

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)材料として配合の異なる4種のセメント混合砂を選び、三軸圧縮試験($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)および三軸伸張試験($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)を行った。その結果、以前の過圧密粘土の場合²⁾と同様、実験データを拡張SMP上で表現すれば1本の応力～ひずみ曲線上に整理されることを示す。さらに、本文では、セメントの配合がセメント混合砂の変形・強度特性に与える影響についても検討する。

1. 拡張SMPの概念

すでに提案している空間滑動面(SMP)の概念を粘着成分を有する摩擦性材料に対しても拡張するために、橋口³⁾、大槇⁴⁾にならって3次元応力下の3個のモールの応力円にσ軸上の負の1点(この点の絶対値をボンド応力σ₀と名付ける、σ₀ = c · cot φ (c : 粘着力, φ : 内部摩擦角))から接する3本の直線を想定する(図-1参照)。ここでは、この点 $\hat{\sigma}$ を新しい座標原点と考え、これを $\hat{\sigma} \sim \hat{\tau}$ 座標とすれば、以前のσ₀ = 0の場合(従来のSMP)と同じ定式化が可能となる。この新しい座標系で考えれば、主応力 $\hat{\sigma}_i$ 、応力不変量J₁、J₂、J₃、拡張SMPの法線の方向余弦 \hat{a}_i は次式で表される。

$$\hat{\sigma}_i = \sigma_i + \sigma_0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{J}_1 &= \hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_3 \\ \hat{J}_2 &= \hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_2 \hat{\sigma}_3 + \hat{\sigma}_3 \hat{\sigma}_1 \\ \hat{J}_3 &= \hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_2 \hat{\sigma}_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\hat{a}_i = \sqrt{\frac{\hat{J}_3}{\hat{\sigma}_i \hat{J}_2}} \quad (\text{拡張SMPの方向余弦}) \quad (3)$$

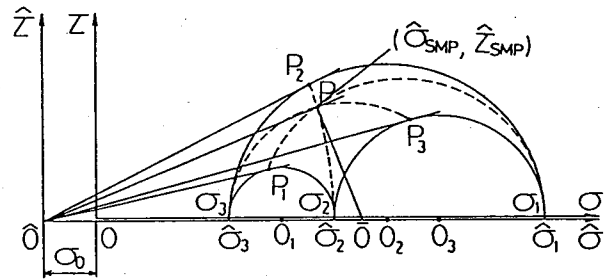


図-1 拡張SMP上の垂直応力 $\hat{\sigma}_{SMP}$ とせん断応力 $\hat{\tau}_{SMP}$

式(3)で表される方向余弦は、σ₀ = 0のときには従来のSMPに、σ₀ = ∞のときには正八面体面に対応する(図-2参照)。拡張SMP上の垂直応力 $\hat{\sigma}_{SMP}$ とせん断応力 $\hat{\tau}_{SMP}$ 、垂直ひずみ $\hat{\epsilon}_{SMP}$ とせん断ひずみ $\hat{\gamma}_{SMP}$ は次式で表される。

$$\hat{\sigma}_{SMP} = \hat{\sigma}_1 \hat{a}_1^2 + \hat{\sigma}_2 \hat{a}_2^2 + \hat{\sigma}_3 \hat{a}_3^2 \quad (4)$$

$$\hat{\tau}_{SMP} = \sqrt{(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2)^2 \hat{a}_1^2 \hat{a}_2^2 + (\hat{\sigma}_2 - \hat{\sigma}_3)^2 \hat{a}_2^2 \hat{a}_3^2 + (\hat{\sigma}_3 - \hat{\sigma}_1)^2 \hat{a}_3^2 \hat{a}_1^2} \quad (5)$$

$$d\hat{\epsilon}_{SMP} = d\epsilon_1 \hat{a}_1^2 + d\epsilon_2 \hat{a}_2^2 + d\epsilon_3 \hat{a}_3^2 \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{\gamma}_{SMP}}{2} = \sqrt{(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 \hat{a}_1^2 \hat{a}_2^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2 \hat{a}_2^2 \hat{a}_3^2 + (d\epsilon_3 - d\epsilon_1)^2 \hat{a}_3^2 \hat{a}_1^2} \quad (7)$$

もし粘着成分を有する摩擦性材料が従来の摩擦性材料の場合と同様に、 $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP}$ がある一定値に達したとき破壊するとすれば、次の破壊規準を得る。

$$\frac{\hat{\tau}_{SMP}}{\hat{\sigma}_{SMP}} = \sqrt{\frac{\hat{J}_1 \hat{J}_2 - 9\hat{J}_3}{9\hat{J}_3}}$$

$$= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{4(\sigma_1 + \sigma_0)(\sigma_2 + \sigma_0)} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{4(\sigma_2 + \sigma_0)(\sigma_3 + \sigma_0)} + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)^2}{4(\sigma_3 + \sigma_0)(\sigma_1 + \sigma_0)}}$$

$$= \text{const.} \quad (8)$$

図-3は、式(8)による破壊規準の3次元応力空間における形状を示したものである。なお、式(8)は $\sigma_0 = 0$ のときには従来のSMP規準に、 $\sigma_0 = \infty$ のときにはミーゼス規準に帰着される。

