

庄子球材質の相違が硬さに及ぼす影響*

石橋達弥**, 下田 茂**

The Influence of Different Mechanical Properties
of the Spherical Indenters on Hardness

by Tatsuya ISHIBASHI and Shigeru SHIMODA

Hardness is influenced by the different mechanical properties of the spherical indenter in the elastic-plastic transient indenting process. To clarify that point, we indented steel and tungsten-carbide spherical indenters in the several standard blocks for hardness. In order to establish the relations of the elastic-plastic transient indenting process experimentally we related the hardness P_m (mean contact pressure) with a true profile coefficient of the permanent indentation: (d/D_p) , not with an apparent profile coefficient: (d/D) used traditionally, and formulated as follows; $P_m = P_{up}(d/D_p)^{2.7}$. We can calculate the hardness affected by the different mechanical properties of the spherical indenter using this formula for arbitrary conditions. Further, we compared the Brinell hardness obtained by Yoshizawa with our calculated values, and we obtained a good coincidence between them.

Key Words: Material Testing, Mechanical Property, Hardness, Mean Contact Pressure, Elastic-Plastic Transient Area, Profile Coefficient of Indentation, Spherical Indenter, Brinell Hardness, Deformation of Indenter

1. 緒 言

Brinell 硬さ試験では、硬さが320を越え450以下の場合、使用する庄子球材質により異なる硬さ記号、すなわち鋼球庄子の使用時は HBS、超硬合金球庄子の使用時は HBW を表示記号として定めている⁽¹⁾。さらに硬さが450を越えて規定の最高値650にいたるまでの範囲においては、超硬合金球庄子のみを用いることにしている。

このようなことは、庄子球の(1)材質〔ヤング率など〕の相違、(2)使用時の永久変形量の差異、といった点が、硬さに及ぼす影響として問題になるための措置である。

(1)は、荷重が低い場合、試料が硬い場合などの弾～塑性遷移押込み過程において生ずる問題であり、Hertz の法則でも、Meyer の法則でも十分に説明しきれない点である。

(2)は、試料に比べて庄子球の強度が十分でない場合に問題となる。

以上のような諸点に関し、本研究は(1)について考

察することに主眼をおいたもので、球庄子による弾～塑性遷移押込み過程での試料と庄子球との物理的諸量の関係を、これまでのやり方とは異なり平均接触圧力と永久くぼみの真の形状係数との関係に着目して実験的に求め、庄子球材質の相違が硬さに及ぼす影響を解析した。さらに硬い試料に対して得られる Brinell 硬さが、庄子球材質の相違と永久変形量との度合により与えられる点を、定量的に示すことで(2)についての考察も加えた。

2. 庄子球と試料との弾性接触

まず試料の塑性変形が始まる前の庄子球と試料との弾性接触状態について考える。

Meyer⁽⁴⁾と同じく平均接触圧力を硬さと定義し、(1)のように与え、また荷重と庄子球直径の二乗との比を荷重率⁽⁵⁾として式(2)で与える。庄子球と試料とが弾性接触をなす時の Hertz の法則⁽²⁾を要約して示すと、式(3)～(6)となり、庄子球材質の違いが硬さへ及ぼす影響は $f(E)$ を含む式(5)あるいは(6)で示される。例えば庄子球が剛体球 (Rigid ball)、超硬合金球 (W ball)、鋼球 (S ball) の各場合について、式(6)より得られる $P_{me} \sim (d_e/D)$ の関係を後出の図2、図3、図5に示してある。

* 昭和61年3月15日 東海支部第35期総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年3月11日。

** 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

$$P_{me} = 0.102 \times 4L / \{\pi d_s^2\} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_{LR} = 0.102L / D^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$L = d_s^3 / \{3Df(E)\} \dots\dots\dots (3)$$

$$f(E) = \frac{1-\mu_i^2}{E_i} + \frac{1-\mu_s^2}{E_s} \dots\dots\dots (4)$$

$$P_{me} = 0.102 \frac{4}{\pi} \left[\frac{9.8C_{LR}}{\{3f(E)\}^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (5)$$

$$P_{me} = 0.102 \frac{4}{3\pi f(E)} \left(\frac{d_e}{D} \right) \dots\dots\dots (6)$$

