プラスチックのロックウェル硬さにおける押込み 加圧時間と除圧後の時間の影響について*

山口章三郎** 山田陽保***

On the Effects of Duration of Impressive Loading and Time after Unloading upon the Rockwell Hardness Numbers for Plastics

by

Yukisaburo YAMAGUCHI and Kiyoyasu YAMADA

(Kogakuin University)

(Industrial Art Institute)

The authors have inquired experimentally into the effects of the times of impressing the specimen and after unloading upon the Rockwell hardness numbers for plastics and steel.

The experiments have been carried out under the constant impressive load, 150 kg, using the constant indenter, 1/4 inch steel ball. The materials of specimens tested are a soft steel and the five kinds of plastics, such as phenolic, urea, polyester, polystyrene and nylon.

As the results, two empirical formulas have been derived as follows :

$$\bar{H}_R = \bar{H}_1 - \Delta \bar{H}_0 \cdot (\log t)^m \quad (1)$$

and

$$H_R = (H_1 - k \cdot \log t) + (n_1 + l \cdot \log t) \{ \log(\log t') \} \quad (2)$$

where $\bar{H}_R$ is the total depth of indented hole under impressive loading in the scale of Rockwell hardness numbers, $\bar{H}_1$ hardness numbers at impressive loading instant, $\Delta \bar{H}_0$ hardness numbers' changes from $\bar{H}_1$ to 10 sec impressive loading's, H_R Rockwell hardness numbers, t duration of impressive loading, t' time after unloading, and H_1 , k , l , m and n_1 are the constants proper to the materials.

Accordingly, the Rockwell hardness numbers H_{R1} for the standard duration of impressive loading t_1 and time after unloading t'_1 may be obtained by the following formula

$$H_{R1} = H_R + k \cdot \log \frac{t}{t_1} + n_1 \cdot \log \left(\frac{\log t'_1}{\log t'} \right) + l \cdot \{ \log t_1 \cdot \log(\log t'_1) - \log t \cdot \log(\log t') \} \quad (3)$$

where H_R is the Rockwell hardness numbers of the material for any duration of impressive loading t and time after unloading t' .

(Received Apr. 7, 1960)

1. 緒 言

プラスチックのような粘弾性的な材料の硬さをロックウェル硬さのような押込み荷重による残留くぼみ深さによって測定する場合、押込み加圧の時間とともに押込みくぼみの深さは増加するから、除圧後のくぼみの深さに荷重時間の長短は影響を及ぼし、かつまた回復現象に伴ない除圧後の経過時間によっても残留くぼみの深さは影響されることは容易に推測される。

このような現象の一部について、大和久、町田らによって定性的な研究がなされている。

ロックウェル硬さに及ぼす因子としては、材料の種

類、圧子の大きさ、加圧力、押込み加圧時間および除圧後測定までの経過時間の5つが考えられる。本研究においてはこれらの中で圧子の大きさと加圧力を一定とし、金属(一例として軟鋼)および7種の各プラスチックについて、それらのロックウェル硬さ値に及ぼす押込み加圧時間ならびに除圧後の経過時間の影響がどのように現われ、またこれらの間にどのような関係があるかを実験的に明らかにし、定量的に表わそうとするものである。

なおまた、押込み加圧による試料の総くぼみ深さと、除圧後の残留くぼみ深さが、金属およびプラスチックの種類によってどの程度異なるかを明らかにし、プラスチックにおいては、加圧中の一定時間における押込み総くぼみ深さから得られる硬さ値も付記するこ

* 原稿受付 昭和35年4月7日、当協会関西支部講演会にて講演(昭34.11)

** 正員 工学院大学

*** 産業工学試験所

との意味を述べようとする。

2. 実験の方法

実験に用いたロックウエルかたさ試験機は JIS 規格による試験機で、押込み鋼球の径は 1/4 吋、押込み荷重は 150 kg、すなわちロックウエル P スケールとした。

実験に用いた試料は Table 1 に示すように軟鋼と 7 種のプラスチックである。

実験の方法は Fig. 1 (a), (b) に図解して示すように、試片を試験機の台上にのせて、まず 10 kg の初荷重をかけて針をダイヤルの目もり 130 に合わせる。すなわち、図の A 点がこの位置を表わす。この点で 150 kg の荷重をかけ、ダイヤルの針の動きがゆるくなり始めた点 B を荷重開始後 1 sec の点と仮定し、それから 5 sec 以上の各荷重時間 t_i までのダイヤルによる

読みを測定して、これらを結ぶと BC 線となる。ついで C 点で除圧し (ただし 10 kg の初荷重はかかったまま)、ダイヤルの針の読みを各経過時間 t'_i まで経過時間に対して測定し、これらの点を結ぶと CDE 線が得られる。

