

# 建築用大入熱溶接型予熱低減780N/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板

## 780N/mm<sup>2</sup> Class High Tensile Strength Steel Plates with Large-Heat-Input-Weldability and Low-Weld-Cracking-Susceptibility for Architectural Construction

徳 納 一 成 <sup>(1)</sup> Kazushige TOKUNO	岡 村 義 弘 <sup>(2)</sup> Yoshihiro OKAMURA	田 中 睦 人 <sup>(3)</sup> Mutsuto TANAKA	瀬 戸 厚 司 <sup>(4)</sup> Atsushi SETO
小 山 邦 夫 <sup>(5)</sup> Kunio KOYAMA	山 下 達 雄 <sup>(6)</sup> Tatsuo YAMASHITA	家 沢 徹 <sup>(7)</sup> Toru IEZAWA	深 沢 隆 <sup>(8)</sup> Takashi FUKASAWA

### 抄 録

厚手超高層建築用780N/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板(HT780)開発を目的とし、大入熱溶接の熱影響部(HAZ)靱性を確保することに重点を置いた1.4Ni-B添加系(A鋼)及び予熱低減を主眼とした低C-1.2Cu-1.4Ni-Bフリー系(B鋼)の2鋼種を開発した。これらの鋼を制御圧延・制御冷却による圧延とオフライン熱処理の組み合わせにより厚鋼板とし、以下の特性を確認した。(1)A鋼, B鋼ともに引張特性は開発目標値を満足しており、低降伏比HT780鋼として満足できる特性を有し、且つシャルピー衝撃試験特性も良好である。(2)y形溶接割れ試験における割れ停止予熱温度は、A鋼で75℃, B鋼で50℃以下と極めて優れている。特にCu析出強化で母材強度を得て最高硬さを低減させたB鋼の耐割れ性が優れている。(3)板厚100mmHT780鋼スキンプレートと板厚50mmSM490鋼板のダイアフラムとのエレクトロスラグ溶接継手部のシャルピー衝撃試験(0℃)において、A鋼, B鋼ともに従来の490N/mm<sup>2</sup>級鋼と同等の値を得た。(4)B鋼について、HT780ボックス柱-SM490H形梁十字骨組みに適用される溶接継手部の破壊及び疲労試験を行ない、各種溶接継手部は素材と同等以上の破壊性能を有すること及び従来鋼と同等の疲労設計が可能であることを確認した。

### Abstract

With a view to developing 780N/mm<sup>2</sup> class high tensile strength steel plates for a superhigh architectural construction, two steel grades of a 1.4Ni-B added system (steel A) being developed with main purpose of securing heat effected zone toughness in large-heat-input welding, and of a low C-1.2Cu-1.4Ni-B free system (steel B) being developed with the main purpose of reducing in preheating temperature have been developed. Through combining controlled rolling/controlled cooling and off-line heat treatment, these steel were made as heavy plates, and following characteristics have been confirmed from the results of tests on them. (1) Both steel A and steel B satisfy the desired value of tensile properties to be pursued, and have characteristics to be required for HT780 steel with a low yield ratio, and their characteristics obtained by the Charpy impact test were also desirable. (2) The preheating temperatures for preventing cracking on the y-groove cracking test were 75°C or under for steel A and 50°C or under for steel B, both of which are very low. Especially excellent is in the crack-resistant characteristic of steel B, the maximum hardness of which is reduced by securing the strength of base material through Cu precipitation hardening. (3) The Charpy impact test at 0°C on electroslog welded joints, which were coupled with a skin plate of HT780 steel with 100mm in thickness and a diaphragm of SM490 steel with 50mm in thickness, showed that both steel A and steel B have the equal Charpy impact value to the one of conventional 490N/mm<sup>2</sup> grade steel. (4) It has been confirmed from the results of fracture test and fatigue test on welded joints to be applied to a cross framework composing of a box column made of HT780 steel (steel B) and an H-shape beam of SM490 steel, that the welded joints of every sort have the equal or more excellent fracture properties compared to the one of the base material and the same fatigue design as the one of the conventional steel can be applied to them.

<sup>(1)</sup> 名古屋技術研究部 主任研究員 工博  
愛知県東海市東海町5-3 ☎ 476 ☎ (052)603-7627  
<sup>(2)</sup> 日本鑄鍛鋼(株)(元 名古屋技術研究部 主任研究員)  
<sup>(3)</sup> 名古屋製鉄所 厚板工場 課長  
<sup>(4)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員

<sup>(5)</sup> 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員  
<sup>(6)</sup> (株)巴コーポレーション 取締役 技術開発部長 工博  
<sup>(7)</sup> (株)巴技研 取締役 溶接研究部部長 工博  
<sup>(8)</sup> (株)巴コーポレーション 鉄塔設計部長 工博

# 1. 緒 言

近年の超高層建築物には大スパン室内空間を有するものが多い。このような建築物の主要鋼材として、高張力鋼に対する要求が強まっており、すでにSM570Q鋼を使用する事例が多くなってきている。これら超高層建築物は、さらなる高層且つ大スパン化の傾向にあり、引張強さ780N/mm<sup>2</sup>級厚手高張力鋼(以後HT780鋼)への要求が高まってきている。

超高層建築用HT780鋼には、HT780鋼としての通常の機械的性質のほか、施工コスト削減のため良溶接性であること、エレクトロスラグ溶接やサブマージーク溶接等の大入熱溶接継手の強度・靱性が優れていること、更に低降伏比をはじめとする建築構造用鋼材としての耐震性能等の多くの特性が要求される。

