

局所弾塑性応答に基づく鋼材の疲労亀裂伝播寿命評価

- 応力集中場中存在する表面亀裂の進展特性 -

Fatigue crack propagation life predicted by local elastoplasticity response

- Surface crack propagation from a notch with stress concentration -

堤 成一郎 (大阪大・接合研) 長濱啓和 (大阪大・接合研)
 清川裕樹 (大阪大・接合研) FINCATO Riccardo (大阪大・接合研)
 TSUTSUMI Seiichiro, Osaka University, JWRI
 NAGAHAMA Hirokazu, Osaka University, JWRI
 KIYOKAWA Yuki, Osaka University, JWRI
 FINCATO Riccardo, Osaka University, JWRI
 FAX: 06-6879-8689, E-mail: tsutsumi@jwri.osaka-u.ac.jp

This paper investigates the surface crack propagation life based on the local elasto-plasticity response at crack tip. Fatigue crack propagation including its life and the profiles are assessed as a continuous behavior of fatigue crack initiation in this study. Firstly fatigue crack initiation life is assessed by 3-dimensional cyclic elasto-plasticity analyses and $\Delta\varepsilon-N_c$ criterion. Then fatigue crack growth rate is calculated as $da/dN = \Delta a/N_c$, where Δa is a fatigue crack growth length parameter. It is verified that fatigue crack propagation life in the depth and width directions is accurately assessed by comparing with the corresponding experimental results.

1. 緒言

鋼橋に代表される大型溶接構造物に発生する損傷事例の多くは疲労に起因しており、その損傷メカニズムに関しては、疲労亀裂発生と伝播に分けて議論される。疲労亀裂発生問題に関して、これまで各種取り組みがなされており、著者らは最新の繰返し弾塑性モデルを採用した FEM 解析を用いた局所ひずみ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 の疲労設計指針などでも Paris 則を用いた手法が採用されている。しかしながら、 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) の影響を適切に考慮することはできない。また、弾塑性破壊力学パラメータである J 積分を採用する場合でも、負荷/除荷時の応答が時々刻々と変化する一般の弾塑性材料への適用は理論保証外となっており、適用範囲が限定される。社会基盤の分野でも性能規定型耐震設計法が導入されるなど、複雑な荷重履歴に対して、低～高サイクルの疲労亀裂の発生伝播を同じ理論的かつ簡便・高精度に評価したいというニーズも高まっている。

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。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 法の適用検証は板厚貫通亀裂問題に限定されており、表面亀裂に対する検討は行われていなかった。そこで本研究では、表面き裂に対する疲労亀裂伝播寿命評価を行い、その予測精度に関して検討する。

2. 局所弾塑性応答に基づく疲労亀裂伝播寿命評価手法

本研究では、材料試験に基づく実験データベースであるひずみ寿命式をもとに疲労亀裂発生寿命 N_c を算出し、その間に亀裂が Δa 進展するとして疲労亀裂伝播速度 da/dN を $da/dN = \Delta a/N_c$ として算出する。なお、 Δa は亀裂伝播速度を決める材料定数であり、本研究では初期の亀裂速度を再現できる値として $\Delta a = 0.120 \text{ mm}$ とした。亀裂長さを変化させ上記手順を繰り返すことにより各亀裂長さにおける亀裂

進展速度を求める。そして得られた亀裂進展速度を積分することにより疲労亀裂伝播寿命 N_p を算出する。

3. 解析条件

本研究では穴井²⁾によって行われた KA 鋼材の切欠き付試験片の実験を対象として解析を行った。Fig. 1 に破面写真および設定した亀裂形状 (K1-2, 7, 13, K2-2, 5, 9) を併せて示す。楕円の一部とした亀裂形状は実験により得られたビーチマークの形状とよく一致している。Fig. 2 に FE モデルの一例 (K1-2) を示す。亀裂先端近傍の最小メッシュサイズは $0.05 \times 0.05 \times 0.05 \text{ mm}$ としている。計算時間を削減するため、亀裂周辺とそれ以外の部分でそれぞれ要素分割を行い、Tie 機能により節点不連続部を結合している。

