

# 個別要素法による‘土のう’式補強地盤の 支持力試験シミュレーション

山本修一<sup>1</sup>・松岡 元<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)大林組 技術研究所 数値解析研究室 (〒204 東京都清瀬市下清戸4丁目640番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

アルミ丸棒積層体から成るモデル地盤の基礎の支持力試験とその個別要素法によるシミュレーション解析を行い、両結果を比較して個別要素法がいわゆる「数値土槽」となり得ることを示した。また、地盤の一部を包み込む‘土のう’式補強のメカニズムを調べるために、まず補強材料の個別要素法でのモデル化方法を提案し、‘土のう’単体の圧縮試験シミュレーションを行ってその妥当性を示した。そして、‘土のう’の圧縮荷重、内部摩擦角および包み込み材料に作用する張力の関係を示した。さらに、‘土のう’式補強を施したモデル地盤の支持力試験シミュレーションを行って、粒状体の特徴であるダイレイタンスーと摩擦則によって補強部分の粒状体が完全に一体化する‘土のう’式補強のメカニズムを示した。

**Key Words** : bearing capacity, reinforcement, load test, granular material, dilatancy, distinct element method

## 1. はじめに

基礎地盤の補強方法の1つに地盤内にジオグリッド等の補強材を水平に敷設する方法がある。松岡ら<sup>1),2),3)</sup>は、補強材を単に水平に敷設するよりも地盤の一部を完全に包み込んでしまう方が補強効果が高くなると考え、アルミ丸棒積層体のモデル地盤の支持力試験を行って、地盤の一部を包み込む‘土のう’式の補強方法が地盤の支持力を飛躍的に高めることを示した。

一方、粒状体の様々な現象を個別要素法 (DEM)<sup>4)</sup>による数値解析によって予測・解明しようとする研究が行われている<sup>5),6)</sup>。中瀬ら<sup>7)</sup>はアクリル丸棒積層体の平面ひずみ圧縮試験とそのDEMによるシミュレーション解析を行って、DEMの粒状体解析への適用性を示し、解析結果に基づいて粒状体のせん断帯の形成メカニズムを考察した。筆者ら<sup>8)</sup>はアルミ丸棒積層体の一面せん断試験、二軸圧縮試験結果とそのDEMによるシミュレーション結果とが定量的に一致することを示し、解析結果に基づいて粒状体の微視的せん断メカニズムを考察した。このように、要素試験シミュレーションに関してはDEMの適用性と有効性が実証的に明らかにされている。しかし、粒状体地盤の模型実験シミュレーションに関しては、実験との定量的な比較に基づく検証はほとんどなされていないのが現状

である。

本研究は、粒状体地盤の支持力問題を取り上げ、個別要素解析 (以下、DEM解析) が定量的にも粒状体の模型実験の代わりになり得るかどうか、言い換えればDEMがいわゆる「数値土槽」となり得るかどうかを調べることに、および、前記の地盤の一部を包み込む‘土のう’式補強のメカニズムを調べることを目的とするものである。

まず、アルミ丸棒積層体の基礎の支持力試験とそれをできる限り忠実にモデル化したDEM解析を行って、両結果を比較してDEMの適用性を調べた。次に、‘土のう’のような包み込み材料のDEMでのモデル化方法を提案し、‘土のう’単体の圧縮試験シミュレーションを行ってその妥当性を調べるとともに、‘土のう’の圧縮荷重、‘土のう’内部の応力および包み込み材料に作用する張力の関係について考察した。最後に、基礎直下の粒状体の一部を包み込む‘土のう’式補強を施したモデル地盤の支持力試験シミュレーションを行って無補強の場合と比較してその補強メカニズムを考察した。

なお、解析では著者の一人が作成した円形要素に基づく粒状体個別要素解析プログラム (GRADIA)<sup>9)</sup>を用いた。

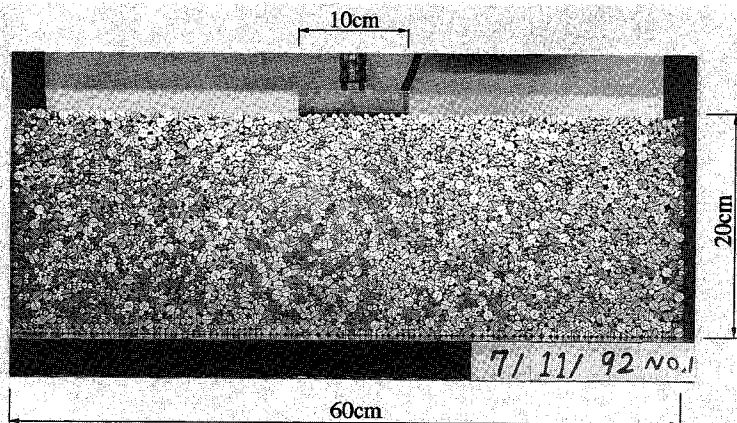


写真-1 アルミ丸棒積層体の支持力試験装置と初期粒子配置

表-1 DEM解析で用いた材料パラメータと $\Delta t$

	particle-particle	particle-platen
Normal stiffness $k_N, k_N'$ (N/m/m)	$7.5 \times 10^9$	$1.5 \times 10^{10}$
Shear stiffness $k_S, k_S'$ (N/m/m)	$1.2 \times 10^8$	$2.4 \times 10^8$
Normal damping $\eta_N, \eta_N'$ (N s/m/m)	$7.2 \times 10^4$	$1.0 \times 10^5$
Shear damping $\eta_S, \eta_S'$ (N s/m/m)	$0.9 \times 10^4$	$1.3 \times 10^4$
Friction angle $\phi_\mu, \phi_\mu'$ (deg.)	16	90
Density of particles $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2700	
Time increment $\Delta t$ (sec)	$5 \times 10^{-7}$	

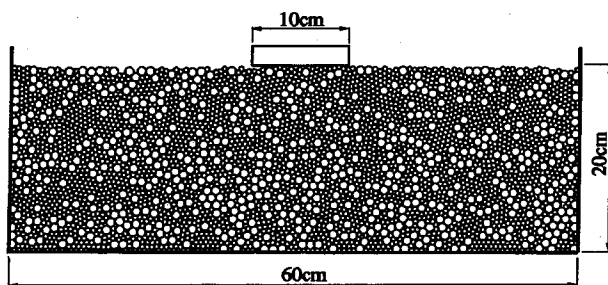


図-1 支持力試験シミュレーションにおける初期粒子配置 (重力作用時)

