



解説

受賞技術-22

超高層ビルの安全性と経済性向上に寄与する 超大入熱溶接用高強度鋼板

High Strength Steel Plate for Ultra-large Heat Input Welding Contributing to
Excellent Earthquake Resistance and Economic Efficiency of High-rise Buildings

大森章夫

Akio Ohmori

JFE スチール (株)

西日本製鉄所 (倉敷)

鋼材商品技術部 主任部員

1 はじめに

地震の多い我が国では、高層建築物の耐震構造として、比較的軽量で高い強度が確保できる鉄骨造が主流となっている。その中でも都市部を中心とした再開発プロジェクトなどの超高層建築物では、大スパン化や商業スペースとオフィスおよびホテルの重層化などの多様な設計に応えるため、高強度の鉄骨用鋼材の必要性が高まっている。鋼材の高強度化は、鋼材重量の低減、設計自由度の拡大、溶接施工コストの削減などにより、超高層ビルの経済性向上に貢献することが期待されるものの、一般に鋼材の高強度とともに溶接部の靱性は低下するため、高強度化と優れた溶接部靱性とを両立させる技術が求められていた。さらに建築用鋼材では、大地震時の塑性変形能を確保するために低い降伏比（降伏強度／引張強度）が要求されることも、高強度化と溶接部靱性両立のハードルを高める一因となる。

近年、従来の鋼材では避けられなかった超大入熱溶接部の靱性低下を克服し、優れた溶接部靱性に加えて高強度と低降伏比、さらには良好な溶接施工性をも併せ持つ鋼板が開発され、多くの超高層ビルに適用されている。本稿では、第5回ものづくり日本大賞経済産業大臣賞を受賞した超高層建築用高強度鋼板について紹介する。

2 建築鉄骨への超大入熱溶接適用

2.1 四面ボックス柱の製作

超高層ビルの柱には、図1に示すような溶接組立四面ボックス柱が用いられる。この四面ボックス柱には概ね板厚40mmから100mmまでの厚鋼板が用いられ、柱の強度を高

めるために最大板厚が近年増大する傾向にある。従来の溶接では、板厚の増大に伴って積層パス数が増え、溶接施工に多くの工期とコストを要するため、溶接施工能率を向上するためにサブマージアーク溶接（最大入熱量600kJ/cm程度）やエレクトロスラグ溶接（最大入熱量1000kJ/cm程度）といった超大入熱溶接法の適用が進んでいる。四面ボックス柱の超大入熱溶接適用部の断面マクロ写真を図2に示す。

2.2 超大入熱溶接熱影響部の靱性低下

溶接の入熱量が増大すると、溶融部周囲の溶接熱影響部（HAZ：Heat affected zone）では溶接時に高温に長時間さらされるため、従来の鋼材では結晶粒の粗大化や低靱性組織の生成によって靱性が顕著に低下し、四面ボックス柱の耐震性が確保できないという問題があった。図3は、大地震を模擬した載荷試験時に、ボックス柱のダイアフラムとスキンプ

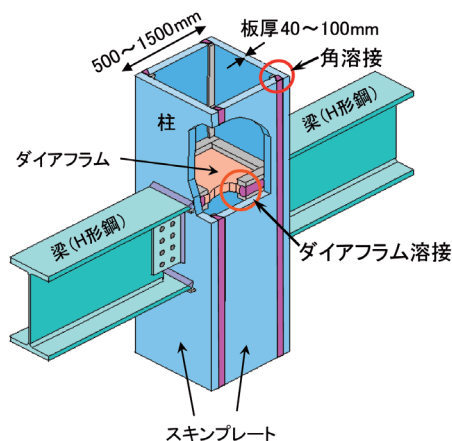


図1 四面ボックス柱

レート溶接部を模擬した試験体のエレクトロスラグ溶接熱影響部に沿って脆性破壊した例である。実際の建築物でこのような破壊が起きないようにするため、超大入熱溶接部の靱性低下を最小限に抑えることが求められる。

