

溶接性に優れた建築用高性能HT590鋼板の開発

Development of High Performance 590N/mm² Class Steel Plate with Excellent Weldability for Building Use

壺岐 浩/Hiroshi Iki・鹿島製鉄所 厚板生産技術部 厚板商品技術室 担当副長

大西一志/Kazushi Ohnishi・鹿島製鉄所 厚板生産技術部 厚板管理室 室長

大竹章夫/Fumio Ohtake・建材事業部 建設技術部 専門部長

岡口秀治/Shuji Okaguchi・総合技術研究所 材料研究部 構造用鋼グループ グループ長

横山幸夫/Yukio Yokoyama・駒井鉄工(株) 技術課 課長

波多野 勲/Isao Hatano・住金溶接工業(株) 溶接材料開発室 課長

要 約

TMCP 技術を適用し、低 Pcm 化した建築用高性能HT590鋼板を開発した。

開発鋼の母材および各種溶接継手部の性能調査を行った結果、目標性能を十分満足し、優れた溶接性を有することが確認された。また、大入熱溶接された場合でも十分な継手性能を確保することができた。

Synopsis

New high performance HT590 steel has been developed with low Pcm value by applying thermomechanical control process (TMCP) in order to improve weldability .

Mechanical properties of base metal and welded joints have been investigated. It has been confirmed that this steel meets target properties and the mechanical properties of welded joints are satisfactory for large heat input welding.

1. 緒 言

鋼構造物の巨大化、高層化に伴い、建築用鉄骨材への高張力鋼の適用が求められており、塑性変形能を重視した低降伏比HT590、HT780の開発が進められてきた。特に、HT590では1988年から建設省の総合技術開発プロジェクトの一環として鉄鋼メーカーとファブリケーターと共同で研究が進められた結果、建築構造用高性能590N/mm²鋼(以下、SA440B、C)としてその利用技術指針¹⁾、溶接施工指針²⁾が作成され、当社では1996年9月に建設大臣一般認定を取得した。

本SA440B、C鋼板は板厚によらず440N/mm²以上の一定の降伏強度を有したうえで、耐震設計思想に基づき降伏比(以下、YR)80%以下とした高性能鋼である。従来より α (フェライト)と γ (オーステナイト)の共存する二相域から急冷すると鋼板のYRが低下することがよく知られており³⁾、本鋼のような低降伏比高張力鋼の製造には焼入れ―二相域焼入れ―焼戻しの三段熱処理が適用されてきたが、この場合には母材強度を確保するため炭素当量(Ceq)^{※1)}や溶接割れ感受性組成(Pcm)^{※2)}を高くする必要があり溶接性の劣化をもたらすという難点があった。一方

で、建築鉄骨材の施工コスト低減の観点からは予熱低減、大入熱溶接の適用による溶接施工効率の向上が望まれている。

このような背景を基に、当社では Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) 技術の活用による SA440B、C鋼板の溶接性の向上に取り組むとともに、本開発鋼を用いて溶接組立箱形断面柱(ボックス柱)を試作し各種溶接継手部の性能調査を行った⁴⁾。ここではその概要を紹介する。

注1) $Ceq = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$ (%)

注2) $Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/16 + 5B$ (%)

2. 開発目標

要求性能を第1表に示す。SA440Cの規定値に準じ板厚によらず降伏応力を440N/mm²以上とし、その範囲を100N/mm²以下に制御し、YRを80%以下とした。また、溶接組立箱形断面柱用鋼であることから、JIS G 3136 Cクラス鋼に準じZ方向絞りは25%以上とした。溶接性に関し

第1表 母材の要求性能

Table 1 Target properties of developed steel

母材特性 ^{*1}						溶接性 ^{*2}	継手特性 ^{*3}
Y.S. N/mm ²	T.S. N/mm ²	YR %	EL %	vEo J	RAz %	割れ防止予熱温度 °C	vEo J
440~540	590~740	≤80	≥20	≥47	≥25	≤50	≥20

* 1 引張試験片：JIS Z 2201 No.4 衝撃試験片：JIS Z 2202 No.4

* 2 Y形溶接割れ試験 * 3 溶接入熱 角継手部（サブマージアーク溶接法）：40kJ/mm
ダイヤフラム部（エレクトロスラグ溶接法）：100kJ/mm

ては従来鋼の場合100℃以上の予熱が必要とされ作業性の点で問題があったが本開発においては必要な予熱温度を50℃以下とすることを目標とした。溶接部の継手靱性については溶接施工指針に準じ実施工時大入熱溶接が適用される角継手部のサブマージアーク溶接（溶接入熱：約40kJ/mm）、ダイヤフラム部のエレクトロスラグ溶接（溶接入熱：約100kJ/mm）の熱影響部（HAZ）全域において0℃でのシャルピー吸収エネルギーが20J以上となることを目標とした。

