

軽水炉環境下における応力腐食割れき裂進展に伴う き裂先端塑性ひずみ分布の有限要素解析

Finite Element Analysis of Plastic Strain Distribution at a Distance
from Growing Stress Corrosion Crack in Light Water Reactor Environment

東北大学大学院工学研究科	土屋 暢久	Nobuhisa TSUCHIYA
株式会社リッチストーン	渡辺 公雄	Kimio WATANABE
東北大学大学院工学研究科	竹田 陽一	Yoichi TAKEDA
東北大学大学院工学研究科	呂 戦鵬	Zhanpeng LU
東北大学	庄子 哲雄	Tetsuo SHOJI

Plastic strain as a function of the distance from a growing stress corrosion crack tip is quantitatively evaluated by three-dimensional elastic-plastic finite element analysis. The strain distribution obtained by node-release simulation of crack growth follows the logarithmic law. The criteria for the transition from a stationary crack to a growing crack were investigated. Results suggested that the prediction of crack growth by the FRI model, in which oxidation kinetics and continuum mechanics has been considered, is consistent with by FEM analysis.

Keywords: Finite Element Analysis, Plastic Strain, Stress Corrosion Cracking, Crack Growth

1. 緒言

軽水炉発電プラントの構造部材において応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking : SCC) の発生がプラント利用率の低下を招いており、解決すべき問題となっている。近年、SCC き裂進展速度予測式として、き裂先端部のひずみ速度と酸化の相互作用を考慮したき裂進展モデルが Shoji ら[1][2]により提案されている。これまでの、このモデルを用いた検討により、材料の硬化、降伏応力、応力拡大係数依存性などについての SCC き裂進展試験データとよく一致する結果が得られており、高精度な SCC き裂進展挙動の予測手法として注目されている。このモデルの構成要素であるき裂先端のひずみ速度は、き裂先端の塑性ひずみ勾配と SCC き裂進展速度との関係から導出されている。進展き裂の塑性ひずみは、小規模降伏かつ平面ひずみ条件を前提とする Gao-Hwang の理論[3]に基づき導入されている。一方、その理論の成立範囲外である大規模降伏かつ実構造物形状模擬材における SCC き裂進展挙動に対して、塑性ひずみ勾配に着目した進展速度予測も試みられている[4]。このように、塑性ひずみ勾配の検討に基づく SCC き裂進展挙動の解明や、それに基づく応用が期待され

ている。

一般に高温高圧水中構造部材のき裂先端近傍における塑性ひずみを実験的に測定することは困難である。そこで本研究では、軽水炉環境下におけるき裂進展模擬条件での、塑性ひずみ分布を理論的に評価する。その手段として三次元有限要素モデルを構築し、有限要素法 (Finite Element Method : FEM) を用いて弾塑性解析を行った。FEM 解析により、SCC き裂進展を想定したき裂先端力学挙動の影響因子を抽出した。この結果から、FEM 解析による進展き裂先端部の塑性ひずみ分布評価に基づく SCC き裂進展則の高精度化を検討した。

2. 有限要素モデル

三次元有限要素モデルは、SCC き裂進展試験で広く利用される ASTM-E399 に指定されるコンパクトテンション試験片を用いた。Fig. 1 にそのモデルを示す。

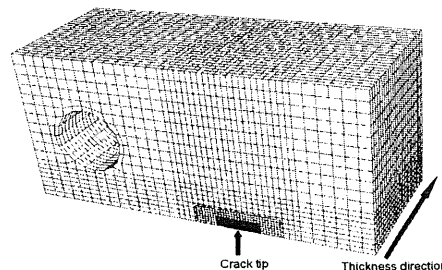


Fig. 1 Finite Element Model for SCC crack growth

連絡先:土屋暢久, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区青葉字青葉 6-6-1, 東北大学大学院工学研究科, 電話: 022-795-7520, e-mail:nobuhisa@rift.mech.tohoku.ac.jp

モデルは 1/2 対称モデルとし、き裂先端に向かいメッシュを細分化した。き裂先端からの距離 $r \geq 0.015$ mm における板厚方向中央部の塑性ひずみを算出する。

材料物性値は、ヤング率 $E = 184$ GPa, ポアソン比 $\nu = 0.3$, 降伏応力 $\sigma_Y = 277$ MPa と軽水炉構造部材として広く使用される 304 ステンレス鋼を想定した。さらに Gao-Hwang の理論で規定されている加工硬化指数 $n_G = 1.43$ として応力-ひずみ線図を算出し、FEM による弾塑性解析に用いた。

