

解説

建築用鋼材-1

建築鉄骨における高強度鋼の利用

Application of High Strength Steels to Architectural Steel Structures

JFE スチール (株) スチール研究所
主任研究員 (課長)

大森章夫

Akio Ohmori

新日本製鐵 (株) 建材開発技術部
マネジャー

志村保美

Yasumi Shimura

1 はじめに

我が国の建築分野における鉄骨構造は、建築構造設計者による創意工夫と鉄鋼メーカーによる技術開発により、目覚ましい発展を遂げ、超高層建築物や大スパン構造物を実現させてきている。以下では、我が国において、建築分野独特の使用基準、建築用鋼材に求められる性能、様々な鋼種の使用部位や使用方法、および今後のニーズを紹介すると共に、様々な鋼材の特性の発現機構、設計思想および製造工程でのポイントを紹介する。

2 建築鉄骨の概要

2.1 建築骨組に求められる性能

我が国における建築構造物は、建築基準法に準拠して建設される。建築基準法は、第一条に「この法律は、建築物の敷地、構造、設備および用途に関する最低の基準を定めて、国民の生命、健康および財産の保護を図り、もって公共の福祉の増進に資することを目的とする。」と記されており、構造の視点で考えるならば、建築物の「構造に関する最低の基準を定めて国民の生命を守る」ことを義務付けている。我が国の構造物にとっては、地震が特に大きな脅威であり、地震に対して（人命を損なう事の無い）安全な構造物とすることを求めている。具体的な設計法の中では、中小地震では構造骨組が全く損傷しない性能を確保し（一次設計）、極稀に生じる大規模地震に対しては構造骨組の部分的な損傷は許容するものの倒壊しない性能を確保すること（二次設計）が要求されている。このように建築構造物の経済性も踏まえて、最低限の性能として建物の倒壊を回避することを定めたもので、地震後の建物の再利用の可否には関しては言及していない。

一方、建築構造物は個人あるいは事業主の財産であり、建設に当たっては経済性の観念も不可欠であり、個々の構造物

が保有する耐震安全性は、経済性との兼ね合いで定められることになる。つまり、現行の建築基準法で定める最低基準の性能に対して、それ以上の性能を持たせることは持ち主の意思に委ねられている。なお、近年はBCP（事業継続計画）あるいは地震PML（地震による予想最大損失額）等の評価指標が議論¹⁾されており、高い耐震性能の建築物が設計される機会も増えてきているようである。

このように建築骨組には耐震性能が求められ（地震力の他に台風や積雪等の外力も存在するが、ここでは最も影響度の大きい地震を中心に解説する）、骨組（システム）あるいは骨組を構成する各々の部材には、大規模地震時に地震エネルギーを吸収することが要求されている。つまり、建築物の鉄骨部材（柱部材や梁部材）は、大規模地震時には弾性限を超えて塑性化することにより地震エネルギーを吸収することが求められることになる（塑性設計）。建築物によっては、地震エネルギーを吸収する専用のデバイスを用いる場合や、免振構造とする場合、これらを組み合わせる場合等が設計者により工夫されている。

2.2 建築骨組とその構成部材

我が国における建築鉄骨の構造骨組は、図1に示すように、柱部材と梁部材を剛に接合して組み立てる「ラーメン構造」が一般的である。その中で使用される鋼材の種類は、低層建築物の場合、柱には冷間成形角形鋼管（BCR295、BCP235、BCP325）、梁には圧延H形鋼（SN400、SN490）が使用される（一般にコラムH構造と言われている）。これらの鋼材は400N/mm²、490N/mm²級鋼材であり、建築基準法告示により使用できるJIS鋼材の種類が規定されている（表1参照）。一方、超高層建築物の場合は、柱には4枚の厚板を溶接組立する4面BOX（SN490、SA440 etc）、梁には大型のH形鋼として外法一定H形鋼（SN490）や溶接組立H形鋼が使用される。これらの規模の柱材では、490N/mm²級を超えて、590、

780N/mm²級の鋼材が使用される場合がある。また、梁部材では490N/mm²級を超えて、550、590N/mm²級の鋼材が使用される場合がある。これらは何れも国土交通大臣による大臣認定を取得した鋼材である（表2参照）。また、超高層建築物では、構造物の耐震性能の向上を狙い、地震エネルギーを吸収するための低降伏点鋼を用いた制振デバイスが取り付けられる場合もある。

