

連携記事

建築構造用超高強度鋼の最近の動向

Recent Progress on Ultra-high Strength Steel for Building Structure Applications

新日鐵住金(株)
建材事業部 建材開発技術部
部長 一戸康生
Yasuo Ichinohe

新日鐵住金(株)
建材事業部 建材開発技術部
建築建材技術室 室長 福田浩司
Koji Fukuda

1 緒言

建築物の高層化、大型化に伴い鋼部材も大型化・厚肉化している。使用鋼材量を抑制するとともに加工や溶接施工の負荷を低減する目的で、主要構造部材への高強度鋼材の適用が考えられるようになった。このようなニーズが大きくなり始めた1996年に、従来の建築用構造材料の枠組みを超える強度クラスの鋼材として開発・商品化されたのが建築構造用高性能590 N/mm²鋼・SA440である。現在では、その後に市場投入された550 N/mm²級鋼とともに超高層建築物向け柱材の定番となっている。一般に高強度になるほど鋼材の降伏比(YR)は高くなり、部材の塑性変形能力は劣化するが、SA440は建築構造用圧延鋼材・SN鋼(JIS G 3136)と同様、塑性設計の適用を前提に開発された高強度鋼であり、低YR(YR80%以下)及び狭降伏点レンジ(100 N/mm²)など、SN鋼のコンセプトと整合を取りながら規格が制定された。その後引き続いて、1990年代後半にSA440と同じ考え方に基づく低YR型(YR85%以下)の780 N/mm²級超高強度鋼が商品化されたが、結果的に主要構造部材への採用はごく限られた部位にとどまっている^{1,2)}。

一方で、兵庫県南部地震を契機に建築物の継続使用性がクローズアップされ、各種エネルギー吸収デバイスの発展も相まって、巨大地震に対しても主要構造部の損傷を局限する設計法が脚光を浴びだした。このような背景のもと2004年から始まった府省連携プロジェクト「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物の開発」では、「震度7クラスの地震動に対して主要構造部無損傷」をスローガンとして掲げ、その中で開発された鋼材がH-SA700(780N/mm²級超高強度鋼)である³⁾。また、ほぼ同時期に住友金属(現新日鐵住金)等の研究グループにより、BT-HT880(950N/mm²級超高強度鋼、旧規格名:SSS1000)及び専用の溶接材料が開発された⁴⁾。これらの鋼材は、超高強度鋼の弾性減の大きさを上手

く活用し、主として「耐震構造」または、エネルギー吸収デバイスと組み合わせた「免震・制振構造」として、弾性保持を目指す主架構に適用される。このように、原則として弾性設計での使用が前提となっているため、今までにない高YR型(YR98%以下)の鋼材規格となっている点が、従来の超高強度鋼と大きく異なる。

このように新しいタイプの超高強度鋼が開発され、その利用技術も整備されつつある中で、近年、南海トラフの巨大地震や首都圏直下地震に対する危機感を背景として、防災拠点や大規模建築物の事業継続性に対する意識が更に高まり、高水準の構造安全性を指向する観点から徐々に超高強度鋼の適用が増加しつつある。本稿では、780 N/mm²超えの引張強度を有する超高強度鋼の中から高YR型のH-SA700とBT-HT880を取り上げ、これらの鋼材の概要と適用事例を紹介するとともに、現在取り組み中の技術課題について概観する。

2 超高強度鋼の特性

表1に建築基準法第37条による国土交通大臣認定を取得している超高強度鋼の一覧を示す。いずれの鋼材もその適用範囲は、建築基準法第20条第一号及び建築基準法施行令140条第2項の規定に基づき、国土交通大臣の認定を受けた構造方法(時刻歴応答解析ルート)に用いる場合に適用され、かつ超高強度鋼を使用した部材に損傷が生じないことが確認されたもの(弾性範囲での使用)に限られている。ここでは、その中から780 N/mm²鋼材・H-SA700と950N/mm²鋼材・BT-HT880について概要を記す。

2.1 H-SA700

H-SA700は、府省連携プロジェクト「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物の開発」で開発された鋼材³⁾である。本プロジェクトは「震度7クラス・無損傷(弾性設計)の

