

原子力発電機器における応力改善工法の 長期安全性評価のための基盤技術開発

(受託者) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 秋田貢一 量子ビーム応用研究センター応力評価技術研究グループ

(再委託先) 公立大学法人大阪府立大学、一般財団法人発電設備技術検査協会

(研究期間) 平成 26 年度～28 年度

1. 研究の背景とねらい

軽水炉の安全性に関わる課題として応力腐食割れ (SCC) がある。SCC は、ピーニングなどの応力改善工法により、部材表層に圧縮残留応力を付与することで防止できる。しかし、その圧縮残留応力はプラントの稼働中に緩和する可能性があり、緩和が大きい場合は潜在的に SCC 発生のリスクを抱えることになる。したがって、応力改善工法により付与した圧縮残留応力の長期間稼働後の持続性を評価する技術が確立できればこのリスクが低減でき、原子力安全に貢献できる。

本研究では、長期間稼働後の圧縮残留応力の持続性を評価するための基盤技術として、理想化陽解法をベースとした有限要素法解析 (Finite Element Method: FEM) 手法を開発する。具体的には、原子力発電プラント溶接構造物の応力改善工法適用部における溶接施工からピーニング及び実環境までの一連の工程を通した残留応力シミュレーション手法を開発する。また、解析手法の検証のため、原子力プラントの冷却配管を模擬した実機部分模擬溶接試験体を製作し、それらの残留応力を X 線および中性子回折で実測する。ここでは、現在進めている模擬試験体製作と初期残留応力測定、そして、ピーニングの力学モデル構築に関する進捗状況を報告する。

2. これまでの研究成果

(1) 実機部分模擬溶接試験体の製作

原子力発電プラントのピーニング適用箇所は溶接部がほとんどであり、溶接部の材料の組合せは、①母材、溶接金属ともにオーステナイト系ステンレス鋼の同材溶接継手、②母材がフェライト鋼とオーステナイト系ステンレス鋼、溶接金属がオーステナイト系ステンレス鋼またはニッケル基合金の異材溶接継手が主である。そのため、本研究ではピーニング適用箇所の材料を模擬した表 1 に示す円筒形状の溶接試験体を製作し、FEM 解析の検証に用いた。図 1 に試験体の製作の流れを示す。応力除去焼鈍は、鋼管製造時や開先加工時の残留応力を除去する目的で行い、材料表面の酸化を防止するため真空雰囲気で行った。また、整形加工は、平成 28 年度に実施する予定の応力負荷試験において溶接部に均等な応力を負荷するため、余盛と裏波を除去した。図 2 に平成 26 年度に製作した同材溶接試験体と平成 27 年度に製作した異材溶接試験体の TIG 溶接後の外観写真を示す。

表 1 本研究で製作した溶接試験体

溶接試験体	材料	寸法	数量	製作時期
同材	母材 : SUS316LTP 溶接金属 : 316L	肉厚 11.25 mm, 外径 161.5 mm, 長さ 195 mm	7 体	平成 26 年度
異材	母材 : SUS316LTP, STPT370 溶接金属 : 316L	肉厚 11.25 mm, 外径 161.5 mm, 長さ 400 mm	4 体	平成 27 年度
	母材 : SUS316LTP, STPT370 溶接金属 : alloy82		4 体	平成 27 年度

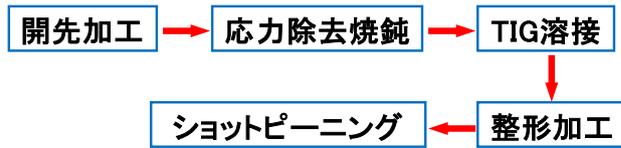


図1 試験体製作の流れ

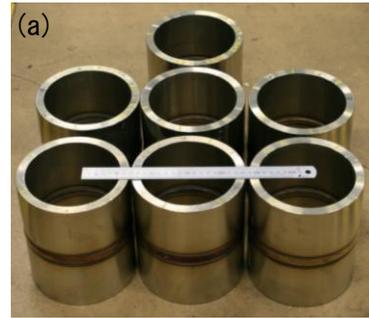
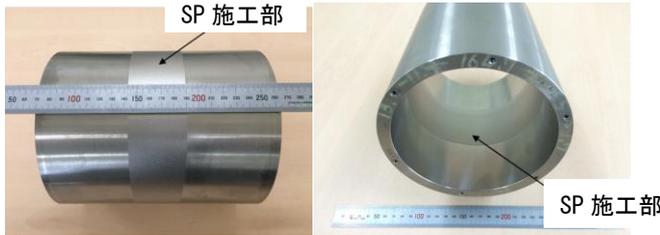


