

ショットピーニングにおける圧縮残留応力の付与に関する数値解析的検討

大阪府立大学大学院
発電設備技術検査協会
日本原子力研究開発機構
大阪府立大学大学院

○山田 祐介 , 生島 一樹
西川 聡 , 古川 敬
秋田 貢一 ,
柴原 正和

Numerical analysis on the imparting of compressive residual stress in shot peening

by Yusuke YAMADA , Kazuki IKUSHIMA, Satoru NISHIKAWA, Takashi FURUKAWA,
Koichi AKITA, and Masakazu Shibahara

1. 緒言

溶接時に生じる残留応力のうち、特に引張りの残留応力は疲労き裂や応力腐食割れ(SCC)発生の原因の一つとされている。そのため、構造物の健全性を担保するために残留応力について事前に検討を行う必要があると言える。溶接によって生じた残留応力、特に引張りの残留応力を改質・低減するため、レーザーやショット、ウォータージェットなどを用いた種々のピーニングの手法¹⁻³⁾が提案されている。これらの手法は、Fig. 1 に示すように、対象の部材表面に衝撃的な荷重を加えることで塑性ひずみを導入し、応力状態を改質するものである。しかしピーニングの施工条件によっては応力場を逆に改悪してしまう可能性もあり、ピーニングによる応力改質効果、また改質された残留応力場の持続性について事前に検討することは非常に重要であると考えられる。塩谷らは単一ショット衝突時の圧痕寸法について、ショット条件および被ショット材の降伏応力との関係を示しているが、応力分布についての検討は実施していない⁴⁾。ピーニングによる残留応力改質効果について検討するため、著者らが先行研究において高速・大規模解析の可能な理想化陽解法に対し動的解析を導入し、さらにショット衝突時の荷重の分布・履歴をモデル化することによって、多数のショットが衝突する場合の解析が可能な手法を開発した。その後単一ショットの衝突を従来手法と比較し、提案手法を用いてショット衝突時の応力分布を表現できることを確認し、円管多層継手に対するショットピーニング施工に適用した⁵⁾。しかしながら、ピーニングのシミュレーションはその解析の難しさから実際の施工条件との比較が困難であり、ショットピーニング後の残留応力分布について定量的に比較した事例は著者らの知る限り存在しない。

一方、ショットピーニングの施工条件を定めるために、アルメンストリップと呼ばれる試験片を用いた試験が行われている。アルメンストリップ試験片を用いた試験は、試験片に対しショットピーニングを施工し、その際に付加されたひずみによって試験片が湾曲する際の反り量をアークハイトと定義し、そのアークハイトによってショットピーニング強さを定めるという試験である⁶⁾。この試験について実験的に検討を行った例はあるものの、数値解析的検討を行った例はほとんどない。

そこで本研究では、アルメンストリップ片を用いた試験に対して理想化陽解法を用いたショットピーニング解析手法を適用し、本手法の定量化へ向けた検討を行う。まず単一ショットの衝突時の挙動の解析に対して提案手法を適用し、それにより得られた圧痕・残留応力を実験、汎用解析コードと比較することで、提案手法を用いて単一ショット衝突時の圧痕寸法または応力分布を表現できることを確認する。その後、アルメンストリップ片を用いた試験に対して提案手法を適用し、ショットピーニング時に生じる試験片の挙動について検討を行う。また実験により得られたアークハイトと解析より得られたアークハイトを比較することで、本手法の定量化を行う。

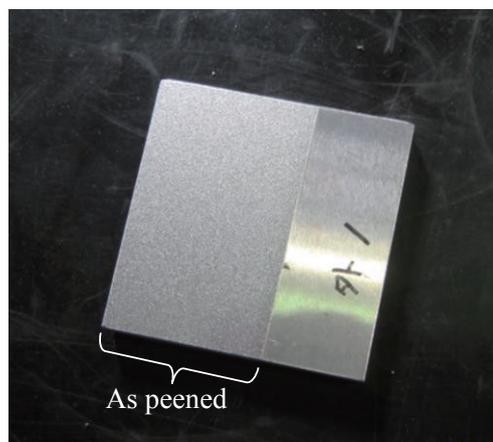


Fig. 1 Shot peened specimen

2. 解析理論

2. 1 衝突時の荷重分布・履歴のモデル化

ショットピーニング時の荷重はごく短時間にごく微小な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. 2 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、塑性変形の進行に伴い、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。

