

遠心載荷模型実験によるジオシンセティックス 敷設盛土の排水・補強機能評価

棚橋 由彦*・蔣 宇静*
日高 公大**・河東 立**

Evaluation of drainage and reinforcement functions of geosynthetics-reinforced earth fills based on the centrifuge model tests

by

Yoshihiko TANABASHI*, Yujing JIANG* Koudai HIDAKA** and Ryu KATOH**

The recent development of new geosynthetics such as geocomposites (sandwich structure of non-woven fabric between woven fabrics) has enabled the construction of earth filled structures using the unsuitable Kanto loam. However, the mechanism of drainage and reinforcement functions of geocomposites has not been clearly examined yet. This paper presents an experimental study on geocomposites-reinforced steep earth fills using Kanto Loam by using the centrifuge model tests. Based on the comparison of both non-reinforced and reinforced embankment using the Kanto loam, the drainage and reinforcement functions of the geocomposite have been investigated and discussed.

Key words: Kanto loam, geosynthetics, Centrifuge model test, Reinforced earth fill

1. 序論

我が国には火山灰起源の土である火山灰質粘性土が国土面積の40%近くにも及び分布している。特に、関東地方には土質工学的に特異な性質を持つ関東ロームが広範囲にわたって分布している。関東ロームとは赤褐色の火山灰質の粘性土であり、火山灰が偏西風に乗って関東平野に堆積し、風化、粘土化したものである。代表的な火山灰質粘性土である関東ロームは従来捨土の対象とされ、盛土材としては不適であった。しかし、ジオシンセティックスを用いた急勾配補強盛土工法の開発などにより、関東ロームや建設発生土でさえも盛土材として積極的に用いられるようになってきた。一方、不織布は粘性土に対して排水材としてのみ用いられてきたが、近年、ジオコンポジット（高剛性・高強度の織布を不織布で挟んだサンドイッチ構造）の開発に伴い、引張補強材としても機能することが可能になった。しかしながら、補強土工法において引張効果と

排水効果の両方の効果を期待する補強土の設計法などは研究段階であるが、近年、補強土工法は低品質発生土を再利用する技術工法の1つとして注目されている。

盛土内応力は土の自重によるものが支配的であり、土の強度や変形特性は、応力レベルに大きく依存する。したがって、自重応力のごく小さい縮尺模型を用いて重力場の実構造物の変形や破壊挙動を把握することは非常に困難である。しかし遠心力載荷模型実験では実物の縮尺の $1/n$ の模型を重力加速度の n 倍遠心加速場におくことで模型内に実物と同じ自重応力状態を再現させようとする実験手法で、これによって縮尺模型に実物と同じ挙動を生じさせることが期待できる¹⁾。

本研究の目的は、遠心力載荷模型実験装置を用いて、関東ロームを用いた無補強およびジオシンセティックス補強盛土の変形挙動等に関する実測値との比較、検討により、ジオコンポジットの排水・補強両機能を把握することにある。

平成16年4月16日受理

* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**生産科学研究科博士前期過程 (Graduate student, Graduate school of Science Technology)

2. 火山灰質粘性土の特徴

関東ロームは関東地方一体の丘陵に広く分布する赤褐色の火山灰性の粘性土である。その分布は火山灰の供給源、鉱物組成などの違いから北関東と南関東の二つの地域に大別されている。両地域はほぼ北緯36度の線を境としており、前者は浅間、棒名山などが、後者は富士、箱根山が供給火山とされている。関東ロームは火山灰が偏西風に乗って関東平野に堆積し、風化、粘土化したものであることから、その分布の状態は供給火山に近いほど厚く、その東側にはほぼ楕円形に延びている。ロームとは本来は砂、シルト、粘土粒子が一定の割合で混ざり合った土で、粒度組成上の分類名である。

関東ロームの工学的分類については既存の工学的分類方法では充分でないこと、地質学的、粘土鉱物学的性質と工学的性質との関連も明らかでないこと等から、現在有効な方法はなく、今後の問題として残されている。関東ロームは他の粘性土と比べて工学的に多くの特異性を持つが、攪乱や乾燥の履歴を受けた場合に、特にそれは顕著になる。比較的工期の長い小規模な工事の場合には掘削しやすく、強度も大きく、施工にあたってはあまり問題のなかった土であるが、大型の施工機械によって急速施工が行われるようになると、土はますますこね返されてトラフィカビリティーが低下し、扱いにくい土に一変する。また、乾燥履歴を受けると土性は改良されるが、コンシステンシーや締め固め等の特性が極端に変化するため、土工工事等における設計や施工管理が困難になる。

