

# 地盤の一部を包み込む支持力補強方法に関する研究

松岡 元<sup>1</sup>・劉 斯宏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>2</sup>学生会員 名古屋工業大学大学院生 工学研究科社会開発工学専攻

地盤の一部を包み込む支持力補強方法の発想からはじめて、フーチングの支持力補強模型実験と鉛直盛土地盤の支持力補強模型実験により、その有効性を示す。さらに、現場への適用例として、鉄道枕木の「土のう」式支持力補強方法について述べる。従来の「土のう」は土が水に流されないために包むという考え方であったが、ここでは土のような粒状体のダイレタンシー特性に着目して土を包み込むことの力学的意義を再考し、「土のう」自体をフーチングや杭のような荷重支持体とみるところが特徴である。

**Key Words:** ballast, bearing capacity, granular material, model test, reinforcement, soilbag

## 1. はじめに

鉄やコンクリートと比べれば、土は本来バラバラの土粒子から成るもので、こっばみじんに破壊しているものと言えるかもしれない。土粒子間に働く力は、基本的には摩擦力だけである。したがって、土を包み込んで拘束すること（垂直力 $N \rightarrow$ 大）は、摩擦力を大きくする（摩擦力 $F = \mu N \rightarrow$ 大、 $\mu$ ：摩擦係数）ので、有効な方法と言えるであろう。

ここでは、地盤の一部を包み込む補強方法の発想からはじめて、2種類の実験例（フーチングの支持力補強模型実験、鉛直盛土地盤の支持力補強模型実験）を示し、その有効性を検証する。次に、鉄道枕木の「土のう」式支持力補強方法を提案し、2次元粒状体モデルであるアルミ丸棒積層体と6号碎石と実際のバラストに対して静的および動的載荷実験を行い、この方法の有効性を検証する。この中には、地盤の「敵」である載荷重（外力）を利用して地盤の強化を図る—いわば「敵を味方にする」逆転の発想が入っている<sup>1)</sup>。

## 2. 地盤の一部を包み込む補強方法の発想<sup>1)</sup>

写真-1は支持力模型実験装置の全景を示したものである。地盤の試料としては、直径1.6mmと3.0mm、長さ50mmのアルミ丸棒を混合して（混合重量比3：2）積み上げたものを用いた（間隙比 $e=0.23$ 、単位体積重量 $\gamma = G_s \gamma_s / (1+e) = 2.69 / 1.23 = 2.2 \text{ gf/cm}^3 = 21.6 \text{ kN/m}^3$ ）。こ

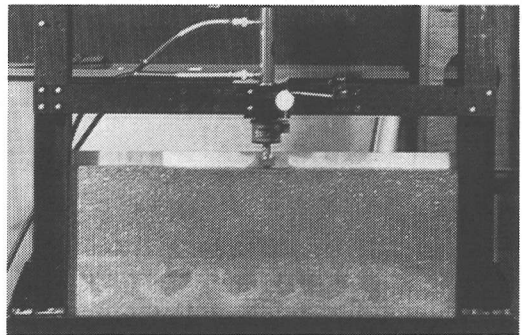


写真-1 支持力模型実験装置全景

れは、砂礫のような粒状体の2次元モデルである。このようなアルミ丸棒積層体は、アルミの比重 $G_s = 2.69$ と土粒子の比重 $G_s = 2.65$ が近い値であること、自立するので前後面を壁面で覆う必要がなく、壁面摩擦が皆無であること、粒子（アルミ丸棒の端面）にマジックインクなどで標線を描きやすいことなどの利点がある。このような模型地盤に補強材のモデルである紙を種々の方法で設置して補強し、荷重 $Q \sim$ 沈下量 $S$ 関係を測定するとともに、粒子の挙動を観察して、補強のメカニズムについても考察した。

現在よく用いられている軟弱地盤の支持力補強法として、シートやネットなどのジオグリッドの面状補強材を地盤の表層付近に水平に配置し、補強材の引抜き摩擦抵抗力によって土の水平移動を阻止しようとする水平補強材を用いた補強工法がある<sup>2)~4)</sup>。そこで、まずアルミ丸棒積層体の粒状体模型地盤の表層付近に補強材とし

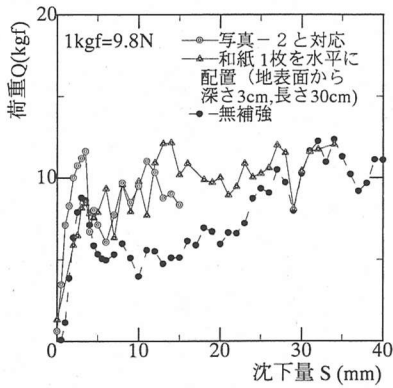


図-1 和紙1枚での補強と無補強の比較

で通常市販されている和紙（奉書紙，以下紙と称する）1枚を水平に配置（地表面から深さ3cm，長さ30cm）して支持力試験を行って見たが，アルミ丸棒が紙の上ですべてしまい，また紙が軟らかく地盤の変形に追随するため，あまり効果がみられなかった（図-1参照）．そのため，図-2に示す弾性応力解<sup>5)</sup>による最小主応力 $\sigma_3$ の方向にほぼ最小主ひずみ（最大引張ひずみ） $\varepsilon_3$ が発生するものとして一引張補強材である紙は最大引張ひずみの生じる方向に入れるのが最も効果的であるので一紙を半円弧状に入れることを試みた（写真-2参照）．ところが，写真-2からわかるように，最初は紙とアルミ棒の間の摩擦によって少し支持力が增加する（図-1参照）が，やがて滑って載荷板の両脇にあふれ出てしまい，もうひとつ効果が上がらないことがわかった．なお，載荷板底面にはサンドペーパーを貼り付けている．そこで，図-3に示すように紙の両端を長くして載荷板の下へ折りたたんで包み込む方法を思い付いた．この方法を用いると支持力が急激に増加したので，以下この地盤の一部を包み込む補強方法に基づいて種々の比較実験を行い，支持力補強のメカニズムについて考察するとともに，その様々な適用を試みた．

### 3. 地盤の一部を包み込む補強方法の実験例

#### (1) フーチングの支持力補強模型実験<sup>1), 6), 7)</sup>

写真-3は，フーチング直下を半円弧状の紙で補強した場合の，地盤に発生するスベリ線の状況を示したものである（載荷板幅 $B=10\text{cm}$ ，初期の補強材幅 $B'=15\text{cm}$ ）．補強された半円弧状の部分が固くなり，あたかもフーチングと一体化したようになって，その下に大きなスベリ線が形成されているのが見られる．次に， $B'=15\text{cm}$ の半円弧状の木製ブロックを作製し，フーチング（ $B=10\text{cm}$ ）直下に設置した実験や， $B'=15\text{cm}$ の半円弧状の補強部分を一体化させるために通常市販されているガム

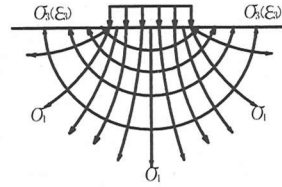


図-2 弾性応力解による主応力線図

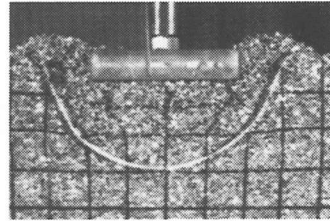


写真-2 半円弧状に入れた紙による補強（載荷板の両脇を包み込んでいない場合）

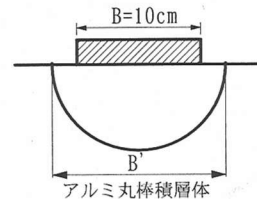


図-3 フーチング下の地盤の一部を包み込む補強方法（ $B$ :載荷板幅， $B'$ :初期の補強材幅）

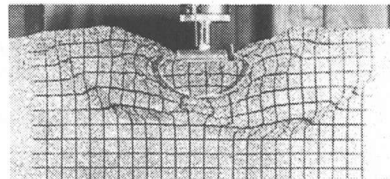


写真-3 半円弧状の紙で補強した場合の地盤全体のスベリ破壊状況( $B=10\text{cm}$ ， $B'=15\text{cm}$ )

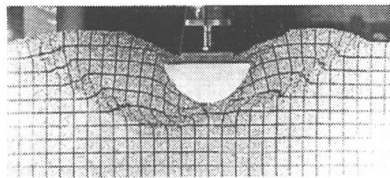


写真-4 半円弧状の木製ブロックを用いた場合の地盤全体のスベリ破壊状況( $B=10\text{cm}$ ， $B'=15\text{cm}$ )

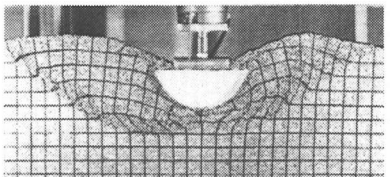


写真-5 半円弧状の補強部分をガムテープで接着・固定した場合の地盤全体のスベリ破壊状況( $B=10\text{cm}$ ， $B'=15\text{cm}$ )

