ジオシンセティック敷設による粘性土地盤支持力補強の考察

日本大学理工学部 正会員 ○ 峯 岸 邦 夫
同 上 正会員 卷 内 勝 彦

概 要:

本研究は、ジオシンセティック（織布）を用いて室内土層モデル試験を行い、ジオシンセティックを地盤表面あるいは地盤中に敷設した場合と、敷設しない場合とについて地盤中の変形を観測・解析し、軟弱粘性土とジオシンセティックの摩擦特性試験結果などを踏まえ、既往のTerzaghiの支持力理論を基本とする支持力算定法の検討に基づき、軟弱地盤に対するジオシンセティック敷設の支持力補強と地盤変形抑制の効果についてのメカニズムとその評価方法について考察を行った。

その結果、地盤表面の変形を2次曲線として近似することによって従来の方法に比べ半径や傾斜角の算出に個人誤差の影響を受けないこと、全支持力の中でジオシンセティック敷設によるハンモック的効果の受け持つ割合が大きいこと、地盤中にジオシンセティックを敷設する場合、一定以深になると敷設効果が発揮できないことなどが明らかとなった。

A Consideration of Geosynthetic-Reinforcement on Bearing Capacity of Cohesive Soils

Kunio MINEGISHI & Katsuhiko MAKIUCHI
(College of Science & Technology, Nihon University)

Abstract:

In this study, a series of laboratory two-dimensional model tests were carried out using geosynthetics and cohesive soils. Several geowovens of different tensile strength were laid on the surface of and at the given depth of soft clay ground. The deformation of the ground under strip loadings were observed and the interface friction between geosynthetics and cohesive soil was determined. A mechanism of geosynthetic-reinforcement on the bearing capacity of clay ground was considered and the evaluation method was proposed based on the modified Terzaghi's bearing capacity theory.

As the experimental results, a ground surface deformation can be expressed in the form of a quadratic equation and the radius and the tangent of surface deflection can be taken more accurately than the conventional methods. It was found that the role of hammock's effect is significant. Moreover, it was observed that the reinforcement of geosynthetics did not display at the deeper place than a certain laying limit.

ジオシンセティック敷設による粘性土地盤支持力補強の考察

日本大学理工学部 正会員 ○ 峯 岸 邦 夫
同 上 正会員 巻 内 勝 彦

1. まえがき

軟弱地盤においてジオシンセティックを敷設した場合、地盤支持力を算定する最も一般的な式は、Terzaghiの支持力理論を基本とするものである。しかし、この式の適用範囲および式中に存在する諸パラメータの決定については、経験に頼るところが大きいのが現状である。これを明確にするために各方面での調査・研究が行われている。

本研究においては、ジオシンセティックを使用した場合の補強メカニズムを検討するため土槽モデル試験を行いTerzaghiの支持力理論式の適用範囲および式中に存在する諸パラメータの特性および設計に関する定数を明確にするために、表面および内部の変形状態、荷重と沈下量の関係、載荷幅、ジオシンセティックの張力などの影響、ジオシンセティックと粘土の付着力を調べ、それらについて考察を行った。

2. 試料および試験方法

2-1 試料

(1) 粘土試料

今回実験に使用した粘土試料は、市販の粉末状カオリン粘土である。室内で軟弱地盤状態を再現するため、カオリン粘土を含水比 $w_0=80, 90, 100\%$ に十分練り返して調整した。このカオリン粘土の物理的性質およびCBR値は、表-1に示すとおりである。なおCBR試験は、JIS A 1211²⁾に基づき行ったが、極めて低支持力になるため貫入棒等を改良して行った。

(2) ジオシンセティック試料

ジオシンセティックは、引張り強度の異なった3種類の織布 (T-100, T-150, T-200) を用いた。表-2にそれらの諸物性を示す。

表-1 粘土試料の物理的性質とCBR

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.68	
液性限界 w_L (%)	81.0	
塑性指数 I_P	53.7	
C B R (%)	$w_0=80\%$	0.05
	$w_0=90\%$	0.04
	$w_0=100\%$	0.03

