

複合地盤における変形局所化についての微視的考察

熊本大学大学院 学生員 山本健太郎
熊本大学工学部 正会員 大谷 順

1. はじめに

近年、破壊の前兆である変形の局所化やせん断帯の発生メカニズムを明らかにすることは、地盤の破壊メカニズムを考える上で極めて重要なものであると考えられている^{1),2)}。これらの解析方法として、数値解析的研究では、巨視的な構成式を用いた数学的手法である分岐解析や地盤材料内部の微視的構造を構成式に取り入れたマイクロメカニクスに基づく手法がある。実験的研究としては、平面ひずみ圧縮試験等を行い、光弾性、X線応力測定、画像処理解析等を用いた手法がある。また、変形の局所化やせん断帯形成に至る地盤材料内部の微視的メカニズムを解明するには、かなりの困難が予想され、数学的手法にも限界がある。最終的には、妥当な物理的メカニズムを想定することができるかが、変形の局所化やせん断帯形成の問題における重要な課題と考えられる³⁾。このような背景のもとに、著者らは、複合地盤の変形局所化を解明することを目的に、その進行途中より終局までを、微視的な観察が可能なアルミ棒積層体模型地盤を用いた支持力試験を実施し、補強材の敷設条件や材質の違いによる地盤の破壊メカニズムに着目し、これを検討してきた^{4),5)}。本報告では、载荷に伴う特定のアルミ棒の剛体運動（移動と回転）について画像処理解析を実施することによって微視的な観察を実施したものである。そして、個々のアルミ棒の移動、回転量の分布並びに着目している領域でのひずみ分布を求めることにより、複合地盤（補強土地盤）の変形及び破壊の進行性及局所性について考察するものである。

2. 実験方法

実験方法は、以下の手順で行った。

① 実施するケースの地盤条件（無補強地盤・補強土地盤（補強材の材質や敷設条件等））を設定する。
本報告では、以下に示す地盤条件において実施した。

CASE 1: 無補強地盤

CASE 2: 補強土地盤（補強材：紙, 敷設条件：
 $b/B=1.0, z/B=0.4$ ）

CASE 3: 補強土地盤（補強材：紙, 敷設条件：
 $b/B=2.0, z/B=0.4$ ）

CASE 4: 補強土地盤（補強材：プラスチック,
敷設条件： $b/B=1.0, z/B=0.4$ ）

ここで、 B : 载荷板幅(=10 cm)、 b : 補強材の敷設長、 z : 補強材の敷設深さである。

② アルミ棒積層体上部中央から左側の地盤にアルミ棒の剛体運動の様子が観察できるように、アルミ棒の表面を着色し、表面に半径分だけ傷を加えたアルミ棒群を約1 cm間隔で縦8、横11の計88本挿入する（Photo1.参照）。

③ 载荷速度1.0 mm/minで载荷試験を開始し（変位制御）、载荷板の沈下が1.0 mm増すごとにその時の荷重を読み取り、それと同時に、模型地盤の

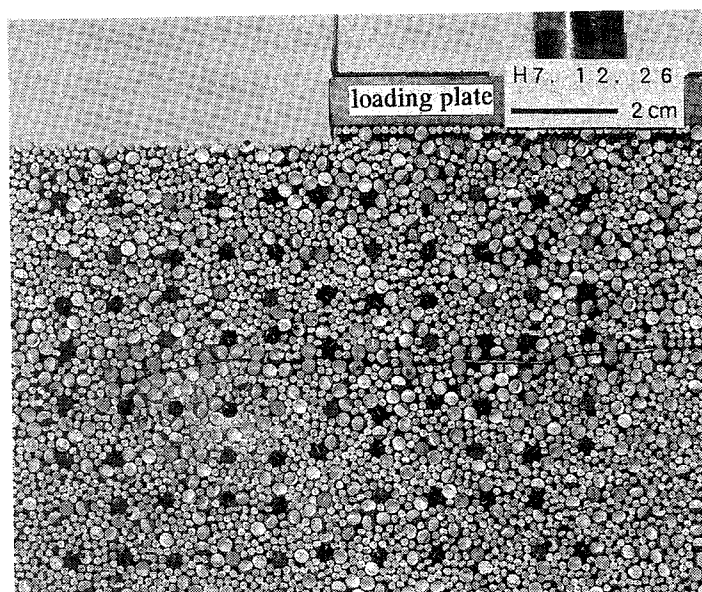


Photo 1. Initial location of the ground in the model test (CASE 3).

