁾。Table 3に極低降伏強度鋼厚板の化学成分例を、Table 4にその機械的性質例を示す。

Fig. 3は耐震壁部材として利用した場合の設計例を示す。高剛性部材で枠を構成し、板厚6mmのSS400で格子状に補剛された極低降伏強度鋼板をはめ込むことで耐震壁を構成している。この極低降伏強度鋼製パネルを用い、その対角線方向に圧縮と引張の繰り返し

Table 3 Typical chemical composition of ultra-low yield strength steel plate (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Others
0.001	<0.01	0.07	0.008	0.006	Ti, Nb

Table 4 Mechanical properties of ultra-low yield strength steel plate

Plate thickness (mm)	Direction	Tensile properties				Charpy impact property ϵ E _{0.2} (J)
		YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	YR (%)	
30	L	90	251	64	36	191
	T	87	255	64	34	133

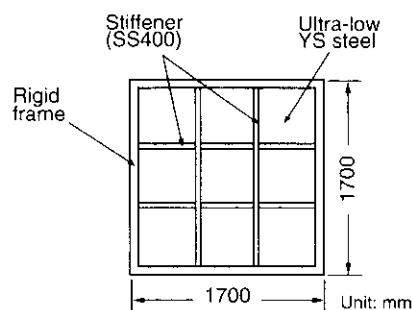


Fig. 3 Example of anti-seismic panel structure comprised of ultra-low yield strength steel plate stiffened by 6-mm-thick SS400 inside rigid frame

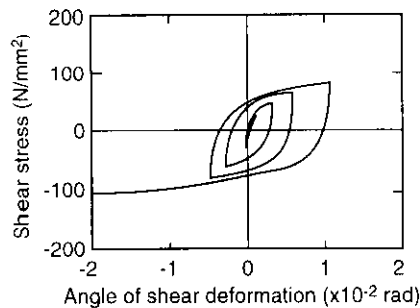


Fig. 4 Shear stress behavior of anti-seismic ultra-low yield strength steel panel under hysteretic shear deformation

し載荷をおこなった実験の結果の一例を、Fig. 4 に示す。図では横軸にせん断変形角を、縦軸に平均せん断応力を示しているが、ヒステリシスカーブは耐震壁の優れたエネルギー吸収能力を示している。また適切なパネル形態を採用すれば、座屈によるロスも生じないことが判明している。

3.3 新 JIS (SN) 対応耐火鋼の特性

耐火鋼は、従来鋼で保証できなかった 600℃ での降伏強さを常温の 2/3 以上に保証する機能鋼材で、火災時の安全性とともに耐火被覆軽減による建設コストの低減、居住空間の拡大などに大きく寄与するため、厚板製品にとどまらず建築部材として汎用されている H 形鋼や鋼管にも波及している⁹⁾。

新 JIS 規格 (SN 材 (JIS G 3136)) は、建築構造部材としての溶接性と耐震性を高める目的で、炭素当量 (C_{eq}) の上限と、降伏点 (YP)、あるいは耐力 (PS) および降伏比 (YR) のそれぞれの上限を従来の SS 材および SM 材の規格に追加したものである。これにより YP 変動の最小化と厳格な品質管理が必要となる。このためには、YP 変動の原因となるフェライト粒の粗大化と圧延冷却過程における析出物生成を抑制する必要がある。さらに C_{eq} の厳格化に対しては、合金元素の増量を最小限とするために成分設計の最適化を図らなければならない。

新 JIS 規格に対応した製造実績の一例として、H 形鋼の製造実績を紹介する。H 形鋼では厚板の製造と異なり圧延後の冷却速度を制御することが困難なため、成分設計で鋼の焼き入れ性を最適化し

ミクロ組織を制御している。新 JIS 規格と耐火 H 形鋼の代表化学組成、フランジの 1/4 高さの機械的性質をあわせて Table 5 に示すが、新規格を十分満足する特性が得られている。

