

自立式プレキャスト法枠を用いた 盛土補強土工法の開発

鳥井原 誠¹・古屋 弘²・平間 邦興³

¹正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸四丁目640番地)

²正会員 (株)大林組 土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティーB棟)

³フェロー 工修 (株)大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸四丁目640番地)

急勾配盛土が可能なジオシンセティックスを用いた盛土補強土工法は、近年施工実績も増え、補助工法と組み合わせた工法も幾つか提案されてきている^{1), 2)}。この補強盛土の施工において、盛土造成時に法面形成を行い、且つ補強領域の一体化を促進する法面保護工の拘束効果も、盛土の安定に寄与する重要な要因のひとつである。筆者らはこの点に着目し、室内および現場での各種実験ならびに数値解析を行うことにより、ジオシンセティックスと法枠を組み合わせた新しい盛土補強土工法を開発し、いくつかの工事に適用してきた。これらの実験および現場計測データから、本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十分満足するものとなっていることが確認できた。

Key Words : *geosynthetics, reinforced embankment, laboratory test, field loading test, finite element analysis*

1. はじめに

近年、用地の制約または土地の有効利用といった観点から、急勾配盛土が施工可能なジオシンセティックス（以下補強材と呼ぶ）を用いた補強盛土の施工実績が増加している。この工法についての設計施工マニュアル³⁾も整備され、比較的簡便に補強盛土の設計・施工が行えるようになってきている。この時、特に設計において重要となるのは、土および補強材の材料強度、敷設層数（ピッチ）、敷設長、盛土材と補強材との摩擦特性などである。しかし、これらのパラメーターに加え、補強盛土の安定に対しては、盛土造成時に法面形成を行い、且つ補強領域の一体化を促進する法面保護工の拘束効果も、安定に寄与する重要な要因のひとつであると考えられる。

従来、この種の工法の多くは、法面前面に土のうを設置して補強材で巻き込むことによって法面を形成するもので、補強効果、長期的信頼性および出来上がり形状・景観などの点から仮設構造物として位置づけられることが比較的多かった。

筆者らは、これらの工法の短所を克服すべく、永久構造物としての仕様も満足する、補強材と法枠を組み合わせた盛土補強土工法（以下ハイブリッドフレーム

盛土補強土工法）を開発し、これまで数多くの室内模型実験を行い⁴⁻⁶⁾その効果を確認してきた。その後、現場実験によって在来工法に対する優位性を確認するとともに、実施工においても各種データを収集し、さらにFEM解析によって補強効果の確認を行った。

本論文は、以上の成果をもとに、ハイブリッドフレーム盛土補強土工法の特徴と、室内および現場実験ならびに数値解析の結果についてまとめたものである。

2. 工法の概要

一般に、補強盛土の安定性は、盛土材以外の要因では、補強材の引張り強度および補強材と土との摩擦抵抗に支配されるが、その他に法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いる。筆者らがこれまでに行ってきた多くの室内模型実験からも、同一の補強材を使用した場合、法面の拘束条件によって補強効果に大きな差が生じ、法面拘束工のある場合には盛土の安定性は著しく向上するが、法面拘束工のな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⁴⁻⁶⁾。

表-1 実験に使用した材料

補強材	ポリマーグリッド $T_{max} = 17.65kN/m$, $\epsilon_f = 14\%$, 目合い寸法 28×38mm
土	鬼怒川砂 ($D_{max} = 2.0mm$), $w = 5\%$ $Dr = 80\%$ ($\rho_i = 1.54g/cm^3$), $\phi_d = 33^\circ$
法枠	アルミフレーム (60×30cm) : 10cm格子 (枠内; 耐水紙にて砂のこぼれ出し防止)

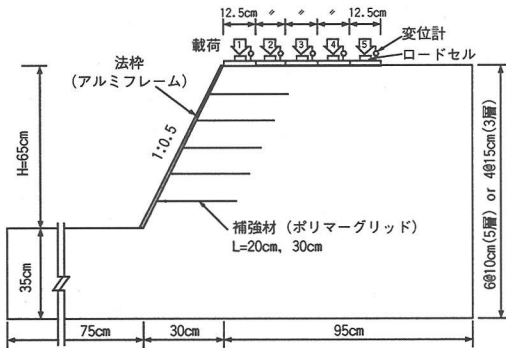


図-1 模型実験概要

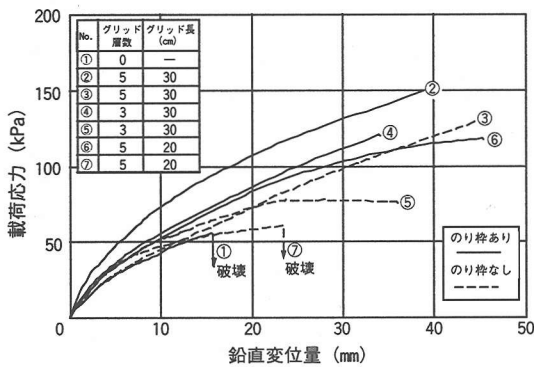


図-2 載荷応力-鉛直変位 (法肩: 載荷板1)

従来、法面を緑化する盛土補強土工法としては、法面形成および拘束の手段として法表面に土のうを配置し、補強材を巻き込む方式がほとんどであるが、土のう部分の変形量が大きいため、法面近傍を拘束する効果が低下し、施工中あるいは施工後に法面がはらみ出しやすくなるという欠点があった。しかも、補強材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、安定性や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、筆者らは補強材と法枠を組合せた新しい補強盛土であるハイブリッドフレーム盛土補強土工法を開発した。この工法は、補強盛土の法面工として自立式法枠を用いる