A microscopic observation on deformation localization of composite ground;
Kumamoto University, K. Yamamoto and J. Otani

変形状態を写真撮影した。また、実験は載荷板が 50 mm 沈下するまで実施した。Photo 2 は、載荷板の沈下量が 40 mm 時の CASE 3 における変形した地盤の写真である。

④ 撮影した写真を photo CD に変換し、この画像データを用いてコンピュータ上で画像処理解析を行い、載荷板の沈下に伴う、着目している特定のアルミ棒の剛体運動（移動と回転）について微視的な観察を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重-沈下曲線

Fig.1 は、今回報告する地盤条件の全ケースにおける荷重-沈下曲線である。これを見ると、全ケースとも載荷板の沈下量の増大とともに荷重が増大しているのがわかる。また、補強土地盤のケースのみを比較すると、CASE 3(Paper, $b/B=2.0$, $z/B=0.4$)が最も補強土効果が大きく現われていることがわかる。

3.2 アルミ棒の軌跡

Fig.2 は、CASE 1 において、2 mm の沈下を 1 step として、0~40 mm までの計 21step 間に移動したアルミ棒の軌跡を示す。また、Figs.3,4 及び 5 には、CASE 2,3 及び 4 における 2 mm の沈下を 1 step として、(a) では載荷板の沈下量が 0~20 mm までの前半部分、(b) では載荷板の沈下量が 20~40 mm までの後半部分におけるアルミ棒の軌跡を示す。図中の曲線は、各図における最初と最後の step での補強材の位置を示す。CASE 1 では、載荷板直下から周辺に向かって、主働、過渡、受働の 3 領域（図中点線でその領域を示す）が比較的顕著に現われており、

Terzaghi に代表される従来の破壊メカニズムを比較的よく示している。このことにより、実験結果の定量的評価が検証されたと考える。続いて、補強材の敷設長が異なる補強土地盤について比較する。補強材として、紙を使用したケースである Figs.3 及び 4 を見ると、前半の(a) $S/B=0.0\sim 0.2$ では、両図とも補強材上面においてアルミ棒の移動が著しく、移動方向も無補強地盤の結果である Fig.2 と類似していることがわかる。しかし、後半の(b) $S/B=0.2\sim 0.4$ においては、Fig.3(CASE 2)では、載荷板下のアルミ棒は下方、載荷板側方に位置するアルミ棒は上方への移動が観察される。これに対して、Fig.4(CASE 3)では、載荷板下のアルミ棒は下方、載荷板側方、補強材下面に位置するアルミ棒に対しては側方への移動が著しいことがわかる。次に、補強材の剛性が異なる補強土地盤について比較する。Fig.3 と Fig.5 は補強材の敷設条件は同一であるが、補強材の材質が紙とプラスチックで異なるケースである。これらを比較すると、前半の(a) $S/B=0.0\sim 0.2$ においては、Fig.3 (CASE 2)では、補強材下面のアルミ棒があまり移動していないが、Fig.5(CASE 4)では、補強材下面のアルミ棒についてもその移動が著しいことが観察される。また、後半の(b) $S/B=0.2\sim 0.4$ においては、Fig.3 では、前述したように、載荷板下のアルミ棒は下方、載荷板側方に位置するアルミ棒は上方への移動が観察される。一方、Fig.5 では、載荷板下のアルミ棒は左斜め下方、載荷板側方に位置するアルミ棒は左斜め上方への移動

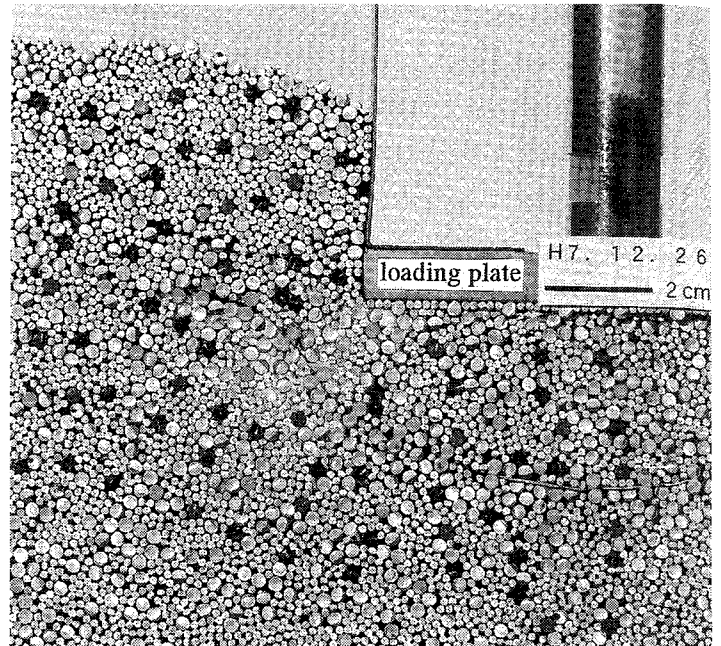


Photo 2. Picture of deformed ground (CASE 3).

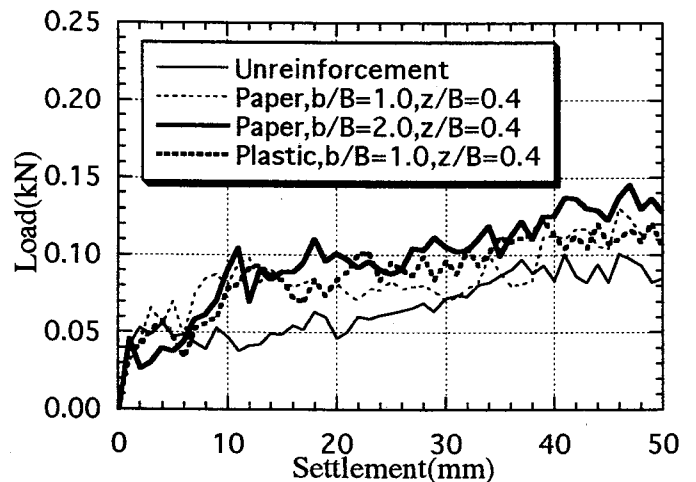


Fig.1 Load - settlement curve.

