1209 溶接部の SCC 防止のためのショットピーニング効果

Effect of shot peening for SCC prevention at welded part

○ 井上 謙 (横浜国大院) 吉野 浩平 (横浜国大院)
正 高橋 宏治 (横浜国大) 正 安藤 柱 (横浜国大)

Ken Inoue, Kohei Yoshino, Graduate Student, Yokohama National University.
Kotoji Ando, Koji Takahashi, Yokohama Nat. Univ. 79-5, Hodogayaku, Yokohama

Key words: Shot Peening, SCC, Residual Stress, Stress Intensity Factor, Finite Element Method, Permissible crack size

1. 緒言

原子力発電プラントの安全性は高いレベルで確保されなければならない。最近シュラウド等の応力腐食割れ（以下 SCC）が問題となりはじめた。安全性の維持のために、シュラウド等の構造材料に耐腐食性の高い低炭素ステンレス鋼を用いるなどして SCC 対策を行ってきたが、SCC の発生が完全になくなることはなかった。損傷を受けたシュラウドの交換および修理にはコストがかかるうえに、稼働停止中の経済的損失も大きい。SCC が発生し、検出されたとしても、それを評価することによってき裂進展に問題なければ継続して稼働することができる。過去の事例から SCC により溶接線に沿ったき裂が発生することが報告されている。これらの SCC のき裂進展防止策としてショットピーニング等により金属表面に圧縮残留応力を導入することが効果的であることが示されている。

本研究ではステンレス鋼中の溶接残留応力場における SCC を想定し、有限要素法を用いることにより SCC によるき裂進展に悪影響を及ぼさない許容き裂寸法の評価方法を提案した。さらに、圧縮残留応力を導入した場合の許容き裂寸法への効果についても破壊力学的観点から検証を行った。

2. 解析方法

ステンレス鋼の溶接線近傍に存在する溶接線に平行な半円き裂を想定し、図 1 に示すような四角柱の表面に存在する半円き裂モデルを作成した。ステンレス鋼の溶接線近傍は図 2 に示すように、溶接線に垂直方向の溶接残留応力 ($\sigma_{y,res}$) が作用し、材料や溶接条件によって多少異なるが、き裂表面部で約 300 MPa となり板厚方向に向かって減少する。(1) この材料表面部における溶接残留応力分布は、想定したき裂内面においてほぼ一定であると仮定し、本解析ではき裂内面部に深さ方向に一定の残留応力を作用させた。図 3 には解析モデルのき裂内面に負荷させた溶接後の残留応力場及びピーニング処理後の残留応力分布を示してある。これらより、有限要素法を用いて各き裂深さにおけるき裂前縁に沿った応力拡大係数 K_I を算出した。また本解析ではショットピーニング処理後の残留応力分布において残留応力値が零になる地点（クロッシングポイント）を 500 μm 、700 μm と変化させた場合の許容き裂寸法に及ぼす影響についても調査した。

解析には対称性を考慮して、図 4 に示すような 1/4 モデル

を作成した。使用要素は 20 節点アイソパラメトリック六面体要素を用い、き裂先端付近には特異要素を使用した。ヤング率 $E=197\text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。境界条件は図 4 に示してある。

Fig. 1 Rectangular solid containing a semi-circular crack.

Fig. 2 Surface crack around welded part

Fig. 3 Residual stress distribution

Fig. 4 Boundary conditions for rectangular solid containing a semi-circular crack (1/4 model)

3. 解析結果及び考察

3.1 半円き裂全縁に沿う応力拡大係数 K_r

メッシュ分割の精度を検証するために、一様引張応力場における応力拡大係数を解析し、Raju-Newman⁽²⁾の解と比較した結果、誤差は3%以内であった。

応力拡大係数 K_r に及ぼすき裂深さの影響を比較した結果を、各残留応力分布について図5、図6および図7にそれぞれ示す。溶接残留応力場中におけるき裂前縁に沿った応力拡大係数 K_r は、図5に示すように、き裂表面部において最大値となりき裂最深部に向かって単調に減少している。ピーニング処理後の残留応力場において、き裂表面部では圧縮残留応力の影響により K_r は負の値を示し、き裂最深部で最大値を示した。負の応力拡大係数はき裂を開口させる応力を働かせた時の抵抗力を意味する。

Fig. 5 Distribution of K_r along the crack front for a semi-circular crack in the residual stress field induced by welding.

Fig. 6 Distribution of K_r along the crack front for a semi-circular crack in the residual stress field induced by shot peening ($L=500 \mu m$).

Fig. 7 Distribution of K_r along the crack front for a semi-circular crack in the residual stress field induced by shot peening ($L=700 \mu m$).

3.2 許容き裂寸法

各残留応力分布によって求められた K_r 値より許容き裂寸法を定義する。各 K_r 分布の最大値を横軸に、き裂深さ a を縦軸にとったものを図8に示す。通常原子炉内水質環境中における、もはやこれ以上 SCC が進展しない下限界の応力拡大係数 K_{Isc} は SUS304 において $3.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, SUS304L, SUS316, SUS316L の場合は $7.0 \text{ MPa}\sqrt{m}$ であると仮定し、図8に縦線で示してある。つまり各 K_r の最大値が各材料の K_{Isc} の値を超えてしまうと無応力でき裂が進展することを意味する。溶接残留応力場中の許容き裂寸法に対してピーニング処理後の残留応力場のそれは非常に大きくなっていることがわかり、また深い残留応力を導入することも許容き裂寸法に対して効果的であることが伺える。

Fig. 8 Relationship between crack depth and K_r .

4. 結言

FEM を用いることにより半円き裂前縁の応力拡大係数を算出し、各ステンレス鋼材料の各残留応力場における SCC 欠陥によって構造破壊が起こらないための許容き裂寸法を解析的に定義することができた。

材料表面に対してピーニング処理により圧縮残留応力を付加することによって許容き裂寸法を大きくできることがわかった。また圧縮残留応力を深く導入することによりさらに許容き裂寸法を大きくすることができる。

5. 参考文献

- (1)火力原子力発電技術協会, BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン(2002), 61
- (2)Raju, I. S. and Newman, J. C. Jr., *Eng. Fract. Mech.*, 11(1979), 817