

大阪大学工学部	学生員	○桐生 泰輔
大阪大学大学院	学生員	柴田 誉
パドヴァ大学	非会員	フィンカト リカルド
大阪大学大学院	正会員	堤 成一郎

1. 緒 言

機械・構造物の損傷の約 8 割は疲労に起因していると言われており、耐疲労設計や余寿命評価のための技術確立が重要となっている。しかし、実構造物における疲労問題は、亀裂開閉口挙動や応力比 R など亀裂面接触状態の影響因子に加え、溶接入熱による局所的強度分布の影響や変動荷重影響なども重畳し、複雑な挙動を示す。そのため、高精度・簡便な疲労寿命評価手法の確立が、喫緊の課題と言える。

著者ら¹⁾は、これまで巨視的弾性状態を含む応力ひずみ応答を高精度に再現可能な弾塑性材料モデル（以降、疲労 SS モデル）を開発するとともに、得られる局所応答より疲労亀裂発生寿命 N_c を評価する手法を検討²⁾してきた。近年では、この手法を疲労亀裂進展問題へと拡張し、唯一つの材料パラメータ Δa の導入によって、疲労亀裂進展速度 da/dN および進展寿命 N を高精度に再現可能な手法の提案³⁾を行っている。この手法は、疲労亀裂進展現象を亀裂先端における疲労亀裂発生問題の連続挙動と考え、亀裂発生から進展までを同じ材料モデルを導入した弾塑性変形解析の枠組みで評価することが可能である。これにより従来の破壊力学的手法では適用不可能であった非線形性の強い力学現象の解明も期待されている。この手法の妥当性検証として、米澤ら⁴⁾は、3 種の異なる鋼種に対し、亀裂発生直後の短い亀裂から破断までの寿命を概ね予測可能であることを確認し、この手法の有効性を検証した。ただし、解析モデルが 2 次元平面ひずみモデルと仮定されていたことや亀裂進展に伴う変形履歴および損傷履歴の考慮がなされていないことに改善の余地を有していた。

そこで本研究では、著者らの提案する弾塑性疲労亀裂進展解析手法を拡張し、鋼材の弾塑性変形履歴と累積損傷を考慮した疲労亀裂進展性能予測手法を開発することを目的とした。具体的には、亀裂進展に伴う変形履歴および累積損傷を考慮した手法を提案し、複数の最大応力 σ_{max} および応力比 R に対する検証を行った。

2. 弾塑性変形履歴および損傷履歴を考慮した疲労亀裂進展寿命評価手法

本章では、本研究で提案する手法の概要を述べる。なお、著者らがこれまで提案している弾塑性疲労亀裂進展寿命評価手法については、疲労亀裂進展速度 da/dN を

式(1)にて表現するが、その詳細については先行文献⁴⁾を参照されたい。

$$da/dN = \Delta a/N_c \tag{1}$$

ここに Δa は疲労亀裂進展速度に影響を与える材料定数もしくは関数であり、本研究では $\Delta a = 137.9\mu\text{m}$ を採用した。また、疲労亀裂発生寿命 N_c は、平均応力 σ_m および全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ の関数である。

累積損傷の考慮の例として、Fig.1 の状況を考える。疲労亀裂進展速度の評価対象位置は位置 i であり、右図は位置 i に向けて左から疲労亀裂が一要素ずつ進む様子を、左図の棒グラフは亀裂進展に伴い位置 i において累積する累積損傷 D を表現したものである。この時、累積損傷は $D = \sum D_i (i = 1, 2, 3)$ で表現し、 $D = 1$ となる時疲労亀裂が発生すると考える。

まず初めに、State I のとき、疲労亀裂先端は位置 $i - 2$ にある。この時、亀裂先端において全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{t,i-2,1}$ および平均応力 $\sigma_{m,i-2,1}$ 、対応する亀裂発生寿命 $N_{c,i-2,1}$ が算出される。この時、評価対象位置 i においても繰返し荷重載荷状態となっており、 i においても亀裂発生寿命 $N_{c,i,1}$ を算出することができる。つまり、位置 i では、現状の荷重が $N_{c,i,1}$

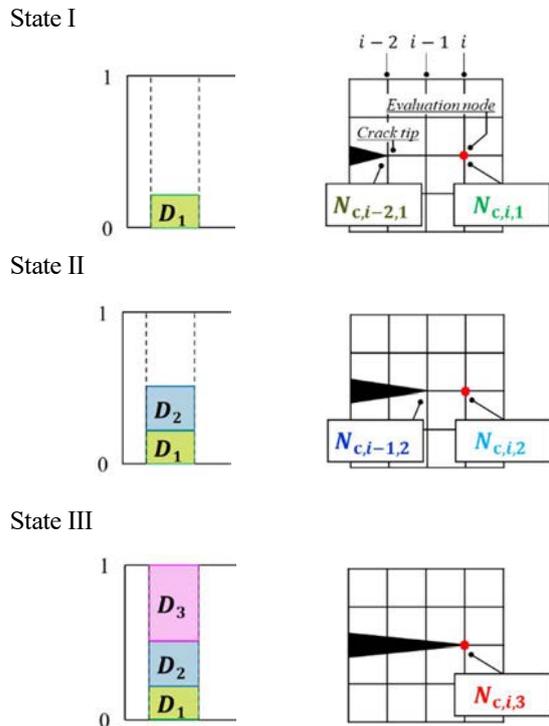


Fig.1 Damage Consideration Methods

回載荷された場合に亀裂が発生するところ、実際は $N_{c,i-2,1}$ 回だけ載荷されている状態である。ここで、線形累積被害則の考え方を援用して、位置 i における損傷度 D_1 を $D_1 = N_{c,i-2,1}/N_{c,i,1}$ と表現する。同様に、State IIの場合は、位置 i にて $D_2 = N_{c,i-1,2}/N_{c,i,2}$ が累積するため、この時点で $D = D_1 + D_2$ だけ損傷が累積することとなる。最後に、亀裂先端が評価対象位置 i に到達したState IIIの場合、この節点が許容可能な損傷値は $1 - D = 1 - (D_1 + D_2)$ となり、この値を解析から直接得られる亀裂発生寿命 $N_{c,i,3}$ に乗じることで、亀裂進展に伴う累積損傷を考慮した評価が行われる。

