粘性土のダイレイタンシー特性がジオコンポジットの引抜き抵抗特性に及ぼす影響

防衛大学校システム工学群建設環境工学科 宮田喜壽 末次大輔 木暮敬二

粘性土盛土を安定化するために、排水機能を有するジオコンポジットが盛土内に配置されることが多い。このような場合、設計ではジオコンポジットの圧密促進効果のみが考慮される。しかし、ジオコンポジット周辺の土に十分な有効拘束圧が作用し、ジオコンポジットの剛性と強度が周囲の土の変形を拘束できるほど大きいという条件のもとでは、粘性土であっても十分な補強効果が期待できると考えられる。

本研究では、粘性土中におけるジオコンポジットの挙動を明らかにするために、ジオコンポジットの引抜き試験を行った。一連の試験では、ダイレイタンシー特性が異なる2種類の供試土が用いられた。試験結果を比較すると、正のダイレイタンシーを示す粘性土中のジオコンポジットの引抜き抵抗は、負のダイレイタンシーを示す粘性土中に比べ大幅に増加することが明らかとなった。

キーワード：ジオコンポジット，粘性土，引抜き試験，ダイレイタンシー

the Effect of Dilatancy of Cohesive Soil on Pull-out Resistance of Geo-composite

M.Miyata, D.Suetsugu and K.Kogure

Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy

Geo-composite having a drainage function is often used for stabilizing cohesive soil embankment. In conventional design, only an effect of accelerating consolidation is evaluated. However, it is considered that geo-composite can reinforce cohesive soil when effective confining pressure applied to the soil surrounding geo-composite is large enough and geo-composite has high tensile strength and stiffness to restrain soil deformation.

In this study, pull-out tests using a geo-composite were carried out in order to understand the behavior of geo-composite in a cohesive soil. In a series of tests, two types of cohesive soil having different dilatancy were used. The results from the laboratory test showed that pull-out resistance of geo-composite in the cohesive soil exhibiting positive dilatancy is larger than one in the cohesive soil exhibiting negative dilatancy.

Keywords: geo-composite, cohesive soil, pull-out test, dilatancy

粘性土のダイレイタンシー特性がジオコンボジットの引抜き抵抗特性に及ぼす影響

防衛大学校システム工学群建設環境工学科 ○宮田喜壽 末次大輔 木暮敬二

1. はじめに

粘性土盛土を安定化するために、排水機能を有するジオコンボジットが盛土内に配置されることが多い。このような場合、従来の設計ではジオコンボジットの圧密促進効果のみが考慮される。しかし、ジオコンボジット周辺の土に十分な有効拘束圧が作用し、ジオコンボジットの剛性と強度が周囲の土の変形を拘束できるほど大きいという条件が満足されれば、粘性土であっても十分な補強効果が期待できると考えられる¹⁾。

能登空港建設工事では、硬質な芯材を不織布で包んだジオコンボジットで圧密促進を図りつつ、高さ 55m の粘性土盛土が構築されている。この盛土の動態観測結果をみると、盛り立て終了後の放置期間において、水平方向のはら見出しはほとんど生じず、盛土は準一次元的に沈下している²⁾。粘性土盛土がこのような挙動を示した一つの要因として、ジオコンボジットが盛土に生じる水平方向の変位を拘束したことが考えられる。そこで本研究においては、能登空港建設工事で盛り立てられた粘性土を用いて、織布／不織布からなるジオコンボジットの引抜き試験を実施した。本文では、本研究の動機となった能登空港建設工事の動態観測結果の概略を紹介した後、実施した引抜き試験の概要と試験結果を説明する。そして、それらの結果と、空港建設工事で用いられた粘性土とは異なるダイレイタンシー特性を有する火山灰質粘性土を用いた引抜き試験の結果を比較し、粘性土のダイレイタンシー特性がジオコンボジットの引抜き抵抗特性に及ぼす影響について検討する。

