

砂にセメントを混合する地盤改良は広く行われているが、3主応力の下でのセメント改良砂の変形・強度特性およびその解析に関する研究は少ないと思われる。本文では、まず、拡張SMPの概念に基づいて、セメント改良砂の三軸圧縮・三軸伸張試験および3主応力制御試験の結果を統一的に整理できることを示す。次に、これらの特性から3主応力下のc、φ材料であるセメント改良砂の構成式を提示するとともに、実験による実測値と本構成式による予測値を示す。

1. 拡張SMPに基づいた整理結果

本文で扱うセメント改良砂はA-I種（豊浦砂:セメント:水:粘土粉末=11.7:1:4.8:1.5）とC-I種（豊浦砂:セメント:水=15:1:3）の2種である。

Figs.1,2はA-I種のセメント改良砂の平均有効主応力 $\sigma_m=600\text{kPa}, 2000\text{kPa}$ のもとでの排水三軸圧縮試験結果（Comp.;○）および三軸伸張試験結果（Ext.●）を拡張SMPに基づいて整理したものである¹⁾。これらの図より、同じ平均有効主応力 σ_m のもとであれば、三軸圧縮（Comp.）・三軸伸張（Ext.）条件のいかんにかかわらず、 $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP}^* \sim \hat{\epsilon}_{SMP}^*$ 関係はほぼ同じのカーブ上に整理されるのがみられる。また、ストレス・ダイランシー式に相当する $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim -d\hat{\epsilon}_{SMP}^*/d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ 関係で整理した実測プロットは、三軸圧縮（Comp.）・三軸伸張（Ext.）条件の違いにかかわらず、平均有効主応力 σ_m の違いにかかわらず、ほぼ一本の直線上にのることがわかる。

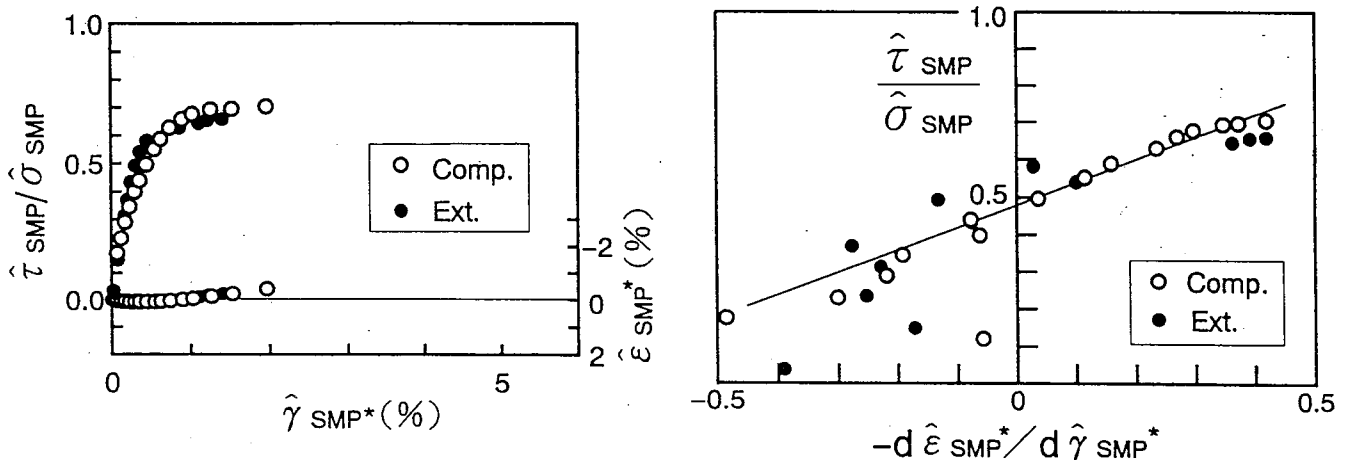


Fig.1 Arrangement of stress-strain relationships on Extended SMP from results of triaxial compression and extension tests on Cemented Sand A-I($\sigma_m=600\text{kPa}$)

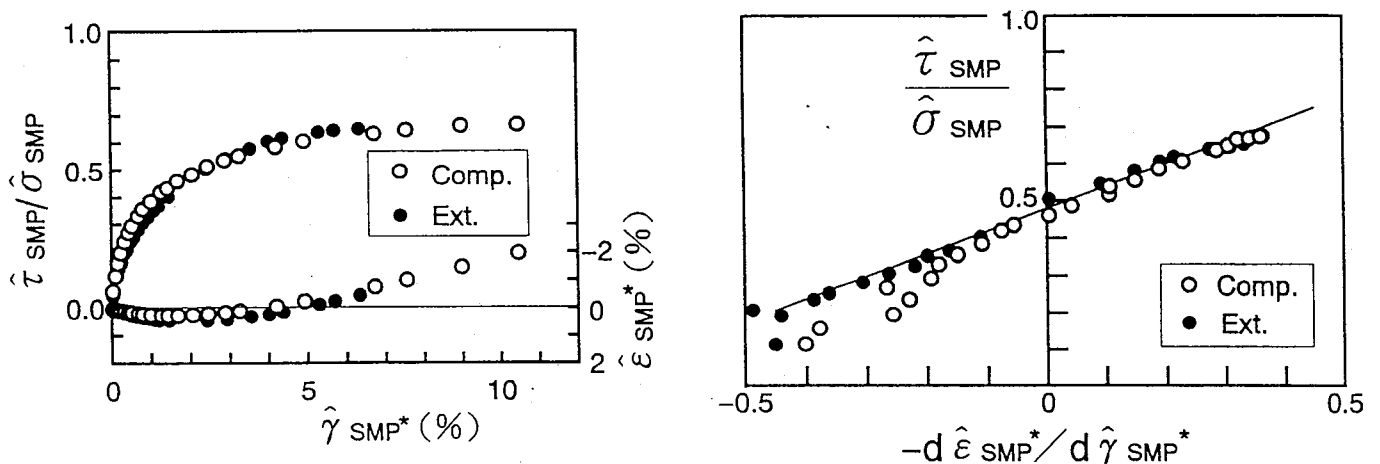


Fig.2 Arrangement of stress-strain relationships on Extended SMP from results of triaxial compression and extension tests on Cemented Sand A-I($\sigma_m=2000\text{kPa}$)

