

(解説)

## 溶接性に優れた TMCP 型 HT570 鋼板

岡野重雄\*・児山拓郎\*・小林洋一郎\*・山内 学\*\*

\*鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター \*\*鉄鋼部門・鉄鋼総括部

### TMCP Type HT570 Steel Plates with Excellent Weldability

Shigeo Okano・Takuo Koyama・Yoichiro Kobayashi・Manabu Yamauchi

A new type of 570 MPa grade rolled steel plate (HT570) for welded structures was developed through the application of a thermo-mechanical control process (TMCP) to low-carbon steels. The steels used contain small amounts of Ti, Mo and B to promote finely dispersed bainite structures without special quenching and tempering. The resultant HT570 plates provide constant high yield strength independent of thickness. Moreover, preheating before welding can also be eliminated. The newly developed HT570 steel cuts the delivery lead time and has the potential to reduce the cost of rationalized bridge constructors.

まえばき = 我国における鋼橋の建設技術は、明石海峡大橋などの長大橋に代表されるように国際的にも高い評価を受けているが、一方では最近の財政事情の悪化にともない公共事業にもコスト縮減が強く求められている。そのなかで、コンクリート橋と競合する中小規模の橋梁において、コスト競争力向上に向けて産官学の連携のもと様々な活動が展開されている。

その成果として、1995年に建設省（現国土交通省）から橋梁構造の合理化を目的として「鋼道路橋設計ガイドライン」が示され、また（社）日本鋼構造協会の「高機能鋼材の橋梁への利用小委員会」で鋼素材の高機能化と高度利用技術が検討され、2000年に成果が公表されている<sup>1)</sup>。

このような動きの中で、使用される鋼材にも従来の JIS 規格の枠内に留まらず、強度・靱性・溶接性・耐食性などで規格材よりも優れた性能を発揮できる鋼材が選択され、その一部は 1996 年の道路橋示方書の改訂時に織込まれている。

本報ではこれらの高機能鋼材のうち、近年採用が増えている TS（引張強度）570MPa 級鋼板（SM570）において、更なる高機能化を目的として開発した TMCP 型鋼板「HT570」の開発コンセプトや特性を紹介する。

#### 1. 開発ニーズ

鋼橋の製作コストのうち、加工費の比率が大きいため構造自体の合理化が不可欠であり、具体的には 2 主 1 桁橋、開断面箱桁橋などの形式が提唱されている<sup>2)</sup>。これらはいずれも PC 床版の使用を前提に床版支間を大きくし、構造の簡素化及び施工量の減少を達成するものである。

例えば 2 主 1 桁橋の場合、従来の 4 主桁橋に比べて鋼重は 5%、溶接長は 60%、塗装面積は 40% も低減できると試算されている<sup>2)</sup>。

このようなコスト縮減を更に押進める上で、重量軽減や薄肉化による運搬・施工の効率化に結びつく高強度鋼板の使用が欠かせない。これまで中小規模の鋼橋には主に引張強さが 400MPa 級や 490MPa 級鋼板が使用されて

きたが、上述の合理化橋梁では 570MPa 級高張力鋼板（SM570）の使用割合が増大している。

SM570 鋼板の製造方法は一般には焼入れ焼戻し工程が採用され、圧延ままの鋼板に比べて製造リードタイムが長く、同一橋梁の中で使用される 400 あるいは 490MPa 級鋼板と同じタイミングで入手するためには、早めに発注するなど需要家にとっての煩わしさがあった。

また、上述の合理化橋梁ではフランジ厚が厚いため、現場継手はボルト接合ではなく、溶接接合によることが多いが、従来の焼入れ焼戻し型 SM570 鋼板では溶接施工時に低温割れ防止のため 50~100 程度の予熱が不可欠であり、橋梁製作コスト上昇の原因となっていた。

更に、従来の SM570 鋼板では、図 1 に示すように、降伏点（YP）の下限値が板厚によって変化するため設計上の煩雑さがあったが、厚肉材でも薄肉材と同じ YP を保証する YP 一定鋼（SM570-H）が実用化され、普及しつつある。