表-2 試験盛土

	ブロック①	ブロック②	ブロック③
盛土高	4.0m		
法勾配	1:0.5		1:1.0
盛土材料	山砂 (砂質土) 密度: $1.85g/cm^3$ 含水比: 2~5% 締固め度: 85%以上	ローム (粘性土) 密度: $1.50g/cm^3$ 含水比: 65~90% 飽和度: 90%以上	
補強材	ジオグリッド 材質: ビニロン 目合い寸法: 20×20mm 強度: $29.42kN/m$ 敷設長: 25m 敷設ピッチ: 10m	排水性補強材 材質: ポリオレフィン+不織布 幅: 50cm 強度: $2.45kN/50cm$ 透水係数: $1 \times 10^2 \sim 10^4 cm/sec$ 敷設長: 40m 敷設ピッチ: $\phi 71m$	
法枠	在来工法	軽量法枠 補強材と と接合	RC法枠

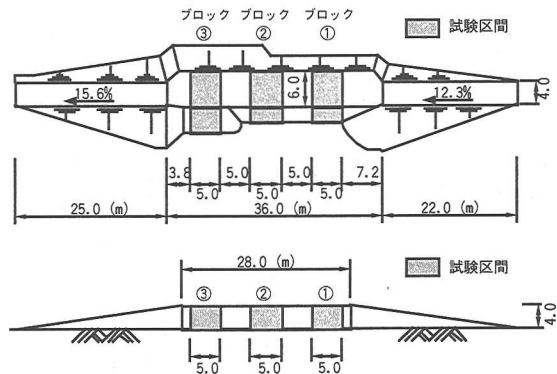


図-3 試験盛土概要

もので、補強材と法枠を緊結させることによって法面の拘束効果を高め、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法面の変形を小さくするところに特徴がある。同時に、法面の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、必要に応じて法枠内に植生を行うなど景観を考慮した設計も可能な工法である⁸⁾。

3. 室内模型実験

ハイブリッドフレーム盛土補強土工法の有効性に関して検討するために、これまでに幾つかの室内模型実

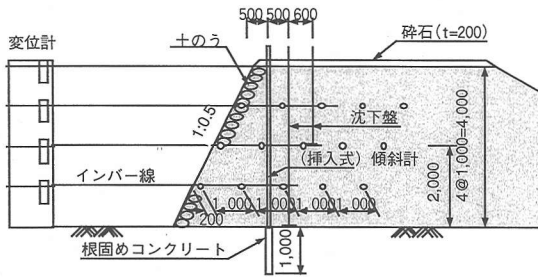


図-4 ブロック①：在来工法

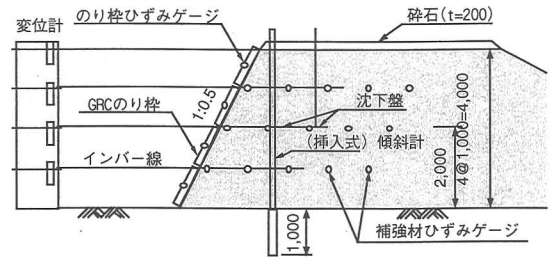


図-5 ブロック②：ハイブリッドフレーム
盛土補強土工法 (砂質土適用)

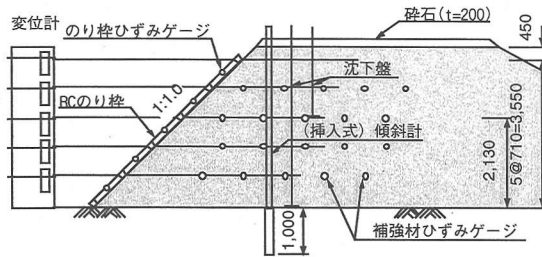


図-6 ブロック③：ハイブリッドフレーム
盛土補強土工法 (粘性土適用)

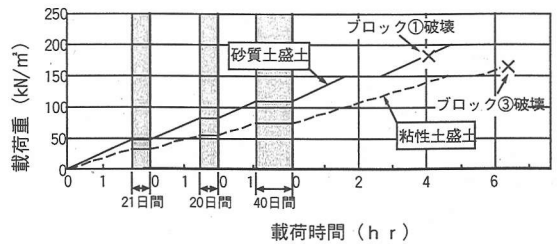


図-7 載荷パターン

験を行っている。これらのうち、法面保護工による拘束効果の盛土体への影響が特に顕著であった実験の一例に関して以下に述べる。

実験は、鋼製フレームで補強したアクリル製の土槽 (200×100×30cm) 内に、図-1に示すような模型斜面を作成し、盛土上部から5台の空気圧シリンダーを用いて12.5×30cmのプレートを紹介し、1ステップ3.9kPaの段階載荷実験を行ったものである。実験に使用した材料の諸元を表-1に示す。この実験においては補強材は比較的短いものを使用し、法枠工の有無、敷設層数、および敷設長の違いによる補強効果の違いを検証した。なお、実験においては土槽内側の側面にはシリコングリースとテフロンシートを塗布して摩擦低減を図り、法枠有りのケースでは法枠と補強材を連結している。また、模型斜面の変位は変位計および標点を用いた写真解析にて計測し、補強材には載荷時のひずみ分布を測定するためにひずみゲージを取り付けている。

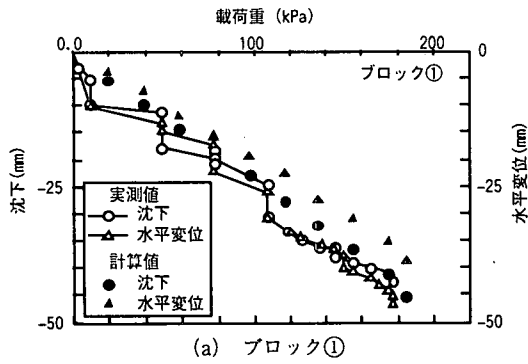
実験の結果は図-2に示すとおりであるが、補強材の敷設長が長く、敷設層数が多く、法枠の有る方が強度が大きくなっていることは明白である。また、法枠有りのケースは無いケースに比べ載荷応力-変位曲線の初期勾配も大きく、変形が抑制されていることがわかる。さらに、法枠の効果は20mm変位時の応力でそれぞれ法枠無しの場合と比較した場合、補強材敷設層数5層30cmおよび20cmでは40%以上、3層30cmの場合でも20%程度の強度増加が確認できた。