$$P(\rho, \tau) = f(\rho, t) \cdot g(\tau) \quad (2.1)$$

ここで、 $P(\rho, \tau)$, $f(\rho, t)$, $g(\tau)$ 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。

$$\rho = \frac{r}{r_0}, \quad \tau = \frac{t}{t_0} \quad (2.2)$$

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. 2 で模式的に示した荷重分布の傾向を再現するため、式(2.3)および式(2.4)の6次の多項式で定義する。多項式の係数に単一ショット衝突時の反力分布を再現可能、すなわち Fig. 2 の反力分布の傾向を表現できるものを用いることで荷重分布関数は Fig. 3 のように定義され、Fig. 2 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。

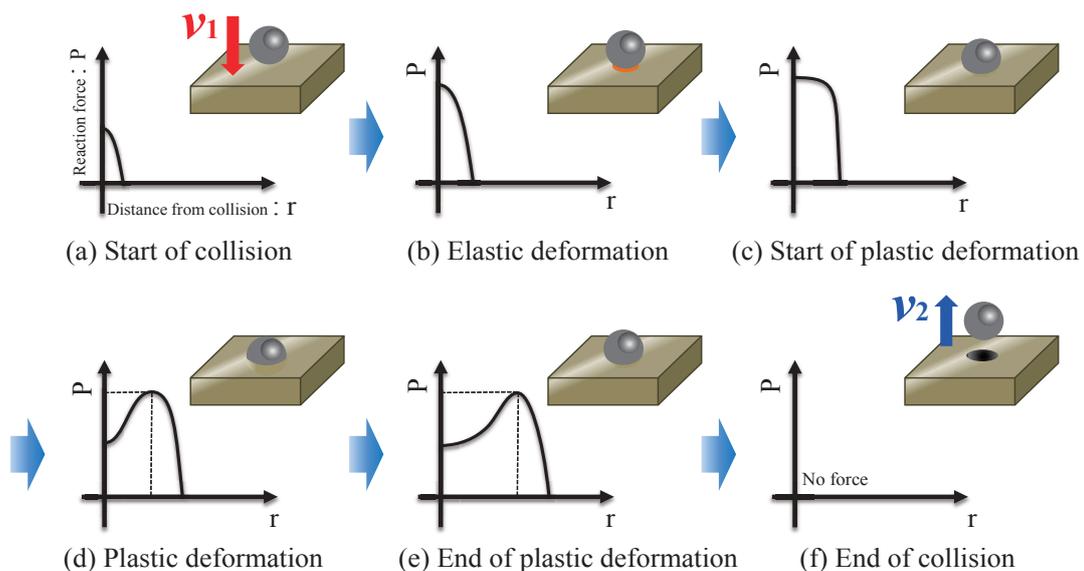


Fig. 2 schematic illustration of reaction force distribution on shot peening

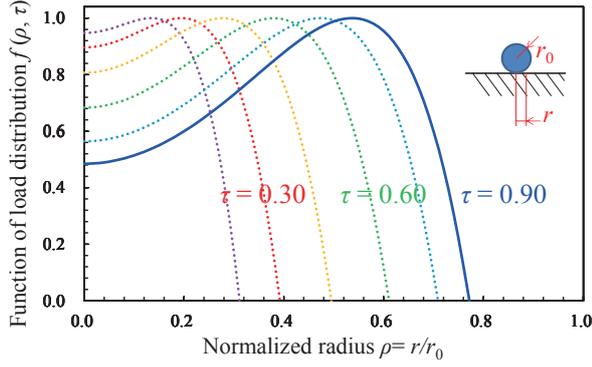


Fig. 3 Function of load distribution

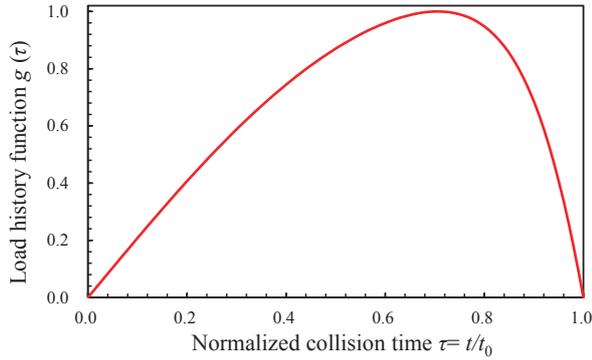


Fig. 4 Function of load history

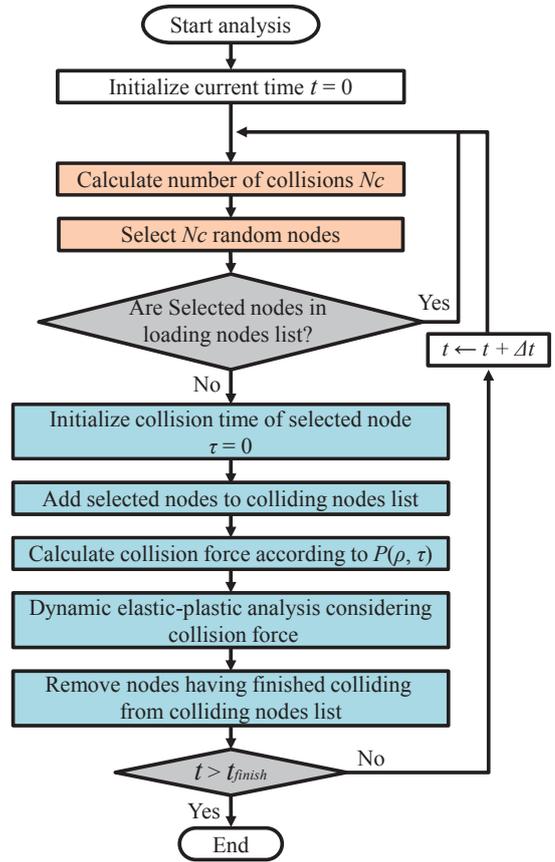


Fig. 5 Flow of analysis

$$f(\rho, \tau) = \frac{a(\rho, \tau)}{\int_0^1 a(\rho, \tau) 2\pi\rho d\rho} \quad (2.3)$$

$$a(\rho, \tau) = a_6(\rho, \tau)\rho^6 + a_4(\rho, \tau)\rho^4 + a_2(\rho, \tau)\rho^2 + a_0 \quad (2.4)$$

