

会 議：第 74 回 国際溶接会議 (IIW) 第 XIII (疲労 (Fatigue)) 委員会

開催場所：オンライン

会議期間：令和 3 年 7 月 7 日～7 月 14 日 (7 月 7 日～7 月 17 日の期間中に委員会毎に開催)

海技研からの参加者：岩田知明 (産業システム系 物理システム研究グループ長)

概要

IIW (国際溶接会議) は、18 の委員会を中心に、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 委員会及び溶接学会疲労強度研究委員会の委員として第 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第 XIII 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。

オンライン開催による変更点

当初、第 74 回国際溶接会議 (IIW) は、イタリア溶接協会主催で、2020 年 6 月 20 日から 25 日までジェノバで開催される予定であったが、新型コロナウイルスの影響による入国制限の状況から、昨年と同様にオンライン開催に変更となった。これに伴い、2024 年の第 77 回 IIW が、ジェノバで開催される見通し。

Delegation による投票ルール、SharePoint によるドキュメントへのアクセス権、Welding in the World への推薦方法などは、例年と同形式。昨年は中止された WG は、今年は例年と同様に委員会とは別日に設けられ開催された。一方、合同委員会については、併催された委員会もあったが、第 XIII 委員会が関連する第 XV 委員会などとの合同委員会は今年も開催されなかった。

今年の第 XIII 委員会のドキュメント件数 (テクニカル 25 件) 並びに時間枠 (14h) は例年の半分程度の規模であった。例年とは異なり昨年と同様に WG の分野毎にセッションが構成されていないため、本報告では各ドキュメントの内容から推定して分類した。



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きた。また、長期間供与中の溶接構造物の寿命延長計画の開発、並びに溶接構造物補修事例データベースの維持・拡張を行ってきた旧 WG 5 も統合し、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。WG 2 には、サブワーキンググループ WG 2-1 (HFMI)、WG 2-2 (TIG 再溶融仕上げ)、WG 2-3 (ショットピーニング・ブラスト) が設置されている。

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) : ISBN 9781782420644」並びに 2016 年発行の「IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints (溶接継手の疲労強度改善用 HFMI 処理の推奨) : ISBN 978-981-10-2503-7」である。前者には HFMI が含まれていないため、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。また、「Retrofitting Engineering for Fatigue Damaged Steel Structures (疲労損傷した鋼構造物の改造技術)」の発行作業について状況報告が行われ、レビューに急を要することが確認された。

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 とドイツの GSI SLV 社の「バニシング加工 (高硬度半球形状工具の押しならしにより仕上げ面を得る加工法) またはディープローリング加工 ‡ を用いたアルミニウム溶接部の疲労改善」、ミュンヘン応用科学大学とブラウンシュヴァイク工科大学の「線形スペクトル変動荷重下の溶接まま又は HFMI 処理をした横付加物継手に及ぼすスペクトル系列の影響」、オーストリアのグラーツ技術大学とオーストリアシーメンス・モビリティの「公称応力または局所応力を用いた TIG 溶融高強度鋼十字継手の疲労強度照査」、岐阜大学とスウェーデン王立工科大学の「HFMI 補修予疲労溶接継手のき裂開閉口挙動の数値解析」、岐阜大学とヤマダイインフラテクノスの「ショットピーニング施工した鋼橋溶接継手の疲労強度」、名古屋大学の「静的荷重下で HFMI 改善処理をした縦方向付加物継手の疲労強度と残留応力」、名古屋大学の「HFMI 処理により誘起される残留応力の予測」、一般社団法人建設コンサルタント協会、

* 高周波機械的衝撃：超音波圧電素子（電気信号と力を変換する素子）、超音波磁歪素子（磁気信号と力を変換する素子）、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変形を起し、局所幾何形状を滑らかにして応力集中を緩和させるとともに、圧縮残留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。

‡ 回転する高硬度球形状工具によるバニシング加工で、押しならしにより仕上げ面を得ることに加えて、ショットピーニングと比較して加工面表層からより深い部位まで圧縮残留応力を加えることができ、疲労強度を改善するために用いられる。



関西大学、日本橋梁建設協会、国土交通省の「鋼床板中の高疲労耐性新型垂直補剛材結合部詳細」、大阪大学の「付加溶接による疲労寿命延長、並びに、スプラインビード形状を考慮した高性能応力集中係数式によるその照査」について討論が行われた。

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。しかしながら、疲労問題への破壊力学の適用は最先端の技術であり、現行の IIW 推奨で規定される溶接継手への標準化手法が明確でなく、包括的な文書が必要である。

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) : ISBN 978-3-319-23756-5」である。本推奨は各種疲労関連規則の付属規則として使用されるのみならず、学術分野の参考文献として広く引用されている。次の改訂作業が行われており、統計評価 (JWG-293-21)、板厚効果 (JWG-295-21)、有効切欠応力 (JWG-299-21、JWG-300-21)、疲労照査 (JWG-301-21) などに関する項目の改定案が作成されている。

