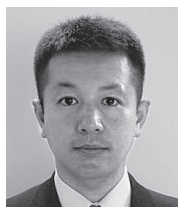


溶接継手の疲労き裂発生寿命の予測技術*

堤 成一郎**, リカルド フィンカト**, 大畑 充***, 佐野 智一***



堤 成一郎



リカルド フィンカト



大畑 充



佐野 智一

Assessment Technology of Fatigue Crack Initiation Life of Weld Structures*

by TSUTSUMI Seiichiro**, RICCARDO Fincato**,
OHATA Mitsuru*** and SANO Tomokazu***

キーワード

fatigue, cyclic plasticity, crack initiation, deformation analysis

1. はじめに

繰返し応力を受ける溶接構造物の疲労き裂発生とその後の伝播寿命は、作用する応力やその履歴に加えて、採用する溶接プロセスによって変化する溶接残留応力やビード形状、さらには溶接金属に対する母材の希釈や局所的に分布する材料組織など、多くの力学および組織学的因子の影響を受ける¹⁾。なお、これまでTMCP鋼に代表される高強度鋼が盛んに開発され、材料レベルでは一般に降伏応力の上昇に比例して200万回疲労強度も上昇することが確認されている。しかし、高強度鋼を用いた溶接継手の疲労特性はバラつきが大きく、母材強度の向上にもかかわらず、継手の疲労強度は通常材と同等になることが報告されている。この原因としては、高強度材を用いた場合、通常材と比べて止端部の応力集中が大きくなる傾向にあること、また残留応力が高くなることなどが考えられるが明確な原因は不明と報告されている。

一方、溶接構造物の疲労寿命の高精度予測や疲労損傷部材の余寿命評価技術の確立に対する要求は高く、これまでに疲労寿命に対する各種影響の解明を目的として、多くの検討が行われている。しかし、疲労き裂発生起点となる局所領域の材料特性や残留応力分布の取得は困難であり、また実働荷重は多岐に渡るため、一般に一定荷重振幅下で得られたS-N曲線に基づく疲労設計が主体となっている。他方、各種構造物の変形や破壊を対象とし

た数値シミュレーション技術の向上は著しく、計測が困難な局所的な力学状態の予測が可能になりつつあるが、得られる結果は採用する材料モデルの特性に大きく依存することになる。

これまでに著者ら^{2,5)}は、低サイクル疲労に限定されること無く、一般に巨視的弾性の応力状態となる高サイクル疲労条件下の変形挙動にも適用可能な繰返し弾塑性モデルの開発とそれを導入した高精度数値シミュレーション技術の開発を行っている。本技術は、繰返し変形や応力に起因する諸問題へ適用可能であり、これまでに疲労寿命に対する溶接止端部形状・溶接残留応力分布・溶接角変形・過大荷重・材料強度分布の影響などに関して考察⁶⁻¹¹⁾を行っている。また、巨視的弾性繰返し応力に対する座屈挙動やピーニング処理に伴う疲労寿命の延命化効果のメカニズムの解明¹²⁻¹⁴⁾などにも適用されている。

そこで本報では、“溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発”を目的とした拠点型プロジェクトにおける「個別テーマ③：溶接継手の性能予測技術の開発」の中で、特に、溶接止端部における局所的な繰返し弾塑性挙動の予測結果を活用した疲労寿命評価に関する研究進捗の概要について紹介する。

2. 疲労き裂発生寿命評価

2.1 研究目的と実施内容

一般に高サイクル疲労となる疲労事例の多くは、いわゆる降伏応力よりも小さく、低回数繰返し応力下で得られた応力-ひずみ関係からは明瞭な塑性変形が確認されない、いわゆる“巨視的弾性”の繰返し応力に伴う疲労き裂の発生と、その後の伝播挙動に支配される。しかし、

*原稿受付 平成28年12月8日

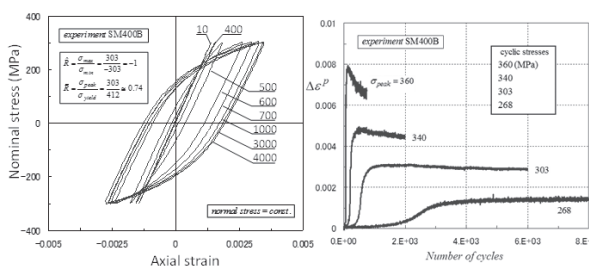
**正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

