

建築構造用鋼板の動向

新日鐵住金株式会社 鹿島技術研究部
加 茂 孝 浩

1. はじめに

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、建築構造用鋼板に対しても高い破壊安全性が要求されてきた。一方で建築構造物の高層化や大スパン化も進んでおり、高強度鋼の適用が重要な選択肢であるものの、高強度化にともない一般的には溶接割れや脆性破壊の感受性が高まり、溶接時の入熱量や予熱・パス間・後熱温度等の厳格な施工管理が必要になる。このような状況下、種々の鋼板製造技術を駆使した高機能鋼板の開発および実用化が進んでいる。今回、建築構造用鋼板について、要求特性および製造技術の動向を整理した。また鋼板の具体的特性および実用化事例について、近年実用化が進んでいる降伏強さ 700 N/mm^2 (引張強さ 780 N/mm^2) 級以上の超高強度鋼を例に挙げ述べる。

2. 建築構造用鋼板の要求特性および製造技術

2.1. 建築構造用鋼板への要求特性

2.1.1. 高強度化

鉄骨構造の約 90% の建物ではボックス柱と H 型断面梁からなるラーメン構造が用いられる。ボックス柱と H 型梁とはダイアフラム等を用いて結合され、現場での接合も含めて溶接が多用される。大地震時には柱や梁の端部における塑性変形を許容し、地震入力エネルギーを消費させることで建物の崩壊を防ぐ (図 1(a)¹⁾)。このため、1994 年に JIS 規格化された建築構造用圧延鋼材 (SN 材) に規定される通り、低 YR (Yield Ratio: 降伏比, 降伏強さ/引張強さ) による材料の降伏から破断までの塑性変形能の確保が必要である。一方、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制振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⁾)。このために各部材に要求される必要特性も異なっている。すなわち、梁部材には柱損傷を防ぐために柱部材に先行して塑性変形させる目的で低降伏比の鋼板が要求される。これに対し柱部材では、ダンパーおよび梁部材の優先的塑性変形によりほぼ弾性範囲内での変形にとどまり、かつ、建物自重と地震荷重増大のために、設計強度の高い鋼板が要求される。このため、鋼板の低 YR は必須では無く、むしろ YR 上限を緩和し溶接性および経済性を追求した超高強度鋼が必要とされる。

