

球圧子の押込硬さ試験方式を利用した  
高分子材料の変形抵抗-ひずみ特性測定法\*石橋達弥\*<sup>1</sup>, 下田 茂\*<sup>1</sup>, 古川 徹\*<sup>1</sup>  
新田 勇\*<sup>1</sup>, 蒲沢英喜\*<sup>2</sup>The Measuring Method about Flow Stress-Strain Characteristics  
of Plastics Using the Indenting Hardness Test  
by a Spherical IndenterTatsuya ISHIBASHI, Shigeru SHIMODA, Tooru FURUKAWA,  
Isami NITTA, and Hideki GAWASAWA

This study deals with the measuring method about flow stress-strain characteristics of plastics using the indenting hardness test by a spherical indenter. Firstly, hardness  $P_m$  (mean contact pressure)-total mean strain of an indentation  $\epsilon_{ic}$  characteristics are obtained with the indenting experiments by a spherical indenter, and flow stress  $Y$ -total strain  $\epsilon$  ( $=\epsilon_{ic}$ ) characteristics are measured using the uniaxial compression tests for plastic materials; PMMA, ABS, PC and PE. Secondly, Hardness/Flow stress ratio  $C$  is formulated,  $C=9.8 P_m/Y$ :  $Y$  in MPa, as the function of the ratio  $(\epsilon_{ic}/\epsilon_r)$ ,  $\epsilon_r$  is an elastic recovery strain ( $=Y/E_s$ ,  $E_s$ : Young's modulus). Finally, it is shown that flow stress-strain characteristics from the elastic strain range to about the 10-15% strain range of plastics can be obtained using a one time indenting hardness test by a spherical indenter, by means of the calculation with the formulated equations in this paper and the former reports, and this method can be applied to the present hardness testing machines.

**Key Words:** Material Testing, Measuring Method, Flow Stress-Strain Characteristics of Plastics, Indenting Hardness Test by a Spherical Indenter, Performance of Hardness Machine

## 1. 緒 言

硬さ(試験)から材料の変形抵抗を求めようという試みは、引張試験などに比べて規格化された試験片を必要としないことや、試験が簡単・迅速であることなどの工業的利点と有用性のゆえに、これまでも硬さと変形抵抗の対応に関する理論的解析や、実験による定量化が行われてきた<sup>(1)~(6)</sup>。

特に、近年出現した新素材(高分子材料、複合材料、ニューセラミックス、その他<sup>(6)(7)</sup>)といわれる材料は、一般に(超)高温や(極)低温のような特殊(極限)の環境条件下での使用を目的としたり、あるいは柔らかすぎたり・硬すぎたり・もろすぎたりというような特性のゆえに、規定の試験片形状に仕上げることができないとか、量が少なすぎて試験片としての形を作ることができないとか、試験をする際のチャッキングに問題があるとか、などの測定上の難点を多く含んでいるため、どのような試験法がこれらの材質(材料特性)評価法として適当であるかなどの点はまだ確立されていない<sup>(8)(9)</sup>。

い<sup>(8)(9)</sup>。

硬さ試験がこのような特殊な環境や材料条件に対しても有効であり威力を発揮するであろうことは、硬さ試験の持つ特徴から十分予想できる。

そこで本報では、新素材の内でも軟質に属するような材料も含めた材料の材質評価法を確立するための一環として、前報<sup>(10)</sup>に続いて球圧子の押込硬さ試験方式を利用しての高分子材料の変形抵抗-ひずみ特性を測定する方法について考察し、このような測定法(球圧子の1回の押込みと除荷により弾性域から10数%のひずみ域までの変形抵抗-ひずみ特性を測定する方法も含む)の有用性を示し、かつそれを現行の硬さ試験機に応用することによりいっそうの多目的・多機能化が図れる点を示す。

2. 高分子材料において球圧子の押込みによる  
硬さを変形抵抗に対応づける際の基本関係式

硬さと変形抵抗を1対1で対応づけるためには、球圧子の押込みにより生じたくぼみ周辺部の平均ひずみを、単軸圧縮応力状態下のひずみに対応づけることがその基本となる。ただし、高分子材料は金属材料に比べその材料特性において、ひずみ速度依存性と温度依存性を有するから、本報においては試験温度は一定で

