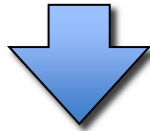


機能性材料評価学特論 第6回

前回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
（その3，フレームコンプライアンス補正について）



今回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
（その4，パイルアップ補正および Oliver-Pharr 法の改善
について）

6. 計装化押込み硬さ試験による材料特性評価理論（その4）

“Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology”, W.C. Oliver and G. M. Pharr, J. Mater. Res, 19(1) (2004) 3-20

6.1 要約

- 1992年の著者論文以降の計装化押込みにおける研究成果について言及、特に「有効圧子形状」「パイルアップ」による誤差、「係数による補正」について言及。
 [有効圧子形状について、Tudoba-Jennetの論文で示した可変係数と同様の概念のため今回は省略]
- 1992年の著者論文で示した解析手法について、その欠点を示した上で現在著者らが実施している改良解析手法を説明した。

6.2 パイルアップによる誤差

- 1992年の論文で示された解析手法（Oliver-Pharr 手法）の重大な問題点：
 圧痕周辺のパイルアップの早急影響を考慮していない。

・パイルアップに関連づけられる材料特性：

- 複合弾性率と降伏応力の比, E_{eff}/σ_Y
- 加工硬化係数

注：本来の「シンクイン」は
 右図(b)のように
 圧痕近傍に限定
 される材料
 隆起を指すが、
 ここでは純粋な「沈降」
 としてとらえる。

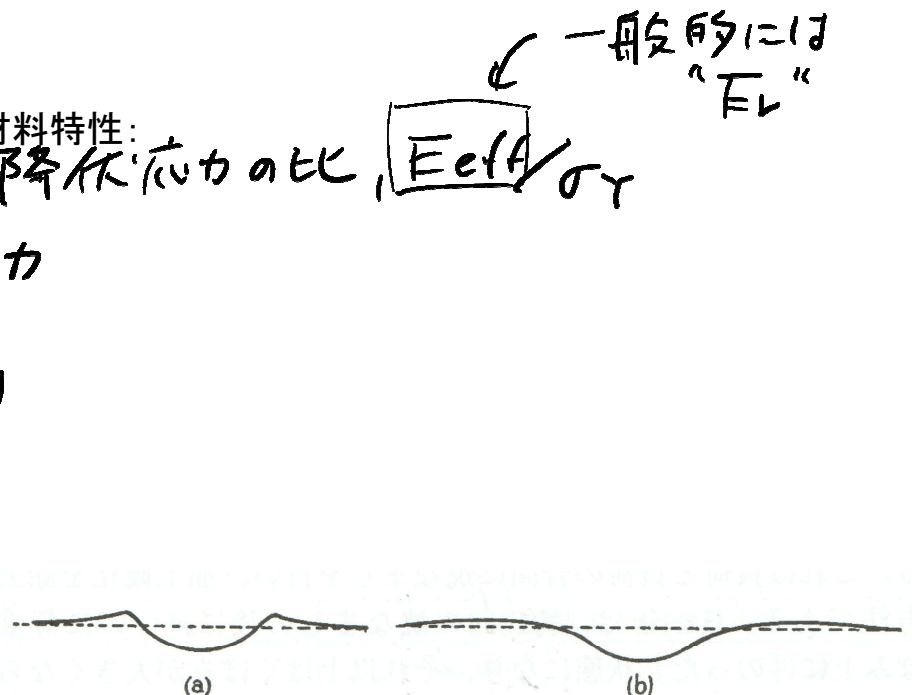


図 6.1 「Piling-up」と「Sinking-in」(再掲)

6.2 (続き)

- ・パイルアップが大きい: E_{eff}/σ_Y 比 大 + カロエ硬化しにくい材料
 - ・軟質金属 (鉛等)
 - ・十分にカロエ硬化した後の材料
- ・押し込み中の変形による加工硬化: パイルアップを抑制

●剛体円錐をモデルとしたFEシミュレーション

①パイルアップ挙動に及ぼす材料パラメータの影響

- ・ $E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$
- ・ σ_Y を $0.114 \sim 26.62 \text{ GPa}$ で変化
- ・ カロエ硬化率 η として
 - $\eta = 0$ (3弾-完全塑性)
 - $\eta = 10 \sigma_Y$ (線形硬化)
- の2条件を設定。

