

## 超大型三軸圧縮試験による実物補強材で補強した砂の強度特性

## STRENGTH CHARACTERISTICS OF SAND REINFORCED WITH FULL SCALE REINFORCING MATERIALS IN LARGE SCALE TRIAXIAL COMPRESSION TEST

福島伸二\*・望月美登志\*\*・香川和夫\*\*\*

By Shinji FUKUSHIMA, Yoshitoshi MOCHIZUKI and Kazuo KAGAWA

A reinforcing mechanism, and strength and deformation characteristics of the reinforced soil have been investigated by a laboratory element test using a small size specimen. However, the properties of soil that reinforced with a full scale reinforcing material can not be studied by the laboratory test as the size of specimen is very small.

In this paper, a series of large scale triaxial compression tests were performed in order to investigate the strength and deformation characteristics of sand that reinforced with full scale reinforcing materials (geo-grid, non-woven and metal strip for Terre armee). The tests were carried out on a dry sand sample, the results were represented by comparing the stress-strain relation of reinforced sand with that of unreinforced sand.

*Keywords* : reinforcement, triaxial compression test, sand, reinforced earth

## 1. ま え が き

補強土工法は、土以外の合成繊維材料や金属製の帯材などの引張に強い材料（補強材）を土が伸びる方向に配置し、土と補強材との間に発生する摩擦により土の伸び変形を拘束して地盤を補強するものである。最近、この補強土工法を適用した盛土や切取斜面が数多く建設されるようになってきた。今後はさらに適用分野が広がり、高盛土や長大切取斜面のような大規模な土構造物へも補強土工法が適用されてゆくものと考えられる。

これまで補強材を地盤中に配置したときの補強メカニズムや補強効果は、供試体寸法の小さい小型室内要素試験（三軸圧縮・平面ひずみ圧縮試験など）を用いた、主にモデル補強材で補強した土のせん断試験により調べられてきた<sup>1),2)</sup>。しかし、これらの試験では供試体寸法が小さいため実物の補強材の効果を調べることは不可能である。特に、補強土工法を大規模な土構造物の建設に適用してゆくためには実際の補強材が地盤中に配置されたときの効果を把握しておく必要がある。そこで本報告は

供試体寸法が大きい超大型三軸圧縮試験機を用いて、実際の補強材が現実により得る間隔で砂地盤中に配置されたときの効果について実験的に調べた結果についてまとめたものである。

今回実施した超大型三軸圧縮試験は要素試験<sup>注1)</sup>であるが供試体が大きいため、図-1に示すように補強材を配置した供試体は部分的に実際の補強地盤と考えることもできる。したがってこの試験により実際の補強材の効果をかなり正確に調べることができるものと考えられる。

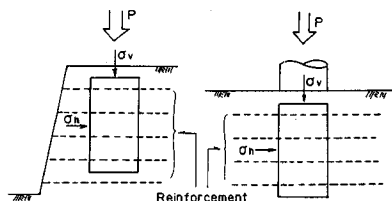


図-1 超大型三軸供試体と補強地盤との対応

注1) 供試体内に補強材が配置されると供試体内の応力状態は一様ではなく非常に複雑なものになり要素試験と考えるにいが、ここでは供試体の境界条件が明確でかつ拘束圧も制御できるという意味で要素試験として扱うことにする。

\* 正会員 工博 フジタ工業(株)技術研究所トンネル研究室 (〒223 横浜市港北区大柵町74)

\*\* 正会員 工修 フジタ工業(株)技術研究所トンネル研究室 (同上)

\*\*\* 正会員 工修 フジタ工業(株)技術研究所トンネル研究室長 (同上)

## 2. 試験方法

### (1) 超大型三軸圧縮試験機

本報告で使用した超大型三軸圧縮試験機は粗粒材の力学的特性を調べる目的で開発されたもので、供試体の寸法は直径  $d_s=120\text{ cm}$ 、高さ  $h_s=240\text{ cm}$  である<sup>3)</sup>。図-2にこの試験システムの全体図を示してある。側圧  $\sigma_c$  はコンプレッサーからの高圧縮空気圧をレギュレータにより所定の圧力に制御して、供試体体積変化測定用タンク (TA) 内で水圧に変換して加える。また軸荷重の載荷は、油圧ユニットからの油圧油を載荷シリンダー内に一定量ずつ流し込み、載荷プランジャーにより供試体を圧縮して行く。軸変位速度は油圧ユニットからの油量を流量調節弁で調節するが、今回の軸変位速度は  $\epsilon_a=0.3\%$  /min とした。試験はすべて排気条件で実施したが、このときの供試体の体積変化量は、供試体の体積変化分だけの水が三軸セル内からタンク TA に流入するようしておき、このタンク内の水位を差圧計により測定して求める。載荷プランジャーが三軸セル内に貫入すると、その貫入した容積分の水はそれぞれ載荷プランジャーの半分の断面積をもつ補正シリンダー (CA, CB) に流入する。こうすることにより載荷プランジャー貫入による三軸セルからのタンク TA への水の流出をなくし、タンク TA へは供試体の体積変化分だけの水が流出入することになる。

