ショットピーニング痕に対する有限要素解析*

当舎勝次**, 平井信幸***

Finite Element Analysis on a Dent Fromed by a Single Shot

Katsuji TOSHA, Nobuyuki HIRAI

This paper presents several finite element analyses on a dent produced by a single shot. A finite element model is discussed in order to clarify the influences of peening conditions and characteristics of material on the surface aspect. The following points are presented; (1) Dent form is influenced significantly by the yield stress of work material, but not influenced by density and Poisson's ratio. (2) Influence of Tangent modulus on the Dent form, which is work hardening coefficient, is low whenever Yield stress is high. (3) Finite element analysis method (FEM) is able to represent almost exactly dent forms.

Key Words : shot peening, finite element analysis, dent form, diameter of dent, depth of dent.

1. 緒 言

ショットピーニングは材料依存性が少なく, 他の加工技術と比較して安価で疲労強度向上を図ることができる噴射加工法であるが¹⁾, 適正な加工を行なうためには, 加工条件や材料特性に応じてその都度, 多種多様な条件で検討をしなければならない. 近年, このようなムダを省く一方策として, 有限要素解析がショットピーニングの研究にも行なわれるようになった^{2)~6)}. しかし, それらの研究は残留応力に着目したものが多く, 表面粗さに対する体系的な研究は十分とは言えない状況にある. さまざまなピーニング効果を生む表面粗さの基本要素である痕形状に対する加工条件や材料特性の影響を明らかにすることは工業的にも重要である. そこで本研究では, 市販の有限要素解析ソフトを使用し, 単一ショットによる痕生成に関するシミュレーション解析を行なった.

2. 解析条件

解析ではTable 1に示す解析基本条件を基本として各条件を変化させ, Fig. 1に示す軸対称モデルを使用し行なった. Fig. 2には本研究で材料モデルに使用した2直線近似等方硬化則の引張特性を示す. 図中のTangent modulus (接線係数)

は塑性変形域での傾きで, 加工硬化指数にあたるものである. 今回の解析では, Fig. 3に示す痕形状をもとに痕径ならびに痕深さについて検討した. 痕径はパイリングアップ部の最高地点の間隔とした.

3. 解析結果

本研究の解析目的は高硬度材をターゲットとしたものであるが, 今回の報告では始めにショットの速度, サイズ, 密度の影響を示し, 一般的な加工条件が痕形状に及ぼす影響を把握した後, 被加工材特性値 (密度, ヤング率, ポア

Table 1 Conditions for analysis

Modeling	Axi-symmetric (twodimensional)	
Shot velocity v m/s	60	
Shot diameter D mm	1.2	
	Shot	Work material
Material model	Rigid	Bilinear isotropic hardening model
Density ρ g/cm ³	7.8	7.8
Young's modulus E GPa	200	200
Poisson's ratio ν	0.28	0.28
Yield stress σ_y MPa	—	1450
Tangent modulus E_t MPa	—	2500

原稿受付日 2007年1月17日

* 日本ばね学会2006年度秋季講演会

** 明治大学 (Meiji University)

*** キヤノン (Canon Co.)

Fig. 1 Analysis model

Fig. 2 Stress-strain relation of work material

Fig. 3 Definitions on Dent size

ソン比, 降伏点, 接線係数)の影響について検討した. なお, 被加工材の密度は今回のような解析では影響がほとんど現れない事が予想されるが, 材質の異なる金属を解析する場合の考察基準となりうるため検討項目に加えた.

3.1 ショット速度, ショット径, ショット密度の影響

Fig. 4は痕形状に及ぼすショット速度の影響を示したものである. ショット速度が増加するとショットの運動エネルギーがその2乗に比例するためそれに応じて痕のサイズも大きくなる. 痕の形状自体にはあまり大きな変化は見られないが, パイリングアップ部のショットが接触した部分の形状が丸みを帯びた状態から角張った状態にわずかながら変化し, 最高位置が内側に移動する. Fig. 5は痕径に及ぼすショット速度の影響を両対数グラフ上に示したものであり, 痕径はショット速度の2/5乗程度に比例する結果となった. この指数の値は, 次に示す飯田らの運動方程式による解析⁷⁾

Fig. 4 Influence of shot velocity on dent form

Fig. 5 Relations between shot velocity

Fig. 6 Relations between shot velocity

の結果よりやや小さめとなっている.