## 2. アルミ丸棒積層体の基礎の支持力試験とそのシミュレーション解析

### (1) 実験方法<sup>10)</sup>

写真-1は試験装置と載荷前の初期の粒子配置を示している。モデル地盤は、長さ5cm、直径5mmと9mmのアルミ丸棒を混合重量比3:2で混ぜ合わせたものを横幅60cmの鉄製載荷枠内に高さ約20cmまで積み上げて作成した(総粒子数は3727個である)。このとき、モデル地盤が均一となるようモデル地盤前面から手で振動を与えながら積み上げている。また、積み上げ後、モデル地盤表面を板で軽く押さえてモデル地盤表面に凹凸がないようにしている。これにより、載荷板底面がアルミ丸棒にできるだけ一様に接触するようにしている。写真-1の中央上部に見られる載荷板(基礎)は、横幅10cm、高さ2cm、奥行き5cmの鉄製載荷板であり、アルミ丸棒との接触面(載荷板底面)にサンドペーパーを貼り付け、滑らないようにしている。なお、載荷ピストン軸と載荷板は剛結されているので載荷板は水平を保ち回転しない。また、載荷ピストン軸は実験土槽の中心にある。

載荷板に荷重 $Q$ を作用させ、沈下量 $S$ を計測すると

も、粒子の動きを視覚的に捉えるために沈下量5mmごとに写真を重ね撮りした。

すでに述べたように、実験はモデル地盤表面を平坦に成形して行ったが、これとは別に、モデル地盤表面の載荷板直下の部分を人為的に多少でこぼこにすることによって、載荷板底面にアルミ丸棒を意識的に偏らせて接触させた場合の実験(以下、予備実験と呼ぶ)も行った。モデル地盤表面を平坦に成形した場合には、載荷開始時に10個程度のアルミ丸棒がほぼ同時に載荷板と接触するが、予備実験の場合にはまず1~2個が載荷板と接触し、載荷板の沈下が進むにしたがって接触粒子数が増えていくという両者の違いがある。

### (2) 解析方法

筆者ら<sup>8)</sup>は、以前に今回の支持力試験と同じアルミ丸棒積層体に対する一面せん断試験と二軸圧縮試験のDEMシミュレーションを行って、実験結果と解析結果が定量的に一致することを示した。解析に必要な材料定数の決定方法や初期粒子配置の作成方法はそのときと同じ方法を用いたので、ここではその概略を述べる。

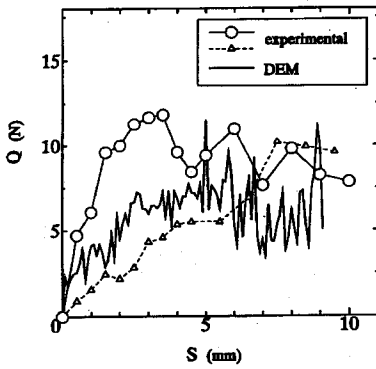


図-2 荷重 $Q$ ～沈下量 $S$ 関係についての実験結果と解析結果(地盤表面を平坦に成形しないで載荷した場合)の比較

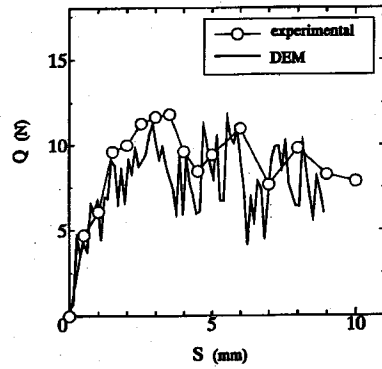


図-3 荷重 $Q$ ～沈下量 $S$ 関係についての実験結果と解析結果(地盤表面を平坦に成形した後に載荷した場合)の比較

解析に必要な材料定数は、粒子間の法線方向および接線方向バネ定数 ( $k_N, k_S$ ) と粘性定数 ( $\eta_N, \eta_S$ )、粒子～載荷板間の法線方向および接線方向バネ定数 ( $k_N', k_S'$ ) と粘性定数 ( $\eta_N', \eta_S'$ )、粒子間摩擦角 ( $\phi_m$ )、粒子～載荷板間摩擦角 ( $\phi_m'$ )、粒子の質量密度 ( $\rho$ ) である。バネ定数は弾性接触理論に基づいて、粒子および載荷板の弾性係数から粒状体に作用する応力レベルを考慮して決定できる<sup>8)</sup>。支持力試験においては、モデル地盤に作用する応力レベルは場所や載荷レベルによって変化するが、ここでは支持力試験で得られた載荷板直下のピーク応力レベル (10 kN/m<sup>2</sup> のオーダー) に対応するバネ定数を採用した。粘性定数は準静的な問題の場合には解を安定させる役割のみを担うので、1 自由度系の臨界減衰定数を用いた。粒子間の物理摩擦角は摩擦試験により  $\phi_m = 16^\circ$  であることがわかっている<sup>11)</sup>。また、実験では載荷板底面にサンドペーパーが貼り付けてあることを考慮して、載荷板とアルミ丸棒間の摩擦角 ( $\phi_m'$ ) は  $90^\circ$  とした。解析時間増分  $\Delta t$  は、次式で示される 1 自由度系の解の安定条件<sup>9)</sup> を基に、 $\Delta t = \Delta t_c / 10 = 5 \times 10^{-7}$  (sec) とした。

$$\Delta t < \Delta t_c = 2\sqrt{m/k} \quad (1)$$

ここに、 $m$  は粒子の質量、 $k$  はバネ定数である。解析に用いた材料定数と  $\Delta t$  をまとめて表-1 に示す。

解析における初期粒子配置は、載荷前の実験写真 (写真-1) をデジタイズして作成した。また、載荷板と土槽は剛線要素でモデル化した。読み取り誤差による粒子の重なりによる粒子間反発力 (接触力) は計算上作用しないものとして、重力を作用させて釣り合わせた。こうして得られた載荷前の初期粒子配置を図-1 に示す。読み取り誤差のために重力作用時に粒子が若干動いてモデル地盤表面が実験に比べて多少でこぼこになった。そのため、載荷板底面に接触する要素が多少偏る結果となった。そこで、そのまま載荷す

