

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289332

研究課題名(和文) 溶接構造体に対する疲労寿命予測システムの確立

研究課題名(英文) Development of a Systems for Fatigue Life Assessment of Weld Structures

研究代表者

堤 成一郎 (Tsutsumi, Seiichiro)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：70344702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では溶接構造物の溶接止端部における局所的な繰返し弾塑性挙動を明らかにし、それらの結果を用いて疲労き裂発生寿命を評価するシステムの開発を行った。まず熱弾塑性解析を実施することにより残留応力を導入し、その結果を反映した繰返し弾塑性解析により得られた結果を用いて疲労き裂発生寿命の評価を可能とした。さらにK値を用いた疲労き裂伝播寿命評価を行うことにより、全寿命を評価可能とした。2種類のビード形状を有する溶接十字継手を解析対象とし、ビード形状に加え、先行荷重および繰返し荷重の大きさの残留応力緩和挙動および疲労寿命への影響を評価可能なシステムを整備させた。

研究成果の概要(英文)：The Finite Element analyses carried out in this paper aimed to examine the effect of the weld bead shape on the fatigue crack initiation and propagation lives of a non-load carrying fillet joint under cyclic loading condition. At the same time, the effect of the factors, such as cyclic loading amplitude/welding residual stress/pre-loading/bead shape, on the fatigue life were examined. Fatigue life is obtained as the total of crack initiation and propagation lives. The results numerically obtained were in good agreement with the experimental ones by the Japanese Society of Steel Construction (JSSC) and the result provides that comparing the factors of fatigue, the bead shape has a strong effect on the crack initiation life.

研究分野：疲労

キーワード：疲労亀裂 弾塑性 溶接構造 繰返し軟化 繰返し硬化

1. 研究開始当初の背景

これまで鋼道路橋などの鋼構造物において、疲労損傷事例が数多く報告されており、将来疲労損傷による被害の拡大が予測される。近年、疲労の重要性が見直されており、疲労寿命評価技術に対する要求も高まっている。一方、き裂発生寿命については、これまでに数多くの実験的検討が行われてきたが、溶接部は一般に形状が複雑であり、加えて疲労き裂発生位置の局所的な残留応力や材料特性の取得が困難であること、また疲労試験自体のコストに関連する問題も重なることから、各要因を分離して議論するには限界があった。そこで、S-N 曲線を取得することで統計的な分析が進められてきたが、各継ぎ手に対する変動応力や過大荷重の影響など、実験的に全て検証するには膨大なコストを必要とすることから現実的ではなく、各種影響因子を加味した統一的理解が進んでいるとは言いがたい。また、数値解析的検討においては、材料を解析対象として、各種影響因子がき裂発生寿命に与える影響を検討した報告は数多くあるものの、実構造物を意識した溶接継手等への適用例は少なく、各種影響因子を切り分けた定量的評価には至っていない。

2. 研究の目的

有限要素法などを用いて行われる数値シミュレーション技術の進歩は目覚ましく、適切な材料モデルを適用することで、実測が不可能な局所的・微視的領域での現象把握や設計の大きな手助けとなっている。また、これまでに著者らは、(極)低サイクル疲労に限定されること無く、高サイクル疲労にも適用可能な繰返し弾塑性モデルを開発するとともに、溶接止端部近傍における局所的な弾塑性挙動を用いた疲労寿命評価手法の確立を目指してシステムの改良を行ってきた。本研究では溶接止端部における局所的な繰返し弾塑性挙動を明らかにし、それらの結果を用いてピード止端形状が疲労き裂発生寿命に与える影響を明らかにすることを目的とした数値シミュレーション技術を開発した。

3. 研究の方法

熱弾塑性解析を実施することにより残留応力を導入し、その結果を反映した繰返し弾塑性解析により得られた結果を用いて疲労き裂発生寿命の評価を可能とした。さらに K 値を用いた疲労き裂伝播寿命評価を行うことにより、全寿命を評価可能とした。2 種類のピード形状を有する溶接十字継手を解析対象とし、ピード形状に加え、先行荷重および繰返し荷重の大きさの残留応力緩和挙動および疲労寿命への影響を評価可能なシステムを開発する。

4. 研究成果

本研究では、溶接ピードフランク角、溶接

残留応力および過大先行荷重が繰返し負荷に伴う局所的な応力ひずみ挙動、および疲労寿命に与える影響を明らかにするために、開発システムにより、十字溶接継手を対象とした数値シミュレーションを実施した結果、以下に得られた知見をまとめる (図 1)。

