

原子炉配管の確率論的構造健全性評価－2 － 残留応力解析による溶接条件のばらつきの影響評価 －

Probabilistic Structural Integrity Assessment of Reactor Coolant Pressure Boundary Piping-2
- Residual Stress Analyses of the Effect of Scatter of Welding Conditions -

(独)日本原子力研究開発機構 勝山 仁哉 Jinya KATSUYAMA
(独)日本原子力研究開発機構 飛田 徹 Tohru TOBITA
(独)日本原子力研究開発機構 伊藤 裕人 Hiroto ITOH
(独)日本原子力研究開発機構 鬼沢 邦雄 Kunio ONIZAWA Member

Stress corrosion cracking (SCC) in primary loop recirculation piping made of austenitic stainless steel has been observed near welding joints. The SCC grows near the welding zone mainly due to high tensile residual stress by welding as well as the other contributing factors of material and environment. The residual stress analysis due to welding of austenitic stainless piping is important and has been already conducted by many researchers. In present work, the effect of scatters of welding conditions such as heat input and welding speed on residual stress have been evaluated by parametric FEM analyses considering the variation of some parameters based on the welding experiments. The effects of welding conditions on crack growth behavior have been also evaluated by SCC growth simulations using calculated residual stress distributions and a procedure in the fitness-for-service code. Welding parameters such as heat input and welding speed have a strong influence on crack growth rate since residual stress is also affected by scatter of these welding parameters.

Keywords: Thermo-Elastic-Plastic Analysis, Scatter of Welding Parameter, Residual Stress, Stress Corrosion Cracking

1. 緒言

配管内表面の引張残留応力は応力腐食割れ (SCC) 等き裂の発生要因となるとともに、配管板厚内の残留応力分布は、き裂の進展速度や方向に影響を及ぼす。このため、配管板厚内の残留応力分布は健全性評価において重要な因子である。そこで本研究では、再循環系配管における突合せ溶接継手を対象に、溶接条件が残留応力分布に及ぼす影響について評価するため、前報[1]で取得した溶接条件及びそのばらつきに基づき、有限要素法を用いた熱弾塑性解析により溶接条件のばらつきが溶接残留応力に及ぼす影響を評価した。また、後報[2]の確率論的破壊力学解析に供する残留応力データベースを構築した。さらに、得られた残留応力分布に基づき、影響関数法を用いたき裂進展解析を行い、溶接条件のばらつきが配管の構造健全性に及ぼす影響について決定論的検討を行った。

連絡先: 勝山仁哉、〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4、独立行政法人日本原子力研究開発機構、電話: 029-282-5147、e-mail:katsuyama,jinya@jaea.go.jp

2. 解析方法

2.1 溶接残留応力シミュレーション

本研究では、2通りの 250A 配管溶接 (A 及び B) を対象とした。解析に使用した有限要素モデルの一例として、本報で主に述べる溶接 A の三次元モデルを Fig. 1 に示す。本研究では、前報で対象とした 250A 配管突合せ溶接部における開先形状、及び溶接中に実測した

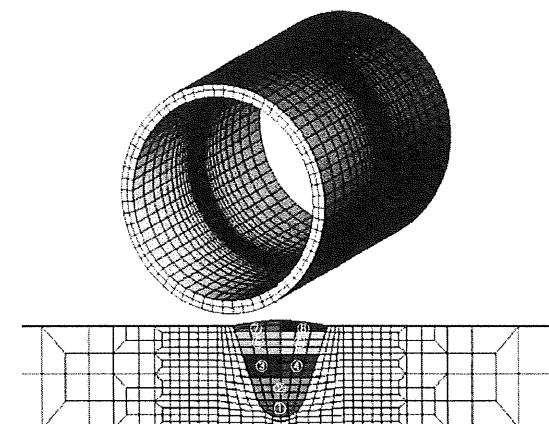


Fig. 1 Finite element model and cross section view of weld A.