るケースに加えて、モデル地盤表面全体を一旦水平な載荷板で軽く押さえることによって (支持力実験で得られた基礎載荷板直下のピーク応力の約 1/10 の応力を作用させて) モデル地盤表面を平坦に成形した後に載荷するケースの 2 ケースの解析を行った。

載荷は、載荷板の水平方向変位と回転変位を拘束して、鉛直下向きに 1cm/sec の一定速度で変位させる方法で行い、粒状体からの鉛直上向きの反力を支持力  $Q$  として計測した。

### (3) 実験結果と解析結果の比較

図-2 は、奥行き 1cm 当たりの荷重  $Q$  ～ 沈下量  $S$  関係についての実験結果と解析結果 (実線) の比較を示している。点線で結んだ  $\Delta$  印は載荷板底面にアルミ丸棒を意識的に偏らせて接触させた場合 (予備実験) の実験結果である。また、解析結果は重力作用後にモデル地盤表面を平坦に成形しないで載荷した場合の結果である。解析では載荷板底面に接触するアルミ丸棒要素が多少偏っていたことを考慮すれば、この解析結果は十分考え得る範囲の結果と思われる。

図-3 は、重力作用後にモデル地盤表面を平坦に成形した後に載荷した場合の解析結果を実験結果と比較して示している。実験結果と解析結果がよく一致するのがわかる。また、図-4 に沈下量  $S=0 \sim 5$ mm 間の重ね撮り実験写真と解析で得られたその間の粒子の移動ベクトルを比較して示している。粒子の移動の様子が実験と解析でよく対応しているのがわかる。

以上より、DEM による数値モデル地盤によって実際の粒状体モデル地盤の挙動を定量的にも表現することができ、DEM はいわゆる「数値土槽」となり得るといえる。今後、様々な粒状材料や条件下での物理実験と数値実験を積み重ねて、この「数値土槽」の適用範囲の拡大と信頼性の向上を図る必要がある。

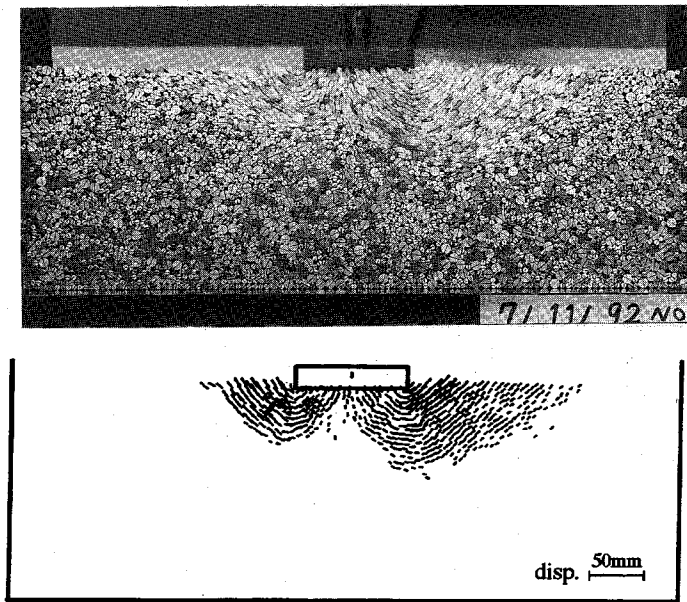


図-4 粒子の移動に関する実験結果（沈下量 $s=0\sim 5\text{mm}$ 間の重ね撮り写真）と解析結果（沈下量 $s=0\sim 5\text{mm}$ 間の変位ベクトル、ベクトルスケール：1.0倍）の比較

#### (4) 載荷に伴う基礎地盤の変位状況

解析結果（重力作用後にモデル地盤表面を平坦に成形しなかった場合）に基づいて、載荷に伴って起こる粒状体地盤の変位状況を検討する。図-5は、基礎の沈下が1mm進む間の粒子間の相対変位ベクトルを支持力のピーク前（ $s=2\sim 3\text{mm}$ ）、ピーク時（ $s=5\sim 6\text{mm}$ ）およびピーク後（ $s=8\sim 9\text{mm}$ ）について示している。ただし、粒子間の相対変位が0.2mm未満のものは表示していない。図より、(1)基礎の両端近傍は常に粒子間の相対変位が大きい、(2)支持力ピークまでは局所的な粒子間のすべり領域が基礎の下部から地表面まで連なり比較的大きなすべり線を形成する、(3)一方、支持力ピーク後では大きなすべり線は姿を消し粒子間のすべり領域は基礎の近傍に集中する、などの特徴的で興味深い結果が読みとれる。

図-6は、沈下量 $s=5\text{mm}$ の時の10cm×10cmの領域ごとの粒子接点角の度数分布を放射状のヒストグラムで示している。各領域の右肩には次式<sup>12)</sup>で計算されるその領域の平均的な応力の主応力方向を示している。

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \left( \sum_R b_i F_j + \sum_{\partial R} r_i F_j \right) \quad (2)$$

ここに、 $R$ は領域、 $\partial R$ は領域の境界、 $V$ は領域の体積、 $F_j$ は粒子に作用する接触力、 $b_i$ は枝ベクトル、 $r_i$ は接触力作用点の動径ベクトルである。粒子接点角分

布は粒子構造が等方的な場合には円形分布になるが、図-6に見られるように分布形は楕円形状になっており、載荷によって構造的な異方性がかなり発達するのがわかる。また、粒状体の要素試験やシミュレーションから粒子接点は最大主応力方向に集中することが明らかになっているが<sup>9),13)</sup>、本支持力問題においても主応力の回転に伴って粒子構造の主軸も回転し、応力の主軸と粒子構造の主軸がほぼ一致するのが見られる。

なお、図-6のようなある領域内の粒子接点角分布や平均的な応力を検討する場合、対象とする領域を小さくしすぎると局所的な不均一性のみが強調され、前記のような考察は困難となる。松浦ら<sup>14)</sup>は、DEM解析に基づいて粒状体の応力とひずみについて考察し、粒子数が200個程度以上の領域を考えれば平均的な応力とひずみがともに安定して得られることを示している。ここでは、これらを考慮して約300粒子、約550接点程度を含む領域で整理したことを付記しておく。

