

持続可能な鋼構造を創出する建築用超高強度鋼

Ultra High Strength Steel for Sustainable Building Structures

加茂孝浩*
Takahiro KAMO

鈴木孝彦
Takahiko SUZUKI

安藤隆一
Ryuichi ANDO

渡部義之
Yoshiyuki WATANABE

佐々木正道
Masamichi SASAKI

抄 録

一般に、構造物に作用する地震力は地盤面から受ける地震動の加速度に建物の重量を掛け合わせたもので表される。構造物自体の重量を低減することは地震力の軽減に繋がるため、部材断面を小さくして構造物の軽量化を可能とする高強度鋼適用の要望は高い。新日鉄住金(株)は建築構造用に溶接性および経済性を追求し、最小降伏強さを700N/mm²および880N/mm²とした高強度鋼材を開発し、世界で初めて実用化した。

Abstract

Sustainability of building structures is focused on especially after the Hanshin-Awaji earthquake in 1995. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation developed the minimum yield strength of 700 N/mm² and the minimum yield strength of 880 N/mm² steel for the columns used in advanced damage control design, and put them into the first practical use in the world.

1. 緒 言

世界有数の地震国である我が国では、過去の大きな地震災害に学びながら安全で経済性の高い建築構造物のあり方が探求されてきた。近年では、建築構造物の倒壊を防止するだけでなく、地震後も本来の機能を継続して利用可能とする建築構造物が求められており、弾性変形域の大きな高強度鋼が注目されている。

新日鉄住金(株)では、これまでの豊富な高強度鋼の製造実績を活かして新しい耐震思想に基づき設計される建築構造物向けに、溶接性と経済性の高い降伏強さ880N/mm²(引張強さ1000N/mm²)級までの超高強度鋼材を開発し実用化している。本報では、降伏強さ700N/mm²(引張強さ780N/mm²)級以上の建築構造用超高強度鋼の開発指針、鋼材特性および実用化例について述べる。

2. 耐震設計と建築用鋼材の動向

近年の建築構造物は、1981年の建築基準法改正で導入された新耐震設計法に基づいて、中規模地震に対しては骨組を弾性変形の範囲に留め、耐用年限中に一回遭遇するかもしれない大地震に対しては、骨組を塑性変形させること

で地震エネルギーを吸収する設計が行われてきた。

一方で、土地の有効活用という観点から建築構造物の高層化が進み、骨組に使用される鋼材には厚手化、高強度化が求められるようになった。この要求に対応するため、熱加工制御(TMCP)を適用して板厚100mmまで降伏強さ(YS)を一定とした建築構造用TMCP鋼(YS325N/mm², 355N/mm²鋼)が開発され、1980年代後半から建設大臣(当時)の認定を得て使用されるようになった。

この間に、骨組の塑性変形能の信頼性を向上させるための研究も進められ、1994年の建築構造用圧延鋼材(SN)規格制定に併せて建築構造用TMCP鋼にも降伏比と降伏強さの上限規定が設けられ、高層建築を主体に盛んに使用されるようになった。

1995年の阪神淡路大震災では多くの建築物が大きな被害を受けたが、新耐震設計法に準拠し設計された建築物の被害は比較的少なかったとされている。しかし一方で、期待通りに大きな塑性変形を伴い崩壊を免れた建築物は、その後の継続利用や復旧の困難さ、さらには資産価値の消失という事実を示していた。これを受けて、骨組の変形はあくまで弾性の範囲に収め、骨組とは異なる部材を大きく塑性変形させて地震エネルギーを吸収する設計法が検討さ

* 鹿島技術研究部 主幹研究員 茨城県鹿嶋市光3番地 〒314-0014

れ，“震度7弾性設計”という従来を遥かに上回る耐震性能を実現するために“革新的構造材料を用いた新構造システムの開発”が府省連携プロジェクトとして発足し，耐震性と可変性が格段に優れた新たな建築物（新構造システム）の開発が進められた。

3. 新日鐵住金の建築用超高強度鋼板

新しい設計思想による超高層建築物では，被災後も建物の再使用が可能になるようダンパーと称する地震エネルギー吸収機構を導入することで柱および梁の損傷を制御する損傷制御設計が行われる（図1 (b)）¹⁾。このような構造を有効に機能させるために，ダンパーには伸びの大きな低降伏点鋼，梁には降伏強さと降伏比を制御した塑性変形能力保証鋼，そして柱には梁部材よりも高い降伏強さを有する鋼が使用される。新日鐵住金では，柱用鋼材として既に従来鋼よりも降伏強さを高めたBT-HT400，BT-HT500を商品化しているが，さらに柱の断面積を小さくしてより効率的にダンパーに地震エネルギーを吸収させることが可能となる高強度鋼の開発に取組み，降伏強さ下限を700N/mm²および880N/mm²としたBT-HT700，BT-HT880を商品化した。

