Ⅲ 継手性能の評価

3. 疲労に関する研究動向レビュー

毛利 雅 志*

Review of the Trend of Recent Studies of Fatigue

by MOURI Masashi*

キーワード：疲労，疲労寿命，疲労強度

3.1 はじめに

2008年9月のリーマンショック以降の世界的な急激な景気減退や地球温暖化防止のための厳しいCO₂排出規制への対応など，ここ数年で産業界は劇的な変化を経験した。この社会情勢やニーズの変化に応じて様々な疲労に関する研究が報告されている。そこで本報では最近の2年間に発表された疲労に関する論文を中心に，金属材料の疲労特性に関する研究，溶接継手の疲労に関する研究，実構造物に関する研究に分けて動向の一部を紹介する。

3.2 母材の疲労特性に関する研究

高強度鋼やTi-6Al-4V合金を対象とした超高サイクル疲労に関する研究が盛んに行われてきたが，最近ではアルミニウム鋳造合金を対象とした研究報告があり，鋳造欠陥を起点とした内部破壊が10⁷回以上の繰返し数においても生じることが報告されている^{1,2)}。またこれまでは超高サイクル疲労領域における破壊に水素の関与が注目されていたが，近年ではCO₂削減に伴う水素利用機器向けに各種構造材料の疲労強度に及ぼす水素の影響に関する研究が数多く報告されている^{例えば3-6)}。

一方，溶接構造物の鉄鋼材料では金属組織制御によりき裂進展抵抗の高い耐疲労鋼がミルメーカーにより開発され，船舶や橋梁などへの適用が進んでいる。既存の研究では一定振幅荷重下での疲労き裂進展特性が従来鋼より優れていることが報告されていたが，勝田らは過大荷重やブロック荷重下での耐疲労鋼のき裂進展挙動について検討した⁷⁾。その結果，図1に示すように従来鋼に比べて耐疲労鋼は荷重変化に伴うき裂進展の遅延効果が顕著であることを示した。またき裂先端近傍のヒステリシスループの計測から，遅延効果が顕著となった原因が，従来鋼に比べて耐疲労鋼のRPG荷重が増加し疲労き裂進展に寄与する応力拡大係数範囲が低下することを明らかにした。今後ランダム荷重下での進展挙動の検証によって船舶のような波浪外力に伴う不規則荷重下でも疲労き裂の進展を抑制できることが明らかになると考えられる。

2007年7月の新潟県中越沖地震では柏崎刈羽原子力発電所をはじめとして多くの機器や構造物が大きな被害を受けた。この地震を機に外観上割れや変形などが見られない機器や構造物を対象に，地震に伴う過大なひずみに伴う健全性評価の研究が小川らにより行われた⁸⁻¹⁰⁾。過大な予ひずみが疲労限度や低サイクル疲労の累積損傷に与える影響が検討されており，これらの知見が本年3月の東北地方太平洋沖地震で被災した構造物の健全性評価に適用されることが期待される。

図1 過大荷重に伴う耐疲労鋼の疲労き裂遅延 (Steel F：耐疲労鋼，Steel K：従来鋼)⁷⁾

3.3 溶接継手の疲労に関する研究

溶接継手の疲労強度を改善する方法として，グライNDER処理や超音波ピーニングが確立され実機への適用が増えている。これらの手法はき裂の起点となる形状不連続部の応力集中緩和や圧縮残留応力の導入により，疲労き裂の発生を抑制し疲労強度を改善することができる。一方，山田らは図2に示すように平板の表面き裂開口部をタガネの打撃による塑性流動により閉口させることで，比較的小さな疲労き裂の進展を停留もしくは遅延させる衝撃き裂閉口処理 (ICR) を提案した¹²⁾。これを溶接継手へ応用し面外ガセット継手の疲労強度を大幅に改善することに成功した¹³⁾。また溶接継手に対する適用ではないが，高橋らは高強度材の表面に存在する微小欠陥に対してショットピーニングを実施することで，欠陥周辺部に圧縮残留応力を導入することで疲労強度を大幅に改善できることが報告されており¹⁴⁾，大掛かりな補修を行うことなく微小な欠陥やき裂を簡易に無害化が可能となるため，今