表1 国土交通大臣認定を取得している超高強度鋼

形状	強度 クラス N/mm ² 級	メーカー	種類の記号	寸法 mm		炭素 当量 %	溶接割れ 感受性組成 %	基準 強度 N/mm ²	引張強さ 下限値 N/mm ²	降伏比 %	衝撃 試験 J	備考
厚板	780	㈱神戸製鋼所 JFE スチール㈱ 新日鐵住金㈱	H-SA700A	6 ≤ t ≤ 50		≤ 0.65	≤ 0.32	未指定	780	≤ 98	47 ≤	*1,*2
			H-SA700B			≤ 0.60	≤ 0.30	未指定	780	≤ 98	47 ≤	*1,*2,*3
		㈱神戸製鋼所	KBSA630B	6 ≤ t ≤ 80		—	≤ 0.30	630	780	≤ 85	47 ≤	*1,*2
			KBSA630C	16 ≤ t ≤ 80		—	≤ 0.30	630	780	≤ 85	47 ≤	*1
		JFE スチール㈱	JFE-HITEN780TB	22 ≤ t ≤ 100		≤ 0.60	≤ 0.30	630	780	≤ 85	47 ≤	*1
			JFE-HITEN780TC	22 ≤ t ≤ 100		≤ 0.60	≤ 0.30	630	780	≤ 85	47 ≤	*1
			HBL630B-L	12 ≤ t ≤ 40		≤ 0.60	≤ 0.30	未指定	780	≤ 85	47 ≤	*1
			HBL630C-L	12 ≤ t ≤ 40		≤ 0.60	≤ 0.30	未指定	780	≤ 85	47 ≤	*1
		新日鐵住金㈱	BT-HT630B	9 ≤ t ≤ 100		≤ 0.60	≤ 0.30	630	780	≤ 85	47 ≤	*1
			BT-HT630C	9 ≤ t ≤ 100		≤ 0.60	≤ 0.30	630	780	≤ 85	47 ≤	*1
	950	新日鐵住金㈱	BT-HT880B BT-HT880C	9 ≤ t ≤ 50		≤ 0.62	≤ 0.34	810	950	≤ 98	70 ≤	*1,*2
	鋼管	780	新日鐵住金㈱	SA-TT630	φ 400～2200	19 ≤ t ≤ 60 60 < t ≤ 80	≤ 0.60 ≤ 0.63	≤ 0.23 ≤ 0.28	未指定	780	≤ 95	47 ≤
JFE スチール㈱			P-630T	φ 800～1200	40 ≤ t ≤ 60	≤ 0.60	≤ 0.30	630				
㈱神戸製鋼所			KSAT630	φ 400～2500	12 ≤ t ≤ 80	—	≤ 0.30	未指定	780	≤ 90	47 ≤	*1

*1: 時刻歴応答解析ルートなど国土交通大臣の認定を受けた構造方法に、弾性範囲で用いる場合に限る。

*2: 衝撃試験は板厚 12mm 超えに適用する。衝撃試験の温度は 0℃とする。なお、*3 については -20℃とする。

*4: 東京スカイツリー[®]に採用された鋼管とは、規格内容が異なる。*5: 東京スカイツリー[®]に採用された鋼管の規格。

表2 主要な研究開発の目標

項目	開発目標
鋼材強度	従来鋼材の2倍
耐震性能	震度7クラス・主要構造部 無損傷(弾性設計)
耐用年数	200 年
スパン	従来鋼構造の 1.5 倍 ~ 2.0 倍
主要部材・ 部品システム	スケルトン・インフィル分離、 リユース可能
用途(変更)適用性	大規模、自由な コンバージョン容易
建設工期	現行施工法と同等以下
建設費	現行設計法による 従来鋼構造の 1.1 倍以下

