

433 微小押込み試験におよぼすひずみ速度依存性の影響

防衛大学校 ○小笠原永久 千葉 矩正 巻口和香子

防衛庁技本 倉持知佳夫

1. 緒言

微小押込み試験は、ダイヤモンド製の微小圧子をサブ μm から数 μm 程度、対象材料に押込み、その際に計測される荷重-変位曲線からヤング率と硬さを評価する手法である。従来の材料試験では難解な電子デバイス銅配線など微小領域の機械的特性評価を目的として研究が進められている。

しかし、この手法は対象とする領域や計測量の微小さゆえに問題点も多く⁽¹⁾、汎用性の高い評価手法として確立されているとは未だ言い難い。正確な押込み形状を得るために圧子先端が三角錐の Berkovich 圧子が用いられているが、圧子直下の応力集中や摩擦による圧子形状変化などの問題がある。

本研究では、Berkovich 圧子直下の大ひずみ域におけるひずみ速度が微小押込み試験に与える影響⁽²⁾⁽³⁾について、微小押込み試験と有限要素解析により評価した。

2. 微小押込み試験

微小押込み試験には、圧延銅（多結晶タフピッチ銅、以下圧延材）および同材料を焼きなました焼鈍銅（以下、焼鈍材）の2種類のバルク材を使用した。微小押込み試験に先立ち万能試験機を用いた準静的引張試験を行ない、Fig. 1 に示した応力-ひずみ関係を得ている。

試験片の表面は耐水研磨紙で機械研磨した後、加工変質層を除去する目的で電解研磨によりさらに $30\mu\text{m}$ 以上を研磨し表面粗さを $Ra=0.02\mu\text{m}$ 程度に仕上げている。

実験に使用した超微小硬度計（島津製作所製、DUH-201S）は、恒温槽内に設置している。圧子は荷重速度一定で制御されており、負荷速度および除荷速度は約 70mN/s 、最大負荷点で30秒の保持時間を設けている。

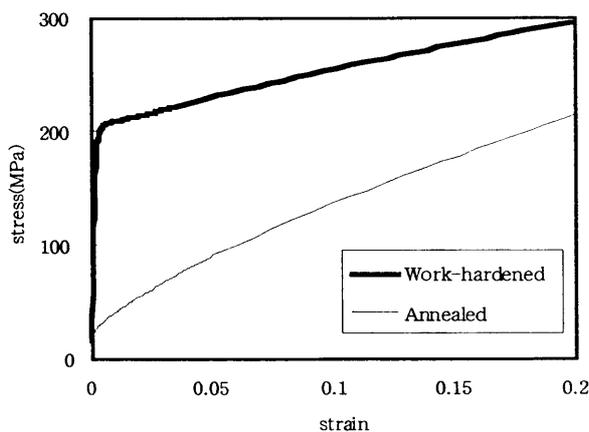


Fig. 1 Stress - strain curves (quasi-static)

3. 有限要素解析

微小押込み試験における変形機構を調べるために、陽解法有限要素法プログラム LS-DYNA を用いて、微小押込み試験の3次元シミュレーションを行なった。

圧子形状の 60° 周期の対称性を考慮し、実験の $1/6$ サイズのモデルを作成した。8節点ソリッド要素を使用し、要素数10006、節点数11824、最小要素は、圧子直下の要素で $0.4\mu\text{m}$ である。材料定数は、準静的引張試験で得た応力-ひずみ関係を多直線近似し、入力している。

実験および有限要素解析において、圧子に $5\mu\text{m}$ の変位を与えたときの荷重-変位曲線をFig. 2に示す。

硬さ H および複合弾性率 E_r は、以下の式に示されるように荷重変位曲線から得られる最大荷重 P_{max} 、初期除荷勾配 dP/dh 、接触深さ h_c により決定される。故に、荷重-変位曲線の再現は非常に重要である。

