

高圧設備の長期使用に対応した疲労強度評価手法に関する研究

A Study on Fatigue Strength Evaluation Technique applicable for Long-Term Use of High-Pressure Equipments

佐々木 哲也, 本田 尚, 山際 謙太 機械システム安全研究グループ

■ SASAKI Tetsuya, HONDA Takashi, YAMAGIWA Kenta

高度経済成長期に製造された圧力設備をはじめとする産業機器には依然として使用可能なものも多いが、長期間の使用によって疲労破壊の危険性は高まっていると考えられる。しかし、従来の疲労強度設計は長期間使用を前提とした疲労強度データに基づいていないため、これらの機器の安全性を十分に評価することができないという問題があった。本研究では産業機器に使用される各種鉄鋼材料の長期間使用に対応した疲労強度データを取得するとともに、溶接継手の疲労強度向上手法などについても検討し、産業機器の安全な長期間使用に資することを目的とする。

1 産業機器の長期使用と疲労強度上の問題点

わが国では経済の低成長化に伴い、各種産業機器に対して設計寿命を超えて使用したいという要求が産業界において高まっている。しかし、長期間の使用によって機器に負荷される荷重の回数は増大することになるため、寿命延伸によって疲労破壊の危険性は高まることになる。

一般に、鋼構造物の疲労破壊を防止するためには、材料の疲労試験を行って図1に示すようなS-N線図と呼ばれる疲労設計線図を求め、設計時に想定した荷重繰返し数に対して破壊が生じないようにする。しかし、疲労強度設計に使用されている疲労設計線図(S-N線図)は荷重繰返し数 10^7 回程度までのデータで作成されており、長期間使用を前提としたものになっていない。

一方、近年の研究によれば、工具鋼や低合金鋼などの高強度鋼では、荷重繰返し数 10^7 回程度以上の長寿命領域で疲労強度が低下し、疲労限以下の応力振幅であっても疲労破壊が生じる恐れのあることが明らかになっている。従って、労働者の安全を確保しつつ、機器の寿命延伸を可能にするためには、長期間使用に対応した材料の疲労強度特性を明らかにする必要がある。また、疲労破壊が最も問題となる溶接部については、継手形式に応じた疲労強度評価に加えて、疲労強度を向上させる手法の開発が望まれる。

さらに、実際に疲労破壊事故が発生した場合には、事故原因の究明が必要となる。この場合には、材料の破断面の模様から荷重された荷重の大きさや繰返し数を推定することができれば、実際に荷重されていた荷重を推定できるため、同種災害の再発防止に寄与することができる。

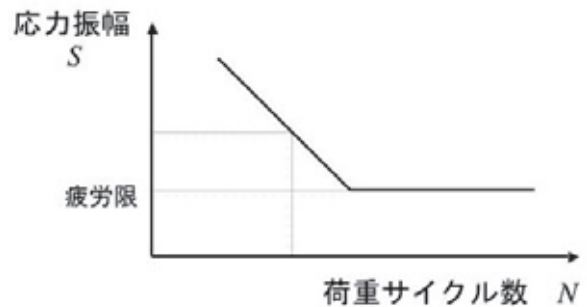


図1 S-N線図の一例

2 研究の全体像

本研究では、まず、高圧設備をはじめとする各種産業機器で使用される鉄鋼材料の母材および溶接部について、長寿命領域(荷重繰返し数 10^7 回以上)の疲労設計線図(S-N線図)を取得する。

また、高圧設備やクレーンなど大型の構造物や機械では、溶接が多用されているが、溶接部の長期間使用に対する強度(疲労強度)は、使用する材料の強度にあまり影響されない。このため、高強度な材料の長所を生かされておらず、そこで、各種産業機器で使用される溶接継手の疲労強度を向上させ、高強度材料を長期間にわたって安全に使用するための手法を開発する。

さらに、長期間使用した産業機器が疲労破壊して災害が発生した場合に、破断面の模様からその部材に荷重された応力の大きさを推定するための手法を開発し、災害調査に資することも目的とする。

上記を可能にするため、本研究は3つのサブテーマに分けて実施する。以下、それぞれのサブテーマの概要について述べる。

①鉄鋼材料の長寿命疲労強度評価

通常の電気油圧サーボ疲労試験機（最大加振周波数 20Hz 程度）に加え，超音波疲労試験機（加振周波数 20kHz）や回転曲げ疲労試験機（最大加振周波数 60Hz，図 2 参照）を使用して，高圧設備をはじめとする各種産業機器で使用される鉄鋼材料素材（母材）の疲労試験を行い，荷重繰返し数 10^7 回～ 10^9 回程度までの疲労強度データを取得する．また，長寿命領域での疲労破壊機構についても検討する．



図 2 回転曲げ疲労試験機



図 3 油圧サーボ疲労試験機（容量 1500kN）

②溶接継手の長寿命疲労特性の評価

各種産業機器で使用される鉄鋼材料を用いて溶接継手を模擬した試験片を作製し，疲労強度特性を明らかにする．疲労試験には電気油圧サーボ疲労試験機（図 3 参照）を使用する．

