414

押込み法による弾塑性特性の評価法

阪大工　○米津明生，阪大工[院]　近藤俊之，阪大工　箕島弘二

Method to Determine Elasto-Plastic Properties by Indentation

Akio YONEZU, Toshiyuki KONDO and Kohiji MINOSHIMA

1. 緒　　言

押込み法は，圧子を材料に所定の力あるいは変位まで押込み，除荷するまでの押込み力と変位の関係，すなわち押込み曲線（*F-h* 曲線）から力学的特性を簡便に評価できる方法である．最近では，押込み試験の数値解析を利用して弾塑性特性を評価する手法が提案されている[(1)-(6)]．具体的には，2 つ以上の異なる角度の圧子から得られる押込み曲線と数値解析により導出した無次元関数を用いて，塑性特性（降伏応力σ_y，強さ係数 R，加工硬化指数 n）を推定する方法であり，2 圧子法（Dual Indentation）と呼ばれている[(1)]．しかしながら，この方法は複数の圧子を用いて複数回の試験を行う必要がある．実用の観点では，1 つの圧子を用いた一回の押込み試験（1 圧子法）による評価が望ましい．

本報告では，これまで提案されてきた 2 圧子法を紹介するとともに，その方法に基づいて新たに検討した 1 圧子法の結果について述べる．

2. 押込みの有限要素解析法

Fig.1 に押込み曲線と応力―ひずみ曲線の模式図を示す．等方材料の場合，押込み過程では Kick の法則（$F=Ch^2$）が成立するので，傾き C は押込み力と深さに影響しない，圧子の角度および材料特性に依存した定数である．一方，除荷過程の $S=\mathrm{d}F/\mathrm{d}h$ は弾性スティフネスと呼ばれ，複合ヤング率 E^*を計算できるパラメータである．

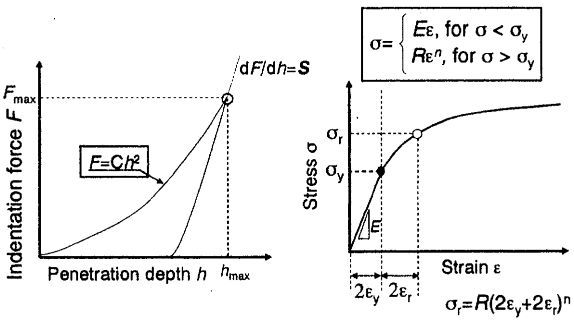
Fig.1(b)の応力―ひずみ曲線は，べき乗硬化則が成立する材料の模式図であり，降伏応力（σ_y）以上では$\sigma=R\varepsilon^n$ が成立する．2 圧子法で推定するパラメータは降伏応力σ_y，強さ係数 R および加工硬化指数 n であるが，降伏応力では$\sigma_y=E\varepsilon_y=R\varepsilon_y^n$ が成立するので R および n の２つのパラメータを推定すればよい．次に Fig.1(b)に示すσ_rは，代表応力と呼ばれ，塑性変形領域を特徴付ける応力であり，それと対応したひずみを代表ひずみε_r と定義されている[(1)(2)]．後述の Fig.5 に示した無次元関数Πの結果は，このε_rに依存するので，加工硬化指数 n に依存しないΠ関数を導出するためには適切なε_r を選ぶ必要がある．ε_rは押込む圧子の角度に依存する[(2)]．本研究では，小笠原ら[(4)]が等２軸平面ひずみ状態を仮定して，導出した式(1)を用いた．

$$\varepsilon_r=0.0319\cdot\cot\alpha \qquad (1)$$

ここで，αは円錐圧子を仮定した半頂角の角度で，対稜角 115°のバーコビッチ圧子では$\alpha=70.3°$($\varepsilon_r=0.0115$) になる．

無次元関数Πを導出するために押込み試験の有限要素解析（FEM）を行った．解析に用いたソフトは，非線形構造解析用の汎用パッケージソフトである MARC および MENTAT（ver.2005 32bit）（ともに MSC ソフトウェア社製）である．Fig.2 に FEM モデルを示す．２次元軸対称モデルを作成し，圧子は剛体とした．計算される押込み曲線は，材料のポアソン比νと摩擦係数μに影響されないと報告されているが[(2)(4)]，本研究では押込み解析で一般的に用いられている$\nu=0.3$ および$\mu=0.15$[(4,6)]を採用した．Table1 は解析に用いた材料定数で，合計 54 種類の材料に対して変位制御の押込み試験の弾塑性解析を行った．圧子は 3 種類の三角錐圧子（対稜角：115，110，100°）を想定して，円錐圧子（半頂角：70.3°，64.8°，50.6°）モデルを作成した．なお，モデルは三角要素で作成し，要素数は 1457，総節点数は 813 である．