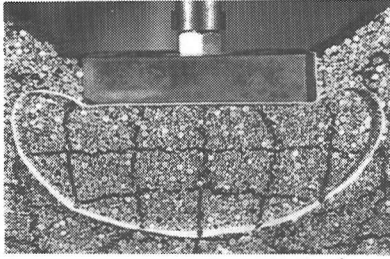


写真-6 紙で包み込んだ部分の拡大写真

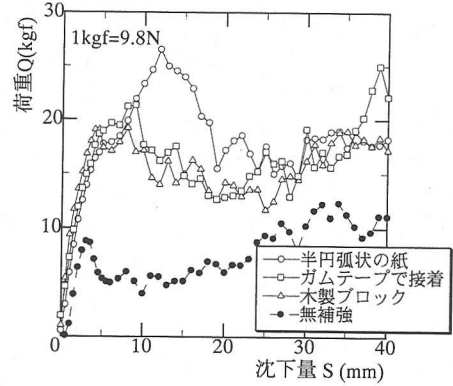
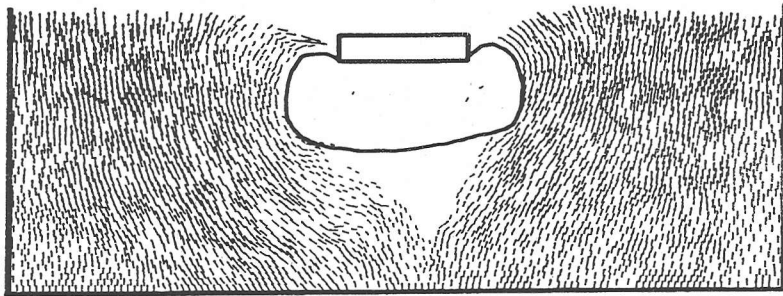
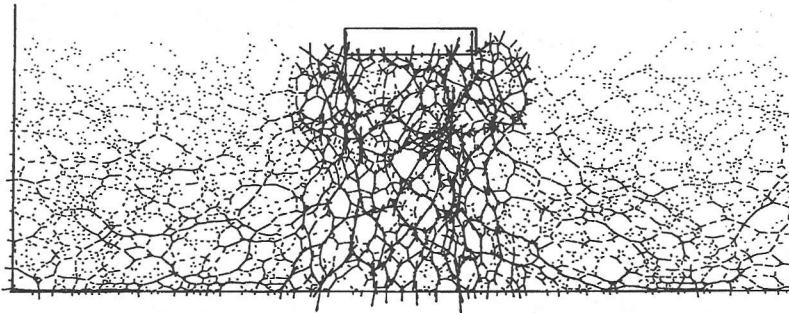


図-4 補強材で包まれた内部の違いによる荷重 Q ~ 沈下量 S 関係の変化 (B=10cm, B'=15cm)



(a) 沈下量 S=18.0~22.5mm 間の載荷板に対する粒子の相対変位ベクトル



(b) 補強地盤の粒子間力の伝達状況 (支持力ピーク時)

図-5 DEMによる「土のう」式補強地盤の支持力増加のメカニズム<sup>8), 9)</sup>

テープで接着・固定した実験を行った(写真-4, 5参照)。図-4は、無補強の場合、半円弧状の紙で補強した場合、半円弧状の木製ブロックを設置した場合、半円弧状の紙で包まれた内部のアルミ棒の両端面(前後面)をガムテープで接着・固定した場合の荷重Q~沈下量S曲線の実測値を示したものである。図-4より、木製ブロックで置き換えた場合が最大の支持力となるであろうとの予想に反して、紙でアルミ棒を包み込んだだけのものが最も大きな支持力を与えるという驚くべき結果を得

た。紙で包み込むだけで、なぜこのような高い支持力が得られるのであろうか。写真-6は紙で包み込んだ部分の拡大写真を示している。写真より、当初の半円弧状の紙が左右にはらみ出して紙の間の最大幅がB'=15cmより大きくなっているのが見られる。また、紙に包まれた内側の地盤が非常に固くなって載荷板と一体化するような強度を持つようになるのが観察された。なぜこのようなことが起こるのであろうか。これは、載荷重によって生じるダイレイタンスーによって密な地盤は体積膨張し

よとするが、紙で包まれているため紙から反力を受けて、紙の内部の有効応力 $\sigma'$ が増加するためと考えられる。すなわち、 $\sigma'$ が増加すればせん断強度式 $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$ より紙の内部の地盤の強度も増加して、紙の内部全体が根入れのある大きな基礎のように働いて支持力が飛躍的に増加すると考えられる（以上は、垂直力 $N$ が増加すれば摩擦力 $F = \mu N$ も大きくなるという議論と同じである）。いわば地盤の「敵」である載荷重（外力）を利用して地盤の強化を図る一敵を味方にする一点が特色である<sup>1)</sup>。山本ら<sup>8), 9)</sup>はDEM(Distinct Element Method, 個別要素法)によって、アルミ丸棒積層体模型地盤に対してこの支持力増加のメカニズムを確認した。図-5(a)は沈下量 $S=18.0\sim 22.5\text{mm}$ 間の載荷板に対する粒子の相対変位ベクトルを示し、図-5(b)は「土のう」で補強した地盤の支持力ピーク時の粒子間力ベクトルを示している。図-5(a)より「土のう」による補強領域の粒子が載荷板に対してほとんど動かず載荷板と一体化して、基礎の有効幅を大きくし、根入れも大きくすることがわかる。また、図-5(b)より「土のう」によ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」内部の粒状体に作用する有効応力が格段に高くなっているのが見られる。

次に、粘性土などのゆるい構造の地盤を想定して、紙の内部の間隙比を $e=0.23$ から、 $0.28, 0.36$ と大きくした試験（実際には、紙の内部のアルミ棒を適当に引き抜いて間隙比を大きくした）、さらに極端に緩い構造として紙の内部を通常市販されている紙巻きタバコ（商品名ハイライトを $5\text{cm}$ に切って用いた）に置き換えた試験を行った。図-6より、間隙を大きくする程極限支持力を発揮する沈下量は大きくなるが、紙巻きタバコの場合でも無補強の場合の2倍程度の支持力が得られることがわかる（ $B=10\text{cm}, B'=15\text{cm}$ の場合）。

さらに、紙で包み込む部分の幅 $B'$ を大きくした試験を行った。図-7は載荷板幅 $B=10\text{cm}$ に対して初期の $B'=1.5\text{cm}$ 、 $2\text{cm}$ 、 $3\text{cm}$ とした時の荷重 $Q$ ～沈下量 $S$ 関係を示している。図-8は $B=5\text{cm}$ に対して $B'=5\text{cm}$ 、 $25\text{cm}$ の場合を示している。支持力公式 $Q = q_u B L = \gamma B^2 L N_\gamma / 2$ が教えるように、無補強の場合の $Q = 78.4\sim 88.2\text{N}$ （ $B=10\text{cm}$ の時）、 $Q = 19.6\text{N}$ （ $B=5\text{cm}$ の時）のほぼ $(B'/B)^2$ 倍で支持力が増加しているのが見られる（図-7で最大約 $3^2=9$ 倍、図-8で約 $5^2=25$ 倍になる）。なお、厳密には上記の拡幅効果のほかに、包み込んだ部分が基礎の一部のように働いて根入れが深くなった効果—根入れ効果—もあるであろう。なお、図-7, 8より、あまり紙で包み込む面積を大きくすると、極限支持力は確かに大きくなるが、その極限支持力が得られるまでの沈下量が大きくなってしまっているのが見られる。これは、写真-7に見られるように載荷板の両脇で紙が膨

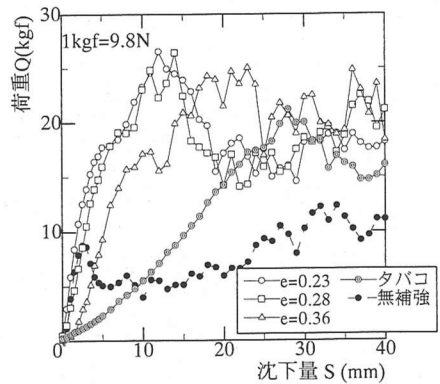


図-6 補強材で包まれた内部の間隙の増加に伴う荷重 $Q$ ～沈下量 $S$ 関係の変化（ $B=10\text{cm}, B'=15\text{cm}$ ）

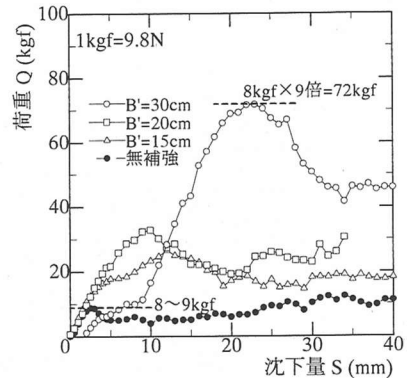


図-7 補強材幅 $B'$ の増大に伴う支持力の増加（ $B=10\text{cm}, B'=15\text{cm}, 20\text{cm}, 30\text{cm}$ ）

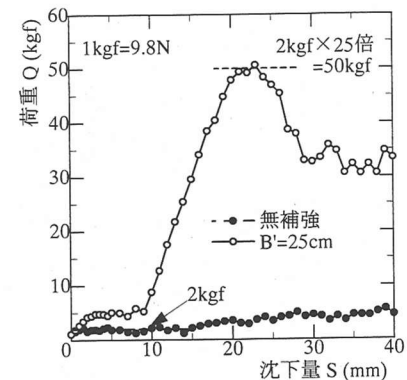


図-8 補強材幅 $B'$ の増大に伴う支持力の増加（ $B=5\text{cm}, B'=25\text{cm}$ ）

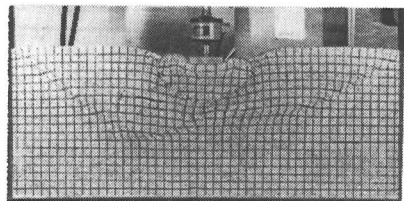


写真-7 載荷板の両脇で紙が膨れ上がる状況（ $B=10\text{cm}, B'=30\text{cm}$ ）

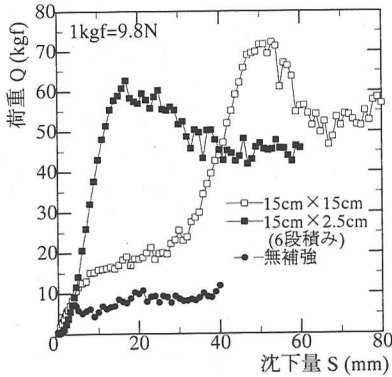


図-9 補強部の分割による荷重Q～沈下量S関係の変化(補強部全体を同面積とする)( $B=10\text{cm}$ ,  $B'=15\text{cm}$ )