2. 実験方法

実験の用いた砂は豊浦砂で、セメントは普通ポルトランドセメントである。試料の混合重量比は、**A-I種**(砂:セメント:水:粘土粉末=11.7:1:4.8:1.5)、**B-I種**(砂:セメント:水=15:1:3)、**B-II種**(砂:セメント:水=10:1:2)、**B-III種**(砂:セメント:水=5:1:1)とした。これらをソイルミキサーで十分練り混ぜた後、内径5cm、高さ15cmのアクリル製モールドに1/3ずつ棒で突いて充填した。その後、1~2日間放置して、供試体を脱型し、ポリエチレン袋に入れ、恒温室(20°±1°C)内で水分一定下で約3ヶ月間養生した。養生後、供試体をマイグダーボックスの中に入れて両端面を包丁あるいは鋸で切りながら、高さを10cmにした。したがって、供試体の寸法は最終的に直径約5cm、高さ約10cmとなる。また、成形した供試体を脱気水中に入れて、飽和させるために真空脱気を1時間以上行った。なお、供試体とベダスタル、供試体とキャップの間の摩擦を除去するために、供試体をセットする前にベダスタルとキャップの表面に高真空用グリースを塗り、ゴム膜を取り付けた。飽和した供試体をセットして、等方圧密後、平均有効主応力 $\sigma_m (= (\sigma_v + 2\sigma_h)/3)$ (σ_v :軸圧, σ_h :側圧)一定の排水三軸圧縮試験と排水三軸伸張試験を実施した。なお、排水は供試体上下両端面から行った。載荷はひずみ制御で行い、軸ひずみ速度は0.005%/minとした。

3. 実験結果の整理

図-4, 5, 6, 7は**A-I種**のセメント混合砂の平均有効主応力 $\sigma_m = 600\text{kPa}, 1000\text{kPa}, 2000\text{kPa}$ および4000kPaのもとでの三軸圧縮および三軸伸張試験結果の各種の整理を示したものである。図-4, 5, 6, 7(c), (d)の整理をするには、粘着成分を表すパラメーター σ_0 がいるが、破壊時のモールの応力円の包絡線と σ 軸の交点より $\sigma_0 = 170\text{kPa}$ と決定した(図-8参照)。これらの図より、主応力比(σ_1/σ_3)~主ひずみ($\varepsilon_1, \varepsilon_3$)関係で整理すると、三軸圧縮条件か三軸伸張条件によって、主応力比~主ひずみの関係がかなり異なるのが見られる(図-4, 5, 6, 7(a)参照)。また、正八面体面上の応力比(τ_{oct}/σ_{oct})~せん断ひずみ(γ_{oct})関係で整理すれば、図-4, 5, 6, 7(b)に示すように、三軸圧縮(Comp.)と三軸伸張(Ext.)の結果が一本に乗らない。

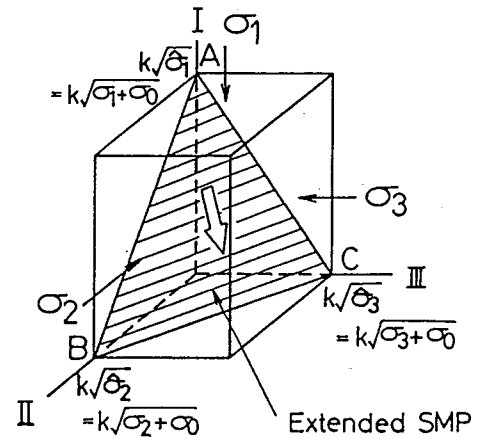


図-2 粘着成分を有する摩擦性材料のための拡張された空間滑動面

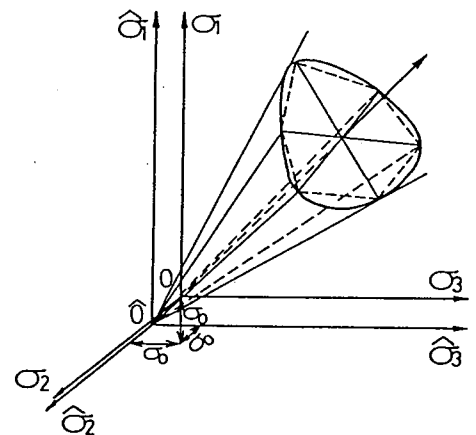


図-3 拡張された空間滑動面に基づいた粘着成分を有する摩擦性材料の破壊規準

図-4, 5, 6, 7(c), (d)は拡張SMP上の整理を示したものである。これらの図より、拡張SMP上の整理によれば、三軸圧縮・三軸伸張条件のいかんにかかわらず、ほぼ一本の線上に乗ってくるのがわかる。特に、拡張SMP上のせん断・垂直応力比 ($\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP}$) ~ 垂直・せん断ひずみ増分比 ($-d\hat{\epsilon}_{SMP}/d\hat{\gamma}_{SMP}$) 関係は、三軸圧縮・伸張条件の違いにかかわらず、また平均有効主応力 σ_m の値にかかわらず、同じ一本の直線上に整理されるのが見られ、興味深い。このような特性は、砂や正規圧密粘土に対して従来のSMP上で整理した場合に得られた結果と同じものである。すなわち、セメント混合砂に対しても、粘着成分を反映するパラメーター σ_0 を導入して拡張SMP上で整理すれば、従来のSMPの場合と同様な長所が発揮されるのである。これより、拡張SMPの概念に基づいて、セメント混合砂の構成式を立てることが可能となる。