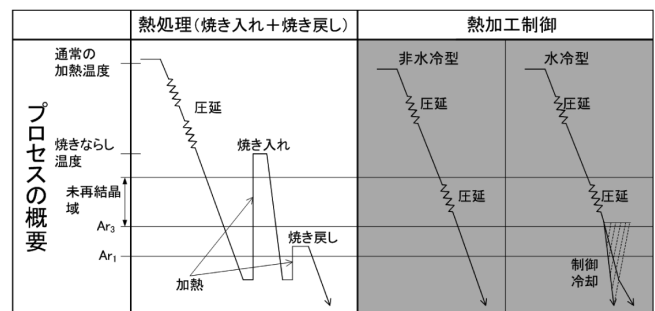


図1 鋼材の製造プロセスのイメージ

建築]、「省資源（鋼材3R）生産による建築」ならびに「長期耐用の長寿命建築」の実現化を目標とし、2004年度～2008年度の5年間で実施された。表2に主要な研究開発の目標を示す。本プロジェクトでは鋼材や接合技術の開発の他に、構造設計指針、施工指針、建築計画指針及び具体的なプロジェクトの事例検討など、様々な利用技術整備もあわせて実施されている。

これまでの超高強度鋼は低YR型を指向したため、2段階熱処理あるいは3段階熱処理による製造方法をとっていた。H-SA700の開発にあたっては、震度7クラスの大地震時においても建築物が弾性範囲に留まることを条件としてYRの要求が緩和されたため、図1に示すような簡略化された熱処理工程（熱加工制御）を適用し、合金添加量を低減することにより経済合理性を追求しながら、あわせて溶接性を向上することが可能となった。なお、H-SA700は2009年7月に高炉メーカーの共通規格として国土交通大臣認定を取得している⁵⁾。

鋼種としては、A種（乾式接合用）、B種（溶接接合用）の2種類の規格が設定されている。このうちA種は、超高強度鋼

の溶接施工のハードルの高さと部材のリユース性を考慮し、部材断面の組立てや部材の接合に高力ボルトを適用する工法を前提として設定された鋼材である。一方、大断面材や閉鎖形断面ではボルト接合だけでは対応に限界があるため、溶接接合用のB種もあわせて開発されている。いずれも板厚の適用範囲上限は50mmである。溶接施工は、被覆アーク溶接、ガスシールドアーク溶接（大臣認定品）及びサブマージアーク溶接が適用可能であり、その詳細については日本鉄鋼連盟の「建築構造用高強度780 N/mm²鋼材（H-SA700）・鋼材規格および溶接施工要領」に記載されている⁵⁾。

2.2 BT-HT880

BT-HT880は、住友金属（現新日鐵住金）、日建設計、片山ストラテック、大阪大学及び京都工芸繊維大学が2003年から2010年にわたって実施した共同開発プロジェクトにて開発された鋼材である⁴⁾。このプロジェクトでは、前述の府省連携プロジェクト「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物の開発」と同じく、巨大地震に対して主架構を無損傷

に留める構造を指向し、そのための鋼材、溶接材料及び利用技術が開発された。従って、H-SA700と同様に弾性状態での使用が前提であるため、鋼材のYRを大幅に緩和することが可能となった。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について、国土交通大臣認定を取得している。

本鋼材の製法には、効率的に強度と靱性のバランスを発揮させるため微細な焼戻しマルテンサイトを得ることを狙い、温度を最適化した焼入れ焼戻し法を用いた。化学成分の設定においては、既に水圧鉄管分野で多数の実績を有する 1000N/mm^2 鋼を参考にした。特に、溶接時の低温割れを防止する目的で P_{CM} 値を低く設定しているのが特徴である。基本的に溶接による接合を前提とした鋼材であり、最大板厚は50mmまで製造可能である。溶接材料は、ガスシールドアーク溶接及びサブマージアーク溶接向けに専用材料を開発した。この溶接材料は、耐水素割れ性がクリティカルになる超高強度鋼の領域にあり、この耐割れ性確保及び母材と同レベルの強度確保を、建築鉄骨分野において実行可能な管理レベルで達成することが、溶接材料の開発における大きなブレークスルーポイントであった。種々の溶接施工試験や構造実験を行い、その結果を基に、予後熱やバス間温度管理などの施工条件が定められている。

3 超高強度鋼の適用事例

ここでは、最近の超高強度鋼の実構造物への適用事例の中から、H-SA700やBT-HT880に代表される高YR型の超高強度鋼の適用例を示す。この他、超高層建物への適用も進みつつある。例えば、文献6では 780N/mm^2 級の溶接4面ボックス柱に $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートを組み合わせた超高強度CFT柱を超高層建物（大手町タワー）の下層階の柱として適用している。

