



会議：第70回 国際溶接会議（IIW）第XIII（疲労（Fatigue））委員会

開催場所：上海国際会議中心、上海、中華人民共和国

会議期間：平成29年6月25日～6月30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、17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。

#### 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<sup>\*</sup>)、低変態温度溶接ワイヤ<sup>†</sup>、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。

疲労強度改善技術に関する最新の指針は、2013 年 2 月発行の「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指針)」並びに 2016 年 9 月発行の「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)」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。

WG 2 内に、TIG 再溶融仕上げ、HFMI、ショットピーニング・ブラストをそれぞれ取り扱うサブワーキンググループを設けるため、WG 2-1, WG 2-2, WG 2-3 の責任者が決められた。WG 2-1 では、HFMI の疲労強度改善効果に及ぼす母材強度・板厚・応力比の影響に対するガイドラインの妥当性を検証するため、母材強度・板厚・応力比の影響に関する研究を要約し、HFMI ガイドラインの更新を行う。WG 2-2 では、IIW 指針・ガイドライン案中の TIG 再溶融仕上げの箇所の更新を行う。WG 2-3 では、ショットピーニング・ブラストの新たな指針案を作成するために過去～最近の研究や結果の要約を行う。

フラウンホーファー研究機構材料メカニズム研究所 IWM とレオーベン鉱山業大学の「HFMI 処理過程を数値最適化するための各種解析手法の適用」、フィンランド Aalto 大学の「変動荷重条件下での HFMI 処理継手の許容応力」などについて討論が行われた。

#### 【今後の取り組み】

- TIG 再溶融仕上げにより改善処理をした溶接部の疲労データのレビュー
- 新たに追加された実験データを基にした HFMI ガイドラインの更なる検証
- ショットピーニング・ブラストによる疲労寿命改善
- HFMI 処理をした厚板溶接部の疲労試験
- HFMI と TIG の両方により改善処理をした溶接部の疲労試験
- 実荷重履歴を伴う大型構造物における更なる事例研究

---

<sup>\*</sup> 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。

<sup>†</sup> 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。



## 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。

溶接構造に関する最新の指針は、2016 年 3 月発行の「Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (溶接構造疲労設計指針) 第二版 (2016 年版)」である。

IIW の疲労設計指針の設計モデルの妥当性を補強するため、板厚や曲げの影響についての破壊力学を用いたより性格な予測が特に重点的に取り組まれている。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。ISO, IIW, DNV など既存のコードや指針の妥当性を比較検証するため、荷重伝達型継手において、主板厚、付加物板厚、溶け込み深さ、曲げなどの疲労強度に及ぼす影響に関して更なる数値解析結果が必要とされており、将来的には荷重伝達型継手の板厚効果を含む包括的な指針の確立が予定されている。

岐阜大学の「800MPa 級鋼のアンダーマッチ溶接継手の局所応力解析による疲労強度評価」、名古屋大学、三井造船鉄鋼エンジニアリング、三井造船の「レーザークハイブリッド溶接による十字継手並びに連続縦方向両面すみ肉継手の疲労強度」、新日鐵住金、東京都市大学の「車両荷重が負荷された鋼床板の疲労に及ぼすスリットとリブ形状の影響」、フィンランドの Lappeenranta 技術大学、Outotec 研究センターの「4R 法による二相ステンレス鋼並びに超二相ステンレス鋼の疲労強度評価」、フィンランド Aalto 大学の「有効応力法による疲労に及ぼす溶接アンダーカットの三次元幾何形状の影響」、オーストリア Leoben 大学、Voestalpine スチール社の「超高強度鋼突合せ継手の目違いによる切欠きの疲労に及ぼす影響解析」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

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完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いなかった。そこで、溶接品質と疲労強度の相関に関する最新の指針が作成され、2016 年 3 月に「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 IIW ガイドライン)」が発行された。ISO にも DTS として送られ、ISO/TS 20273 Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength として 2017 年 7 月に発行された。

薄板溶接構造の疲労設計法を開発するため、溶接により誘発される歪みの検討が行われている。板厚 5mm 以下を対象としており、歪みは大きくないものの、厚板の場合とは形状が異なっているが、現行のガイドラインや規則では考慮されていない。溶接欠陥、不連続アンダーカット、溶接不整合、高強度鋼の表面粗さの影響、設計や製造における品質状況などを取り扱う。得られた成果を基に、現在発行済みの IIW ガイドラインの改正を行う。

---

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



ブラウンシュバイク工科大学の「熱切断端面の疲労強度－ISO9013 品質区分の影響」、フラウンホーファー研究機構材料メカニズム研究所 IWM の「接合プロセスに起因する不完全部を含む溶接継手の疲労評価」などについて討論が行われた。

