

大阪大学 接合科学研究所 学生員 ○清川 裕樹
 正会員 堤 成一郎
 正会員 Fincato Riccardo

1. 緒言

近年社会基盤構造物の老朽化が問題となっており、中でも疲労は機械・構造物の損傷の 60%を占めるといわれるように主要な破損原因である。特に溶接部は構造的、局所的な形状変化によって応力が集中し、塑性ひずみが集積するため疲労き裂が発生しやすい。高サイクル疲労においては巨視的には弾性応答を示していても繰返し数の増加により塑性ひずみが顕在化する、いわゆる繰返し軟化挙動が確認される。

一方、疲労寿命を評価する手法の一つとして局所ひずみに基づく方法がある。この方法では疲労き裂の発生が予測される箇所でのひずみを解析的、もしくは数値計算によって求める。しかしながら、採用する材料構成モデルにより局所ひずみは変化するため、正確な疲労寿命評価を行うためには適切なモデルを採用する必要がある。著者らは、巨視的には弾性応答を示すような高サイクル疲労にも適用可能な繰返し弾塑性モデルの開発を行い、継手のピード形状や強度分布等が疲労き裂の発生寿命に与える影響に関して考察を行ってきた^{1,2)}。なお、疲労問題のように弾塑性シミュレーションを複数ステップ実施する場合、相応の計算時間・コストを必要とするため、計算力学的立場からの非線形解析技術向上のみならず、より簡便で高速に局所応答を評価可能な手法の確立も求められている。

そこで本研究では、繰返し軟化挙動に対するモデル化の相違が応力集中を有する継手の疲労き裂発生寿命評価に与える影響に関して考察を行った。

2. 解析条件

本研究で採用する疲労 SS モデルは、繰返し軟化特性に代表される塑性変形の蓄積の結果として生じる材料特性の変化をダメージ D により考慮する。 D 値は塑性仕事に対応するスカラー値である塑性内部変数ダメージパラメータ H_d の関数であり、 H_d の増加により軟化が促進される。本研究では、繰返し軟化が疲労き裂発生寿命に与える影響を評価するために、 H_d の積算を通常のように維持もしくは加速させる以下に示す 4 種類の解析を実施した。BJO は初期には単調引張の応力ひずみ応答を示すが繰返し数の増加に伴い、繰返し軟化挙動が発現する従来モデルである。BJA_100 は H_d の積算速度を 100 倍とし、BJM では D の初期値として D の飽和値 D_{max} を与えた。BJC は単調載荷時の応力ひずみ応答が繰返し応力ひずみ応答に沿うよう設定した繰返し載荷に伴う軟化を考慮しないモデルであり、ダメージ D は常に 0 である。図-1 にそれぞれの単調載荷時の応力ひずみ応答を示す。mat"X" はそれぞれ BJ"X" に用いた材料特性である。単調載荷では mat0 と matA_100 は同等の応答を示す。matM および matC は低ひずみ範囲において、上の二つに比べ軟らかい応答を示す。

図-2 に疲労寿命評価に採用した突合せ継手を模した解析モデルを示す。境界条件としては疲労試験を模擬し、繰返し荷重を 100 回載荷した。

3. 解析結果および疲労き裂発生寿命評価

図-3 に解析終了時の疲労き裂の発生が予測された溶接止端部付近におけるダメージの分布を示す。なお、示していないものの BJC のダメージは 0 である。

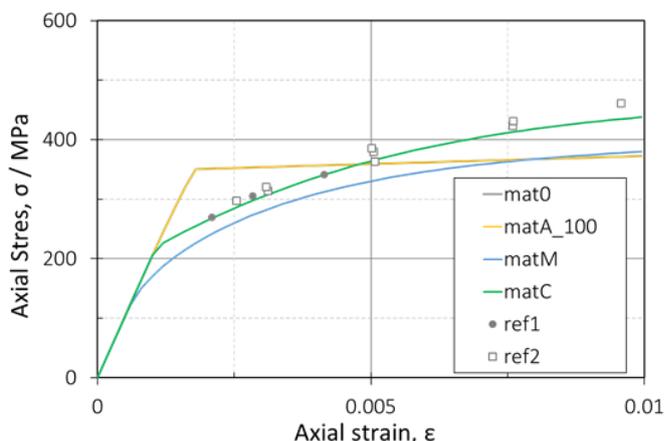


図-1 単調載荷時の応力ひずみ関係

BJO と BJA_100 では疲労き裂の発生が予測された止端部周辺にダメージが集積している．一方で，BJM においては初期に設定したダメージの値が継手全体に渡り分布している．

次に疲労き裂発生寿命予測を行った結果を示す．なお疲労き裂発生寿命 N_c の算出には，局所軸ひずみ範囲と試験データに基づく，先行研究の手法を用いた²⁾．図-4 にき裂の発生が予測された要素 A における応力ひずみ関係を示す．ひずみの集積量は全体が軟化している BJM で最も多く，次が部分的に軟化している BJA_100 となり，BJO と BJC が同程度で最も少なくなっている．また，図-5 に S-N 線図を示す．き裂発生寿命は $BJA_{100} < BJM < BJC < BJO$ の順に長くなっている．BJM, BJA_100 ではき裂発生個所にて材料が繰返し軟化後の応答を示すため，寿命が短くなったと考えられる．また BJM ではき裂発生個所だけでなく周辺も軟らかいため，変形しやすく止端部周辺の形状が鈍化し，応力集中が減少したため BJA_100 に比べ疲労き裂発生寿命が長くなったと考えられる．逆に BJA_100 ではひずみは溶接止端のみに集中し安全側の評価となっている．一方，BJC では，繰返し応力ひずみ関係は繰返し軟・硬化後のループの先端を結んだ関係と定義しており，実際よりも硬い応答を示すため BJM よりもき裂発生寿命を長く評価，すなわち危険側に評価する結果となっている．

参考文献

- 1) Tsutsumi, S, Fincato, R. : Cyclic plasticity model for fatigue with softening behavior below macroscopic yielding, Materials and Design, 165, 107573, 2019
- 2) 平出ほか：溶接継手疲労寿命に及ぼす熱影響部の繰返し負荷下の材料挙動の影響，溶接学会論文集, 36(2) (2018), 145-151.

