

14. ジオテキスタイルを用いた軟弱粘性土の 急勾配盛土補強に関する研究

土岐 晃生

要 旨

建設工事に伴って発生する建設副産物の処理問題は大きな社会問題となっているが、近年、これを資源として積極的に再利用しようとする試みが盛んになされている。本研究はその一環として、高い排水性能と材料強度を持つジオテキスタイル（GHD）を補強土工法に用いて、これまで処理が困難とされてきた高含水比の粘性土による急勾配の盛土工事を可能にしようとして行ってきた。

本報は、今回開発したGHDの物性試験と、それらを使って行った実大盛土実験について、その結果を述べるものである。実験の結果、GHDの材料性能と盛土施工の安定性を確認することができた。

キーワード

ジオテキスタイル／GHD／補強土／建設副産物／粘性土／強度増加

目 次

1. はじめに
2. 開発の概要
3. 材料開発
4. 実験盛土の実施計画
5. 盛土実験と崩壊実験の結果
6. 補強材に発生した引張力の逆算
7. まとめ

14. A STUDY OF THE USE OF GEOTEXTILES FOR THE REINFORCEMENT OF STEEP SOFT CLAY EMBANKMENTS

Teruo Toki

Abstract

The treatment of construction by-products generated during construction works has become a major social problem. In recent years however, positive efforts have been made to make use of these by-products as a source of raw materials through recycling. In the light of this situation, it was planned to make possible the effective re-use of construction by-products such as high water content soft clay, that presents particular problems. Therefore, this research was carried out to investigate the possibility of constructing steep embankments using Geosynthetic Horizontal Drain Materials (GHD), that combines high drainage characteristics with high tensile strength.

The stability of the GHD developed for this research was confirmed through a series of material tests and the trial construction of full size steep slope embankments.

1. はじめに

近年、環境保全の立場から、産業廃棄物や建設残土などを有効に利用する方法についてさまざまな研究開発がなされている。その中で高含水比の軟弱粘性土については、天日乾燥や改良材の添加などを併用して埋め立てに使用する他に利用方法がなく、その有効な利用方法の開発が望まれていた。

本報は、GHD(ジオシンセティック水平排水材)と総称されるジオテキスタイル材を開発して補強土工法に用いることにより、従来ではその取扱いが困難であった軟弱粘性土の有効利用を図ることを目的として行ってきた一連の研究開発について報告するものである。

2. 開発の概要

軟弱な土を盛り立てる際、ジオテキスタイルは、それらを適当な厚さごとに敷き込むと引張り補強材としての機能を果たし、土のみの場合より高い支持力を持つ盛土体を築造できることがこれまでに知られており、補強土工法のひとつとして実用化されている。

またジオテキスタイルは、その組織構造から言って排水性能に優れているため、適切に使用すれば土中の間隙水圧を早期に消散させ、圧密を促進することができるのも特長としてあげられている。

しかしながら、従来のジオテキスタイルは、これらの優れた特質のいずれかの機能は持っていない、それを2つとも持った材料がなかったために、補強土工法に使用するには対象土質など制約面が多かった。

今回の開発は、こういったジオテキスタイルの素材の持つ優れた特質を有効に発揮する材料(GHD)を開発し、それを補強土工法に適用することによって、従来では施工が困難とされた高含水比の粘性土の急勾配盛土を可能とすることにより、建設残土の有効利用や用地の高度利用を図ろうと行ってきた。

本報告では、このような要求仕様を満足する補強材(GHD)の開発、およびそのGHDを用いて盛土を行うための設計と施工実験および崩壊実験の結果について報告するものである。

3. 材料開発

3.1 GHDの要求仕様

今回の開発に向けて行ってきた室内試験や予備実験および補強に関する基礎研究の結果をもとに、GHD

に要求する性能仕様を次の様に設定した。

- ・引張り強度 ; 5%伸長時 0.5tf/m以上
; 破断時 8.0tf/m以上
- ・面内方向透水係数 ; $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 以上

