

## 液状化地盤上の盛土補強の解析事例

岡三リビング (株)	小浪 岳治
日本工営 (株)	大和田貴博
ターナル・レゾナンス (株)	久保 幹男
港湾空港技術研究所	中澤 博志

### 1. はじめに

従来、液状化地盤上に土構造物を構築する場合には、密度増大、間隙水圧消散、固化処理、地下水水位低下などの液状化対策が施されてきたが、土構造物を許容できる変状に抑制して経済的な盛土補強技術の研究開発には有意義といえる。本研究では人工的に液状化させた実地盤上の盛土底部を、高強度ジオシンセティック（パラリンク）を用いたマットレスで補強してその挙動を調べた。本報告では、実験により確認された液状化に伴う流動現象、及び過剰間隙水圧の消散に伴う沈下現象を2次元液状化流動解析プログラムALID<sup>2)</sup>を用いて再現するとともに、高強度ジオシンセティックを用いた補強土のモデル化について検討した結果を述べる。さらに液状化地盤の諸元や盛土の規模を種々変化させて補強効果が顕著となる条件を探った結果を報告する。

### 2. 液状化実験

マットレスを構成する高強度ジオシンセティック<sup>3)</sup>はポリエステル長繊維を平行かつ密に引き揃えて芯材として、その繊維束をポリエチレンで被覆した帯材料を縦方向に等間隔に揃えて4.5m幅の面状にした補強材である。高強度ジオシンセティックの引張り特性は図-1に示すとおり、破断ひずみが13%程度、製品基準強度に相当する荷重が作用したときのひずみは11%程度である。写真-1はマットレスの構築状況であり、この上部に高さ3mの盛土を構築した<sup>4)</sup>。

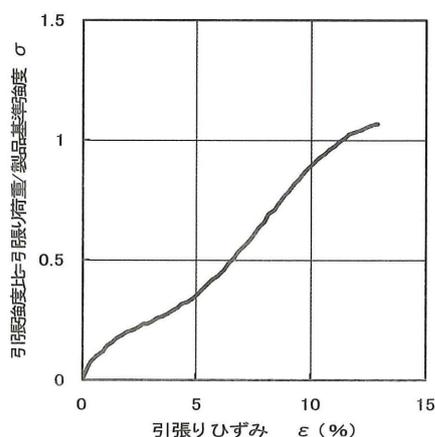


図-1 高強度ジオシンセティック引張り特性

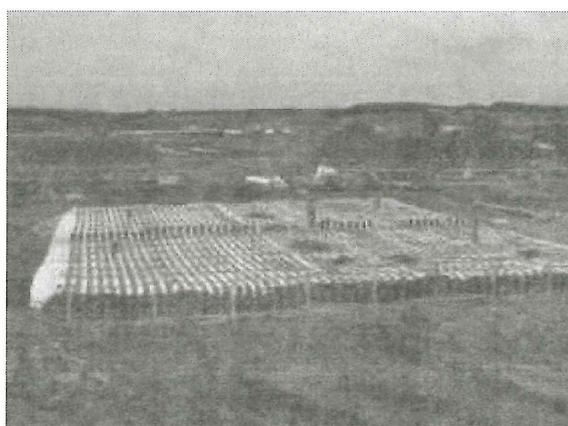


写真-1 高強度ジオシンセティックマットレス

公称強度 200kN/m の高強度ジオシンセティックによる盛土補強は延長 10m の区間であり、その両側の 10m が無補強盛土の区間となっている。人工的な液状化は地盤中に設置された発破による振動で生じさせ、地盤の液状化の程度は、盛土中央と盛土の法面中腹の位置の地盤中に設置した水圧計で確認した。液状化時および液状化後は間隙水圧の他、ジオシンセティックのひずみ、盛土底部の沈下、盛土のり肩・のり尻の沈下と水平変位を計測した。

