

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-101876

(P2010-101876A)

(43) 公開日 平成22年5月6日 (2010.5.6)

(51) Int.Cl.
G01N 3/42 (2006.01)F1
G01N 3/42

テーマコード (参考)

D

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2009-140935 (P2009-140935)
 (22) 出願日 平成21年6月12日 (2009.6.12)
 (31) 優先権主張番号 特願2008-249893 (P2008-249893)
 (32) 優先日 平成20年9月29日 (2008.9.29)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 000000099
 株式会社 I H I
 東京都江東区豊洲三丁目1番1号
 (74) 代理人 100097515
 弁理士 堀田 実
 (74) 代理人 100136548
 弁理士 仲宗根 康晴
 (74) 代理人 100136700
 弁理士 野村 俊博
 (72) 発明者 宮崎 信弥
 東京都江東区豊洲三丁目1番1号 株式会
 社 I H I 内

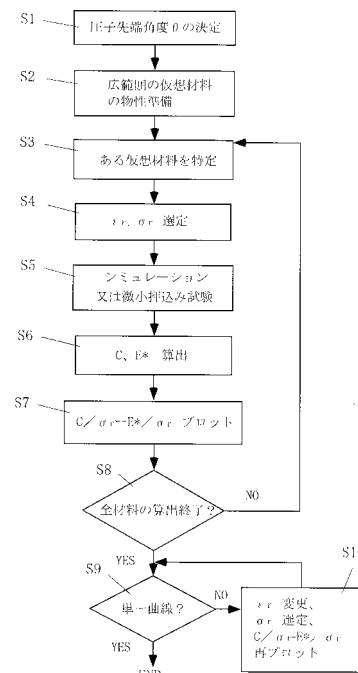
(54) 【発明の名称】 圧子押込み試験による弾塑性材料の材料物性特定方法

(57) 【要約】

【課題】加工硬化指数が単一でない金属であっても、非破壊試験により金属の材料物性（例えば降伏応力 σ_y ）を、高い精度で特定することができる圧子押込み試験による弾塑性材料の材料物性特定方法を提供する。

【解決手段】金属材料が、塑性範囲において応力 σ が加工硬化係数 R とひずみ ε の n 乗（ n は加工硬化指数）の積に一致すると仮定し、円錐圧子の先端頂角 θ を降伏点近傍の塑性領域において2つ以上設定する。各円錐圧子について、圧子押込み試験のシミュレーションにより、 (C/σ_r) と (E^*/σ_r) の無次元関係とこの関係が一義的に求められる代表ひずみ ε_r を求める。一方、各円錐圧子を用いた圧子押込み試験により、荷重 P と深さ h の関係を求め、これから、押込み荷重係数 C および複合ヤング率 E^* を求め、さらに無次元関係から代表応力 σ_r を求める。次いで、2組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r から加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求める。

【選択図】図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

特定対象の金属材料が、塑性範囲において応力 σ が加工硬化係数 R とひずみ ε の n 乗 (n は加工硬化指数) の積に一致すると仮定し、

円錐圧子の先端頂角 θ を降伏点近傍の塑性領域において 2 つ以上設定し、

前記各円錐圧子について、有限要素法を用いた圧子押込み試験のシミュレーションにより、押込み荷重係数 C と代表応力 σ_r の比 (C / σ_r) と複合ヤング率 E^* と代表応力 σ_r の比 (E^* / σ_r) の無次元関係とこの関係が一義的に求められる代表ひずみ ε_r を求め、

前記各円錐圧子を用いて圧子押込み試験により、荷重 P と深さ h の $P - h$ 関係を求め、この関係から押込み荷重係数 C および複合ヤング率 E^* を求め、

前記無次元関係、前記押込み荷重係数 C および複合ヤング率 E^* から代表応力 σ_r を求め、

2 組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r から加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求める、ことを特徴とする圧子押込み試験による弾塑性材料の材料物性特定方法。

【請求項 2】

前記円錐圧子のうち少なくとも 1 つの先端頂角 θ を $70^\circ \sim 85^\circ$ の範囲で設定する、ことを特徴とする請求項 1 に記載の材料物性特定方法。