3.2 開発材料の物性および実験材料の選定

開発目的に合致するGHDの試作材料は14種類にのぼった。材料の強度試験や透水試験などの室内試験を行い、またコスト、施工性などを検討して材料形状ごとに優れた材料を選定し、3材料まで絞り込んだ。また、比較用としてすでに市販されている不織布を1種類採用し、合わせて4材料について工区を分け、それぞれの実験盛土を行うこととした。

表-1にこれらの材料の物性試験の結果を示す。いずれも3.1に示す要求仕様を満足している。なお、図-1は実験盛土に使用する材料の構造を模式化して表したものである。

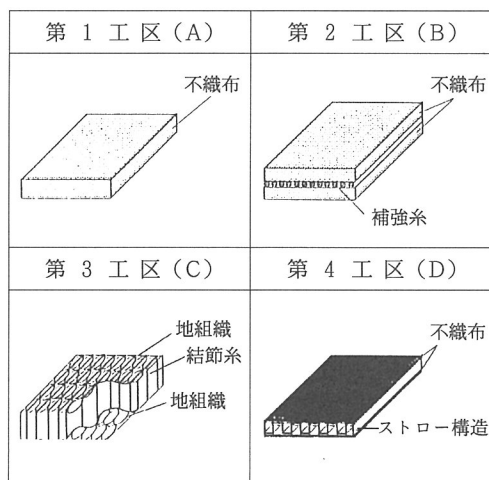


図-1 GHDの構造模式図

表-1 GHDの材料物性値

材料 No.	材料分類 (補強不織布)	引張り強さ (tf/m)			破断時 伸び率 (%)	面内方向透水係数 (cm/s) 上載荷重 (kg/cm ²)			採用 工区
		5% 伸張時	10% 伸張時	破断時		1.0	2.0	3.0	
A	不織布	0.3	0.7	4.2	82.5	1.6×10 ⁻¹	1.2×10 ⁻¹	6.2×10 ⁻²	1
B	GHD (補強不織布)	4.5	7.1	7.4	11.4	3.2×10 ⁻¹	1.3×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹	2
C	GHD (繊維物)	2.5	5.0	8.2	18.1	9.4×10 ⁻¹	5.0×10 ⁻¹	3.1×10 ⁻¹	3
D	GHD (ストロー材)	4.4	5.6	8.5	32.1	1.6×10	1.6×10	1.6×10	4

4. 実験盛土の実施計画

4.1 実験の手順

実験の目的はGHDの排水機能と補強機能を検証することにある。したがって、GHDを敷設しながら粘性土を盛り立てることにより、施工中および完成後の盛土体の変位、土中の間隙水圧変化、GHDのひずみ等を計測する。今回の実験に使用した粘性土は予備実験の結果から、時間経過とともに強度増加が起こることが分かっていたので、盛土は一定の圧密時間をおきながらの緩速施工とした。

盛土が完成後は所定の圧密時間が経過するまで待機した上で、その最上部にGHDを敷設してから上載荷重を斜面崩壊が起こるまで順次、載荷し、限界状態における盛土中のGHDの挙動を観察した。なお、上載荷重として砂質土を用いた。以上の手順を段階別に次に示す。

- ・第1段階 盛土；圧密による土の強度増加を図りながら緩速で盛土を行う。
- ・第2段階 待機；90%の圧密に達するまで待機し、排水による土の強度増加を図る。
- ・第3段階 崩壊；設計高さ以上に盛土を行い、その載荷重により崩壊させる。

4.2 盛土方法

軟弱な粘性土を盛り立てる実験施工および計測管理が行い易いよう、あらかじめ図-2に示すように地盤条件の良い場所に、東西100m、南北30mの大きさで良質土による盛土枠を築造した。実験工区は4工区とし、それぞれの箇所に軟弱粘性土を高さ3mに、法勾配1:0.5で盛り立てることとした。

その際、粘性土からの浸透水が盛土枠へ流出して境界部分の排水条件が異ならないようにするため、粘性土との接触面の盛土枠側面や底面をすべて遮水シートで覆った。粘性土を盛り立てる直前の状況を写真-1に示す。