4. 現場実験

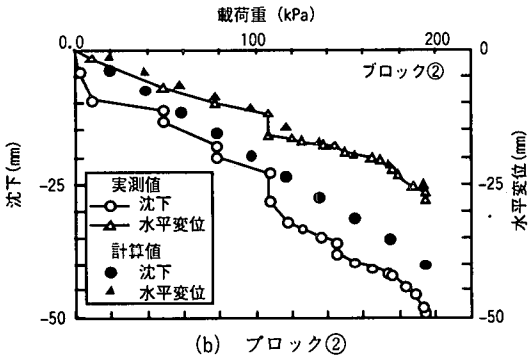
室内模型実験により、ハイブリッドフレーム盛土補強土工法の効果が確認されたので、この結果を踏まえて実大盛土での補強効果を検証する目的で現場実物大実験を実施した。以下、実験結果と砂質土盛土における法枠の有無が補強効果に与える影響について主に述べる。

(1) 実験工事の概要

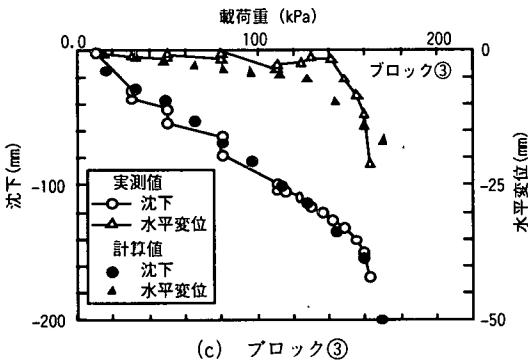
実験のために造成した補強盛土の全体概要を図-3および表-2に示す。実験区間は①～③の3ブロックからなる。ブロック①、②は砂質土 (設置した計測器等は、図-4、5参照)、ブロック③は粘性土 (図-6参照)を対象としている。盛土の高さは4.0m、実験区間は各5.0m、法勾配は砂質土盛土で1:0.5、粘性土盛土で1:1.0である。各ブロック間には相互の影響を排除するため5.0mの緩衝帯を設け、実験区間と緩衝帯の間には仕切り板を設置し、できる限り平面ひずみ状態となるようにしている。ブロック①は従来からよく行われてきた土のう巻き込み方式である。ブロック②はハイブリッドフレーム盛土補強土工法で、補強材と法枠はボルトで接合されている。この実験工事ではグラスファイバー補強コンクリート (GRC) 製軽量法枠を使用し、法枠の間は砂のこぼれ出しを防止するため、鋼製のメッシュ材料であるエキスパンドメタルと不織布を取り付



(a) ブロック①

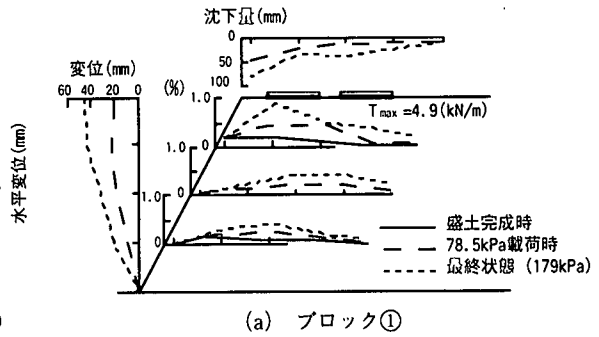


(b) ブロック②

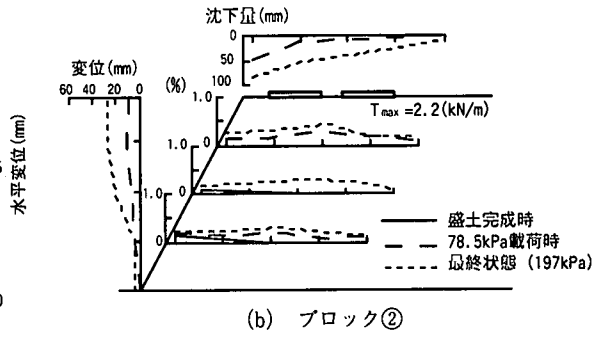


(c) ブロック③

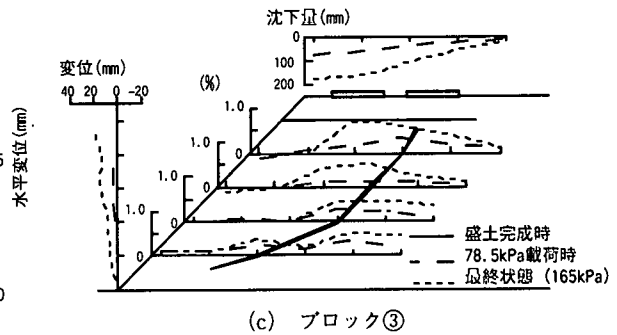
図-8 載荷重-変形量 (実測値と計算結果)



(a) ブロック①



(b) ブロック②



(c) ブロック③

図-9 試験盛土に発生したひずみ・変位

けている。施工手順としては、まず最初に補強材を水平に敷設し、その上に法枠を設置する。その際、上下の法枠の間に補強材を挟み込んでボルトで緊結する。その後、背面部の盛土施工を行なう。以上の施工を繰り返すことによって盛土を造成していく。