\* 昭和62年11月3日 北陸信越支部北陸地方学術講演会において講演、原稿受付 昭和62年6月1日。

\*<sup>1</sup> 正員、新潟大学工学部(☎950-21 新潟市五十嵐二の町8050)。

\*<sup>2</sup> 学生員、新潟大学工学部。

あり、かつ押込みと除荷中のひずみ速度は近似的にある一定の値にあると考えることにし、金属に対して得られたと同様な式<sup>(5)</sup>を用いる。

そこで、各ひずみの相互関係を先の報告<sup>(5)</sup>と前報<sup>(10)</sup>を参照の上要約して示すと次のようになる。

図1(a)は高分子材料[ヤング率  $E_s$ 、ポアソン比  $\mu_s$ 、ただし  $(1-\mu_s^2)=0.9$  とする]に剛体圧子球(直径  $D$ 、ヤング率  $E_i$ 、ポアソン比  $\mu_i$ 、ただし  $E_i \gg E_s$ )を荷重  $L$  で押し込み次いで除荷したときの接触関係をモデル的に表したものである。

いま、圧子荷重  $L$  が作用しているときのくぼみ直径(接触直径)を  $d$  とすれば、このときの全くくぼみの平均ひずみ  $\epsilon_{ic}$ (単軸圧縮応力状態下の全ひずみ  $\epsilon$  に相当すると考える)は、次式で与えられる。

$$\epsilon_{ic} = 0.21 \left\{ 1 + \frac{0.9 \times 3DL}{d^3 E_s} \right\} (d/D) \equiv \epsilon \quad \dots\dots (1)$$

また、この  $\epsilon_{ic}$  は弾性くぼみの平均ひずみ  $\epsilon_{ir}$

$$\epsilon_{ir} = 0.43(0.9) \times 3L / (d^2 \cdot E_s) \quad \dots\dots (2)$$

と塑性くぼみの平均ひずみ  $\epsilon_{ip}$  の和 ( $\epsilon_{ic} = \epsilon_{ir} + \epsilon_{ip}$ ) として示される。[図1(b)参照]

一方、単軸圧縮応力状態下の全ひずみ  $\epsilon$  はそのときの変形抵抗を  $Y$  として、弾性回復ひずみ  $\epsilon_r$

$$\epsilon_r = Y/E_s \quad \dots\dots (3)$$

と塑性ひずみ  $\epsilon_p$  の和 ( $\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_p$ ) として示される。

したがって、 $\epsilon_{ic}$  における硬さ(平均接触圧力)  $P_m$

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

を、 $\epsilon$  のときの変形抵抗  $Y$  に対応させればよい。

ただし、本論文においてはSI単位を用いており、その場合 [ $L$  の単位は(N),  $Y$  の単位は(MPa)] でも硬さの数値が従来の(kgf/mm<sup>2</sup>)のときと変わらないようにするため、式(4)のような定義を  $P_m$  に与えている。その意味から、 $P_m$  と  $Y$  を対応させるときには  $Y$  に 0.102 という数値をかけるやり方を行っている。

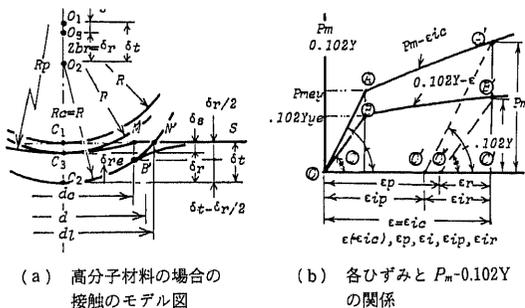


図 1

### 3. 実験方法

2章の関係式を基にして、高分子材料に球圧子を押し込んだときの硬さ  $P_m$  と、単軸圧縮試験における変形抵抗  $Y$  との対応関係を検討するための実験を行った。

**3.1 球圧子と押込試験装置** 実験に用いた球圧子 ( $D=5$  mm,  $E_i=608$  Gpa,  $\mu_i=0.21$ , 超硬合金球) と押込試験装置および計測法は前報<sup>(10)</sup>と同じである。また圧子荷重  $L$  としては、 $L=147, 294, 612.5$  N を PMMA, ABS, PC 試料に、 $L=147, 294, 392$  N を PE 試料に用い、荷重保持時間  $t_h$  は 2 s とした。