図-2は地質断面とN値を示している。図-3に示す盛土直下基礎地盤の間隙水圧データを見ると、過剰間隙水圧比はGL-4.0mでは1.0程度まで上昇しているのに対し、GL-8.0mでは0.3程度と顕著な上昇が見られない。これを踏まえ、液状化層の範囲はAs3層の下端までとし、As4層及びAs5層については非液状化層として取り扱うこととした。

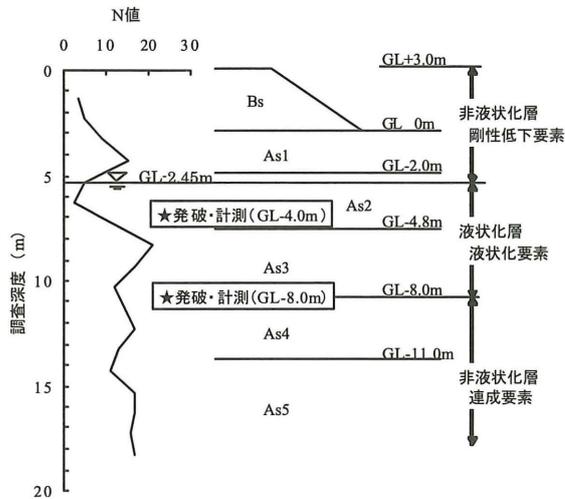


図-2 地質断面とN値

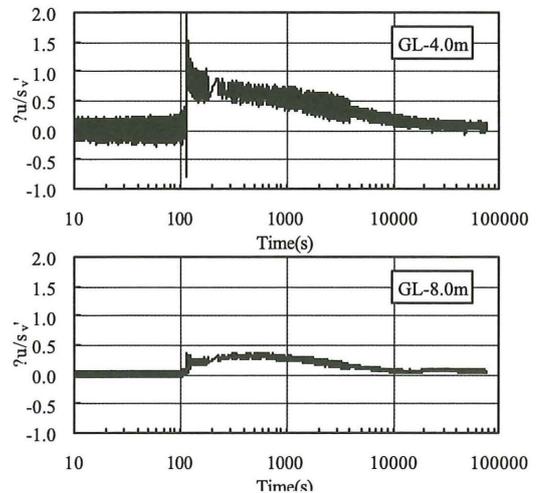


図-3 過剰間隙水圧比の時系列

### 3. 再現解析

#### 3.1 無補強盛土の解析条件

実験により確認された液状化に伴う流動現象、及び過剰間隙水圧の消散に伴う沈下現象を2次元液状化流動解析プログラムALIDを用いて再現した<sup>5)</sup>。

表-1 解析定数一覧

土層名	要素タイプ	変形特性	せん断弾性係数 G kN/m <sup>2</sup>	ポアソン比 ?	湿潤単体重量 ? kN/m <sup>2</sup>	液状化抵抗率 FL	細粒含有率 Fc %	相対密度 Dr %
Bs	SOLID	剛性低下	4000	0.33	15.6	-	-	-
As1	SOLID	剛性低下	12000	0.33	16.1	-	-	-
As2	SOLID	剛性低下	5000	0.33	17.2	-	-	-
As2	SOLID	弾性液状化	2000	0.33	17.5	変-Z	19.0	23.0
As3	SOLID	弾性液状化	17000	0.33	17.7	変-Z	7.7	62.5
As4	SOLID	連成要素	16000	0.33	17.6	-	-	-
As5	SOLID	連成要素	16000	0.33	16.8	-	-	-

表-2 FL値<sup>6)</sup>一覧

	K <sub>f</sub> =0.15		K <sub>f</sub> =0.20		K <sub>f</sub> =0.25	
	一般部	盛土部	一般部	盛土部	一般部	盛土部
As2	0.64	0.74	0.48	0.56	0.38	0.45
As3	1.27	1.56	0.96	1.17	0.76	0.93