【請求項 3】

前記代表ひずみ ε_r のうち少なくとも 1 つを $1\% \sim 5\%$ の範囲で設定する、ことを特徴とする請求項 1 に記載の材料物性特定方法。

【請求項 4】

前記 2 組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r を両対数上にプロットし、降伏点近傍の塑性領域においてほぼ直線上に位置する 2 点以上を用いて、加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求める、ことを特徴とする請求項 1 に記載の材料物性特定方法。

【請求項 5】

前記塑性範囲における応力 σ とひずみ ε との関係と、ヤング率 E の値から、 0.2% の永久ひずみが残る降伏応力 σ_y を求めることを特徴とする請求項 1 に記載の材料物性特定方法。

【請求項 6】

前記塑性範囲における応力 σ とひずみ ε との関係と、ヤング率 E の値から、比例限度 σ_p を求めることを特徴とする請求項 1 に記載の材料物性特定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、圧子押込み試験による弾塑性材料の材料物性特定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

弾塑性材料はべき乗硬化材とも呼ばれ、引張試験により、図 1 に示すような応力 σ とひずみ ε の関係を示す。この図において、応力 σ とひずみ ε が小さい弾性範囲 a では、応力 σ とひずみ ε が比例し、式 (1a) に示す関係を示す。また、応力 σ とひずみ ε が弾性範囲を超える塑性範囲 b では、応力 σ はひずみ ε の n 乗に比例し、式 (1b) に示す関係を示す。

$$\sigma = E \varepsilon \quad \sigma < \sigma_y \cdots (1a)$$

$$\sigma = R \varepsilon^n \quad \sigma \geq \sigma_y \cdots (1b)$$

ここで E はヤング率、 n は加工硬化指数、 R は加工硬化係数である。本出願では、弾塑性材料において 0.2% の永久ひずみが残る応力を降伏応力 σ_y 、式 (1a) と式 (1b) の交点における応力を比例限度 σ_p と呼ぶ。また、降伏応力 σ_y 、比例限度 σ_p 、ヤング率 E 、加工硬化指数 n 、加工硬化係数 R を全体として材料物性と呼ぶ。

【0003】

10

20

30

40

50

弾塑性材料には、非鉄金属、鋳鉄、合金、鉄鋼材料などの金属材料が一般的に該当する。なお、鉄鋼材料は引張試験により特異な特性を示すが、同様に弾塑性材料として扱うこともできる。

【0004】

弾塑性材料からなる鋳造品などでは、微小領域、微小構造物であるため、引張試験など従来の材料試験が実施困難な場合がある。このような場合に、従来から微小押込み試験により材料物性を特定することが行われている。

微小押込み試験（ナノインデンテーション）は、圧子押込み試験とも呼ばれ、ダイヤモンド製の微小圧子を数nmから数μm程度対象材料に押込み、荷重と押込み深さの関係から、硬さ、ヤング率等の材料物性を評価する試験である。

10

【0005】

図2は、微小押込み試験により得られる荷重Pと深さhの関係図である。この図において、曲線odは荷重増加時、曲線deは荷重除荷時の変位である。

この図における曲線odは、式(2)の関係を示す。ここで、Cは押込み荷重係数である。また、曲線deの初期勾配deから複合ヤング率 E^* が求められる。複合ヤング率 E^* は、圧子の弾性変形の影響を含んだ弾塑性材料のヤング率であり、圧子を剛体とした場合に式(3)の関係がある。ここで ν はポアソン比である。

$$P = C h^2 \quad \dots (2)$$

$$E^* = E / (1 - \nu^2) \quad \dots (3)$$

【0006】

上述した圧子押込み試験により、弾塑性材料の材料物性を特定する手段として、例えば特許文献1～3、及び非特許文献1が既に開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2002-162328号公報、「押込み試験による材料構成式の導出方法」

【特許文献2】特開2003-65921号公報、「構造材料健全性評価方法およびプログラム」

【特許文献3】特開2006-194604号公報、「機械的特性算出プログラムおよび機械的特性計測装置」

30

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】小笠原 永久、他、「弾性解と剛完全塑性解を利用した三角錘圧子押込みによる塑性特性評価法」、論文No. 04-1109、日本機械学会論文集(A編)、71巻710号(2005-10)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