が観察される。これらの観察より、曲げ剛性を持たず、伸びないような補強材（紙）の場合には、載荷板の沈下量が小さく、補強材の変形量が小さい時には、補強材の上面で Fig.2 と類似した変形が生じると考える。そして、載荷板の沈下量が大きくなり、補強材の変形量が大きくなると荷重が補強材下面にも影響を与え始め、補強材下面において、地盤の変形が著しくなることがわかる。また、補強材が大きい曲げ剛性を有する場合（プラスチック）には、載荷板の沈下量が比較的小さい時から補強材が剛板のようにほとんど変形せず、載荷初期からこの補強材が載荷板のような働きをするために、補強材下面でのアルミ棒の移動が観察される。そして、載荷板の沈下量が大きくなっても、アルミ棒の軌跡の変化はあまりないと言える。

3.3 アルミ棒の回転

地盤の破壊時に生ずるすべり面のような変形局所化は、すべり面上において、土粒子の回転を伴うと考えられることから、ここでは、アルミ棒の回転について議論を行う。

(1) アルミ棒の回転量の総和

Fig.6 は、4 mm の沈下を 1step として、0~40 mm までの計 11step 間の回転の変化量を加えていったものを各ケースごとに示し、どこの位置にあるアルミ棒がどれだけ回転したかを表わしている。横軸は個々のアルミ棒の番号を表わし (Figs.2,3,4 及び 5 と対応)、縦軸は各 step 間の回転の変化量の総和を表わしている。Fig.6(a) CASE 1 では、No.25,33,41 の載荷板底面の端部に位置するアルミ棒が他と比べて、最もよく回転しているのがわかる。一方、補強土地盤では載荷板底面の端部に位置するアルミ棒以外に、(b) CASE 2 では No.28,29,36、(c) CASE 3 では、No.52,60,69,76,77、(d) CASE 4 では、No.35,43,44, 45 のような補強材端部または変形の変曲点付近に位置するアルミ棒が大きく回転しているのがわかる。また、絶対量を比較すると、無補強地盤では載荷板底面の端部において極度に集中しているのに比べ、補強土地盤では全体的にその分布が滑らかである。補強土効果は、局所変形を引き起こさせ、その結果として補強材の強度が有効に発揮する効果と考えられるが、ここでの観察はこれを示唆するものと考えられる。

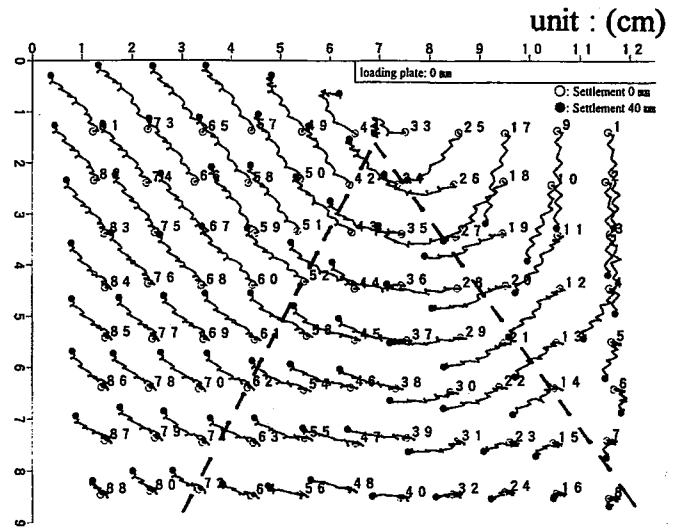
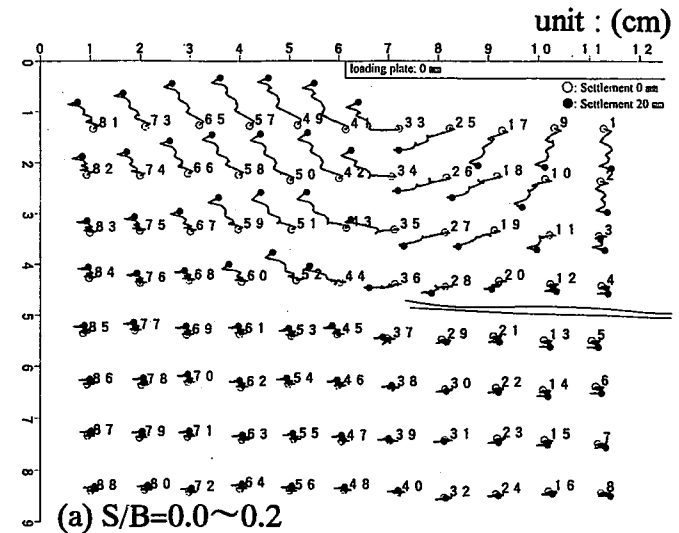
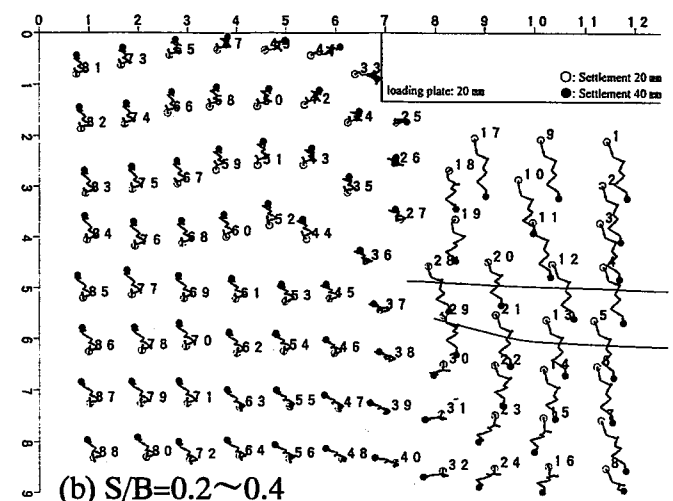