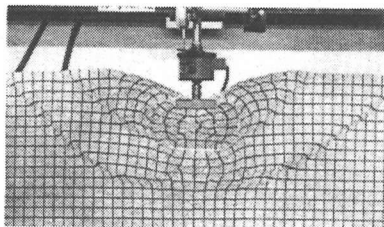


写真-8 15cm×15cmの正方形の紙を配置した場合の地盤全体のスベリ破壊状況( $B=10\text{cm}$ ,  $B'=15\text{cm}$ )

れ上がり、紙で包み込まれた部分が固くなるまでに大きな沈下量を要するからである。このことは、一般に望ましいことではないので、次にこの問題を考えよう。

図-9は、15cm×15cm(=225cm<sup>2</sup>)の正方形に紙で包み込んだ場合と、それと同面積の補強部分を6段に分割した場合(15cm×2.5cm×6段=225cm<sup>2</sup>)の荷重Q～沈下量S曲線の比較を示したものである。写真-8, 9は、その2つの場合のスベリ線の発生状況を示している。写真-8に示す1個の大きな正方形の場合には、まず正方形の内部でスベリ破壊を起こした後に、ダイレイタンスー現象によって正方形内部が固くなり、 $B=10\text{cm}$ のフーチングと正方形部分が一体化して、今度は正方形部分の下にもう1つの大きなスベリ線が形成されるのが見られる。これが図-9中の15cm×15cmの場合の荷重Q～沈下量S曲線が“2段”になることの原因である。しかし、同じ面積を6段に分割して包み込むと、発生しようとするダイレイタンスーを少ない沈下量でいち早く拘束し、荷重Q～沈下量S曲線の初期の立ち上がりの勾配 $dQ/dS$ を大きくすることができる。このことは、補強部分を分割して包み込むことが効果的であることを示している。そこで、15cm×5.9cm(=88cm<sup>2</sup>)の長方形の補強部を同面積、同じ横幅になるように3個に分割(地表層に2個、その直下層中央に1個、7.5cm×3.9cm×3個=88cm<sup>2</sup>)すると、図-10に示すように予想に反してほ

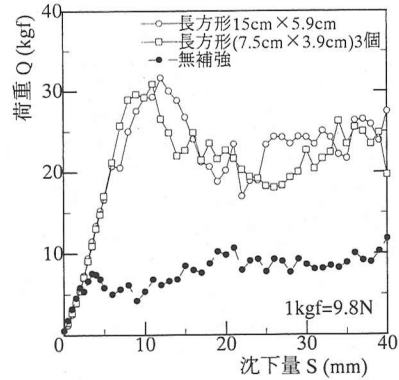


図-10 補強部15cm×5.9cm(=88cm<sup>2</sup>)によると3個に分割された7.5cm×3.9cm×3個(=88cm<sup>2</sup>)の荷重Q～沈下量S関係の比較( $B=10\text{cm}$ ,  $B'=15\text{cm}$ )

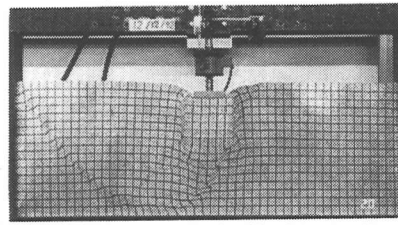


写真-9 15cm×2.5cmの長方形の紙を6段積み配置した場合の地盤全体のスベリ破壊状況( $B=10\text{cm}$ ,  $B'=15\text{cm}$ )

ぼ同じ高い支持力が得られた。これより、補強部を分割しても、極限支持力が下がるなどのマイナス面はあまり生じないことがわかる。そこで、「土のう」のようにさらに細かく分割することを思い付く。図-12は、図-11に示す細かく分割した「土のう」のような補強材の配置状況のもとでの試験結果を示している。図よりわかるように、「土のう」の個数が多いほど極限支持力が高くなるが、すべての配置について支持力が無補強の場合の2倍以上をなるという良好な結果が得られた。したがって、支持力を2倍程度にすればよいのであれば、「土のう」の配置については、さほど神経質にならなくても良さそうである。「土のう」のような補強材内部に適当な粒状体を詰めて、構造物基礎下に多数配置する補強方法が考えられる。

一方、構造物基礎下に複数の補強材を水平に敷き詰めると支持力が増加することが知られている<sup>4), 10)~12)</sup>ので、比較のため複数の和紙を水平に配置して実験を行った。図-13(a)に15cm×2.5cmの「土のう」6段積み(写真-9に対応)の試験結果と和紙6枚水平配置(長さ15cm, 間隔2.5cm)の試験結果の比較、図-13(b)に「土のう」12個(図-11に対応)の試験結果と和紙3枚(フーチング底面から順に長さ12, 16, 20cm, 間隔1.5cm, 図-11の「土のう」12個の場合に対応させた)、和紙1枚(長さ20cm, フーチング底面から深さ1.5cm)



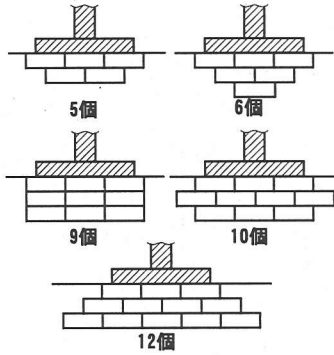


図-11 細かく分割した補強材(「土のう」)の配置状況 (B=10cm, 1個の「土のう」の寸法 4cm×1.5cm)

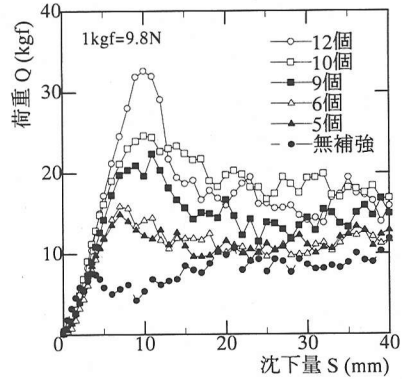


図-12 細かく分割する補強方法による荷重Q～沈下量S関係の差異(図-11と対応)(B=10cm, B'=12cm)

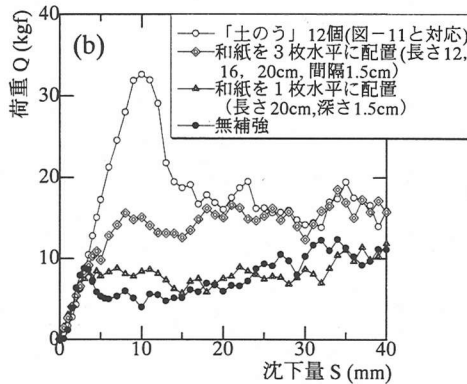
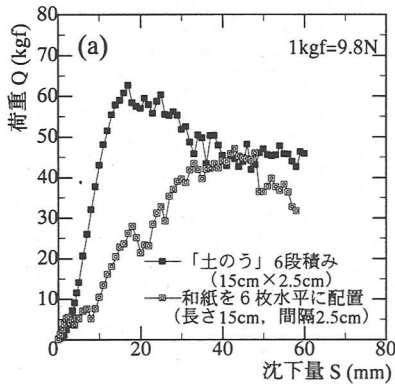


図-13 「土のう」と和紙の水平配置による荷重Q～沈下量S関係の比較

の試験結果および無補強場合の試験結果の比較を示す。  
**図-13(a)**より、「土のう」6段積み場合は極限支持力が和紙を6枚水平に配置した場合より高く、しかも極限支持力までの沈下量も小さいのが見られる。これは「土のう」6段積み場合には、ダイレイタンスーによって「土のう」とフーチングが早く一体化し、拡幅効果と根入れ効果の両方とも大きくなるためと考えられる。しかし、和紙を「土のう」幅と同じ長さ15cm、同じ間隔2.5cmで6枚水平に配置した場合には、「土のう」のように側方へ逃げる粒子を拘束できないため極限支持力を得るまでにかなりの沈下量を要し、また和紙の両端が折れ曲がるため拡幅効果が小さく極限支持力も小さくなると考えられる。また、**図-13(b)**より、「土のう」12個の場合の極限支持力が、それに対応させて和紙を3枚水平に配置した場合より、かなり高くなるのが見られる。これも拡幅効果が「土のう」の方が確実なためと考えられる。

以上は、2次元粒状体モデルを試料とした場合であるが、次に乾燥砂(豊浦砂:  $G_s=2.65$ ,  $D_{50}=0.18\text{mm}$ ,  $U_c=1.7$ ,  $e_{\max}=0.95$ ,  $e_{\min}=0.58$ )および乾燥粘土粉末(藤の森粘土:

