

炉内計装筒管台内面軸方向応力腐食割れき裂進展シミュレーション

Stress Corrosion Cracking Test Methodology for inner axial cracks and its cracking behavior

東北大学
東北大学

佐藤 康元 Yasumoto SATO Member
庄子 哲雄 Tetsuo SHOJI Non-member

A 3D-FEM simulation code based on the deformation/oxidation model for the evaluation of SCC in compact tension specimens was extended to evaluate the axial SCC behavior of mock-up specimens of bottom mount instrumentation tube of pressurized water reactor, and its applicability was investigated by comparing the cracking behavior calculated by the simulation with that obtained by the experiment.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Simulation, Bottom Mount Instrumentation Tube

1. 緒言

応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking; SCC)のき裂進展挙動は、力学・材料・環境の3つの因子による複雑な相互作用により支配されており、それらの組み合わせ条件をすべて実験的に評価するのは物理的制限により非常に困難であり現実的ではない。そこで、限られた実験事実に基づき高温高圧水中における環境助長割れの進展機構を解明し、それに基づいてき裂進展速度を定量的に予測しようとする試みがなされている[1]。本研究では、CT試験片を用いたSCCき裂進展をシミュレートするため開発された3次元有限要素法コード[2]を配管状試験体内面軸方向SCCき裂進展へと拡張しその有効性を実験結果と比較することで検証した。

2. SCCシミュレーション

これまでの研究によれば、環境助長割れの主因は、環境と材料との化学的又は電気化学的過程、あるいはそれに付随して生じる現象によるものであり、その場所はき裂先端あるいはその周辺であることは事実である。そこで本研究では「環境と材料との化学的又は電気化学的過程あるいはそれに付随して生じる現象によるもの」であることと「その場所はき裂先端あるいはその周辺である」ことを独立事象と考え、この2つの事象が相互に作用するとき環境助長割れが発生するものとする。これらの事象のうち前者を材料・環境因子によるき裂進展として考え、環境助長割れモデルの一つであり、高温高圧水中において実現象とよく

一致していると言われるすべり酸化モデル[3]に基づくモデルによりき裂進展速度を表現する。また、後者を力学因子によるき裂進展と考え、き裂先端ひずみ速度を力学因子で求められる3D-FEMを用いてき裂先端のひずみ勾配を計算し、き裂進展速度とき裂先端ひずみ速度の関係を導出する手法により評価する。ここで重要なことは、Riceら[4][5]によると、き裂先端に生じるひずみはその要因によらず加算されるものであり、ひずみ量が適切に評価されていれば負荷モードによらず統一的にき裂進展速度を評価することが可能であるという点である。これらの考え方にに基づき、材料・環境・力学因子が複雑に関与した環境助長割れ進展速度式が次式のように提案されている[6]。

$$\frac{da}{dt} = \kappa_a \cdot (\dot{\epsilon}_{cl})^m \quad (1)$$

ここで $\dot{\epsilon}_{cl}$ はき裂先端ひずみ速度、 m は酸化速度減衰曲線の傾き、 κ_a は酸化速度定数である。シミュレーションではき裂先端ひずみ速度を、成長き裂先端ひずみ勾配と予め実験的に求められているき裂進展速度から求め、(1)式を用いてき裂進展速度を予測した。

シミュレーションの対象としたSCC試験はFig.1に示すように、加圧水型原子炉(PWR)炉内計装筒管台試験体の内面に2つの軸方向スリットを有し、スリット

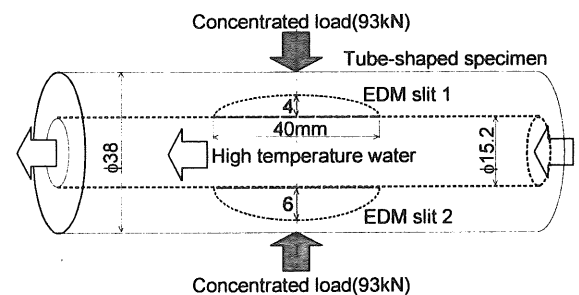


Fig. 1 Illustration of SCC test setup using tube-shaped specimen.

連絡先:佐藤康元、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター、電話: 022-795-7520、e-mail:yasumoto.sato@riff.mech.tohoku.ac.jp

直上に集中荷重(93kN)を負荷するものである。試験体には PWR1 次冷却水を循環させる状態を想定した。

3. SCC 試験方法

供試材は溶体化処理された Ni 基合金 600 であり、Fig.1 に示した PWR 炉内計装筒管台形状の試験体へと加工した。荷重荷重方法もシミュレーションで想定している状態とし、試験体内部に PWR1 次系模擬水(1200ppm B+2ppm L、溶存水素量 2.8~3.0ppm)を循環させて SCC 試験を実施した。