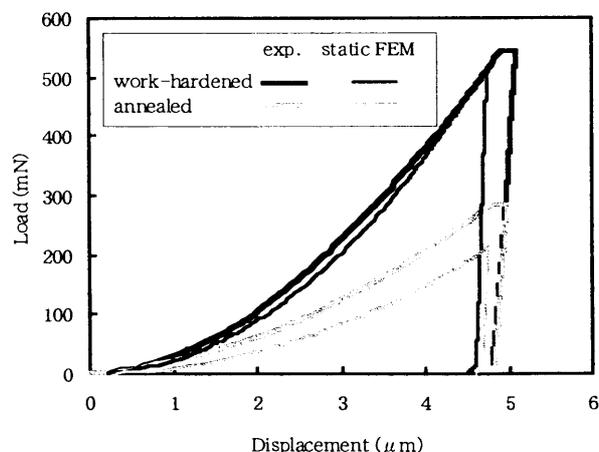
$$H = \frac{P_{\text{max}}}{24.5h_c^2} \quad (1)$$

$$E_r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{24.5h_c^2} \frac{1}{dh/dP - C_f}} \quad (2)$$

しかし、圧延材と焼鈍材の両解析の荷重値とも実験の値と較べ低く、特に焼鈍材では実験値の $2/3$ 程度である。また、実験では最大負荷後の保持時間に変位が増加していることに対して、有限要素解析の結果では変位は増大していない。

Fig. 3 に焼鈍材を対象に行なった解析において、圧子直下の節点のひずみ速度履歴を示す。最大で約 $10/\text{sec}$ と大きなひずみ速度を有していることがわかる。

微小押込み試験では Berkovich 圧子など鋭い先端形状を持つ圧子を用いており、圧子直下には非常に大きな応力集中が生じる。試験の初期段階では、応力集中部のひずみ速度が非常に大きくなるため、加工硬化のひずみ速度の依存性を考慮していない解析の結果が、実験と較べ低い荷重値を示したのである。また、実験における保持時間中の変位増加は、応力緩和に起因すると考えられる。

Fig. 2 Load - displacement curve
(Experiment and static FEM)

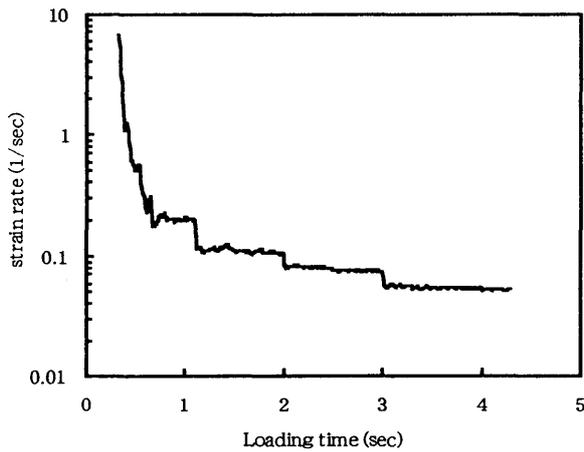


Fig. 3 Changes of strain rate right under indenter

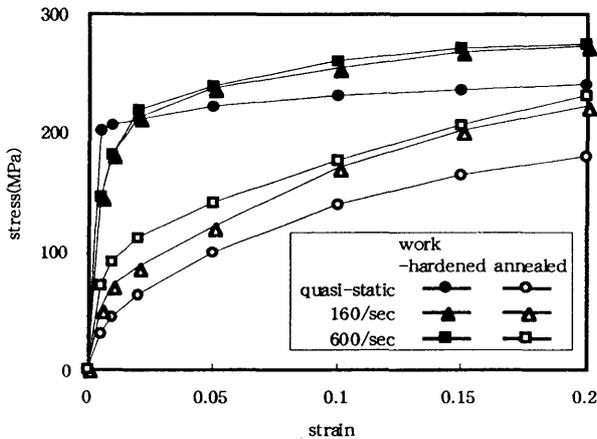


Fig. 4 Stress - strain curves (high velocity tensile test)

4. 衝撃引張試験

本実験で用いた圧延材および焼鈍材の加工硬化のひずみ速度依存性を調べるために、One Bar 方式の衝撃引張試験を行なった。

得られた応力-ひずみ曲線を Fig. 4 に示す。ひずみ速度範囲は、160/sec および 600/sec である。

5. ひずみ速度依存性を考慮した解析

有限要素解析においては、Cowper-Symonds の式を利用してひずみ速度依存性の効果を再現する。

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_y \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \quad (3)$$

