実 用 講 座

溶接設計とその注意点 (II)*

Design for Welding*

中 西 保 正**

by Yasumasa Nakanishi**

キーワード：溶接設計，溶接力学，材料選択，溶接施工法，
継手強度，溶接能率，作業性，溶接コスト，品
質保証

は じ め に

「溶接設計とその問題展 I, II」と題し，第 1 報に引き続き「溶接設計」のあるべき姿や設計者への要望などについて身近な例を通じて考える。なお，本報は「4. 溶接構造物の強度，損傷と設計」の途中から続けるが，図 No.，参考文献は前報からの通し No. とした。

4.2 疲労破壊

疲労破壊は施工不良による溶接欠陥を起点とする

ことが多いが，疲労破壊に影響を及ぼす因子は部材応力，応力繰返数および環境であり，設計の役割は重要である。疲労破壊に対しても，多くの損傷事例および研究成果により設計基準・規格が改訂された。図 6 に示すように構造上の応力集中を避けたり，海洋構造物で行われるように溶接止端の形状を管理し，応力集中を避けることは常識である。また，図 7 に例を示すように，溶接継手の設計不良により疲労損傷が発生した例は非常に多い⁸⁾。これも常識のはずであるが，歴史は繰り返すようである。

鉄道橋は疲労設計を行うのに対し，道路橋は変動応力が小さいので疲労設計を行わないが，疲労損傷

図 6 構造上の応力集中の低減による継手疲労強度の改善

図 7 溶接継手の設計不良による疲労損傷と改善

*原稿受付 平成 6 年 8 月 23 日

**正 員 石川島播磨重工業株式会社 Member,
Ishikawajima Harima Heavy Industries
Co., Ltd.

が生じることがある。また、基準・規格に基づき設計が行われる主要部材には損傷は生じないが、二次部材に疲労損傷が発生することもあり、すなわち、二次部材などの見えないところに設計者の資質の差が生じると考えられる。さらに、繰返応力の見込み違いや応力繰返数の積算不足による損傷は今も皆無ではないようであり、仕様決定段階における基本設計の役割は重要である。

4.3 高温環境における損傷

化学装置用溶接構造物は高温 ($\geq 300^{\circ}\text{C}$)・高圧環境で使用され、高温ぜい化により低合金鋼やオーステナイト系ステンレス鋼の溶接熱影響部に割れが発生したことがある。材料の問題であるため、施工面からの検討が多く行われた⁹⁾が、設計面からも同時に検討が行われた。その結果、熱応力の発生や形状的応力集中が割れの発生・伝播を助長することが判明し、すみ肉溶接継手をできるだけ避ける構造が採られた¹⁰⁾。オーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れの防止には PWHT (溶接後熱処理) による残留応力除去が有効であるが¹⁰⁾、PWHT の可否を決めるのも設計である。さらに、最近 700°C 以上で使用されているオーステナイト系ステンレス鋼部材において、フラックス・コアード・アーク溶接 (FCAW) 法で施工された継手の溶接金属損傷が生じているとの報告がある¹¹⁾。現在、損傷メカニズム、溶接施工法における差異、寿命などの検討が行われているが、同じトラブルを繰り返さないためにも Up-to-date な情報収集が必要である。

5. 能率、品質と設計

5.1 作業性

作業環境および作業ためのクリアランスなどの溶接作業性は、溶接能率および品質に及ぼす影響は大

図8 構造物寸法と溶接作業性との関係

図9 溶接作業性を考慮した部材形状

きいのにもかかわらず忘れられがちである。図8に構造物寸法と溶接作業性との関係を示す⁹⁾。溶接ができない部材形状は論外であるが、溶接施工困難な状態で溶接を行っても健全な溶接部を得ることは困難であり、注意を要する。また、図9に示すように、健全な溶接を行うためには部材形状を考慮する必要がある。さらに、ブロック分割も設計者の役割である。できるだけ溶接がしやすい工場内の下向姿勢を多くすることや、姿勢に限らず高能率溶接が適用できる部材形状および組立順序の選定、現地溶接継手を減らすことなども能率、品質の両面で重要である。

5.2 溶接変形と新しい施工法

原動機などの機械部品は高い精度が要求される。図10に概要を示すタービン静翼環は従来は GTAW (TIG 溶接) で組み立てられ、精度管理に苦労していた。しかし、溶接変形が少ない電子ビーム (EB) 溶接の採用により、組立精度は大幅に向上した¹²⁾。