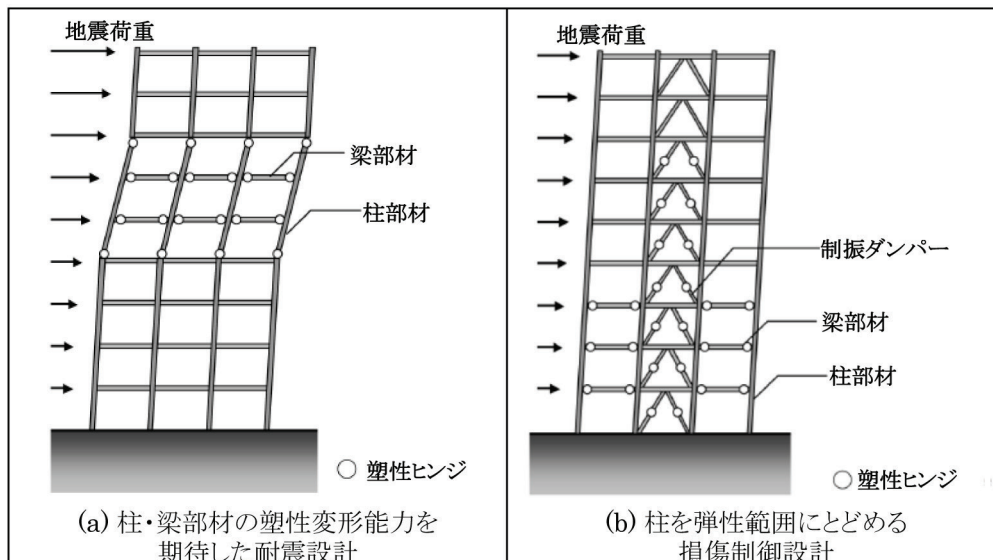


図1 耐震設計のコンセプト

2.1.2. 溶接作業効率向上

鋼材の高強度・厚肉化とともに鉄骨製作での高能率な溶接施工の要求が高まっている。一般的に高強度化とともに溶接割れや脆性破壊の感受性が高まり、溶接時の入熱量や予熱・パス間・後熱温度等の厳格な管理が必要となるため、溶接施工性に優れた高強度鋼が望まれる。また、溶接能率向上策として4面ボックス柱のダイヤフラム溶接や角溶接に対してエレクトロスラグ溶接(ESW)や多電極のサブマージアーク溶接(SAW)などの大入熱溶接が適用され、溶接入熱量が 50~100kJ/mm に及ぶ場合がある。従来の建築構造用鋼にこのような大入熱溶接を適用すると、溶接熱影響部(Heat Affected Zone : HAZ)のマイクロ組織が著しく粗大化し、じん性が大きく劣化するため、大入熱溶接を適用しても高いHAZ じん性を確保できる建築構造用鋼板が必要となる。

2.2. 建築構造用鋼板の製造技術

2.2.1. TMCP 技術

TMCP(Thermo Mechanical Control Process : 加工熱処理または熱加工制御)は、制御圧延、制御冷却を通じた高度なマイクロ組織制御により鋼板の強度、じん性、溶接性を向上させる製造プロセスであり、造船、建築、橋梁、海洋構造物、ラインパイプ、建設産業機械、タンク、ペンストックなどあらゆる用途に適用されている。図2にその概要および金属組織の変化を示す²⁾が、高強度鋼の作り込みにはオンライン冷却装置の優れた冷却均一性と広範な冷却速度制御が重要である³⁾。塑性変形能が必要な低YR鋼は軟質のフェライトと硬質のベイナイトを混合させた組織制御が必要であり、設計強度を重視した超高強度鋼ではベイナイト、マルテンサイト組織の制御が必要である^{4,5)}。