また，溶接継手の疲労強度を向上させる手法として，超音波処理（UIT; Ultrasonic Impact Treatment）に着目し，その有効性について検討する．

③鉄鋼材料の長寿命領域疲労破面の定量評価

疲労破面には繰返し応力の影響で図 4 に示すような縞模様（ストライエーション）が観察される．これをストライエーションという．ストライエーションの幅はおおよそ $0.1\mu\text{m}$ ～数 μm であり，形状は 1 方向の波のような形状をしている．高さは幅の 30 ～ 40% 程度であるため， $1\mu\text{m}$ 以下である．

これまでの研究により，ストライエーションの幅は応力振幅と関係があり，高さは大小の比（応力比）と関係があることが知られている．従って，ストライエーションの幅と高さに相当する量が得られれば，応力が推定できることになる．高さと幅を計測するためには，疲労破面の三次元形状を計測する必要があるが，本研究ではレーザー顕微鏡の三次元計測機能を使用することを試みた．

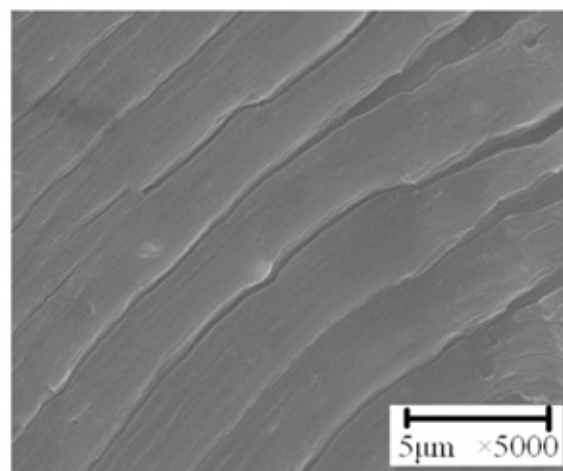


図 4 ストライエーションの例

3 今後の展開

本研究では時間，予算の制約から一部の鉄鋼材料，継手形式の疲労強度データしか得られなかった．今後も，さらに強度の高い高張力鋼等について，長寿命領域での疲労強度，破壊メカニズムを明らかにすることにより，産業機器の安全な寿命延伸に寄与していきたいと考えている．