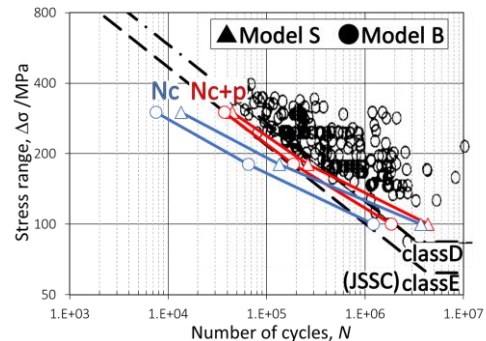


図 1 S-N 関係

1) 溶接止端部直下では、初期応力に関わらず、N=1 における引張負荷により圧縮の残留応力が発生し、繰返し数 N の増加に伴い、ヒステリシス・ループが引張軸方向へ移動する。またヒステリシス・ループ幅は一定値に収束していく。

2) 止端部形状の違いにより、Model S と比較して Model B では応力集中が大きいため、ひずみの集積量および応力振幅は大きい。

3) 先行過大圧縮荷重による影響で、塑性変形が生じることから、応力集中度合が大きくなり、応力振幅およびひずみの集積量が増加する。また、先行過大引張加重を与えたケースでは、逆の傾向が観察された。

4) き裂伝播速度は、ストレート型よりボール型の方が速く、板厚垂直方向への進展経路よりも、主応力と垂直な方向にき裂が進展すると仮定したき裂伝播経路の方が速いことがわかった。

5) 得られた疲労寿命予測結果は、JSSC の疲労強度等級に対応しており、それぞれ Model B は classD と classE の間、Model S は classD に対応する。

6) 本研究で検討した影響因子の中では、疲労き裂発生寿命はピード形状の影響を最も大きく受け、特に長寿命側でその差は大きくなるのが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① R. Fincato, S. Tsutsumi, Numerical study of a welded plate instability using the subloading surface model, Marine Structures, 55, (2017), 104-120

- ② 堤 成一郎, 森田 花清, Fincato Riccardo, 疲労き裂発生伝播寿命に対する溶接ビード形状の影響に関する解析的検討, 構造工学論文集, 63A, 2(2017), 609-618
- ③ 堤 成一郎, 植田 一史, 佐野 智一, 崎野 良比呂疲労強度向上を目的としたレーザーピーニング技術に関する数値解析的検討, 土木学会論文集A2(応用力学), 73, 2(2017), I\_379-I\_386
- ④ 靱井 秀斗, 堤 成一郎, Riccardo Fincato, 非比例高サイクル疲労下の繰返し硬軟化挙動に対する接線塑性構成式の拡張, 土木学会論文集A2(応用力学), 73, 2(2017), I\_367-I\_378
- ⑤ Seiichiro Tsutsumi, Kasumi Morita, Riccardo Fincato, Hideto Momii, Fatigue life assessment of a non-load carrying fillet joint considering the effects of a cyclic plasticity and weld bead shape, Fracture and Structural Integrity, 38(2016), 240-250
- ⑥ Riccardo Fincato, Seiichiro Tsutsumi, Numerical modelling of ductile damage mechanics coupled with an unconventional plasticity model, Fracture and Structural Integrity, 38(2016), 231-236
- ⑦ 松本 理佐, 石川 敏之, 堤 成一郎, 河野 広隆, 山田 健太郎, ハンマーピーニング処理による残留応力の解析的検討, 構造工学論文集, 62A, (2016), 685-692
- ⑧ 堤 成一郎, 靱井 秀斗, Fincato Riccardo, 水平2軸漸増繰返し負荷を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚の弾塑性挙動に対する接線塑性の影響, 構造工学論文集, 62A, (2016), 72-83
- ⑨ Ramy Gadallah, Seiichiro Tsutsumi, Kazuo Hiraoka, Hidekazu Murakawa, Prediction of residual stresses induced by low transformation temperature weld wires and its validation using the contour method, Marine Structures, 44, (2015), 232-253
- ⑩ Yuichi Shintaku, Mayu Muramatsu, Shinsuke Takase, Seiichiro Tsutsumi, Kenjiro Terada, Cohesive Crack Model to Reflect Local Chemical Action at Grain and Its Boundaries in Polycrystalline Metals, Quarterly J. Japan Welding Soc., 33, 2(2015), 152s-155s
- ⑪ Seiichiro Tsutsumi, Hideto Momii, Riccardo Fincato, Tangential Plasticity Effect on Buckling Behavior of a Thin Wall Pier under Cyclic Loading Condition, Quarterly J. Japan Welding Soc., 33, 2(2015), 161s-165s
- ⑫ Seiichiro Tsutsumi, Riccardo Fincato, Kazushi Ueda, Kenjiro Terada, A Crystal Plasticity FE Analysis Considering Mechanically Induced Martensitic Phase Transformation, Quarterly J. Japan Welding Soc., 33, 2(2015), 102s-106s
- ⑬ Riccardo Fincato, Seiichiro Tsutsumi, Cyclically Triggered Instability and Yield-vertex Effect on a Welded Plate Investigated by means of the Extended Subloading Surface Model with Tangential Plasticity, Quarterly J. Japan Welding Soc., 33, 2(2015), 111s-115s
- ⑭ 新宅 勇一, 村松 眞由, 堤 成一郎, 寺田 賢二郎, 京谷 孝史, 加藤 準治, 森口 周二, 損傷変数を導入した結合力モデルによる多結晶金属の疲労き裂進展解析, 日本計算工学会論文集, 2014, 20140014