図-9, 10, 11はB-I種のセメント混合砂の平均有効主応力 $\sigma_m=1000\text{kPa}$, 2000kPa および 4000kPa のもとでの三軸圧縮および三軸伸張試験結果の各種の整理を示したものである。従来のSMP上の応力比 (τ_{SMP}/σ_{SMP}) ~ せん断ひずみ (γ_{SMP}) ~ 垂直ひずみ (ϵ_{SMP}) 関係で整理すると、図-9(c)よりわかるように、Comp.の結果とExt.の結果は一本のカーブに乗ってこない。また、従来のSMP上の応力比 (τ_{SMP}/σ_{SMP}) ~ ひずみ増分比 ($-d\epsilon_{SMP}/d\gamma_{SMP}$) 関係で整理しても、図-9(d)よりわかるように、Comp.とExt.の結果は一本に乗らないことがわかる。そこで、粘着成分も考慮した拡張SMPの概念が提案されたわけである。図-9(e), (f)および図-10, 11(c), (d)の整理をするには、粘着成分を表すパラメーター σ_0 が必要であるが、破壊時のモールの応力円の包絡線と σ 軸の交点より $\sigma_0=250\text{kPa}$ と決定した(図-12(a)参照)。前述のA-I種のセメント混合砂が粘土粉末を含むのに対して、B-I, II, III種のセメント混合砂は粘土粉末を含まない点が大きな違いである。B-I種の三軸圧縮および三軸伸張試験結果を拡張SMP上で整理すれば、A-I種の場合と同様に、ほぼ一本の線上に乗ってくるのが見られる(図-9(e), (f)と図-10, 11(c), (d)参照)。

図-12はB-I, B-II, B-III種のセメント混合砂の破壊時のモールの応力円を示したものである。これらの図より、パラメーター σ_0 を決定した。セメント量の増加にしたがって、 σ_0 は大幅に増加するが、内部摩擦角 ϕ はあまり増大しないのが見られ、興味深い。

図-13はB-I, B-II, B-III種のセメント混合砂の拡張SMPのせん断・垂直応力比~垂直・せん断ひずみ増分比関係の整理を示したものである。セメント量の大幅な増加にもかかわらず、3種の試料ともほぼ近い直線上に実測値がプロットされるのがみられる。また、破壊時の $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP}$ の値が3種とも $0.7\sim 0.8$ となっているのがみられる。このことは、図-12において破壊包絡線の傾きが $35^\circ\sim 39^\circ$ になることと対応している。

4. まとめ

砂などの摩擦性材料に対して有効であった空間滑動面(SMP)の概念を粘着成分を有する摩擦性材料にも適用するため、粘着成分を評価するパラメーター σ_0 を導入して拡張SMPの概念が提案された。粘着成分を有する摩擦性材料の代表試料としての各種配合のセメント混合砂の三軸圧縮・三軸伸張試験結果を拡張SMP上で整理したところ、唯一の一本の線上にプロットされ、従来のSMPの場合と同様な長所が見出された。これらの唯一的な関係式に基づいて、セメント混合砂の構成式を立てることができる。

参考文献

- 1) Matsuoka et al(1990): Soils and Foundations, Vol. 30, No. 2, PP. 119-127.
- 2) 松岡他(1990): 第25回土質工学研究発表会, 243, pp. 657-658.
- 3) 橋口(1975): 東工大学位論文, pp. 181-184.
- 4) Ohmaki(1979): Proc. of 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, pp. 465-474.

