

改良型ジオセルを引張り補強材として用いた 補強土擁壁の地震時安定性

米良有玄¹・HAN Xinye²・清田隆³・片桐俊彦⁴・原田道幸⁵

立体形状を有するジオセルについて、補強土擁壁内の引張り補強材としての機能に着目し、引抜き抵抗力を高めるため擁壁に対して垂直に縦材を配した改良型ジオセルを開発した。本研究では、改良型ジオセルで盛土が補強された擁壁の地震時安定性を振動台実験により検討した。実験では、改良型ジオセル補強土擁壁模型のほか、比較のためジオグリッドで補強された擁壁模型、及び無補強の擁壁模型を用いた。盛土材粒径の違いが盛土擁壁の補強効果に及ぼす影響を検証するため、実験では粒径の揃った砂と礫を盛土材として用いた。その結果、限られた実験条件での比較ではあるが、改良型ジオセルにより補強された擁壁は他の2種類の擁壁模型と比べ高い耐震性を示した。

キーワード：振動台実験，ジオセル，ジオグリッド，引張り補強材，補強土

1. はじめに

立体構造を有するジオセルは、セル内の盛土材料を拘束して安定化させることから、基礎地盤や路盤に対して鉛直支持力の向上を目的として使用されてきた¹⁾。また、近年では図-1のように積み重ねたジオセルを壁体として使用するケースも増加している。しかし、ジオセルの補強土擁壁内における引張り補強材としての機能を検討した研究例は限られている。

一方、ジオグリッド等の面状補強材は盛土内の引張り補強材として既に多く利用されている。剛な一体壁面工を有するジオグリッド補強土擁壁は強振動に対しても高い耐震性を示しており、1995年の兵庫県南部地震では鉄道盛土を支える従来型の無補強擁壁の多くが甚大な被害を受けたが、ジオグリッド補強土擁壁の被害は軽微なものに留まり比較的短時間で修復可能であった²⁾。しかし、ジオグリッドの目の開きよりも大きな盛土材との間では、ジオグリッドの特徴である噛み合わせ効果が低下してしまい、効果的に引抜き抵抗力を発揮できなくなる可能性が指摘されている³⁾。これに対しジオセルは立体構造を有しており開口も相当なので、その構造に起因するアンカー力を生かして大粒径の盛土にも対応できる引張り補強材として機能する可能性がある。

これまでの既往研究では土中引抜き試験を行い、従来型のジオセル(図-2a)オグリッド(Tensar-SS35)と比較して引抜き抵抗力は低く、延性的な強度変形特性

を持つことを示した^{3,4)}。これは従来型ジオセルの引抜き方向に対する剛性が低いことが原因であると考えられる。そこで、引抜き方向に対して縦材を直線に配した改良型ジオセル(図-2b)を開発し土中引抜き試験を行ったところ、従来型ジオセルと比べ引抜き抵抗力は大きく増加した。また、ジオグリッドと比較した場合、特に大粒径の盛土材を用いた場合ではジオグリッド以上の引抜き抵抗力を示した⁴⁾。

本研究では補強盛土における引張り補強材として改良型ジオセルの適用可能性を探るため、背面盛土を改良型ジオセルで補強した擁壁と、2種類のジオグリッドで補強した擁壁、及び比較対象として無補強T型擁壁の地震時安定性を粒径の異なる2種類の盛土材を用いて振動台実験により検討した。