L: 荷重

d_e: 弾性接触時の接触直径

R, D: 圧子球の曲率半径, 直径

E_i, E_s, μ_i, μ_s: 圧子球と試料のヤング率, ポアソン比

f(E): 圧子球と試料の接触に関する弾性パラメータ⁽⁹⁾

C_{LR}: 荷重率

P_{me}: 弾性接触時の硬さ〔平均接触圧力〕

3. Meyer の相似則

次に, 試料の完全塑性変形状態における接触について考える。

接触荷重を増してゆくと, 球と試料の接触中心の下部で試料の塑性変形が始まり, それが次第に大きくなる弾～塑性遷移押込み過程を経て, ついに塑性変形領域が接触部全周を包むほどに拡大される。このような状態を試料の完全塑性変形状態ということにすれば, その時の関係を表すのが Meyer の相似則⁽⁴⁾であり, 要約して示すと式(8)～(11)のようになる。

この時にも前章と同じく, 式(7)に示す平均接触圧力を硬さと定義する。

さて式(10), (11)は, 試料が完全塑性変形状態の時には圧子球材質の違いが硬さに影響せず, 単に(d/D)が同じになるような押込み条件, すなわちLとDが変わってもC_{LR}が同じ値であれば同じ硬さが得られることを示している。また最終硬さP_u⁽³⁾とは, (d/D)=1の時の硬さP_mを意味する。

$$P_m = 0.102 \times 4L / \{\pi d^2\} \dots\dots\dots (7)$$

$$L = ad^m \dots\dots\dots (8)$$

$$P_u = 0.102(4a/\pi)D^{m-2} \dots\dots\dots (9)$$

$$P_m = P_u^{2/m}(4C_{LR}/\pi)^{(m-2)/m} \dots\dots\dots (10)$$

$$P_m = P_u(d/D)^{m-2} \dots\dots\dots (11)$$

a: 球径により異なる係数

m: 材料のみによる定数〔Meyer 指数〕

d: 永久くぼみ直径

P_u: 球の押込みによる最終硬さ

P_m: 硬さ〔平均接触圧力〕

4. 弾～塑性遷移押込み過程における永久くぼみ形状と形状係数

本章では試料が弾性と塑性の両方の性質を呈する, 弾～塑性遷移押込み過程を解析する際の基礎としてくぼみ形状を考察する。

4.1 永久くぼみの形状 球の押込みにより生じた永久くぼみの断面形状は, 図1のようにくぼみ周辺部の形状により(a)盛り形, (b)沈降形⁽⁵⁾とに大別される。著者らの実験では黄銅基準片の内, HRB 33と HRB 51は沈降形を呈したが, 黒木⁽⁶⁾による測定例に似て d≒d_sの関係がみられた。ここで d_sと δ_sとは試料面を基準とした時の永久くぼみの直径とくぼみ深さを表しているが, 高荷重の押込みでは盛り形を示す試料でも, 荷重が低くなるにつれて盛り量が減少し縁端部がなだらかになり, 次第に沈降形に近い形状へと変化してゆく。そのため, 後述の実験における高硬度試料に対する低荷重の押込みでは, dとd_sとの差はほとんど見られない。

4.2 くぼみ形状係数 弾～塑性遷移押込み過程においては, 除荷時に接触部分の深さ方向での弾性回復量が大きくなるため, 永久くぼみ面の曲率半径 R_p(=D_p/2)が圧子球の曲率半径 Rの数倍にも達するような浅底効果が起こる⁽⁵⁾。この効果は使用する圧子球材質の違いにより異なるため, それぞれの圧子球材質に応じた永久くぼみの形状が呈されることになる。

したがって本論文では, 従来近似的に同一として扱われてきたくぼみの形状を明確に区別するため, 次のようなくぼみ形状係数なる量を定義する。

(d/D): 永久くぼみの見かけの形状係数

(d/D_p): 永久くぼみの真の形状係数

4.3 くぼみ形状係数間の相互関係 Taborは, ひとたび形作られた永久くぼみ面に対しては, 再度同じ荷重で球圧子を押し込んで両者の接触は完全に弾性的であり, 図1に示す永久くぼみの直径 dとそれを生じさせた時の荷重 L, 永久くぼみの凹球面直径 D_pおよび圧子球と試料の弾性パラメータ f(E)の関係は, Hertzの球と凹球面との弾性接触関係式(12)を満足することを実証した⁽⁵⁾。

したがって, 両係数の関係は式(13)のようになる。

$$L = \frac{1-(D/D_p)}{3Df(E)} d^3 \dots\dots\dots (12)$$

$$\left(\frac{d}{D_p} \right) = \left(\frac{d}{D} \right) - \frac{3 \times 9.8 C_{LR} f(E)}{(d/D)^2} \dots\dots\dots (13)$$