供試体の上下端面は、この面が主応力面となるように、図-3に示すように厚さ 0.5 mm のゴムシートをキャップあるいはペダスタルにシリコンシーラント (タイルメント社 H-型) で接着し、さらにシリコングリース (信越化学 KS 63G) をはさんでゴムシートを置いて摩擦を除去した。

#### (軸応力・側方応力の計算)

本試験は寸法の大きい供試体を用いているので、供試

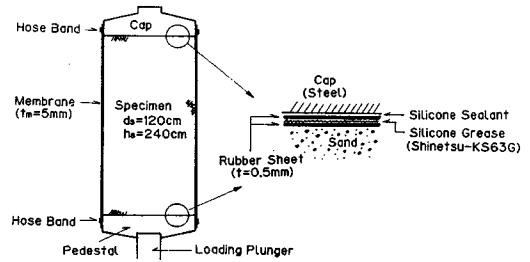


図-3 供試体の端面条件

体に作用している応力を求めるには供試体の自重、セル水位 (供試体の高さ方向にセル水圧が異なる)、ゴムスリーブによる供試体の変形の拘束などの影響を考慮する必要がある。軸応力  $\sigma_a$  は供試体の自重の影響を考慮して、図-4に示すように供試体中央部 (高さ  $h_s$  の 1/2 の位置) で計算している。キャップ上部の水の重量は供試体下面からタンク TA 内の水面までの高さ  $h_B$  ( $=h_{B0} + \Delta h_B$ ) とすると

$$W_w = (A_s - a)(\Delta + h_B - h_{TP})\gamma_w$$

となる。ここで  $\Delta$  は三軸セル上面からキャップ上面までの平均高さである。そして  $P_a$  をロードセルによる軸荷重の測定値、 $W_c$  をキャップ重量、 $\gamma_a$  を供試体の乾燥密度として、鉛直方向の力のつり合いから、供試体中央部の軸応力は

$$\sigma_a = (P_a + W_c + W_w) / A_s + \sigma_c(1 - a/A_s) + \gamma_a h_s / 2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

となる。またゴムスリーブの外側から作用する側方応力  $\sigma_r$  は供試体中央部で水平方向の力のつり合いから次式のようになる。

$$\sigma_r^* = \sigma_c + (h_B - h_s/2)\gamma_w$$

そして求めるべき供試体に作用する側方応力は以下に示すゴムスリーブの拘束力の補正 (式 (3)) をした

$$\sigma_r = \sigma_r^* - \Delta\sigma_{rm} \quad \dots \dots \dots (2)$$

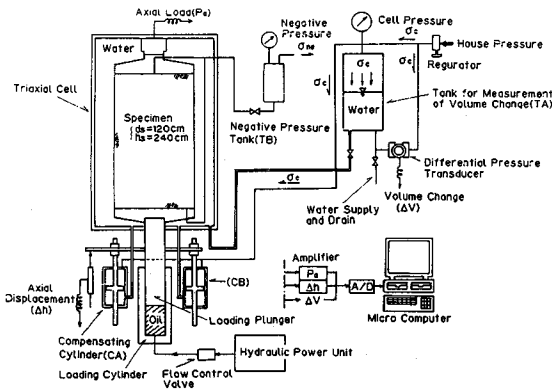


図-2 超大型三軸圧縮試験システム

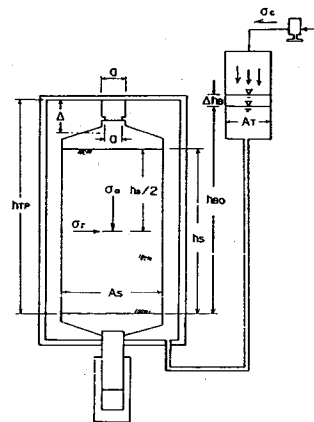


図-4 供試体の応力の計算

である。

(ゴムスリーブ拘束力の補正)