そこで、上記の 3 つの大きい課題を同時に解決し、焼入れ焼戻し省略、溶接時の予熱不要、YP 一定という要求に応える新しい鋼板の開発が強く望まれていた。

#### 2. 目標性能及び開発の考え方

機械的性質の目標を表 1 に示す。JIS の SM570 の規格

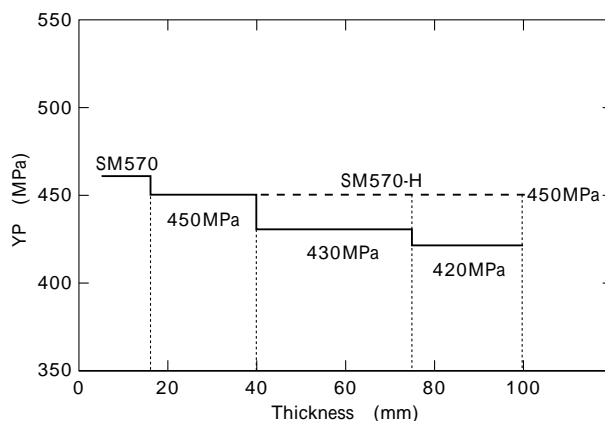


図 1 SM570 と SM570-H の YP の比較

Fig. 1 Comparison between YP of SM570 steels and that of SM570-H steels

表1 TMCP型HT570の目標特性  
Table 1 Target properties of TMCP type HT570

Tensile properties*					V-notch Charpy properties**	
Thickness (mm)	Test piece	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Thickness (mm)	∫E <sub>-5</sub> (J)
t 16	No.5	460	570 ~ 720	19	t 12	-
16 < t < 40	16 <	450		26	t > 12	47
	20 <			No.4		
40 < t < 50	No.5	450 (As per JIS spec. 430)		26		
	No.4			20		

\*T-direction, \*\*L-direction

値を満足するとともにYP一定鋼にも対応できることとし、板厚にかかわらずYPは450MPa以上を目標とした。また、溶接性については完全に予熱を省略するため、溶接割れ感受性組成(P<sub>CM</sub>)を0.21%以下とする。溶接継手靱性は道路橋示方書の最大入熱量である7kJ/mmにおいて-5でのシャルピ吸収エネルギーが母材に対する規格値47J以上を満足することを目標とした。

このような目標を焼入れ焼戻しを省略しながら満足するために、TMCP(Thermo-mechanical Control Process)を活用することとした。TMCPは制御圧延と制御冷却を組合わせた厚板製造プロセスであり、Cや合金元素量の大幅な低減が可能となり、高強度化・高靱性化に有効なため、これまで主として490MPa級鋼板の製造に適用されてきた方法である。

しかし、TMCPを適用してもP<sub>CM</sub>を低減しながら強度確保することは容易ではなく、Cやその他元素の添加量の設定と製造方法の最適化が非常に重要である。鋼の特性に及ぼす影響が最も大きいC量については、溶接時の低温割れ防止及びHAZ(溶接熱影響部)靱性確保の観点から可能な限り低減することが望ましいが、母材の強度確保の観点から限界を見極める必要がある。

今回の開発においては、Ti系の低C-B添加ベイナイト組織の活用という当社独自技術により、Cを0.05%まで低減することとした。低C-B添加ベイナイト組織はラインパイプ用鋼板などの薄物を念頭に検討が行われ、Ti系の場合、強度上昇効果が大きいものの、靱性低下が大きいことが報告されている<sup>3)</sup>。従って、これまでに実用化

された鋼板ではほとんどTiではなくNbが活用されている。今回、複雑なTiの固溶・析出挙動をコントロールし、高強度・高靱性を達成するために基礎的な検討を行った。

### 3. 基礎的検討

上記の基本成分系を前提に、HT570としての強度を板厚50mm程度の厚物材で満足するために必要な焼入れ性を確保すべく、各種合金元素の影響を調査した。実験に用いた鋼の化学成分を表2に示す。0.05%C-0.05%Ti-B系をベースにNb,Cu,Ni,Cr,Moを添加した6種類のスラブを加熱温度1100℃,FRT(圧延仕上げ温度)760℃で板厚50mmまで熱間圧延しTMCPを施した。その実験結果を図2に示す。各合金元素の中でMoは0.2%という少量添加でTS上昇効果が著しいが、YP一定鋼の要求(450MPa

