

ショットピーニング時の残留応力緩和挙動に関する検討

Study of behavior to relieve residual stress at the time of the shot peening

大阪府立大学大学院	木谷 悠二	Yuji KITANI	Member
大阪府立大学大学院	柴原 正和	Masakazu SHIBAHARA	Non Member
大阪府立大学大学院	生島 一樹	Kazuki IKUSHIMA	Non Member
大阪府立大学大学院	山田 祐介	Yusuke YAMADA	Member
発電技術検査協会	西川 聡	Satoru NISHIKAWA	Member
発電技術検査協会	古川 敬	Takashi FURUKAWA	Member
日本原子力研究開発機構	秋田 貢一	Koichi AKITA	Non Member
日本原子力研究開発機構	鈴木 裕士	Hiroshi SUZUKI	Member
日本原子力研究開発機構	諸岡 聡	Satoshi MOROOKA	Non Member

In nuclear power plants, surface treatment including the shot peening is carried out after welding for the prevention of stress corrosion cracking. In this research, the authors developed evaluation systems of the persistence of compressive residual stresses due to shot peening based on the Idealized Explicit FEM which can conduct large-scale non-linear structure analyses in realistic computing time. The developed evaluation system was applied to the analysis of the compressive residual stress due to shot peening in the multipass welded pipe joint. The predicted residual stress distribution after shot peening was compared with the experimental measurement by the X-ray diffraction(XRD). As a result, It was found that the measured result by XRD agree well with the predicted residual stresses. In addition, assuming a large axial compression load due to earthquake, the elastic-plastic analysis was carried out to investigate the influence of the axial load on the compressive residual stress introduced by shot peening. From these investigation, it was shown that the persistence of the compressive residual stress introduced by shot peening can be evaluated using the proposed analysis system.

Keywords: Shot peening, FEM, non-linear analysis, Residual stress, multilayered welding

1. 緒言

構造物はその運用に伴い経年劣化が進行し、応力腐食割れ(SCC)や疲労亀裂等の損傷に至る場合がある。SCCは原子力発電プラントの炉容器等の重要機器で検出されており、SCCが検出された場合補修が行われ、補修後はSCCの再発生を防止するため、応力改善工法の一つであるレーザー[1]やショット[2]、などを用いたピーニング法により表面に圧縮残留応力を付与している。しかし、ピーニングにより付与された圧縮残留応力は長期間の使用に伴い、緩和が生じる恐れがある。ピーニングによる圧縮残留応力の緩和が生じる要因として、運用時に荷重が

繰り返し作用することが挙げられる。そのため、改質された残留応力分布の運用中の変化について検討することが重要であると考えられるが、改質後の残留応力分布の運用時の変化について議論する際、試験による評価では多大な時間及びコストがかかる。そのため数値解析による評価が憂苦であるといえるが、その場合ピーニングにより改質された溶接継手の残留応力分布を求める必要があり、無数の衝撃荷重が作用する現象のモデル化を行う必要があると考えられる[3]。

溶接時の残留応力を高精度かつ実用的な計算時間で予測することができる手法として、著者らは理想化陽解法FEM[4]を提案している。同手法は動的陽解法FEM[5]を基にした解析手法であり、静的平衡状態への収束を考慮することで、高速かつ高精度な解析を実現している。そこで、本研究ではショットピーニング時の応力変化の運用時における効果について検討するために、理想化陽解法

連絡先:木谷悠二
大阪府立大学大学院
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号
E-mail: y_kitani@marine.osakafu-u.ac.jp

を用いたショットピーニングによる残留応力分布の改質効果、および長期間稼働後の圧縮残留応力の持続性を評価できる手法を構築する。

2. ショットピーニング時の圧縮応力持続性評価システム

ショットピーニングにおいては、1mm以下の小さなショットを多量に衝突させることで対象表面に圧縮応力を導入する。こうした工程において発生する応力分布を予測するためには、きわめて高い空間および時間解像度を有する動的弾塑性解析が必要となる。そこで大規模解析が可能な理想化陽解法に対し、動的効果を考慮するための拡張を行ったのち、ショット衝突時の荷重を考慮することで、ショットピーニング時の力学挙動を解析可能なシステムを構築した。本システムにおいては、ショット衝突中の荷重分布の履歴を等価荷重モデルとして次式のようにモデル化している。

$$P(\rho, \tau) = f(\rho, \tau) \cdot g(\tau) \quad (1)$$

ここで $P(\rho, \tau)$ 、 $f(\rho, \tau)$ 、 $g(\tau)$ をそれぞれ、荷重分布履歴関数、荷重分布の形状を定義する荷重分布関数、荷重の大