4 建設コスト削減と構造物の軽量化に寄与する新機能鋼材

4.1 溶接性を向上した低予熱型橋梁用 HT 780 鋼

780 N/mm²級高張力鋼 (以下 HT 780 鋼と称す) の橋梁用鋼としての適用は、1974 年の港大橋から始まり、瀬戸大橋への適用を経て現在建設中の明石大橋における大規模使用へと拡大進展を遂げている。

4.1.1 要求される機能

HT 780 鋼を実用化する上で最も大きな障害は低温割れ感受性の上昇である。これまでの HT 780 鋼は、溶接施工において大きな工数・負荷あるいは熱変形などの主要原因となる 100~150℃ での高温予熱を必要とするため、その使用拡大が妨げられてきた。開発した新 HT 780 鋼の開発目標を Table 6 に示す。強度および靱性は HBS-G-3102 (本州四国連絡橋公団規格) 仕様に基づき、目標予熱温度 (斜め Y 形溶接われ試験¹⁰⁾における割れ阻止温度) を 50℃ と極めて低く定めた。

4.1.2 材質設計上の特徴

低温割れ感受性を低下するには、溶接熱影響部 (HAZ) の硬化性を低下することが必要である。このため、炭素当量を抑えた成分設計が重要となるが、HAZ の硬さを決定するマルテンサイトの硬さは含有する C 量に依存するため、C 量の制限が重要な設計因子である。Fig. 5 は HT 780 鋼の C 量と斜め Y 形溶接割れ試験におけ

Table 6 Target properties of HT780 steel of new type for Akashi bridge

Plate thick. (mm)	Tensile properties			Bend test	Charpy $\sqrt{E_{-40^{\circ}\text{C}}}$ (J)	Oblique-y groove test
	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)			
34	≥685	780 ~930	≥16	180° R=2.0t	≥47	Preheat ≤50℃

Table 5 New specification JIS G3136-1994 and mechanical properties of fire resistant H-shapes

Grade		Chemical composition (mass%)					C_{eq}	P_{cm}	YS (N/mm ²)	YS _{600℃} (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	YR (%)	$\sqrt{E_{0^{\circ}\text{C}}}$ (J)
		C	Si	Mn	P	S								
SN400-B	Spec. ^a	≤0.2	≤0.35	0.6~1.40	≤0.030	≤0.015	≤0.35	≤0.26	235~355	≥157	400~510	≥22	≤80	≥27
	Size-1 ^b	0.07	0.22	0.62	0.015	0.009	0.35	0.16	316	181	428	33	69	353
	Size-2 ^c	0.06	0.20	0.64	0.012	0.006	0.35	0.15	316	179	428	35	74	333
SN490-B	Spec. ^a	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.030	≤0.015	≤0.44	≤0.29	325~455	≥217	490~610	≥21	≤80	≥27
	Size-1 ^b	0.09	0.20	0.78	0.009	0.006	0.39	0.20	381	245	539	25	71	240
	Size-2 ^c	0.09	0.20	0.78	0.009	0.006	0.39	0.20	373	230	532	28	70	203

^aSpecified values are applied to two sizes below in accordance with JIS G3136-1994

^bSize-1: 600^u×300^u×12^u×20^u

^cSize-2: 900^u×300^u×16^u×28^u

Table 7 Concepts of chemical composition design of new HT780 steel of low-preheat type

Target properties	Countermeasures	Control ranges	
		Conventional	Developed
Preheat temperature $\leq 50^{\circ}\text{C}$	(1) Low C content (2) Low P_{cm} value (3) Low B content	0.10~0.13% 0.24~0.25% 10~25 ppm	$\leq 0.09\%$ $\leq 0.23\%$ 7 ppm (aimed)
Ultimate TS $\geq 780 \text{ N/mm}^2$	(1) DI-value design (2) Nb addition	65~110 mm —	65~110 mm 0.02%
Weld joint strength $\geq 780 \text{ N/mm}^2$	(1) Lower limit of C_{eq} (2) Nb addition	— —	$\geq 0.45\%$ 0.02%