***正 員 大阪大学 大学院工学研究院 Member, Osaka University

部材性能を支配する材料機械的特性の解明

部材性能: 疲労き裂の発生・伝播寿命

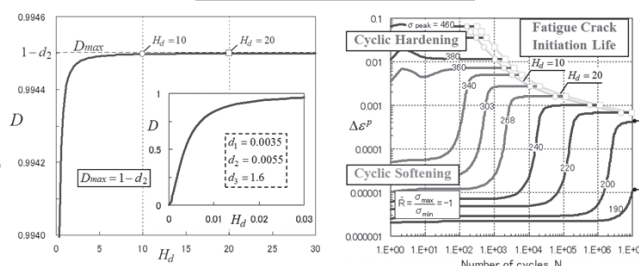
- 繰返し硬/軟化特性: 疲労損傷進展を支配
- 高・低サイクル疲労下のひずみ-疲労寿命特性



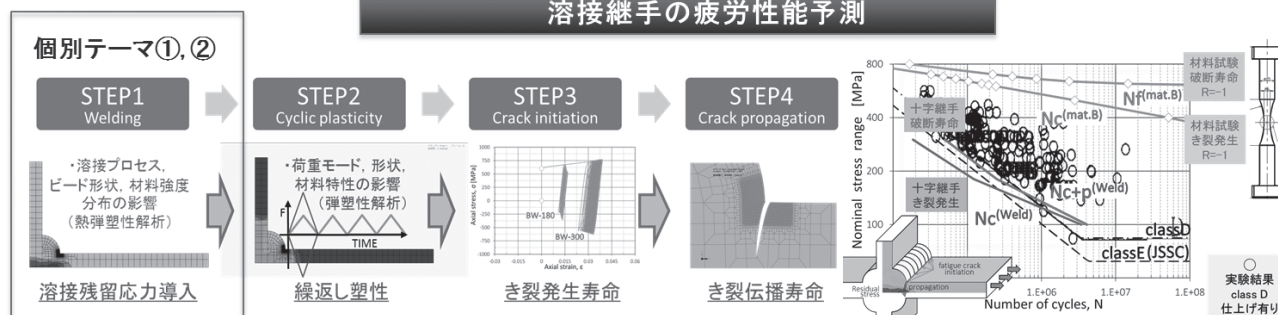
繰返し硬/軟化挙動・疲労SSモデルの提案

Cyclic Damage Variable $H_d = \int \bar{H}_d dt, \bar{H}_d = \sqrt{2/3} \|\mathbf{D}^p\| \bar{D}(k_s R - R^e)$
 Cyclic Damage Function $D(d_1, H_d) = (1 - d_2) \{1 + (\frac{d_1}{H_d})^3\}^{-1}$

繰返し損傷パラメータの決定



溶接継手の疲労性能予測



個別テーマ①および②の情報を活用した高・低サイクル疲労下の疲労寿命予測

図1 溶接継手の疲労寿命予測 (個別テーマ③: 疲労性能)

巨視的弾性応力下の材料の力学挙動に注目した研究や疲労き裂発生を予測し得る理論的研究は極めて限定的である。つまり、疲労設計の高度化には、巨視的弾性の繰返し応力による疲労き裂の発生寿命を定量的に評価可能な理論体系の確立が重要である。なお、溶接構造物の疲労寿命を高精度に予測するためには、次の4つのステップ、すなわち Step1) 溶接残留応力、変形および強度分布特性、Step2) 繰返し応力に対する変形特性、Step3) き裂発生寿命特性、Step4) き裂伝播特性を考慮することが望ましいが(図1)、それぞれのステップにおける実験と数値シミュレーションによる予測技術の開発は進められている。

