ショットピーニング加工における塑性変形および残留応力の 三次元有限要素シミュレーション*

(単一ショットによる変形)

森 謙一郎^{*1}, 小坂田 宏造^{*1}
塩 見 誠 規^{*2}, 岡 田 達 夫^{*3}

Three-Dimensional Finite Element Simulation of Plastic Deformation and Residual Stress in Shot-Peening (Deformation by Single Shot)

Ken-ichiro MORI, Kozo OSAKADA,
Masanori SHIOMI and Tatsuo OKADA

A dynamic rigid-plastic finite element method for simulating high-speed plastic deformation in the shot-peening processes is proposed on the basis of the finite deformation theory of plasticity. In the present method, the inertial force due to the decelerating shot is equilibrated with the force caused by plastic deformation of the workpiece at the interface in each deformation step. By the use of the stress distribution at the time of maximum inertial force calculated from the rigid-plastic analysis, the residual stress distribution in the shot-peened workpiece is obtained via the elastic finite element method. Three-dimensional plastic deformation and residual stress distributions in rectangular blocks peened with a single rigid shot are computed. The calculated shape and residual stress distribution of the shot-peened workpiece are in reasonable agreement with the experimental ones for mild steel, copper and aluminium blocks.

Key Words: Finite Element Method, Plasticity, Residual Stress, Numerical Analysis, Shot-Peening, High-Speed Deformation, Inertial Force, Three-Dimensional Deformation

1. 結 言

ショットピーニング加工では、球状のショットを素材に打ちつけて塑性変形させ、表面を加工硬化させるとともに圧縮の残留応力を発生させる。表面の加工硬化および圧縮の残留応力は、疲労強度に対して有効であり、最近自動車用部品の軽量化に対して積極的にショットピーニング加工を行うという動きがある。ショットの速度に対して、表面の加工硬化の程度を予測するのは一般に容易ではない。また、残留応力の測定法にはX線応力測定法などがあるが、材料内部の残留応力分布を測定するのは非常に手間がかかる。このため、ショットピーニング加工において表面の加工硬化および残留応力分布を計算する方法が望まれている。

ショットピーニング加工のような高速変形問題では、慣性力の影響を取扱える方法が必要になる。Al-Obaid⁽¹⁾は、動的弾塑性有限要素法を用いてショットピーニング加工における素材の変形挙動を解析している。弾塑性有限要素法は負荷中の塑性変形だけで

なく、除荷後の残留応力分布も計算できるが、応力増分を加え合わせるにより応力成分を求めているため、1ステップの変形量を非常に小さくしなければならない。特に高速変形問題では、慣性力の影響を考慮するために速度の微分項である加速度を取扱う必要があり、静的な問題よりも収束判定がきびしくなる。

剛塑性有限要素法では、各変形ステップの応力がひずみ速度から直接求まるため、1変形ステップの変形量を比較的大きく取ることができる。著者ら⁽²⁾は慣性力の影響を考慮した剛塑性有限要素法を提案している。この方法では、節点速度を変数として速度の微分から加速度を導き、慣性項を汎関数の中に取り込んでいる。剛塑性有限要素法では、各変形ステップの応力が直接求まるため、速度の微分項を含んでも比較的収束が容易である。

本研究では、剛塑性有限要素法を基礎として、ショットピーニング加工における高速塑性変形を計算する方法を提案する。また、得られた負荷中の応力分布から残留応力を近似的に計算する方法についても検討を行う。提案された方法を用いて、単一ショットによる塑性変形および残留応力分布を求める。

* 原稿受付 平成4年11月27日。

^{*1} 正員、大阪大学基礎工学部(〒560 豊中市待兼山町1-1)。

^{*2} 正員、大阪大学大学院。

^{*3} 正員、広島大学工学部(〒724 東広島市西条町大字下見)。

2. シミュレーション法

2.1 塑性変形 本解析法では、ごくわずかの圧縮性を許容した剛塑性有限要素法⁽³⁾⁽⁴⁾を基礎としている。わずかの圧縮性を許すことにより、ひずみ速度から直接応力が計算でき、しかも非圧縮性の条件をほぼ満足することができる。