さを表す荷重履歴関数と定義する。また、 ρ 、 τ はそれぞれ、衝突点からの正規化距離、正規化衝突時間である。本荷重モデルにおいて、荷重分布関数 f 、荷重履歴関数 g を適切に設定することで、ショット衝突中の荷重をモデル化できる。本解析においては、事前に単一のショットの衝突解析を実施し、これを参考に f 、 g を決定した。また、本研究では、ショットピーニング後の残留応力分布に対して荷重を負荷した弾塑性解析を実施し、ピーニングにより導入される圧縮応力の持続性について検討する。本研究で構築したショットピーニングによる圧縮残留応力の持続性を評価するための解析の流れを Fig. 1 に示すように、本解析ではまず溶接残留応力を熱弾塑性解析により求め、続いて、ショットピーニングによる圧縮応力の導入を前述の解析システムを用いて解析する。そして、最後に弾塑性解析により荷重が作用した際のショットピーニング後の応力分布を解析するという一連の非線形解析を実施する。

3. 同材継手模擬試験体の外面ショットピーニング時の応力分布の予測

3.1 解析モデルおよび解析条件

等価荷重モデルを用いて実機模擬試験体に生じる残留応力分布の改質について検討する。解析モデルを Fig. 2 に示す。節点数、要素数はそれぞれ、3,494,600、3,004,664 である。解析の手順として、溶接により生じる残留応力を理想化陽解法による熱弾塑性解析手法を用いて求める。続いて、機械加工により除去される部分に相当する領域の要素を無効化し、これに伴う応力の再配分を再現する。そして、提案システムを用いてピーニングの解析を実施し、ピーニングによる残留応力分布の改質の効果の検討を行う。その後地震動による過大荷重想定した 1.0%の軸

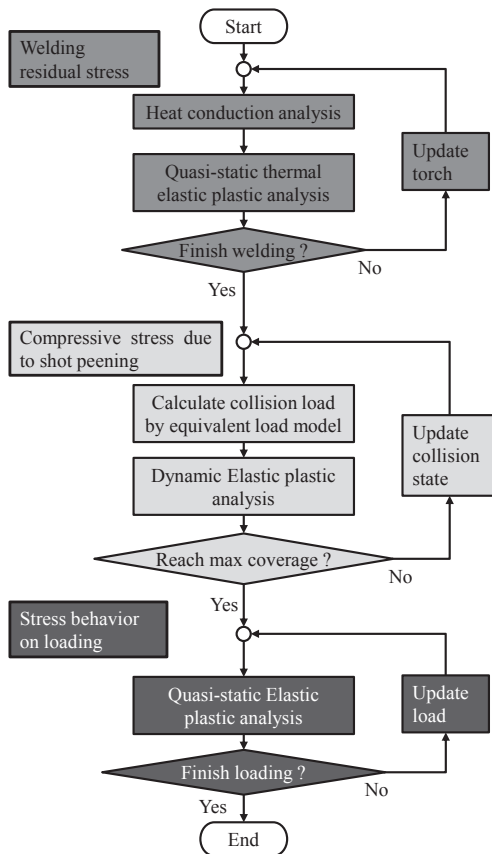


Fig. 1 Flow of analysis

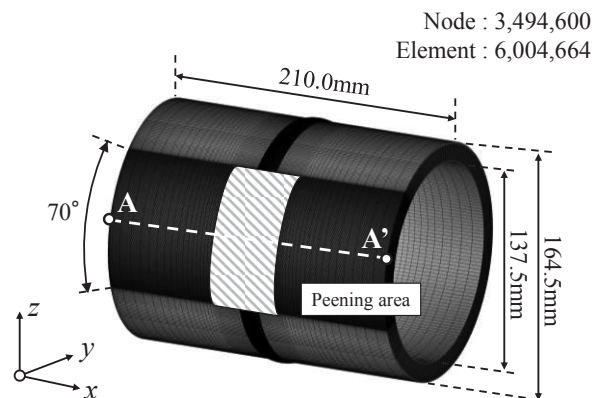


Fig. 2 Analysis model

方向の圧縮荷重サイクルを負荷した際の残留応力分布の変化について検討する。荷重は3サイクル負荷するものとした。

溶接残留応力の解析において使用した材料定数の温度依存性データを Fig. 3 および Fig. 4 に示す。また、溶接の層数は10であり、1層1パスで溶接した。溶接条件は、電流が180A、電圧が10V、溶接速度が10cm/min、熱効率が0.8で、全パス同一の条件とした。ショットピーニングは円管の外面に施すものとし、ピーニングを施す領域は溶接線から幅方向に50mm、周方向に溶接開始位置から145°から215°までの70°の区間と設定した。解析においては、次式で定義されるピーニングによる衝突荷重が与えられた面積の総和のピーニング対象領域の面積に対する比(以降、衝突面積率 R_c と定義)が十分に大きくなると考えられる $R_c=50.0$ まで解析を行うものとした。

$$R_c = \frac{A \cdot N_p}{S} \quad (2)$$

ここで、 A 、 N_p 、 S はそれぞれ、一度の衝突で荷重を加える面積、衝突回数、衝突対象領域の面積である。

3.2 ショットピーニング後の残留応力分布

Fig. 5 に Fig. 2 の A-A 線に沿った残留応力分布を示す。A-A 線は溶接開始位置から180°の断面における円筒外面上に位置している。また、Fig. 5 において、四角形および