Fig.3は、セメント改良砂C-Iの $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の放射状応力経路に沿った3主応力制御試験結果を拡張SMPに基づいて整理したものである²⁾。これらの図より、拡張SMP上の整理によれば、 σ_m 一定条件下での放射状応力経路の違いにかかわらず、 $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP}^* \sim \hat{\varepsilon}_{SMP}^*$ 関係および $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim -d\hat{\varepsilon}_{SMP}^*/d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ 関係のプロットは、ほぼ同じ線上に整理されるのがみられる。

Fig.4は、セメント改良砂C-Iの $\sigma_m=800\text{kPa}$ の下での、折れ線状応力経路OAC, OAD, OAF, OBE(Fig.12参照)に沿う3主応力制御試験結果を拡張SMP上で整理したものである²⁾。同図より拡張SMP上で整理すれば、セメント改良砂の、 σ_m 一定の単調載荷せん断試験結果が正八面体面上の応力経路の違いにもかかわらず、ほぼ同じ線上に整理されるのがみられる。

Fig.5はセメント改良砂C-Iの破壊時の実測応力状態と拡張SMPに基づく破壊規準の予測線($\sigma_0=350\text{kPa}$, $\phi=36^\circ$)をモール平面と π 平面で示している。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。

2.3次元応力下のセメント改良砂の構成式

以上より、 σ_m 一定の単調載荷のもとでは、応力経路の違いにかかわらず、拡張SMPの概念に基づいて、 ϕ 材料であるセメント改良砂の3主応力制御試験結果は統一的に整理されることがわかる。以下、これらの実験事実に基づいて、簡単な構成式を提案する。

一般応力経路下の主ひずみ増分 $d\varepsilon_i$ は次式で与えられる。

$$d\varepsilon_i = d\varepsilon_i^{ic} + d\varepsilon_i^{sa} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

ここに、 $d\varepsilon_i^{ic}$ は等方圧密による主ひずみ増分であり、 $d\varepsilon_i^{sa}$ はせん断と異方圧密による主ひずみ増分である。次に、それぞれの算定方法を述べる。

2.1 等方圧密による主ひずみ増分 $d\varepsilon_i^{ic}$

等方圧縮条件下の平均有効主応力 σ_m と体積ひずみ ε_v の関係の実測値を精度よく近似するために、

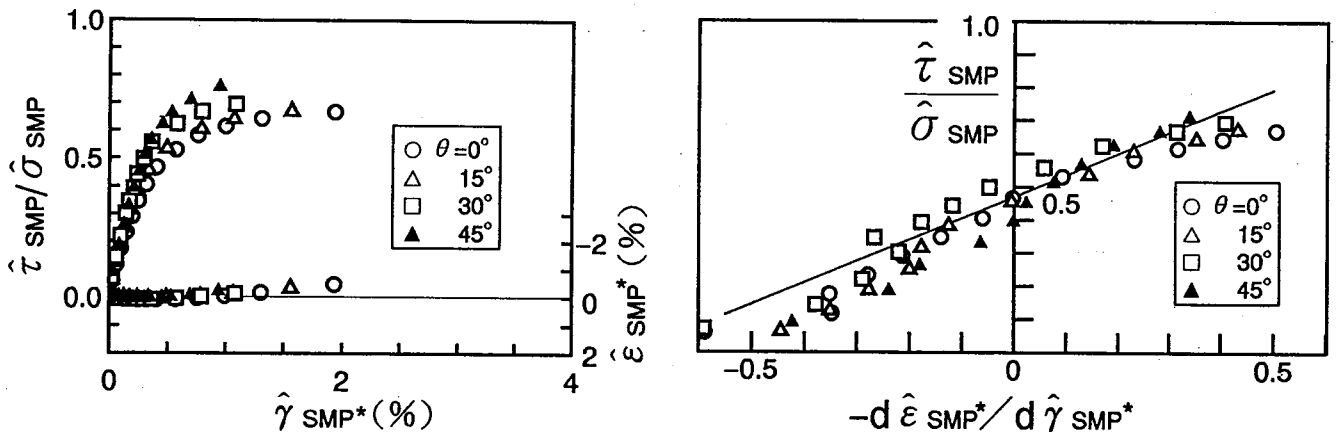


Fig.3 Arrangement of stress-strain relationships on Extended SMP from results of true triaxial tests on Cemented Sand C-I along radial stress paths($\sigma_m=800\text{kPa}$)

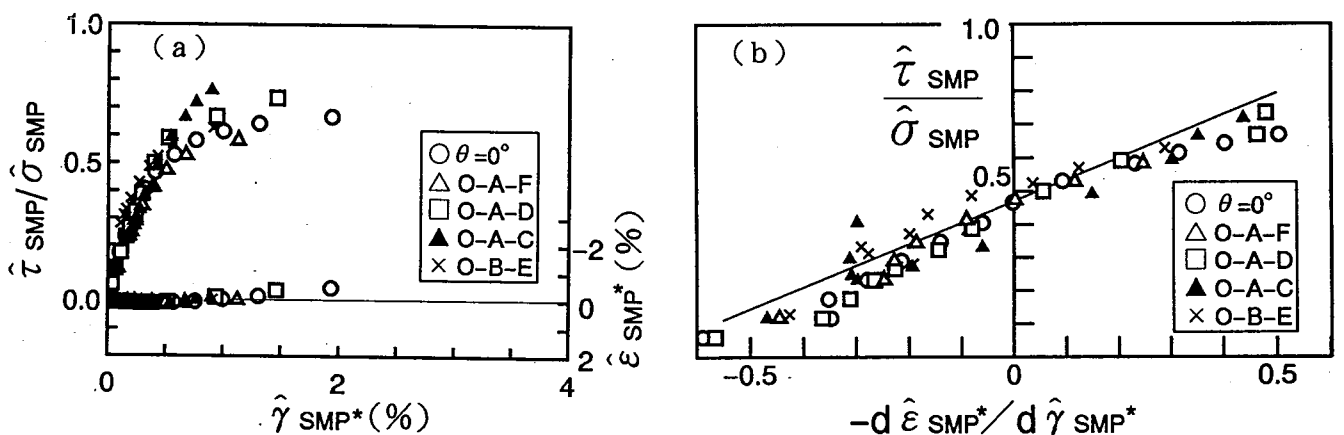


Fig.4 Arrangement of stress-strain relationships on Extended SMP from results of true triaxial tests on Cemented Sand C-I along bending stress paths($\sigma_m=800\text{kPa}$)

