ジオグリッドで補強された水平砂地盤 の支持力特性の載荷速度依存性

平川大貴¹・Warat Kongkitkul²・龍岡文夫³

ポリエステルジオグリッドを敷設して補強した水平地盤の支持力特性における粘性挙動を検討するため、無補強の豊浦砂地盤と補強砂地盤の室内平面ひずみ模型載荷実験を行った。以下の知見を列挙する。1) 地盤の基礎鉛直初期載荷に対する剛性と最終支持力は引張り補強によって大きく増加するが、弾性的剛性も若干増加する。2) 弾性的剛性は、補強の有無によらず基礎接地圧の増加に対してべき乗則に従って増加する。3) 補強の有無によらず、地盤の支持力特性には載荷速度依存性がありクリープ変形を示し、全体的な弾粘塑性挙動は材料のものと同様である。4) 一定沈下速度での単調載荷の途中で沈下速度を急変させると基礎平均接地圧と底面での局所接地圧は急変する。沈下速度の変化比の対数に対する基礎接地圧の変化率の比を速度感応係数 β と定義すると、その値は無補強と補強地盤で類似であり豊浦砂の三軸圧縮試験から得た値とも類似であるが、補強材（ポリエステル）の引張り試験から得た値よりも遙かに小さかった。5) 詳細にみると、側方伸びひずみに対する拘束が強い場合ほど β の値は小さくなる傾向にあることから、豊浦砂の β の値に対する応力経路の影響があることが示唆された。これらの実験結果は、砂とジオグリッドの弾粘塑性を表現できる非線形三要素モデルに基づいた数値解析によって、補強砂地盤の載荷に伴う即時沈下の載荷速度依存性と荷重保持載荷による残留沈下を予測可能であることを示している。

キーワード：水平地盤、支持力特性、剛性、粘性

1. はじめに

水平地盤中に高分子補強材を水平に敷設することによって、地盤の剛性と支持力は大幅に向上する¹⁾。一方、ジオテキスタイル補強土構造物を変位に対して厳しい条件が要求される重要構造物の支持構造物として適用するためには、極限支持力だけでなく即時変形や死荷重等による残留変形特性に優れている必要がある。この即時・残留変形を精度良く予測するためには、地盤材料²⁾だけと高分子補強材³⁾の弾性・塑性・粘性等の物性及び境界条件・進行性破壊の影響を考慮する必要がある。

本研究では、ジオテキスタイルで補強された水平砂地盤の支持力特性（特に変形特性）を、無補強地盤の支持力特性と比較して検討した結果を報告する。

2. 実験概要および構成材の力学物性

(1) 実験概要

図-1a に示す平面ひずみ土槽（長さ 180 cm×奥行き 40 cm）内に、多重ふるい落下装置を用いて初期相対密度 D_r = 約 90 %、深さ 65 cm の気乾豊浦砂の水平地盤を構築した。地盤の補強には、地表面から 5 cm の鉛直間隔でグリッド状の補強材（長さ・奥行きともに 40 cm）を水平に 3 層敷設した（図-1b）。模型地盤と補強材の剛性比を考慮

して、現場で盛土等の簡易補強に用いられている基布素材ポリエステルの高分子補強材から縦横ストランドを 1 本ずつ間引いた。この結果、縦横目あいはともに 1.8 cm (Covering ratio^{1), 4)}:CR = 4.75%) となった。本ジオグリッドの製品基準強度は、オリジナルの形状に対して 4 ton/m である。ストランド・リブ幅は、ともに 1 mm である。

土槽側壁の摩擦は、高真空グリース（厚さ 30 μ m）とラテックスメンブレン（厚さ 0.3 mm）を用いて軽減した。底面が粗で剛な帯基礎を用いて、地盤を鉛直に載荷した。帯基礎と載荷軸の間に楔を設置して、模型地盤の降伏によって偏心荷重が生じても基礎に回転モーメントが生じないようにした。一定沈下速度での単調載荷の途中で微小な繰返し載荷、荷重保持載荷、やや大きな荷重振幅での繰返し載荷、応力緩和や載荷速度急変を繰り返した。

(2) 砂・補強材の剛性・粘性特性と非線形三要素モデル

このような模型補強地盤内でのひずみと応力分布は非常に非一様になり、破壊も進行的に生じる。従って、模型地盤の粘性挙動を検討するためには、基本情報として構成材である豊浦砂と高分子補強材（ポリエステル）の基本的な剛性と粘性を理解しておく必要がある。

¹⁾IGS正会員，東京理科大学理工学部土木工学科、助手（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