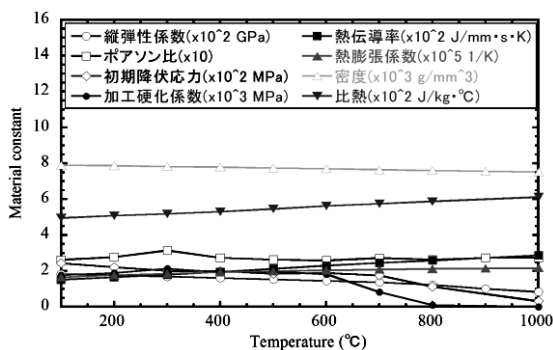


Fig. 3 Material constant of SUS316L

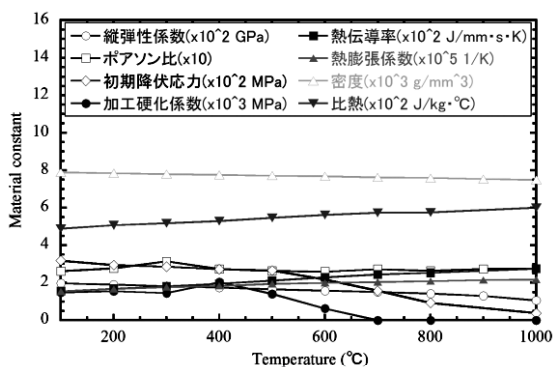


Fig. 4 Material constant of Y316L

三角形はそれぞれ XRD で計測された残留応力分布の管軸方向成分 σ_z と周方向成分 σ_θ であり、赤線および青線はそれぞれ理想化陽解法 FEM による残留応力分布の管軸方向成分 σ_z と周方向成分 σ_θ である。Fig. 5 より、管軸方向成分に関しては、溶接線から40mmの付近で差がみられるものの、その他の領域に関しては、解析結果は実験計測結果の傾向を良く再現できていると言える。また、周方向成分に関しては、解析により得られた残留応力分布は XRD による計測結果を非常に良く再現できている。以上より、本解析の妥当性を示すことができたと言える。

3.3 ショットピーニングによる負荷圧縮応力の持続性に関する検討

Fig. 6 に、溶接開始位置から180°の断面における管軸方向の残留応力分布を示す。同図(a)は1%圧縮ひずみが負荷された状態での応力分布を示し、(b)は1サイクルのひずみを負荷した後、除荷された状態での応力分布である。同様に(c)、(d)はそれぞれ2、3サイクルのひずみを負荷した後、除荷された状態での応力分布である。また、変形倍率は20倍としている。Fig. 6(a) より、最大圧縮荷重状態において外面側では高い圧縮の応力が生じることがわかる。また、SP施工部ではピーニングにより圧縮塑性が進み、それに伴い母材部と比べ、降伏応力が高くなっていると考えられる。この結果、圧縮のひずみを付与した際の SP 施工部の周方向への変形は少なくなると考えられる。これにより、溶接金属部と母材部は、径方向の膨張量に差が出るため Fig. 6(a) に示すような内に凸の曲げ変形が生じると考えられる。また Fig. 6(b) より、1サイクル負荷後においては、ピーニングを行ったパイプ外面においても引張りの応力が生じていることが確認できる。Fig. 7 にパイプ外面側における管軸方向の残留応力分布を示す。同図からも、圧縮のひずみサイクルの負荷に