5. 実験方法

5.1 圧子 直径がそれぞれ2mmと5mmの鋼球と超硬合金球を、圧子球保持具に接着固定することにより圧子とした。表1に圧子球諸元を示す。

5.2 試料 均質性、標準性の保証という点から、市販の Shore 用、RockwellB スケール用硬さ基準片を試料として用いた⁽⁷⁾。表2に試料諸元を示す。

5.3 荷重率 荷重9.8Nから490NまではVickers 硬さ試験機を、それ以上の荷重には最大4900Nまでの圧縮試験機を用いた。各荷重で3回ずつ、載荷時間は約30秒とした。この際、本報では圧子球に永久変形が生じない条件での実験を行うため、吉沢⁽⁸⁾による鋼球と超硬合金球の永久変形量に関する研究を参考とし、高硬度の試料に対しては最大荷重率を表3のように与えた。

5.4 永久くぼみ形状の測定 図1に示す永久くぼみ形状の諸寸法の測定は工具顕微鏡を用い、 d の測定は倍率50か100で、 d_s と δ_s の測定は倍率400で行った。同時に、各試料において数点ずつを輪郭測定器で測定し、比較対照することで顕微鏡測定の妥当性を確認した。

6. 実験結果と考察

6.1 圧子球の永久変形について 実験終了後、輪郭測定器で圧子球先端部の曲率を測定し永久変形の有無を検討した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

表3に示した最大荷重率の内、鋼球圧子(S5)をHS80の試料に対して $C_{LR}=7$ の条件で押込んだ時には、圧子球先端部に5~6%程度の永久変形が観測されたため、このデータは除外した。他の条件下での測定値は、校正用に測定した未使用球の曲率値(±3%位)の近傍にあることから、永久変形を生じなかったものとして扱った。

以下、実験により得られた硬さ P_m とくぼみの形状係数との関係について考察する。

6.2 $P_m \sim (d/D)$ 硬さ P_m を永久くぼみの見か

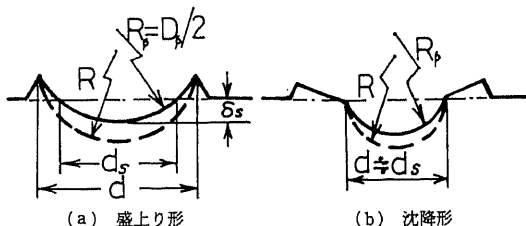


図1 永久くぼみの断面形状

けの形状係数 (d/D) に対して両対数グラフ上に示したのが、図2、図3中の白印である。硬さ P_m の単位はMPaであるが、Brinell硬さ試験やVickers硬さ試験の場合と同じく、数値に単位を付けずに示すことにする。

例えばHS40.4(HV276)やHRB80.6(HV155)のような軟かい試料では、 $(d/D) > 0.15$ 位では圧子球の違いによる硬さの差は見られず、このようなことがJISにおけるBrinell硬さ試験の範囲： $HB < 320$ で同一の表示記号を用いている理由である。なお実験点の重なりによる煩雑さをさけるために、この場合他の圧子球のデータを省いてある。

また、HS101(HV1000)やHS80(HV676)のようなごく硬い試料では、 (d/D) の大きい値でも弾~塑性遷移押し込み過程にあり、鋼球圧子による硬さは超硬合金球圧子による硬さよりも低い値を示し、圧子球材質の相違が顕著に表れている。

すなわち $P_m \sim (d/D)$ の関係に基づいた弾~塑性遷移押し込み過程では、圧子球材質の相違による硬さの差は試料が硬いほど、荷重が低くなるほど大きくなり、かつ (d/D) が小なるにつれて、Hertzの式(6)によ

表1 圧子球諸元

Indenter	Ball Material	D mm	E _i GPa	μ _i
S 2	Steel	2	201	0.29
S 5		5		
W 2	Tungsten	2	608	0.21
W 5	carbide	5		

表2 試料諸元

Standard Blocks for Hardness	Hardness		E _s GPa	f(E) 1/(10 ³ GPa)		
	HS	HV		S ball	W ball	
Steel	SK2	101	1000	188	9.38	6.36
		92	847		9.30	6.28
	SK5	80	676	191	9.18	6.16
		69	550			
		61	458			
		53	382			
	S20C	41	276	201	3.07	6.05
		31	206			
	SK5	22	138	211	8.86	5.84
		(101)	260			
Brass	C2600P	(81)	155	98	13.8	10.8
		(51)	97			
		(33)	79			

表3 高硬度試料に対する最大荷重率

Indenter	HS101	HS92	HS80	HS69	HS61
S 2	10	13.8	16.3	25	30
S 5	-	-	?	-	15
W 2	17.5	25	31.3	45	62.6
W 5	8.6	13	15	15	15

る $P_m \sim (d_e/D)$ の計算結果へと漸近してゆく傾向を示している。

6・3 $P_m \sim (d/D_p)$ 以上のような結果からすると、 P_m を (d/D) の関数として考えた場合 Meyer の式(11)のような簡単、明瞭な形で定式化を行うことは困難であることがわかる。