3. ジオシンセティックス

3.1 ジオシンセティックスの概要²⁾

広義ジオシンセティックスは、ISOで次の2つの性状を有するものでなければならないと規定されている。

- ・ Permeable (通水性)
- ・ Polymeric (合成高分子)

したがって、腐食性のある有機質素材の製品は含まれないのが原則である。合成高分子材には多種のものがあるが、ジオシンセティックス素材としては土中での耐久性・安全性に優れ、安価で安定した供給が可能となるものなので、一般的にはポリプロピレン(PP)、ポリエチレン(PE)、ポリエステル(PET)、ビニロン(PVAL)、ナイロン(PA)、ポリ塩化ビニール(PVC)の製品が多い。

ISOでは、広義ジオシンセティックスが土構

造物に關与する製品の機能として、次の5つの項目を挙げている。①排水、②ろ過、③分離、④補強、⑤保護、これにジオメンブレンの遮水と合わせて6つの機能となる。これらの機能を設計に導入する際には、適切な機能により得られた特性値を用いる必要があり、材料試験方法は、要求機能を十分に評価しうるものでなければならない。

3.2 実験に使用したジオシンセティックス

本研究では Photo.1 に示すジオコンポジット (TRF-31)、Photo.2 に示す不織布 (EX-60)、Photo.3 に示すジオグリッド (グラスファイバー製防虫ネット)の計3種類を盛土内に敷設して実験を行った。またそれぞれの特性を Table-1 に示す。高強度・高剛性の織布を不織布ではさんだものがジオコンポジットである。不織布は布の一種であり、紡糸から布を形成するまで連続的に行うスパンボンド工法で製造されたものである。不織布は引っ張り補強効果が小さく、排水材としての機能を有するものとして位置付けられている。また、ジオグリッドは一体的に結合した引っ張り部材による規則正しい開口の格子状物から構成された平面構造の高分子材料として定義している。本研究ではジオグリッド (SS-1) 模型補強材としてグラスファイバー製防虫ネットを使用した。目合い約1mm四方の二軸延伸のもので遠心加速度100G載荷後には10cm四方の大きさになり、完全には一致しないが、引っ張り抵抗などの強度特性がSS-1に非常に近似しており、補強機能が同様に評価できると考えられる。

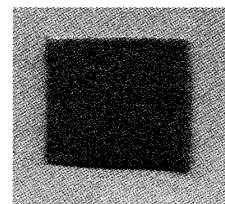
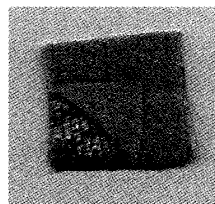


Photo.1 Geocomposite Photo.2 Nonwoven fabric

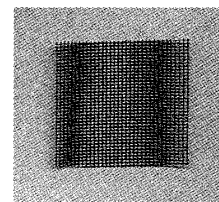


Photo.3 Geogrid

Table-1 The properties of geosynthetics

Reinforced materials		Geogrid	Nonwoven fabric	Geocomposite
Nature of Tenacity	Strength (KN/m)	19.6	15.7	49
	Elongation (%)	5.0	100	6.5
Coefficient of permeability (cm/sec)	Vertical direction		1×10^{-1}	9×10^{-3}
	Direction of inside the surface		1	1×10^{-1}

4. 遠心模型実験の概要

幾何学的に相似な領域における相対する点の応力は、もし領域の境界において、それらが相似であり、領域内で、 ϕ , $c/(p+c \cot \phi)$, $\gamma l/(p+c \cot \phi)$ の3つの量が等しければ相似であるということ（ここに、 l , p はそれぞれ基準長、基準応力、 γ は土の自重、 c は土の強度定数である）をもとに力学的相似則を満足するための1つの方法として遠心力を利用する方法がある。