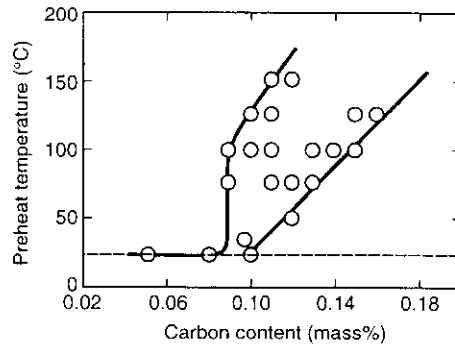


Fig. 5 Relation between carbon content of HT780 class steel and critical preheat temperature to prevent cold cracking by constraint oblique y-groove test

る割れ阻止予熱温度の関係を示している。C量の低減に伴って割れ阻止予熱温度は明瞭に低下する傾向があり、0.09 mass%を下回る場合に室温すなわち予熱なしでも割れが阻止される。このC量は、水素による遅れ破壊発生の限界硬さといわれるヒッカース硬さ(HV) $\leq 385^{10)}$ の条件を完全マルテンサイト組織で得るためのC量にほぼ一致する¹¹⁾。HT 780級の開発鋼ではHAZ組織がほぼ完全なマルテンサイトとなるため、C量を厳しく制限することによって従来鋼に比べて飛躍的な低予熱を実現している。C量を制限しても、焼き入れ深さを考慮した成分設計に基づき他の合金元素を適正に添加することによってHT 780級の強度を得ることは可能である。Table 7に開発鋼に適用した成分設計を従来鋼のそれと比較してまとめた。低C化に加えて、低B化、Nb添加が特徴である。

4.1.3 開発鋼の機械的性質

Table 8は直接焼き入れ焼きもどし工程によって製造された34 mm厚鋼板の機械的性質を示している。規格値を十分に満足し

Table 8 Mechanical properties of new HT780 steel plate of 34 mm^t produced by DQ-T process

Location	Tensile properties			Toughness		
	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	$vE_{-40^{\circ}\text{C}}$ (J)	$vE_{-60^{\circ}\text{C}}$ (J)	vT_{rs} (°C)
1/4t (Quarter-thick.)	808	842	24	235	229	-92
	811	847	24	240	213	
				240	219	
1/2t (Mid-thick.)	807	844	22	224	200	-91
	803	838	23	218	211	
				213	211	

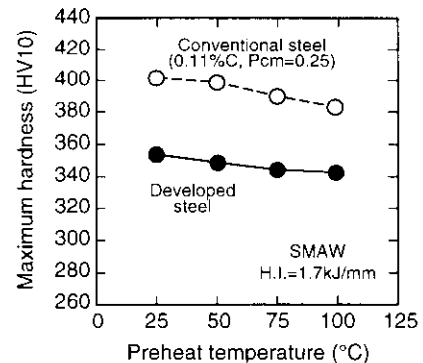


Fig. 6 Results of maximum hardness test of weld HAZ

た特性が得られている。

HAZの低温割れ感受性について、Fig. 6に最高硬さ試験結果を、またTable 9に斜めY形溶接われ試験の結果を示す。 P_{cm} が

Table 9 Improved susceptibility of weld HAZ to cold cracking evaluated by constraint oblique-y groove test

Welding conditions	Atmosphere		Preheat temp. Location	Crack ratio (%)								Desired preheat temp.		
	Temp.	Humidity		25℃	45℃		50℃		55℃		75℃			
SMAW ^a	20℃	60%	Root	17	0	0	0	0	0	0	0	—	—	45℃
			Section	2	0	0	0	0	0	0	0	—	—	
			Surface	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	
	30℃	80%	Root	—	—	—	—	0	0	—	—	0	0	≤50℃
			Section	—	—	—	—	0	0	—	—	0	0	
			Surface	—	—	—	—	0	0	—	—	0	0	

^aRod, KSA-116; H.I. 1.7 kJ/mm

0.25%の従来型 HT 780 鋼と比較して、最高硬さが約 40 ポイント低下することがわかる。この硬化性の低下により、Table 9 に示すように、20℃、湿度 60% の環境において 45℃ 以下の割れ阻止予熱温度が得られている。より厳しい環境である 30℃、湿度 80% においても 50℃ 以下という優れた耐低温割れ性が達成されている。

