複合ファブリックの排水・補強両機能を考慮した急勾配補強盛土の設計法試案

棚橋由彦	長崎大学工学部	和久田直孝	大林組(株)
○陶山健太	長崎大学大学院	安原一哉	茨城大学工学部
西村 淳	三井石化産資(株)	平井貴雄	三井石化産資(株)

概要

粘性土や建設副産物を盛土として用いたジオシンセティックス急勾配補強盛土が注目されている。最近開発された複合ファブリックは、不織布と同様な排水機能を持ち、ジオグリッド以上の高剛性・引張強度を有する。よって複合不織布を用いて火山灰質粘性土盛土の補強を行う場合、①排水材として使用して盛土の圧密促進を図ることによる盛土本体の補強、②引張補強材として使用することによる盛土本体の補強の2つの補強効果を期待しているのが現状である。したがって、より経済的で合理的な設計を行うためにも、複合不織布の2つの補強効果を考慮した設計法を確立する必要がある。本研究では、排水・補強両機能を同時に考慮した新しい設計法試案を提示する。

New Design Method of Steep Earthfill Reinforced with Composite Fabrics Considering both Drainage and Reinforce Effects

By

Yoshihiko TANABASHI, Naotaka WAKUDA

Kenta SUYAMA, Kazuya YASUHARA

Jun NISHIMURA, Tsutomu HIGASHI

ABSTRACT

Recent development of new geosynthetics such as composite fabrics has been able to construct steep earthfill used high water content volcanic cohesive soils such as Kanto loam and /or even construction by-products which have never been used as fill materials. Recent developed composite fabric has almost the same tensile strength of geogrid and of course drainage effect. However, current design method of the steep reinforce earthfill with nonwoven fabric has not considered its reinforced effect and strength increase of cohesive soil by consolidation. Therefore, this paper proposes a new design method of a steep reinforced earthfill taking strength increase of high water content volcanic cohesive soil by consolidation, A characteristics of soil-fabric interface and reinforced effect of composite fabric into account.

複合ファブリックの排水・補強両機能を考慮した急勾配補強盛土の設計法試案

棚橋由彦	長崎大学工学部
和久田直孝	大林組
○陶山健太	長崎大学大学院
安原一哉	茨城大学工学部
西村 淳	三井石化産資
平井貴雄	三井石化産資

1. 本研究の背景

近年、遊休地の減少や依然地価が高いこと、更には良質な土質材料の入手が困難な状況にあることから、盛土材料に不向きな現場発生土の積極的再利用や、盛土を急勾配にする必要が生じてきた。そのため、ジオシンセティックスを用いた補強土工法が積極的に採用されるようになってきた。従来盛土材として用いられることのなかった関東ロームのような高含水比火山灰質粘性土でさえ、補強土工法を採用することにより急勾配盛土の築造が可能になってきた。このような状況のもと、ジオシンセティックスにより粘性土高盛土を補強することが注目され、補強盛土の設計法に関する理論的研究が活発になってきた。しかしながら、現行の設計法はいくつか不備な点があり、改善の余地が残されている。

2. 本研究の目的

複合不織布は、不織布と同様な排水機能を持ち、排水機能を持たないジオグリッドと同等の引張強度を持つ特徴を有する。よって複合不織布を用いて火山灰質粘性土盛土の補強を行う場合、①排水材として使用して盛土の圧密促進を図ることによる盛土本体の補強(図-1(a))、②引張補強材として使用することによる盛土本体の補強(図-1(b))の2つの補強効果が期待される。しかしながら、不織布は①の排水材としての機能のみを期待し、設計を行っているのが現状である。したがって、より経済的で合理的な設計を行うためにも、複合不織布の2つの補強効果を考慮した設計法を確立する必要がある。本研究の目的は、2つの補強効果を同時に考慮した新しい設計法を提示することにある。

図-1 複合不織布の補強効果

3. 既往設計法

ジオシンセティックスを引張補強材として用いる時の安定解析法は、ジオシンセティックスに働く引張力がせん断強度の増加に寄与していると考え、この時の安全率は次式で与えられる。¹⁾

$$F_s = (M_R + \sum RT_i) / M_D \quad (1)$$

ここに M_R , M_D : 抵抗および起動モーメント, R : すべり円の半径, T_i : 各層のジオシンセティックスの引張力

本研究では、複合不織布が引抜けて破壊するモードを考えているので、式(1)中の T_i の値は引抜き抵抗を採用する。ジオシンセティックスの引抜き抵抗 T_i は次式で与えられている。