4. 結果および考察

SCC 試験終了後、疲労負荷により試験片を破断して破面観察に供した。Fig.2 に深さ 4mm のスリット周辺の破面の写真と SEM 像を示す。スリット先端から疲労予き裂が発生し、疲労予き裂の先端から SCC が生じている。しかし、荷重線周辺では SCC は発生せず(深さ 6mm のスリットでも荷重線周辺では疲労予き裂、SCC ともに発生していなかった)、荷重線の両脇において最もき裂進展量が大きい結果となった。

Fig.3 には 2 つのスリットから導入されている疲労予き裂先端から生じた SCC 進展量を破面観察により測定しスリット中心から軸方向の位置に対してプロットした。また同図にはシミュレーションにより計算されたき裂進展量を合わせて示した。Fig.3(a)に見られるように、中央部分において 0.1mm 程度の SCC き裂進展がシミュレーションにより計算されているが、Fig.2 にも示したように実験結果においてはスリット中央部で SCC は全く発生していない。これは疲労予き裂は試験片を開放するまでは形状が不明であり、シミュレーションでは全くモデル化されていないために生じた誤差と考えられる。さらに深さ 4mm のスリット先端から生じた疲労予き裂の大きさは 6mm のスリットから生じたものよりもおよそ 2 倍大きかった。Fig.3(b)に示したように、両端で若干の過小評価が見られるものの、中央付近で全くき裂が生じていないことも含めてシミュレーションと実験は良好な一致を示した。

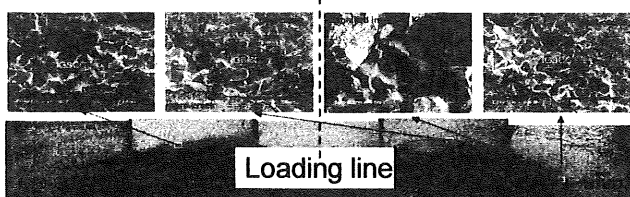


Fig. 2 Fracture surface around EDM slit 1

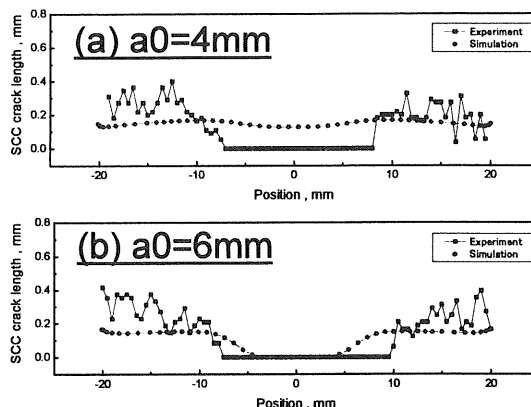


Fig. 3 Increments of the cracks obtained by the experiment and the simulation.

5. 結言

- 1) 深さ 6mm のスリットから生じた SCC き裂進展挙動は実験結果とシミュレーションで良好な一致を示した。
- 2) 疲労予き裂形状をモデル化できなかったため、深さ 4mm のスリットから生じた SCC き裂進展挙動にたいして中央部周辺で 0.1mm 程度シミュレーションが過大評価した。

謝辞

本研究の一部は独立行政法人原子力安全基盤機構安全調査研究として実施した。

参考文献

- [1] T. Shoji et al., A New Parameter for Characterizing Corrosion Fatigue Crack Growth, Trans. ASME, J. Engineering Materials and Technology, Vol. 103, October 1981, pp.298-304.
- [2] T. Shoji et al., 3D-FEM Simulation of EAC Crack Growth Based on the Deformation/Oxidation Mechanism, Proc. 11th Int. Symp. Environ. Degradation Mater. Nuclear Power Systems - Water Reactors, 2003, pp.855-861.
- [3] F. P. Ford, A Mechanism of Environmentally-Controlled Crack-Growth of Structural Steels in High-Temperature Water, Proc. of the IAEA Specialists Meeting on Subcritical Crack Growth, Vol.2, Freiburg, W.H.Cullen Ed., NUREG/CP-0044, MEA-2014, May 13-15, 1981, pp.249-294.
- [4] J. R. Rice and E. P. Sorensen, Continuing Crack-Tip Deformation and Fracture for Plane-Strain Crack Growth in Elastic-Plastic Solids, J. Mech. Phys. Solids, Vol.26, 1978, pp.163-186.
- [5] J. R. Rice., W. J. Drugan and T. L. Sham, Elastic-Plastic Analysis of Growing Cracks, , Fracture Mechanics, Twelfth Conference, ASTM STP 700, 1980, pp. 189-221.
- [6] T. Shoji et al., Modeling and quantitative prediction of environmentally assisted cracking based upon a deformation-oxidation mechanism, PVP-Vol.479, Residual stress, Fracture, and Stress Corrosion Cracking, PVP-2004-2662. Ed. Y. Y. Wang, ASME, New York, 2004, pp.175-184.