繰返し荷重による SCC き裂進展の遅延

齋藤利之^{*1}, 伊藤幹郎^{*2}

Retardation of SCC Propagation by Cyclic Load

Toshiyuki SAITO^{*3} and Mikiro ITOW

^{*3} Mechanical Technology & Design Dept., Toshiba Corporation Power Systems Company
8, Shinsugita-Cho, Isogo-ku, Yokohama, 235-8523 Japan

The Stress Corrosion Cracking has been observed in a component of low carbon austenitic stainless steel in the BWRs. It is necessary to examine various factors on the SCC crack propagation for the operation and maintenance and the reliability securing of the aged plant. In this study, the effect of the cyclic load that causes it for SCC crack propagation in simulated BWR environment is examined by using the CT specimen of cold-rolled stainless steels (SUS316L). As a result of the examination, the retardation phenomenon was observed as for the SCC crack immediately after the cyclic load was received.

Key Words : Stress Corrosion Cracking, Crack Propagation, Life Prediction

1. 緒 言

近年, 国内外の沸騰水型原子炉 (BWR: Boiling Water Reactor) において, オーステナイト系ステンレス鋼製の再循環配管や炉心シュラウドに多数の応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) が確認されている。国内プラントの欠陥評価は, 日本機械学会維持規格⁽¹⁾に基づいて実施される。この評価の結果, 健全性が維持される場合, 継続検査を行いながらの継続運転が認められる。SCC は溶接残留応力等の定常的な負荷により進展するが, 地震荷重のように繰返しの大きな荷重を受けた後の SCC き裂の進展挙動も評価しておく必要がある。著者らは, 繰返しの引張および除荷の過大荷重を負荷することにより, SCC き裂が遅延することを明らかにした⁽²⁾。本報では, 異なる荷重モードが及ぼす SCC き裂進展への影響について検討するために, BWR 炉水模擬環境中にて SCC き裂進展試験を行い, 試験途中で繰返しの除荷の荷重を負荷し, 変動荷重負荷前後での SCC き裂進展挙動について検討する。

2. 試験方法

供試材は, 前報⁽²⁾と同じ低炭素ステンレス鋼 (SUS316L) 溶体化処理材であり, SCC の発生が確認されている溶接熱影響部などの硬化部位を想定するために室温にて冷間圧延加工を施してある。冷間圧延加工の加工率は 20% である。試験片は, 1 インチ (25.4mm)

厚さのコンパクトテンション型試験片 (ITCT) であり, 両側面に 1.27mm 深さのサイドグループを設ける。試験片採取方向は T-L 方向とする。試験片ノッチ先端には, 予め室温大気中にて疲労予き裂を導入する。

SCC き裂進展試験は, 高温高圧水循環ループに接続した電気サーボ式引張試験装置付のオートクレーブ内にて, 荷重軸に 2 個の試験片を直列に装着して試験を実施する。試験温度は 288°C, 溶存酸素濃度は BWR 炉内水質環境を模擬するため高濃度 (15ppm 以上) に設定し, またオートクレーブ出口の導電率は $0.2 \mu S/cm$ 以下とする。図 1 は, SCC き裂進展試験および繰返しの荷重付与等の荷重履歴の概要である。環境中予き裂⁽³⁾を導入後, 一定荷重に移行し SCC き裂進展試験を行い, 試験途中で繰返しの除荷の荷重を負荷し, 再度一定荷重による SCC き裂進展試験を行う。なお, 一定荷重において目標とする応力拡大係数 (K) は, $25 MPa\sqrt{m}$ とする。本研究において負荷する荷重モード除荷であり, K_{min} は $1 MPa\sqrt{m}$ を目標とし, 周波数 0.05Hz で 60 回負荷する。また, き裂の進展量の変化は交番直流電位差法により連続計測する。

3. 試験結果および評価

3・1 SCC き裂進展試験結果 表 1 は繰返しの荷重負荷前の応力拡大係数と SCC き裂進展速度である。いずれも試験時間 900 時間から 1200 時間の平均値である。なお, き裂長さは, 実測したき裂長さの平均値 (進展部分の面積を試験片板厚で除した値) を基に, 交番直流電位差法の測定値を補正している。また, 表中には繰返し荷重の K_{max} , K_{min} の条件を示す。

^{*1} 正員, 株式会社東芝 電力システム社 (〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8)

^{*2} 株式会社東芝 電力システム社
E-mail: toshi.saito@toshiba.co.jp

Fig.1 Schematic loading history for SCC crack propagation test

Table 1 Results of SCC crack propagation test

TP No.	Before cyclic load		Cyclic load
	K^* (MPa√m)	da/dt^* (m/s)	K_{max}/K_{min} (MPa√m)
SS-3	24.8	2.4E-10	25.2/0.9
SS-4	29.0	3.6E-10	29.8/1.1

*Average value from 900h to 1200h

Fig 2 SCC crack growth rate for SUS316L(20%CW)
図2は、前報⁽²⁾および本研究で取得した低炭素ステンレス鋼(SUS316L)の20%冷間圧延加工材のBWR模擬環境中における繰返し荷重を負荷した前のSCC進展速度と応力拡大係数の関係である。また、同図には、Tsubota⁽⁴⁾、Andresen^{(5)~(7)}が取得したSCCき裂進展速度をも示す。本研究で取得した K 値が30MPa√m近傍のSCCき裂進展速度は、これらのデータと同等である。また、日本機械学会維持規格⁽¹⁾に規定されている鋭敏化SUS304および低炭素ステンレス鋼のSCC進展速度線図をも示す。冷間圧延加工を行うことにより硬さが上昇