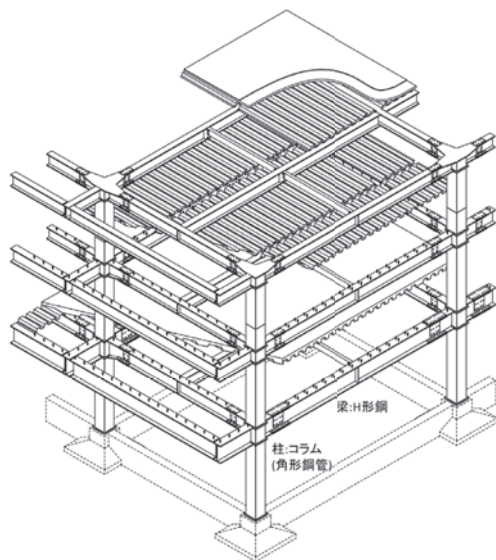


図1 鉄骨骨組の概要

2.3 部材に求められる性能

鉄骨構造の場合、前述の設計思想に基づいて、鋼材の塑性域まで利用して安定したエネルギー吸収を確保するための鋼材としてSN鋼が規格されている（1994年）²⁾。SN鋼は、400N/mm²級、490N/mm²級の一般圧延鋼材を対象として、構造部材の塑性変形性能を確保するために、鋼材の特性値として降伏点の上下限值と降伏比（YR：Yield Ratio、降伏点の引張強さに対する比）を新たに規定し、降伏点のばらつきは120N/mm²以内、YRは80%以下として設定された鋼材である。SN鋼に対して、柱部材に適用される冷間成形角形鋼管や円形鋼管等のように冷間加工による材質変化を伴う材料については、種々の部材性能実験を踏まえて、加工後の特性を考慮して、冷間成形角形鋼管ではBCP、BCR規格、円形鋼管ではSTKN規格が整備されており、これらの規格の中では、BCRにおいてYRは90%以下、STKNにおいてはYR85%以下と緩和した規定となっている。このように、建築構造分野で使用される鋼材には、強度特性（降伏点の上下限值、引張強さの下限値、伸びの下限値）に加えて、「YR（一般には80%以下）」が求められるという特徴がある。

一方、建物の大型化に伴い板厚の大きな鋼材が要求される事になるが、SN（SM）鋼では40mmを超える板厚の降伏点または耐力の値はそれ以下の場合に対して低く規定されており（SN400規格では、板厚40mm以下の場合の降伏点は235N/mm²、板厚が40mmを超える場合の降伏点は

表1 指定建築材料の主な建築構造用鋼材（JIS）

規格番号	規格名	引張強さ*1	設計強度*1
JIS G 3101	一般構造用圧延鋼材(SS)	400	235
JIS G 3106	溶接構造用圧延鋼材(SM)	400, 490, 520	235, 325, 355
JIS G 3136	建築構造用圧延鋼材(SN)	400, 490	235, 325
JIS G 3444	一般構造用炭素鋼鋼管(STK)	400, 490	235, 325
JIS G 3475	建築構造用炭素鋼鋼管(STKN)	400, 490	235, 325
JIS G 3446	一般構造用角形鋼管(STKR)	400, 490	235, 325

注記 *1) 引張強さ、設計強度の単位はN/mm²。

表2 大臣認定を取得している主な建築構造用鋼材

記号	名称*1	引張強さ*2	設計強度*2
BCR	冷間ロール成形角形鋼管	400	295
BCP	冷間プレス成形角形鋼管	400, 490	235, 325
(TMCP鋼)	TMCP鋼板、極厚H形鋼 etc	490, 520	325, 355
TMCP385	建築構造用550N/mm ² 級鋼材	550	385
SA440	建築構造用高性能590N/mm ² 鋼材	590	440
(780鋼)	建築構造用780N/mm ² 鋼材	780	630
H-SA700	建築構造用780N/mm ² 鋼材(弾性用)	780	700

