

先端に丸味を有する円錐圧子を用いた微小押込み試験による材料特性評価法

Evaluation Method of Material Characteristics

by Microindentation Testing with Truncated Conical Indenter

○学 吉川 武文 (新潟大学院)

正 石橋 達弥 (新潟大学)

正 大木 基史 (新潟大学)

学 桜井 正義 (新潟大学院)

Takefumi KICHIKAWA, Graduate School of Science and technology, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-tyo, Niigata

Tatsuya ISHIBASHI, Faculty of Engineering Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-tyo, Niigata

Motofumi OHKI, Faculty of Engineering Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-tyo, Niigata

Masayoshi SAKURAI, Graduate School of Science and technology, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-tyo, Niigata

Key Words : Microindentation, Truncated Conical Indenter, Evaluation Method of Young's Modulus

1. 緒言

本研究室ではこれまでに、天野らによる理想的な円錐圧子のヤング率算出理論式⁽¹⁾を提案してきた。この理論は、金属に関し大荷重域で有用性が確認されているが、微小荷重域における検討は十分でない。

そこで本研究では、微小荷重域における理論の有用性を検討すると共に、高分子材料等の非金属を含んだ幅広い材料範囲にも適用可能であるか検討した。併せて、高分子材料の算出ヤング率に対するひずみ速度依存性の考察も行った。

2. 実験

2.1 微小硬さ試験機および圧子

本研究では、Fig.1に示すような本研究室で設計・開発した縦型微小硬さ試験機 DVH2003 を用いて実験を行った。

本試験機は、変位測定装置として2つのリニアセンサ、荷重測定装置としてロードセルを取り付けてあり、これらから得られるデータをA/Dボードを介してコンピュータに取り込む仕組みになっている。圧子には、圧子先端角 $\beta_{Con}=119^{\circ}51'$ 、先端半径 $R_{Con}=0.195$ mm、球部分の高さ $h_B=0.0262$ mm、トランケーション $T_{Con}=0.0303$ mm のロックウェルダイヤモンド円錐圧子を用いた。

2.2 試験片および試験条件

試験片としては、HV500(SKS3)、ガラス(BK7)、高分子材料のポリカーボネイト(PC)およびアクリル(AC)を用いた。

試験荷重は、1.98 N、4.90 N、7.84 N の3段階を用い、各5回ずつ試験を行った。また、高分子材料の算出ヤング率に対する試験速度の相違の影響を検討するため、較正用試験片を試験したときの押込み速度(0.1 mm/s)を基準として、その10倍の速度(1 mm/s)と1/10倍の速度(0.01 mm/s)でも5回ずつ試験を行った。

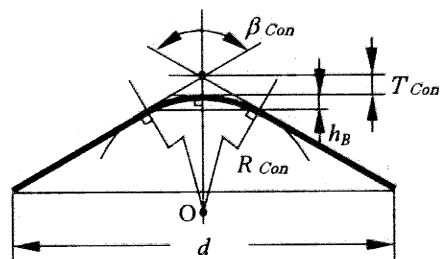
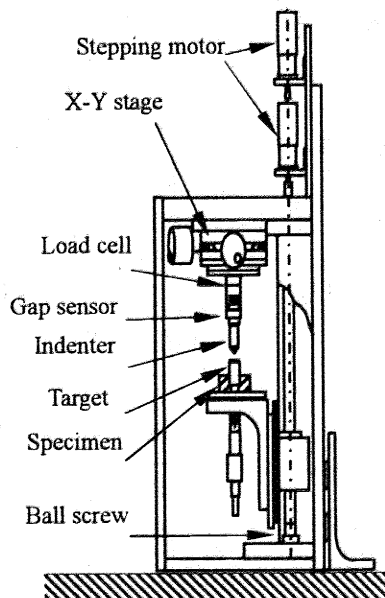


Fig.1 Schematic illustration of DVH2003 tester and Conical indenter's tip



なお試験温度 23.5 °C である。

3. 理論

3.1 荷重-変位線図

Fig.2は押込み試験の荷重-変位線図の模式図である。この測定線図から圧子の押込み量 δ_t と除荷量 δ_r は決定される。しかし圧子と試験片の接触時には圧子保持軸に弾性変形が生じるため、それを考慮に入れる必要がある。図中の破線は実験によって得られたデータの荷重-変位線図である。実線はその弾性変形量 δ_E を考慮に入れ、補正した後の線図である。

3.2 ヤング率算出式

ロックウェルダイヤモンド円錐圧子は先端から 26.2 μm の位置までは、半径 0.195 mm の球であるため円錐の理論が適用できない。そのため押込み量 26.2 μm までは石橋らの提案している球圧子のヤング率算出理論式^{(2),(3)}を用い、それ以降は、球理論および円錐理論を用いて算出した。