図-1 ジオセルの施工事例

¹2学生会員，東京大学大学院社会基盤学専攻

³正会員，東京大学生産技術研究所，准教授

⁴非会員，東京大学生産技術研究所，技術職員

⁵非会員，東京インキ株式会社加工品営業本部生産技術部

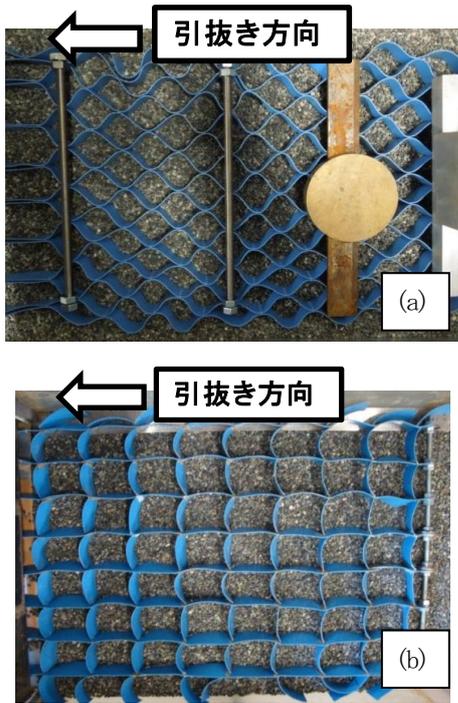


図-2 a)従来型ジオセル模型 b)改良型ジオセル模型

2. 実験概要

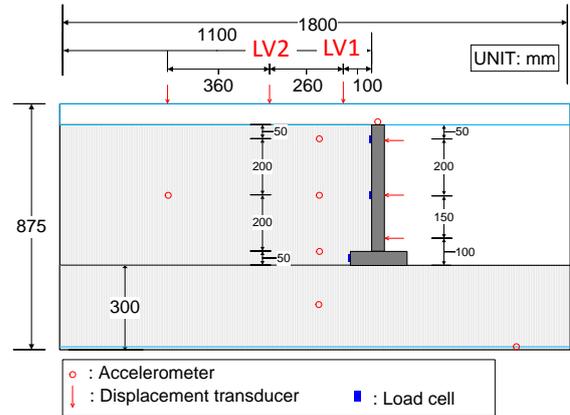
(1) 振動台実験の概要

図-3に実施した振動台模型実験の断面図を示す。振動台に設置した平面ひずみ土槽（幅1800mm×高さ875mm×奥行400mm）の内部に厚さ300mmの支持地盤を作製し、その上に長さの相似則1/10を想定した各擁壁模型を設置した。擁壁壁面及び底面の盛土との接触面にはサンドペーパー（#150）を貼り付け十分に粗くした。背面盛土には珪砂7号（ $D_{50}=0.25\text{mm}$; $U_c=2.2$ ）及び五分礫（ $D_{50}=14.2\text{mm}$; $U_c=1.44$ ）を用いた。珪砂7号に関しては、気中落下法により相対密度約90%となるよう作製した。五分礫に関しては、盛土地盤を7層に分け、層ごとに締め固め度約100%になるよう締め固めた。盛土には散弾を用いて1kPaの上載圧を作用させた。図-3に示すように、レーザー変位計、接触式軸変位計（LV）、加速度計を設置し、擁壁の水平変位、背面盛土の沈下量、所定の位置における加速度を測定した。加振は正弦波5Hzの計20波を一段階とする100galずつの多段階加振とした（図-4）。

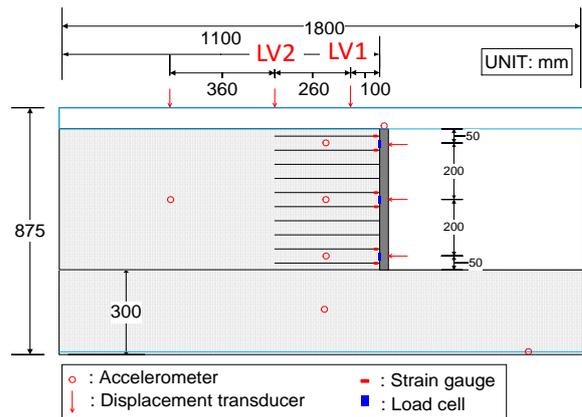
(2) 使用補強材概要

盛土の補強に用いた改良型ジオセル模型はポリエステル、表面樹脂はポリ塩化ビニルである。厚さは1mmであり、横材の高さは $H=25\text{mm}$ である。全体の長さは360mmであり、奥行350mmである。このジオセル模型を背面盛土内部に10層にわたり等間隔で敷設した。ジオセル模型と擁壁壁面とはクランプを用いて定着させている。

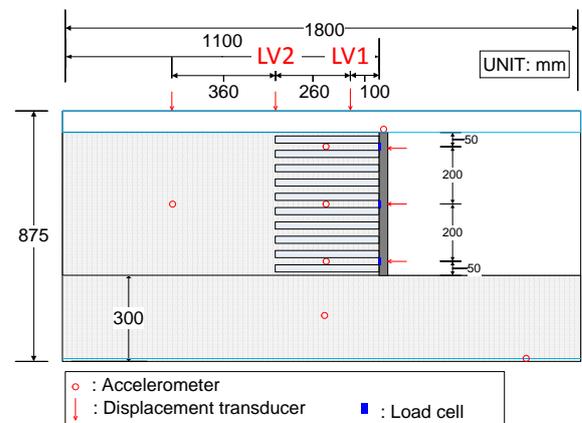
ジオグリッド補強材模型はストランドの厚さ0.2mm×幅3mmのリン青銅性ストリップに直径1mmのリン青銅製針金のリブを半田付けし、長さ360mm×奥行350mmの格子状にしたもの（ジオグリッドA）と、KTG-4000（太陽工業製）（ジオグリッドB）を用いた。格子の形はジオグリッドAが1辺35mm、Bが1辺9mmの正方形である。ジオグリッドAは表面に接着剤で珪砂7号を塗布して摩擦力を増加させた。使用した補強材を図-5に示す。また実験ケースを表-1に示す。