本報告は、藤本盛久神奈川大学教授を委員長として、(株)巴コーポレーション、日鐵溶接工業(株)及び新日本製鐵との間で行なわれたSHB(Super High-rise Building)委員会(目的：超高層建築用HT780鋼の開発及び適用研究)の成果<sup>1-16)</sup>を中心に、新日本製鐵が開発した超高層建築用新HT780鋼開発の考え方及び新鋼材の基本性能について述べる。

# 2. 開発目標

本研究開発における超高層建築用新HT780鋼の開発目標の考え方を以下に示す。表1には開発目標値を示す。

- (1) 建築用としての溶接時低温割れ防止のための予熱温度を可能な限り低くできること(従来HT780鋼は125℃以上)。
- (2) 1 000kJ/cmレベルの超大入熱溶接継手靱性(目標値 $vE_0 \geq 20J$ )が優れること。
- (3) 耐震性上、大変形領域における安定した荷重-変形関係の確保が要求されることから、降伏比の低減及び一様伸びの確保がなされていること。
- (4) 溶接構造部材として十分な破壊及び疲労強度を有すること。

# 3. 新HT780鋼開発の考え方

目標達成のため以下の課題を考慮した予備検討を行なった。

## 3.1 成分系

### 3.1.1 大入熱溶接継手靱性の向上

1 000kJ/cm相当の大入熱溶接部は、冷却速度が遅いため焼入れ組織が得られにくい。粗大な旧オーステナイト結晶粒から生成された上部ベイナイト主体組織は靱性上極めて不利であるため、合金元素を最低限度確保し、下部ベイナイト組織分率を高める必要がある。

あらかじめ、合金元素含有量で表される焼入れ性指数DI(=  $0.367 \sqrt{C} (1+0.7Si) (1+3.33Mn) (1+0.35Cu) (1+0.36Ni) (1+2.16Cr) (1+3.0Mo) (1+1.75V) (1+1.77Al)$ )と1 000kJ/cm相当入熱の溶接熱影響部(以後HAZ)再現シャルピー試験片を用いた結果( $vE_0$ )の関係を整理した。図1にその結果を示す。目標値 $vE_0 \geq 20J$ を満足す

表1 超高層建築用HT780の開発目標値

機械的性質						炭素当量 Ceq (%)
降伏耐力 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 YR (%)	伸び EL (%)	一様伸び (%)	$vE_0$ (J)	
630 $\leq$	780~930	85 $\geq$	16 $\leq$	[8 $\leq$ ]	47 $\leq$	0.60 $\geq$

注) [ ]内は参考値

るためには、ばらつきを考慮すると7インチ以上のDIが必要である。

更に、HAZ靱性を向上させる手法としてNiの高添加が考えられるが、コストアップを考慮すればその添加には制限がある。

### 3.1.2 溶接予熱温度の低減

溶接時の低温割れ防止のための予熱は、HAZ硬化抑制と拡散性水素濃度の低減のために行なう。特に、母材開発面からはHAZ硬化抑制の配慮が不可欠である。

図2は、炭素当量Ceq(=  $C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$ )を0.48%に固定した鋼中のボロン(B)含有量とHAZ硬さの関係を検討した結果を示す。Bの影響は極めて大きく、わずか3 ppmほどで硬さを上昇させる。Bはこのような強い焼入れ性効果を通して大入熱溶接継手靱性に有効ではあるが、低温割れ感受性を高めるため、Bの添加には十分な配慮が必要である。

一方、新日本製鐵では、すでに建築以外の用途でHAZの硬化抑制を狙ったCu析出強化型HT780を開発済み<sup>17)</sup>であり、本開発鋼でも基本的にこの思想を採用する。Cuは、焼入れ性を大きく高めることがない一方、適切な熱処理によって、マトリックスとの整合性が高い微細なbcc構造析出物を形成して強い強化作用が期待できる。

### 3.2 製造プロセスの考え方

超高層建築用HT780鋼開発には、上記の成分系検討のほか、製造プロセス面での検討が不可欠である。この場合、溶接性を重視して合金元素添加量が制限される中で、最大板厚100mm程度のHT780鋼としての強度・靱性を確保すること、鋼板の降伏比を十分に低減させることに留意しなければならない。

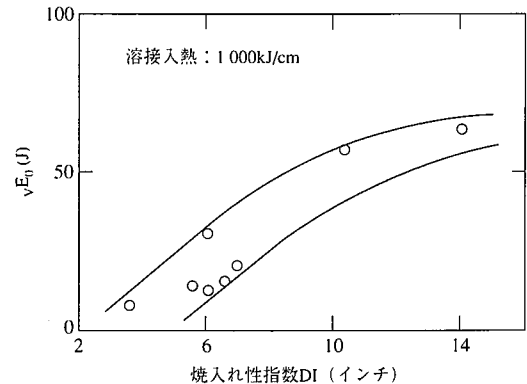


図1 超大入熱溶接部靱性に及ぼす焼入れ性指数(DI)の影響

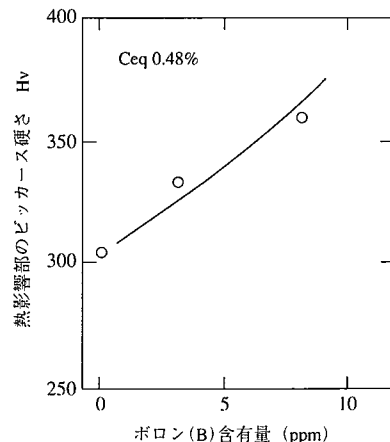


図2 溶接熱影響部硬さに及ぼすボロン(B)含有量の影響

予想される最大板厚100mm程度の鋼板中心部まで十分な焼入れ組織を得ることは困難であるが、本開発では、十分な溶体化処理後焼入れることができる直接焼入れ法<sup>17)</sup>を採用する。