4.2 溶接性を向上した TMCP 極厚 H 形鋼

これまで高層建築の柱部材には、SM 490 あるいは SM 520 級の低 YR 厚板を用いた厚肉溶接 4 面ボックス柱が用いられてきた。しかし、高層化にともなう安全性の向上のためには溶接線の減少が求められ、また厚肉化にともなう強度、靱性低下の防止も強く望まれている。厚肉ボックス柱に匹敵する大断面を有する極厚 H 形鋼はこのニーズに適合するが、従来の極厚 H 形鋼は、強度確保のために C_{eq} の低減が困難で溶接性に問題を残している。ここでは、寸法 H-612×500×50×80 の溶接性に優れた TMCP 型極厚 SM 520 鋼をターゲットとした開発鋼について紹介する。

4.2.1 成分設計と TMCP による組織制御

溶接性向上のために C, Mn, Cu, Ni などの焼き入れ性元素を低減し低 C_{eq} 化を進める必要があるが、同時に発生する強度低下を補償する手段が必要である。Fig. 7 は SM 490~520 級鋼におけるフェライト粒径と機械的性質の関係を示す。フェライト粒径を微細化することにより降伏強さ (YS) を向上することが可能で、たとえば SM 520 級鋼に必要な 355 N/mm² 以上の降伏強さを達成するには、フェライト粒径を約 45 μm 以下に制御すればよい。細粒化によって靱性を同時に向上させることも可能であることが分かる。こうした冶金的制御は TMCP の有効利用によって可能で、さらに V あるいは Nb などの析出元素の微量添加により強度をいっそう高めることができる。

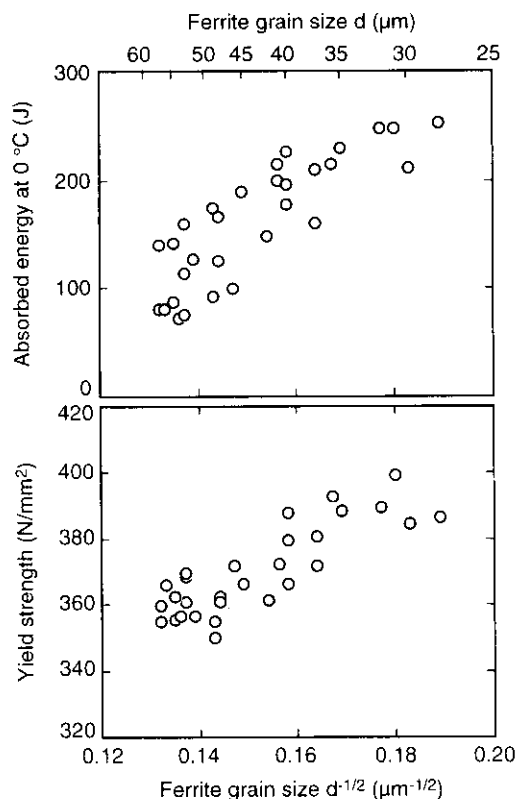


Fig. 7 Effect of ferrite grain size on yield strength and Charpy absorbed energy at 0°C of SM490~520 steel

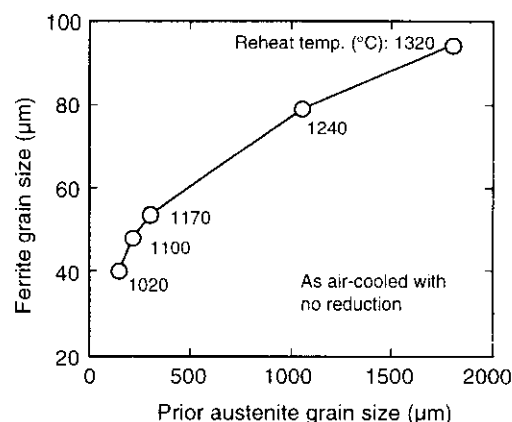


Fig. 8 Correlation between austenite grain size and size of transformed ferrite grain for 0.15%C-0.30%Si-1.5%Mn steel

