A Numerical Analysis of Earth Embankment Reinforced by Polymer Grids

Katsuyuki Kutara, Public Works Research Institute, Ministry of Construction
Noriaki Aoyama, Public Works Research Institute, Ministry of Construction
Kazuyuki Nakamura, Tokyu Construction Co., Ltd.
Tetsuhisa Minami, Tokyu Construction Co., Ltd.
Komei Iwasaki, Mitsui Petrochemical Industries, Ltd.
Jun Nishimura, Mitsui Petrochemical Industries, Ltd.
Naozo Fukuda, Fukken Chosa sekkei Co., Ltd.
Masakazu Taki, Fukken Chosa Sekkei Co., Ltd.

A series of testings on earth embankments had been conducted with a view to formulate a rational design as well as a proper construction technique of polymer grid reinforced embankment. In practice experimental embankments (height 3m, slope 1:0.7) were constructed laying in the earth-fill polymer grids at various lengths and at various spacings in the vertical direction. Tests were also done for both cases of embankment with and without slope protection measures. A comparative studies of grid reinforcing effect was carried out by conducting tests on embankments under heavy rain (reinfall intensity 15mm / hr) and reinforcing effects of grids as a result of integration of earth and grid was under special scrutiny. In this report a summary of test results were described. The FEM analysis based on elasto-plastic models was performed using these results. It was confirmed that models simulate the actual conditions of practical construction.

ポリマーグリッドを用いた盛土補強工法の数値解析

建設省土木研究所	久楽 勝行	青山 憲明
東急建設(株)	中村 和之	南 哲久
三井石油化学工業(株)	岩崎 高明	西村 淳
復建調査設計(株)	福田 直三	滝 昌和

ポリマーグリッドを用いた盛土補強工法の合理的な設計法および施工法の確立を目指して、これまで一連の大型盛土実験を行ってきた。すなわち、高さ 3m、のり勾配 1:0.7 の盛土中にポリマーグリッドを長さや高さ方向の間隔を変えて敷設し、また、のり面保護工を施工する場合としない場合の盛土を築造した。これらの盛土に約 15mm / hr の人工降雨を降らせ、盛土の補強効果について比較実験を行い、土とポリマーグリッド間の一体化による補強効果を確認した。本報は、これらの実験結果を要約し、これに基づいて弾塑性モデルによる FEM 解析を行った結果を示すものである。本解析モデルは、実際の現象を比較的良好にシミュレーションすることを明らかにした。

ポリマーグリッドを用いた盛土補強工法の数値解析

建設省土木研究所	久楽勝行	青山憲明
東急建設(株)	中村和之	南 哲久
三井石油化学工業(株)	岩崎高明	西村 淳
復建調査設計(株)	福田直三	○滝 昌和

1. まえがき

本研究は、昭和60年度から開始した建設省土木研究所と民間企業との共同研究「ジオテキスタイルの土中での挙動とその効果に関する研究」の一環として実施したものであり、ポリマーグリッドを用いた盛土補強工法の開発を目的としたものである。¹⁾²⁾ すなわち、盛土材とポリマーグリッド間の補強メカニズムを反映させた合理的な設計法および施工法の確立を目指すものであり、これまでポリマーグリッドの敷設仕様およびのり面処理工との組み合わせを変化させた一連の人工降雨による大型盛土崩壊実験を行っており、これまでに得られた成果を報告している。³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾

本報は、これまでの一連の実験の成果を整理し、数値解析によってシミュレーションし、補強メカニズムについて検討した結果について述べるものである。

2. 実験概要

2. 1 材料特性

盛土材およびポリマーグリッドの材料特性は表-1および表-2に示すとおりである。

盛土材は、盛土築造後にすべり安全率が 1.0以上で安定となり、降雨時には1.0以下となって盛土が崩壊するような強度特性を有するものとして、

茨城県稲敷郡江戸崎地区内に分布する山砂を用いた。

盛土締固め後の乾燥密度および含水比の平均は、各々 1.41tf/m^3 、22%である。これらは、それぞれ締固め度83%初期飽和度70%あたる。この状態におけるせん断強度定数は $C_u = 0.7\text{tf/m}^2$ 、 $\phi_u = 20.1^\circ$ である。なお、高飽和度状態におけるせん断強度定数は、以下に示す盛土崩壊実験から円形すべり解析によって逆算すると $\gamma_t = 1.85\text{tf/m}^3$ 、 $\phi_u = 20^\circ$ としたとき $C_u = 0.337\text{tf/m}^2$ となり、初期の約 1/2に低下する結果が得られている。

