

大阪大学大学院 工学研究科 学生員 ○中村 源太
 大阪大学大学院 工学研究科 学生員 桐生 泰輔
 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 工学研究科 正会員 堤 成一郎

1. 緒言

金属材料中に水素が侵入することで強度や延性が低下する“水素脆化”が生じることが知られており、社会基盤構造物に多用される炭素鋼を対象とした水素ガス中の実験¹⁾²⁾においても、延性が著しく低下することや疲労亀裂進展速度が30倍に加速される現象が確認されている。一方、著者らは近年、巨視的弾性状態を含む弾塑性応答を高精度に再現可能な材料モデル³⁾を開発するとともに、繰返し弾塑性FEM解析を活用した疲労亀裂発生・進展寿命評価手法⁴⁾⁵⁾を提案している。本手法は、水素環境下における疲労損傷メカニズムの理解や疲労性能設計の高度化に有益であると考えられるが、従来手法の精度検証が十分に行われたとは言い難い。

そこで本研究では、従来の疲労亀裂発生・進展寿命評価手法を拡張することにより、大気中および水素ガス環境下における疲労亀裂進展挙動を予測可能な手法を提案する。

2. 局所弾塑性応答に基づく疲労亀裂進展速度予測

大気中の疲労亀裂進展速度評価⁴⁾⁵⁾は、まず所定の亀裂長さ a を有する構造に対し、想定される繰返し荷重条件下の弾塑性解析を実施する。次に、亀裂先端の全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ および平均応力 σ_m と実験データベースに基づいて規定される亀裂発生寿命式 $N_c = N_c(\Delta\varepsilon_t, \sigma_m)$ を活用し、亀裂先端の疲労亀裂発生寿命 N_c を算出する。予測された疲労亀裂発生寿命 N_c の間に疲労亀裂が Δa 進展するとして、疲労亀裂進展速度を次式により算出する。

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

ここに、 Δa は亀裂進展速度に関するパラメータである。なお、水素ガス環境下における進展速度の予測手法への拡張に関しては次章で述べる。CT試験片を模した3次元FEモデルおよび付与した境界条件をFig. 1に示す。板厚方向および荷重載荷方向の対称性を考慮した1/4サイズとし、亀裂先端周辺には要素サイズ $10\mu\text{m}$ の6面体1次要素を配置した。解析ソルバーには、有限要素解析ソフトADVENTURECluster2023を採用し、疲労SSモデル³⁾を実装して弾塑性解析を実施した。荷重条件は、疲労亀裂進展試験を模擬し、公称応力範囲 ΔP 一定、応力比 $R=0.1$ とし、繰返し荷重回数 $N=20$ とした。また亀裂長さ $a(\text{mm})$ は、 $a=0$ から12まで2mm刻みに変化させて弾塑性解析を実施した。

繰返し数 $N=20$ における亀裂開口方向の全ひずみ範囲と、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