GHDの敷設および法面の表面保護についての施工方法を図-3に示す。盛土の巻き立て厚は1層を30cmとし、斜面の表面は1層ごとに土のうと不織布で保護した。また、GHDは2層（60cm）を盛り立てるごとに敷設した。

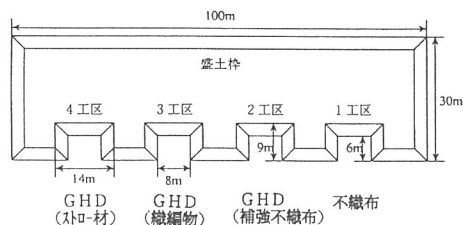


図-2 実験工区平面図



写真-1 盛り立て直前の状況（4工区）

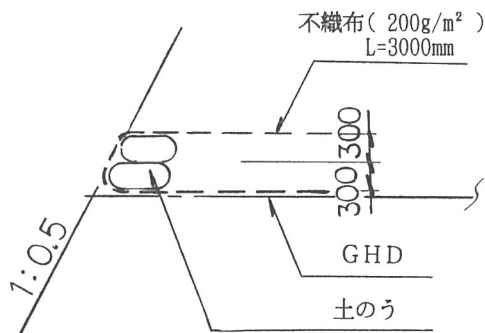


図-3 法面保護の仕様

4.3 土の材料特性

(1) 盛土実験に用いた粘性土の物理・力学的特性

盛土材に使用する粘性土は、大阪産業廃棄物処理公社による産業廃棄物の海洋埋め立て処分の際に海底から押し出されて発生した沖積粘性土である。この沖積粘性土は自然含水比が高く、攪乱による強度低下が著しいのが特徴である。施工時の粘性土の含水比は85%であった。その粘性土の物理・力学的特性を表-2に示す。

(2) 土質定数の設定

実験盛土の安定解析を行うための土質定数は各種の室内試験の結果から、表-3のとおりとした。

表－２ 粘性土の物理・力学的特性

土粒子の密度 g/cm ³	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _n (%)	塑性指数 I _p (%)	単位重量 (tf/m ²)	一軸圧縮強度 qu(kgf/cm ²)	圧縮指数 Cc
2.716	100.5	31.7	68.8	1.489	0.087	0.85

表－３ 土質定数

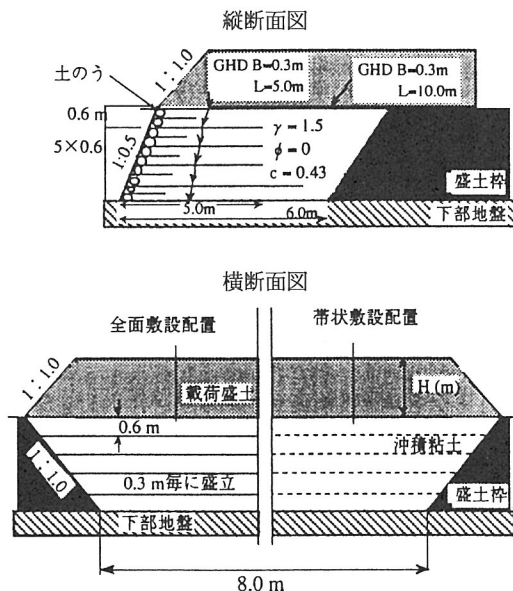
材料名	単位重量 γ t(t/m ³)	内部摩擦角 φ°	粘着力 C(tf/m ²)	圧密係数 Cv(cm ² /d)
粘性土 (盛土)	1.5	0	0.43	40
砂質土 (載荷)	1.6	30	0	—

4.4 GHDの種類と配置

実験に用いたジオテキスタイルは、1工区は比較用の不織布、2工区はGHD（補強不織布）、3工区はGHD（編織物）、4工区はGHD（ストロー材）である。なお、従来のジオテキスタイル材に比べて開発したGHDの引張り強度が著しく高いため、実験ではそれらの強度比を同等にするために、GHDの敷設面積は1工区は全面敷設、2～4工区は面積比50%の帯状敷設として調整した。