そこで本研究では実物の盛土内応力を実物の1/nの縮尺模型内に再現させ、破壊への挙動を遠心力を利用した遠心载荷模型実験によって把握する。

4.1 実験概要

以下のような手順で実験を行った。

- ① 試料（関東ローム）を2mmふるいで粒度調整する。
- ② すべての実験で締固め度を一定に近い値で行うため最大乾燥密度の0.9~1.0倍の乾燥密度に模型盛土の体積を乗じた量の試料を準備する。
- ③ 準備した試料を自然含水比に近い含水比にするために含水比調整を行う。
- ④ 均等に締固めながら模型盛土を実験装置の試料容器に作成する。このとき、補強材、計測器、変位ベクトル図出力のための標点は、それぞれ作成時に決定した場所に配置する。
- ⑤ 試料容器を実験装置に備え付ける。
- ⑥ データを記録するためにコンピューターの準備をする。
- ⑦ 盛土が破壊に至るまで遠心加速度を上げていく。
- ⑧ 実験終了後、CCDカメラによって撮影された画像の編集を行い、変位ベクトルを出力する。

以上の手順により限界盛土高が決定される。

実験に使用した関東ロームの工学的性質を Table-2 に示す。盛土の崩壊の様子や盛土内応力の比較を行うため、無補強、ジオグリッド、不織布、ジオコンポジット敷設のそれぞれ浸潤面の有無で計8ケースの実験を行った。初期浸潤面の作成は試料容器の背面下部より同量の水を流入させて行った。供試体の形状、寸法、初期浸潤面の位置、各ジオシンセティックスの敷設位置を Figure-1 に示す。なお、変位ベクトル図出力のための標点、各計測器の配置はそれぞれ Figure-2、Figure-3 に示す。また、すべての実験において Figure-4 のように滑らかに遠心加速度を上昇させ限界盛土高を決定できるようにした。

Table-2 The properties of Kanto loam

Results of soil tests			
Density of soil particles	ρ_s	2.73	(g/cm ³)
Natural water content	W_h	70.0	(%)
Liquid limit	W_L	90.8	(%)
Plastic limit	W_P	66.9	(%)
Maximum dry density	ρ_{dmax}	1.06	(g/cm ³)
Optimum water content	W_{opt}	46.8	(%)
Angle of internal friction	ϕ'	24.8	(°)
Cohesion	c'	0.001	(MPa)
Parameters of earth fill			
Initial water content	W_i	70.0	(%)
Degree of saturation	S_r	90.0	(%)
Bulk density	ρ_t	1.484	(g/cm ³)
Dry density	ρ_d	0.873	(g/cm ³)
Saturated density	ρ_{sat}	1.554	(g/cm ³)

