

新しいジオテキスタイル補強盛土工法の開発

——現場載荷実験とシミュレーション解析——

鳥井原 誠 古屋 弘 平間 邦興
申間 正敏 黒岩 正夫
(本社 土木技術本部 技術第一部) (本社 土木技術本部 技術第一部)

Development of New Embankment Method Reinforcing with Geotextiles

——Field Loading Test and FEM Comparative Analysis of Reinforced Embankment——

Makoto Toriihara Hiroshi Furuya Kunioki Hirma
Masatoshi Kushima Masao Kuroiwa

Abstract

For reasons of limitations to availability of land and effective utilization of land, the demand for reinforced embankments using geotextiles has been increasing in recent years. Conventionally, reinforcements had consisted mostly of combinations of gabions and geotextiles, so they tended to be considered as temporary structures in general. In comparison, the authors have developed a new type of geotextile-reinforced embankment which amply satisfies requirements for a permanent structure, with geotextile connected to a grille frame for slope protection. The effectiveness of this new construction method has been confirmed conducting numerous laboratory tests. Now, a full-scale field loading experiment has been carried out with the aim of applying this new development in practical use.

According to the results of this model loading test the use of a grille frame connected with geotextile restrained the slope surface. Consequently, it controlled slope deformation and improved slope stability. The effect of this newly-developed method was well-reproduced by simulation of the field loading test with calculations using non-linear FEM analysis.

概 要

近年、用地の制約や土地の有効利用といった観点から、ジオテキスタイルを用いた補強盛土工法の需要が増大してきているが、従来の工法は、土のうとジオテキスタイルを組合せて施工されることが多く、仮設のり面として位置付けられることが多かった。これに対して、今回開発したジオテキスタイルとのり枠を組合せた補強盛土工法は、補強効果の増大のみならず、完成後の景観からみても永久構造物としての仕様を充分満足したのものとなっている。今回この新しい工法の実用展開を図ることを目的として実大規模の現場載荷実験を実施した。

実験の結果、この工法は従来の工法に比べて、のり面の安定性が向上し、しかも盛土の変形も小さくなることが確認できた。これらの傾向は、非線型 FEM 解析による現場実験のシミュレーション解析でも再現することができた。

1. はじめに

近年、用地の制約や土地の有効利用といった観点から、急勾配盛土が可能なジオテキスタイルを用いた補強盛土工法の施工実績が増大してきている。従来、この工法におけるのり面施工の多くは、土のうとジオテキスタイルを組合せて行われてきたが、この場合、その補強効果の信頼性や出来上がり形状・景観などから、仮設構造物としての位置付けになることが比較的多かった。これに対して、今回開発したジオテキスタイルとのり枠を組合せた補強盛土工法は、補強効果の増大のみならず、完成後の景観からみても永久構造物としての仕様を充分満足したのものとなっている。

この新しい工法についてこれまで数多くの室内模型実験によってその効果を確認してきたが^{1),2)}、今回その実用展開を図る上で不可欠な設計・施工システムの確立を目指して実大規模の現場実験を行い、各種データを計測し、のり枠と組合せたことによる補強効果の増大について検討した。さらに、今回の実験について、各種室内土質試験結果から得られた定数をもとに FEM によるシミュレーション解析を実施した。