**3.2 試料** 実験には PMMA(アクリル)、ABS、PC(ポリカーボネイト)、PE(ポリエチレン)の4種類を試料として用いた。圧縮試験片の形状は  $10 \times 10$  mm 長さ 13.5, 20, 30 mm のものを PMMA, ABS, PC に使用し、PE の場合はそのほかに  $10 \times 15$  mm の断面形状のものも用いた。表1に試料諸元を示す。

**3.3 変形抵抗-ひずみ特性測定法** 試料の変形抵抗-ひずみ特性の測定は、前報<sup>(10)</sup>と同じく定ひずみ形圧縮試験機を用い、試験片端面の変位量とそのときの荷重を測定する方法により行った。

### 4. 実験結果と考察

**4.1 変形抵抗  $Y$ -全ひずみ  $\epsilon$  特性曲線** 圧縮ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  が 30%/min と 270%/min の場合における各試料の  $0.102Y-\epsilon$  特性曲線を図2(a)~(d)に示す。

一般に高分子材料の  $Y-\epsilon$  の形状はいろいろとあることが報告<sup>(12)~(14)</sup>されているが、図2に示した四つの形状は近似直線弾性域を過ぎてから①右上がりを示す：PE試料 ②最大値を示したのち、いったんわずかに下降しその後一定となる：ABS試料 ③ゆるやかに最大値に達し、その後徐々に減少する：PC試料 ④ゆるやかに上昇し、その後一定となる：PMMA試料のようなものであり、高分子材料における典型的な形状を表している。

表 1 試料諸元

Plastic material (ISO code)	$E_s$ GPa	Specific gravity	Transparence
Polymethyl methacrylate (PMMA)	3.04	1.19	transparent
ABS (ABS)	2.06	1.03	opaque
Polycarbonate (PC)	1.96	1.21	transparent
Polyethylene (PE)	0.784	0.933	opaque

1GPa=102Kgf/mm<sup>2</sup>

前報<sup>(10)</sup>でも述べたように、高分子材料においては弾性域を線形弾性域と非線形弾性域とに厳密に分けることのできるものもあれば、はじめから直線部を持たず近似的に直線とみなせるような弾性域を持つものもあり、さらに粘性の影響による遅延弾性なども含まれたりするため、すべての高分子材料を通じてその弾性域の形状や範囲あるいは降伏点などを明確に定めることは実際困難である<sup>(11)~(14)</sup>。

実験で用いた試料の弾性域は近似的に直線部を有するような形に属しており、そのため本論文では、変形抵抗-ひずみ曲線において明確に規定できない非線形弾性域の一部も含めたほぼ直線とみなせる部分を、直線で置きかえて近似的に弾性域と考えることにし、同

時に弾性(回復)ひずみ  $\epsilon_r$  および塑性ひずみ  $\epsilon_p$  は図 2 (a) に示すように与えられるとして取扱う。

4.2 硬さ  $P_m$ -全くぼみの平均ひずみ  $\epsilon_{ic}$  圧子荷重を変化させて押し込んだ後のくぼみ直径  $d$  (ただし PMMA 試料は  $L=147N$  のとき測定不可) より、硬さ  $P_m$  [式(4)] と全くぼみの平均ひずみ  $\epsilon_{ic}$  [式(1)] を算出し、それを図 2 (a)~(d) 中に黒丸(●)印で  $P_m \sim \epsilon_{ic}$  として記入してある。

ただし、このときの単軸圧縮試験に対応する平均ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_r$  は後述の式(9)を用いて算出したものであり、 $\dot{\epsilon}_r=20\sim40\%$ /min 程度の範囲にあったものを、 $\dot{\epsilon}_r=30\%$ /min として記入してある。

