



会議：第71回 国際溶接会議 (IIW) 第 XIII (疲労 (Fatigue)) 委員会
開催場所：バリヌサドゥアコンベンションセンター、バリ、インドネシア共和国
会議期間：平成30年7月15日～7月20日
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

概要

IIW (国際溶接会議) は、18 の委員会 (品質保証に関する分科会が廃止され、第 XVIII 委員会として新設) を中心に、ワーキンググループ・合同委員会を適宜設置し、各分野の専門家が集まって推奨/勧告 (Recommendation) ・指針 (Guidelines) 作成作業を行っている。また、ISO/TC 44 において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「溶接構造の疲労設計の推奨」・「溶接継手の疲労強度改善方法に関する推奨」・「溶接品質と疲労強度相関に関する指針」・「高周波機械的衝撃処理の推奨」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) 13 委員会・溶接学会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推奨・指針・規格の改正・新規提案の動向、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。

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、疲労強度改善法、疲労設計法、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

WG2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きた。

疲労強度改善技術に関する最新の推奨は、2013年発行の「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推奨)」並びに2016年発行の「IIW Recommendations for HFMI Treatment (HFMI処理の推奨)」である。前者にはHFMIが含まれていないため、近年得られた知見を元に、施工手順・品質管理・疲労強度指針などHFMIに関する技術が盛り込まれた後者が発行された。

今次会合においてWG5が廃止されWG2に統合し、新たなWG2となり、溶接構造物の疲労強度改善・寿命延長・改造工学に関連する技術を取り扱うこととなった。新たなWG2の目的は、溶接・接合技術及び溶加材の革新並びに使用方法の最適化、溶接後処理技術の熱的並びに機械的な使用方法の最適化、修繕した溶接構造物の疲労寿命評価並びに修繕した溶接部のロバスト‡設計による寿命延長方法の解明である。

旧WG2の疲労強度改善技術に関する事項として、カナダのコンコルディア大学、スウェーデンのチャルマース工科大学、スイス連邦工科大学の「超音波衝撃処理をした溶接継手の破壊力学による疲労寿命評価」、オーストリアのレオーベン鉱山業大学とスウェーデン王立工科大学の「高周波機械的衝撃処理鋼継手における降伏強度、応力比、板厚の増加が疲労抵抗に及ぼす影響」、Serba Dinamik (マレーシアのエネルギー機器メーカー)、マレーシアのMARA工科大学、レオーベン鉱山業大学の「AA6061の摩擦攪拌溶接継手の疲労後の高周波機械的衝撃処理による寿命延長」、ブラウンシュバイク工科大学の「ショットピーニングとブラスト洗浄による突合せ継手の疲労強度向上」、フラウンホーファー研究機構の大型構造物生産技術研究所IGPとロストック大学の「ブラスト洗浄による溶接部材の疲労強度向上—影響、結果、品質保証」、フラウンホーファー研究機構の構造耐久性・システム信頼性研究所LBF、スウェーデンのチャルマース工科大学、スイス連邦工科大学、スウェーデン王立工科大学の「局所解法によるTIG再溶融を行った鋼溶接継手の疲労強度評価」、岐阜大学、ヤマダイインフラテクノス (塗装会社)、トーヨー精工の「既存鋼橋の溶接継手へのショットピーニングの適用」などについて討論が行われた。

* 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。

‡ ロバスト：外的要因による誤差因子にばらつきがあっても特性値のばらつきは小さい条件を採用するなどにより、外乱の影響によって変化することを阻止する内的な性質（頑健性）



【今後の取り組み】

- 疲労改善・寿命延長技術に関する分野での進行中のプロジェクトの情報交換
- 「Retrofitting Engineering for Fatigue Damaged Steel Structures (疲労損傷した鋼構造物の改造技術)」の発行(旧 WG 5 関連)。出版に向けてレビュー検討会が設置されることとなった。
- 「Life Extension Solutions by Repair and Retrofit Engineering of Welded Components (溶接構造物の修繕・改造工学による寿命延長方法)」一覧の作成(旧 WG 5 関連)

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。これまでの破壊力学評価解析を基にして詳細に記述した包括的な文書が必要で、最初の草案を自発的に作成する担当が必要な現況である。

溶接構造に関する最新の推奨は、2016 年発行の「Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (溶接構造の疲労設計の推奨) 第二版 (2016 年版)」である。