2. 試験工事

2.1 新しい補強盛土工法の概要

一般に、補強盛土の安定性は、補強材の引張り強度や補強材と土との摩擦抵抗力に支配されるが、その他にの

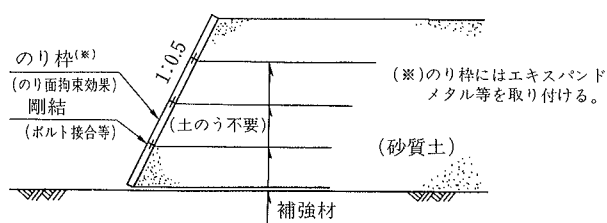


図-1 盛土材料が砂質土の場合

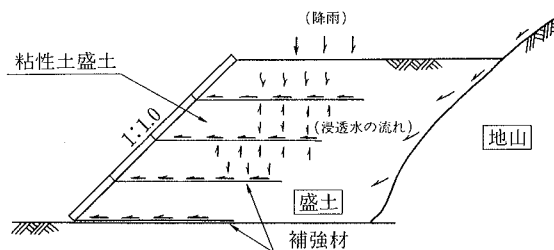


図-2 盛土材料が粘性土の場合

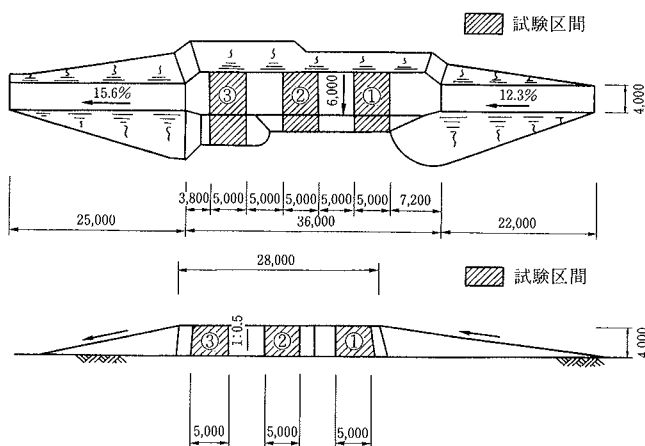


図-3 試験盛土概要図

表-1 試験盛土一覧表

	ブロック①	ブロック②	ブロック③
盛土高	4.0m	4.0m	4.0m
のり勾配	1:0.5	1:0.5	1:1.0
盛土材料	山砂(砂質土) 密度: 1.85t/m ³ 含水比: 2~5% 締固め度: 85%以上	同左	ローム(粘性土) 密度: 1.5t/m ³ 含水比: 65~90% 飽和度: 90%以上
使用補強材	テキスタイルグリッド 材質: ビニロン 強度: 3.0tf/m 目合寸法: 20×20mm 敷設長: L=2.5m 敷設ピッチ: 100cm	同左	排水性補強材 材質: ポリオレフィン+不織布 強度: 250kgf/50cm 透水係数: 1×10 ⁻² ~10 ⁻¹ cm/sec 敷設長: L=4.0m 敷設ピッチ: 71cm
使用のり枠	(在来工法)	軽量のり枠(GRC) (補強材とボルト接合)	RCのり枠 (同左)

り表面の拘束条件によっても大きな影響を受けることが明らかとなってきている³⁾。筆者らがこれまでにやってきた多くの模型実験からも、同一の補強材を使用した場合のり面の拘束条件によって補強効果に大きな差が生じ、のり面拘束工のある場合盛土の安定性は著しく向上するが、のり面拘束工の無い場合には補強材の強度を十分に生かすことができず、盛土の安定性はあまり向上しないという結果が得られている^{1),2)}。

従来の補強盛土工法では、のり面拘束の手段としてのり表面に多数の土のうを配置し、ジオテキスタイルで巻き込む方式を採用しているが、変形量が大きく充分なのり面拘束効果が発揮されないため、のり面が不安定になりやすい。しかも、ジオテキスタイル露出部の材料劣化や、土のう製作および積み上げ時の施工手間など、景観上の問題以外にもさまざまな問題点が指摘されている。

これらの問題点を解決することを目的として、図-1, 2に示すようなジオテキスタイルとのり枠を組合せた補強盛土工法を今回新たに開発した。この工法はジオテキスタイルとのり枠を剛結し、のり面の拘束効果を高めることによって補強効果を増大させるとともに、補強領域の一体化を促進してのり面の変形を小さくするところにその特徴がある。同時に、施工において土のうを使用しないため、省力化と施工のスピードアップが図れ、必要に応じてのり枠内に植生を行うなど景観を考慮した設計も可能である。また、補強材に排水機能を有するジオテキスタイルを用いることによって、高含水比粘性土の盛土に対しても補強盛土工法が適用可能である。

2.2 試験工事の概要

試験実施場所は、栃木県宇都宮市豊郷台の当社造成地

内の切土部で実施した。試験盛土の全体概要を図-3および表-1に示す。試験区間は①~③の3ブロックとなり、各ブロックの断面図を図-4~⑥に示す。ブロック①, ②は砂質土、ブロック③は粘性土を対象としている。盛土の高さは4.0m、試験区間は各5.0m、のり勾配は砂質土で1:0.5、粘性土で1:1.0である。各ブロック間には相互の影響を排除するため5.0mの緩衝帯を設けている。

