

第 I 部門 疲労亀裂進展寿命に及ぼす試験体サイズの影響

大阪大学大学院 ○桐生 泰輔
住友重機械工業 柴田 誉
IHI 森田 花清
日本製鉄 米澤 隆行
大阪大学大学院 堤 成一郎

The Effect of Specimen Size on Fatigue Crack Propagation Life

by KIRYU Taisuke, SHIBATA Homare, MORITA Kasumi,
YONEZAWA Takayuki and TSUTSUMI Seiichiro

キーワード：疲労，弾塑性，サイズ効果 Keyword：Fatigue, Elastoplastic, Size effect

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，高精度な耐疲労設計や余寿命評価のための技術確立が望まれている．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，様々な因子が重畳し複雑であり，現状の評価では精度に疑問がある．現状の破壊力学を用いた疲労性能評価手法として，Paris 則をベースとした評価が多用されており，評価式は実験結果をもとに，亀裂開閉口挙動や応力比の影響を考慮したモデルへ拡張されている．これら評価式は特定の条件下で経験則的に決定されるため，パラメータの物理的根拠は不明確であり，また適用範囲も限定的である．そこで著者らは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 FEM 解析結果の応力ひずみ応答を用いて評価する手法の提案を行ってきた．ただし，FEM 解析の応力ひずみ応答は，幾何学的に相似な大小の構造物に対して同等の結果をもたらすため，疲労亀裂進展速度や疲労性能に及ぼすサイズ効果の再現可能性についての検討は十分に行われていなかった．

そこで本研究では，鋼材の疲労亀裂進展寿命に及ぼす試験体サイズの影響に関する検討を行った．具体的には，著者らの提案する弾塑性変形履歴と累積損傷を考慮した疲労亀裂発生・進展性能評価手法²⁾を用いて，サイズの異なる疲労試験の再現解析を実施し，考察を行った．

2. 評価手法

本研究で採用した評価手法の概要を述べる．著者らが先に提案した繰返し弾塑性モデルを導入した FEM 解析を活用する手法は，疲労亀裂進展速度 da/dN を式(1)にて評価する．

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

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，実験結果との照査により決定する．ここで，実験に用いた鋼材は SM490 である．なお，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 $\Delta \varepsilon_t$ の関数であるが，その詳細については先行文献³⁾を参照されたい．

3. 解析条件および精度検証

Fig. 1 に，板厚 3mm の 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．解析には汎用有限要素解析ソフト ADVENTURECluster2024 を採用し，ユーザーサブルーチン機能により実装した疲労 SS モデル⁴⁾を材料モデルとして採用した．亀裂は，切欠き底および予亀裂先端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) ずつ節点を開放することにより亀裂進展を模擬した．なお，各亀裂長さにおける荷重繰返し数は $N = 1$ 回とし，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変形状態，応力に加えて，背応力および塑性ひずみなどの内部状態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．本手法の精度検証を行った結果を Fig. 2 に示す．最大応力が 90MPa と 110MPa の 2 通り，応力比が 0.1 と -1 の 2 通りの掛合せである 4 条件で検証した． Δa は，最大応力 110MPa，応力比 0.1 における亀裂長さ 5mm 地点での実験結果と予測結果の誤差が最小となるように決定し，177 μ m とした．以上の結果より本手法は試験結果を高精度に予測可能であり，また， $R = -1$ における，微小亀裂時

の高速進展及び減衰の現象も再現可能であることを確認した。

4. 試験体サイズの影響評価

3章で使用した板厚 3mm モデルと相似形を維持する板厚 1mm および 16mm のモデルに対して同様の解析を実施した。なお、いずれのモデルも亀裂進展部の最小メッシュサイズは 0.05mm × 0.05mm であり、荷重条件は最大応力 110MPa、応力比は 0.1 である。以上の解析により得られた、各試験片サイズにおける亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係および、亀裂長さ a と荷重サイクル数 N の関係を Fig. 3 に示す。比較対象として、Paris 則により予測した結果も示しているが、Paris 則パラメータ m は、板厚 3mm の SENT において、亀裂長さ 5.0mm 地点での実験結果と解析による予測結果が一致するよう決定した。これより、試験片サイズが大きくなるに従って、亀裂の進展が速くなる現象を弾塑性解析にて再現可能であることを確認できる。なお、実験に用いた板厚 16mm の試験体においては、解析に用いた材料モデルと化学成分および機械的性質において概ね類似しているが、完全に同一の材料ではない。そのため実験結果と解析結果が大きく乖離した可能性が考えられる。

5. 結言

本研究では、鋼材の疲労亀裂進展寿命に及ぼす試験体サイズの影響の解明を目的に、著者らの提案する弾塑性変形履歴と累積損傷を考慮した弾塑性 FEM 解析を実施して考察を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 採用した予測手法により、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。
- (2) 採用した予測手法により、試験体サイズが大きくなるに従って亀裂進展速度が上昇する現象は、予測精度に課題は残るが、再現できることを確認した。

参考文献

- (1) 日本材料学会編：疲労設計便覧，株式会社養賢堂，1995。
- (2) 柴田 誉，桐生泰輔，佐藤啓介，フィンカトリカルド，堤成一郎：弾塑性変形履歴と累積損傷を考慮した鋼材の疲労亀裂進展寿命予測手法，土木学会論文集，特集号（応用力学）論文，Vol. 81, No. 15, 24-15028, 2025。
- (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) S. Tsutsumi and R. Fincato: Cyclic plasticity model for fatigue with softening behavior below macroscopic yielding, Materials & Design, Vol.165, No.5, 107573, 2019。

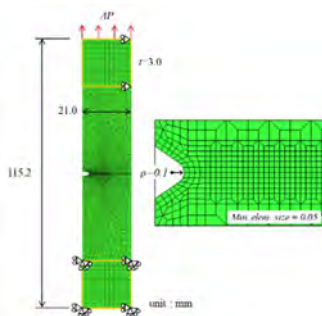


Fig.1 FE model and boundary conditions (t = 3mm)

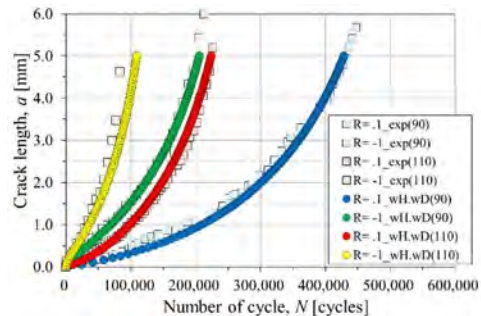
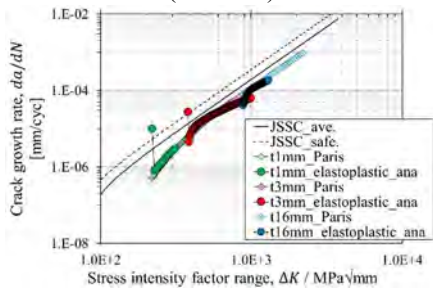
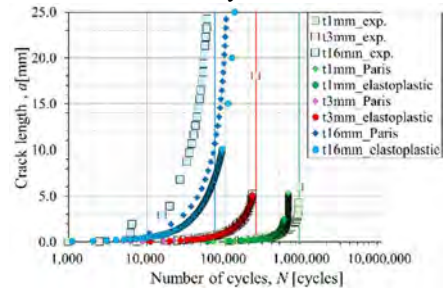


Fig.2 a-N prediction based on elasto-plastic analysis



da/dN vs ΔK

Fig.3 Comparison of elasto-plastic analysis and the Paris law



a vs N