実験に使用した補強材はブロック①、②ともに引張強度 $T_{max} = 29.4 \text{ kN/m}$ 、目合い寸法 $20 \times 20 \text{ mm}$ の補強材を使用し、敷設長 2.5 m 、敷設ピッチ 1.0 m である。補強材 (敷設幅 5.0 m 、敷設長 2.5 m) には 1.0 m ピッチにひずみゲージを貼り付け、実験に伴い発生する張力を計測することとしたが、今回は比較的短い補強材を使用したため、補強領域外の盛土内のひずみを間接的に計測す

る目的で、幅 30 cm の計測用補強材にもひずみゲージを貼り付け図-4、5に示すように盛土内に配置した。

ブロック③は、ブロック②と同様の工法を粘性土盛土材料に対して適用したものであり⁹⁾、不織布に非塩系ソフトポリマーの一種であるポリオレフィンの芯材を挟んだ幅 50 cm の排水性を有する補強材 ($T_{max} = 2.45 \text{ kN/50cm}$ 、 $k_H = 1 \times 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ cm/sec}$) を長さ 4.0 m 、鉛直ピッチ 0.71 m 、水平ピッチ 1.0 m の千鳥型配置で敷設し、これをRC製法枠とボルトで接合している。なお、砂質土盛土では法面形成のために盛土に先行して法枠を設置したが、粘性土の場合には1段ごとに法面を $1:1.0$ で整形した後に法枠を設置するという作業を繰り返した。これは、

今回用いた粘性土が高含水比で強度が非常に小さかったため、砂質土と同一の仕様(勾配, 転圧方法など)では施工ができなかったためである。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, これらを振動ローラおよびプレートタンバを用いて各層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で湿潤密度 $\rho_t = 1.85\text{g/cm}^3$, ブロック③で $\rho_t = 1.50\text{g/cm}^3$, 飽和度90%で施工管理を行った(表-2参照)。また, 盛土の基盤は安定した地山であったが, 念のため表層約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。

(2) 実験内容

実験工事では, ダンプトラックによる走行実験と敷鉄板を用いた載荷実験を行ったが, ここでは載荷実験に関して述べる。

載荷実験は, 各実験ブロックの盛土上の法肩から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(沈下・水平変位), および補強材のひずみ等の計測を行った。載荷は0→49 kN/m², 49→79 kN/m², 79→108 kN/m², 108 kN/m²→最終荷重までの4段階で行い, 各載荷ステップ間には20~40日の放置期間がある。また, それぞれのステップでは荷重増分3.9 kN/m²の段階載荷を行い, この時の載荷速度はブロック①, ②では24.5 kN/hr, ブロック③では16.7 kN/hrであった。

(3) 実験結果

載荷重と法肩側載荷板の沈下および法肩の水平変位の関係を図-8に示す。砂質土の実験ブロック①, ②における結果(図-8(a), (b))を比較すると, 補強材と法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, 特に水平変位の低下が顕著に現われている。また, 水平変位が急増した時点をもって載荷終了としたが, この最終荷重段階についてもブロック①では178.5 kPa, ブロック②で197.1 kPa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, 法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いかった。

粘性土盛土のブロック③では(図-8(c)), 沈下量が砂質土のブロックに比べ2倍程度生じ, 同じ載荷重に

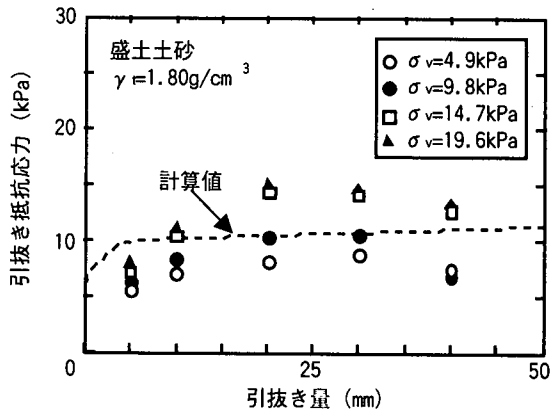


図-10 引き抜き試験結果

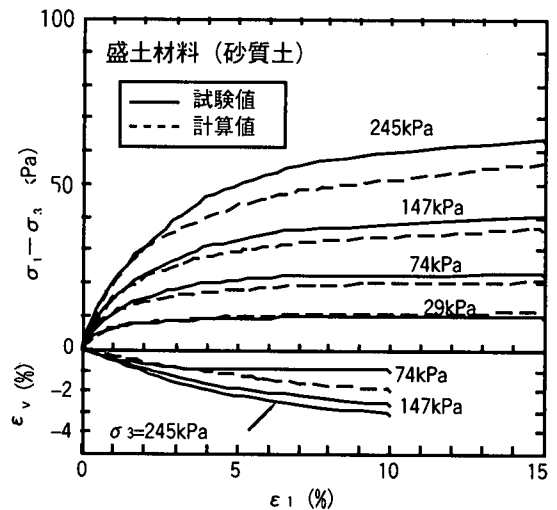


図-11 三軸試験結果

においてブロック①, ②と比較しても, 盛土の沈下が測方変形に比べ卓越していることがわかる。載荷重が140 kPaを越えた時点から水平変位速度の増分が急激に増加し, 160 kPaを越えた時点でブロック①と同様に破壊の兆候を示した。

これらの状態を補強材に発生したひずみの分布と合わせて示したものが図-9である。図には補強盛土完成時, 78.5 kPa 載荷時, 各ブロックの最終荷重段階の補強材に発生したひずみ, および盛土の変位量(沈下量, および水平変位量)を示している。

砂質土盛土に関して比較すると(図-9(a), (b)), 従来工法のブロック①では, 法表面付近の補強材のひずみはほとんど発生せず, 載荷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