ブロック①は従来からよく行われてきた土のうを使用した巻き込み方式である。ブロック②は今回新たに開発したジオテキスタイルとのり枠を組合せた工法で、のり表面の拘束効果を高めるために、ジオテキスタイルとのり枠はボルトで剛結されている。この工法では盛土を急勾配にするため、ジオテキスタイルを敷設した後のり枠1段を所定の勾配で設置し盛土を行うという作業を繰返すが、そのためにはのり枠は軽量である方が施工性がよい。今回の試験工事ではグラスファイバー補強コンクリート(GRC)製軽量のり枠を使用した。また、のり枠の間は砂のこぼれ出しを防止するため、エキスパンドメタルと不織布を取り付けている。

実験に使用した補強材はブロック①, ②ともテキスタイル系ジオグリッド(Tmax=3.0tf/m、目合い寸法20×20mm)で、敷設長2.5m、敷設ピッチ1.0mである。

ブロック③は、ブロック②の工法を粘性土に対して適用したもので、不織布にポリオレフィンの芯材を挟んだ幅50cmの排水性補強材(Tmax=250kgf/50cm、k_H=1×10⁻²~10⁻¹cm/sec)を長さ4.0m、鉛直ピッチ0.71m、水平ピッチ1.0mの千鳥型配置で敷設し、これをRC製のり枠とボルトで剛結している。なお、粘性土の場合には1段ごとにのり面を整形した後のり枠を設置するとい

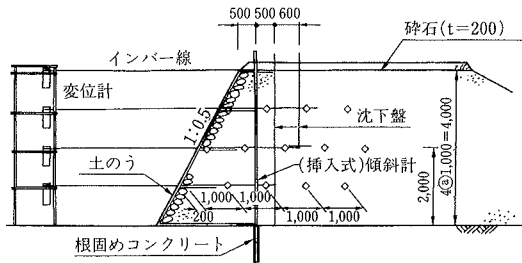


図-4 ブロック①：従来工法

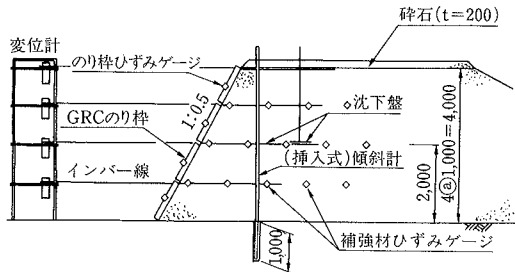


図-5 ブロック②：ジオテキスタイル+のり枠(砂質土)

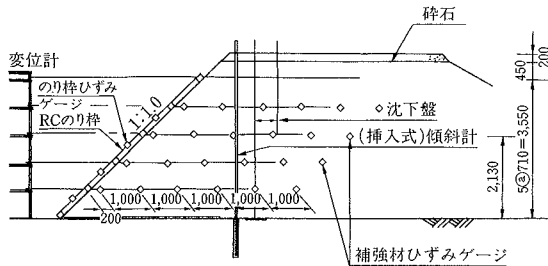


図-6 ブロック③：ジオテキスタイル+のり枠(粘性土)

う作業を繰返した。

盛土材料は、ブロック①、②では自然含水比2～5%の山砂、ブロック③では自然含水比65～90%の現地発生ローム質粘性土を使用し、これらをボマークタイプ振動ローラ、およびプレートタンパを用いて各層30cmごとに転圧して均一な盛土を造成した。盛土の密度、飽和度管理にはRIを用い、ブロック①、②で $\gamma=1.85 \text{ t/m}^3$ 、ブロック③で $\gamma=1.5 \text{ t/m}^3$ 、飽和度90%で施工管理を行った(表-1参照)。

また、盛土基盤は安定した地山であったが念のため表層1mをセメント改良土で置換することによって載荷実験の影響が基盤部に及ばないようにした。

3. 実験内容

今回の実験工事では、ダンプによる走行試験と敷鉄板を用いた載荷試験を行った。

3.1 走行試験

補強盛土の繰返し荷重に対する挙動を把握するため、盛土上に総荷重20tf(T-20)、および30tf(T-30)のダンプトラックを繰返し走行させ(T-20:200回、T-30:150回)、各走行ごとの盛土の変状等を計測した。

3.2 載荷試験

今回の載荷試験では、各試験ブロックの盛土上でのり

表-2 走行試験計測結果

	のり肩沈下量			のり肩水平変位量		
	ブロック①	ブロック②	ブロック③	ブロック①	ブロック②	ブロック③
T-20 200回走行	3mm	2mm	7mm	4mm	3mm	0mm
T-30 150回走行	8mm	6mm	16mm	11mm	7mm	0mm