$$T_i = L_e \cdot 2(c^* + \sigma_v \cdot \tan \phi^*) / F_{sm} \quad (2)$$

ここに、 T_i : 引抜き抵抗, F_{sm} : 引抜き安全率, σ_v : ジオシンセティックス敷設位置での鉛直荷重, L_e : すべり面より奥

のジオシンセティックス定着長, c^* , ϕ^* : 土とジオシンセティックスの間の粘着力, せん断抵抗角

式(2)中の c^* , ϕ^* は、土と補強材の摩擦特性を表す指標である。つまり、この引抜き抵抗は土と補強材間の摩擦特性と密接な関係がある。そのため、その摩擦特性を正確に把握しておくことが非常に重要である。現行の安定解析法においては、盛土本体の圧密に伴う土と補強材との摩擦特性の変化を考慮せず、摩擦特性は圧密の進行の程度に拘らず一様として計算している。すなわち、式(2)の c^* , ϕ^* は圧密に伴って変化しないとしている。しかし、高含水比火山灰質粘性土の場合には圧密に伴って、摩擦特性が変化する可能性が十分に考えられる。

4. 提案設計法

4.1. 提案設計法の基本的流れ

既往の設計法では、完成形を想定するため、圧密による摩擦特性の変化を考慮できない。¹⁾そこで、本設計法は、盛土段階を追うことで、圧密に伴う摩擦特性の変化と盛土材料の強度増を考慮しようとするものである。提案設計法のフローを図-2に示す。本設計法ではN次盛土を想定し、N-1次以下盛土の圧密による強度増を期待し、N次盛土の施工が可能となる圧密時間を求める。まず、N次盛土の盛土厚、複合不織布の枚数 N_f , 定着長 l_e を設定する。本設計法においては、盛土斜面の安定解析に

図-2 提案設計法のフロー

分割法を用いるので、円弧中心座標（格子）の設定を行う。まず N-1 次以下盛土の圧密時間が無限大として安定計算を行い、円弧中心座標の一つでも安全率を満たさない点がある場合は、N 次盛土を適宜再設定する。次に N-1 次以下盛土の最低圧密時間を求める。そして、目標盛土高に達するまで繰返し行う。なお、複合不織布の枚数、定着長と最低圧密時間の組合せは、盛土段階が進むにつれて非常に多くなるので、適宜複合不織布の枚数、定着長を変化させ計算を行う。

4.2. 内的安定の計算法

内的安定の計算法は、式(1)を基本式とする。本設計法の特徴は、圧密による土と複合不織布の摩擦特性の変化を考慮することにある。圧密の進行に伴って、土の強度は増加する。よって土の強度定数の粘着力成分、摩擦成分は圧密時間 t_c の関数となる。また、複合不織布と土の摩擦特性も圧密の進行に伴い変化するものと考えられる。したがって、土の抵抗モーメント M_R は次式で与えられる。

$$M_R = R \cdot \sum (c_{cu}(t_c) \cdot l_i + W_i \cdot \cos \theta_i \cdot \tan \phi_{cu}(t_c)) \quad (3)$$

ここに、 $c_{cu}(t_c)$ 、 $\phi_{cu}(t_c)$ ：圧密時間 t_c における粘着力、内部摩擦角、 l_i ：分割片で切られたすべり面の弧長

次に引抜き抵抗モーメント RT_i の T_i は、複合不織布と土のせん断強度 τ_{fs} と定着長 l_e により次式で与えられる。

$$T_i = 2\tau_{fs}(t_c) \cdot l_e / F_{sm} \quad (4)$$

$$\tau_{fs}(t_c) = c_{cus}(t_c) + \sigma_i \cdot \tan \phi_{cus}(t_c) \quad (5)$$

ここに、 $c_{cus}(t_c)$ 、 $\phi_{cus}(t_c)$ ：圧密時間 t_c における土と複合不織布の摩擦特性、 σ_i ：複合不織布に作用する拘束圧