注記 *1) 名称は通称で正式名称では無いものも含む。

*2) 引張強さ、設計強度の単位はN/mm²。

215N/mm²と凡そ10%低い規定値となっている)、構造設計における基準強度(一般に降伏点の規格下限値と同等)を低減して設計しなければならず、板厚を増大させても比例的な部材強度の上昇を享受できない。これに対して、板厚が40mmを超える場合でも基準強度の低減がなく、さらに溶接性にも優れた厚板がTMCP法(Thermo-Mechanical Control Process:加工熱処理法、熱加工制御法)により製造され、設計の利便性が高まり既に多くの建築物に利用されている。また、更なる板厚の増大を抑えるために、鋼材の高強度化も強く要求され、490N/mm²以上では、520、550、590、780N/mm²の様々な強度の鋼材が開発されている³⁻⁵⁾。但し、これらの高強度鋼材に対しても地震時におけるエネルギー吸収を期待することから、YR80%以下という性能が求められ、メーカーの技術開発により製造が可能となり利用されている。建築構造物に使用されている鋼材の種類を図2に示す。また、各種強度の鋼材の応力歪関係を図3に示す。

なお、近年(2005～2009年)、鉄鋼メーカーや建設会社等が参画した府省連携研究開発プロジェクトでは「震度7クラス弾性構造の開発」に挑戦し、前述の塑性設計という従来の建築構造設計の考え方を修正し、地震後においても建物を利用することができるように、大規模地震に於いても部材が弾

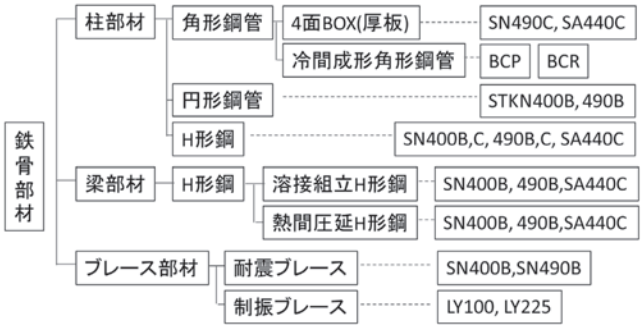


図2 建築構造に使用される各種鋼材(概要)

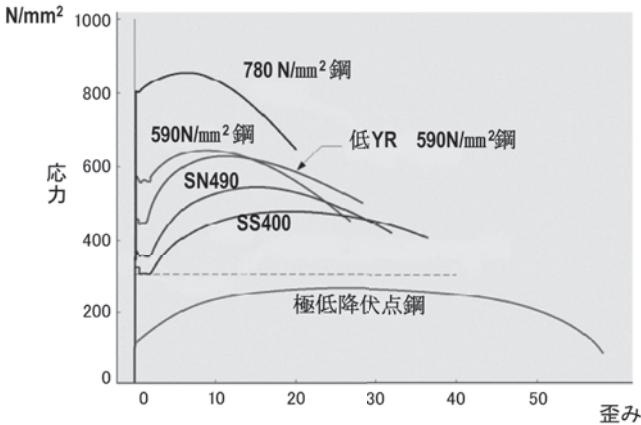


図3 各種鋼材の応力歪関係

性に留まる設計手法を開発した⁶⁾。それに伴い、塑性設計のために要求された鋼材のYRを大幅に緩和した780N/mm²級鋼材がH-SA700として開発され既に実構造物に適用されている。

2.4 接合部に求められる性能

建築鉄骨は上述のように柱部材や梁部材を組み立てることにより構成される。各部材は地震等の外力に対する構造安全性が確認され、さらに塑性化により地震エネルギーを吸収する前提で設計されている訳であるが、各部材に発生する応力は接合部近傍が最も大きくなる場合が多く、部材の強度やエネルギー吸収性能を発揮させるためには、その接合部の性能は部材と同等あるいは同等以上である必要がある。具体的には、接合部には、部材の十分な塑性化を確保するために鋼材の引張強さ以上の強度(いわゆるオーバーマッチ)が求められる。また、地震等の繰り返し応力(塑性域)に対しても高い性能が要求され、阪神大震災以降は、特に溶接部の脆性的な破断現象の回避が要求されている。このように、接合部は構造骨組の要であり極めて重要な部位であることから、様々な性能が求められている。

この部材同士の接合には、高力ボルトによる摩擦接合が用いられる場合と溶接接合により接合される場合がある。高力ボルト接合の場合は、部材にボルト孔をあける必要があり、有効断面が減少してしまう欠点はあるものの、部材の強度以上の接合は可能であり、また繰り返し応力に対しても安定した性能を発揮することができる。一方、溶接接合の場合は、鉄骨加工工場あるいは建設現場において溶接施工により新たに作り出されることから、その溶接部の性能を確保するために様々な視点で条件が規定されている。例えば、鋼材本来の性能(溶接性)は言うまでもなく、溶接施工条件(溶接材料、入熱、パス間温度管理等)、非破壊検査、溶接施工者の技量検定等の多くの事項が規定されている。ここでは、鋼材に関連する性能について紹介する。

