微細低炭素ベイナイト技術による大入熱溶接 熱影響部靱性に優れた高強度厚鋼板の開発

畑野 等^{*1)} 岡崎 喜臣^{*2)}
川野 晴弥^{*3)} 岡野 重雄^{*4)}

1. はじめに

近年、都市の再開発による建築物の高層化や物流のグローバル化による輸送機(船)の大型化など、溶接鋼構造物の大型化が一層進んでいる。これに伴い、鋼材の厚肉化、高強度化が進み、従来は採用例が少なかった引張強度 590 MPa 級以上の高強度厚鋼板の適用が広がっている。しかし、590 MPa 級以上の高強度鋼板は大入熱溶接を行った場合、溶接熱影響部(HAZ)の靱性が大きく劣化するため、低入熱溶接で対応しており、高強度鋼適用拡大の障害となっている。鋼構造物においては、溶接施工が製作コストの大きな部分を占めるため、溶接効率が高い大入熱溶接ができないことは、製作コスト削減が求められている現状、致命的な欠点となっている。これらの背景から、大入熱溶接が可能な高強度鋼板、すなわち、大入熱溶接施工においても優れた HAZ 靱性を有する高強度鋼板へのニーズが高まっている。

大入熱 HAZ 部がフェライト/パーライト組織主体となる 490 MPa 級鋼板に関しては、大入熱溶接における HAZ 靱性の改善に対してこれまでに多数の研究が行われ⁽¹⁾、大入熱溶接対応鋼板が開発されてきているが、大入熱 HAZ 部がベイナイト/マルテンサイト組織主体となる 590 MPa 級以上の高強度鋼板に関しては研究例が少なく、十分な改善がされてこなかった。そこで、著者らは 590 MPa 級以上の高強度鋼板の大入熱 HAZ 靱性改善に取り組み、微細低炭素ベイナイト組織という全く新しい組織コンセプトを導出し、高強度鋼板に適用することにより大入熱 HAZ 靱性を大幅に改善できることを見出し、技術確立した⁽²⁾。また、本技術を用いて大

入熱溶接対応可能な建築用 590 MPa 級鋼板、780 MPa 級鋼板の開発に成功した。

2. 高強度鋼の大入熱 HAZ 高靱化の考え方

微細低炭素ベイナイト技術の特徴は、①有害な組織である MA (Martensite-Austenite constituent) を微細化すると同時に、②ベイナイト組織自体も微細化することで、大入熱溶接時にも極めて高靱性なベイナイト組織が得られることである。以下に本技術の詳細について紹介する。

590 MPa 級以上の高強度鋼板の大入熱化の課題は、母材強度を確保しつつ、如何に大入熱溶接時の HAZ 靱性を確保するかである。これまでの研究から、大入熱 HAZ 靱性の劣化因子は、硬質相である MA であることが明らかとなっている⁽³⁾。MA は、大入熱溶接によって HAZ 部の冷却速度が小さくなり、上部ベイナイトが生成する際に、未変態 γ 中への C の分配によって γ が安定化するために生成する。従って、鋼材中の C 量を低減させることにより上部ベイナイトの生成に伴う MA の生成量を低減し、HAZ 靱性を改善できると考えられる。しかし、従来からも低 C 化による MA の

図1 低炭素化による再現 HAZ における MA の低減 (溶接入熱 25 kJ/mm 相当)。

* 神戸製鋼所
材料研究所：1)主任研究員 2)研究員
加古川製鉄所：3)研究員 4)主任研究員
Development of High Strength Steel Plates with Excellent HAZ Toughness under High Heat Input by Low-Carbon-Fine-Bainite-Technology; Hitoshi Hatano, Yoshitomi Okazaki, Haruya Kawano, Shigeo Okano (KOBELITE, LTD.)
2003年12月5日受理

低減が検討されてきたが、強度確保のために必要な合金元素の添加によりパーライトの生成が抑制されるため、逆にMAの生成量が多くなるとされてきた。そこで著者らはC量を大幅に低減させた上で、合金元素を添加することでMAを低減することを試みた。図1に、従来鋼(0.10%C)に対して大幅に低C化(0.03%)した鋼種の再現HAZでのMAの形態を示す。低C化したことによりMAの体積分率が低減するとともに、微細化することが分かる。このことから、MAの無害化には大幅な低C化が有効であるといえる。

一方、強度確保のための添加合金元素としては、炭化物生成能の弱い元素(炭化物非生成元素)が望ましいことが著者の検討で明らかとなった。大入熱HAZ部がフェライト/パーライトとなる490 MPa級鋼においては C_{eq} 値の上昇を伴わないNbなどの炭化物生成能の強い元素(炭化物生成元素)の添加が、HAZ 靱性改善には有効とされている。しかし、高

強度鋼板においては大入熱HAZ部がベイナイト主体となるため、変態温度を低温化できる炭化物非生成元素の添加により、ベイナイト組織が微細化できることを見出した。図2に、炭化物非生成元素(Mn, Cr)および炭化物生成元素(Mo, Nb)でそれぞれ強度を確保した、低炭素ベイナイト鋼の再現熱サイクル組織の大傾角粒界を示す。炭化物生成元素型に比べ、炭化物非生成元素添加型は大傾角粒界が多く、ベイナイト組織が微細化することが分かる。図3に再現HAZ熱サイクル靱性に及ぼす溶接入熱の影響を示す。従来鋼(0.10%C)に対し、低炭素ベイナイト鋼(0.03%)はいずれも高靱化しているが、炭化物生成元素型に比べ、炭化物非生成型の方が顕著に高靱化できている。特に、大入熱側では、従来鋼および炭化物生成元素型は、十分な靱性が得られないのに対し、炭化物非生成元素型は十分な靱性を確保できており、ベイナイト組織の微細化による高靱化が達成できている。