Fig.2 Movement of aluminum rods (CASE 1).



(a) S/B=0.0~0.2



(b) S/B=0.2~0.4

Fig.3 Movement of aluminum rods (CASE 2).

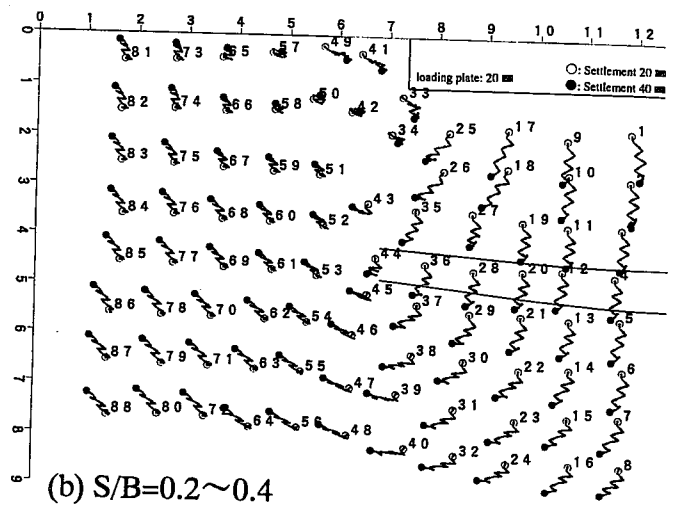
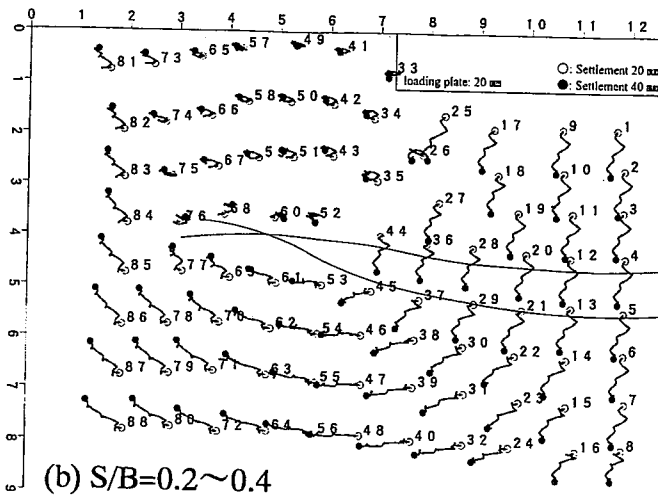
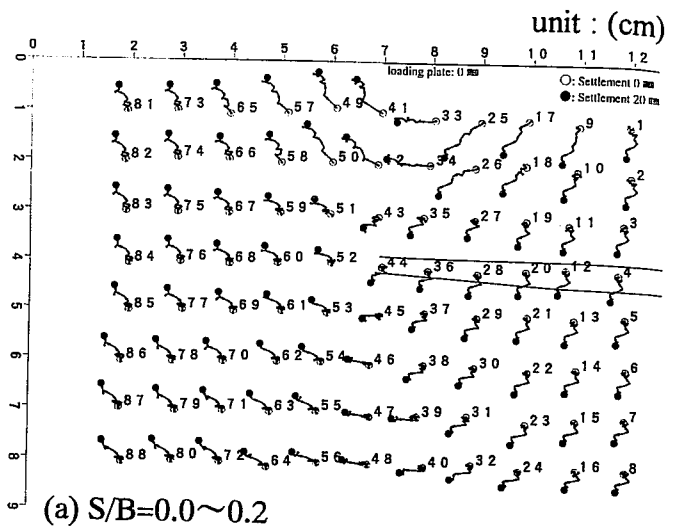
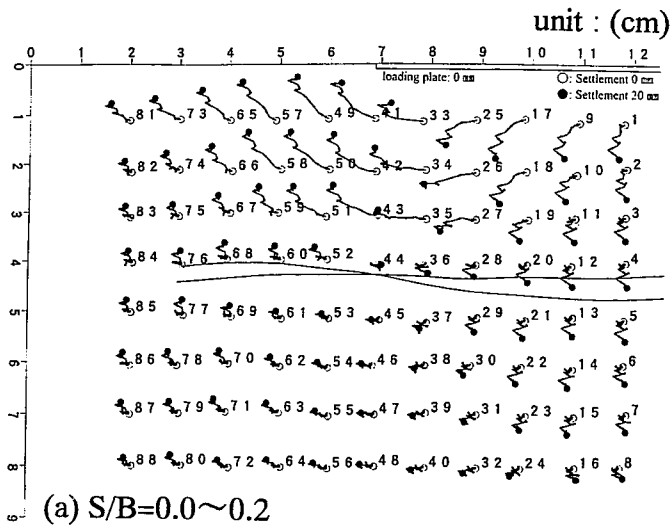


Fig.4 Movement of aluminum rods (CASE 3).

