

国立研究
開発法人

海上技術安全研究所 国際会議報告

会議：第68回 国際溶接会議 (IIW) 第 XIII (疲労 (Fatigue)) 委員会

開催場所：クラウンプラザ、ヘルシンキ、フィンランド共和国

会議期間：平成27年6月28日～7月3日

概要

IIW (国際溶接会議) は、16 の委員会を中心に、分科会・合同委員会を適宜設置し、各分野の専門家が集まって規格・指針作成作業を行っている。また、ISO/TC 44 で溶接関係規格作成団体に指定されており、溶接に関して ISO/TC 44 で必要とされる既存 ISO 規格の改定案・新規 ISO 規格案の作成も行っている。第 XIII (疲労) 委員会では、独自の設計基準を設けていない造船所などで利用されている「溶接構造疲労設計指針」・「疲労強度改善方法に関する指針」・「溶接品質と疲労強度相関に関する指針」等を最新の知見や技術革新を反映させ随時更新・出版している。海技研からは岩田が第 XIII (疲労) 委員会の下部組織となる JIW (日本溶接会議)・疲労強度研究委員会の会議報告作成担当として第 XIII 委員会に参加し、溶接構造物の設計・製作に影響を及ぼす規格・指針の改正点、重点的な取り組みが推奨される研究課題、溶接疲労分野における最新の知見や技術革新の動向を調査し、国内関係者へ情報提供している。

海技研からの参加者：岩田知明：構造基盤技術系 基盤技術研究グループ長

主な貢献：岩田は国内造船系委員として本委員会及び WG に参加し、当所の第三期 (平成 23～27 年度) 重点研究において実施している疲労強度改善技術に関する研究により得られたデータを公表し、現在 WG2 で作成中の HFMI (高周波機械的衝撃) ガイドライン並びに一部の船級の規則見直しに役立つよう提供すると共に、疲労強度改善法、疲労設計規格、疲労データ評価法などに関して、討議への参加、情報収集、関係者間の連絡調整を行った。



委員会に出席した岩田

主な審議結果

1 溶接継手の疲労強度改善技術に関する事項

WG 2 は、HFMI (High Frequency Mechanical Impact ; 高周波機械的衝撃^{*})、低変態温度溶接ワイヤ[†]、ショットピーニングなどの溶接構造物の疲労強度改善技術を取り扱い、推奨指針の作成、並びにその裏付けデータを掲載した文書を発行している。

現在、最も注目されている HFMI では、主に圧縮残留応力付加の効果で疲労強度を向上させているが、供用中に圧縮過大荷重がかかることもありうる船舶などの構造物では、圧縮側での降伏によりその効果が薄れる事例も報告されている。そこで、異なる応力比での、全体寿

命における圧縮残留応力付加の効果持続性などについて検討が行われてきた。作成中の「IIW recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints (HFMI 処理による溶接継手疲労強度改善に関する指針)」の素案において、鋼材の強度別並びに応力比別に改善効果の考え方が示された。鋼材の降伏応力別では、355MPa 未満については 4 段階、355MPa 以上 550MPa 未満については 5 段階、550MPa 以上 750MPa 未満については 6 段階、750MPa 以上 950MPa 未満については 7 段階、950MPa 以上については 8 段階、それぞれ疲労等級が向上するとされ、また、SN 特性曲線の傾きも母材と同等の $m=5$ (数字が大きいくほど傾きが緩く、長寿命でも強度が低下しにくい) とされた。また、応力比については、0.15 以下については 0 段階、0.15 より大きく 0.28 未満については 1 段階、0.28 より大きく 0.4 未満については 2 段階、0.4 より大きく 0.52 未満については 3 段階、それぞれ疲労等級改善効果が“減少”するとされた。なお、0.52 より大きい範囲については公表試験データが不十分なため、個別に試験を実施し疲労強度改善効果を検証しなければならいとされた。一方、現行指針「IIW recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints (溶接継手の疲労強度改善方法に関する指針: 2013 年 2 月発行)」で取り扱われている既存の 4 種類の疲労強度改善技術では、それぞれ、棒状グラインダーは 2 段階、TIG 溶接仕上げは 2 段階、ハンマーピーニングは 3 段階、ニードルピーニングは 3 段階、それぞれ疲労等級が向上するとされ、SN 特性曲線の傾きは改善処理を施工していない溶接継手と同等の $m=3$ のままである。また、ハンマーピーニングとニードルピーニングについては、応力比が、0.15 以下については 0 段階、