新日鐵住金では，高度なTMCP技術を用いて予熱の省

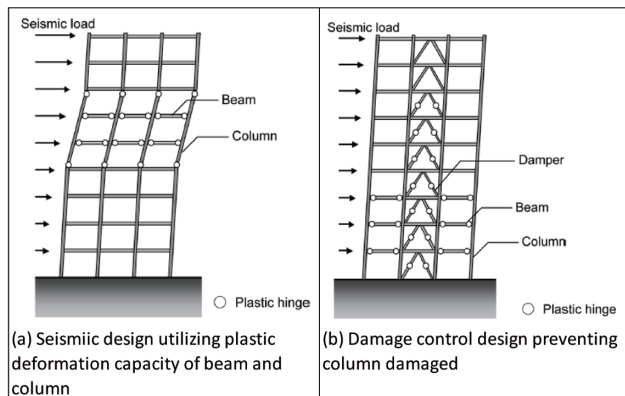


図1 耐震設計のコンセプト¹⁾

Schematic illustration of seismic design concept

略または予熱温度の低減を可能とする低 P_{CM} 化^{2,3)}や，微細粒子によるHAZ細粒高韌化技術（HTUFF[®]）^{4,5)}などで溶接施工性の向上や溶接部の高韌化要求に応えたと共に，高度化する耐震設計の要求に応じて，地震エネルギー吸収部材用の低降伏強度鋼材のBT-LYP100，225，従来の低降伏比型鋼材BT-HT325，385，440，630に加えて，高い弾性変形域を有する高降伏強度鋼材BT-HT400，500，700，880を図2に示す様にシリーズ化している。

4. BT-HT700，BT-HT880の特徴

4.1 鋼材の規格

表1にBT-HT700およびBT-HT880の鋼材規格を示す。降伏強さ下限をそれぞれ700N/mm²，880N/mm²とし，降伏後の補歪エネルギーを確保しつつ弾性変形域を最大限活用する観点から，降伏比を98%としている。また，BT-HT700については，円形鋼管柱用にシャルピー衝撃試験の試験温度を-20℃とした規格を設けた。

4.2 BT-HT700の特性と実用化

4.2.1 鋼材特性

表2に供試材の化学成分を示す。溶接性の向上に主眼を置いた，低Cかつ低溶接割れ感受性指数（ P_{CM} ）の成分系を採用した。さらに，Ni，Cr，Mo，B等の添加による焼入性の最適化，および不純物であるP，Sの低減を行い破

表1 鋼材規格
Material specification

Brand name	Tensile test			Charpy impact test (1/4t, L-dir.)	
	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	Test temperature (°C)	Absorbed energy (J)
BT-HT700	700-900	780-1000	≤ 98	0 -20	≥ 47 ≥ 47
BT-HT880	880-1060	950-1130	≤ 98	0	≥ 70

t: Thickness, L-dir.: Longitudinal direction

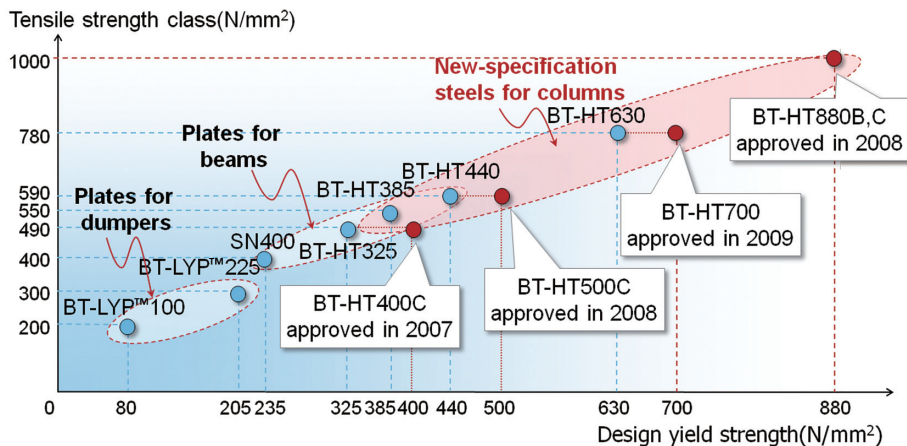


図2 新日鐵住金の建築構造用鋼材
NSSMC's steel plate used for building structure

表2 化学成分 (mass%)
Chemical compositions (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq	P _{CM}
0.07	0.06	1.24	0.008	0.001	Cu, Ni, Cr, Mo, Nb, Ti, B	0.58	0.22

