

繰返し塑性変形に伴う非荷重伝達型十字溶接継手の残留応力緩和挙動および 疲労き裂発生寿命に関する数値解析的検討

大阪大学 正会員 ○堤 成一郎
 大阪大学 Riccardo Fincato
 大阪大学 新宮原 悠太
 エステック㈱ 初井 秀斗
 川重テクノロジー㈱ 矢嶋 泰基

1. 目的

社会インフラとして用いられている各種溶接構造体に繰返し荷重を加えると、溶接止端部などを中心に応力の大きさに依存した非弾性応答が発生する。また計測される非弾性ひずみの大きさと疲労寿命との相関の高さが確認されている。つまり、任意形状の構造物の疲労寿命の予測を高精度に実現するためには、材料の非弾性応答を予測可能な材料モデルとそのモデルを用いた高精度・高効率な有限要素(FE)解析ツールの開発¹⁾が不可欠である。これまでに著者ら²⁾は、低サイクル疲労に限定されず、一般に高サイクル疲労となる巨視的弾性条件下にも適用可能な繰返し弾塑性モデルを提案し、実験結果との照査によりその適用性の高さを示している。さらに近年、ABAQUS(汎用FE解析ツール)用ユーザサブルーチンを開発し、その精度検証を行なった結果、計算効率の高さが示された。本研究では、繰返し応力に対する材料モデルの応答を把握する。次に具体的境界条件におけるモデル挙動の把握を目的として、非荷重伝達型十字溶接継手を採用し、圧縮荷重により導入した引張残留応力が繰返し応力に伴って減少する挙動やヒステリシス・ループの全ひずみ範囲により推定される疲労寿命の予測精度などに関して考察を行う。

2. 材料およびFEモデルの概要

本研究で採用した(拡張型)下負荷面モデル(I)を用いて、平面ひずみ一軸条件下の単調引張および片振り繰返し(400 or 600 [MPa], R=0, N=50)試験の計算を行った(Fig.1)。本モデルはMises型降伏面および複合硬化則とともに相似中心の概念を採用している。Fig.1より、モデルIは比較的小さな片振り繰返し荷重に対しても、ヒステリシス・ループおよびラチェット現象を表現可能であることがわかる。次に、Fig.2に示した非荷重伝達型十字溶接継手を模擬したFEモデルおよび境界条件(解析対象の対称性を考慮した1/4平面ひずみモデル、節点数5582、要素数5531、最小要素サイズ50 μ m四方)を採用し、2種類の圧力を試験片端部に載荷することにより疲労試験の解析を行った。まず、-300[MPa]の片振り圧縮負荷1回(C-3)を付与した後に、それぞれ-180および-300[MPa]の片振り引張負荷(R=0)条件で、合計N=100回の繰返し負荷を与えたケースをC-3-1およびC-3-2とした(Fig.3)。なお、予備解析において最大の塑性ひずみが予測された溶接ビード止端部直下の要素Aの平均値を出力して評価を実施した。

3. 繰返し塑性変形および残留応力緩和に関する考察

Fig.3および4に、要素Aにおける載荷軸方向の応力-ひずみ関係および繰返し数Nに対する載荷荷重0時の応力(残留応力)をそれぞれ示している。これよりNの増加に伴ってヒステリシス・ループが引張方向へ移動(ラチェット挙動)するとともに、軸ひずみ範囲が一定値(塑性シェイクダウン状態)に収束し、その間に残留応力は0に近づくことがわかる。また、今回採用した-300[MPa]の圧縮荷重後に残留した460[MPa]程度の引張応力(P-0)は、その後の荷重に対する塑性化を早めるものの、ループ形状および残留応力に対する顕著な影響は見られなかった。

キーワード 繰返し荷重, 疲労, 残留応力, 弾塑性, 寿命予測

連絡先 〒567-0005 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1 大阪大学 接合科学研究所 TEL 06-6879-4887

4．疲労き裂発生寿命に関する考察

平滑試験片に対する一定振幅下の疲労試験によって得られた疲労き裂発生 (N_c) (Fig.5) に対して, $N=100$ において定常状態になった軸ひずみ範囲を考慮することにより Fig.6 に示す S-N 曲線が得られる. 合わせて, N_c の 10 倍寿命 ($10 \cdot N_c$) および JSSC 指針に基づく非荷重伝達型十字溶接継手の等級別 S-N 曲線 (class D: 止端仕上げ有り, E: 止端仕上げ無し) も示している. これらの図より, 材料試験の疲労き裂発生条件である N_c は JSSC 指針よりも短寿命側の保守的な予測結果となり, $10 \cdot N_c$ による予測値は止端仕上げ有りの D 等級曲線と比較的良好一致を得た. ただし本研究では, 溶接に伴う残留応力および初期たわみの影響に加えて, き裂伝播プロセスを考慮しておらず, 任意荷重条件における疲労寿命評価などと合わせて引き続き検討を重ねる必要がある.