### 3. ‘土のう’の圧縮試験シミュレーション

#### (1) ‘土のう’の包み込み材料のモデル化

通常、粒状体解析で用いられる個別要素法では、接触要素間でのみ力が伝達され、しかも伝達される力は圧縮力だけである。乾燥砂やアルミ丸棒積層体のような材料を対象とする場合はそれでよいが、粒子間に付着力を有する材料やより連続体としての性質の強い材

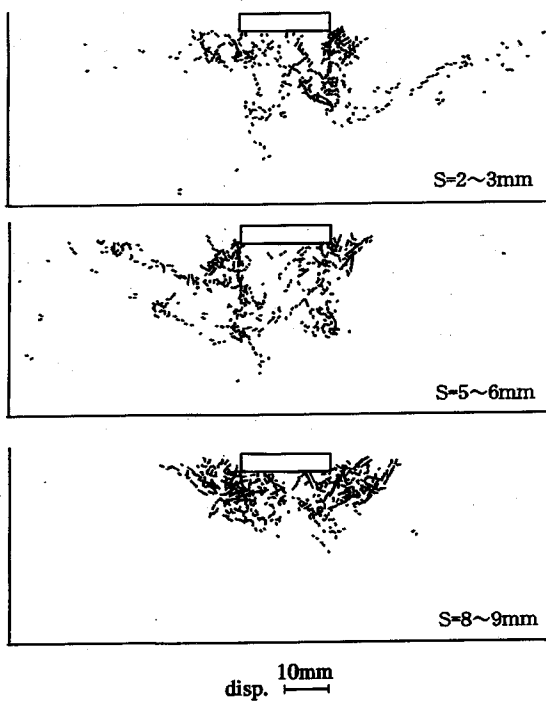


図-5 基礎の沈下量増分 $\Delta S=1\text{mm}$ ごとの粒子間の相対変位ベクトル (ベクトルスケール: 5.0倍)

料に対してはそのままでは適用できない。岩下<sup>15),16)</sup>は、要素間を繋ぐ物質の効果を間隙バネとしてモデル化し、個別要素法を拡張して、盛土の崩壊解析や断層運動の解析に適用した。目黒・伯野<sup>17)</sup>は、それをさらに拡張してコンクリートの破壊解析に適用した。また、複数の円形要素を間隙バネで結合することで任意形状の粒子をモデル化できるというアイデアも示されている<sup>18)</sup>。ここで扱う‘土のう’の包み込み材料は、例えば布やジオグリッドのような、材料が伸びようとする時だけ抵抗する材料を想定しているので、やはり通常の要素では扱うことができない。また、間隙バネもそのままでは適用できない。そこで、このような材料を表現できる要素を新たに導入した。

‘土のう’の包み込み材料は、‘土のう’内部の粒状体と同様に円形のDEM要素でモデル化する。ただし、包み込み材料としては、材料が伸びる時のみ抵抗し圧縮力、せん断力および曲げには抵抗しないものを想定して、通常のDEM要素に修正を加える(以下、包み込み要素と呼ぶ)。以下に包み込み要素のモデル化の概要を示す(図-7参照)。

- ・内部の粒状体が飛び出さない程度の間隔で包み込み材料に沿ってDEM要素を配置する。要素の直径は内部の粒状体の直径に比べて無視できる程度の大きさとする。

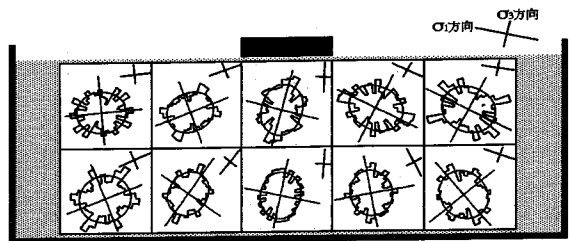


図-6 粒子接点角分布と主応力の方向 (基礎の沈下量  $S=5\text{mm}$ の時)

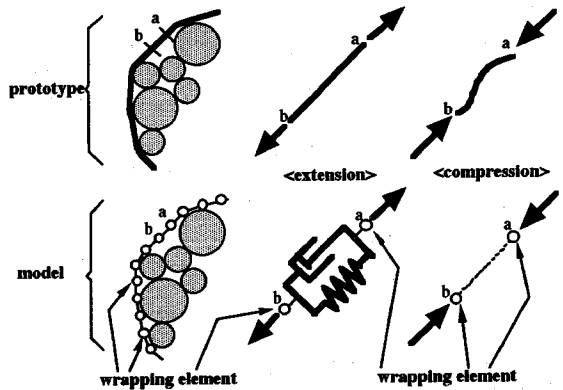


図-7 ‘土のう’の包み込み材料のモデル化

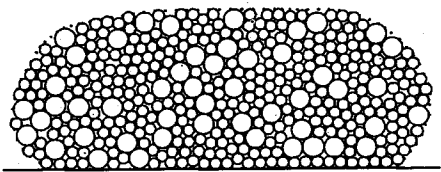


図-8 ‘土のう’の解析モデル (重力作用時)

- ・包み込み要素と包み込み要素の間には、要素間距離が初期の要素間距離より伸びる時のみ働く法線方向のバネとダッシュポットを配置する(接線方向にはバネもダッシュポットも配置しない)。
- ・包み込み要素と粒状体要素の接触点には、粒状体要素同士の場合と同様にバネ、ダッシュポットおよびスライダーを配置する。

このように、包み込み要素をDEM要素でモデル化することによって、通常のDEMのアルゴリズムを変更することなく‘土のう’を取り扱うことができる。また、この方法はジオグリッドなどの補強材をDEMでモデル化する場合にも応用できると考える。