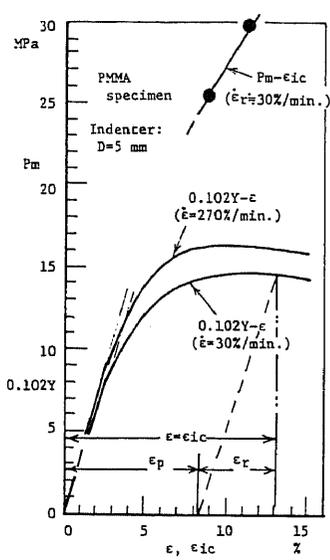
4.3 硬さ/変形抵抗比  $C$ -全(くぼみの平均)ひずみ  $\epsilon(=\epsilon_{ic})$  図 2 (a)~(d) 中に示された  $0.102Y-\epsilon$  と  $P_m-\epsilon_{ic}$  の関係を対応させることにより、硬さ/変形抵抗比  $C$

$$C=9.8P_m/Y \dots\dots\dots (5)$$

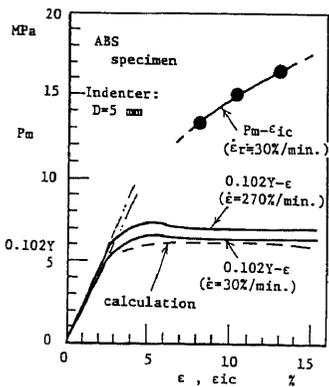
を求めそれを全(くぼみの平均)ひずみ  $\epsilon(=\epsilon_{ic})$  に対して片対数グラフ上に示したのが図 3 である。

図 3 中には先の報告<sup>(6)</sup>における金属材料の例も示してあるが、高分子材料のデータ群は右方に大きくずれて位置しており、かつ  $C$  の値は見掛けのくぼみの形状係数 ( $d/D$ ) の値がかなり大きくなっても 2.5 程度より低く、押し込みの範囲が弾・塑性遷移過程にあることを示している。

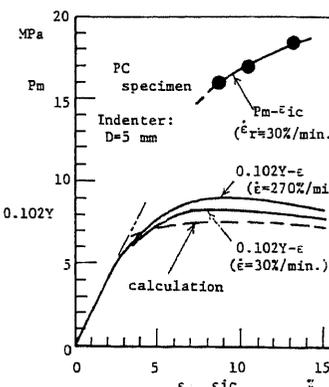
4.4 硬さ/変形抵抗比  $C$ -全(くぼみの平均)ひずみ/弾性回復ひずみ比  $\epsilon(=\epsilon_{ic})/\epsilon_r$  そこで硬さ/変形抵抗比  $C$  を整理するにあたっての横軸のとり方としては、金属材料の場合と同じく全(くぼみの平均)ひずみ/弾性回復ひずみ比  $\epsilon(=\epsilon_{ic})/\epsilon_r$  を考えることにし、その関係を片対数グラフ上で示したのが図 4 であ



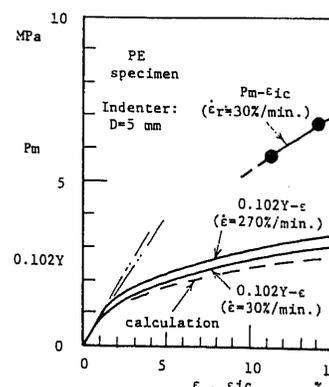
(a) PMMA



(b) ABS



(c) PC



(d) PE

図 2 高分子材料 PMMA, ABS, PC および PE の  $0.102Y-\epsilon$  特性曲線と  $P_m-\epsilon_{ic}$  の関係

る。

4・3節の  $P_m-\epsilon_{ic}$  の関係と異なり高分子材料のデータも金属材料のデータもほぼ同じ位置に集まり、このような整理の仕方が妥当であることを意味しているが、詳細に眺めると高分子材料のデータ群は金属材料のデータ群の若干上方(または左方)に位置していることがわかる。

また、 $\epsilon(=\epsilon_{ic})/\epsilon_r$  の値が小さくなるにつれ  $C$  の値も減少してゆき、 $\epsilon(=\epsilon_{ic})/\epsilon_r=1$  のときには  $C$  の値もほぼ1近辺に達するものと考えてよい。

得られた実験結果は Marsh が四角すい圧子の押込みで示した結果と定性的に一致していることを表し、同時に高分子材料への球圧子の押込みにおいても Hill による球状空洞押広げ理論が、試料の弾・塑性遷移過程において適用できる<sup>(5)</sup>基本理論であることを実証しているものとみなせる。