上述したように、金属材料（非鉄金属、鋳鉄、鉄鋼等）の材料物性の特定は、対象物から試験片を取り出して、引張試験等の材料試験を行うのが一般的である。しかし、このような材料試験が不可能な領域について材料物性を特定する方法が、Bucaille、Daoらにより従来から研究されている。その中でDaoらにより提案は、後述する無次元関数 Π を用いるものであり、非特許文献1も同様の方法を提案している。

40

以下、非特許文献1に開示された従来の方法（三角錘圧子押込みによる塑性特性評価法）を説明する。

【0010】

この方法は、上述した弾塑性材料すなわちべき乗硬化材を対象とする。

非特許文献1による対象材料の塑性特性評価の手順は以下の通りである。

(1) 対頂角 ϕ の異なる複数の三角錘圧子を用いて圧子押込み試験を行う。この試験よ

50

り荷重 P と深さ h の関係 ($P-h$ 曲線) が得られる。

(2) 各実験の $P-h$ 曲線より、複合ヤング率 E^* および押込み荷重係数 C を求める。

(3) 予め数値実験より蓄積したデータから (C/σ_r) と (E^*/σ_r) の無次元関数 Π を求めておく。得られた複合ヤング率 E^* および押込み荷重係数 C を無次元関数 Π に代入し、この無次元関数 Π を満足する代表応力 σ_r を求める。

(4) 圧子の対頂角 φ に対応する代表ひずみ ε_r を式 (4) より求める。ここで θ は対頂角 φ と等価な円錐圧子の頂角である。

$$\varepsilon_r = 0.157 \cot \theta \cdots (4)$$

(5) 代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r から応力-ひずみ曲線を描き、これから材料物性 (降伏応力 σ_Y 、ヤング率 E 、加工硬化指数 n 、加工硬化係数 R) を求める。

10

【0011】

表1は、上述した従来の方法により、焼きなまし銅、冷間圧延銅、SUS304、およびINCONEL600の降伏応力 σ_Y を求め、これを引張試験の結果と比較したものである。この従来例では、Berkovich圧子 (対頂角 φ : 115° 、等価円錐圧子頂角 θ : 70.06°) とCube corner圧子 (対頂角 φ : 90° 、等価円錐圧子頂角 θ : 42.28°) を用いている。

【0012】

【表1】

	降伏応力 σ_Y (MPa)		誤差 (%)
	引張試験	従来方法	
焼きなまし銅	58.0	8.1	-86
冷間圧延銅	200.1	136.9	-32
SUS304	276.0	160.7	-42
INCONEL600	352.2	302.2	-14

20

30

【0013】

表1から上述した従来の方法で求めた降伏応力 σ_Y は、引張試験の結果と比較して誤差が大きく ($-14 \sim -86\%$)、実用に適さないことがわかる。

すなわち、従来の方法は、材料の塑性領域において加工硬化指数が単一の値を持つことを前提としており、実際の材料のように単一でない加工硬化指数を持つ対象に対しては、材料物性の算出精度が低い問題点があった。

40

【0014】

本発明は上述した従来の問題点を解決するために創案されたものである。すなわち、本発明の目的は、加工硬化指数が単一でない金属であっても、非破壊試験により金属の材料物性 (例えば降伏応力 σ_Y と比例限度 σ_p) を、高い精度で特定することができる圧子押込み試験による弾塑性材料の材料物性特定方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0015】

本発明によれば、特定対象の金属材料が、塑性範囲において応力 σ が加工硬化係数 R とひずみ ε の n 乗 (n は加工硬化指数) の積に一致すると仮定し、

50

円錐圧子の先端頂角 θ を降伏点近傍の塑性領域において2つ以上設定し、

前記各円錐圧子について、有限要素法を用いた圧子押込み試験のシミュレーションにより、押込み荷重係数 C と代表応力 σ_r の比(C/σ_r)と複合ヤング率 E^* と代表応力 σ_r の比(E^*/σ_r)の無次元関係とこの関係が一義的に求められる代表ひずみ ε_r を求め、

前記各円錐圧子を用いて圧子押込み試験により、荷重 P と深さ h の $P-h$ 関係を求め、この関係から押込み荷重係数 C および複合ヤング率 E^* を求め、

