ショットピーニング加工面の残留応力*

—被加工材の寸法による変化—

飯田 喜介** 当 舎 勝 次**

Influence of Work Size on the Residual Stress Induced by Shot Peening

Kisuke IIDA and Katsuji TOSHA

Several experiments were run to study the influences of work size on the residual stress induced by shot peening. Shot peening was performed for steel (0.45%C) and influences were discussed on the surface residual stress, arc height and half width. The results are as follows: (1) Residual stress on the peened surface shows the size effect for the work thickness, and the critical thickness is 5 times to the depth of work hardened layer produced by shot peening for annealed steel. (2) The size of specimen does not affect on the surface residual stress for the square form. (3) The surface residual stress shows anisotropy for the rectangular specimen and the value on the longitudinal is lower than that on the latitudinal. (4) The more the kinetic energy of a shot, the more the anisotropy. (5) The maximum difference from anisotropy of surface residual stress was 77% and 88 MPa in this experiment.

Key words: shot peening, surface residual stress, arc height, size effect, critical thickness for residual stress

1. 緒 言

ショットピーニング加工面に生じる圧縮残留応力は非加工層の存在によって生じることはすでに報告した¹⁾。また加工面の残留応力は加工条件だけで決定されるのではなく、加工物の板厚に対して寸法効果を示す²⁾。

この残留応力の寸法効果があらわれ始める板厚（限界板厚）はショットピーニングの投射条件により変化し、限界板厚以下になると表面残留応力は減少し、板厚と加工硬化層深さが等しい場合、すなわち加工深さが板厚全部に及ぶと表面残留応力はゼロとなる³⁾。さらに、加工面の残留応力は試験片の形状が正方形でない場合には異方性を示す⁴⁾。

本報はショットピーニング加工面の残留応力について検討するために、鋼 (S 45 C : C ; 0.45%) にショットピーニングを行い、X 線回折により表面残留応力を測定して投射条件と限界板厚との関係ならびに形状比の相違による残留応力の方向性のあらわれ方などについて検討したものである。

2. 実験条件および方法

表 1 は加工装置、ショットピーニングの加工条件、試験片および残留応力測定について示したもので、残留応力値は次式により算出した。

$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial \sin^2 \Psi}$$

であり、 $\nu=0.28$, $E=206 \text{ GPa}$ とした。ここで、 E : 縦弾性係数, ν : ポアソン比, θ_0 : 標準ブラッグ角, 2θ : 回折角, Ψ : 加工面の法線に対する X 線入射角。

試験片の板厚および形状は表 1 に示すように種々変化した。試験片の縦横比（長さ L /幅 W ）を形状比とし、本実験では 1~4 まで変化した。長さ 76 mm, 幅 19 mm の形状比が 4 の試験片はショットピーニングの加工強度の測定に用いられているアルメンストリップと同一形状である。

X 線の照射面積は 1 mm × 14 mm であるが、形状比が 2~4 の長方形試験片では図 1 に示すように (a) が L 方向の残留応力であり、(b) が W 方向の残留応力である。

半価幅は (211) 面の X 線回折から重心法により求めた値で、 Ψ 角が 0~60° のものを平均して求めた。

硬さ分布の測定はマイクロビッカース硬度計を用い、加工面に垂直な断面を加工面から内部に向かって

* 原稿受付 昭和 62 年 1 月 6 日。昭和 60 年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和 60 年 10 月 14 日）にて発表

** 正 会 員 明治大学工学部（川崎市多摩区東三田 1-1-1）

Table 1 Experimental conditions

Peening machine	centrifugal type
Shot	cast steel (HV 800)
	diameter D mm 0.55, 1.1, 2.2
	shot velocity V m/s 15, 20, 35
Peening conditions	peening time T s $1-T_f^*$
	P 1 $D : 2.2$ mm, $v : 35$ m/s
	P 2 $D : 1.1$ mm, $v : 20$ m/s
	P 3 $D : 0.55$ mm, $v : 20$ m/s
Work	material 0.45%C annealed
	length L mm 6, 12, 19, 25, 38, 57, 76
	width W mm 6, 12, 19, 25
	thickness t mm 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 5.8
Residual stress measurement	X-ray diffraction $\sin^2\psi$ method, (211)

* T_f : full coverage time **Fig. 1** Direction of X-ray irradiation and surface residual stress