* 高周波機械的衝撃: 超音波圧電素子(電気信号と力を返還する素子)、超音波磁歪素子(磁気信号と力を返還する素子)、圧縮空気のいずれかにより、円柱状圧子を高周波で振動させて被加工材に対して打ち込み、衝撃を受けた材料は塑性(加えた力を除いても変形が残ること)変形を起こし、局所幾何形状を滑らかにして応力集中(形状不連続部に大きな応力が発生すること)を緩和させるとともに、圧縮残留応力(加えた力や温度を除いても残る応力)が負荷されることにより引張の溶接残留応力を緩和させる。従来のハンマーピーニングに対して作業性に優れるとともに、被加工範囲が小さいので、より滑らかな形状に仕上げ易い。

† 低変態温度溶接ワイヤ: 従来の溶接材料は組織変態点が 500°C 以上で、溶接後の冷却過程において収縮するため引張残留応力が発生し、無負荷でも引っ張られている状態になっている。この引張残留応力を低減させるため、変態点を 200°C 以下の低温とし、溶接後の冷却過程において膨張し圧縮残留応力を発生させることにより外部の引張力の緩和を可能とした Ni-Cr ステンレス系材料を用いた溶接ワイヤのことである。



0.15より大きく0.28未満については1段階、0.28より大きく0.4未満については2段階、それぞれ疲労等級改善効果が“減少”する(0.40より大きい範囲については公表試験データが不十分のため、個別に試験を実施し疲労強度改善効果を検証しなければならない)。以上より、既存の疲労強度改善効果と比較すると、HFMIの疲労強度改善効果は、特に破断寿命が200万回以上の長寿命領域において大きく向上するとされた。なお、上記のHFMIの疲労強度改善効果の数値については、現在まだ素案段階で、今後修正される可能性がある。また、これらの値は、公表されている疲労試験データを基にした統計処理により決定されたものであるが、新日鐵住金から「UIT (HFMIのうちの1種) 改善処理をした溶接継手の残留応力を基にした評価手法」において提案された、修正グッドマン線図^{*}を基にしたSN特性曲線予測法においても、応力比別の疲労等級改善効果の減少割合については、現行素案とほぼ同様であった。

フラウンホーファー研究機構材料力学研究所の「HFMI処理溶接継手の表層状態モデル化に関する解析的実験的研究」、カナダ Waterloo大学の「HFMI処理溶接部の疲労挙動に及ぼす強度影響に関する実験並びに破壊力学的解析」、ボルボ並びにスウェーデン王立研究所の「溶接止端の疲労寿命を改善するための適切な溶接手順」などについて討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 高強度鋼など異なる鋼材グレードにおけるTIG再溶融・グラインダー仕上げ・ショットピーニングなど既存の疲労強度改善技術による効果の更なるデータの拡充、局所応力解法基準による疲労強度指針の開発

- IIW-IAB (International Authorization Board) 委員会との連携による疲労強度改善技術の施工作業者の訓練計画、訓練教材、認証手続きの開発
- ステンレススチールやチタン合金などに疲労強度改善技術を適用する場合のガイドラインの開発

2 溶接構造の疲労設計規格に関する事項

JWG-XIII/XVでは、現行のIIW推奨疲労等級を破壊力学計算に基づく新たな等級へ置き換えるため、溶接継手評価への破壊力学の適用の基準化が行われている。これにより、構造詳細のサイズ変更による影響評価や現行含まれていない新しい形状の評価が可能となる。

「溶接構造疲労設計指針」は出版に向けた校正段階。

新日鐵住金と東京都市大学の「鋼床板の縦通りと横桁の交差部の疲労評価」などについて討論が行われた。

3 欠陥や溶接品質の疲労への影響に関する事項

WG4では、第5委員会(非破壊検査及び溶接製品の品質保証)及び品質保証特別委員会(SC Qual)と連携して、溶接部周辺の溶接不全部がどのように疲労挙動に影響を及ぼすかについて明確化したガイドラインを作成している。

溶接品質に関するISO 5817[†]やAWS-D1.1における欠陥の品質は疲労寿命を考慮していないため、IIWの疲労強度に関する推奨指針と整合しておらず、設計者が品質レベルと幾何形状をバランスさせて強度レベルを決定する際に問題(過剰品質、強度不足)が生じている。そ

^{*} 疲労限度(応力振幅)と平均応力の関係を示す疲労限度線図の予測式の一つ。応力振幅が0の場合の疲労限度として引張強さを採用。

[†] ISO 5817:2014 “Welding -- Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) -- Quality levels for imperfections”



ここで、溶接品質と疲労強度の相関の適正化を行った。「IIW guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength (溶接品質と疲労強度相関に関する IIW ガイドライン)」は、テクニカルレポートとして ISO に送付された。