圧密による土と複合不織布の摩擦特性および土のせん断特性の変化は、定体積一面せん断試験より求まる。

4.3. 圧密時間の算出法及び換算

式(1)から、安全率に起動モーメントを乗じた値から未圧密層（N 次盛土）の抵抗および引抜き抵抗によるモーメントを引いた値が、圧密層に求められる必要モーメントとなる（式(1)の M_R 、 T_i には未圧密層（N 次盛土）分と圧密層（N-1 次以下盛土）分が含まれている）。圧密層の抵抗及び引抜き抵抗によるモーメントは圧密時間の関数であるから、圧密時間 t_c を変化させ、必要最低圧密時間 t_{cd} を求めることができる。変化させる t_c は、実験値 t' に変換させる必要があり、さらに層ごとに排水距離が異なるので各々の変換が必要となる。盛土施工の実情と実験結果より、圧密時間の各々の換算にはテルツァギの二乗則を用いることとする。求められた必要最低圧密時間 t_{cd} は、N-1 次盛土載荷後の、N 次盛土が施工可能となる圧密時間である。しかし、N-2 次以下盛土はそれ以前にも圧密により強度増加している。したがって、ある時点の間隙比までの応力履歴は、それ以降の圧密沈下には影響しないものと仮定し、以下にある層の換算圧密時間について述べる。沈下量 S は平均圧密度 U の近似式を用いると次のように表せる。²⁾

(I) 時間係数 $T_v \geq 0.5$ の時

$$S = \frac{k \cdot H \cdot p \cdot \left\{ 1 - 8 \cdot \frac{\exp(-\pi^2 c_v \cdot t / 4H_d^2)}{\pi^2} \right\}}{\gamma_w c_v} \quad (6)$$

(II) 時間係数 $T_v < 0.5$ の時

$$S = \frac{4kp \cdot \sqrt{c_v \cdot t / \pi}}{\gamma_w c_v} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 c_v ：圧密係数、 H_d ：排水距離、 γ_w ：水の単位体積重量、 k ：透水係数、 p ：圧密圧力、 H ：層厚

紙面の都合上、(II)を用いて説明する。図-3 において線分 $\overline{OA}$ は、次の盛土（ある層に対して m 層目）による自重圧密の経路を示し（ $\overline{AB}$ 、 $\overline{BC}$ 、 $\overline{CD}$ は $m+1 \sim m+3$ 層目を盛る為に $m+0 \sim m+2$ 層の荷重と自重による圧密の経路）、 $t_m \sim t_{m+3}$ は圧密時間、 $t_{m+1}^* \sim t_{m+3}^*$ は換算圧密時間を表す。また、各々の傾きを $a_m \sim a_{m+3}$ とする。ある層が、B の沈下量を得るためには (p_1, t_m) から (p_2, t_{m+1}) の応力経路を経る。もし、初めから p_2 の荷重を受けていたならば、B の沈下量を得るためには $(p_2, t_{m+1} + t_{m+1}^*)$ という唯一の応力経路として表される。ある層に対して n 層目を盛るためとし、実験値への変換（供試体の有効排水距離 H_d' ）を含めた換算圧密時間 t_n^* を一般式として以下に示す。

図-3 換算圧密時間

$$t_n^* = (a_{n-1}/a_n)^2 \cdot \{ t_{n-1}^* + t_{n-1} \cdot (H_d'/H_d) \}^2 \quad (8)$$

$$a_n = 4kp_n / \sqrt{c_{v(n-1)} \cdot \pi} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $a_1=0$ $t_1=0$ $t_1^*, t_2^*=0$ 。

同様にして求めた(I)の場合の一般式を示す。

$$t_n^* = \left\{ t_{n-1}^* + t_{n-1} \cdot (H_d'/H_d)^2 \right\} + \ln(a_{n-1}/a_n) \quad (10)$$

$$a_n = 8kHp_n \cdot \exp(-\pi^2 c_{v(n-1)} / 4H_d^2) / \gamma_w c_{v(n-1)} \pi \dots (11)$$

5. 提案設計法の適用

火山灰質粘性土のなかで代表的な関東ロームを飽和度規定で締め固め（施工含水比は自然含水比）、補強材に複合不織布(TRF-31)を用いて築造される急勾配高盛土を想定する。

5.1. 定体積一面せん断試験³⁾

提案設計法に所要のパラメータ決定のために、関東ローム自身のせん断特性および関東ロームと複

合不織布の摩擦特性を調べるための２種類の試験が必要である。本研究では、これらの両試験を定体積一面せん断試験で行った（三笠式改良型一面せん断試験装置使用）。

(1) 供試体初期条件

関東ロームを5mmふるいでふるい分けし、含水比調整をしたものを用いた。関東ロームなどの火山灰質粘性土はその性質上、飽和度規定で締め固められる。飽和度規定では施工時の含水比や密度を数値的に規定することはしていない。本研究では、含水比と密度を設定した上で、供試体を作成するため、これらの設定が必要となる。したがって、含水比 w は自然含水比 $w_n=128\%$ とし、湿潤密度 ρ_i はほぼ飽和($S_r \approx 98\%$)している 1.363g/cm^3 と設定した。なお、供試体作成法は突固めとした。