疲労設計推奨の各項目 (破壊力学、板厚効果、溶接欠陥・疲労寿命・検査間隔・供与温度・脆性破壊のそれぞれの相互作用、疲労強度改善技術) の改訂作業進捗状況について、概要 (JWG-298-21) などにより活動報告が行われた。IIW の溶接構造の疲労設計の推奨と溶接品質に関する ISO 5817*との整合表は板厚 10mm を対象としており、板厚が過大になるほど過剰に安全側の評価となっているため、整合表の拡張が必要である。

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では、切欠きに起因する効果などの疲労寿命が考慮されておらず、IIW の溶接構造の疲労設計の推奨と整合していなかった。そこで、2016 年に「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指針) : ISBN 978-3-319-19197-3」が発行され、ISO/TS 20273:2017 Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength としても 2017 年 8 月に発行している。

薄板構造物の溶接誘起変形、高強度鋼の切断面の状態、高性能溶接部や構造、付加製造による部材や構造の疲労挙動について活動報告が行われた。

ミュンヘン応用科学大学の「軟鋼部分溶込突合溶接部の疲労強度－実験・解析結果及び経済性－」により、現行の IIW の溶接構造の疲労設計の推奨では、厚板では未溶着部の疲労強度に及ぼす影響を過大に評価しているため、現状 FAT36 とされている疲労等級に対して、板厚の 10%未満

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

† AWS D1.1 “Structural Welding -- Steel”



のギャップ長 4mm または 6mm では FAT71 (+6 等級)、板厚の 20%未満のギャップ長 8mm では FAT63 (+5 等級) の適用可能性について提案され討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 薄板構造物の溶接誘起変形：頑健性モデル
- 溶接切欠の影響・局所的な不完全部・材料の影響・最新溶接技術を考慮した高性能溶接部や構造
- 表面粗さ・硬さ・残留応力の複合的な影響を考慮した高強度鋼の切断面の状態
- 付加製造による部材や構造の疲労挙動：溶接欠陥・残留応力・表面形状の相互作用の特性解析とモデル化
- 疲労照査のための幾何特性（切断面粗さなど）に関するガイドライン（WG1 と連携）

4 応力解析に関する事項

WG3 では、ホットスポット応力解法（幾何形状に起因する構造的応力集中のみを考慮して評価する方法）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）による局部的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。

溶接ビードの局部的切欠による応力集中の影響は除いた構造的応力解法の最新の設計者向けガイドは、2018 年発行の「Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's guide（構造的応力(ホットスポット応力)解法による溶接部材の疲労解析－設計者向けガイド）：ISBN 978-981-10-5567-6」である。溶接ビードの局部的切欠による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）：ISBN 9780857098559」である。

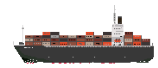
ドイツのクラウスタール技術大学とフラウンホーファー研究機構の材料メカニズム研究所 IWM の「弾塑性材料挙動を考慮した溶接線の疲労照査」、ブラウンシュバイク工科大学、ダルムシュタット工科大学、フラウンホーファー研究機構の構造耐久性・システム信頼性研究所 LBF の「レーザー溶接によるギャップを有する 16MnCr5 クロムマンガン鋼突合溶接部：溶接品質と疲労強度照査の結果」、ミュンヘン応用科学大学の「数値解析とメタモデル構築に基づく荷重非伝達横補剛材の切欠係数の決定」について討論が行われた。

5 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。

溶接構造の疲労試験の最新の推奨は、ISO/TR（技術報告書）14345:2012「Fatigue -- Fatigue testing of welded components – Guidance」である。疲労試験データの統計解析に関するベストプラクティス指針「Best Practice Guideline for Statistical Analysis of Fatigue Results」原案（XIII-2807-19）の校正作業は継続中。

フィンランドのラッペーンランタ大学の「荷重伝達十字継手の溶接ルート疲労強度照査における軸荷重と曲げ荷重の相互作用」、ハンブルグ工科大学の「溶接継手の疲労強度に及ぼすサブゼロ



温度の影響」、ケンブリッジ大学の「曲げ荷重を受ける溶接継手の疲労照査」について討論が行われた。

6 残留応力の疲労への影響に関する事項

WG6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が行われている。

今回はWG6の活動報告は行われなかった。また、今回はWG6に関するドキュメントはなかった。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「Best Practice Document on Residual Stress Determination in Welded Components」の作成作業は継続中。

7 2021 IIW INTERNATIONAL CONFERENCE

年次会議併催初のオンライン開催として、「溶接接合を革新するAI」をテーマとした招待講演者のみによる国際会議が行われた。

オーストリア Know-Center では、理論誘導型機械学習に取り組んでいる。多くの工学領域では、過去数十年の間、理論駆動型モデルが導入されてきた。一方、デジタル化の近年の傾向は、これらのモデルをデータにより補完している。精度と FEM 解析モデルの複雑さはトレードオフの関係にあるが、理論モデルとデータを結合した理論誘導型機械学習を用いることにより、それほど複雑ではない解析モデルでも、より高精度の結果を得ることができる。