$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$
 $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

表3 y型溶接割れ試験結果 (60mm 鋼板)
Result of y-groove cracking test (60mm thickness plate)

Welding condition	Atmosphere	Preheat temperature	Crack ratio
GMAW (CO ₂) YM-80C, 1.7kJ/mm	20°C, humidity 60%	free	0%

GMAW: Gas metal arc welding

表4 機械試験結果 (25mm 鋼板)
Mechanical test results (25mm thickness plate)

Thickness position	Tensile test (JIS5B, Flat, T-dir.)			Charpy impact test (1/4t, L-dir.)	
	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	Test temperature (°C)	Absorbed energy (J)
Full-thickness	801	852	94	-20	324
Target (BT-HT700B)	700-900	780-1000	≤ 98	-20	≥ 47

T-dir.: Transverse direction

表5 製管試験結果 (25mm 鋼板, 冷間曲げ, 板厚/直径=0.05)

Mechanical properties of pipes (25mm thickness plate, cold forming, thickness/diameter=0.05)

Tested sample	Direction	Tensile test (full-thickness)			Charpy impact test (1/4t, L-dir.)	
		YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)
Plate	L	788	842	94	-20	302
Pipe (as formed)	Pipe axial (L-dir. of plate)	801	879	91	-20	281

壊靱性の安定化を図った。表3にy形溶接割れ試験結果を示す。鋼材としては予熱無しでも低温割れが発生しないことを確認した。表4に鋼材の引張およびシャルピー衝撃試験結果を示す。高い強度と安定したシャルピー特性が確保できている。円形鋼管柱向け素材として用いる場合を想定し、冷間曲げ加工前後の機械特性を評価した結果を表5に示す。製管後においても安定した強度およびシャルピー衝撃特性を示すことが確認でき、鋼管柱としての活用が可能であるとの判断を得た。

4.2.2 実用化事例

(株)大林組の技術研究所本館テクノステーション(図3)には高強度コンクリート充填鋼管(CFT)柱向けに板厚

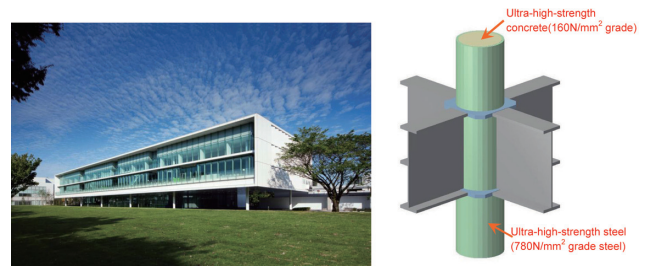


図3 大林組技術研究所本館テクノステーション外観およびBT-HT700適用部材(写真・図:大林組提供)

Appearance of Obayashi Corporation's Technical Research Institute Main Building "Techno-Station" and column applied BT-HT700 (photo and figure provided by Obayashi Corporation)

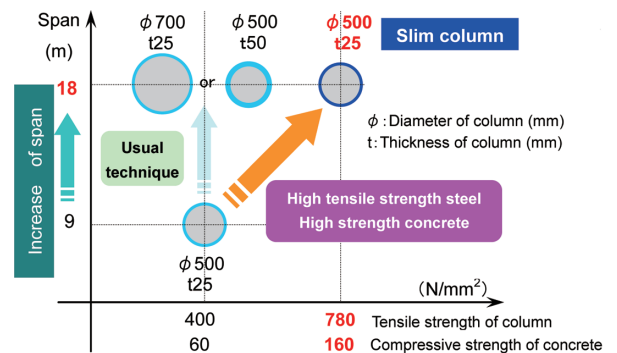


図4 超高強度CFT柱の特徴(概念図)
Feature of ultra-high-strength CFT column

25mmのBT-HT700が世界で初めて採用された。従来の鋼材(SM490A)に比べて降伏強度が2倍以上と大きく、従来の降伏強さ700N/mm²級鋼に比べてP_{CM}が低いという特徴を活かし、鋼材の薄肉化と溶接施工性を両立している。さらに、充填コンクリートの高強度化、耐火被覆の合理化等により柱の細径化を図っており、高い耐震性と併せて大スパンや吹抜けのある開放的空間、耐火性を同時に実現している(図4)。さらに、これら高強度材料を使用することにより、鋼材、コンクリートの使用量を削減でき、環境負荷低減に貢献している。