溶接接合部は、図4に示すように溶接金属および母材の熱

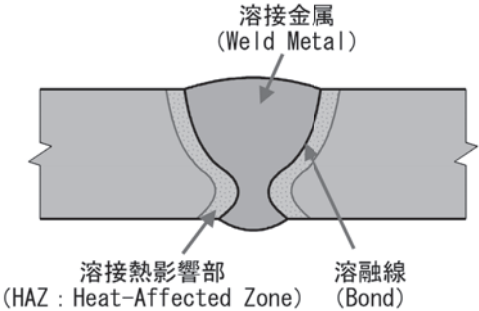


図4 溶接部

影響部で構成され、両者共に母材と同等の性能が求められる。一般に、溶接施工はその効率upが求められ、高入熱溶接や連続溶接（多パス）が指向される。このような溶接条件を採用すると、溶接金属の性能が十分に確保できない場合があることから、現状では接合する鋼材の種類と溶接材料毎の適切なパス間温度や入熱の管理がなされている。また、阪神大震災以降、溶接接合部の脆性的な破断を回避するための研究が進められ、溶接接合部に対して所定の靱性値（シャルピー衝撃値）を確保することが提案された。これに対応する鋼材としては、溶接入熱40kJ/cm以下、溶接パス間温度350℃以下のCO₂半自動溶接施工の範囲で、マグ溶接熱影響部靱性指標（fHAZ）を規定した鋼材規格が日本鉄鋼連盟製品規定「耐震建築溶接構造用圧延鋼材（MDCR0001-2003）」として制定されている⁷⁾。

また、溶接接合部の施工は建物の大型化に伴い板厚の増大、高強度化する中で、常に高効率化を指向しており、大入熱溶接や予熱温度の低減（あるいは不要化）が求められている。これらに対応する鋼材として、エレクトロスラグ溶接等の大入熱溶接（図5参照）においても鋼材の熱影響部の靱性劣化の少ない鋼材や、590N/mm²級鋼（SA440）の溶接施工において必要とされる予熱に関して、予熱低減が可能な鋼材が開発され利用されてきている。

2.5 近年の建築鉄骨におけるトレンド

建築分野における鉄骨造のトレンドは上記の中で述べたが、高度経済成長期以降、建築物は超高層化、大スパン化が求められ、それに対応する建築構造物用の高強度鋼の開発が進み、それらを実現させてきている。一般建築で使用される490N/mm²級鋼材を超えた高強度鋼の実例としては、図6に示す590N/mm²級鋼の極厚円形鋼管がランドマークタワーで使用された。さらに、図7に示す小倉駅ビルでは、780N/mm²級で低YRの鋼材（4面ボックス）が使用されている。

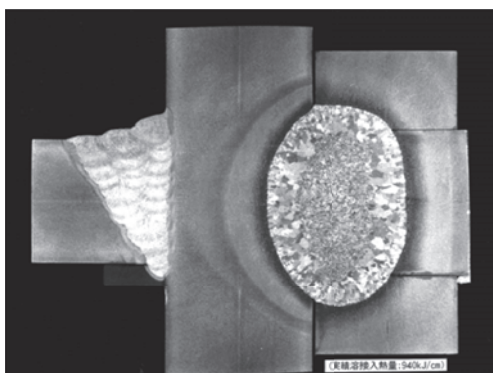


図5 大入熱溶接部のマクロ写真

3 高強度鋼の材質制御技術

鋼材の高強度化は、同時に溶接性や塑性変形能の低下を伴うなど、建築構造物鋼として要求される他の特性との間にトレードオフの関係にあることが多い。このトレードオフ問題の解決こそが、高強度鋼の適用拡大の鍵となる。そこで本章では、高強度化と他の特性をいかに両立するかという観点から、ここまでで紹介した高強度鋼の材質制御の考え方と製造技術について述べる。

3.1 低降伏比（低YR）

鋼の高強度化は、①固溶強化、②転位強化（加工硬化）、③粒子分散強化（析出硬化）、④結晶粒微細化強化の4つの基本的な強化機構を利用して行われる。相変態を経てベイナイトやマルテンサイトなどの硬質組織を生成することによる高強度化（⑤変態強化）は、これら4つの強化機構を複合的に活用したものである。どの強化機構も本質的に降伏強さを高めるものであり、多くの場合YRの上昇を伴う。図8に示すとおり、従来鋼のYRは降伏強さの増加に伴って上昇する傾向にあり、

