

応力改善工法で付与した圧縮残留応力の持続性評価－理想化陽解法 FEM を用いたショットピーニング解析手法の開発 (第 1 報)

Evaluation of the sustainability of compressive residual stress by introduced a stress improvement method (the first report)
-Development of analysis method of the shot peening using idealized explicit FEM

大阪府立大学大学院	山田 祐介	Yusuke YAMADA	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	木谷 悠二	Yuji KITANI	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	Non 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

When the steel structure is built such as nuclear power plant, residual stress occurs in or near the welding joint and it may cause the stress corrosion cracking(SCC). Therefore, as prediction of SCC, surface treatment such as the shot peening(following SP) is carried out in the weld, but the case analyzed about residual stress reforming by the SP does not exist. So, we developed the analysis method that can predict compressive residual stress relaxation behavior during shot peening by modelling dynamics behavior at the time of the shot peening based on idealized explicit FEM which is large-scale non-linear structure analysis method. As a result of having compared the indentation from experiment with the indentation of by the developed method, I confirmed that I agreed well. In addition, I confirmed relaxation of the compressive residual stress by the shot peening by applying development method for bead on plate welding.

Keywords: Shot peening, FEM, Elastic plastic analysis, Residual stress

1. 緒言

日本において原子力発電は重要なベースロード電源であり、安全確保のために必要な技術を早急に構築することが求められている。全ての構造物は使用開始に伴い経年劣化が進行し、応力腐食割れ (SCC) や疲労割れ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]、ウォータージェット[3]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。

これらの手法は、対象の部材表面に衝撃的な荷重を加えることで圧縮の残留応力を導入し、応力状態を改質するものである。ピーニングの効果については、実験的、解析的な検討が数多くなされている。しかしながら、疲労き裂[4]や SCC の防止を考える場合、ピーニングにより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。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。そこで数値解析による評価が考えられるが、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[4,5,6,7,8]。ショットピーニングによる応力状態の予測に関する検討例として、数十回程

連絡先:山田祐介
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_yamada@marine.osakafu-u.ac.jp

度の衝撃荷重を考慮した解析事例[9]や、DEM と FEM を組み合わせてショット衝突時の荷重分布をモデル化した解析を行った事例[10]は存在するものの、無数のショットの衝突を考慮した事例は少ない。また、溶接時の残留応力までを考慮した事例は著者らの知る限り存在しない。これはピーニングが非常に微細な現象であるため解析規模が増大するためであり、さらに、溶接残留応力の改質効果について議論するためには、溶接時に生じる残留応力についても考慮する必要があり、解析の実施が一層困難になることが想定される。

一方、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[11,12,13]を提案している。同手法は動的陽解法 FEM[14,15]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。加えて、本手法は動的陽解法 FEM を基にしていることから、並列化に対する適用性が非常に高く、画像処理装置(GPU)を用いた並列化を導入することで、従来手法と比べて大幅に高速な解析が可能であることが報告されている。

そこで、本研究ではピーニング時の応力分布変化の運用時における効果について検討するために、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。本報では、解析手法を構築するために、理想化陽解法 FEM に対して衝撃荷重の付与に伴う動的効果を考慮するための拡張を行う。また、ショットの衝突によるピーニング時の衝撃的な荷重をモデル化した等価荷重モデルを作成し、理想化陽解法 FEM に統合することで、ピーニングによる残留応力分布の改質を予測できる手法を構築する。構築した手法をビードオンプレートを模擬したモデルのショットピーニングによる残留応力分布の改質に対して適用することで、ショットの衝突量と残留応力分布の変化について議論する。

2. ショットピーニング時の力学挙動解析システム

2.1 動的効果を考慮した理想化陽解法 FEM

理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM を基に、溶接時の準静的な弾塑性挙動を高速に解析するために開発された手法であり、慣性力の影響は考慮されていない。一方、ピーニング時においては、対象に対して衝撃的な荷重が

作用することから、動的効果は少なからずあるものと考えられる。そこで、本研究では、理想化陽解法 FEM に対して動的効果を考慮するための拡張を行う。

動的効果を有する問題の非線形有限要素解析においては、式(1)で表される運動方程式が基礎式として用いられる。

$$[M]\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} + \{Q\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ はそれぞれ、質量マトリックス、減衰マトリックスであり、 $\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{\dot{U}\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{Q\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{F\}_{t+\Delta t}$ はそれぞれ、時刻 $t + \Delta t$ における加速度ベクトル、速度ベクトル、内力ベクトル、荷重ベクトルを表す。