3.1 事例1：東京スカイツリー®

本案件は、高YR型の鋼材が主要構造部材として積極的かつ大々的に活用された初めての案件である（図2）。塔体は、中央に直径8mの鉄筋コンクリート造円筒形の心柱（内塔）を配置し、これを取り囲む鉄骨造のコア（中塔と中内塔）、その外側に配置された円形鋼管によるトラス構造（外塔とリングトラス）で構成されている。さらに、塔体の頂部にはアンテナが配置されるゲイン塔が接続されている。ゲイン塔には高YR型の 780N/mm^2 級超高強度鋼管が採用され、塔体のトラス構造にも同じく高YR型の 490N/mm^2 級及び 590N/mm^2 級鋼管が使用されている。本案件は、H-SA700規格の制定以前に計画されたもので、ゲイン塔に採用された 780N/mm^2 級

超高強度鋼管はH-SA700の規格とは若干異なるが、YR規定が大幅に緩和されている点は共通である（YR95%以下）。また、これらの鋼管には、製管工程で母材の降伏強度が上昇しYRの抑制が難しい径厚比（鋼管径/板厚）の小さな極厚鋼管が含まれている。鋼管の製造コスト低減の観点からも高YR型規格の採用が大きな役割を果たしている。

構造的には、心柱と外周架構は切り離され地震時に別々の挙動を示すため、全体システムの揺れを早期に減衰する制振構造となっている。その結果、レベル2地震に対し、部材が弾性域に留まる設計となっているので、一般的な建築構造用鋼材に規定されるYRを緩和することが可能となった。一方で、屋外及び高所での使用環境から靱性と現場溶接を考慮した高溶接性が要求された^{7,8)}。

3.2 事例2：大林組・技術研究所本館テクノステーション

H-SA700が初適用された案件である（図3）。建物は鉄骨造3階、延べ面積 5535m^2 の免震構造となっており、柱材に適用されている。鋼管にはH-SA700B（ $\phi 500 \times 25\text{mm}$ ）を、充填コンクリートには $\text{Fc}160\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートを用いた超高強度CFT柱としている⁹⁾。超高強度CFT柱を用いた理由として以下をあげている¹⁰⁾。① 高い意匠性：細い柱で大

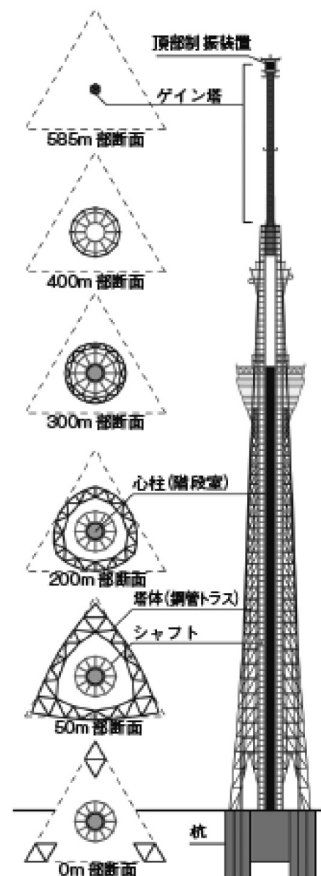


図2 東京スカイツリー®（画像提供 大林組）

スパンや吹抜けのある開放的な空間を実現。②高い耐震性：阪神大震災クラスの大地震に対しても、少ない柱本数で高い安全性を実現。③高い耐火性：鋼管の表面に耐火塗料を塗布することにより、耐火被覆厚さや仕上げ寸法を大幅に低減した細い柱で、火災時の安全性を確保。

3.3 事例3：新日鐵住金・尼崎研究開発センター1号館

BT-HT880が初適用された案件である(図4)。建物規模は地上5階、塔屋1階、高さ29.54mの鉄骨造で延床面積20377m²である。本建物の1階柱にBT-HT880が適用されている。本建物の構造上の特徴は、第1に研究室を将来の研究内容や組織の変化に柔軟に対応可能とした133m×23mの大きな無柱空間を確保している点、第2の特徴は1階に本鋼材と制振ブレースを併用した1階集中制振構造としている点である。1階集中制振構造は1階の柱に本鋼材で構成された溶接組立H形鋼を用い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1階に集中配置し建物に入力される地震エネルギーの大半を吸収し大地震時の柱梁部材の挙動を弾性範囲に留めている⁴⁾。