GHDは事前に行った予備検討の結果から、次の各点を設計に取り入れ、それに従い配置した。

- (1) 補強材の敷設は60cmごとの6段とする。
- (2) 1～5段目は盛り立て時の粘性土の安定条件から敷設長さを5mとする。
- (3) 6段目のGHD補強材は上載荷重の載荷時の安定



図－４ GHDの配置と盛土方法

性を確保した上で、最終的にはその部分で破断するように敷設長さを10mとし、最小安全率のすべり面がGHD材内を通るようにする。

図－４にGHDの配置と盛土の方法を示す。盛り立ては圧密による強度増加を図るため、室内実験の結果をもとに1日2層づつ行いのを基本として行い、盛土完成後の崩壊実験は90%圧密が達成された時点で行うものとした。

4.5 計測方法

盛土実験に伴う粘性土の性状変化と盛土地盤の挙動調査を行うため、表－４に示すような内容で試験を行った。

表－４ 調査目的と計測項目

調査目的	試験項目
粘性土の状態調査	含水比 コーン貫入試験
盛土に伴う挙動調査	レーザー測量 斜面水平移動 パイプひずみ 間隙水圧 土圧 排水量

4.6 安定解析および設定条件

(1) 安定計算式

盛土実験と崩壊実験の解析のために必要な安定計算は（財）土木研究センター／ジオテキスタイルを用いた補強土の設計、施工マニュアルで示される次式を用いた。

$$F_s = \frac{R \cdot \sum \{c_i \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \theta_i + T_i \cdot \sin \theta_i) \cdot \tan \phi_i + T_i \cdot \cos \theta_i\}}{R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \theta_i)}$$

ここに、

F_s ：安全率 c_i ：土の粘着力（tf/m²）

R ：すべり円弧の半径（m） W_i ：分割片の土塊重量（tf/m）

l_i ：分割片で切られたすべり面の弧長（m）

ϕ_i ：土の内部摩擦角（°）

θ_i ：各分割片で切られたすべり面の中点のすべり角度（°）

T_i ：各補強材の引張り強度TA（材料の破断強度とした）と引き抜き抵抗抗力Tpi（次式のとおり）のうち小さい値。

$$T_{pi} = 2 \cdot (0.5 \cdot c_i + 1.0 \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi_i) \cdot L_{di}$$

σ_v ：各段の補強材の定着部に作用する鉛直土圧（ $= \gamma_t \cdot h_i$ ）

L_{di} ：各段の補強材の定着長

5. 盛土実験と崩壊実験の結果

5.1 盛土実験の結果

粘性土を盛り立てていく過程での盛土地盤の挙動に関しては紙面の都合により省略するが、計測した実験結果から、GHDからの排水がすみやかに行われたことと、GHDとGHDの層間の粘性土中においても盛土荷重が増加しても間隙水圧の消散が早く圧密による粘着力の増加が見込めることを確認した。これらの詳細については別の機会に報告したい。

5.2 崩壊実験の結果

(1) 载荷に伴う変形の状況

実験盛土に载荷重をかけるに従い、各工区でそれぞれ異なった载荷の高さで盛土地盤が崩壊した。それらの崩壊に到るまでに盛土部分に見られた状況を表-6に、またその施工中および崩壊後の状況を4工区を例として、写真-2～5に示す。

不織布を全面敷設した1工区の場合には、斜面全体が全面に押し出されるような変形が見られ、特に盛土下方の2層目が著しくせり出した。一方、GHDを帯状配置した2～4工区(面積比50%)では、载荷盛土高が大きくなるに従い、変形箇所が盛土下

表-6 崩壊に至るまでの実験状況

工 区	1工区	2工区	3工区	4工区
GHDの種類	不織布	補強不織布	織編物	ストロー材
敷 設 率	100% 全面敷設	50% 帯状敷設	50% 帯状敷設	50% 帯状敷設
粘性土盛土高さ	3.0m	3.0m	3.0m	3.0m
载荷盛土高さ (クラック発生時)	1.5m	1.5m	1.0m	2.1m
载荷盛土高さ (崩壊時)	2.2m	2.0m	1.7m	2.8m
GHDの状況 (崩壊時)	破 断	引き抜け	破 断	破 断