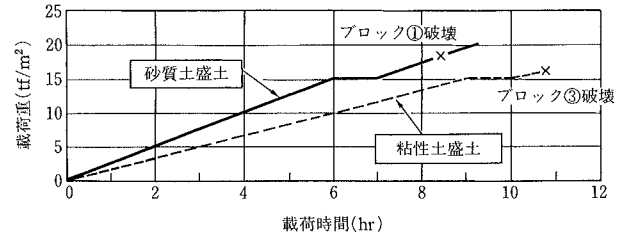


図-7 載荷パターン図

肩から0.6mの位置に1.2m×2.4mの敷鉄板を4箇所配置し、図-7に示すような載荷パターンで段階載荷を行い、盛土の変形および補強材のひずみ等の計測を行った。載荷は0.4tf/m²のステップで段階載荷を行い、この時の載荷速度は砂質土のブロック①、②では2.5tf/hr、粘性土のブロック③では1.7tf/hrである。

4. 試験結果

4.1 走行試験結果

各ブロックのT-20荷重200回走行後、およびT-30荷重150回走行後ののり肩の沈下および水平変位を表-2に示す。

砂質土のブロック①、②について比較すると、ジオテキスタイルとのり枠を組合せたブロック②のほうが従来工法(土のう巻き込み方式)のブロック①に比べ沈下・水平変位とも小さな値を示している。

粘性土盛土のブロック③では沈下は砂質土盛土よりも大きい、水平変位はほとんど生じていない。これは盛土自体の沈下が側方変形に比べ卓越しているためだと考えられる。なお、同じロームで盛土を行った無補強のアプローチ部(のり勾配1:1.8)では、この走行試験によりクラックが発生した。

4.2 載荷試験結果

砂質土の実験ブロック①、②における載荷重とのり肩側載荷板の沈下およびのり肩の水平変位の関係を図-8、9に示す。これらの結果によれば、補強材とのり枠を組合せたブロック②の方が従来の巻き込み方式のブロック①に対して沈下、水平変位とも小さくなっているが、この傾向は水平変位に関して特に顕著である。また、最終荷重段階についてもブロック①では18.2tf/m²、ブロック②で20.1tf/m²とブロック②の方が大きな荷重まで載荷可能であった。これらの最終荷重段階において、ブロック①では沈下および水平変位の急激な増加に加えて、のり面天端部にクラックが発生したことからも明確な破壊の兆候を示していることが確認できた。それに対してブロック②では、水平変位の増加傾向はみられたが、外見上は破壊の兆候を示すまでには至っていなかった。

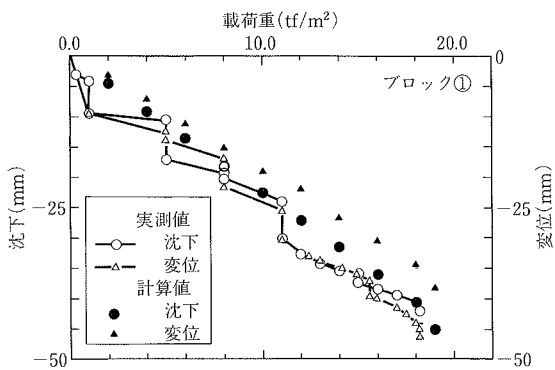


図-8 荷重-変形量 (ブロック①)

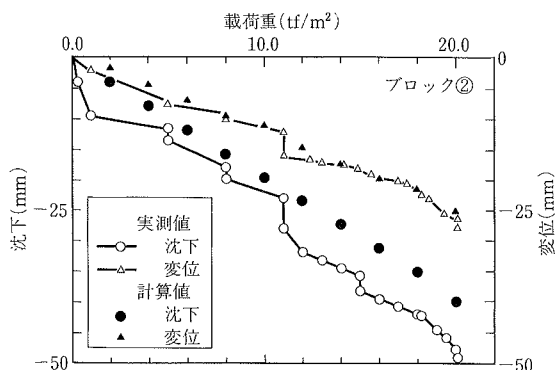


図-9 荷重-変形量 (ブロック②)

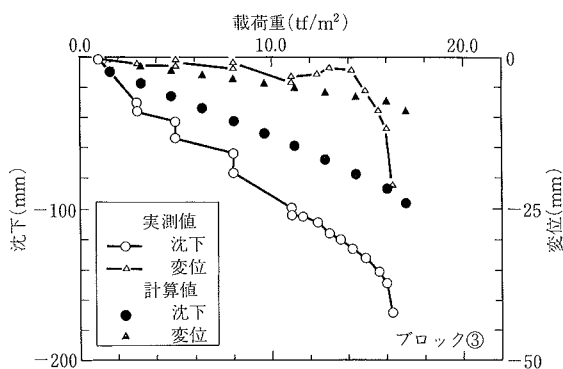


図-10 荷重-変形量 (ブロック③)