3. SCC き裂進展を模擬した有限要素解析

3.1 進展き裂における塑性ひずみ勾配

本研究では、き裂進展を逐次節点開放で再現した。モデルへの荷重負荷は ASTM-E399 に記述される応力拡大係数 K の算出式に従い、 $K = 20$ MPa \sqrt{m} とする荷重を負荷した。その際のき裂進展量を Δa とし、各 Δa で塑性ひずみ勾配を算出した。このとき、塑性ひずみ勾配が得られた r を特性距離 r_0 とし、複数の r_0 毎の挙動を併せて Fig. 2 に示す。

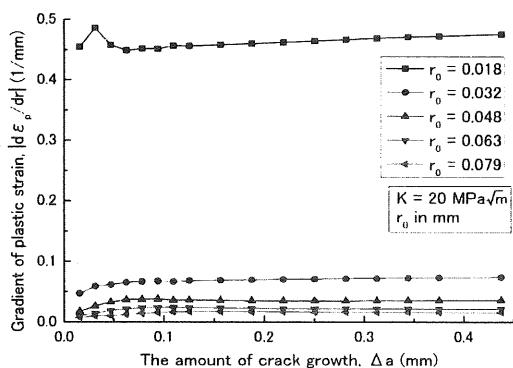


Fig. 2 Relationship between the gradient of plastic strain and the amount of crack growth

Fig. 2 より、 $K = 20$ MPa \sqrt{m} 、かつ $\Delta a = 0.1$ mm 以上となる場合、 r_0 によらず塑性ひずみ勾配はほぼ一定値となる。この結果より、0.1 mm 程度の進展により静止き裂から、進展き裂への遷移が生じたことが分かる。そして、進展き裂における塑性ひずみ勾配の Δa 依存性が認められないことから、進展き裂においては、き裂先端力学挙動が遷移後の進展量によらず一定に維持されることを示している。SCC き裂進展挙動の評価のためには、き裂先端周辺での力学状態と酸化との相互作用の評価が必要であり、その基礎条件の提示が可能と考えられる。

3.2 FEM 解析と Gao-Hwang の理論の比較

前項の FEM 解析結果より、進展き裂条件を十分に満たすために、 $\Delta a = 1.8$ mm と定めた。Gao-Hwang の理論によると塑性ひずみ ϵ_p は、式 (1) で表される。

$$\epsilon_p = \beta \frac{\sigma_Y}{E} \left[\ln \left(\frac{R_p}{r} \right) \right]^{\frac{n_G}{n_G-1}} \quad (1)$$

式 (1) より、塑性ひずみは r に対する対数特異性を有していることが分かる。また R_p は塑性域寸法であり、式 (2) 式で表される。

$$R_p = \lambda \left(\frac{K}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 β および λ は材料定数である。

縦軸を n_G により変形した塑性ひずみとし、 $K = 20$ MPa \sqrt{m} の条件における FEM 解析値と Gao-Hwang の理論値を整理したものを Fig. 3 に示す。この整理により、Gao-Hwang の理論に示される対数特異性は、図上に右下がりの直線として表示される。図中、プロットは FEM 解析値であり、直線は Gao-Hwang の理論値である。

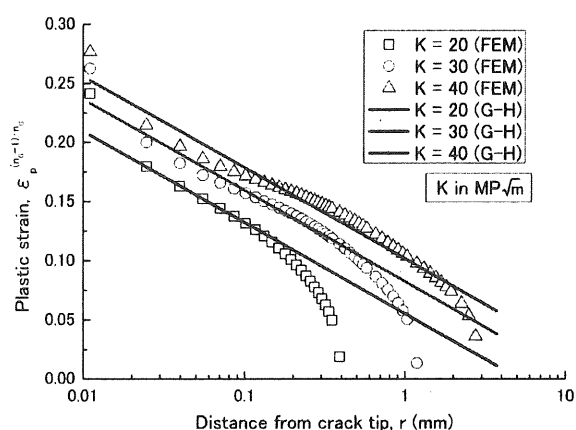


Fig. 3 Distribution of plastic strain versus the distance from a crack tip

Fig. 3 より、 $K = 20$ MPa \sqrt{m} の FEM 解析値によると、 $r = 0.02 \sim 0.10$ mm の範囲での減少挙動は直線で近似することが可能であった。したがって、 $K = 20$ MPa \sqrt{m} 、 $\Delta a = 1.8$ mm において、 r_0 が $r = 0.02 \sim 0.10$ mm の範囲で定められる場合、Gao-Hwang の理論値による塑性ひずみ勾配の導入が有効であることが明らかとなった。