## (2) 解析モデルと解析ケース

‘土のう’内部の粒状体として、前記のアルミ丸棒積層体の基礎の支持力試験シミュレーションにおける

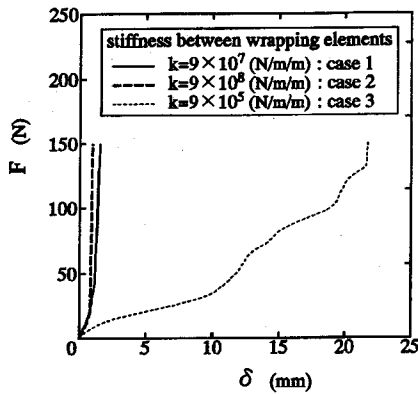


図-9 ‘土のう’の圧縮荷重 $F$ ～圧縮変位 $\delta$ 関係

初期粒子配置 (図-1 参照) から基礎直下の粒子を約  $15\text{cm} \times 7.5\text{cm}$  の範囲で取り出したものを用いた。この粒状体を包み込み要素で包み込み、無応力状態の‘土のう’を作成した。これに重力を作用させて釣り合わせた時の状態を図-8 に示す (‘土のう’下部の水平線は、固定された剛板を想定した剛線要素である)。この時の寸法は幅 ( $w$ ) が約  $18\text{cm}$ 、高さ ( $h$ ) が約  $7\text{cm}$  となった。次に、水平載荷板によって鉛直方向に‘土のう’を圧縮する試験を行った。包み込み材料の変形係数が‘土のう’全体の圧縮特性にどのように影響するかを調べるために、包み込み要素間のバネ定数を変えて3ケースの圧縮試験 (ケース1～3) を行った。ケース1は基本のバネ定数を用いたもので、基本のバネ定数としては一般的なジオグリッドの変形係数と対応する値 (要素間距離約  $5\text{mm}$  に対してバネ定数  $k = 9 \times 10^7 \text{ N/m/m} = 918 \text{ kgf/cm/cm}$ ) を採用した。ケース2, 3はケース1のそれぞれ10倍,  $1/100$  倍のバネ定数とした。粒状体要素間の材料定数は前記の支持力試験の場合と同じものを用いた (表-1 参照)。なお、載荷板と包み込み要素間の摩擦はないものとしている。

解析時間増分  $\Delta t$  は式(1)で示されるように要素の質量とバネ定数の比  $m/k$  によって決定されるパラメータである。包み込み要素の直径は粒状体要素に比べて小さいが、包み込み要素の質量密度を調整することによって包み込み要素の  $m/k$  と粒状体要素の  $m/k$  とが対応するようにしている。これにより、包み込み要素を含む場合にも粒状体要素だけの場合と同じ  $\Delta t$  (表-1 参照) で安定して解析することができる。なお、包み込み要素には重力を作用させていない。

### (3) ‘土のう’の変形特性

図-9は、奥行き  $1\text{cm}$  当たりの圧縮荷重 ( $F$ )～圧縮変位量 ( $\delta$ ) 関係を示している。一般のジオグリッド程

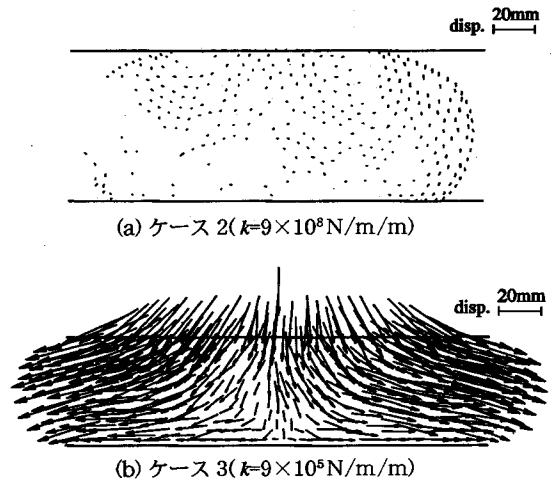


図-10 ‘土のう’内部の粒子の動き (ベクトルスケール:  $1.0$  倍); 包み込み材料が(a)ほとんど伸びない場合と(b)伸びる場合の比較

度以上の変形係数を用いたケース1とケース2では、荷重の初期段階で  $1\text{mm}$  程度の圧縮変位が起こった後、荷重～変位関係は線形関係となるが、その変形係数は大きく、‘土のう’はほとんど変形しないのがわかる。一方、包み込み材料を極端に伸びやすくしたケース3では、荷重を増加させるにつれて圧縮変位はずると大きくなっているのがわかる。図-10は、(a)ケース2と(b)ケース3の  $F = 0 \sim 150\text{N}$  ( $F = 0 \sim 15.3\text{kgf}$ ) 間の粒子の変位ベクトルを示している。ケース2では粒子がほとんど動いていないのに対して、ケース3では粒子が側方に大きく流動しているのがわかる。ケース2では、荷重によって粒状体がダイレイトして側方に膨らもうとするのを包み込み材料が即座に押さえ込むためにさらに荷重を増加させても粒子構造は変化せず、従って荷重～変位関係は線形になる。よって、荷重の増加とともに粒状体の有効応力  $\sigma$  が比例的に増加しせん断強度  $\tau_f$  も比例的に大きくなることになる (摩擦側:  $\tau_f = \sigma \tan \phi$ )。ところが、ケース3では包み込み材料が伸びてしまうので粒状体は拘束されず押し潰されてしまう。粒状体を包み込む‘土のう’は、粒状体の特徴であるダイレイトンシーと摩擦則によって、いわば地盤の敵である荷重 (外力) を味方にして‘土のう’内部の粒状体の弾性化と強度増加が図られるという特徴があり、興味深い。

### (4) ‘土のう’の圧縮荷重、内部の粒状体の応力および包み込み材料の張力の関係

2次元の‘土のう’に外力として圧縮荷重  $F$  のみが作用する場合の力の釣り合いを考える。図-11に示すように、‘土のう’内部の平均的な水平方向応力

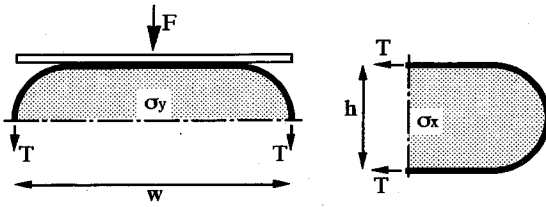


図-11 '土のう'の力の釣り合い

を $\sigma_x$ 、鉛直方向応力を $\sigma_y$ 、包み込み材料に作用する張力を $T$ 、'土のう'の幅を $w$ 、高さを $h$ とすれば、力の釣り合い式は

$$F + 2T = w\sigma_y \quad (3)$$

$$2T = h\sigma_x \quad (4)$$

式(3),(4)より

$$F = 2T \left( \frac{w}{h} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} - 1 \right) \quad (5)$$