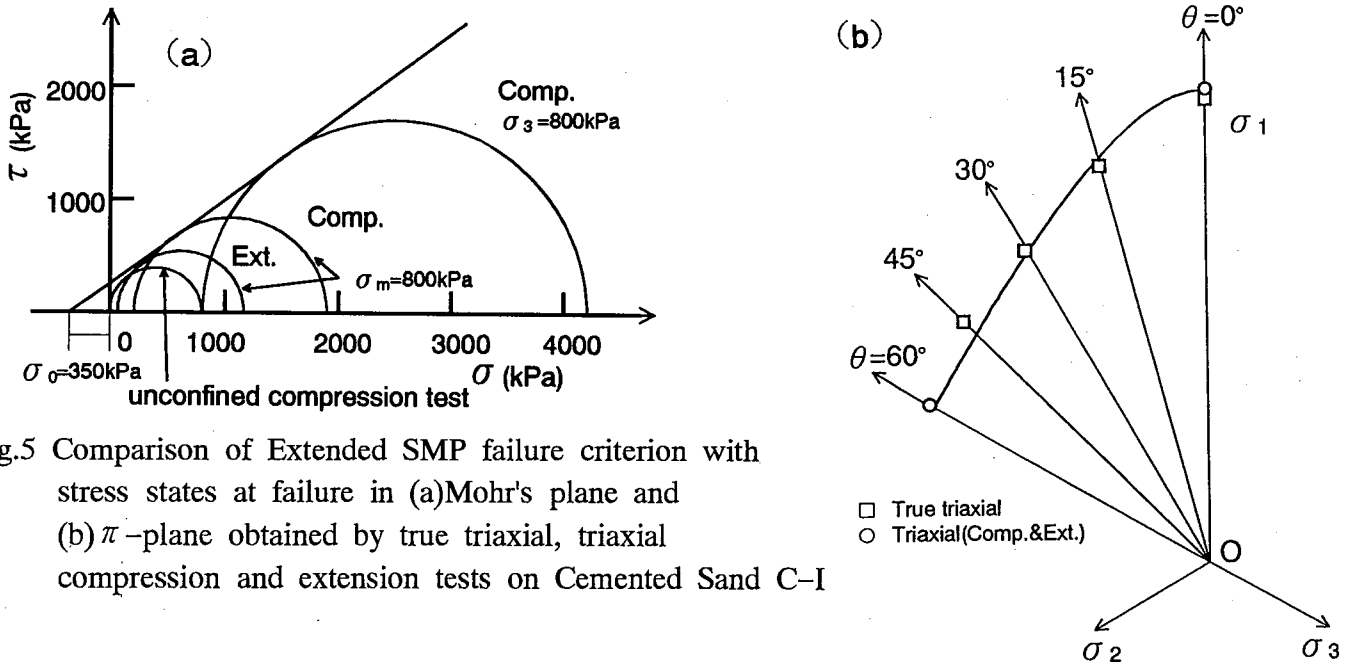


Fig.5 Comparison of Extended SMP failure criterion with stress states at failure in (a) Mohr's plane and (b) π -plane obtained by true triaxial, triaxial compression and extension tests on Cemented Sand C-I

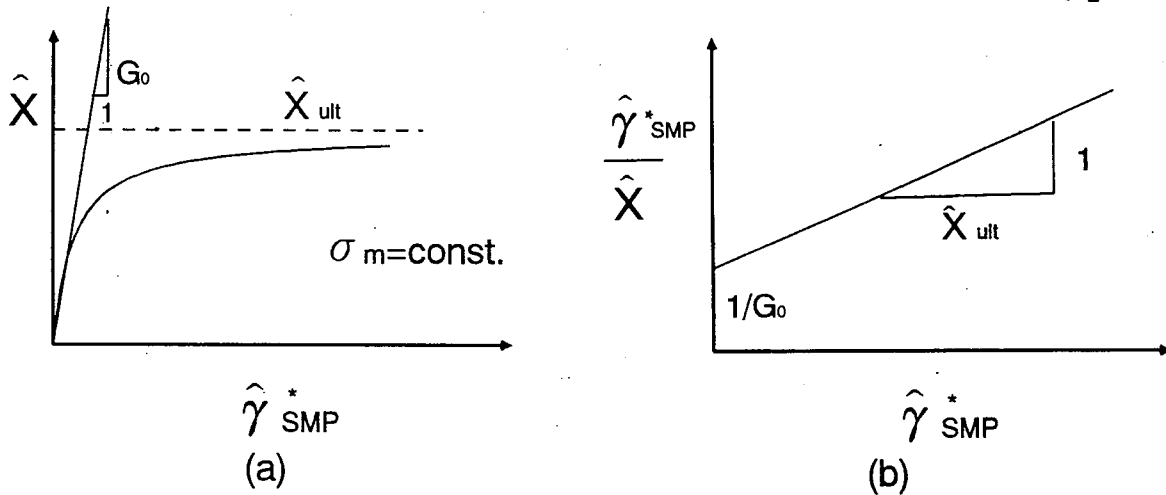


Fig.6 Determination of parameters G_0 and X_{ult} in hyperbolic fitting

$\varepsilon_v \sim \log \sigma_m$ の関係を直線とするのではなく、 $\log \varepsilon_v \sim \log \sigma_m$ の関係を直線と仮定する。式で表せば

$$\log \varepsilon_v = a \log \frac{\sigma_m}{p_a} + b \quad \varepsilon_v = C_t \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^m \quad (2)$$

σ_m は平均有効主応力であり、 p_a は大気圧力である。また、 a, b, C_t, m はパラメーターである。したがって、等方圧縮による主ひずみ増分 $d\varepsilon_i^{ic}$ は次式で与えられる。

$$d\varepsilon_i^{ic} = \frac{d\varepsilon_v}{3} = \frac{m C_t \sigma_m^{m-1}}{3 p_a^m} d\sigma_m \quad (3)$$