本実験で行なった荷重時間 t_i は 5, 10, 30 および 90 sec の 4 種とし、それぞれ除圧後 90~240 sec 程度まで測定した。

3. 実験の結果と考察

(I) 総くぼみ深さ、塑性くぼみ深さおよび時間効果くぼみ深さ変化

1/4" 鋼球, 150 kg 基準荷重によって Fig. 1 のような加圧, 除圧実験を各種材料について行なった中で、押込み加圧時間 30 sec における総くぼみ深さを L 、除圧後 30 sec における残留くぼみ深さを M 、 M/L を塑性くぼみ率として、各材料に対するこれらの数値を一括表示すると Table 2 の L , M および M/L 欄になる。

Table 2 の数値から明らかなように、 M の値で示されるロックウエル硬さ H_RP ではユリヤ樹脂およびフェノール樹脂 A は軟鋼より硬いこととなる。しかしその押込み荷重中の総くぼみ深さはいずれも軟鋼の 2 倍以上であり、したがって硬さ目もりでははるかに小さくなる。このことは M/L の値は軟鋼が最も大きくユリヤ樹脂およびフェノール樹脂は著しく小さい。すなわち、軟鋼は塑性くぼみ深さが大きくプラスチックでは塑性くぼみ深さより、除圧後回復する弾性くぼみ深さが著しく大きいことを示している。

Table 1 Details of specimen tested

	Name of materials tested	Details
Metal	Soft steel	0.1%C, annealed at 900°C for 20 minutes
	Urea	Quadrangular prism, 15×15×90 mm, made of Uright, urea compound containing 50% cellulose manufactured at Toyo-koatsu Co., by compression molding under 120°C and 180 kg/cm ² for 5 minutes
Plastics	Phenolic A	Quadrangular prism, 15×15×90 mm, made of Sumikon PM 20, phenol resin compound containing 50% cellulose manufactured at Sumitomo Bakelite Co., by compression molding under 150°C and 180 kg/cm ² for 5 minutes
	Phenolic B	Quadrangular prism, 15×15×90 mm, made of Sumikon PM 702 (containing cotton cloth chips of 50%) manufactured at Toyo-koatsu Co., by compression molding under 150°C and 180 kg/cm ² for 5 minutes
	Polyester	Quadrangular prism, 15×15×90 mm, made of Ester AG type, polyester resin, manufactured at Toyo-koatsu Co., by compression molding
	Poly-styrene	Cube, 20×20×20 mm, made of polystyrene pellet, manufactured at Dawbain Bros. Inc., by compression molding under 100°C and 50 kg/cm ² for 5 minutes
	Nylon 6 A	Circular cylinder, 50φ×50 mm, made at Toyo-Rayon Co., by transfer molding
	Nylon 6 B	Circular cylinder, 50φ×50 mm, made of Nylon 6 resin and 2% carbon black, and manufactured at Toyo-Rayon Co., by transfer molding

Fig. 1 Relation between dial reading and time in measuring Rockwell hardness number

したがって、プラスチックにおいては一般に硬さという感じからすると、この弾性くぼみ深さを無視するわけにいかない程度に持っていると考えられる。よってこの弾性くぼみも考慮に入れる方法としては、従来のロックウエル硬さ表示方法 (Fig. 1 における $H_R = 130-500 M$) とともに、押込み加圧一定時間 (たとえば 30 sec) における総くぼみ深さ (Fig. 1 また Table 2 の L) からの硬さ目もり ($130-500 L$) を次のように付記する一方法が考えられる。たとえば軟鋼およびユリヤ樹脂では Table 2 から

$H_R P 99.8 (65.2) \cdots \cdots$ 軟鋼

$H_R P 114.6 (-5.5) \cdots \cdots$ ユリヤ樹脂

のように表示する。

次に Fig. 1 に示すように、総くぼみ深さ L は加圧時間とともにクリープ現象によって増加し、また残留くぼみ深さ M は余効果弾性によって、除圧後の経過時間 t' とともに減少する。この L の増加および M の減少量を時間効果によるくぼみ深さの変化と称する。

いま、加圧後 5 sec から 90 sec における時間効果によるくぼみ深さの増加量をロックウエル硬さ目もりで

$\Delta \bar{H}_{(5-90)}$ とし、加圧時間 t_i が 5, 10, 30 および 90 sec における除圧後 5 sec から 90 sec における時間効果によるくぼみ深さの回復量をロックウエル硬さ目もりで $\Delta \bar{H}_{(5-90)}$ として、各材料の実験結果から求めて表示すると、Table 2 の $\Delta \bar{H}_{(5-90)}$ となる。