溶接条件(入熱量 Q 、溶接速度 V 等)に基づき[1]、三次元及び軸対称多層溶接シミュレーションを行い[3-5]、溶接条件が残留応力に及ぼす影響について検討した。解析においては、TIG 溶接を模擬した移動熱源を用いるとともに、熱源移動に伴う溶接金属の付着を考慮した。

2.2 SCC進展解析

内表面周方向半楕円き裂を対象に、前記シミュレーションから得られた残留応力分布を用いて、日本機械学会の維持規格に規定されている影響関数法により応力拡大係数(K 値)を算出し、同規格の低炭素ステンレス鋼における通常水質環境下のSCC進展速度線図を用いてき裂進展解析を行った[6]。初期き裂寸法について、初期き裂深さ及び初期き裂長さは、ハリスら[7]がまとめた初期き裂寸法の平均を求め、それぞれ0.1mm及び3.18mmとした。この際、運転応力としては、設計応力強さに相当する98MPaを残留応力に加えることにより、保守的にSCC進展挙動を評価した。

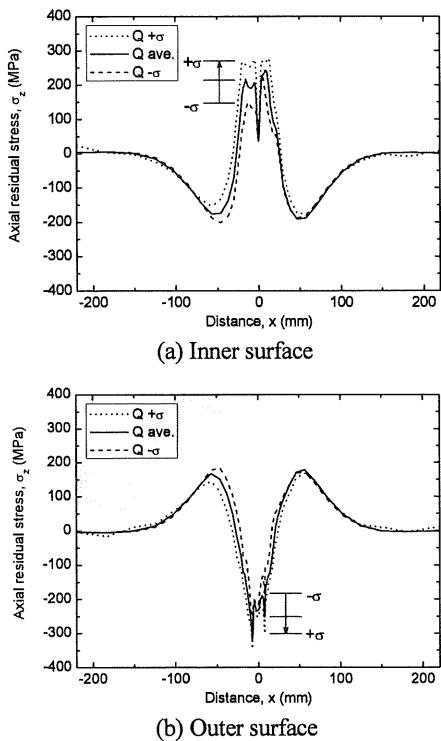


Fig. 2 Residual stress distributions along inner and outer surfaces for 250A butt-welded pipes by several heat inputs of last pass.

3. 解析結果及び考察

本研究で用いた溶接残留応力シミュレーションの精度に関して、実測の残留応力データと、三次元モデル及び軸対称モデルによる解析結果を比較し、それらがほぼ一致することを確認した。そこで、以下の解析では軸対称モデルによる解析結果を用いることとした。軸対称モデルを用いて、入熱量 Q のばらつきが残留応力に及ぼす影響について評価した結果を Fig. 2 に示す。この図は、溶接 A に対する最終溶接パスの入熱量 Q の違いについて評価するため、前報で取得した入熱量について、平均値 Q_{ave} 及び Q_{ave} に対して標準偏差 $\pm \sigma$ だけ変化させた溶接残留応力シミュレーションにより得られた軸方向応力分布の変化を示している。入熱量 Q が大きくなるほど内表面の引張応力は増加し、同時に外表面では圧縮応力が増加することが分かる。同様に、同じ入熱量の場合、溶接速度 V が遅くなるほど内表面の引張応力及び外表面の圧縮応力が増加することを確認した。すなわち、単位時間当たりの入熱量が大きいほど、内表面の引張応力及び外表面の圧縮応力は増加する。また、この単位時間当たりの入熱量が大きくなるほど残留応力が生じる範囲も拡大することが分かった。溶接 B の開先形状及び溶接条件に対する結果も、この溶接 A の結果と同様であった。ここで得られた知見を基に、溶接条件(入熱量 Q 及び溶接速度 V)をパラメトリックに変化させ、溶接 A 及び B に対して、それぞれ 108 ケース及び 1217 ケースの解析を実施した。その際、溶接条件は、配管内表面の 1 パス目、及び残留応力分布に及ぼす影響が大きいと考えられる外表面付近の複数の溶接パスについて、実測により取得した溶接条件の平均値及び標準偏差に基づき変化させた。この結果をデータベース化し、確率論的破壊力学解析における溶接残留応力分布の確率評価モデルの入力データとした[2]。溶接 A に対する代表的な溶接条件の解析結果を Table 1 に示す。表は、溶接条件に対して軸方向応力の最大値(σ_z^{max})及びその位置($z_{\sigma max}$)をまとめたものである。表から分かるように、最終溶接パスの溶接条件のばらつきは残留応力に大きな影響を及ぼすことが分かる。一方、それ以外の溶接パスに関しては、内表面側(1 パス目)の溶接条件のみならず、最終溶接パス以前の溶接条件のばらつきも残留応力にはほとんど影響しな