フィンランド：アールト大学とマイヤー・トゥルク造船の「普通鋼並びに高強度鋼の薄板突合継手の疲労強度に及ぼす溶接品質の影響」、フィンランド：アールト大学と Oulu 大学の「溶接部の実形状を考慮した薄板のレーザハイブリッド溶接の疲労強度解析」について討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 例えば、実際には、一つの角回し溶接継手の二つの溶接止端にかかる実荷重が等しくなることはめったになく、従って、要求される品質も止端毎に異なる。よって、実荷重を考慮して溶接部の形状と品質の許容限界を個別に設定することにより“溶接まま”品質レベルの疲労強度の更なる向上を図る。
- 切断面の表面粗さは疲労評価に重大な影響を及ぼすが、現在の IIW ガイドラインでは考慮されておらず設計者の溶接品質選択の際の問題となっている。板厚毎の許容表面粗さ RZ (十点平均粗さ) の範囲が示されている ISO 9013* を利用して疲労規則を発展させる (第 1 委員会 (溶断及びサーフェシング (肉盛溶接や溶射など)) と連携)。

4 応力解析に関する事項

WG 3 では、ホットスポット応力法 (幾何形状に起因する構造的応力集中を用いて評価する方法) 及び有効切欠応力法 (き裂の影響を同等の影響を与える楔形形状に換算して評価する方法) による局所応力解析の情報交換、溶接継手の静的強度評価のための応力解析法指導

* ISO 9013:2002 “Thermal cutting -- Classification of thermal cuts -- Geometrical product specification and quality tolerances”

書の作成 (第 15 (設計) 委員会と連携) を行っている。

疲労強度改善技術を施工した継手に対する (弾塑性) 切欠応力法の適用、切欠応力強度係数 (N-SIF) 解法の適用 (切欠応力の効果を数字で重みをつけ定量的に評価する)、平均応力法 (ノッチ底から一定距離の間の平均応力) や臨界距離法 (ノッチ底から一定距離の 1 点の応力) の適用について検討が行われた。

「Structural hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components -Designer’s guide- (構造的応力集中解法による溶接部材の疲労解析—設計者向けガイドー)」の改訂作業として、板厚方向への応力の線形化手法のうち、Dong 法 (溶接止端から微小距離 δ 離れた箇所の板厚方向の応力分布に曲げ応力を加えて溶接止端の構造的形状応力とする) と Xiao・Yamada 法 (溶接止端において表層から深さ 1mm の箇所の応力値を溶接止端の構造的形状応力とする) についても Haibach 法 (溶接止端から 2mm 離れた箇所の応力値を溶接止端の構造的形状応力とする) と同程度の詳細な記述を追加した。

イタリア：パドバ大学と Zamperla (アミューズメント機器メーカー) の「切欠応力法による鋼溶接継手の溶接止端及び溶接ルート破壊の疲労評価」、イタリアパドバ大学の「鋼並びにアルミニウムの突合溶接継手の疲労強度評価への切欠応力法の適用」について討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 解析ソルバーの精度検証をするための局所応力解法のラウンドロビンテスト[†]
- 局部形状別の縦すみ肉止端部疲労の評価

[†] ラウンドロビンテスト:方法や装置の信頼性の検証のため複数の試験機関で同一の測定を行う共同作業。国際標準試験法の策定や標準試料の選定の際に行われる。



5 修繕・改造・構造モニタリングによる溶接構造物の寿命延長に関する事項

WG 5 では、溶接構造物補修事例データベース (<http://iiw-wg5.cv.titech.ac.jp/>) の維持・拡張を行っている。

「実構造物の寿命延長技術」一覧に掲載する技術項目の検討が行われている。寿命評価のための疲労強度曲線、ボルトによる応力軽減、面外ガセット溶接継手への適用、面内ガセット溶接継手への適用、に関する章立てが行われる予定である。

オーストリア Leoben 大学とスウェーデン王立技術研究所の「疲労を受けた溶接構造物の HFMI による修復と亀裂進展解析」、フィンランドアールト大学の「レーザ溶接ウェブで構成される鋼製サンドイッチパネルのポリマー系充填材による疲労寿命改善」などについて討論が行われた。

6 溶接構造物の疲労試験法及び疲労データ評価法に関する事項

WG 1 では、統計解析手法を正しく適用する手助けとするため、統計解析のためのベストプラクティス（最も効率の良い手法）推奨事項と関連した作業計画表（データシート及びスプレッドシート）の整備を行っている。