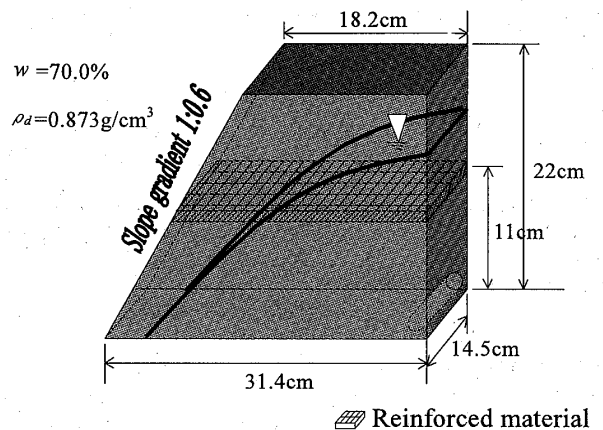


Figure-1 Shape and size of earth fill model

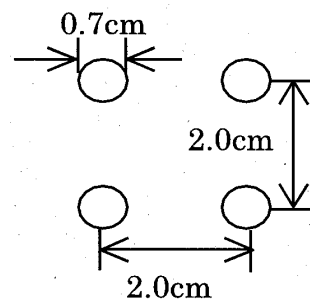


Figure-2 The arrangement of displacement vectors measurement points

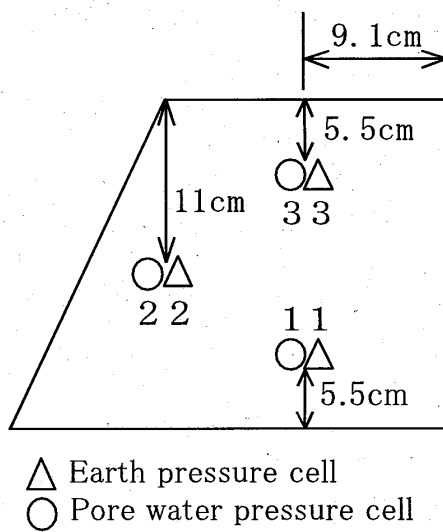


Figure-3 The arrangement of measurement points

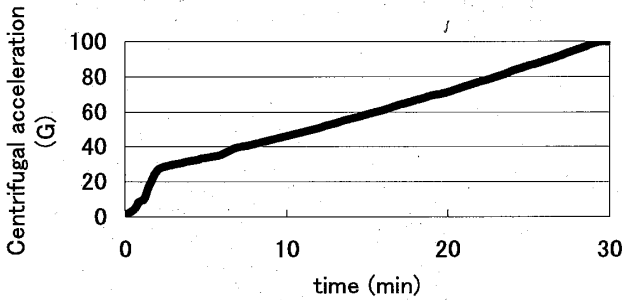


Figure-4 Progress of centrifugal acceleration

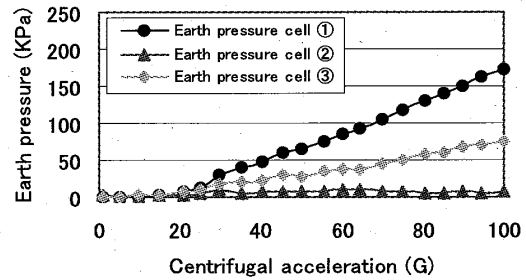
5. 実験結果と考察

5.1 実験結果

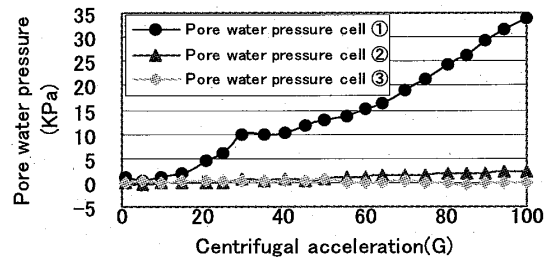
浸潤面を設定した無補強盛土, ジオコンポジット敷設盛土の遠心加速度に伴う土圧, 間隙水圧の変化をそれぞれ Figure-5, Figure-6 に示し, 凡例に各計測器の番号を示した。浸潤面がない場合は各パターンとも遠心加速度100G 載荷後も盛土の崩壊はなく, 圧密沈下のみが確認された。今回は締固め度を82.4%となっているため, 浸潤面がない場合は盛土の締め固めが十分行えていると考えられ, 無補強盛土でも安定することが判断される。

初期浸潤面を設定した場合, 無補強盛土では遠心加速度約35Gで盛土の崩壊が CCD カメラの映像より確認された。Figure-5 では土圧計②が35G 辺りから下降しており, 法面付近の盛土の崩壊が起きたことが判断される。また, 間隙水圧計①が30~40G 辺りで上昇していない。これは初期浸潤面が法面方向へ移動することにより, 水位が低下した影響であると考えられ, 浸潤面の移動による浸透力が盛土内部の強度低下に影響していることが推測される。

Figure-6 では, 無補強盛土の場合と比べ, 土圧計①の値が低く抑えられており, 引っ張り補強機能によるせん断抵抗が増加したためであると考えられる。加速度の上昇に伴い, 土圧計②の値も増加しており, 盛土が安定していることが判断される。また, 間隙水圧計①の値が顕著に抑えられており, 排水機能が有効に機能したことが推測される。間隙水圧計②の値が0付近で一定となっていることから排水補強機能が有効に働いていることが考えられる。