次に、実験に用いたポリマーグリッドは、盛土内の敷設材に二軸延伸材(SS-2)を、またのり

表-1 盛土材の物性

		実験 3	実験 1, 2
自然含水比	ω (%)	22.41	24.32
土粒子の比重	G_s	2.699	2.698
粒度特性	隙分 (%)	2	1
	砂分 (%)	74	70
	シルト分 (%)	12	20
	粘土分 (%)	12	9
	最大粒径 (mm)	4.75	4.75
	均等係数 U_c	70.0	27.3
	曲率係数 U_c'	15.9	5.5
締固め特性	試験方法	1-6-b	1-5-b
	最適含水比 ω_{opt} (%)	17.0	18.6
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (t/m^3)	1.695	1.640
透水係数 k (cm/s)		1.58×10^{-4}	1.45×10^{-4}

表-2 ポリマーグリッドの材料特性

		敷設材 SS-2	伸体 SR-2
単位重量 (g/m^2)		320	940
単位幅当りの引張り強度 (tf/m)	縦	1.5	8.0
	横	0.8	1.3
ピーク時のひずみ ϵ_f (%)	縦	10	17
	横	10	10

面処理工(のり枠材)には一軸延伸材(SR-2)を用いた。

2. 2 実験方法

長さ16m、幅 8m、深さ2.6mの土槽を 4分割し、この中に高さ3m、のり勾配1:0.7の盛土を築造した。ポリマーグリッドの敷設仕様は表-3に示すケースである。また、表中*印のケースでは図-1(a)、(b)に示すようなのり面処理工を施している。また、比較のために無補強の盛土も築造している。これら合計12ケースの盛土に対して平均降雨強度 13.5~15.0mm/hr、総降雨量 400~540mmの人工降雨を約3日間連続して盛土に加えた。実験ではa)ひずみゲージによる降雨時のポリマーグリッドのひずみ変化、b)中性子水分計(RI)による盛土内の飽和度の変化、c)水位計による盛土内の地下水位の変化、d)土壌水分計による盛土内のサクションの変化、およびe)変位計による盛土の変状の計測および目視観察を行った。

(a) 実験盛土の横断面図

(b) のり枠工の模式図

図-1 のり面処理工の概要

2. 3 実験結果の概要

表-3 実験結果の概要

実験中および実験終了時の各盛土の変状、ポリマーグリッドのひずみ、および飽和度の関係の代表例を表例を図-2に示す。ここで、ひずみの初期値は盛土築造後の降雨開始直前としており、発生ひずみ量は、降雨の影響によるものである。なお、累積降雨量が約 150mmの時に無補強の盛土が、また、同約 260mmの時敷設長 $L=1$ mの補強盛土が崩壊を生じている。

間隔 V (m)	0.75 (盛土3m高に3層敷設)	1.0 (同2層)	1.5 (同1層)
1.0	外的安定で済む(220mm) [ケース1.3] *	—	—
2.0	補強材露出にクラック(260mm) [ケース2.3]	—	—
3.0	安定 [ケース3.3] *	安定・変形有 [ケース3.2]	侵食性表層崩壊(210mm) [ケース3.1]

() は累積降雨量

一連の実験結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 敷設間隔を0.75mとした実験では、敷設長と盛土高の比 L/H が0.33(ケース1.3)の時には外的安定が、また0.67(ケース2.3)以上では内的安定が盛土体の安定性を支配する。
- (2) ポリマーグリッドのような補強材を盛土内に水平多層に敷設すると、土と補強材の相互作用によって補強領域の変形が拘束され、その結果ポリマーグリッドに生じるひずみはかなり小さいものとなる傾向がある。この効果をここでは一体化の効果と呼んでいる。
- (3) ポリマーグリッドに発生するひずみは、通常、盛土の下部に位置するものほど大きい値を示すが、降雨条件下では、降雨浸透の大きい上層部ほど大きい値を示す。
- (4) 急勾配の補強盛土では、のり面の処理が重要な問題である。一連の実験において、ポリマーグリッドと不織布をのり面で巻込む方式およびポリマーグリッドによるのり枠方式とを比較したところ、前者