2.2 せん断と異方圧密による主ひずみ増分 $d\varepsilon_i^{sa}$

前述のように、セメント改良砂の σ_m 一定の三軸圧縮・三軸伸張試験結果、 σ_m と θ 一定の3主応力制御試験結果および σ_m 一定の単調載荷時の3主応力制御試験結果を $\hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP}^*$ 関係で整理すれば、実測プロットが一本のカーブにのる。そこで、 $\hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP}^*$ の関係を双曲線と仮定すれば、 $\hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP} = \hat{X}$ とし、次式を得る³⁾。

$$\hat{X} = \frac{\hat{\gamma}_{SMP}^*}{1/G_0 + \hat{\gamma}_{SMP}^* / \hat{X}_{ult}} \quad \hat{\gamma}_{SMP}^* = \frac{1}{G_0} \frac{\hat{X}_{ult} \hat{X}}{\hat{X}_{ult} - \hat{X}} \quad (4)$$

ここに、 G_0 は初期接線の勾配であり、 \hat{X}_{ult} は $\hat{\gamma}_{SMP}^* \rightarrow \infty$ 時の $\hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP}$ の値である (Fig.6参照)。式(4)の全

微分をとれば、次式を得る。

$$d\hat{\gamma}_{SMP}^* = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{\hat{X}_{ult}^2}{(\hat{X}_{ult} - \hat{X})^2} d\hat{X} + \frac{\hat{X}_{ult} \hat{X}}{\hat{X}_{ult} - \hat{X}} \cdot \frac{\partial(1/G_0)}{\partial \sigma_m} \cdot d\sigma_m \quad (5)$$

式(5)において、右辺第1項はせん断によるひずみ増分量 $d\hat{\gamma}_{SMP}^{*s}$ を表し、右辺第2項は異方圧密によるひずみ増分量 $d\hat{\gamma}_{SMP}^{*ac}$ を表していると思なせる。したがって、せん断 ($\hat{X} = \hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP}$ の増加) によるひずみ増分量 $d\hat{\gamma}_{SMP}^{*s}$ は次式で与えられる。

$$d\hat{\gamma}_{SMP}^{*s} = \frac{1}{G_0} \frac{\hat{X}_{ult}^2}{(\hat{X}_{ult} - \hat{X})^2} d\hat{X} \quad (6)$$

異方圧密 (σ_m の増加) によるひずみ増分量 $d\hat{\gamma}_{SMP}^{*ac}$ は $1/G_0 \propto (\sigma_m/p_a)^m$ なる実験事実より、次式を得る。

$$d\hat{\gamma}_{SMP}^{*ac} = K_C \cdot \frac{\hat{X}_{ult} \hat{X}}{\hat{X}_{ult} - \hat{X}} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{p_a}\right)^m \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \quad (7)$$

ここで、 K_C は異方圧密時に発生するせん断ひずみの大きさを規定するパラメーターであり、 K_0 圧密条件から決められる。

上述の整理結果によれば、 σ_m 一定の単調载荷条件下で

$$\hat{X} = \hat{\lambda} \left(-\frac{d\hat{\epsilon}_{SMP}^{*s}}{d\hat{\gamma}_{SMP}^{*s}} \right) + \hat{\mu} \quad (8)$$

という関係があるが、異方圧密時のダイレイタンス成分もせん断時と同様に式(8)の stress-dilatancy 関係を満すとする、次式を得る。

$$d\hat{\epsilon}_{SMP}^* = \frac{\hat{\mu} - \hat{X}}{\hat{\lambda}} d\hat{\gamma}_{SMP}^* \quad (9)$$

ところで、式(5)、(9)で与えられるひずみ増分 ($d\hat{\epsilon}_{SMP}^*$ 、 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$) を主ひずみ増分 $d\epsilon_i^{sa}$ へ変換する時には、従来は物質空間で $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方向と $\hat{\tau}_{SMP}$ の方向が一致すると考えてきた⁴⁾が、これは θ 一定 (放射状応力経

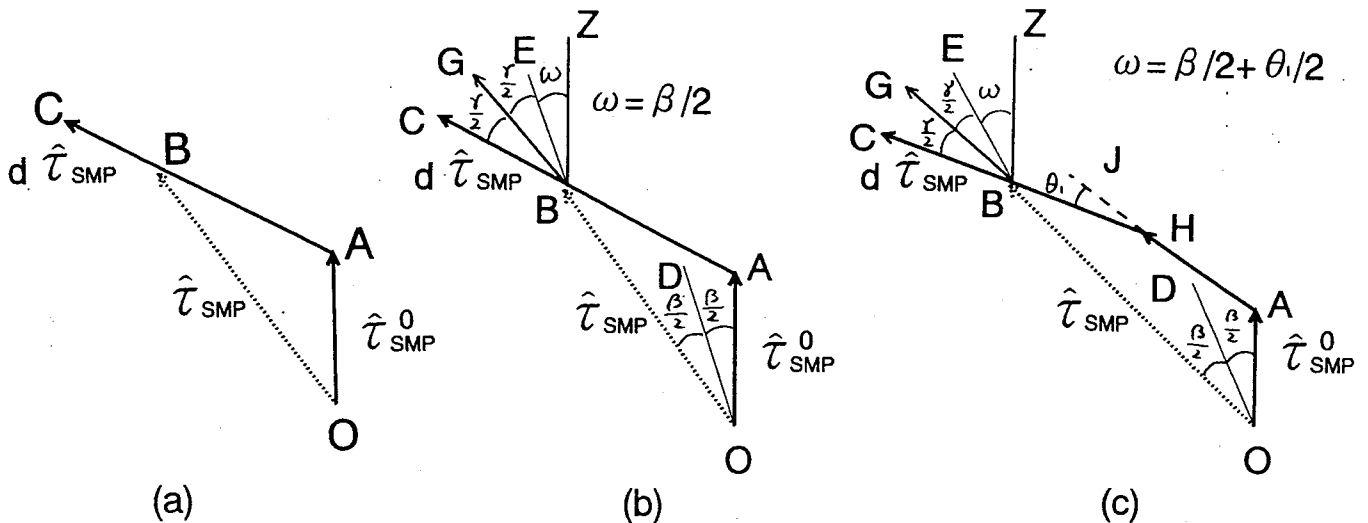


Fig.7 Proposed direction of $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ in Extended SMP (a) Direction of shear stress in Extended SMP (b) Direction of shear stress in case of changing once in Extended SMP (c) Direction of shear stress in case of changing twice in Extended SMP