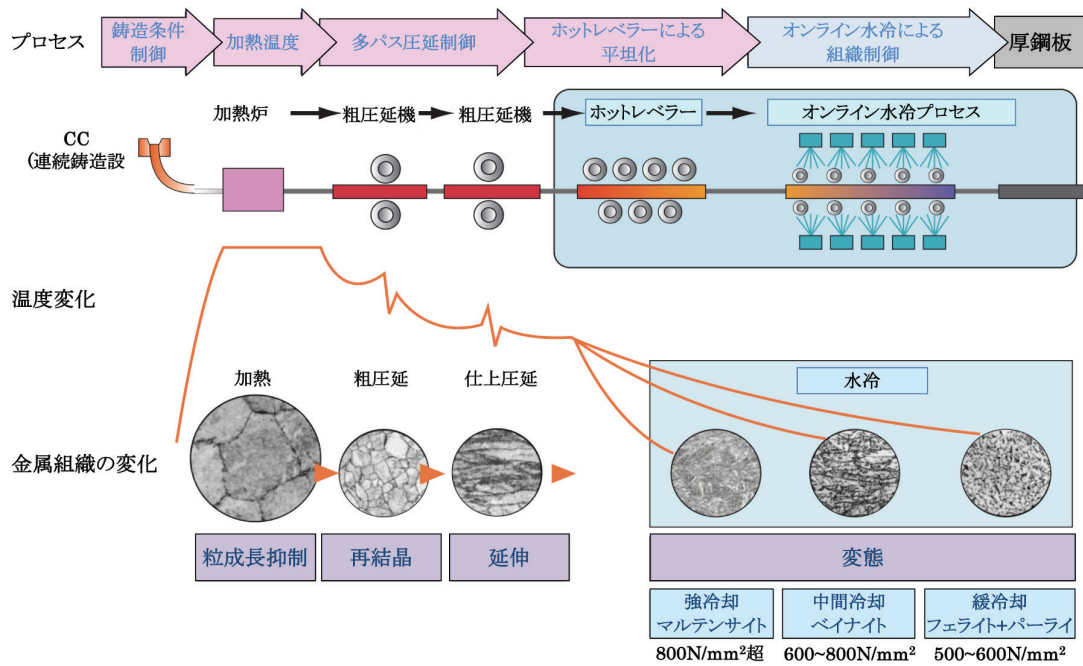


図2 厚板製造プロセス TMCP の概要と金属組織の変化

2.2.2. 高 HAZ じん性技術

HAZ じん性の向上には、溶融線近傍の 1400℃以上に加熱される粗粒領域における HAZ 組織の微細化が重要である。図3に当社の HAZ 組織微細化技術を示す²⁾。HAZ 組織微細化の要点は、熱的に安定な微細粒子を γ 粒成長を抑制するピン止め粒子として、あるいは γ 粒内におけるフェライト変態核として利用することである。1970年代にピン止めの観点から数 10nm の TiN を利用する TiN 鋼が開発された。1990年代には、Al 無添加 Ti 脱酸によって数 μm 以下の Ti 酸化物を鋼中に分散させ、粒内フェライト (Intragranular Ferrite、IGF) の変態核として利用する Ti-O 鋼が開発され、オキサイドメタラジの概念が提唱された。2000年代には、オキサイドメタラジの追求によって HAZ 細粒鋼が開発された。これは Mg や Ca を含有する数 10~数 100 nm の酸化物や硫化物を鋼中に分散させ、溶融線近傍の γ 粒成長を強力にピン止めする技術である。このような微細粒子利用による HAZ 高じん化技術を総称して HTUFF® (High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles : エイチタフ) と呼び、建築、造船、風力発電などに用いられる大入熱溶接用鋼および海洋構造物向けの継手 CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 保証用鋼として実用化されている^{6,7)}。