3. 化学成分と製造方法

上記要求性能を満足させるための鋼板製造に対する考え方を第2表に示す。ここで必要予熱温度50℃以下を達成するための許容最大Pcm値は、鋼材の化学成分組成、溶着金属の水素量、継手の拘束度を取り入れた溶接割れ感受性指数Pw⁵⁾を用いて算出した。すなわち開発目標である必要予熱温度(T₀)を50℃以下とするには(1)式よりPw値を0.31以下とする必要がある。

$$T_0 = 1440Pw - 392 (°C) \quad (T_0: \text{割れ停止温度}(°C)) \quad (1)$$

$$\text{ここで } Pw = Pcm + H/60 + K/40000 \quad (\%) \quad (2)$$

(2)式に低水素系手溶接材料の拡散性水素(H)2ml/100g(グリセリン法)および一般溶接継手における拘束度(K)=

2000(t>50mm)を代入すると予熱温度を50℃以下(Pw≤0.31)のためのPcm値は0.23%以下にすることが必要となる。また、大入熱溶接継手靱性を確保するため低Ceq化およびTi処理⁶⁾などの化学組成面での配慮を行った上で必要強度を確保するためTMCPの適用を行うこととした。TMCP適用に際しては高強度を確保しながら低YR化を図るべく圧延終了温度とその後の水冷条件を厳格にコントロールし適切な焼戻し温度と組み合わせることにより微細なフェライト（軟質相）ベイナイト（硬質相）二相混合組織としている。これにより厚肉であっても引張強さを大きく低下させることなく低い降伏強度を得ることができ安定して80%以下のYRが確保できる。

4. 開発鋼の特性

4-1 母材性能

第3表に示す化学成分を有する現場溶製スラブにTMCPを適用して実製造を行った。開発鋼の化学成分はTMCPの適用を前提としCeqを0.40までPcmを0.20まで低減し、HAZ靱性向上のため微量Tiを添加している。板厚25~70mmの開発鋼の機械試験結果を第4表に示す。いずれも従来鋼と同等な引張特性を有し、目標とした機械的性能を十分満足している。また、板厚70mmの1/4t

第2表 溶接性、HAZ靱性向上のための冶金的対策

Table 2 Metallurgical countermeasures for improving weldability and HAZ toughness

項目	溶接性	大入熱継手靱性
冶金的対策	・低Pcm化 (Pcm≤0.23)	・Ti処理 (TiNのピンニング効果) によるHAZ組織の微細化
	・TMCPの活用	・低Ceq化による島状マルテンサイト、HAZ硬化組織の低減

第3表 開発鋼と従来鋼の化学成分(mass%)

Table 3 Chemical composition of developed and conventional steel

鋼	化 学 成 分						
	C	Si	Mn	P	S	他	Pcm
開発鋼	0.08	0.19	1.46	0.006	0.002	Cu, Ni, Cr, V, Ti	0.40
従来鋼	0.14	0.32	1.39	0.008	0.001	Ni, Mo, V	0.44
SA440C規格値	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.008	—	≤0.47
							≤0.30 ^{*1}

* 1 40mm<板厚≤100mm

第4表 開発鋼と従来鋼の機械的性質

Table 4 Mechanical properties of developed and conventional steel

鋼	板厚 mm	Y.S. N/mm ²	T.S. N/mm ²	YR %	El. %	vEo J	RAz %
開発鋼	25	489	637	77	31	256	72
	50	471	622	76	31	294	74
	70	481	620	76	28	294	78
従来鋼	70	477	637	75	32	270	76

位置でのミクロ組織を写真1に示す。板厚に応じた適切な圧延条件、水冷開始温度を選択することにより、均一なフェライトとペイナイトの混合組織が得られ、同一成分で薄肉から厚肉までの製造が可能となった。