2-2 試験装置および試験方法

2-2-1 摩擦特性試験

本研究では、ジオシンセティックと粘性土との摩擦特性を調べるため以下の3種類の摩擦特性試験を行った。

表-2 ジオシンセティック試料の諸物性³⁾

(1) Type I

ジオシンセティックを平坦な合板に接着剤で貼りつけ、その上を試料土を詰めたせん断箱を滑らせる実験である。試験条件は、試料土であるカオリン粘土を初期含水比を前述した3条件に調整し、それぞれ垂直応力 $\sigma_v=2.5, 5.0, 7.5, 10$ kN/m²を載荷してスクリージャッキにて水平荷重をかけ水平変位と力計の読みを測定した。なお、せん断箱は箱自体の自重

品 番		T-100	T-150	T-200
質 量 (g/m ²)		115	150	210
厚 さ (mm)		0.19	0.25	0.35
引張強さ (N/3cm)	縦	1200	1600	2200
	横	1200	1600	2200
伸 び (%)	縦	13	14	13
	横	13	14	13
引裂強さ (N)		400×400	350×350	650×650
透水係数 (cm/s)		1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	1.5×10^{-3}

の影響を避けるため木製とし、摩擦抵抗を極力低減するように工夫し、寸法は $300 \times 200 \times 50\text{mm}$ とした。

(2) Type II

後述する室内土槽モデル試験で使用する土槽を用いて、試料土とその上に敷設したジオシンセティックの摩擦特性を調べた。

土槽 ($1000 \times 400 \times 510\text{mm}$) に含水比を80%に調整したカオリン粘土を気泡が混入しないように詰め、表面を平坦に成形しジオシンセティックを敷設する。ジオシンセティックの中央部に荷重を載荷板 (載荷幅2.5, 5.0mm) を介して載荷し一方から一定速度 (1.0mm/sec) で引抜き、ジオシンセティックが動き出した瞬間の荷重を測定した。

(3) Type III

在来型一面せん断試験装置を用いて、せん断箱下箱にダミー供試体にジオシンセティックを接着剤で貼りつけたものを入れ、上箱に含水比を80%に調整したカオリン粘土を空隙のないように詰め、それぞれ $\sigma_v=50, 100, 150, 200 \text{ kN/m}^2$ を載荷して試験を行った。

2-2-2 室内土槽モデル試験

(1) Test I (応力制御型試験)

図-1に示す側面が強化ガラス製の土槽 ($1000 \times 400 \times 510\text{mm}$) に含水比を80%に調整したカオリン粘土を気泡が混入しないように詰め表面にジオシンセティック (T-150) を敷設した場合としない場合について載荷板を介して所定の載荷荷重を加え、土槽表面および内部の変形量を観測した。試験条件は、載荷幅5.0cmの場合は載荷荷重を100, 200, 300, 400, 500 N、載荷幅2.5cmの場合は載荷荷重を100, 150, 200, 250, 300 Nとして、ジオシンセティックを敷設した場合は、両端に0, 2.5, 5.0, 7.5, 10 N/cmの張力を与えた。載荷板に所定の載荷荷重を加え粘土中に貫入させ、貫入が停止後、土槽表面および内部 (埋設したマーカー) の変位量を測定した。

(2) Test II (沈下量制御型試験)

Test Iと同様に粘土を詰めた土槽の表面および地盤内部にジオシンセティックを敷設または、敷設しない場合について、所定量 (40または80mm) 載荷板を貫入させた時の力計および土槽表面、地盤内部の変位量を測定した。ジオシンセティックは、T-100, T-150およびT-200を用いた。試験条件は、載荷幅5.0cmの場合は、深さ $z=0$ (表面), 25, 50, 75, 100, 125, 150mmに敷設し、表面に敷設した場合は、ジオシンセティックの両端に $T=0, 2.5, 5.0, 7.5, 10 \text{ N/cm}$ の張力を与えた。載荷幅2.5cmの場合は、深さ $z=0$ (表面), 25, 50mmに敷設し、表面に敷設した場合は、ジオシンセティックの両端に $T=0, 5.0, 10 \text{ N/cm}$ の張力を与えた。

3. 軟弱地盤の支持力算定法

軟弱地盤の支持では、ジオシンセティックを用いると図-2に示すような張力がシートと地盤との摩擦力によって得られるか、または人工的に加

図-1 試験土槽 (Test I, II)

えられるかして荷重による沈下を可能な限り小さくするように設計される。Terzaghiの支持力理論に基づくシート工法における盛土体の支持力要素を分割して考えると次のようになる。

図-2 支持力機構の模式図

- 1) 在来地盤の支持力 q_1
- 2) シートの張力によるハンモック効果的支持力 q_2
- 3) 載荷体周辺のシートによる押え効果 q_3
- 4) 載荷体が在来地盤中に沈下した部分の押え盛土的支持力 q_4

