

相異なる3主応力下のセメント混合砂の変形・強度特性とその解析

名古屋工業大学 学生会員 ○孫 徳安 正会員 松岡 元
 “ 菅田 孝宏 柴田 頼之

粒状体のような粒子間に粘着力のない摩擦性材料と金属のような粘着力の強固な粘着性材料の中間の特性を持つ材料、すなわち粘着成分を有する摩擦性材料(c, ϕ 材料)の相異なる3主応力下の応力～ひずみ関係を統一的に評価するため、「拡張された空間滑動面(Extended SMP)」¹⁾の概念に基づいて各種材料の実験データの整理を試みている。ここでは、(c, ϕ)材料としてセメント混合砂を選び、平均有効主応力一定条件下で種々の3主応力制御試験を実施した。得られた実験結果を拡張SMPに基づいて整理したところ、砂と粘土に対する従来のSMP上の整理と同様の唯一的な応力～ひずみ特性が得られたので、従来の砂などの構成式²⁾に粘着成分を考慮するパラメーター σ_0 を導入することにより解析を試みた。

1. 実験方法 実験に用いたセメント混合砂の混合重量比は、砂:セメント:水=15:1:3とした。密度は $1.80 \pm 0.01 \text{ t/m}^3$ 。試験に用いた3主応力制御試験機は、3主応力とも剛板で載荷する方式の試験機である。試験時には、まず平均有効主応力 $\sigma_m=800 \text{ kPa}$ になるまで等方圧密した。その後、 $\sigma_m=800 \text{ kPa}$ の下で、 θ ($=\arctan \sqrt{3}(\sigma_2-\sigma_3)/((\sigma_1-\sigma_2)+(\sigma_1-\sigma_3))$; π 面上の主応力ベクトルの σ_1 軸からなす角度)がそれぞれ、 0° 、 15° 、 30° 、 45° の放射状応力経路と、図-1に示すOAC、OAD、OAFおよびOBEのような折れ線状応力経路に沿ったせん断試験を実施した。

2. 拡張SMPと、粘着成分を考慮した弾塑性モデル 従来のSMPの概念を(c, ϕ)材料にも拡張するために、変換応力 $\hat{\sigma}_{ij}=\sigma_{ij}+\sigma_0\delta_{ij}$ を採用した(ここで、 $\sigma_0(=c \cdot \cot \phi)$ は粘着成分を表すパラメーターである)。この新しい応力系で考えれば、従来のSMPと同じ定式化が可能となる¹⁾。

一方、SMP*の考え方を基礎とした t_{ij} モデルが砂などの構成式として提案されている²⁾。ここでは、 t_{ij} モデルに粘着成分を考慮して、次式のような $\hat{t}_{ij}$ を定義した。

$$\hat{t}_{ij}=\hat{\sigma}_{ik} \cdot \hat{a}_{kj} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{a}_{kj}$ は拡張SMPの方向余弦である¹⁾。そして、文献2)の方法にならって t_{ij} を $\hat{t}_{ij}$ に変換すれば、種々の応力経路下のセメント混合砂の変形挙動を予測できる。

3. 実験結果とモデルによる予測 図-1(a)は、 $\sigma_m=800 \text{ kPa}$ 条件下での折れ線状応力経路OAC、OAD、OAFおよびOBEに沿った3主応力制御試験によって実測された主ひずみ増分ベクトルを π 面上に投影したものである。同図より、同じ応力状態でも応力経路によってひずみ増分ベクトルの方向が異なることがわかる。例えば、図中のG点のひずみ増分ベクトルの方向は明かに応力経路(OADとOBE)によって異なる。このことから、セメント混合砂についても、いわゆるひずみ増分方向の応力経路依存性が認められる。図-2(a), (b)は折れ線に沿った種々のせん断試験結果を拡張SMPに基づいて整理したものである。同図より、経路OAC(▲印)の後半部分のデータを除いて、種々の応力経路下のデータがほぼ同じ線上に乗るのがみられる。この結果から、従来のSMP*を基礎とした弾塑性理論に拡張SMPの概念を考慮すれば、粘着成分を有する摩擦性材料に対する弾塑性理論の展開が可能となる。また図-3は拡張SMPに基づいた破壊規準¹⁾の予測線(実線、 $\sigma_0=350 \text{ kPa}$, $\phi=36^\circ$ 、 $(\hat{\tau}_{\text{SMP}}/\hat{\sigma}_{\text{SMP}})_r=2\sqrt{3}\tan \phi=0.684$)と破壊時の実測応力状態(□印は3主応力制御試験結果、○印は三軸圧縮・三軸伸張試験結果を示す)を π 面上に示したものである。同図より、拡張SMPに基づいた破壊規準は実測値とかなりよい一致を示しているといえよう。なお、 45° の実測値が予測値より少し高いのは剛板載荷型3主応力試験機の隣接載荷板どうしの相互干渉によるものと考えられる。図-2(a)の経路OACの後半部分のプロット(▲印)が少し高いのも同じ原因によるものと考えられる。

図-1(b)と図-4中の実線は力学量 $\hat{t}_{ij}$ を用いた移動硬化モデルによる予測結果を示している。図-1より、予測値はひずみ増分方向の応力経路依存性を説明している。図-4より、モデルは実測の応力～ひずみ関係をほぼ説明している。モデルのパラメーターは、 $\alpha=.6$, $M^*=.5$, $C_1=.1\%$, $C_2=.04\%$, $m=.8$, $\zeta=.3$ である。