3.4 事例4：大林組・技術研究所オープンラボ2

BT-HT880を溶接4面ボックス柱に適用した案件である

(図5)。建物は地上2階、高さ約15m、東西方向64.8m、南北方向49.5mの鉄骨造建物である。架構形式は、制振ブレース付きラーメン構造であり、1階の柱のうち、計26本にBT-HT880を採用している。BT-HT880鋼を柱として1階に配置することにより、架構の剛性を低くしダンパーの制振効果を高めている。また、弾性範囲の大きいBT-HT880と制振ダンパーを組み合わせることにより、レベル2地震時においても構造体が無損傷となる設計となっている¹¹⁾。

4 普及のための技術課題

4.1 溶接施工の合理化

適用事例で紹介した案件における超高強度鋼の溶接条件を表3に示す。鋼材の強度クラスや板厚により溶接条件は異なるが、いずれも予熱は必須であり、入熱は20～40kJ/cm以下、パス間温度は150～200℃以下と、490N/mm²級鋼材に比べ厳しい条件となっている。これは、鋼材側のキャパシティというよりは、むしろ溶接材料のデリケートな特性に起因し、溶接金属の割れ防止のための予熱・後熱処理や、強度確保のための入熱・パス間温度管理などの厳しい溶接施工条件が施工効率の低下を招き、超高強度鋼の普及の桎梏となっている。

上記の問題を解決する技術として軟質継手(アンダーマッ

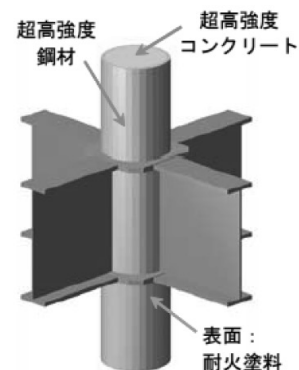


図3 大林組・技術研究所テクノステーション (画像提供 大林組)

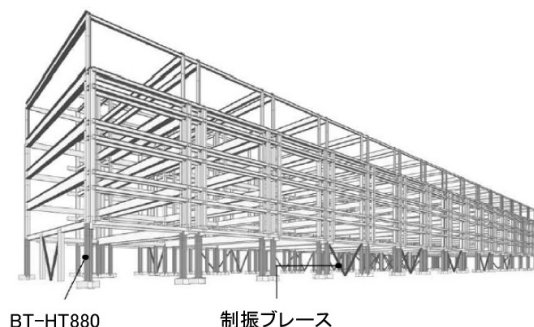


図4 新日鐵住金・尼崎研究開発センター1号館

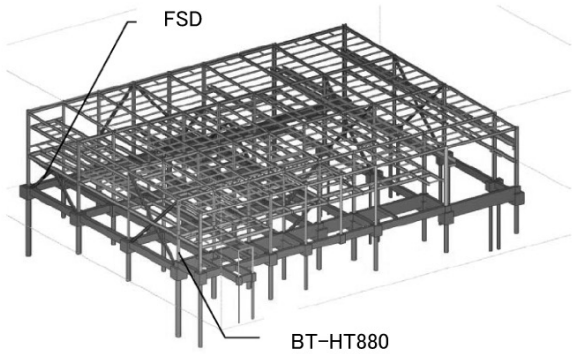
チング溶接) が注目されている。ここでは、部材断面を構成する溶接部 (シーム溶接) への軟質継手の適用について述べる。この場合、せん断力が卓越する柱梁接合部パネル部の柱溶接部が最も厳しい応力状態となる。池田等は780N/mm²級の溶接4面ボックス柱の角溶接に590N/mm²級溶接材料を適用した場合と780N/mm²級溶接材料を適用した場合で柱梁接合部パネルの耐力を比較し、完全溶け込み溶接であれば両者に顕著な差はないことを確認している¹²⁾。