し、低炭素ステンレス鋼のSCCき裂進展速度を上回る。

図3と図4はき裂長さと時間の関係である。環境中予き裂導入後、一定荷重にてSCCき裂進展試験を行い、一定の進展速度で進展していることを確認後、変動荷重を負荷し、再度一定荷重にてSCCき裂進展試験を実施する。繰返しの除荷の荷重を負荷した直後にSCCき裂進展速度が小さくなるが、その後は負荷前のSCCき裂進展速度と同等である。

Fig.3 Crack propagation data for SCC propagation test and prediction curve with no cyclic load (TP No.SS-3)

Fig.4 Crack propagation data for SCC propagation test and prediction curve with no cyclic load (TP No.SS-4)

また、同図には繰返しの荷重を受けない場合の進展挙動の予測をも示す。維持規格で規定のBWR環境中の鋭敏化SUS304のSCCき裂進展速度（上限値と下限値を除く）は以下の式で表される。

$$da/dt = 2.20 \times 10^{-13} K^{2.161} \quad (1)$$

ここで、 da/dt はSCCき裂進展速度(m/s)、 K は応力拡大係数(MPa√m)である。繰返しの荷重を受けない場合の進展挙動の予測では、維持規格の鋭敏化SUS304と同じ傾きを有し、繰返し荷重負荷前のSCCき裂進展速度を通るように係数 C を定める。繰返しの荷重を受けたSCCき裂の試験結果は、繰返しの変動荷重を受けない場合の進展

挙動の予測に比較して、その進展挙動は負荷直後に遅くなり、その後も上回ることはない。

3・2 き裂先端の応力場の解析 繰返しの変動荷重に伴うき裂先端の応力場の変化を、有限要素法(FEM)を用いて解析する。き裂長さを 27.672mm (TP No. SS-1⁽²⁾)として定常荷重を負荷した後、変動荷重を付与し、続いて 1 要素長さ(0.01mm)ずつ節点の拘束を解放することによりき裂を進展させる。弾塑性解析に用いたヤング率は 175GPa, ポアソン比は 0.3, 降伏応力は 400MPa である。また、塑性ひずみ 0.2%での応力を 450MPa として 2 直線近似の応力ひずみ関係を用い、移動硬化則を用いて弾塑性解析を行う。解析モデルは CT 試験片の対称性を考慮して 1/2 モデルとし、平面ひずみ要素を用いる。図 5 は、変動荷重負荷前のき裂面に垂直な方向の応力分布である。このときの応力拡大係数は約 $27\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

Fig.5 Stress contour before cyclic load

図 6 は、除荷の繰返しによるき裂先端近傍のき裂面に垂直な方向の応力分布である。き裂先端の応力は除荷の繰返し直後、わずかながら小さくなるがその前後で大きな変化は見られない。また、き裂を 0.5mm 進展させた場合においてもその応力場に変化は見られない。したがって、繰返しの除荷を受けた SCC き裂は、負荷直後にわずかに遅くなるものの、その後の進展挙動には大きな差がない。一方、図 7 は、前報⁽²⁾で報告の引張と除荷の繰返し荷重を付与した直後、およびその後 0.5mm 進展させた場合の応力分布である。き裂先端には引張の過大荷重により引張の塑性域が形成され、除荷時にその周辺の拘束によりき裂先端には圧縮の塑性域が残る。その結果、定常荷重に戻った場合、き裂先端の応力は繰返し荷重負荷前に比較して小さくなる。また、き裂を進展させると繰返し荷重負荷前の応力場に徐々に戻る。したがって、前報⁽²⁾で報告した引張と除荷の繰返し荷重を受け

た SCC き裂は、負荷後に遅延、その後徐々に回復する現象が現れる。

Fig.6 Stress contour at crack tip after cyclic unload

Fig.7 Stress contour at crack tip after cyclic overload

4. 結 言

低炭素ステンレス鋼の BWR 炉水模擬環境中における SCC き裂進展試験において、繰返しの除荷の荷重を負荷した直後に SCC き裂進展が遅延し、その後は負荷前の SCC き裂進展挙動と同等となることを明らかにした。また、FEM 解析の結果、き裂先端の応力場に及ぼす除荷の影響は小さいことを確認した。

文 献

- (1) The Japan Society of Mechanical Engineers, *Codes for Nuclear Power Generation Facilities - Rules on Fitness-for-Service for Nuclear Power Plants* -, JSME S NA1-2008, (2008).
- (2) Saito, T. and Itow, M., Retardation of SCC Propagation by Cyclic Overload, JSME Material & Mechanics Conference 2008, GS0408.
- (3) Itow, M., Itatani, M., Kikuchi, M., Tanaka, N., Crack Growth Behaviors of Low Carbon 316 Stainless Steels in 288 °C Pure Water, 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors, (2005).
- (4) Tsubota, M., Katayama, Y., Saito, Y., Stress Corrosion Crack Growth Behavior of Cold Worked Austenitic Stainless Steel in High Temperature Water, Environmental, 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors, (2005).
- (5) Andresen, P., L., Effect of Deformation on SCC of Unsensitized Stainless Steel, Corrosion 2000, Paper No.00203(2000).
- (6) Andresen, P., L., Similarity of Cold Work and Radiation Hardening in Enhancing Yield Strength and SCC Growth of Stainless Steel in Hot Water, Corrosion 2002, Paper No.02509(2002).
- (7) Andresen, P., L., Morra, M., M., SCC of Stainless Steels and Ni Alloys in High Temperature Water, Corrosion 2007, Paper No.07612(2007).