また、日本における粒子加速器の開発は、TRISTAN 計画が完成し、現在は Spring 8 計画が進められている。その重要部品であるビームポジションモニタ (図11参照) は、TRISTAN 計画の R&D 段階では TIG 溶接で検討された。しかし、TIG 溶接では変形が大きく、溶接後に個別チューニングのばらつ

きが大きくなる問題が指摘されたほか、溶接熱による本体の損傷や電極ろう付け部におけるリークが懸念された。そのため、溶接入熱量が小さな EB 溶接が採用され、無事に TRISTAN 計画は完成した。しかし、EB 溶接は真空チャンバ内で溶接する必要があるため、チャンバによる寸法制限や真空排気の待ち時間

による能率低下がある。そのため、さらに長大な構造で溶接部の数量が 1100 箇所以上となる Spring 8 計画では、大気中で施工が可能で、溶接変形も小さなレーザ溶接が採用された。

5.3 新施工法の採用

図 12 に、ビーム加速器の部品であるピローシール型フランジの構造を示す。本フランジの構造は二重ベローズ部を持ち、内圧を付与して膨らませ、対向フランジに密着させることにより 10^{-8} torr の真空度を確保する。シール面には SUS304 の薄板 (0.2 mm) が使用されるが、厚板にこのような薄板を接合することは従来の溶接法では困難であった。そのため、最新の YAG レーザによる施工が検討され、無事製品が出来上がるとともに、所定の性能を満足する

図 10 電子ビーム溶接により製作したタービン静翼環

図 11 レーザによるビームポジションモニタの溶接

図 12 レーザ溶接で製作したピローシール型フランジ

図 13 TRISTAN 計画のメインリング排気ポートの設計変更

図 14 溶接施工を考慮して設計したアルミニウムベローズ (模式図)

図 15 非破壊検査の不備により残存した溶接欠陥

ことができた。設計者は、常に研究開発部門の動向を知っておくことが重要である。

5.4 設計変更とコスト低減および品質向上

図 13 に概略を示す TRISTAN 計画のメインリングの排気ポートの製作において、当初は部品構成を本体／パイプ／フランジとし、溶接組立を行っていた。しかし、溶接変形が無視できないほか、フランジの使用材料がアルミニウム合金熱処理材であり、溶接熱による材質変化も問題であったため、パイプ付きフランジを採用した。その結果は、加工および材料コストは上昇したが、溶接変形および溶接による材質劣化の両問題が解消でき、溶接および検査コストの低減によりトータルコストはかえって低下した。また、図 14 に溶接施工を考慮して設計したアルミニウムベローズを示す。アルミニウムは板厚 $< 2 \text{ mm}$ では溶接が難しく、とくに板厚 0.4 mm ではベテランが 1 個溶接するのに半日を要し、欠陥率も高かった。そこで、ベローズ製造時に伸縮性を確保し、溶接のし易い構造とした。その結果、ベローズの製造コストは上昇したが、溶接コストが大幅に低減し、トータルコストはかえって減少した。

6. 検査と信頼性

溶接後には健全性を確認するために非破壊検査を行うが、その指示も設計の担当である。図 15 に示す貯槽の主要部材の溶接部ほぼ全線に欠陥が検出され、調査の結果施工不良による融合不良であることが判明した。製作時の記録によれば、検査の指示が磁粉探傷試験 (MT) のみであり、MT には合格していた。もしも当初から X 線 (RT) または超音波探傷試験 (UT) を指定していたなら、発生しなかったか生じたとしてもサイズは小さかったと考えられる欠陥である。設計は構造物の使用条件、応力状態などを考慮して検査法を選定する必要がある。

実際の溶接構造物においては、欠陥率 0% は実現困難であり、使用中のき裂進展を考慮した設計思想もある。使用中の欠陥進展は、疲労き裂、クリープ、応力腐食割れなども含めて破壊力学により推定される。しかし、適用に際しては的確な非破壊検査法を選定し、残存欠陥寸法を許容寸法以内に正確に抑える必要があり、設計の役割は重要である。

7. 溶接を取り止めた例

従来行ってきた溶接を止めることも、能率、品質保証、コスト面で重要である。とくに、アルミニウム合金を使用する構造物では押出型材が利用できるため、多量に使用する場合や精度を厳しく要求する場合には、従来の溶接構造から押出型材へ切り替えた例が多くある。また、精密鍛造技術が発展し、エンジンケーシングなど溶接構造から鍛造に変更した例も多い。図 1 (第 I 報) の例に対しても一体鍛造構造の採用は魅力的であり、設計、製造、開発および資材・調達部門を含めた検討が必要である。