Table 2 から明らかなように、軟鋼においては加圧時間効果によるくぼみ深さの増加量 $\Delta \bar{H}_{(5-90)}$ はほんのわずかな影響が認められ、除圧後の時間効果によるくぼみ深さの回復量 $\Delta \bar{H}_{(5-90)}$ は全くない。しかし、いずれのプラスチックにおいても $\Delta \bar{H}_{(5-90)}$ および $\Delta H_{(5-90)}$ は無視できない程度に生じており、特に加圧時間が長くなるものほど大きな値となる。

(II) ロックウエル硬さ値に及ぼす加圧時間と除圧後の時間の影響

以上の考察を更に厳密に検討してみよう。

Fig. 1 の押込みくぼみ深さと加圧時間および除圧後の時間との関係線図を、各材料について、各加圧時間 t_i に対するものを一括し、かつ最も近い直線の関係線図で表わすと、Fig. 2, 3, 4 のようになる。同図はユリヤ樹脂、スチロールおよびナイロンについて示して

Table 2 Values of L , M , M/L and $\Delta \bar{H}_{(5-90)}$ at measuring Rockwell hardness number for various materials
($H_R P 114.6 (-5.5)$; for urea, $H_R P 99.8 (65.2)$; for soft steel)

H_R ; in Rockwell number δ ; in mm ($\times \frac{1}{500}$)

Name of materials		L $t=30 \text{ sec}$	M $t'=30 \text{ sec}$	M/L	$\Delta \bar{H}_{(5-90)}$	$\Delta H_{(5-90)}$			
						$t \text{ sec}$			
						5	10	30	90
Soft steel	δ	64.8	30.2	0.440	0.8	0	0	0	0
	H_R	65.2	99.8						
Urea	δ	135.5	15.4	0.113	8.0	3.8	3.9	4.9	6.1
	H_R	-5.5	114.6						
Phenolic A	δ	149.1	20.2	0.136	2.6	2.9	3.0	4.7	4.8
	H_R	-19.1	109.8						
Phenolic B	δ	170.7	48.2	0.280	2.4	3.1	3.8	6.5	8.0
	H_R	-40.7	81.8						
Polyester	δ	158.1	57.6	0.364	5.5	4.0	4.1	6.5	8.6
	H_R	28.1	72.4						
Polystyrene	δ	172.2	59.6	0.344	3.1	3.7	5.1	7.5	8.1
	H_R	-42.2	70.4						
Nylon 6 A	δ	180.9	69.1	0.382	3.2	4.4	5.6	7.9	11.6
	H_R	-50.9	60.9						
Nylon 6 B	δ	190.4	78.0	0.405	2.9	4.4	5.5	8.1	9.0
	H_R	-60.4	52.0						

Note: t is duration of impressive loading, t' is time after unloading

いるが、他のプラスチックも同じ傾向を持っている。
すなわち加圧のときは、加圧開始点 A における硬さ目もり $\bar{H}_1$ と加圧時間 t における硬さ目もり $\bar{H}_R$ との差の対数 $\log(\bar{H}_1 - \bar{H}_R)$ を縦軸にとり、加圧時間 t の $\log \cdot \log$ 目もりを横軸にとると、両者の関係はほぼ直線的となる。

また、各種加圧時間後の除圧によるくぼみ深さの回復と除圧後の時間 t' との関係は Fig. 2, 3, 4 の Aa , Bb , Cc および Dd 線で表わされる。すなわち、縦軸にくぼみ深さのロックウエル硬さ目もり、横軸に除圧後の時間の $\log \cdot \log$ をとるとほぼ両者の関係が直線的となる。

Fig. 2 Impressing and recovery curves of urea plastics

Fig. 3 Impressing and recovery curves of polystyrene

Fig. 4 Impressing and recovery curves of nylon 6

これらの関係を一般図として表わすと Fig. 5 の線図となる。

したがって、加圧中のくぼみ深さの関係は次式で表わされる。

$$\log(\bar{H}_1 - \bar{H}_R) = K + m \log \cdot (\log t) \quad (1)$$

$$\text{いま, } t=10 \text{ sec とすると } K = \log(\bar{H}_1 - \bar{H}_R)$$

すなわち、加圧時間 10 sec における $(\bar{H}_1 - \bar{H}_R)$ の値を $\Delta \bar{H}_0$ とすると、 $K = \log \Delta \bar{H}_0$ 、したがって、(1)式は次のようになる。

$$\bar{H}_R = \bar{H}_1 - \Delta \bar{H}_0 \cdot (\log t)^m \quad (2)$$

(2)式における定数、すなわち加圧直後(約 1 sec)の硬さ $\bar{H}_1$ 、加圧時間 10 sec における加圧直後から変化したくぼみ深さ(硬さ目もりで) $\Delta \bar{H}_0$ および bD 直線の傾斜係数 m の値を各材料について実験結果から求めると Table 3 の数値となる。これらの定数は一定鋼球、一定加圧では材料によって定まる定数である。