また、荷重履歴関数として、式(2.6), (2.7)のような関数形を仮定すると、その履歴は Fig. 4 に示すようになる。式(2.6)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。

$$g(\tau) = b \sin\left(\frac{\tau^7 + 2\tau}{3} \pi\right) \quad (2.6)$$

$$b = \frac{m(v_2 - v_1)}{t_0 \int_0^1 \sin\left(\frac{\tau^7 + 2\tau}{3} \pi\right) d\tau} \quad (2.7)$$

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。作成した解析システムの流れを Fig. 5 に示す。本システムでは、弾塑性解析を実施する前に、ショットの衝突による荷重を算出する。荷重の算出に当たっては、現在の時間ステップの時間増分において、新たな衝突の発生回数 N_c を決定し、その分だけ新たな衝突点となる節点を選択する。ここで、選択さ

れた節点がすでに衝突点として選択されている場合は、同一点への多重衝突を避けるために再度節点の選択を行う。衝突の中心となる節点を選択した後は、選択された節点をリスト(衝突節点リスト)へ追加する。続いて、衝突節点リストをもとに、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^{7,8)}。弾塑性解析が終了した後、衝突期間を過ぎた衝突点を衝突節点リストから除外する。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. 単一ショット衝突時に関する検討

3.1 解析モデル

本章では、単一ショットが衝突した場合の挙動について検討し、圧痕寸法および残留応力分布の定量化を行う。Fig. 6 に単一ショットの衝突の解析モデルおよび拘束条件を示す。本解析では、板厚 3.2mm、長さ 8mm、幅 8mm の被ショット材に対し、直径 0.8mm のショットを衝突させるモデルを対象とした。本モデルの節点数、要素数はそれぞれ 196,824、204,015 である。ショットの初速は 30m/s とし、ショットの材料は SUS304、被ショット材の材料を SUS316L とした。SUS304 および SUS316L の材料物性値を Table 1 に示す。