Fig.5 Movement of aluminum rods (CASE 4).

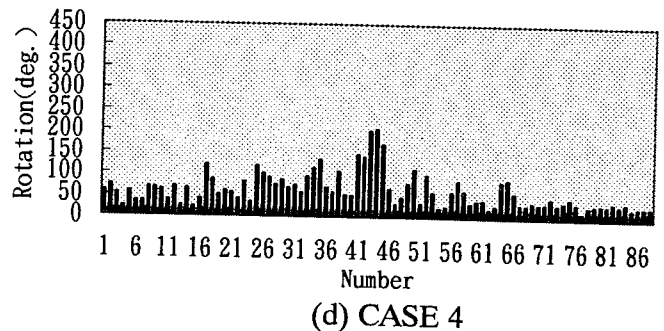
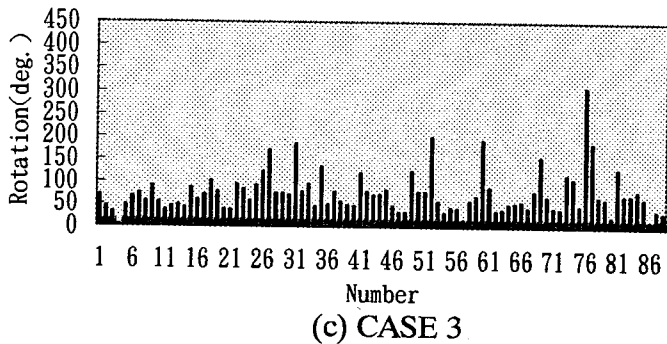
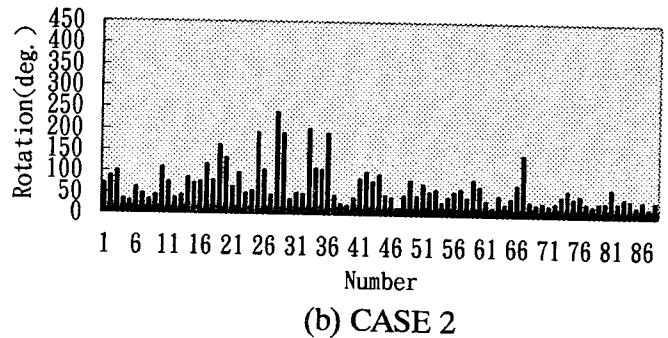
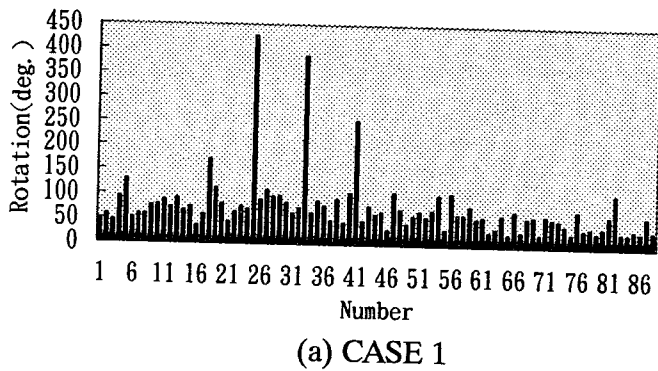


Fig.6 Accumulation of the rotation in each aluminum rods due to deformations.

(2) アルミ棒の回転分布

Fig.7 及び Fig.8 は、個々のアルミ棒の step 間における回転の分布図で、アルミ棒の回転が反時計回りを正、時計回りを負としている。図中の S は載荷板の沈下量を示す。Fig.7 は、 $S/B=1.2\sim 1.6$ 、Fig.8 は、 $S/B=3.2\sim 3.6$ における回転の分布図を表わす。なお、図中で右上に位置する黒色の矩形領域は載荷板、補強土地盤での太線は補強材を表わす。これらを見ると、CASE 1 では、載荷板底面の端部付近に位置するアルミ棒は時計回りに回転していることがわかる。一方、補強土地盤である CASE 2, CASE 3 及び CASE 4 では、載荷板底面の端部と補強材周辺でアルミ棒の回転が著しいことがわかる。このことは、Fig.6 の各々のアルミ棒の回転量の総和からも確認できる。また、CASE 2 及び CASE 3 のような曲げ剛性のない補強材の場合には、補強材周辺にわたって広範囲に回転が卓越しているのに対して、CASE 4 のように曲げ剛性が大きい補強材の場合には、補強材端部の狭い領域において回転が卓越している。これらより、アルミ棒の回転分布は、補強材の剛性の大きさや敷設条件に大きく依存していることがわかる。