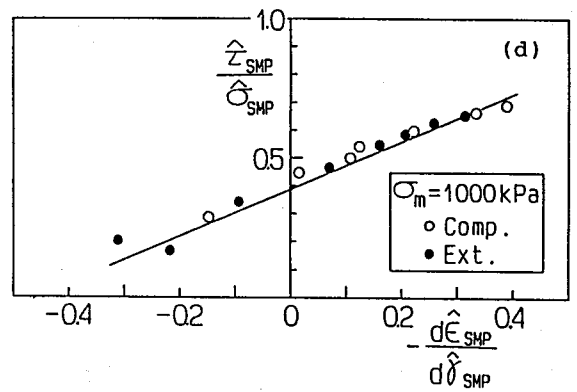
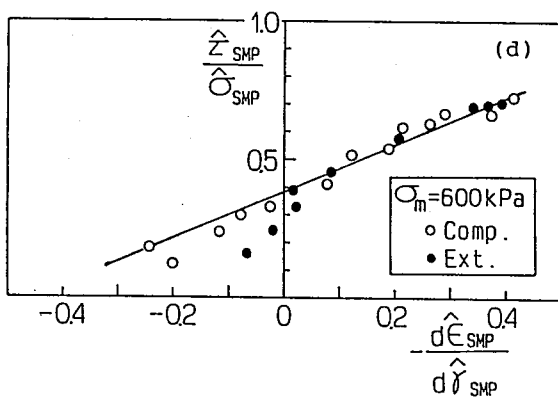
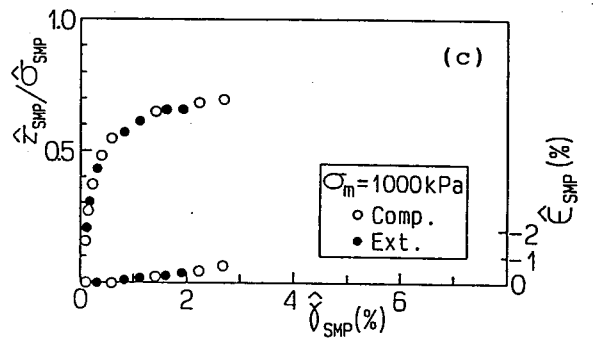
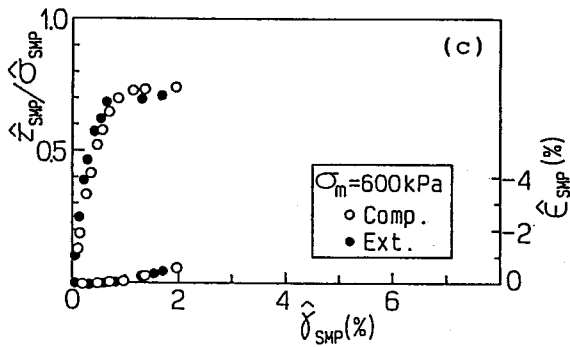
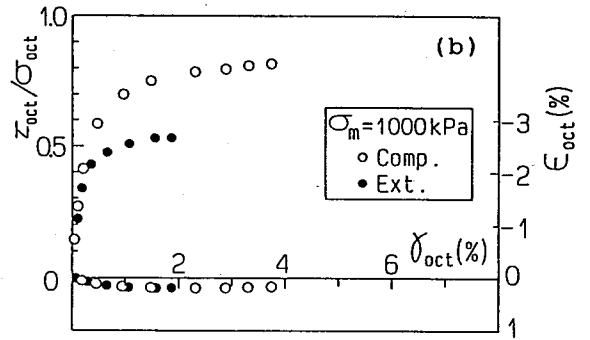
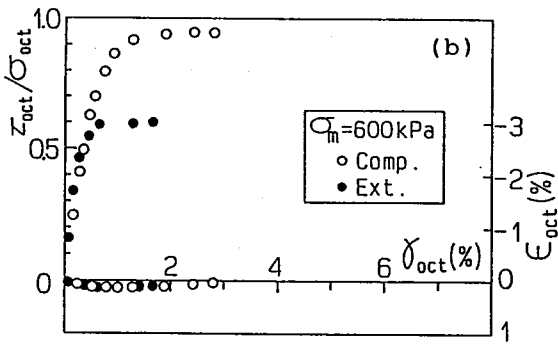
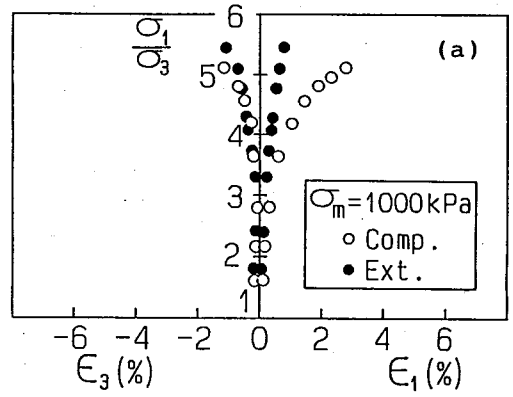
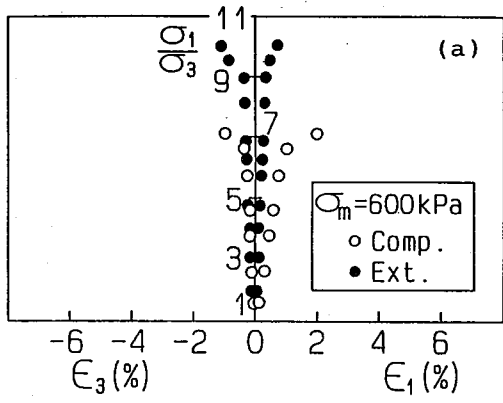


図-4 A-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験結果の各種の整理 ($\sigma_m = 600$ kPa)

図-5 A-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験結果の各種の整理 ($\sigma_m = 1000$ kPa)