本モデルを用い、荷重モデルを導入した理想化陽解法による結果、ABAQUS 動的陽解法による結果、および実験での圧痕を比較することで、本手法の定量化について検討する。

3.2 ショット圧痕に関する検討

Fig. 7 に実験、ABAQUS、および理想化陽解法によって得られた圧痕の直径および深さを示す。同図より、実験、ABAQUS、および理想化陽解法によって得られた圧痕直径、深さともに良好に一致していることが確認できる。

3.3 残留応力分布に関する検討

この節では衝突中および衝突後の残留応力分布について、ABAQUS と理想化陽解法による結果を比較する。Fig. 8 および Fig. 9 に衝突中および衝突後の残留応力分布を示す。また Fig. 10 に ABAQUS および理想化陽解法により得られた深さ方向への残留応力分布を示す。同図より衝突中、および衝突後の残留応力分布について

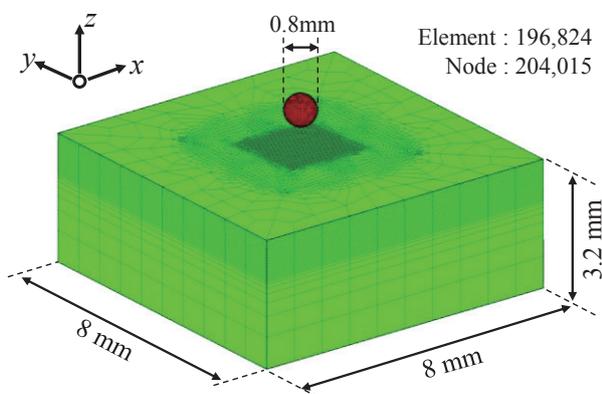
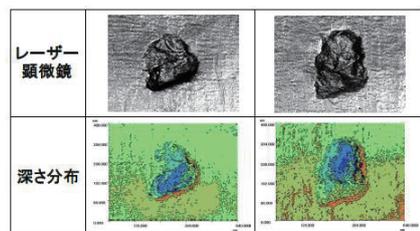


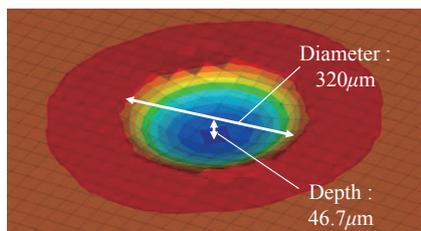
Fig. 6 Analysis model

Table 1 Material constants of SUS304 and SUS316L

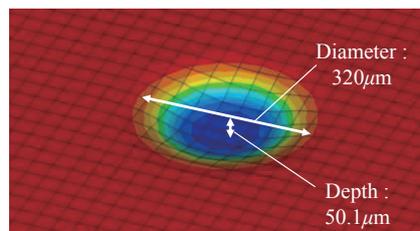
| | SUS304 (Shot) | SUS316L |
|------------------------------|--------------------|--------------------|
| Density (kg/m ³) | 7.90×10^3 | 7.92×10^3 |
| Young's module (MPa) | 198500 | 194700 |
| Poason's ratio | 0.294 | 0.285 |
| Initial yield stress (MPa) | 288.0 | 231.0 |
| Work hardening (MPa) | 1474.0 | 2427.0 |