$$d = k_d D v^{0.5}$$

$$h = k_h D v$$

この理由は, 飯田らの解析では, 剛体の球が半無限塑性体に衝突して静止した状態で解析を行ったもので, 今回の解析条件との違いや, 前述したようにパイリングアップ部の最高値がショット速度の増加と共に内側に移動すること, などによるものと考えられる. また, 図中で3種類のショット密度で直線の傾きにばらつきが見られるが, 本解析では, 盛り上がり部分の最高点をもとにしたことによるものと思われる. Fig. 6は痕深さに及ぼすショット速度の影響を示したものである. 指数は1~1.03の範囲となり, 痕深さはショッ

ト速度にほぼ比例し、飯田ら研究⁷⁾と同一の結果となった。

Fig. 7は痕形状に及ぼすショット径の影響を示したものである。ショット径が増加するとショット質量がその3乗に比例して増加するため、痕のサイズもそれに応じて増加するが、ショット速度の場合とは若干異なり、パイリングアップ部を含めた痕形状全体が相似的に増大する。Fig. 8は痕径に及ぼすショット径の影響を示したものである。指数は0.98~1.0の範囲となり、痕径はショット径にほぼ比例し、Fig. 9に示すように、指数は0.99~1.0の範囲となり、痕深さもショット径にほぼ比例する。これらの結果は、先に示した飯田らの解析結果と同一の結果となった。さらに、本研究ではショット径を変化させる場合には相似モデルを作成

Fig. 7 Influence of shot diameter on dent form

Fig. 8 Relations between shot diameter and diameter of dent

Fig. 9 Relations between shot diameter and depth of dent

して解析を行なっているために、1要素における変形状態が相似になったためであると思われる。

Fig. 10は痕形状に及ぼすショット密度の影響を示したものである。本研究ではショット体積を一定とした状態でショット密度を大きくしているため、ショット密度が増加するとショットの運動エネルギーが増加し痕のサイズも増加する。パイリングアップ部の形状に及ぼすショット密度の影響はショット速度の場合と同様で、パイリングアップ部の形状がわずかに変化する。Fig. 11は痕径に及ぼすショット密度の影響を示したものであり、痕径はショット密度の1/5乗程度に比例する。Fig. 12は痕深さに及ぼすショット密度の影響を示したものであり、痕深さはショット密度の1/2乗程度に比例する。

以上のように、ショットの運動エネルギーに関する因子であるショット速度、ショット径、ショット密度の増大が

Fig. 10 Influence of shot density on dent form

Fig. 11 Relations between shot density and diameter of dent

Fig. 12 Relations between shot density and depth of dent

痕形状に及ぼす影響として、形状自体はあまり変化せずに、痕のサイズが増大することを示す結果となった。

3.2 被加工材密度の影響

Fig. 13は痕形状に及ぼす被加工材密度の影響を示したものである。被加工材密度が変化しても痕形状はほとんど変化しなかった。その結果、Fig. 14に示す痕径、Fig. 15に示す痕深さもほとんど変化しない。本研究での被加工材密度の増加は、被加工材の大きさ（寸法）は変化させておらず体積が一定であるので、被加工材の質量が増加することと同一内容である。

3.3 被加工材ヤング率の影響

Fig. 16は痕形状に及ぼす被加工材ヤング率の影響を示したものであるが、その影響は僅かである。その結果、Fig. 17に示す痕径への影響も僅かではあるが、被加工材ヤング

Fig. 13 Influence of work density on dent form

Fig. 14 Relations between work density and diameter of dent

Fig. 15 Relations between work density and depth of dent

率が小さいほど痕径が増加する傾向を示している。またFig. 18に示すように、痕深さに及ぼす影響も小さい。

3.4 被加工材ポアソン比の影響

Fig. 19は痕形状に及ぼす被加工材ポアソン比の影響を示したものである。被加工材ポアソン比が変化しても痕形状には変化はほとんど見られなかった。またFig. 20に示す痕径、Fig. 21に示す痕深さもほとんど変化しない。

以上のように、被加工材の密度、ヤング率、ポアソン比に関しては痕生成に関して影響が非常に小さい。したがって、痕生成に関する解析を行なう場合は、材料ごとの正確な数値が判らない場合でも、ある程度予想される数値を入力すれば、材料の近似に問題ないと考えられる。