通常の陰解法の場合、式(1)に対して Newmark の β 法を適用し、内力ベクトルの線形化を行うことで得られる次式を用いて Newton-Raphson 法の反復計算を行う。

$$[K_{eff}]^{(k)} \{\Delta U\} = {}^{(k)}\{F_{eff}\} \quad (2)$$

$$[K_{eff}]^{(k)} = \left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + [K] \right) \quad (3)$$

$${}^{(k)}\{F_{eff}\} = \{F\}_{t+\Delta t} - [M]{}^{(k-1)}\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} - [C]{}^{(k-1)}\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} - {}^{(k-1)}\{Q\}_{t+\Delta t} \quad (4)$$

$$\{U\}_{t+\Delta t} = \{U\}_t + \{\Delta U\} \quad (5)$$

$$\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \{\Delta U\} + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \{\dot{U}\}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} \quad (6)$$

$$\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \{\Delta U\} - \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{U}\}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \{\ddot{U}\}_t \quad (7)$$

ここで、 $[K_{eff}]$ 、 $[F_{eff}]$ はそれぞれ有効剛性マトリックス、有効荷重ベクトルを表す。また、各変数の左肩の (k) は反復回数を表す。

理想化陽解法の手順を適用するため、式(2)に対して新たに仮想的な時刻 τ における慣性項、減衰項を加えた次式を考える。

$$[M_{dum}]\{\ddot{U}_{dum}\}_{\tau} + [C_{dum}]\{\dot{U}_{dum}\}_{\tau} + [K_{eff}]\{U_{dum}\}_{\tau} = \{F_{eff}\} \quad (8)$$

ここで、 $[M_{dum}]$ 、 $[C_{dum}]$ はそれぞれ、仮想的な質量マトリックスおよび減衰マトリックスであり、 $\{\ddot{U}_{dum}\}_{\tau}$ 、 $\{\dot{U}_{dum}\}_{\tau}$ 、 $\{U_{dum}\}_{\tau}$ はそれぞれ、仮想的な時刻 τ における加速度ベクトル、速度ベクトルおよび変位ベクトルである。

式(8)に対して、動的陽解法と同様に中心差分を適用し次式を得る。

$$\left(\frac{1}{\Delta \tau^2} [M_{dum}] + \frac{1}{2\Delta \tau} [C_{dum}] \right) \{U_{dum}\}_{\tau+\Delta \tau} = \{F_{eff}\}_{\tau} + [M_{dum}] \left(\frac{2}{\Delta \tau^2} \{U_{dum}\}_{\tau} - \frac{1}{\Delta \tau^2} \{U_{dum}\}_{\tau-\Delta \tau} \right) + \frac{1}{2\Delta \tau} [C_{dum}] \{U_{dum}\}_{\tau-\Delta \tau} - [K_{eff}] \{U_{dum}\}_{\tau} \quad (9)$$

式(9)を用いて、仮想的な慣性項、および減衰項の影響が無視できる程度に小さくなるまで仮想的な時間ステップを進め、その時点の $\{U_{dam}\}$ を $\{\Delta U\}$ に代入することで、式(2)を用いて収束計算を行ったものと同等の解が得られる。また、式(9)を用いて収束が得られるまで仮想的な時間ステップを進める計算を行う際に、仮想的な質量マトリックス $[M_{dam}]$ および仮想的な減衰マトリックス $[C_{dam}]$ に通常の物理的に導出されるものを用いた場合、仮想的な時間増分にきわめて小さい値を用いる必要があり、収束に要する計算回数が増大することが予想される。ここで、式(9)を用いた収束計算は収束解である $\{U_{dam}\}$ を得るための仮想的なものであることから、収束性を高めるために、文献[13]と同様に、1次元の振動問題における臨界減衰の考え方を基に、 $[M_{dam}]$ と $[C_{dam}]$ を決定する。以上の定式化を用いることで、理想化陽解法の手順に基づき、動的解析を行うことができる。

2.2 等価荷重モデル

ショットピーニング時の荷重はごく短時間にごく小さい領域に集中して作用する。本研究では、この荷重分布の履歴をモデル化し、荷重ベクトルとして与えることで、ショットピーニングによる残留応力分布の変化を解析する。

本研究では Fig. 1 のようなショット衝突時の現象を仮定する。同図(a)で、最初にショットが初速 v_1 で衝突し、反力が生じ始める。その後、弾性変形が進行し反力が大きくなる(Fig. 1 (b))。衝突が進行し、衝突の中心が降伏応力に達した時点で、衝突の中心から塑性変形が始まる(c)。塑性変形が始まると、その開始点である衝突の中心から

荷重の増加が緩やかとなり、塑性変形が進行すると、衝突の中心より周囲の反力が大きくなる(d)。そして、ある段階で塑性変形が終了し(e)、その後、ショットが速度 v_2 で跳ね返ることで衝突が終了する(f)。この衝突時の荷重分布の履歴を次式で示す衝突時の荷重の分布形状を決定する関数 f と荷重の総量の履歴を決定する関数 g の積でモデル化する。

