207 球状圧子押し込み試験によるセラミックス材料の変形特性測定法の提案

Proposal of measuring method on deformation characteristics of ceramics
by ball-indentation testing

正 ○塙 悟史 (原研) 正 石原 正博 (原研)

正 本橋 嘉信 (茨大)

Satoshi HANAWA, Japan Atomic Energy Research Institute, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki

Masahiro ISHIHARA, Japan Atomic Energy Research Institute

Yoshinobu Motohashi, Ibaraki University

Key word : Material testing, Hardness testing, Material property, Stress-strain, Ceramics

1. 概要

圧子を材料へ押し込む Indentation 法は、硬さ測定のみならず、材料の変形特性等の評価法として検討されている。Indentation 法による変形特性等の評価法に関する検討では、金属材料を対象としたものがそのほとんどであり、圧子が押し込まれる際の材料の弾・塑性状態を考慮して、押し込み荷重・深さ特性等の情報から応力-ひずみの変形挙動や降伏応力等が評価されている¹⁾。また最近では、圧子が押し込まれる際の、圧子近傍部の詳細な変形挙動を考慮することで、加工硬化指数等の評価も行われ^{2,3)}、例えば溶接熱影響部の健全性評価を目的とした具体的な検討もなされている⁴⁾。Indentation 法のメリットは、試験の簡便さに加え、非破壊的に微小領域も含めた材料変形特性等が測定できることである。従って、例えば工学的な応用として、機器の供用期間中検査法としても、非常に魅力的な手法である。しかし、前述のように検討対象が金属材料であり、また一般的に塑性変形量の少ないセラミックス材料に対しては金属材料の手法をそのまま適用するのは難しく、セラミックス材料の変形挙動の評価を目的とした検討例はほとんどない。このため、耐熱・耐腐食性構造材として有望視され、その適用が拡大しつつあるセラミックス材料の Indentation 法による変形特性評価法を確立することは、非常に重要なものと考えられる。

そこで、本研究ではセラミックス材料の変形特性の評価法の確立を目的として、有限要素法 (FEM) を用いた圧子の押し込み荷重-深さについての関連性を解析的に検討し、新たな材料変形特性の評価法として球状圧子を用いた Indentation 法を提案する。

2. 基礎式

球状圧子の押し込みによる荷重 (P) - 応力 (σ)、変位 (δ) - ひずみ (ε) の関係は、断面 A の棒状単純引張りを考えると次式で与えられる。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (1)$$

ここでは、明瞭な降伏点を示さない次式で示される応力-ひずみ関係が n 乗則に従うセラミックス系材料等を対象とする。

$$\sigma = F * \varepsilon^n \quad (2)$$

(1) 式を用いて(2)式を展開すると、

$$P = \frac{A}{l^n} * F * \delta^n \quad (3)$$

さらに、両辺の対数を取ると、

$$\ln P = \left\{ \ln \left(\frac{A}{l^n} \right) + \ln(F) \right\} + n * \ln \delta \quad (4)$$

なお、(4)式は荷重-変位の間の関係が、 $\ln P \propto \ln \delta$ であることを意味する。ここで、単純なモデルでは比例係数が加工硬化指数 n と一致している。すなわち、荷重-深さを対数プロットし、その一次近似式の傾きを求めれば、 n 値を直接定めることができる。

次に、(4)式に示した $\ln P$ と $\ln \delta$ の一次近似式の切片を C_1 とすれば、

$$C_1 = \ln \left(\frac{A}{l^n} \right)^F + \ln(F) \quad (5)$$

である。したがって、 $C_1 \propto \ln(F)$ の関係があり、(4)式の関係で求めた加工硬化指数 n から塑性係数 F が切片の値 C_1 より定めることができる。

以上、単純なモデルについての関係を示したが、球状圧子押し込み時の押し込み荷重-深さの関係にも適用できるかどうかについて、以下有限要素法を用いて検討する。

3. 解析

解析には、汎用有限要素解析コード ABAQUS を用いた。

Fig.1 Analytical model.