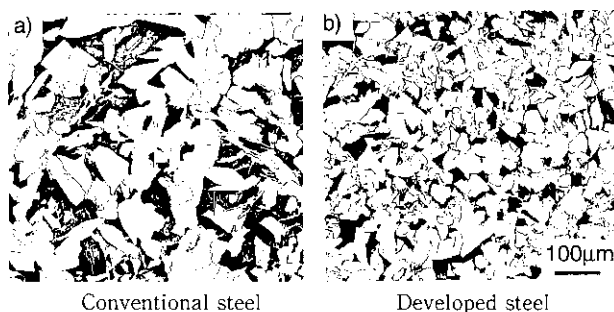


Photo 2 Example of microstructure of developed heavy-wall TMCP H-shape steel compared with conventional one

Fig. 8 に加熱温度を変化させた場合の初期 γ 粒径と $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態後のフェライト粒径の関係を示す。微細なフェライトと微量のパールライトからなる組織を得るためには変態前の γ 粒径を細粒化させる必要がある。加熱温度の低下は組織微細化に極めて効果的であるが、さらに圧延によっても細粒化を図ることができる。極厚 H 形鋼圧延ではその形状および圧延機能から、変形抵抗の大きい未再結晶領域で厚板圧延に匹敵する制御圧延を行うことは困難である。そこで開発鋼では、低温加熱と変形抵抗の小さい再結晶域圧延による γ 粒の再結晶細粒化を最大限に活用する TMCP を採用している。さらに、これと組み合わせて析出元素による γ 粒内変態促進を利用することにより、これまで困難とされた板厚中央部においても細粒組織を得ている。また、板厚に応じて適宜加速冷却を適用することでいっそうの細粒化が図られる。Photo 2 は、従来細粒化が困難であったフランジ 2/4 t-3/4 t 部 (Table 11 参照) のマイクロ組織を従来鋼と開発鋼の両方で比較したものであるが、TMCP 型の開発鋼はフェライト粒の細粒化が顕著に図られている。

4.2.2 TMCP 極厚 H 形鋼の諸特性

上述の組織制御に基づいて製造した H 612×515×65×80 mm サイズの TMCP 極厚 H 形鋼 (リバータフ 355) の化学組成と機械的性質をそれぞれ Table 10 と 11 に示す。従来鋼に比べて C_{eq} と P_{cm} は低く抑えられており、フランジ中央部 (F 2/4) およびウェブ部 (W 1/4) においても極めて良好な靱性が得られている。なお、斜め Y 形溶接われ試験による割れ阻止温度は 25℃ 以下であることが確かめられており、この温度は従来鋼より約 75℃ も低い。

Table 11 Mechanical properties of TMCP heavy-wall H-shape at specific portions

Test locations	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	El (%)	$vE_{0.2}$ (J)	Location map
Specification ^a	≥355	520~640	≤80	≥21	≥27	
F 1/4	417	560	75	34	258	
F 1/4	407	556	73	35	232	
F 1/4	412	559	74	34	235	
F 3/4	410	556	74	34	238	
F 3/4	406	556	73	34	230	
F 3/4	402	554	73	34	225	
W 1/4	422	564	75	33	242	

^aSM520 (Size : H-612¹¹ × 500⁸ × 50¹¹ × 80¹²)Table 10 Typical chemical composition of heavy-wall TMCP H-shape steel with lower C_{eq} and P_{cm} values compared with that of conventional H-shape steel (mass%)

Steel ^a	C	Si	Mn	P	Others	C_{eq}	P_{cm}
Conventional	0.15	0.38	1.50	0.010	Cu, Ni, V	0.43	0.27
TMCP	0.12	0.38	1.48	0.010	Cu, Ni, V	0.39	0.23

^aSM520 (Size : H-612¹¹ × 500⁸ × 50¹¹ × 80¹²)