解析モデルの有効性を確かめるためにアルミニウム合金（Al2024-T3）および純アルミニウム（Al1100）の押込み解析を行った．Fig.3(a)は引張試験より得られた応力―ひずみ曲線である．この特性を FEM に入力して押込み曲線を計算した．得られた結果を Fig.3(b)に示す．比較のために押込み試験結果を実線で示す．両材料ともに解析結果は実験結果によく一致し，モデルの要素数お



(a) Typical indentation curve　　(b) The power low elasto-plastic stress-strain behavior

Fig.1 Schematic illustration of typical indentation curve (a) and the power low elasto-plastic stress-strain curve (b).

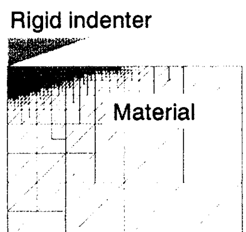


Fig.2 Computational modeling of indentation.

Table1 Elasto-plastic properties of 54 materials for FEM calculation.

E GPa	σ_y GPa	n
100	0.1	0.1
200	0.3	0.3
300	0.5	0.5
	1.0	
	3.0	
	5.0	

よび圧子の角度の有効性が確認された.

Fig.4 に Table1 に示す特性を有する材料の押込み曲線を求めた例を示す. なお, 最大押込み変位を 2μm に設定して全ての計算を行った. Fig.4(a)は n 値, (b)はσ_y, (c)および(d)は E をそれぞれ変化させた結果である. n およびσ_y の塑性特性を変化させると最大押込み力が変化しており, これは負荷過程の傾き C が塑性特性に依存していることを意味している. 一方, Fig.4(c)および(d)では E の上昇に伴い弾性スティフネス S も上昇していることがわかる. なお, Fig.4(c)は n およびσ_y を固定して E のみを変化させているが, C は変化している. これは, 強さ係数 $R=\sigma_y (E/\sigma_y)^n$ で表されるためである.

3. 次元解析とその応用

FEMから得られた C を以下の次元解析[3]のΠ関数式(2)で整理した.

$$\frac{C}{\sigma_r(\varepsilon_r)} = \Pi\left(\frac{E}{\sigma_r(\varepsilon_r)}\right) \qquad (2)$$

Π関数は変数の次元のみに着目し, 等しい次元をもつ変数同士を除して整理する[3]. 得られた結果を Fig.5 に示す. 上述のとおりε_r=0.0115 で整理すると式(2)の関係は一本の曲線 (図中の実線) で近似できる. その他の圧子の結果についても式(1)に基づいて適切なε_r を選ぶと Fig.5 と同様な結果が得られた. なお, 図中の破線は小笠原らが提案した[6]弾性解と剛塑性解の 2 つの理論を組み合わせた無次元関数であり, 本研究の結果とよく一致している.

Fig.3 の材料に 115° および 100° の三角錐圧子を用いて押込み試験を行った. 得られたそれぞれの C を式(2)に代入し$\sigma_r-\varepsilon_r$ 関係を求めて塑性特性を推定した. 得られた結果を Fig.6 に示す. 引張試験結果を○で示すが, 良く一致していることがわかる.

次に 1 つの圧子で塑性特性を推定する 1 圧子法を検討した. 詳細は紙面の都合で割愛するが, 式(2)で用いる C と独立したパラメータを抽出する必要があるので, 除荷部の弾性スティフネス S を用いた. なお, 圧子の離脱除荷部は不安定になりやすいので引張試験から求めたEから S を算出した. この S に対して式(2)と独立した新たな無次元関数を作成した. 1 圧子法を用いて推定した結果を Fig.6 の点線で示す. 両材料ともに引張試験結果と比較的よく一致しているが, 従来の 2 圧子法の結果と比較して精度が悪い. 今後は, 提案した 1 圧子法の精度向上および適用限界を調べる予定である. **(結言省略)**

参考文献 (1) M. Dao, et.al., Acta. Mater, 49, pp.3899-3918 (2001). (2) J. L. Bucaille, et.al, Acta. Mater, 51, pp.1663-1678 (2003). (3) Y-T Cheng, et.al. Surface and Coatings Technology, 133-134, pp.417-424 (2000). (4) N. Ogasawara, et.al., J. Mater. Res., 20, 8, pp.2225-2234 (2005). (5) N. Ogasawara, et.al. , Scripta Mater. 54, pp.65-70, (2006). (6) N. Ogasawara, et.al, J. Mater. Res., 21, 4, pp.947-957, (2006).

