

第 I 部門

構造用鋼の亀裂面腐食を活用する疲労寿命の予測手法開発

大阪大学大学院	学生員	○河野拳也
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・構造物の損傷要因の多くは疲労に起因しており、疲労寿命延伸技術の開発、活用は喫緊の課題とされている。

例えば、高橋ら¹⁾は、疲労亀裂面内に微細金属粒および磁粉を混ぜたオイルペーストを注入することによる大幅な疲労亀裂遅延を報告している。また、Putri ら²⁾は、疲労亀裂面内に腐食促進剤（65%硝酸）を注入して亀裂面に腐食生成物を堆積させ、荷重レベルや疲労亀裂長さに応じた寿命延伸効果の大小を報告している。ただし、腐食生成物量の測定や対応する寿命延伸効果等のメカニズム解明はなされていない。これを踏まえ、柴田ら³⁾は熱膨張解析を活用した数値解析評価を実施し、異なる 3 つの試験結果が再現可能なことを報告した。ただし、腐食生成物の物性値に関する詳細な検討は行われていない。

そこで、本研究では腐食による亀裂面要素の物性値を考慮した解析評価を行い、疲労亀裂面を積極的に腐食させる寿命延伸技術のメカニズム解明、ひいては新たな数値解析手法の確立によるデジタルツイン技術の開発や活用を目的とした検討を行う。

2. 疲労亀裂進展寿命評価の流れ

本研究では、研究室で開発を進めている疲労亀裂進展速度 da/dN および進展寿命予測手法⁴⁾を採用した。この手法では、疲労亀裂進展挙動を亀裂先端における疲労亀裂発生連続挙動として考えて疲労亀裂進展速度 da/dN を算出する。

まず初めに、繰返し弾塑性解析において、亀裂先端節点の繰返し荷重載荷最終サイクルにおける全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ および平均応力 σ_m を取得する。続いて、それら値と実験データベースを基に平均応力の影響を考慮して拡張した疲労亀裂発生寿命評価式を用いて疲労亀裂発生寿命 N_c を算出する。次に、予測された疲労亀裂発生寿命 N_c の間に疲労亀裂が Δa だけ進展するとして、次式により疲労亀裂進展速度 da/dN を算出する。

$$da/dN = \Delta a/N_c \quad (1)$$

疲労亀裂進展寿命 N_p は、疲労亀裂進展速度 da/dN を亀裂長さ a に亘って積分することにより算出する。

3. 数値解析条件

CT 試験片を模擬した 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 Fig. 1 に示す。要素数：42,696、節点数：53,172 であり、亀裂進展領域の対称面上に 50 μm 程度の立方体要素を配置した。解析には汎用有限要素解析ソフト ADVENTURECluster2022 使用し、ユーザーサブルーチン機能を使用して疲労 SS モデルを実装した。

荷重条件は、一定荷重条件（荷重一定、応力比 $R=0.048$ ）とし、繰返し荷重を解析モデル上部に 10 回載荷した。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、亀裂分離面上の接触条件領域を変化させて進展させた。

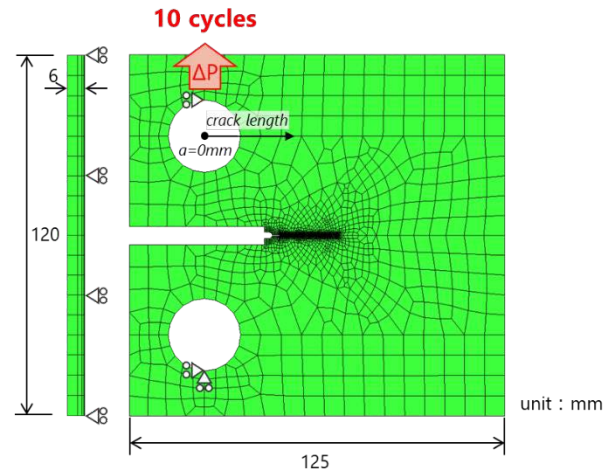


Fig. 1 解析モデルおよび境界条件

まず初めに、①亀裂面腐食前の疲労亀裂進展試験を模した弾塑性疲労亀裂進展解析を実施する。亀裂長さ a は、試験片荷重載荷点を $a=0\text{mm}$ 、切欠き底を 25mm として、 $a=29.4\text{mm}$ まで進展させた。

続いて、②腐食影響を模した解析として、既往文献

3)を参考に、亀裂面要素への入熱解析を行う。ここでは、亀裂面要素を鋼材と腐食生成物の合成要素として考え、鋼材の弾性係数を $E_{stl.}=206000\text{MPa}$ 、腐食生成物の弾性係数を $E_{co.}=300\text{MPa}$ とし、以下の式から合成要素弾性係数を決定した。

ここに、 a および b は、それぞれ鉄、腐食性生成物の厚みであり、腐食生成物量割合 $t(=b/a)$ を導入する。また、入熱量は、実際の腐食状況を模し、亀裂面要素同士が十分接触する程度の熱を与えた。最後に、③亀裂を少しずつ進展させながら、①と同荷重条件の弾塑性疲労亀裂進展解析を実施する。

4. 解析結果

Fig. 2 に合成弾性係数 E_{all} に $t=0.1$ を採用した、亀裂面膨張直前と直後の亀裂先端節点における応力ひずみ線図を示す。この図より、疲労亀裂発生寿命 N_c を決定するパラメータである平均応力 σ_m の上昇および全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ の大幅な減少が確認できる。続いて、Fig. 3