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

ここで $P(\rho, \tau)$ 、 $f(\rho, \tau)$ 、 $g(\tau)$ 、をそれぞれ、荷重分布履歴関数、荷重分布関数、荷重履歴関数と定義する。また、 ρ 、 τ はそれぞれ、次式で定義する衝突点からの正規化距離、正規化衝突時間である。

$$\rho = \frac{r}{r_0}, \tau = \frac{t}{t_0} \quad (2)$$

ここで r 、 r_0 はそれぞれ衝突点からの距離、ショットの半径であり、 t 、 t_0 はそれぞれショットの衝突開始からの時刻、ショットの衝突期間である。

荷重分布関数の一例として、Fig. 1 で模式的に示した荷重分布の傾向を再現するため、式(3)および式(5)の6次の多項式で定義する。式(2)の荷重分布関数に次式で表される係数を採用した場合、荷重分布関数は Fig. 2 のように定義され、Fig. 1 で仮定したショット衝突時の荷重分布の傾向を再現できる。

$$f(\rho, \tau) = \frac{a(\rho, \tau)}{\int_0^1 a(\rho, \tau) 2\pi\rho d\rho} \quad (3)$$

$$a(\rho, \tau) = a_6(\rho, \tau)\rho^6 + a_4(\rho, \tau)\rho^4 + a_2(\rho, \tau)\rho^2 + a_0 \quad (4)$$

$$a_0 = 0.655, a_2 = 4$$

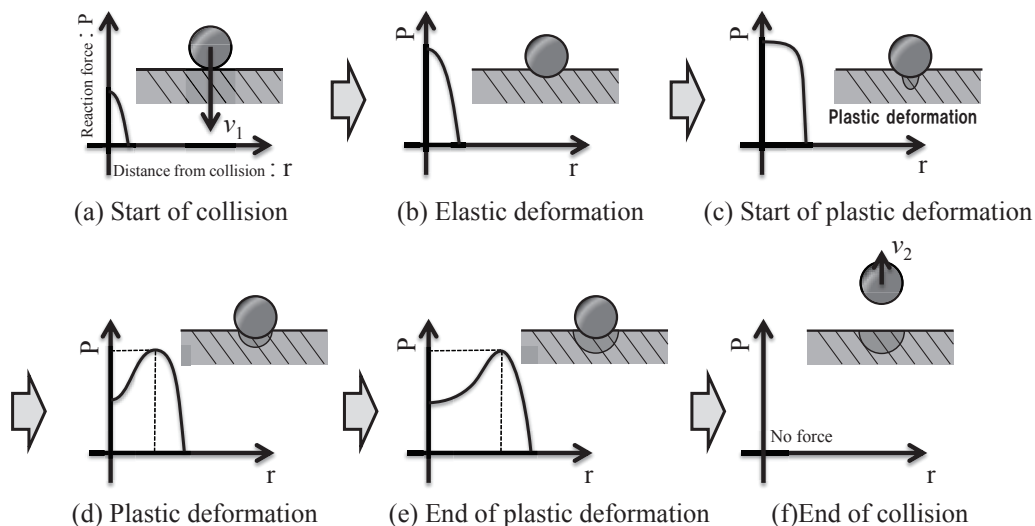


Fig.1 Schematic illustration of reactive force for each stage of shot collision

$$a_4 = 10000 \left(\frac{1}{1 + \exp(-5(\tau + 0.75))} - 1 \right) \quad (5)$$

$$a_6 = 10$$

また、荷重履歴関数として、式(6)、(7)のような関数形を仮定すると、その履歴は Fig. 3 に示すようになる。式(6)の荷重履歴関数の係数 b は、衝突前後のショットの運動量の差 $m(v_2 - v_1)$ 、すなわち、ショットの衝突が対象に与える力積を用いて定義する。

$$g(\tau) = b \sin\left(\frac{\tau^7 + 2\tau}{3} \pi\right) \quad (6)$$

$$b = \frac{a(\rho, \tau)}{t_0 \int_0^1 \sin\left(\frac{\tau^7 + 2\tau}{3} \pi\right) d\tau} \quad (7)$$

以降、上述の荷重分布履歴の関数を等価荷重モデルと定義する。

ショットピーニングにおいては、無数のショットが対象に対して吹き付けられることから、時間的、空間的にランダムな無数の回数作用する荷重分布を想定する必要がある。そこで、本研究では、時間的、空間的にランダムに荷重分布を作用させる解析システムを作成した。本システムではランダムなタイミングでランダムな節点を選択し、その節点を衝突の中心として等価荷重モデルを使用し弾塑性解析のための荷重ベクトルを算出し、動的弾塑性解析を実施する。弾塑性解析においては、GPU 並列