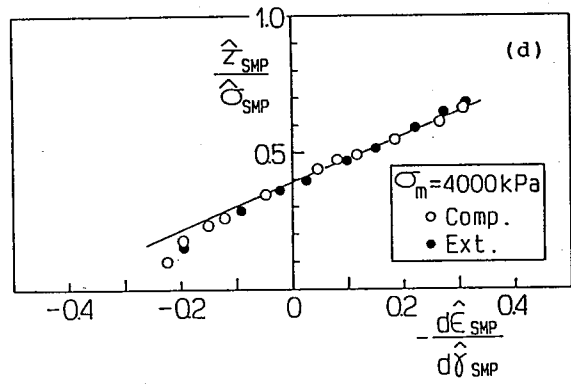
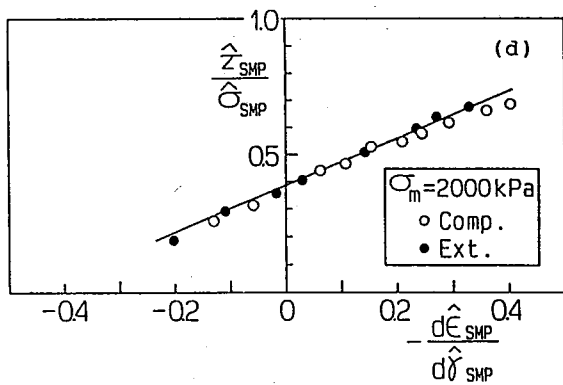
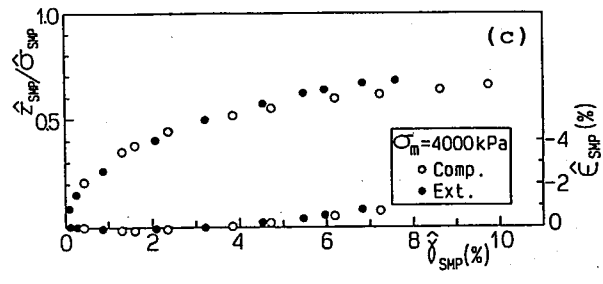
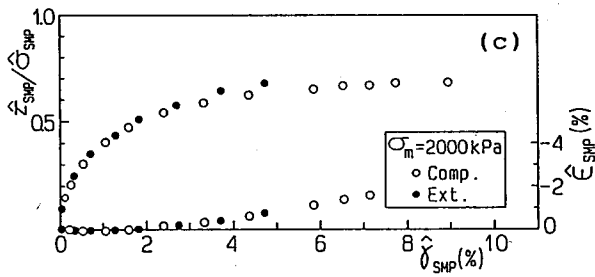
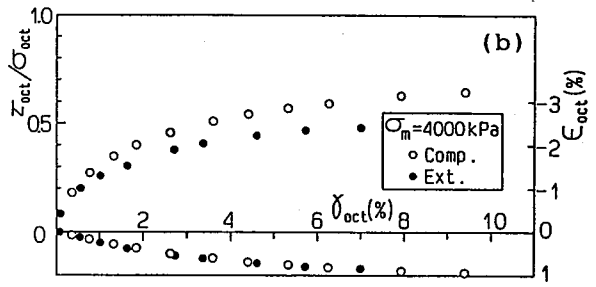
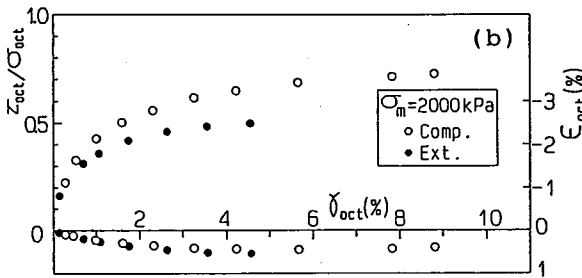
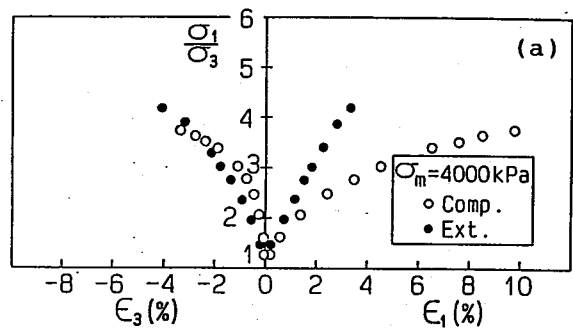
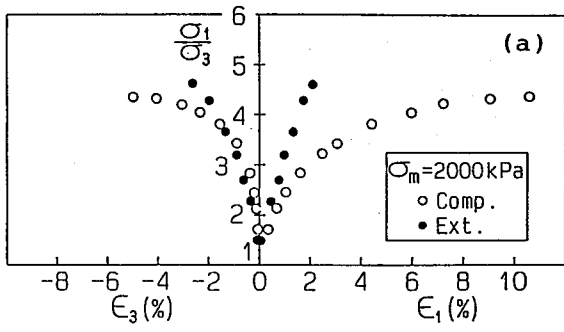


図-6 A-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験結果の各種の整理 ($\sigma_m = 2000 \text{ kPa}$)