(2) 試験条件

関東ロームの標準圧密試験より、圧密降伏応力 p_v は $1.5 \sim 2.0\text{kgf/cm}^2$ であった。また、一次圧密終了時間は $10 \sim 20$ 分前後である。これらより試験条件を定め、表-1 に示す網掛け部分について試験を行い、空白部は試験結果より内挿した。

(3) 試験結果

関東ロームの粘着力および関東ロームと複合不織布の粘着力成分は圧密時間によらずほぼ一定であった。 $\tan \phi_{cu(s)}$ と圧密時間 t_c の関係を図-4 に示す。関東ロームの $\tan \phi_{cu}$ および関東ロームと複合不織布の $\tan \phi_{cus}$ は圧密時間と共に増加し、一次圧密が充分終了した後はほぼ一定値になる傾向を示した。さらに、 $\tan \phi_{cus} / \tan \phi_{cu}$ が圧密時間によらずほぼ一定($\tan \phi_{cus} / \tan \phi_{cu}=1.1$)であるという注目値する結果を得た。これは複合不織布の繊維と関東ロームの土粒子との間に優れたか見合わせ効果が得られたものと考えられ、用いた複合不織布は関東ロームに対して有意な摩擦抵抗を示し、引張り補強材として有効に働くと判断できる。

5.2. 安定解析

(1) パラメータ

$c_{cu}(t_c)=0.322\text{kgf/cm}^2, c_{cus}(t_c)=0.196\text{kgf/cm}^2, k=0.0042\text{m/min}$ 。 $\phi_{cu}(t_c)$ およ

び $\phi_{cus}(t_c)$ は、最も良い相関を示した次式で近似する(単位：度)。

$$\phi_{cu}(t_c) = 20.2 - 1/\exp(-3.00 + 0.941\sqrt{t_c}) \quad (12)$$

$$\phi_{cus}(t_c) = 22.0 - 1/\exp(-3.09 + 0.944\sqrt{t_c}) \dots (13)$$

$$c_v = 8.25 \times 10^{-6} + 2.72 \times 10^{-6} \ln \sigma_c \quad (\text{m}^2/\text{min}) \dots\dots (14)$$

ここに σ_c は圧密圧力(tf/m^2)

表-1 試験条件

		圧密圧力 (kg/cm ²)			
		0.5	1.0	2.0	3.0
圧密時間 (分)	2	○	○	○	○
	5				○
	10				○
	20	○	○	○	○
	30				○
	60	○	○	○	○

図-4 $\tan \phi_{cu}, \tan \phi_{cus}$ と圧密時間 t_c 関係

図-5 勾配の影響

基礎地盤はすべり面が内部を通らない砂礫層とする。

(2) 無補強盛土

全く補強されない盛土（締め固めは可能）を想定し、勾配 1:0.1, 0.3, 0.6, 0.8 盛土高 5, 10, 20, 30m の組合せについて計算を行った。その結果、安全率は図-5 に示すように盛土高ごとに勾配の影響が異なり、それぞれ直線的な変化をする。また、限界盛土高 H_c ($F_s=1.0$ の盛土高)は約 10m である。さらに、図-6 に示すように、図-5 の各々の垂直勾配安全率（切片）、安全率改善率（傾き）は盛土高に対して反比例で良い相関を示した。安全率改善率は勾配に対する影響を示すことから、盛土高が高くなるにつれ勾配の影響は小さくなる。

(3) 排水効果のみを考慮した場合

勾配 1:0.1 で排水効果が十分に発揮された状態（無限時間放置した状態）での、盛土高に対する安全率の変化について計算を行った。その結果、図-7 に示すように安全率は盛土高に対して反比例で良い相関を示した。また、限界盛土高 H_c は 11.8m となった。無補強時に比べ安全率で 18% 程度の有為な差があり、確実に補強されているものと判断できる。

(4) 引張補強効果のみを考慮した場合

勾配 1:0.1 で表-2 の敷設方法で、引張補強効果のみを期待した場合の計算を行った。その結果、図-8 に示すように、どの敷設方法においても盛土高 20m は施工不可能となった。敷設方法①～④の順で常に総定着長が長いため、同順で安全率が高い結果となった。しかし、盛土高が高くなるにつれ敷設方法間の差は小さくなる。敷設方法①～④の順に限界盛土高 H_c は 19.1, 18.6, 17.0,