写真-2 盛り立て8層目完了時（4工区）

方の2層目から順次、上層が覆いかぶさるように変形が上方へ移行し、ついに中腹部から崩壊するような状況が見られた。

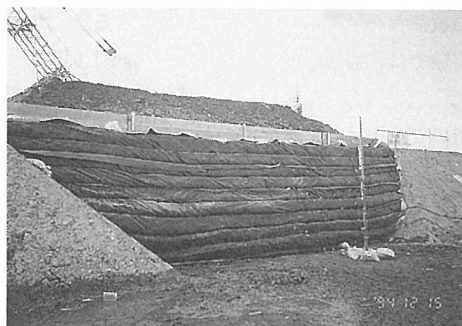


写真-3 载荷盛土（+2.0m）完了時（4工区）

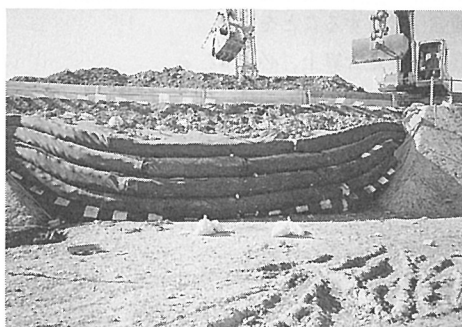


写真-4 载荷盛土による崩壊後（4工区）



写真-5 盛土背面の滑落崖の状況（4工区）

(2) 盛り立てと粘着力

表－５に設計手法の基本的項目を示す。斜面安定の実験を行う場合、補強を過大に設計して盛り立て時の安全率を高くとりすぎると、崩壊実験時に多大の載荷が必要となり、実験が困難になる恐れがある。実験では、盛り立て時の目標安全率を1.0以上として施工中の安全を図る一方、盛土完成後の崩壊実験時の安全率は、上載荷重の高さ1.5mの載荷状態で1.0となるよう設定した。

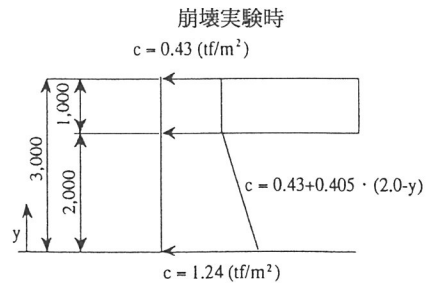
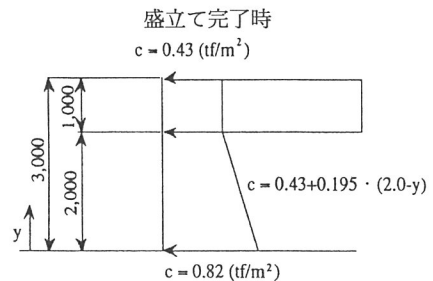
また、盛土の補強強度は補強材の引き抜き強度と材料強度のどちらか小さい方で決まるものであるが、粘土の盛り立て段階で補強材に高い引張り応力がかかると、以降の崩壊実験での材料強度に影響が及ぶ恐れがあるので、斜面安定の設計は盛り立て時には引き抜き強度で、崩壊実験時には材料強度で決まる補強仕様とすることを目標とした。

盛土の安定計算上、必要な粘着力は以下のように仮定した。初期の粘着力 C 。(0.43tf/m²)に相当する盛土荷重を圧密降伏応力と見なし、それ以上の盛土については室内試験で得られた圧密曲線に基づき粘着力の増加を見込むものとし、図－５のような粘着力の分布を設定した。