これらの状態を補強材に発生したひずみの分布と合せて示したものが図-11, 12である。図には補強盛土完成時, 8.0 tf/m² 荷重時, 各ブロックの最終荷重段階を示している。従来工法のブロック①では, のり表面付近の補強材のひずみはほとんど発生せず, 荷重初期からひずみ分布に明確なピークが確認された。これに対しブロック②では補強材のひずみにピークは存在するもののそれほど明確でなく, 補強材内のひずみの分布はなだらかで, 特にブロック①と異なり, のり表面付近のひずみが大きくなっていることが特徴的である。これは補強材とのり枠材を剛結することによって, 補強材の抵抗力が敷設長全体に有効に作用していることを示しており, このことからこのり枠材を併用することによってのり面の拘束効果が向上し, 従来の巻き込み方式に比較してより大きな補強効果が発揮されていることがわかる。

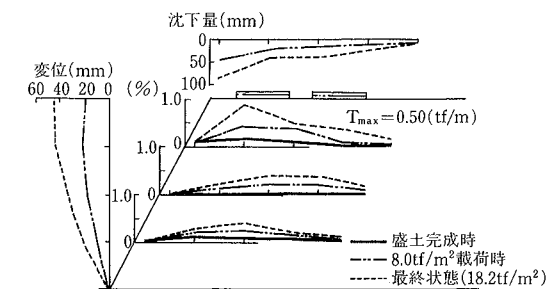


図-11 実験結果：ブロック① (従来工法)

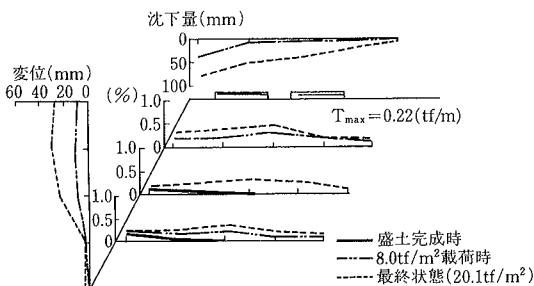


図-12 実験結果：ブロック② (ジオテキスタイル+のり枠；砂質土)

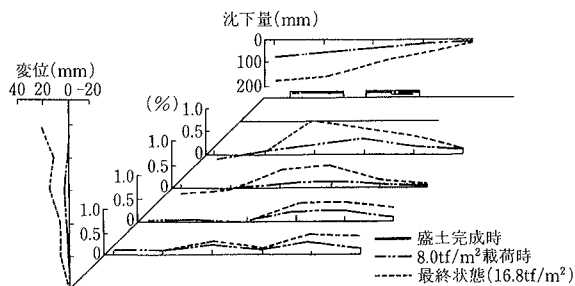


図-13 実験結果：ブロック③ (ジオテキスタイル+のり枠；粘性土)

ブロック③の粘性土盛土に関する同様の図を図-10, および13に示すが, 沈下量は砂質土のブロックに比べ2倍程度生じ, 同じ荷重においてブロック①, ②と比較しても, 盛土の沈下が側方変形に比べ卓越していることがわかる。この影響は補強材のひずみ分布にも現れ, のり面側の補強材に圧縮ひずみが発生している。また, 最終状態 (16.8 tf/m²) において, 補強材にひずみのピークが発生しており, この時, 荷重の増分に対する沈下速度の増分が急激に増加し, 破壊の兆候を示した。

5. 数値解析による補強効果の検証

今回の試験工事で, のり面拘束工としてののり枠は, 補強盛土の安定性に大きく寄与していることを確認することができた。これらの結果を数値解析によって検証するため, 解析プログラム「SIGNAS」を用いてシミュレーション解析を行った^{1),4)}。

5.1 解析条件

今回の解析に用いた解析モデルおよび入力定数一覧表

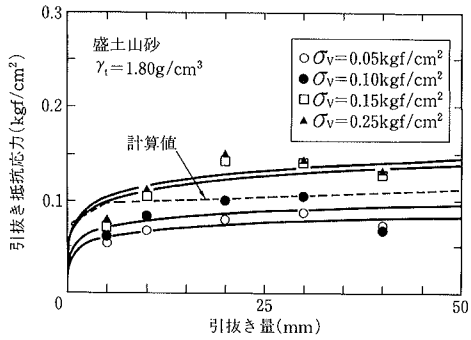


図-14 引抜き試験結果 (砂質土)