後多くの機器や構造物への適用が期待される。

また溶接止端部に発生した表面き裂進展の評価については、WES2805や白鳥らの影響係数法を用いて評価されることが多い。白鳥らの手法では平板の表面き裂の解析に基づき整備された影響係数と溶接継手のき裂位置における応力分布から溶接部におけるき裂の応力拡大係数を容易に算定することができるが、応力拡大係数を高めに推定することが指摘されていた。そこで大沢らは図3に示すように隅肉継手の止端部にき裂をモデル化し、白鳥

図2 ICR処理¹²⁾

図3 溶接止端部における表面き裂の解析¹⁵⁾

と同様の手法により影響係数のデータベースを整備した¹⁵⁾。この改良された影響係数を用いることにより、隅肉溶接の止端に生じたき裂の応力拡大係数を高精度に推定することが可能となることが報告された。

3.4 実構造物の疲労に関する研究

橋梁分野におけるトピックスは既設道路橋の鋼床版の損傷に対する有効な補修法が確立されたことである。既設鋼床版のデッキプレートと閉断面リブの溶接部を起点とする疲労損傷は、車両が溶接部直上近傍を通行する際に局所的な曲げ変形が作用することにより損傷することが報告されている。三木らは図4に示すように鋼繊維で補強されたコンクリート (SFRC) をデッキプレートの上に敷設することで、荷重を分散すると共に局所的な曲げ変形を抑制しデッキプレートに発生する応力を効果的に低減できることを明らかにした¹⁶⁾。また小野らは同施工を実施した供試体による疲労試験により効果を確認し¹⁷⁾、SFRCが首都高速道路の補強に適用されている。

一方、船舶関係におけるトピックスとしては、超大型コンテナ船のホイッピング振動に伴う疲労被害の問題が挙げられる。船長が300mを越える大型コンテナ船は、船体が細長く船体の縦曲げ剛性が相対的に低下し、スラミング衝撃荷重を受けた後の弾性応答に伴う振動応力 (以下、ホイッピング振動応力と称する) が発生することが実船計測により明らかとなっている (図5参照)。このホイッピング振動応力に起因する疲労損傷は現在の疲労設計には考慮されていないため、同現象の発生頻度と疲労被害を定量的に把握する必要がある。小川らは弾性模型による水槽試験結果と海象発生確率から、ホイッピング振動応力のレベルと頻度の検討を行った¹⁸⁻²⁰⁾。また累積損傷則を用いて疲労被害を算定したところ、振動成分

図4 SFRCによる鋼床版の補強^{16), 17)}

図5 ホイッピング振動の一例²⁰⁾

(小波)の変動による疲労被害は僅かであるが波浪応答応力に振動成分が重畳しピーク応力増大に起因した疲労被害を検討する必要性が報告されている²¹⁾。今後は同現象を模擬した疲労試験により、ホイッピング振動応力が疲労被害に与える影響を定量的に明らかにする必要があると考えられる。

3.5 おわりに

国内においては、地球温暖化防止に伴う CO₂ 削減への対応に加えて、本年3月の東北地方太平洋沖地震により原子力発電所が大きな被害を受け電力不足への対応が喫緊の課題となっている。今後はより多様なエネルギー利用に関係した研究が必要になると考えられる。また被災地の復興に伴う構造物や既設社会インフラの延命化に対する健全性評価など、疲労の研究分野の役割はますます重要になると考えられる。