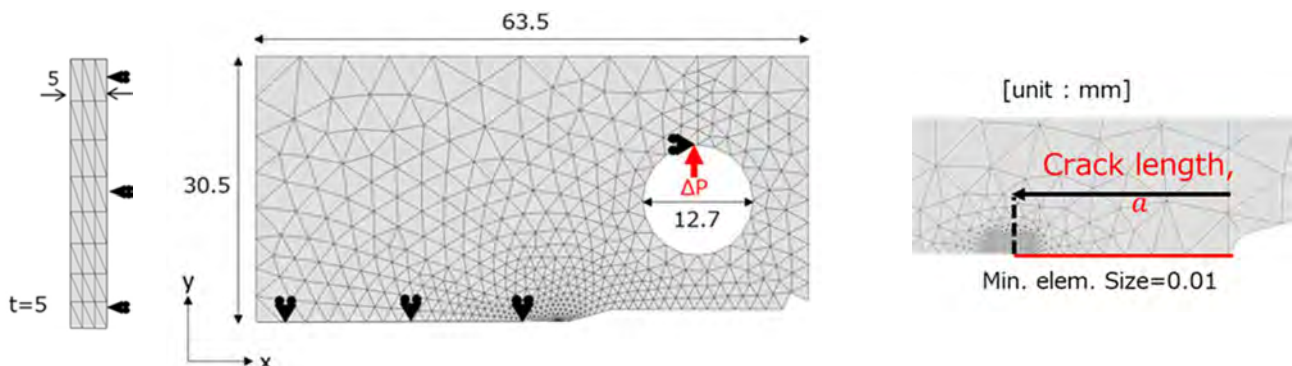


Fig. 1 FE model and boundary conditions

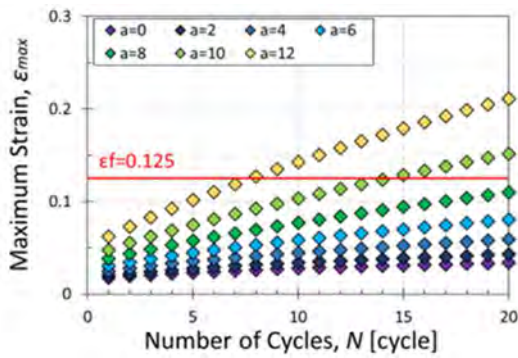


Fig. 2 Relationship between maximum strain and number of loading cycles

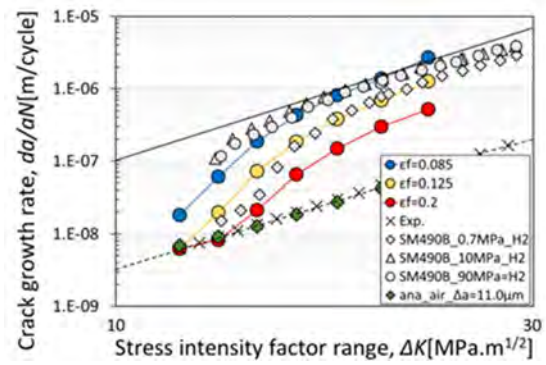


Fig. 3 Predicted fatigue crack growth rates in air and hydrogen environments

出する。式(1)より算出された疲労亀裂進展速度 da/dN および評価対象とした実験結果¹⁾を Fig. 3 に示している。なお、 Δa の同定方法は、 $a=10\text{mm}$ における繰返し数が実験結果と一致するように Δa を決定することで、 $\Delta a=11.0\mu\text{m}$ を得た。これより、広範囲な ΔK 領域において実験結果を概ね再現できることが示された。

3. 水素影響を考慮した疲労亀裂進展速度予測

本研究で提案する水素影響を考慮した疲労亀裂進展速度予測手法は、従来手法と同様に $\Delta\varepsilon_t$ および σ_m の関数として、実験データベースに基づいて規定される微小亀裂の発生寿命式 $N_c = N_c(\Delta\varepsilon_t, \sigma_m)$ 、もしくは新たに考慮する亀裂先端の最大ひずみ ε_{max} が所定のひずみ ε_f に達する回数 $N_c = N_c(\varepsilon_f)$ 、いずれか小さい方を N_c として採用する、すなわち次式となる。

$$N_c = \text{Min}\{N_c(\Delta\varepsilon_t, \sigma_m), N_c(\varepsilon_{max} = \varepsilon_f)\} \quad (2)$$

以上より、疲労亀裂発生基準は、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ もしくは最大ひずみ ε_{max} に支配されるとして定式化された。

FEM 解析より得られる最大ひずみと荷重繰返し数の関係を Fig. 2 に示す。ここで、ひずみ ε_f を 0.125 とした場合、同図内に赤実線で示している。 $\varepsilon_f=0.125$ に達する回数と、寿命式から決定される疲労亀裂発生寿命とを比較して、小さい繰返し数をその亀裂長さにおける N_c として疲労亀裂進展速度を予測した結果を Fig. 3 に示す。なお、疲労亀裂進展長さのパラメータ Δa は第 2 章と同様の値を用いるとともに、 $\varepsilon_f=0.085, 0.125, 0.2$ と設定した結果もあわせて示している。これより、 ε_f を適切に設定することで、水素環境下において疲労亀裂進展速度が急加速する実験結果の傾向を捉えることができた。

4. 結言

本研究では、大気中及び水素ガス環境中における疲労亀裂進展寿命の評価方法を提案した。具体的には、繰返し弾塑性 FEM 解析から得られる局所的なひずみ応答に対して、全ひずみ範囲と平均応力に基づく疲労亀裂発生寿命評価式に加えて、亀裂先端の最大ひずみが所定のひずみ値 ε_f に到達する回数を評価し、両者で評価される回数のうち少ない回数を N_c として疲労亀裂進展速度 da/dN を算出する。これより、水素影響を考慮しない場合は、大気中で取得された疲労亀裂進展特性を高い精度で再現可能であることを確認した。また、水素影響を考慮する場合は、延性ひずみを考慮することにより、疲労亀裂進展速度が 30 倍程度に急加速する実験結果を再現可能であることを示した。

参考文献

- 1) 吉川ら：0.1MPa から 90MPa 水素ガス中における炭素鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす水素ガス圧力と試験周波数の影響，日本機械学会論文集，80, 817 (2014), 1-16.
- 2) Ogawa, Y., et al.: Unified evaluation of hydrogen-induced crack growth in fatigue tests and fracture toughness of a carbon steel, Int. J. Fatigue, 103, (2017), 223-233.
- 3) Tsutsumi, S., Fincato, R.: Cyclic plasticity model for fatigue with softening behaviour below macroscopic yielding, Materials & Design, 165, (2019), 107573.
- 4) 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 材の疲労亀裂伝播特性および十字溶接継手の疲労寿命評価，溶接学会論文集，40, 1 (2022), 27-35.
- 5) 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