²⁾JGS正会員，東京理科大学理工学部土木工学科、ポストドクトラルフェロー（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

³⁾IGS正会員，東京理科大学理工学部土木工学科、教授（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

図-1 実験概要；a) 土槽&基礎寸法、b) 補強材の敷設状況

図-2 豊浦砂の材料粘性特性⁵⁾(三軸試験結果)

図-2は、豊浦砂(気乾, 初期 D_r 約 90%, 初期高さ 20 cm × 断面 7.8 cm 角)を用いた二つの三軸圧縮試験の結果⁵⁾である。 $K = \sigma'_h / \sigma'_v = 0.344$ で異方圧密した後、 $\sigma'_h = 40$ kPa (一定)で三軸圧縮している。図-2は「一定軸ひずみ速度での単調載荷の途中で微小な繰返し載荷を何回も繰返した実験」と「ひずみ速度の急変を繰返し何回かの荷重保持載荷を行った実験」から得た偏差応力～軸ひずみ関係である。図-3は、空気中でポリエステル補強材の引張り試験で求めた張力～ひずみ関係であり、一定ひずみ速度での単調載荷の途中で何回かひずみ速度を急変し、荷重保持載荷と応力緩和試験を一回ずつ実施している。この引張り試験では、ローラーランプを用い JIS L 1908 に準じて実施している。これらの図から、構成材の変形特性として次のことが分かる。

- 1) 10^{-3} %以下の微小なひずみ振幅に対する豊浦砂の変形特性は極めて弾性的であり、軸ひずみに対して定義した弾性ヤング率は軸応力の増加に従って増加する(図-2)。
- 2) 粘塑性挙動の強い高分子補強材でも、砂と同様に荷重レベルに依存する弾性的変形特性を示す³⁾。
- 3) 豊浦砂・ポリエステル補強材は、粒状体と高分子繊維材という全く異なる構造体であるが、その強度変形

図-3 ポリエステル補強材の材料粘性特性³⁾

図-4 非線形一般三要素モデル；a) 粒状体²⁾、b) 高分子補強材³⁾

特性には多かれ少なかれ類似な粘性挙動(載荷速度依存性やクリープ、応力緩和現象)が含まれている。砂とポリエステルの粘弾塑性強度変形特性は、図-4に示す非線形三要素モデルで表現できることが分かっている^{2)、3)、6)}。

境界値問題である砂地盤上の浅い基礎の支持力特性にも砂の粘性が反映されることが示されている⁶⁾。本研究では、ジオテキスタイルで補強した水平砂地盤上の浅い基礎の即時沈下特性と载荷速度依存性（一定荷重の持続载荷による基礎の残留沈下特性を含む）を定量的に測定して、無補強地盤の場合と比較する。その結果を、非線形三要素モデルの枠組みで解析する。

3. 実験結果および考察

(1) 補強/無補強水平地盤上の浅い基礎の支持力特性

図-5aに補強/無補強地盤の基礎平均接地圧 q ～基礎沈下 s 関係を、図-5bに $q = 50 \sim 250$ kPaの範囲での拡大図を、図-6に基礎（幅 $B = 10$ cm）の底面での幅2 cm毎の局所摩擦角 $\delta \sim s$ 関係を示す。また、図-7に単調载荷の途中での微小な繰返し载荷から求めた等価線形剛性 k_{eq} （バネ係数）を示す。これらの図から、次のことが分かる。

- 補強によって地盤の極限支持力は大幅に増加した。
ピーク前の $q \sim s$ 関係での接線剛性も増加している。
- 補強地盤での基礎底面の局所摩擦角 δ は、補強地盤での値よりも大きい傾向がある（図-6）。特に、補強地盤での基礎底面両端のNos. 1 & 5での δ は非常に高い値に達している。また、無補強地盤では、 δ はピーク値を示した後に低下するという軟化傾向を示すが、補強地盤ではその傾向は見られない。

- 補強/無補強地盤に共通して、基礎沈下速度が急変すると q が急変し、荷重保持载荷時には基礎のクリープ沈下が生じ、基礎を固定すると基礎荷重が緩和する、という明確な粘性挙動を示す。
- 補強/無補強地盤に共通して、荷重保持载荷と応力緩和後に単調载荷を再開すると極めて高い剛性を示す（図-5a & 5b）。その剛性は、弾性挙動時の剛性に近い（図-7）。