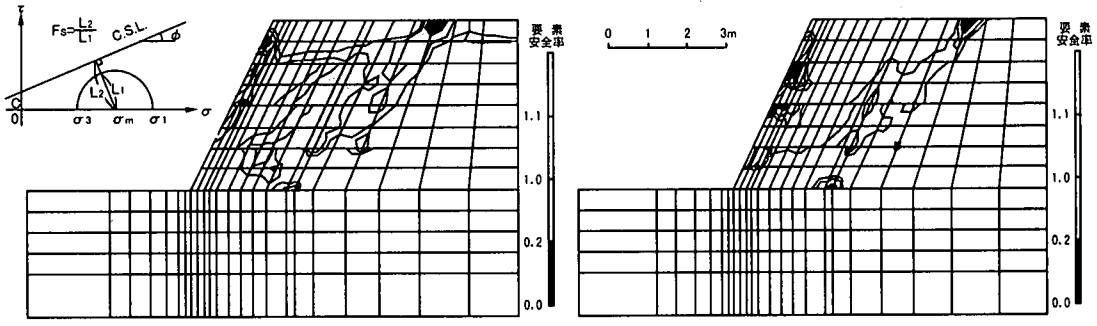


図-12 盛土内土要素の安全率分布 (載荷重 176.5k Pa)

表-3 材料モデル

材料	要素	モデル (定数)
ブロック①②	土 (盛土)	ソリッド要素 基盤: 線形弾性 (等方性材料) 盛土: 非線形弾性 (Duncan-Chang) $\rho = 1.80 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ $c = 9.8 \text{ kN/m}^2, \phi = 32^\circ$ $E_t = 15.70 \text{ MN/m}^2, \nu = 0.40$ $K_L (K_{UR}) = 50, n = 1.1, R_f = 0.8$ $E_0 = 29.43 \text{ MN/m}^2, \alpha = 0.01$
	補強材	トラス要素 線形弾性: $EA = 32.37 \text{ MN/m}^2$
	法枠	ビーム要素 線形弾性: $E = 2.06 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$ $I = 16.1 \text{ cm}, A = 10.95 \text{ cm}^2$
	摩擦特性	ジョイント要素 非線形 (テーブル形式) $(k, \Delta u) = (\text{せん断剛性, 変位量})$ $= (0.001.5.0) (0.69.0.5)$ $, (14.72.0.05) (29.4.0.0)$ $, (\text{N/m}^2, \text{cm})$ $kn = 1.28 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$
ブロック③	土 (盛土)	ソリッド要素 基盤: 線形弾性 (等方性材料) 盛土: 粘弾塑性 (関口-太田モデル) $\rho = 1.54 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ $c = 19.2 \text{ kN/m}^2, \phi = 2^\circ$ $D = 0.079, \Lambda = 0.594$ $M = 0.981, \alpha = 6.56 \times 10^{-3}$ $V_0 = 9.6 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$ $\nu = 0.394, K_0 = 0.670$
	補強材	トラス要素 線形弾性: $EA = 35.32 \text{ MN/m}^2$ $k_N = 1 \times 10^6 \text{ cm/sec}$
	法枠	ビーム要素 線形弾性: $E = 2.06 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$ $I = 4.2 \times 10^3 \text{ cm}, A = 225.0 \text{ cm}^2$
	摩擦特性	ジョイント要素 弾塑性: $\tau_{\max} = 14.7 \text{ kN/m}^2$ $\gamma_{\text{yield}} = 5\%$
境界条件	側面	X方向固定, Y方向ローラー
	底面	X方向ローラー, Y方向固定

にブロック①と異なり法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。これは補強材と法枠を接合一体化することによって、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、このことから法枠を併用することによって法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。なお、

補強材に発生した最大張力は最上段の補強材に発生し、最終載荷状態でブロック①、ブロック②でそれぞれ4.9 kN/m, 2.2 kN/mであった。

ブロック③においては (図-9 (c))、粘性土の圧密による沈下量が大きかったことも原因となり、法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 (164.8 kPa) において、補強材にひずみのピークが発生しており、このピークをつなぐと円弧状の滑りが発生していることが観察される。

5. 数値解析による補強効果の検証

実験工事の計測結果から、法面拘束工としての法枠は、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、FEMを用いてシミュレーション解析を行った。

(1) 解析条件

今回の解析に用いた解析モデルでは、計測された変形量およびひずみを考慮して、盛土材料 (土) は非線形弾性、補強材は線形弾性トラス、法枠は線形弾性ビーム要素とした。ブロック①においては土のうを補強材で巻き込んだ状態を、トラス材を法面表面まで配置することによって、ブロック②では法枠のビーム材とトラス材を接点共有させることによって、法枠との一体化を表現している。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。解析における入力定数は室内試験を基に決定したが、それらの一覧を表-3に示す。

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、補強材と土の相互作用、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。ブロック①、②の砂質土盛土における今回の解析では、図-10に示す室内引抜き試験結果 (補強材: 幅 30cm, 長さ