路) 応力条件下の場合にのみ成立する仮定であると思われる。折れ線状応力経路に沿う場合には、この仮定は成立しないと考えられる。 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方向は、Fig.6(a)に示すように応力経路が変わる前の拡張SMP上のせん断応力 $\hat{\tau}_{SMP}^0$ の方向(Fig.6(a)のOA)、拡張SMP上のせん断応力増分 $d\hat{\tau}_{SMP}$ の方向(Fig.6(a)のAB)および拡張SMP上のせん断応力 $\hat{\tau}_{SMP}$ の方向(Fig.7(a)のOB)と関係があると考えられる。また、 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方向に及ぼす $d\hat{\tau}_{SMP}$ の方向の影響が一番大きいと思われる。そこで、本研究では、 θ 一定の場合には、 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方向と $\hat{\tau}_{SMP}$ の方向(この場合は $d\hat{\tau}_{SMP}$ の方向と同じ)の一致を仮定することにより、うまく予測できる事実⁴⁾をふまえて、簡単のために、応力増分方向が1回変わる場合に対して、 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方向はFig.7(b)に示すようにBEとBC($d\hat{\tau}_{SMP}$ の方向)の2等分線BGの方向に一致すると仮定する。ここで、BEの方向はOA($\hat{\tau}_{SMP}^0$ の方向)とOB($\hat{\tau}_{SMP}$ の方向)の2等分線ODの方向に一致するものとする。すなわち、BEとBZ(OAに平行)のなす角 $\omega = \beta/2$ とする(Fig.7(b))。応力増分方向が2回変わる場合は、Fig.7(c)に示すように、 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方向はBEとBC($d\hat{\tau}_{SMP}$ の方向)の2等分線BGの方向に一致すると仮定する。ただし、BEとBZ(OAに平行)のなす角 $\omega = \beta/2 + \theta_1/2$ とする。ここに、 θ_1 は1回変わった後の応力増分方向と2回変わった後の応力増分方向のなす角である。後はFig.7(b)の場合と同じであるが、応力増分方向が2回以上変わる場合にはFig.7(c)の場合から類推できる。したがって、BG($d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方向)の方向余弦($\hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3$)が得られる。 $d\hat{\epsilon}_{SMP}^*$ と $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ から3主ひずみ増分への変換式は次式で与えられる。

$$d\epsilon_i^{SA} = \hat{a}_i d\hat{\epsilon}_{SMP}^* + \hat{b}_i d\hat{\gamma}_{SMP}^* \quad (10)$$

ここに、 \hat{a}_i は拡張SMPの方向余弦である。

2.3 構成式のパラメーターの検討

等方圧密時のパラメーター(C_c, C_e, m)は等方圧密試験(載荷、除荷および再載荷)結果より決定できる。せん断時のパラメーター($\sigma_0, \hat{\lambda}, \hat{\mu}, \hat{X}_{ult}, G_0$)については、一軸圧縮試験と σ_m 一定の三軸圧縮試験より決定できる。 σ_0 は一軸試験と三軸圧縮試験の破壊時のモール応力円の包絡線と σ 軸の交点より決められる($\sigma_0 = c \cdot \cot \phi$)。 $\hat{\lambda}, \hat{\mu}$ は σ_m 一定の三軸圧縮試験結果を $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim -d\hat{\epsilon}_{SMP}^*/d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の関係でプロットすれば、決定できる。 \hat{X}_{ult}, G_0 は σ_m 一定の三軸圧縮試験結果をFig.6(b)に示すような関係で整理すれば決定できる。しかし、この G_0 はある σ_m の下でのものであるが、実際は G_0 が σ_m の大小によって変わることがよく知られている。せん断初期の圧縮方向と膨張方向の変形係数はせん断直前の等方圧縮・膨潤時の変形係数と一致すると仮定すれば、次式を得る⁵⁾。

$$G_0 = \frac{9p_a^m \sigma_m^{-m}}{\sqrt{3}m(2C_t + C_e)} \quad (11)$$

ここに、 C_e は等方膨潤時における式(2)の C_t に対応するものである。

Table 1にc、 ϕ 材料であるセメント改良砂A-I、C-I試料の等方圧縮試験結果および平均有効主応力 σ_m 一定のもとでの三軸圧縮試験結果より決定されたパラメーターの値を示している。

3. セメント改良砂の応力・ひずみ挙動の予測

3.1 円柱形供試体による三軸圧縮および三軸伸張試験結果との比較

Fig.8は、平均有効主応力 σ_m 一定条件下のセメント改良砂A-Iの三軸圧縮および三軸伸張試験データを粘着成分を考慮した主応力比($\hat{\sigma}_1/\hat{\sigma}_3 = (\sigma_1 + \sigma_0)/(\sigma_3 + \sigma_0)$) \sim 主ひずみ(ϵ_1, ϵ_3) \sim 体積ひずみ(ϵ_v)関係で整理した結果¹⁾(○:三軸圧縮; ●:三軸伸張)と本モデルによる予測結果(実線:三軸圧縮; 点線:三軸伸張)を示している。同図より、応力経路の違い(三軸圧縮か三軸伸張か)にかかわらず、簡単な構成

Table 1 Parameters of Cemented Sand for Simple Model

	Consolidation			Shear Behaviour				
	C_t (%)	C_e (%)	m	$\hat{\mu}$	$\hat{\lambda}$	σ_0 (kPa)	\hat{X}_{ult}	ϕ
A-I	.09	.024	1.0	.48	.60	200	.75	36°
C-I	.10	.040	0.8	.48	.65	350	.85	36°