文 献

- 山田, 宮川: アルミニウム合金ダイカストの内部欠陥起点型疲労破壊機構の検討, 材料, Vol.58, No.12, (2009), pp.990-996.
- 中村, 酒井, 平野, 望田: アルミニウム合金の長寿命疲労挙動に対するアルマイト処理および微細組織の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 76巻, 764号, (2010), pp.386-388.
- 富岡, 木口, 田村: 自動車用圧縮水素容器 (VH3) の疲労寿命に及ぼす環境温度影響, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.2, (2010), pp.501-506.
- 大塚, 大神, 滝: FC 車用水素タンク疲労メカニズムの研究, トヨタテクニカルレビュー, Vol.57, No.1, (2010), pp.107-112.
- 尾田, 野口, 東田: 低圧水素ガス環境中におけるアルミニウム合金 A6061-T6 の疲労き裂伝ば速度に及ぼす繰返し速度の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 75巻, 760号, (2009), pp.1746-1753.
- 矢野, 本間, 福島, M. Arnaud, F. Jader, 松岡: 70 MPa 水素ステーション蓄圧器用 SNCM439 鋼の疲労特性に及ぼす水素と繰返し速度の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 76巻, 767号, (2010), pp.918-927.
- 勝田, 久保, 誉田, 古賀, 牛島, 河野: 耐疲労鋼の疲労き裂伝播特性における遅延効果, 日本船舶海洋工学会論文集, 第12号, (2010), pp.209-217.
- T. Ogawa, M. Nakane, K. Masaki, S. Hashimoto, Y. Ochi and K. Asano, Investigation of Effect of Pre-Strain on Very High-Cycle Fatigue Strength of Austenitic Stainless Steels, J of Power and Energy Systems, Vol.3, No.1, (2009), pp.38-50.
- 高木, 鳥居, 小川, 小茂島, 中根, 菅野, 板谷, 齋藤: 低サイクル疲労寿命に及ぼす予ひずみの影響, 非破壊検査, Vol.59, No.6, (2010), pp.267-271.
- 蓮沼, 宮田, 坂上, 小川: 低合金鋼 SFVQ1A の低サイクル疲労における微小き裂進展に及ぼす予ひずみ履歴の影響, 材料, Vol.60, No.3, (2011), pp.210-216.
- 菅野, 中根, 寄川, 高木: 低サイクル疲労寿命に及ぼす繰返し塑性予ひずみの影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 76巻, 764号, (2010), pp.375-377.
- 山田, 石川, 柿市: 疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, (2009), pp.961-965.
- 石川, 山田, 柿市, 李: ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, (2010), pp.264-272.
- 高橋, 天野, 花折, 安藤, 高橋: き裂状表面欠陥を有する高強度鋼のショットピーニングによる疲労限度向上と表面欠陥の無害化, 材料, Vol.58, No.12, (2009), pp.1030-1036.
- 大沢, 澤村, 岡田, 重田, 辻: 船体構造中の溶接継手に影響係数を適用する際の計算精度に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集 第12号, (2010), pp.201-208.
- 三木, 鈴木, 加納, 佐々木, 石田, 高森: 鋼床版の疲労への SFRC 舗装による予防補強とその健全性モニタリング, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, (2006), pp.950-963.
- 小野, 平林, 下里, 稲葉, 村野, 三木: 既設鋼床版の疲労性状と鋼繊維補強コンクリート敷設工法による疲労強度改善効果に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, (2009), pp.335-347.
- 小川, 岡, 川野: 大型船舶の曲げ振動が疲労強度に及ぼす影響についての研究, 溶接学会疲労強度研究会 FS-1175-10, (2010).
- 川野, 小川, 岡: ホイッピングによる高次振動が重畳した船体疲労評価に関する一考察 (第2報), 日本船舶海洋工学会講演論文集 第10号, (2010).
- 深沢, 高木, 小川, 岡: 動的荷重を考慮した船体強度評価についての考察, 日本船舶海洋工学会講演論文集 第11号, (2010).
- 岡, 川野, 小川: 船体弾性振動の発生確率を考慮した疲労評価手法について, 日本船舶海洋工学会講演論文集 第10号, (2010).