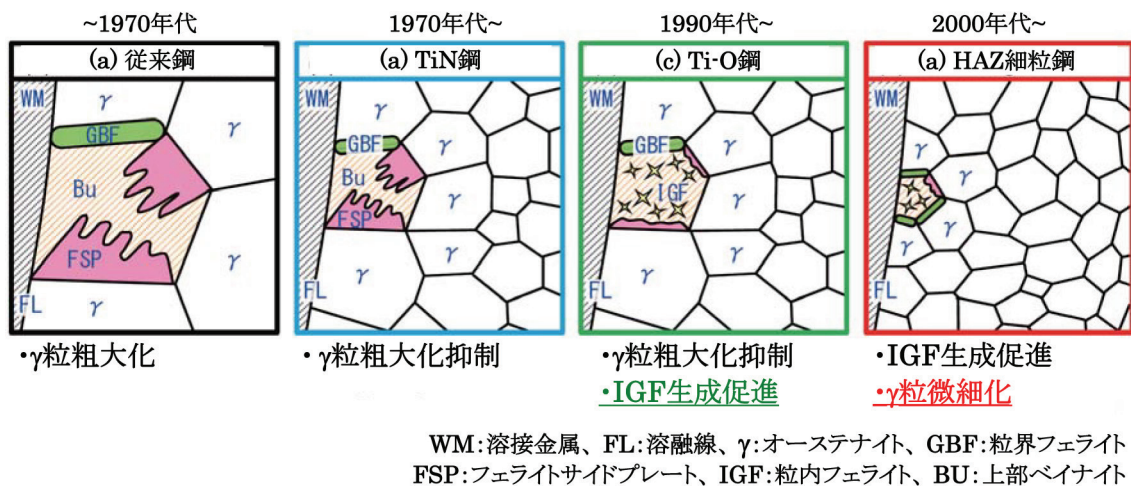


図3 当社における HAZ 高じん化技術 HTUFF の歩み

2.3. 建築用鋼板ラインナップ

図4に当社の建築構造用高張力鋼(ビルテン)のラインナップを示す。材料の降伏から破断までの塑性変形能に優れた低降伏比型鋼として BT-HT325,385,440,630 を商品化している。また制振ダンパー導入により柱および梁の損傷を制御する損傷制御設計に対応する鋼板として、地震エネルギー吸収部材用の低降伏強度鋼の BT-LYP100,225 を、YR を緩和する一方で高い弾性変形域を有する高降伏強度鋼 BT-HT400,500,700,880 をシリーズ化している。加えて、HAZ 細粒高じん化技術 (HTUFF®) により大入熱溶接の適用を可能とした BT-HT325-HF,385-HF,440-HF、および高温における耐力に優れた建築構造用耐火鋼板 NSFR シリーズもラインナップ化している。

次章では、鋼板の具体的特性と実用例について、近年実用化が進んでいる引張強さ 780 N/mm² 級以上の超高強度鋼を代表例として述べる。

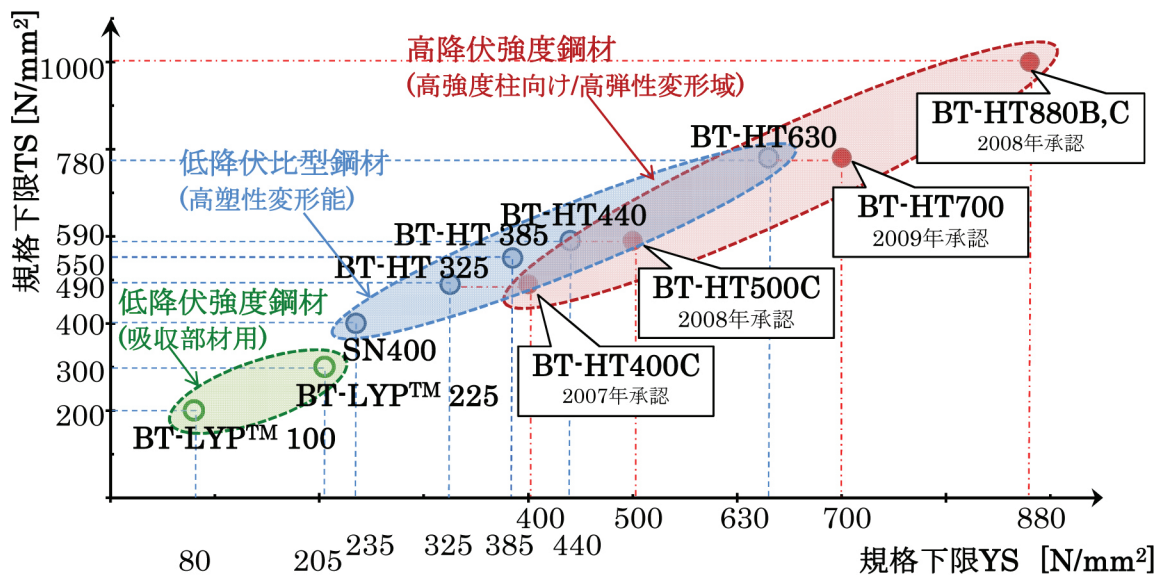


図4 当社の建築構造用鋼板

3. 超高強度鋼板の代表的特性および実用事例

3.1. 鋼板規格

表1に引張強さ 780N/mm² 超級である BT-HT700,BT-HT880 の鋼板規格を示す。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 では、円形鋼管柱用にシャルピー衝撃試験の試験温度を -20℃とした規格を設けている。