ゴムスリーブによる供試体の変形の拘束による影響は以下に示す考え方により補正した。試験後の供試体の観察によると、ゴムスリーブは供試体を軸方向に圧縮すると軸方向に座屈している。したがって、ゴムスリーブはこの方向に供試体を拘束しないが、横方向への供試体変形を拘束するものと考えられる。このため側方応力のみゴムスリーブが理想的な弾性薄肉円筒として供試体とともに変形するものとしてゴムスリーブの拘束力を求めて補正する。つまり供試体の側方ひずみを  $\epsilon_r$  として水平方向の力のつり合いから補正值は、

$$\Delta\sigma_{rm} = 2 t_m(\sigma_r^* - E_m \epsilon_r) / d_s \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 $t_m$ 、 $E_m$  はゴムスリーブの肉厚とヤング率で、今回使用したゴムスリーブはそれぞれ  $t_m = 0.7$  cm、 $E_m = 45$  kgf/cm<sup>2</sup> である。

(2) 供試体の作製方法

試験に使用した試料は豊浦砂 ( $G_s = 2.64$ ,  $e_{max} = 0.977$ ,  $e_{min} = 0.605$ ) である。供試体は以下に示すように作製した。まずゆる詰状態の供試体は空気乾燥状態にある砂を多重ふるい (4層でふるい目の組合せは上から 9.54, 4.76, 4.76, 4.76 mm) により約 80 cm の高さから自由落下させて作製した (空中落下法)。このときの供試体の間隙比は約  $e = 0.84 \sim 0.88$  ( $D_r = 34\%$ ) である。また密詰め状態の供試体は、ゆる詰の供試体と同じように砂を自由落下させて作製させた後、層厚 60 cm ごとにバイブレーターにより加振して作製した。このときの供試体の間隙比は約  $e = 0.68 \sim 0.70$  ( $D_r = 70\%$ ) である。

試験に使用した補強材は実際に現場で使用されることのある次の3種類で、これを図-5(a)、写真-1に示すような形状にして供試体内に配置した。

- ① ジオグリッド：ポリプロピレンを原材料とする格子状の材料で、これを直径 110 cm の円板に切断したもの (テンサー SS-2、格子の目合寸法は 28×40 mm)
- ② 不織布：ポリプロピレン 100% の連続長繊維よりなる布状の材料で、これを直径 110 cm の円板に切断したもの
- ③ ストリップ材：テールアルメ工法で使用されている金属製の帯状材料 (リブなし (幅 10 cm) とリブ付き (幅 6 cm)) を長さ 110 cm に切断し、その中央部で3枚交差させたものを1層とする

補強した供試体は以下のように作製した。砂の部分は上述した方法で作製するが、補強材は図-5(b)に示すように水平に、かつ等間隔 (補強材間隔： $\Delta$ ) で配置する。ここで補強材層数 ( $n$ ) と補強材間隔の関係は  $h_s = n \cdot \Delta$  である。

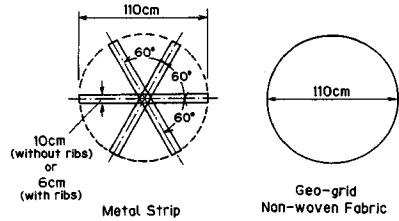


図-5(a) 補強材の形状と寸法

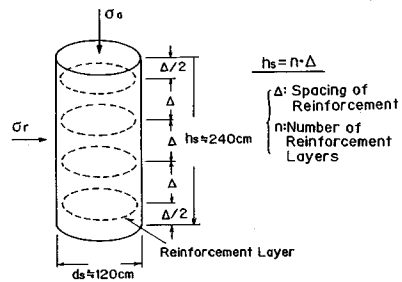


図-5(b) 供試体中への補強材の配置

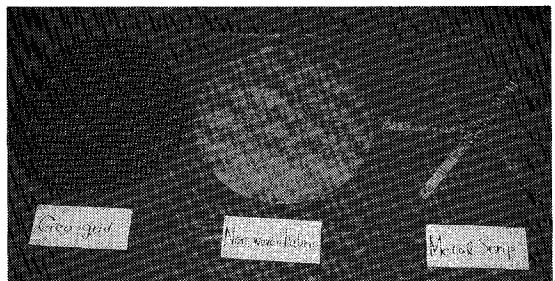


写真-1 補強材

なお、供試体の密度は圧密圧  $\sigma_{rc} = 0.5$  kgf/cm<sup>2</sup> における間隙比  $e_{0.5}$  で示してある。

3. 試験結果

図-6に各種補強材をそれぞれ供試体中に4層配置して補強した砂の応力比-軸ひずみ関係を比較してある。この図からストリップ材で補強した砂は他の材料に比較して供試体の変形が小さいうちから効果が現われている。しかし  $\Delta = 60$  cm 程度の間隔で補強材を配置して補強した砂の応力比-ひずみ関係は、材料により多少の差があるものの、最大応力比 ( $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ ) の増加量は材料によらずほぼ同量であることがわかる。