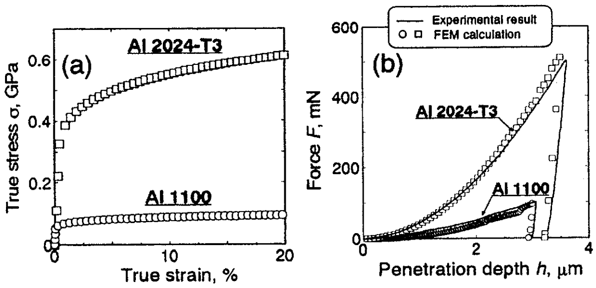


Fig.3 Stress-strain curve of Al 2024-T3 and Al 1100 measured by tensile loading test (a) and their indentation curves compared with FEM calculations (b).

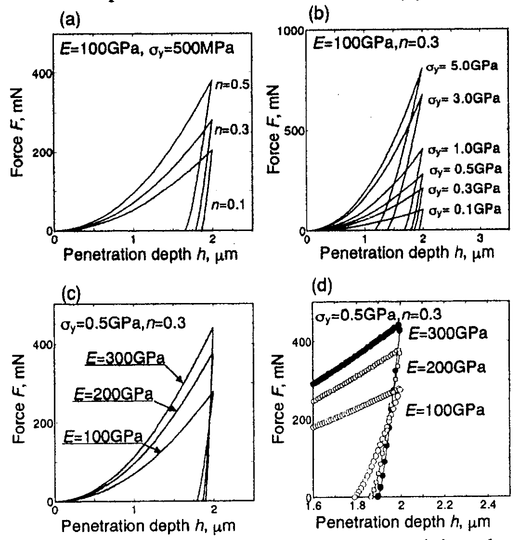


Fig.4 Indentation curves of various materials calculated by parametric FEM study.

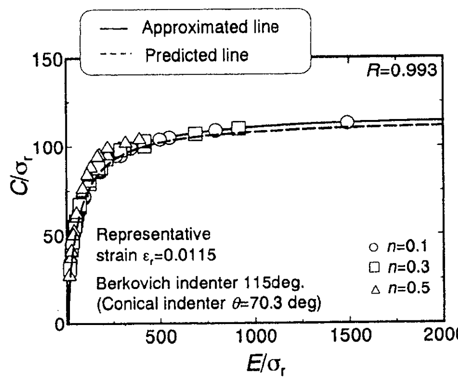


Fig.5 Dimensionless function of C/σ_r vs E/σ_r for Berkovich indenter with apex angle of 115 degree.

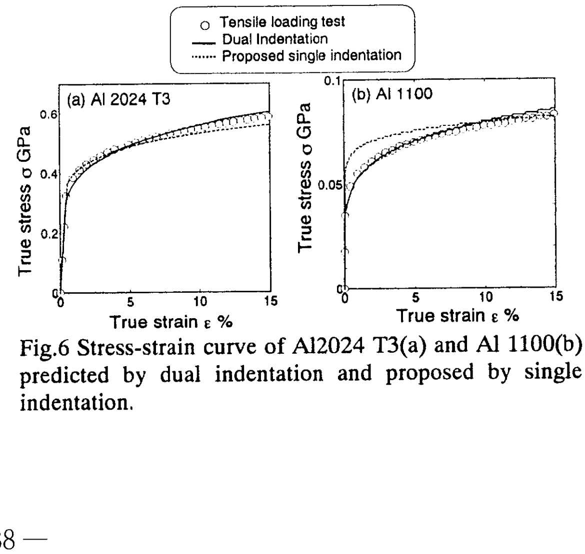


Fig.6 Stress-strain curve of Al2024 T3(a) and Al 1100(b) predicted by dual indentation and proposed by single indentation.