表1 BT-HT700 および BT-HT880 の鋼板規格

鋼材名	引張試験			シャルピー衝撃試験	
	YS [N/mm ²]	TS [N/mm ²]	YR [%]	試験温度 [°C]	吸収エネルギー [J]
BT-HT700	700-900	780-1000	≤98	0	≥47
				-20	≥47
BT-HT880	880-1060	950-1130	≤98	0	≥70

3.2. BT-HT700 の特性と実用化

表 2 に BT-HT700 の化学成分の一例を示す。溶接性の向上に主眼を置いた低 C かつ溶接割れ感受性指数(P_{CM})の低い成分系を採用した。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 の低減を行い破壊じん性の安定化を図った。表 3 に y 形溶接割れ試験結果の一例を示す。鋼板としては、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 に鋼板の引張およびシャルピー衝撃試験結果の一例を示す。高い強度と安定したシャルピー衝撃特性が確保できている。表 5 に、円形鋼管柱向け素材として用いる場合を想定した冷間曲げ加工前後の機械特性を評価した結果の一例を示す。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。

表 2 BT-HT700 の化学成分の一例 (mass%)

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

$$Ceq=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$$

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

表 3 BT-HT700 の y 形溶接割れ試験結果の一例 (60mm 鋼板)

溶接	溶接材料	雰囲気	予熱	割れ率
GMAW (CO ₂) 1.7kJ/mm	YM-80C (日鐵住金溶接工業)	20°C-60%	無し	0%

表 4 BT-HT700 の機械試験結果の一例 (25mm 鋼板)

	引張試験 (JIS5B; C方向)			シャルピー衝撃試験 (1/4t, L方向)	
	YS [N/mm ²]	TS [N/mm ²]	YR [%]	試験温度 [°C]	吸収エネルギー [J]
実績	801	852	94	-20	324
目標値	700-900	780-1000	≤98	-20	≥47

表 5 BT-HT700 の製管試験結果の一例
(25mm 鋼板、冷間曲げ、D/t=20 (D=曲げ直径, t=板厚))

供試材	引張試験 (全厚)				シャルピー衝撃試験 (1/4t, L方向)	
	方向	YS [N/mm ²]	TS [N/mm ²]	YR [%]	試験温度 [°C]	吸収エネルギー [J]
板	L	788	842	94	-20	302
管 (製管まま)	管軸方向 (板L方向)	801	879	91	-20	281

大林組の技術研究所本館テクノステーション（図5）には高強度コンクリート充填鋼管（CFT）柱向けに板厚 25mm の BT-HT700 が世界で初めて採用された。従来の鋼板（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/mm^2 級鋼に比べて P_{CM} が低いという特徴を活かし、鋼板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⁸⁾。高強度材料を使用することで鋼板・コンクリートの使用量を削減でき、環境負荷低減にも貢献している。

