620.178.152.42.088 : 539.531

ロックウェルかたさの誤差について*

(第3報, 鋼球圧子の鋼球直径の誤差の影響)

山城 貞 男**

On the Errors of Rockwell Hardness Number
(3rd Report, The Effect of the Error of Steel Ball Diameter)

by Sadao YAMASHIRO

On the error introduced into Rockwell hardness numbers by the error of steel ball diameters, this paper reports the results of experiment and the calculated results from Meyer's law.

Results obtained by observation and theoretical calculation respectively coincided well with each other. Accordingly, the errors caused by the errors of total load W_2 kg, preliminary load W_1 kg and diameter D mm are shown as follows:

$$\begin{aligned}\Delta H_{RB} &= (130 - H_{RB})(0.0136 \Delta W_1 - 0.0101 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta H_{RG} &= (130 - H_{RG})(0.0091 \Delta W_1 - 0.0064 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta H_{RF} &= (130 - H_{RF})(0.0232 \Delta W_1 - 0.0184 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta H_{RE} &= (130 - H_{RE})(0.0136 \Delta W_1 - 0.0101 \Delta W_2 + 0.233 \Delta D), \\ \Delta 45 T &= (100 - 45 T)(0.0303 \Delta W_1 - 0.0214 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta 30 T &= (100 - 30 T)(0.0452 \Delta W_1 - 0.0335 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta 15 T &= (100 - 15 T)(0.0949 \Delta W_1 - 0.0770 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D).\end{aligned}$$

1. ま え が き

ロックウェルかたさBスケール用鋼球圧子にたいして, JISのB7726-1955では「鋼球はJIS B1501-1956に適合するものを用いる」と規定している. B1501(玉軸受用鋼球)には径1.5875 mm (1/16 in)の場合には小さすぎて記載されていないが, B1502-1958(小径鋼球)には1.5875 mmの基本径に対する許容誤差は -0.010 mm から $+0.005$ mm である. 本報告はこの鋼球径の誤差によりかたさ値がどれほど影響されるか調べるとともに理論的考察を試みた. そして諸文献と比較するとともに, 同じ考えで導入した第1報⁽¹⁾の荷重の誤差式を加え鋼球圧子使用のロックウェルかたさに対する誤差式を導いた.

2. 実 験

下記の条件にて, それぞれの場合のロックウェルかたさ値を求めた.

試験機: 普通の市販ロックウェルかたさ試験機.

鋼球の直径: 1/16 in (1.5878 mm), 3/32 in (2.3813 mm), 1/8 in (3.1750 mm) の3種類.

試験荷重: 60 kg, 100 kg, 150 kg の3種類.

試料: 7:3 黄銅 H_{RB} 用かたさ基準片5個 (BsP 1, H_{RB} 約 94, 80, 60, 35, 21), 鋼製かたさ基準片2個 (軸受鋼製基準片1個 SuJ 2, H_{RB} 約 92, 炭素鋼製基準片1個 S20C, H_{RB} 約 74), アルミニウム合金試験片2個 (63S, H_{RB} 約 57, 17S, H_{RB} 約 10). 試料の厚さは後の3個が10 mmで, その他は約7 mm.

測定値: いずれも5点測定の平均値.

このロックウェルかたさ H_R 値を(1)式に代入して計算した h mm と, 鋼球径 D mm との関係を両対数目盛であらわしたのが第1図および第2図である. $\log h$ と $\log D$ はほぼ直線関係にあるので⁽²⁾(2)式のようにあらわされる.

$$H_R = 130 - 500 h \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$h = k D^{-m} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし k は定数. したがって(1)および(2)式から H_{RB} の場合に D の誤差 ΔD による H_{RB} の誤差 ΔH_{RB} は(3)式のようなになる.

$$\frac{\Delta H_{RB}}{130 - H_{RB}} = -m \frac{\Delta D}{D} \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 昭和34年3月20日 関西支部第34期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和35年6月30日.