前記無次元関係、前記押込み荷重係数 C および複合ヤング率 E^* から代表応力 σ_r を求め、

2組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r から加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求める、ことを特徴とする圧子押込み試験による弾塑性材料の材料物性特定方法が提供される。

10

【0016】

本発明の好ましい実施形態によれば、前記円錐圧子のうち少なくとも1つの先端頂角 θ を $70^\circ \sim 85^\circ$ の範囲で設定する。

また、前記代表ひずみ ε_r のうち少なくとも1つを1%~5%の範囲で設定する。

【0017】

また前記2組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r を両対数上にプロットし、降伏点近傍の塑性領域においてほぼ直線上に位置する2点以上を用いて、加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求める、ことが好ましい。

20

【0018】

さらに、前記塑性範囲における応力 σ とひずみ ε との関係と、ヤング率 E の値から、0.2%の永久ひずみが残る降伏応力 σ_y を求める。

【0019】

また、前記塑性範囲における応力 σ とひずみ ε との関係と、ヤング率 E の値から、比例限度 σ_p を求める。

【発明の効果】

【0020】

上記本発明の方法によれば、2以上の各円錐圧子について、有限要素法を用いた圧子押込み試験のシミュレーションにより、(C/σ_r)と(E^*/σ_r)の無次元関係とこの関係が一義的に求められる代表ひずみ ε_r を求めることにより、実用材料すべてをカバーする範囲の仮想材料について、加工硬化係数 R と加工硬化指数 n に影響されない無次元関係が得られる。

30

また、前記各円錐圧子を用いた圧子押込み試験により、対象とする金属材料の圧子押込み物性(荷重 P と深さ h の $P-h$ 関係)を求めることにより、押込み荷重係数 C および複合ヤング率 E^* を求めることができる。

さらに、実験結果と無次元関数を比較することで、代表応力 σ_r を求め、さらに2組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r から加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求めることができる。

【0021】

40

また塑性領域の初期では加工硬化指数が単一に近い挙動を示すことが知られている。本発明の方法では、円錐圧子の先端頂角 θ を降伏点近傍の塑性領域において設定するので、加工硬化指数が単一であることを前提としている理論との適合性を高めることができる。

同様に、本発明の方法では、円錐圧子の先端頂角 θ を降伏点近傍の塑性領域において設定するので、降伏点に近いデータ(2組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r)が算出でき、それを基に高い精度で降伏応力 σ_y と比例限度 σ_p を算出することができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】弾塑性材料の応力 σ とひずみ ε の関係図である。

【図2】微小押込み試験により得られる荷重 P と深さ h の関係図である。

50

【図 3】焼きなまし銅の引張試験結果と、その降伏点以降の応力 - ひずみ関係を両対数上にプロットした図である。

【図 4】代表ひずみと無次元関数の導出方法を示すフロー図である。

【図 5】代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r の関係図である。

【図 6】 $C / \sigma_r - E^* / \sigma_r$ 曲線の例である。

【図 7】等価円錐圧子頂角 θ と代表ひずみ ε_r の関係を示す図である。

【図 8】焼きなまし銅の仮想実験結果である。

【図 9】SUS304 の仮想実験結果である。

【図 10】INCONEL600 の仮想実験結果である。

【発明を実施するための形態】

10

【0023】

以下、本発明の好ましい実施例を図面を参照して説明する。なお、各図において共通する部分には同一の符号を付し、重複した説明を省略する。

【0024】

上述した従来の方法で求めた降伏応力 σ_y が、引張試験の結果と比較して誤差が大きい原因として、以下の 2 つが考えられる。

【0025】

第 1 の原因は、加工硬化指数 n が、変形量の小さい領域から大きい領域まで全体として一定とみなしていることによる。

図 3 (A) は、焼きなまし銅の引張試験結果であり、図 3 (B) は、降伏点以降の応力 - ひずみ関係を両対数上にプロットしたものである。

20

加工硬化指数 n が一定であれば、両対数上のプロットでは、単一直線になるが、図 3 (B) において真ひずみが 1 ~ 2 % の領域で折れ曲がりが生じている。すなわち塑性変形の初期に対して、塑性変形が大きい領域では大きな傾きとなっており、加工硬化指数 n が大きいことがわかる。

従来の方法で用いた圧子は、このような領域の物性に対応した代表応力 - 代表ひずみ関係を算出しているため、従来の方法では降伏応力が小さい値に見積もられたと考えられる。