FL値は道路橋示方書V耐震設計編に示される手法より算出した。  
地震時せん断応力比の算定においてはN値による簡易法を用いた。

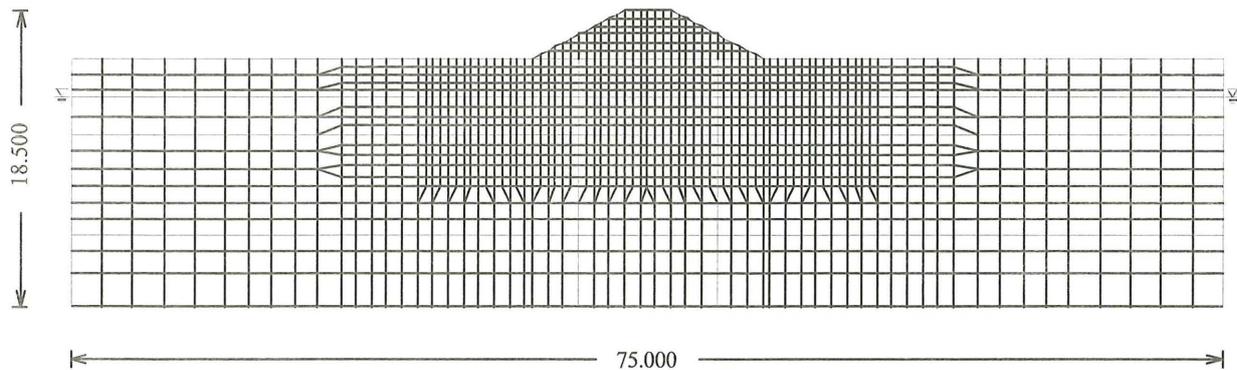


図-4 解析モデル

ALIDは液状化に伴う流動をある程度の精度で比較的簡易に解析できる手法である。液状化要素については液状化時の剛性低下率を安田らによる細粒分含有率と液状化抵抗率との関係<sup>7)</sup>から算出し、液状化後の体積圧縮率については石原らによる相対密度と液状化抵抗率との関係<sup>8)</sup>から算出するモデルである。液状化層より上層の非液状化層及び盛土については、液状化による影響を考慮して剛性低下要素として、初期剛性から一律の割合で低下させる手法とした。

図-4は解析対象断面を示しており、境界条件を側面水平方向固定、底面固定とした。解析は表-1と表-2に示した条件として、液状化抵抗率算出のための設計水平震度、及び非液状化層・盛土の剛性低下率をパラメータとしたケーススタディを行った。再現解析におけるパラメータの設定範囲はそれぞれ0.15~0.25 (タイプI)、及び1~1/100とした。

### 3.2 無補強盛土の解析結果

無補強盛土の再現解析結果の主な傾向は以下のとおりである。

- ・沈下量は設計水平震度が大きいほど増加する (図-5)。
- ・法尻水平変位量は設計水平震度による差異はほとんど見られず、非液状化層の剛性低下率が支配的である (図-6)。

実測値との比較から推定される非液状化層の剛性低下率の最適値は、法尻水平変位量に着目すると1/10程度となる (図-6)。一方、設計水平震度の最適値は、図-5の沈下量に着目すると非液状化層の剛性低下率を1/10とした場合0.20~0.25程度となる。