4.3 橋梁用テーパプレート

近年の土木・建築業界では、熟練労働者の不足や工事費の低減要求の高まりから、鋼橋建設工法の省力化への取り組みが積極的に行われている。鋼橋の桁設計では、使用鋼重ミニマムの観点から負荷される曲げモーメントに応じて断面積を変化させる必要があり、このために板厚の異なった鋼材をつなぎ合わせるため、工数、能率、溶接長の点で負荷が大きかった。板厚が連続的に変化する傾斜板厚鋼板（以降、テーパプレートと称す）では、こうした異厚材の接合数を減少することが可能で、工数の削減や能率向上につながるとして注目されている。

4.3.1 テーパプレートの特徴

テーパプレートは Fig. 9 に示すような形状をしており、当初は単純な傾斜板厚鋼板（(a)タイプ）として、不要肉厚の削減による船体軽量化あるいは溶接工数の低減を目的に造船用開発され実績を上げてきた。最近では、Fig. 9(b) に示すようなボルト接合用の平行部を付加するなどの改良によって橋梁用として使用されるに至っている。なお、Fig. 9 (c) ~ (d) に示すような多段テーパ形状は現在開発中である。

4.3.2 製造技術

厚板圧延におけるテーパプレート圧延とは、圧延中に目標厚を変更し、鋼板長手方向の板厚を動的に制御する圧延技術である。この制御を実現する主要技術は次の三つである。まず第1は、厚部と薄部の圧延荷重差等を考慮したパスごとの厚部と薄部の板厚差の設定技術である。第2は、決定したパススケジュールを実現する油圧压下装置の圧延中制御であり、これは第3の圧延中の压下量変動等起因した圧延荷重差によるミル伸び量変化の補正（実際には AG-AGC ; Absolute-Gauge-Automatic-Gauge-Controller による）技術によって実現される。

現在の造船あるいは橋梁向けテーパプレートではその要求特性を

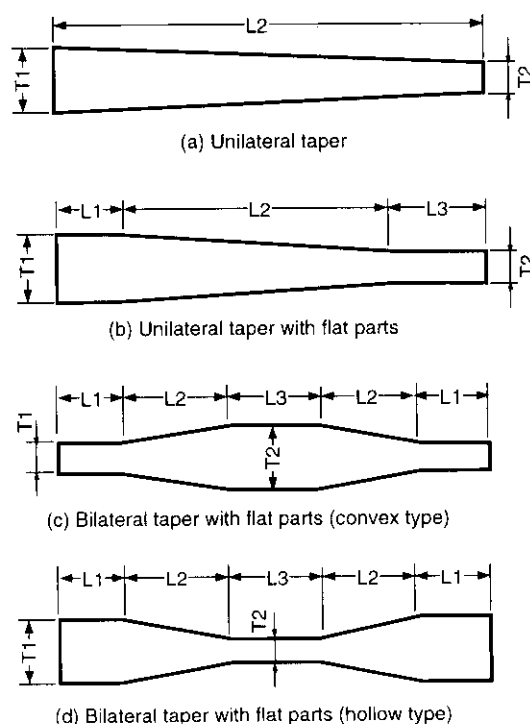


Fig. 9 Variations of side view shape of tapered plates and typical dimensions

満足するために TMCP も活用している。板厚が連続的に変化するテーパプレートの加速冷却（ACC）では、平坦な厚板の冷却をそのまま適用すれば厚部と薄部で冷却速度や冷却停止温度が変化し平坦度等の形状のみならず材質にも影響する。この問題は、鋼板を制御冷却区域内に進入させた後、鋼板全域で冷却を同時一斉に開始することによって出側通過までの冷却距離差に移送速度の加減速による冷却時間差を加えるような制御方法の開発で解決されている。

4.3.3 製造実績

Table 12 と 13 にテーパプレートの製造例を示す。鋼材の規格は SM 490 YB と SM 520 C であり、Fig. 9 で示した (b) タイプのテーパ形状である。Table 12 は、各位置での寸法を示しているが、テーパ量はそれぞれ、15/8 000 (1.88 mm/m) と 19/9 700 (1.96 mm/m) である。Table 13 に機械的性質を示すが、厚部と薄部に大きな材質の相違は見られず、また良好な靱性が得られている。

Table 12 Example of dimensions of tapered plates manufactured (taper shape of (a) and (b) type in Fig. 9)