** 正員, 大阪工業技術試験所 (大阪市大淀区大仁西2).

m の値と試料のかたさとの関係を示したのが、第 3 図および第 4 図である。第 1, 2 図から m の値は $1/16 \sim 3/32$ in 間および $3/32 \sim 1/8$ in 間で一般的に前者の値のほうがやや大きい、大差ないので第 3, 4 図にはその平均値がとってある。第 5 図の実験値 (丸印) は鋼球径 D の JIS の許容限界すなわち $\Delta D = -0.010$ mm および $+0.005$ mm と、実験によってえられた m の値を (3) 式に入れて求めた ΔH_{RB} である。

第 6 図および第 7 図の各試料のマイヤー指数 n を求めるために行なった実験結果で、 $1/16$ in 鋼球でのくぼみの直径 d' と荷重 W との関係を示した。だいたい $\log d'$ と $\log W$ とは直線であり、 n はこの直線のこう配でその値は第 1 表に示す。 $1/8$ in 鋼球の場合も n の値は ± 0.05 程度の相違で $1/16$ in 鋼球の場合と一致した結果になった。

3. 考 察

負荷時の圧子の侵入深さを t mm, 基準平面におけるくぼみの直径を d mm, さらに基準荷重 W_1 , 試験荷重 W_2 のときの t を t_1, t_2 , d をそれぞれ d_1, d_2 とする。一般にいわれるくぼみの直径は第 8 図 (b) のように荷重除去時の盛上がりを含めた直径 d' で

あるが、ここでは (a) 図のように盛上りを含めない基準平面におけるくぼみの直径 d である。鋼球径を D mm とする。負荷中の鋼球径の変化は無視できるものとすれば、簡単な幾何学的関係から、

第 1 図 $\log D$ と $\log h$ との関係 (黄銅試料の場合)

第 2 図 $\log D$ と $\log h$ との関係 (鋼, Al 合金の場合)

第 3 図 H_{RB} と m との関係
(黄銅試料の場合)

第 4 図 H_{RB} と m との関係
(鋼, Al 合金試料の場合)

$$(D-t)t = d^2/4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

t_1, t_2 が D にくらべて相当小さいとすれば,

$$t_1 \doteq d_1^2/4D \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$t_2 \doteq d_2^2/4D \quad \dots\dots\dots (6)$$

くぼみの直径方向の弾性回復を無視し、マイヤー法則は負荷時の W, d, D の関係にも成立すると拡大して解釈すれば⁽¹⁾,

$$W_1 = Ad_1^{n_1}/D^{n_1-2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$W_2 = Ad_2^{n_2}/D^{n_2-2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし A は材料によってきまる定数である。(7), (8)

式を用いると, (5), (6) 式はそれぞれ

$$t_1 = \frac{1}{4} A^{-2/n_1} W_1^{2/n_1} D^{(n_1-4)/n_1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$t_2 = \frac{1}{4} A^{-2/n_2} W_2^{2/n_2} D^{(n_2-4)/n_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

t_e を試験荷重から基準荷重にもどしたときの弾性回復量として,

$$\epsilon = t_e/(t_2 - t_1) \quad \dots\dots\dots (11)$$

とおき, ϵ は材料によってきまる定数とする。さらに,

$$n = n_1 = n_2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

とすれば,

$$h = t_2 - t_1 - t_e$$

$$= t_2 - t_1 - \epsilon(t_2 - t_1) = (1 - \epsilon)(t_2 - t_1)$$

$$= \frac{1}{4} (1 - \epsilon) A^{-2/n} (W_2^{2/n} - W_1^{2/n}) D^{(n-4)/n} \quad \dots\dots\dots (13)$$

鋼球径の変化 ΔD のみによる h の変化を求めると,

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{n-4}{n} \frac{\Delta D}{D} \quad \dots\dots\dots (14)$$

第5図 鋼球径の JIS 許容誤差による H_{RB} の誤差

第6図 $\log d'$ と $\log W$ との関係 (黄銅試料, 1/16 in 鋼球の場合)