降伏比の低減は、引張強さの低下を抑え、降伏強さを低下させるという性質を鋼材に持たせることに相当する。降伏強さの低減には、降伏しやすく且つ加工硬化しやすい柔らかい相(例えばフェライト相)を導入する方法が最も簡便である。このためには、鋼板を焼入れ後、Ac<sub>1</sub>点以上Ac<sub>3</sub>点以下の適切な温度に加熱した後焼入れを行ない、二相組織化させる方法がある。この焼入れはL処理(Lamellarizing)と呼ばれ、新日本製鐵の既存建築用鋼における低降伏比化には、この処理法がすでに適用されている<sup>18,19)</sup>。

#### 4. 鋼材の基本性能

##### 4.1 成分系

第3節での検討をふまえ、新日本製鐵では、表2に示す板厚100mmHT780の大入熱溶接型A鋼及び予熱低減型B鋼の2鋼種を開発した。

##### 4.2 大入熱溶接型鋼(A鋼)の特徴

大入熱溶接のHAZ靱性を確保することに重点を置いた成分系であり、Cを従来HT780鋼なみの0.11%ベースとするが、その他合金元素(Cr, Mo等)の添加を極力抑えるためB添加系とし、更にNiを1.4%まで高めた。写真1にA鋼の母材マイクロ組織を示す。

##### 4.3 予熱低減型鋼(B鋼)の特徴

溶接時の低温割れ性を低減した成分系であり、そのためにCを0.07%にまで制限し且つB無添加とした。一方、Niは1.4%まで高める一方、低い焼入れ性でも十分に強度が確保できるように析出強化元素Cuを1.2%まで添加した。この鋼は、見かけの炭素当量(C<sub>eq</sub>)は高いが、HAZ硬さが低い低温割れ感受性が低い<sup>17)</sup>。写真2に母材マイクロ組織を示す。また、Cu析出物を観察する目的で、制御圧延+直接焼入れ→L処理→焼もどしまで完了した鋼板を更に600℃で1h過時効させて析出物を粗大化させた後、薄膜を作成しこれを200kV電界放射型透過電子顕微鏡で観察した。結果の一例を写真3

表2 開発鋼の化学成分

鋼	化学成分 (wt%)											C <sub>eq</sub>	P <sub>cm</sub>
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B		
A	0.11	0.30	1.03	0.006	0.003	0.28	1.41	0.54	0.48	0.04	0.0015	0.56	0.28
B	0.07	0.29	1.34	0.005	0.002	1.18	1.46	0.62	0.44	0.04	-	0.58	0.29

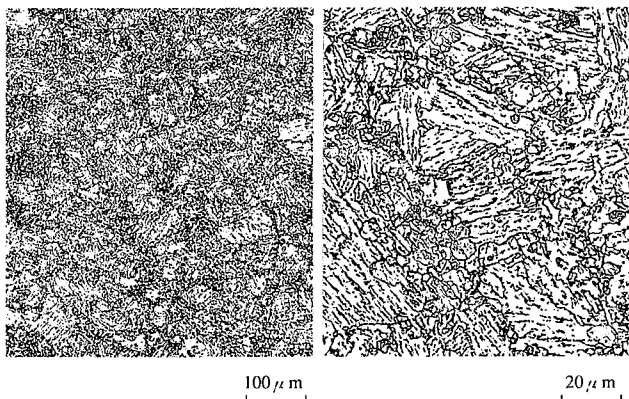


写真1 開発鋼(A鋼)のマイクロ組織

に示す。直径20nmほどで球形に近いCu析出物の格子像が観察される(写真中央矢印で示す)。このCu析出物のサイズ及び分布間隔は、同様に600℃で過時効させたCu析出強化型HT780(1%Cu添加)<sup>1)</sup>のCu析出物のそれとほぼ等しい。ただし、ここで見られるCu析出物は、過時効により、実際に強度に寄与するbcc構造の微細Cu析出物を凝集粗大化させfcc構造のε-Cu析出物としたものである。

##### 4.4 開発鋼材の母材性能

表3にA鋼及びB鋼の母材機械的性質、図3に引張試験における応力-伸び曲線を示す。A鋼、B鋼ともに、引張の強度特性はHT780として満足しており、且つ降伏比も78~82%のレベルであり、低降伏比鋼として満足できる特性である。シャルピー衝撃試験の延性脆性遷移温度は-60℃以下である。