Table 3 から明らかなように、軟鋼は $\Delta \bar{H}_0$ および m が著しく小さく $\bar{H}_1$ が特に大きい。プラスチックでは $\Delta \bar{H}_0$ は 3~9、 m は 0.6~0.86、 $\bar{H}_1$ は -5~-49 程度となる。

次に除圧後のくぼみ深さの回復の状況は Fig. 2~5 で明らかなように加圧時間の大きいものほど関係線は

Fig. 5 General curves representing the relation between dial reading and time at measuring Rockwell hardness number for various plastics

Table 3 Values of the constants m , $\bar{H}_1$ and $\Delta \bar{H}_0$ for $\bar{H}_R$

Materials	m	$\bar{H}_1$	$\Delta \bar{H}_0$
Soft steel	0.578	67.6	1.3
Urea	0.860	-5.3	8.9
Phenolic A	0.617	-17.5	4.4
Polyester	0.822	-20.8	5.7
Phenolic B	0.714	-31.3	3.3
Polystyrene	0.744	-35.3	4.6
Nylon 6 A	0.616	-44.8	5.0
Nylon 6 B	0.601	-49.3	4.4

上に位いし、その傾斜も大きくなる。

この関係は次式で表わされる。

$$H_R = H_0 + n \cdot \log(\log t') \quad (3)$$

ここで H_R は除圧後 t sec 後におけるロックウェル硬さ値、 H_0 は除圧後 10 sec におけるロックウェル硬さ値、 n は $A'a, B'b, \dots$ 各線の傾斜係数、すなわち除圧後の時間による硬さ値変化係数とする。

(3)式における H_0 および n の値は一定鋼球、一定加圧量でも加圧時間 t_i によって影響される。この関係を実験結果から求めてみる。

まず、 H_0 と加圧時間との関係を各材料について実験結果から求めて表示すると Table 4 の H_0 の欄で表わされ、図示すると Fig. 6 になる。

Fig. 6 から各材料とも H_0 と加圧時間 t との間には次式のような関係が認められる。

$$H_0 = H_1 - k \cdot \log t \quad (4)$$

ここで H_1 は除圧後 1 sec 相当時の H_0 の値、 k は加圧時間による H_0 の変化係数とする。

この H_1 および k の値を各材料について Fig. 6 から求めると Table 4 の数値となり、軟鋼における k の値は零となる。

次に(3)式における除圧後の時間による硬さ値変化係数 n の値と加圧時間 t_i との関係を各材料について求めて、表示すると Table 4 の n 欄、この関係を図示すると Fig. 7 になる。

Fig. 7 から明らかなように、 n は次式で表わされる。

$$n = n_1 + l \cdot \log t \quad (5)$$

ここで n_1 は加圧時間 1 sec 相当時の n の値、 l は加圧時間 t による n の値の変化係数で、これらの値を各材料について Fig. 7 から求めると、Table 4 の右の欄の数値となる。

したがって(3)、(4)、(5)式から一定鋼球、一定加圧量による荷圧時間 t sec、除圧後 t' sec におけるロックウェル硬さ値 H_R は次式で表わされる。

$$H_R = (H_1 - k \cdot \log t) + (n_1 + l \cdot \log t) \{ \log(\log t') \} \quad (6)$$

したがって、いまロックウェル硬さ測定における標準の加圧時間および除圧後測定までの経過時間を t_1 および t_1' (ASMA ではそれぞれ 15 sec)、それに対応するロックウェル硬さを H_{R1} とし、任意の加圧時間 t および除圧後 t' sec において測定したロックウェル硬さを H_R とすると、一定鋼球、一定加圧量において