ここで、 σ_0 は準静的状態の応力値、 σ_y は降伏応力である。 C と P は材料定数であり、衝撃引張試験の結果から最小二乗近似法により、圧延材と焼鈍材のそれぞれの値を求めた。

また、実験では荷重速度一定で圧子を制御しており、圧子の押し込み速度は、押し込み初期に速く、徐々に遅くなる。これに対し有限要素解析では圧子を変位制御している。そこで、速度依存性を正確に再現するために、解析における圧子の変位速度を実験と同じになるよう設定した。

Fig. 5 にひずみ速度依存性を考慮した時の有限要素解析結果を実験の結果と示す。ほぼ実験と同じ荷重変位曲線が得られており、また最大負荷後の保持時間における変位増加も再

現できている。

保持時間を取らないこととして、荷重変位曲線の押し込み過程の荷重値からそれぞれの押し込み深さにおける硬さを計算し、Fig. 6 に示した。特に焼鈍材において押し込み深さが浅い場合に硬さの値が高い⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これはひずみ速度依存性が一因であると考えられる。

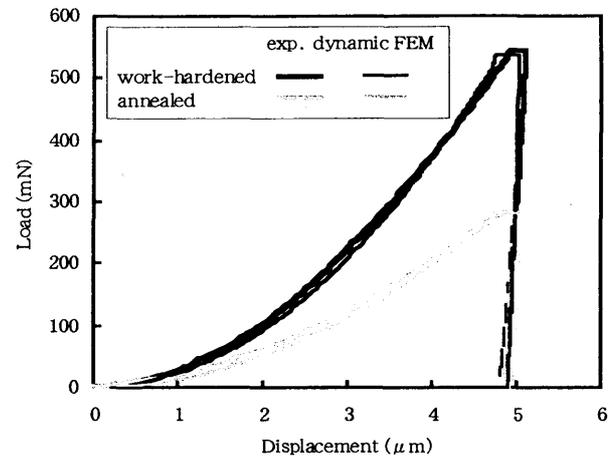


Fig. 5 Load - displacement curves (Experiment and dynamic FEM)

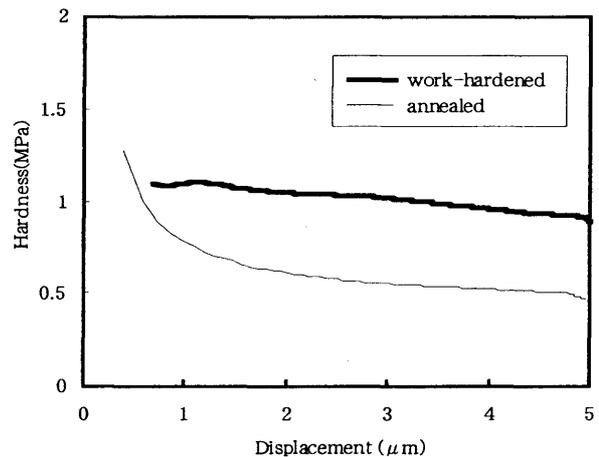


Fig. 6 Relation between displacement and hardness

6. 結言

ひずみ速度依存性を考慮した有限要素解析の結果から、押し込み速度によっては材料のひずみ速度依存性の影響が分かることが分かった。荷重変位曲線の押し込み過程の荷重値から硬さを求めると、ひずみ速度の影響で押し込み深さ依存性が現れる。

圧子の押し込み速度を遅くすればひずみ速度の影響を小さくすることは可能であるが、環境温度の影響を受けることが予測され実験が難しくなる。

参考文献

(1)W.C.Oliver and G.M.Pharr, J. Mat. Res., 7-8, 1992, p.1564
 (2)仲町, 布施, 日本機械学会論文集 A 編, 64-622, 1998, p.1535
 (3)M.F.Doener and W.D.Nix, J. Mat. Res., 1-4, 1986, p.601
 (4)W.D.Nix and H.Gao, J. Mch. Phys, 46-3, 1998, p.411
 (5)Y.Liu and A.H.W.Ngan, Scripta Mat., 44-2, 2000, p.237