3.4 最大せん断ひずみ分布

Fig.9 及び Fig.10 は、それぞれの沈下量における各ケースの最大せん断ひずみ分布を示している。図中の S は載荷板の沈下量を示し、ひずみは圧縮を正としている。ここで、最大せん断ひずみをひずみの代表値として考えたのは、最大せん断ひずみが集中している部分では、相隣る両面間に相対的なすべりを生じており、変形の局所化が卓越したすべり面が生じていると考えられるからである⁶⁾。ひずみを計算するに当たっては、着目している隣接するアルミ棒を最小の四角形要素を形作る四つの節点と見なし、アルミ棒の回転量を求めた時と同様に、4 mm の沈下を 1step とする。そして、個々のアルミ棒の移動データから、載荷に伴う隣接するアルミ棒が形作る最小の四角形要素の変形がわかり、この四つの節点変位に有限要素法と同様に、微分演算子を掛けることにより要素中心のひずみを求めた。幾何学的非線形を考慮するために、ひずみを求める際、四角形要素を形作るアルミ棒の座標は更新し、沈下量 4 mm 間の変位は線形としている。Fig.9 は $S/B=0.8$ 、Fig.10 は $S/B=2.0$ の時の最大せん断ひずみ分布を示している。無補強地盤では、載荷板底面の端部下とそれから右下にかけて最大値を生じているのがわかる。これより、せん断帯の発生は、載荷板底面の端部付近から開始することを示唆していると考えられる。一方、補強土地盤である Fig.9(b) CASE 2 では、最大値は載荷板底面の端部と補強材との間で生じ、より載荷板の沈下が進んだ Fig.10(b) になると、この位置が少し下がってきている。Fig.9 (c) CASE 3 では、この最大値は載荷板底面の端部下で補強材上面の位置で生じている。また、より載荷板の沈下が進んだ Fig.10(c) になると、補強材の変形とともに補強材上面で生ずる最大せん断ひずみ分布も変化することがわかる。材質が異なるケースである Fig.9(d) CASE 4 では、Fig.9(b) と同様に、載荷板底面の端部と補強材との間で最大値を生じているのがわかる。Fig.10(d) では、Fig.10(b) と異なり、載荷板底面の端部下で補強材端部上面に位置する部分で集中的に最大値が生じている。ゆえに、補強土地盤においては補強材の材質、敷設長により最大せん断ひずみの分布形状は変化するが、どのケースにおいても載荷板底面の端部下で補強材上面に位置する部分において、最大値を生じ、そこから左上へと分布形状が広がっている。なお、画像データから、すべり面が上述した最大せん断ひずみが生ずる載荷板底面の端部下で、補強材上面に位置する部分から左上方へと生ずることも観察されている。

4. 終わりに

本論文では、変形の局所化が卓越する載荷板底面の端部と補強材近傍に位置する特定のアルミ棒の局所的な移動及び回転の観察を実施した。そして、補強土地盤においては、補強材の影響により無補強地盤と異なるアルミ棒の移動を示すことや、補強材端部においてアルミ棒の局所的な回転が卓越することがわかった。また、最大せん断ひずみ分布に関しても、補強土地盤においては、すべり面が載荷板底面の端部下で補強材上面に位置する部分から生じ、進行性破壊を示すことがわかった。今後は、実施された実験の再現性を検証し、ひずみの算定法についても大変形理論を導入することを考えていく予定である。また、筆者らが従来より実施している剛塑性有限要素解析⁷⁾ に土粒子の局所的な回転を評価するモデルを導入して、補強土基礎地盤の支持力解析を実施したい。