剛塑性有限要素法では、通常微小変形理論に基づいて定式化が行われている。微小変形理論では、1変形ステップは微小であるとして変形ステップの最初の時点において定式化を行う。このため、変形ステップ間の形状および加工硬化などの変化が基礎式の中に入っておらず、取扱いが簡単になる。しかしながら、慣性力の影響を考慮した場合、微小変形理論では加速度の定義が明確でなく、特に変形初期のステップでは変形量が非常に小さくしなければならない⁽²⁾。

本研究では、1変形ステップの最後の時点で定式化を行う有限変形理論⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いる。有限変形理論では、1ステップの最後で力の釣合いを考えるため、各種の物理量の変化を取扱うことができる。ここでは、1ステップの中で速度の変化を考えることにより加速度を導く。

要素内のひずみ速度 $\{\dot{\epsilon}\}$ は、通常の有限要素法と同様に次のように節点速度 $\{v_e\}$ の1次関数になる。

$$\{\dot{\epsilon}\} = [B]\{v_e\} \quad (1)$$

ここで、 $[B]$ はひずみ速度と節点速度の関係を表すマトリックスである。マトリックス $[B]$ は節点座標の関数となるため、1変形ステップの最後における節点の座標 (x_1, y_1, z_1) は、次式で表される。

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + \frac{1}{2}\Delta t(v_{x0} + v_{x1}) \\ y_1 &= y_0 + \frac{1}{2}\Delta t(v_{y0} + v_{y1}) \quad (2) \\ z_1 &= z_0 + \frac{1}{2}\Delta t(v_{z0} + v_{z1}) \end{aligned}$$

ここで、添字0, 1は変形ステップの最初と最後を表し、 v_x, v_y, v_z は節点速度、 Δt は変形ステップ間の時間増分である。有限変形理論では、節点座標は節点速度の関数になり、素材の形状変化の影響が定式化の中で考慮されている。

慣性項における加速度 a_i を変形ステップの最初の速度 v_{i0} と最後の速度 v_{i1} によって近似する。

$$a_i = \frac{v_{i1} - v_{i0}}{\Delta t} \quad (3)$$

慣性項を考慮した力の平衡方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} - \rho a_i = 0 \quad (4)$$

ここで、 ρ は素材の密度である。式(4)においては、変形ステップの最後の時点での釣合いを考える。式(3)を式(4)の中に代入すると、

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} - \rho \frac{v_{i1} - v_{i0}}{\Delta t} = 0 \quad (5)$$

ショットが素材と衝突することによって、慣性力 T_i が接触面に加わる。

$$T_i = -\rho_s V_s \frac{v_{si1} - v_{si0}}{\Delta t} \quad (6)$$

ここで、 ρ_s はショットの密度、 V_s はショットの体積、 v_{si0}, v_{si1} はショットの速度である。本解析では、ショットは剛体であるとして取扱う。式(6)では、ショットが素材と衝突する際に速度が変化し、その変化率が加速度になり、加速度に比例して力が発生する。

有限要素法の定式化には、重み付き残差法の一つであるガラーキン法を用いる。式(5)より、

$$\int_V \{N\}^T \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} - \rho \frac{v_{i1} - v_{i0}}{\Delta t} \right) dV = 0 \quad (7)$$

ここで、 $\{N\}$ は要素の形状関数のベクトルである。式(7)を部分積分して、式(6)の境界条件を考慮すると、

$$\begin{aligned} & \left[\int_V \left([B]^T [D^p] [B] + \{N\}^T \{N\} \frac{\rho}{\Delta t} \right) dV \right] \{v_i\} \\ & = \left(\int_V \{N\}^T \{N\} \frac{\rho}{\Delta t} dV \right) \{v_0\} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{n_s} P_i = \frac{\rho_s V_s}{\Delta t} (v_{si0} - v_{si1})$$