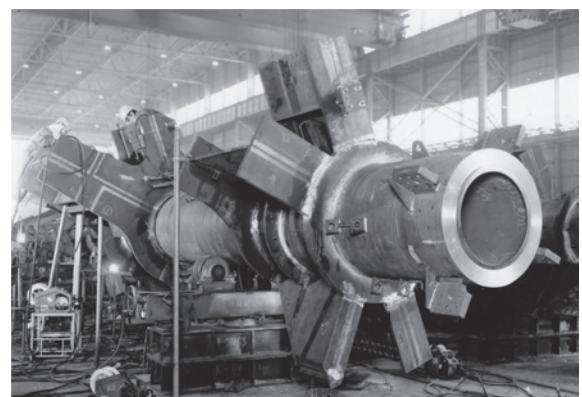


図6 ランドマークタワーの鉄骨柱



図7 小倉駅ビルの外観

鋼材の強度が増加するほど低YRとの両立は困難となる。

高強度鋼において低YRを実現するための基本指針は、軟質相（フェライト）と硬質相（ベイナイトやマルテンサイト）からなる複相組織にすることである。複相組織の引張強さについては、軟質相と硬質相それぞれの引張強さと分率の混合則が成立するが、降伏強さについては単純な混合則が成立せず、より低い降伏強さを示すことが知られている⁷⁾。その結果、同一強度で比較すると、複相組織のYRは単相組織よりも低くなる。これまでに開発されたほぼすべての低YR鋼で、複相組織化が行われている。

図9に、建築用高強度鋼の製造方法とミクロ組織、強化機構をまとめた。引張強さ490～550N/mm²級の低YR鋼（TMCP325～385）では、TMCP法によって、フェライトと

パーライト、ベイナイトからなる複相組織が作り込まれている。さらに高強度の引張強さ590および780N/mm²級の低YR鋼（SA440および低YR-HT780）では、2相域焼入（LまたはQ'処理）によって、より微細な軟質相と、より高強度の焼戻しマルテンサイト、ベイナイトの硬質相からなる複相組織が作り込まれている。鋼材の引張特性や靱性を支配する軟質相と硬質相の分率や分布、形態、硬さなどの組織因子は、TMCPや熱処理の条件を厳密に管理することによって適正な状態に制御される。このようにして、引張強さ490～550N/mm²級のTMCP325～385および590N/mm²級のSA440では、SN規格と同じ80%以下の低YRと、降伏強さのばらつき低減が実現されている。780N/mm²級鋼では、2相域焼入によっても、他の特性を犠牲にすることなく80%以下まで低YR化することは難しく、YRを85%以下とした低YR-HT780が実用化されている⁸⁻¹⁰⁾。

3.2 溶接性

鋼材の高強度化のために炭素量や合金添加量を増加すると、溶接熱影響部（HAZ）での割れの発生や靱性低下などの問題が生じる。HAZで発生する低温割れの危険性は、HAZの硬さが増加するほど高まることが知られ、鋼材の化学組成で表されるCeqやCEN¹¹⁾などの炭素当量、あるいは低温割れ感受性組成P_{CM}などの溶接性指標で評価される。これらの指標はすべて、CやMn、その他合金の添加量を増加するほど高い値となる。高いCeqやP_{CM}を有する鋼材のHAZは硬化しや

