微細粒子による溶接熱影響部の組織微細化技術『HTUFF』を適用した厚鋼板の開発

児島明彦¹⁾ 植森龍治²⁾ 皆川昌紀³⁾
星野 学⁴⁾ 市川和利⁵⁾

1. 緒 言

近年、安全性向上、環境保護、エネルギー節約、資源開発環境の過酷化などの社会的要求から、溶接鋼構造物に対して、信頼性向上、大型化、軽量化などが求められている。これを受けて、溶接鋼構造物に広く用いられる引張強度が490～590 MPa級の厚鋼板では、高靱性化、厚手化、高強度化などが重要な開発ターゲットとなっている。同時に、鋼構造物の建造コスト低減の観点から、大入熱溶接を用いた高能率な溶接施工の利用が増大している。以上の背景から、大入熱溶接化や高強度厚手化や高靱性化に対応しつつ、溶接熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)の靱性を確保できる厚鋼板の開発が強く求められている。

一般に、厚鋼板に大入熱溶接を施すと、HAZの組織が粗大化して靱性は低下する。また、厚鋼板を高強度厚手化すると、鋼成分の影響を受けてHAZの硬さが上昇するため、靱性の確保が難しくなる。さらに、厚鋼板を高靱性化しても、母材と同等の靱性をHAZで確保することは難しい。このように、大入熱溶接化や高強度厚手化や高靱性化の要求と、良好なHAZ靱性とを、高い次元でバランスさせることは容易でない。

従来、HAZ靱性を高めた厚鋼板として、TiNによるピン止め効果を利用したTiN鋼が広く実用化されている。また、各種の析出物や酸化物をフェライト変態核として利用した粒内変態鋼も開発されている。しかしながら、強度、板

厚、溶接入熱量、HAZ靱性の要求レベルが高度化しつつある昨今では、従来鋼を用いても十分なHAZ靱性が得られない場合があり、さらに高度なHAZ靱性向上技術の開発が必要である。

本技術「HTUFF(エイチタフ): Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles」は、熱的に安定な酸化物や硫化物の微細粒子を鋼中に分散させ、これら新しいタイプの粒子を活用してHAZ組織を画期的に微細化する技術である⁽¹⁾⁽²⁾。HTUFFを適用した厚鋼板は、大入熱溶接化や高強度厚手化や高靱性化などの要求に対応しつつ、良好なHAZ靱性を達成できる⁽³⁾。

2. HAZ靱性向上の考え方

HAZ靱性向上の基本的な考え方は、要約すると下記の3点である。

- (1) 有効結晶粒径の微細化
- (2) 破壊の起点となる脆化相の低減
- (3) 地鉄(マトリックス)の高靱化

本技術HTUFFは、(1)の観点からオーステナイト(γ)の粒成長抑制を目指す。図1に溶融線近傍におけるHAZ組織制御の考え方を模式的に示す。ここでは、加熱時のHAZにおける γ 粒の分布状況と、その中の一つの γ 粒について冷却後の

図1 溶融線近傍におけるHAZ組織制御の考え方。

(WM: 溶接金属, FL: 溶融線, γ : オーステナイト, GBF: 粒界フェライト, FSP: フェライトサイドプレート, IGF: 粒内変態フェライト, Bu: 上部ベイナイト)

* 新日本製鐵株式会社

1) 技術開発本部鋼材第二研究部主任研究員

2) 技術開発本部君津技術研究部主幹研究員

3) 技術開発本部分技術研究部主任研究員

4) 技術開発本部名古屋技術研究部主任研究員

5) 技術開発本部接合研究センター主任研究員

Super High HAZ Toughness Steels with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles; Akihiko Kojima, Ryuji Uemori, Masanori Minagawa, Manabu Hoshino, Kazutoshi Ichikawa (Nippon Steel Corporation)