##### 4.5 開発鋼材の溶接性能

図4に最高硬さ試験結果を示す。最高硬さはA鋼でHv=360~370、B鋼でHv=330~340である。予熱低減の効果を強く指向したB鋼の硬さが低い。

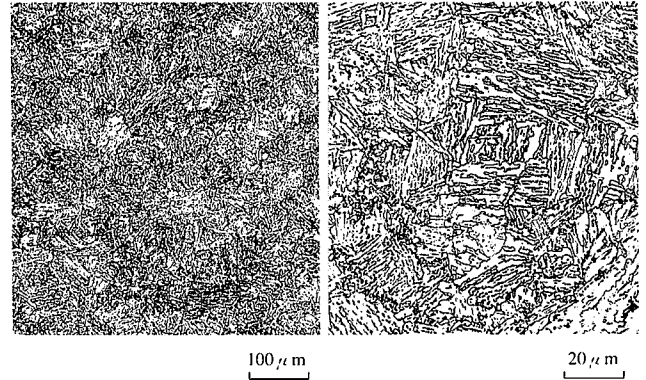


写真2 開発鋼(B鋼)のマイクロ組織

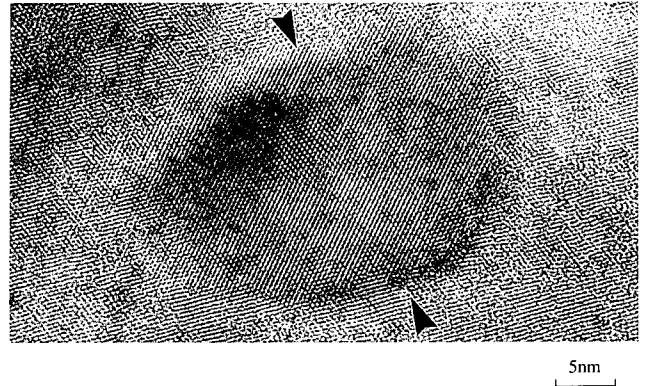


写真3 開発鋼(B鋼)薄膜の電界放射型透過電子顕微鏡組織

表3 開発鋼母材の機械的性質

鋼	引張特性				シャルピー衝撃特性		
	σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>B</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	YR (%)	EL (%)	50°FATT (°C)	√E <sub>0</sub> (J) (平均値/最小値)	√E <sub>20</sub> (J)
A	659	806	82	26	<-60	192/188	190/188
	659	810	82	25			
B	665	844	79	27	-77	209/208	193/190
	673	860	78	26			

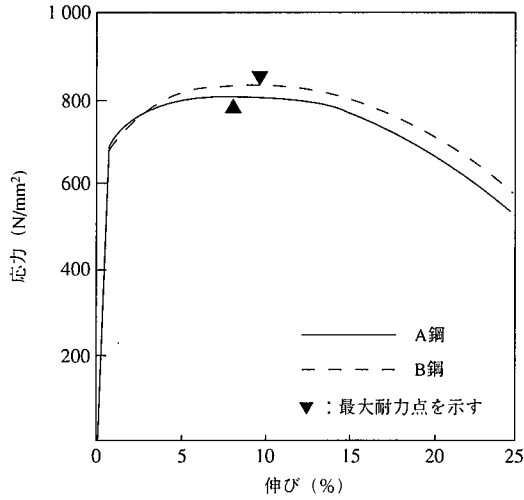


図3 開発鋼母材の応力-伸び曲線

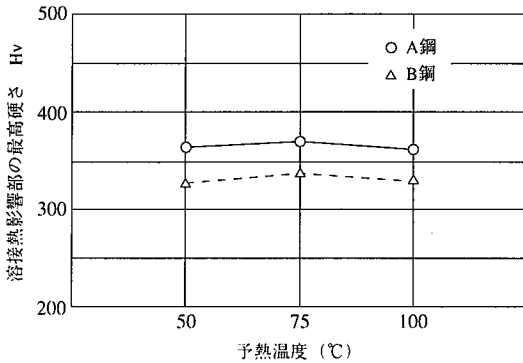


図4 溶接熱影響部最高硬さ試験結果

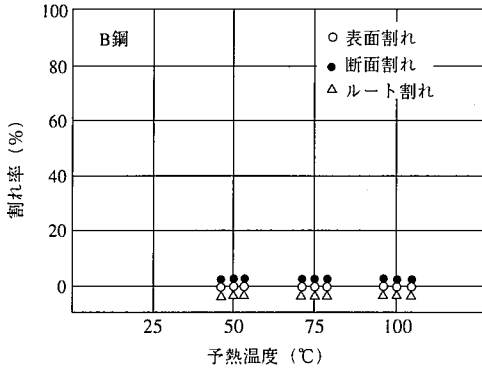
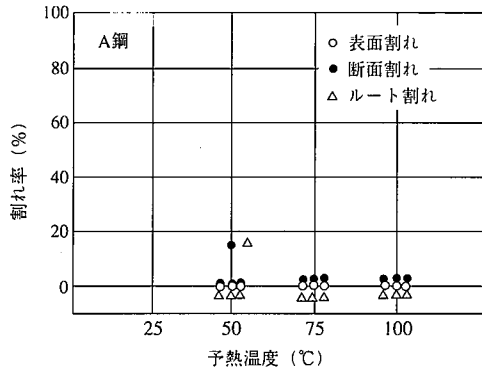


図5 y形溶接割れ試験結果

図5にA鋼, B鋼のy形溶接割れ試験による割れ性評価結果を示す。これより, 割れ停止予熱温度は, A鋼で75℃, B鋼で50℃以下と良好な結果を得た。特に, 最高硬さを低減させたB鋼の耐割れ性が優れている。