そこで著者らは $P_m \sim (d/D)$ の定式化を試みるに際して、まず弾～塑性遷移押込み過程では $D \neq D_p$ すなわちくぼみ形状は圧子球材質の影響を強く受ける点に着目し、除荷後の真の永久くぼみ形状との関連において硬さを考えることにした。

このような考えで硬さ P_m を永久くぼみの真の形状

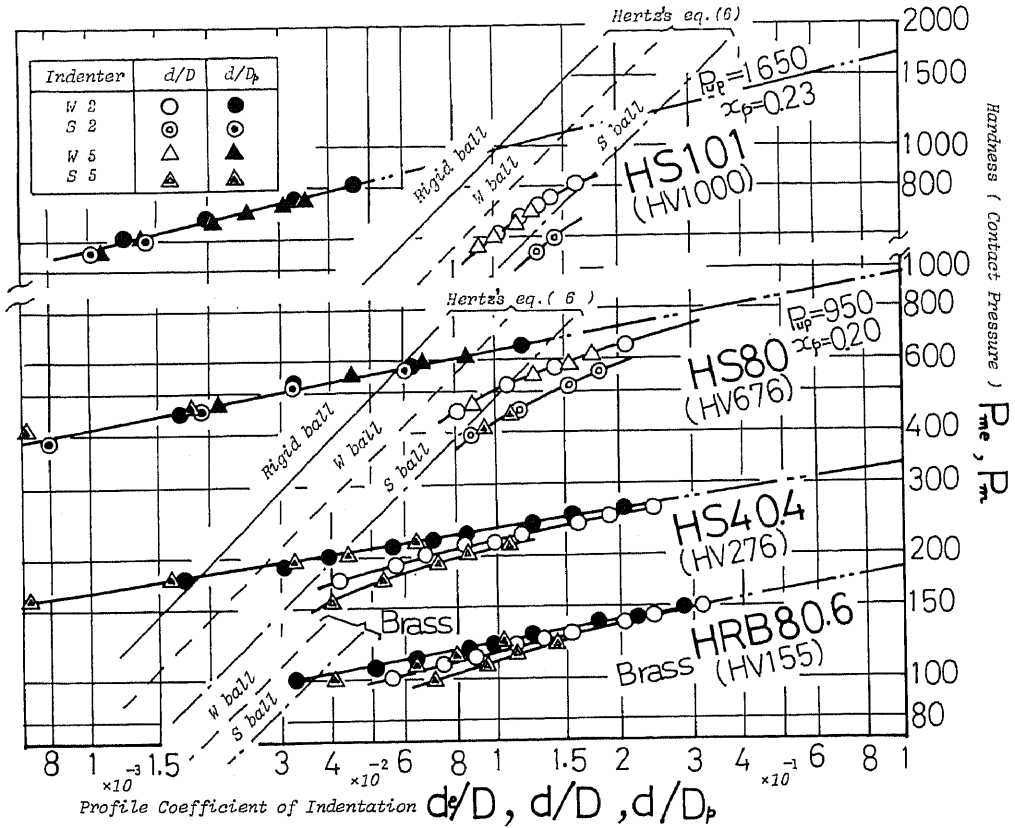


図 2 硬さとくぼみ形状係数との関係

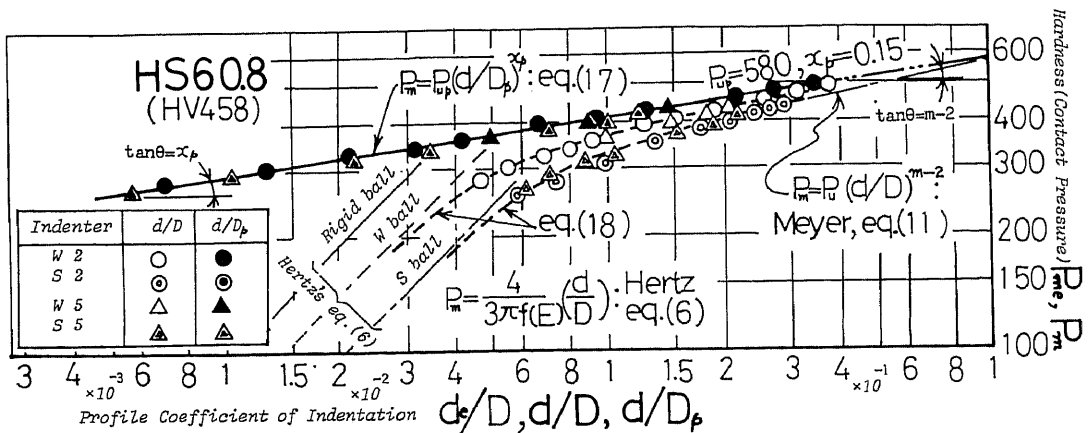


図 3 Hertz, Meyer, 著者らの式の相互関係

係数 (d/D_p) に対して示したのが、図 2、図 3 中の黒印である。

前述した $P_m \sim (d/D)$ の関係とは異なり、 $P_m \sim (d/D_p)$ に関する実測値は圧子球材質の違いによらず、ほぼ一直線上に分布していることがわかる。