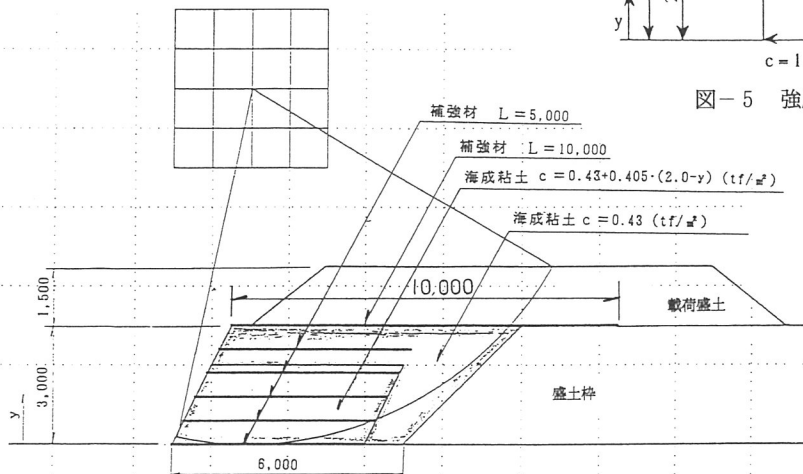
図－６に安定解析のアウトプットの一例を示す。

表－５ 設計手法の基本的項目

項 目	内 容
安定計算の手法	円弧すべり計算方法
土の粘着力 (未圧密時)	既存の三軸圧縮試験、一軸圧縮試験データより設定
圧密による強度増加	GHD配置レベルを排水層とみなし、一次元圧密解析により算出
GHDの引抜き抵抗	土のせん断強度より次式を用いて算出 $2 \cdot (0.5 \cdot C_i + 1.0 \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi_i) \cdot L_{ei}$
GHDの材料強度	室内材料試験による破断強度
盛り立て時の安全率	1.0以上。計算結果は下記のとおり
崩壊のための 載荷盛土高	3 m以下とする



図－５ 強度増加後の粘着力



図－６ GHD補強盛土の安定計算結果例 (1.5m 載荷時)

(2) 圧密による強度増加の検証

盛土実験に際し、表－4に示すような調査と計測を行ったことはすでに述べたが、紙面の都合上、それらの結果はここでは省略し、粘着力の増加についてのみその結果を述べる。

図－7は、粘性土の盛り立て時に計測した粘着力、および崩壊後に計測した粘着力を、それぞれ位置別にプロットしたものである。いずれもミニコーン貫入試験器で得られた強度を粘着力 $C = qc/5$ から換算して求めたものであるが、それらの値はバラツキがあるものの、ほぼ当初の設計段階での想定通り、GHDによる排水効果により圧密が促進され、粘着力の強度が増加している様子を示している。

6. 補強材に発生した引張力の逆算

すでに述べたように、実験盛土が変状を示した時の載荷盛土の高さは表－6に示すとおりであるが、どの時点の状況を崩壊と見るかについては、線引きが難しいので、ここでは試みに、盛土にクラックが発生した時点および崩壊に到った時点の、それぞれの時点において斜面安定の安全率が1.0であったと仮定し、各層のGHDに発生した引張力を逆算してその結果を表－7に示した。

なお、今回の安定計算はGHDの長さとその配置および断面形状をもとに行ったものであり、材料の違いによる摩擦係数の差は考慮していない。表の中の引き抜き力の差は想定すべり面の位置によるGHDの定着長の違いから生じている。

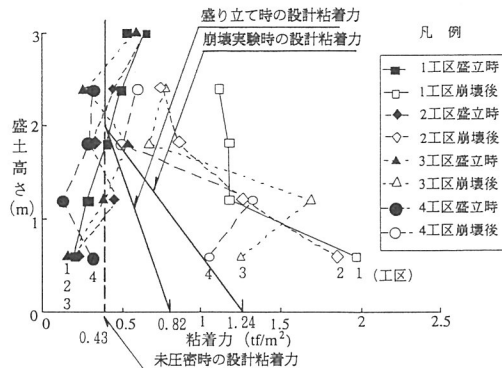
表によると、盛り立て2層目の引張力は引抜き力で決まり、盛土最上部に敷設した盛り立て10層目のGHDの引張力は殆どが材料強度で決まっていることが分かる。

