アドホック研究会報告

高張力鋼の溶接 HAZ 軟化と強度特性評価*

望月正人**

Evaluation of Weld HAZ Undermatching and Tensile Strength Characteristics in High-Tensile Strength Steel Welded Joint*

by MOCHIZUKI Masahito**

キーワード 軟化, 溶接継手, 超微細粒鋼, 強度評価, 引張特性, 数値解析, アドホック委員会

1. はじめに

構造材料の代表格である鉄鋼材料ならびにその溶接についての重要性については今さらここに記すまでもなく、これまでの溶接学会誌での種々の記事はもちろん、他のいろいろな情報などからでも容易に理解することができる。この鉄鋼材料についてのさらなる飛躍形の一つとして、独立行政法人 物質・材料研究機構において「超鉄鋼」の研究プロジェクト¹⁾が進められている。超鉄鋼材料を実用化し、実際の構造物に適用していくために重要な技術の一つはやはり「溶接・接合」である。すなわち、結晶粒を微細化することにより強度を高めた超鉄鋼材料が、溶接に伴う熱影響部 (HAZ) において粗粒化に伴う軟化が避けられないことに対して、その解決への道筋を溶接学会が担うことも当然の成り行きであろう。本稿では、上記プロジェクトとの協力体制の元に溶接学会で実施された、「高張力鋼の HAZ 軟化とその強度特性」アドホック研究会の活動内容についての概要を報告する。

2. アドホック研究会について

溶接学会では、(1) 溶接構造研究委員会や溶接冶金研究委員会などの9つの常設研究委員会、(2) 多くの分野にまたがる広範囲なテーマや今後の溶接学会発展に繋がる大テーマのための特別研究会に加え、(3) 平成10年度より、研究活動を一層充実強化し、会員の研鑽に資するため、また、時期を得た緊急に解決すべき課題を研究するために、アドホック研究会の制度を設けて調査研究活動を行っている。さらに、(4) 平成15年度からは研究活

動のより活性化を図るため、少人数 (7~8名以内) で若手中心 (原則として30歳台以下) のミニ研究会を用意し、学会員以外の人などを含めて気軽に参加できるような形で、若手研究者・技術者によって学会の将来展開への布石を気楽に担えるようなシステムを取っている。

上記のような研究調査活動の受け皿がある中で、今回、溶接学会に物質・材料研究機構から「超鉄鋼の溶接軟化部を含む継手の実用性能に関わる有効支配パラメータの抽出調査」研究が委託された。本調査研究を実施するに当たり、産官学からの会員の協力を得るため、さらには、調査研究内容をより幅広く公知とし活用していくために、平成15年度から2年間にわたり、「高張力鋼の HAZ 軟化とその強度特性」アドホック研究会と、「高張力鋼の強度的不均質を持つ溶接継手の破壊靱性評価」アドホック研究会をそれぞれ設置し、調査・研究を行うこととなった。

上記2研究会の内、「高張力鋼の HAZ 軟化とその強度特性」アドホック研究会は、以下のメンバーにより2年間の活動を行い、今般、その成果を最終報告書²⁾として纏めるに至った。

◎主査:

望月正人 (大阪大学 大学院工学研究科)

◎アドバイザー:

平岡和雄 (物質・材料研究機構 超鉄鋼研究センター)

◎委員:

中込忠男 (信州大学 工学部 社会開発工学科)

山本元道 (広島大学 大学院工学研究科)

安圭栢 (姫路工業大学 工学部 機械工学科)

中村照美 (物質・材料研究機構 超鉄鋼研究センター)

榎波啓太郎 (物質・材料研究機構 超鉄鋼研究センター)

川畑友弥 (住友金属工業(株) 総合技術研究所)

新富達也 ((株) 中山製鋼所 商品開発部)

護雅典 ((株) 竹中工務店 建築技術部)

井上好章 (三菱重工業(株) 長崎研究所)

猪瀬幸太郎 (石川島播磨重工業(株) 技術開発本部)

*原稿受付 平成16年5月14日

**会 員 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 Member, Department of Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University

山本純司（日立建機(株)技術開発センター）

三上欣希（大阪大学 大学院工学研究科 博士後期課程）

もう一つの、「高張力鋼の強度的不均質を持つ溶接継手の破壊靱性評価」アドホック研究会の概要については本誌の別稿を参照されたい。

3. 研究会の活動内容・目標について

本研究会では、次世代の構造用材料として期待されている微細粒高強度超鉄鋼材料において、溶接 HAZ の粗粒化に伴う軟化が避けられないと考えられていることから、この溶接 HAZ 軟化部の継手強度などへの実用安全性上の限界を明確にするために、軟化部の幅と軟化の程度（軟化度）および溶接金属の強度特性が実用溶接継手性能に及ぼす影響について、既往の研究成果の整理結果をもとに明らかにすることを目的としている。さらに、このような溶接 HAZ 軟化を数値解析によって予測する手法についての検討を行い、新たな評価手法のための課題の抽出を行うことを目的とし、活動を進めてきた。これらの目標を箇条書きに記すと以下ようになる。

- ・高張力鋼の溶接 HAZ 軟化とその強度特性に関する従来知見のまとめ（レビューと課題の整理）
- ・超微細高張力鋼の溶接 HAZ 軟化特性の把握と引張強度特性から見た軟化限界評価
- ・溶接 HAZ 軟化部を持つ引張強度評価式の提案
- ・溶接 HAZ 軟化を考えた溶接金属強度マッチングのあり方とその評価手法の提案
- ・溶接 HAZ 特性と溶接熱サイクルの関係の解析的検討