この直線はまた、試料が軟かい場合や完全塑性変形状態の場合には、Meyer の式(11)に近づくことも図 3 よりわかる。

さて、このような $P_m \sim (d/D_p)$ の関係が得られる理由を、これまでにも多くの研究者が $P_m \sim (d/D)$ と応力 $\sigma \sim$ ひずみ ε との類似性を論じてきた点を参考にして、同じような観点に基づいて考察する。

いま、材料の応力 σ と全ひずみ ε (塑性ひずみ ε_p と弾性ひずみ ε_r の和) との関係を示す定性的に両対数グラフ上で示すと図 4 のようになる。

多くの材料では全ひずみ ε から弾性ひずみ ε_r [式(14)] を引いた塑性ひずみ ε_p [式(15)] と、応力 σ との関係は式(16)に示す形 [n 乗硬化則] で表し得るから⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、 $\sigma \sim \varepsilon$ の関係を示した図 4 中に、 $\sigma \sim \varepsilon_p$ の関係も併せて示すと破線のような形で表される。ただし、図中の elastic, elastic-plastic, fully plastic の範囲は $\sigma \sim \varepsilon$ の関係に対してのみ示したものである。

$$\varepsilon_r = \sigma / E_s \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_r \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\sigma = C\varepsilon_p^n \quad \dots\dots\dots (16)$$

以上の関係をもとにして、図 3 の $P_m \sim (d/D_p)$ と図 4 の $\sigma \sim \varepsilon_p$ の各形状を、 $P_m \sim (d/D)$ と $\sigma \sim \varepsilon$ の各形状とに関連させながら比較し、ついで (d/D_p) を表す式(13)と ε_p を表す式(15)とを比較対照すると、両者は明らかに類似性を有していることがわかる。

したがって $\sigma \sim \varepsilon_p$ に対応するものとして $P_m \sim (d/D_p)$ の関係が得られるものと考えることができる。

次に $P_m \sim (d/D_p)$ を定式化するにあたって考えてみると、両対数グラフ上における $P_m \sim (d/D)$ の関係が Hertz の式(6)へ漸近する時の湾曲部は、それに対応する $P_m \sim (d/D_p)$ の関係にとっては直線部として示さ

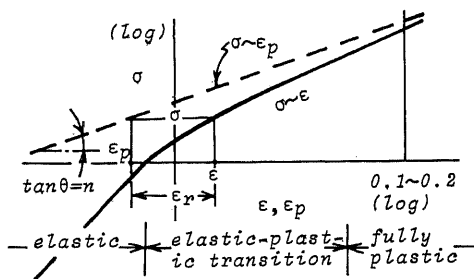


図 4 一般材料の $\sigma \sim \varepsilon, \varepsilon_p$

れることから、先の $\sigma \sim \varepsilon_p$ に関する n 乗硬化則を参考にすれば、弾性接触の近傍まで P_m を (d/D_p) の指数関数として定式化できることになる。

以上より $P_m \sim (d/D_p)$ の関係を、 $(d/D_p) > 0$ の条件で式(17)のように与えれば、式(13)などを用いて、弾性～塑性遷移押し込み過程における諸量の定量的関係を表す式(18)、(19)を得る。

すなわち式(18)に各試料に固有の P_{up}, x_p および試料と圧子による $f(E)$ を与え、任意の (d/D) に対して式を満足する P_m を求めることで、 $P_m \sim (d/D)$ の関係を得ることができるわけである。同様にして式(19)からは荷重率 C_{LR} と (d/D) との関係を求め得る。ここでは球の押し込みによる最終塑性硬さ P_{up} とは、 $(d/D_p) = 1$ における硬さ P_m を意味し、 x_p は球の押し込みによる塑性硬化指数と称する。