ここで、 $[D^p]$ はごくわずかの圧縮性を許容した剛塑性材料における応力とひずみ速度の関係を表すマトリックス、 $\{v_0\}, \{v_1\}$ は素材の節点速度ベクトル、 n_s は接触面における節点の数である。 P_i は接触面における素材の節点力であり、節点速度の関数になる。式(8)では、ショットと素材の接触面における釣合いはそれぞれの節点ではなく、その節点力の合計がショットの慣性力と釣合っている。連立方程式(8)では、 $\{v_1\}, v_{si1}$ は変数であり、 $\{v_0\}, v_{si0}$ は前の変形ステップで求められた定数である。変形開始のステップにおける v_{si0} は、ショットの衝突速度になる。

式(8)では、それぞれの変形ステップにおいてショットの慣性力が素材の塑性変形による力と釣合っていることを示している。ショットの慣性力はショットの速度変化から生じるため、変形抵抗の小さい素材では1変形ステップの間の速度変化が小さく、大きな塑性変形を受けることになる。式(8)では、ショットの1変形ステップの最後の速度 v_{si1} も変数になり、素材が塑性変形する際に生じる力に釣合うような速度が求まる。

2.2 残留応力 剛塑性有限要素法では、素材の弾性変形が計算できないため、残留応力は直接求めら

ない。このため、剛塑性有限要素法によって得られた負荷時の応力分布を用いて、弾性または弾塑性有限要素法によって残留応力およびスプリングバックを求める試みが行われている⁽⁷⁾。本シミュレーションでも同様な方法で残留応力を計算する。しかしながら、ショットピーニング加工では、負荷終了点が明りょうでないため、どの時点の応力分布を用いるかが問題となる。

図1は、表1に示す炭素鋼、 $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ において剛塑性有限要素法によって計算されたショットピーニング加工中のショットの慣性力と速度の変化である。慣性力は時間とともに増加して最大値を示し、その後1ステップで変形が終了しており、最大慣性力点以降はあまり塑性変形が進行しない。そこで、最大慣性力時の応力分布を用いて弾性有限要素法から残留応力を計算する。

剛塑性有限要素法によって計算された応力分布を弾性的に除荷後の残留応力 $\{\sigma^r\}$ は塑性の応力成分 $\{\sigma^p\}$ と弾性の応力成分 $\{\sigma^e\}$ の和として表される。

$$\{\sigma^r\} = \{\sigma^p\} + \{\sigma^e\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\{\sigma^p\}$ は剛塑性有限要素法から計算された最大慣性力時の応力成分である。除荷における弾性変形は、弾性有限要素法によって1回の変形ステップで計算される。弾性変形における節点力の釣合いは次のように表される。

$$\int_V [B]^T [D^e] [B] dV \{u\} = - \int_V [B]^T \{\sigma^p\} dV \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $[D^e]$ は弾性変形における応力とひずみの関係を表すマトリックス、 $\{u\}$ は節点変位ベクトルである。線形の連立方程式(10)を解くことにより、弾性変

形の応力分布が計算され、式(9)より残留応力分布が計算される。

3. 単一ショットのシミュレーション

3・1 計算条件 炭素鋼、銅、アルミニウムのブロックに1個の鋼球が衝突するときの三次元変形のシミュレーションを行った。球の弾性変形は無視して剛体としている。素材は8節点六面体要素によって三次元的に要素分割されている。球はブロックに垂直に衝突する場合の計算を行うが、球が斜めに衝突する場合も

図1 炭素鋼、 $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ におけるショットピーニング加工中のショットの慣性力と速度の変化