化を考慮した理想化陽解法を使用する[10]。以上の手順を指定された時刻に達するまで繰り返すことでショットピーニングによる応力の変化を解析する。

3. 力学モデルの検証

3.1 解析システム

等価荷重モデルの妥当性を示すために、Fig. 4 に示す単一のショットが衝突する問題の解析を汎用非線形有限要素解析ソフトウェアである ABAQUS を用いて実施し、その結果を等価荷重モデルを用いた解析の結果と比較する。本解析モデルの総節点数は 204,015、総要素数は 196,824 で六面体要素を使用した。衝突点を中心とした 20 mm の正方形の領域に関しては、一辺が 0.04 mm の立方体で要素分割を行った。ABAQUS を用いた解析において、Penalty 法に基づく接触モデルを使用し、解析手法として動的陽解法を用いた。等価荷重モデルを用いた解析において、式(1)から(7)に示す関数を用い、衝突後のショットの速度および衝突期間は、それぞれ ABAQUS の解析結果より、-10.5 m/s、2.0 μ s とした。Fig. 4 の解析モデルにおいて、ショットの材料に SUS304 を仮定し、衝突対象の材料として SUS316 を仮定した。SUS304 と SUS316 の材料定数は Table 1 に示す通りとした。また、ショットの初速は 60 m/s と仮定した[14]。

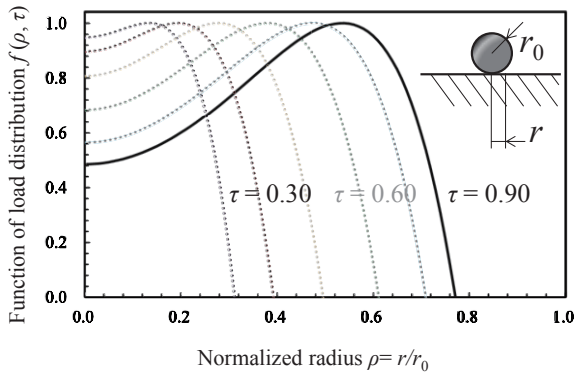


Fig.2 Function of load distribution

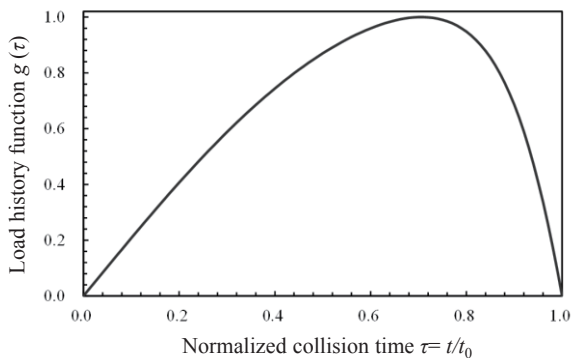


Fig.3 Load history function

Table 1 Material constant of SUS304 and SUS316L

Material constant	Shot (SUS304)	Plate (SUS316L)
Density (kg/m ³)	7.90 × 10 ³	7.92 × 10 ³
Young's modulus (GPa)	198.5	194.7
Poisson's ratio	0.294	0.285
Initial yield stress (MPa)	288.0	231.0
Work hardening (MPa)	1474.0	2427.0