8. おわりに

身近な例を通じて、「溶接設計」のあるべき姿や設計サイドへの要望などについて述べてきた。さらに、設計者と製造者との間に位置する研究者側からみると、設計者が直接現場に持ちかけて無理と決めつけ、実現しなかったケースも多いと思われる。「あれば便利」は研究のニーズであり、研究サイドと現場が協力することにより新技術が生まれると思われる。さらに、研究サイドと設計との付合いは、研究サイドが暖めているシーズ「種」が具体的な構想に発展させると考える。一方、本テーマは範囲が非常に広く、全部の溶接施工法はカバーできなかったが、本

稿が設計に携わる方々への参考になれば幸いである。また、執筆に際し、諸先輩、諸兄の貴重なデータや事例報告を参考にさせて頂いた。最後に、感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 才川, 喜多, 吉田; 溶接施工管理の実施例, 溶接学会誌, Vol. 49, No. 11 (1980)
- 2) 稲垣; 溶接構造物の品質保証と溶接管理, 溶接学会誌, Vol. 50, No. 7 (1981)
- 3) 軽金属溶接構造協会編; アルミニウム合金構造物の溶接施工管理
- 4) 例えば, 造船学会; 新しい製造法による鋼材 (TMCP 鋼) の溶接構造物への適用に関するシンポジウム (1983), TMCP 鋼の使用性能 (溶接性, 加工性と溶接材料)
- 5) 亀井; 石油タンクの損傷とその対策, 溶接学会誌, Vol. 52, No. 5 (1983)
- 6) 中西, 井元, 金崎, 井上, 大西; HT780 トラス格点部かど継手の強度, 土木学会第 49 回年次学術講演会 (1994)
- 7) 栗山, 河野, 村山, 中西; すみ肉溶接止端部割れに関する研究一二つのすみ肉溶接部が接した谷間における割れの発生一, IHI 技報, Vol. 18, No. 4 (1978)
- 8) 渡辺; 溶接設計と管理, オーム社 (1963)
- 9) 例えば, 渡辺ほか; 石油学会誌, No. 16 (1973)
- 10) 渡辺; 化学装置用鋼溶接構造物の損傷と対策, 溶接学会誌, Vol. 52, No. 8 (1983)
- 11) 例えば, 宇野; FCAW の損傷事例, 化学機械溶接研究委員会, 溶接協会 (1994)
- 12) 喜多ほか; 溶接学会昭和 44 年秋季全国大会講演概要, p 238 (1969)

〔新 刊〕

溶接学会技術資料 (JWS Bulletin) NO. 13

溶 接 冶 金 現 象 の モ デ リ ン グ

(社)溶接学会 溶接冶金研究員委員会編

周知のように、溶接金属並びに HAZ は短時間でかつ局所的な溶融・凝固もしくは融点直下に至る熱サイクルを受けることにより母材とはかなり異なった組織となります。このような溶接部特有の組織は溶接部の特性に大きな影響を及ぼすことから、溶接部の組織を予測することは溶接部の特性を理解するうえで極めて重要であると考えられます。

溶接金属や熱影響部における組織変化は一般に平衡状態に至る中間的な段階にあることからその理解のためには速度論的な観点からのアプローチが必要であり、特に、溶接部各部の組織はその領域が受ける溶接熱サイクルに依存していることから、精度の高い組織予測を行うためには速度論的な取扱いの中に非等温過程の取扱いを持ち込むことが必要となります。

本書では溶接部の組織並びに特性予測のための基礎的概念の理解を深めるため、溶接部の組織予測に必要な熱サイクルを受けた場合の材料挙動に関する諸現象について、基礎的事項から溶接部の組織予測の実例並びに溶接部の組織変化と関連する溶接割れ現象、靱性および耐食性などの諸特性についてまでを詳述しています。本書は溶接に携わる研究者や技術者の方々にとって、溶接部の組織並びに特性の理解を深めるための好適な参考書といえます。

平成 6 年 9 月発行

価 格: ¥10,000

サイズ: B5 版, 190 ページ

申込先: 社団法人 溶接学会 事務局 松尾

〒101 東京都千代田区神田佐久間町 1-11

TEL/03-3253-0488

FAX/03-3253-3059