荷重 100 gf または 200 gf で 3 か所の痕の直下を測定し、同一深さの値を平均してその深さの硬さとした。加工硬化層の深さは硬さが焼きなまし材と同一の値となった時の深さである。

試験片のマクロ的変形には従来アークハイトが用いられている。変形が均一であるとき、図 2 に示す式が成立し、マクロ的変形は曲率半径によって表すことができる。アークハイトの測定は 1/1000 mm のパーニヤ付きマイクロメータで測定し、長さは 1/100 mm のマイクロメータで測定した。

$$\rho = \frac{L^2 + 4 h_a^2}{8 h_a}$$

h_a : arc height
 L : length of specimen
 ρ : radius of curvature

Fig. 2 Arc height and radius of curvature **Fig. 3** Size effect of surface residual stress for the thickness of specimen t_c ; critical thickness

3. 実験結果

表面残留応力に影響を与える試験片の寸法として考えられるものは、板厚と形状比がある。

3.1 板厚の寸法効果と限界板厚

表面残留応力の板厚による寸法効果を形状比 1 (25 mm×25 mm) の場合について示したものが図 3 である。それぞれの照射条件で異なった限界板厚 t_c が存在し、限界板厚を越えると表面残留応力は板厚の影響を受けないが、それ以下では板厚の影響を大きく受け、板厚と加工硬化層深さが等しい場合、応力値はゼロとなる。

限界板厚は投射エネルギーによって変化するが、投射エネルギーの変化は表面粗さや加工硬化層深さ δ などを変化させる。ショットピーニング加工面の残留応力が表面粗さに影響されないことはすでに報告した通りである⁵⁾。投射エネルギーと限界板厚および加工硬化層深さとの関係を示したものが図 4 であり、限界板厚、加工硬化層深さ共に投射エネルギーの 1/4 乗に

Fig. 4 Relation between kinetic energy of one shot (KE) and critical thickness of specimen (t_c), depth of work hardened layer (δ) and ratio t_c/δ

Fig. 5 Surface residual stress on the square specimen

比例する。従って限界板厚と加工硬化層深さとの比 (t_c/δ) は投射エネルギーに影響されず、その値は5.0となる。言い換えれば、ショットピーニングの投射条件に対する限界板厚は、その条件で焼きなまし材に加工した場合に生じる加工硬化層の深さの5倍である。

3.2 正方形試験片における一辺の長さで残留応力

形状比を変化させることは試験片の一辺の長さを変化させることになるので、まず正方形試験片の場合における一辺の長さの表面残留応力に及ぼす影響を検討した結果が図5である。一辺の長さが6~25 mmの範囲では表面残留応力に変化は認められず、L方向、W方向共に同一の値となって等方性を示している。

3.3 投射時間の曲率半径、半価幅、表面残留応力に及ぼす影響

さらに形状比が1で一辺の長さが50 mmの試験片にショットピーニングを行った場合の曲率半径、半価幅、表面残留応力について投射時間による変化を示したものが図6である。

投射時間の増加に伴って曲率半径は急激に減少し、

Fig. 6 Influence of peening time on radius of curvature, half width and surface residual stress for $R=1$

試験片の変形が進むことを示しているが、LとWの方向による差異はない。ミクロ的結晶の変形状態を表す半価幅にも方向の差異はなく、投射時間の増加と共に単調増加し飽和の傾向を示している。表面残留応力も半価幅と同様の傾向を示すが、飽和値に達するまでの時間は表面残留応力の方が短い。

アルメンストリップと同形で形状比が4の場合の曲率半径、半価幅、表面残留応力を示したものが図7である。

曲率半径はL方向とW方向とで差が認められ異方性を示すが、W方向の変形が大きくなっている。半価幅には方向による差は認められず、図6に示した場合と同一の結果となる。表面残留応力には方向の差があらわれ異方性を示すが、図6の形状比が1の場合と比較すると、L方向の残留応力がW方向のものに対して23%減少している。

図3に示したように寸法効果の結果、表面残留応力がゼロとなるような試験片の板厚が薄い場合には図8に示したように形状比が4であっても残留応力は発生せず、したがって異方性もあらわれない。

3.4 試験片の板厚と表面残留応力の異方性との関係

上述のように試験片の板厚により表面残留応力の異方性が異なるので、形状比が4で板厚が0.5~5.8 mmの場合の異方性のあらわれ方を示したものが図9、図10である。

図9と図10は投射エネルギーの違いによるもので

Fig. 7 Influence of peening time on radius of curvature, half width and surface residual stress for $R=4$