【0026】

第 2 の原因は、降伏応力から離れた領域から降伏応力を外挿しているため、誤差が大きいことが考えられる。そのため、降伏応力を精度良く求めるためには、できるだけ降伏点に近い領域の代表応力 - 代表ひずみ関係を算出することが望ましいといえる。

30

【0027】

上述した観点に基づき、本発明の方法では、Berkovich 圧子 (対頂角 ϕ : 115°、等価円錐圧子頂角 θ : 70.06°) よりも鈍角な圧子形状として等価円錐圧子先端角度 θ が 75° および 80° の鈍角圧子を採用した。

【0028】

なお、等価円錐圧子先端角度 θ は、75° および 80° に限定されず、降伏点近傍の塑性領域において 2 つ以上設定すればよい。

【0029】

40

また、好ましくは、円錐圧子のうち少なくとも 1 つを先端頂角 θ を 70° ~ 85° の範囲で設定する。先端頂角 θ が 85° を超えると塑性範囲における荷重 P が過大となり、かつ圧子による深さ h が小さくなりすぎて、精度が低下する。また、先端頂角 θ が 70° 未満では、降伏応力から離れすぎるため、加工硬化指数 n が一定でなくなるおそれがある。

【0030】

また、好ましくは、後述する代表ひずみ ε_r のうち少なくとも 1 つを 1% ~ 5% の範囲で設定する。代表ひずみ ε_r が 1% 未満では、塑性範囲における荷重 P が過大となり、かつ圧子による深さ h が小さくなりすぎて、精度が低下する。また、代表ひずみ ε_r が 5% を超えると、降伏応力から離れすぎるため、加工硬化指数 n が一定でなくなるおそれがある。

50

【 0 0 3 1 】

以下、本発明の方法を説明する。

【 0 0 3 2 】

図 4 は、代表ひずみと無次元関数の導出方法を示すフロー図である。この図に示すように、この方法は S 1 ~ S 1 0 の各ステップからなる。各ステップ S 1 ~ S 1 0 は、コンピュータプログラムとして、記憶媒体に記憶し、コンピュータにインストールして実行するのがよい。

【 0 0 3 3 】

ステップ S 1 では、圧子の形状（先端角度）を決定する。例えば、鈍角圧子の等価円錐圧子先端角度 θ として 75° および 80° を選定する。

10

ステップ S 2 では、実用材料を十分に網羅するように、幅広い物性の仮想材料を準備する。すなわち、広範囲の材料物性を想定して、材料物性（降伏応力 σ_y 、ヤング率 E 、加工硬化指数 n 、加工硬化係数 R ）を変化させた多数の組み合わせ（例えば 1 1 0 ケース程度）を準備する。

【 0 0 3 4 】

ステップ S 3 では、ある仮想材料を特定する。例えば、後述の例では、焼きなまし銅、冷間圧延銅、SUS304、および INCONEL600 である。

ステップ S 4 では、代表ひずみ ε_r を任意に決め、それに対応する応力を読み取り、代表応力 σ_r とする。代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r の関係は、図 5 に示すように、特定した仮想材料の物性値から、式 (1 b) を用いて算出しておく。

20

【 0 0 3 5 】

ステップ S 5 では、材料物性を入力して、有限要素法による圧子押込み試験のシミュレーション又は圧子押込み試験を行う。この試験より荷重 P と深さ h の関係（ $P-h$ 曲線）が得られる。

ステップ S 6 では、シミュレーション結果又は試験結果から式 (2) により押込み荷重係数 C を算出する。また荷重除荷時の初期勾配 d_e から複合ヤング率 E^* を求める。なお、仮定したヤング率 E から式 (3) により複合ヤング率 E^* を算出してもよい。

ステップ S 7 では、押込み荷重係数 C と複合ヤング率 E^* を代表応力 σ_r で除した C/σ_r と E^*/σ_r を算出し、縦軸、横軸にプロットする。