図-7 A-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験結果の各種の整理 ($\sigma_m = 4000 \text{ kPa}$)

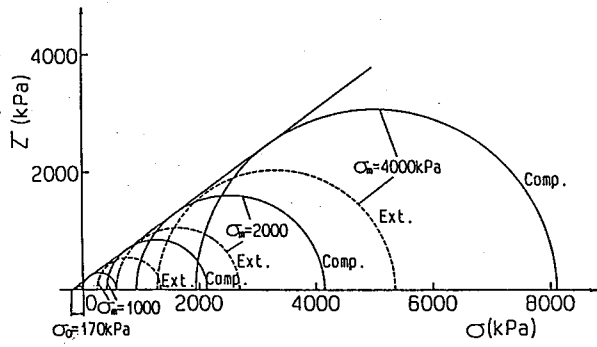


図-8 A-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験の破壊時のモールの応力円による σ_0 の決定

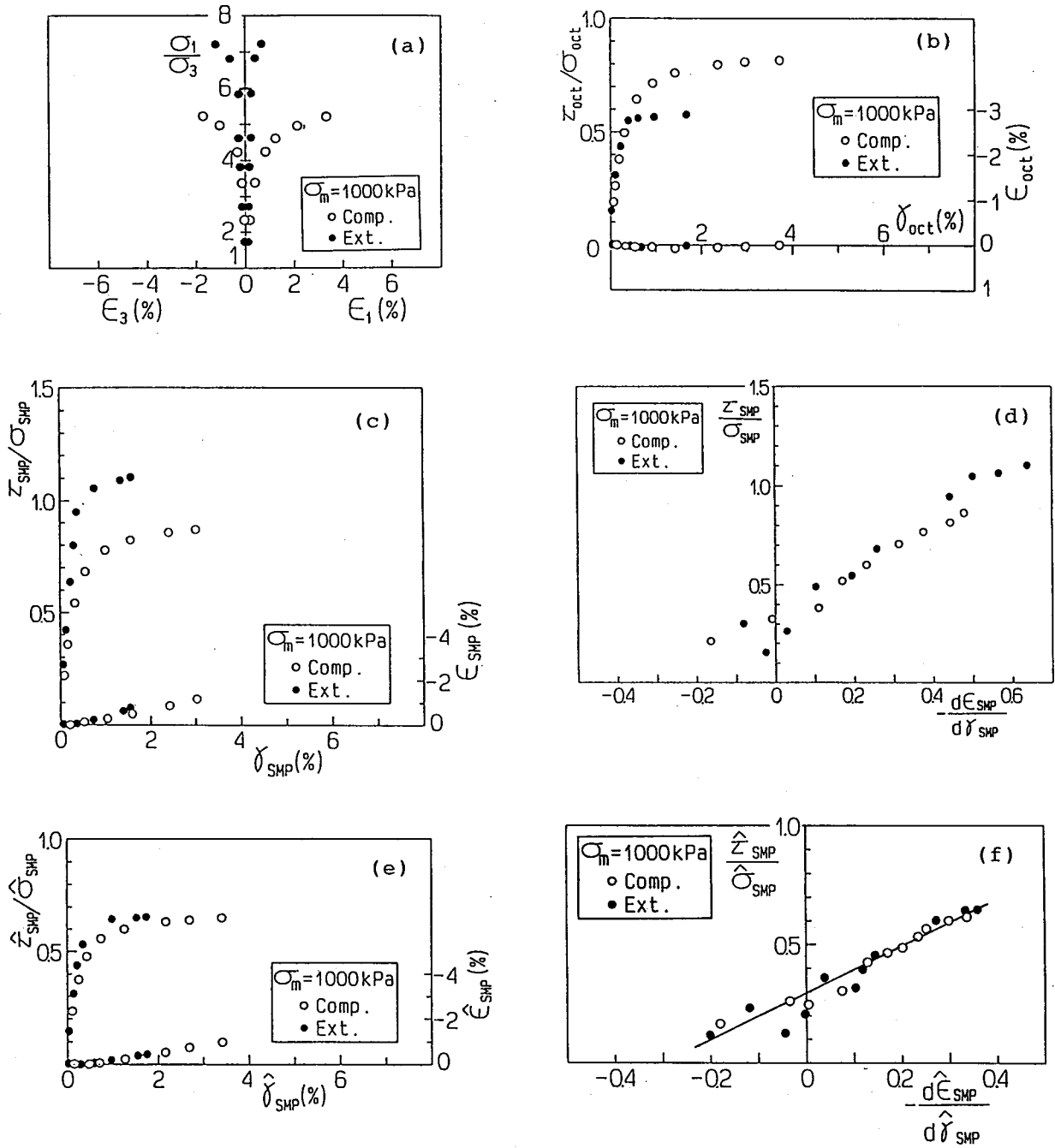


図-9 B-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験結果の各種の整理($\sigma_m=1000\text{kPa}$)