#### 【今後の取り組み】

- 現行ガイドラインを発展させた高品質用疲労設計ガイドラインを作成し、高性能構造や高性能部材を基にした構造設計により、（設計時に疲労強度向上の恩恵が受けられる）高品質材料や高品質製造方法を活用できるようにする。
- “溶接まま”品質で通常得られるよりも高い疲労強度となる可能性を検討する。そのためには、品質管理のデジタル化や許容限界を考慮したシステムなどを用いた総合的な取り組みが必要である。
- 内部欠陥や外部欠陥、高強度鋼、薄板や厚板、レーザハイブリッド溶接のような新しい溶接技術などを考慮した高品質溶接に基づく設計法の開発を行う。
- 異なる品質レベル別の疲労設計指針を開発するため、切断面の疲労に及ぼす表面の健全性（粗さ、硬さ、残留応力）の影響に関する研究を行う。

#### 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。

「Designer's guide for Structural hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components（構造的応力集中解法による溶接部材の疲労解析のための設計者向けガイド）」の第二版は 2017 年中には発行される予定。構造的応力集中解法の最新の指針は、2006 年 9 月発行の「Fatigue analysis of welded components: Designer's guide to the structural hot-spot stress approach（溶接部材の疲労解析：構造的応力集中解法の設計者向けガイド）」。

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\*について引き続き検討が行われた。

フラウンホーファー研究機構 構造耐久性・システム信頼性研究所 LBF の Dr. Jörg Baumgartner 氏が新たに WG3 議長を担当することとなった。

#### 【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）解放の適用（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

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・拡張を継続しており、引き続き、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う。

### 【今後の取り組み】

- 鉄道や航空機産業、電力やエネルギー部門など、橋梁以外の異なる機械工業分野の（溶接構造物補修）事例収集
- 関連産業のWG5への参加を図る
- XIII委員会の特にWG2など他のWGやIIWの他の委員会との連携を構築する

## 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。

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）へ追加する事例案を含むコメントを盛り込んだ修正版がWGで作成される予定である。
- ISO 12106:2017 Axial-strain-controlled method : FDIS（最終国際規格案）に対して投票が行われ、ISO 12106:2017として発行された。
- ISO 1099:2017 Axial force-controlled method : 取り込まれた修正箇所の討議後、FDIS用にDIS（国際規格案）がISOに提出され、ISO 1099:2017として発行された。
- ISO 12108:2012 Fatigue crack growth method : CD（委員会原案）を作成中。
- ISO DTR 12112 Multi-axis fatigue testing method : 修正箇所が承認されたDTR（技術報告書案）がISOに提出され発行された。
- ISO 1143:2010 Rotating bar bending fatigue testing : 記述に不確実な部分のあるため、現行のISO 1143を修正することがTC164/SC5にて決定され、修正に関する討議が行われた。

ハンガリーのミシュコルツ大学の「高強度鋼ガスマタルアーク溶接継手の疲労亀裂進展挙動に及ぼす強度マッチングの影響」、マイヤー・トゥルク造船、フィンランド Aalto 大学、ハンブルグ工科大学の「プラズマ切断・グラインダー・サンドブラストなどの造船所における生産工程後の高強度鋼の疲労強度」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

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。

残留応力を考慮した設計規則を工学ツールとして開発するには、異なる継手種類の残留応力を決定する標準が必要である。溶接継手に適用可能な確立された各種計測技術について残留応力計測手法の可能性と限界が要約され、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。

ガスマタルアーク溶接及びガスタングステンアーク溶接による高強度鋼突合せ継手の溶接残留応力をX線回折計測技術により高精度に決定するためのラウンドロビンテスト、不確実性や推定を伴う実際の残留応力計測を基に高精度に残留応力を近似し設計規則で残留応力を取り扱えるよ



うにするためのモデルの開発、低変態温度溶接ワイヤやブラスト処理のような疲労強度に影響を及ぼす残留応力を軽減させる従来とは異なる手法などについて検討が行われた。

#### 【今後の取り組み】

- 残留応力計測手順の実用指針の開発
- 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開発

## 8 研究動向紹介他

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行っている。

ピーニング処理を扱うフランスの SONATS 社では米国 Empowering 社並びに米国 Purdue 大学と共同で、UIT は工場内での製造だけでなく実構造物の補修においても非常に効果があるので、疲労抵抗に及ぼす UIT の影響を確認するための実サイズの桁橋の疲労試験を行っている。

フランスのアルセロールミタルでは、自動車の軽量化のため、溶接止端の応力集中部を緩和することにより溶接部の疲労強度を向上させ、加工性を従来ハイテンより高めた組織制御型ハイテンの特性を活用した車台の薄板化が行われている。

## 9 次回会議予定

次回第 71 回国際溶接会議(IIW)は、トルコ共和国イスタンブールの予定であったが変更となり、2018 年 7 月 15 日から 20 日までインドネシア共和国のバリで開催される。主催はインドネシア溶接協会。

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