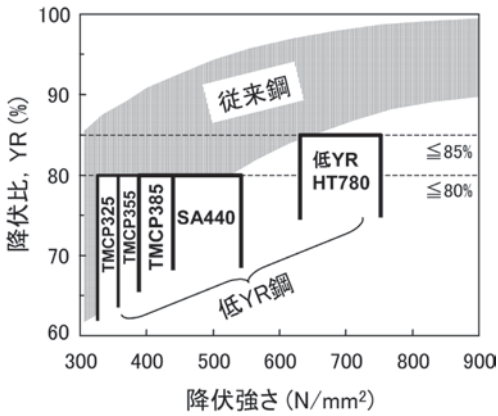


図8 鋼材の強度と降伏比の関係

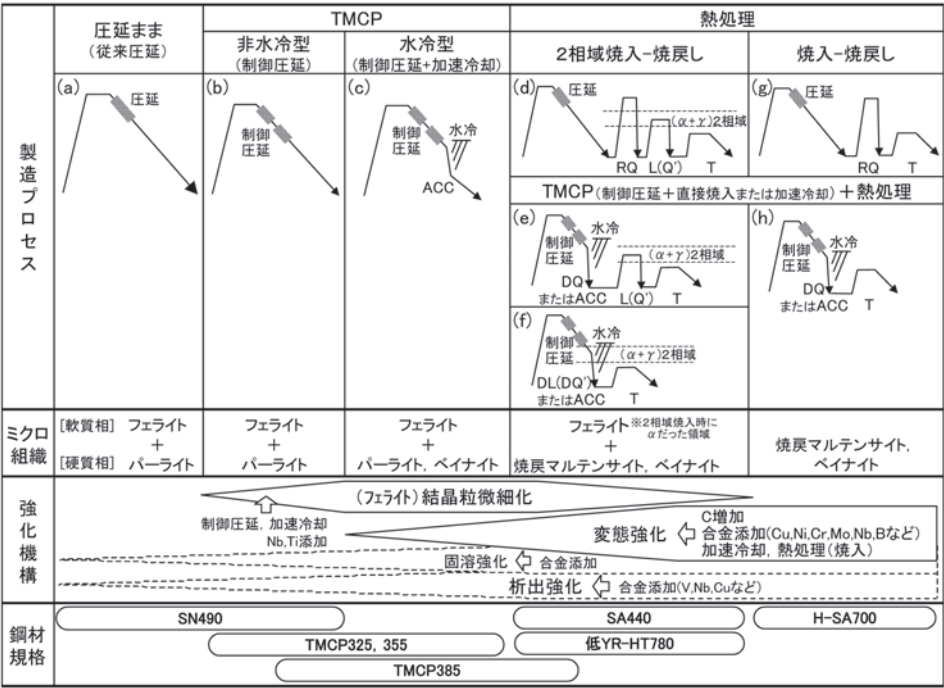


図9 建築構造用鋼の製造プロセスとミクロ組織、強化機構

すく、低温割れ発生の危険性が高まるため、割れ防止のために予熱や後熱が必要になるなど、溶接施工性が低下する。

TMCPは、制御圧延 (Controlled Rolling : CR) と加速冷却 (Accelerate Cooling : AcC) を組み合わせることによって、低Cおよび低合金でも、すなわち低Ceq、低P_{CM}の化学組成でも、熱処理なしで高い強度と靱性を確保できる製造方法である。図10¹²⁾に鋼材強度に及ぼす制御圧延と加速冷却の影響を示す。TMCPによる高強度化は、鋼の強化機構のうち、合金添加に頼らずに強度と靱性を同時に向上できる結晶粒微細化強化を最大限に活用しようとするものである。加速冷却を適用する場合は、⑤変態強化を活用することになるが、前述のように変態強化にも結晶粒微細化強化が寄与している。

建築構造用鋼材では、過度の結晶粒微細化によるYR上昇、不均一な加速冷却による切断 (条切り) 後の歪発生、圧延温度の低下による音響異方性の増加などの課題を解決するため、圧延温度や冷却条件を高精度に制御するTMCP技術が求められる。近年の組織制御メタラジーと加速冷却設備の進歩¹³⁾により、広い鋼種と板厚範囲でのTMCP活用が可能となり、溶接性の優れた (低Ceq、低P_{CM}) のTMCP325、TMCP355、TMCP385などの高強度厚板が製造されている¹⁴⁾。また、590N/mm²級以上の低YR鋼の製造にもTMCPが応用され、制御圧延と直接焼入を組み合わせた製造方法 (図9の (e) DQ-L (Q') -T、(f) DL (DQ') -T) による溶接性の優れた590N/mm²級鋼 (SA440)^{15,16)}や、オンライン熱処理によるTMCP型低YR-HT780¹⁷⁾が開発されている。

TMCP技術を適用した場合も、低YR化の基本は複相組織化であり、高強度と低YRを両立させるためには、硬質相の分率と硬さを所定以上に制御する必要がある。しかしながら、溶接性向上のための低C化や低Ceq、低P_{CM}化は、硬質相の分率や硬さの低減を伴うため、低YR化とは相反し、高強度鋼ほど低YRと溶接性を両立させるのが困難になる。引張

強さ780N/mm²級鋼では、YRを85%以下にまで緩和して、各種特性と経済性のバランスの最適化を図った予熱低減型低YR鋼も開発されているが¹⁸⁻²⁰⁾、590N/mm²級以下の鋼材と同等の溶接性は実現できていない。