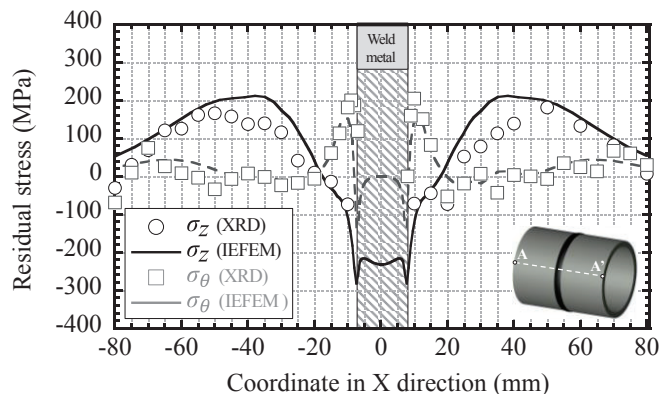


Fig. 5 Distribution of residual stress

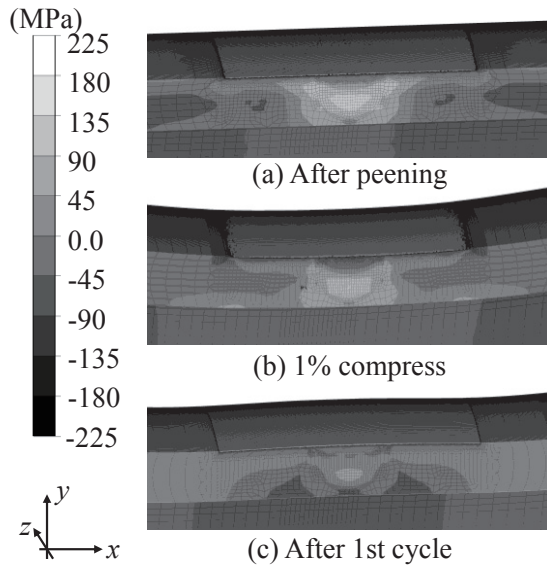


Fig. 6 Distribution of residual stress σ_x on compressive load cycles

に伴い、ピーニング部の圧縮残留応力が小さくなり、3 サイクル目においては、溶金部以外で引張りの残留応力となる傾向を確認することができる。

以上のように、本検討において、圧縮のひずみサイクルを加えた場合は、ピーニング部の残留応力の低減効果が小さくなる結果が得られた。このように、過大なひずみがピーニング部に作用した場合はピーニングによる圧縮残留応力の効果が小さくなる場合があることを数値的に確認した。

4. 結言

本研究では、ショットピーニング時の応力変化の運用時における効果について検討するために、ショットピーニングによる残留応力分布の改質効果、および圧縮残留応力の持続性を評価できる手法を構築した。構築した解析システムを実機模擬試験体のショットピーニングによる残留応力改質効果の予測、および過大荷重想定した軸方向の圧縮荷重サイクルを负荷した際の残留応力分布の変化に対して適用した。その結果以下の知見を得た。

- 1) 多層溶接時の残留応力の予測に対して提案手法を適用し本手法による計測結果と XRD による計測結果を比較した結果、両者が良好に一致することを確認した。
- 2) ショットピーニングによる残留応力低減効果の持続性について数値解析により検討した結果、今回対象とした同材円管多層溶接継手においては、1%圧縮ひずみサイクルを负荷した場合、ピーニングによる残留応力低減効果に影響を及ぼす可能性があることを確認した。

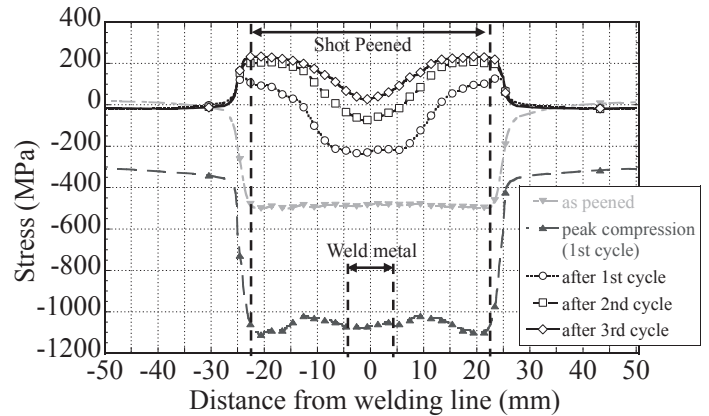


Fig. 7 Compression of stress in axial direction along line A-A' on compressive load cycle

謝辞

本研究は、「文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「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」の成果である。

参考文献

- [1] S. Bagherifard, R. Ghelichi and M. Guagliano: On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developments, *Applied Surface Science*, Vol.259 (2012), pp.186-194.
- [2] Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki and M. Obata: Residual stress improvement in metal surface by underwater laser irradiation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol.121 (1997), pp.432-436.
- [3] M. Klemen, V. Schulze, I. Rohr and D. Lohe: Application of the FEM for the prediction of the surface layer characteristics after shot peening, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209 (2009), pp.4093-4102.
- [4] K. Ikushima and M. Shibahara: Prediction of residual stresses in multi-pass welded joint using Idealized Explicit FEM accelerated by a GPU, *Computational Materials Science*, Vol.93 (2014), pp.62-67.
- [5] A. Maekawa, A. Kawahara, H. Serizawa and H. Murakawa: Fast three-dimensional multipass welding simulation using an iterative substructure method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.215 (2015), pp.30-41.