無補強地盤内では、基礎直下に集中して水平方向に最大伸びひずみが発生する（Poisson 効果）。一定の拘束圧下では、粒状体の応力～ひずみ関係の接線剛性はひずみが増加してせん断破壊に接近するほど低下する。その一方、拘束圧の増加によって接線剛性は上昇する。この二つの要因が釣り合うと、応力～ひずみ関係は線形に近くなる^{6), 7)}。このような特性は、無補強でも载荷初期（図5b）に現れているが、補強地盤ではピーク前全体で明確に現れている。すなわち、a) & b)の挙動は、基礎直下の地盤の水平伸びひずみを基礎直下に敷設した引張り補強材が拘束することによって地盤内の拘束圧が上昇し、その結果支持力特性が大幅に向上したためである（引張り補強メカニズム¹⁾）。この補強効果は、結果として基礎直下のすべり面発生を抑制する。本実験での補強材長は40 cmと、基礎幅10 cmよりも大きい。深い位置の補強

図-5 基礎の平均設置圧～沈下関係(拡大図)

図-6 基礎底面の摩擦角～沈下量関係；a) 補強土、b) 無補強水平地盤

材では、基礎幅の外にある部分も一定の範囲で基礎荷重を分散する効果 (slab effect¹⁾) を発揮する。しかし、浅い補強材で基礎幅の外にある部分は、上記の引張り補強メカニズムを有効に発揮できない。補強材の沈下抵抗を増すというアンカー効果⁸⁾ を発揮できるが、この効果は基礎の沈下が小さい時には期待できない。

c) & d) の挙動は、砂とジオテキスタイルの材料実験での弾粘塑性的挙動 (図-2&3) と定性的に一致している²⁾。一方、本模型実験のような境界値問題では、地盤・補強材内のひずみと応力の分布は極めて非一様で複雑である。それに関わらず、このような定性的に一致するのは、補強地盤の弾粘塑性的挙動に砂とジオテキスタイルの弾粘塑性が反映していることを示している。このことを確認するために、次節で材料試験により材料の弾粘塑性を解析した方法を用いて、補強/無補強地盤の剛性と粘性を定量的に評価し、これらに対する境界条件・地盤の進行性破壊の影響を検討する。この結果から、材料の弾粘塑性モデルに基づいて補強土構造物の弾粘塑性的挙動の数値解析を合理的に実施する見通しを得る。

(2) 材料試験と模型実験での剛性と粘性の比較

図-5 に示すように、基礎平均接地圧 q の増加に伴い地盤内のせん断応力 (ひずみ) が増加しても、微小なひずみ振幅での载荷に対しては弾性を示す。図-7 に示すように、補強/無補強地盤の弾性的剛性 (等価線形バネ係数 k_{eq}) は設置圧 q の増加に伴って増加する。補強地盤の方が無補強地盤により k_{eq} が大きいのは、補強効果による地盤内の拘束圧増加のためであろう。一方、要素試験に結果に基づいて砂礫の非線形歪弾性モデル^{2), 9)} (図-4 参照) が提案されている。このモデルを参照して、 k_{eq} は q の関数であるとしてフィッティングした結果を図-7 に示す。補強材の有無に関わらず、 k_{eq} は q のべき乗則に従っている。

次に、基礎沈下速度の非弾性成分 s^p の速度 ds^p/dt の急変により生じた基礎平均接地圧の変化量 Δq を求めた。沈下速度急変前後の値の比 $(ds^p/dt)_{after} / (ds^p/dt)_{before}$ が同じでも、それが生じた時の q の値によって応力増分比 $\Delta q / q$ の値が若干異なることが分かったため、図-8 のように比 $\Delta q / (q + q_c)$ を $\log \{ (ds^p/dt)_{after} / (ds^p/dt)_{before} \}$ に対してプロットした。ここで、 q_c は定数 (無補強地盤: 62 kPa, 補強地盤: 88 kPa) である。基礎平均圧力 $q = 0$ の時でも地盤内では主応力比 $R (= \sigma_1 / \sigma_3) = 1.0$ ではなく $1 / K_0$ であることが考えられるため、 q_c は初期地盤圧の補正值としている。このような整理によって補強/無補強の区別なく、両者には q の値によらない一義的な関係があり、それぞれ高い線形性を示すことが分かる。材料試験の場合を参照して、この線形関係の勾配を速度感応係数 β (粘性を表す) として、その値を算出した (図-8 参照)。図-9 は、補強地盤と無補強地盤に対して基礎底面に配置された分割ロードセルで測定された幅 1 cm での局所接地圧 (q_{local}) を用いて同様な解析をした結果である。ただし、 $(q_{local})_c$ は図中に示した値とした。図-9 では図-8 での q を $(q)_{ave}$ と表現