表1 ショットピーニング加工の三次元シミュレーションに用いた計算条件

	Steel	Copper	Aluminium
Density of workpiece / gmm^{-3}	7.79×10^{-3}	8.96×10^{-3}	2.70×10^{-3}
Flow stress / MPa	$1150 \bar{e}^{0.11 \pm 0.01}$	$528 \bar{e}^{0.44 \pm 0.01}$	$134 \bar{e}^{0.27 \pm 0.01}$
Young's modulus / GPa	210	112	68.9
Dimension of workpiece / mm	60 x 60 x 40		
Coefficient of friction	0.25		
Diameter of shot / mm	40		
Density of shot / gmm^{-3}	7.79×10^{-3}		
Height of free-fall / m	2	8	
Impact speed v_{si} / ms^{-1}	6.11	12.2	

(a) 変形前

(b) 変形後

図2 アルミニウム、 $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ における三次元変形形状の計算結果

図3 $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ における加工後のくぼみ形状の計算結果と実験結果の比較

計算できる。

単一ショットのシミュレーションに用いた計算条件を表1に示す。ショットピーニングの実験は球を自由落下させることによって行い、測定を容易にするため大きな球で実験を行った。球は衝突後弾性変形エネルギーによって落下高さの10%弱程度跳ね上がるため、落下高さの95%に相当するエネルギーが塑性変形に費やされるとして、球の衝突速度 v_{si} を計算した。また、変形抵抗は油圧プレスと機械プレスでひずみ速度 (0.01 s^{-1} と 10 s^{-1} のオーダー) が大きく異なる実験結果から求めた。シミュレーションでは、変形ステップの最後の時点のショットの速度が衝突速度の1/1000以下になったときに計算を終了させたが、最終の変形ステップでは塑性変形はほとんど生じていなかった。

3.2 塑性変形 アルミニウムのブロックに衝突速度 $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ でショットが衝突したときの三次元変形形状の計算結果を図2に示す。三次元変形のシミュレーションには8節点六面体要素を用い、変形の対称性を考慮して素材の1/4だけ計算を行った。ショットの衝突により、素材の中央部に丸いくぼみが現れ

図4 炭素鋼, $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ における最大慣性力時の断面の応力分布および残留応力分布の計算結果

ている。

図3に $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ における加工後のくぼみ形状の計算結果と実験結果の比較を示す。炭素鋼、アルミニウムの結果はよく一致しているが、銅は計算のほうが小さくなっている。

3.3 残留応力分布 図4は炭素鋼, $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ における最大慣性力時の断面の応力分布, および弾性有限要素法から計算した断面の残留応力分布の計算結果である。最大慣性力時の応力は球が衝突する直下で大きな圧縮応力であり, この応力分布を除荷すると表面より少し内側で圧縮の残留応力が最大になっている。

図5は炭素鋼, $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ における表面の残留応力分布の計算結果と実験結果の比較である。実験の残留応力の測定には, 位置敏感比例検出器付微小領域X線応力測定装置を用い, 照射径は 0.15 mm である。 σ_x は中央部で小さく, 周辺部で大きな圧縮応力になっており, σ_y も中心より少し離れた部分で圧縮の残

留応力が大きくなっており, 計算および実験結果は同じ傾向を示している。X線応力測定法の実験結果は, 照射径が微小であって結晶の数が十分得られないため, 多少ばらついている。

3.4 実際の加工条件でのシミュレーション

実際のショットピーニング加工は, $50\sim 100\text{ ms}^{-1}$ で行われることが多いため, 衝突速度を大きくした場合のシミュレーションを炭素鋼のブロックに関して行った。

$v_{si}=50, 100\text{ ms}^{-1}$ における中央断面の格子の変形の計算結果を図6に示す。衝突速度が増加するほど, 格子が大きくゆがんでいる。

$v_{si}=50, 100\text{ ms}^{-1}$ における中央断面の相当ひずみ分布を図7に示す。塑性変形は衝突した表面近傍に集中している。衝突速度が増加するほど, 相当ひずみは大きくなっている。