4.6 開発鋼材の溶接継手性能

超高層建築物ボックス柱の板厚100mmHT780スキンプレートと板厚50mmSM490鋼板のダイアフラムとのエレクトロスラグ溶接(以後ES溶接)を想定した試験溶接を行ない, スキンプレート側各溶接部位にノッチを入れたシャルピー衝撃試験(0℃)を行なった結果を図6に示す。従来HT780鋼がHAZ 3mm, HAZ 5mmで20J未満であるのに対し, A鋼, B鋼ともに高い値を示している。A鋼がB鋼に比べて低い値を示しているが, これはA鋼の入熱が大幅に高いためと考えられる。

5. 建築構造物への適用試験

5.1 考え方

ここでは, 特に予熱低減を主眼として開発したB鋼の建築構造物としての基本性能の検討を目的として, HT780ボックス柱-SM490H形梁十字骨組みに適用される溶接継手の破壊及び疲労試験を行なった。

5.2 溶接継手の破壊強度特性

ボックス柱の製作で適用される図7に示す5タイプ, 総片15片の

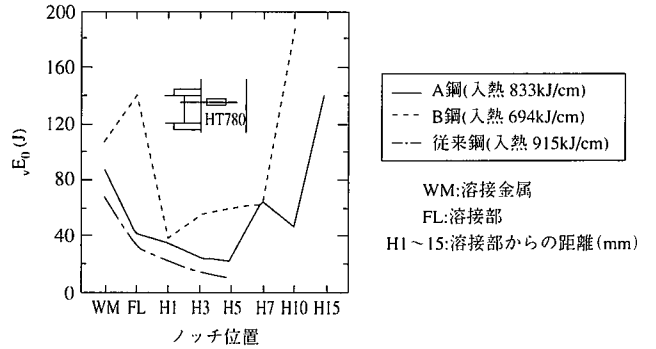


図6 エレクトロスラグ溶接継手部シャルピー衝撃試験結果

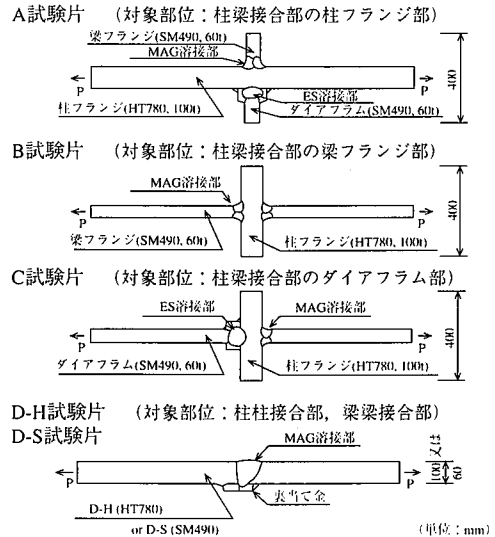


図7 破壊強度試験に用いた溶接継手部

溶接継手(A, B, C, D-H, D-S)の実厚広幅試験片を用いて単調引張試験を行なった。

A, C試験片はHT780柱フランジとSM490梁フランジ, ダイアフラムをそれぞれ炭酸ガスシールド(MAG)溶接及びES溶接して十字形状にしたものであり, A試験片は柱フランジ, C試験片はダイアフラムES溶接の耐力評価に用いた。B試験片はHT780柱フランジとSM490梁フランジをMAG溶接して十字形状にしたものであり, 梁フランジMAG溶接部の耐力評価に用いた。D-H試験片はHT780柱フランジ, D-S試験片はSM490梁フランジをそれぞれMAG板継溶接したもので, MAG溶接部の耐力評価に用いた。また, 破壊挙動に及ぼすアンダーカットの影響を調査する目的で, A, D-H, D-S試験片には幅0.15mm, 深さ2.0mmないし5.0mm, 長さ200mmの表面切欠をMAG溶接止端部に設けた。広幅試験片の平行部寸法は図8に示す通りであり, 伸び計測は平行部長さを標点間として行なった。

表4に試験結果, 図9に代表的試験片の応力-伸び関係を示す。これより, 切欠のないA1, A2試験片はES溶接部から脆性亀裂が発生してES溶接部伝播するが, HT780母材中で延性破壊に転化し, 最終的に脆性破壊した。また, 切欠を付けたA3試験片は切欠のないA1, A2試験片と同様ES溶接部より延性破壊しており, 切欠が破壊の起点にはならなかった。B試験片はいずれもSM490母材部で延性破壊した。C試験片は, SM490母材破壊, ES溶接部裏当て部のSM490母材破壊, ES溶接金属破壊を呈した。切欠のあるD-H1, D-H2試験片は切欠から延性亀裂が発生し, 溶接金属に斜めに

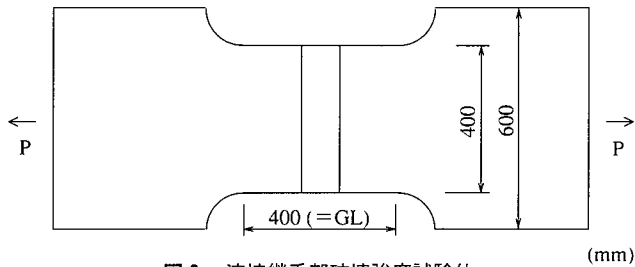


図8 溶接継手部破壊強度試験体

進展して延性破壊した。また, 切欠の無いD-H3試験片は止端部からHT780母材へ延性破壊した。D-S試験片では, 切欠のあるD-S1, D-S2試験片は延性亀裂が板面に垂直に進展し, 溶接ボンドに沿って脆性破壊した。切欠の無いD-S3試験片はSM490母材部で延性破壊した。