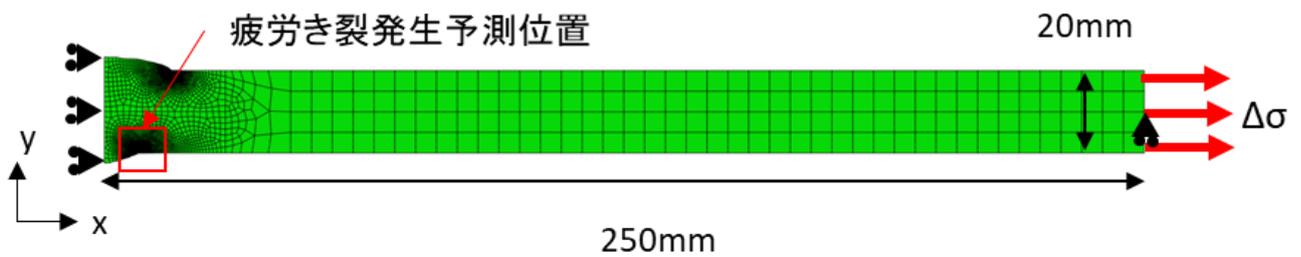


図-2 解析モデル

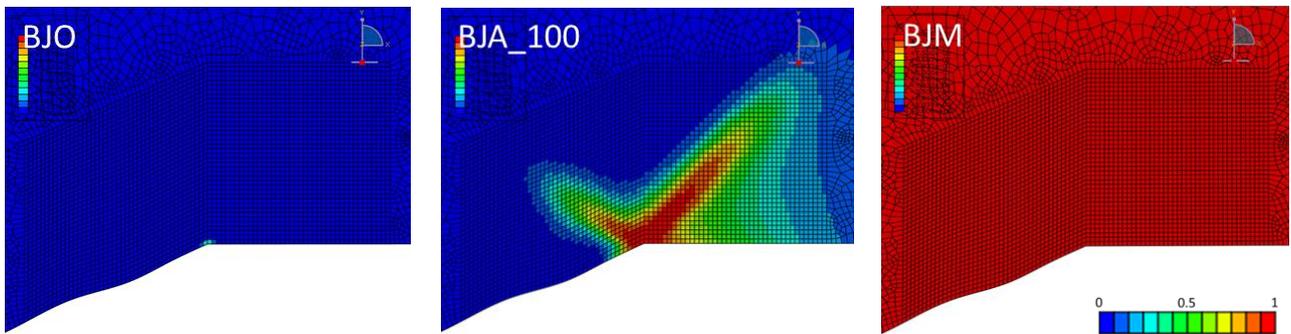


図-3 ダメージの分布

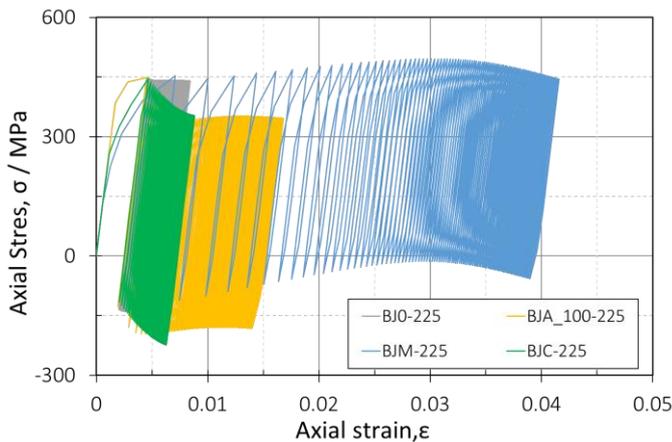


図-4 要素 A における SS 応答

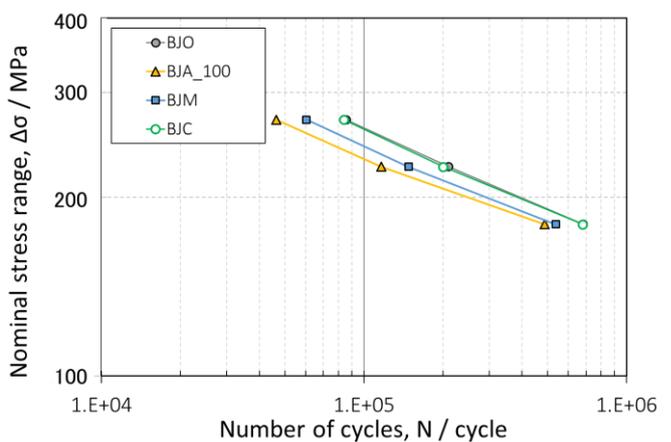


図-5 S-N 線図