図-2 盛土の変状とポリマーグリッドのひずみおよび飽和度の関係
は安定は保ったものの、のり面部の変形を生じた。一方、剛性を有するのり枠方式では、盛土体の変形を拘束する効果が著しく、ポリマーグリッドに生じるひずみも巻込み方式より小さいことが分かった。土構造物として、機能上問題となる場合には、のり面処理工に剛性を持たせる必要がある。

これらの実験結果に基づいて、円形すべり解析によって補強効果を解析し、以下の結果を得ている。土と補強材との一体化の程度を定量化する試案として、見かけの粘着力の増加率 $R_c ((c+\Delta c)/c)$ を定義した。解析の結果は図-3に示すごとく、敷設間隔と敷設長の比 V/L が小さいほど、また L/H が大きいほど R_c は大きい値を示し、このことは実験結果の傾向と良い対応を示すものである。

3. 数値解析結果

3.1 解析モデルとケース

解析モデルおよびケースを図-4と表-4に示す。ここで、ケースの3桁めは、のり面処理工の種類を示

図-3 V/L , L/H と R_c との関係

すものである。解析モデルは、有限要素法

表-4 解析ケース

による弾塑性モデルを用いて、ポリマーグリッドと盛土地盤をバイリニアな弾完全塑性体と仮定した。地盤の構成式には、取り扱いが簡易なDruker-Pragerの降伏関係を用いた。降雨浸透に伴う浸潤線の変動状態は、実験結果から飽和度 $S_r=80\%$ のゾーンの挙動に着目して、盛土に変状が観察された累積降雨量 R が150mmと265mmの状態をシミュレーションした。なお、ケース-0.0.0

条件 解析ケース	グリッド敷設長 L (m)	グリッド敷設層数 N (層)	法面保護工の タイプ
ケース-0.0.0	0	0	保護なし
ケース-1.3.0	1	3	"
ケース-2.3.0	2	3	"
ケース-3.3.0	3	3	"
ケース-3.1.0	3	1	"
ケース-3.2.0	3	2	"
ケース-3.3.1	3	3	不織布巻込み方式
ケース-3.3.2	3	3	グリッド法枠方式

は $R=150\text{mm}$ で盛土崩壊に至った時期に対応する。今回の解析では浸潤に伴う盛土の単位重量の増加と強度低下を外力と考えた。

表-5 材料定数

材料定数の設定は、室内材料試験結果に基づき予め与えておき、ケース-0.0.0やケース-3.1.0などの代表ケースについて実験結果を逆解析する方法で定数の修正を行った。その結果、盛土材料の浸潤時の強度低

材料番号	要素タイプ	材料名	材料定数
①	四節点四角形要素 (2×2 Gauss積分点)	砂 (弾塑性体)	$\gamma_t=1.70\text{t/m}^3$, $E=30\text{tf/m}^2$, $\nu=0.30$, $C=0.7\text{tf/m}^2$, $\sigma'_c=2.0$, $E'=0\text{tf/m}^2$
②	"	"	$\gamma_{sat}=1.85\text{t/m}^3$, $E=30\text{tf/m}^2$, $\nu=0.30$, $C=0.0175\text{tf/m}^2$, $\sigma'_c=2.0$, $E'=0\text{tf/m}^2$
③	パネ要素 (弾塑性タイプ)	水平敷設グリッド (SS-2織)	$EA=0.5\text{tf}$ $Ty=1.8\text{tf}$, $E'=0$
④	梁要素 (弾性タイプ)	法面部グリッド (法枠方式)	$E=30\text{tf/m}^2$, $\nu=0.3$ $A=10\text{cm}^2$, $I=83\text{cm}^4$

下は、粘着力が浸潤前の $1/4$ となった。この結果は円形すべり解析結果と類似している。ポリマーグリッド(SS-2織方向)の物性は、標準的な引張り強度試験から求まっている荷重～ひずみ関係から与えた。材料定数の決定値は、表-5に示すとおりである。

3. 2 解析結果

のり面水平変位とポリマーグリッドのひずみ分

布を図-5に示す。同図の(a)～(c)はポリマーグリッドの敷設層数の増加に伴う補強効果を比較したものである。降雨初期には有意な差が見られなかったものの、無補強盛土が崩壊した降雨末期において顕著に変形特性が改善されている。ポリマーグリッドのひずみについては実験値と解析値とはよい近似を見せているが、ひずみ分布のピーク位置が浸潤線の進行に従って解析値の方がのり面側に移動する傾向にある。この現象は、浸潤線近