3 超大入熱溶接部の靱性制御技術¹⁻⁶⁾

鋼材の高強度化・低降伏比化は、超大入熱溶接熱影響部の靱性との間にトレードオフの関係にある。この解決のため、開発鋼では下記の4つの技術要素を適用し^{1,2)}、強度グレード毎に組み合わせを最適化して設計基準強度（降伏強度）325MPa級から440MPa級までの高強度・低降伏比の建築構造用鋼を開発した。

3.1 TMCPを活用した最適成分設計

TMCP（加工熱処理）は、制御圧延や加速冷却などを駆使して鋼板の材質をオンラインで造り込む技術である。図4⁷⁾

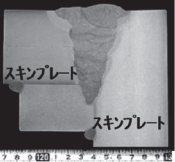
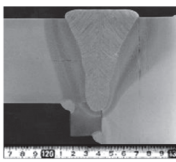
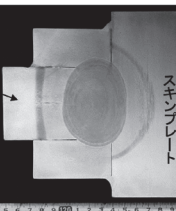
	従来溶接	超大入熱溶接
角部	多層 サブマージーク溶接 最大入熱100kJ/cm程度 	1パス サブマージーク溶接 最大入熱700kJ/cm程度 
ダイヤフラム — スキンプレート	多層 CO ₂ 溶接 最大入熱30kJ/cm程度 	1パス エレクトロスラグ溶接 最大入熱1000kJ/cm程度 

図2 四面ボックス柱の角およびダイヤフラム-スキンプレート溶接部の断面マクロ

に示すとおり、圧延後の加速冷却を活用することによって低炭素/低合金の低炭素等量（低Ceq）成分でも高強度化が可能となる。TMCPを活用した低Ceq成分設計は、溶接熱影響部の靱性を劣化させる上部ベイナイトやパーライト、島状マルテンサイトなどの組織の生成を極力抑制しつつ、鋼板の高強度化を同時に達成するための基本技術である。また、加速冷却においては、高冷却速度での均一かつ高精度な冷却制御を可能にする鋼板水冷技術が求められる。JFEスチールでは、独自に開発した水冷設備Super-OLAC[®]を活用している⁸⁾。

3.2 微細TiN粒子分散による結晶粒粗大化の抑制

溶接により高温に過熱された熱影響部では、オーステナイト結晶粒が粗大化して靱性が劣化する。溶接前の鋼中にTiNなどの微細介在物/析出物粒子を分散させておくと、ピンニング効果により結晶粒の粗大化を抑制することができる。

3.3 結晶粒内組織の改善

溶接熱影響部のオーステナイト粒内には、上部ベイナイトや島状マルテンサイトなどの低靱性組織が生成しやすい。粒内フェライトの生成を促進する介在物を鋼中に分散させておくことにより、溶接熱影響部での粗大な上部ベイナイトの

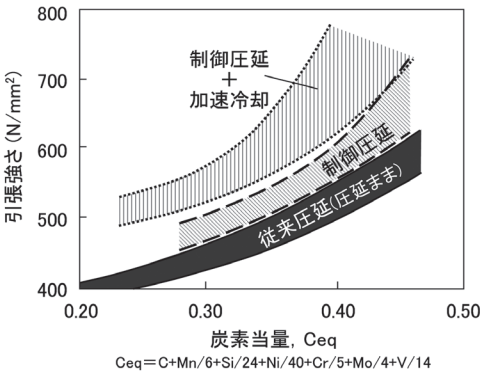


図4 鋼材強度に及ぼす炭素当量の影響とTMCPの効果⁷⁾

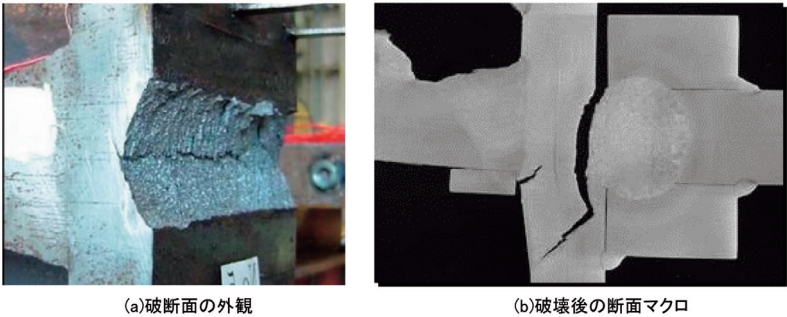


図3 四面ボックス柱を模擬した超大入熱溶接部の脆性破壊例

生成を抑制し靱性を改善することができる。Ca, Ti, Mnなどを含む酸化物/窒化物複合介在物が利用されており、粒内フェライト生成能を確保するために各元素の含有量バランスを適正範囲に制御することが重要である。図5に従来鋼と開発鋼の溶接熱影響部のミクロ組織を示す。開発鋼では結晶粒粗大化の抑制と粒内組織の改善が認められる。

