

機能性材料評価学特論 第9回

前回 : ISO14577:2015 による材料特性評価



今回 : 計装化押込み試験による材料特性評価理論
(その5, 可変 ε 係数補正および半径変位補正について)

8. 計装化押込み硬さ試験による材料特性評価理論（その5）

“Higher accuracy analysis of instrumented indentation data obtained with pointed indenters”, T Chudoba and N M Jennett, J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 215407

8.1 要約

●ISO14577:2002 での押込みデータ解析に対して、精度向上のための補正方法として「可変ε係数補正」と「半径変位補正」を提案

→ いずれも ISO 14577:2015 に反映された

・ 上記2つの補正は、特に溶融石英 (Fused Silica, FS) のような弾性率の強い材料にとって重要

→ この2つを組み合わせて補正すると、FSの接触面積は13%程度変化する。

・ 有限要素法による数値解析結果と実験結果を比較
 ・ この補正に基づき得られた面積関数は、AFMで直接測定した面積関数と良く一致した。

8.2 従来モデルの導出

●剛体円錐圧子による押込みを仮定

角錐の場合: $a_{eff} = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}}$
 と定義することで等価な円錐とみなせる。

$$h_{max} = h_e + h_p = h_s + h_c \quad \dots (1)$$

$$H = \frac{F}{A_c} = \frac{F}{\pi a^2} \quad \dots (2)$$

$$h_c = a \tan \alpha = \frac{\sqrt{F}}{\sqrt{\pi H}} = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \tan \alpha \quad \dots (3)$$

$$E = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad \dots (4)$$

(3)(4)とも A_c に依存する → 正確な面積関数の必要性

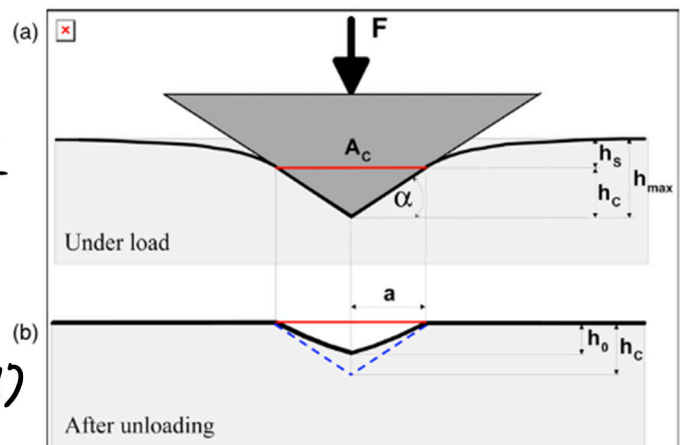


図 8.1 押込み過程の模式図

8.2(続き)

●従来の解析における仮定（問題の単純化のため）

- (1) 負荷時の接角と投影面積と、除荷後の接角と投影面積は等しい。
- (2) 表面の弾性変形は、押し込みによる塑性変形（圧痕形成）の影響を受けない。
- (3) パイルアップもしくはシンクインと同程度の表面相対は無視できる。

●トータルの弾性変位 h_e : $h_e = h_s + (h_c - h_0) = h_{\max} - h_0 \dots (5)$

●純粋な弾性接触における自由表面の弾性変位 h_s : Hertzの弾性接触理論を参照

・角度 α の剛体円錐: $F = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E^*}{\tan \alpha} \cdot h^m, m=2 \dots (6)$

・半径 R の剛体球: $F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} h^m, m=1.5 \dots (7)$

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad \frac{dF}{dh} = S$$

→表面上の任意の位置における円錐による垂直変位: Sneddonの弾性角錐を参照

$$w(r) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{r}{a} \right) a \tan \alpha \quad (r \leq a) \dots (8)$$

・この式に $r=a$ (h_s に相当) または $r=0$ ($h_{\max}$ に相当) を代入し、 $h_s/h_{\max}$ の比をとると、 $h_s/h_{\max} = 1 - \frac{2}{\pi}$ となる。