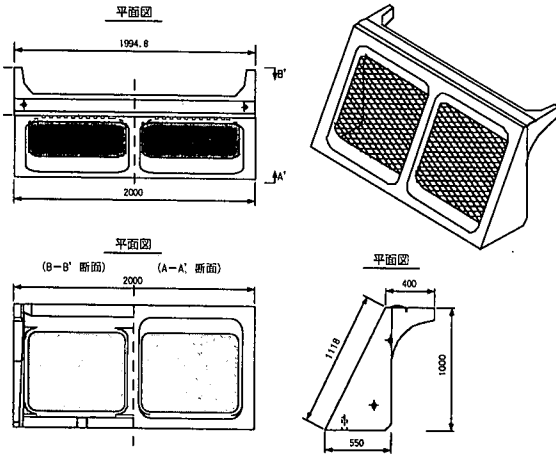


図-13 自立式RC法枠

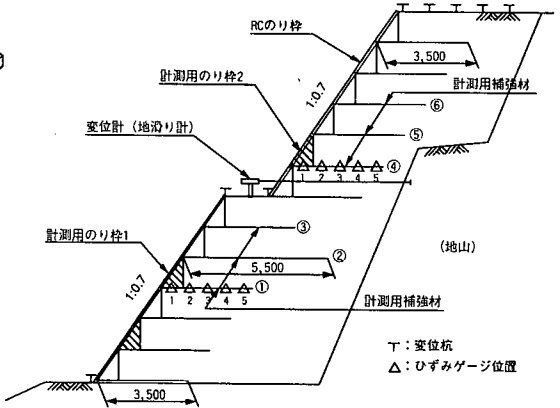


図-14 施工および計測断面

50cm) を基に、補強材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。解析対象の実験工事では、盛土高さも比較的 low、ジョイント部の応力依存性も低いと判断したため、ジョイント部の摩擦特性の非線形モデルとして、せん断剛性と変位量を段階的に変化させるテーブル形式を用いた。図-10には解析結果(図中の破線)を合わせて示しているが、全体的な傾向としては室内引き抜き試験結果とはほぼ対応している。

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-11は盛土に使用した砂質土の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(σ_3)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、今回の実験工事での土被り圧範囲($\sigma_3=73.5\text{ kPa}$ 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。粘性土盛土のブロック③も砂質土盛土と同様であるが、盛土材料が飽和度93～95%の粘性土であったため、土要素には関口・太田による粘弾塑性モデルを用いている。

また、補強材と土の摩擦特性に関しては、引き抜き試験結果からせん断応力(τ)とせん断ひずみ(γ)の関係がバイリニアである弾塑性要素を仮定して解析を行った¹⁰⁾。なお、荷重実験シミュレーションにおける補強材の排水効果は考慮していない。

(2) 解析結果および考察

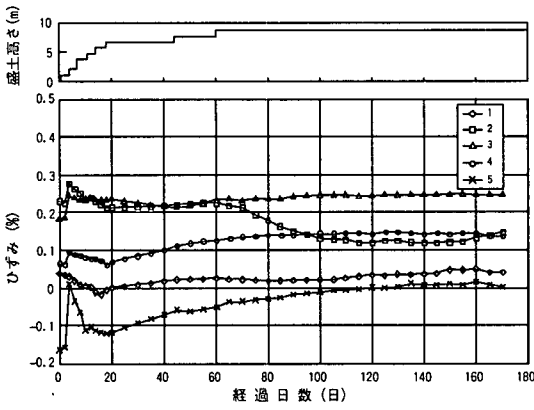
a) 砂質土盛土

法面形成に土のうを用いる従来工法(ブロック①)と、ハイブリッドフレーム盛土補強土工法(ブロック②)の荷重と変形量の解析結果を計測結果とあわせて図-8(a)(b)に示す。

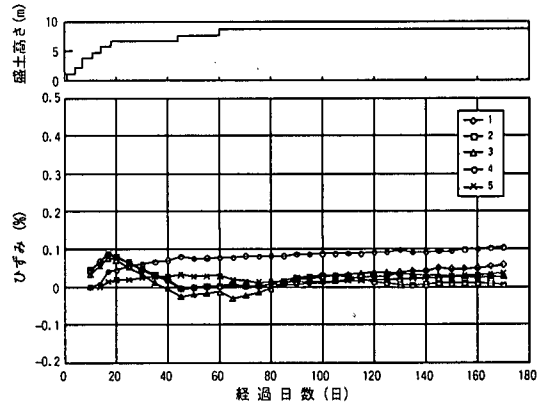
ブロック①、②とも、法肩部の沈下および水平変位に関して解析結果と実験結果は良い対応を示している。解析結果においても実験結果と同様に、法枠と補強材を組み合わせたブロック②において、沈下、変位ともに小さく、補強効果がより大きくなっていることがわかる。

さらに法面拘束効果が安定性向上に大きく寄与していることを明確にするために、(a)補強材を土のうを用いて巻き込んだ場合(法面拘束ややあり:ブロック①に対応)、(b)補強材と法枠を接合した場合(法面拘束あり:ブロック②に対応)の2ケースについて、荷重176.5kPa時の盛土内土要素の安全率分布を比較したのが図-12である。

これらの結果からも、法枠を用いることによって盛土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、在来工法に比べハイブリッドフレーム盛土補強土工法では補強材に均一な張力が生じ、盛土内の土要素に働く拘束圧の水平成分が様に増加し、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と考えられる。この結果は計測結果からも明らかであり、在来工法では特に最上段に敷設した補強材に明確なひずみのピークが発生しているのに対し、法面を拘束した方は、補強材に発生するひずみは法表面近くからならだらかに発生し、ピークが小さくな

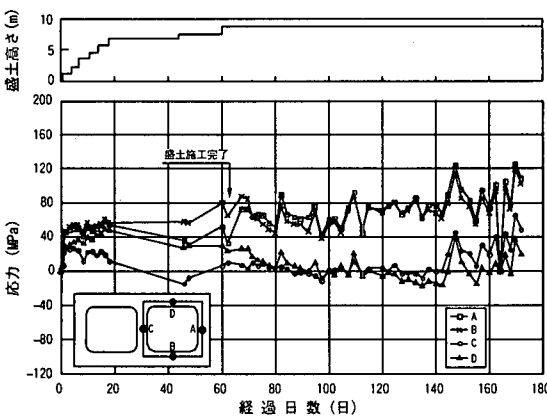


(a) 計測補強材 1

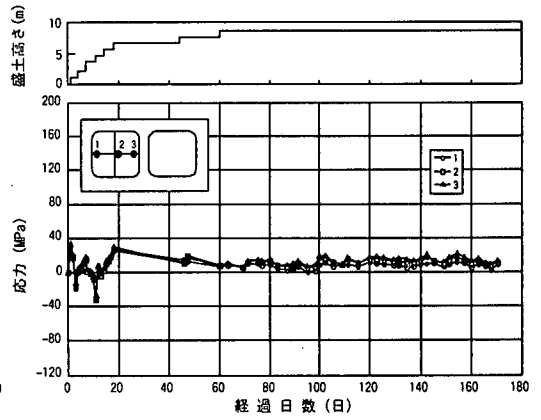


(b) 計測補強材 4

図-15 補強材に発生した張力(経時変化図)