に第2章の手順により算出した亀裂長さ a と疲労亀裂進展速度 da/dN の関係を示す。同図には、実験結果 $+$ および亀裂面要素の膨張をさせない結果（大気中疲労試験結果に相当）も併せて示している。この結果より、亀裂面要素膨張をしない結果は、亀裂長さが大きくなるに従い亀裂進展速度 da/dN も単調増加していくが、要素膨張をさせた結果は急激に速度低下していることが分かる。また、その後は急激に速度が回復していく様子が見て取れ、疲労試験において取得された疲労亀裂進展挙動を高い精度で再現できている。

$$E_{all} = \frac{(1+t)E_{stl.}E_{co.}}{tE_{stl.} + E_{co.}} \quad (t = \frac{b}{a}) \quad (2)$$

展速度 da/dN の関係を示す。同図には、実験結果 $+$ および亀裂面要素の膨張をさせない結果（大気中疲労試験結果に相当）も併せて示している。この結果より、亀裂面要素膨張をしない結果は、亀裂長さが大きくなるに従い亀裂進展速度 da/dN も単調増加していくが、要素膨張をさせた結果は急激に速度低下していることが分かる。また、その後は急激に速度が回復していく様子が見て取れ、疲労試験において取得された疲労亀裂進展挙動を高い精度で再現できている。

5. まとめ

本研究では、亀裂面の腐食による体積膨張と実際の物性値を反映した繰り返し弾塑性解析手法の提案、及び

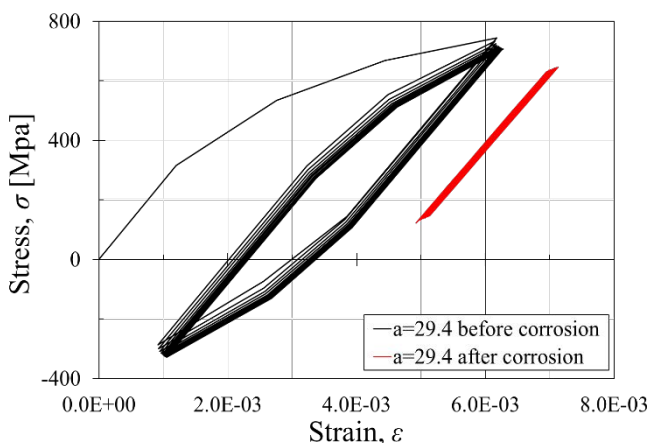


Fig. 2 膨張直前と直後における応力ひずみ線図

疲労亀裂進展速度 da/dN の評価を行った。その結果、亀裂面の体積膨張とその合成要素の適切な弾性係数 E_{all} となる腐食生成物量割合 t の導入によって、腐食による疲労亀裂進展速度 da/dN の回復挙動を概ね再現可能なことが分かった。しかし、膨張直後の急激な速度低下から回復していく挙動すべてを完璧に再現しているとは言い難い結果となった。これは亀裂面要素を弾性材料としているため、圧縮による塑性変形を考慮できておらず、亀裂閉口の影響が実現象より大きくなり亀裂進展速度の回復スピードが遅くなっているからと考えられる。今後は、実現象との乖離を埋めるため、実際の腐食による体積膨張量と数値解析における膨張量の関連付け、合成要素弾性係数 E_{all} 調整などによる解析精度の上昇を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 高橋一比古, 牛嶋通雄, 高橋千織, 植松進, 古谷典子: アルミナペースト塗布による疲労き裂進展の自動抑制および目視検出, 溶接学会論文集, 22, 4, pp.531-541, 2004.
- 2) Putri, C., A., Tateishi, K., Shimizu, M. and Hanji, T.: Retardation of fatigue crack growth by corrosion accelerator injection, Steel Construction Engineering, 28(112), 111-116, 2021.
- 3) 柴田 誉, 佐藤 啓介, フィンカトリカルド, 堤 成一郎: 亀裂面腐食による亀裂閉口を考慮した弾塑性疲労性能評価手法の開発, 溶接学会全国大会講演概要集, p.244-245, 2023.
- 4) 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), Vol.75, No.2 (応用力学論文集 Vol.22), I_445-I_453, 2019.
- 5) Tsutsumi, S. and Fincato, R.: Cyclic plasticity model for fatigue with softening behavior below macroscopic yielding, 165, 5, 107573, Materials & Design, 2019.

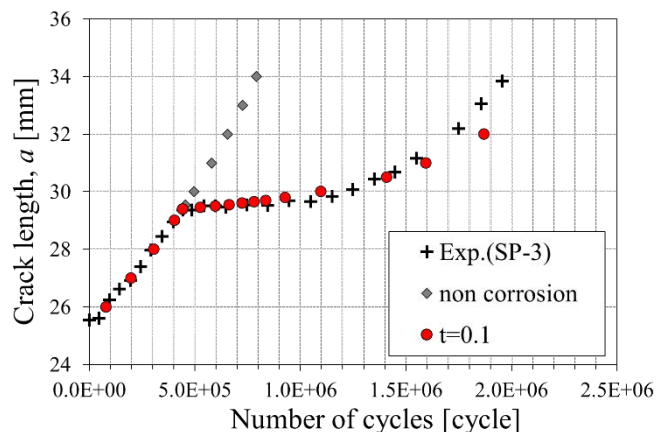


Fig. 3 亀裂長さaと疲労亀裂進展速度の関係