また式(17)は試料が完全塑性変形状態のときには式(13)で $(d/D_p) \approx (d/D)$ となるため、Meyer の式(11)に一致する形となる。{ $P_{up} \approx P_u, x_p \approx m - 2$ }

$$P_m = P_{up} (d/D_p)^{x_p} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$P_m = P_{up} \left[\left(\frac{d}{D} \right) \left\{ 1 - \frac{3 \times 9.8 \pi f(E)}{4(d/D)} P_m \right\} \right]^{x_p} \quad \dots (18)$$

$$C_{LR} = \frac{\pi}{4} P_{up} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \left[\left(\frac{d}{D} \right) \left\{ 1 - \frac{3 \times 9.8 f(E)}{(d/D)^3} C_{LR} \right\} \right]^{x_p} \quad \dots\dots\dots (19)$$

6・4 Hertz, Meyer, 著者らの式の相互関係

図 3 には HS 61 (HV 458) の試料の $P_m \sim (d/D), P_m \sim (d/D_p)$ の実測値と、Hertz の式(6), Meyer の式(11), 著者らの式(17), (18)の相互関係を示してある。

圧子球を試料に接触させた時、まず弾性接触をなし硬さは Hertz の式(6)に沿って上昇し、ついで塑性変形が生じた時点より湾曲しはじめて著者らの式(18)による破線部をたどり、最後に Meyer の式(11)による直線部へと推移してゆく様子が図 3 に示されている。

6・5 高硬度試料における Brinell 硬さ 緒言の

(2)で述べたように、実際の Brinell 硬さ試験では高硬度試料の場合圧子球に永久変形を生ずることがある。

そのため、本節では圧子球材質の相違と永久変形量とが、式(20)で定義される Brinell 硬さ⁽¹⁾に及ぼす影響を検討する。

$$\frac{HBS}{HBW} = \frac{2}{\pi} \frac{C_{LR}}{1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

まず HS 101, HS 80, HS 61 の各試料に対する押し込みで、圧子球に永久変形が生じない時の関係は式(18)～(20)より得ることができ、それにより算出した

$P_m S$, $P_m W$ と HBS , HBW の計算値を (d/D) に対して示したのが図5である。図5を見ると P_m と HB はおよそ $(d/D) < 0.2$ 位までは同じ値を示すが、それ以上では P_m は上昇しつづけるのに対し HB は最大値を有する形をとり、 $(d/D) = 1$ では P_m の半分値に達することがわかる ($P_m S$, $P_m W$ はそれぞれ鋼球圧子、超鋼合金圧子の時の硬さ)。

また図中には JIS の標準試験条件: $C_{LR} = 30$: で実験を行った時に得られる $HB \sim (d/D)$ の計算値の関係を二点鎖線で示してある。

次に、この $C_{LR} = 30$ の計算値に対応する高硬度試料の実例として、 $D = 10$ mm の時の吉沢⁽⁶⁾の Brinell 硬さの実測値を引用し、両者を表4に示す。

例えば HS 101 の試料に対する吉沢の実測値が $HBW 825$ であるのに対し、計算値は 892 であるから、このような差が生ずる原因を次のように考えてみる。

吉沢は、HV 478 の試料に対し $C_{LR} = 30$ の条件で押込みを行った時には、超硬合金球圧子にも永久変形が認められるとしているから、このような点を参考にすれば表4の実測値と計算値との差異は、圧子球の永久変形に起因するものと考えられる。

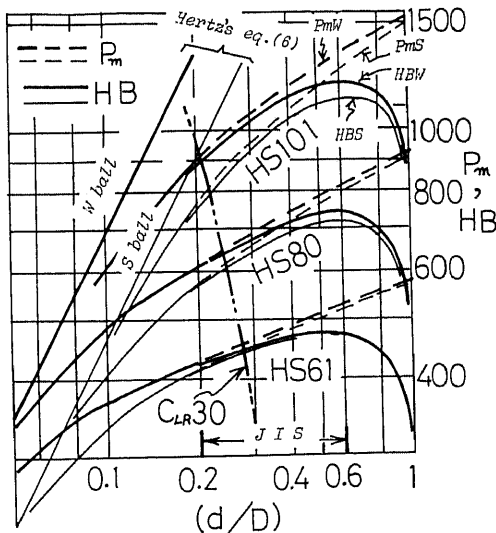


図5 P_m , $HB \sim (d/D)$

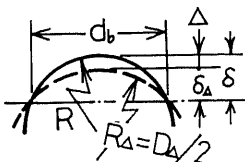


図6 平均変形球径算出の近似的な考え方

そこで山城⁽¹³⁾ にならって図6に示す平均変形球径算出の近似的な考え方に基づき、吉沢の実測値 Δ [永久変形量] と d_b とを次式に代入し、圧子球先端部の平均変形直径 D_Δ を算出したものを表4中に示す。

$$D_\Delta = D / \{1 - (4\Delta D / d_b^2)\} \dots\dots\dots(21)$$

同時に、この D_Δ を用いて式(18)~(20)から算出された HBW , HBS に Suffix Δ を付けて表4の HBW , HBS の下側に () 付で示してある。これによれば吉沢の実測値とよく一致する結果が得られていることがわかる。ただし、HS 101 試料への鋼球圧子による押込みの場合は大幅なずれがみられる。この原因としては、永久変形量が過大な場合は圧子球の先端部の形状がほとんど平坦化していることが山城⁽¹³⁾ の実験でも示されており、そのため球による押込みという前提が成り立たないことから生じた差であると思われる。