また、Si含有量を低減することによって、溶接熱影響部の島状マルテンサイトが減少する³⁾。島状マルテンサイトが生成しやすい60キロ鋼 (YS440MPa級) の高強度鋼において特に重要な技術である⁴⁾。

3.4 溶接金属からの拡散ボロン (B) 活用

B含有量の高い溶接材料を用いることにより、溶接時にB濃度の高い溶融金属 (溶接金属) から拡散により熱影響部へ

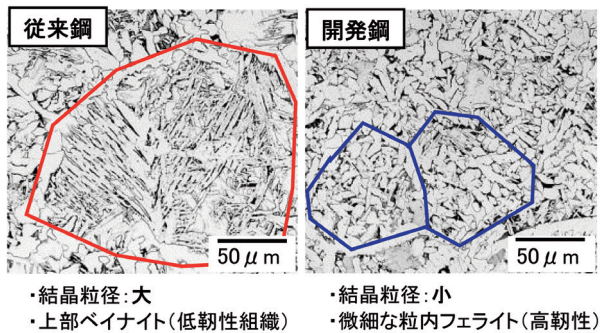


図5 超大入熱溶接熱影響部のミクロ組織

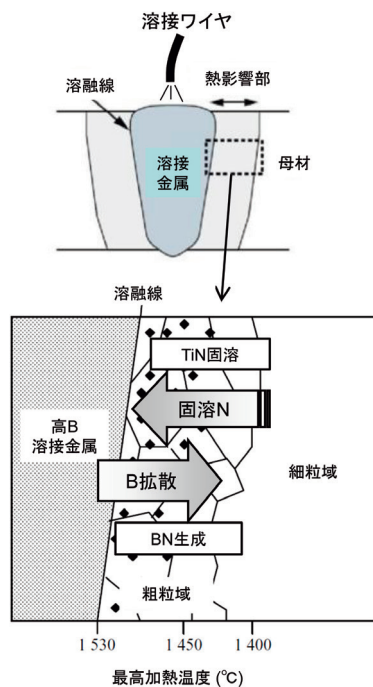


図6 高B含有溶接金属のボンド近傍におけるTiN固溶およびB拡散の模式図⁵⁾

微量のBが供給され、BN生成により靱性を劣化させる固溶Nを無害化できる^{1,5,6)}。図6⁵⁾は本技術のコンセプトを示す模式図である。溶接時に鋼の融点付近まで加熱される溶融線近傍では、結晶粒粗大化防止のために分散させたTiNの一部が固溶して、固溶N生成が避けられないため、溶融線近傍にのみ固溶Bを供給する本技術は、最も靱性が劣化しやすい溶融線近傍の熱影響部靱性の改善策として重要である。このような効果を最大限に発揮するため、溶接材料と鋼材のマッチングに着目した材料開発が行われ、本開発鋼板とそれに組み合わせる高B系の溶接材料が開発されている。

4 開発鋼の効果

4.1 安全性への貢献

四面ボックス柱に適用される超大入熱溶接の熱影響部靱性が改善された (図7)。これにより大地震の際の四面ボックス柱の脆性破壊が防止でき、超高層建築物の耐震安全性が向上した。

4.2 経済性への貢献

高強度鋼を用いた四面ボックス柱の製作に超大入熱溶接が適用できるようになり、溶接施工コストが大幅に低減した。高強度化による鋼材重量低減とTMCP活用による合金添加量の低減により鋼材コストも低減した。

また、従来適用が難しかった高強度鋼を四面ボックス柱に適用することにより、高層化、柱間隔の拡大、柱の細径化、大空間の確保 (大スパン化) などが可能となった。図8に模式図