(1) 球圧子の理論

$$E_{S(B)} = (1 - \mu_s^2) / \left[\left(\frac{4}{3} \right) D^2 (\delta_t - \delta_E) \frac{\{ \delta_t - (1/2)(\delta_r + \delta_E) \}^{1/2}}{L_M} - I(E) \right] \quad \dots (1)$$

(2) 理想的な円錐圧子の理論

$$E_{S(C)} = (1 - \mu_s^2) / \left[\left(\frac{4}{3} \right) (\delta_{tt} + T_{Con}) \cdot \delta_{rt} \cdot \tan \left(\frac{\beta_{Con}}{2} \right) / L_M - I(E) \right] \quad \dots (2)$$

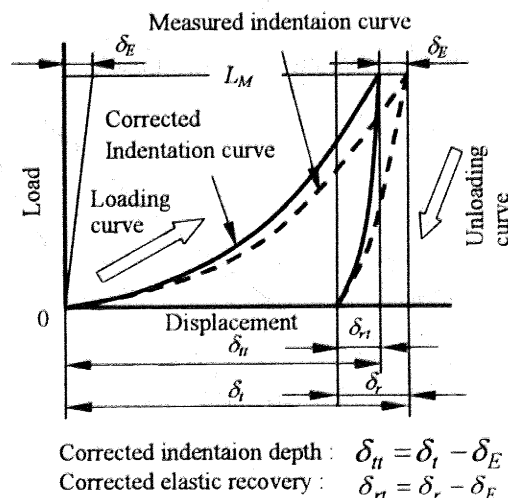


Fig.2 Relationships between displacement and load

ここで、

- δ_i : 圧子の押込み量 δ_r : 圧子の除荷量
 δ_E : 試験機の弾性変形量 β_{Con} : 圧子の先端角($=119^\circ 51'$)
 D : 圧子の先端直径($=2R=2 \times 0.195 \text{ mm}=0.39 \text{ mm}$)
 T_{Con} : トランケーション($=0.0303 \text{ mm}$)
 μ_s : 試験片のポアソン比
(HV500, PC, AC: $\mu_s=0.3$, BK7: $\mu_s=0.214$)
 $I(E)$: ダイヤモンド圧子の弾性パラメータ
 $\{(1-\mu_i^2)/E_i=0.86 \times 10^{-5} [\text{GPa}^{-1}]\}$

4. 実験結果と考察

4.1 試験機の弾性変形量 δ_E の算出結果

本実験では HV500 を較正用試験片($E_s=210 \text{ GPa}$ を既知とする)として用いた。まず式(1)を試験機の弾性変形量 δ_E に関する式に改めたのち、荷重-変位線図から測定した押込み量と除荷量に対し荷重ごとに δ_i , δ_r の平均値を代入することで算出した。その結果を Table 1 に示す。

Table 1 Average values of δ_i , δ_r for HV500 specimen and calculated holder's elastic deformation δ_E

$L_M [\text{N}]$	$\delta_i [\mu\text{m}]$	$\delta_r [\mu\text{m}]$	$\delta_E [\mu\text{m}]$
1.98	1.14	0.770	0.279
4.97	2.33	1.39	0.561
7.84	3.27	2.02	0.890

4.2 ヤング率算出結果

Fig.3 に実際に得られた $L_M=7.84 \text{ N}$ における AC(0.01mm/s)の荷重-変位線図を示す。○で囲んだところは圧子が球部分から円錐部分に変わるところである。

試験機の弾性変形量 δ_E を考慮し、式(1), (2)を用いて PC と AC のヤング率を算出した結果を Fig.4 にまとめる。その他、本実験で得られたデータと算出したヤング率を荷重ごとに平均し、Table 2 に文献値と共にまとめる。

BK7, AC, PC の球の理論を用いた算出ヤング率は文献値と比べほぼ良い一致を示しているが、円錐の理論を用いた算出ヤング率は文献値と比べ 10% 以上低い差が生じた。これは藤塚ら⁽⁴⁾が三角錐圧子の押込み理論で指摘したように、基準片として鋼試験片のみを用いたためであり、今後は式中に藤塚らが提案した試験機較正係数を導入すれば良いと考えられる。一方、高分子材料ではひずみ速度依存性を有する AC のデータにおいて、明らかに押込み速度の上昇と共に、ヤング率が上昇していることがわかる。