図-7にはリブなしとリブ付きのストリップ材で補強した砂の応力比-ひずみ関係を比較してあるが、リブなしストリップの方がやや補強効果が大いことがわかる。ストリップ材の引抜試験結果によればリブ付きストリップの方がリブなしに比べて摩擦係数が大きくなっており<sup>4)</sup>、ここで得られた結果と逆の傾向になっている。

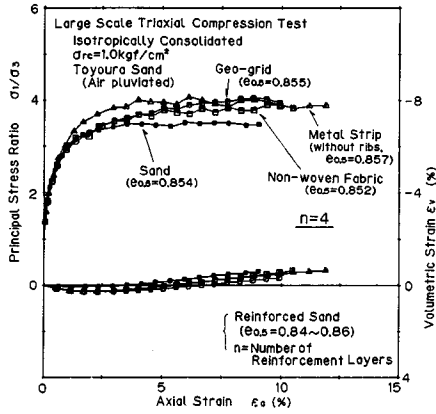
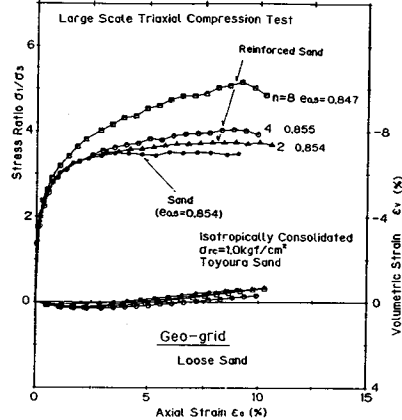


図-6 各種補強材により補強した砂の応力比-ひずみ関係



(a) ゆるい砂

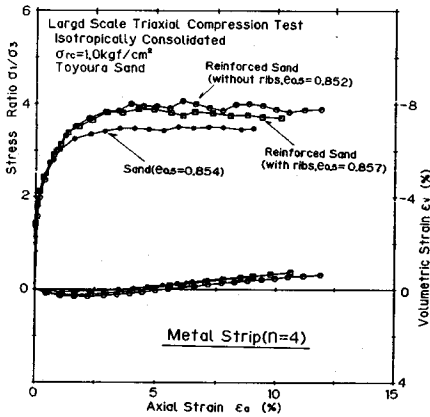
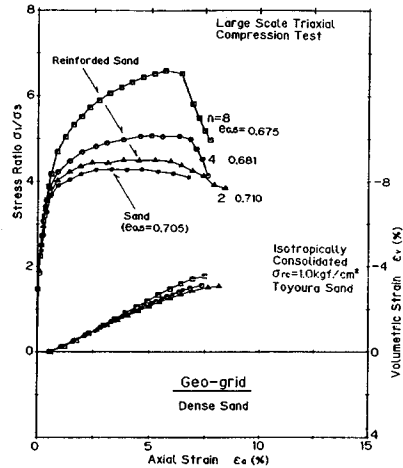


図-7 ストリップで補強した砂の応力比-ひずみ関係



(b) 密な砂

図-8 ジオグリッドで補強した砂の応力比-ひずみ関係

次に図-8(a), (b) に層数を  $n=2, 4, 8$  と変えてジオグリッドで補強した砂の応力比-ひずみ関係を示してある。また図-9, 10 にはそれぞれ不織布, ストリップ材(リブ付き)で補強した砂の応力比-ひずみ関係を示してある。これらの図から, 補強材層数が多くなるほど, つまり補強材間隔が小さくなるほど補強効果が大きくなることがわかる。また3種の材料のうちで特徴的なのがジオグリッドで補強した砂で, 他の材料に比べて補強効果が最も大きい, が, せん断変形がある程度生じると応力比は急に低下する。この傾向は補強材層数が多いほど顕著である。この応力比が急に低下するのはジオグリッドが破断した結果と考えられる。たとえば図-11 には  $n=4$  層のジオグリッドで補強した密詰め砂の軸荷重-軸変位関係 (X-Y レコーダの記録) を示してあるが, この図で軸荷重が急に低下したときに三軸セル内からパキパキというような音が聞こえてきた。この音がジオグリッドが破断するときのものと思われる。図-8(a) と (b) からこの応力比-ひずみ曲線が急に低下するとき