（平成 22 年 9 月 21 日受理）

研究業績リスト

課題名：高圧設備の長期間使用に対応した疲労強度評価手法に関する研究

| 平成 22 年度 (2010 年) | | |
|-------------------|----------------|---|
| 1 | 国内外の研究集会発表 | Y. Togasaki, T. Honda, T. Sasaki, A. Yamaguchi (2010) Effect of Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Life in Butt Welded Joints of Austenitic Stainless Steel. ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Bellevue, WA, U.S.A., CD-ROM. |
| 2 | 国内外の研究集会発表 | 宮本昌幸, 辻 裕一, 山際謙太, 佐々木哲也 (2010) アルミニウム合金疲労破面に観察されるストライエーションの三次元定量解析. 日本機械学会 M & M2010 材料力学カンファレンス, 長岡市, CD-ROM. |
| 3 | 国内外の研究集会発表 | 戸ヶ崎祐, 辻 裕一, 本田 尚, 山口篤志 (2009) UIT 高張力鋼溶接継手の疲労強度改善. 日本機械学会 M & M2010 材料力学カンファレンス, 長岡市, CD-ROM. |
| 4 | 国内外規格等 | 佐々木哲也ほか (2010) 移動式クレーン構造部分に使用する鋼材の基準. 日本クレーン協会技術仕様書, JCA TS 2103-2010. |
| 5 | 国内外規格等 | 佐々木哲也ほか (2010) クレーン等のリスクアセスメント. 日本クレーン協会規格, JCAS 0001-2010. |
| 平成 21 年度 (2009 年) | | |
| 1 | 原著論文 | Kenta Yamagiwa, David W Hoepfner (2009) In-situ fatigue test of A36 steel. 12th International Conference on Fracture (ICF12), Ottawa, Canada. |
| 2 | 原著論文 | Honda, T., Sasaki, T., Yamaguchi, A. (2010) Effect of UIT on Fatigue Life in Web-Gusset Welded Joints, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.3, p.391-400. |
| 3 | 原著論文 | 最上雄一, 佐々木哲也, 泉 聡志, 酒井信介 (2009) 破壊評価線図を用いた構造健全性評価における部分安全係数の感度解析. 日本機械学会論文集 A 編, 第 75 巻 756 号, p.1112-1117. |
| 4 | 国内外の研究集会発表 | 坂本国雄, 辻 裕一, 佐々木哲也, 本田尚 (2009) 600MPa 級高張力鋼の超長寿命疲労特性. 日本機械学会 M & M2009 材料力学カンファレンス, 札幌市, CD-ROM. |
| 5 | 国内外の研究集会発表 | 戸ヶ崎祐, 辻 裕一, 本田 尚, 佐々木哲也 (2009) 面外ガセット溶接継手の疲労寿命に及ぼす超音波衝撃処理の影響. 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス, 札幌市, CD-ROM. |
| 6 | 国内外の研究集会発表 | 宮本昌幸, 辻 裕一, 佐々木哲也, 本田 尚, 山際謙太 (2009) レーザ顕微鏡を用いたアルミニウム合金疲労破面の三次元定量解析. 日本機械学会 M & M2009 材料力学カンファレンス, 札幌市, CD-ROM. |
| 7 | 国内外の研究集会発表 | 戸ヶ崎祐, 辻 裕一, 本田 尚, 山口篤志 (2009) UIT による面外ガセット溶接継手の疲労寿命向上. 溶接構造シンポジウム講演論文集, p.451-454. |
| 8 | 国内外の研究集会発表 | 山際謙太, 宮本昌幸 (2009) レーザ顕微鏡を用いた疲労破断面の三次元形状の解析例. 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会, 東京. |
| 9 | 国内外の研究集会発表 | 佐々木哲也 (2010) クレーンのリスクアセスメント. 日本高圧力技術協会 RBM 専門研究委員会. |
| 10 | 国内外規格等 | 佐々木哲也ほか (2010) 移動式クレーン構造部分の許容応力及び破壊靱性要求の基準. 日本クレーン協会技術仕様書, JCA TS 2101-2009. |
| 11 | 国内外規格等 | 佐々木哲也ほか (2010) 移動式クレーン構造部分の溶接継手の許容応力基準. 日本クレーン協会技術仕様書, JCA TS 2102-2009. |
| 平成 20 年度 (2008 年) | | |
| 1 | 国内外の研究集会発表 | Kenta Yamagiwa, David W Hoepfner (2009) Fundamentals of 3D-EBSD Method, HOLSIP09, Utah, U.S.A.. |
| 2 | 国内外の研究集会発表 | 戸ヶ崎祐, 辻 裕一, 本田 尚, 佐々木哲也 (2008) SUS304 突合せ溶接継手の疲労寿命に及ぼす超音波衝撃処理の影響. 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 草津市, CD-ROM. |
| 3 | 国内外の研究集会発表 | 坂本国雄, 辻 裕一, 佐々木哲也, 本田 尚 (2008) SNC631 鋼の超長寿命疲労特性評価. 日本機械学会 M & M2008 材料力学カンファレンス, 草津市, CD-ROM. |
| 4 | 国内外の研究集会発表 | 佐々木哲也 (2008) モンテカルロシミュレーションによる設計点の近似評価法. 日本機械学会 M & M2008 材料力学カンファレンス, 草津市, CD-ROM. |
| 5 | 国内外の研究集会発表 | 最上雄一, 酒井信介, 佐々木哲也 (2008) 部分安全係数法を用いた構造健全性評価. 日本機械学会 M & M2008 材料力学カンファレンス, 草津市, CD-ROM. |
| 6 | 国内外の研究集会発表 | 山際謙太, David W Hoepfner (2008) A36 鋼の in-situ 疲労試験. 第 4 回マイクロマテリアルシンポジウム. |
| 7 | その他 (表彰 / 報道等) | 佐々木哲也 (2008) 科学技術振興賞「リスクベース工学の基礎から応用まで」, 日本高圧力技術協会. |
| 平成 19 年度 (2007 年) | | |
| 1 | 原著論文 | 本田 尚, 佐々木哲也, 山口篤志, 吉久悦二 (2007) 赤外線法による溶接止端に発生する疲労き裂の検出と応力拡大係数範囲の評価. 日本機械学会論文集 (A 編), 73-735, p.1280-1287. |
| 2 | 総説ほか (査読有無問わず) | 佐々木哲也 (2007) 破損確率評価技術. 圧力技術 45-2, p.18-27. |

| | | |
|---|---------------|--|
| 3 | 総説ほか(査読有無問わず) | 本田 尚 (2007) 機械・構造物の経年劣化と非破壊検査. 日本信頼性学会誌 29-6, p.350-357. |
| 4 | 国内外の研究集会発表 | 佐々木哲也 (2007) 国際安全規格による機械設備のリスク評価手法と関連研究の紹介. 日本鉄鋼協会・第76回技術部会. |
| 5 | 国内外の研究集会発表 | 本田 尚 (2007) ホイスト用リンクチェーンの破断事故解析. 日本材料学会第50回強度設計・安全性評価部門委員会. |
| 6 | その他の専門家向け出版物 | 本田 尚 (2007) 「金属疲労」とはき裂の現象. 労基旬報, 第1349号. |
| 7 | その他の専門家向け出版物 | 本田 尚 (2007) 経年機とつきあう方法(維持・管理). 労基旬報, 第1352号. |