[学会発表] (計 14 件)

- ① Takashi Hiraide, Satoshi Igi, Tetsuya Tagawa, Rinsei Ikeda, Seiichiro Tsutsumi, Investigation of microstructural factors on fatigue crack initiation behavior using crystal plasticity finite element method, Proc. 10th Int. Conf. on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS), (2016), 432-435
- ② Riccardo Fincato, Seiichiro Tsutsumi, Numerical model of ductile damage using the subloading surface model, Proc. 10th Int. Conf. on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS), (2016), 428-431
- ③ Seiichiro TSUTSUMI, Kazushi UEDA, Riccardo FINCATO, Relaxation Behavior of Peening Induced Residual Stresses Predicted by an Elastoplasticity Model with Cyclic Hardening and Softening Effects, 69th IIW Annual Assembly and Int. Conf., 2016, IIW Doc. XIII - 2663 -16
- ④ Riccardo Fincato, Seiichiro Tsutsumi, Ductile Damage Accumulation under Cyclic Loading Evaluated by the Extended Subloading Surface, Proc. the 26th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 2016, 836-841
- ⑤ 長尾 涼太, 堤 成一郎, フィンカトリカルド, 石川 敏之, 松本 理沙, Uリブ鋼床版へのピーニング処理による疲労寿命向上効果, 溶接学会 平成 28 年度

- 秋季全国大会，群馬，  
(2016.09.14-2016.09.16)
- ⑥ 堤 成一郎，材料の繰返し弾塑性挙動を考慮した溶接継手の疲労寿命予測技術，溶接学会平成28年度秋季全国大会，群馬，(2016.09.14-2016.09.16)
- ⑦ 堤 成一郎，森田 花清，フィンカトリカルド，十字継手の疲労き裂発生寿命に対する溶接角変形の影響，溶接学会平成28年度秋季全国大会，群馬，(2016.09.14-2016.09.16)
- ⑧ 平出 隆志，伊木 聡，田川 哲哉，池田 倫正，堤 成一郎，溶接熱影響部の材料の繰返し弾塑性挙動と疲労寿命，溶接学会平成28年度秋季全国大会，群馬，(2016.09.14-2016.09.16)
- ⑨ 堤 成一郎，北村 拓也，フィンカトリカルド，荻野 陽輔，平田 好則，浅井 知，溶融池形成シミュレーションにより得られる溶接ビード形状を反映した疲労き裂発生寿命予測，溶接学会平成28年度秋季全国大会，群馬，(2016.09.14-2016.09.16)
- ⑩ 的場 耕，中込 忠男，曾田 五月也，金子 洋文，堤 成一郎，巻島 淳，増田 開，藤田 哲也，板谷 俊臣，笠原基弘現場溶接型柱梁溶接接合部における梁端仕口ディテールに関する実験的研究その4 ロールHの仕口ディテールと施工方法，日本建築学会大会学術講演会，福岡，(2016.08.24-2016.08.26)，22608
- ⑪ 長尾 涼太，堤 成一郎，Fincato Riccardo，石川 敏之，松本 理沙，ピーニングによるUリブ鋼床版の疲労寿命向上効果に関する基礎的研究，土木学会関西支部年次学術講演会，草津，(2016.06.11)
- ⑫ 北村 拓也，堤 成一郎，Fincato Riccardo，高強度鋼板HT780を用いた突合せ溶接継手の強度評価に関する基礎的研究，土木学会関西支部年次学術講演会，草津，(2016.06.11)
- ⑬ 森田 花清，堤 成一郎，Fincato Riccardo，母材強度が上昇しても継手強度が向上し難い理由に関する一考察，土木学会関西支部年次学術講演会，草津，(2016.06.11)
- ⑭ 堤 成一郎，Fincato Riccardo，寺田賢二郎，相変態を考慮した結晶塑性FEシミュレーションによる局所応力評価，日本鉄鋼協会第170回秋季講演大会，福岡，(2015.09.16-2015.09.18)，766

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

堤 成一郎 (TSUTSUMI, Seiichiro)  
大阪大学・接合科学研究所・准教授  
研究者番号：70344702

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

( )