応力腐食割れの破壊経路予測移動有限要素解析[†]

西岡 俊久* 丹羽 隼** 藤本 岳洋*

Moving Finite Element Analyses of Fracture Path Prediction for Stress Corrosion Cracking

by

Toshihisa NISHIOKA*, Hayato NIWA** and Takehiro FUJIMOTO*

In recent years, the breakdowns of piping have occurred by the stress corrosion cracking in the nuclear power generation plant. To avoid serious accident, some plants did not work during several years. The stress corrosion cracking is caused by interaction of the stress and erosive environment. This study is done about the stress corrosion cracking in the combination of the SCM435 steel and the boric acid solution. This combination has the feature that corrosion happens comparatively easily. The moving finite element analyses are operated according to acquired data by the experiment. The stress intensity factor is compared with an analytical solution, and the validity of this simulation is verified. Moreover, the application of the simulation including holes is discussed based on numerical result.

Key words : Stress corrosion cracking, Stress intensity factor, Fracture mechanics, Finite element method, Simulation

1 緒 言

近年のエネルギー需要の関係から原子力発電の利用は今後も増すのは不可避と考えられる。しかし、一部の原子力発電プラントにおいて、応力腐食割れが原因となって、機器や配管の破壊が起きている。これにより、放射能漏えいやプラント稼働の長期停止といった重大な事故が起こる可能性がある。現在（2010年3月時）、実際に応力腐食割れ等の検査のため運転停止中の原子力発電所が存在する。¹⁾ 応力腐食割れでは、応力と腐食環境の相互作用により、材料にき裂が発生し、そのき裂が時間と共に進展し、本現象は様々な金属材料と腐食性環境と負荷の組み合わせによって生じる。先述のような工学的背景から、応力腐食割れによるき裂成長挙動を精度よく予測評価できる手法を確立することは工学上、非常に有益である。

本研究では、基礎的な応力腐食割れ問題としてSCM435鋼とホウ酸水溶液の組み合わせに着目する。²⁾ この組み合わせは、比較的腐食が起こりやすいという特徴がある。まず文献(2)より引用した実験結果を基に、応力拡大係数とき裂成長速度の関係式を近似する。そして、デローニ自動要素分割^{3) 4)}に基礎を置く移動有限要素法^{5) 6)}を用いて、破壊経路予測シミュレーションを行う。破壊経路を考察し、応力拡大係数について評価式(1)との比較を行い、このシミュレーションの妥当性を検証する。また実際の応力腐食割れの多くが複雑な形状を有する構造中で生じている。そこで構造の幾何学的不均一性とき裂成長の関係を調べるため、円孔を含む試験片においても経路予測シミュレーションを行い、円孔が破壊経路、き裂成長速度にどのような影響を及ぼすかを検討する。

2 解析モデル²⁾

本研究では試験片の材料として、SCM435鋼を想定した。試験片寸法をFig. 1に示す。試験片の材料の機械的性質をTable 1に示す。

文献(2)ではFig. 1の試験片のき裂部分をホウ酸水溶液につけ、荷重伝達ピンを介して定引張荷重を与え、き裂を進展させている。文献中の実験で加えた荷重は1600Nとされている。実験では次式で応力拡大係数が求められる。

Fig. 1 Shape of specimen based on the experiment in Ref. (2).

Table 1 Mechanical properties of SCM435 steel.

Modulus of Elasticity	205 GPa
Poisson's Ratio	0.28

[†] 原稿受理 平成 22 年 3 月 26 日 Received Mar. 26, 2010 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 神戸大学海事科学研究科 〒658-0022 神戸市東灘区南町, Graduate School of Maritime Sci., Kobe Univ., Higashinada-ku, Kobe, 658-0022

** 神戸大学海事科学研究科 〒658-0022 神戸市東灘区南町, Graduate School of Maritime Sci., Kobe Univ., Higashinada-ku, Kobe, 658-0022

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f \quad (1)$$

ここで、 P は荷重、 B は板厚、 W は荷重線から試験片端までの距離、 f は補正係数²⁾を表す。

実験によって得られたき裂成長速度 c と応力拡大係数 K_I との関係を図. 2 に示す。また、この c と K_I の関係を関数近似した式を式 (2) に示す。

$$c = -7.19554 \times 10^{-21} K_I^2 + 1.19047 \times 10^{-12} K_I - 9.23799 \times 10^{-6} \quad (2)$$