(a) Experiment



(b) ABAQUS



(c) IEFEM

Fig. 7 Diameter and depth on indentation

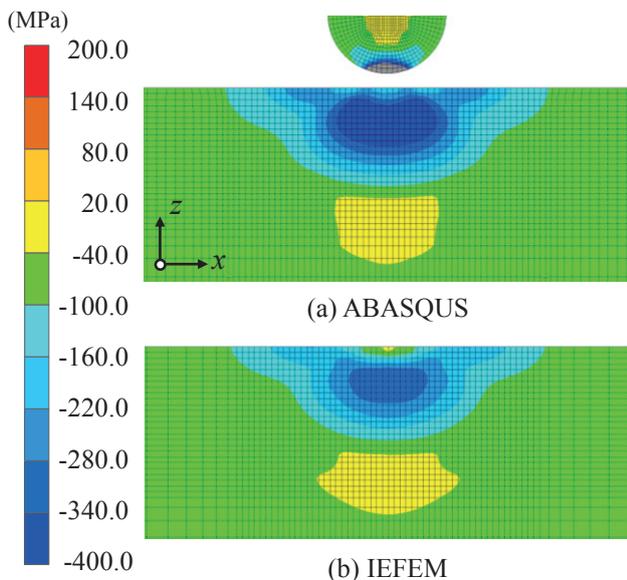


Fig. 8 Distribution of residual stress during collision

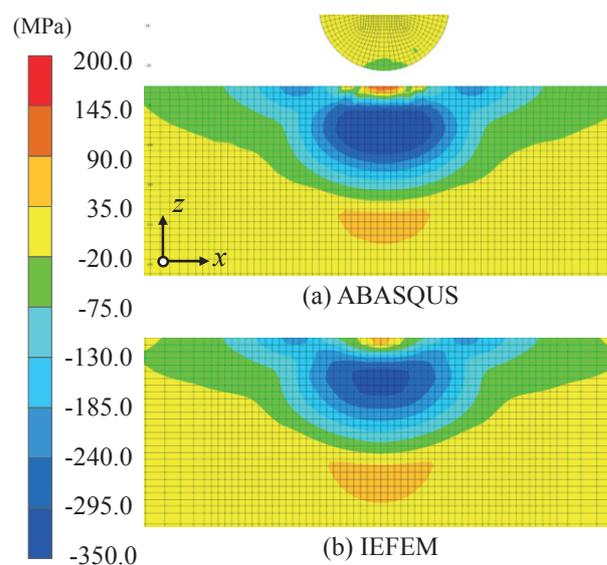


Fig. 9 Distribution of residual stress after collision

て ABAQUS により得られた残留応力分布と理想化陽解法により得られた残留応力分布が良好に一致することが確認できる. 以上より構築した荷重モデルを用いることで汎用解析コードの接触機能とほぼ同等の解析が可能であることを確認した. また, 提案手法は実験および汎用解析コードによって得られる結果と定量的に一致することを確認した.

4. アルメンストリップ片を用いた試験の試験片挙動に関する検討

本章では, 理想化陽解法を用いたショットピーニング解析手法の定量化に向けた検討を行う. ショット投射量の定量化について検討を行うため, アルメンストリップ片を用いた試験について検討を行う.

4. 1 解析モデル

本節では, Fig. 11 に示すようなアルメンストリップ片に関する解析を実施した. 試験片を A 片とし, 板厚 1.3mm, 長さ 76mm, 幅 19mm のモデルを対象とする. また, 試験片表面にショットピーニングを施工するものとした. モデル節点数, 要素数はそれぞれ 438,912, 397,100 である. ショット直径は 0.8mm とし, ショットの初速は 30m/s とした. ショットの材料は SUS304, アルメンストリップ片の材料を高速度鋼とした. 高速度鋼の材料物性値を Table 2 に示す.

アルメンストリップ片を用いた試験を行う際, Fig. 13 に示すようにボルトによって試験片を固定してショットピーニングを施工し, その後拘束を開放するという手順で試験が行われる. それを模擬し, 解析上ではショットピーニング解析中は裏面を z 方向に拘束し, ショットピーニング解析終了後, 拘束を解放して静解析を実施する. アークハイトの測定位置を Fig. 12 に示す. 同図に示す通り, O 点の z 座標と A, B, C, D 点の z 座標の平均との差をアークハイトとして算出した. 解析上カバレッジを算出することが困難であるため, 衝突面の節点数に対する衝突節点数の割合を衝突面積率 R_c と定義し, これを用いて結果を整理する. R_c を算出する式を式(4.1)に示す.