さて、図4において高分子材料から金属材料までのデータを総合して眺めると、同じ横軸  $\epsilon(=\epsilon_{ic})/\epsilon_r$  の位置でおよそ±10%ぐらいうすなわち最大差20%程度の違いが  $C$  には生じていることがわかる。

このような原因としては、たとえばPE試料の0.8 GPaから鉄鋼試料の200 GPa程度までのおよそ300倍にもおよぶヤング率の開きや、高分子材料の場合は金属材料に比べ弾性回復ひずみが5~10倍程度もある(たとえば弾性回復ひずみ  $\epsilon_r=Y/E_0$  において、高分子材料の  $E_0$  を金属のその約1/100とし、変形抵抗  $Y$  を金属のその約1/10とすれば、高分子材料の  $\epsilon_r$  は金属のその約10倍となる) ことなどを考えることができ、そのような点からすれば  $C$  の値における最大差20%ぐらゐの違いはやむをえないものと思われる。

しかしながら、球圧子の押込みを利用して高分子材料の変形抵抗-ひずみ特性を、かなり精度よく測定する点に主眼を置くことにすれば、むしろ高分子材料に対する硬さ/変形抵抗比  $C$  の式を定式化するほうが適当である。よって次式のような定式化を図る。

$$C=1.1\{1+\ln(\epsilon_{ic}/\epsilon_r)\}=1.1\{1+\ln(\epsilon_{ic}E_0/Y)\} \dots\dots\dots(6)$$

4・5 球圧子の押込みによるひずみ速度と単軸圧縮試験におけるひずみ速度との関係 球圧子による除荷時の平均ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ir(m)}$  を前報<sup>(10)</sup>では除荷に要する時間  $t_r$  を用いて、次式のように定義した。

$$\dot{\epsilon}_{ir(m)}=\epsilon_{ir}/t_r \dots\dots\dots(7)$$

一方、硬さ  $P_m$  を基にして変形抵抗  $Y$  を求めるときには、押込み時の平均ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ii(m)}$  を考える必要があり、押込みに要する時間を  $t_i$  として

$$\dot{\epsilon}_{ii(m)}=\epsilon_{ic}/t_i \dots\dots\dots(8)$$

のように定義できる。しかし、前報までの実験結果を参考にすると、全くほみの平均ひずみ  $\epsilon_{ic}$  が15%程度の範囲までは弾性くほみの平均ひずみ  $\epsilon_r$  はその1/2~1/4程度であり、逆に  $t_r$  は  $t_i$  の1/2~1/3ぐらゐとなっているから荷重保持時間  $t_h$  が短ければ、簡単に考えて  $\dot{\epsilon}_{ii(m)}\approx\dot{\epsilon}_{ir(m)}$  としても大差ないことになる。

また、ヤング率や変形抵抗のひずみ速度依存性を検討してみると、ひずみ速度の数%程度の違いはほとんど影響しないことが実験結果よりわかるから、本報では球圧子の押込みおよび除荷の際の単軸圧縮試験でのひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  に対応する平均ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_r$  は、前報<sup>(10)</sup>で示したと同じ次式を用いて算出した。

$$\dot{\epsilon}_r=(\epsilon_{ir}/t_r)\cdot e\cdot\exp\{1.17\{(\epsilon_{ir}/\epsilon_{ic})-1\}\} \dots\dots(9)$$