$G_s=2.65$ ,  $D_{50}=0.015\text{mm}$ ,  $U_c=8.0$ )を地盤試料として、円形載荷板下の「土のう」方式による支持力補強模型実験(土槽寸法40cm×40cm×40cm)を行った。載荷板は直径8cmの円形(断面積: 50.3cm<sup>2</sup>)とし、「土のう」は**図-14**に示すように配置した。「土のう」を2層(2段)に配置した場合もある。「土のう」としてチャック式ビニール袋(約6cm×4cm×1cm)を、中詰め材として乾燥砂および乾燥粘土粉末を用いた。**写真-10**に実験の状況、**図-15(a)**に乾燥粘土地盤の場合の荷重Q～沈下量S曲線を示す。この実験結果より、無補強と比較すれば、中詰め材や「土のう」の配置によらず、いずれも約2倍程度の支持力増加の効果があることがわかる。なお、補強した場合の載荷板の実効断面積を補強部のほぼ内接円程度(直径: 12cm, 断面積: 113.1cm<sup>2</sup>)と考えると、載荷圧力(載荷重/実効断面積)～沈下曲線が無補強の場合と補強した場合でほぼ一致する(**図-15(b)**参照)。すなわち、本模型実験によれば、**図-14**のように補強した場合は直径12cmの円形載荷板とほぼ同じ効果を期待できると考えられる。

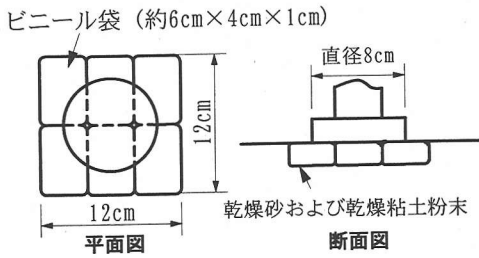


図-14 「土のう」の配置状態(1層配置の場合)

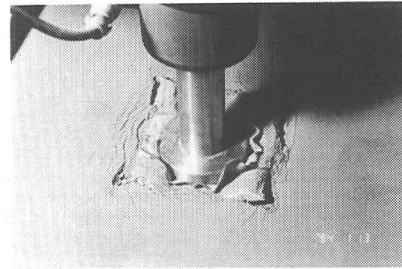


写真-10 乾燥粘土粉末を試料とした「土のう」式支持力模型実験の状況

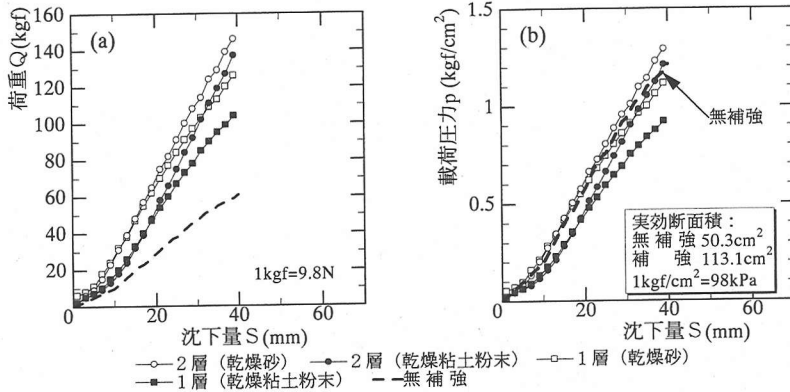


図-15 乾燥粘土地盤の場合の「土のう」式補強方法による(a)荷重 $Q$ ～沈下量 $S$ 関係、(b)載荷圧力 $p$ ～沈下量 $S$ 関係の比較(カッコ内は中詰め材を示す)

## (2) 鉛直盛土地盤の支持力補強模型実験<sup>13)</sup>

前述と同じアルミ丸棒積層体を、補強材のモデルとしての2種類の紙(和紙またはユボ紙)で包み込んだもの(横幅40cm、高さ4cmを標準とする)を10段程度積み上げて鉛直盛土地盤を製作し、これに対していくつかの支持力模型実験を行った。これより、鉛直盛土地盤の有効な補強方法について検討した。なお、和紙の短辺方向、長辺方向の破断強度(幅5cm当たり)はそれぞれ約6kgf(58.8N)、約14kgf(137.2N)であり、ユボ紙の短辺方向、長辺方向の破断強度(幅5cm当たり)はそれぞれ約50kgf(490N)、約22kgf(215.6N)である(短辺方向、長辺方向とは紙を購入した時の短い方向と長い方向のことである)。なお、ユボ紙は通常市販されているもので、表面が滑らかで水に濡れても破れない性質(耐水性)がある(破断強度については表-1参照)。

図-16は、行った鉛直盛土地盤の支持力模型実験のうち、代表的な2例の補強材の配置(アルミ丸棒積層体を紙で包んだものの配置)<sup>14)</sup>を示している(このほかに、紙を最初から切断させたもの、紙で完全に包み込まないものについても行ったが紙面の都合で省略する)。タイプ1とタイプ2はそれぞれ集中的な荷重を分散させて支持する場合と「土のう」全体に作用する幅広い荷重

表-1 補強材(紙)の破断時の実測値と計算値(Type1)

補強材の種類	補強材の破断強度 $T$ (kgf)	実測値 $Q_u$ (kgf)	計算値 $Q_c$ (kgf)
ユボ紙の短辺方向	50	615	641
ユボ紙の長辺方向	22	290	282
和紙の短辺方向	6	91	77
和紙の長辺方向	14	225	184

を支持する場合を想定したものである。また、写真-11は、それらの載荷時の地盤の変位状況を示したものである。写真中の黒い線は載荷前にマジックインクでアルミ丸棒の端面に描いた標線である。図-17は、図-16(a)の場合(タイプ1と呼ぶ)の、4種の破断強度をもった紙に対する荷重 $Q$ ～沈下量 $S$ 曲線を示している。図中の矢印は、紙がどこかの位置で破断して荷重が急低下する点を示す。紙は2段目の下辺と3段目の上辺中央部の同じ位置で同時に破断することが多かった。奥行き5cmある紙の破断強度を $T$ とすると、補強材内部の有効拘束応力 $\sigma'$ を力のつり合い式( $2T = \sigma' \times \text{高さ} 4\text{cm} \times \text{奥行き} 5\text{cm}$ )より推定し、その $\sigma'$ のもとで一定のせん断強度 $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$  ( $\phi' = 25^\circ$ )が作用するものとした。そして写真-11(a)のような破壊時の現象観察に基づいて簡

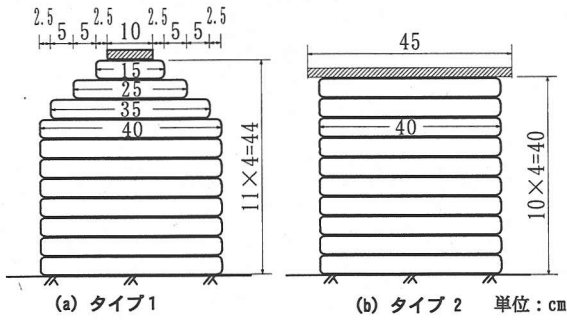


図-16 鉛直盛土地盤の代表的な補強材の配置

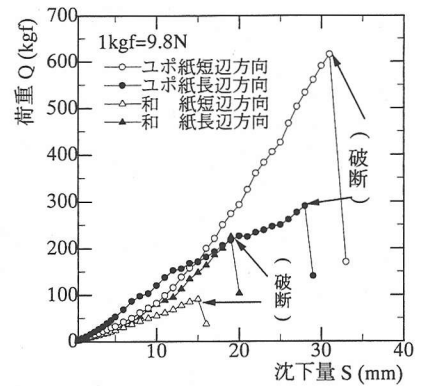


図-17 タイプ1の場合の補強材(紙)の破断までの荷重Q~沈下量S関係

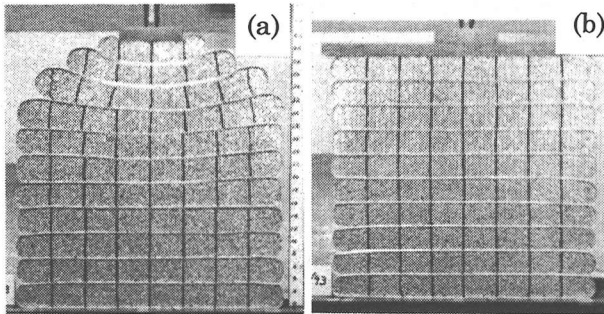


写真-11 鉛直盛土地盤の支持力補強模型実験: (a)タイプ1の場合の載荷状況(沈下量 $S=25\sim30\text{mm}$ ), (b)タイプ2の場合の載荷状況(沈下量 $S=15\sim20\text{mm}$ )

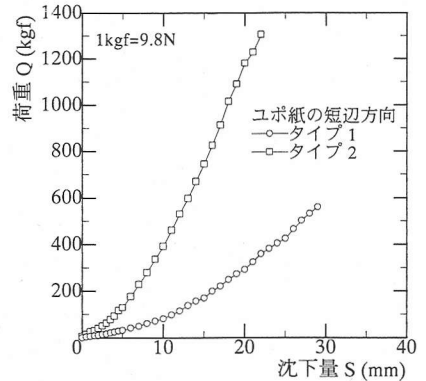


図-18 補強方法(タイプ1とタイプ2)による荷重Q~沈下量S関係の比較

単な円弧スベリ面を仮定し、補強材破壊時の載荷重  $Q_c$  を概算した ( $Q_c = 5.5 \tau_f \cdot B \cdot L$ ,  $B$ : 載荷幅 10cm,  $L$ : 奥行き 5cm, 係数 5.5: 円弧の中心回りの載荷重  $Q_c$  によるモーメントと一定のせん断強度  $\tau_f$  によるせん断抵抗力のモーメントのつり合いから求めた支持力係数)。そのようにして求めた計算値  $Q_c$  と実測された補強材破断時の載荷重  $Q_m$  の比較を表-1 に示す。大胆な仮定に基づく計算ではあるが、 $Q_c$  と  $Q_m$  は4つのケースについて大略一致しているのが見られる。それにしても、写真-11(a)に示すような不安定な形の鉛直盛土が、人間の体重の数倍~10倍もの荷重に耐えられるとは驚きである。なお、局所的な集中荷重を受ける場合には、補強材(紙)による拘束効果が小さくなると考えられるので、できるだけ補強部全体への分布荷重になるよう工夫しなければならないであろう(写真-11(b)参照)。また、包み込む土が正規圧密粘土のような圧縮性に富む土の場合も効果は小さくなると考えられるが、透水性のある補強材で包み込めば圧密して固くなり、それなりの効果は期待できよう。