Steel	Type	Thick. (mm)		Width (mm)	Length (mm)		
		T1	T2		L1	L2	L3
SM490YB	(b)	28	13	3 450	1 090	8 000	1 095
SM520C	(a)	44	25	3 040	—	9 700	—

Table 13 Example of mechanical properties of tapered plates manufactured

Steel	YP(N/mm ²)		TS(N/mm ²)		El(%)		$\sqrt{E_{0c}}$ (J)
	Thickest portion	Thinnest portion	Thickest portion	Thinnest portion	Thickest portion	Thinnest portion	
SM490YB	400	440	522	544	28	25	279
SM520C	385	386	527	538	36	29	267

5 結 言

高機能化が図られている土木建築用鋼材において、現在最も関心が高く実用化が進んでいる低 YR 高張力鋼、極低降伏強度鋼、耐火鋼、低予熱型 HT 780 鋼、TMCP 極厚 H 形鋼について、それぞれの材質と材質を実現する金属学的制御方法を示した。また、形状

を制御した新しい高機能鋼材である傾斜板厚鋼板（テーパプレート）の形状制御技術ならびに機械的性質を例示した。要点を以下にまとめる。

- (1) 低 YR 高張力鋼では、軟質フェライト相と硬質マルテンサイト相からなる複合組織を利用し、硬質相の体積率と形態を制御することによって、YR が 75% でかつ引張強さで 590 N/mm² 級の高張力化を達成している。
- (2) 極低降伏強度鋼では、結晶粒径制御と炭素化合物形成元素 (Nb, Ti) の炭素(窒素)固定作用を利用することで極めて低い降伏強度を実現している。この材料を耐震壁部材として利用することにより、高い地震エネルギー吸収能が得られる。
- (3) 厳格化した炭素当量規制と降伏点あるいは耐力規制(新 JIS 規格)に対応し得る耐火鋼は、析出物と圧延後の冷却の適正な制御によって製造可能である。
- (4) 低予熱型 HT 780 鋼(板厚 34 mm)では、C 量の厳しい制限と微量の B および Nb 添加による新しい成分設計により、50℃ 以下の低い予熱温度を実現している。
- (5) これまで靱性が低いとされた極厚 H 形鋼においても、新しい TMCP すなわち再結晶域での圧延を最大限に活用しかつ析出元素による γ 粒内変態促進作用と加速冷却を利用することにより、飛躍的な靱性向上を実現することができる。
- (6) 圧延中の高精度でかつ動的な板厚制御法の確立により多彩な形状制御が可能となり、橋梁用鋼に形状という新機能が追加された。このテーパプレートでは、加速冷却設備の効果的な適用により均質性の向上も同時に図られている。

参 考 文 献

- 1) 岡 裕, 内田 清, 永易正光, 安田博和, 弟子丸慎一, 藤野 博: 材料とプロセス, 4(1991)3, 770
- 2) 永易正光, 安田博和, 弟子丸慎一, 藤野 博, 内田 清: 川崎製鉄技報, 22(1990)1, 29
- 3) 加藤 勉: 鉄と鋼, 74(1988)6, 11
- 4) JIS G 3136-1994
- 5) 藤野 博, 入見 潔, 橋本順次, 梅沢誠芳: 川崎製鉄技報, 25(1993)1, 71
- 6) 日本造船学会編: 「新しい製造法による鋼材 (TMCP 鋼) の溶接構造物への適用に関するシンポジウム」, (1983)
- 7) 中川郷司, 山本 昇, 藤澤和義, 寺本隆幸, 木原順美, 鳥井信吾: 材料とプロセス, 8(1995)2, 476
- 8) 日本鉄鋼協会編: 「21 世紀のインフラを支える条鋼製品」, 西山記念講座, 第 157・158 回(1995)
- 9) JIS Z 3158: 「斜め Y 形溶接われ試験方法」
- 10) 中井揚一: 「水素による遅れ割れの機構」, 鉄鋼基礎強度研究会遅れ破壊部会報告書, (1975), 87
- 11) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼, 74(1988)5, 158