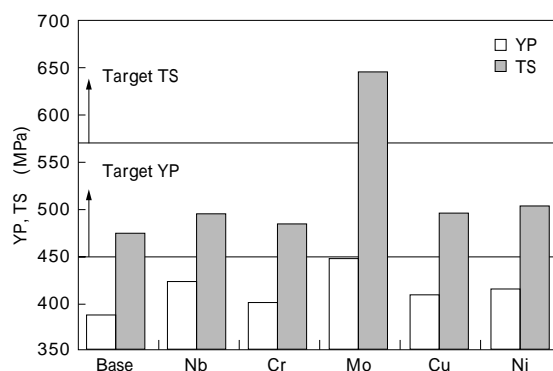


図2 引張特性に及ぼす添加元素の影響  
Fig. 2 Effect of additional elements on tensile properties

表2 添加元素の最適化に用いた鋼の化学成分

Table 2 Chemical compositions of steels for selection of additional elements

Steel	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B (ppm)	C <sub>eq</sub>	P <sub>CM</sub>
Base	0.05	0.29	1.50	-	-	-	-	-	0.048	15	0.31	0.14
Nb	0.05	0.32	1.47	-	-	-	-	0.015	0.046	16	0.31	0.14
Cr	0.05	0.30	1.52	-	-	0.20	-	-	0.048	16	0.36	0.15
Mo	0.05	0.31	1.49	-	-	-	0.19	-	0.047	15	0.36	0.16
Cu	0.05	0.32	1.48	0.20	-	-	-	-	0.047	13	0.31	0.15
Ni	0.05	0.29	1.53	-	0.22	-	-	-	0.047	14	0.32	0.15

$$C_{eq}(\%) = C + Mn / 6 + Si / 24 + Ni / 40 + Cr / 5 + Mo / 4 + V / 14$$

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

以上)は満たさない。

そこでHAZ 靱性も考慮して Cu, Ni を若干添加した上で、強度と靱性の両立を図るために製造条件の最適化を図った。具体的には Ti の固溶量を通じて焼入れ性や析出強化、それにとともなう靱性劣化の程度に大きく影響するスラブ加熱温度とベイナイト組織の延伸や微細化に影響する圧延温度の影響を調査した。

表3に示す化学成分の鋼を種々のスラブ加熱温度と FRT で板厚 50mm に圧延し、TMCP を施した。FRT を 720 に固定した場合の加熱温度と機械的性質の関係を図3に示す。YP, TS はそれぞれ目標下限に対して 30MPa の余裕を持たせ、また靱性は  $v_{T_{rs}}$  (破面遷移温度) が -40 以下となることを前提に評価すると、FRT が 720 の場合には加熱温度は 1050~1170 の範囲に管理する必要がある。

次にこの結果をふまえ、加熱温度を 1100 に固定した場合の FRT と機械的性質の関係を図4に示す。これより図3の場合と同様の基準で評価すると、FRT は 750 以下

表3 圧延方法の最適化に用いた鋼の化学成分  
Table 3 Chemical compositions of steels for optimization of rolling process (mass%)

C	Si	Mn	Others	C <sub>eq</sub>	P <sub>CM</sub>
0.05	0.33	1.46	Cu, Ni, Mo, Ti, B	0.38	0.19

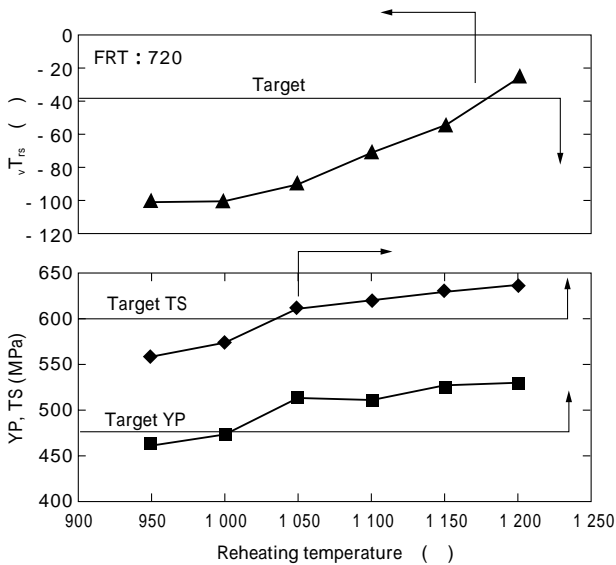


図3 強度、靱性に及ぼす加熱温度の影響  
Fig. 3 Effect of reheating temperature on mechanical properties