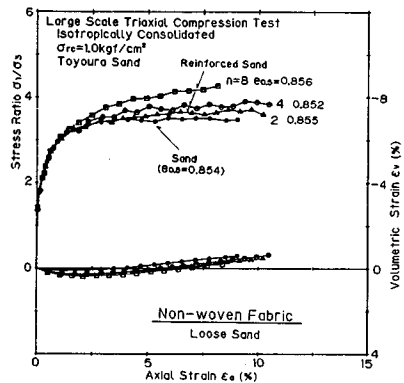


図-9 不織布で補強した砂の応力比-ひずみ関係

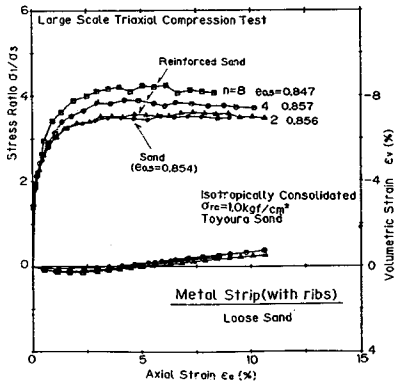
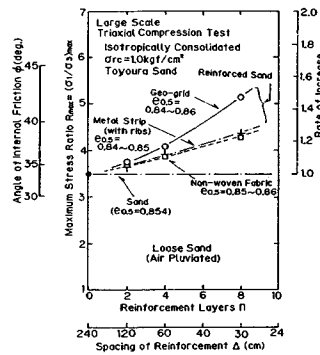
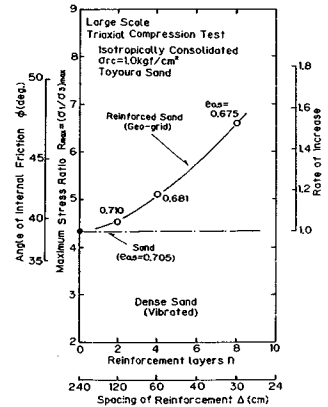


図-10 ストリップで補強した砂の応力比-ひずみ関係



(a) ゆるい砂



(b) 密な砂

図-12 補強材層数と補強効果の関係

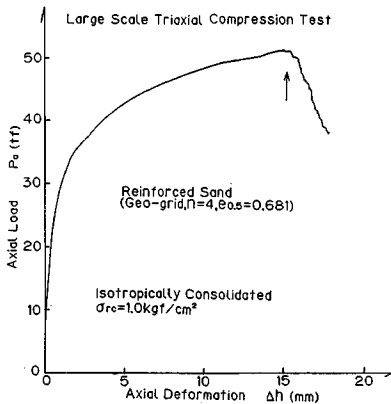


図-11 軸荷重-軸変位関係 (X-Yレコーダの記録)

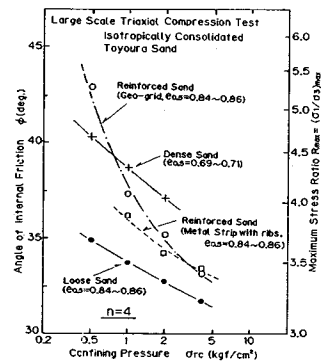


図-13 補強効果と拘束圧の関係

の軸ひずみ量は砂の密度により異なり、密な砂の方が小さいことがわかる。以上のことから、ジオグリッドを用いて地盤を補強するときは材料自体が破断するときの変形量を考慮する必要がある。

次に補強材層数の影響をみるために、図-8, 9, 10 から最大応力比を読み取り、補強材層数に対してプロットしたのが図-12(a), (b)である。またこの図の縦軸には補強材による最大応力比の増加率と内部摩擦角(粘着力成分  $C=0$  としている)

$$\phi = \sin^{-1} \left[ \frac{(\sigma_1/\sigma_3) - 1}{(\sigma_1/\sigma_3) + 1} \right] \dots \dots \dots (4)$$

のスケールもそれぞれ示してある。これらの図から補強材層数が増加すると補強効果が急に増加すること、また材料の種類による効果の差も大きくなることわかる。しかし実際の補強地盤における補強材間隔が一般に70~100cmであることを考えると、図-12(a)からこの間隔における補強効果は材料によりほとんど差がないか、あってもその差は小さいことがわかる。そしてこの70~100cm間隔で補強材を実際の地盤に配置したときの効果は、最大応力比の増加分で1~2割程度で、この