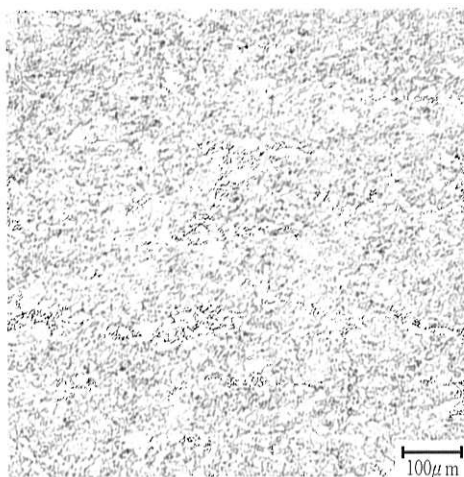
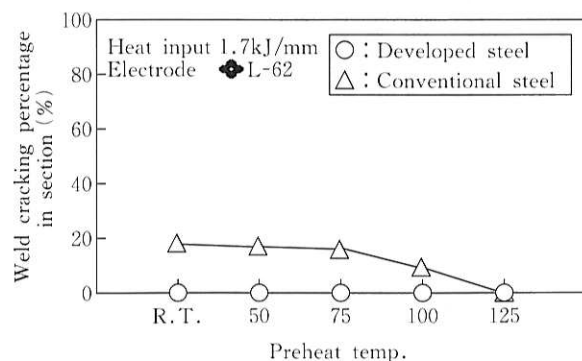


写真1 開発鋼のミクロ組織 (板厚70mm 位置 1/4t)
Photo 1 Microstructure of developed steel
(Thickness:70mm, Position:1/4t)

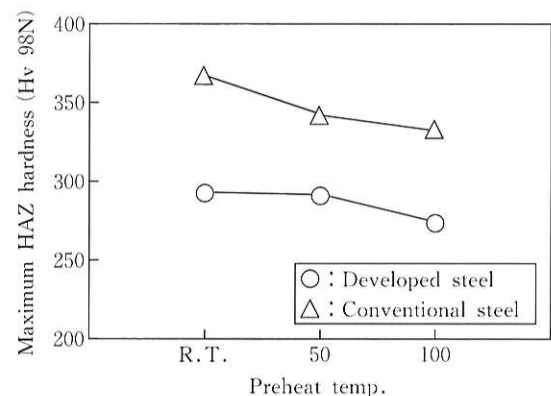
4-2 溶接性

板厚50mmの鋼板について実施したY形溶接割れ試験 (JIS Z 3158-1993) と溶接熱影響部の最高硬さ試験 (JIS Z 3101-1990)結果を第1～2図に示す。その結果、HT 590としては低 Pcm, 低 Ceqの成分系を採用しているため、予熱なし (室温) で割れの発生は認められなかった。また、



第1図 Y形溶接割れ試験結果
Fig.1 y-groove cracking test results

熱影響部の最高硬さも室温で300以下の値を示し、本鋼が従来鋼より優れた溶接性を有することが確認された。



第2図 最高硬さ試験結果
Fig.2 Maximum hardness test results

4-3 溶接継手部の性能

構造物の実溶接性能を調査するため、板厚70mmの開発鋼を用い柱断面が□—800×800×70×70mm (S A 440 C)、ダイヤフラムおよび梁フランジに板厚55mmのHT 490 (T-DAC325)を使用した溶接組立箱形断面柱を試作し、特に大入熱溶接が適用される角継手サブマージアーク溶接、ダイヤフラム部のエレクトロスラグ溶接を対象として性能調査を行った。また、炭酸ガス半自動溶接とエレクトロスラグ溶接で溶接される柱梁仕口部についても同様の試験を行った。これらの溶接諸条件を第5表に示す。第6表に継手引張試験結果を示す。角継手の場合にはタブ板を一方に溶接して JIS 1号試験片により引張試験を行ったが、大入熱溶接にもかかわらず引張強さは630N/mm²以上の値を示し目標性能を満足している。十字継手引張ではHT 490を使用したエレクトロスラグ溶接側で破断したが、引張強さは490N/mm²以上の値を示し、HT 490の母材強度は十分満足できている。第3図には0℃にて実施した角継手サブマージアーク溶接での継手シャルピー試験結果を、第4図には炭酸ガス半自動溶接とエレクトロスラグ溶接で溶接される柱梁仕口部の継手シャルピー試験結果を示す。角継手フランジ部、仕口部の柱側も含めて全てのノッチ位置において、衝撃値は35J以上の値を示し大入熱溶接継手においても目標性能を十分満足していることが確認された。

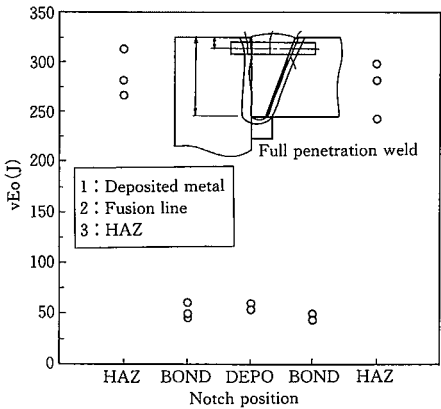
第5表 溶接継手作製条件
Table 5 Shapes and dimensions of groove and welding conditions