図-12は式(5)に対する前記3ケースの解析結果を示している。当然のことであるが3ケースともに式(5)が成立する。このことは、包み込み材料のモデル化の妥当性と解析システム全体が正しく機能していることを表している。図-13は $\sigma_x$ と $\sigma_y$ の関係を示しているが、3ケースとも応力比 $\sigma_x/\sigma_y$ は圧縮中ほぼ一定で、しかも3ケースの応力比 $\sigma_x/\sigma_y$ が等しいのがわかる。図-13中の実線は内部摩擦角 $\phi=23^\circ$ とした場合の次式の関係を示している。

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 1 - \sin \phi \quad (6)$$

アルミ丸棒積層体の内部摩擦角 $\phi$ は $22^\circ \sim 25^\circ$ 程度<sup>8)</sup>であることを考慮すれば、'土のう'内部の平均的な応力比は式(6)で近似されるのがわかる。'土のう'の圧縮は必ずしも $K_0$ 圧密状態とはいえないが、'土のう'内部の平均的な応力比(式(6))はJakyの関係式<sup>19)</sup>と一致するようであり興味深い。式(5)に式(6)の関係式を代入して整理すれば、次式が得られる。

$$\frac{F}{T} = 2 \left( \frac{w}{h} \frac{1}{1 - \sin \phi} - 1 \right) \quad (7)$$

したがって、'土のう'は、内部粒状体の内部摩擦角 $\phi$ が大きいほど、 $w/h$ が大きいほど(扁平なほど)、包み込み材料の引張強度 $T$ に対して大きな圧縮荷重 $F$ を作用させることができる。

#### 4. '土のう'で補強した粒状体の基礎の支持力試験シミュレーション

##### (1) 解析モデルと解析方法

補強は、前記の支持力試験シミュレーションでの重力作用時のモデル地盤(図-1)に対して、載荷板直

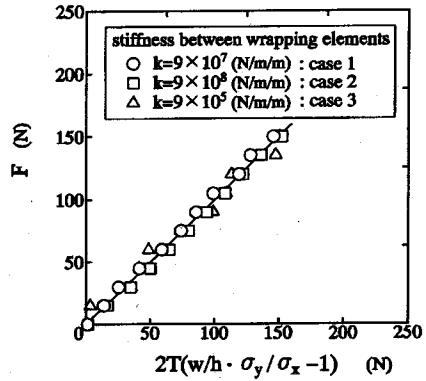


図-12 '土のう'の外荷重 $F$ と内力の関係

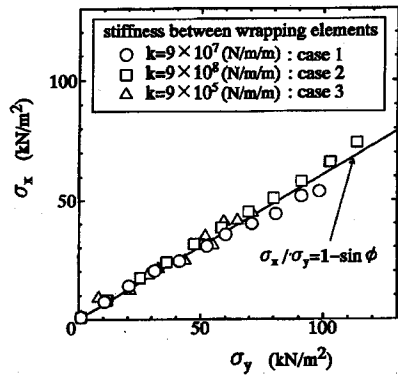


図-13 '土のう'内部の粒状体の応力比

下の幅15cm、深さ7.5cmの領域を包み込み要素で取り囲むものである。図-14に、包み込み要素を直線で結んで補強領域を示している。包み込み要素は、図-14上部の拡大図に示すように粒状体と包み込み要素が重ならないように粒状体の間隙部分に配置した。したがって、補強地盤の載荷前の粒子配置は無補強地盤と全く同じである。このモデル地盤に対し前記の無補強の場合と同じ方法で支持力試験シミュレーションを行った。包み込み要素間のバネ定数は'土のう'の圧縮試験シミュレーションのケース1の値(一般的なジオグリッドの変形係数に対応するバネ定数)を用いた。

##### (2) 解析結果

図-15に荷重 $Q \sim$ 沈下量 $S$ 関係が無補強の場合と比較して示す。荷重 $Q$ は奥行き1cm当たりの値である。無補強の場合は、沈下量 $S$ が5mm程度で極限支持力値を示し、その後は支持力が低下するのが見られる。一方、補強した場合には、沈下量の増加とともにさらに支持力は増加し続け、無補強の場合の4倍程度の極限支持力値を示しているのがわかる。