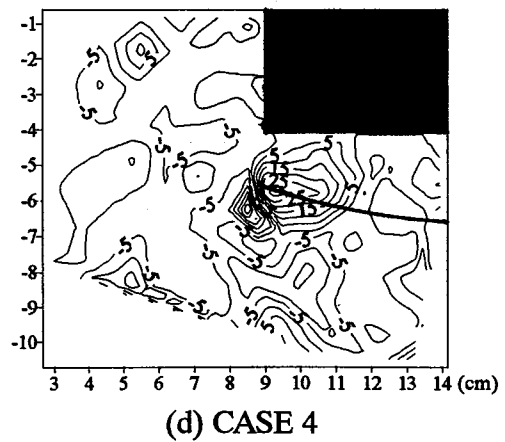
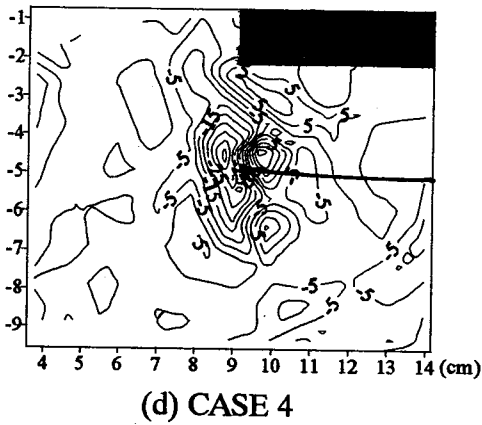
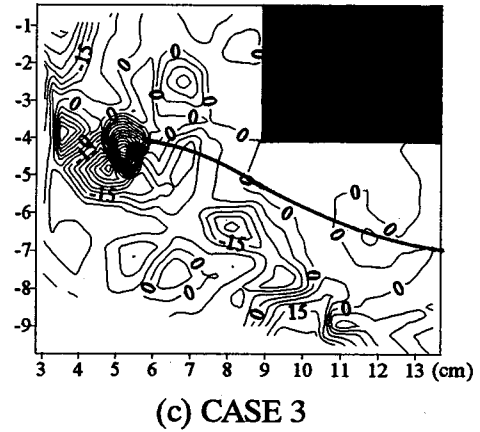
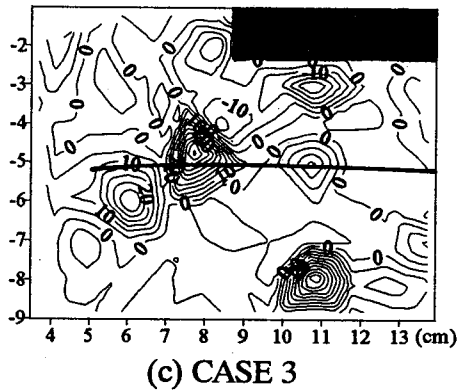
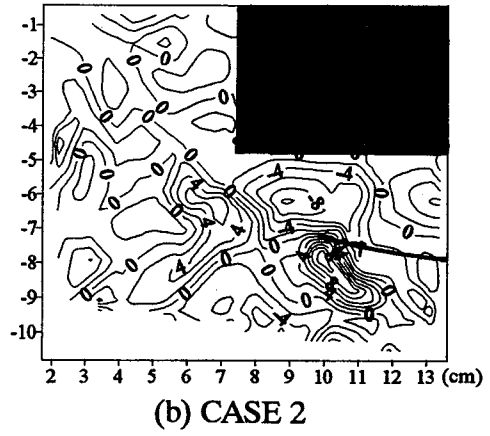
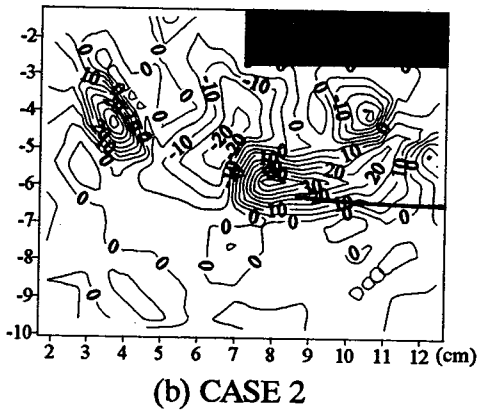
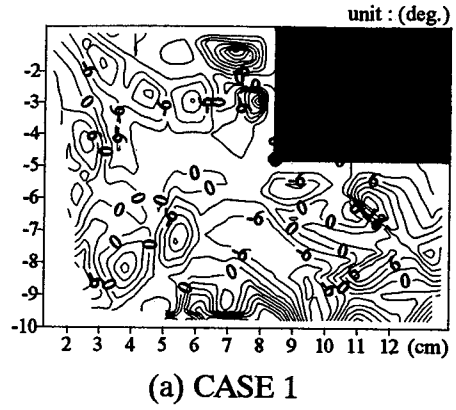
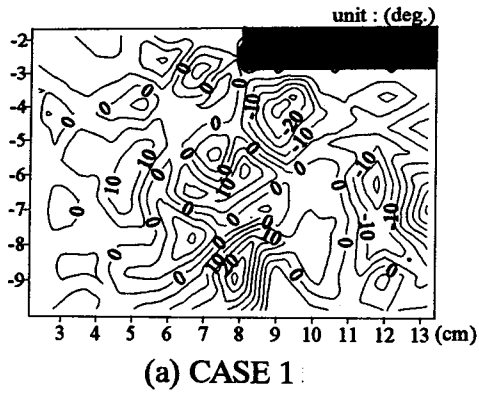


Fig.7 Contour of the rotation in each aluminum rods (S/B=1.2~1.6).

Fig.8 Contour of the rotation in each aluminum rods (S/B=3.2~3.6).