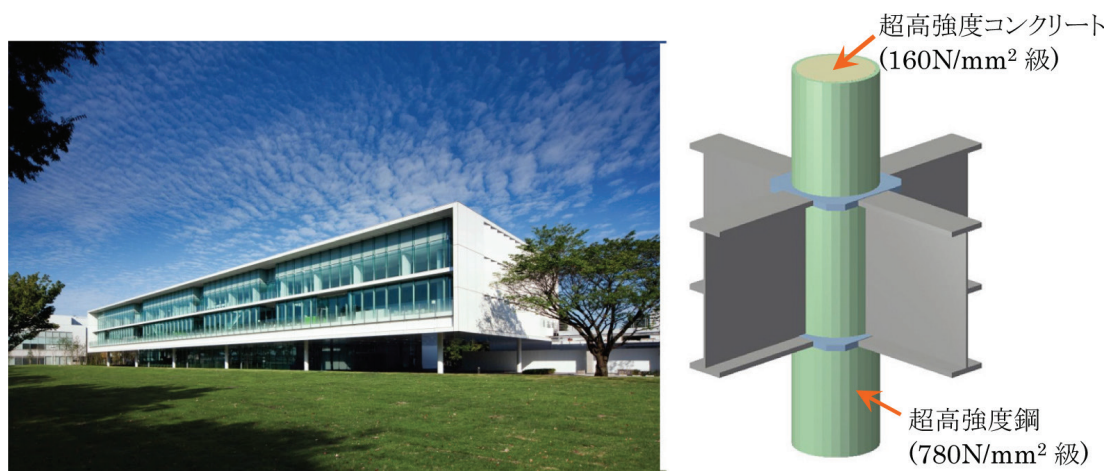


図5 大林組技術研究所本館テクノステーション外観および BT-HT700 適用部材
(写真・図：大林組提供)

3.3. BT-HT880 の特性と実用化

表6に BT-HT880 の化学成分の一例を示す。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。高い強度と優れたじん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に鋼板の機械試験結果の一例を示す。50 mm 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衝撃特性が確保できている。図6⁹⁾に示す通り、一般的に使用される引張強さ 490N/mm^2 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に溶接性試験結果の一例を示す。鋼板としては 100°C の予熱により低温割れの抑制が可能である。

表6 BT-HT880 の化学成分の一例 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	others	Ceq	P_{CM}
実績	0.10	0.19	0.97	0.005	0.001	Cu,Ni,Cr,Mo,V,Nb,Ti,B	0.54	0.26
目標値	≤ 0.16	≤ 0.85	≤ 1.50	≤ 0.015	≤ 0.008	-	≤ 0.62	≤ 0.34

表7 BT-HT880 の機械試験結果の一例 (50mm 鋼板)

板厚位置	引張試験 (JIS4; C方向)				シャルピー衝撃試験 (L方向)	
	YS [N/mm^2]	TS [N/mm^2]	YR [%]	El. [%]	試験温度 [$^\circ\text{C}$]	吸収エネルギー [J]
1/4t	909	966	94	23	0	279
1/2t	892	962	93	21	0	242
目標値	880-1060	950-1130	≤ 98	≥ 13	0	≥ 70

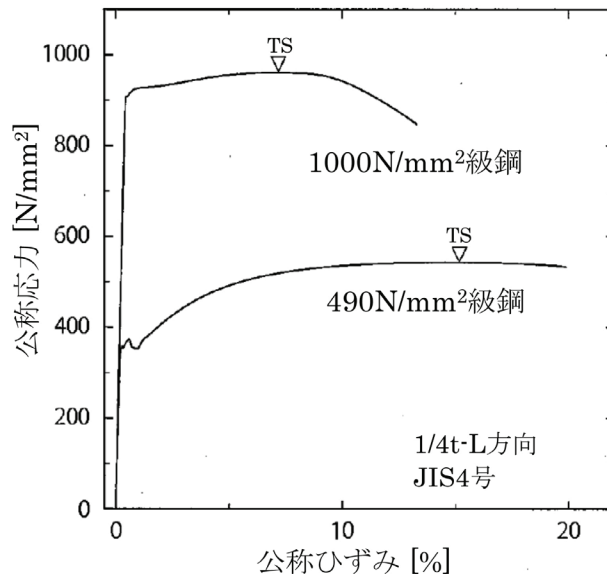


図6 応力ひずみ歪曲線

表8 BT-HT880 の y 形溶接割れ試験結果の一例 (50mm 鋼板)

溶接方法	溶接材料	雰囲気	予熱温度	割れ率
GMAW(95%Ar+CO ₂), 1.7kJ/mm	YM-100AS (日鉄住金溶接工業)	35°C・48%	100°C	0%

BT-HT880 の実用化事例として図7に新日鐵住金の尼崎研究開発センターを紹介する^{9,10}。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 年に鋼板、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⁹。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、更に柱断面を 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¹¹。高強度鋼の溶接においては、溶接部の強度、じん性の確保に加え、溶接金属の割れ防止対策が特に重要である。本物件においては、1 パス溶接で溶接割れ抑制と必要のど厚の確保を両立可能な溶接条件を見出すことで、実施工では後熱が不要となった¹²。