Fig. 6 Relation between H_0 and t

Fig. 7 Relation between n and t

Table 4 Values of the constants H_0 , n , H_1 , k , n_1 , l for H_R

<div>Const. t_i (sec)</div>	H_0 (HRP)				$n \{ \Delta H / \log(\log t') \}$				H_1	k	n_1	l
	5	10	30	90	5	10	30	90				
Materials												
Soft steel	98.1	100.4	99.8	99.8	0	0	0	0	99.8	0	0	4.0
Urea	114.7	111.1	110.6	106.7	9.0	9.0	10.9	15.4	117.1	4.9	4.9	8.8
Phenolic A	109.7	108.1	105.3	96.9	6.4	10.2	15.4	20.7	113.7	5.7	2.1	9.1
Phenolic B	65.4	73.9	67.4	61.5	9.4	10.5	14.7	21.8	86.9	13.0	1.9	9.6
Polyester	87.3	85.9	76.3	72.2	7.9	9.0	15.8	16.5	98.5	14.1	0.8	7.0
Polystyrene	73.3	70.6	65.7	56.8	8.6	11.3	13.9	19.5	83.9	13.3	3.4	3.7
Nylon 6 A	66.6	59.8	54.9	43.2	9.4	12.8	18.4	28.6	77.0	16.4	0	11.3
Nylon 6 B	58.5	57.9	46.0	33.9	9.8	11.3	18.4	22.2	83.0	25.1	1.0	11.3

は次の式によって H_{R1} を推定することができる.

$$H_{R1} = H_R + k \cdot \log \frac{t}{t_1} + n_1 \cdot \log \left(\frac{\log t_1'}{\log t'} \right) + l \cdot \{ \log t_1 \cdot \log(\log t_1') - \log t \cdot \log(\log t') \} \quad (7)$$

ここで k , n , および l は (6) 式と同じく Table 4 に示すように材料によって定まる定数である.

4. 結 論

プラスチックおよび軟鋼において 1/4" 鋼球, 150 kg 基準荷重によるロックウェル硬さ測定に関して, 加圧時間と除圧後の時間の影響を要約して次のように結論できる.

(1) 粘弾性的なプラスチックのロックウェル硬さの測定においては, 除圧によって回復する押し込みくぼみ深さの割合が大きい. すなわち, 除圧後の残留くぼみ深さと加圧中の総くぼみ深さとの比率が金属などに比べて著しく小さいものが多いため, 加圧中の総くぼみ深さをもロックウェル硬さ値で付記する方法が比較考察する点で適当と考えられる.

(2) 軟鋼のロックウェル硬さ測定値に対し, 加圧時間が増すとわずかに硬さ値は減少するが, 除圧後の経過時間はほとんど影響を与えない.

しかしプラスチックにおいては加圧時間が増すほど, 総くぼみ深さはクリープ現象によってそうとう増加し, 除圧後の残留くぼみ深さから測定するロックウェル硬さ値も減少し, 除圧後の時間とともに回復する余効時間の影響も大きくなる. また, 除圧後の時間が増すほど漸次残留くぼみ深さは小さくなる.

したがって, プラスチックスのロックウェル硬さにおける加圧時間と除圧後の時間には一定の標準を置く必要がある. この場合上記の理由から加圧時間はあまり長くないのが望ましい.

(3) 加圧中の総くぼみ(硬さ値)およびロックウェル硬さ値と加圧時間ならびに除圧後の時間との間の関係の実験式を導き, 材料に特有の定数を定めることによって, 任意の加圧時間と除圧後の時間によって測定したロックウェル硬さ値から, 基準の加圧, 除圧後の時間による硬さ値を求める実験式を求めた.

本研究の実験について助力していただいた大柳康君および前野猛君に厚く謝意を表する.

参 考 文 献

- 1) 大和久, 宮下, カタサ研究会資料, (13-101), (1959)
- 2) 町田, 山路, 第3回材料試験連合講演会前刷, 79 (1959)

工業用積層板に及ぼす温度の影響 (Effect of Temperature on Industrial Plastics Laminates) N.A. Skow, Materials in Design Engineering, Vol. 47, No. 2 (Feb. 1958) pp. 109~111, 図9, 表1.

2種の紙, ガラス布, 綿布, ナイロン布を補強材とした5種類のフェノール樹脂積層板, ガラス布, 綿布を補強材としたメラミン樹脂積層板, ガラス布を補強材としたエポキシ樹脂およびシリコン樹脂積層板の合計9種について -90°F ~ 200°F の温度範囲で抗折力,

アイゾット衝撃強度, 力率, 更に乾燥状態および相対湿度90%における絶縁抵抗の測定結果が示されている. 積層板は機械的性質として異方性を示すため抗折力およびアイゾット衝撃強度は lengthwise および edge-wise (あるいは crosswise) 方向にそれぞれ測定されているが, ガラス布エポキシ積層板が最も優秀な機械的性質を示している. 絶縁抵抗は -90°F ではいずれの積層板も約 $10^9\text{M}\Omega$ であるが温度上昇とともにいろいろ異なった値に減少している. (伊藤勝彦)