ここでは主に、溶接十字継手を解析対象として、継手部疲労き裂発生寿命に与える材料強度の影響に関して考察を行った研究の概要について紹介する。

2.2 弾塑性材料モデル

本研究では、Mises型降伏面および複合硬化則とともに弾性境界面、下負荷面、相似中心および繰返し損傷の概念を導入した疲労SSモデル^{2,3)}を拡張している(図1)。図2に溶接構造用鋼SM490材を対象に本モデルにより予測された巨視的弾性応力条件下の特定回数における応力ひずみ曲線を示す。

この図から明らかなように、巨視的弾性の繰返し応力载荷に伴う材料軟化挙動を本モデルは予測可能である。

2.3 継手局所領域の弾塑性挙動および疲労き裂発生寿命予測

次に、十字溶接継手を模擬したFEM解析モデルによる弾塑性解析事例を示す。解析には上記疲労SSモデル³⁾を

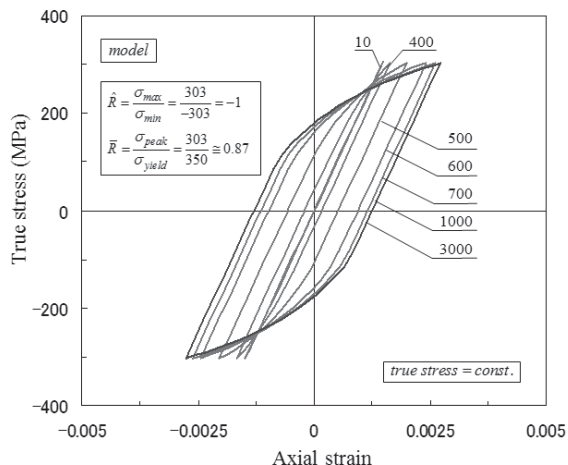


図2 巨視的弾性応力の繰返しに伴う塑性ひずみの顕在化挙動(シミュレーション結果)

FEMプログラムとして実装し、解析対象の形状および境界条件の対称性により、十字継手の1/4形状を2次元平面ひずみ要素でモデル化している。なお、解析対象の止端半径はゼロ(ρ=0)、評価対象部のビード止端部近傍の要素サイズは50μm四方としている。疲労き裂発生寿命に対する溶接残留応力、溶接残留応力/強度分布/ビード形状/繰返し塑性/残留応力緩和と先行荷重の影響を検討するために、様々なケースについて検討を行っている。ここでは例として、図3に溶接残留応力シミュレーション結果を引き継いだ疲労载荷FEM解析により得られた局

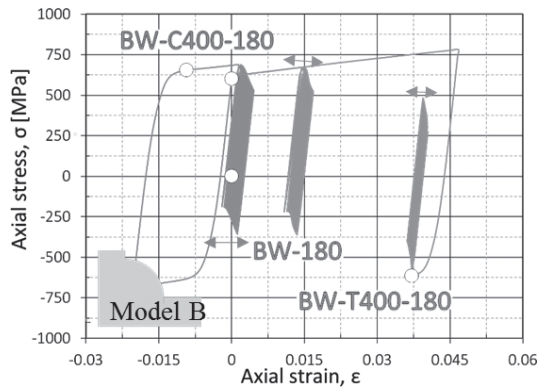


図3 溶接継手の局所領域における応力ひずみ応答の解析例

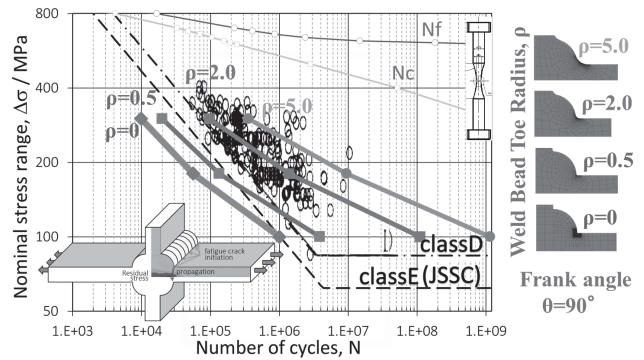


図4 溶接ビード形状とS-N(疲労き裂発生寿命)曲線の関係

所領域(止端部)の応力ひずみ関係を示している。

この結果より、溶接残留応力解析結果を引き継ぐことにより、载荷前から高い引張残留応力状態にあった止端部が疲労载荷直後に圧縮応力状態へ変化し、さらに繰返し回数の増加とともに時々刻々と変化する様子がわかる。次に、4種類のビード形状を有する十字溶接継手を模擬したFEM解析モデルによる疲労き裂発生寿命評価の結果例を図4示す。解析には止端半径の形状を除いて、先の検討と同様のモデル形状を採用している。また、図内の破線classE(溶接まま)および一点鎖線classD(溶接止端仕上げ)は、JSSCにより実験的に定められた疲労強度等級である。

