第 1 部門　　弾塑性疲労性能評価手法の高効率化に関する検討-FEM 要素サイズ依存性の影響評価-

大阪大学大学院工学研究科　学生員　○西垣　駿
大阪大学大学院工学研究科　学生員　桐生　泰輔
大阪大学大学院工学研究科　学生員　田中　颯人
大阪大学大学院工学研究科　学生員　中村　源太
住友重機械工業株式会社　技術研究所　正会員　柴田　誉
大阪大学大学院工学研究科　正会員　堤　成一郎

1. 緒言

鋼構造物に生じる疲労損傷の対策は，設計から維持管理に至る各段階で重要な課題[1]であり，複雑な荷重履歴に対する疲労破壊までの寿命を高精度かつ簡便に予測可能な解析技術の確立が望まれる．著者らは，弾塑性 FEM 解析の結果から得られる局所的な弾塑性応答に基づき，疲労亀裂の発生寿命および破断までの進展寿命を統一的に評価可能な手法を提案[2-4]している．本評価に用いる疲労亀裂進展パラメータΔaは，亀裂先端近傍に位置する要素のサイズ（以降，要素サイズl）に依存して決定される．そのため，高精度な評価を目的として，要素サイズlを小さく設定した場合に計算コストが高くなることが課題である．一方，先行研究[2]では，CT 試験片を模擬した要素サイズl=0.005mm から 0.05mm の 2D モデルについて，試験結果を高精度で予測可能なΔaと要素サイズlの関係を定式化することにより，要素サイズlに非依存な疲労性能評価手法を提案している．しかし，計算コストの削減に有効な要素サイズlが大きな条件（l >0.05mm）に加えて，要素サイズlを不均一に配置したモデルへの適用性について検討はされていない．

そこで本研究では, SM490A からなる SENT 試験片を対象として，亀裂近傍に均一な要素サイズlのモデルを採用するとともに，疲労試験結果を再現可能な疲労亀裂進展パラメータΔaと最小評価距離a_0との関係式を提案する．次に，要素サイズlを亀裂進展方向に連続的に大きくしたモデルに対する提案手法の予測精度および，解析時間に及ぼす影響について検討を行う．

2. 弾塑性疲労性能評価手法の適用性検証

本研究で採用する疲労亀裂進展速度da/dNの評価手法について概説する．本手法では，鋼材の繰返し載荷に伴う弾塑性応答を高精度に再現可能な疲労 SS モデル[5]を採用した弾塑性 FEM 解析を実施し，応力集中部の節点で評価された弾塑性応答と実験データベースに基づく評価式[2]を活用することにより，疲労亀裂発生寿命N_cを算出する．さらに，亀裂進展速度の評価は，所定の亀裂長さaにおける亀裂先端での疲労亀裂発生寿命N_cを算出するとともに，N_cの間に疲労亀裂がΔaの距離を進展するとして，次式に従って疲労亀裂進展速度を算出する．

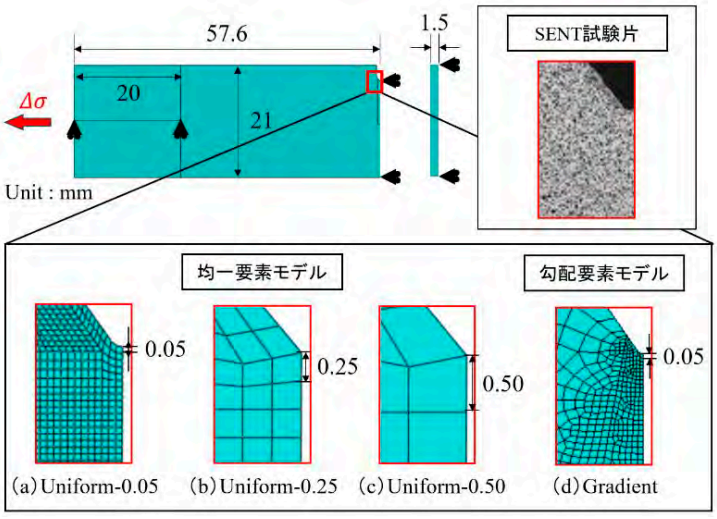


Fig. 1　FE mesh and boundary conditions for SENT specimen

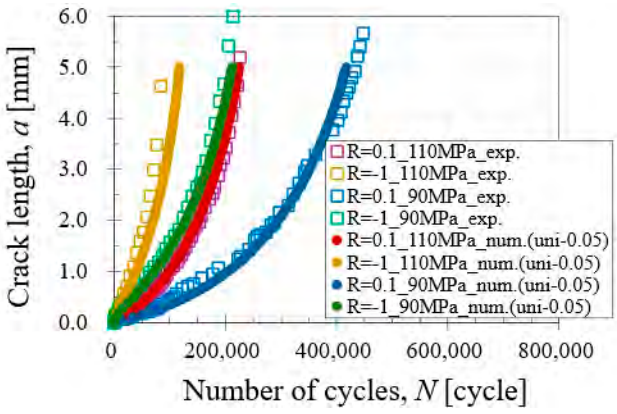


Fig. 2　Crack length vs. number of cycles (Uni-0.05)

Shun NISHIGAKI, Taisuke KIRYU, Hayato TANAKA, Genta NAKAMURA, Homare SHIBATA, Riccardo FINCATO, and Seiichiro TSUTSUMI
s.nishigaki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