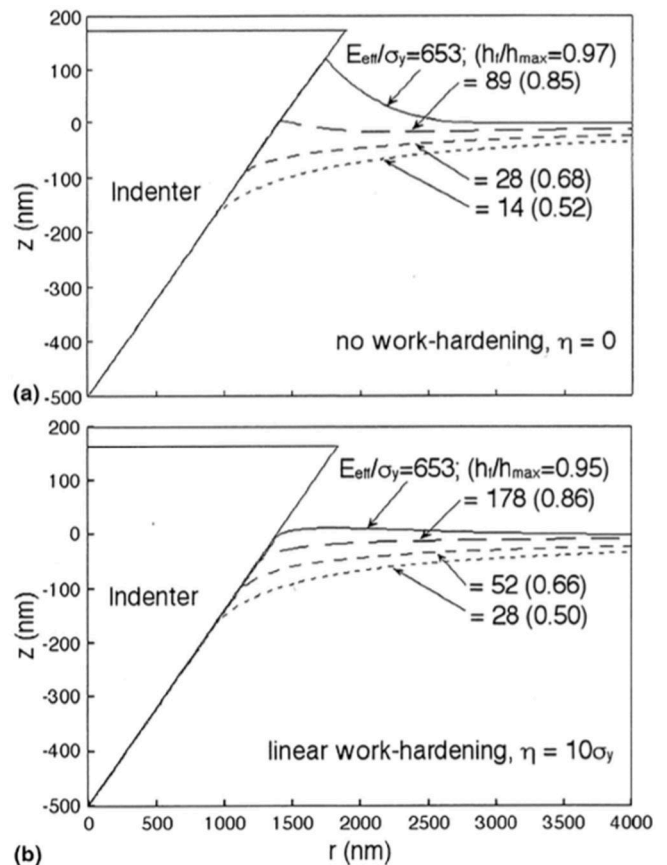


図 6.2 パイルアップに及ぼすパラメータの影響

(1)パイルアップ挙動と関連するパラメータとしての h_f/h_{max} 比を定義

- ・ 自己相似形状因子 (円錐や角錐) では h_f/h_{max} は押し込み深さに依存しない。
- ・ h_f/h_{max} の範囲: 0 (完全弾性) ~ 1 (完全塑性)

(2) h_f/h_{max} 比に基づくパイルアップ挙動解析

- ・ h_f/h_{max} が 1 に近い + カロエ硬化が小さい: パイルアップ大
- ・ $h_f/h_{max} < 0.7$: カロエ硬化挙動によらずにパイルアップしない。

6.2 (続き)

②パイルアップ挙動と接触面積との関係

・ A_{true} : FEシミュレーションでの
圧痕形状から直接求めた
接触面積。

・ A_{expt} : FEシミュレーションで
得られた押込曲線
データと解析手法に
適用して予測した接触
面積

・ A_{af} : パイルアップが
ない状態での接触面積

$$\left[\begin{array}{l} A_{true} \text{ or } A_{expt} / A_{af} > 1 : \text{パイルアップ} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad < 1 : \text{シンクイン} \end{array} \right]$$