次に、円孔を含む試験片寸法を図. 3 に示す。これまでに Nishioka ら⁷⁾は円孔モデルについて疲労き裂進展の数値シミュレーションを実施し、き裂進展経路の蛇行を確認している。この研究では、進展き裂先端が円孔付近にさしかかった際、荷重端とき裂先端の間に空孔が位置することでき裂先端モード I 負荷が過渡的に低下し、き裂成長率にも増減が生じることが明らかとされている。応力腐食割れでも、円孔の存在による非均質効果によって応力拡大係数値が変動し、き裂成長の傾向に大きな変化が生じる可能性が考えられる。本研究では、き裂延長線上から Δl ずらしたところに 4 つの円孔を配置した各試験片 ($\Delta l = 7, 8, 9\text{mm}$) について、経路予測シミュレーションを行い、各ケースについてき裂成長挙動の相違を比較した。

Fig. 2 Relationship between crack growth rate c and stress intensity factor K_I .

Fig. 3 Shape of specimen with holes.

3 き裂進展予測シミュレーション

3.1 J 積分評価法

本研究では、衝撃荷重下のき裂や高速で進展するき裂の破壊力学パラメータとして Nishioka・Atluri により導出された経路独立動的 J 積分⁸⁾に準じてき裂先端の力学的状態を評価した。動的 J 積分の経路積分式を次に示す。

$$J'_k = \int_{\Gamma + \Gamma_c} [(W + K)n_k - t_i u_{i,k}] dS + \int_{V_r} [\rho \ddot{u}_i u_{i,k} - \rho \dot{u}_i \dot{u}_{i,k}] dV \quad (3)$$

ここで W はひずみエネルギー密度、 K は運動エネルギー密度、 u_i , t_i は変位成分と表面力成分、 ρ は質量密度、 n_k は積分経路上の外向単位法線ベクトルの全体座標軸 X_k 成分 (座標軸定義は Fig. 1, 3, 4 参照) を表す。 Γ はき裂先端をとり囲む遠方場経路、 Γ_c はき裂面上の経路を意味する。 $\Gamma + \Gamma_c$ で囲まれた領域を V_r とする。本問題では、き裂は X_1 軸に沿って進展するとは限らないため、 J' 値のき裂進展方向成分を評価すべきである。動的 J 積分のき裂先端直交座標系 (X_1^0 - X_2^0 系, Fig. 4 参照) の成分 J'_i への変換は、式 (4) により表される。

$$J'_i = \alpha_{ik}(\theta_0) J'_k \quad (4)$$

ここで α_{ik} は座標変換テンソル、 θ_0 はき裂先端座標系と全体座標系のなす角度である。

しかし、Fig. 4 のように、介在物・円孔にき裂先端が接近した場合、円孔領域を含まないような積分経路 V_r を設定するには手間がかかる。

そこで、本研究では連続な関数 s を用いた動的 J 積分評価法⁹⁾を用いる。本手法では、材料内の各点について連続関数 s を定義し、この s と他の計算項の積により動的 J 積分を評価する。いま、Fig. 4 のように円形積分経路内 V_r に円孔領域が含まれる状況を考える。このとき連続関数 s を用いた動的 J 積分は式 (5) で与えられる。

$$J'_k = \int_{\Gamma + \Gamma_c} [(W + K)n_k - t_i u_{i,k}] s dS + \int_{V_r} [(\rho \ddot{u}_i u_{i,k} - \rho \dot{u}_i \dot{u}_{i,k}) s + \sigma_{ij} u_{i,k} s_{,j} - (W + K)s_{,k}] dV \quad (5)$$

ここで s を V_r 内の全ての節点において 1 とすると式 (5) は従来の動的 J 積分の評価式と一致する。また、 s を V_r 内部で 1、 Γ 上で 0 とすると、等価領域積分法¹⁰⁾と一致する。式 (5) では領域 V_r 内に円孔領域が含まれるような場合でも、 V_r 内の材料内節点の s を 1、円孔領域・境界

Fig. 4 Conceptual figure for integral domain and distribution of s function.