近年、H-SA700に関しても同様の研究がおこなわれてい

る。田中等は、H-SA700の溶接組立H形断面、溶接組立箱形断面等のシーム溶接について、490N/mm²級溶接材料 (YGW11、－U試験体) を用いた場合と780N/mm²級溶接材料 (G78A、－O試験体) を用いた場合を比較しながら、接合部パネルの力学特性について検討している¹³⁾。結果の一部を紹介する。試験体と載荷装置を図6に、実験の結果得られたパネルせん断耐力とせん断変形角の関係 (骨格曲線) を図7に示す。図7より、溶接組立H形断面の場合は両者の差はほとんど無く、溶接組立箱形断面では、軟質継手を用いた



図5 大林組・技術研究所オープンラボ2 (画像提供 大林組)



※FSD: 高力ボルト摩擦接合滑りダンパー

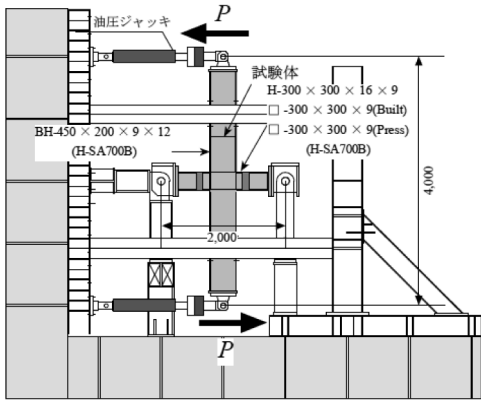


図6 試験体と載荷装置

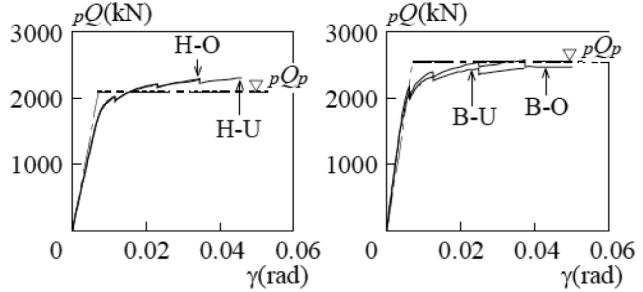


図7 実験結果 (パネルせん断耐力とせん断変形角の関係)

表3 超高強度鋼の溶接条件比較

	事例1	事例2	事例3	事例4	文献6	参考
強度クラス	780N/mm ²	780N/mm ²	950N/mm ²	950N/mm ²	780N/mm ²	490N/mm ²
最大板厚	80mm	25mm	45mm	25mm	50mm	40mm
溶接部位	現場溶接 柱継手	現場溶接 柱継手	工場溶接 BH フランジ・ウェブ溶接	工場溶接 溶接 4 面ボックス溶接	現場溶接 柱継手	
溶接方法※	GMAW	GMAW	SAW	SAW	GMAW	GMAW
溶接条件	予熱	75℃以上	50℃以上	150℃以上	10℃以上	—
	後熱	—	—	—	200～250℃ 1hr	—
	入熱	20kJ/cm 以下	30 kJ/cm 以下	40kJ/cm 以下	35kJ/cm 以下	30 kJ/cm 以下
	ハス間温度	75～150℃	150℃以下	—	125～200℃	150℃以下

※事例3は1ハス溶接。それ以外は多層盛り溶接

試験体（－U試験体）の耐力がわずかに低下するが、その差は全塑性耐力で4%程度であることが分かる。また、吹田等は母材にH-SA700Bを、溶接材料に490N/mm²級溶接材料（YGW11）を用いて組立てられた溶接組立H形鋼部材についての4点曲げ試験を行いその力学特性を調査している¹⁴⁾。多賀等は、軟質継手ではないが、フランジに超高強度鋼、ウェブに普通鋼を用いた溶接組立H形鋼柱の耐力及び変形能力を調査している¹⁵⁾。

上記の例はいずれも鉄骨造部材に関する研究であるが、普及のためにはCFT柱への展開が必須である。また、超高層建物への適用を考えると、溶接組立箱形断面の角溶接やダイアフラム溶接等の大入熱溶接に対応する超高強度の高HAZ靱性鋼も必要となるであろう。軟質継手の開発は未だ途上であるが、今後、関連する技術が整備されて超高強度鋼の溶接施工合理化に貢献することが期待される。