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

疲労亀裂進展寿命Nは，疲労亀裂進展速度を亀裂長さaに亘って積分することで算出する．

本手法の適用性検証として，SENT 試験片の疲労試験結果を対象に再現解析を行った．本研究では，亀裂進展領域の要素サイズが一定の均一要素モデル（Uniform-0.05, Uniform-0.25, Uniform-0.50）と，要素サイズが連続的に変化する勾配要素モデル（Gradient）を用いる（Fig. 1）．本章では，このうち Uniform-0.05 を対象とする．本解析により得られたサイクル数Nと亀裂長さaの関係を Fig. 2 に示す．これより，異なる最大応力および応力比で取得された実験結果の傾向を概ね再現可能であることが確認できる．

3. 要素サイズ影響に関する検討

均一要素モデル Uniform-0.05, Uniform-0.25, Uniform-0.50（Fig. 1 参照）に対する評価を実施した．ここで，疲労亀裂発生位置や発生直後の短い亀裂に関しては，切欠き部の形状再現性の影響を受けることから，適切な要素サイズlを設定する必要がある．そこで，Δaの決定プロセスにおいて，実験結果との照査に採用する亀裂長さ(mm)の評価区間を$[a_0, 5]$と設定する．基本モデルと同程度に実験結果を予測可能なa_0およびΔaを各モデルにおいて決定するとともに，得られたa_0とlの関係およびΔaとlの関係（Fig. 3 参照）をそれぞれ

$$a_0 = 1.57ln(l) + 4.72 \quad (2)$$

および

$$\Delta a = 35.1l^2 + 0.26l + 0.08 \quad (3)$$

として規定した．

4. 勾配要素モデルに関する検討

亀裂進展領域における要素サイズが亀裂進展方向に 0.05mm から 0.20mm へ連続的に変化する勾配要素モデル Gradient（Fig. 1 参照）に対する評価を実施した．Δaの決定フローとして，Method1 と Method2 の 2 つを検討した．Method1 では，応力集中部の節点を共有する要素のうち，亀裂前縁の要素の要素サイズを対象に，Method2 では，亀裂前縁の要素の要素サイズl_1に，亀裂進展に伴うサイズ変化の影響を考慮した補正を加えた要素サイズ$\underline{l}$を対象に，第 3 章で規定した式(3)を用いてΔaを算出した．Uniform-0.05 での結果を含めた解析結果を Fig. 4 に示す．これより，Uniform-0.05 から若干の精度低下はあるものの同様の傾向を予測可能であることが確認でき，更に Gradient によって，Uniform-0.05 と比較して解析時間を約 5 分の 1 に短縮するなど，その有用性を確認した．

5. 結言

本研究では，要素サイズlやその分布に非依存な疲労性能予測手法の提案を目的として，疲労性能評価手法の要素サイズ依存性及び，勾配要素モデルに対する適用性について検討を行った．その結果，任意の要素サイズlに対してa_0およびΔaを決定可能な関係式を提案した．また，勾配要素モデルに対する検討により，疲労亀裂進展挙動を高精度かつ短縮時間で評価可能であることを示した．

参考文献

1) 日本材料学会編: 疲労設計便覧, 1995,養賢堂
2) 堤成一郎, 長濱啓和, Riccardo Fincato: 局所的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, 75, 2 (2019), I_445-I_453.
3) 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, 81, 15 (2025), 24-15028.
4) 田中颯人, フィンカト リカルド, 高木芳史, 崎本隆洋, 堤成一郎: 分割回し溶接による面外ガセット継手の疲労寿命延伸効果に関する研究, 土木学会論文集, 82, 15(2026), 25-15030.
5) S.Tsutsumi, R.Fincato, Cyclic plasticity model for fatigue with softening behaviour below macroscopic yielding, Materials & Design, 165, (2019), 107573.

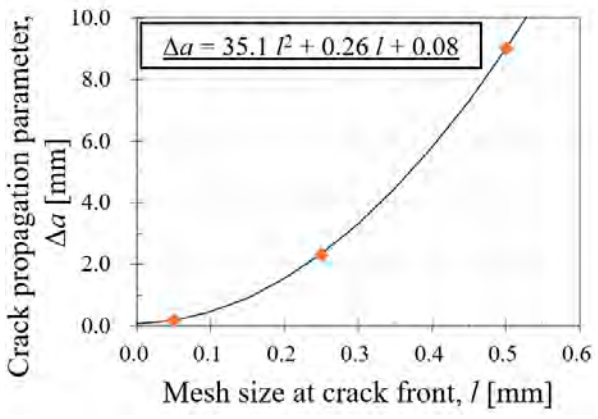


Fig. 3 Crack propagation parameter vs. mesh size at crack front

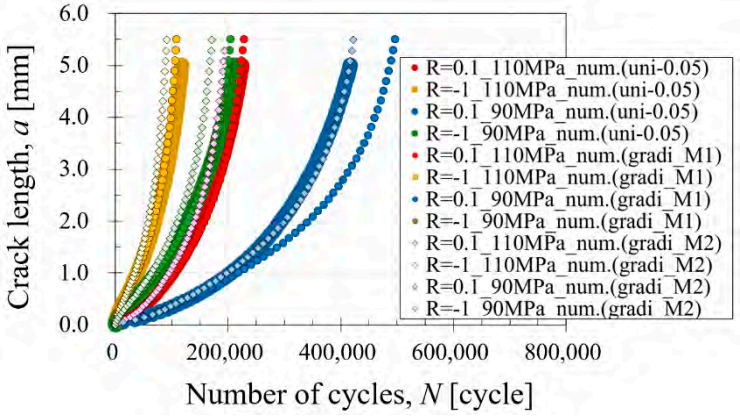


Fig. 4 Crack length vs. number of cycles