荷重非伝達型継手に関しては、板厚の影響が幅広く研究され討議が行われているが、溶け込みの有無にかかわらず荷重伝達型継手に関しては不十分である。そのためエジソン溶接研究所においてデータ収集・評価が行われており、今後の疲労設計推奨の更新時に取り込むため、包括的な文書の作成が予定されている。

溶接欠陥、疲労寿命、検査間隔、供与温度、脆性破壊の相互作用に関しては、第 10 委員会(破損を回避する溶接継手の構造性能)と連携して進めていく予定である。

DCNS (フランス艦艇造船所) の「造船に適用される高降伏点鋼 FSW 溶接部の疲労挙動」、名古屋大学の「荷重伝達型十字継手の低サイクル疲労強度に及ぼす溶接溶け込み深さの影響」、東京都市大学と新日鉄住金の「鋼床板におけるプレート型縦リブとスリット無し横リブとの結合部の実験的疲労評価」、ブラウンシュバイク工科大学の「高強度鋼 (S355M, S690Q) の切断端面の疲労強度に関する研究」、ミシガン大学とフィンランド Aalto 大学の「軽量構造の疲労挙動に及ぼす角変形と座屈歪の影響を結合した二次要素による SCF 解法 (Self-Consistent Field 解法: 求めるべき解が自分自身を含むような問題の解析手法)」などについて討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 溶接欠陥の疲労に及ぼす影響に関するレビュー
- サイズ効果に関するレビュー
- 破壊力学を適用した推奨の開発

3 欠陥や溶接品質の疲労への影響に関する事項

WG 4 では、第 5 委員会(非破壊検査及び溶接製品の品質保証)及び第 18 委員会(溶接及び関連プロセスの品質管理、旧 SC Qual: 品質保証特別委員会)と連携して、溶接部周辺の溶接不完全部が疲労挙動に及ぼす影響について評価を行っている。

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いなかった。そこで、溶接品質と疲労強度の相関に関

* ISO 5817:2014 “Welding -- Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam



する指針が作成され、2016年に「IIW guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength（溶接品質と疲労強度に関する指針）」が発行された。ISOにもDTS（技術仕様書原案）として送られ、ISO/TS 20273 Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strengthとして2017年8月に発行している。

板厚5mm以下の薄板溶接部のロバスト設計基準を開発するため、大型構造物の疲労強度に及ぼす溶接歪みの影響評価が行われている。また、許容可能な欠陥サイズ（ブローホール、アンダーカット、溶接切欠形状などを含む）と疲労等級の相関を明らかにするため、内部の不完全部や表面欠陥が疲労強度に及ぼす影響に関していくつかの研究が行われている。

上海交通大学の「高サイクル疲労における溶接欠陥特性と疲労亀裂発生寿命の定量関係」、ブラウンシュバイク工科大学の「溶接品質を考慮したビーム溶接突合せ継手の疲労強度に関する研究」、フラウンホーファー研究機構の材料メカニズム研究所IWM、ハンブルグ工科大学、スイス連邦工科大学、フラウンホーファー研究機構の構造耐久性・システム信頼性研究所LBFの「各種溶接構造詳細の局所溶接幾何パラメータの決定に及ぼす光学計測技術と評価手法の影響」などについて討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 品質管理のデジタル化、品質特性のロバスト性や許容限界を考慮したシステムなどを用いた総合的なアプローチにより、最新の材料や製造技術を構造設計に用いる高性能構造や高性能部材用の疲労設計ガイドラインを開発する。
- 薄板構造物における溶接歪みや目違いの影響を評価するため、ロバストモデルアプローチや新たな設計推奨について検討を行う。
- 溶接切欠、局所的な不完全部、高強度鋼、残留応力、最新の溶接技術などの影響を考慮した高性能溶接を実現するため、幾何特性のデジタル化に関するガイドラインや設計推奨の改良を行う。
- 表面粗さ、硬さ、残留応力など、高強度鋼の切断面の状態の影響を考慮した設計推奨の改良を行う。

4 応力解析に関する事項

WG3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書の作成（第15-A（設計）委員会と連携）を行っている。