従来の鉛直盛土地盤の補強方法では、主働土圧領域を設定して主働土圧を求め、これと補強材の引き抜き摩擦抵抗力がつり合うものとして設計している。これに対して本補強方法は、いわば地盤の敵である載荷重(外力)を利用して地盤の強化を図るという特色がある。図-18に、図-16(a)のタイプ1と図-16(b)のタイプ2の場合の荷重Q~沈下量S曲線の比較を示している(ユポ紙の短辺方向を用いた場合)。図-18より、横幅40cmの包み込み補強の全面に剛な真鍮板(45cm×2cm×5cm)で載荷するタイプ2の場合は、タイプ1の場合よりもさらに大きな極限支持力を得られ(ロードセルの容量より $Q=1300\text{kgf}$ (12.74kN)で試験を中止した)、また沈下量も小さくなる(写真-11(b)も参照)。また、盛土の高さについても従来の方法では、主働土圧の増大につながるの制限があるのに対して、本提案法では包み込んだ土塊を安定するように積みかさすればかなりの高さまでもつであろう。以上のことより、地盤の一部を包み込む補強方法は、多種多様な土構造物にも適用可能と考えられる。



#### 4. 鉄道枕木直下の道床バラスト地盤の支持力補強・変形抑制への適用

鉄道枕木直下の道床バラスト粒子の移動が、枕木の有害な沈下の主たる原因であるといわれている。これは道床バラストが地表に近い位置にあるため自重による拘束応力 $\sigma'$ が小さく、せん断強度 $\tau$ も小さいためと考えられる( $\tau_c = \sigma' \tan \phi$ ,  $\sigma' : \text{小} \Rightarrow \tau_c : \text{小}$ )。道床バラスト粒子の移動を防ぐために、現在ジオセルという立体補強材を道床中に設ける方法や固結材を充填するなどの工法がある<sup>15)</sup>。ここでは、鉄道枕木の「土のう」式支持力補強方法を提案する。その原理は、バラストを包み込むと列車荷重などの外力によって包み込んだバラストがダイレイト(膨張)して「土のう」によって拘束反力を受けせん断強度 $\tau_c$ は増加する。これによって道床バラスト地盤の支持力が向上し、枕木の沈下も抑制されることが期待される。

##### (1) アルミ丸棒積層体による2次元モデル地盤の静的載荷試験<sup>16), 17)</sup>

図-19に示すように、実際の枕木(3号)断面の1/2のサイズ(幅12cm, 高さ8.7cm)の模型フーチングを用いて、ここで提案している「土のう」式の補強方法が有効かどうかを、アルミ丸棒積層体の地盤に対して検討した。

道床部の厚さは実際の寸法の1/2のサイズ(8.7cm+12.5cm)とし、直径5mmと9mm, 長さ50mmのアルミ丸棒積層体(混合重量比3:2)を用いた。また、その下の路盤部の厚さは15cmとし、直径1.6mmと3mm, 長さ50mmのアルミ丸棒積層体(混合重量比3:2)を用いた。なお、対象地盤の横幅は60cmとした(実際の鉄道の枕木間隔は通常60cmである)。

図-20は、2段積みの場合の「土のう」の配置図を示す。「土のう」としては、ユポ紙で輪を作りセロテープで補強したものを用いた。なお、「土のう」2段の高さを、枕木下の道床部の厚さ12.5cm(実際の1/2サイズ)に一致するようにした。写真-12(a)は図-20(a)の配置の場合の粒子の移動状況(沈下量 $S=15\sim 20\text{mm}$ )を、写真-12(b)は図-20(b)の配置の場合の粒子の移動状況( $S=20\sim 25\text{mm}$ )を重ね撮り写真で示したものである。図-21はこの場合の荷重 $Q\sim$ 沈下量 $S$ 曲線の実測値を示したものである。(無補強)とは「土のう」を入れなかったもの、(15cm+20cm)とは図-20(a)、(20cm+30cm)とは図-20(b)の「土のう」配置のものを指す。すでに述べたように、「土のう」内部は粒状体のダイレタンシー効果によって極めて高い強度を発揮し、あたかもフーチングの一部ようになって一体化する。したがって、図-21の実測極限支持力は、「土のう」がフーチングの一

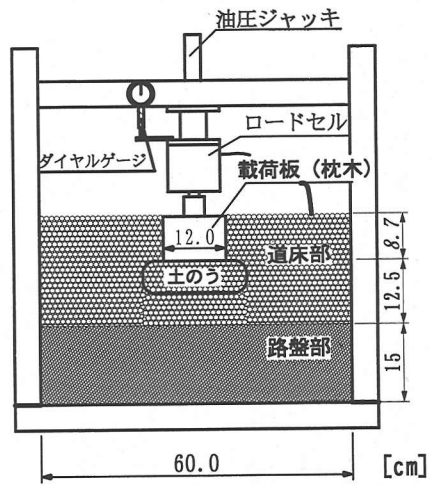


図-19 枕木直下に「土のう」式補強を用いた支持力試験

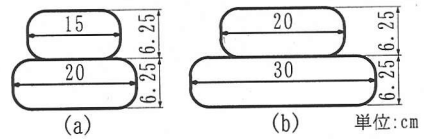


図-20 2段積みの場合の「土のう」の配置図

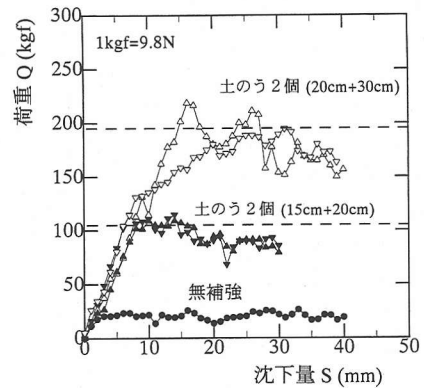


図-21 2段積み「土のう」の場合の荷重 $Q\sim$ 沈下量 $S$ 関係

部として働くと仮定してフーチング幅と根入れ深さが増加するとして算定した支持力公式の計算値とほぼ一致することを確かめている(図中の破線はその計算値を示す。単位体積重量 $\gamma = 2.2\text{gf/cm}^3$ ( $21.56\text{kN/m}^3$ ),  $c=0$ ,  $\phi=25^\circ$ )。なお、 $\blacktriangle$ ,  $\triangle$ 印のプロットは図-20(a), (b)に示す地盤中の長方形の紙の輪の中へ後から粒子を入れたため、少しゆる詰めとなった場合、 $\blacktriangledown$ ,  $\triangledown$ 印のプロットはあらかじめ別の所で紙の輪の中へ粒子を入れて安定させたもの(楕円形状となる)を積んだ場合を示している。図-21の結果から、2段積みの場合の支持力の増加は十分すぎるとの考えに達し、次に「土のう」1個の場合を

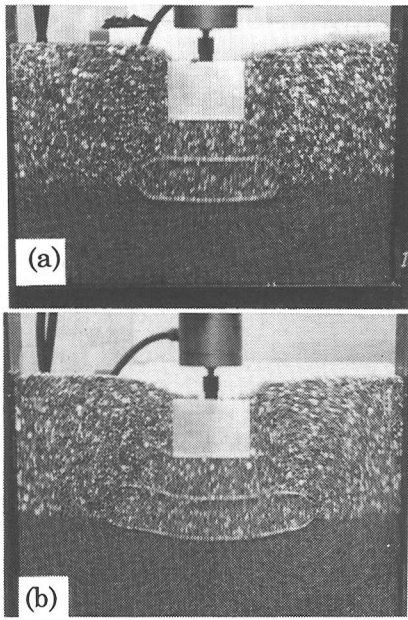


写真-12 2段積み「土のう」の場合の支持力試験時の粒子の移動状況: (a) 15cm+20cm (沈下量  $S=15\text{mm} \sim 20\text{mm}$ ), (b) 20cm+30cm (沈下量  $S=20\text{mm} \sim 25\text{mm}$ )

対象とした。

図-22 は「土のう」1個 (幅 20cm, 高さ 6.25cm) を入れた場合と、「土のう」を入れない無補強の場合の荷重  $Q \sim$  沈下量  $S$  曲線の実測値を示したものである (再現性を見るために、「土のう」1個を入れた3回の支持力試験結果のプロットを示している)。特に3回の中の2回については、沈下量 20mm において一度除荷し、再載荷時の荷重  $Q \sim$  沈下量  $S$  曲線のシャープな立ち上がりの勾配  $dQ/dS$  (大きなバネ係数) に着目した。すなわち、「土のう」を入れて極限支持力を高めると共に、再載荷時の大きなバネ係数の部分を用いれば、無補強での極限支持力を越えた荷重に対しても、沈下の抑制をはかることができると考えられる。