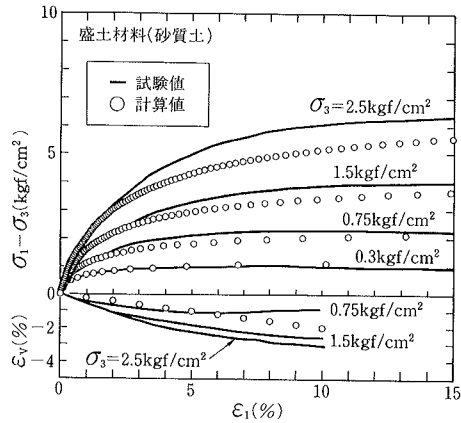


図-15 三軸試験結果 (砂質土)

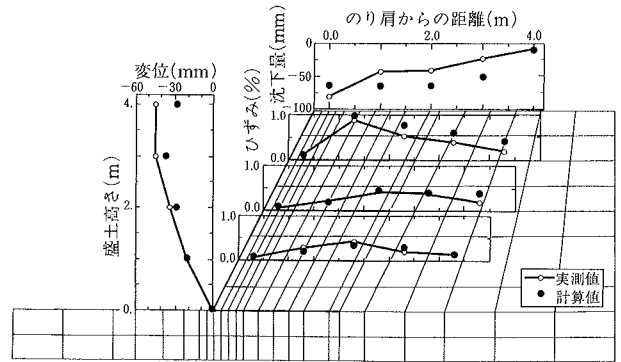
表-3 解析モデル

材料要素	モデル(定数)	
	ブロック①, ②	ブロック③
土 (盛土)	基礎: 線形弾性 (等方性材料) 盛土: 非線形弾性 (Duncan-Chang) $\gamma_1 = 1.80 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$ $c = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi = 32^\circ$ $E_1 = 160 \text{ kgf/cm}^2$, $w_i = 0.40$ $K_1(K_{\sigma\sigma}) = 50$, $n = 1.1$, $Rf = 0.8$ $E_0 = 300 \text{ kgf/cm}^2$, $\alpha = 0.01$	基礎: 線形弾性 (等方性材料) 盛土: 非線形弾性 (Duncan-Chang) $\gamma_1 = 1.54 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$ $c = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi = 1^\circ$ $E_1 = 80 \text{ kgf/cm}^2$ $Rf = 0.98$ $E_0 = 80 \text{ kgf/cm}^2$
補強材	トラス要素 線形弾性: $E_g = 330 \text{ kgf/cm}^2$	線形弾性: $E_g = 360 \text{ kgf/cm}^2$
のり枠	ビーム要素 線形弾性: $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $I = 16.1$, $A = 10.95 \text{ cm}^2$	線形弾性: $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $I = 4.2 \times 10^2 \text{ cm}^4$, $A = 225 \text{ cm}^2$
摩擦特性	非線形 (テーブル形式) $(k_s, \lambda, \nu) = (3.00, 0.01, 1.50, 0.05)$ $(0.07, 0.5), (0.02, 1.50)$ (kgf/cm², cm) $k_s = 1.3 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	非線形 (テーブル形式) $(k_s, \lambda, \nu) = (3.00, 0.01, 0.50, 0.5)$ $(0.01, 1.0), (0.01, 5.0)$ (kgf/cm², cm) $k_s = 1.3 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$

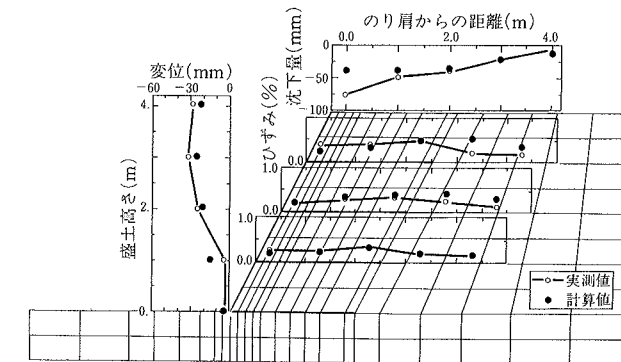
を表-3に示す。土は非線形弾性、ジオテキスタイルは線形弾性トラス、のり枠は線形弾性ビーム要素である。また、盛土基盤部はセメント改良土であることを考慮して線形弾性材料とした。