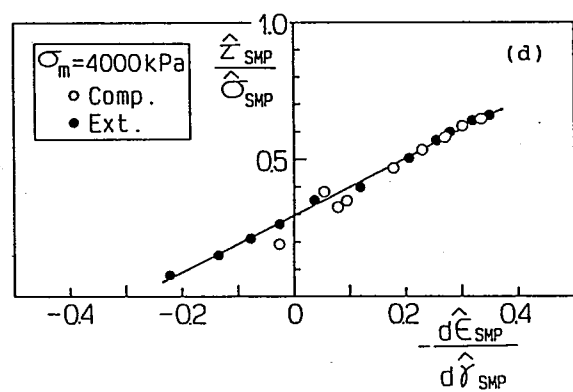
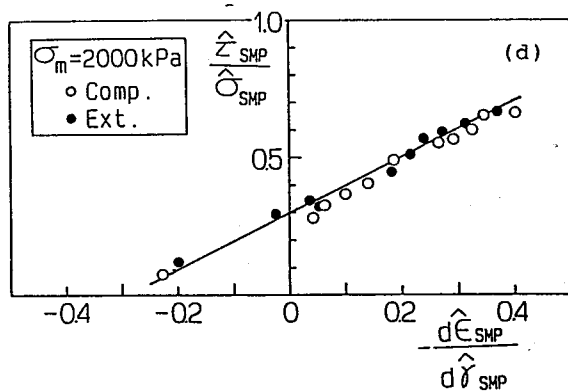
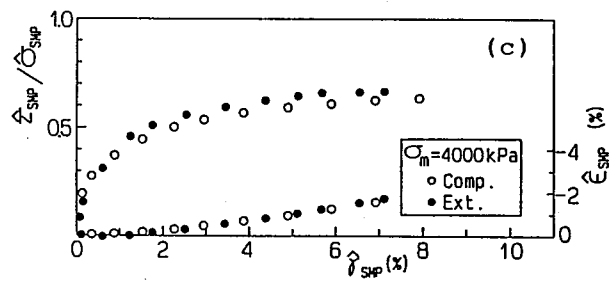
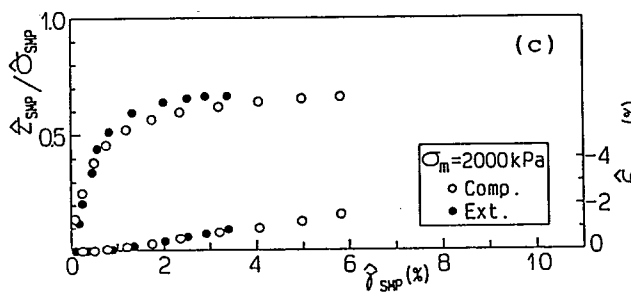
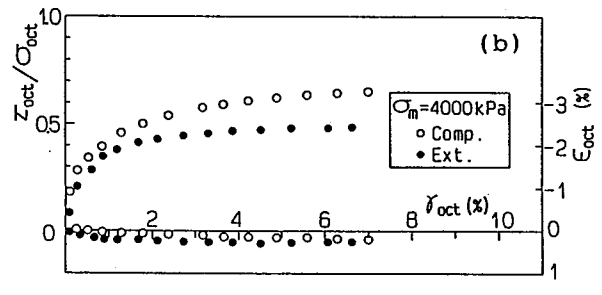
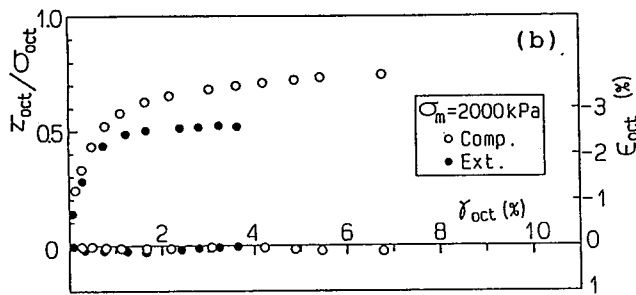
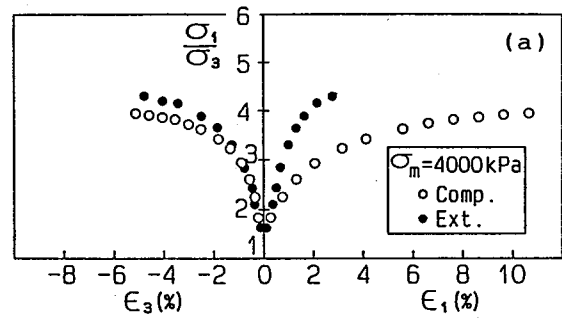
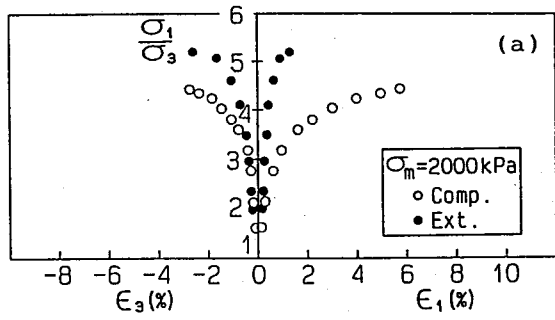