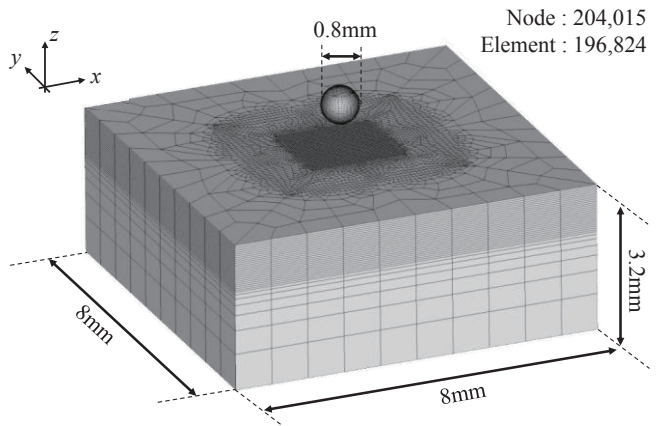


Fig.4 Analysis model

3.2 解析結果

Fig. 5 に x 方向応力 σ_x の分布を示す。Fig. 5(a)、(b) はそれぞれ、衝突から $1.0 \mu\text{s}$ における、ABAQUS および等価荷重モデルを用いた理想化陽解法 FEM による応力分布を示す。Fig. 6 より、衝突に伴い、衝突点内部に大きい圧縮の応力を生じ、衝突点では引張の応力が生じていることが分かる。また、Fig. 7 に同図中に示す表面の A-A 線に沿った応力の x 方向成分 σ_x の分布を示す。同様に、Fig. 8 に板厚方向に向かう B-B 線に沿った応力の分布を示す。Fig. 7 および Fig. 8 において、三角は等価力学モデルを用いた理想化陽解法の応力分布を示し、四角は接触モデルを用いた ABAQUS の応力分布を示す。Fig. 7 および 8 より、提案した等価荷重モデルは、接触を考慮した解析により得られた応力分布を定性的、定量的に再現できていることが確認できる。

3.3 実験との比較

提案手法によるショット一球の衝突後の衝突痕と実験結果の比較を行う。解析条件に 3.1 節に示すものと同様のものを用いた。Fig. 8 に解析によるショット 1 発の打痕を示す。打痕の直径は $320 \mu\text{m}$ であった。Table 2 にショット四個の衝突痕の大きさを示す。縦方向の平均が $293 \mu\text{m}$ 、

横方向の平均が $316 \mu\text{m}$ であった。以上のことから単一ショット衝突時の打痕に関して、実験と解析の打痕の大きさが解析と良好に一致することを確認した。

Table 2 Size of shot mark from experiment

	Vertical dimension (μm)	Lateral dimension (μm)
Shot mark No.1	273	293
Shot mark No.2	271	345
Shot mark No.3	624	330
Shot mark No.4	305	297
Average	293	316

4. アルメンストリップ

4.1 解析モデルおよび条件

開発したショットピーニング時の残留応力分布予測システムにおける衝突面積率とカバレッジの関係性について整理するために、アルメンストリップ片のアーク高さを解析と実験で比較する。Fig. 8 に解析モデルを示す。本モデルは長さ 76.0mm 、幅 19.0mm 、厚さ 2.6mm で、 0.2mm で要素分割を行った。材質は SUS316L を仮定し、