【 0 0 3 6 】

30

ステップ S 8 で、全材料の算出終了をチェックし、NO の場合には、S 3 ~ S 7 を繰り返す。

ステップ S 9 で、 $C/\sigma_r - E^*/\sigma_r$ がおよそ 1 つの曲線に乗っているかをチェックし、NO の場合には、ステップ S 1 0 で代表ひずみ ε_r を適切に変更し、それに対応する応力を読み取り、新しい代表応力 σ_r とする。さらに C/σ_r と E^*/σ_r を算出し直し、プロットし直す。

ステップ S 9 で、 $C/\sigma_r - E^*/\sigma_r$ がおよそ 1 つの曲線に乗っているとき（YES）、代表ひずみと無次元関数の導出が終了し（END）、その代表ひずみ ε_r がこの圧子形状に対応する代表ひずみ ε_r となり、この曲線の近似式が無次元関数 Π となる。 $C/\sigma_r - E^*/\sigma_r$ はべき乗硬化材を用いた場合に 1 つの曲線に乗ることが理論的に導かれている。データが 1 つの曲線に乗っている最適な状態は、データに対して誤差が最小になる近似曲線を描き、その曲線に対する全データの誤差が最小になるように代表ひずみ ε_r を変更することにより得られる。

40

【 0 0 3 7 】

図 6 は、上述した方法で求めた $C/\sigma_r - E^*/\sigma_r$ 曲線の例である。この図において、横軸は E^*/σ_r 、縦軸は C/σ_r 、図中の B は Berkovich 圧子、C は Cube corner 圧子に相当する。その他の圧子を用いた場合にも、同様の曲線が得られる。この曲線の近似式（無次元関数 Π ）で表される関係を以下「無次元関係」と呼ぶ。

【 0 0 3 8 】

上述した導出方法により、代表ひずみ ε_r として、図 7 に示すように、以下の値が求め

50

られた。

B e r k o v i c h 圧子 B (等価円錐圧子頂角 $\theta : 70.06^\circ$) : $\varepsilon_r = 5.50\%$

本発明の鈍角圧子 A 1 (円錐圧子先端角度 $\theta : 75^\circ$) : $\varepsilon_r = 2.80\%$

本発明の鈍角圧子 A 2 (円錐圧子先端角度 $\theta : 80^\circ$) : $\varepsilon_r = 1.80\%$

【0039】

次に本発明の鈍角圧子 A 1、A 2 の有用性を、仮想実験により検証した。

この仮想実験は、引張試験により得られた応力 - ひずみ関係を用いて、F E M により圧子押込み試験のシミュレーションを行ない、その結果を用いてそれぞれの圧子の無次元関数と比較することで代表応力を算出し、弾塑性物性を算出した。

なお、図 4 のステップ S 5 に示したように、シミュレーションの代わりに、実際に鈍角圧子 A 1、A 2 を用いて圧子押込み試験を行うことが好ましい。

【0040】

図 8 は、焼きなまし銅の仮想実験結果である。先端角度 75° の圧子から算出した代表応力 - 代表ひずみの関係は A 1、先端角度 80° の圧子から算出した代表応力 - 代表ひずみの関係は A 2 である。

また、この塑性範囲における応力 σ とひずみ ε との関係と、ヤング率 E の値から、応力 σ とひずみ ε が、0 と 0.2 % の点を通り勾配が E の直線との交点として、0.2 % の永久ひずみが残る降伏応力 σ_y を求めることができる。

この図から得られた降伏応力は 72.9 MPa であり、従来方法の実験結果 (8.1 MPa) よりも高い精度で特定することができた。

【0041】

さらに、この塑性範囲における応力 σ とひずみ ε との関係と、ヤング率 E の値から、応力 σ とひずみ ε が、それぞれ 0 の原点を通り勾配が E の直線との交点として、比例限度 σ_p を求めることもできる。

【0042】

図 9 は、S U S 3 0 4 の仮想実験結果である。 75° と 80° の圧子 A 1、A 2 により算出された降伏応力は 181.9 MPa となり、従来方法の実験結果 (160.7 MPa) より 10 % 程度精度が改善された。

【0043】

図 10 は、I N C O N E L 6 0 0 の仮想実験結果である。この材料においては 339.2 MPa という降伏応力が算出され、誤差は 4 % となり、降伏応力 σ_y を、高い精度で特定することができ、本発明の有用性が高いことが確認された。