第7図 $\log d'$ と $\log W$ との関係 (鋼, Al 合金試料 1/16 in 鋼球の場合)

第8図

一方 H_{RB} の定義から

$$H_{RB} = 130 - 500h \quad \dots\dots\dots (15)$$

ゆえに

$$\begin{aligned} \Delta H_{RB} &= -500 \Delta h \\ &= -\frac{n-4}{n} (130 - H_{RB}) \frac{\Delta D}{D} \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$\Delta D/D = +0.005 \text{ mm}/1.5875 \text{ mm} = +0.00315$ として各試料に対する n を第 6, 7 図より第 1 表のようにきめ, (16) 式によって ΔH_{RB} を計算した結果が第 1 表の近似計算式である. この近似計算値は実験値より 0.01~0.08 ほど小さいが比較的よく一致している. n の平均として $n=2.3$ とすれば (16) 式は (17) 式のようになり, 第 5 図の実線のようにあらわされる.

$$\Delta H_{RB} = 0.739(130 - H_{RB}) \Delta D/D \quad \dots\dots\dots (17)$$

4. 吟 味

次に実験値と近似計算値の差を吟味してみる. (3) 式の m は (16) 式の $(4-n)/n$ に相当している. それゆえ ΔH_{RB} の実験値と近似計算値の差は結局この m の違いである. 第 3 図や第 4 図のように m の実験値は第 6 図や第 7 図の n を用いた近似計算値より大きい. これはくぼみの直径 d と侵入深さ t との関係に (5), (6) 式の近似式を用いたことに一つの原因がある. (4) 式をとけば

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{2} \{D - D\sqrt{1 - (d/D)^2}\} \\ &= \frac{d^2}{4D} \left\{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{d}{D}\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{d}{D}\right)^4 + \dots\dots\right\} \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

$$\approx d^2/4D \quad \dots\dots\dots (19)$$

(18) 式による厳密な侵入深さを $\bar{t}$, (19) 式の近似の侵入深さを t とし, それに対応して (13) 式の h を $\bar{h}$ と h とすれば第 1 報の (59) 式から

$$\bar{h} = h \left(1 + \frac{\beta}{1-\epsilon} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \bar{h}\right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし $\beta = 1/D$, $\gamma = \bar{t}_1/\bar{t}_2 \approx (W_1/W_2)^{2/n}$ である. H_{RB} の場合を考えれば, $D = 1.59 \text{ mm}$, $W_1 = 10 \text{ kg}$, $W_2 = 100 \text{ kg}$ であり, $\epsilon = 0.1$ とすれば

$$\bar{h}_B \approx h_B(1 + 0.9 \bar{h}_B) \quad \dots\dots\dots (21)$$

同様に $D = 1.59 \text{ mm}$ で $W_2 = 150 \text{ kg}$, 60 kg の H_{RG} , H_{RF} では,

$$\bar{h}_G \approx h_G(1 + 0.85 \bar{h}_G) \quad \dots\dots\dots (21)'$$

$$\bar{h}_F \approx h_F(1 + 1.1 \bar{h}_F) \quad \dots\dots\dots (21)''$$

であらわされる. したがって

$$\Delta \bar{h}_B = \bar{h}_B(1 + 0.9 \bar{h}_B) \Delta h_B/h_B \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\Delta \bar{h}_G = \bar{h}_G(1 + 0.85 \bar{h}_G) \Delta h_G/h_G \quad \dots\dots\dots (22)'$$

$$\Delta \bar{h}_F = \bar{h}_F(1 + 1.1 \bar{h}_F) \Delta h_F/h_F \quad \dots\dots\dots (22)''$$

したがって近似計算で求めた m の値に対して, 100, 150, 60 kg のそれぞれに $(1 + 0.9 \bar{h}_B)$, $(1 + 0.85 \bar{h}_G)$, $(1 + 1.1 \bar{h}_F)$ すなわち $\{1 + 0.9(130 - H_{RB})/500\}$, $\{1 + 0.85(130 - H_{RG})/500\}$, $\{1 + 1.1(130 - H_{RF})/500\}$ を乗じて補正すればよい. その結果は第 3, 4 図に示すごとく実験で求めた m の値に近づく. 第 1 表の補正計算値は H_{RB} の場合の例で, 実験値と非常によく一致してくる.