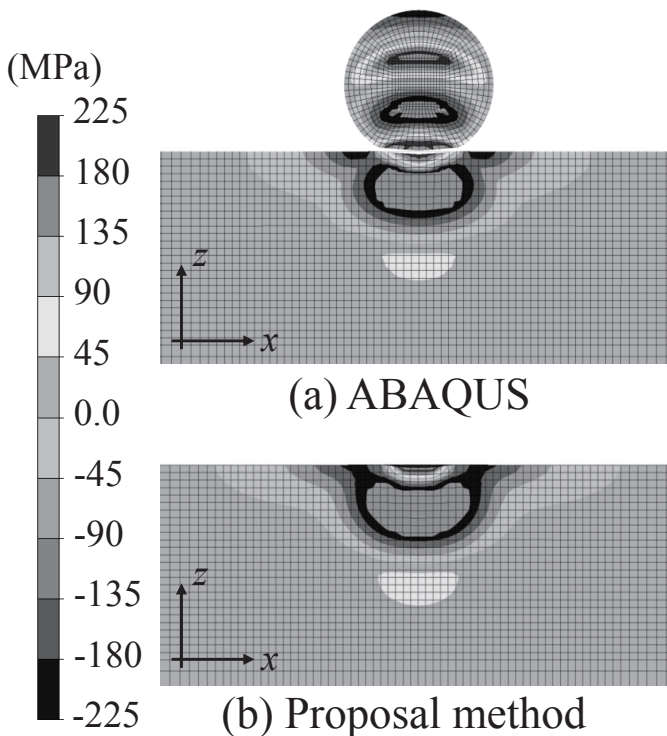


Fig.5 Distribution of residual stress σ_y

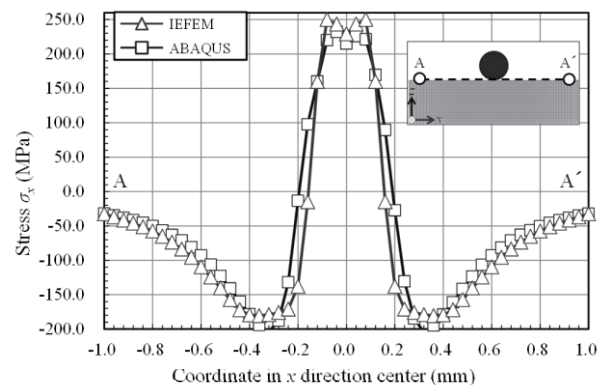


Fig.6 Distribution of residual stress σ_x at the surface

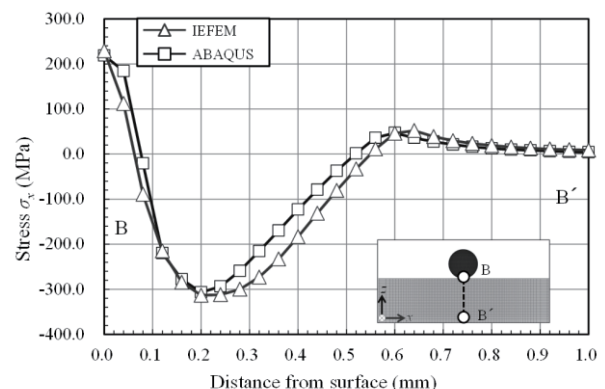


Fig.7 Distribution of residual stress σ_x in depth direction

ヤング率を 190.4GPa、ポアソン比を 0.256 初期降伏応力を 297.0MPa、加工硬化係数を 1807.0MPa、密度を 7940.0kg/m³ とした。また、ショットの投射条件は3章で用いたものと同じとし、解析では衝突面積率 R_c が 900 に達するまでショットを投射するものとした。

アークハイトは Fig. 9 に示す A、B、C、D 点がなす平面と O 点の距離より算出するものとした。

4.2 解析結果

Fig. 10 に衝突面積率 $R_c=10, 25, 50, 90, 150, 300, 600, 900$ における面外方向の変位分布を示す。同図より、衝突面積率が大きくなるとともに面外方向の変位が大きくなっていくことが確認できる。これは、ショットの衝撃力が表面に付与されると、表面に法線方向の強い圧縮力が作用し、法線方向、すなわち板厚方向に圧縮の塑性変形が発生するとともに、塑性変形の非圧縮性により、

面内方向にも引張りの塑性変形が発生することから、中立軸より上側に引張りの塑性変形が発生するため、全体としては面外上方方向に凸形状の変形が発生するためであると考えられる。

Fig. 11 にアークハイトの解析結果を示す。同図より、衝突面積率が小さい段階では、アークハイトの増加量が大きい、衝突面積率が大きくなるに従いアークハイトの増加量が小さくなっていることが分かる。これは、本解析では加工硬化を考慮しているため、衝突面積率が小さいとき、すなわち、ショットの投射量が少ない状態では、塑性変形量が小さいため加工硬化の影響が小さく、降伏応力も小さいため塑性変形が起きやすいが、衝突面積率が大きくなるに従い、表面の塑性変形が大きくなるため加工硬化の影響が大きくなり降伏応力が大きくなるため、塑性変形の発生量が小さくなるためであると考えられる。