図-7 等価線形剛性 (バネ値換算) ~ 応力レベル関係

図-8 基礎の平均鉛直応力から算出した速度感応係数 β (= 粘性パラメータ)

図-9 基礎底面の局所的な速度感応係数 (β)_{local} : a) 補強地盤、b) 無補強地盤¹⁰⁾

している。この場合も、それぞれに高い線形性があり β が求まる。図-8&9から次のことが分かる。

- 1) 基礎平均接地圧と局所的接地圧で求めた何れの場合でも、補強地盤の β の値は無補強地盤よりも若干小さい。
- 2) 基礎中心部の局所的接地圧で求めた β の値は、基礎端部での局所的接地圧で求めた値よりも若干小さい。

この傾向は補強地盤の方が強い。

これらの結果は、基礎直下の地盤内での水平伸びひずみの拘束度が、基礎底面での位置と地盤補強の有無の影響を受けるためと考えられる。以下具体的に考察する。

図-10 に鉛直応力 σ_v と水平応力 σ_h の応力面上で、ある応力・ひずみ条件の下で非可逆鉛直ひずみ速度がある比率で増加した時の応力状態の変化をa→bで模式的に示す。この応力変化は、せん断降伏に対する降伏曲線の変化と圧縮降伏に対する降伏曲線の変化を伴っている¹⁰⁾と考える。今、側方に伸び変形して $-\dot{\epsilon}_h$ が大きくなることに対する拘束が強いほど、せん断降伏よりも圧縮降伏が卓越する。例えば、 $\dot{\epsilon}_h = 0$ での一次元圧縮変形の場合は $\dot{\sigma}_h = 0$ での圧縮変形の場合よりも、この側方拘束が強い。このため、側方伸び変形に対する拘束が強い方がひずみ速度を急増した時の応力経路はより時計回りの方向になる(図-11)。このとき、同一の鉛直ひずみ変化率に対して、側方伸び変形に対する拘束が強いほど鉛直応力の変化率が小さくなるならば、上に示した実験結果を説明できる。即ち、

- a) 補強地盤の方が補強材の働きにより側方伸び変形に対する拘束が強いから、一次元圧縮により近い状態になる。
- b) 基礎底面直下では、基礎中央に近いほど側方伸び変形に対する拘束が強くなるから、一次元圧縮により近い状態になる。

これらの結果は、粘弾塑性特性を持つ土構造物の変形予測を行うためには、粘性に対する応力経路の影響を考慮する必要があることを示している。

図-12 は、無補強及びジオテキスタイル補強地盤の支持力実験から得られた粘性と豊浦砂の三軸圧縮試験とポリエステル補強材の引張り試験から得られた粘性の比較である。模型実験では基礎の沈下特性から粘性を求めているためと思われるが、模型実験から求めた β の値は豊浦砂の三軸圧縮試験から求めた β の値と類似である(なお、この値は平面ひずみ圧縮試験から求めた値と類似である)。一方、模型実験から求めた値はポリエステルの引張り試験から求めた値よりも遙かに小さい。これは、補強地盤の粘性挙動に対してポリエステルの粘性は間接的に関連しているためであろう。なお、土構造物の裏込材としては、豊浦砂よりも粒度分布が良い砂礫が用いられることがある。従って、上記の現象に対する盛土材の影響も検討する必要がある。

以上示したように、無補強及びジオテキスタイル補強地盤が示した弾粘塑性変形特性は、全体としては材料(豊浦砂とジオテキスタイル)の弾粘塑性挙動と強い類似性が見られる。このことから、材料の非線形三要素モデルを用いた数値解析によってこれらの模型実験の結果

図-10 ひずみ速度の急変に伴う応力状態の変化a→bとその解釈の模式図

図-11 異なる拘束条件下でのひずみ速度の急変に伴う応力状態の変化の模式図

図-12 模型実験と材料実験での速度感応係数 β の比較

を解析できるはずである。

4. まとめ

本論文で得られた重要な知見を以下に列挙する。

- 1) 無補強地盤上の直接基礎直下の地盤内に、集中して水平方向に最大伸びひずみが発生する(Poisson効果)。この伸びひずみを拘束するように基礎直下に引張り補強材を敷設することにより、地盤内の水平伸びひずみの発達とそれに伴うせん断破壊の発