2. 能登空港建設工事での粘性土盛土の動態観測結果

動態観測が行われた能登空港建設工事での粘性土盛土の概要を図-1に、図-1中 A 点での鉛直および水平変位の実測値と解析値の比較を図-2に示す。この工事で用いられた土は凝灰角礫岩類であり、塑性図に基づく粘性土に分類される（以後本文では、この土を凝灰角礫岩類粘性土と称する）。解析値は、ジオコンボジットの圧密促進効果を考慮した土-水連成の有限要素解析によるものである。一連の解析において、粘性土の構成則は、関口-太田による粘弾塑性モデル³⁾が用いられ、ジオコンボジットの圧密促進効果は、バーチカルドレーン打設地盤の圧密理論³⁾に基づいた等価透水係数換算法で考慮された。一連の計測と解析の詳細は文献4)を参照いただきたい。

図-1 動態観測の概要

図-2において、実測値と解析値を比較すると、鉛直変位については、施工中および放置期間において両者はほぼ一致している。しかし水平変位については、施工が進むにつれて実測値と解析値の差が大きくなっていく。すなわち、実測では、水平変位が僅かしか生じていないが、解析では大きな水平変位が計算されている。このようにジオコンポジットの排水効果のみを考慮した解析が、実盛土に生じた水平変位を表現できていないひとつの理由として、著者らはジオコン

図-2 動態観測結果

ポジットが粘性土の変形を拘束する効果を解析で考慮していないためと仮説をたてた。そこで、本研究においては、連成解析においてジオコンポジットによる補強効果を合理的に評価するための解析手法を確立する研究の第1ステップとして、凝灰角礫岩類粘性土を用いたジオコンポジットの引抜き試験を実施した。

3. 凝灰角礫岩類粘性土を用いた引抜き試験

3. 1 室内試験に用いた試料

(1) 供試土の物理的特性：能登空港用地造成工事現場より採取した凝灰角礫岩類粘性土を、手でほぐしながら2mmふるいを通過させ、所定の含水状態にしたものを供試土として用いた。試料土の物理的特性を表-1に、粒度調整後の粒径加積曲線を図-3に示す。いずれの図表にも、後で引抜き特性を比較する火山灰質粘性土のデータを合わせて示している。凝灰角礫岩類粘性土は、火山灰質粘性土よりも塑性指数、液性限界ともに低く、粗粒分が多いという物理的特性を有している。

(2) 供試土の力学的特性：供試土の基本的な力学特性を調べるために、標準圧密試験および一面せん断試験を実施した。これらの試験で用いた供試体は次のように作製した。まず、上述のように準備した試料を、直径200mm、高さ400mmのモールド内で締め固めた後、49kPaの圧密応力を作用させて、1週間予圧密した。次に、モールドから試料を抜き出し、トリミングによって供試体($\phi=60\text{mm}$, $H=20\text{mm}$)を作製した。以上の方法によって準備された供試体の飽和度は平均84%であった。

表-1 供試土の物理的性質

	土粒子密度 (Mg/m^3)	平均粒径 (mm)	液性限界 (%)	塑性指数
凝灰角礫岩類粘性土	2.634	0.64	62	20
火山灰質粘性土	2.342	0.14	115	62

図-3 供試土の粒径加積曲線

図-4 凝灰角礫岩類粘性土の $e-\log p$ 関係

図-5 凝灰角礫岩類粘性土の $\tau-D$ 関係

図-6 凝灰角礫岩類粘性土の $\tau-\sigma_v$ 関係

標準圧密試験より得られた $e-\log p$ 関係を図-4に示す。圧密降伏応力 p_c は 50kPa となり、供試体作製時の圧密応力と概ね一致した。正規圧密領域の圧縮指数 C_c は 0.521、圧密係数 c_v と透水係数 k は、圧密圧力の大きさに応じて、 $c_v=0.1\sim0.3 \text{ m}^2/\text{day}$ 、 $k=10^{-2}\sim10^{-3} \text{ m/day}$ の間で変化した。総じて、今回用いた供試土は、火山灰質粘性土に比べると圧縮性が小さく、透水性が高い材料であることが明らかとなった⁵⁾。

定体積一面せん断試験より得られたせん断応力 τ とせん断変位 D の関係を図-5に、せん断応力 τ と垂直応力 σ_v の関係を図-6に示す。試験は、所定の圧密圧力で供試体を圧密した後、せん断速度 1.0 mm/min で実施した。図-5、6のような結果より、今回用いた供試土は、せん断初期では負のダイレイタシーが生じるが、せん断が進むと正のダイレイタシーを生じはじめ、最終的には一定の応力比で残留状態に至るという特性を有することが明らかになった。