・この比を m の関数: ε 係数, Oliver & Pharr (1992) で導入, $h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{F}{S} \dots (9)$

表 8.1 各圧子の弾性変形パラメータ

Indenter/pressure	$h_s/h_{\max}$	m	ε
Flat punch	1	1	1
Sphere, paraboloid of revolution	0.5	3/2	0.75
Cone	$1-2/\pi = 0.3634$	2	0.7268
Constant pressure, circular boundary	$2/\pi = 0.6366$	1	0.6366

8.2(続き)

- ・ 圧子自身の弾性変形の考慮: 複合弾性率 E_L の導入
- $$\frac{1}{E_L} = \frac{1-\nu_k^2}{E_k} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \quad \dots (10)$$

8.3 付加的塑性変形が存在する時の表面弾性変位

- 圧子による接触時の接触圧力分布が、圧子形状および接触状態（弾性接触時 or 塑性変形開始後）にどう影響を受けるのか？

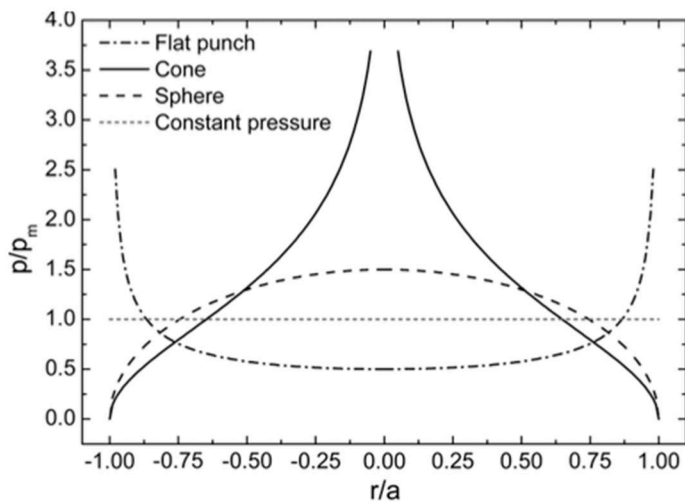


図 8.2 接触圧力分布(弾性接触時)

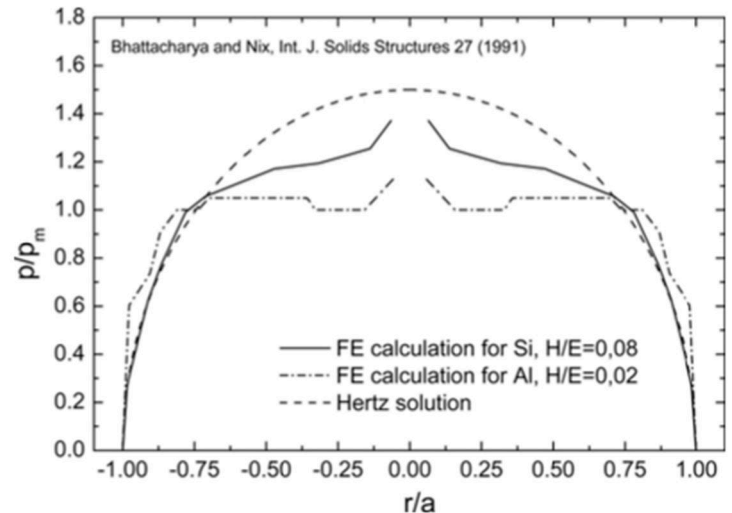


図 8.3 接触圧力分布(塑性変形開始後)

- ①弾性接触時: 解析的に接触圧力分布を求めることが可能

- ・ 円錐圧子: 中心部で無限大
- ・ フラット圧子 (円筒形): 端部で無限大

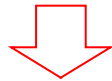
↓
実際の材料では圧力(応力)が一定限度を超えると塑性変形が始まる(降伏する)ため、このような圧力分布にはならない。

- ②塑性変形開始後: 解析的には求められないので数値計算 (有限要素シミュレーション)