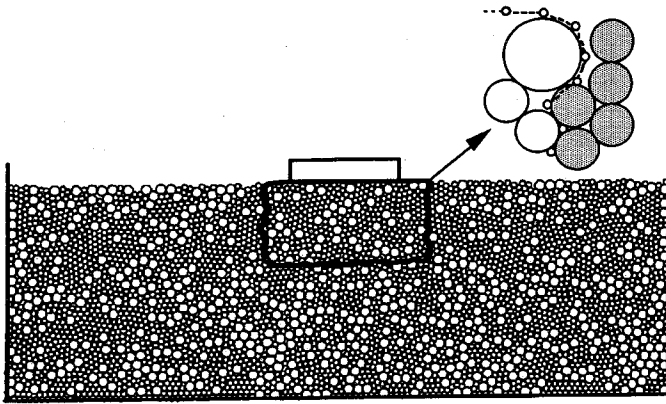


図-14 補強モデル地盤の解析モデル

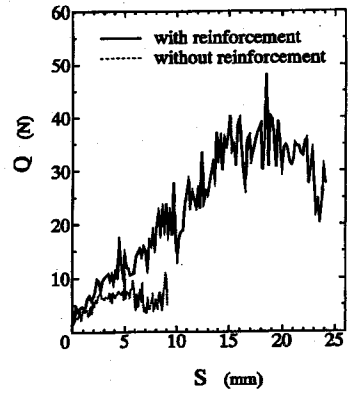
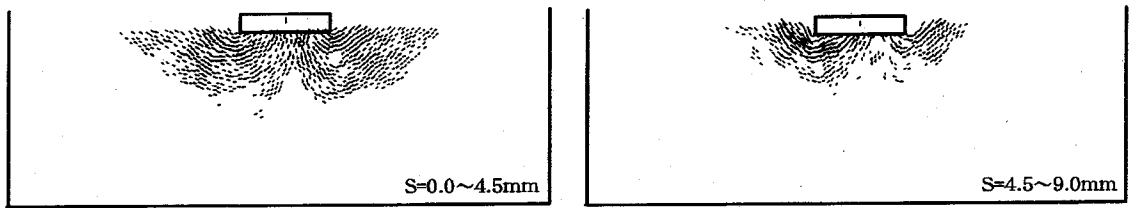
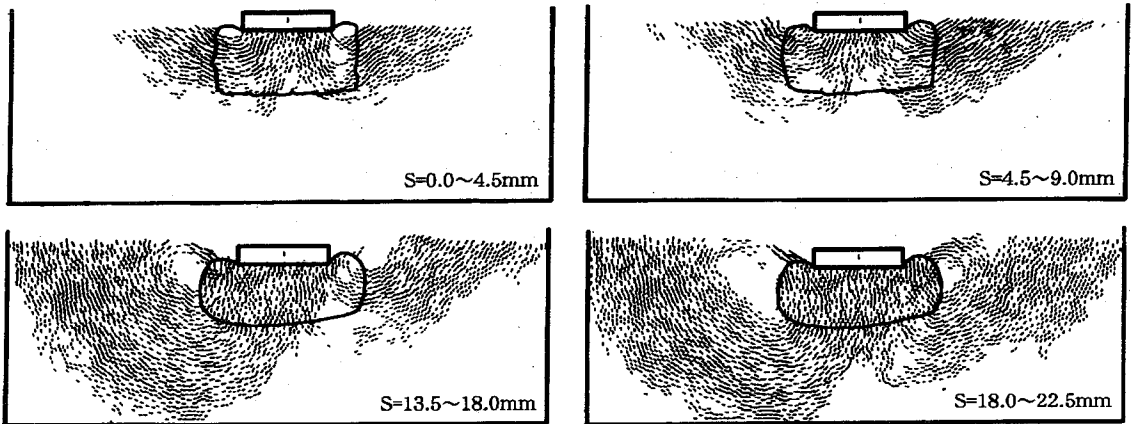


図-15 補強地盤と無補強地盤の荷重  $Q$  ~ 沈下量  $S$  関係の比較



(a)無補強地盤



(b)補強地盤

図-16 沈下量増分 $\Delta S=4.5\text{mm}$ 間の粒子の移動ベクトル (ベクトルスケール: 1.0倍) : (a)無補強地盤; (b)補強地盤

図-16は沈下量増分 $\Delta S=4.5\text{mm}$ ごとの粒子の移動ベクトルを示している(初期からの総移動量ではないことに注意を要する)。無補強の場合には、支持力ピーク以降( $S=4.5\sim 9.0\text{mm}$ 間)の粒子の移動領域が、支持力ピーク前( $S=0\sim 4.5\text{mm}$ 間)に比べて、載荷板の両端近傍の狭い範囲に集中しているのが特徴的である。一方、補強した場合には、沈下量が増加するとともに粒子の移動領域が広がっていくのがわかる。粒子の移動領域はいわばせん断領域と考えることがで

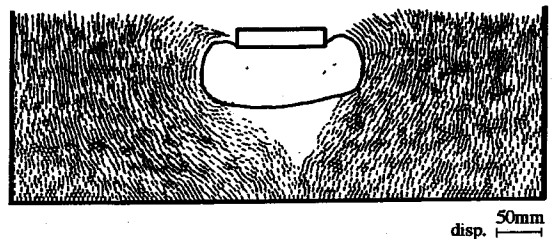


図-17 載荷板からみた補強地盤の粒子の移動ベクトル (沈下量 $S=18.0\sim 22.5\text{mm}$ 間)



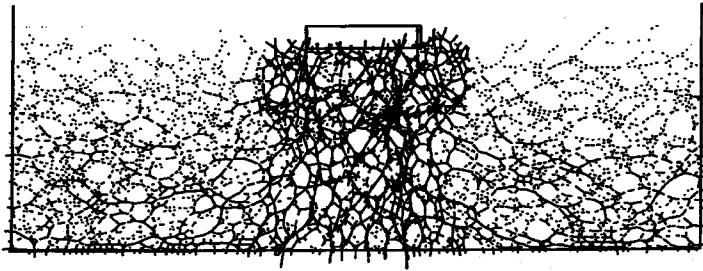


図-18 補強地盤の粒子間力の分布 (沈下量 $S=18\text{mm}$ の時)

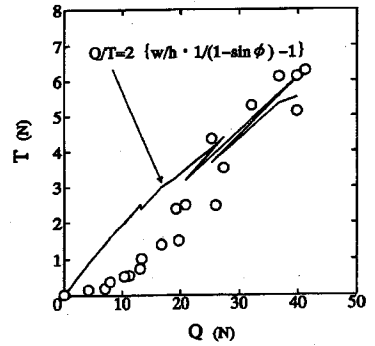


図-19 無補強地盤の荷重 $Q$ と包み込み材料の張力 $T$ の関係

き、せん断領域の拡大、縮小に対応して支持力が増加、低下するメカニズムを理解することができる。また、実線で取り囲まれた補強領域の粒子の移動の様子を見ると、荷重前半の $S=9\text{mm}$ のころまでは粒子は側方に流動し前述の「土のう」の圧縮試験シミュレーションで見られる補強材としての機能を十分発揮するに至っていないが、荷重後半では補強領域の粒子が徐々に一体化し剛体的に鉛直下向きに移動しているのがわかる。図-17は沈下量 $S=18.0 \sim 22.5\text{mm}$ 間の荷重板から見た粒子の移動ベクトル（荷重板に対する粒子の相対変位ベクトル）を示している（初期からの総移動量ではないことに注意を要する）。荷重後半の $S=18.0 \sim 22.5\text{mm}$ 間においては、補強領域が荷重板と完全に一体化して、あたかも大きな根入れ基礎が存在するかのようであるのがわかる。

図-18は補強した場合の $S=18\text{mm}$ の時の粒子間力をベクトルで示している。補強領域の粒子間力が他の領域に比べて極端に大きく、「土のう」の拘束効果によって内部の粒状体に作用する応力が高くなっているのが見られる。

図-19は解析結果から得られた荷重 $Q$ と包み込み要素間の平均的な張力 $T$ の関係を示している。図中の実線は $Q=T$ として式(7)により計算される荷重 $Q$ と張力 $T$ の関係 ( $\phi=23^\circ$ ) を示している。「土のう」が補強材としての機能を十分に発揮し始める荷重後半では、式(7)の関係がほぼ満たされているのがわかる。式(7)は外力として鉛直荷重 $F$ のみが作用する「土のう」単体の場合の関係式であるが、図-18からわかるように「土のう」外部の側方土圧は「土のう」内部の応力に比べて無視できるほど小さいので、基礎直下に埋め込まれた場合にも近似的に式(7)が成立することが理解される。