ジオテキスタイル補強盛土のシミュレーション解析を行う上で最も重要なのが、ジオテキスタイルと土の相互作用、すなわち摩擦特性をどのように評価するかということである。今回の解析では図-14に示す室内引抜き試験結果を基にジオテキスタイルと土との間に非線形ジョイント要素を配置することによって摩擦特性を表現している。図-14に摩擦特性の非線形モデルとして表-3に示すテーブル形式を用いた解析結果を合せて示すが、全体的な傾向としては実験結果とほぼ対応している。

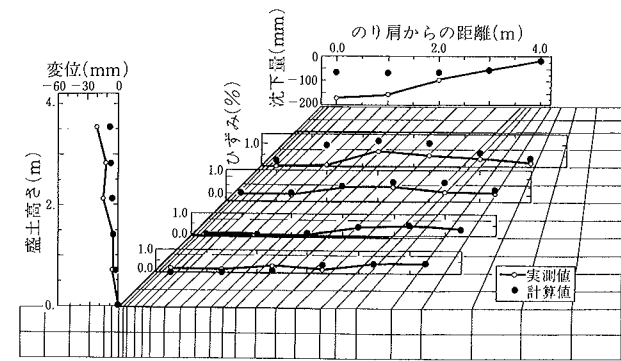
土の非線形モデルとしては、軸差応力・体積ひずみ～最大主ひずみ関係を双曲線で近似する Duncan-Chang モデルを用いている。図-15は現位置で採取した砂質土の



(a) ブロック①: 載荷重 18.0 tf/m²



(b) ブロック②: 載荷重 18.0 tf/m²



(c) ブロック③: 載荷重 16.0 tf/m²

図-16 実験結果と解析結果の比較

三軸試験結果と解析結果を示したものである。軸差応力～軸ひずみの関係をみると拘束圧(σ₃)が大きくなるほど解析結果の方が小さくなる傾向にあるが、今回の試験工事での土被り圧範囲(σ₃=0.75 kgf/cm²以内)では良い一致を示している。体積ひずみ～軸ひずみ関係の解析ではポアソン比を拘束圧によらず一定としたため、拘束圧の違いによる差が現れていないが、上記土被り圧範囲では実験結果と良く対応している。

5.2 解析結果および考察

砂質土を用いた補強盛土の従来工法(ブロック①)と補強材とのり枠を組合せた工法(ブロック②)における、載荷重 18.0 tf/m² 時の解析結果を図-16(a), (b)に、粘性土盛土(ブロック③)における載荷重 16.0 tf/m² 時の解析結果を図-16(c)に示す。

砂質土を対象としたブロック①, ②では、地表面の沈下、のり面部の変位および補強材に発生したひずみなど

も解析結果と実験結果は良い対応を示している。すなわち、解析結果においても実験結果と同様にのり枠と補強材を剛結したブロック②では、沈下、変位とも小さく、補強材のひずみものり表面部で大きく全体的になだらかな分布になっている。

それに対して、粘性土を対象としたブロック③では、特に沈下が解析結果と実験結果でやや異なっている。これは、載荷中に粘性土の圧密変形がかなり進行したためだと思われる。

以上述べてきたように、のり面拘束工としてののり枠が補強盛土の安定性向上に大きく寄与していることは解析上でも明らかとなったが、この点をより一層明確にするために、(a)補強材を水平に敷設しただけの場合（のり面拘束全くなし）、(b)補強材をのり表面で巻き込んだ場合（のり面拘束ややあり、ブロック①に対応）、(c)補強材とのり枠を剛結した場合（のり面拘束あり、ブロック②に対応）の3ケースについて、載荷重 18.0 tf/m² 時の地盤内安全率分布を比較したのが図-17(a), (b), (c)である。

これらの結果から、のり枠を用いることによって地盤内の安全率が大きく向上しているのが明らかである。これは図-16の補強材ひずみ分布からもわかるように、補強材に大きな張力が生じることによって、地盤内の土要素に働く拘束圧の水平成分が増加し、その結果最小主応力が大きくなり、せん断力成分が減少したからである。