表4 開発鋼板の化学成分  
Table 4 Chemical compositions of developed steels (mass%)

Steel	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Others	C <sub>eq</sub>	P <sub>CM</sub>
Developed HT570	9	0.05	0.32	1.54	0.006	0.002	Cu, Ni, Mo, Ti, B	0.38	0.19
	25								
	50								
JIS SM570 Spec.	t 50	0.18	0.55	1.60	0.035	0.035	-	-	-

$$C_{eq}(\%) = C + Mn / 6 + Si / 24 + Ni / 40 + Cr / 5 + Mo / 4 + V / 14$$

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

とする必要がある。以上より、加熱温度 1100、FRT720 であれば、それぞれの作業上のバラツキを考慮しても目標特性を満足できることがわかる。

#### 4. 開発鋼板の性能

##### 4.1 母材特性

開発鋼板の化学成分の一例を表4に示すが、板厚 9~50mm までを同じ狙いの成分系で製造している。引張試験結果を表5に示すが、JIS規格の SM570 の要求を満足しているとともに、YP は 500MPa 以上であり、YP 一定鋼の要求も満足している。

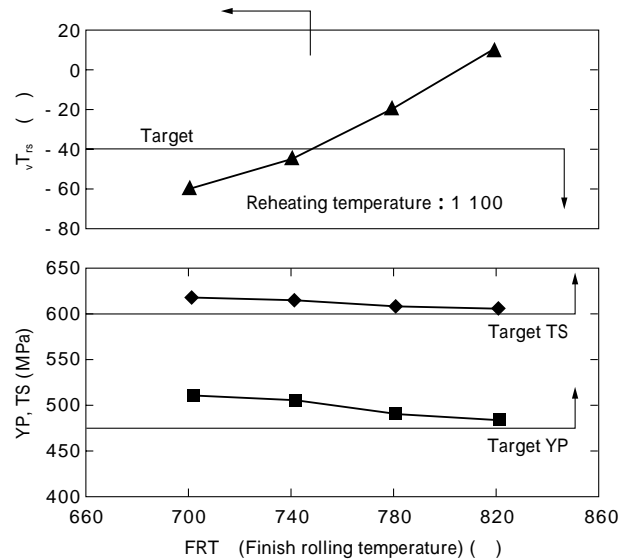


図4 強度、靱性に及ぼす圧延仕上げ温度の影響  
Fig. 4 Effect of FRT (finish rolling temperature) on mechanical properties

表5 開発鋼板の引張特性  
Table 5 Tensile properties of developed steels

Thickness (mm)	Position	Direction	Test piece	Tensile properties		
				YP (MPa)	TS (MPa)	EI. (%)
9	Full thickness	T	No.5	572 570	673 670	25 25
			No.4	507 503	677 674	26 26
50	t/4	T	No.4	565 561	615 614	31 31

衝撃試験結果を図5に示す。いずれの板厚においても - 5 におけるシャルビ吸収エネルギーは 250J 以上であり、規格値 (47J 以上) を十分に満足するとともに、破面遷移温度は - 40 以下と良好である。

#### 4.2 溶接性

溶接性を評価するために板厚 50mm の鋼板を使用し、ガスシールドアーク溶接 (GMAW) と被覆アーク溶接 (SMAW) での最高硬さ試験、ならびに SMAW での y 型溶接割れ試験を行った。図6に最高硬さ試験結果、図7に y 型溶接割れ試験結果を従来の焼入れ焼戻し型 SM570 鋼板の結果と比較して示す。最高硬さ試験結果は 25 の予熱温度においても HV320 程度であり、通常溶接割れ発生防止のために必要な最高硬さの上限の指標とい