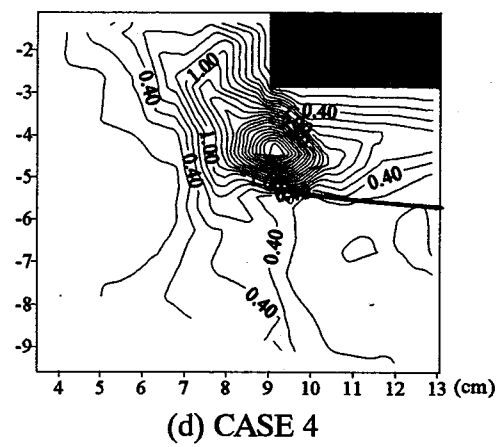
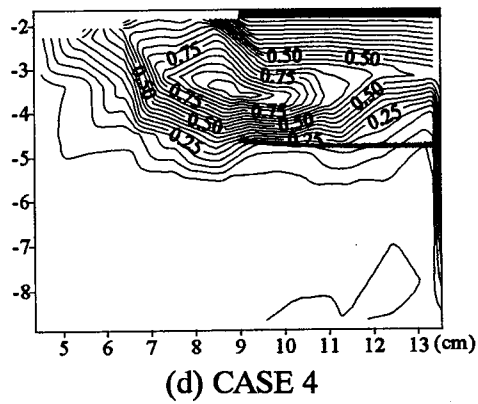
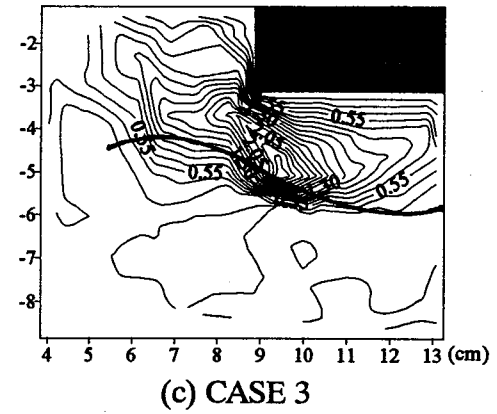
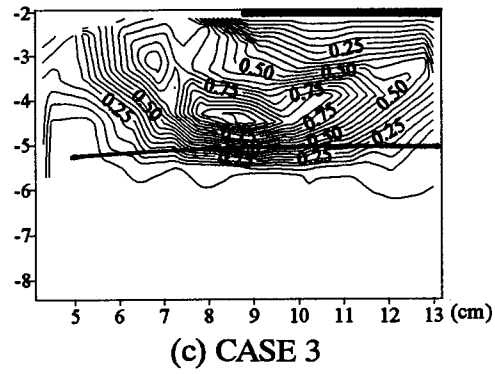
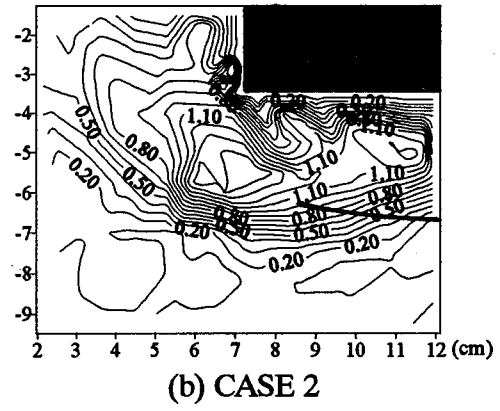
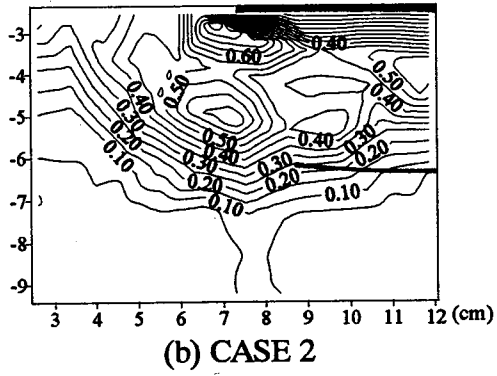
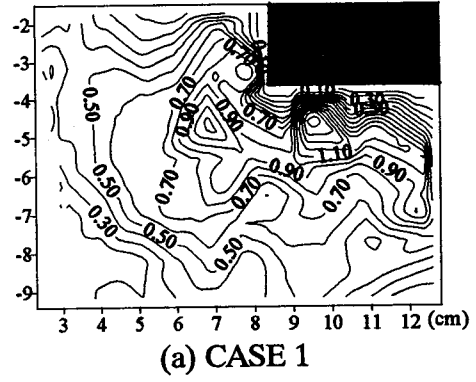
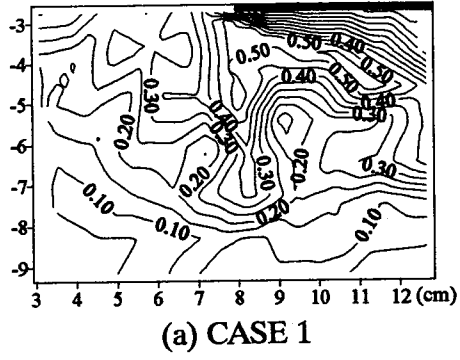


Fig.9 Contour of maximum shear strain ($S/B=0.8$).

Fig.10 Contour of maximum shear strain ($S/B=2.0$).

【参考文献】 1) 地盤の破壊とひずみの局所化に関する研究委員会：地盤の破壊とひずみの局所化，土質工学会，1994. 2) 地盤の破壊とひずみの局所化に関する研究委員会：地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，1994. 3) 飛田善雄：地盤材料のせん断帯解析の必要性和現状，土と基礎，Vol.38, No.12, pp.17-22, 1990. 4) 山本健太郎，大谷順，水田貴夫：補強土基礎地盤の局所変形に関する実験的研究，第31回土質工学研究発表会講演集，1996，印刷中. 5) 山本健太郎，大谷順：複合地盤の変形局所化に関する実験的研究，土木学会51回年次学術講演会講演概要集，第3部，1996，印刷中. 6) Huang, C. C. and Tatsuoka, F.: Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground, Geotextiles and Geomembranes, Vol.9, No.1, pp.51-82, 1990. 7) Otani, J., Ochiai, H. and Li, X.-X.: Bearing capacity analysis of reinforced foundation ground by geosynthetics, Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol.II, pp.1397-1402, Balkema, 1994.