図-6 垂直勾配安全率, 安全率改善率

図-7 盛土高-安全率関係
(排水効果のみ)

表-2 敷設方法

敷設方法		①	②	③	④
層 No.	層圧	N_f, le	N_f, le	N_f, le	N_f, le
1	5m	10,3	5,3	10,1	3,1
2	5	3,2	9,2	10,1	3,1
3	4	2,1	2,1	5,1	9,1
4	3	1,1	1,1	1,1	1,1
5	3	1,1	1,1	1,1	1,1

N_f : 複合不織布枚数, le : 定着長(m)

15.3mとなった。

(5) 両効果を考慮した場合

(i) 敷設方法の影響

盛土高 20m, 勾配 1:0.1 の盛土を想定し、表-2 に示す 4 パターンの敷設方法で計算を行った(図-9 参照)。なお、圧密時間は必要最低圧密時間 t_{cd} に従うとする。その結果、複合不織布総延長は敷設方法④(273m), ①(289m), ②(373m), ③(425m)の順で短く、総圧密時間は敷設方法②(591分), ③(905分), ①(8758分), ④(16885分)の順で短い結果を得た。敷設方法②, ③の比較では、敷設方法②の方が有効な敷設法である。排水距離と各盛土段階における総定着長を比較すると、排水距離は敷設方法③の方が短く、総定着長は②の方が常に長い。このことは、複合不織布の引抜き抵抗力が安全率に大きく寄与していることを示す。特に下層の排水距離を短くし、下層の総定着長を長くした方が効果的であることが判明した。

図-8 盛土高-安全率関係
(引張補強効果のみ)

図-9 敷設図

(ii) 施工行程の影響

N-1 次盛土終了後、未圧密で N 次盛土が盛土可能な場合でも、N-1 次盛土終了後意図的に圧密させた場合、総圧密時間がどのように変化するかを調べるため、敷設方法③において図-9 の太線部分（意図的に圧密させる部分を表す）のパターンで計算を行なった。その結果、複合不織布総延長は施工工程③c(378m), a(379m), b(379m), d(425m)の順で短く、総圧密時間は施工工程③c(495 分), b(510 分), a(905 分), d(955 分)の順で短い結果を得た。施工工程③d が意図的な圧密を施さないパターンであり、最も効率の悪い結果であることから、未圧密で盛土可能な場合でも意図的に圧密させた方が、総圧密時間を短縮でき、特に盛土初期段階に圧密させた方がより短縮できることが判明した。

(6) 限界盛土高 H_c による比較

無補強、引張効果のみ、排水効果のみのいずれの場合も限界盛土高 H_c より、盛土高 20m は施工不可能である結果となった。しかし、引張効果・排水効果の両効果を考慮した場合、敷設方法①～④のどの場合でも盛土高 20m は施工可能な結果を得た。よって、両効果を考慮することで、より経済的な設計が可能になったと言える。

6. まとめ

実験に用いた複合不織布は、関東ロームに対して引張補強材として十分な摩擦特性を示した。複合不織布の排水効果および引張補強効果を同時に考慮した設計法を提示した。どちらか一方の効果を考慮した場合に盛土施工不可と判断される場合でも、両効果を考慮した提案設計法では盛土施工可と判断されることから、複合不織布の特性を十分に考慮できる設計法であると考ええる。また、施工過程をイメージしながら安定性の判断を行うことができるため、工程管理を考慮に入れた設計法が容易にできる特徴も有している。

なお、本研究の一部は文献(4) (5)に発表済であることを付記する。

参考文献

- 1) ジオテキスタイル補強盛土工法普及委員会, ジオテキスタイルを用いた設計・施工マニュアル, pp. 51-83, 1996
- 2) 山口伯樹, 土質力学(全改訂), pp. 121-122, 技報堂, 1984
- 3) 陶山・棚橋・和久田・安原・西村, 高含水比火山灰粘性土と複合ファブリックの一面せん断試験による摩擦特性の把握, 平成 8 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, Ⅲ-57, pp. 480-481, 1997
- 4) 和久田・棚橋・陶山・安原・西村, 圧密による強度増を考慮した急勾配補強盛土の設計法試案, 平成 8 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, Ⅲ-126, pp. 614-615, 1997
- 5) 棚橋・和久田・陶山・安原・西村, 圧密による強度増と複合不織布の補強効果を考慮した急勾配補強盛土の設計法の試案, 第 32 回地盤工学研究発表会, pp. 2557-2558, 1997

図-10 盛土施工工程 (計算結果)