次に、この再載荷時の大きなバネ係数の部分を用いようとすると、1) 多数回の列車荷重を受けて沈下が生じた後に、沈下量を回復させる保守作業をする方法、2) あらかじめ上げ越えられた軌道を大きな振動荷重のもとで締め固めることによって沈下させ、所定の高さに調整する方法などが考えられる。1) の方法の中の沈下量を回復させる保守作業としては、枕木直下にパラストを圧入する方法が従来通りの保守作業において可能であり、最も簡単である。また、現場保守作業には従来からタイタンパーがよく使われているので、タイタンパーの刃が「土のう」袋を破らないように「土のう」は枕木直下から若干離すことが要求される (図-23 参照)。そのため、枕木と「土のう」の間に粒子を入れた場合の支持力試験を実

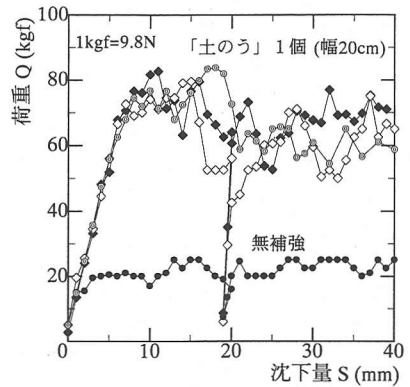


図-22 「土のう」1個の場合の荷重  $Q \sim$  沈下量  $S$  関係

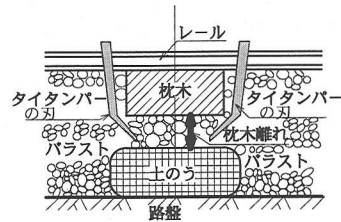


図-23 現場保守作業にタイタンパーを使うイメージ図

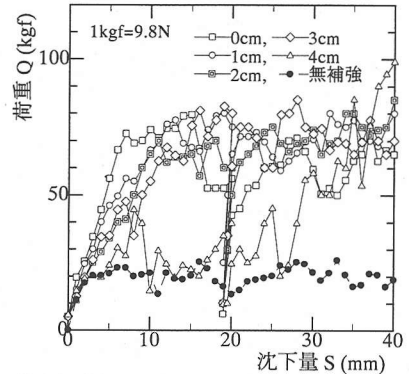


図-24 枕木と「土のう」の間にアルミ丸棒積層体を入れた場合の荷重  $Q \sim$  沈下量  $S$  関係

施した。

図-24 は、枕木と「土のう」の間に 0cm, 1cm, 2cm, 3cm, 4cm の厚さのアルミ丸棒積層体を入れた場合の荷重  $Q \sim$  沈下量  $S$  曲線を、「土のう」を入れない無補強の場合と比較したものである。アルミ丸棒積層体の厚さ 2~3cm 位 (平均粒径の 3~4 倍程度) までは支持力としてはかなり高くなるのが見られる。しかし、厚さ 4cm になると支持力は急に低くなり、沈下量も大きくなっているのが見られる。写真-13(a)~(e) は枕木と「土のう」の間に 0cm, 1cm, 2cm, 3cm, 4cm の厚さのアルミ丸棒積層体を入れた場合の支持力試験時 (沈下量  $S=5 \sim 10\text{mm}$  の時) の粒子の移動状況を示したものである。写真 13(a) に示すように厚さ (0cm) の時には「土のう」はその内部の試料のダイレタンシー効果によって拘束圧  $\sigma'$  が増

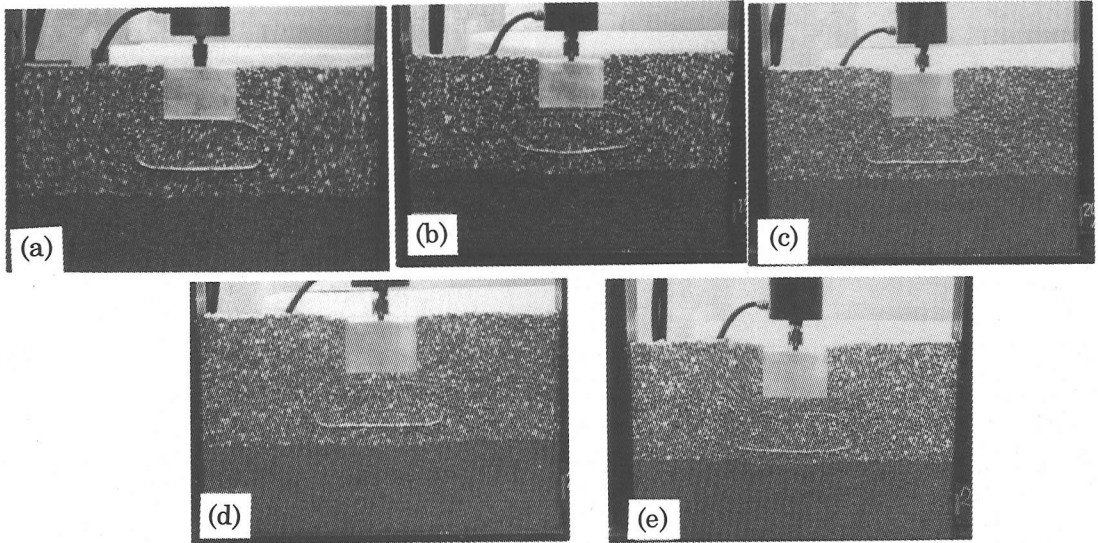


写真-13 枕木と「土のう」の間にアルミ丸棒積層体を入れた場合の支持力試験時の粒子の移動状況 (枕木と「土のう」の間隔: (a)0cm, (b)1cm, (c)2cm, (d)3cm, (e)4cm)

大し、せん断強度  $\tau = \sigma' \tan \phi'$  も大きくなり、あたかも枕木の一部のように挙動しているのがみられる。写真-13(b)~(d)に示すように「土のう」が枕木から2~3cm位まで離す(枕木と「土のう」の間隔を枕木離れと呼ぶ)と、枕木と「土のう」の間に挟んでいるアルミ丸棒積層体は側方移動することなく「土のう」と一体になって枕木を支持している。この効果を「はさみ込み効果」と呼ぶ。しかし枕木離れが平均粒径の3~4倍程度を越えると、枕木と「土のう」の間のアルミ棒の横方向移動が急に顕著となり(特に写真-13(e)参照)、沈下量の増大につながる事がわかった。したがって、枕木と「土のう」の間にバラストを入れるとしても、バラストの平均粒径の3~4倍程度の厚さにとどめるべきであろう。

## (2) アルミ丸棒積層体による2次元モデル地盤の動的 荷重試験<sup>18)</sup>

この試験は動的繰返し荷重下「土のう」の補強効果を調べるためにJR総研において実施した。使用した試験装置と地盤試料であるアルミ丸棒の直径や混合重量比などは4.1で述べた静的荷重試験とほぼ同じであるが、上述の静的荷重試験ではアルミ丸棒の長さが5cmであるのに対して、動的荷重試験では荷重の大きさの関係からアルミ丸棒の長さを24cmとしている。「土のう」(幅20cm, 高さ6.25cm)の材質は実際に補強盛土工法等に用いられるジオグリッド(目合い1.5cm, 破断強度88.2~98kN/m, 破断伸度5%)を用いた。なお、動的荷重圧力は平均29.4kPa, 最大49kPa(補強した場合の静的極限支持力の約1/2), 最小9.8kPaとし、正弦波で周波数を20Hzとした。動的平均荷重圧力29.4kPaというの

は無補強での静的極限支持力(計算では39.2kPa)に近い値であり、「土のう」で補強した場合と無補強の場合の沈下量の差異を大きく出すために設定したものである。無補強と「土のう」による補強(枕木離れ0cm, 2cm, 5cm)の試験を行った。図-25に枕木の沈下量と繰返し回数の関係を示す。無補強の場合には最終的に沈下量が40mm程度なのに対して補強されている場合(枕木離れ0cm)は3mm程度と1オーダー小さくなる事が分かる。また、図-26より2cm程度枕木離れであれば、かえって沈下量が減少するのが見られるが、枕木離れが大きくなると(5cm), 沈下量が大きくなり安定するまでの繰返し荷重回数も多くなるのが見られる。なお、図-26において枕木離れ2cmの場合の沈下量が枕木離れ0cmの場合よりわずかに小さいのは、枕木と「土のう」の間にはさまれた粒子が「はさみ込み効果」によって「土のう」と一体化して全体の根入れ効果が大きくなったためとも考えられる。

## (3) 6号碎石による3次元モデル地盤の模型実験<sup>19)</sup>

### a) 6号碎石をバラストとする枕木の静的荷重試験

用いた試験機としては名古屋工業大学にある大型簡易一面せん断試験機の垂直荷重載荷部を利用した。図-27は支持力模型試験土槽の概略図である。路盤部として用いた砂の最大粒径, 平均粒径, 初期間隙比はそれぞれ2.5mm, 0.6mm, 0.71であり、道床部とした6号碎石の最大粒径, 平均粒径, 初期間隙比はそれぞれ20mm, 8mm, 0.69である。荷重板(枕木)は実物断面の約1/2サイズ(幅12cm×高さ8.5cm×長さ60cm)で、「土のう」袋も1/2