2002年10月31日受理

図2 HTUFFを適用した開発鋼の γ 粒成長抑制効果。

変態組織を表している。(a)のTiN鋼は、溶融線(FL)近傍で γ 粒成長を抑制することが難しく、粗大化した γ 粒の粒界から粗大な粒界フェライト(GBF)やフェライトサイドプレート(FSP)が生成してしまう。(b)の粒内変態鋼は、 γ 粒内に粒内変態フェライト(IGF)が生成することで、 γ 粒界からの変態組織の発達を抑制する効果がある。これらに対して、HTUFFを適用した(c)の開発鋼は、溶融線近傍の γ 粒成長を強力に抑制し、 γ 粒の顕著な微細化と γ 粒界からの変態組織の微細化をはかる。

3. HTUFF の開発

一般に、結晶粒成長におけるピン止め効果はZenerの式(1)として表される⁽⁴⁾。

$$R = (4/3) \cdot (r/f) \quad (1)$$

ここで、 R : 結晶粒の半径、 r : 第二相粒子の半径、 f : 第二相粒子の体積率、である。式(1)に基づくと、結晶粒成長を抑制するためには、 r/f を小さくすることが基本的な考え方となる。HTUFFが対象とするのは溶融線近傍のHAZであるから、例えば1400°Cのような高温での第二相粒子の分散状態が重要である。従来鋼で広く用いられているTiNは、このような高温で長時間にわたって加熱されると、その大部分が固溶して f が減少し、溶け残った粒子は成長して r が増加するため、 r/f が大きくなってピン止め力が低下する。

HTUFFが目指すピン止め強化の考え方は、まず第一に、例えば1400°Cのような高温で、固溶や成長が生じにくい熱的に安定な第二相粒子を採用することである。第二に、このような粒子を鋼中に微細かつ均一に分散させることである。第三に、母材特性に悪影響を与えないことである。

HTUFFの研究では、熱的に安定な第二相粒子として酸化物や硫化物に着眼した。そして、OやSと親和力の強いMgやCaなどに注目し、これらの元素を含有する数10nm～数100nmの非常に微細な酸化物や硫化物を鋼中に均一に分散させる技術を工業的に初めて確立した。従来鋼の酸化物や硫化物は数 μm の大きさであるから、これらの新しいピン止め粒子は従来の1/100～1/10程度の大きさに微細化されており、鋼中に数多くの粒子が分散する。このとき、OとSの鋼中含有量は従来鋼と同等であり、母材特性に悪影響を与えるような粗大な介在物が増えることはない。図2にHTUFF

図3 再現HAZ靱性に及ぼす γ 粒径の影響。

を適用した開発鋼のピン止め効果の例を示す。開発鋼は、溶融線近傍のHAZを模擬した1400°Cで1～100s保持しても γ 粒がほとんど成長せず、従来のTiN鋼に対して極めて強力なピン止め効果が発揮されている。特に、高温での滞留時間が長くなる大入熱溶接のHAZにおいて、開発鋼の優位性が増す。図3に大入熱溶接を模擬した再現HAZ靱性に及ぼす γ 粒径の影響を示す。HTUFFを適用してHAZの γ 粒を小さくすることで、HAZ靱性を向上させることができる。

4. HTUFF を適用した厚鋼板の溶接部靱性

(1) 大入熱溶接対応鋼

降伏強度が325MPa級と440MPa級である建築向け厚鋼板(規格: BT-HT325C, BT-HT440Cなど)へのHTUFF適用例を図4と図5に紹介する⁽⁵⁾。図4から、極めて大きな溶接入熱量であるにもかかわらず、溶接部全域で良好な靱性が達成されている。従来鋼では27J以上の靱性が目標であったが、開発鋼は溶接部の耐震安全性を確保するために70J以上を目標とし、これを安定的に達成している。図5から、開発鋼の溶融線近傍に相当するHAZは、従来鋼に対して γ 粒が顕著に微細化されており、HTUFF適用の効果が明瞭に現れている。開発鋼はこれに合わせて開発された溶接材料⁽⁶⁾との組合せで、高層建築向けボックス柱などへの使用に適している⁽⁷⁾。

降伏強度が390MPa級である造船向け厚鋼板(規格: EH40など)へのHTUFF適用例を紹介する⁽⁸⁾。板厚65mmの厚手材を、溶接入熱量が38kJ/mmである2電極エレクトロガスアーク溶接を用いて、1パスで突合せ継手を作製した⁽⁹⁾。前例のない高強度厚手材の大入熱溶接にもかかわらず、-20°Cのシャルピー吸収エネルギーの平均値が150J以上である良好なHAZ靱性が達成された。開発鋼はこれに合わせて開発された溶接材料⁽¹⁰⁾との組合せで、大型コンテナ船などへの使用に適している。