溶接ビードによる切欠応力集中の影響は除いた形状応力解法の最新の設計者向けガイドは、2006年発行の初版から改訂され、「Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's guide（ホットスポット構造応力解法による溶接部材の疲労解析－設計者向けガイド）」が2018年に発行した。溶接ビードによる切欠応力集中の影響も考慮する切欠応力解法に関する最新の推奨は、2012年発行の「IIW Recommendations for the Fatigue Assessment of Welded Structures by Notch Stress Analysis（切欠応力解法による溶接構造物の疲労評価の推奨）」である。



公称応力解法や切欠応力解法では、軸力と剪断力とでは異なる SN 特性曲線の傾きを用いるのに対して、構造応力解法では、傾きの区別がない。このように異なる解法間では、多軸応力状態の評価において矛盾が生じていることが合意された。そこで、多軸疲労試験結果のデータバンクを作成することが計画されている。

サウサンプトン大学と TWI の「高分解能三次元溶接止端応力解析並びに溶接止端疲労亀裂発生モニタリングのための交流電圧降下手法」、フランス国立機械産業技術センター、KUHN 社（農業機械等のメーカー）、MANITOWOC（建設機械等のメーカー）の「フランス産業連携作業グループで実施中の疲労による障害が生じている各種シーム溶接の有限要素法による理想化モデル」、川崎重工業と大阪大学の「異なる板厚のアルミニウム溶接継手のホットスポット SN 線図に関する研究」、ミュンヘン応用科学大学の「数値解析を用いたメタモデルの分析・構築・開発による十字溶接継手のノッチ係数の決定」などについて討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 「疲労強度改善技術を施工した継手に対して（弾塑性）切欠応力法を適用する際の手引書の作成
- 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
- 局部形状に基づいた溶接終始端の疲労評価
- 「歪-寿命」解法の適用による溶接構造の疲労評価
- 多軸応力状態の溶接継手の疲労評価

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

WG5 では、これまで溶接構造物補修事例データベースの維持・拡張を継続すると共に、主に疲労荷重の観点から、長期間供与中の溶接構造物の寿命延長計画の開発を行ってきたが、WG5 の目的と活動はWG2 と共通する部分もあるため、WG2 に統合し、WG5 は廃止されることとなった。WG5 議長のフラウンホーファー研究機構の材料メカニズム研究所 IWM の Dr. Majid Farajian は、WG2 議長のスウェーデン王立工科大学の Prof. Zuheir Barsoum と共に、新たな WG2 の共同議長となった。

東京都市大学の「新型圧電センサーを用いた疲労亀裂検出に関する研究」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

WG1 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。

これまで WG1 副議長であった Cetim（フランス国立機械産業技術センター）の Dr. Fabien Lefebvre が新たに WG1 議長を担当することとなった。

ISO/TC 164（金属の機械試験）の SC 4 靱性試験と SC 5 疲労試験が統合され新たな SC 4 疲労・破壊・靱性試験となった。

WG1 で対応している Metallic materials -- Fatigue testing に関する ISO の現状



- ISO 12107:2012 Statistical planning and analysis of data : DIS (国際規格案) の修正版に対して 2017 年中に投票が行われた。
- ISO 12106:2017 Axial-strain-controlled method : 発行済
- ISO 1099:2017 Axial force-controlled method : 発行済
- ISO/WD 22407 Axial plane bending method : 平面曲げ疲労試験法を取り込むための新規提案 (NWIP) が行われ原案の作成段階 (WD)。
- ISO 12108:2012 Fatigue crack growth method : FDIS (最終国際規格案) が承認され、発行待。
- ISO/TR 12112:2018 Principles and designs for multiaxial fatigue testing : 2018 年 4 月に TR (技術報告書) が発行。
- ISO 1143:2010 Rotating bar bending fatigue testing : コメントに関する討議が行われ、DIS (国際規格案) が 2018 年 3 月に承認された。

釜山国立大学の「3.5%Ni 鋼の疲労・破壊特性に及ぼす溶接プロセスと溶接消耗品の影響」などについて討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 変動荷重における SN 曲線の傾き並びにその変曲点に対するデータ解析時の物理的な意味づけ
- デジタル画像相関法 (DIC : Digital Image Correlation) による亀裂検出など新技术を用いる場合の正しい試験手法の検討

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、変動荷重など) 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。溶接構造物の目的適合性評価、残留応力をより適切に考慮した疲労設計推奨の開発、残留応力を評価する工学ツールの開発が行われている。