4.3 BT-HT880の特性および実用化

4.3.1 鋼材特性

表6に供試材の化学成分を示す。BT-HT700と同様に、低Cと低P_{CM}化による溶接性の向上に主眼を置いた成分系とした。高い強度と優れた靱性を両立させるため、微細な焼き戻しマルテンサイト組織を得ることを狙い、合金設計および熱処理条件の最適化を行った。表7に鋼材の機械試

表6 化学成分 (mass%)
Chemical compositions (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq	P _{CM}
Ladle analysis	0.10	0.19	0.97	0.005	0.001	Cu, Ni, Cr, Mo, V, Nb, Ti, B	0.54	0.26

表7 機械試験結果 (50mm 鋼板)
Mechanical test results (50mm thickness plate)

Thickness position	Dir.	Tensile test (JIS4 round type)				Charpy impact test (1/4t, L-dir.)	
		YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	EI (%)	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)
1/4t	C	909	966	94	23	0	279
1/2t	C	892	962	93	21	0	242
Target		880-1060	950-1130	≤98	≥13	0	≥70

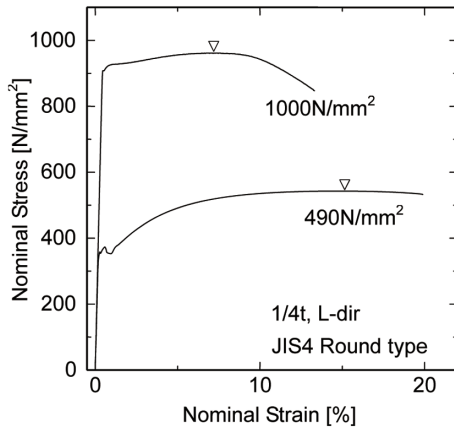


図5 応力歪曲線
Stress strain curve

表8 y型溶接割れ試験結果 (50mm 鋼板)
Result of y-groove cracking test (50mm thickness plate)

Welding condition	Atmosphere	Preheat temperature	Crack ratio
GMAW (95%Ar + CO ₂) YM-100AS, 17kJ/cm	35°C, humidity 48%	100°C	0%

験結果を示す。50mm厚鋼板の板厚内部まで均一な強度および安定したシャルピー特性が確保できている。図5⁷⁾に示す通り、一般的に使用される引張強さ490N/mm²級鋼に比べ極めて大きな弾性範囲と共に降伏後も十分な伸びを有する点が特徴である。表8に溶接性試験結果を示す。鋼材としては100°Cの予熱により低温割れの抑制が可能である。

4.3.2 実用化事例

BT-HT880の実用化事例として新日鐵住金の尼崎研究開発センターを紹介する^{7,8)}。世界で初めて建築構造物に降伏強さ880N/mm²級鋼が適用された建物であり、2008年に鋼材、溶接材料、溶接施工条件ならびに構造設計上の基本方針等について国土交通大臣の認定を取得し、2012年に完成した。

1階の柱にBT-HT880を使用して地震時の弾性限変位を大きくした上で、地震エネルギーを吸収する制振ブレースを集中的に配置した(図6, 7)。これにより建物に入力される地震エネルギーのほとんどを1階部分で効率よく吸収し、大地震においても柱・梁部材を弾性限耐力以下に抑

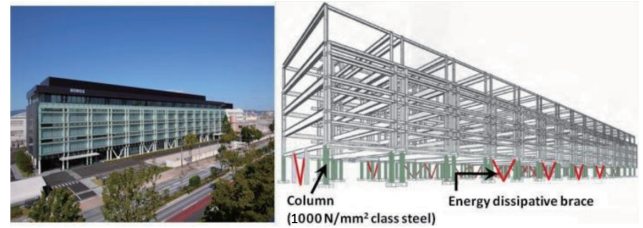


図6 尼崎研究開発センター外観およびBT-HT880適用箇所⁹⁾
Appearance of Amagasaki Research and Development Center, and application part of BT-HT880 steel plate



図7 制振ブレースとBT-HT880適用柱
Appearance of energy dissipative brace and column applied BT-HT880

える設計としている。梁スパン23mとした大空間を実現するため、柱には大きな荷重を負担することになる。柱材にBT-HT880を用い、さらに柱断面を2本1組の組柱として用いることで、1本当たりの柱断面を小さくすることを実現した。また、柱断面に採用した溶接組立H形鋼(BH)のフランジウェブの溶接には新たに開発した引張強さ1000N/mm²級のサブマージアーク溶接材料を使用した⁹⁾。高強度鋼の溶接においては、溶接部の強度、靱性の確保に加え、溶接金属の割れ防止対策が特に重要である。予熱温度、溶接入熱、パス間温度に加え、多層溶接時の後熱条件等を詳細に検討した結果、1パス溶接で溶接割れが発生せず必要な厚が得られる溶接条件を見出し、実施工では後熱が不要となった¹⁰⁾。