値は内部摩擦角で表わすと3~4度に相当している。

図-13には  $n=4$  層のジオグリッドとストリップ(リブ付き)で補強した供試体について拘束圧( $\sigma_{rc}$ )を変えた試験をしたときの内部摩擦角(あるいは最大応力比)を拘束圧に対してプロットしてある。この図からジオグリッドとストリップとで補強効果と拘束圧の関係に相違があることがわかる。つまりストリップによる補強効果( $\Delta\phi$ )は拘束圧によらずほぼ一定であるのに対して、ジオグリッドで補強した砂では拘束圧が低くなるほど  $\Delta\phi$  は大きくなっている。これは両者の補強メカニズムの相違によるものと考えられる。つまり、ストリップは砂に一定の摩擦角を付加するような効果をもっている。これに対して、ジオグリッドは砂のダイレイタンス傾向がより大きい低拘束圧領域においてより大きな効果を示しているから、グリッドと砂とのかみ合わせ(インターロッキング)の効果が重要な役割をしているものと考えられる。またジオグリッドは拘束圧が低くなるほど効果が大きくなるが、拘束圧が高くなると逆にストリップの効果よりも小さくなる傾向がある。このことは、この材料が

比較的低い盛土のような土構造物の建設に適していることを示している。

以上のような補強メカニズムの相違は Mohr の応力円から求められる破壊包絡線（強度パラメーター： $C$ ,  $\phi$ ）に反映する。図—14(a), (b)にはそれぞれジオグリッド、ストリップで補強した砂の Mohr の応力円 ( $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$  時) から求めた破壊包絡線を示してある。これらのうち図—14(a) は拘束圧  $\sigma_{rc}=0.5, 1.0, 2.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  における試験から、また図—14(b) は  $\sigma_{rc}=1.0, 2.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  における試験から求めた破壊包絡線である。図中にはこの破壊包絡線から求めた内部摩擦角 ( $\phi$ ) が示してある。なお、図中の (a) と (b) における無補強砂の破壊包絡線は供試体数の違いにより若干の差異を生じているが、これは同等とみなすべきものでありこの図から大略的に次のことがいえる。すなわちこれらの図から、ジオグリッドとストリップで補強した砂の破壊包絡線は異なっており、ジオグリッドで補強した砂は無補強の砂に比べて内部摩擦角はほとんど同じであるが粘着力成分のみが増加している ( $\Delta\phi=0, \Delta C>0$ )。これに対してストリップで補強した砂は無補強の砂に比べて内部摩擦角のみが増加している ( $\Delta\phi>0, \Delta C=0$ )。このことは補強した砂の強度パラメーターは補強材の効果として  $C$  のみが増加するか、 $\phi$  のみが増加するか、あるいは

$C$ ,  $\phi$  ともに増加するかは補強材料の種類（材料により補強メカニズムは異なる）によることがわかる。

#### 4. 小型三軸圧縮試験結果との比較

小型三軸圧縮試験により補強した砂のせん断特性を調べるときは、供試体寸法が小さいので補強材は実物ではなく、一般にモデル化したものが用いられる。ここではモデル補強材で補強した砂の小型三軸圧縮試験結果 (S-TC) と実物補強材を用いた超大型三軸圧縮試験結果 (L-TC) と比較することにする。

小型三軸圧縮試験の供試体寸法は直径  $d_s=10 \text{ cm}$ 、高さ  $h_s=20 \text{ cm}$  で、供試体はロートを用いた空中落下法により作製した。供試体の端面条件は超大型三軸と同様に厚さ  $0.3 \text{ mm}$  のメンブレンシートを2枚用いて摩擦を除去した。試験時の供試体は飽和状態で、背圧  $\sigma_{BP}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  を加えている。

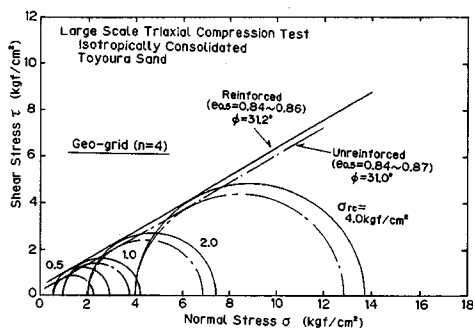
試験に用いたモデル補強材は超大型三軸で用いた材料と補強メカニズムができる限り似たものとなるように選んだ次の3種類である。

- ① ジョグリッド：高密度ポリエチレン製の網状ネット（網目  $2.0 \times 2.0 \text{ mm}$ ）を直径  $90 \text{ mm}$  の円板状にしたもの
- ② 不織布：超大型三軸圧縮試験で使用したものを直径  $90 \text{ mm}$  の円板状にしたもの
- ③ ストリップ材：幅  $5 \text{ mm}$ 、厚さ  $0.5 \text{ mm}$ 、長さ  $90 \text{ mm}$  の銅板にアルアルダイトで砂粒子を付着させたものを（平均厚さ  $1.6 \text{ mm}$ ）、その中央部で3枚交差させたものを1層とする。