一方で、強度とYR、溶接性のように、要求される特性が互いにトレードオフの関係にある場合、必要となる鋼材性能を見極めて必要性能を絞り込み、特定の機能を向上させるという考え方もある。例えば、弾性範囲内で使用することを想定してYRを緩和した柱部材専用の高降伏点鋼が開発されている²¹⁾。さらに高強度のH-SA700²²⁾でも、YRを大幅に緩和 (98%以下) したことによって、溶接性の向上が期待できる。

3.3 大入熱溶接熱影響部靱性

建築分野では、四面ボックス柱の製作に、入熱量が最大1000kJ/cm近くにもなるエレクトロスラグ溶接 (ESW) や最大500kJ/cm程度のサブマージアーク溶接 (SAW) が適用されるなど、図11に示すように、他分野と比べても過酷な超大入熱溶接に対応する鋼材が求められる。図12は、大入熱溶接

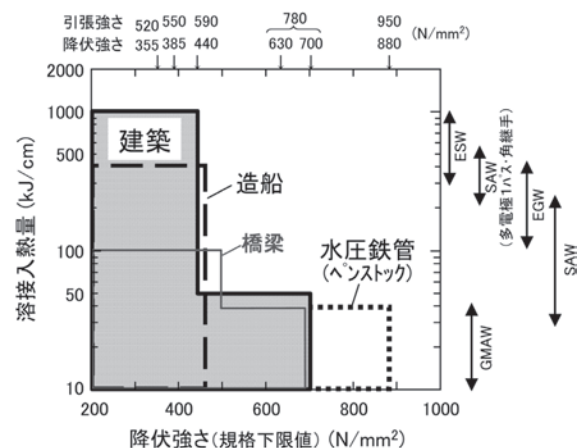


図11 鋼材強度と溶接入熱量

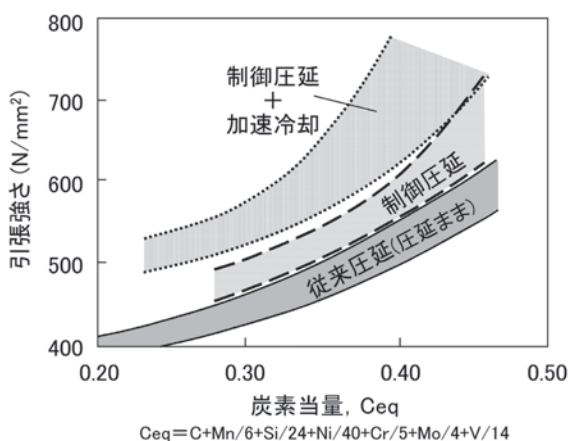


図10 鋼材強度に及ぼす炭素当量の影響とTMCPの効果¹²⁾

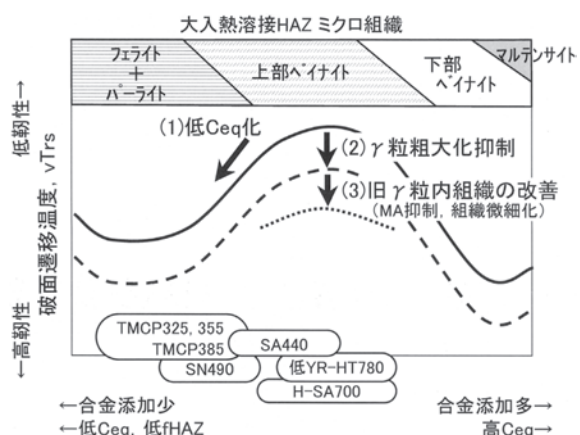


図12 大入熱HAZのマイクロ組織と靱性に及ぼすCeqの影響 (模式図)

HAZのミクロ組織と韌性に及ぼす鋼材の高Ceq化、高合金化の影響を示した模式図である。建築用鋼で通常用いられる成分範囲では、高Ceq化、高合金化に伴って、大入熱HAZ組織は上部ベイナイト主体となり、韌性が低下する。

大入熱HAZ韌性向上のための対策は、鉄鋼メーカー各社で特徴があるものの、PやSなどの不純物元素低減に加えて、(1) 低Ceq、低合金化による上部ベイナイトやパーライトなどの低韌性組織低減、(2) 窒化物や酸化物などの微細分散粒子のピンニング効果によるオーステナイト粒粗大化防止、(3) 合金設計や微細分散粒子活用による旧オーステナイト粒内組織の改善(島状マルテンサイト(MA相)低減、ベイナイトブロック微細化、粒内フェライト生成など)に大別される。これらの対策により、490～590N/mm²級までの鋼材については、大入熱HAZでも0℃で概ね70J以上のシャルピー吸収エネルギーが確保できる“高HAZ韌性鋼”が開発されている²³⁻²⁵⁾。