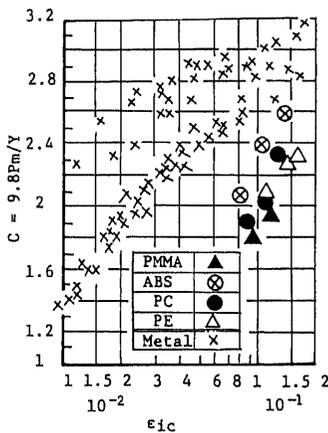


図3 高分子材料と金属材料の  $C-\epsilon(=\epsilon_{ic})$  の関係

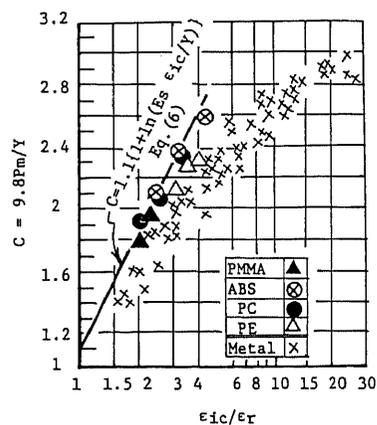


図4 高分子材料と金属材料の  $C-\epsilon(=\epsilon_{ic})/\epsilon_r$  の関係

5. 球圧子の1回の押込みと除荷を利用した弾性域から10数%程度のひずみ域までの変形抵抗-ひずみ特性測定法

4章までの結果を用いれば、先の報告における金属材料と同じようにして  $Y-\epsilon(=\epsilon_{ic})$  特性を求める方法が考えられる。しかし、その方法は多数回の押込みが必要であることから、測定に要する時間と広い試験面とが必要になる。

そこで本章では金属材料に比べ、押込深さ方向の量が著しいという高分子材料への押込特性を活用することにし、かなり大きな荷重で球圧子を1回だけ押込み除荷したときの圧子荷重  $L$ -押込み量  $\delta_i$ 、くぼみの弾性回復量  $\delta_r$  線図を基本に2点の位置における硬さ  $P_m$  を用いて、弾性域から10数%のひずみ域までの変形抵抗-ひずみ特性を測定する方法について述べる。

図5はPC試料に球圧子 ( $D=5\text{ mm}$ ) を  $L=612.5\text{ N}$  で押込みかつ除荷したときの  $L-\delta_i, \delta_r$  線図を例として示したものである。

図5と図1(a)を参照すれば、深さ方向の測定量  $\delta_i, \delta_r$  より接触面直径  $d_c$  は

$$d_c = 2\{(\delta_i - \delta_r/2)\{D - (\delta_i - \delta_r/2)\}\}^{1/2} \dots\dots(10)$$

で与えられ、また試料面直径  $d_i$  は、

$$d_i = 2\{\delta_i(D - \delta_i)\}^{1/2} \dots\dots(11)$$

で与えられるから、試料面上のくぼみ直径  $d$  は前報で得られた次の関係式

$$d = d_i\{1.71 - 0.707(d_i/d_c)\} \dots\dots(12)$$

により求めることができ、よってヤング率  $E_s$  は

$$E_s = (3/2)(0.9)L/(d \cdot \delta_r) \dots\dots(13)$$

から算出できる。

そこで、まず  $L_{max}, \delta_{i,max}, \delta_{r,max}$  を用いてそのときのくぼみ直径  $d_{max}$  を式(10)~(12)から求めたのち、これ以後においては一定と考える  $E_s$  を式(13)から定めれば、 $Y-\epsilon$  曲線の近似直線弾性域部を設定したことになる。

次に、式(10)~(13)より得られる次式においては、

$$E_s = \frac{0.9(3/2)L/[2\delta_r\{\delta_i(D - \delta_i)\}^{1/2}]}{1.71 - 0.707\left[\frac{\delta_i(D - \delta_i)}{(\delta_i - \delta_r/2)\{D - (\delta_i - \delta_r/2)\}}\right]^{1/2}} \dots\dots(14)$$

測定した  $L-\delta_i$  線図上の任意の点における  $(L, \delta_i)$  の値はこの式を満足しなければならないことに着目する。すなわち、一組の  $(L, \delta_i)$  の値を式(14)に代入してこの式を満足する  $\delta_r$  を求めると、式(10)~(12)より  $d$  を、式(4)より硬さ  $P_m$  を求めることができる。そこで  $L_{max}$  の50~60%程度の荷重 ( $L_{mid}$  とする) における

硬さを算出し、この硬さと  $L_{max}$  における硬さを用いれば、先の報告と同じ方法で  $Y-\epsilon$  特性を算出することができる。

すなわち、先の報告<sup>(5)</sup>から  $P_m$  と  $(d/D)$  の関係式：式(15)、(16)を、

$$P_m = P_{up}\left[\frac{d}{D}\right]\left\{1 - \frac{9.8 \times 3\pi}{4(d/D)}(0.9/E_s)P_m\right\}^{x_p} \dots\dots(15)$$

$$(d/D) = (P_m/P_{up})^{1/x_p} + (3\pi/4)(0.9/E_s)(P_m/0.102) \dots\dots(16)$$

式(4)からは荷重  $L$  を算出する式(17)を得るから、

$$L = P_m \cdot d^2 / 1.273 \dots\dots(17)$$

まず式(15)に  $L_{max}$  と  $(d/D)_{max}$  および  $L_{mid}$  と  $(d/D)_{mid}$  を代入して試料の  $P_{up}$  と  $x_p$  値を求める。