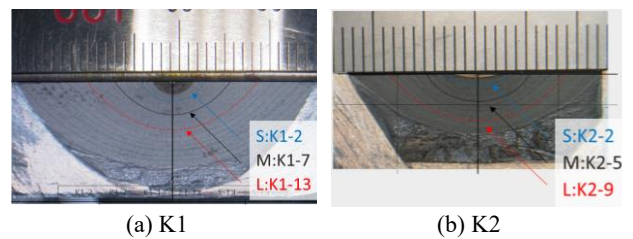


Fig. 1 疲労破面およびモデルの亀裂形状

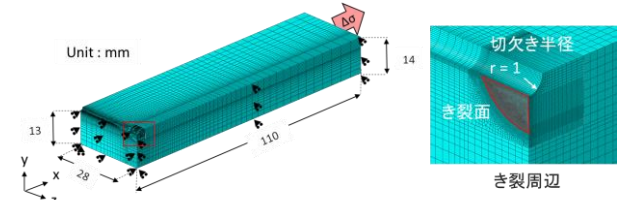


Fig. 2 FE モデル

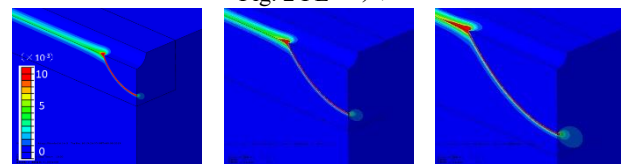


Fig. 3 累積相当塑性ひずみの分布

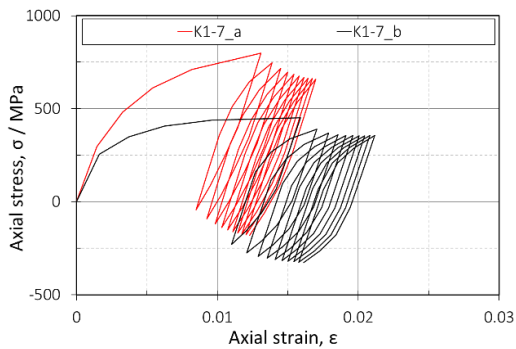


Fig. 4 亀裂先端の局所応力ひずみ応答 (K1-7, a : 亀裂最深部, b : 板表面部)

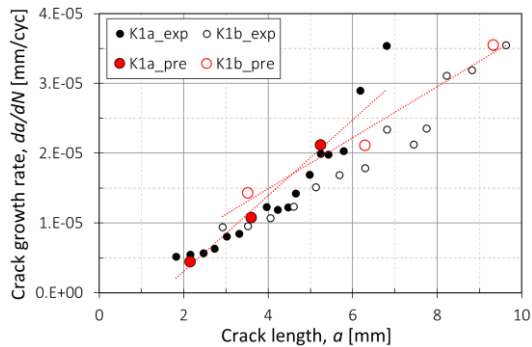


Fig. 6 亀裂長さとの亀裂伝播速度の関係 (a : 深さ方向, b : 幅方向)

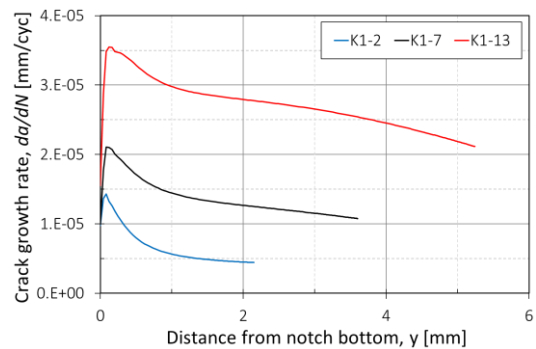


Fig. 5 板深さ方向の疲労亀裂伝播速度の分布

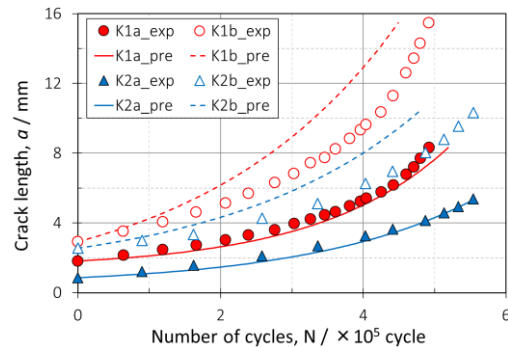


Fig. 7 疲労亀裂伝播寿命予測結果 (exp:実験結果, pre:解析による予測結果)