(4)ジオコンポジットの引張り強度特性：空港建設工事では、硬質な芯材を不織布で包んだ板状のジオコンポジットが用いられたが、このタイプの製品を用いた引抜き試験の実施は、装置の都合上困難であったため、板状のジオコンポジットと同じ表面性状を有する織布／不織布のジオコンポジットの引抜き抵抗特性を調べることにした。このタイプのジオコンポジットの引張り強度特性を調べるため、空中において、ジオコンポジットの引張試験を行っ

た。ジオコンポジットの引張強度特性は図－7に示すとおりである。また、この製品の透水性は、垂直方向の透水係数が 9×10^{-5} m/s、面内方向が 1×10^{-3} m/s（カタログ値）であり、排水材として十分な機能を有している製品といえる。

3. 2 引抜き試験装置

引抜き試験装置を図－8に示す。本装置は、土槽、引抜き装置、鉛直応力载荷装置、データ計測装置より構成されている。土槽の大きさは縦 50cm、幅 20cm、高さ 30cm で、シリコングリースとラバースメンブレンを用いて、土槽内の供試土と土槽側面間の摩擦の低減を図っている。引抜き装置は変速可能なモーターを駆動力とするもので、一定の速さでジオテキスタイルを土槽内から引抜くことができる。鉛直応力载荷装置はエアバック方式であり、土層内にセットした供試土に均一な鉛直応力を作用させることができる。データ計測装置は、ジオテキスタイルの引抜き力、引抜きチャックの水平変位、供試体の鉛直変位（2点）、土槽内に敷設されたジオテキスタイルの水平変位（5点）、土槽外のジオテキスタイルの水平変位（2点）を一定の時間間隔で計測するものである。

3. 3 引抜き試験方法

(1)供試体作製方法：まず、土槽前壁および後壁に、引抜き口を所定の高さに取り付け、土槽内壁にシリコングリースを塗布し、その上からラテックス製のラバースメンブレンを貼り付ける。次に所定の含水比に調製した供試土を、締め固め後の供試体高さが 100mm になるように、4 層に分けてタンパーで締め固めた。以上のようにして、下層の供試体を作製後、あらかじめ土中変位計測用のワイヤーを取り付けて、24 時間水浸させておいたジオコンポジットを敷設し、土中変位計測用ワイヤーをガイドチューブに通して土槽後端に引き出した。その後、上層の土供試体を、下層と同じく厚さ 100mm になるように締め固めて作製した。

(2)試験方法：所定の応力条件で圧密を開始する。圧密終了時間は、予め本試験装置でジオコンポジットを敷設した供試体の圧密試験を行い、 $\sqrt{t}$ 法で求めた t_{90} を基準に、 t_{90} の 2 倍 ($2t_{90}$) および 4 倍 ($4t_{90}$) とした。圧密終了後、引抜きチャックにジオコンポジットを取り付け、1.0 mm/min の速さで引抜いた。

図－7 ジオコンポジットの引張試験結果

図－8 引抜き試験装置の概略図

図-9 F_p-X_1 関係 (圧密時間 = $2t_{90}$)

図-10 F_p-X_1 関係 (圧密時間 = $4t_{90}$)

図-11 F_p-X_1 関係の双曲線近似

3. 4 実験結果と考察

ジオコンポジットの引抜き試験より得られた引抜き力 F_p と引抜き変位 X_1 (節点 X_1 の水平変位, 節点の位置は図-8を参照のこと) の関係を, 圧密時間別に図-9と図-10に示す。圧密時間 $=2t_{90}$ の場合, 引抜き力 F_p は引抜き変位 X_1 の増加に伴って増大し, 一定値に漸近する傾向がみられる。圧密時間 $=4t_{90}$ の場合, F_p は $2t_{90}$ の場合より若干大きな値を示し, 29kPa の圧密圧力では, F_p がジオコンポジットの引張強さに達して, 引き抜けが生じる前にジオコンポジットが空中で破断した。このように, 圧密時間が長くなると, それだけ土が密な状態になるので, 発揮されるジオコンポジットの引抜き抵抗も大きくなる。