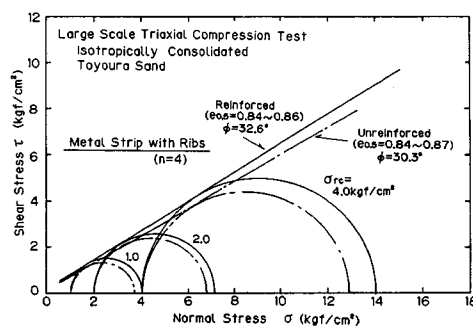
これらの補強材は超大型三軸と同様に図—5 に示すように供試体内に配置した。

図—15(a), (b), (c) にそれぞれジオグリッド、不織布、ストリップにより補強した砂の小型三軸圧縮試験の結果を示してある。これらのうちジオグリッド、ストリップで補強した砂の応力比-ひずみ関係は補強材による強度増加量は必ずしも一致していないが超大型三軸で得られたものと似ている。これに対して不織布で補強した砂の応力比-ひずみ関係は超大型三軸のものとは全く異なり、せん断初期から無補強の砂よりも弱くなっており、かなりの変形が生じてから補強材の効果が現われている。これは不織布の厚さが無拘束状態で約  $4 \text{ mm}$  もあり、かつ厚さ方向に変化しやすいため、これを寸法の小さい供試体内に配置すると補強材間隔の大きさに対して材料自体の変形が大きくこのような応力比-ひずみ曲線になるものと考えられる。