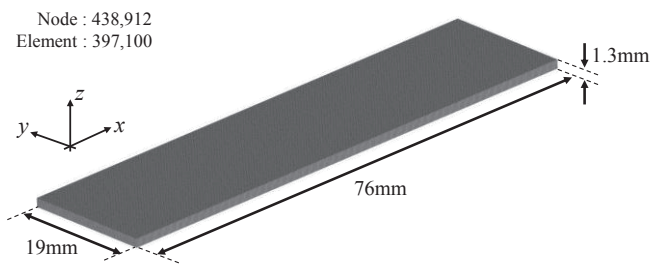


Fig.8 Analysis model

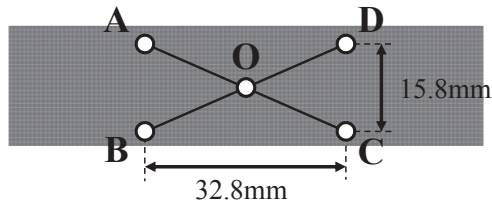


Fig.9 Measurement position of arc height

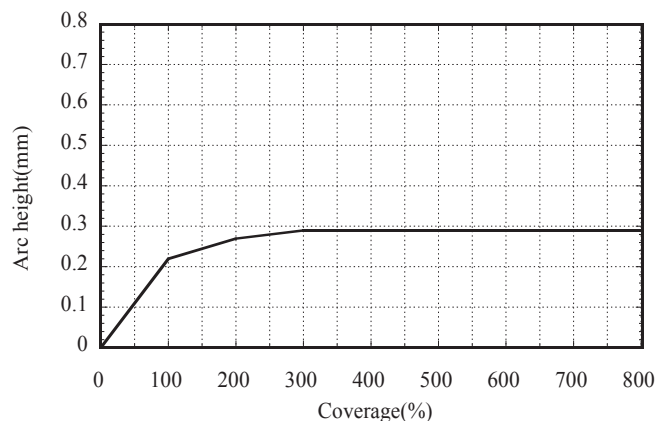


Fig.11 Coverage history of arc height

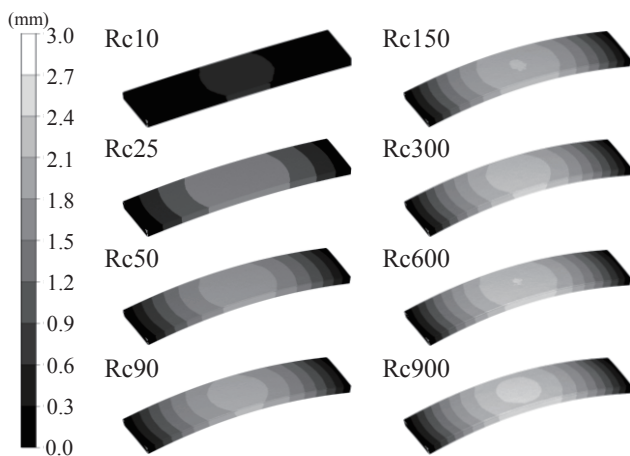


Fig.10 Distribution of out-of-plane deformation

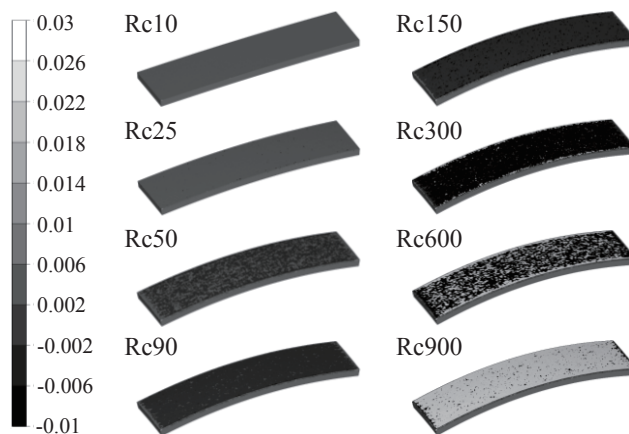


Fig.12 Distribution of plastic strain in x direction

Fig. 12 に塑性ひずみの長手方向成分の分布を示す。同図からも衝突面積率が大きくなるに従い、塑性ひずみが大きくなっていることが確認できる。

5. ビードオンプレートモデルのショットピーニング時の応力分布の予測

5.1 解析モデルおよび条件

Fig. 13 に溶接残留応力分布のショットピーニングによる変化を解析するために用いる解析モデルを示す。板長 200mm、板幅 200mm、板厚 20mm であり、材料を SUS316L[16]とした。溶接条件は電流 200A、電圧 10V、溶接速度 3.33mm/sec、熱効率は 0.7 とした。またモデル中央部の 20mm×20mm の部分をショットの衝突領域とし、衝突領域は 0.1mm 間隔でメッシュ分割を行った。ピーニングの条件としては、ショットの材料を SUS304 とし、衝突領域にショットが 3000 回衝突するまで解析を実施した。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。

5.2 解析結果

Fig. 14 および Fig. 15 に溶接後、ショットピーニングを行った場合の残留応力の変化を示す。同図より、特に表面において溶接線方向応力 σ_{xx} 、溶接線垂直方向応力 σ_{yy} ともに引張応力が圧縮応力に変化していることが確認できる。

6. 結言

1) 等価荷重モデルを単一のショットが衝突する問題に対して適用し、ABAQUS によるショットと衝突対象部材の接触を考慮した動的陽解法 FEM の解析結果と比

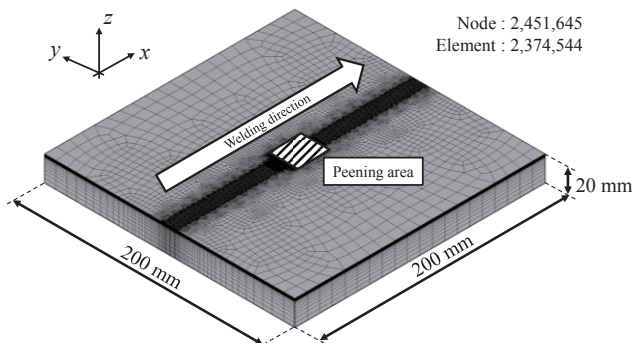


Fig.13 Analysis model

較した結果、良好に一致することを確認した。

- 2) 等価荷重モデルにより得られたショットの打痕径が実験で得られたショット打痕径と良好に一致することを確認した。
- 3) 熱弾塑性解析により得られたビードオンプレートの残留応力分布に対し、提案システムを適用した結果、ショットの衝突回数増加に伴い、引張残留応力が圧縮残留応力に転化していることが確認できた。これより本手法を用いてショットピーニング時の応力挙動を解析可能であることを確認した。
- 4) 開発したショットピーニング時の残留応力分布予測システムにおける衝突面積率とカバレッジの関係性について整理するために、アルメンストリップ片のアーカハイトを解析と実験と比較した結果、本解析は良好な定性的傾向を有していると言える。