溶接法	角継手部サブマージアーク溶接	ダイヤフラム部 炭酸ガス+エレクトロスラグ溶接
開先形状 (単位：mm)		
溶接条件	L : 1 700A×38~42V×200mm/min T : 1 350A×49~52V×200mm/min 入熱 : 39.2~42.5kJ/mm 予熱 : なし	380A×52V×12mm/min 入熱 : 98kJ/mm (エレクトロスラグ溶接) 320~400A×29~39V×200~300mm/min 入熱 : 2.7~4.7kJ/min (炭酸ガス溶接) 予熱 : なし

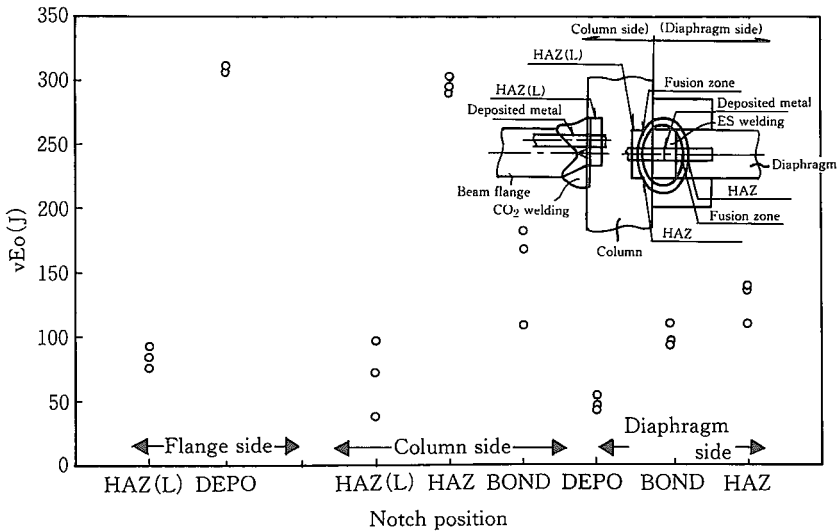
第6表 継手引張試験結果
Table 6 Tensile test results of welded joint

溶 接 法	T.S. N/mm ²	試験片形状
角継手サブマージアーク溶接	636	JIS 1 号 (W=25)
炭酸ガス+エレクトロスラグ溶接	568*1	十字引張 (W=25)

* 1 エレクトロスラグ溶接側55mm, HT490で破断



第3図 継手シャルピー試験結果
(角継手部サブマージアーク溶接)
Fig.3 Charpy impact test results of
submerge arc welded joint



第4図 継手シャルピー試験結果 (炭酸ガス半自動溶接+エレクトロスラグ溶接)
Fig.4 Charpy impact test results of electroslag and CO₂ welded joints

4-4 SA440B, C用エレクトロスラグ 溶接材料の開発

SA440B, C鋼板用に強度590N/mm²のエレクトロスラグ溶接材料が新たに開発された。本開発鋼に適用した場合の機械特性を第7表に示す。溶接金属の強度、靱性は溶接施工指針に準じた要求性能を上回っていることが確認され、既にSA440C鋼板を使用したダイヤフラム部へ適用されている。

第7表 開発溶接金属の機械的特性

Table 7 Mechanical properties of developed weld metal

エレクトロスラグ溶接材料 溶接入熱	Y.S. N/mm ²	T.S. N/mm ²	El. %	RA %	vEo J
◆SC-60Ex ◆100(E), 80kJ/mm	450	600	25	75	88
要求性能	≥440	≥590	—	—	≥15

5. 結 言

溶接性向上の観点から低Ceq低Pcm化した成分にTMCP技術を活用することによってフェライト、ベイナイト二相混合組織化を図った建築用高性能HT590鋼板は従来鋼に比べ優れた母材、溶接性を有し、大入熱溶接時においても十分な継手性能を確保できることが判明した。



壺岐 浩/Hiroshi Iki

鹿島製鉄所 厚板生産技術部
担当副長

(問合せ先: 0299(84)2542)

参考文献

- 1) 建設省建築研究所, 鋼材倶楽部: 高性能鋼利用技術指針, 1994
- 2) 鋼材倶楽部: 60キロ高性能鋼溶接施工指針, 1993
- 3) 鎌田ら: 住友金属, 43 (1991) p.13
- 4) 森田, 横山, 沢村ら: Structural Steel 4th Pacific Struc-

tural Conference Vol.1 (1995) p.675

- 5) 日本鋼構造協会 技術委員会 工作基準小委員会 溶接割れ研究班, SSC Vol.8 No.80 (1972)
- 6) 瀬田ら: 溶接学会論文集, No.2 (1984) p.33
- 7) 大西ら: 住友金属, Vol.40 No.3 (1998) p.33