

第 I 部門

繰返し弾塑性応答を考慮した疲労亀裂伝播寿命評価

－ 応力比影響に関する検討 －

大阪大学 接合科学研究所 学生員

○長濱 啓和

正会員

堤 成一郎

正会員

フィンカト リカルド

1. 緒言

構造物の損傷の多くは疲労に起因していると言われ、一般に疲労破壊は疲労亀裂の発生と伝播に分けて議論される。前者に対し著者らは繰返し弾塑性解析を用いた局所ひずみ $\Delta\varepsilon_t$ に基づく手法を提案してきた。一方で、疲労亀裂進展の駆動力としては破壊力学に基づく応力拡大係数 ΔK や J 積分が用いられることが多く、JSSC の疲労設計指針¹⁾ などでも Paris 則を用いた手法が採用されている。しかし、 ΔK による評価は弾性材料を前提としており、小規模降伏を仮定できない微小亀裂や大変形時に対しては適用できず、ましてや荷重履歴（例えばオーバーロード）の影響を考慮できない。複雑な荷重履歴に対して、低～高サイクル域の疲労亀裂発生と伝播を高精度かつ簡便に同一の理論的枠組みで評価したいというニーズは高い。

近年著者らは、材料の局所的な弾塑性応答に基づいて疲労亀裂伝播寿命を評価する（CP-FSS）手法を提案している²⁾。本手法は、疲労亀裂の伝播を疲労亀裂の発生の連続挙動として考え、疲労亀裂伝播寿命を評価している。しかし、CP-FSS 法により疲労亀裂伝播速度に対する応力比影響は明らかにされていなかった。そこで本研究では、疲労亀裂伝播速度に対する応力比影響に関して、CP-FSS 法を用いた解析を行い、その予測精度に関して検討する。

2. 解析モデルおよび解析結果

CT 試験片^{例え3)}を模擬した 2 次元モデル（平面ひずみ条件）を Fig. 1 に示す。材料モデルには疲労 SS モデル⁴⁾を用いた。荷重条件は応力比 $R=0.1$ かつ荷重一定で、繰返し数 20 回とした。亀裂は荷重載荷直角方向に進展すると仮定し、亀裂分離面上の要素の境界条件を変更することで亀裂の進展を模擬した。亀裂長さ $a=0\text{mm}$ から 2mm 刻みで 12mm まで変化させた解析を行った。亀裂先端近傍の要素サイズ l は $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ とした。

Fig. 2 に累積相当塑性ひずみの分布、Fig. 3 に各亀裂先端部節点における荷重載荷軸方向の応力ひずみ応答を示す。亀裂長さ a に比例し、累積相当塑性ひずみ分布が広範囲になり、ループ幅とラチェットひずみが大きくなることから分かる。

3. 疲労亀裂伝播寿命評価手法および算出結果

CP-FSS では疲労亀裂伝播を発生時の連続挙動として評価する。疲労亀裂発生条件として次式(1)を提案する。

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_a} \right) = 0.305 N_c^{-0.580} + 0.00412 N_c^{-0.115} \quad (1)$$

ここで、 σ_w/σ_a は平均応力 σ'_m の関数である。弾塑性解析により得られるひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ および平均応力 σ'_m を式(1)に代入

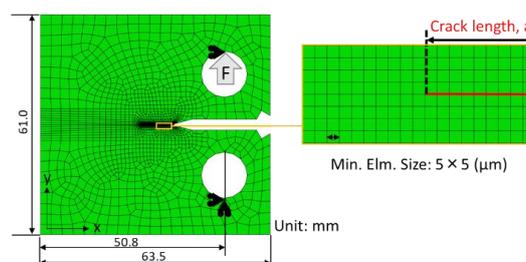
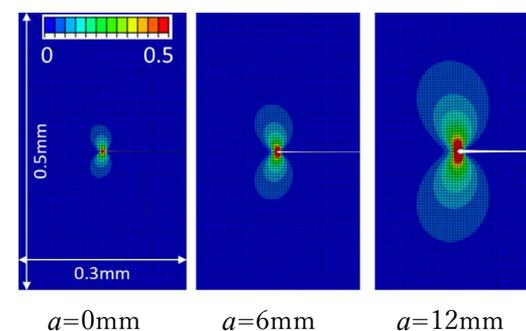


Fig. 1 FE 解析モデルと付与した境界条件

Fig. 2 累積相当塑性ひずみの分布 ($l=5\mu\text{m}$)

し疲労亀裂発生寿命 N_c を算出し、その間に疲労亀裂が Δa 進展するとして疲労き裂伝播速度 $da/dN = \Delta a/N_c$ を算出する。算出結果 da/dN および評価対象結果を Fig. 4 に示す。横軸の ΔK は実験と同様に弾性解析解の値を用いた。 $a=0$ における da/dN の実験結果を再現できる疲労亀裂進展長さとして $\Delta a = 5.35\mu\text{m}$ とした。得られた伝播速度の積分により得られる伝播寿命が実験結果と誤差 5%以内となり、実験結果を概ね再現できたと言える。