この  $P_{up}$  と  $x_p$  および求めてある  $E_s$  を式(16)に代入すれば、以後任意の位置における  $P_m$  と  $(d/D)$  の関係が得られる。同時に式(17)より荷重  $L$  を、式(1)より  $\epsilon_{ic}$  を算出してこの  $P_m$  と  $\epsilon_{ic}$  の値を式(6)に代入したとき式を満足する  $Y$  を求めればよい。

以上のやり方をPMMA試料を例にとりて示したのが図6であり、実測した  $Y-\epsilon$  線図と算出した線図(破線)とはよい一致を示している。また、ABS, PC, PE試料に対する結果 ( $\dot{\epsilon}_r \approx 30\%/min$ ) を「calculation」として、破線で図2(b)~(d)に示してあるが、定式化したCの式(6)と実測値とがへだたっているPE試料の場合には、ひずみの大きいところでは16~17%程度の違いを生じている。

6. 結 論

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 高分子材料へ球圧子を押し込んだときの硬さ

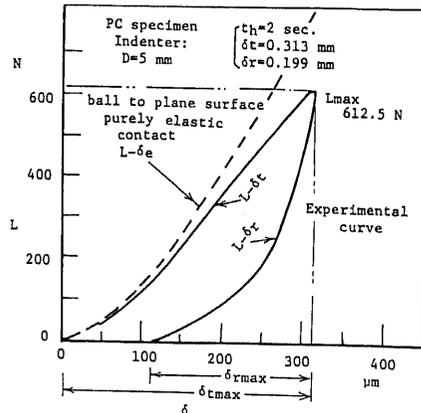
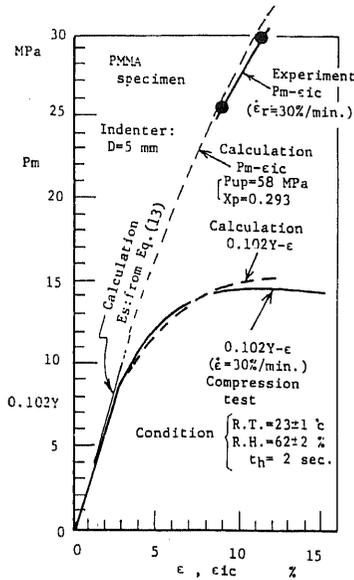


図5 PC試料の  $L-\delta_i, \delta_r$  線図

図 6 PMMA 試料の計算による  $Y-\epsilon$  特性

$P_m$  と単軸圧縮試験における変形抵抗  $Y$  とを対応させ、硬さ/変形抵抗比  $C$  を全(くぼみの平均)ひずみ/弾性回復ひずみ比  $\epsilon(=\epsilon_{ic})/\epsilon_r$  の関数として定式化した。

(2) 前報で示した押込深さ方向の量からくぼみ直径  $d$  を求める式や  $C-\epsilon/\epsilon_r$  の関係式などを工夫して用いることにより、1回の球圧子の押込みと除荷を利用

して弾性域から10数%のひずみ域までの変形抵抗  $Y$ -全ひずみ  $\epsilon$  特性を求めることができることを示した。

(3) この方法は試験片が小さい場合や特殊な環境条件における材料特性を測定する場合などにも有用であり、さらに現行の硬さ試験機に応用してその機能拡大を図ることにより、新素材をも含めた材料の材質評価において利用できる。