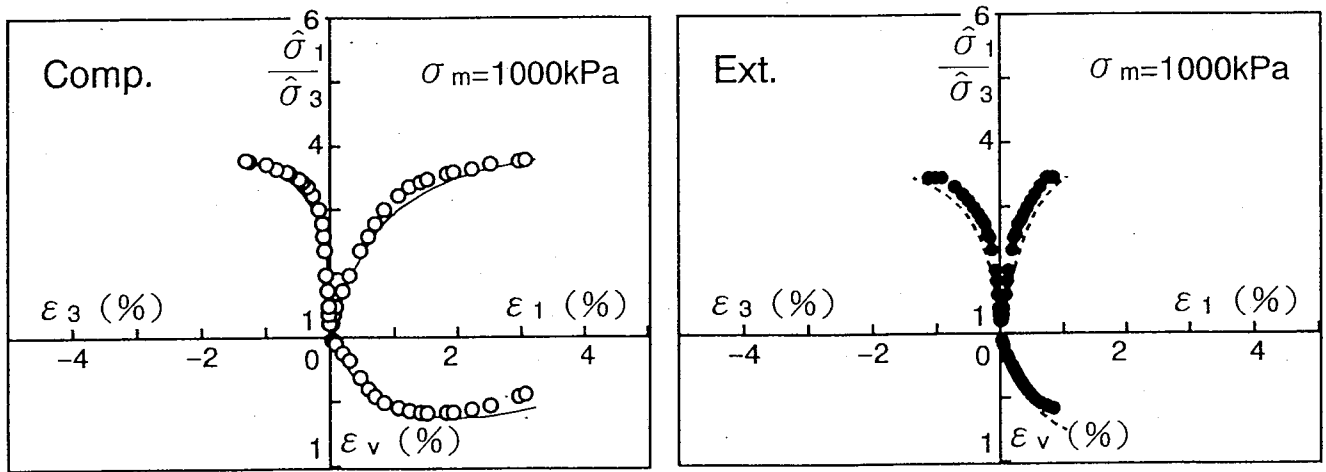


Fig.8 Predicted and experimental results of triaxial compression and extension tests on Cemented Sand A-I($\sigma_m=1000\text{kPa}$)

式による予測値は実測値の傾向をよく説明しているのが見られる。図中からわかるように、本モデルはセメント改良砂のダイレイタンス特性をほぼ予測している。

3.2 立方体供試体による3主応力制御試験結果との比較

Figs.9,10は、 $\sigma_m=800\text{kPa}$ 条件下での放射状(Fig.11参照)と折れ線状(Fig.12参照)応力経路に沿ったセメント改良砂C-Iのせん断試験結果を粘着成分を考慮した主応力比($\hat{\sigma}_1/\hat{\sigma}_3$)~主ひずみ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$)~体積ひずみ(ε_v)関係で整理した結果²⁾と本モデルによる予測結果(実線)を示している。同図より、モデルは実測された応力~ひずみ関係やダイレイタンス特性をほぼ予測している。

Fig.11は、主応力空間($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)と主ひずみ増分空間($d\varepsilon_1, d\varepsilon_2, d\varepsilon_3$)を重ね合わせたものであり、矢印は σ_m と θ 一定の放射状応力経路のセメント改良砂C-Iの3主応力制御試験($\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)の実測値²⁾とモデルによる予測ひずみ増分ベクトルを π 面上に投影したものを表している。同図より、モデルはセメント改良砂の π 面上のひずみ増分ベクトルの方向が応力経路よりずれる傾向を説明している。

Fig.12は、Fig.11と同じ整理の方法で、 σ_m 一定の折れ線状応力経路に沿ったセメント改良砂C-Iの3主応力制御試験の実測値²⁾とモデルによる予測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、予測値はセメント改良砂のひずみ増分ベクトル方向の応力経路依存性を説明している。例えば、Fig.12(a)のG点の実測ひずみ増分ベクトル方向は明かに応力経路(OADとOBE)によって異なるが、Fig.12(b)に示すようにモデルはこの傾向をよく説明している。また、Fig.12(a)に示すように応力経路の回転の角度が大きいほど、ひずみ増分ベクトルと応力増分ベクトルのなす角度が大きくなるが、Fig.12(b)に示すようにモデルはこの傾向を説明している。ところが、従来のSMPに基づいたモデル⁴⁾では、Fig.12(a)に示すような変形特性を説明できない。これは、折れ線状のような応力経路下では、 $\hat{\sigma}_{SMP}$ の方向と $d\hat{\sigma}_{SMP}$ の方向が一致するという仮定がもはや成立しないためと思われる。

参考文献

- 1) 松岡 元・孫 徳安：粘着成分を有する摩擦性材料の変形・強度特性の統一的解釈、土木学会論文集、No.463/Ⅲ-22, pp.163-172, 1993.
- 2) 松岡 元・孫 徳安・菅田孝宏：セメント混合砂の3主応力制御試験結果とその統一的解釈、土木学会論文集、No.475/Ⅲ-24, pp.119-128, 1993.
- 3) 松岡 元・中井照夫：砂と粘土の構成式の考え方、(財)高速道路調査会資料、pp.136-139, 1987.
- 4) 中井照夫・松岡 元：3主応力下のせん断挙動に関する統一的解釈、土木学会論文報告集、第303号、pp.65-77, 1980.
- 5) 孫 徳安：粘着成分を有する摩擦性材料の変形・強度特性に関する研究、名古屋工業大学学位論文、1994.