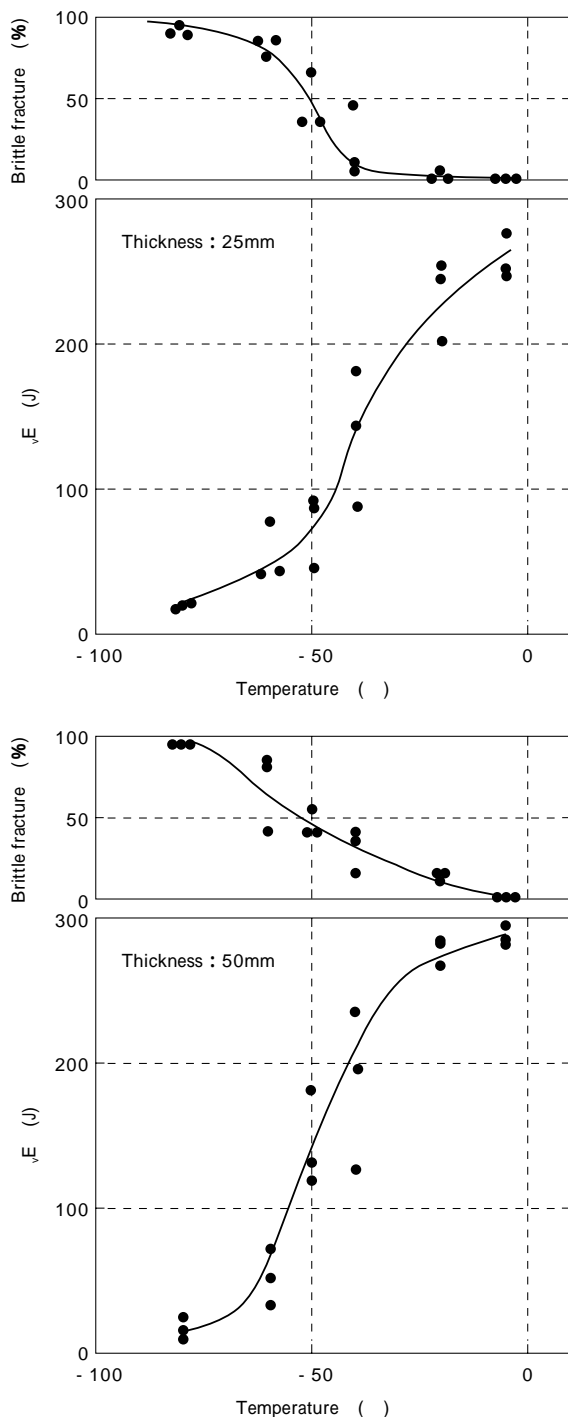


図5 開発鋼板のシャルビ吸収エネルギー  
Fig. 5 V-notch Charpy energy of developed steels

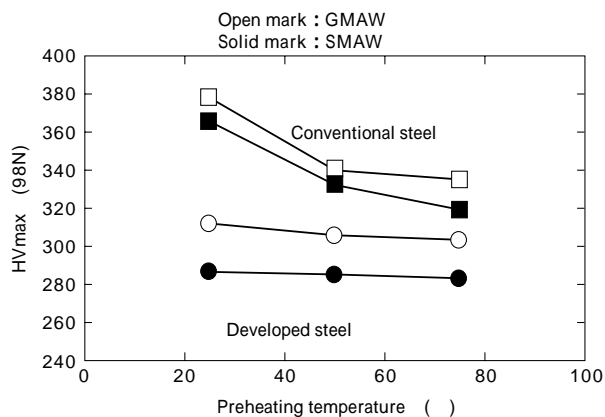


図6 従来鋼と開発鋼の最高硬さ試験の比較  
Fig. 6 Comparison between maximum hardness test results of conventional steel and that of developed steel