大林組の技術研究所オープンラボ2には、BT-HT880を適用した外ダイアフラム形式の溶接4面Box柱が採用された(図8)。溶接4面Box柱はオフィスビルなどの建物で

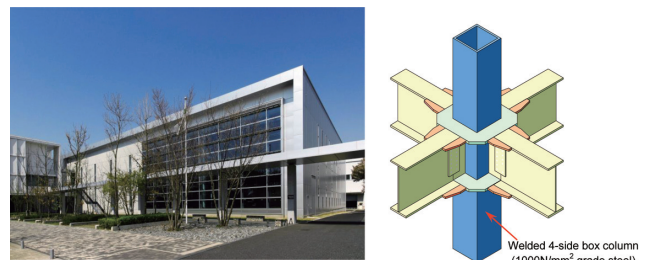


図8 大林組技術研究所オープンラボ2外観およびBT-HT880適用部材 (写真・図: 大林組提供)
Appearance of Obayashi Corporation's Technical Research Institute "Multipurpose Laboratory 2", and column applied BT-HT880 (photo and figure provided by Obayashi Corporation)

BH 柱と並び一般的に採用される柱断面形状である。本物件では 4 面 Box 柱の角部の多層溶接部に対して、前述の検討結果に基づいた後熟処理を行い、外観、内質、機械的性質ともに健全な溶接部を実現した¹⁾。

5. 結 言

建築構造物の損傷制御設計の要望に対し、溶接性および経済性を高めた BT-HT700, BT-HT880 を開発し、世界で初めて国内物件の円形鋼管柱、BH 柱および 4 面 Box 柱に供した。降伏強さ 700 N/mm² 以上の超高強度鋼は、その特徴である大きな弾性範囲を最大限活用できる構造設計と組み合わせることで、建築構造物の耐震性能を高め持続可能なものとするだけでなく、大スパン化による快適な空間の創出、さらには軽量化等環境に優しい構造物を実現する鉄鋼材料として、今後も適用拡大が期待される。

参考文献

- 1) 鈴木(孝), 鈴木(悠), 吉田, 窪田, 志村, 永田: 新日鉄技報. (387), 64 (2007)
- 2) 徳納, 岡村, 田中, 瀬戸, 小山, 山下, 家沢, 深沢: 新日鉄技報. (365), 37 (1997)
- 3) 渡部, 石橋, 吉井, 井上, 吉田: 新日鉄技報. (380), 45 (2004)
- 4) 児島, 清瀬, 植森, 皆川, 星野, 中島, 石田, 安井: 新日鉄技報. (380), 2 (2004)
- 5) 児島, 吉井, 秦, 佐伯, 市川, 吉田, 志村, 東: 新日鉄技報. (380), 33 (2004)
- 6) 鈴木, 丹羽, 測田, 時野谷, 山中, 遠藤: 大林組技術研究所報. (74), (2010)
- 7) 川畑, 福田, 佐々木, 一戸, 白沢, 秦泉寺, 吉澤, 多賀, 福正, 川井, 沼田, 橋田: 月刊鉄構技術. 24 (278), (2011)
- 8) 佐々木, 一戸, 西尾, 沼田, 橋田, 甲津, 多田, 桑原, 多賀: 日本建築学会大会学術講演梗概集. C-1, 構造 III. 2007-05, p. 889
- 9) 川畑, 一戸, 福田, 佐々木, 沼田, 橋田, 藤平, 甲津, 多田, 桑原, 多賀: 溶接学会論文集. 29 (2), (2011)
- 10) 中野, 沼田, 岡本, 米本, 橋田: 片山技報. (32), (2013)
- 11) 鈴木, 時野谷, 丹羽, 山中, 中塚, 岡田: 大林組技術研究所報. (77), (2013)



加茂孝浩 Takahiro KAMO
鹿島技術研究部 主幹研究員
茨城県鹿嶋市光3番地 〒314-0014



鈴木孝彦 Takahiko SUZUKI
建材事業部 建材開発技術部 建築建材技術室
主幹



安藤隆一 Ryuichi ANDO
厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室
主幹



渡部義之 Yoshiyuki WATANABE
君津製鉄所 品質管理部 厚板管理室 主幹



佐々木正道 Masamichi SASAKI
建材事業部 建材開発技術部 建築建材技術室
主幹