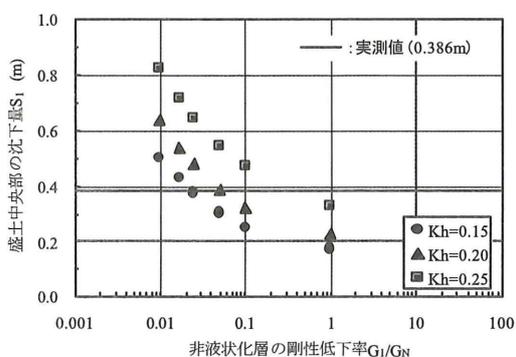


図-5 剛性低下率と盛土中央部沈下量の関係

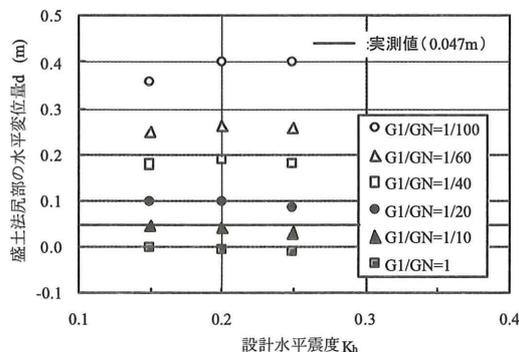


図-6 設計水平震度と法尻水平変位量の関係

### 3.3 補強盛土の解析条件

マットレスは、厚さ0.5mの碎石層を高強度ジオシンセティック (厚さ1.4mm) により上下2段巻きとする構造である。解析ではこのマットレス構造を一体化した梁要素でモデル化することとした。引張に対してはジオシンセティックのみが働くように、梁要素の弾性係数と断面積を表-3に示したジオシンセティックの仕様のみから設定した。一方、この梁要素の曲げ剛性EIは、弾性係数 $E=2.1 \times 10^5$  (kN/m<sup>2</sup>)の碎石による厚さ0.5mのマットレスの曲げ剛性 $EI(=E \cdot bh^3/12)$ と等価になるように、断面2次モーメントIを決定した。またジオシンセティックと土は十分な摩擦が得られると仮定して、ジョイント要素は考慮していない。

表-3 補強材の解析定数

要素タイプ	弾性係数 E kN/m <sup>2</sup>	断面積 A m <sup>2</sup>	断面2次モーメント I m <sup>4</sup>
BEAM	1300000	0.0028	1.7E-03

### 3.4 補強盛土の解析結果

解析値は表-4に示すとおり、概ね実測値と一致するものであった。補強効果を表す指標として、各着目点における補強時変位/無補強時変位を算出すると、盛土・法尻沈下量においては、解析値、実測値とも1.0程度と補強の効果は見られないものの、法尻水平変位においては、解析値で0.77、実測値で0.59と補強による変位の抑制効果を示す値が得られた。また、図-7に示すように補強

材に発生した張力は、解析値で11.1kN/m、実測値で14.6kN/mと概ね一致した値が得られた。

表-4 解析値と実測値の比

		盛土沈下量 S <sub>1</sub> m	法尻沈下量 S <sub>2</sub> m	法尻水平変位 d m
解析値	無補強時	0.379	0.187	0.039
	補強時	0.372	0.189	0.030
	補強時/無補強時	0.98	1.01	0.77
実測値	無補強時	0.385	0.150	0.047
	補強時	0.390	0.160	0.028
	補強時/無補強時	1.01	1.07	0.59

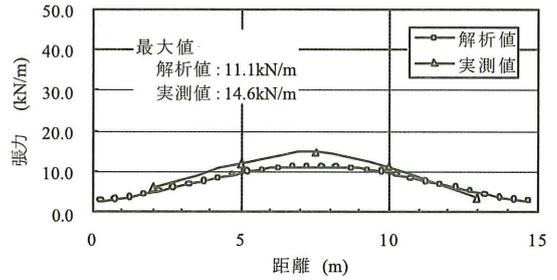


図-7 解析値と実測値の比

め

#### 4. 効果的補強効果のシミュレート

ジオシンセティックによる変位抑制効果が高くなる条件を抽出するため、パラメータスタディを実施した。検討パラメータは地下水位、盛土の高さ、及びジオシンセティックの弾性係数とした。いずれのケースも地下水位以下を液状化層として解析した。ここでは盛土法尻の補強時と無補強時の水平変位の比を補強効果として評価する。