(13) 式から (14) 式をみちびくときに ϵ を D に無関係な定数とおいたが, 実際には鋼球径による ϵ の変化が当然考えられる. また計算に用いた n の値は荷重を除いた後のくぼみから求めたものであるが, 実際に関係しているのは負荷時の n である. これらのことを考えると第 3 図および第 4 図の補正計算値の m と実験値の m の間に, なおいくらかの差があるものの比較的よく一致しているものと思われる.

5. 諸文献との比較

吉沢⁽²⁾は種々の材料の試料を用いて行なった実験結果を次の実験式にまとめている.

$$\Delta H_{RB} = m_{10}(130 - H_{RB}) \Delta D/D \quad \dots\dots\dots (23)$$

この m_{10} の値は 0.6~1.0 の範囲であり平均 0.78 としている. また Hengemühle⁽⁸⁾の結果は次式であらわされる.

$$\Delta H_{RB} = 0.77(130 - H_{RB}) \Delta D/D \quad \dots\dots\dots (24)$$

(23) 式と (24) 式とは非常によく一致している. また (23) 式は筆者の (16) 式の近似計算式によれば, $n = 2.5 \sim 2.0$ で平均値は $n = 2.25$ に相当していて,

第 1 表 $\Delta D/D = +0.00315$ ($\Delta D = +0.005 \text{ mm}$) による ΔH_{RB}

試料	7 : 3 黄銅					鋼		Al 合金	
	94	80	60	35	21	92	74	57	10
H_{RC}	94	80	60	35	21	92	74	57	10
n	2.14	2.23	2.29	2.33	2.36	2.34	2.26	2.08	2.31
実験値	0.11	0.15	0.19	0.25	0.28	0.10	0.15	0.25	0.36
近似計算値	0.10	0.12	0.16	0.21	0.24	0.08	0.14	0.20	0.28
補正計算値	0.11	0.13	0.18	0.25	0.29	0.09	0.15	0.23	0.34

第2表 鋼球圧子使用の各種ロックウェルかたさ

H_R	D in	W_1 kg	W_2 kg	算出式, h mm
G	1/16	10	150	$H_R = 130 - 500 h$
B			100	
F			60	
K	1/8	10	150	$H_R = 130 - 500 h$
E			100	
H			60	
45 T	1/16	3	45	$H_R = 100 - 1000 h$
30 T			30	
15 T			15	

(23), (24) 式は筆者の近似計算式と一致しているが, 補正計算式とは若干値を異にしている. 黒木⁽⁴⁾は完全塑性体に対する接触圧力の近似解を用いて, 侵入深さ, 荷重, 鋼球径の関係式を導き, 鋼球径の誤差式として次式を与えている.

$$\Delta H_{RB}(G, F) = (130 - H_{RB}(G, F)) \Delta D / D \cdots (25)$$

この式は筆者の (16) 式の $n=2.0$ に相当し, $m=1$ である. 筆者の補正計算式から求めた m は吉沢あるいは Hengemühle と黒木の結果の中間にある.