【0044】

なお、2 組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r を両対数上にプロットし、降伏点近傍の塑性領域においてほぼ直線上に位置する 2 点以上を用いて、加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求めることにより、さらに降伏応力 σ_y と比例限度 σ_p を、高い精度で特定することができる。

【0045】

上述したように、本発明の方法によれば、2 以上の各円錐圧子について、有限要素法を用いた圧子押込み試験のシミュレーションにより、 (C / σ_r) と (E^* / σ_r) の無次元関係とこの関係が一義的に求められる代表ひずみ ε_r を求めることにより、実用材料すべてをカバーする範囲の仮想材料について、加工硬化係数 R と加工硬化指数 n に影響されない無次元関係が得られる。

また、各円錐圧子を用いた圧子押込み試験により、対象とする金属材料の圧子押込み物性 (荷重 P と深さ h の P - h 関係) を求めることにより、押込み荷重係数 C および複合ヤング率 E^* を求めることができる。

さらに、実験結果と無次元関数を比較することで、代表応力 σ_r を求め、さらに 2 組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r から加工硬化係数 R と加工硬化指数 n を求めることができる。

【0046】

10

20

30

40

50

また塑性領域の初期では加工硬化指数が単一に近い挙動を示すことが知られている。本発明の方法では、円錐圧子の先端頂角 θ を降伏点近傍の塑性領域において設定するので、加工硬化指数が単一であることを前提としている理論との適合性を高めることができる。

同様に、本発明の方法では、円錐圧子の先端頂角 θ を降伏点近傍の塑性領域において設定するので、降伏点に近いデータ（２組以上の代表応力 σ_r と代表ひずみ ε_r ）が算出でき、それを基に高い精度で降伏応力 σ_Y と比例限度 σ_P を算出することができる。

【 0 0 4 7 】

従って本発明の方法によれば、加工硬化指数が単一でない金属であっても、非破壊試験により金属の材料物性（例えば降伏応力 σ_Y と比例限度 σ_P ）を、高い精度で特定することができる。

10

【 0 0 4 8 】

なお、本発明は上述した実施の形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の変更を加え得ることは勿論である。

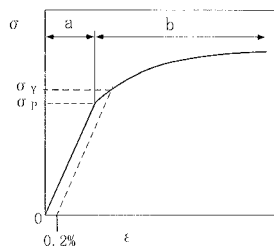
【 符号の説明 】

【 0 0 4 9 】

σ 応力、 σ_Y 降伏応力、
 σ_P 比例限度、 σ_r 代表応力、
 ε ひずみ、 ε_r 代表ひずみ、
 E ヤング率、 E^* 複合ヤング率、
 n 加工硬化指数、 R 加工硬化係数、
 ν ポアッソン比、 P 荷重、 h 深さ、
 C 押込み荷重係数、
 φ 対頂角、 θ 対頂角と等価な円錐圧子の頂角、
 Π 無次元関数

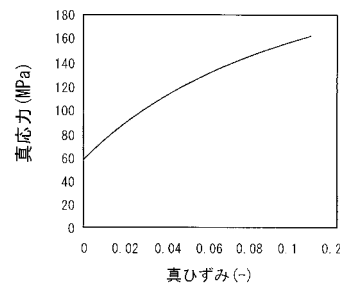
20

【 図 1 】

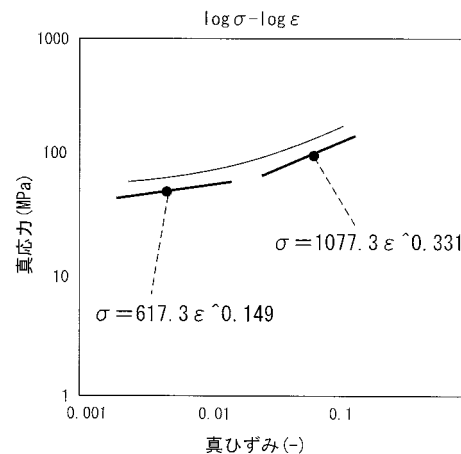


【 図 3 】

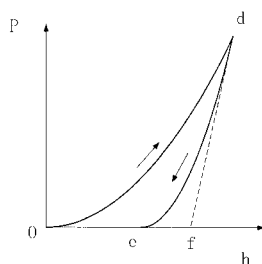
(A)