図2 TIG溶接後の(a)同材溶接試験体と(b)異材溶接試験体の外観写真



(a) 外表面 SP (b) 内表面 SP

図3 同材溶接試験体の SP 後の外観写真

整形加工後の一部の試験体に対し、外表面または内表面の溶接部近傍にショットピーニング (SP) を施した。なお、施工の制約から外表面はインペラー式、内表面はエア式の装置を用いて SP 施工しているが、両者のアークハイト値がほぼ同じになる条件を選定している。図3に同材溶接試験体の SP 後の外観写真を示す。

(2) 残留応力測定

これまでに、同材溶接試験体のうち溶接後整形加工した試験体(以下、SP 前)および SP 施工した試験体(以下、SP 後)の表面残留応力を X 線回折法で測定し、SP 施工の効果を確認した。また、SP により導入された残留応力の表面層内深さ分布を、X 線回折法と電解研磨の併用によって測定した。

同材溶接試験体における残留応力測定位置は、溶接始点から 180° の外表面であり、溶接ビード中心から配管軸方向 ± 30 mm の範囲で分布測定を行った。図4に、SP 前および SP 後試験体における周方向残留応力の測定結果を示す。残留応力は、SP 前試験体では全体的におよそ 200~400 MPa の引張となっている。これは整形加工時の塑性変形や入熱のために発生したものと考えられる。また、SP 後試験体の残留応力は、SP 施工領域で約 700 MPa の圧縮に転じており、SP によって残留応力が圧縮側に改善されたことが確認できた。

次に、SP 施工面における残留応力深さ分布の測定結果を図5に示す。外表面 SP 条件、内表面 SP 条件の残留応力は、最表面の残留応力は両者

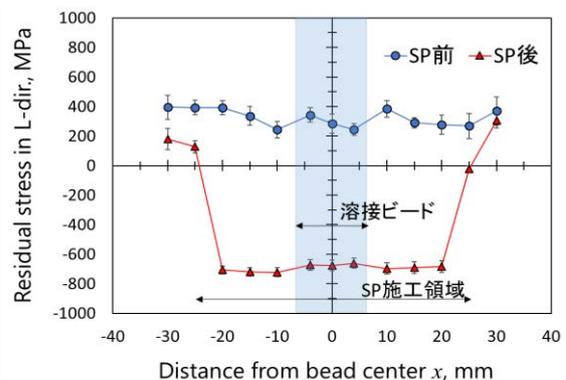


図4 同材溶接試験体外表面における配管周方向(溶接ビード方向)残留応力の分布

とも圧縮で、それが深さ約 30~50 μm 深さまで増大して最大値を示し、そののち漸減して深さ 500~600 μm 付近ではほぼゼロ応力に収束した。表面値の残留応力値は両方でやや異なるものの、ほぼ同様の分布となった。

(3) FEM 解析

ショットピーニングでは、無数のショットを対象箇所に衝突させることにより残留応力を低減している。よって、ショットピーニングの応力変化挙動について数値解析を用いて詳細に解析するのは有意と言える。しかしながら、多量に衝突を繰り返すショットを対象に解析した事例は見当たらず、1 個のショットが残留応力に及ぼす影響について検討した事例がほとんどである。そこで本研究では、実際のショットピーニングを模擬し、平板に対し、多量のショットを時間的・空間的にランダムに衝突させた際に発生する応力変化挙動について、詳細に検討を行った。

解析対象である試験片の形状・寸法および解析に用いた要素分割を図 6 に示す。節点数は、173,978、要素数は 168,168 である。材料は SUS316L を解析対象とした。図 7(a)には、ABAQUS を用いてショット 1 個を試験片に衝突させた際に発生する残留応力分布を示す。また、図 7(b)には、(a)と等価な荷重モデルを作成した上で、理想化陽解法 FEM を用いて、その荷重分布を試験片に負荷した際に発生する残留応力分布を解析した結果を示す。これらの分布を基に、図 6 の A-A' 部を横軸にとり、接触解析により得られた残留応力分布と等価荷重分布モデルにより得られた残留