図-3 隣接円半径 r と傾斜角 θ の求め方

これらの支持効果を考慮することにより、Terzaghiの支持力理論を用いて軟弱地盤上の支持力機構を考えることができる。すなわち、軟弱地盤上にシートまたはネット状のものを敷設して土を帯状に一方から載せていくと、盛土部分にめり込み量が生じてこのめり込み量に見合う体積とほぼ同程度の土が盛土周辺に盛り上がりて載荷と支持は均衡する。これらを次の式-1 (Terzaghiの改良型支持力算定法)⁴⁾で示すことができる。

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = cN_c + \frac{2T \sin \theta}{B} + \frac{T}{r} + \gamma_t D_f \quad \cdots \text{式-1}$$

ここで、 c : 軟弱地盤の粘着力、 N_c : 支持力係数、

T : ジオシンセティックの張力に地盤との付着力を加えたもの、

γ_t : 軟弱地盤の単位体積重量、 D_f : めり込み量、

r : 隣接円半径、 θ : 傾斜角

また、図-3は、実測表面変形とそれを2次曲線的変形と見なして2次曲線で近似した場合とを比較したものである。これらの関係から、半径 r および傾斜角 θ は、式-2で示される。

$$r = \frac{1}{2\alpha}, \quad \theta = \tan^{-1} \beta \quad \cdots \text{式-2}$$

4. 試験結果および考察

4-1 摩擦特性試験

図-4は、Type Iによる摩擦試験の結果を示したものである。粘土の初期含水比は、 $w_0 = 80, 90, 100\%$ であったが、この結果から含水比の影響をほとんど受けていないことがわかる。これは、粘土の含水比が高いため垂直応力を載荷したときに粘土とジオシンセティックの接触面に水分による膜ができたためと考えられる。また、各含水比における付着力は、 $0.98, 0.92, 0.88 \text{ kN/m}^2$ となりかなり小さいことがわかる。

表-3は、室内土槽モデル試験において表面変形におけるジオシンセティックとカオリン粘土の付着力の影響を調べるために行った試験結果である。

図-4 ジオシンセティックと粘土の摩擦

図-5は、在来型一面せん断試験装置を用いて行ったカオリン粘土とジオシンセティックの付着力に及ぼすジオシンセティックの種類の影響を調べた結果である。ジオシンセティック T-100, T-150, T-200 における付着力は、それぞれ 1.7, 1.3, 1.1 kN/m² となり、今回の実験範囲ではジオシンセティックの引張強度が増加するとカオリン粘土との付着力は、若干ではあるが減少する傾向にあることがわかる。

4-2 室内土槽モデル試験

4-2-1 Test I

図-6は、T-150、載荷幅 2.5cm の場合の載荷荷重と沈下量の関係を示したものである。ジオシンセティックを敷設しない場合は、200N 以上載荷すると沈下が止まらず貫入してしまう。しかし、ジオシンセティックを敷設することにより沈下を抑制することができる。ジオシンセティックの両端に張力を与えた場合、張力の大きさによる沈下量の差異はあまり認められなかった。したがって、支持力は張力の大小の影響をほとんど受けないと考えられる。張力を与えず敷設のみの場合、載荷荷重が 300N になるとジオシンセティックとカオリン粘土の付着力のみでは耐えられず沈下量が大きくなる。また、図示はしていないが載荷幅が 5.0cm の場合は、2.5cm の場合に比べ大きな載荷荷重に耐えられる結果が得られた。しかし、載荷応力で考えた場合は、2.5cm の方が沈下量が少ない。このことから載荷幅が小さい方がジオシンセティックの張力によるハンモック効果が発揮されていると考えられる。

図-7は、T-150、載荷幅 2.5cm、張力 2.5N/cm の場合の土槽表面および地盤内の变形を示したものである。表面より深さ 300mm を越えとほとんど変形を生じないことがわかる。また表面変形についてみるとジオシンセティックの張力および粘土との付着力により 2 次曲線的変形を示している。これは、他の張力の場合も同様のことがいえる。

4-2-2 test II

図-8は、表面に T-100 を敷設、載荷幅 5.0cm のときの沈下量と載荷応力の関係を示したものである。この図から沈下量と載荷応力の間には、直線的な比例関係が見られる。また、ジオシンセティックを敷設するだけで敷設しない場合の約 2 倍程度の載荷応力に耐えることが出来る。しかも、