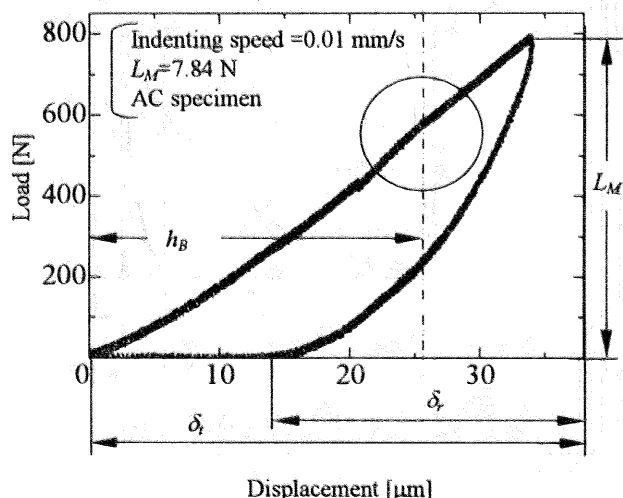


Fig.3 Relationship between load and displacement for AC(7.84 N, 0.01 mm/s)

また、PC のひずみ速度依存性はほとんどないことがわかる。

今後は、押込み量により理論を使い分けるのではなく、ひとつの式でヤング率が求められるような理論を考察していく必要がある。

本研究を遂行するにあたりご支援を賜った(株)原田伸銅所に心から感謝申し上げる。また、ご協力いただいた石橋研究室 4 年生の武士侯育宏君に感謝する。

<参考文献>

- (1) Amano・Ishibashi et al., Journal of Material Testing Research Association of Japan Vol.47(2002), 170
- (2) 石橋・鋤柄, 材料試験技術 Vol.41(1996), 155
- (3) 石橋・鋤柄, 材料試験技術 Vol.42(1997), 188
- (4) Masayuki FUJITSUKA・Tatsuya ISHIBASHI・Motofumi Ohki, Journal of Material Testing Research Association of Japan, Vol.48 No.2(2003), 88

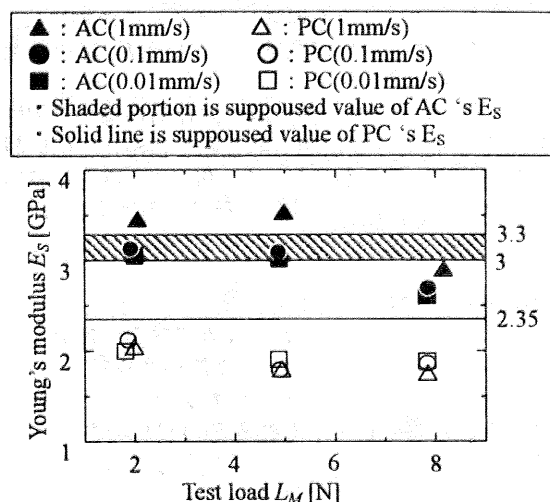


Fig.4 Results of calculated Young's modulus for PC, AC

Table 2 Calculated Young's moduli E_s of arbitrary specimens

Specimen	L_M [N]	δ_i [μm]	δ_r [μm]	Calculated value $E_{s(b)}$ [GPa]	Calculated value $E_{s(c)}$ [GPa]	Supposed value E_s [GPa]
BK7	2.04	1.54	1.54	78.5	-	79.2
	4.97	2.87	2.87	77.8	-	
	7.88	4.11	4.11	74.8	-	
PC (1mm/s)	1.99	14.4	11.6	2.09	-	2.35 (2.23)*
	4.93	29.7	19.2	2.06	1.77	
	7.84	43.8	24.70	2.05	1.73	
PC (0.1mm/s)	1.87	13.8	11.0	2.12	-	2.35 (2.23)*
	4.90	30.9	18.4	2.06	1.79	
	7.84	46.3	23.0	2.10	1.86	
PC (0.01mm/s)	1.82	14.4	10.2	2.10	-	2.35 (2.23)*
	4.89	31.7	17.1	2.14	1.90	
	7.84	47.3	22.4	2.11	1.88	
AC (1mm/s)	2.06	10.5	8.89	3.43	-	3~3.3 (2.89~ 3.19)*
	4.98	19.7	14.7	3.51	-	
	8.16	29.2	20.0	3.41	2.88	
AC (0.1mm/s)	1.91	11.2	8.32	3.14	-	3~3.3 (2.89~ 3.19)*
	4.86	21.9	15.0	3.10	-	
	7.84	32.0	19.6	3.11	2.70	
AC (0.01mm/s)	2.02	12.1	8.6	3.05	-	3~3.3 (2.89~ 3.19)*
	4.90	23.5	14.8	3.01	-	
	7.84	34.6	19.5	2.95	2.60	

(*) : result of bending test