上の s を 0 とすることで, 積分経路 Γ を修正したものと等価な計算が可能となり, き裂先端が円孔付近に達した時も, 動的 J 積分を容易に正しく求めることが可能である. このようにして求めた動的 J 積分計算法は静的問題にもそのまま適用することができ, その場合 J 値は Rice¹¹⁾ の J 積分値の評価式 (6) と一致する.

$$J_k = \int_{\Gamma+\Gamma_c} (W n_k - t_i u_{i,k}) dS \quad (6)$$

また, J 積分に対しても s 関数を用いた評価を同様に考えることで, 式 (7) が得られる.

$$J_k = \int_{\Gamma+\Gamma_c} (W n_k - t_i u_{i,k}) s dS + \int_{V_r} (\sigma_{ij} u_{i,k} s_{,j} - W s_{,k}) dV \quad (7)$$

本研究では, 静的解析のため式 (7) より求めた J 積分値と成分分離法¹²⁾を用いて, 応力拡大係数を求めた. 以下の式 (7), (8) にその評価式を示す.

$$K_I = \delta_I \left\{ \frac{(2\mu J_1^0 \beta_2)}{A_I (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{1/2} = \delta_I \left\{ \frac{2\mu \beta_2 (J_1 \cos \theta_0 + J_2 \sin \theta_0)}{A_I (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$K_{II} = \delta_{II} \left\{ \frac{(2\mu J_1^0 \beta_1)}{A_{II} (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{1/2} = \delta_{II} \left\{ \frac{2\mu \beta_1 (J_1 \cos \theta_0 + J_2 \sin \theta_0)}{A_{II} (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{1/2} \quad (9)$$

ここで δ_I , δ_{II} はき裂開口変位, A_I , A_{II} はき裂速度関数, β_I , β_{II} はき裂速度パラメータ, μ は横弾性係数である.

3・2 デローニ自動要素分割^{3), 4)}に基礎を置く移動有限要素法^{5), 6)}

き裂進展に適用したデローニ自動要素分割の概念図を Fig. 5 に示す. デローニ自動要素分割では, Fig. 5 (a) に示す外部境界点・内部境界点と Fig. 5 (b) に示す内部指定点の情報を用いて Fig. 5 (c) に示すようなメッシュが自動で生成される.

Fig. 5 (a) では, き裂の上下面を区別するために, き裂面の上下の境界点はき裂面に垂直に微量ずつそれぞれずらして配置している. また, き裂先端の応力特異性を精度よく評価するために, Fig. 5 (b) のように, き裂先端を中心にき裂先端に近づく程小さくなる多層の同心円を設定し, それらの円上に一定間隔で内部指定点を設定した. これらの節点を用いた細密なメッシュ生成によりき裂先端近傍の特異応力分布を高精度で評価できる.

Fig. 5 An example of Delaunay automatic mesh.

また, 本移動要素法では, Fig. 6 に示すように, き裂の進展と共に, き裂先端近傍の内部指定点群を移動させる. このように, 任意方向に進展・移動するき裂の先端に対して, 高密度の要素分割を保った数値解析が行えるため, 移動有限要素法は非直進き裂問題に優れた結果をもたらす.

3・3 円孔領域のメッシュ生成法

本研究では解析対象内に円孔が存在するケースがある. この領域を正確に再現するためにデローニ自動要素分割では内部指定点として節点を円孔境界上に配置させ, 円孔部を表している. き裂進展により, 円孔の領域にき裂先端の移動要素群が干渉する場合がある. この場合, 円孔部と重なる領域については移動要素群の節点は配置しないことで円孔・介在物領域の生成を優先させ, 形状を忠実に再現した.

3・4 解析方法

本シミュレーションは第 2 章の文献 (2) における実験を模擬している. 要素分割モデルの概観を Fig. 7 に示す. 本シミュレーションでは弾性解析を行い, 拘束条件として荷重ピンの中心とき裂の延長線上の試験片端を拘束し, 各ピン中心節点において上下方向 ($\pm X_2$ 方向) にそれぞれ $\pm 1600\text{N}$ の定荷重を加え, 平面応力状態を仮定した.

前ステップで生じた応力拡大係数を式 (2) に代入することによって, 次ステップのき裂成長量を求めた. このようき裂成長率は変化していくが, 計算 1step 当たりの時間増分を調整し, 1step 当たりのき裂進展量 Δa を一定 ($\Delta a \doteq 1\text{mm}$) とすることで良好な計算条件を維持している.

