鋼球の衝撃による Indentation について*

正会員 大 越 諄** 飯 田 喜 介**

On the Indentations of Impact by Steel Balls

Makoto OKOSHI and Kisukey IIDA

In order to obtain the relations between the indentations and the conditions of impact as the basis for shot peening, flat piece of steel was clamped to a large solid block and shot by hard steel ball.

The result obtained is expressed by equations (1)~(5) in the paper with the following nomenclature: d, h, V = chordal diameter, depth and volume of indentation, D, v = diameter and velocity of steel ball, k_d, k_h, k_v = material constant.

Force of impact is connected to the equivalent static pressure (P) from the chordal diameter of indentations penetrated by the method above mentioned and static loading by the Vickers hardness testing machine.

1. 緒 言

Shot peening, grit blasting, sand blasting 及び Liquid honing 等粒子を work に噴射してその表面を加工する所謂噴射加工法が最近各方面で行われる様になって来た。此の加工法は従来からの種々の加工法と比較して幾多の長所があるが特に槌打効果 (peening effect) を伴う事が特徴で、之に依り、work の疲労強度及耐腐耗性は非常に増大する。

この槌打効果を伴う 噴射加工機構を明らかにする為には、其の基礎として、単一粒子の作用を知る必要がある。現在、噴射加工では shot peening に用いられている粒子が $4 \sim 0.5\text{mm}$ で最も大きく、grit blasting 及 sand blasting では $3 \sim 0.2\text{mm}$ 、liquid honing では #60~#5000 程度のものであるが、此の様な微小粒子一個の為す作用を定量的に観察する事は、その精度の上から充分なものを得る事が期待出来ない。以上の理由から本研究は実際の噴射加工に用いられているものより大きい径の鋼球数種を選び、之を種々の条件で試験片に投射して、其の際生ずる外部変形量を測定し、之と投射条件との関係を求め、噴射加工に対する基礎的研究を行つたものである。

2. 実験方法

投射球は直径 $\frac{3}{16}'' \sim \frac{11}{16}''$ までの鋼球7種を用いた。之は Hv : 900 のボールベアリング用鋼球である。試験片は 0.2%炭素鋼を 25mm 角、厚さ 10mm に仕上げた後焼準し、#240~#300 までの5種類のエメリーペーパーに依り鏡

面仕上をした。

試験片の厚さによる影響を調べる為、5~25mmまで5種類の厚さの試験片に対して同一条件で実験を行つた結果、此の範囲に於ては厚さの相異に依る影響は認められなかつた。

球の投射方法は、低速投射には重力加速度を利用した図 1 に示す如き落下法、即ち電磁石に依り鋼

図 1 A : 試験片, B : 球, C : 支持台, D : 電磁石, E : 脚立

図 2 高速投射装置

A : 試験片, B : 投射銃, C : 減圧弁, D : ボンベ, E : 光束筒, F : ストロボ円板, G : 反射鏡

* 昭和29年10月24日精機学会秋季講演会にて発表

** 東京大学工学部

～3.72m の位置より試験片に衝撃を与える方法により、高速投射では図 2 に示す如きガス圧に依り投射し、夫々球の速度をストロボ撮影に依り測定した。

試験片に生じた痕を斜め上方より撮影したのが図 3 である。痕の形状は工具顕微鏡及表面検査機に依り測定した。

図 3
試験片：0.2% 炭素鋼，
投射球径：7.15mm，投射速度：28.7m/s

3. 実験結果

a. 痕 径

先ず落下法により最低落差 1m より最高 3.72m まで、落差を 1m 間隔にとつて球を自由落下させて試験片に衝撃を与え、之に依つて生じた痕径 d を測定し、之と球径 D 及落差 H との関係を求めたものが図 4 に実線で示す関係である。

図 4

一方 Vickers 硬度計の indenter を球にして静荷重試験を行い、之に依つて生じた痕径を球径及荷動 P に対して求めたものが図 4 に鎖線で示す関係である。図から明らかな様に、静荷重に於ける痕径と球径の關係に対して、衝撃に依る痕径と球径とは極めて規則的な關係にある事を示している。

静荷重と痕径に対しては 1908 年 E. Meyer¹⁾ は実験から

$$P = a d^n$$

$$n, a : \text{const}$$

の關係がある事を示している。

本実験の結果は次式であらず事が出来る。

$$d = k D^{0.107} P^{0.453} \dots \dots \dots (1)$$

$$k : \text{const}$$

噴射加工に於ては、痕径は area coverage を支配する因子である。之と投射球径及投射速度との關係を求めると図 5 の如く、

$$d = k_d D v^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

図 5

となる。 k_d は材質に依る定数²⁾である。

(2) 式は投射球の半分以上も入り込む様な塑性変形に対しては成立しなくなるものである。実際の噴射加工ではその様な大きい塑性変形をする様な加工は行わないのであるが、此の關係がどの程度の変形にまで成立つかを吟味する為、ガス圧に依る単一球の高速投射装置に依り実験を行い、痕径及球の速度を測定し、(2) 式を変形して $(d/D)^2$ と v との關係で示したのが図 6 である。此の場合の投射球径は $1/8$ から $11/16$ まで、速度は 4.43m/s より 25.2m/s までである。此の範囲に於ては未だ (2) 式の限界内にあり、 $(d/D)^2$ が 0.08 程度迄は充分成立つ事

図 6

1) E. Meyer : Untersuchungen über Härteprüfung u. Härte, Z. VDI Bd. 52, Nr. 21.