図-10 B-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験結果の各種の整理($\sigma_m=2000\text{kPa}$)

図-11 B-I種のセメント混合砂の三軸圧縮・伸張試験結果の各種の整理($\sigma_m=4000\text{kPa}$)

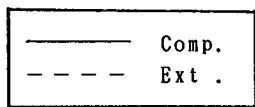
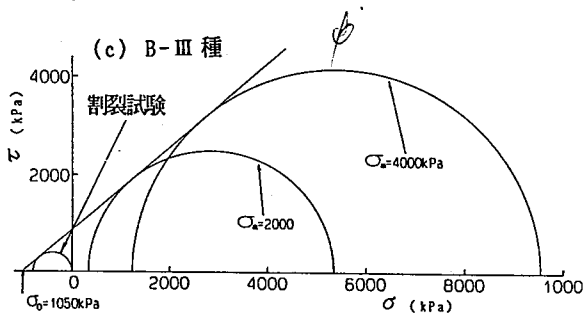
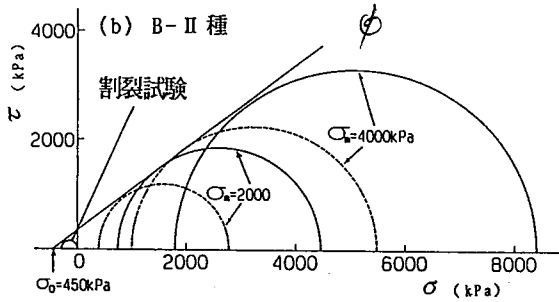
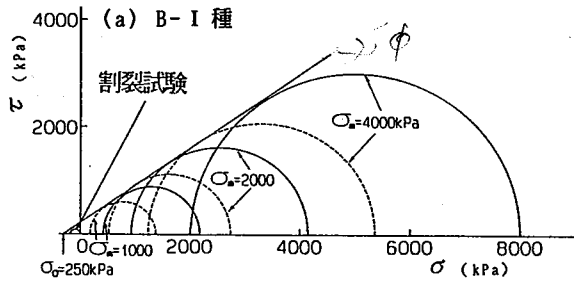


図-12 B-I, B-II, B-III種のセメント
混合砂の破壊時のモールの応力円

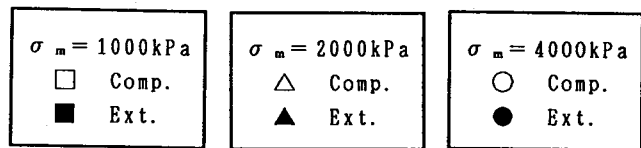
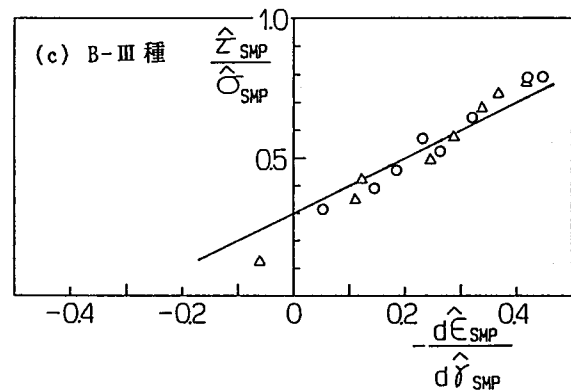
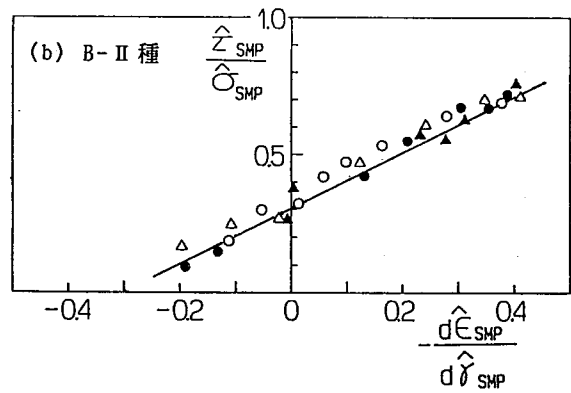
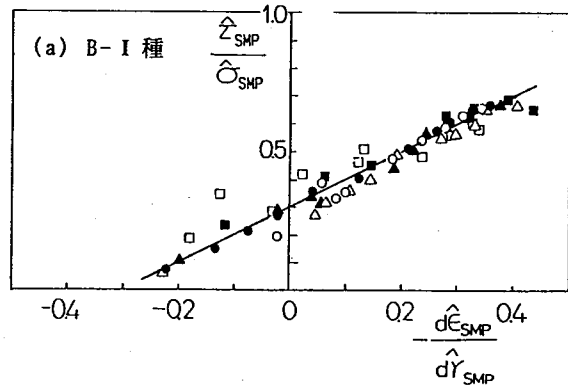


図-13 B-I, B-II, B-III種のセメント
混合砂の拡張SMP上でのせん断・垂直
応力比～垂直・せん断ひずみ増分比関係