6. 結 論

第1報でのべた基準荷重 W_1 および試験荷重の誤差と本報の鋼球径 D の誤差を加えて, H_{RB} に生ずる誤差は次のように近似的にあらわせる.

$$\begin{aligned} \Delta H_{RB} = & \frac{2}{n} \frac{(130 - H_{RB})}{(W_2/W_1)^{2/n} - 1} \frac{\Delta W_1}{W_1} \\ & - \frac{2}{n} \frac{(130 - H_{RB})}{1 - (W_1/W_2)^{2/n}} \frac{\Delta W_2}{W_2} \\ & + \frac{4-n}{n} (130 - H_{RB}) \frac{\Delta D}{D} \cdots \cdots (26) \end{aligned}$$

$D=1.5875$ mm (1/16 in), $W_1=10$ kg, $W_2=100$ kg, $n=2.3$ とすれば,

$$\begin{aligned} \Delta H_{RB} = & 0.0136(130 - H_{RB}) \Delta W_1 \\ & - 0.0101(130 - H_{RB}) \Delta W_2 \\ & + 0.466(130 - H_{RB}) \Delta D \\ = & (130 - H_{RB})(0.0136 \Delta W_1 \\ & - 0.0101 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D) \cdots \cdots (27) \end{aligned}$$

鋼球圧子使用の他のスケール (第2表) に対しては (26) 式の W_1 , W_2 , D にそれぞれの値を代入して計算すれば,

$$\begin{aligned} \Delta H_{RG} = & (130 - H_{RG})(0.0091 \Delta W_1 \\ & - 0.0064 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta H_{RF} = & (130 - H_{RF})(0.0232 \Delta W_1 \\ & - 0.0184 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{RK} = & (130 - H_{RK})(0.0091 \Delta W_1 \\ & - 0.0064 \Delta W_2 + 0.233 \Delta D), \\ \Delta H_{RE} = & (130 - H_{RE})(0.0136 \Delta W_1 \\ & - 0.0101 \Delta W_2 + 0.233 \Delta D), \\ \Delta H_{RH} = & (130 - H_{RH})(0.0232 \Delta W_1 \\ & - 0.0184 \Delta W_2 + 0.233 \Delta D), \\ \Delta 45 T = & (100 - 45 T)(0.0303 \Delta W_1 \\ & - 0.0214 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta 30 T = & (100 - 30 T)(0.0452 \Delta W_1 \\ & - 0.0335 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D), \\ \Delta 15 T = & (100 - 15 T)(0.0949 \Delta W_1 \\ & - 0.0770 \Delta W_2 + 0.466 \Delta D) \end{aligned} \quad \cdots (27)'$$

補正值は (27) および (27)' 式の近似式のそれぞれに,

$$\begin{aligned} & \{1 + 0.9(130 - H_{RB})/500\}, \\ & \{1 + 0.85(130 - H_{RG})/500\}, \\ & \{1 + 1.1(130 - H_{RF})/500\}, \\ & \{1 + 0.4(130 - H_{RK})/500\}, \\ & \{1 + 0.45(130 - H_{RE})/500\}, \\ & \{1 + 0.55(130 - H_{RH})/500\}, \\ & \{1 + 0.85(100 - 45 T)/1000\}, \\ & \{1 + 0.9(100 - 30 T)/1000\}, \\ & \{1 + 1.15(100 - 15 T)/1000\} \end{aligned}$$

の補正項を乗ずればよい.

さらにかたさの単位であらわされる指示装置の誤差や, いわゆる機台のひずみ⁽²⁾による誤差が加わる.

鋼球圧子を使用するロックウェルかたさ値に及ぼす鋼球径の誤差の影響を実験的に求め, 別にマイヤー法則を拡大解釈して理論的な考察も試みたが, その結果この簡単な理論的考察は実験値と比較的よく一致して役に立つことがわかった.

本研究に多大の御指導を賜った東京大学 吉沢武男教授および計算や実験に多大の御援助にあずかった大阪工業技術試験所 植村幸生氏, 石橋 徹氏に厚く感謝する.

文 献

- (1) 山城, 本論文集, 1 ページ.
- (2) 吉沢, 機械学会論文集, 14, 46 (昭23), 36.
- (3) Siebel, *Handbuch der Werkstoffprüfung*, II (1955), 420, Springer-Verlag.
- (4) 黒木, 機械学会論文集, 26, 170 (昭35-10), 1435.