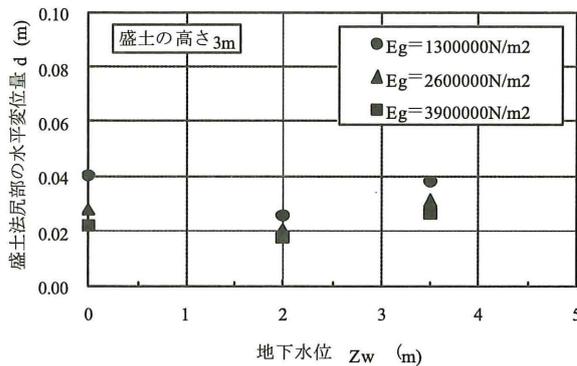


図-8 地下水位-法尻水平変位量 (H=3m)

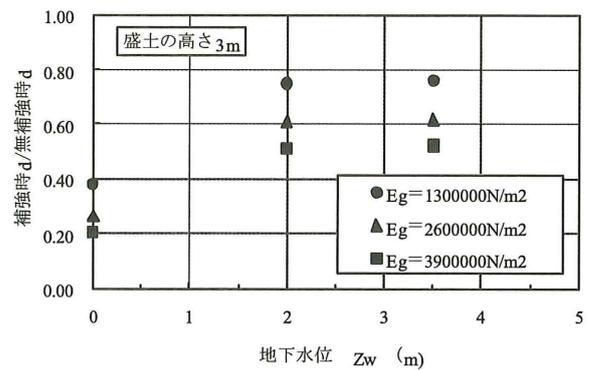


図-9 地下水位-補強時 d/無補強時 d (H=3m)

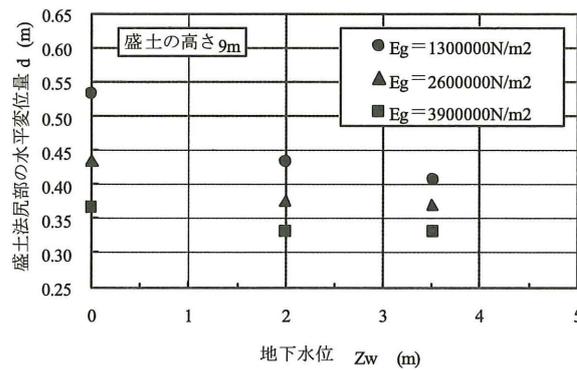


図-10 地下水位-法尻水平変位量 (H=9m)

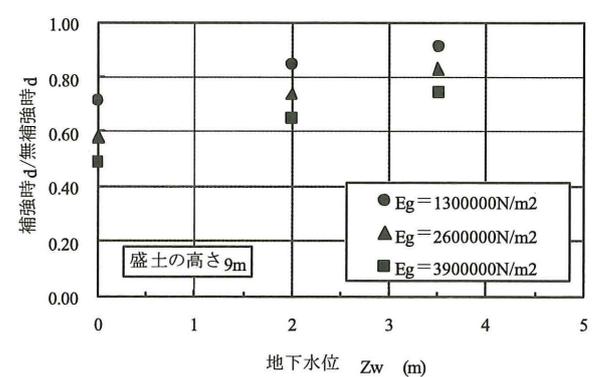


図-11 地下水位-補強時 d/無補強時 d (H=9m)