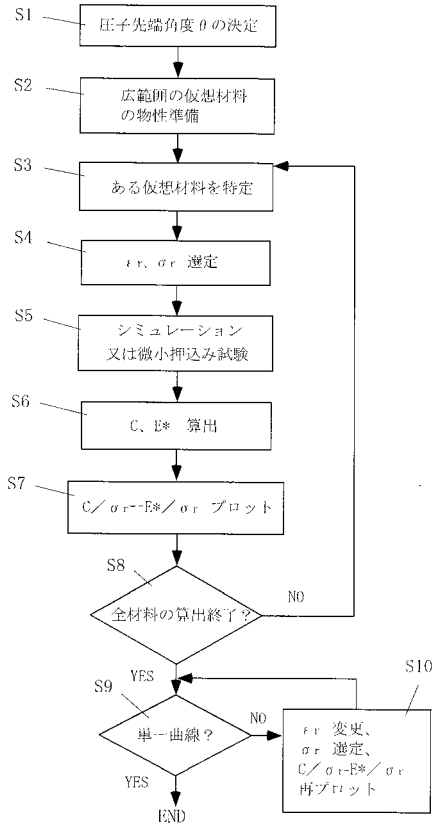
(B)



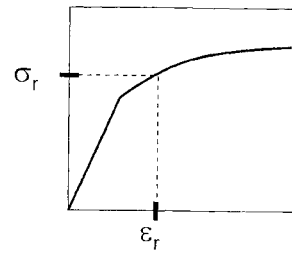
【 図 2 】



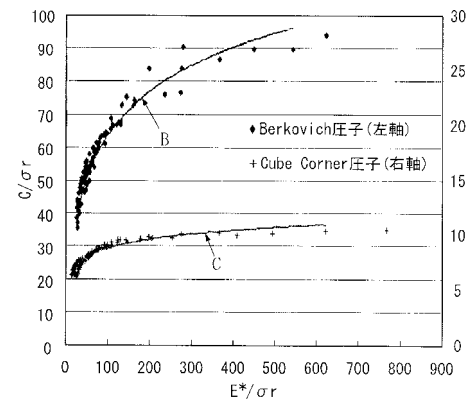
【図4】



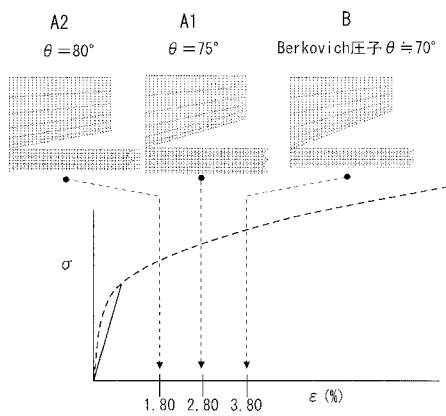
【図5】



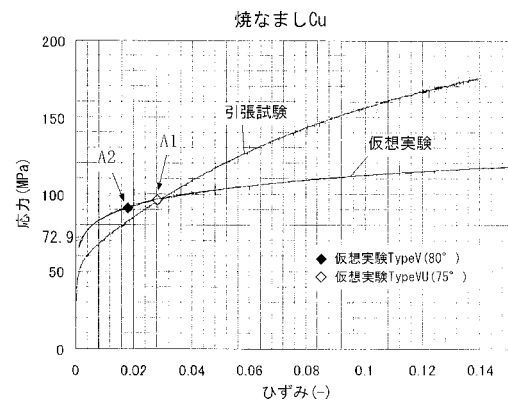
【図6】



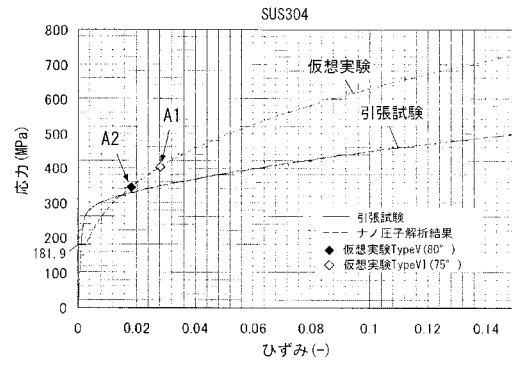
【図7】



【図8】



【図 9】



【図 10】