- ・ 円錐圧子において、中心部の圧力が顕著に低下
- ・ 石工の異なる材料において、圧力分布が異なる。
- 塑性変形の影響により圧力分布が変化する。

8.3(続き)

- ・ 除荷曲線を表すべき乗関数 $F = C(h-h_0)^m$ - (11) において、弾性接触荷重であれば角錐は円錐と同様に $m=2$ になるが
- ・ 角錐圧子による実験データから $m: 1.2 \sim 1.6$ の範囲
- ・ いずれも表1における球圧子の値と一致する。 $\varepsilon: 0.75$



- m および ε の値は圧子形状によって決まるものではなく、負荷と除荷において影響を受ける (塑性変形)

8.4 「可変 ε 係数」の導入

- ・ ε の定義として、圧子形状だけでなく材料の圧力分布の影響を考慮したもの。
- ・ Bolshakov の「等価先端」モデルを適用、 h_s/h_{max} 比を導出

$$\frac{h_s}{h_{max}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{m}{2m-2}\right)}{\Gamma\left(\frac{2m-1}{2m-2}\right)} \quad \text{--- (12)}$$

↳ ISO 14577: 2015 に反映

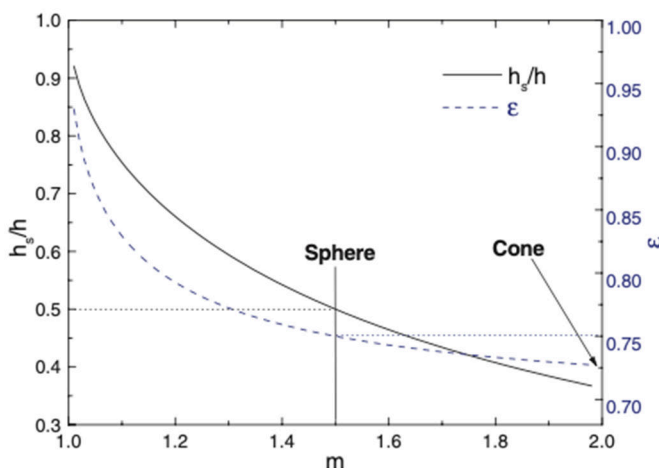


図 8.4 m の関数としての ε および h_s/h_{mx}

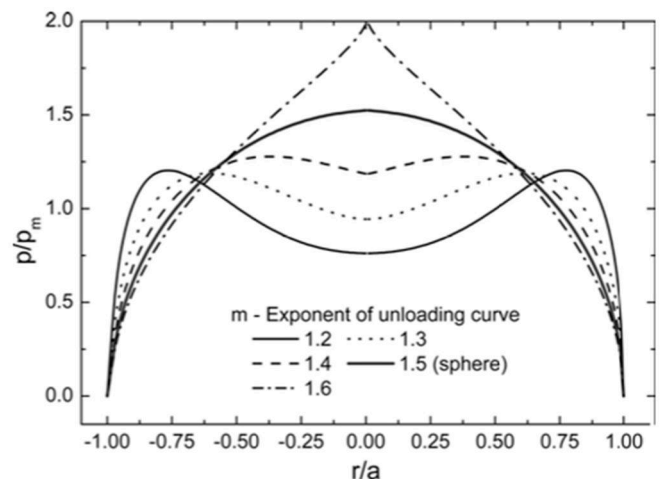


図 8.5 接触圧力分布に及ぼす m の影響

8.4(続き)

- ・ h_s/h_{max} は ε は m の関数として変化 (図 8.4)
- ・ m が 1.2 ~ 1.6 の範囲における圧力分布 (図 8.5)
- 主な圧力変化は中心部で生じているが、全体の接触面積に対する中心部の割合はそれほど大きくない。
- ・ 円錐のような先端が尖った圧子: $\varepsilon = 0.75 \sim 0.8$ で変化
- 一般的に、 $\varepsilon = 0.75$ の代わりに可変 ε 係数を用いることによる精度の改善はそれほど大きくはない。