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・

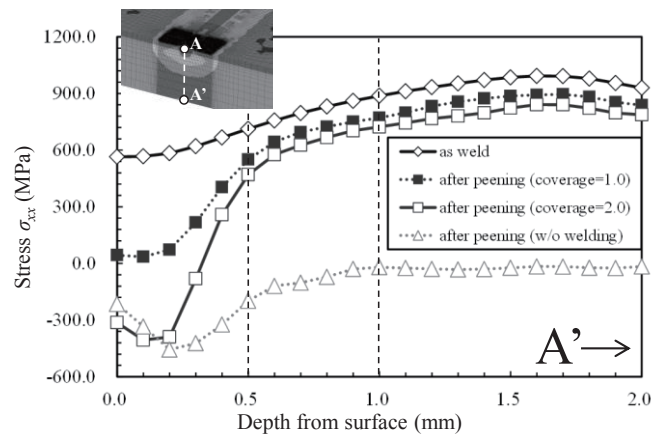


Fig.14 Distribution of residual stress σ_x in depth direction

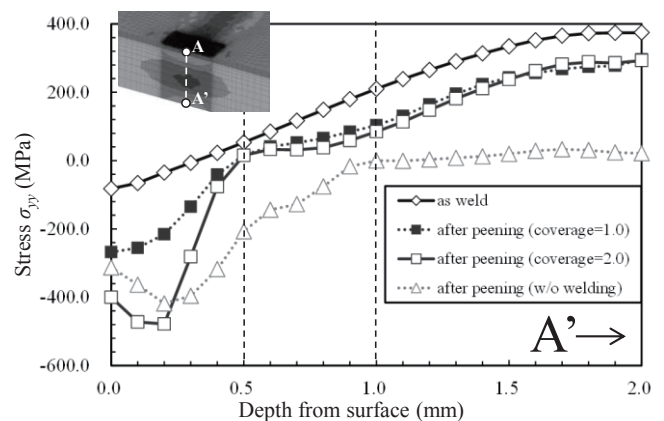


Fig.15 Distribution of residual stress σ_y in depth direction

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] H. Soyama and O. Takakuwa: Enhancing the aggressive strength of a cavitating jet and its practical application, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.6, No.4 (2011), pp.510-521.
- [4] M. Benedetti, V. Fontanari, M. Bandini and D. Taylor: Multiaxial fatigue resistance of shot peened high-strength aluminium alloys, *International Journal of Fatigue*, Vol.61 (2014), pp.271-282.
- [5] M. Klemenz, 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.
- [6] S. Bagherifard, R. Ghelichi and M. Guagliano: Mesh sensitivity assessment of shot peening finite element simulation aimed at surface grain refinement, *Surface & Coating Technology*, Vol.243 (2014). Pp.58-64.
- [7] B. Bhuvanaraghan, S. M. Srinivasan, B. Maffeo, R. D. McClain, Y. Potdar and O. Prakash: Shot peening simulation using discrete and finite element method, *Advances in Engineering Software*, Vol.41 (2010), pp.1266-1276.
- [8] M. Seki, A. Yoshida, Y. Ohue, T. Hongo, T. Kawamura and I. Shimoyama: Influence of shot peening on surface durability of case-hardened steel gears (influence of shot velocity and diameter), *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.71, No.706
- [9] X. Sheng, Q. Xia, X. Cheng and L. Lin: Residual stress field induced by shot peening based on random-shots for 7075 aluminum alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.22 (2012), pp.s261-s267.
- [10] M. Jebahi, A. Gakwaya, J. Levesque, O. Mechri and K. Ba: Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method, *International Journal of Mechanical Science*, Vol.107 (2016), pp.21-33.
- [11] 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.
- [12] K. Ikushima and M. Shibahara: Large-scale non-linear analysis of residual stresses in multi-pass welded pipe welds by idealized explicit FEM, *Welding in the World*, Vol.59 (2015), pp.839-850.
- [13] M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa: Finite element method for hot cracking using interface element (3rd report) - development of static-dynamic hybrid method, *Journal of Kansai Society of naval Architects Japan*, No.235 (2001), pp.161-169.
- [14] P. Wriggers: *Nonlinear Finite Element Methods*, Springer (2008).
- [15] 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.
- [16] Japan nuclear energy safety organization: Project of Integrity Assessment of Flawed Components with Structural Discontinuity (IAF) Material Properties Data Book at High Temperature for dissimilar metal welding in Reactor pressure Vessel (2013) pp.1-34-1-42