実際の補強地盤や超大型三軸の補強した供試体では補強材間隔が大きいため、材料自体の変形量が大きくとこのような問題は生じないだろう。したがって、小さい

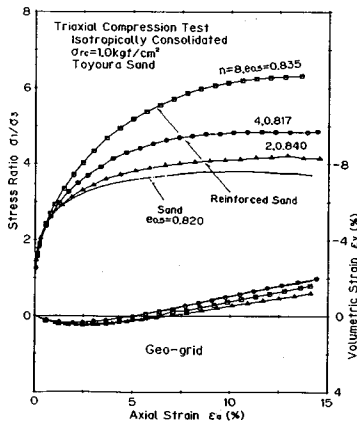


(a) ジョグリッド

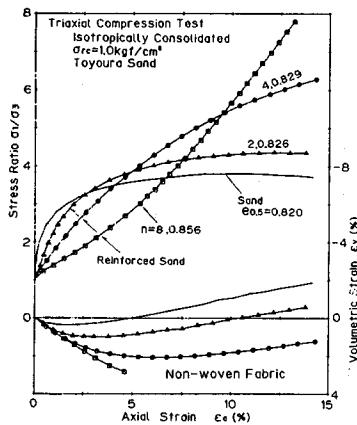


(b) ストリップ

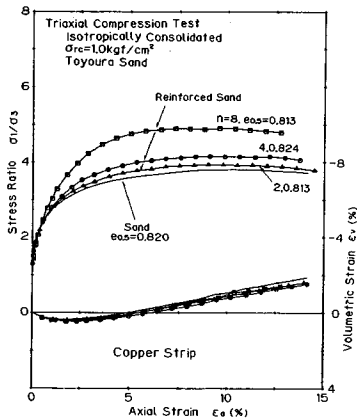
図—14 ジョグリッドで補強した砂の破壊包絡線



(a) ジョグリッド



(b) 不織布



(c) ストリップ

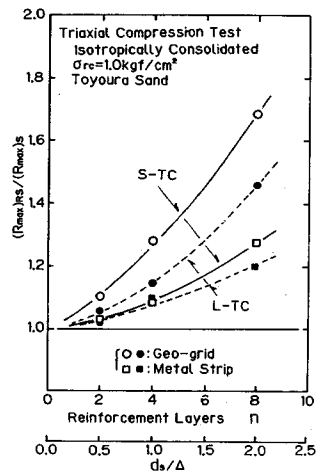
図—15 小型三軸試験による補強した砂の応力比-ひずみ関係

供試体を用いて不織布のような材料で補強した砂の試験をしても実際とは全く異なった挙動しか得られないことになる。

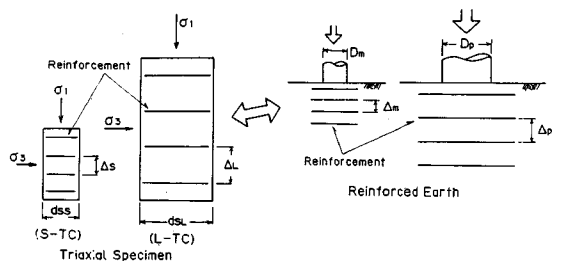
図—16には小型と超大型三軸圧縮試験の供試体直径( $d_s$ )と補強材間隔( $\Delta$ )の比( $d_s/\Delta$ )と補強効果の関係を示してある(不織布は除く)。この図からモデル化した補強材であっても上述したような補強材自体の変形が及ぼす影響がなければ、小さい寸法の供試体を用いた小型三軸圧縮試験でも補強材間隔と供試体寸法の比で整理すれば超大型三軸圧縮試験による実物補強材の効果を定量的には難しいが定性的には評価できることがわかる。特にストリップで補強した砂の試験では供試体寸法に関係なく両者はよく似た傾向を示している。以上のことは、相似率の問題も無視できないが図—17に示すように幾何学的に相似(たとえば $D/\Delta$ を一定とする)な模型補強地盤( $D_m, \Delta_m$ )の試験から実際の補強地盤( $D_p, \Delta_p$ )の挙動を推定することがある程度可能であることを示している。

### 5. 結論

従来、補強材により補強した土の補強メカニズムや補



図—16  $d_s/\Delta$ と補強効果の関係



図—17 小型試験と大型試験

強効果は供試体寸法の小さい室内要素試験により調べられてきた。また使用される補強材も、供試体寸法が小さいという制約上、モデル化した補強材であった。本報告では、供試体寸法の大きい超大型三軸圧縮試験により、実物補強材を現実により得る間隔で砂地盤中に配置したときの効果について実験的に調べた。その結果以下のことが明らかになった。

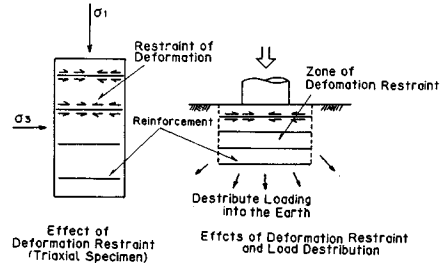
(1) ジオグリッドによる補強効果が最も大きい(補強材間隔が小さい場合は特にそうである)、この材料を使用するときには注意すべきことは材料の破断に対する検討を十分に行う必要があることである。ストリップ材による補強効果は他の材料による場合よりも小さい変形から現われる。

(2) 補強材間隔が小さくなるほど補強効果は急激に増加し、また補強材の種類による効果の差も大きくなる。しかし、現実により得る補強材間隔(70~100 cm)では材料による補強効果の差は小さいかあるいはほとんどない。

(3) 現実により得る間隔で砂の供試体に実物補強材を配置すると最大応力比は1~2割ほど増加する。これは内部摩擦角(式(4))で表わすと3~4度である。

(4) 補強材の効果と拘束圧の関係はジオグリッドとストリップで異なるが、これは両者の補強メカニズムの相違によるものと思われる。つまりストリップでは主に摩擦による補強であるのに対して、ジオグリッドでは砂との摩擦だけでなく、インターロッキングも補強効果に重要な役割をしているものと考えられる。この補強メカニズムの差はMohrの応力円から求められる破壊包絡線の差になって現われる。

(5) 通常、補強材の効果はモデル補強材を用いた寸法の小さい小型室内試験により調べることになるが、このような試験でも不織布のように材料自体の変形が大きい場合を除いて補強メカニズムのよく似たモデル補強材を用いれば実物補強材の効果を定量的には難しいが定性的な評価は可能である。



図—18 補強材の効果

## 6. あとがき

以上述べてきたことは境界条件が明確な要素試験で調べることができる補強材による土の変形拘束の効果(土と補強材間に発生する摩擦による変形拘束)のみである(図—18(a)). 実際の補強地盤における補強材の効果は、この変形拘束効果のほかに、補強材により変形拘束された部分が一体化し、受けた荷重を周辺地盤に広く分散させる効果もある(図—18(b)). この応力分散効果はそれぞれの構造物の境界条件に応じて決まるもので、補強地盤をより合理的に建設するには設計法にこの効果をどのように取り入れてゆくかが課題であろう。

### 参考文献

- 1) 龍岡文夫・金藤浩司・三木五三郎・生原 修・浜田英治・佐藤剛司：引張補強材による砂の補強についての基礎的研究，土と基礎，Vol. 31, No. 9, pp. 11~19, 1983.
- 2) 土質工学会編：補強土工法，第2編メカニズムと設計の基本，1986.
- 3) 鎌田正孝・石井武美・酒見徳行・小山田吉孝・栗原明美：砂による大型三軸圧縮試験機の検定，フジタ工業技術研究所報，No. 12, pp. 85~92, 1975.
- 4) Ingold, T. S. : Reinforced Earth, Thomas Telford Ltd, pp. 95, London, 1982.

(1987. 7. 24・受付)