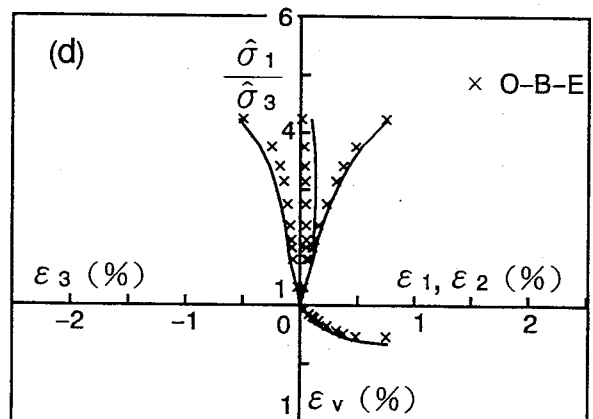
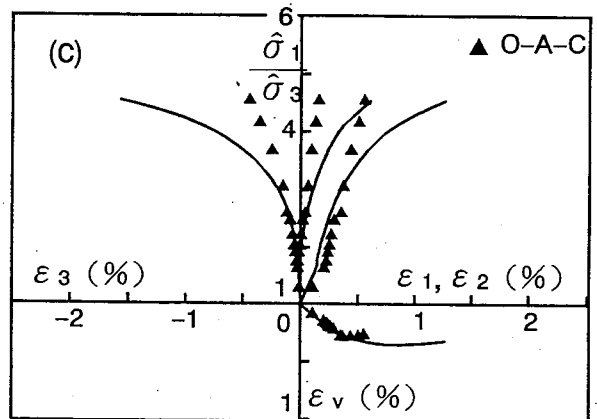
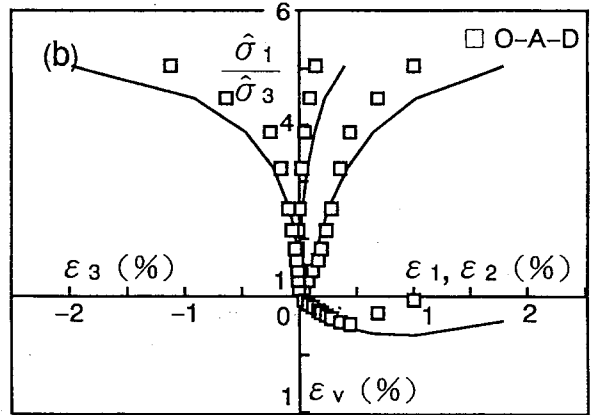
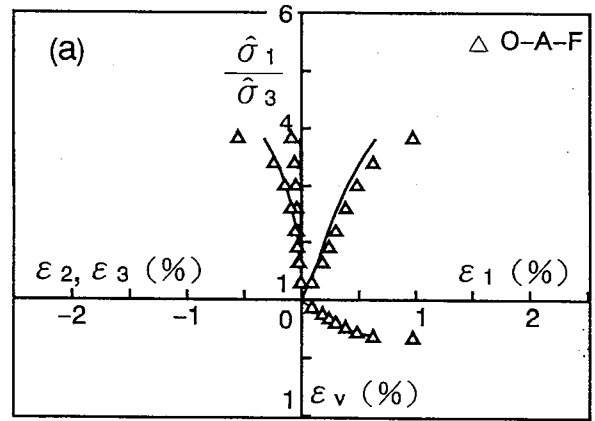
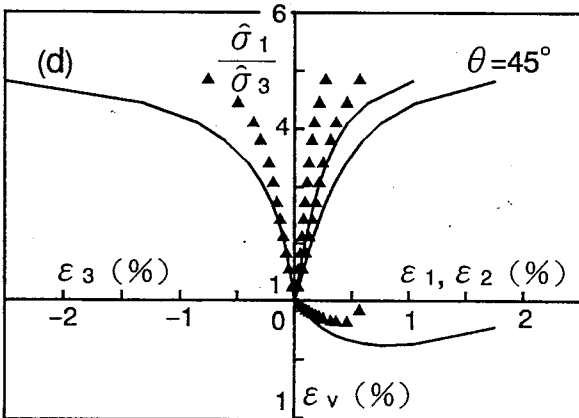
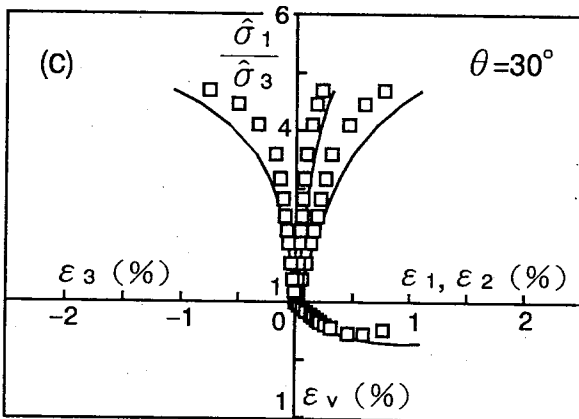
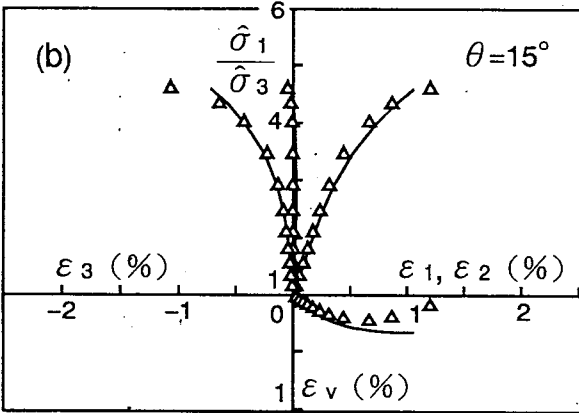
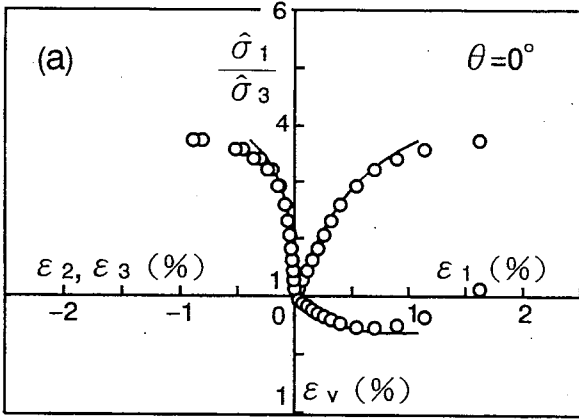


Fig.9 Predicted and experimental results of true triaxial tests on Cemented Sand C-I along radial stress paths($\sigma_m=800\text{kPa}$)

Fig.10 Predicted and experimental results of true triaxial tests on Cemented Sand C-I along bending stress paths($\sigma_m=800\text{kPa}$)