また圧子球径の永久変形量の割合が、硬さへ及ぼす影響としてはその 1/4 程度とかなり少ないことも表4からわかる。

7. 結 論

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 球圧子による弾~塑性遷移押込み過程では、弾性接触近傍から試料の完全塑性変形状態に至るまでの範囲で、硬さ P_m を永久くぼみの真の形状係数 (d/D_p) の指数関数として簡単な形で定式化できる。
- (2) 従来から指摘されている $P_m \sim (d/D)$ と $\sigma \sim \epsilon$ との類似性をもとにして考察することにより、 P_m と (d/D_p) の関係は応力 σ と塑性ひずみ ϵ_p との関係に対応づけることができる点を指摘した。
- (3) 弾~塑性遷移押込み過程における試料と圧子球との物理的諸量の関係を定める式が得られたことから、圧子球材質の相違が硬さに及ぼす影響は、任意の押込み条件で解析できる。
- (4) 実際の Brinell 硬さ試験で硬い試料に対して得られる値と、著者らの式による圧子球の永久変形も

表4 HBW , HBS の計算例, 実測値

Standard Blocks for Hardness HS (HV)	Calculation eq. (18), (19), (20)				Yoshiiawa's data	
	HBW (HB Δ)	D_Δ mm	HBS (HBS Δ)	D_Δ mm	HBW	HBS
101 (1000)	892 (835)	12	790 (491)	25	825	662
80 (676)	639 (634)	10.2	607 (576)	12	629	585
61 (458)	453 (453)	10	443 (440)	10.5	458	436

考慮に入れて計算した値とがよい一致をみせることから、軟かい試料からごく硬い試料までの一貫した球押し込み硬さ試験に関する知見が得られた。

本研究を遂行するにあたり、終始変わらぬご指導、ご激励をいただいた東京工業大学 神馬敬教授に心から感謝申し上げる。また、実験や図面作成などに協力いただいた本学部の田村隆技官に感謝する次第である。

文 献

(1) ブリネル硬さ試験方法, JIS Z 2243.

(2) 例えば, Goldsmith, W., Impact, (1960), 83.
 (3) O'Neill, H., *Hardness of Metals and Its Measurement*. (1934), 52. CHAPMAN & HALL.
 (4) Meyer, E., *VDI-Z* (1908), 645.
 (5) Tabor, D., *Hardness of Metals*, (1951), 14, 15, 86. OXFORD.
 (6) 黒木, 機論, 26-170 (昭35), 1435.
 (7) 吉沢編, 硬さ試験法とその応用, (昭42), 165, 裳華房.
 (8) 吉沢, 機論, 24-143 (昭33), 503.
 (9) 飯塚, 計量研報告, 20-4 (昭46), 5.
 (10) 山本・飯塚, 硬さ, (昭49), 27, コロナ社.
 (11) 山田・中原, 塑性学, (昭35), 7, 日本機械学会.
 (12) Hill, R., *Mathematical Theory of Plasticity*, (1950), 11. OXFORD.
 (13) 山城, 機論, 27-176 (昭36), 428, 426.

討 論

〔質問〕 山城 貞男〔茨城大学工学部〕

(1) 小荷重ブリネル硬さの場合、くぼみ直径測定用顕微鏡の開口数により、 d の値が異なるともいわれているので、とくに d_s, D_p の測定方法をもう少し詳しくご教示願いたい。

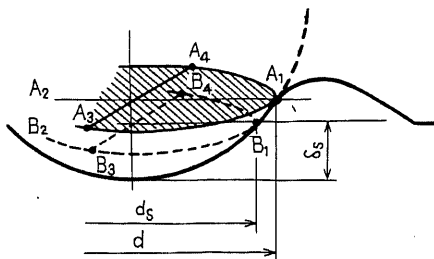
(2) 貴論文の骨子には無関係であるが、表2の E_s が硬い試料のほうが小さくなっている。その測定方法をご教示願いたい。

(3) 質問者も荷重の広範囲にわたって、Meyer 法則は成立せず、小荷重では弾性接触に近く、大荷重では塑性流動と考えていたが、そのとき試料の表面硬化層の影響は無視してもよろしいか。いずれにせよ、きれいに解析されたことに敬意を表す。