この図より、本研究で得られた止端半径 $\rho=2\text{mm}$ の結果は、JSSC疲労強度等級のD等級より若干長寿命側に対応することがわかる。また、疲労き裂発生寿命は溶接ビード形状の影響を大きく受けることが予測されており、止端半径によって疲労き裂発生寿命が10倍以上も変化することが確認できる。

3. 結 言

これまでに著者らが開発を進めている弾塑性モデルは、低サイクル疲労に限定されることなく、巨視的弾性の応力状態となる高サイクル疲労条件下の変形挙動を再現し得るように拡張されており、溶接継手部などの局所域で生じる変形現象に限らず、繰返し载荷を伴う座屈問題、非比例負荷条件下の弾塑性挙動、極低サイクル延性破壊問題への対応や、Uリブ構造に対するハンマーピーニングによる寿命延伸化のメカニズム解明などのより具体的な問題への適用なども進めている。さらに、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¹¹⁾など、“溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発”を目的とした拠点型プロジェクトにおける他の個別テーマとの連携も進んでおり、今後も様々な問題への適用を通じて、モデルのさらなる高精度化を図るとともに、計測が困難な局所領域の応答や実験コストの問題に悩まされる大型構造物の応答把握など、様々な力学的問題の一助となることを目指していく予定である。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例 2012年改訂版。
- 2) S. Tsutsumi et al., Cyclic Stress-strain Relationships during High Cycle Fatigue Process -Elastoplastic Constitutive Model Introducing Cyclic Damage Effect, J. of JASNAOE, 17 (2008), 243-250.
- 3) S. Tsutsumi, K. Morita, R. Fincato, H. 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.
- 4) R. Fincato, S. Tsutsumi, Numerical modelling of ductile damage mechanics coupled with an unconventional plasticity model, Fracture and Structural Integrity, 38 (2016), 231-236.
- 5) 堤 成一郎, 初井 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.
- 6) 堤 成一郎, 森田 花清, Fincato Riccardo, 溶接継手の疲労強度と材料強度の関係に対する数値解析的検討, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 97 (2015), 194-195.
- 7) 堤 成一郎, 北村拓也, 森田花清, Fincato Riccardo: 継手疲労寿命に対するビード形状影響に関する数値解析的検討, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 98, pp.194-195, 2016.4
- 8) 堤 成一郎, 森田花清, Fincato Riccardo: 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, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 99, pp.364-365, 2016.9
- 9) 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, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 99, pp.360-361, 2016.9
- 10) 森田花清, 堤 成一郎, フィンカト リカルド, 平出隆志, 伊木聡, 田川哲哉, 池田倫正: 溶接継手熱影響部の強度分布とビード形状を考慮した疲労き裂発生寿命評価, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 99, pp.362-363, 2016.9
- 11) 堤 成一郎, 北村拓也, Fincato Riccardo, 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, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 99, pp.372-373, 2016.9
- 12) 堤 成一郎, 植田 一史, Fincato Riccardo, 石川 敏之, 松本 理佐, 鋼板へのピーニング処理による疲労強度向上効果に関する数値解析的検討, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 2015s (2015), 308-309.
- 13) 堤 成一郎, 植田 一史, Riccardo Fincato, 藤久保 昌彦, 巨視的弾性域となる低疲労荷重により誘発される鋼板の繰返し座屈挙動, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 2015s (2015), 222-223.
- 14) 長尾 涼太, 堤 成一郎, Fincato Riccardo, 石川 敏之, 松本 理佐, Uリブ鋼床版へのハンマーピーニングによる疲労寿命向上効果に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 99, pp.358-359, 2016.9