(2) 低温靱性保証鋼

降伏強度が355MPa級である造船向け厚鋼板(規格: FH36など)へのHTUFF適用例を図6に紹介する⁽³⁾。低合金鋼としては前例のない-68°Cの低温仕様にもかかわらず、溶接部全域で良好な靱性が達成されている。開発鋼は、LPG船パイロブ型タンクなどへの使用に適している。

図4 建築向け大入熱溶接対応開発鋼の溶接部靱性。
 (BT-HT325C : 0.16%C-1.3%Mn-Nb-Ti, 板厚 50~80 mm)
 (BT-HT440C : 0.10%C-1.6%Mn-Cu-Ni-Nb-V-Ti, 板厚 60~80 mm)
 T 継手: エレクトロスラグ溶接 1 パス, 83~88 kJ/mm

図6 造船向け低温靱性保証開発鋼の溶接部靱性。
 (FH36 : 0.08%C-1.4%Mn-Cu-Ni-Nb-Ti, 板厚 40 mm)
 突合せ継手: サブマージアーク溶接多層, 4.8 kJ/mm

(3) 高強度 CTOD 保証鋼

降伏強度が 500 MPa 級である海洋構造物向け厚鋼板(規格: S500M3z など)への HTUFF 適用例を図7に紹介する⁽¹¹⁾。CTOD 保証鋼としては前例のない高強度厚手材にもかかわらず, 溶接部全域で良好な靱性が達成されている。開発鋼は, 海底の油田・ガス田を生産するプラットフォームの上部構造などへの使用に適している。

5. 製造状況

HTUFF を適用した厚鋼板は, 2000年(平成12年)から量産を開始し, 建築, 造船, 海洋構造物, などの分野へ約10万トンの製造実績がある。今後, さらに広範な溶接鋼構造物へ適用されることが期待され, 構造物の信頼性向上, 大型化, 軽量化, 建造コスト低減に大きく貢献すると考える。

6. 特許

国内特許は1991年(平成3年)以降に約60件を出願し, 特

図5 エレクトロスラグ溶接の溶融線近傍に相当する HAZ の γ 組織。

図7 海洋構造物向け高強度 CTOD 保証開発鋼の溶接部靱性。

(S500M3z : 0.10%C-1.6%Mn-Cu-Ni-Nb-Ti, 板厚 63.5 mm)
 突合せ継手: ガスシールドアーク溶接(FCAW)多層, 0.7 kJ/mm
 サブマージアーク溶接(SAW)多層, 3.5 kJ/mm

許第2653594号, 特許第2940647号, 特許第3256118号, 特許第3323414号の4件が登録されている。外国特許は EP-Patent Application No. 01930007.8 ほか4件をフランス, ドイツ, 韓国, 中国, 台湾などに出願している。

文献

- (1) 植森龍治他: CAMP-ISIJ, **14**(2001), 1174.
- (2) 児島明彦他: 溶接構造シンポジウム2002講演論文集, (2002), 投稿中.
- (3) 皆川昌紀他: 溶接構造シンポジウム2002講演論文集, (2002), 投稿中.
- (4) C. Zener quoted by S. Smith: Trans. AIME, **175**(1948), 15-51.
- (5) 児島明彦他: 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1(2001), 761-762.
- (6) 市川和利他: 溶接学会全国大会講演概要集, **69**(2001-10), 176-177.
- (7) 稲田達夫他: 鉄鋼技術, (2002-7), 35-44.
- (8) 石田浩司他: 溶接学会全国大会講演概要集, **70**(2002-4), 214-215.
- (9) 豊原 力他: 溶接学会全国大会講演概要集, **70**(2002-4), 38-39.
- (10) 笹木聖人他: 溶接学会全国大会講演概要集, **70**(2002-4), 40-41.
- (11) A. Kojima *et al.*: Proc. 20th Int. Conf. OMAE, (2001), Rio de Janeiro, ASME, MAT-3241.