次に、 K の変化による塑性ひずみ分布への影響を確認した。式 (1) および (2) より、Gao-Hwang の理論値

は K により表される。そこで、Gao-Hwang の理論値における材料定数を求めるために、 $K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $r = 0.02 \sim 0.10 \text{ mm}$ の FEM 解析値を式 (1)、(2) により線形近似した。この結果、 $\beta = 0.00885$ 、 $\lambda = 1.008$ が得られた。これらの材料定数より、 $K = 30, 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ における Gao-Hwang の理論値を算出し、同 K 値における FEM 解析値と共に Fig. 3 に示す。

$K = 30, 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合、Gao-Hwang の理論値は FEM 解析値より過大に評価される傾向が認められる。これらの過大評価が認められた要因の一つとして、塑性域寸法 R_p の相違が考えられる。Fig. 3 より、 $K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合、FEM 解析値によれば $R_p = 0.4 \text{ mm}$ 、Gao-Hwang の理論値によれば $R_p = 5.3 \text{ mm}$ となる。つまり、FEM 解析値の対数特異性に着目することで得られた λ による R_p は、FEM 解析値によるものより明らかに大きくなる。一方、 K を変化させた場合でも、 $r = 0.02 \sim 0.10 \text{ mm}$ の範囲では図上に直線領域が存在し、対数特異性が認められる。

以上より、Gao-Hwang の理論値による塑性ひずみ勾配の導入に際して、 K に基づく Gao-Hwang の理論値の校正が必要であることが示唆された。具体的な校正手段として、塑性ひずみの過大評価を招く要因の一つである材料定数 λ を適切に設定するための検討が必要と考えられる。

式 (1) および (2) の材料定数の値は、実験値および解析値として様々な値が報告されている[5]。その一例として、W.J.Dtugan らにより $\beta = 5.46$ [6]が報告されている。また、平面ひずみ条件下では $\lambda = 0.05$ が用いられることが多く、これらは本研究で算出した材料定数と大きく異なっている。一方、Shoji らのモデル[1]による SCC き裂進展速度のデータ解析では、軽水炉環境下の各パラメータ代表値として $\beta = 5.08$ 、 $\lambda = 0.3$ 、 $r_0 = 0.01 \text{ mm}$ が報告されている[2]。ここで、Shoji らの検討によると、SCC 進展データ処理では λ が大きくとられていることに着目すれば、SCC き裂進展挙動を表現する各種材料定数などパラメータが、必ずしも一意ではないことが分かる。

以上より、SCC き裂進展予測式の高精度化を目指し、FEM 解析の応用による Gao-Hwang の理論値に利用される材料定数のより適切な校正が望まれる。

4. 結言

本研究により、以下の知見が得られた。

- 1) 応力拡大係数 $K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の条件では、き裂進展量 $\Delta a = 0.1 \text{ mm}$ 以上の場合、塑性ひずみ勾配がほぼ一定を示し、静止き裂から進展き裂への遷移挙動が明らかとなった。
- 2) 十分な進展き裂と想定される $\Delta a = 1.8 \text{ mm}$ の塑性ひずみ分布は、き裂先端からの距離 $r = 0.02 \sim 0.10$ において Gao-Hwang の理論値に示される対数特異性を示す。さらに K を $40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ まで変化させた場合、FEM 解析値と Gao-Hwang の理論値は異なる値を示すが、対数特異性は維持される。

参考文献

- [1] T. Shoji, S. Suzuki, B. Ballinger, "Theoretical Prediction of SCC Growth Behavior -Theoretical and Plateau Growth Rate-", 7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems Water Reactor, Vol.1, 1995, pp.881-891.
- [2] T. Shoji, et al, "Modeling and Quantitative Prediction of Environmentally Assisted Cracking Based upon a Deformation-Oxidation Mechanism", ASME, PVP-Vol.479, Residual Stress, Fracture and Stress Corrosion Cracking, July 25-29, 2004, pp.175-184.
- [3] Y. C. Gao and K. C. Hwang, "Elastic-Plastic Fields in Steady Crack Growth in a Strain-Hardening Material", Advances in Fracture Research, 5th International Conference on Fracture, 1982, pp.669-682.
- [4] 荒井健作, "き裂先端ひずみ速度に着目した応力腐食割れ進展性予測に関する研究", 東北大学大学院工学研究科修士学位論文, 2006.
- [5] W. W. Gerberich, D. L. Davidson, M. Kaczorowski, "Experimental and Theoretical Strain Distributions for Stationary and Growing Cracks", J. Mech. Phys. Solids, Vol.38, No.1, 1990, pp.887-113.
- [6] W.J.Dtugan et al., Asymptotic Analysis of Growing Plane Strain Tensile Cracks in Elastic-Ideally Plastic Solids, J. Mech. Phys. Solids, Vol.30, No.6, 1982, pp.447-473.