本補強地盤の支持力試験シミュレーションは基礎直下の粒状体を比較的ゆるく包み込んだ場合（包み込み

方が長方形で、かつ、包み込み材料が少したるんだ状態）であるが、包み込み方の工夫でいち早く「土のう」の補強効果を発揮させることによって、より小さな沈下量で大きな支持力を得ることが可能となる<sup>2)</sup>。

#### 4. おわりに

アルミ丸棒積層体から成るモデル地盤の支持力試験とそのDEMによるシミュレーション解析を行い、両結果を比較してDEMがいわゆる「数値土槽」となり得るかどうかを調べた。また、地盤の一部を包み込む「土のう」式補強のメカニズムを調べるために、まず補強材料のDEMでのモデル化方法を提案し、「土のう」単体の圧縮試験シミュレーションと「土のう」式補強を施したモデル地盤の支持力試験シミュレーションを行った。主な結論は以下の通りである。

- (1)アルミ丸棒積層体から成るモデル地盤の基礎の支持力試験結果とそのDEMシミュレーション結果は定量的にもよく一致し、DEM解析が粒状体の模型実験の代わりになり得ること、言い換えればDEMがいわゆる「数値土槽」となり得ることがわかった。
- (2)提案する「土のう」式補強材料のDEMでのモデル化方法の妥当性が確認された。また、この方法はジオグリッドなどの補強材をDEMでモデル化する場合にも応用できると考える。
- (3)粒状体を包み込む「土のう」は、粒状体の特徴であるダイレイタンスーと摩擦則によって、いわば地盤の敵である荷重（外力）を味方にして材料の弾性化と強度増加が図られるという特徴がある。
- (4)「土のう」の圧縮荷重、内部摩擦角および包み込み材料に作用する張力の関係は本文中の式(7)で表され、したがって「土のう」は、内部粒状体の内部摩擦角が大きいほど、また扁平なほど、包み込み材料の引っ張り強度に対して大きな圧縮荷重を作用させることがで

きる。また、この関係は、基礎直下の地盤の一部を包み込んだ場合の支持力、内部摩擦角および包み込み材料に作用する張力の関係においても近似的に成立する。

(5)基礎直下の地盤の一部を包み込む‘土のう’式補強による大幅な支持力増加は、補強部分の粒状体が完全に一体化することによるものである(図-17参照)。

謝辞：本研究を行うにあたって(株)大林組技術研究所の表佐太郎博士に数々のご助力を頂いた。記して感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 松岡元, 高木信宏, 西井正浩: 粒状体地盤の有効な支持力補強方法, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.1194-1195, 1992.
- 2) 奥田信, 松岡元, 岩井慎一郎: 地盤の一部を包み込む支持力補強方法に関する一考察, 土木学会第48回年次学術講演会, pp.1142-1143, 1993.
- 3) 小野哲治, 松岡元, 瀧澤剛: 各種基礎形状の支持力試験と‘土のう’式支持力補強試験に関する考察, 土木学会第49回年次学術講演会, pp.774-775, 1994.
- 4) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 5) 木山英郎, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文集, No.333, pp.137-146, 1983.
- 6) Uemura, D. and Hakuno, M.: Granular assembly simulation for ground collapse, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol. 62, pp.19-59, 1987.
- 7) 中瀬仁, 安中正, 片平冬樹, 興野俊也: 平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用, 土木学会論文集,

- No.454/III-20, pp.55-64, 1992.
- 8) 松岡元, 山本修一: 個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.167-175, 1994.
- 9) 山本修一: 個別要素法による粒状体の力学挙動に関する解析的研究-粒状体の要素試験のシミュレーション解析, 大林組技術研究所報, No.48, pp.49-54, 1994.
- 10) 松岡元: アルミ丸棒積層体の要素試験結果と支持力試験結果, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.17-24, 1994.
- 11) 松岡元, 斎木清志: 2次元粒状体(丸棒)の粒子間摩擦角( $\phi_m$ )の一測定法, 第27回土質工学研究発表会, pp.579-580, 1992.
- 12) 土質工学会編: 粒状体の力学, pp. 81-83, 1993.
- 13) Oda, M.: Deformation mechanism of sand in triaxial compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.4, pp.45-63, 1972.
- 14) 松浦浩一, 吉野修, 岩下和義, 小田匡寛: 粒状体の巨視的応力とひずみについて, 第29回土質工学研究発表会, pp.805-806, 1994.
- 15) 岩下和義: 粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析-その1, 東京大学地震研究所彙報, Vol.63, pp.201-235, 1988.
- 16) 岩下和義: 粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析-その2, 東京大学地震研究所彙報, Vol.64, pp.71-118, 1989.
- 17) 目黒公郎, 伯野元彦: 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 東京大学地震研究所彙報, Vol.63, pp.409-468, 1989.
- 18) Meguro, K., Iwashita, K. and Hakuno, M.: Fracture analyses of media composed of irregularly shaped regions by the extended distinct element method, *Proc. of JSCE*, No.437/I-17, pp.37-48, 1991.
- 19) Jaky, J.: Talajmechanika(Soil mechanics in Hungarian), *J. Hungarian Arch. & Eng.*, Budapest, pp.355-358, 1944.

(1995.3.20 受付)

## A NUMERICAL BEARING CAPACITY TEST BY DEM ON GRANULAR ASSEMBLIES WITH SANDBAG-LIKE REINFORCEMENT

Syuichi YAMAMOTO and Hajime MATSUOKA

A bearing capacity test on granular assemblies of aluminum rods and its numerical simulation by DEM were performed. Based on the comparison between these results, it is concluded that DEM can be what is called "numerical model ground". To investigate the mechanism of sandbag-like reinforcement numerically, firstly, a distinct element modeling for the reinforcement was proposed. Then, numerical compression tests on wrapped granular assemblies and a bearing capacity test of model ground with the sandbag-like reinforcement were performed. On the basis of the results, the mechanism that the reinforced granular mass behaves as a rigid body due to the nature of granular materials of being dilative and frictional was made clear.