なお、本研究では、累積被害を適用する位置として、評価対象位置から2要素分離れた位置 $i-2$ から考え始めることとしているが、これは位置 $i-3$ 以前の累積値は1割にも満たないためである。

3. 解析モデルおよび解析結果

Fig.2 に、SENT 試験片を模した3次元FEモデル(1/2対称モデル) および付与した境界条件を示す。(最小要素サイズ0.05mm 四方, 要素数:26,592, 節点数:32,753) 荷重条件は、疲労亀裂進展試験を模した一定荷重条件であり、組合せはTable 1に示す通りである。荷重繰返し数は $N = 10$ 回とし、解析モデル上部に載荷した。解析に使用した汎用有限要素解析ソフトはADVENTURECluster2023であり、材料モデルにはユーザーサブルーチン機能を使用して疲労SSモデル¹⁾を使用した。亀裂は、切欠き底を起点として荷重載荷方向の直角方向に進展するものと仮定し、1要素(0.05mm)ずつ亀裂を進展させた。なお、亀裂進展に際しては、直前の亀裂長さにおける繰返し弾塑性解析の最終ステップにおける応力、背応力および塑性ひずみなどの内部状態

Table 1 Investigation cases

Case	R	P_{max}	P_{min}
1	0.1	90	9
2	-1.0	90	-90
3	0.1	110	11
4	-1.0	110	-110

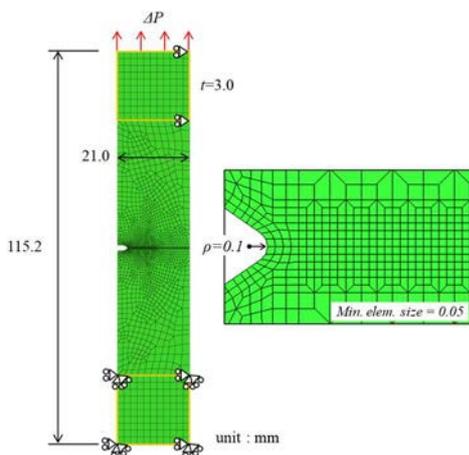


Fig.2 FE model and boundary conditions

変数を全て引き継いだ。亀裂面同士の接触条件はLagrange 未定乗数法により定義した。

以上の解析より得られた予測結果をFig 3に示す。この結果より、実験結果と予測結果の若干の乖離は見られるものの、提案手法は最大荷重および応力比の異なる4条件の疲労試験結果を概ね再現可能であることが確認できる。

4. 結言

本研究では、著者らが提案する弾塑性疲労亀裂進展寿命評価手法に対し、弾塑性変形履歴および累積損傷を考慮する亀裂進展速度評価手法の提案を行った。その結果、決定した Δa を用いて、複数の条件の最大応力、応力比の試験結果を精度よく再現できることを確認した。今後の課題として、疲労亀裂進展時の亀裂先端における応力勾配の異なる試験片形状に対する検証や、疲労亀裂進展形状に関する検証、また、亀裂進展速度に板厚が与える影響の検証等が挙げられる。

参考文献

- 1) S. Tsutsumi and R. Fincato: Cyclic plasticity model for fatigue with softening behavior below macroscopic yielding, *Materials & Design*, Vol.165, No.5, 107573, 2019.
- 2) 森田花清, 毛利雅志, アヤン・ブリハン, フィンカト・リカルド, 堤成一郎: 低炭素鋼母材と再現HAZ材の繰返し弾塑性応答と疲労亀裂発生寿命(繰返し弾塑性応答に基づく溶接継手の疲労性能評価), *溶接学会論文集*, 第40巻, 第1号, pp.36-43, 2022.
- 3) 堤成一郎, 長濱啓和, Riccardo 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, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, I_445-I_453, 2019.
- 4) 管楯文, 米澤隆行, 桐生泰輔, FINCATO Riccardo, 堤成一郎: 繰返し軟・硬化挙動を示す鉄鋼材料の疲労亀裂進展速度の予測手法開発, *溶接構造シンポジウム 2023 講演論文集*, p.122-125, 2023.

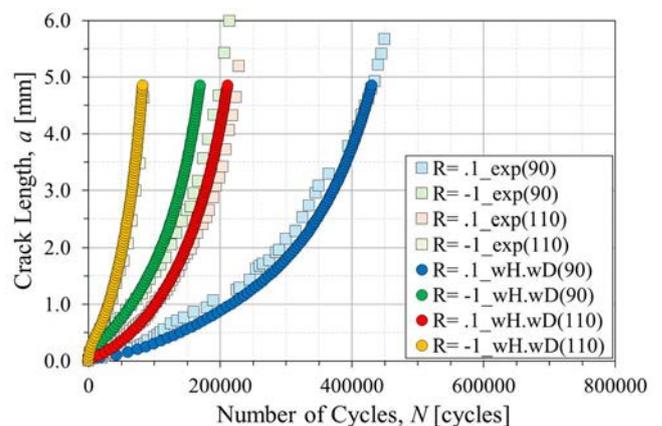


Fig 3 $a - N$ relationships