Fig. 6 Moving elements around a propagating crack tip.

Fig. 7 Numerical model with mesh pattern.

き裂進展方向については曲折破壊基準のひとつである局所対称理論¹²⁾を用いて予測した。この理論を有限要素解析において実現させるため、毎ステップ、仮想き裂進展計算を繰り返し行い、応力拡大係数 K_{II} がゼロとなる方向 θ を求めた。

4 実験結果および解析結果

4.1 均質試験片について

文献 (2) の応力拡大係数とき裂成長速度の関係をj用いて、混合形シミュレーション¹³⁾を行った。本シミュレーションにより得られた9つの積分経路の J 積分を Fig. 8 に示す。き裂進展後の応力分布を Fig. 9 に示す。また、応力拡大係数の数値解析結果と解析解²⁾の比較を行い、その結果を Fig. 10 に示す。 a はき裂長さ、 W は荷重線から試験片端までの長さを表す (Fig. 1 参照)。

Fig. 8 より、 J 積分の経路独立性は良好であることが

Fig. 8 Path independence of J integral.

Fig. 9 Stress distribution of the homogeneous specimen.

Fig. 10 Histories of stress intensity factor and crack growth rate.

分かる。上下対称の試験片に対して上下方向に等荷重を加えているので、純モード I 状態となりき裂は直進する。Fig. 9 に示すようにき裂成長に伴いき裂先端の応力集中は単調に増大していく。そのため Fig. 10 に示すようにき裂成長率も単調に増大し、式 (2) に従ったき裂成長過程を再現している。また Fig. 10 からは応力拡大係数の数値解析結果と式 (1) はよく一致していることも分かる。このことから、本混合形シミュレーションは式 (2) に従った応力腐食割れによる単調き裂進展を忠実に再現していると考えられる。

4.2 非均質試験片について

本シミュレーションにより得られた J 積分の経路独立性を Fig. 11 に示す。また、応力分布を Fig. 12 に示す。

き裂が進展し、1 番目の円孔に近づく時、き裂先端は円孔に吸い寄せられるように進展する。1 番目の円孔を通過すると、次は 2 番目の円孔に吸い寄せられる効果が強くなるため、き裂先端は向きを変える。このように、き裂先端の向きを変えながら進展が生じるため、破壊経路は蛇行する。Fig. 12 は円孔の位置を表すパラメータ $\Delta l = 8\text{mm}$ の場合のシミュレーション結果である。 $\Delta l = 7\text{mm}$, 9mm の場合と比較したき裂進展経路を Fig. 13 に示す。

Δl が小さいほど円孔の影響は強くなり、き裂進展方向経路は急変している。特に、 $\Delta l = 7\text{mm}$ の場合は 3 番目の円孔に突入している。

Fig. 14 にき裂進展に伴う応力拡大係数の時間導関数 $\dot{K}_I$

Fig. 11 Path independence of J integral.

Fig. 12 Stress distribution of the inhomogeneous specimen.

Fig. 13 Simulated fracture path. (7mm, 8mm, 9mm)

Fig. 14 Histories of time derivative of stress intensity factor.

の履歴を示す。横軸 a_1 は初期き裂からのき裂進展距離 X_1 成分を表す。

$\Delta l = 7\text{mm}$, 9mm の場合, K_I の時間変化率は単調増加している。一方 8mm の場合, 3 番目の円孔付近を進展する際に, $\dot{K}_I$ が減少している。これは円孔側部付近にき裂先端が位置する際に, き裂先端への引張作用が一時的に減少する遮へい効果が作用したためと考えられる。一方で, $\Delta l = 9\text{mm}$ では円孔とき裂先端の距離が十分離れているので $\dot{K}_I$ を減少させるほどの遮へい効果は生じていない。このように円孔の位置はき裂進展方向だけでなく, 応力拡大係数の変化率にも影響を与えている。応力拡大係数はき裂進展に伴い増加するパラメータであるが, Fig. 3 に示すように円孔が配置された場合は, き裂成長中の応力拡大係数の時間変化率に増減が生じ, 過渡的にき裂成長が鈍るケースが存在する。応力腐食割れでは, き裂の成長は応力拡大係数値に強く依存するため, この

Fig. 15 Crack growth rate.