のである。降雨初期には有意な差が見られなかったものの、無補強盛土が崩壊した降雨末期において顕著に変形特性が改善されている。ポリマーグリッドのひずみについては実験値と解析値とはよい近似を見せているが、ひずみ分布のピーク位置が浸潤線の進行に従って解析値の方がのり面側に移動する傾向にある。この現象は、浸潤線近

図-4 解析モデルの概要

傍に外力が集中し、更に急激な強度 (凡例)

低下も重なって表層すべり的な応力状態を呈したためと考えられる。

図-6は、ケース-3.3.0の降雨進行に伴う地盤変位と局所安全率コンターの変化を示すものである。変位図からのり面表層部やのり先部における水平変位の累積傾向が、また、局所安全率コンターからのり面より盛土内部へ向かう安全率低下域の進行が明らかであり、塑性変形の増大あるいは破壊(すべり)現象の徴候が検証できる。

以上の挙動は、全ケースの解析結果で認められたものであり、本解析手法はポリマーグリッドの盛土補強メカニズムを表現しうるものと言える。

図-7は、塑性域の分布状況から各ケースの補強効果を比較したものである。この中でケース-0.0.0は $R=265\text{mm}$ 時点では超過応力の繰返し計算が収束せず(繰返し回数30回)、概ね崩壊したと判断される結果となっ

図-5のり面の水平変位とポリマーグリッドのひずみ分布。各ケースの補強効果の順位は、ケース-1.3.0と3.1.0→ケース-3.2.0、ケース-2.3.0と-3.3.0→ケース-3.3.2と評価できそうである。しかしながら、ケース-3.3.2以外はあまり差は顕著でない。ここでケース-3.3.2はのり面保護工を施したケースであり、のり面工の曲げ剛性(梁効果)が盛土内に敷設したポリマーグリッドと一体化して補強効果を増大させた傾向を見ることができる。一方、ケース-3.3.1の不織布巻込み方式は、不織布は、盛土のはらみ出しが不織布に張力を発生させるほどのものではなかったため、ケース-3.3.0の保護工なしの結果と同等になった。

4. あとがき

ポリマーグリッドを用いた一連の補強盛土の崩壊実験結果から、ポリマーグリッドと盛土材との一体化によって、見かけ上せん断強度定数が増加する効果が円形すべり法によって解析されている。この補強メカニズムを解明するために弾塑性有限要素法解析を行った。この解析法によって実験結果をシミュレーションし、補強盛土の挙動を合理的に表現しうることを確認した。しかしながら、この方法を実際

(a) ケース-3.1.0

(b) ケース-3.2.0

(c) ケース-3.3.0

図-6 変位図と局所安全率コンターの变化状況(ケース-3.3.0)

図-7 各ケース毎の塑性域の分布状況

に設計法へ適応するという観点に立つならば、今回のシリーズ解析から各ケースの補強効果の有意差をさらに明確にさせるべく解析方法の改良が必要と考えられる。現在検討中の改良項目は①地盤の構成則、②ポリマーグリッドと地盤間のジョイント要素、③地盤変位量に基づいた解析値の検証である。

最後に、これら一連の研究には発表者の他、共同研究グループの多くの方々が関係した。これらの方々に感謝の意を表します。

《参考文献》

- 1) 昭和60年度ジオテキスタイルの土中での挙動とその効果に関する研究報告書、建設省土木研究所。
- 2) 昭和61年度ジオテキスタイルの土中での挙動とその効果に関する研究報告書、建設省土木研究所。
- 3) 久楽、南他3名:ポリマーグリッドを用いた補強盛土の崩壊実験-のり面処理工による補強効果について、第22回土質工学研究発表会講演集 pp.1761-1762,1987.6.
- 4) 三木、福田他4名:ポリマーグリッドを用いた盛土補強工法の開発(その1)-人工降雨による盛土崩壊実験-、第一回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集,pp.77-82,1986.12.
- 5) 三木、林他3名:1)と同、敷設間隔の違いと補強効果について,pp.1763-1764.
- 6) 三木、福田他3名:1)と同、敷設仕様の違いと補強効果の解析,pp.1765-1767.
- 7) 久楽、南他4名:2)と同(その2),のり砕効果に関する実験,pp.83-88.