サイズ (20 cm×20 cm×7.5 cm) のジオグリッド (目合い 1.5 cm, 破断強度 88.2~98kN/m, 破断伸度 5%) を使用した。無補強の場合と「土のう」1個で補強した枕木離れ 0cm, 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm, 12cm, 14cm の場合の計 9 種類の試験を行った。図-28 は無補強の場合と「土のう」を設置した場合の荷重Q~沈下量S曲線を示したものである。同図より、次のことが見られる。(a) 3次元モデル地盤の場合でも、「土のう」によって補強した場合 (枕木離れ 0cm) の支持力は無補強の場合に比べて約 2 倍程度上昇する。(b) 枕木離れ 4cm の場合の支持力が最も大きく、枕木離れがそれ以上になると支持力が減少していく。この理由は、4cm 以下の場合には枕木と「土のう」の間にはさまれた粒子が摩擦によってあまり動かず (前述の「はさみ込み効果」)、はさまれた粒子が「土のう」と一体化して、全体が根入れの大きな基礎のようになっているが、その範囲を越えると枕木と「土のう」の間の粒子が動いて側方に逃げるためと考えられる。さらに枕木と「土のう」を離すと、スベリ線が「土のう」の上を通して「土のう」が入っていない状況と変らなくなる。なお、枕木離れ 0cm, 2cm の場合の支持力の方が、枕木離れ 4cm の場合の支持力よりも小さいのは、上記のような「はさみ込み」による根入れ効果が小さいためと考えられる。また、試験終了後に碎石を掘り出し、枕木離れを測定した。枕木離れ 4cm 以下の場合にはそのまま残り、枕木離れ 4cm 以上の場合には最終的に約 4cm まで間隔が狭まっていることが観察された。(c) 図-28 中の破線は Terzaghi の支持力式による無補強の場合の計算値 (2次元解析) と枕木離れ 4cm の場合の計算値 (3次元効果を考慮した解析) を示したものであるが、試験結果はそれぞれの計算値とよく一致している ( $G_s=2.67, e_s=0.69, \gamma=1.58\text{gf/cm}^3=15.48\text{kN/m}^3, \phi=44^\circ$ )。 (d) 「土のう」で補強した場合の再載荷曲線の立ち上がりの勾配  $dQ/dS$  は、無補強の再載荷曲線の立ち上がりの勾配  $dQ/dS$  とほぼ同じであり、初期載荷曲線の立ち上がりよりも急な角度になる。これより、「土のう」で補強した場合には、無補強での支持力を越えた荷重に対しても、沈下を抑制できると考えられる。

### b) 動的荷重下の枕木離れの測定

枕木離れ 4cm は動的荷重においても有効かどうかを検討するために、静的荷重に加えて振動荷重も載荷してみた。図-29 は動的試験の様子を示したものである。まず剛な鉄板を置き、その上に 2 個の 1/2 サイズの「土のう」を並べ、枕木離れを約 7cm として枕木を設置し、実験を行った。「土のう」を 2 個並べたのは、振動荷重による枕木の安定を考慮したものである。振動荷重を作用させるため、2 個の振動機 (周波数 30Hz, 加振力 300kgf (2.94kN)) を用いた。枕木の中心に静的荷重 5000kgf (49kN) を載荷したまま約 15 分間 (27,000 回)

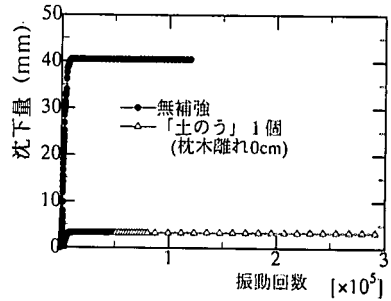


図-25 アルミ丸棒積層体による動的載荷試験 無補強と「土のう」による補強の比較

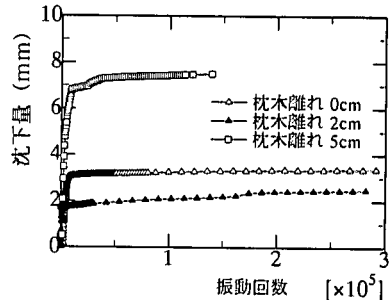


図-26 アルミ丸棒積層体による動的載荷試験 枕木離れの影響

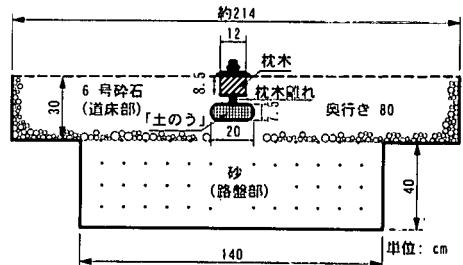


図-27 支持力模型試験土槽概略図

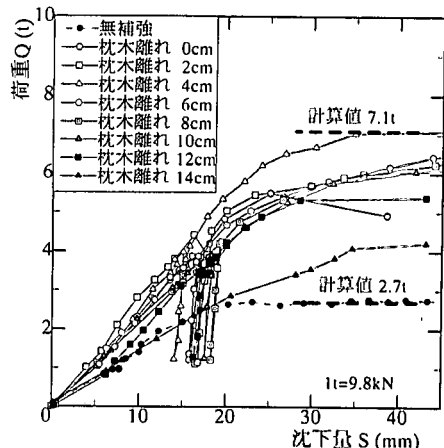


図-28 6号碎石の場合の荷重Q~沈下量S曲線

振動を与え、試験終了後に静的試験の場合と同じように碎石を掘り出して枕木離れを測定したところ、約 4cm であった (写真-14)。

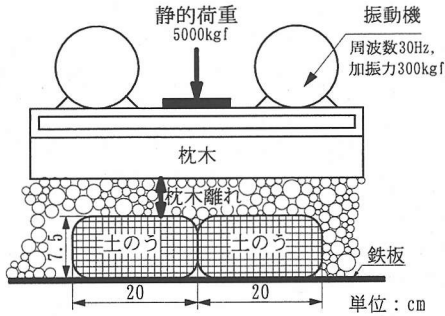


図-29 動的荷重の場合に枕木離れを測定概略図

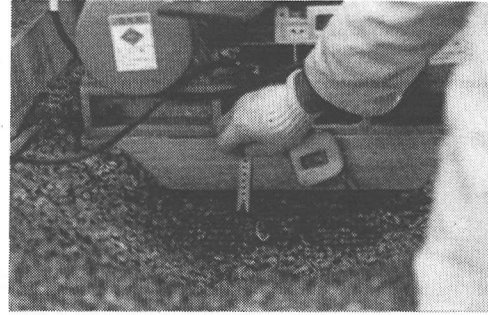


写真-14 6号砕石振動荷重後枕木離れを測定(約4cm)

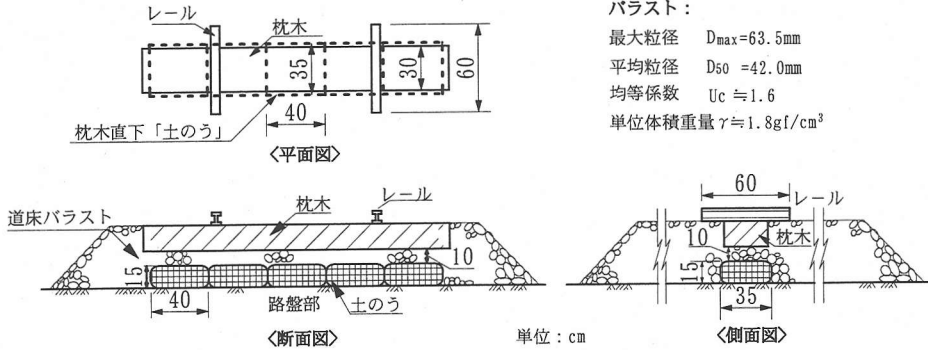


図-30 J R総研内における実物大模型実験概略図

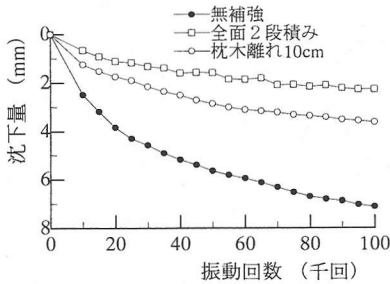


図-31 10万回動的載荷時の累積沈下量～振動回数関係

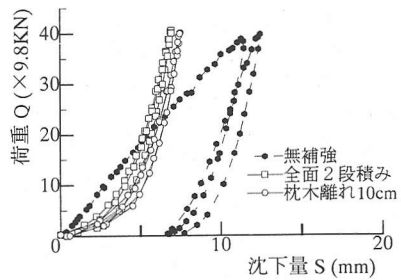


図-32 10万回動的載荷後の静的荷重Q～沈下量S曲線

鉄道軌道の保守工事に従来通りのタイタンパーを使用するためには(図-23参照)、実際の現場では8cm～13cm程度の枕木離れが必要となる。この値は、タイタンパーの刃の長さ(短いもの:25cm,長いもの:30cm)と枕木高さの差によって決まってくるものである(枕木高さを17cmとすれば、刃の長さによって枕木離れは8cm～13cmとなる)。今回の模型試験によって得られた有効な枕木離れは約4cmであったが、これを6号砕石の平均粒径 $D_{50}$  = 0.8cmと比較すれば5倍となる。現場の実際のバラストの $D_{50}$  = 3～4cmであるので、現場での枕木離れの限界値は(3～4cm) × 5倍 = 15～20cmとなるが、少し安全側にみて実際の施工で提唱される枕木離れは、バラストの $D_{50}$ にもよるが10～15cm(平均粒径の3～4倍程度)と考えられる。