図8は衝突速度を変化させた場合の中心軸の残留応力分布の計算結果である。衝突速度を変化させても残

図5 炭素鋼, $v_{si}=12.2\text{ ms}^{-1}$ における表面の残留応力分布の計算結果と実験結果の比較

図6 炭素鋼, $v_{si}=50, 100\text{ ms}^{-1}$ における中央断面の格子の変形の計算結果

図7 炭素鋼, $v_{si}=50, 100\text{ ms}^{-1}$ における中央断面の相当ひずみ分布

図 8 炭素鋼において速度を変化させた場合の中心軸の残留応力分布の計算結果

 図 10 加工硬化指数 n 値を変化させた場合の中心軸の残留応力分布の計算結果 ($v_{si} = 50 \text{ ms}^{-1}$)

図 9 炭素鋼において速度を変化させた場合の表面の残留応力分布の計算結果

留応力の最大値はあまり変化しないが、そのピークは内部になっており、圧縮応力の範囲が増加している。

図 9 は衝突速度を変化させた場合の表面の残留応力分布の計算結果である。表面の残留応力は衝突速度によってあまり変化しない。

加工硬化指数 n 値が残留応力に及ぼす影響を調べるため、 n 値を変化させた場合の計算を行った(図 10)。 n 値が小さいほど圧縮の残留応力が大きくなっている。これは n 値が小さいほど変形が集中し、大きな圧縮残留応力が生じやすくなったためである。

4. 検 討

実際のショットピーニング加工では、素材は多数のショットによって加工され、単一ショットにおける変形挙動と多少異なる可能性がある。複数ショットにおける塑性変形挙動は、ショットごとに計算を繰返すことによってシミュレーションできる。しかしながら、前のステップの残留応力も考慮しなければならない

ため、残留応力の計算法については検討が必要である。

ショットピーニング加工では、素材は高速で変形せられる。シミュレーションで計算されたひずみ速度の最大値は 10^4 s^{-1} のオーダーであり、3・1 節で示した変形抵抗の測定におけるひずみ速度よりもかなり大きかった。変形挙動は変形抵抗によって影響されるため、より高速下での変形抵抗の測定が必要であるが、高速下での変形抵抗の測定は一般に容易ではない。

5. 結 言

ショットピーニング加工における塑性変形を計算するために、慣性力を考慮した剛塑性有限要素法を提案した。本解析法では、ショットの慣性力と素材の塑性変形から得られる力を釣合わせることによって解を求めている。また、定式化は有限変形理論に基づいているため、1 ステップの変形量を比較的大きく取ることができる。加工後の残留応力分布は、剛塑性有限要素法から計算された最大慣性力時の応力分布を用いて弾性有限要素法から近似的に計算された。開発されたシミュレータは、単一ショットにおける表面の加工硬化および残留応力分布を求めることができ、今後複数ショットとの関係を明らかにしたい。

本研究を遂行するにあたり、ご協力をいただいた大阪大学院生・松岡直樹氏、卒研究生・小桑崇氏、および試験材料を提供して下さった日発グループ中央研究所に感謝する。

文 献

- (1) Al-Obaid, Y. F., *Comput. Struct.*, **36**-4(1990), 681.
- (2) Osakada, K., Okada, T. and Miyagawa, Y., *Int. J. Impact Eng.*, **12**-1(1992), 89.
- (3) Osakada, K., Nakano, J. and Mori, K., *Int. J. Mech. Sci.*, **24**-8(1982), 459.

(4) Mori, K., Osakada, K. and Oda, T., <i>Int. J. Mech., Sci.</i> , 24-9(1982), 519.	(6) Mori, K. and Osakada, K., <i>Proc. 3rd ICTP</i> , 2(1990), 877, Kyoto.
(5) Mori, K. and Yamaguchi, K., <i>Proc. 1st Japan Int.</i> <i>SAMPE Symposium</i> , (1989), 701, Chiba.	(7) Oh, S. I. and Kobayashi, S., <i>Int. J. Mech. Sci.</i> , 22- 9(1980), 583.
-