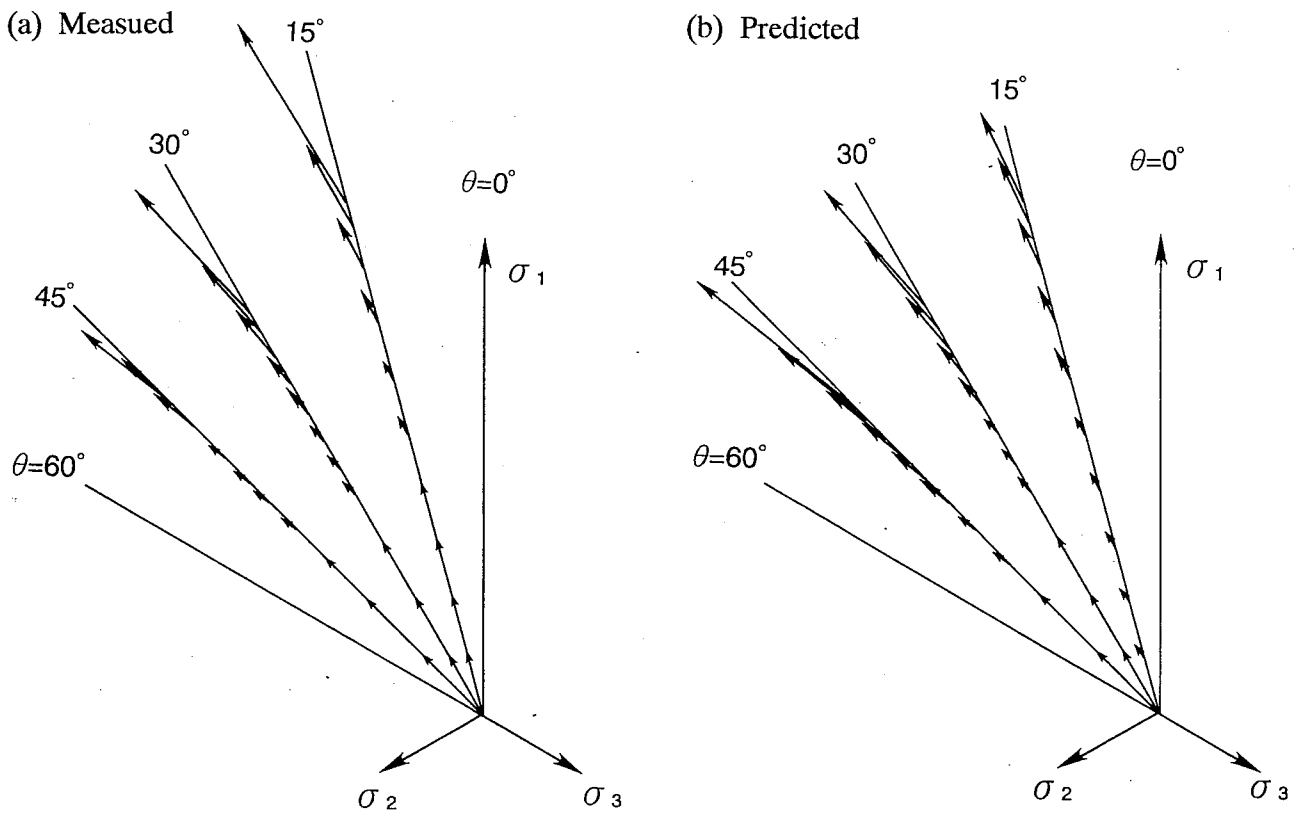


Fig.11 Predicted and measured directions of strain increment vectors in π plane under true triaxial condition with radial stress paths

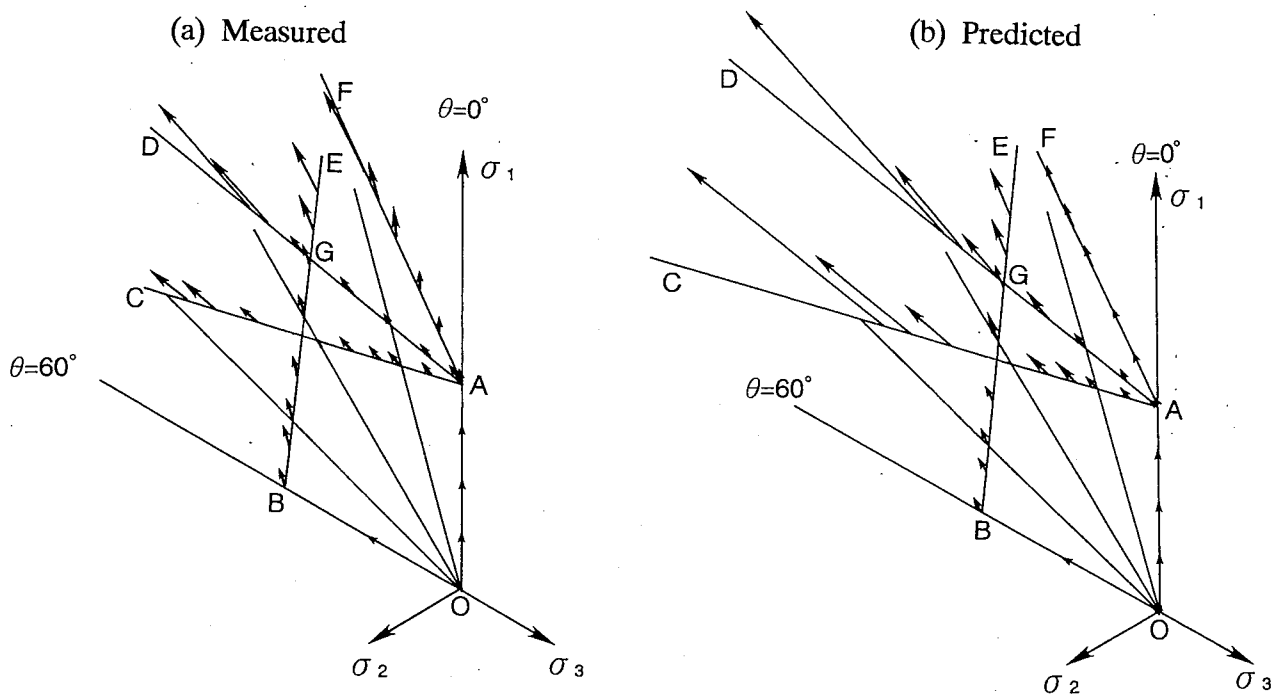


Fig.12 Predicted and measured directions of strain increment vectors in π plane under true triaxial condition with bending stress paths