2) 之に就いては別報に詳述する予定

を示している。

(1)式及(2)式から痕径を媒介として球に依る衝撃力と衝撃条件の関係を求めると、

$$P = k' D^{1.97} v^{1.10} \dots\dots\dots (3)$$

$$k' : \text{const}$$

となる。

b. 痕の深さ

次に球の投射に依つて試験片に生じた痕の深さ h と投射条件の関係を求めると図 7 の如く、痕径同様規則的な

図 7

関係があり

$$h = k_h D v \dots\dots\dots (4)$$

$$k_h : \text{const}$$

となる。即ち球の投射に依つて生ずる痕の深さは、投射球径及其の速度に比例する。

痕の深さを求める際には痕径の中心から 稍離れた所を切断し、痕の中心と切断面とが一致する様に、測定しながら入念に研磨して深さを測定したものである。

切断面が痕の中心と一致しないで少し離れたとしても痕の深さに及ぼす影響は少く、之に依つて生ずる誤差は

図 8

次の如くなる。図 8 に於て、痕に接する直径 D の球を考え、この中心を通る面から Δx だけ離れた $A-A$ 面で痕を切断したとすると、痕の深さは Δy だけ少なくな

る。 $\Delta x = 0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$ 程度であり、投射球径は最小 4.76 mm であるが、生じた痕の D は之より大きい。 $D = 4.76 \text{ mm}$, $\Delta x = 0.02 \text{ mm}$ として計算すると

$$\Delta \theta \approx \frac{2 \Delta x}{D} = 8.40 \times 10^{-3}$$

$\therefore (\Delta \theta)^3 \approx 0$ として Δy を求めると

$$\Delta y = (\Delta x)^2 / D = 8.40 \times 10^{-5} \text{ mm}$$

即ち 0.1μ 以下となる。実際には $\Delta x < 0.01$ にする事は困難な事ではない。

痕の深さは噴射加工に於ける表面あらさを支配する因子である。

c. オーステナイト鋼に対する実験

(2)及(4)式の関係は0.2%炭素鋼に対して求めたものであるが、之が一般的なものである為には他の材料に対しても、同様な関係が成立しなくてはならない。此の為、加工硬化性の大きいオーステナイト鋼として、18-8 不銹鋼を用い、之に対して同様の実験を行つて見た。

其の結果は図 9 に示す如く、投射球径及速度に対しては軟鋼と同一の結果を示し、常数 k_d 及 k_h が異なるだけであつた。

図 9

此の結果から、(2)及(4)式は可成り一般的なもの

* 弾性恢復による。

ある事が推定される。

d. 痕体積

球の衝撃に依つて生じた痕の形状を欠球*として、その体積 V を求めると

$$V = \frac{\pi}{6} h \left(\frac{3}{4} d^2 + h^2 \right)$$

$h^3 \approx 0$ とすると

$$V \approx \frac{\pi}{8} d^2 h \dots \dots \dots (5)$$

$$= k D^3 v^2$$

$$= k_v M v^2$$

$k, k_v : \text{const}$
 $M : \text{投射球の質量}$

即ち球の衝撃に依つて生じた変形体積は、投射球の運動のエネルギーに比例する事になる。

之を吟味する為、種々の投射球の質量及速度を測定して、運動のエネルギーを求め、0.2% 炭素鋼試験片に生じた痕の直径及深さから体積を計算して、両者の関係を求めたものが図10である。図の直線は(5)式の関係である。明らかに変形体積と投射球の運動のエネルギーとは比例し、(5)式の誘導の際用いた(2)及(4)式は夫々妥当なものである。

4. 結 論

噴射加工の基礎実験として、0.2% 炭素鋼及18-8 不銹

* 回転楕円体とすると $V = \frac{\pi}{6} d^2 h$ となる。

図 10

鋼を試験片として 鋼球に依る単球投射衝撃実験を行い、次の如き結果を得た。

球で衝撃した際、作用する衝撃力は(3)式の如く、球の速度に略比例し、球径の略々自乗に比例する。

球で衝撃した際生ずる痕径は、球の速度の平方根に比例し、球径に比例する。

球で衝撃した際生ずる痕の深さは、球の速度及球径に比例する。

球で衝撃した際生ずる痕の体積は、球の運動のエネルギーに比例する。

本研究は昭和28年4月から行つたもので、此の実験の一部には、当時東京大学工学部精密工学科学生であつた三谷喜男君の御協力があつた事を記して感謝の意をあらわす次第である。

(1957, 3月12日受付)

時計ひげぜんまいの非直線性について (第4報)

正 会 員 大 島 康 次 郎*

On the Non-linearity of Watch Hairsprings (Part IV)

Yasujiro OSHIMA

In the preceding report, the author tried the theoretical analysis concerning the influence of the strain at the outer fixed point of the hairspring and found the coincidence with the experimental results. However, the variation of the oscillation period derived from the same theoretical basis differed from the experimental results to some extent.

In order to make the source of this difference clear, he measured the displacements of the outer terminal of the hairspring model supported as the free end spring and compared with the theoretical values.

He also measured the reaction forces at the fixed outer terminal of the hairspring model. The results of measurement and considerations of them are described in this report.