この実験では斜面の安定は盛り立て10層目のGHDに負担させ、その補強効果を検証しようとしたものであるので、その位置のGHDについて逆算して得られた引張力とそれぞれの材料が持つ材料強度との比較を行った。材料強度に対する引張力の比を表－8に示す。表から次の各点が明らかになった。

- ①クラック発生時の引張力は、3工区を除き材料強度の7～9割となっている。
- ②崩壊時の逆算引張力は、3工区を除き材料強度を2～4割上まわっている。
- ③3工区では小さい載荷でクラックが発生した。

以上の検討結果から、GHDを用いて補強盛土を行った場合、斜面の安定が限界に近い状態でも一定の斜面保持効果を示し、GHDの材料強度を上回る引張力にも耐えることと、材料強度の高いGHDを用いればより高い安定性が得られることが分かった。

また、ひずみの大きい材料を使用した場合、クラック等の変状は早期に現れるが、崩壊するまでには一定の斜面保持効果のあることがわかった。



図－7 GHDによる強度増加

表－7 実験時に補強材に発生した引張力の逆算

工区	クラック発生時					崩壊時				
	盛土高 (m)	補強材に発生した引張力 (tf/m)		安全率	盛土高	補強材に発生した引張力 (tf/m)		安全率	盛土高	安全率
		2層目	10層目			2層目	10層目			
1	1.5	0.12*	3.00	1.00	2.2	0.12*	5.80	1.00		
2	1.5	0.88*	6.60	1.00	2.0	0.88*	10.20	1.00		
3	1.0	0.88*	3.00	1.00	1.7	0.88*	8.00	1.00		
4	2.1	0.88*	7.54*	0.94	2.8	0.76*	10.44	0.84		

* 引張力は敷設率を考慮して計算 ** 印は引き抜き力で決まっている。

表－8 逆算引張力と材料強度との比

工区	材料 強度 (tf/m)	クラック発生時		崩壊時	
		逆算値 (tf/m)	比率	逆算値 (tf/m)	比率
1	4.20	3.00	0.71	5.80	1.38
2	7.40	6.60	0.90	10.20	1.38
3	8.20	3.00	0.37	8.00	0.98
4	8.50	7.54*	0.89	10.44*	1.22

* 印は引き抜き力より決まっている。

7. まとめ

実験の結果から、盛土を行う際にGHDを用いて補強すれば高含水比の粘性土を用いても急勾配の盛り立て施工が可能であり、またその施工は適正な時間をとって行えば、盛土材の圧密により強度増加が見込まれ安全な盛土施工を期待できることなどが明らかになった。

さらに、今回開発したGHDが、実用上必要な排水性能と材料強度を有することおよび、この方法を用いて行った盛土工法は崩壊に対して安全性が比較的高いことなどが明らかになった。

今後、適用土質の設定や施工マニュアルの作成に取り組み、その実用化を進めていきたいと考えている。なお、現状では斜面表面の防護については不織布のままでは耐候性が低いため、コンクリートその他の材料で覆う必要があるが、ジオテキスタイルは変形が大きいため、その変形に追従できるような柔構造の保護工が望まれる。現在、いくつかの工法を考え、その検討を進めているところである。

この研究は「ジオテキスタイルを用いた軟弱土の急勾配盛土補強に関する研究」として、京都大学嘉門雅史教授を委員長とし、3大学と大阪府立産業技術総合研究所ほかの研究機関に、メーカー12社、ゼネコン7社が共同で進めてきたものである。最後になりましたが、本報の執筆にあたりご協力を賜った^(株)大林組および大阪府ならびに研究会各社の関係者の方々に謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 嘉門雅史他：GHD 補強高含水比粘性土盛土崩壊実験（その1～その3）、地盤工学会第30回土質工学研究発表会、1995.
- 2) 嘉門雅史他：GHD 補強高含水比粘性土盛土崩壊実験（その4～その6）、土木学会第50回年次学術講演会、1995.