$$R_c = \frac{A \cdot N_p}{S} \quad (4.1)$$

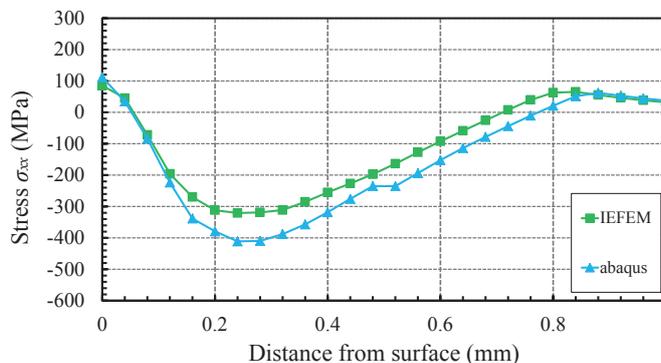


Fig. 10 Distribution of residual stress in depth direction

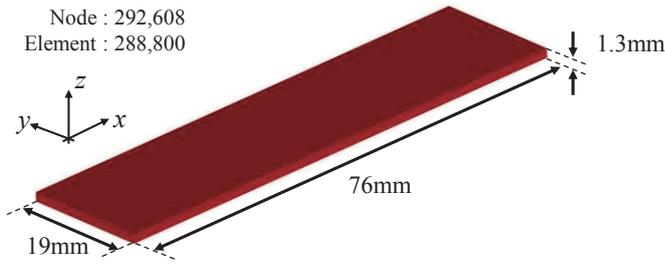


Fig. 11 Analysis model

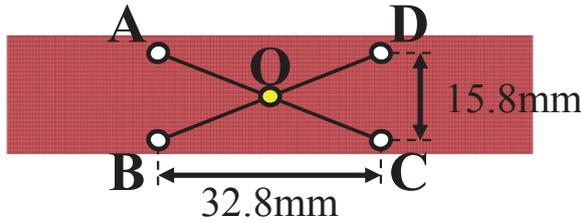
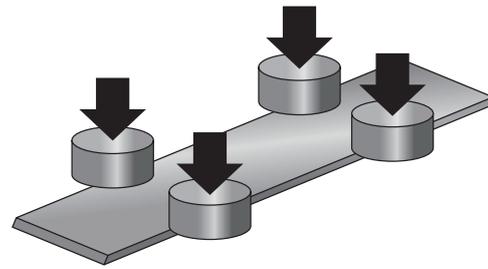
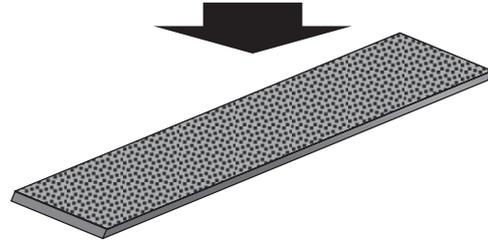


Fig. 12 Measurement point of arc height



(a) During shot peening



(b) After shot peening

Fig. 13 Constraint condition in experiment

ここで A , N_p , S はそれぞれショット衝突時に衝突荷重を受ける節点数, 衝突回数, 衝突対象面の節点数を示す.

4. 2 塑性ひずみに関する検討

本節では, ショットピーニングによって付加された塑性ひずみに変形に及ぼす影響について検討するため, R_c と塑性ひずみ量の関係について検討する.

Fig. 14 に試験片中央断面での相当塑性ひずみ分布を示す. 同図より, ショットピーニング解析の結果, 被ショット面に大きな引張りの塑性ひずみが付与されている様子が確認できる. Fig. 15 に試験片の表面および裏面の長手方向の塑性ひずみの履歴を示す. 同図より, 塑性ひずみを表面と裏面で比較すると, R_c が 100 までの小さい範囲では表面の塑性ひずみが突出して大きくなっているが, R_c が 100 以上の範囲では表面・裏面ともになだらかに増加していく様子が確認できる.

4. 3 面外変形量に関する検討

本節では, アルメンストリップ片を用いた試験での試験片挙動を再現できるかどうかを確認するため, R_c と面外変形量の関係について検討する. Fig. 16 に R_c50 における面外変形分布を示す. 同図より, R_c の増加に伴い特に中央で面外変形量が大きくなっていることが確認できる. これより, 試験片の表面と裏面で塑性ひずみ量の差が生じ, その結果, 試験片に反りの変形が生じるというアルメンストリップ試験のメカニズムが表現できていことが確認できる.