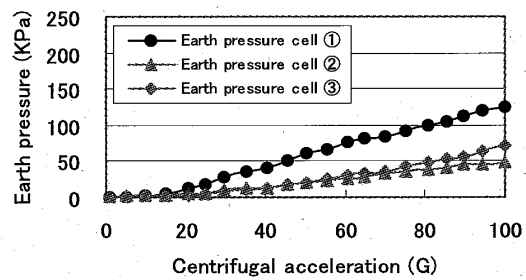


a) Earth pressure vs. centrifugal acceleration

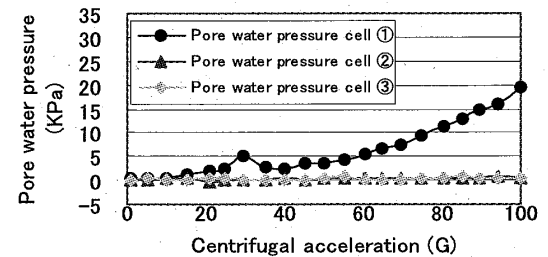


b) Pore water pressure vs. centrifugal acceleration

Figure-5 Non-reinforced earth fill



a) Earth pressure vs. centrifugal acceleration



b) Pore water pressure vs. centrifugal acceleration

Figure-6 Geocomposite-reinforced earth fill

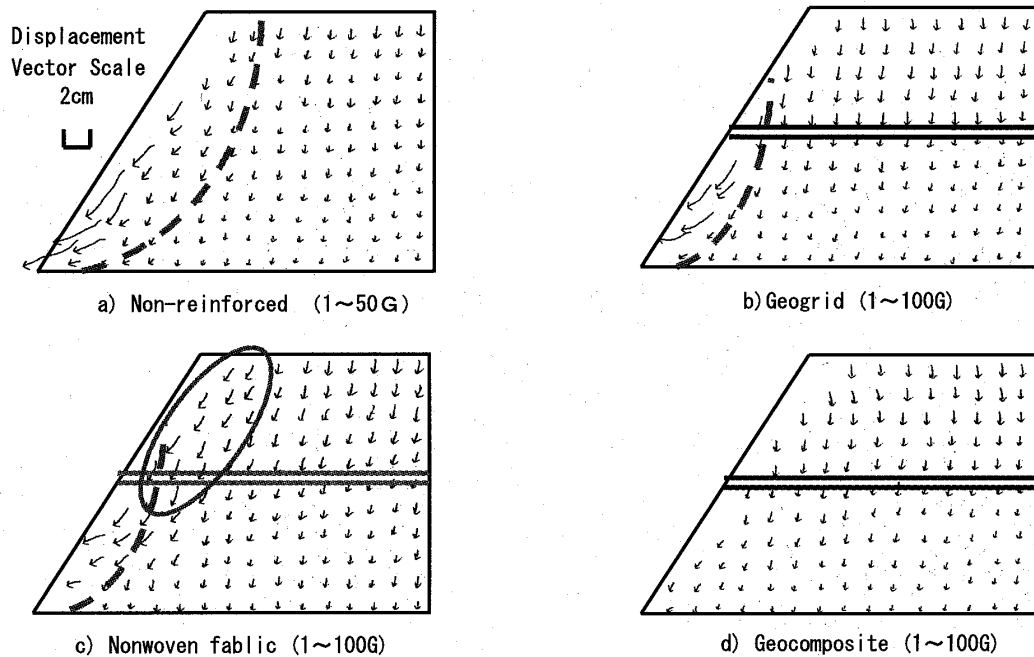


Figure-7 Comparison of displacement vectors

Figure-7 に浸潤面がある場合の各パターンの変位ベクトル図を示す。無補強盛土の場合、50G以降は盛土が崩壊したため変位ベクトル図の出力ができなかったが、図のような円弧状のすべり面がCCDカメラの映像より確認された。ジオグリッド敷設盛土は法面底部付近で破壊が確認されたが、敷設面上部では安定しており、補強機能が有効に働いたことが把握できる。不織布敷設盛土では法面の表層破壊が確認できる。これは盛土内からの排水による影響も大きいと考えられるが、敷設面上部でも法面方向へ盛土が膨らみだしており、引っ張り補強効果が低く、盛土内部では破壊が起きていることも示唆される。ジオコンポジット敷設盛土は排水による法先のわずかな崩壊はあったものの、全体的に真下に変位しており、補強機能に加え、排水効果により圧密促進が有効に働いていることが伺え、4ケースの中で最も安定しており、補強材として最も効果が期待できると考えられる。

5.2 限界盛土高

CCDカメラの映像、変位ベクトル図をもとに限界盛土高を算出すると無補強盛土では遠心加速度約35Gで崩壊が確認されたため限界盛土高は7.7mとなる。ジオグリッド敷設盛土は60Gで盛土の底部破壊が起こったため、13.2mとなる。不織布敷設盛土は75Gで法面の表層破壊が起こったため16.5mとなる。ジオコンポジット敷設盛土は100G载荷後も大きな盛土の崩壊

は確認されず、変位ベクトル図からも盛土の安定が判断されるため限界盛土高は22mとなり、4パターンの中で最も効果のある補強材として期待できることが判断される。

6. 分割法による斜面安定計算と実験結果との比較

分割法³⁾により浸潤面を設定した遠心加速度40G換算無補強盛土(盛土高8.8m)で安定計算を行った結果、安全率は1.15となり、無補強盛土の場合安定計算上、安定という結果になった。しかし安定計算上、安全という結果にもかかわらず、実験では遠心加速度約35Gでの崩壊が確認された。浸潤面を設定したことによって、自由水による実質的な飽和度が上昇するにつれ、関東ロームの粘着力が急激に低下することや、盛土作成時の転圧に伴い、関東ロームの非自由水分である拘束水の一部が繰り返しの自由水化し、元来の自由水とあいまって土を著しく軟弱化させたり、系外に流出したことが原因として考えられる。そしていったん自由水化した水は再び拘束水となることはない。また、浸潤面というのがあくまで初期の浸潤面であり、盛土内の水が移動することは当然考えられ、この水の移動により安定計算上考慮されていない浸透力が働いたことも原因として考えられる。既往の研究^{4)~8)}では粘着力の低下、浸潤面の移動による浸透力の影響、排水による排水機能を考慮した安定計算法が