結果がき裂成長速度に大きな影響を与えている。Fig. 15 にき裂成長速度履歴を示す。横軸は初期き裂からの X_1 方向のき裂進展距離を表す。

3 番目の円孔の近くで, $\Delta l = 8\text{mm}$ と $\Delta l = 9\text{mm}$ のき裂成長率が逆転している。このように不均質構造では引張負荷の遮へいがき裂成長挙動に大きな影響を与え得る。

5 結 言

応力腐食割れによる単調き裂進展現象をデローニ自動要素分割に基礎をおく移動有限要素法を用いてシミュレートした。応力拡大係数とき裂成長速度の関係式に基づき経路予測シミュレーションを行い, 破壊経路, 応力拡大係数について, 実験結果と比較検討した。円孔を含む試験片のシミュレーション解析では, 円孔の位置を変更することで破壊経路やき裂成長率にどのような影響を及ぼすかを検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 均質試験片における応力腐食割れでは, 破壊経路は定性的に正しく, 応力拡大係数の数値解析結果と評価式はよく一致している。このことから, 実験結果と局所対称理論を用いた本混合形シミュレーション数値解析法の妥当性が示された。

(2) 円孔を含む非均質試験片の応力腐食割れでは, き裂進展予測シミュレーション結果より, 破壊経路および, き裂成長速度は構造の非均質効果 (円孔) の影響を受けることが分かった。特に, き裂成長率が一時的に下がる効果が確認された。

参 考 文 献

- 1) <http://www.energia.co.jp/atom/press09/p100310-2.html>
- 2) The Society of Materials Science, Japan eds, "A theory and the application of the corrosion prevention of rust to study by an experiment", pp.251-257 (1999).
- 3) S. W. Sloan and G. T. Houlsby, "An implementation of Waston's algorithm for computing 2-dimensional delaunay triangulations", Advances in Engineering Software, Vol.6, pp.192-197 (1984).
- 4) T. Taniguchi, "Automatic mesh generation for FEM : use of delaunay triangulation", pp.1-198 (1992) Morikita Publishing.
- 5) T. Nishioka, "The State of the Art in Computational Dynamic Fracture Mechanics", The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Series A, Vol.37, No.4, pp.313-333 (1994).
- 6) T. Nishioka, "Computational Dynamic Fracture Mechanics, International Journal of Fracture", A special Issue on Computational Mechanics, Vol.86, No.1/2, pp.127-159 (1997).
- 7) T. Nishioka, M. Masugami and T. Fujimoto, "Simulation of Fatigue Fracture Path Prediction in Materials Containing Holes and Inclusions Using Moving Finite Element Method", Trans. The Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.74, No.742, pp.805-811 (2008).
- 8) T. Nishioka and S. N. Atluri, "Path-Independent Integrals, Energy Release Rates, and General Solutions of Near-Tip

- Fields in Mixed-Mode Dynamic Fracture Mechanics”, Engineering Fracture Mechanics, Vol.18, No.1, pp.1-22 (1983).
- 9) T. Nishioka, S. Tchouikov, J. Furutsuka and T. Fujimoto, “Fracture Path Prediction Simulations of Dynamic Fracture Phenomena”, Materials Science Research International, pp.169-176 (2001).
- 10) T. Nishioka, S. Tchouikov, J. Furutuka and T. Fujimoto, “Materials Science Research International”, Special Technique Publication-1, pp.169-176 (2001).
- 11) J. R. Rice, “A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks”, Journal of Applied Mechanics, Vol.35, pp.379-386 (1968).
- 12) T. Nishioka, “The State of the Art in Computational Dynamic Fracture Mechanics”, The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Series A, Vol.37, No.4, pp.313-333 (1994).
- 13) R. V. Goldstein and R. L. Salganik, “Brittle Fracture of Solids with Arbitrary Cracks”, International Journal of Fracture, Vol.10, No.10, pp.507-523 (1974).
- 14) T. Nishioka, H. Tokudome and M. Kinoshita, “Dynamic Fracture-Path Prediction in Impact Fracture Phenomena Using Moving Finite Element Method Based on Delaunay Automatic Mesh Generation”, International Journal of Solids and Structures, 38, pp.5273-5301 (2002).