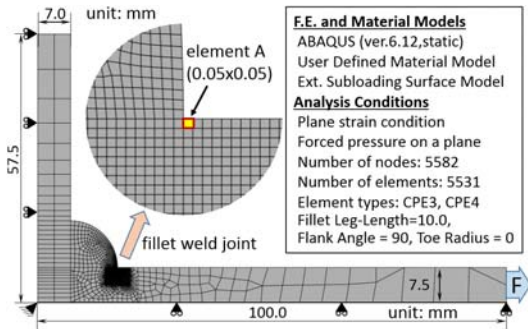


Fig.1 Analyzed model and boundary condition.

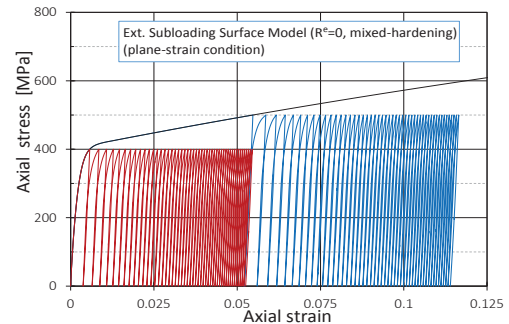


Fig.2 Stress-strain curves by the model I.

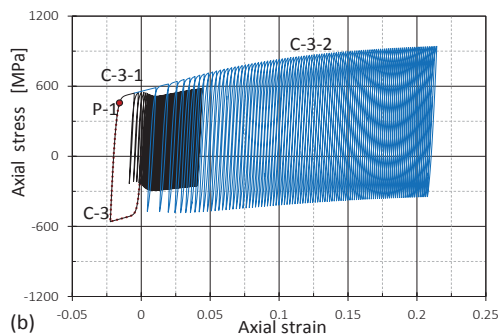


Fig.3 Local stress-strain curves at element A for the cases for C-3-1 and C-3-2.

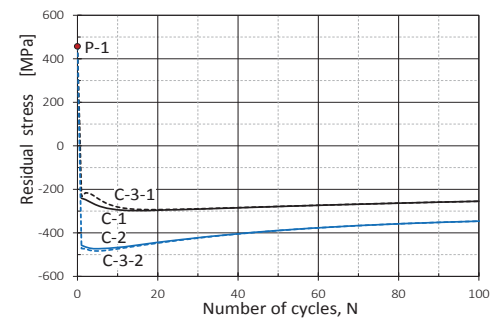


Fig.4 Local residual stress at element A with increase of number of cycles.

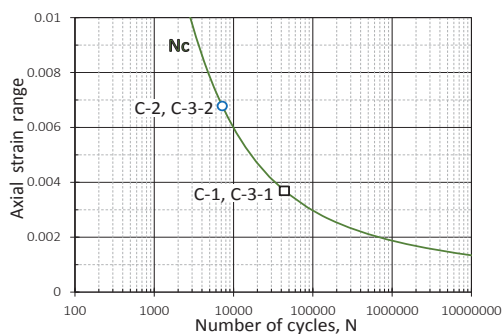


Fig.5 Experimental life curves for uniform specimen together with predicted local axial-strain range at element A.

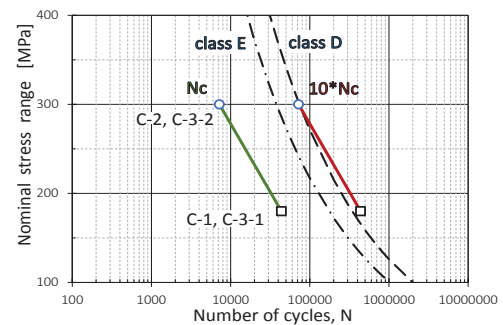


Fig.6 Applied nominal stress range vs. number of cycles together with JSSC curves for the class D and E.

参考文献

- 1) Hashiguchi, K. Elastoplasticity Theory (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics), Springer, 2013
- 2) Tsutsumi, S.ほか, Cyclic stress-strain relationship during high cycle fatigue process : Elastoplastic constitutive model introducing cyclic damage effect, J. of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 7, 243-250, 2008