590N/mm²級を超える高強度鋼では、所定の強度を確保するために、ある程度の合金添加、高Ceq化を避けることはできず、低Ceq化による上部ベイナイトの生成抑制は困難である。そこで、合金設計を最適化することにより、ベイナイトブロックの微細化や下部ベイナイト化を図り、大入熱HAZ韌性を改善した建築用HT780が開発されているが^{18,19)}、コストと性能のバランスに課題が残っており、本格的な適用には至っていない。

4 おわりに

本稿では、建築分野における高強度鋼の要求性能、材料開発および実構造物への適用の現状について概説した。高強度鋼のさらなる適用拡大を通じて、鋼構造建築の安全性と経済性の向上を実現するためには、鋼材開発のみならず、溶接・接合技術や高強度鋼の長所を生かした耐震設計など、多面的な技術の発展が必要である。鋼材メーカーと設計者、施工者の連携が今後ますます重要となろう。

参考文献

- 1) 建築物の安全性評価ガイドライン小委員会報告書, (社) 日本建築学会, (2010)
- 2) 建築構造用鋼材 (SN材), (社) 鋼材倶楽部, 建設省住宅局建築指導課, (1994)
- 3) 高性能鋼利用技術指針, 建設省建築研究所, 鋼材倶楽部, (1994)
- 4) 建築構造用高性能590N/mm²鋼 (SA440) 設計・溶接施工指針, (社) 鋼材倶楽部, (1996)
- 5) 高張力鋼 (780N/mm²級鋼) の建築構造物への適用, 日本鋼構造協会, (1998)
- 6) 「革新的構造材料を用いた新構システム建築物研究開発プロジェクト」成果報告書, (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, (2009)
- 7) 高木節雄: 第191・192回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2007), 1.
- 8) 望月晴雄, 鹿内伸夫, 石川博, 泉満, 成原弘之: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1991), 1109.
- 9) 岡野重雄, 登根正二, 矢野和彦: 神戸製鋼技報, 42 (1992) 3, 6.
- 10) 鎌田芳彦, 一戸康生, 大竹章夫, 川野和雄, 大西一志: 住友金属, 43 (1991) 7, 13.
- 11) 百合岡信孝, 大北茂: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版, (1998), 101.
- 12) 日本溶接学会: 溶接・接合技術, 産報出版, (1993), 170.
- 13) 木下浩幸, 安藤隆一, 和田典巳, 村上弘樹: ふえらむ, 9 (2004) 9, 636.
- 14) 内田三雄: 鉄構技術, 23 (2010) 268, 40.
- 15) 壺岐浩, 大西一志, 大竹章夫, 岡口秀治, 横山幸夫, 波多野勲: 住友金属, 50 (1998) 1, 43.
- 16) 渡部義之, 石橋清司, 吉井健一, 井上肇, 吉田譲: 新日鉄技報, (2004) 380, 45.
- 17) 植田圭治, 遠藤茂, 伊藤高幸: JFE技報, (2007) 18, 23.
- 18) 得納一成, 岡村義弘, 田中睦人, 瀬戸厚司, 小山邦夫, 山下達雄, 家沢徹, 深沢陸: 新日鉄技報, (1997) 365, 37.
- 19) 畑野等, 川野晴弥, 岡野重雄: 神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 105.
- 20) 藤沢清二, 藤澤一善, 大森章夫: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2010), 1117.
- 21) 鈴木孝彦, 鈴木悠介, 吉田譲, 窪田伸, 志村保美, 永田匡宏: 新日鉄技報, (2007) 387, 64.
- 22) 高梨晃一, 志村保美, 油川真広: ふえらむ, 14 (2009) 2, 9.
- 23) 児島明彦, 吉井健一, 秦知彦, 佐伯修, 市川知利, 吉田譲, 志村保美, 東清三郎: 新日鉄技報, (2004) 380, 33.
- 24) 川野晴弥, 柴田光明, 岡野重雄, 小林洋一郎, 岡崎喜臣, 畑野等: 神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 110.
- 25) 木村達己, 角博幸, 木谷靖: JFE技報, (2004) 5, 38.

(2011年8月22日受付)