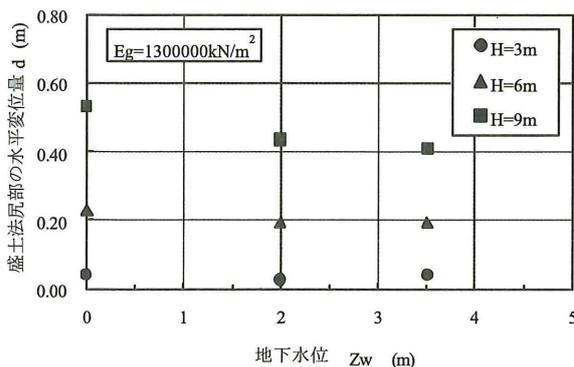


図-12 地下水位-法尻水平変位量

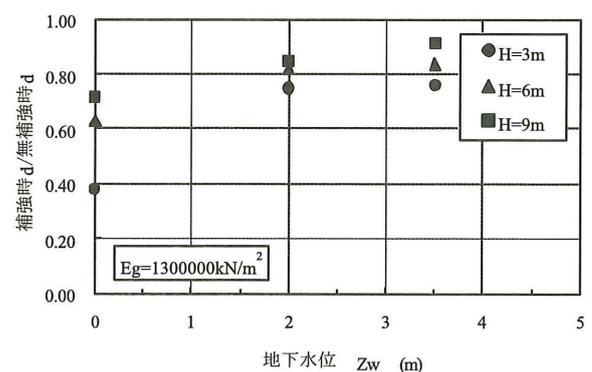


図-13 地下水位-補強時 d/無補強時 d

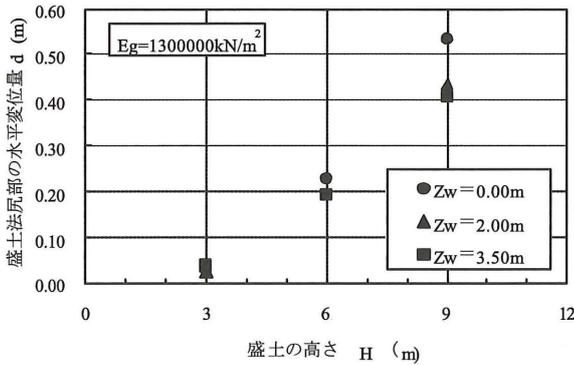


図-14 盛土の高さ-法尻水平変位量

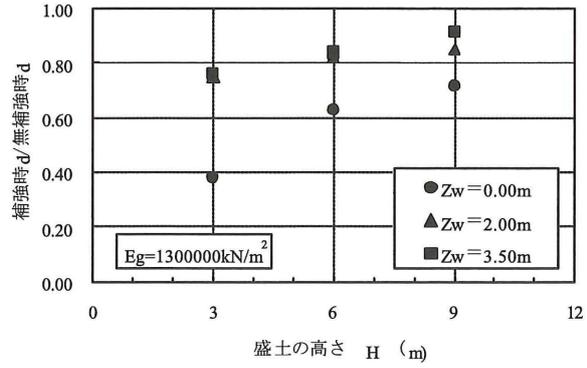


図-15 盛土の高さ-補強時 d / 無補強時 d

図-8～図-15に示した解析結果の主な傾向は以下のとおりである。

- ・ 地下水位が高いほど、盛土法尻の水平変位は大きく、補強時  $\delta$  / 無補強時  $\delta$  の値が小さくなり、補強効果が高くなる傾向にある。
- ・ ジオシンセティックの剛性が高いほど、盛土法尻の水平変位は小さく、補強効果が高くなる傾向にある。
- ・ 盛土高が高いほど、盛土法尻の水平変位は大きくなるが、補強効果は小さくなる傾向にある。

図-16に地盤中の水平変位分布図(盛土法尻直下)を示す。ジオシンセティックによる補強で盛土体の変形が抑制されたことにより、地盤中の側方流動による変形も低減されたことがわかる。

本検討の結果、ジオシンセティックによる補強の効果は、沈下に対してはほとんどみられないものの、水平変位に対しては地下水位が地表近くの高いケースにおいて、高い効果が得られる結果となった。また、ジオシンセティックの弾性係数を大きくすることで補強効果は向上し、盛土が高い場合には剛性の高いジオシンセティックによるマットレスが有効となることが示唆できる。