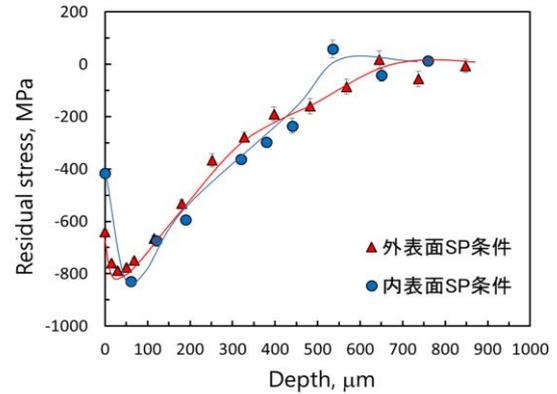


図 5 SP 施工面の残留応力深さ分布

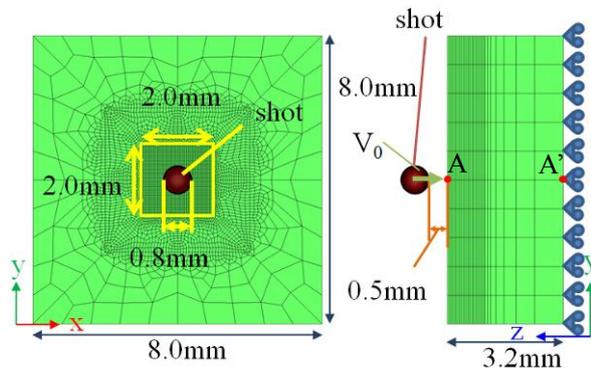


図 6 解析モデルの形状と寸法

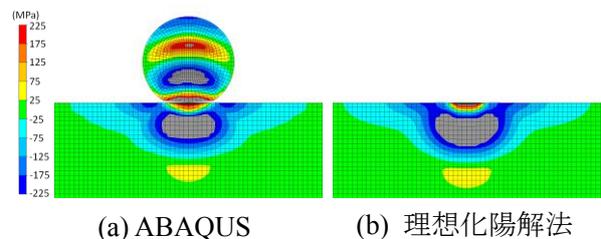


図 7 ショット衝突時の応力 σ_y 分布

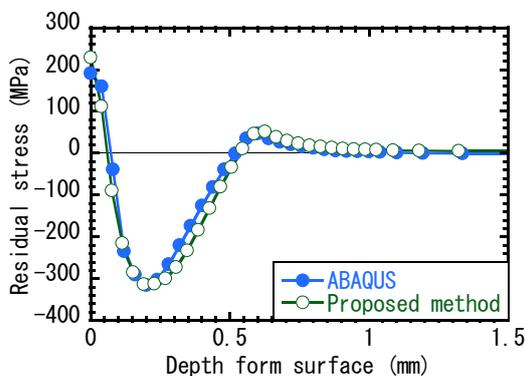


図 8 A-A' 線上の残留応力 σ_y 分布の比較

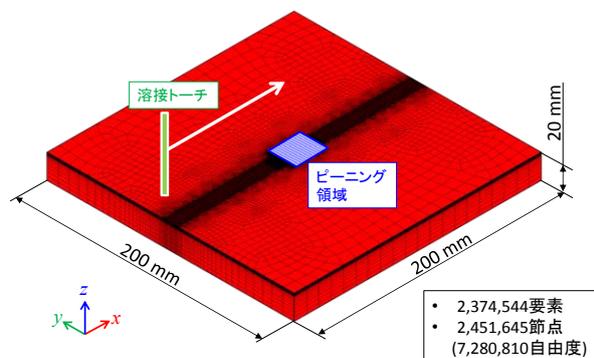


図 9 ショットピーニング解析モデル

応力分布を比較した図が図8である。同図より、両解析モデルにより得られた残留応力分布が良好に一致している点を確認できる。このことより、両者は等価であると言える。また、本解析に要した計算時間は、ABAQUS上で接触モデルを使用した動的陽解法FEMにおいて4時間程度であり、等価荷重モデルを使用した理想化陽解法FEMの解析時間は数分程度であった。