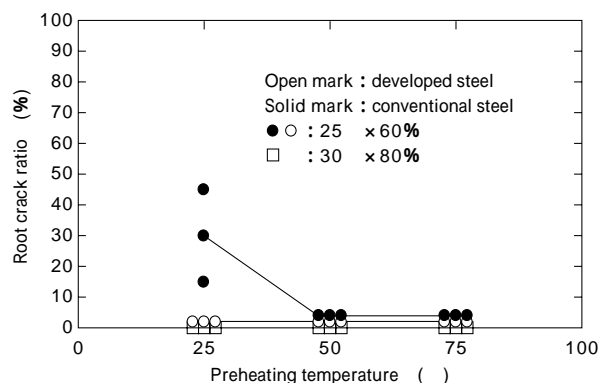


図7 従来鋼と開発鋼の y 型溶接割れ試験の比較  
Fig. 7 Comparison between y-groove cracking test results of conventional steel and that of developed steel

われる HV350 よりも十分低い値である。y 型溶接割れ試験においても 25 において割れないこと、さらに気温 30 ・湿度 80% ・溶接棒の吸湿という過酷な条件においても割れが認められないことから、従来の焼入れ焼戻し型 SM570 鋼板と比較して大幅に溶接性が向上し、予熱省略が可能である。

#### 4.3 溶接継手特性

溶接継手性能試験は、板厚 50mm の鋼板を使用し、GMAW、サブマージアーク溶接 (SAW) を行った。SAW については溶接入熱 5kJ/mm に加えて道路橋示方書の入熱上限である 7kJ/mm の場合も評価した。溶接条件を表6に、試験結果を表7に示す。継手強度は母材引張強度と同等以上の値である。また、側曲げ特性も良好であった。継手衝撃試験においては全ての溶接方法、ノッチ位置で - 5 におけるシャルビ吸収エネルギーは 80J 以上となっており、母材規格の 47J を十分に満足している。

むすび = Ti-Mo-B 系に TMCP を適用することにより、低 C ベイナイト型の HT570 鋼板を開発した。本鋼板は予熱省略が可能であり、YP 一定鋼の要求も満足可能である。また本鋼板は焼入れ焼戻しの熱処理を行わないため、受注から鋼板納入までのリードタイムが短い。従って、今後益々増加する合理化橋梁向け高機能鋼板として需要家でのコストダウンに貢献できるものと考えられる。

表 6 溶接継手性能試験条件  
Table 6 Welding conditions

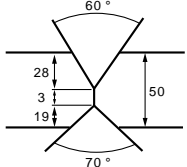
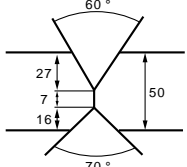
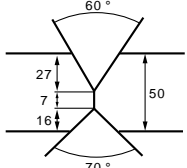
Welding method	Welding material	Welding condition
GMAW	Wire : MG-60 ( 1.2mm )	 Current : 350A Voltage : 35V Speed : 250mm/min Heat input : 2.9kJ/mm
SAW	Wire : US-49 ( 4.8mm ) Flux:MF-38	 Current : 750A Voltage : 38V Speed : 340mm/min Heat input : 5.0kJ/mm
SAW	Wire : US-49 ( 4.8mm ) Flux:MF-38	 Current : 750A Voltage : 38V Speed : 250mm/min Heat input : 6.8kJ/mm

表 7 溶接継手性能試験結果  
Table 7 Mechanical properties of welded joints

Welding method (heat input)	Tensile test		Side bend test	V-notch Charpy impact test	
	TS (MPa)	Position of fracture		Position	$\sqrt{E} - 5$ (J)
GMAW (2.9kJ/mm)	650	Weld metal	Good	Weld metal Bond Bond + 1mm Bond + 3mm	177 220 211 304
SAW (5.0kJ/mm)	639	Weld metal	Good	Weld metal Bond Bond + 1mm Bond + 3mm	135 115 172 276
SAW (6.8kJ/mm)	632	Weld metal	Good	Weld metal Bond Bond + 1mm Bond + 3mm	117 89 163 356

参 考 文 献

- 1 ) 社団法人日本鋼構造協会：高機能・高性能鋼材の橋梁への利用研究報告（2000）
- 2 ) 社団法人日本橋梁建設協会：新しい鋼橋（1999）, p.1.
- 3 ) 為広博ほか：鉄と鋼，Vol.72, No.3（1986）, p.458.