X 線回折法を用いた溶接部の損傷しやすい領域における残留応力計測の好ましい条件と期待可能な精度を算定するためラウンドロビンテスト*が行われた。計測は S460N の高強度鋼構造の突き合わせ溶接部に対して行われた。正確な計測を行うための困難さが溶接シームの典型的な形状によって異なるため、溶接法はガスマタルアーク溶接とガスタングステンアーク溶接が用いられた。可搬式の小型の回折計ではよく用いられる Ψ モードの標準の実験室用回折計により計測は行われた。残留応力を決定するためのベストプラクティス (最も効率の良い手法) ガイドが作成されている。ラウンドロビンテストの結果は、溶接部の境界領域の残留応力を決定するための推奨の改良に用いられる予定である。

大阪大学の「高周波機械的衝撃溶接後処理により生じる残留応力の実解析」、カールスルーエ工科大学とブラウンホーファー研究機構の材料メカニズム研究所 IWM の「多軸機械的荷重下における溶接残留応力挙動の数値的・実験的評価」、新日鉄住金と法政大学の「UIT により誘起される圧縮残留応力の緩和挙動に及ぼす繰り返し荷重の影響」、ブラウンシュバイク工科大学の「X 線回折法による溶接継手の残留応力の計測に関する推奨—WG 6 のラウンドロビンテストの結果」などについて討論が行われた。

* 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。



【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

Cetim（フランス国立機械産業技術センター）では、溶接終始端の溶接ビード端部が疲労強度に及ぼす影響評価、荷重が加わる際の初期の過荷重が溶接構造物の疲労強度に及ぼす影響評価、疲労強度に及ぼすアンダーカットの影響評価が行われている。

ビューローベリタスでは、単軸荷重、多軸線形荷重、多軸非線形荷重のそれぞれの応力状態における応力集中部の特性を解析し、応力テンソルの特性や感度係数を求め、貨物倉下部玄側ナックル構造下側ホッパー斜板などの応力集中により疲労が厳しい溶接構造詳細へ適用することにより、船体構造への過大多軸荷重の影響評価を行っている。

IRDLD（デュピイ・デ・ローム研究所）と DCNS（フランス艦艇造船所）では、赤外線放射温度計を用いた軍艦の溶接継手の疲労特性の高速評価に関する研究を行っている。

フランス国鉄では、補修溶接後の亀裂進展の抑制や溶接部の疲労強度を改善するためにレーザーピーニングの研究を 2019 年にかけて継続している。

委員会後の国際会議において、腐食と破断解析の 3 つのセッションのうち数件の講演がキャンセルとなり、空いた時間に腐食と破断解析のカテゴリのポスターセッション CF-001「Assessment of Residual Stress in Original and Repair Welds in LPG Storage Vessel Steel」が講演に変更となった。オーストラリアで、60 年代に製造され 90 年代に補修された LPG タンクは、補修後更に 30 年近く経過し、新たな補修が必要な状況である。老朽化した鋼構造の残留応力データが少なく、更なる補修が可能かどうか、可能な場合は今後どのような補修をしたらよいか調査するため、90 年代の補修前の材料の状態（溶接前の母材と溶材の材料特性、補修前の溶接部の残留応力分布）が検出可能かどうか、補修が元の材料にどのような影響を与えるか、補修による残留応力の再配分などについて調査研究が行われている。実構造物の残留応力データを得るため、1m 径×1m 長の 1ton 相当の部分から $500 \times 400 \times 29\text{mm}^3$ を切り出し、残留応力計測が行われた。その結果、未補修のシーム溶接部の HAZ 部では 139MPa であるのに対して、補修されたシーム溶接部では局所応力が 480MPa となっていた。オリジナルの溶接部は、内側が初層の 4 パスの両側からのサブマージアーク溶接で、入熱は内側の方が大きいので外側より硬さが高くなっていた。シーム溶接部は熱処理がされているが、ガス溶接部は熱処理がされておらず、降伏応力の 84% に達する残留応力が生じていた。残留応力を減らすための補修方法の最適化について検討し、耐用年数を予想し延命を図る。また、熱処理により破壊靱性を上げることも検討されている。

9 次回会議予定

次回第 72 回国際溶接会議(IIW)は、2019 年 7 月 7 日から 12 日までスロバキア共和国のブラチスラヴァで開催される。主催はスロバキア溶接研究協会。



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