等価荷重モデルを用いて、溶接に伴う残留応力のショットピーニングによる変化挙動の解析を実施した。解析モデルを図9に示す。本解析では、ショットピーニングに先立ち、溶接の残留応力解析を理想化陽解法FEMを用いて求め、その後、等価荷重モデルを用いたショットピーニングの解析を実施している。解析結果を図10に示す。図10(a)および(b)は、それぞれカバレッジ(ショット照射面積に対する衝突痕面積の比)が1.0および2.0の場合における残留応力 σ_y の分布を示す。カバレッジが1.0の場合には、引張り応力およびゼロに近い応力が広範囲に亘り分布しているが、カバレッジが2.0になると、ショットピーニングを施工したほぼ全領域において圧縮の応力が発生していることが確認できる。図10中の衝突領域の中心点における残留応力 σ_y の深さ方向分布についてカバレッジ毎に整理したものが図11である。同図より、カバレッジ2.0ではカバレッジ1.0に比べて表面部に大きな圧縮の残留応力が付加されていることが確認できる。しかしながら、深さが0.5mmを超えるとカバレッジ1.0と2.0の応力分布に大きな差が生じていないことが分かる。なお、本解析に要した計算時間はおよそ1日程度であった。

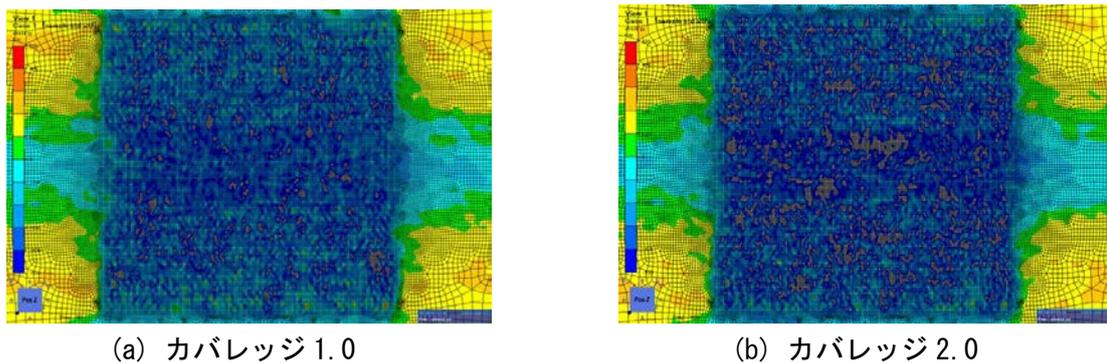


図10 ショットピーニング後の残留応力 σ_y 分布

以上で示す様に、本解析ではショットピーニング施工時の応力変化挙動を解析することを目的として、理想化陽解法FEMを用いたショットピーニング解析システムを提案した。本手法を用いて、多量のショットを対象とした解析を実施することにより、これまで非常に困難であった多量のショットを対象としたショットピーニングの解析が可能であることが確認できた。

3. 今後の展望

今後、模擬溶接試験体の実機模擬環境下(高温および荷重)における中性子残留応力測定を進める。合わせて、FEM解析におけるショット粒などの材料定数の適正化や残留応力実測データを用いた妥当性検証などを実施していく予定である。

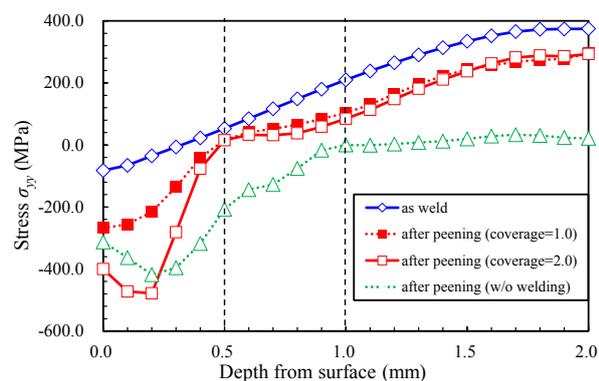


図11 衝突領域中心の深さ方向応力 σ_y 分布