フランス溶接学会では、エキスパートシステムやマルチセンサーデータ融合などの機械学習に取り組んでいる。非破壊検査結果の判定に AI を導入することにより、時間とコストを削減し、結果の解析を容易にし、誤判定率を減らすことが可能である。

物質材料研究機構では、実験・理論・経験則・データベース・数値シミュレーションなどを融合して、コンピューター上で材料のプロセス・組織・性質・パフォーマンスなどを関連づけるマテリアルズインテグレーション（MI: Materials Integration）に取り組んでいる。一例として、材料のプロセスからクリープ破断時間を予測可能とする、溶接・微細組織・クリープ特性・クリープ損傷照査の4つのモジュールから構成されるワークフローを開発した。将来的には、AI を組み合わせることにより、クリープ破断時間を最長にする溶接条件最適化など、要求性能実現のための材料の逆設計に用いられる。

川崎重工では、Kawasaki Production System (KPS)を開発し、デジタルスマート工場を構築中である。熟練溶接工の技術を自動化したロボット溶接システムを開発した。また、ディープラーニングを用いて、熟練検査職員の非破壊検査技術を自動化した画像判定システムを開発した。

ケンタッキー大学では、ロボット溶接の適応性に取り組んでいる。この分野で得られた過去の知見を再調査し、原理や自然法則を解析し、機械学習・ディープラーニングや、人間とロボットとの共同に関する学習など、最新手法が紹介された。

EWI (Edison Welding Institute) では、供与適正評価のための三種類の機械学習・人工知能に取り組んでいる。一つ目は、例えば、超音波溶接されたバッテリータブが十分な引張強度を有するかを判定するためのプロセス中のモニタリングと機械学習による分類アルゴリズムである。二つ目は、付加製造による部材の疲労寿命を、製造パラメーターと製造後の表面仕上げ精度に関連づけるためのベイジアンネットワーク（因果関係を確率により記述するグラフィカルモデル）である。



三つ目は、供与中の部材の非破壊検査データの分類に用いることができる画像認識である。これらの三つを組み合わせると供与適正評価が行われる。

8 次回会議予定

次回第 75 回国際溶接会議(IIW)は、正規の形態で、2022 年 7 月 17 日から 22 日まで日本の東京（グランドニッコー東京台場）で、2022 日本国際ウェルディングショー（2022 年 7 月 13 日から 16 日：東京ビッグサイト）に併せて開催される予定。主催は日本溶接協会及び日本溶接学会による JIW（日本溶接会議）。

また、第 XIII 委員会の 2022 年の中間会合は、2022 年の 3 月に今年と同様にオンラインで開催される予定。

この文書に対するご質問は
海上技術安全研究所 産業システム系
物理システム研究グループ長 岩田知明
iwata@m.mpat.go.jp
まで



Table 1 IIW の委員会構成

- C-I / Additive Manufacturing, Surfacing, and Thermal Cutting
- C-II / Arc welding and Filler Metals
- C-III / Resistance Welding, Solid State Welding and Allied Joining Process
- C-IV / Power Beam Processes
- C-V / NDT and Quality Assurance of Welded Products
- C-VI / Terminology
- C-VII / Microjoining and Nanojoining
- C-VIII / Health, safety and environment
- C-IX / Behaviour of Metals Subjected to Welding
- C-X / Structural Performances of Welded Joints - Fracture Avoidance
- C-XI / Pressure Vessels, Boilers and Pipelines
- C-XII / Arc Welding Processes and Production Systems
- C-XIII / Fatigue of Welded Components and Structures
- C-XIV / Education and Training
- C-XV / Design, Analysis, and Fabrication of Welded Structures
- C-XVI / Polymer Joining and Adhesive Technology
- C-XVII / Brazing, Soldering and Diffusion Bonding
- C-XVIII / Quality Management in Welding and Allied Processes

Table 2 C-XIII 委員会（疲労）の構成

- Joint Working Group XIII-XV / Fatigue Design Rules
- C-XIII-WG1 / Fatigue Testing and Evaluation of data for Design
- C-XIII-WG2 / Fatigue Strength Improvement and Life Extension of Welded Components and Structures
 - C-XIII-WG2-SWG1 / HFMI (High Frequency Mechanical Impact)
 - C-XIII-WG2-SWG2 / TIG Re-melting Dressing
 - C-XIII-WG2-SWG3 / Shot Peening and Blast
- C-XIII-WG3 / Stress Analysis
- C-XIII-WG4 / The Influence of Weld Imperfections on Fatigue Strength
- C-XIII-WG5 (2018年に旧WG2と統合され廃止)
- C-XIII-WG6 / The Influence of Residual Stress on Fatigue