#### (4) J R総研における実物大の模型実験<sup>20)</sup>

鉄道枕木の「土のう」式支持力補強方法が実物大のモデル軌道と実際のバラストの場合に有効かどうかを検討するために、J R総研内の総合路盤試験装置によって動的載荷試験を行った。まず十分締め固めた路盤上にバラストを詰めた「土のう」(長さ35cm×幅40cm×高さ15cm)5個を設置し、その上に厚さ10cmのバラスト(枕木離れ10cm)か高さ10cmの薄型「土のう」5個(2段積みの場合)を設置した。さらに、その上に大判枕木(210cm×30cm×14cm)1本および長さ60cmの2本のレールを敷設し、動的荷重(平均166.6kN,最大313.6kN,最小19.6kN,正弦波で周波数20Hz)を10万回載荷し、軌道の沈下量を測定した。この試験の概略を図-30に示し、



累積沈下量～振動回数関係を図-31に示す。図-31より、「土のう」2段積みの場合には路盤面から直接支持する形になるので累積沈下量が無補強の場合の約1/4になり、枕木離れ10cmの場合には「はさみ込み効果」によって累積沈下量が無補強の場合の約1/3になり、かなりの沈下抑制効果が確認された。また、同図の沈下曲線の傾きより、補強した場合の沈下が止まるまでの振動回数は無補強の場合より少ないと思われる。次に、軌道のバネ係数の傾向を調べるために、10万回繰返し載荷後静的載荷試験を実施した。その結果を図-32に示す。無補強の場合、10万回繰返し載荷後に一度突き固めを実施したため、静的載荷試験の直前において、バラストは「土のう」で補強した場合より少し締固まっている。したがって、載荷重 $Q$ が小さい時、「土のう」効果が発揮されるまでの載荷曲線の傾き（剛性）は補強した場合の方が小さくなっていると考えられる。しかし、「土のう」で補強した場合の再載荷曲線の立ち上がりの勾配 $dQ/dS$ は、「土のう」2段積みと枕木離れ10cmによらず、無補強の除荷後の立ち上がりの勾配 $dQ/dS$ とほぼ同じ傾向が見られる。無補強の場合の再載荷曲線の立ち上がりの勾配 $dQ/dS$ は軌道構造というバネ係数に相当するものである。図-32より無補強、補強ともバネ係数はほぼ同程度であり、補強した箇所において軌道のバネ係数が急激に変化することはないと考えられる。このことは列車の乗心地や騒音と関係して重要である。

今後、まずJR東海内の在来線においてレール継ぎ目部分の枕木下に「土のう」を設置して、この補強方法の施工性や実際の適用性を検討する予定である。

## 5. まとめ

本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

(1) 地盤の一部を包み込む「土のう」式補強方法がフーチングの支持力補強模型実験などにより有効な方法であることが見い出された。その原理は、載荷重によって生じるダイレイタンスーによって「土のう」の内部の土が体積膨張しようとするが、「土のう」で包まれているため反力を受けて、「土のう」の内部の土の有効応力 $\sigma'$ が増加するというものである。すなわち、 $\sigma'$ が増加すれば土のせん断強度式 $\tau_p = \sigma' \tan \phi$ より「土のう」の内部の土の強度も増加して、「土のう」全体が根入れのある大きな基礎のように働いて支持力が飛躍的に増加する。いわば地盤の「敵」である載荷重（外力）を利用して地盤の強化を図る一敵を味方にするものである。

(2) 補強部分が大きい場合は1つの大きな「土のう」を用いるよりも小さな「土のう」に分割して包み込む方が、早く反応し、極限支持力が得られるまでの沈下量が

少なく有効であることがわかった。

(3) 現場への適用例として、鉄道枕木の「土のう」式支持力補強方法の有効性と実用性を模型実験により確認した。ここで行なった実験の範囲内でまとめると、①「土のう」補強によりアルミ丸棒積層体モデル地盤や6号砕石をバラストとするモデル地盤の支持力は無補強に比べて少なくとも2倍以上大きくすることができる（「土のう」のサイズによってはさらに大きくできる）。②「土のう」補強により振動荷重による枕木の沈下量が、アルミ丸棒積層体モデル地盤の場合には無補強に比べて1/10程度に低減、実際のバラスト地盤の場合には無補強に比べて1/3程度に低減できることが分かった。したがって、「土のう」補強により鉄道バラスト地盤の支持力の増加と共に沈下の抑制も期待できる。③実際のバラスト地盤に対して10～15cm程度（バラストの平均粒径3～4cmの3～4倍程度）の枕木離れ（枕木と「土のう」の間隔）の場合は枕木とバラストと「土のう」のそれぞれの間の摩擦によってバラストの移動が阻止され一体となることがわかった。これによって、鉄道軌道の保守工事に従来通りタイタンパーを使用することが可能となる。

(4) 従来の「土のう」は土が流されないために包むという考え方であったが、ここでは土のような粒状体のダイレイタンスー特性に着目して土を包み込むことの力学的意義を再考し、実験を重ねた結果、「土のう」自体をフーチングや杭のような荷重支持体とみることでもできるということがわかった。このような「土のう」に対する積極的な見方は、本来バラバラの粒子の集合体である土の補強方法として、今後様々な分野で有効に利用できると思われる。

**謝辞：**実験を共に行い、様々な議論をし合った本学卒業生高木信宏、西井正浩、奥田信、岩井慎一郎、宮本久仁彦、西村剛、小野哲治、瀧澤剛、佐伯務、伊東究、植田哲志、中村善一郎の各氏に謝意を表す。またJR総研の館山勝博士、小島謙一氏とJR東海身延工務区の可知隆区長の御協力に感謝します。

## 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、III-577、pp.1194-1195、1992。
- 2) 平尾和年、安原一哉、榎橋由彦、落合英俊、安福規之：ジオグリッド敷設による軟弱地盤の支持力改良、土木学会論文集、No.582/III-41、pp.35-45、1997.12。
- 3) 楊俊傑、落合英俊、林重徳：ジオグリッド補強基礎地盤の支持力特性に関する実験的研究、土木学会論文集、No.499/III-28、pp.117-126、1994.9。

- 4) 斜面・盛土補強土工法技術総覧, (株) 産業技術サービスセンター発行, pp.435-488, 1995. 9.
- 5) 山口柏樹: 土質力学, 技報堂, p334, 1993.
- 6) 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, III-544, pp. 1142-1143, 1993.
- 7) 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, III-392, pp. 774-775, 1994.
- 8) 山本修一: 個別要素法による粒状体の力学挙動に関する基礎的研究, 名古屋工業大学博士論文, pp. 108-109, 1995.
- 9) 山本修一, 松岡元: DEM による「土のう」の圧縮試験と「土のう」式支持力増加試験のシミュレーション, 第 30 回地盤工学研究発表会, pp. 1345-1348, 1995.
- 10) Binquet, J. and Lee, K. L.: Bearing Capacity Tests on Reinforced Earth Slabs, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101(GT12), Proc. Paper 11792, pp.1241-1255, 1975.
- 11) Binquet, J. and Lee, K. L.: Bearing Capacity Analysis of Reinforced Earth Slabs, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101(GT12), Proc. Paper 11793, pp.1257-1276, 1975.
- 12) Huang, C.C. and Tatsuoka, F.: Bearing Capacity of Reinforced Horizontal Sandy Ground, *Geotextiles and Geomembranes* 9, pp.51-82, 1990.
- 13) 宮本久仁彦, 松岡元, 西村剛: 鉛直盛土地盤の包み込む補強方法, 土木学会第 48 回年次学術講演会, III-545, pp. 1144-1145, 1993.
- 14) 土質工学会: 補強土工法, p. 109, 1986.
- 15) 須長誠: 鉄道における土構造物の研究の現状と今後の課題, 鉄道総研報告, Vol.12, No. 4, pp. 1-6, 1998. 4.
- 16) 松岡元, 伊東究, 植田哲志, 佐伯務, 劉斯宏: 鉄道枕木の支持力補強方法に関する基礎的研究, 第 31 回地盤工学研究発表会, 1274, pp. 2547-2548, 1996.
- 17) 伊東究, 松岡元, 植田哲志, 佐伯務, 劉斯宏: 鉄道枕木の「土のう」式支持力補強方法に関する基礎的研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会, III-B308, pp. 616-617, 1996.
- 18) 神崎一人, 可知隆, 松岡元, 館山勝, 小島謙一: 鉄道マクラギの支持力補強方法に関する載荷試験, 第 32 回地盤工学研究発表会, 1249, pp. 2503-2504, 1997.
- 19) 松岡元, 劉斯宏, 植田哲志, 中村善一郎: 砕石地盤上の鉄道枕木の「土のう」式支持力補強方法に関する模型試験, 第 33 回地盤工学研究発表会, 1186, pp. 2377-2378, 1998.
- 20) 可知隆, 宮本秀郎, 松岡元, 館山勝, 小島謙一: 鉄道マクラギの支持力補強方法に関するモデル試験, 土木学会第 52 回年次学術講演会, IV-388, pp. 776-777, 1997.

(1998. 7. 2 受付)

## BEARING CAPACITY IMPROVEMENT BY WRAPPING A PART OF FOUNDATION

Hajime MATSUOKA and Sihong LIU

Based on the idea of wrapping a part of foundation like a soilbag, a new reinforcing method for bearing capacity is proposed. The validity of this method is illustrated by the results of the model footing tests and the model vertical embankment tests. Then, as an application example in the real engineering practice, a reinforcing method utilizing soilbags for the ballast foundation under the railway sleeper is stated and its validity is demonstrated by model tests. So far, the soilbag has been mainly used to prevent a flow of soils from water. In this study, however, the mechanical meaning of the soilbag is studied on the basis of the dilatancy characteristics of granular materials and it is found that the soilbag may be used as a load supporting body such as a footing or a pile.