以上のように、従来鋼に比べ、大幅に低C化しつつ、炭化物非生成元素添加により強度を確保することで、母材強度を確保しつつ、大入熱HAZ部で微細なMAかつ微細なベイナイト組織を得ることができる微細低炭素ベイナイト技術を開発し、大入熱HAZ靱性の大幅な改善を可能にした。

図2 低炭素ベイナイト鋼における再現HAZ組織の大傾角粒界(EBSPによる粒界マップ, 粒界レベル: 15~180°).

図3 再現HAZ熱サイクル靱性に及ぼす溶接入熱の影響。

3. 微細低炭素ベイナイト技術を適用した高強度厚鋼板の特性

(1) 建築用大入熱対応 590 MPa 級鋼, 780 MPa 級鋼板

引張強度が590 MPa級(降伏強度440 MPa)の建築向けの厚鋼板(規格: SA440C)へ微細低炭素ベイナイト技術を適用した例を紹介する。図4に、開発鋼および従来鋼について、エレクトロスラグ溶接により超大入熱1パス溶接(溶接入熱93 kJ/mm)を行い、溶接継手靱性を評価した結果を示す。従来鋼ではボンド部での vE_0 が39Jと低い値になっているのに対して、開発鋼では175Jと大幅に改善でき、目標の70Jを十分に満足できている。図5にそれぞれのHAZ部のミクロ組織を示す。従来鋼は粗大なベイナイト組織に粗大な第2相組織が生成しているのに対し、開発鋼は狙いどおり、ベイナイト、第2相組織ともに微細化しており、これにより良好なHAZ靱性が得られているといえる。

図4 建築用大入熱対応 590 MPa 級鋼の大入熱HAZ部の靱性(板厚100 mm エレクトロスラグ溶接入熱93 kJ/mm)。

図5 590 MPa 級鋼の大入熱溶接 HAZ 部のミクロ組織 (エレクトロスラグ溶接, 入熱 93 kJ/mm)。

図6 建築用大入熱対応 780 MPa 級鋼の大入熱 HAZ 部の靱性 (板厚 50 mm サブマージアーク溶接, 入熱 40 kJ/mm)。

次に、引張強度が 780 MPa 級 (降伏強度 630 MPa) の建築向けの厚鋼板 (大臣認定規格: KBSA630C) へ微細低炭素ベイナイト技術を適用した例を紹介する。図 6 に、開発鋼について、サブマージアーク溶接により大入熱溶接 (溶接入熱 40 kJ/mm) を行い、溶接継手靱性を評価した結果を示す。従来、780 MPa 級鋼は入熱 5 kJ/mm 以上では HAZ 靱性が大きく劣化することから、最大 5 kJ/mm の入熱制限がなされている。これに対して図 3 からわかるように、本開発鋼は、入熱 40 kJ/mm と従来の 10 倍程度の入熱にもかかわらず、安定して良好な HAZ 靱性を示しており、画期的な大入熱化が図られている。

(2) 超大型コンテナ船用厚肉 EH390 鋼板

輸送効率化を可能とする超大型コンテナ船には板厚 80 mm 程度の厚肉 EH390 鋼板 (降伏強度 390 MPa) の使用が検討されており、施工効率が高い大入熱 1 パス溶接時の HAZ

図7 コンテナ船用厚肉 EH390 鋼板の大入熱 HAZ 部の靱性 (板厚 80 mm エレクトロガスアーク溶接 入熱 58 kJ/mm)。

靱性確保が課題となっている。本鋼種に微細低炭素ベイナイト技術を適用した例を紹介する。図 7 に開発鋼について、エレクトロガスアーク溶接により大入熱 1 パス溶接 (溶接入熱 58 kJ/mm) を行い、溶接継手靱性を評価した結果を示す。従来 HAZ 靱性確保が困難であった 58 kJ/mm という大入熱溶接時においても、非常に良好な HAZ 靱性を確保できていることが分かる。

4. 実績と将来性

今回紹介した大入熱溶接対応可能な建築用 590 MPa 級鋼板、780 MPa 級鋼板ともに、既に実構造物に適用されている。近年、建築構造物溶接部の信頼性向上が求められており、良好な HAZ 靱性を確保できる本開発鋼は広く適用されていくものと考えられる。また、建築構造物だけでなく、同じく大型化進んでいる輸送機 (船)、橋梁などにおいても、上記で紹介した EH390 厚肉鋼板を初め、本技術を適用した高強度鋼板の商品化を多数予定しており、広範囲な分野でのコスト縮減、付加価値創造に貢献できると考えられる。

5. 特 許

特開2000-160281, 特開2002-47532などを含め、8 件が公開となっている。

文 献

- (1) 笠松 裕, 高嶋修嗣, 細谷隆司: 鉄と鋼, **65**(1979), 1232.
- (2) 畑野 等, 岡崎喜臣, 高木敏晃, 武田裕之, 川野晴弥, 岡野重雄: 溶接構造シンポジウム2002講演論文集, (2002), 323
- (3) 笠松 裕, 高嶋修嗣, 細谷隆司: 鉄と鋼, **65**(1979), 1222.