ここで, 図-9, 10に示した F_p と X_1 の関係を以下の双曲線関数で近似し, 最大引抜き力 $F_{p\max}$ を $1/b$ として評価することを試みる。

$$F_p = \frac{X_1}{a + bX_1} \quad (a, b : \text{近似パラメータ}) \quad (1)$$

$F_{p\max}$ の推定例として, X_1-F_p/X_1 座標系でパラメータを決定する過程を図-11(a)に, そのパラメータで F_p と X_1 の関係を近似した例を同図(b)に示す。ここで, 圧密時間 $=2t_{90}$, 圧密圧力 $\sigma_{v0}=20 \text{ kN/m}^2$ の場合の結果を示した。こ

これらの図より、 X_1-F_p/X_1 座標系でパラメータを決定し、実測の F_p-X_1 関係を双曲線近似することが妥当と判断される。

以上のようにして求めた最大引抜き力 F_{pmax} と圧密圧力 α_0 との関係を図-12 に示す。圧密時間 $=2t_{90}$ のときの F_{pmax} と α_0 の関係は直線で近似することができ、圧密時間 $=4t_{90}$ のときも、 F_{pmax} は α_0 に比例して大きくなると考えてもよいと推察される。

圧密圧力が $\alpha_0=10\text{kN/m}^2$ のときと 29kN/m^2 のときの、引抜きに伴う節点変位の変化および供試土の鉛直変位の変化を図-13、14 に示す。ここで比較する実験ケースはいずれも圧密時間 $=4t_{90}$ のケースであり、供試土の鉛直変位は膨張側を正としている。引抜きが生じた $\alpha_0=10\text{kN/m}^2$ のときは、引抜き初期でジオコンポジットに生じる水平変位はわずかであるが、ひとたび先頭の節点 X_1 に変位が生じ始めると、他の節点もほとんど同時に変位し始めている。また、供試土は、ジオコンポジットの引抜きに伴い、土槽前壁側が膨張し、後壁側が圧縮の傾向を示している。一方、ジオコンポジットが破断するまで引抜きが生じなかった $\alpha_0=29\text{kN/m}^2$ のときは、 X_1 に変位が生じて、他の節点に変位が生じ始めるまでに遅れが生じ、 $\alpha_0=10\text{kN/m}^2$ のときのように、前節点がほぼ同じ水平変位が生じることはなく、チャックと X_1 の間の伸びが増加している。また、供試土の鉛直変位は、 $\alpha_0=10\text{kN/m}^2$ のときのように、土槽後壁側での圧縮が生じなかった。この挙動は、ジオコンポジットの後端まで引抜き変位が生じたか否かに関係すると思われるが、そのメカニズムには今後数値シミュレーションを実施して詳しく考察する予定である。

図-12 $F_p-\alpha_0$ 関係

図-13 引抜きに伴う節点水平変位 X_i および土槽内供試土の鉛直変位 X_v ($\alpha_0=10\text{kN/m}^2$)

図-14 引抜きに伴う節点水平変位 X_i および土槽内供試土の鉛直変位 X_v ($\alpha_0=30\text{kN/m}^2$)

図-15 火山灰質粘性土の $\tau \sim D$ 関係

図-16 火山灰質粘性土の $\tau - \sigma_v$ 関係

4. 火山灰質粘性土を用いた引抜き試験

4. 1 試験概要

乾燥砂を用いた引抜き試験においては、供試土の状態が密な場合と緩い場合、すなわちダイレイタンスーが正を示す場合と負を示す場合の補強材の引抜き抵抗特性が調べられている。3. に示した試験結果は、せん断がある程度進むとダイレイタンスーが正を示す材料についてのものであった。そこで、粘性土のダイレイタンスーがジオコンポジットの引抜き抵抗特性に及ぼす影響を明らかにするために、ダイレイタンスーが負を示す、乱した火山灰質粘性土を用いた引抜き試験を実施した。