表-3 カオリン粘土とジオシンセティックの付着力

載荷荷重なし	$F_{max} = 0.7 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
載荷荷重 100N	$F_{max} = 1.0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$

図-5 ジオシンセティックと粘土の摩擦

図-6 載荷荷重-沈下量関係

図-7 地盤変形 (Test I)

ジオシンセティックに張力を与えると、より敷設効果を発揮することがわかる。

図-9は、T-100、載荷幅5.0cmのときの沈下量と載荷応力の関係を敷設深さ別に示したものである。敷設深さが深くなるほど、耐載荷応力が小さくなる

ことがわかる。また、敷設深さが100mm以上になると載荷応力の差が見られなくなり、敷設しない場合とほぼ同程度の値になり敷設効果が発揮できないことがわかる。

図-10は、T-100に張力を5.0N/cm与え、載荷幅5.0cmのときの土槽表面および地盤内変形について示したものである。表面変形は、ほぼ左右対象であることがわかる。

図-11は、T-100を表面から50mmの深さに敷設し、載荷幅5.0cmの場合の土槽表面および地盤内変形を示したものであるが、この場合も左右対象となり、貫入した周辺以外はほとんど変形していないことがわかる。

4-3 支持力補強に及ぼす影響要因

(1) 載荷幅の影響

図-12は、Test Iにおける載荷幅と沈下量の関係を示したものであ

る。いずれの場合についても載荷幅が増加すると沈下量も増加する。これは、載荷体が在来地盤中に沈下した部分の押え盛土的支持力 $q_4 = \gamma \cdot D_f$ は増加するが、張力が一定の場合、載荷幅が増加するとジオシンセティックの張力によるハンモック的支持力 q_2 が減少するということである。

図-13は、同じくtest Iにおける載荷応力 15 kN/m^2 の時の載荷幅と半径について示したものである。載荷幅が増加すると半径は減少する。ジオシンセティックの張力によるハンモック的支持力 $q_2 = 2T \sin \theta / B$ について考えると、張力が一定の場合、載荷幅が増加すると q_2 は減少するが、半径が減少することにより載荷体周辺地盤のジオシンセティックに

図-8 沈下量と載荷応力の関係 (Test II)

図-9 沈下量と載荷応力の関係 (Test II)

図-10 地盤変形 (Test II)

図-11 地盤変形 (Test II)

図-12 載荷幅と沈下量の関係 (Test I)

よる押え効果 $q_3 = T / r$ は増加する。

図-14 は、test II における載荷幅と載荷応力の関係について示したものである。載荷幅が増加すると載荷応力は減少することがわかる。

これらより、沈下量制御で試験を行った場合、載荷幅が増加するとジオシンセティックの張力によるハンモック的支持力 q_2 は減少し、載荷体周辺地盤のジオシンセティックによる押え効果 q_3 も減少することにより支持力は減少すると考えられる。応力制御で行った場合は、載荷幅が増加するごとに沈下が増加するために、載荷体が在来地盤中に沈下した部分の押え盛土的支持力 $q_4 = \gamma_i D_i$ は増加し、ジオシンセティックの張力によるハンモック的支持力 q_2 は減少し、載荷体周辺地盤のジオシンセティックによる押え効果 q_3 は増加する。

(2) 張力の影響

図-15 は、Test I における載荷幅 2.5cm の場合の張力と沈下量の関係を示したものである。張力が増加すると沈下量はやや減少する傾向がみられる。このことをジオシンセティックの張力によるハンモック的支持力 $q_2 = 2T \sin \theta / B$ について考えると、載荷幅が一定のため張力が増加すると q_2 も増加するが、載荷体が在来地盤中に沈下した部分の押え盛土的支持力 $q_4 = \gamma_i D_i$ は、沈下量が減少することにより減少する。また、図示はしないが張力と傾斜角の関係は、張力が増加しても傾斜角は張力を与えない場合を除いてほとんど差異は認められなかった。