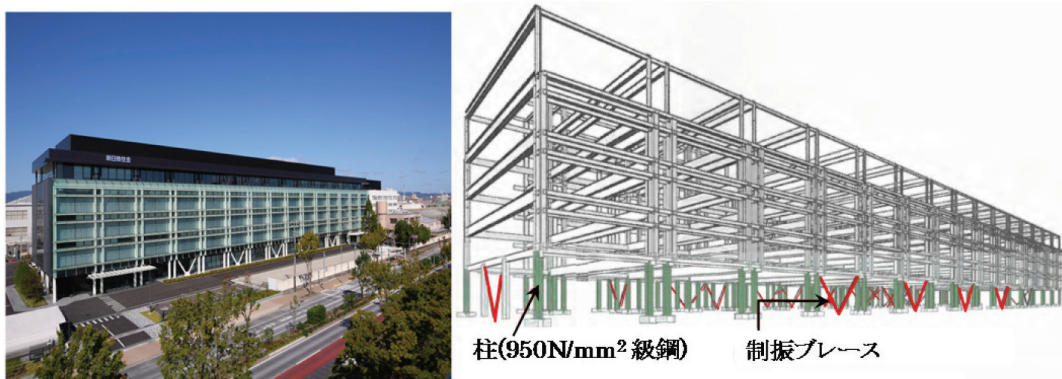


図7 尼崎研究開発センター外観および BT-HT880 適用箇所

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面ボックス柱が採用された(図8)。溶接4面ボックス柱はオフィスビルなどの建物で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面ボックス柱の角部の多層溶接部に対して、溶接金属の強度確保および溶接割れ防止が可能な入熱量、予熱・パス間温度、後熱条件を明確化し、外観・内質・機械的性質ともに健全な溶接部を実現した¹³⁾。

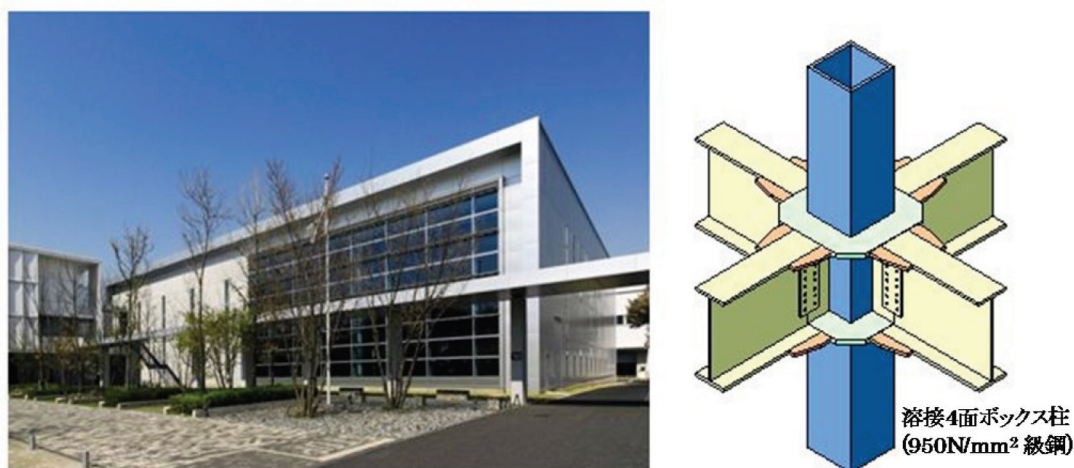


図8 大林組技術研究所オープンラボ2外観およびBT-HT880適用部材
(写真・図；大林組提供)