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 敬教授と池上皓三教授に心から感謝申し上げます。

## 文 献

- (1) Tabor, D., *Hardness of Metals*, (1951), 67, OXFORD.
- (2) 吉沢編, 硬さ試験法とその応用, (昭42), 286, 装華房.
- (3) 山本・飯塚, 硬さ, (昭49), 188, コロナ社.
- (4) 中村・戸沢, 塑性と加工, 18-201(昭52), 77.
- (5) 石橋・下田, 機論, 52-482, A(昭61), 2387.
- (6) 材料学会, 材料学の最近の進歩, 創立30周年記念号(昭57), 197.
- (7) 砂本, 他, 機誌, 90-821, (昭62), 379.
- (8) 寺沢, 機械の研究, 36-9(昭59), 986.
- (9) 富永, 機械の研究, 37-10(昭60), 1125.
- (10) 石橋・下田, 機論, 53-495, A (昭62-11), 2193.
- (11) Vincent, P. I., *Polymer*, 1(1960), 7.
- (12) 広恵・本吉, プラスチック物性入門, (昭56), 73, 日刊工業新聞社.
- (13) 大石, 高分子材料の活用技術, (昭54), 165, 日刊工業新聞社.
- (14) 成沢, 高分子材料強度学, (昭57), 69, オーム社.

## 討 論

〔質問〕 島本 聡〔埼玉工業大学〕

論文を興味深く拝読させていただいた。次の二点についてお教え願いたい。

(1) 直径5mmの球圧子に対して厚さ10mmの試験片を用いておられるが、荷重の増加に伴って球圧子直下のひずみに影響を及ぼすものと思われる。その点はいかがか。

(2) 球圧子直下のひずみは計測されたか。

〔回答〕 (1) ご指摘の点は、圧子荷重をかなり大きくしたり、荷重が同じでも試験片の厚さが薄くなったりする場合には、確かに予想されることである。

しかし、本論文においては厚さ10mmの試験片に対して、最大荷重  $L_{max}$  は612.5 N (62.5 kgf) であり、そのときの最大押込み量  $\delta_{t,max}$  はPMMA 試料で200  $\mu\text{m}$  程度 [試験片厚さ/最大押込み量の比:  $(t/\delta_{t,max}) \approx 50$ ], PC 試料で300  $\mu\text{m}$  程度  $[(t/\delta_{t,max}) \approx 30]$  である。す

なわち、 $(t/\delta_{t,max})$  の値は通常の場合よりもかなり大きいから、本論文で示したような範囲内では、それほど問題は無いと考えられる。

しかしながら、ご指摘の点は実際上重要な点であるので、それを再確認するため、試験片の厚さがヤング率  $E_s$  や硬さ  $P_m$  の測定値に及ぼす影響についての追加実験を行った結果の概略を述べさせていただく。

まず、PMMA と PC の材料を、それらのそりやたわみの影響を生じさせないようにするため、 $\phi 50$  で厚さが15~20 mm くらいの研削済みの鋼材上面にアロンアルファで接着固定したのち、30 mm  $\times$  30 mm で厚さを3, 6, 10, 14 mm に仕上げ、それらを球圧子押込み用試験片とした。

次に、圧子荷重  $L$  を147 N, 294 N, 612.5 N (15 kgf, 30 kgf, 62.5 kgf) としたときの、各厚さ  $t$  におけるヤング率  $E_s$  と硬さ (平均接触圧力)  $P_m$  を測定し

た。

(i) PMMA の場合,  $L=147\text{ N}$  のときは  $t$  の変化による  $E_s$ ,  $P_m$  の変化は確認し難かったが,  $L=294\text{ N}$  になると  $t=3\text{ mm}$  のときは  $t=6\sim 14\text{ mm}$  のときに比べ 2~4%程度,  $L=612.5\text{ N}$  になると 6~8%程度大きい  $E_s$ ,  $P_m$  の値が得られた。なお,  $t=6\sim 14\text{ mm}$  の範囲でも  $t$  が大きくなるにつれ僅かに値が減少する傾向がみられた。

(ii) PC の場合,  $t$  の及ぼす影響は PMMA の場合の半分程度であった。

したがって, この追加実験の結果からすると, 直径  $D=5\text{ mm}$  の球圧子でも  $L$  が  $600\text{ N}$  程度より小さめにあれば,  $5\text{ mm}$  くらいより厚い試験片ではそれほど  $t$  の影響を受けないと考えられる。今後, 詳しい検討を計画しているので, ご教示を深く感謝する。

(2) 球圧子直下のひずみは直接計測していない。