いことが明らかとなった。溶接 B においても同様の傾向であることを確認した。

溶接条件のばらつきが、SCC 進展を通して配管の構造健全性に及ぼす影響に関して、Fig. 3 に示す溶接条件のばらつきによる板厚内の残留応力分布を基に、SCC 進展解析を行った。Fig. 3 は、溶接 A について、入熱量 Q を変化させた際の、内表面の軸方向応力を注目し、その値が最大値となる位置における軸方向応力分布を示している。前述のとおり、入熱量が大きくなるほど内表面の引張応力は高い値を示す。この結果に基づき SCC 進展解析を行ったところ、Fig. 4 に示すように、入熱量が大きいほど、き裂最深点における応力拡大係数は高く、き裂進展速度も速いことが示された。この結果、入熱量 Q のばらつきが実測で得られた

Table 1 Peak axial residual stress in inner surface and distance from the center of welding zone simulated by typical welding conditions for weld A.

Welding parameters						$Z_{\sigma \max}$ [mm]	σ_z^{\max} [MPa]
1pass-Q	7pass-Q	7pass-V	8pass-Q	8pas-V			
Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	8.3	229.0	
Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	11.8	266.0	
Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	5.2	203.5	
Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	7.3	206.6	
Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	10.8	257.3	
Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	3.8	292.3	
Ave.	Ave.	+σ	Ave.	Ave.	8.2	239.8	
Ave.	+σ	Ave.	Ave.	Ave.	8.2	242.1	
Ave.	+σ	Ave.	Ave.	Ave.	8.2	247.1	
+σ	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	8.8	229.8	
-σ	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	8.8	229.5	

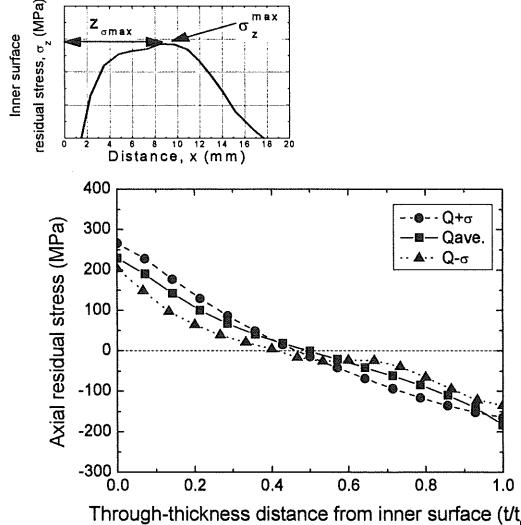
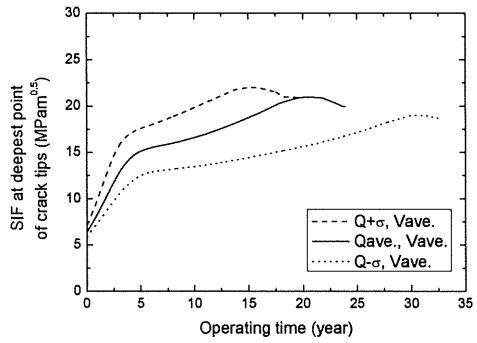


Fig. 3 Through-thickness axial residual stress distribution simulated for welding conditions of different heat input of last welding pass for same welding speed.