4. むすび

建築構造物の高層化、大スパン化が進む中、建築構造用鋼に対しては高い安全性を前提に高強度化および溶接施工能率の向上が求められる。これに対し、TMCP技術やHAZ細粒化技術を活用することで、破壊安全性および溶接性に優れた高強度鋼の開発が進んでいる。これまでにYRの上限を緩和して引張強さを 780N/mm^2 (BT-HT700)、 950N/mm^2 (BT-HT880)まで向上させた超高強度鋼板が開発され、ともに世界で初めて国内物件に適用されている。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(制振ダンパー導入等)と組み合わせることで、建築構造物の耐震性を高め持続可能なものとするだけでなく、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: 新構造システムの先駆けとなる降伏比緩和型高降伏点鋼板の開発, 新日鉄技報, (387), 64 (2007)
- 2) 児島, 藤岡, 星野, 重里, 金子, 田中: 高機能厚鋼板の技術進歩と今後の展望, 新日鉄住金技報, (400) 3(2014)
- 3) 芹澤, 中川, 角谷, 山本, 上野, 原口, 橘, 岩城, 小田: 新日鉄住金(株)の厚板TMCPを支える冷却制御技術, 新日鉄住金技報, (400) 18(2014)
- 4) 徳納, 岡村, 田中, 瀬戸, 小山, 山下, 家沢, 深沢: 建築用大入熱溶接型予熱低減 780N/mm^2 級高直力鋼, 新日鉄技報, (365), 37 (1997)

- 5) 渡部, 石橋, 吉井, 井上, 吉田 : 建築構造用高溶接性 590N/mm² 鋼の開発, 新日鉄技報, (380), 45 (2004)
- 6) 児島, 清瀬, 植森, 皆川, 星野, 中島, 石田, 安井 : 微細粒子による HAZ 細粒高靱化技術” HTUFF®” の開発, 新日鉄技報, (380), 2 (2004)
- 7) 児島, 吉井, 秦, 佐伯, 市川, 吉田, 志村, 東 : 大入熱溶接に対応した建築鉄骨用高 HAZ 靱性鋼の開発, 新日鉄技報, (380), 33 (2004)
- 8) 鈴井, 丹羽, 渕田, 時野谷, 山中, 遠藤 : 超高強度コンクリート充填鋼管「CFT」柱, 大林組技術研究所報, (74), (2010)
- 9) 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 : 住友金属工業(株)総合研究所 新研究棟-世界最高強度の 1000N 級建築用鋼材「SSS1000」を初採用-, 月刊鉄構技術, 24 (278), (2011)
- 10) 佐々木, 一戸, 西尾, 沼田, 橋田, 甲津, 多田, 桑原, 多賀 : 1000N 級鋼(950N/mm² 鋼)の建築構造物への適用性について : その 9 溶接組立 H 形鋼柱梁継手の構造特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 構造 III. 2007-05, p. 889
- 11) 川畑, 一戸, 福田, 佐々木, 沼田, 橋田, 藤平, 甲津, 多田, 桑原, 多賀 : 建築用 1000N 級(950N/mm² 級)GMAW, SAW 溶接材料の開発 : 1000N 級鋼の建築構造物への適用性, 溶接学会論文集, 29 (2), (2011)
- 12) 中野, 沼田, 岡本, 米本, 橋田 : 片山技報, (32), (2013)
- 13) 鈴井, 時野谷, 丹羽, 山中, 中塚, 岡田 : 1000N/mm² 級鋼を用いた溶接 4 面ボックス柱-梁接合の開発, 大林組技術研究所報, (77), (2013)

<略歴>

加茂 孝浩 (かも たかひろ)

1996 年 九州大学 工学部 材料工学科 卒業

1998 年 九州大学大学院 材料物性工学科 修了

1998 年 住友金属工業株式会社 入社 総合技術研究所 配属

2014 年 新日鐵住金株式会社 鹿島技術研究部 配属 主幹研究員

現在に至る