図10に材料引張試験に基づく母材と広幅試験片における各種溶接継手の破壊及び降伏応力の比較図を示す。溶接部の破壊及び降伏応力は母材と同等かそれ以上であり, 試験片平行部での塑性変形を確保するのに十分な結果となる。

### 5.3 溶接部の疲労強度特性

疲労強度特性試験として, ボックス柱の製作に適用される図11に示す3種類の溶接継手を対象とした。

(a)試験片は主板であるHT780の両側にリブ板SM490をMAG溶接で接合した非荷重伝達十字継手, (b)試験片はリブ板の片側をES溶接した継手であり, ES溶接の裏当て金はMAG溶接で接合してある。(c)試験片は主板にSM490を用いて中間にHT780を挟んだ荷重伝達十字継手であり, 接合部はMAG溶接を行なった。(a)及び(b)試験片は, 止端をグラインダーで研削した試験片も製作した。疲労試験は軸力・荷重制御で応力比(最小荷重/最大荷重) $R=0.1$ で行ない, A試験片のグラインダー研削継手は $R=0.5$ でも実施した。

各試験片の公称応力範囲と破断寿命の関係を図12に示す。図中には日本鋼構造協会(JSSC)の疲労設計曲線Dカーブ及びEカーブ<sup>5)</sup>, 並びに最大応力が降伏応力となる $\Delta\sigma$ を破線及び一点鎖線で示す。

(a)試験片では, 溶接まま継手がJSSCのEカーブを, グラインダー研削継手がDカーブを満足している。(b)試験片は, (a)試験片よりもS-N線図の傾きが大きく短寿命側に位置しているが, ほぼJSSCのEカーブを満足している。この試験片はすべてES溶接裏当て金と主板との溶接部止端から亀裂が発生して破断した。(c)試験片は, (a)試験片ほどのグラインダー研削効果は認められないが, 溶接ままはEカーブを, 研削継手はDカーブをそれぞれ満足した。これらより, 本HT780鋼は, 溶接まま, 止端研削継手とも降伏応力レベルの応力範囲まで従来鋼と同等の疲労設計が可能であることを確認した。

表4 溶接継手部破壊強度試験結果

試験片記号	切欠深さ (mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{max}$ (%)	破壊様式	
A1	0	666	819	4.0	$\sigma_{max}$ 時	ES溶接部より脆性破壊, ボンド伝播, HT780母材で延性に転化。最終的に脆性
A2	0	665	828	5.3		
A3	2.0	672	856	6.3		
B1	0	421	614	9.0	$\sigma_{max}$ 後	母材部で延性破壊
B2	0	424	613	8.7		
B3	0	436	617	7.9		
C1	0	428	613	8.0		
C2	0	442	613	8.6		
C3	0	436	610	8.7		
D-H1	2.0	687	838	6.1		
D-H2	5.0	701	828	4.8		
D-H3	0	710	847	7.8		
D-S1	2.0	408	579	12.0		
D-S2	5.0	402	574	8.6	$\sigma_{max}$ 時	D-S1では大きな延性き裂
D-S3	0	407	585	12.3	$\sigma_{max}$ 後	母材部で延性破壊

注)  $\sigma_y$ : 0.2% オフセット耐力,  $\sigma_{max}$ : 最大耐力,  $\epsilon_{max}$ :  $\sigma_{max}$ 時の伸び

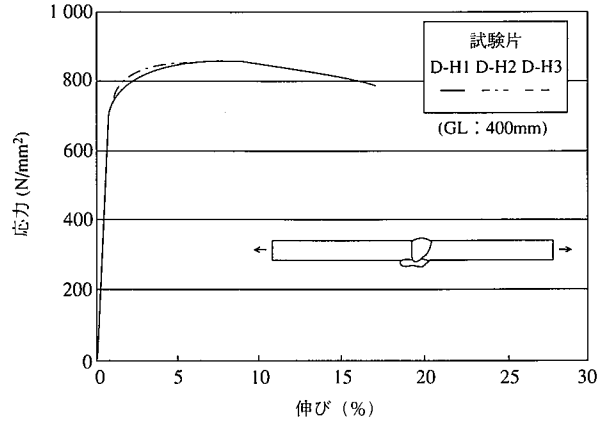
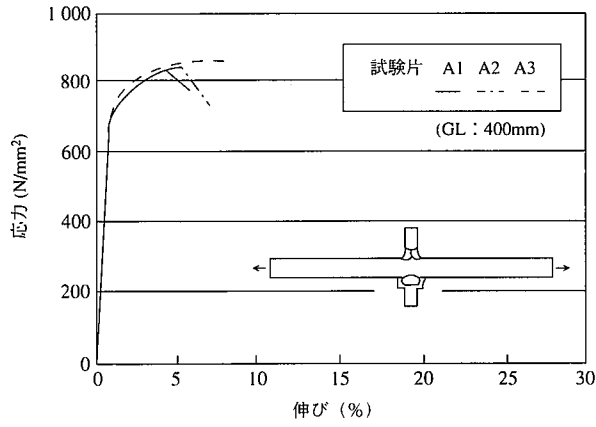