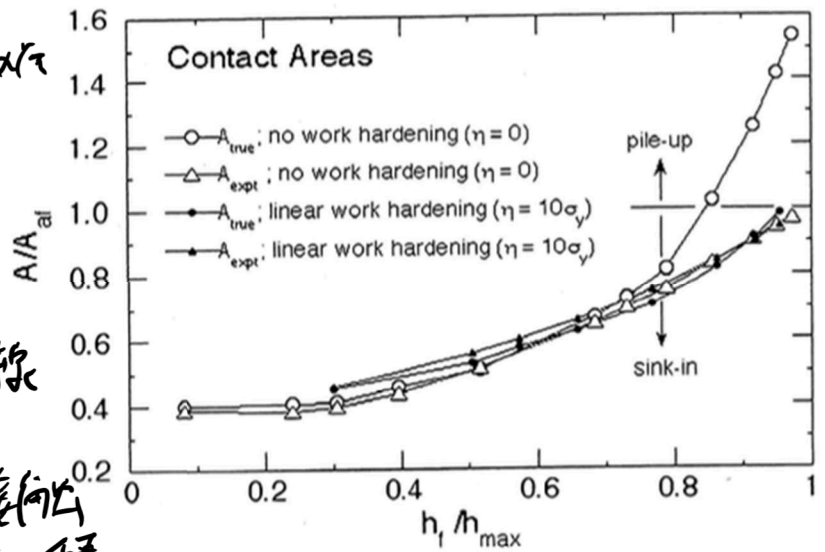


図 6.3 パイルアップ挙動と接触面積との関係

・パイルアップが大きい材料 (h_i/h_{max} が 1 に近い + $\eta=0$): 従来の解析手法は
接触面積を過小評価していたことになる。

・加工硬化する材料 ($\eta=10 \cdot \sigma_y$): 解析手法の誤差は小さい。

注: 言式負力 - 変位データのみに基づいて、材料の加工硬化
挙動を予測することは困難

過小評価となる条件範囲においては、圧痕の
歪み像化によりパイルアップの程度を正確に
推定可能。

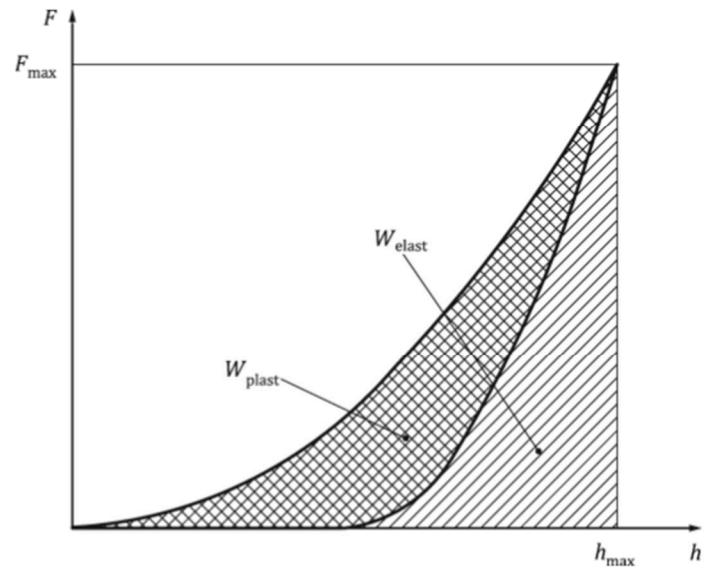
6.3 パイルアップの補正

●圧痕の画像化を伴わないパイルアップ補正手法の開発：

計装化押込みに関する研究の1つの「ゴール」

●Cheng らによる研究：加エ石炭化挙重力の異なる様々な弾-塑性材料に対する FEMシミュレーション、「押込み仕事」に基づく解析手法

- ・ W_{tot} : 押込みによる全仕事
石図, $W_{plastic} + W_{elastic}$
- ・ W_u : 除荷により回復する仕事
石図, $W_{elastic}$
- ・ $W_{tot} - W_u$: 不可逆仕事
石図, $W_{plastic}$



- ① $\frac{W_{tot} - W_u}{W_{tot}}$ とは「加エ石炭化」
挙重力に影響を受ける、 E_{eff}/H の関数であると提案。

図 6.4 押込み仕事 [ISO14577-1:2015 から引用]

$$\frac{W_{tot} - W_u}{W_{tot}} = 1 - S \frac{H}{E_{eff}} \quad (18) \text{ [論文中の式番号]}$$

- ② (5)式 $H = \frac{P_{max}}{A}$, (6)式 $S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_{eff} \sqrt{A}$ を代入し、
 $\beta = 1$ とし次式を導出
- $$\frac{4}{\pi} \frac{P_{max}}{S^2} = \frac{H}{E_{eff}^2} \quad \dots (19)$$

6.3 (続き)

- ③ W_{tot} , W_u , P_{max} , S は全て押込みデータとして与えられる。
 → (18), (19) 式に上記パラメータを代入して逆算
 → H と w E_{eff} を決定
- ④ 求めた H と w (5) 式から A を逆算
 → パイルアップの影響を含んだ「真の接触面積」

●本補正方法の問題点 (Oliver-Pharr の指摘):

- ・ パイルアップは E_{eff}/σ_y が
 大きい条件にて顕在化
 していた
 ↓

- ・ Cheng らの (18) 式導出の
 ためのデータにおいて、この条件が当てはまる領域
 では $\frac{W_{tot} - W_u}{W_{tot}}$ 比が加工硬化率と完全に
 対応していない可能性がなることを指摘。

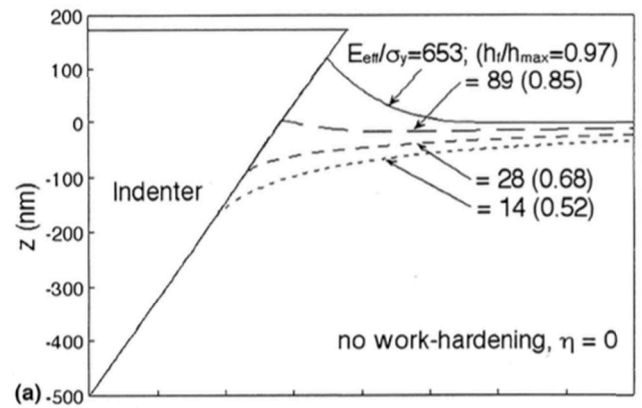


図 6.2 (再掲)