提案されているが、引っ張り補強機能は考慮されておらず、今後、両機能を考慮した分割法プログラムの開発を進めていく必要がある。

7. 結 論

本研究では、ジオシンセティックス敷設盛土の排水・補強機能を把握するために、関東ロームを用いた遠心載荷模型実験による評価を行った。無補強盛土、ジオグリッド敷設盛土、不織布敷設盛土、ジオコンボジット敷設盛土を用いた模型盛土実験を行い、比較検討した。その結果以下の結論が得られた。

- (1) 浸潤面の影響により盛土の安全性は大幅に低下する。
- (2) 初期浸潤面設定後、浸透力の増大や粘着力の低下が予想される。
- (3) ジョグリッドの補強効果により盛土の安定性は増す。
- (4) 不織布は排水材として十分な効果を果たす。
- (5) ジョコンボジットの排水効果（間隙水圧の消散）に加え、引っ張り補強効果（せん断抵抗の増加による盛土の安定性の増加）は十分に期待でき、ジオコンボジットを盛土内に敷設することにより、盛土の安定性は大幅に増す。

8. 今後の課題

関東ロームは土質工学的に特異な性質を持っており、初期含水比や堆積地域等の違いにより試料の性質が大きく異なることや、締め固め時の関東ロームの状態（含水比、練り返しの程度など）に盛土の安定性は大きく左右されるため、今後は、様々な条件を考慮して検討と評価を更に進めていく。今回の実験では遠心加速度を100Gまでしか上げておらず、それ以上に加速度を載荷させた場合の検討も今後の課題として挙げられる。またジオシンセティックスは様々な材質、形状のものが提案されており、敷設層数を増やすなど様々な条件で検討する必要がある。さらに、浸透力に加

え、補強材の効果を考慮した分割法プログラムの開発などジオシンセティックス敷設盛土の排水補強機能をより定量的に把握することについても今後の研究の課題であるといえる。

参 考 文 献

- 1) 高田直俊, 日下部治: 遠心模型実験 (3.原理), 土と基礎 vol35, No12, pp.89-94, 1987.
- 2) ジョテキスタイル補強土工法普及委員会: ジョテキスタイルを用いた設計・施工マニュアル, pp.15-50, 1996.
- 3) 土木工学全集編集委員会: 土木工学全集, 第5巻, 土質力学, pp.286-289, 1986.
- 4) 棚橋由彦, 蔣 宇静, 高原敬一, 筒井章久, 篠原努: ジョシンセティックス補強粘性土盛土の浸透・安定機構に関する実験及び解析的研究, 第35回地盤工学研究発表会講演概要集, 地盤工学会, 岐阜, 543, pp.1073-1074, 2000.
- 5) Tanabashi.Y, Suyama.K, Yasuhara.K, Hirai.T, Nishimura.J, and Nagashima.H :New design method for geocomposites-reinforced cohesive earth fills, Int. Conf. on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng2000), 19-24, November 2000, Melbourne, Australia, CD-ROM, GIGS1036, 2000
- 6) 棚橋由彦, 蔣 宇静, 高原敬一, 永嶋洋政, 筒井章久, 篠原 努: ジョシンセティックス補強粘性土盛土の浸透・安定機構に関する研究, 第55回土木学会年次学術講演概要集, 仙台, III-B306, CD-ROM, 2000
- 7) 棚橋由彦, 永嶋洋政, 陶山健太, 平井貴雄, 西村 淳, 安原一哉: ジョコンボジット補強盛土の設計法試案, 土木学会論文集, 2002-3, No.701, III-58, pp.145-153, 2002
- 8) 永嶋洋政, 棚橋由彦, 平井貴雄, 西村 淳, 安原一哉: ジョコンボジットを用いた補強盛土模型実験による排水・補強効果の把握, 土木学会論文集, No.704, III-61, pp.25-36, 2002