4. 応力比の影響に関する検討

応力比 $R = -0.5, 0.1, 0.5, 0.9$ の低 ΔK 域における検討を行った。前章と同様に、弾塑性解析による局所応答と式(1)により疲労亀裂発生寿命 N_c を算出し、疲労亀裂伝播速度 $da/dN = \Delta a/N_c$ を算出した。なお、パラメータ Δa の値は同様に $\Delta a = 5.35\mu\text{m}$ とした。その結果を Fig. 5 に示す。応力比 R が高いほど同じ ΔK に対する疲労亀裂伝播速度が速くなる傾向が再現されている。また、疲労亀裂伝播速度 $da/dN = 1.0\text{E-}11$ (m/cycle) に対応する ΔK を ΔK_{th} とし、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} と応力比 R の関係を Fig. 6 に示す。応力比 R の上昇とともに下限界応力拡大係数 ΔK_{th} が減少していることが確認できる。また、JSSC の設計指針¹⁾で通常用いられる $\Delta K_{th} = 2.4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (応力比 $R=0$) の値を概ね再現可能であることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、CP-FSS 手法を採用し、疲労亀裂伝播速度に対する応力比影響に関して考察を行った。実験結果との比較により実験結果を精度よく再現できることが示された。下限界応力拡大係数 ΔK_{th} は応力比 R の上昇とともに減少し、JSSC の設計指針で用いられる値と概ね一致する結果を得た。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012。
- 2) 堤成一郎，長濱啓和，R. Fincato: 局所弾塑性応答に基づく鋼材の疲労き裂発生および伝播寿命評価，土論 A2, Vol. 75, No. 2, (2019), I_445-I_453。
- 3) Yoshikawa, M., et al.: Effects of hydrogen gas pressure and test frequency on fatigue crack growth properties of low carbon steel in 0.1-90 MPa hydrogen gas, Transactions of the JSME Vol.80 No.817 (2014), 1-16。
- 4) S.Tsutsumi, R.Fincato, Cyclic plasticity model for fatigue with softening behaviour below macroscopic yielding, Materials & Design, 165, (2019), 107573。

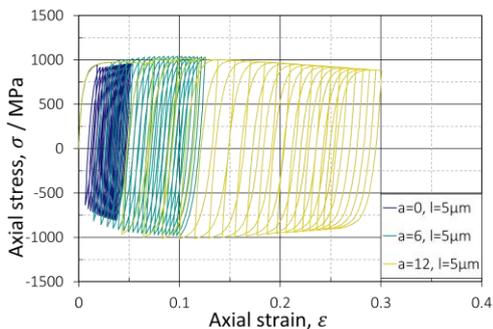


Fig. 3 き裂先端の荷重載荷軸方向の応力ひずみ応答

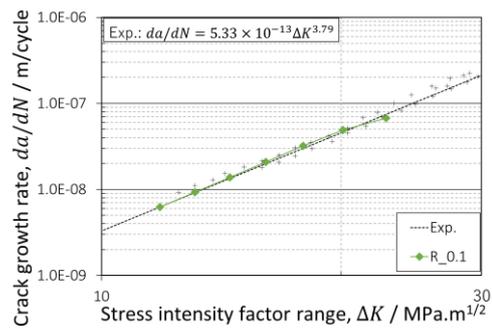


Fig. 4 疲労き裂伝播速度算出結果 (算出結果：◇印，実験結果：点線)

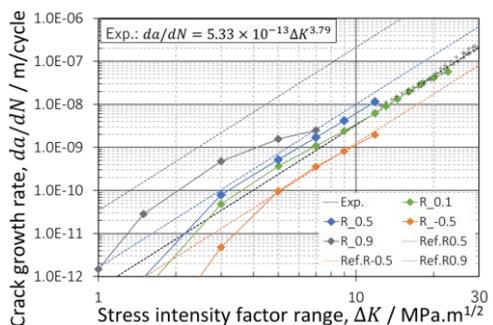


Fig. 5 疲労き裂伝播速度算出結果

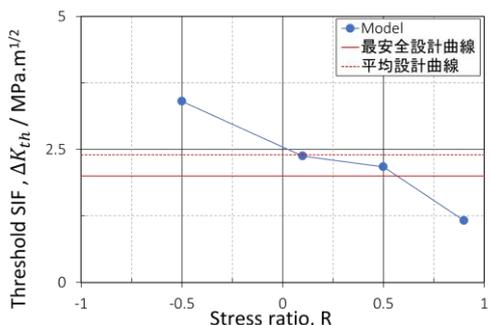


Fig. 6 下限界応力拡大係数 ΔK_{th} と応力比 R の関係