4. 具体的な成果について

本研究会の具体的な活動成果を要約すると、以下に示す2つとなる。すなわち、

(a) 高張力鋼の溶接 HAZ 軟化とその強度特性に関する課題調査として、既存の研究開発成果を調査ならびに整理し、新たな評価手法のための課題の抽出を行った。その結果、これまでの研究成果は特定の継手の強度予測などには適用が可能であるものの、微細粒高強度超鉄鋼材料に適用するためには新たな研究が必要であること、また、そのためには実験的手法のみならず、解析的手法を援用することが望ましいことを明らかにした。

ここで、溶接 HAZ 軟化がある場合の継手引張特性は、図1に模式的に示すように軟質部の幅がある程度小さくなると塑性拘束の効果により見かけ上の強度が上昇するというような特徴的な傾向を示すことが知られている。そのため、この塑性拘束の影響を加味した上で継手の設計を行うことが重要となる。一例として、溶接 HAZ 軟化継手の継手引張強度と入熱量の関係を図2に示す³⁾。溶接 HAZ の母材に対する軟化度を0.7とした場合の入熱量に応じた溶接 HAZ 幅の変化が継手引張強度にどのような影響を及ぼすかを示している。この図から、溶接金属の強度を母材同等のイーブンマッチにした場合はごく低入熱の溶接を行わないと継手の強度は確保できないものの、溶接金属を母材の1.2倍の強度にした場合には、入熱量を

図1 軟質部を持つ継手の塑性拘束効果

図2 溶接 HAZ 軟化継手の引張強度に対する設計曲線を入熱量で整理した一例

約 12 kJ/cm 程度まで上昇させても継手の強度は母材並みとなることが理解できる。このような検討を系統的に行うことにより、高張力鋼の溶接 HAZ 軟化を考慮した継手を実用化することができるようになると考えられる。

(b) 高張力鋼の溶接 HAZ 軟化とその強度特性を評価するための基礎的検討として軟化シミュレーション手法の基盤技術となるピッカース硬さ分布の数値解析援用予測手法について検討し、溶接継手による硬さの数値シミュレーションを行った。その結果、適切な入力データを利用することによって、十分な精度で継手の強度予測を行うことができることがわかった。また、この数値解析手法は硬さ・強度予測のみならず、ミクロ組織の分布挙動など材料学的な側面からの検討にも適用できることを明らかにした。

具体的な数値シミュレーション例⁴⁾として、配管突合せ多層溶接継手について、相変態を考慮した溶接熱サイクルの解析結果から得られるミクロ組織分率の変化挙動を図3(a)に示す。最終パスとその手前の溶接パスの重畳熱

(a) 最終パスとその手前の溶接パスの重畳熱影響部におけるミクロ組織分率の変化挙動

(b) 入熱量が外表面における硬さ分布に及ぼす影響

図3 配管突合せ多層溶接継手のミクロ組織と硬さ分布⁴⁾

影響部におけるミクロ組織分率が初層からの多層溶接開始からどのように変化していくかを示しており、100%ベイナイトであった母材が2回の熱サイクルを受けることによってフェライト・パーライトとベイナイトの混合組織に変質していく挙動が理解できる。また、ミクロ組織

分率と冷却速度からビッカース硬さ分布を求めることができる。その一例として、入熱量が外表面におけるビッカース硬さ分布に及ぼす影響を図3 (b) に示す。溶接熱サイクルによる熱影響の帰結として溶接 HAZ 軟化が生じていること、また、入熱量が大きいほど軟化の程度も大きくなっていることがわかる。

5. おわりに

今回のアドホック研究会で行った調査研究成果は、微細粒高強度超鉄鋼材料の構造化技術のキーとなるものであり、今後のさらなる研究により大きな発展が期待できるものである。引き続き産官学の共同研究を推進することによって、地球環境問題の解決に貢献するとともに、高耐震性・高耐食性などの画期的特性を持つ超鉄鋼の実現を目指した基礎研究（設計、創製から商品化まで）を戦略的に推進することに大きく貢献することができるだけでなく、実際の設計・施工などの実用化面からも付加価値の高い技術を確認することが可能になる。「継手部の強度予測・性能評価なしでは実用化は不可能」であることを念頭に、今後の継続的・集中的な研究が、特に「実用化研究」としてのスタンスに望まれることは言うまでもない。

なお、この概要記事はアドホック研究会の最終報告書²⁾を元に纏めたものであり、内容の詳細にご興味がある方は有料（¥3,000）にて頒布しているのでご利用されたい。最後に、委員会活動にご協力を賜った委員の皆様ならびに関係諸氏に甚大な謝意を表します。

参考文献

- 1) <http://www.nims.go.jp/stx-21/>
- 2) 望月正人編著：高張力鋼の溶接 HAZ 軟化と強度特性評価、アドホック研究会資料 No. 2, 溶接学会 (2004)。
- 3) 新富達也, 橋本義和, 竹士伊知郎, 望月正人, 豊田政男：溶接 HAZ 軟化継手の変形挙動および延性き裂発生位置に関する検討—細粒鋼溶接継手の変形ならびに強度特性に関する研究 (第3報), 溶接学会論文集, Vol. 21, No. 3, pp. 411-418 (2003)。
- 4) M. Mochizuki and M. Toyoda: Residual Stress and Distortion by Pipeline Welding, Proceedings of the 4th International Conference on Pipeline Technology, Ostend, Belgium, Vo. 2, pp. 897-915 (2004)。