Fig. 16 Influence of work Young's modulus on dent form

Fig. 17 Relations between work Young's modulus and diameter of dent

Fig. 18 Relations between work Young's modulus and depth of dent

Fig. 19 Influence of work Poisson's ratio on dent form

Fig. 22 Influence of work yield stress on dent form

Fig. 20 Relations between work Poisson's ratio and diameter of dent

Fig. 23 Relations between work yield stress and diameter of dent

Fig. 21 Relations between work Poisson's ratio and depth of dent

Fig. 24 Relations between work yield stress and depth of dent

3.5 被加工材降伏点の影響

Fig. 22は痕形状に及ぼす被加工材降伏点の影響を示したものである。被加工材降伏点が増加すると、塑性変形が開始するまでに要する応力が大きくなるため、被加工材の変形が小さくなり、痕形状は小さくなる結果となる。Fig. 23は痕径に及ぼす被加工材降伏点の影響を示したものであるが、被加工材降伏点が2000MPaを越えるとパイリングアップ部の頂点が不明瞭になり、その決定が困難になる。図中のバラツキはそのためのものである。Fig. 24は痕深さに及ぼす被加工材降伏点の影響を示したものである。両者は直線的な関係とならず、2000MPa程度を越えると痕の深さが急激に減少し、さらに5000MPa以上では痕がかなり扁平な形状になった。

被加工材降伏点は2直線近似等方硬化則を使用した今回の解析においては、ショットの運動エネルギーに関する因子以外で最も影響を及ぼす因子であった。

3.6 被加工材接線係数の影響

接線係数は塑性変形領域における、弾性変形領域でのヤング率に相当する因子であり、加工硬化指数に相当する因子である。したがって、被加工材接線係数が増加すると塑性変形量が減少し、逆に被加工材接線係数が減少すると塑性変形量が増加する傾向はあるが、Fig. 25に示すように、その影響は非常に僅かである。しかし、被加工材降伏点はかなり小さい場合には、Fig. 26に示すように痕形状のうちパイリングアップ部の高さにその影響が現れる結果を示している。

Fig. 25 Influence of work tangent modulus on dent form

Fig. 26 Influence of work tangent modulus on dent form (Yield stress 300MPa)

3.7 硬さと降伏点との関係

今回使用した解析ソフトには硬さ値を入力する項目がなく利用できないが、硬さはショットの場合でも測定が可能のため、解析を行う場合には非常に便利である。降伏点と硬さ値の関係はFig. 27に示すように西畑らの研究⁸⁾によりある程度判っているため、硬さ値を一旦降伏点に置き換えて入力することで、今回のような解析も可能と思われるが、本報告ではその関係を使用しての解析結果は行わなかった。

4. 結 言

以上のように、市販の有限要素解析ソフトを使用してショットピーニングによる痕生成に関する解析を行った結果、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 被加工材の特性値として痕形状に及ぼす影響が大きい要因は降伏点であり、密度、ポアソン比の影響は僅かである。
- 2) 被加工材の接線係数の影響は、降伏点が低い場合には痕形状に影響するが、高い場合にはその影響は僅かである。
- 3) 痕径と要因との関係式から指数のみ列記すると、

$$v:1/2, D:1, \rho_s:1/5, \rho_w:\div 0, E_w:1/100\sim 3/100, \nu_w:0\sim 3/50, \sigma_{yw}:\div 0.$$

Fig. 27 Relation between hardness and yield stress ⁸⁾

- 4) 痕深さと要因との関係式から指数のみ列記すると、

$$v:1, D:1, \rho_s:1/2, \rho_w:\div 0, E_w:0\sim 2/100, \nu_w:3/100\sim 5/100, \sigma_{yw}:\div 0.$$

- 5) 市販の有限要素解析ソフトは痕生成に関して活用可能である。

謝 辞

本研究は、日本ばね学会2005年度研究助成により行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) ショットピーニング技術協会編：金属疲労とショットピーニング，(2003)，PP9-12，現代工学社。
- 2) Emanuelle Rouhaud, David Deslaef: Influence of Shot's Material on Shot Peening, A Finite Element Model, Material Science Forum, 404-407 (2002), 153.
- 3) Yuansong Zeng: Finite Element Simulation of Shot Peen Forming, Proc. ICSP8 (2002) p554.
- 4) S. Al-Hassani: Numerical Simulation of Multiple Shot Peening, Proc. of ICSP7 (1999) p217.
- 5) A. Tange, H. Okada: Shot Peening and Coverage, Proc. ICSP8 (2002) P516.
- 6) Jochen Schwarzer, Volker Schulze, Otmar Vohringer: Finite Element Simulation of Shot Peening - A Method to Evaluate the Influence of Peening Parameters on Surface Characteristics, Proc. ICSP8 (2002), 507.
- 7) 大越詢，飯田喜介：球の衝撃作用の解析，精密機械，23-12 (1957)，573.
- 8) 吉沢武男編：硬さ試験とその応用 (第2版)，(1971)，p287，裳華房。