(a) 法枠フレーム部(鉄筋計)



(b) 枠内鋼製メッシュ(ひずみゲージ)

図-16 計測用法枠 1 に発生した応力(経時変化図)

っていることから確認できる。

また、法面拘束したハイブリッドフレーム補強盛土では、拘束無しの盛土に比べ補強材に発生するひずみのピークを結んだ潜在すべり面が盛土の奥の方向に移動していることがわかる。この傾向は図-12に示すFEM解析によっても表現されているが、これは法枠で法面を拘束することによって、補強領域の一体化が促進されて疑似擁壁化し、この領域内に大きなひずみが発生するのを抑制したためであると考えられる。

b) 粘性土盛土

ブロック③においては、無補強で今回の盛土に同様の载荷をした場合、Bishop法による円弧すべりの計算で载荷重78.5k Paにて安全率が1.0を下回る結果が出たが、今回の実験では161 kPaまで载荷を行うことができた。この実験結果と解析結果をあわせたものを図-8(c)に示す。実験と解析結果を比較すると、実験では载荷重が130 kPaを越えた時点から沈下量に対する水平変位量の増分が大きくなっているのに対して、解析では水平変

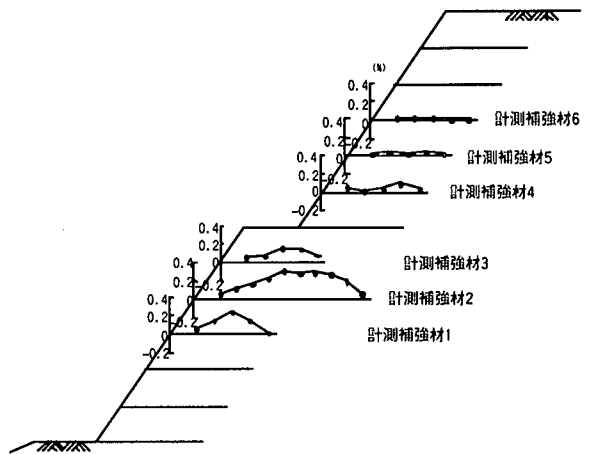


図-17 補強材に発生したひずみ(盛土完成後100日)

位量の発生が若干小さくなっているが、沈下量を含めた全体の挙動を概ね表現できているといえる。

6. 実施工への適用

以上の各種実験結果から、この工法の補強効果や施工性が十分満足できるものであることが確認されたため、ハイブリッドフレーム盛土補強土工法を実施工に適用した。本工法に用いる法枠は、法面形成に必要なとともに法表面の拘束に重要な役割を担う。また、盛土造成時に先行して法枠を設置し、補強材と一体化する必要があることから、図-13 に示すような RC 製のバットレストタイプの法枠を製作した。この法枠は自立可能で、枠内には土のこぼれだし防止と緑化のために鋼製メッシュおよび植生シートが設置されている。ハイブリッドフレーム盛土補強土工法では、この法枠の上下間に補強材を挟み込み、枠同士をボルト接合することにより補強材と法枠の一体化を図っている。

この RC 法枠（枠外寸 $2.0 \times 1.0\text{m}$ ）を使用し、実施工に適用した一例を図-14 に示す。造成した補強盛土は、最大高さ 10.8m （法枠 12 段）、法面勾配 $1:0.7$ 、補強材敷設長 $L=3.5\text{m}$ （目合い寸法 $20 \times 20\text{mm}$ 、引張強度 $T_{\max}=73.5\text{kN/m}^2$ ）であり、盛土材としては現地発生のもつれ土（ $\rho_t=1.9\text{g/cm}^3$ 、 $\phi=25.2^\circ$ 、 $c=9.8\text{kN/m}^2$ ）を使用して造成した。この盛土においては、敷設した補強材の張力や法面の変形のみならず、法枠に対して施工中に発生する応力を調べるために、法枠内の鉄筋および鋼製メッシュにそれぞれ鉄筋計、ひずみゲージを取り付け計測を行った。図-14 における計測用補強材 1 および 4 の計測結果を図-15 に、最下段から 4 段目の計測用法枠 1 に設置した各計器の計測結果を図-16 に盛土工程と合わせてそれぞれ示す。なお、図中の盛土高さは、補強材 1 からの高さを示している。

図-15 には計測補強材 1 と 4 の計測結果を示すが、下段に敷設した補強材 1 の方に大きな張力（ひずみ）が発生していることがわかる。この傾向は図-17 に示す盛土完成後 100 日経過後の補強材のひずみの分布図でも明らかである。また、補強材 1 で特に顕著であるが、補強材に発生した張力は全長にわたり（ひずみゲージ設置位置のすべての点において）敷設後急増している。これは計測補強材近傍の転圧に伴うものであるが、その後は一旦やや減少し、盛土高が高くなるにつれ微増している。しかし盛土高の増加割合に比べ補強材張力の増加は小さくなっているのが特徴である。