荷重条件は応力範囲 $\Delta\sigma=125\text{MPa}$, 応力比 $R=0.4$ を 10 回載荷した。材料モデルには疲労 SS モデル³⁾を用いた。本研究では KA 鋼と同程度の SM490 材の繰返し軟化後の応力ひずみ応答に対して材料定数を同定した。

4. 解析結果と考察

Fig. 3 に繰返し弾塑性解析によって得られた累積相当塑性ひずみの分布を示す。いずれの場合においても亀裂縁前縁および切欠き底周辺に塑性ひずみが集中していることが見て取れる。また、亀裂が大きくなるにつれて塑性域および塑性ひずみが増加している。Fig. 4 に解析によって得られた亀裂最深部 (a) および板表面部 (b) の亀裂先端節点の荷重軸荷方向の局所応力ひずみ応答を示す。亀裂最深部と板表面部を比較すると、亀裂最深部 (a) では高い応力で繰り返す一方、板表面部 (b) においてひずみ範囲が大きくなる傾向がみられる。

Fig. 5 に亀裂縁に沿った板深さ方向の da/dN の分布を示す。板表面から離れるにしたがい亀裂進展速度が遅くなる傾向が見て取れる。板表面では平面応力状態に近い状態、塑性変形がしやすいことに加え、切欠きによる応力集中が板表面で生じるため板表面付近での亀裂進展速度が速くなっているものと考えられる。また、板表面極近傍 ($y=0$) では亀裂進展速度は周囲に比べ低くなっている。しかしながら、板表面の極近傍 (板表面から 0.1 - 0.2 mm) のみ亀裂進展速度が遅かったとしても周囲の亀裂進展速度が速ければ次のサイクルで亀裂は進展するはずである。そこで、板表面幅方向 (b) の亀裂進展速度は板表面 ($y=0$) 付近の最大値を採用した。また、深さ方向 (a) の亀裂進展速度は亀裂最深部 ($y=90$) の値とした。Fig. 6 に予測された疲労亀裂進展速度と亀裂長さの関係を実験結果の○印と共に示す。なお実験の疲労亀裂進展速度は文献²⁾のデータを基に端点以外は中央差分、端点は前進差分もしくは後退差分によって

求めた。解析によって得られた亀裂進展速度は概ね実験結果²⁾の傾向を捉えている。

Fig. 7 に疲労亀裂伝播寿命の予測結果を示す。実線および点線は解析による予測結果、○および△印は実験結果²⁾を表している。疲労亀裂伝播寿命は亀裂長さとの亀裂進展速度の関係を線形近似することにより亀裂長さ 0.05 mm ごとに亀裂進展速度を求め、0.05 mm 進むのに要する繰返し数を足し合わせることで算出した。K1, K2 いずれの場合においても深さ方向の予測結果は概ね実験結果²⁾を捉えており 10% 以内の精度で寿命評価を行うことができた。一方で幅方向は実験結果²⁾と比べ誤差が大きい (15% 以内) ものの安全側の評価となった。

5. 結論

本研究では疲労亀裂の伝播を発生連続として考え、材料の局所弾塑性応答に基づく疲労亀裂伝播寿命評価手法を提案した。具体的には繰返し弾塑性解析により得られる局所応力ひずみひずみ応答と疲労亀裂発生評価式を用いて疲労亀裂発生寿命 N_c を算出し、その間に疲労亀裂が Δa 進展するとして亀裂伝播速度 da/dN を算出した。本手法を表面亀裂に適用、実験結果と比較することにより、深さ方向および幅方向の亀裂伝播寿命を精度よく評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 穴井陽祐: 応力集中場に存在する疲労表面亀裂の形状変化推定法の提案とその疲労寿命評価手法への適用. 九州大学博士論文, 2015.
- 3) S.Tsutsumi, R.Fincato: Cyclic plasticity model for fatigue with softening behaviour below macroscopic yielding, Materials & Design, 165, (2019), 107573