(4) 表1の ν_i は本文の μ_i ではないか。

付表1 超硬合金球と鋼球の価格

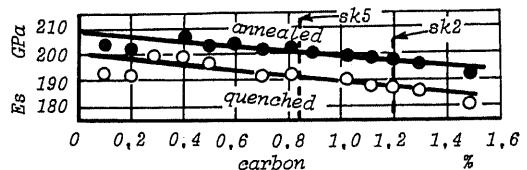
Diameter mm	Tungsten carbide ball yen	Steel ball yen
1	415	3
2	415	2.5
5	810	7
10	4800	18



付図1 くぼみの形状

〔回答〕 (1) 本実験では、まず輪郭測定器により比較的大きな、形状がしっかりしているくぼみ〔図1(a)や付図1〕の断面形状の $\overline{A_3A_4}$ (or $\overline{A_1A_2}$) を測定する。次に工具顕微鏡〔50倍を用い、接触痕が明りような時は100倍でもよい；この点文献(7)の27ページ〕で観察できる暗い円の直径〔付図1, 特に浅いくぼみの場合は目を次第に細めてゆく時に、くぼみの暗い円が浮き出る瞬間をとらえる〕を測定し、それと $\overline{A_3A_4}$ とを比較すると両者はよく一致する。実際、高硬度試料への低荷重押し込みによるくぼみを、輪郭測定器の倍率(2000倍も試みた)を上げて測定してもバラツキが大きく不正確である。そのため上述の方法による顕微鏡での d {この時には δ_s の測定は焦点深度などの点からも不可能} の測定のほうが精度がよいと考えたわけである。したがって図2, 3における (d/D_p) の値は高硬度試料の場合は、 d を測定し式(13)より算出したものを用いている。 d_s の測定はくぼみの縁から1.5 d くらい離れた所で倍率400(焦点深点2 μm)で試料表面に焦点を合わせれば、くぼみの B_1, B_2 点(or B_3, B_4 点)でも焦点が合うから $\overline{B_1B_2} = d_s$ を測定できる。 δ_s はくぼみの底で焦点があった時に測定する。説明不足の点お許しいただきたい。

(2) E_s 測定用試料片を基準片の押し込み方向から



付図2 炭素量と弾性係数の関係

切り出して、ひずみゲージ（ゲージ長 2 mm）により E_s の測定を行った。HS 53 以上の試料では E_s に差がみられないため、断面を MHV で測定したところ、試料表面の数 mm 以外は HV 450~500 程度を示したことから、測定した E_s は押し込み部の E_s とは異なるものと考えた。そこで付図 2 を参考に高硬さの試料の E_s を与えている。説明不足の点お許しいただきたい。

(3) 「試料の表面硬化層」としては ①焼入れによる硬化層は前述のように 2 mm くらいあるから、このような浅い押し込みでは影響ないと {文献(7)の 22~23 ページ} 思う。②表面仕上の際の加工硬化層 {文献(7)の 48~50 ページ} については、実験に先だてて硬さ測定 {4.9N(0.5 kgf), 9.8N(1 kgf)} を行い大荷重によるものと比較したが差はほとんどみられず、したがって表面硬化層の影響は考慮せずに解析している。

(4) 表 1 の μ_i は本文の μ_i と同じものである（字形が悪く失礼いたしました。）

〔質問〕 寺 沢 正 男〔武蔵工業大学〕

貴論文において、低硬度試料においては、鋼球と超硬合金球による硬度差は小さく、高硬度試料になるに従って両種の圧子球による硬度差は大きくなることが認められる。

この結果よりすれば、鋼球を廃止し超硬合金球圧子のみを採用してもよいのではないか。

この点について著者のお考えをご教示いただきたい。

〔回答〕 例えば①適用硬さ範囲が広い、②使用耐用数の限界がはるかに高い {文献(7)の 79~82 ページ}、③ HB 400 程度で比べると、くぼみの縁がより明りょうである、などという点からすると超硬合金球のほうが鋼球よりは圧子球に適していると考えられる。

しかしこのような点だけで、ただちに鋼球を廃止し超硬合金球のみを採用することが妥当であり、かつ可能であるとは思えない。

例えば価格や入手の点が問題点として考えられる。付表 1 は新潟市の工具店における価格を示したものであるが、②の点を考慮してもなおかつ大きな価格差があることがわかる。さらに直径 5 mm 以下の超硬合金球は入手が容易であるが、直径 10 mm のものは探すのにひと苦労するというのが現状である。

したがって、今後このような点やその他の問題点もふまえた上で、ご質問の点についても大いに論じられるべきであり、工業界にとってよい方向に進むべきであると考えます。