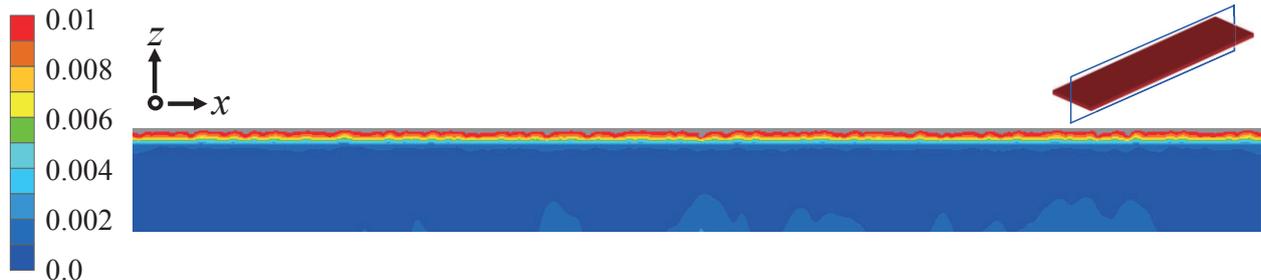


Fig. 14 Distribution of plastic strain in x direction at each R_c50

Table 2 Material constants of high-speed steel

| | High-speed steel |
|-----------------------------|--------------------|
| Density (kg/m^3) | 7.90×10^3 |
| Young's module (MPa) | 201086 |
| Poason's ratio | 0.300 |
| Initial yield stress (MPa) | 1450.0 |
| Work hardening (MPa) | 16935.0 |

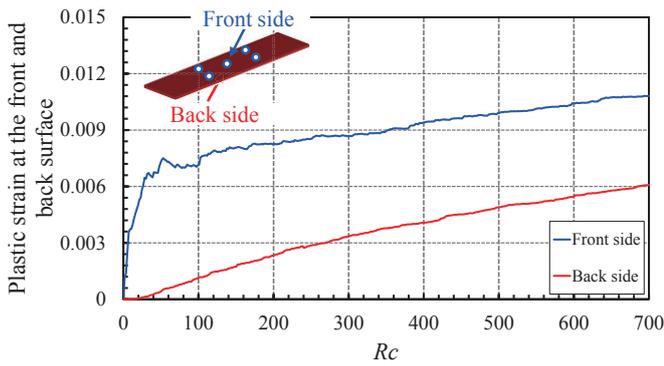


Fig. 15 History of plastic strain in front and back side

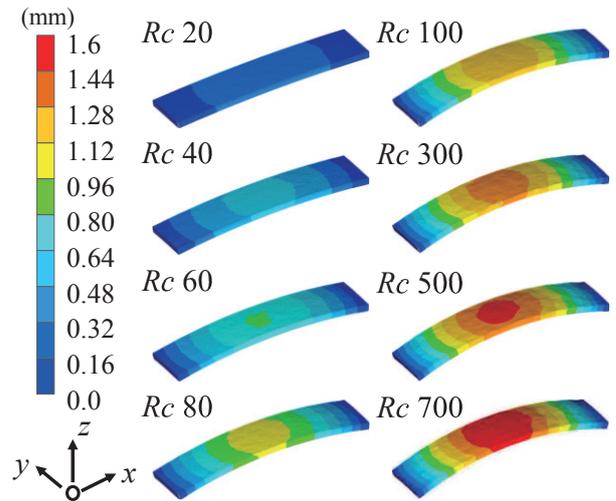
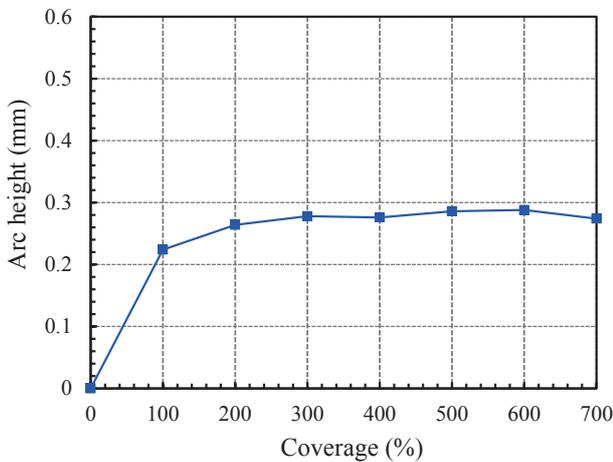
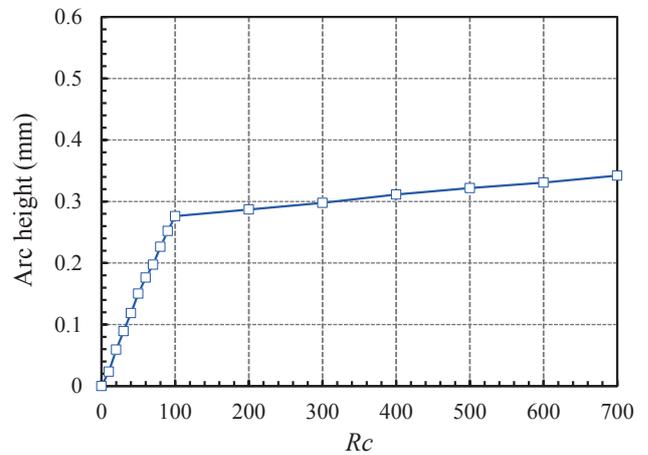