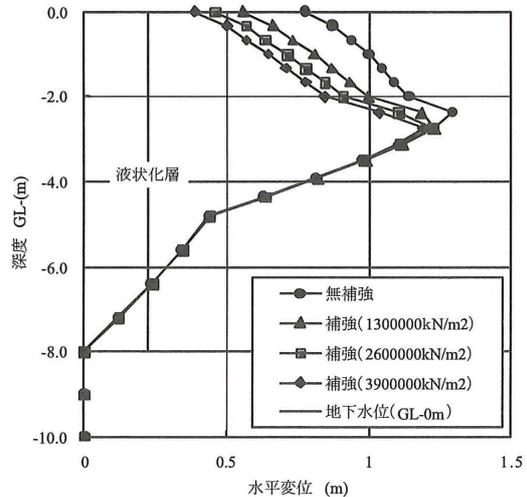


図-16 地盤中の水平変位分布

## 5. おわりに

実験においては、盛土底部をジオシンセティックにより補強することで、液状化時の盛土の水平変位を抑制できることを示唆する結果が得られた。液状化実験の観測結果に基づき、2次元液状化流動解析プログラムALIDで再現解析をおこなった結果、以下の結論が得られた。

- ・ 設計水平震度を0.20～0.25、非液状化層及び盛土のせん断剛性低下率を初期剛性の1/10とすることで実験における盛土の挙動を精度良く再現できた。
- ・ 法尻水平変位  $\delta$  は非液状化層及び盛土のせん断剛性低下率に大きく依存しており、再現解析の結果では非液状化層及び盛土の剛性低下率を初期剛性の1/10程度とすることで良い再現性が示された。

・高強度ジオシンセティックによるマットレスについては、ジオシンセティックを梁要素によりモデル化することで盛土の水平変位抑制効果を再現できることが示された。

また、高強度ジオシンセティックによるマットレスの補強効果がより高くなる条件を抽出するため、パラメータスタディを行った結果、以下のことが明らかとなった。

・地下水位が地表近くの高いケースにおいて、より高い補強効果が得られた。

・ジオシンセティックの弾性係数を大きくすることで補強効果は向上する結果が得られた。

以上のように、実験結果をもとに再現解析を行った結果、ジオシンセティックによる補強が特に有効ないくつかの条件が得られた。

今後の課題としては、模型実験等により、ジオシンセティック・マットレスによる盛土底部の補強が液状化時の流動変形に有効性であることを検証するとともに、設計における補強効果の定量的な評価手法を確立する必要がある。

## 参考文献

- 1) 松尾修・古関潤一・島津多賀夫・藤井照久・福田直三・田尻宣夫：液状化発生時のジオテキスタイル補強盛土の沈下低減効果に関する地震応答解析，ジオシンセティック論文集 第9巻，1994年，pp.38-46.
- 2) ALID研究会：2次元液状化流動解析プログラムALID/Winマニュアル，2007年.
- 3) 長尾和之・今吉英明・小浪岳治・川原秀樹：高強度帯状ジオシンセティックによる軟弱地盤上の盛土補強効果，ジオシンセティック論文集 第14巻，1999年，pp.20-25.
- 4) 小浪岳治・石崎英夫・大和田貴博・中澤博志・立野恵一：液状化地盤上の高強度ジオシンセティックを用いた補強盛土の挙動（その1），地盤工学研究発表会，2008年.
- 5) 大和田貴博・小浪岳治・石崎英夫・中澤博志：液状化地盤上の高強度ジオシンセティックを用いた補強盛土の挙動（その2），地盤工学研究発表会，2008年.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，2002.
- 7) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法，土木学会論文集，1999年，No.638/III-49，pp.71-89.
- 8) 石原研而・吉嶺充俊：Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes, Soils Foundations, 1992年，Vol.32 No.1.
- 9) 小浪岳治・大和田貴博・石崎英夫・中澤博志・立野恵一：高強度ジオシンセティックによる液状化地盤上の盛土の補強効果，ジオシンセティック論文集 第23巻，2008年.