解析では、圧子の押込み荷重-深さ挙動と圧子の押込みにより生じる応力及びひずみについて、 n 乗則に従う材料非線形性を考慮した塑性応力解析を行った。解析モデルは、対象性を考慮して、Fig.1に示すように2次元軸対象モデルとした。使用した要素は、8 節点軸対象要素であり、その節点数は 9917、要素数は 3230 である。また、接触部には接触要素を用い、剛体の圧子と材料との接触による力の伝達を考慮した。解析では、塑性係数 F 及び加工硬化指数 n を Table 1 に示すパラメータとして、押込み荷重-深さの関係を評価した。なお、球状圧子の半径は 0.5mm とした。

3. 結果及び考察

押込み荷重と深さの関係の例として、加工硬化指数 $n=0.5$ における解析結果を Fig.2 に示す。 $\ln P$ と $\ln \delta$ の間には、基礎式(4)で示したように線形の関係が認められる。また、その傾きは塑性係数 F を変化させても一定となっていることがわかる。Table 2 に他の加工効果指数 n に対して求めた傾きをまとめて示す。他の加工硬化指数 n に対して塑性係数 F を変化させても一定の傾きとなっていることがわかる。なお、同表で傾きに若干の差異があるのは、接触要素によりモデル化した接触面の力の伝達の精度によるものと考えられ、要素分割を細かくし接触部をより詳細にモデル化することで差異が減少するものと考えられる。有限要素法の解析から、0.5mm の球状圧子を用いた場合には、 $\ln P$ と $\ln \delta$ の傾きと加工硬化指数 n との間には以下の関係が認められた。

$$n = 1.78 \frac{\ln P}{\ln \delta} - 1.76 \quad (6)$$

すなわち、 $\ln P$ と $\ln \delta$ の傾きから(6)式により加工硬化指数 n を評価することができる。押込み荷重-深さの関係から得た切片値 C_1 を Table 3 にまとめて示す。

次に、基礎式(5)の $C_1 \propto \ln(F)$ の関係より塑性係数 F を定める方法を検討する。塑性係数 F と $\ln P / \ln \delta$ のプロットより得られる切片値 C_1 の関係を Fig.3 に示す。図から分かるように有限要素法の解析結果においても $C_1 \propto \ln(F)$ の関係が認められ、以下の比例関係式で整理される。

$$C_1 = \alpha * \ln F + \beta \quad (7)$$

ここで、

$$\alpha = -1.53 * n^3 + 2.75 * n^2 - 1.67 * n + 1.39 \quad (8)$$

$$\beta = 0.22 * n^2 - 2.87 * n + 3.40$$

である。したがって、(7)式の関係から、塑性係数 F は次式で求めることができる。

$$F = e^{\frac{C_1 - \beta}{\alpha}} \quad (7)$$

以上より、圧子の押込み深さ-荷重の関係より加工硬化指数 n 及び塑性係数 F を評価することができる。

Table 1 Analytical parameter.

Plastic Modules (F)				
50	100	250	500	
Work-hardening exponent (n)				
0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

Table 2 Inclination values obtained from linear approximations.

	n=0.5	n=0.6	n=0.7	n=0.8	n=0.9
F=50	1.28	1.34	1.39	1.45	1.51
F=100	1.26	1.32	1.38	1.44	1.50
F=250	1.27	1.32	1.38	1.44	1.49
F=500	1.27	1.33	1.38	1.43	1.48

5. まとめ

Indentation 法によるセラミックス材料の変形特性の評価法を確立することを目的に、球状圧子を用いた新たな測定手法を提案した。有限要素法による解析的検討の結果、提案した手法により押込み荷重-深さの実測から、加工硬化指数 n 及び塑性係数 F が予測可能で、明瞭な降伏点を示さない n 乗則に従うセラミックス系材料の変形特性を評価できることを示した。

参考文献

- 1) H.A. Francis, Trans. ASME (Series H) 9, 272(1976)
- 2) J.S. Field et al, J. Mater. Res., vol.10, 1, 101(1995)
- 3) Jeong-Hoon et al, J. Mater. Res., 16, 3170 (2001)
- 4) J. Jang et al, APCFS&ATEM'01, JSME-MMD, 888(2001)

Fig.2 Relation between indentation load and depth at the work-hardening exponent of 0.5.

Fig.3 Relation between elastic modulus and intercept values obtained from linear approximations of load and depth.

Table 3 Intercept values obtained from linear approximations.

	n=0.5	n=0.6	n=0.7	n=0.8	n=0.9
F=50	6.10	5.82	5.52	5.18	4.82
F=100	6.82	6.55	6.29	5.99	5.59
F=250	7.77	7.50	7.21	6.88	6.45
F=500	8.50	8.21	7.90	7.55	7.10