4.2 構造計画

超高強度鋼を活用した様々な構造計画の検討が行われている。府省連携プロジェクト「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物の開発」の研究成果を纏めた文献3では、重要庁舎、超長期耐用住宅、超高層建築などH-SA700を用いた設計例が提示されている。これらは、基本的に柱及び梁の全てにH-SA700を使用した構造計画が中心となっている。

日本鉄鋼連盟では「高強度鋼利用技術研究会」（主査：吹田啓一郎、京都大学教授）を2009年度に組織し、架構、部材、接合についての情報や意見を交換し、その成果を報告書〔日本鉄鋼連盟、2010〕にまとめている。その中の試設計例として、超高強度鋼の柱による心棒構造や超高層建物の特定層の柱にH-SA700を使用し制振ダンパーを集中配置した計画等、主として従来鋼と組み合わせた架構形式の提案がなされている。

更に最近では、日本鋼構造協会関西地区の研究小委員会において、「高強度鋼の建築構造への適用」（主査：多田元英、大阪大学教授）をテーマとする建築SWGを2011年度に組織し、H-SA700の特徴を生かした構造計画事例を提案し、その成果をJSSCテクニカルレポートにまとめている¹⁶⁾。メガトラス構造への適用や超高強度鋼柱と従来鋼梁とを組み合わせた高耐震構造の考え方等、H-SA700の新しい適用法の可能性を示している。今後、構工法や溶接施工技術の開発とあわせて、超高強度鋼の特性を上手く活かした構造計画をさらに探求し、建築物の多様性に対応して行く必要がある。

構造計画技術等の利用技術を強化して、建築物の高層化・大型化ニーズ及びコスト低減ニーズに答えながら、超高強度鋼の更なる普及を図って参りたい。

参考文献

- 1) 中平, 大堀, 梅国: 鉄構技術, (2004) 191, 56.
- 2) 日経アーキテクチャ: (1997) 580, 142.
- 3) (社) 新都市ハウジング協会, (社) 日本鉄鋼連盟, (社) 日本鋼構造協会: 新構造システム建築物設計・施工指針(案), (2009.3)
- 4) 川畑友弥, 福田浩司, 佐々木正道, 一戸康生, 白沢吉衛, 奏泉寺稔子, 吉澤幹夫, 多賀謙蔵, 福正聡, 川上康德, 沼田俊之, 橋田知幸: 住友金属工業(株) 総合技術研究所 新研究棟, 月刊鉄構技術, (2011.7)
- 5) (一社) 日本鉄鋼連盟: 建築構造用高強度780N/mm²鋼材(H-SA700) 鋼材規格および溶接施工要領, (2012)
- 6) 松本修一, 後藤和正, 黒岩秀介, 高瀬洋一: コンクリート工学, (2012), 1102.
- 7) 廣田実, 鈴木孝彦, 杉本真隆: JSSC, 15 (2013), 38.
- 8) 村田義明, 豊田剛正: 溶接学会誌, 32 (2013) 4, 30.
- 9) 大西宏治, 山中昌之, 金子悦三: スチールデザイン, 18 (2011), 4.
- 10) 鈴井康正, 丹羽博則, 瀧田安浩, 時野谷浩良, 山中昌之, 遠藤文明: 大林組技術研究所報, 74 (2010), 1.
- 11) 中塚光一, 山中昌之, 岡田郁夫, 今井有希子: 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), (2013), 679.
- 12) 池田利次, 和田肇, 山田隆夫: 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), (1992), 1513.
- 13) 藤澤一善, 田中剛: 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), (2012), 1253.
- 14) 吹田啓一郎, 山本源人, 新才直紀: 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), (2012), 1189.
- 15) 大和田尚吾, 遠藤千尋, 多賀謙蔵: 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), (2013), 1205.
- 16) (一社) 日本鋼構造協会: 関西地区連合会研究小委員会・高強度鋼の建築構造への適用 JSSC テクニカルレポート, (2013) 97.

(2014年12月22日受付)

5 結言

超高強度鋼の普及はまだ緒に就いたばかりである。今後、溶接施工性の向上や様々な設計バリエーションに対応可能な