Fig. 8 Influence of peening time on surface residual stress, where the thickness of specimen and the depth of work hardened layer are overlapped

Fig. 9 Anisotropy of surface residual stress for the thickness of specimen under large kinetic energy of one shot

あるが、P1, P2 共異方性のあらわれ方の傾向は同様で、図9の場合L方向の残留応力がW方向のものよ

Fig. 10 Anisotropy of surface residual stress for the thickness of specimen under small kinetic energy of one shot

Fig. 11 Influence of kinetic energy of one shot on surface residual stress for $R=1$

Fig. 12 Influence of kinetic energy of one shot on surface residual stress for $R=4$

り約88 MPa 低く、図10の場合の両者の差は約39 MPa である。

3.5 投射エネルギーと表面残留応力の異方性との関係

形状比が1の場合と4の場合について投射エネルギーとの関係で示したものが図11と図12である。

形状比が1の場合、図11に示すようにすべての場合等方性を示し、投射エネルギーを約200倍増加させた場合には表面残留応力値は約25%減少する。図12に示す形状比が4の場合、表面残留応力の異方性のあ

Fig. 13 Influence of size ratio (R) on radius of curvature, half width and surface residual stress under large kinetic energy of one shot

Fig. 14 Influence of size ratio on the anisotropy of surface residual stress

らわれ方は投射エネルギーによって異なるが、投射エネルギーの増加と共に異方性は大きくあられ、L方向の値が小さい。

3.6 形状比と曲率半径、半価幅、表面残留応力との関係

形状比を変化させて試験片の曲率半径、半価幅および表面残留応力のあられ方を示したものが図13である。半価幅には形状比の影響は認められないが、曲率半径、表面残留応力には影響する。

投射エネルギーが比較的小さい場合の結果を示したものが図14で、傾向は図13の場合と同様であるが、異方性のあられ方は少ない。

4. 検 討

図13に示したように半価幅には形状比の影響があ

らわれないが、曲率半径や表面残留応力に形状比の影響があらわれるのは次のような理由によるものと考えられる。

長方形の被加工材において長手方向の変形量を ΔL 、それと直角方向の変形量を ΔW とし半価幅には異方性があられないので $\Delta L = \Delta W$ とすると、両者のひずみはそれぞれ $\Delta L/L$ と $\Delta W/W$ とになって、 $W < L$ より $\Delta L/L < \Delta W/W$ となる。したがってこのひずみの差が曲率半径の違いとなり、結果的に表面残留応力にその影響があらわれるものと考えられる。

5. 結 論

ショットピーニング加工面の残留応力の特性を検討するために、鋼に種々の投射条件で加工を行い、被加工材の曲率半径、半価幅、表面残留応力などを測定して、被加工材の厚さと形状比が加工面の残留応力のあられ方に及ぼす影響を明らかにした。従来等方性であるとされていた加工面の残留応力⁶⁾に異方性を示す場合があることも明らかにした。

- (1) 加工面の残留応力に板厚の寸法効果のあらわれ始める板厚（限界板厚）は焼きなまし材に加工した場合に生じる加工硬化層深さの5倍である。
- (2) 正方形の被加工材では一辺の長さは表面残留応力に影響せず、等方性を示す。
- (3) 長方形の被加工材では曲率半径および表面残留応力に異方性があられ、長手方向の残留応力値の方が低い。
- (4) 表面残留応力に被加工材の形状による異方性があられる場合、投射エネルギーが大きい程異方性も大きい。
- (5) 本実験における最大の異方性は投射エネルギーが最大で形状比が4のときあられ、試験片が限界板厚以上の場合、長手方向の残留応力値はそれと直角方向の応力値の77%であり、その差は88 MPaであった。

参 考 文 献

- 1) 飯田喜介, 当舎勝次: ショットピーニング加工面の残留応力, 精密工学会誌, **52**, 3 (1986) 535.
- 2) K. Iida & K. Tosha: Variation of Residual Stress on Work Hardened Surface and Size Effect of Surface Residual Stress by Shot Peening, Bull. JSPE, **17**, 2, (1983) 127.
- 3) 文献1), p. 539.
- 4) 飯田喜介, 当舎勝次: ショットピーニング加工面の残留応力, workの形状による変化, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1985) 361.
- 5) 文献1), p. 537.
- 6) 精機学会編: 新訂精密工作便覧 コロナ社 (1970) 840.