Fig. 16 Distribution of deformation in z direction at each Rc



(a) Experiment



(a) Analysis

Fig. 17 History of Arc height

4. 4 アークハイトに関する検討

Fig 17 に実験より得られたカバレッジとアークハイトの関係, および解析により得られたカバレッジとアークハイトの関係を示す. 同図より, 実験ではカバレッジが 100 を超えるとアークハイトがおよそ 0.3mm で収斂する様子が確認できる. 一方解析では, Rc が 100 を超えるとアークハイトがおよそ 0.3mm で収斂している様子が確認できる. これより, アークハイトが実験と解析でアークハイト値が良好に一致することが確認できる. 以上より, アークハイトについて本手法の定量化ができたといえる.

5. 結言

本研究では, ショットピーニングの施工条件を定めるためのアルメンストリップ片を用いた試験の解析を実施し, ショットピーニング解析手法の定量化に向けた検討を実施した. その結果, 以下の知見を得た.

- 1) 単一ショット衝突時に関する検討を行った結果, 実験, ABAQUS 動的陽解法, 荷重モデルを導入した理想化陽解法の三者で圧痕の直径および深さが良好に一致することを確認した. また, ABAQUS と理想化陽解法によって得られた残留応力分布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ってアルメンストリップ片に付与される塑性ひずみについて検討を行った結果, 被ショット面である試験片表面に大きな引張の塑性ひずみが付与されている一方, 試験片裏面には塑性

ひずみはほとんど付与されていない様子を確認した。また、試験片表面と裏面で塑性ひずみの履歴を確認すると、 R_c が 100 以下の範囲では表面の塑性ひずみ量が卓越しているが、 R_c が 100 を超えると表面・裏面共に緩やかに増加していくことを確認した。

- 3) R_c の増加に伴い、面外変形量も増加していくことを確認した。また R_c が 100 を超えると面外変形量の増加量が小さくなることも確認した。これは表裏面での塑性ひずみの差が一定になる点と同じであり、表裏面の塑性ひずみの差が面外変形を生じさせていることを確認した。
- 4) 実験で得られたアークハイトの履歴と解析で得られたアークハイトの履歴を比較した結果、アークハイトに関して実験と解析が良好に一致することを確認した。

謝辞

本研究は、「文科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) 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) K. Ikushima, Y. Kitani, M. Shibahara, S. Nishikawa, K. Akita, S. Morooka: Study on Residual Stress Distribution on Shot Peening Process using Large Scale Numerical Analysis, Visual JW 2016, pp.241-242(2016)
- 5) T. SHIOYA, N, HIRAI, K. TOSHA: Simulation of shot peening 1st report: Dent profile produced by one shot, Journal of Japan Society for Abrasive Technology, Vol.49, No.3 (2005), pp.147-151.
- 6) 日本工業規格: ばねのショットピーニング JIS B2711:2013
- 7) 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.
- 8) 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.