また、図-16 に示す法枠に発生した応力の計測結果からは、鋼製メッシュに取り付けたひずみゲージから換

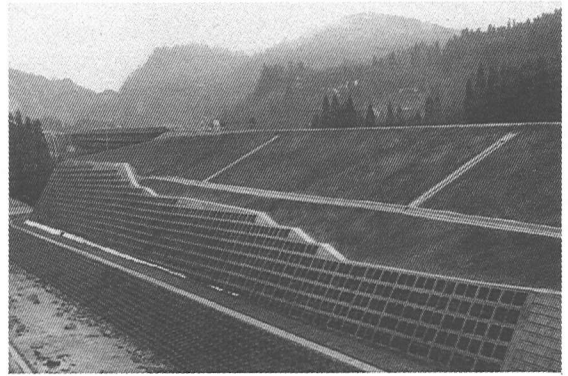


図-18 道路盛土としての施工例

算した応力に一部説明困難な計測値があるものの、全般的な傾向として、法枠に発生した応力は、枠のフレーム部および鋼製メッシュ両者とも近傍の盛土を転圧するときに急増するが、その後盛土高さが増えてもあまり増加しないことがわかる。これは、盛土内の補強材の抵抗力によって壁面としての法枠に作用する土圧が低減されているためであると考えられる。また、盛土の設計安全率が 1.2 以上あるため、盛土自体の変形が小さかったことも一因であろう。

本工法の施工件数も徐々に増え、法枠による表流水の流速緩和効果によって種子流出を抑制することができるため、法面部の緑化に対しても優れた性能を有していることが確認されてきている。そのため、景観上配慮が必要な場所への適用例も増えてきており、最近では、図-18 に示すような盛土高 14m を越える曲線部への適用実績もある^{22, 23}。今後さらに施工データを蓄積し、より効率的な施工法の検討を継続する考えである。

7. まとめ

今回の各種実験、解析、および実施工での計測結果より、次のような知見を得ることができた。

- ① ジオシンセティックス（補強材）と法枠を組合せた法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、盛土法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、補強材と法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、載荷実験時の補強盛土の挙動を良く表現することができる。
- ③ 法枠と補強材を接合することによって、盛土内土要素の安全率が 1.0 以下になる領域が大幅に減少し、

盛土の安定性が大きく向上する。

- ④ 盛土造成時に法枠に作用する応力は、法枠近傍の転圧時に急増するが、その後盛土高が増えても大きな変化は認められない。
- ⑤ ハイブリッドフレーム盛土補強土工法では、法枠によって法面の凹凸が軽減されるとともに、表流水の流速緩和効果によって法面部の緑化に対しても優れた性能を持っているため、景観に配慮した緑化法面の設計・施工が可能である。

参考文献

- 1) 落合良隆, 宮武裕昭: EPSブロック形式の壁面工を持つジオテキスタイル補強土壁の実物大崩壊実験, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 第3部, p.1580~1581, 1995.
- 2) 中嶋智樹, 大木祐司, 尾田賢治, 宮武裕昭, 土橋聖賢: コンクリートブロックを用いたジオテキスタイル垂直補強土壁の試験施工, 第10回ジオシンセティックシンポジウム, p.48~56, 1995.
- 3) ジオテキスタイルを用いた補強盛土の設計・施工マニュアル: (財) 土木研究センター, 1997.
- 4) 鳥井原誠, 松本伸, 平間興邦: 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.
- 5) Toriihara, M., Furuya, H. and Hirama, K.: Laboratory and Field Loading Tests of Embankment Reinforced with Geogrid, The International Geotechnical Symposium (IS Kyusyu '92), p.305~310, 1992.
- 6) 鳥井原誠, 松本伸, 平間興邦: ジオテキスタイルによる盛土補強効果に関する模型実験, 第24回土質工学研究発表会, p.1853~1854, 1989.
- 7) 鳥井原誠, 古屋弘, 平間興邦: 短いジオテキスタイルによる盛土補強効果に関する模型実験, 第26回土質工学研究発表会, p.2183~2184, 1991.
- 8) 三木博史: 道路土工と環境・景観との調和, 土と基礎, 44-6, p.5~8, 1996.
- 9) 龍岡文夫, 佐藤剛司, 岩崎高明, 山田真一, 内藤新吉: 不織布で補強した関東ロームの試験盛土の挙動, 土と基礎, Vol. 31, No. 9, p.21~28, 1983.
- 10) 太田秀樹, 飯塚敦, 表佑太郎, 杉江茂彦: 平面ひずみせん断試験機における端面摩擦の影響について, 第26回土質工学研究発表会, p.571~574, 1991.
- 11) 土質工学会編: 補強土工法, 土質基礎工学ライブラリー, 1986.
- 12) 市川賀寿男, 鳥井原誠, 平間興邦: ジオグリッド補強盛土の補強効果に関する検討, 土木学会第52回年次学術講演会概要集, 第3部, p.548~549, 1997.
- 13) 古屋弘, 鳥井原誠: 盛土補強土工法「ハイブリッドフレーム補強土工法」, 電力土木, No. 273, p.110~112, 1998.

(1999.7.29受付)

DEVELOPMENT OF A REINFORCING METHOD USING GEOSYNTHETICS AND SLOPE SURFACE PROTECTION WORK FOR EMBANKMENT SLOPES

Makoto TORIIHARA, Hiroshi FURUYA and Kunioki HIRAMA

Reinforcing steep embankment slopes with geosynthetics has become popular recently. It has been known empirically that reinforced slopes become more stable by applying some confining pressure to the slope face. Recognising the Importance of this factor, the authors developed a new construction method using geosynthetic reinforcement layers the ends of which are connected to a reinforced concrete slope face protection work. To this end, a series of small laboratory model tests and full-scale field tests and their FEM numerical simulation were performed. The results confirmed the importance of slope face confining for stabilising the reinforced slope and reducing the slope deformation. A number of actual slope protection works have been performed by this new construction method with vegetating slopes through openings of reinforced concrete slope protection works.