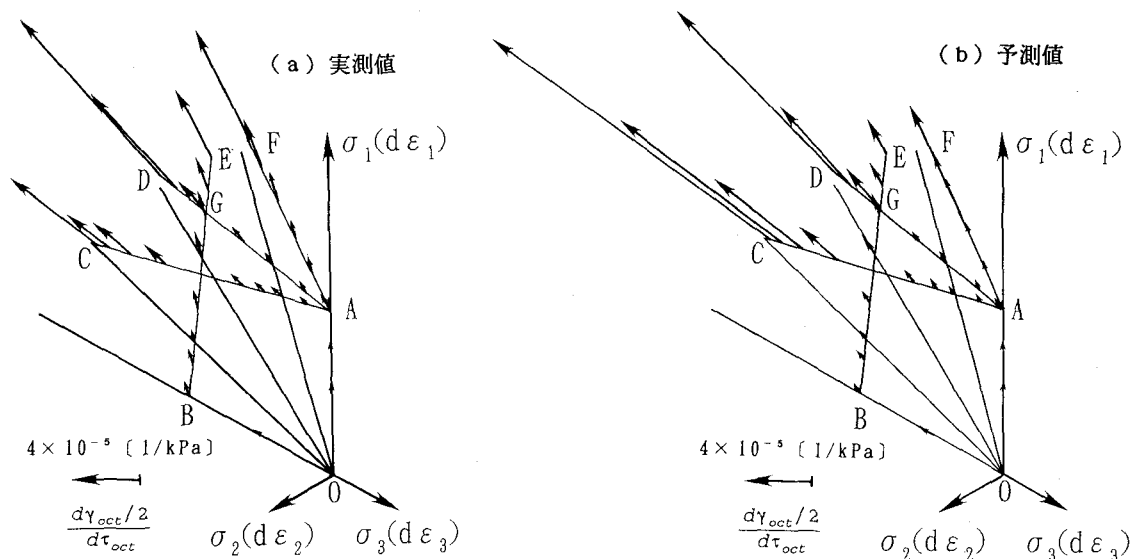


図-1 折れ線状応力経路に沿った π 面上のひずみ増分の (a) 実測ベクトルと (b) 予測ベクトル

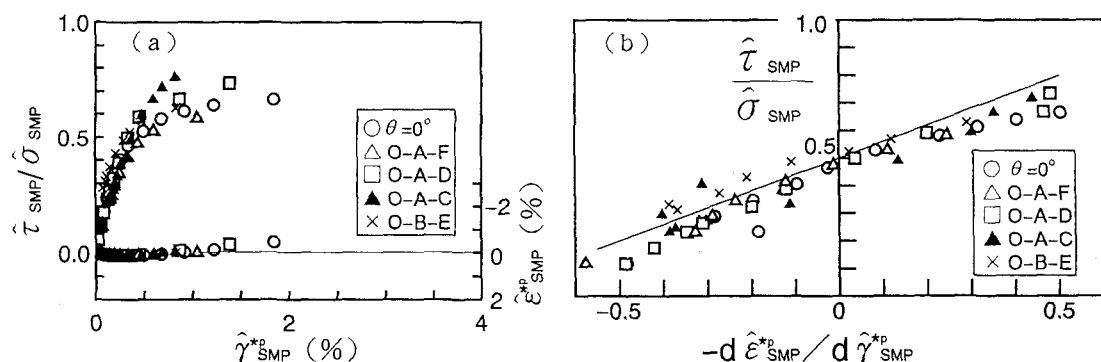


図-2 拡張SMPに基づいて整理した (a) 応力比～ひずみ関係と (b) 応力比～ひずみ増分比関係

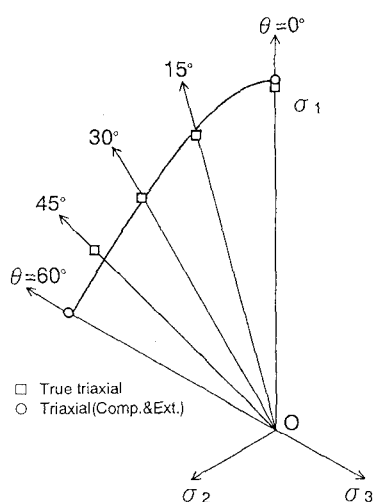


図-3 π 面上で表した拡張SMPに基づいた破壊規準(実線)と実測値(プロット)の比較

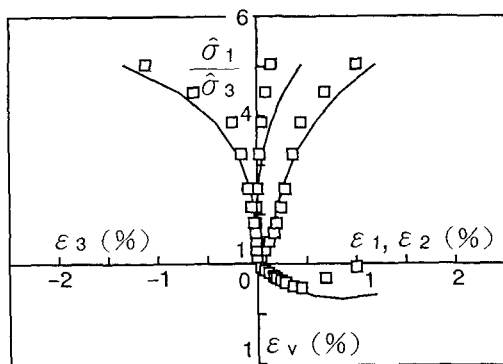


図-4 応力経路OADに沿った応力～ひずみ関係の実測値(□印)と予測値(実線)

- 文献 1) Matsuoka et al. (1990): S & F, Vol. 30, No. 2, pp. 119-127.
2) Nakai et al. (1989): Proc. NUMOG III, pp. 36-45.