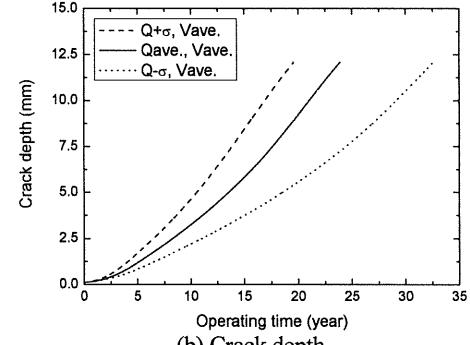
た標準偏差程度である場合、配管溶接部近傍におけるき裂進展速度は、例えば溶接 A においてき裂深さが 2.0mm から 12.0mm に達するまで、1.7 倍程度の差が生じることが分かった。一方、溶接 B においては、溶接 A に比べ入熱量のばらつきが小さいことから、き裂進展速度の差も小さいことが分かった。

4. 結言

- 1) 有限要素法を用いた熱弾塑性解析により、原子炉圧力容器バウンダリ 250A 配管の溶接突合せ継手を対象に、溶接残留応力に及ぼす溶接条件（入熱量、溶接速度）の影響を評価した。
- 2) 軸対称モデルを用いて、パラメトリック溶接残留応力解析を行い、溶接残留応力の分布及びそのばらつきに与える溶接条件の影響を評価した。評価の結果、250A 配管のような比較的薄肉の配管において、最終溶接パスの溶接条件が残留応力分布に及ぼす影響が大きいこと等が定量的に示された。また、確率論的破壊力学解析による破損確率評価に用いる残



(a) Stress intensity factor



(b) Crack depth

Fig. 4 Time dependencies of stress intensity factor at deepest point of crack tip and crack depth between different heat input of last welding pass for same welding speed.

留応力の確率評価モデルに必要な溶接残留応力データベースを構築した。

- 3) SCC 進展挙動に及ぼす溶接条件のばらつきの影響を明らかにした。すなわち、高い入熱量あるいは低い溶接速度により生じる内表面の高い引張残留応力の影響により、き裂進展速度が速くなる程度を明らかにした。

謝辞

本研究は、平成 18 年度及び 19 年度に(独)日本原子力研究開発機構が経済産業省原子力安全・保安院から受託した「確率論的構造健全性評価調査」事業における成果の一部である。

参考文献

- [1] 飛田徹、勝山仁哉、伊藤裕人、鬼沢邦雄: “原子炉配管の確率論的構造健全性評価－1、一溶接条件と溶接残留応力のばらつき－”, 日本保全学会 第 5 回学術講演会 (2008).
- [2] 伊藤裕人、勝山仁哉、飛田徹、鬼沢邦雄: “原子炉配管の確率論的構造健全性評価－3、一溶接残留応力に関する確率論的破壊力学解析－”, 日本保全学会 第 5 回学術講演会 (2008).
- [3] 勝山仁哉、米田正人、樋口良太、望月正人、豊田政男: “2D および 3D-FEM による円周溶接継手部近傍における残留応力特性評価”, 溶接学会全国大会講演概要 第 75 集 (2004), pp. 132-133.
- [4] J. Katsuyama, M. Mochizuki, R. Higuchi and M. Toyoda: “Parametric FEM Evaluation of Residual Stress by Circumferential Welding for Austenitic Stainless Steel”, Proceedings of PVP, PVP2005-71440 (2005).
- [5] J. Katsuyama, W. Asano, K. Onizawa, M. Mochizuki and M. Toyoda: “Crack Growth Analyses of SCC under Various Residual Stress Distributions near the Piping Butt-Welding” Proceedings of PVP2007, PVP2007-26574 (2007).
- [6] 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2002 年版) JSME S NA1-2004 (2002).
- [7] D. O. Harris, D. Dedhia and S. C. Lu: NUREG/CR-5864, UCRL-ID-109798 (1992).