図-16 は、Test II における載荷幅 5.0cm、沈下量 40mm のときの張力と載荷応力についてジオシンセティックの種類別に示したものである。張力が増加すると載荷応力も増加する。 $q_2 = 2T \sin \theta / B$ について考えると q_2 は載荷幅が一定のため増加し、 q_3 も載荷幅が一定のため増加する。このことより、ジオシンセティックに張力を与えることにより支持力の増加が得られると考えられる。また、張力と傾斜角の関係は張力が増加すると傾斜角は減少する結果を得た。 q_2 は張力の増加率と傾斜角の減少率が関係するが押え効果 q_3 は載荷幅が一定のため増加する。このことより支持力式全体で考えると張力の増加率の方が傾斜角の減少率より上回るため支持力が増加すると考えられる。

以上のことから張力の影響について考えると、沈下量制御の場合、張力が増加すると q_2 は増加し q_3 も増加する。このことよりジオシンセティックに張力を与えることにより支持力は増加すると考えられる。一方応力制御の場合は、張力が増加すると q_4 は減少し、 q_2 および q_3 は増加するがこの増減量がほぼ一定のため支持力は変わらないと考えられる。

図-13 載荷幅と半径の関係 (Test I)

図-14 載荷幅と載荷応力の関係 (Test II)

図-15 張力と沈下量の関係 (Test I)

図-16 張力と載荷応力の関係 (Test II)

(3) 敷設深さの影響

図-9および図-17より一定以上深い位置（ジオシンセティックの種類により異なる）にジオシンセティックを敷設しても敷設しない場合とほぼ同程度の載荷応力しか發揮しないことから軟弱地盤内にジオシンセティックを敷設する場合、一定以深になると支持力の増加は期待できないことがわかる。

(4) 押え効果の影響

図-18は、Test IIにおける張力と半径の関係をジオシンセティック別に示したものである。張力が増加すると半径も増加していることから載荷体周辺地盤のジオシンセティックによる押え効果 $q_3=T/r$ について考えると張力と半径の増加率を比較した場合、張力の増加率の方が大きいので結果的には張力が増加すると q_3 は増加することになる。

(5) 諸パラメータ（傾斜角 θ 、半径 r ）

図-19は、Test IIにおける載荷応力と傾斜角について個人差が生じやすい従来の方法と、表面変形を2次曲線の変形と見なして求めた方法について比較したものである。両者はほぼ同様の減少傾向を示しているが表面変形を2次曲線の変形と見なして求めた方が小さいことがわかる。また、図示していないが載荷応力と半径の関係は、2次曲線の変形と見なして求めた方が大きい結果となった。

図-17 敷設深さと載荷応力の関係(Test II)

4-4 Terzaghiの改良型支持力算定式

図-20～21は、Test IIにおいて従来の方法と表面変形を2次曲線で近似して求める方について実測値と理論値の関係を示したものである。前者の方法では、全体的に理論値の方が過大評価しがちであるが、後者の方は理論値と実測値がほぼ一致している結果を得た。このことから表面変形を2次式で近似して求める方法は、従来の方法より適応性が高いといえる。

図-18 張力と半径の関係(Test II)

図-19 載荷応力と傾斜角の関係(Test II)

図-20 従来の方法で求めた実測値と理論値の関係(Test II)

図-21 2次式近似で求めた実測値と理論値の関係(Test II)

5. 結論

今回行った実験

結果から次のような結論を得た。

- 1) Terzaghi の改良型支持力算定式において、表面変形を 2 次式で近似することにより、従来の方法に比べ半径 r および傾斜角 θ の算出を個人誤差の影響を受けず行うことができる。
- 2) ジオシンセティック敷設による支持力 q_2 は、今回の実験結果では全支持力の約 7 割程度を占め、ハンモック的効果が大きいことがわかった。また、ジオシンセティックの張力と地盤との付着力を加えたものを張力とするため、ジオシンセティックと地盤との付着力が大きな影響を及ぼす。
- 3) ジオシンセティックの敷設深さは、ジオシンセティックの種類に関係なくある一定以深になると支持力の増加は期待できない。

【参考文献】

- 1) 土質工学会：土質工学ハンドブック，pp.323-341，1982.
- 2) 土質工学会：土質試験の方法と解説，pp.319-235，1990.2.
- 3) 前田工繊(株)：試験結果報告書，1993.4.
- 4) 土質工学会：補強土工法，pp.325-329，1986.

【謝辞】

本研究を行うにあたり、本学大学院生久保崇紀（現：J R 東日本(株)）、光吉勝（現：谷本臨海土木(株)）両君の協力を得た。また、前田工繊(株)にはジオシンセティック試料の提供を受けた。このことをここに記し謝意を表します。