ただし、今回の解析ケース(a)（のり面拘束なし）とケース(b)（のり面拘束ややあり）にほとんど差がなかったのは、今回用いた補強材の弾性係数がやや小さかったことも影響していると思われる。もう少し大きな弾性係数を持つ補強材を用いたならば同一のひずみに対する補強材の張力が増大することによって、巻き込みによる拘束効果も向上し、両者の間にその違いがもう少し明確に出てきたであろう。このことから、補強盛土工法に用いるジオテキスタイルの特性として、引張強度や土との摩擦特性の他に、弾性係数も重要な要因であることがわかる。

6. まとめ

今回の現場実験および解析により、次のような成果を得ることができた。

① ジオテキスタイルとのり枠を組合せたのり面拘束工を用いることによって、補強盛土の安定性を向上させるとともに、盛土のり面の変形も抑制することができる。

② 土を非線形弾性要素、補強材とのり枠を弾性トラスおよびビーム要素、土と補強材の摩擦を非線形ジョイント要素とする FEM シミュレーション解析によって、補強盛土の挙動を良く表現することができる。

③ のり枠と補強材を剛結することによって、盛土内土要素の安全率は大きく向上する。

④ のり枠と排水性補強材を組合せることによって、本来ならば盛土が不可能な高含水比粘性土を用いても盛土工が可能となる。

なお、以上のような結論の他に、今回の試験工事では

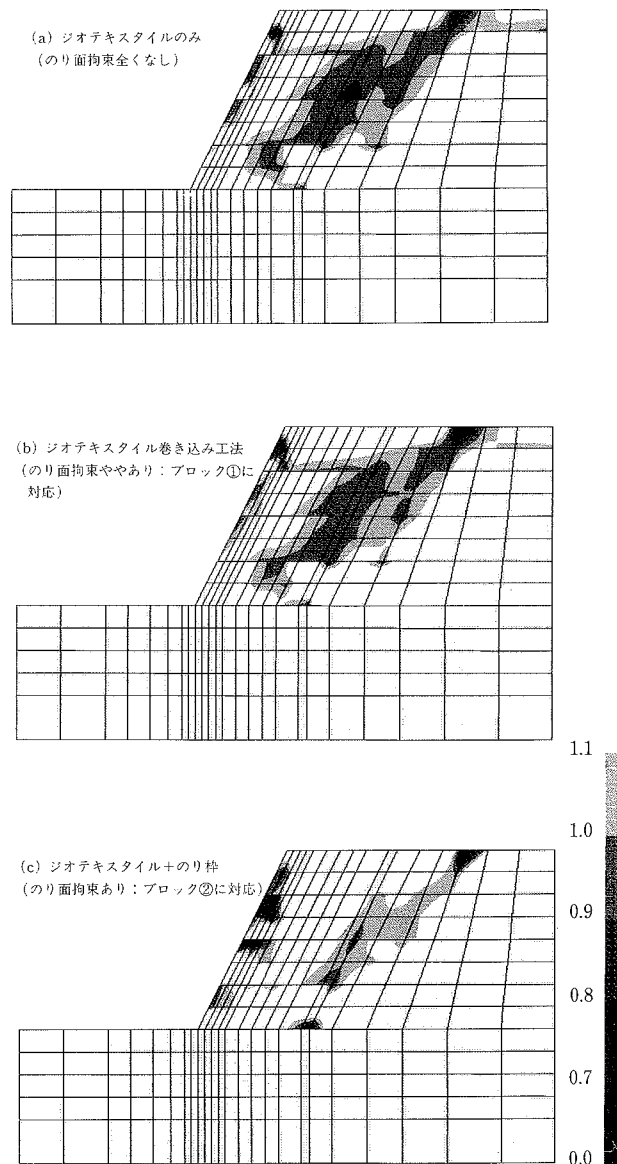


図-17 地盤内安全率分布（載荷重 18.0 tf/m²）

新しい補強盛土工法が従来の土のう積みあげ方式に比べて施工時間が短縮されることも明らかとなっている。

参考文献

- 1) 鳥井原, 松本, 平間: ジオテキスタイルによる盛土補強メカニズムに関する研究, 大林組技術研究所報, No. 41, p. 93~98, (1990)
- 2) M. Toriihara, H. Furuya, K. Hirama: Laboratory and Field Loading Tests of Embankment Reinforced with Geogrid, The International Geotechnical Symposium (IS Kyushu '92), p. 305~310, (1992)
- 3) 龍岡, 館山: 壁面工の剛性が補強擁壁の安定性に及ぼす影響(その1), (その2), 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, p. 92~95, (1988)
- 4) 松本, 他: ジオグリッドによる盛土補強効果に関する室内実験(その1), (その2), 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集 第3部, p. 330~333, (1990)