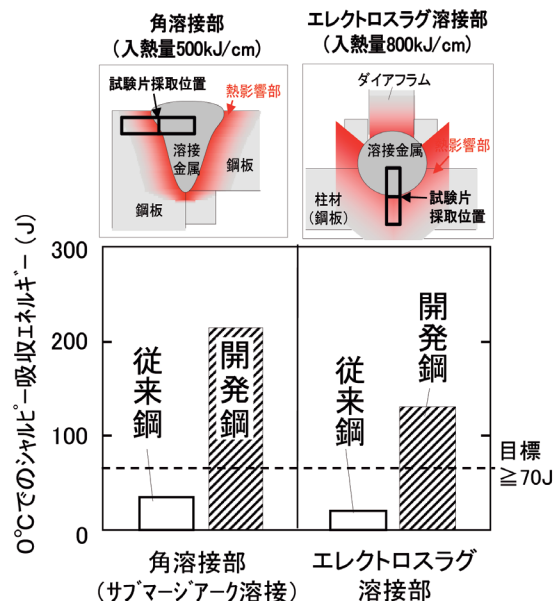


図7 開発鋼の超大入熱溶接部靱性改善

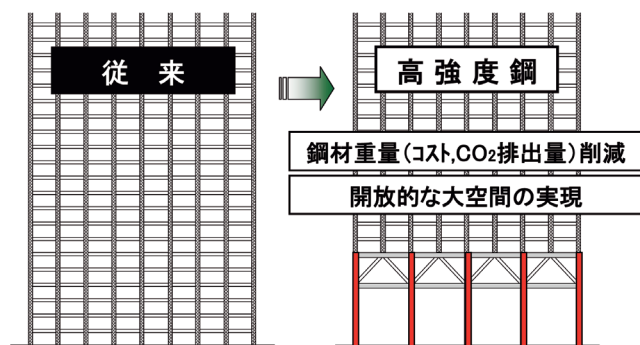


図8 高強度鋼適用による超高層建築の設計自由度拡大

を示す。自由な構造デザインと安全性の両立は、建築物の経済的価値の向上に貢献すると考えられる。

4.3 環境負荷低減

TMCP適用による合金添加量の削減と熱処理省略、高強度化による鋼材重量低減により、電力や燃料等が節約され、CO₂の排出を通して鋼板製造時の環境負荷低減に貢献している。また、超大入熱溶接適用による溶接施工に要するエネルギーの低減、鋼材重量低減による輸送に必要なエネルギーの低減など、鉄骨加工時の環境負荷低減にも貢献している。

5 適用例

超大入熱溶接用高強度鋼は、新丸の内ビルディング（図9）他、著名な超高層ビルに多数採用されている。JFE スチールだけでも累計出荷量は5万トンを超えており、さらに増加することが期待される。

6 おわりに

鋼板製造プロセス技術と溶接熱影響部のマイクロ組織制御技術の組み合わせにより、超高層建築物の超高層ビルの安全性と経済性向上に寄与する超大入熱溶接用高強度鋼板が開発さ



図9 新丸の内ビルディング（提供：三菱地所（株））

れた。本開発鋼をはじめとした高強度鋼の超高層ビルへの適用は今後ますます増加していくものと考えられる。

参考文献

- 1) 木村達己, 角博幸, 木谷靖: JFE 技報, (2004) 5, 38.
- 2) 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上善明: まてりあ, 43 (2004), 232.
- 3) 一宮克行, 角博幸, 平井龍至: JFE 技報, (2007) 18, 13.
- 4) 大森章夫, 中川佳, 室田康宏: JFE 技報, (2014) 33, 25.
- 5) 木谷靖, 池田倫正, 一宮克行: JFE 技報, (2007) 18, 47.
- 6) Y.Kitani, R.Ikeda, K.Yasuda, K.Oi and K.Ichimiya: Welding in the world, 51 (2007), 31.
- 7) 溶接学会: 溶接・接合技術, 産報出版, (1993), 170.
- 8) 鹿内伸夫, 三田尾眞司, 遠藤茂: JFE 技報, (2007) 18, 1.

(2016年11月16日受付)