図9 溶接継手部の応力-伸び曲線

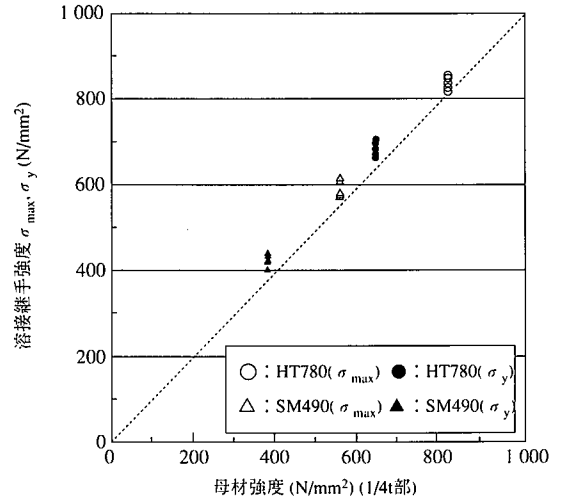
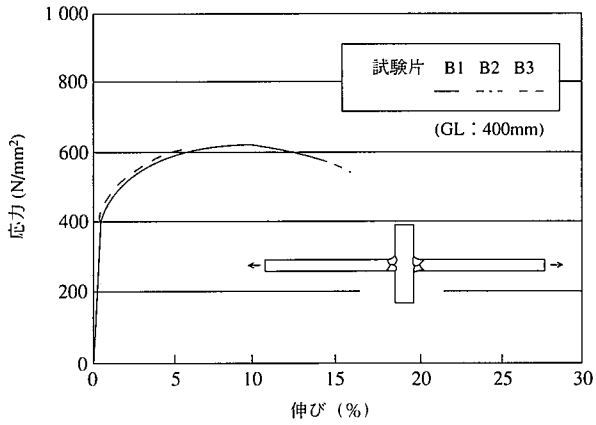


図10 母材強度と各種溶接継手強度の比較

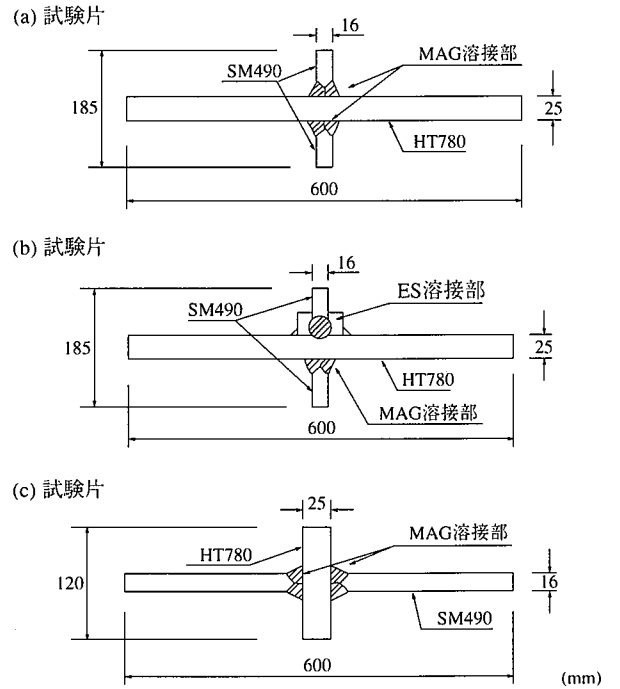
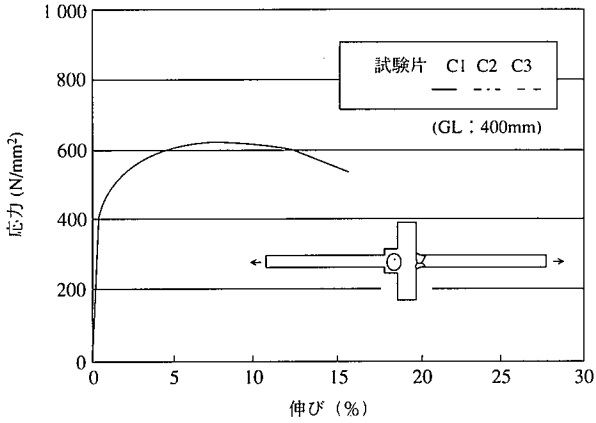
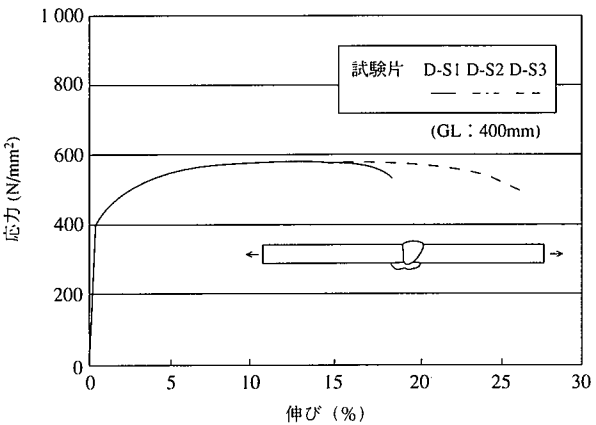