以下の ISO 改訂に適宜対応。

改訂進行中

- WG11 (ISO 23788) Testing Machine Alignment
- WG2 (ISO 12106) Axial Strain Control Low Cycle Fatigue

近年更新したもの

- WG8 (ISO 12110 -1 & -2) Variable Amplitude Method, 2013
- WG12 (ISO 1143) Rotating Bar Bending Fatigue, 2011
- WG13 (ISO 1352) Torsional Fatigue Testing, 2011

その他、関連のあるもの

- WG14 TC44 Liaison-Fatigue of Welds & Welded Structures
- WG3 (ISO 12107) Statistical Planning and Analysis of Data
- WG4 (ISO 1099) Axial Force Control Fatigue
- WG6 (ISO 12108) Fatigue Crack Growth Method
- WG9 (ISO 12111) Thermal-Mechanical Fatigue Testing
- WG5 (ISO 4965 -1, -2) Dynamic Force Verification
- WG10 (ISO 12112) Multi-Axis-Fatigue Testing
- WG7 (ISO 12109) Computer Control Testing Data
- WG1 (TR 12105) Fatigue Testing General Principals

ロイドの「平均応力の変動する溶接継手の疲労試験」、首都高速道路技術センターと法政大学の「主応力方向の変動するウェブガセット溶接継手の疲労亀裂進展と強度」、TWI の「溶接継手疲労設計規則への曲げの取込」などについて討論が行われた。

7 残留応力の疲労への影響に関する事項

WG 6 では、母材強度と疲労荷重の種類（高サイクル、低サイクル、高平均応力、変動荷重）に特に関係して、溶接構造物の疲労強度に与える残留応力の影響に関する入手可能な情報や研究について、要約し批評を行っている。

面外ガセット角回し溶接継手の残留応力計測の信頼性、各種残留応力計測手法の可能性と限界について言及した溶接部材の残留応力を決定するための最適指示書、溶接残留応力を決定するためのラウンドロビンテストなどについて検討が行われている。

ブラウンホーファー研究機構材料力学研究所の「管継手における残留応力分布の疲労評価用記述式」、ブラウンシュバイク工科大学と



ミュンヘン工科大学の「溶接鋼の疲労寿命期間内の残留応力の解放と再配分」、フィンランドアールト大学の「HFMI 処理をした応力比の異なる溶接継手の弾塑性挙動に与える残留応力の影響」などについて討論が行われた。

【今後の取り組み】

- ▶ 溶接継手における残留応力の影響に関連する更なるデータ収集
- ▶ 残留応力の影響を考慮した疲労データの解析と評価
- ▶ 溶接部材に適用するショットピーニングプロセスの解析
- ▶ 残留応力とその影響を評価するための工学モデルの評価

8 研究動向紹介他

フランスのジュール・ベルヌ技術研究所（先進複合材料生産技術研究所）並びに STX グループを中心に実施されている「鋼製海洋構造物の軽量化と高性能化（研究期間 2012-2016 年）」において、高張力鋼の溶接部に超音波ニードルピーニングや TIG 溶接仕上げを適用することにより、薄板化による軽量化が図られている。機械産業技術センター（CETIM）では、部材切断方法の違いによる切断面粗さを考慮した溶接継手の疲労等級の補正に関する研究などが行われている。

本年の国際会議のテーマは「高強度材－挑戦と応用－」で、「レーザーハイブリッド溶接」の

セッションなどが設けられていた。阪大接合研と IHI で実施されている「超高強度鋼のレーザーアークハイブリッド溶接部用サイドグループ付試験片を用いたシャルピ衝撃靱性値の評価」や「超高強度鋼のレーザーアークハイブリッド溶接部の靱性評価」などの研究について発表が行われた。レーザーアークハイブリッド溶接部のシャルピ吸収エネルギーも、純レーザー溶接部のシャルピ吸収エネルギーと同様にワイブル応力を用いて、標準試験で得られる吸収エネルギー値へ換算できること（ただし、溶金の幅が異なるため換算曲線は純レーザーとは異なる）、HT780 や HT980 の溶接部の靱性は、溶接協会規格 WES2805 の設計曲線や破壊評価線図において安全側の評価であることなどが示された。HT780 や HT980 の溶接部の疲労評価については今後公表される予定である。

○ 次回会議予定

次回第 69 回国際溶接会議（IIW）は、2016 年 7 月 10 日から 15 日までオーストラリアのメルボルンで開催される。主催はオーストラリア溶接技術協会。

この文書に対するご質問は
海上技術安全研究所 構造基盤技術系
基盤技術研究グループ長 岩田知明
iwata@nmri.go.jp
まで