試験に供した火山灰質粘性土の物理特性は表-1 に示すとおりで、高い I_p と ω_L を有する。この土を直径 200mm、高さ 400mm のモールド内で締め固めた後、予圧密して作製した供試土の定体積一面せん断試験の結果を図-15 と図-16 に示す。供された火山灰質粘性土は、負のダイレイタンスーを示しながら、せん断応力がピーク値を示して残留状態に至っている。この土を用いて、3. 2 および 3. 3 に示した方法で引抜き試験を実施した。

図-17 F_p-X_1 関係

図-18 火山灰質粘性土の有効応力経路

4. 2 試験結果

火山灰質粘性土を用いた引抜き試験において、得られた引抜き力 F_p －引抜き変位 X_1 関係を図-17 に示す。ダイレイタンシーが負を示す火山灰質粘性土の場合も、凝灰角礫岩類粘性土の場合と同様に、圧密圧力 σ_v が大きいときほど、ジオコンポジットの引抜き抵抗が大きくなることが明らかである。この結果より双曲線近似によって推定した最大引抜き力 F_{pmax} と σ_v との関係を図-18 に示す。図中には、凝灰角礫岩類粘性土の結果も併せて示した。 σ_v の増加に伴う F_{pmax} の増加割合は、ダイレイタンシーが正を示す凝灰角礫岩類粘性土の場合の方が大きい。

今回の引抜き試験で採用した引抜き速度は粘性土の透水性の大きさを考えると、周辺の供試土が非排水条件でせん断される条件に近かったと考えられる。このような条件で引抜き試験を実施すると、ダイレイタンシーが正を示す材料の場合、ジオコンポジットに作用する有効拘束圧が大きくなるので、引抜き抵抗が大きくなる。一方、ダイレイタンシーが負を示す材料の場合、有効拘束圧が小さくなるので、引抜き抵抗は小さくなる。以上のメカニズムによって、図-18 のような結果が得られたと考えられる。

5. まとめ

能登空港建設工事に於いて動態観測された、ジオコンポジットが敷設された粘性土盛土は、施工途中から、はらみ出しがほとんど生じることなく一次的に沈下した。本論文では、排水材として敷設されたジオコンポジットが粘性土の変形を拘束したために上述の挙動が観測されたと考え、実際の盛土工事で用いられた粘性土を用いた引抜き試験を行った。その結果、供試土が正のダイレイタンシーを示す場合、ジオコンポジットの引抜き抵抗は、負のダイレイタンシーを示す場合に比べ大幅に増加することが明らかとなった。空港工事で用いられた粘性土は正のダイレイタンシーを発揮する材料であったことが、動態観測結果を説明するためのひとつの手がかりになると考えられる。

なお、今回は比較的速い引抜き速度で試験を行ったが、ジオコンポジット周辺の土が排水条件に近い条件で挙動できるような条件での試験が必要なことはいうまでもない。引抜き速度の“速い”とか“遅い”は、土の透水性との相対的な関係で定義されるものと考えられる。今後は、数値シミュレーションと実験を併用した検討を続け、粘性土中におけるジオコンポジットの挙動を明らかにすることに努めたい。

謝辞

本実験で使用された材料（凝灰角砂礫岩類粘性土）は、石川県土木部能登空港建設課ならびに、前田・宮地特定建設工事共同企業体のご好意により提供を受けたものである。また、本論文の第1著者は、平成12年度文部省科学研究費補助金（基礎研究(B)(1)；課題番号：12555140；研究代表者：安原一哉）を受けている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 龍岡文夫：2．ジオテキスタイルによる補強メカニズム その1，講座「ジオテキスタイルを用いた補強土工法」，土と基礎，Vol.41，No.3，pp.76-82，1993．
- 2) Sekiguchi, H. : Theory of undrained creep rupture of normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, Soils and Foundations, Vol.24, No.1, pp.129-147, 1984.
- 3) 吉国 洋：多次元圧密理論と，その軸対象問題への適用，東京工業大学学位論文，1973．
- 4) 長原久克，鶴山直義，今井 努，伊藤雅夫，石黒 健，藤山哲雄，太田秀樹：人工排水材を用いた空港盛土の挙動解析，ジオシンセティックス論文集，Vol.15（投稿中），2000．
- 5) 高速道路調査会編：関東ロームの土工－その土質と設計・施工－，共立出版，1973．