図11 疲労強度試験に用いた溶接継手試験体



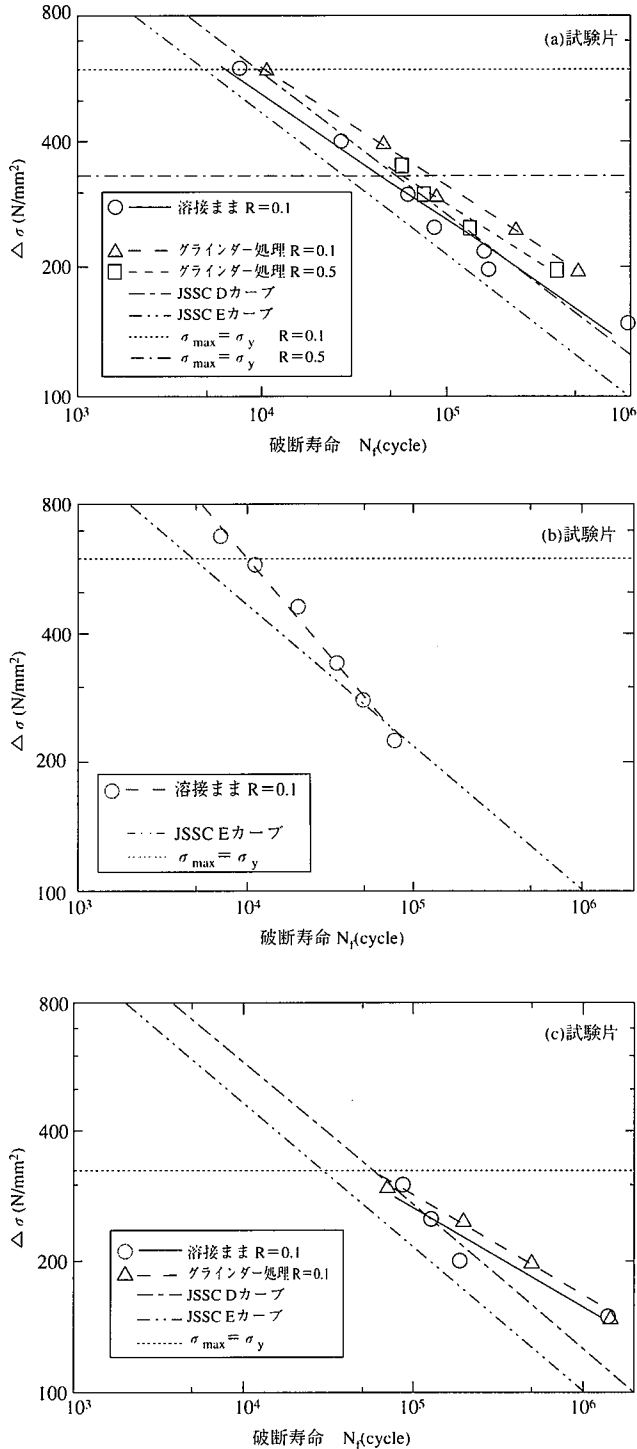


図12 溶接継手部のS-N線図

## 6. 結 言

厚手超高層建築用HT780鋼開発を目的とし、1.4Ni-B添加系(A鋼)及び低C-1.2Cu-1.4Ni-Bフリー系(B鋼)の2鋼種を開発した。これらの鋼を、制御圧延・制御冷却による圧延とオフライン熱処理の組み合わせにより100mm厚鋼板とし、以下の特性を確認した。

(1)A鋼, B鋼ともに引張の強度特性は開発目標値を満足しており, 降伏比も85%以下のレベルであり, 低降伏比鋼として満足できる特性を有し, 且つシャルピー衝撃試験特性も良好である。

(2)y形溶接割れ試験における割れ停止予熱温度は, A鋼で75℃, B鋼で50℃以下と極めて優れている。特に, Cu析出強化で母材強度を得て最高硬さを低減させたB鋼の耐割れ性が優れている。

(3)板厚100mmHT780スキンプレートと板厚50mm鋼板のダイヤフラムとのエレクトロスラグ溶接を想定した溶接継手部のシャルピー衝撃試験(0℃)において, A鋼, B鋼ともに, 従来の490N/mm<sup>2</sup>級鋼と同等の値を得た。

(4)B鋼について, HT780ボックス柱-SM490H形梁十字骨組みに適用される溶接継手部についての破壊及び疲労試験を行ない, 各種溶接継手部は素材と同等以上の破壊性能を有すること, 及び従来鋼と同等の疲労設計が可能であることを確認した。

## 謝 辞

本研究開発を完遂するにあたって, SHB委員会の皆様のご尽力に深く感謝の意を表させていただきます。

## 参考文献

- 1) 山下 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1153
- 2) 山場 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1155
- 3) 小山 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1157
- 4) 金谷 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1159
- 5) 白井 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1161
- 6) 家沢 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1163
- 7) 萩原 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1165
- 8) 瀬戸 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1167
- 9) 田沼 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1169
- 10) 深沢 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1171
- 11) 瀬戸 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1405
- 12) 石田 ほか: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993,p. 1407
- 13) 藤本 ほか: バコーポレーション技報, 7.1 (1994)
- 14) 山場 ほか: バコーポレーション技報, 7.5 (1994)
- 15) 山下 ほか: バコーポレーション技報, 7.9 (1994)
- 16) 萩原 ほか: バコーポレーション技報, 7.11 (1994)
- 17) 岡村義弘 ほか: 鋼構造論文集, 1(1),53 (1994)
- 18) 大橋 守 ほか: 材料とプロセス, 4(3),758 (1991)
- 19) 大谷幸三郎: 新日鉄技報, (344),40 (1992)
- 20) (社)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説,技報堂出版,1993