生を拘束できて、支持力特性は大幅に向上する。

- 2) 引張り補強材の敷設によって、地盤の弾性的剛性もある程度増加する。また、補強/無補強地盤に共通して、弾性的剛性（バネ係数）は地盤材料と同様に基礎平均接地圧のべき乗則に従って増加する。
- 3) 補強/無補強地盤に区別なく、荷重保持載荷時に明確な残留沈下が生じる。これには、地盤材料（砂）と補強材（ジオテキスタイル）の材料粘性が強く反映していると思われる。
- 4) 無補強地盤と補強地盤の単調載荷の途中で基礎の沈下速度 $\dot{s}$ が急増すると基礎平均接地圧 q は急増する。 $\dot{s}$ の同一の増加率に対する q の増加率は、補強地盤の方が無補強地盤よりも若干小さかった。また、基礎底面の局所的な接地圧から求めた β の値は、基礎中心に近いほど小さかった。これは、全般的に側方伸びひずみに対する拘束が強く、応力経路が一次元圧縮条件での応力経路に近いほど β の値が小さくなることを示唆している。
- 5) 補強地盤の β の値は無補強地盤の値と類似であり、かつ豊浦砂の三軸圧縮試験から求めた値とも類似がある。その一方で、ポリエステルの引張り試験から求めた値よりも遙かに小さい。これは、基礎の沈下特性から求めた β の値には、豊浦砂の物性が直接反映しているためであると推察される。

以上のことから、補強/無補強地盤に区別無く、支持力特性における載荷速度に依存する即時沈下特性と荷重保持載荷による残留沈下を予測するためには、地盤材料の粘弾塑性特性を表現する構成モデルを用いた数値解析を行う必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤研究S「既設構造物の高耐震補強と高耐震環境適合土構造物建設への補強土工法の高度化利用」による成果である。

参考文献

- 1) 例えば, Huang.C.C. and Tatsuoka.F. 1990, Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.9, No.1, pp.51-82.
- 2) Di Benedetto.H., Tatsuoka.F. and Ishihara.M. 2002, Time-dependant shear deformation characteristics of sand and their constitutive modelling, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.2, pp.1-22.
- 3) Hirakawa.D., Kongkitkul.W., Uchimura.T. and Tatsuoka.F. 2003, Time-dependant deformation stress-strain behaviour due to viscous property of geosynthetics reinforcement, *Geosynthetics International*, Vol.10, No.6, pp.176-199.
- 4) Peng.F.L., Kotake.N., Tatsuoka.F., Hirakawa.D. and Tanaka.T., 2000, Plane strain compression behaviour of geogrid-reinforced sand and its numerical analysis, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.3, pp.55-74.
- 5) 平川大貴, 2003, ジオシンセティクス補強土構造物の残留変形特性に関する研究, 東京大学博士論文
- 6) Hirakawa.D. and Tatsuoka.F. 2005, Viscous Behaviour of Air-Dried Sand in Model Loading Tests of Strip Footing, *The 16th International conference on Soil Mechanics and geotechnical engineering*, pp.379-383.
- 7) 例えば, 最上武雄, 1969, 土質力学
- 8) Binquet.J. and Lee,K.J. 1975, Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, pp.1241-1255.
- 9) Tatsuoka.F., Ishihara.M., Uchimura.T. and Gomes Correia,A. 1999, Non-linear resilient behaviour of unbound granular materials predicted by the cross-anisotropic hypo-quasi-elasticity model, *Proceedings of an international workshop on modelling and advanced testing for unbound granular materials*, Balkema, pp.197-204.
- 10) Tatsuoka.F., Acosta-Martinez.H.E. and Li.J.-Z. 2003, Viscosity in one-dimensional deformation of clay and its modelling and simulation, 第38回地盤工学研究発表会, pp.257-258.

Rate-Dependent Bearing Capacity Properties of Shallow Foundation on Geogrid-Reinforced Sand

Daiki HIRAKAWA, Warat KONGKITKUL and Fumio TATSUOKA

Model loading tests of a shallow foundation on unreinforced sand ground and geosynthetics-reinforced sand ground were performed to investigate the instantaneous and rate-dependent settlement properties of the model ground. The results of model loading tests showed: a) the peak footing load and pre-peak stiffness increased by tensile-reinforcing; b) the elastic stiffness against vertical footing loading of the reinforced/unreinforced ground can be expressed by a power function of footing average contact pressures, and it is noticeably large when reinforced; c) the trends of the significant loading rate effects due to the material viscosity of sand and reinforcement that are observed on the footing settlement property are essentially similar to those of the sand and reinforcement. These results suggest that the rate-dependent bearing capacity property of geosynthetics-reinforced ground, including the elastic and plastic properties, can be simulated by numerical analysis incorporating nonlinear three-component rheology models for the sand and reinforcement.

Keywords: Horizontal ground, Bearing capacity properties, Elastic stiffness, Material viscosity