T型無補強擁壁模型



ジオグリッドA,B補強土擁壁模型



改良型ジオセル補強土擁壁模型

図-3 各擁壁模型の断面図

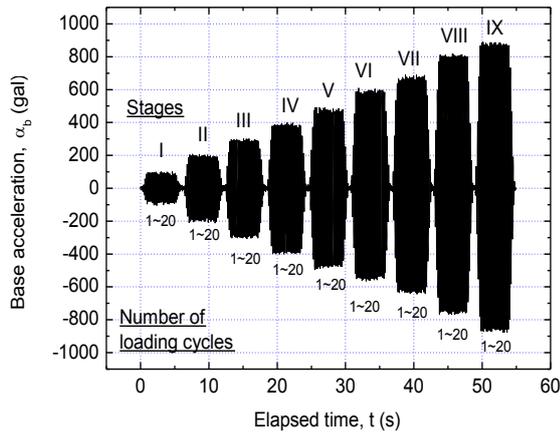


図-4 加振波形の例

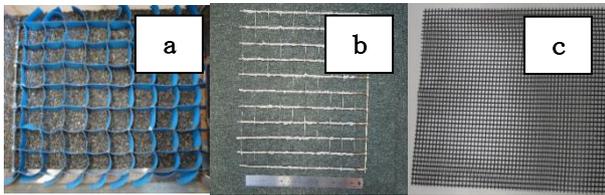


図-5 a) ジオセルと b) ジオグリッド A c) ジオグリッド B

表-1 実験ケース一覧

試験番号	擁壁模型	地盤材料
T-S	無補強 T 型擁壁	珪砂 7 号
T-G	無補強 T 型擁壁	五分礫
GA-S	ジオグリッド A 補強土擁壁	珪砂 7 号
GA-G	ジオグリッド A 補強土擁壁	五分礫
GB-G	ジオグリッド B 補強土擁壁	五分礫
C-S	改良型ジオセル補強土擁壁	珪砂 7 号
C-G	改良型ジオセル補強土擁壁	五分礫

3. 結果及び考察

ここでは盛土を改良型ジオセルで補強した擁壁とジオグリッドで補強した擁壁、無補強 T 型擁壁の振動台実験結果を比較し、各擁壁の地震時安定性について概説する。

(1) 各擁壁の破壊状況及び破壊加速度

図-6、図-7に各ケースの大変形に至った最終段階時の状況、及びその際の振動台加速度を示す。

a) 盛土に珪砂 7 号を用いた場合

無補強 T 型擁壁は最大振動台加速度が 488gal, ジオグリッド補強土擁壁は 790gal, 改良型ジオセル補強土擁壁は 877gal で大変形に至った。無補強 T 型擁壁では、擁壁のつま先部分で支持力破壊が生じ、大きく転倒してい

ることがわかる。すべり面は擁壁背面の底部から地表面にかけて発生した。ジオグリッドとジオセルの補強土擁壁では、擁壁と背面盛土の補強領域が一体となってせん断変形し、その背後からすべり面が発生した。このような補強領域の変形モードは、渡辺の既往研究でも確認されている⁵⁾。

b) 盛土に五分礫を用いた場合

無補強 T 型擁壁は 427gal, ジオグリッド A 補強土擁壁は 800gal, ジオグリッド B 補強土擁壁は 713gal, 改良型ジオセル補強土擁壁は 902gal で大変形に至った。無補強 T 型擁壁では、盛土に珪砂 7 号を用いた場合と比較して支持力破壊は発生せず、背面盛土に押し出される滑動モードで大きく変形した。すべり面は珪砂 7 号を用いた場合と同じく、無補強 T 型擁壁では擁壁背面の底部から地表面にかけて、各補強土擁壁では補強領域の背後から地表面にかけて発生した。

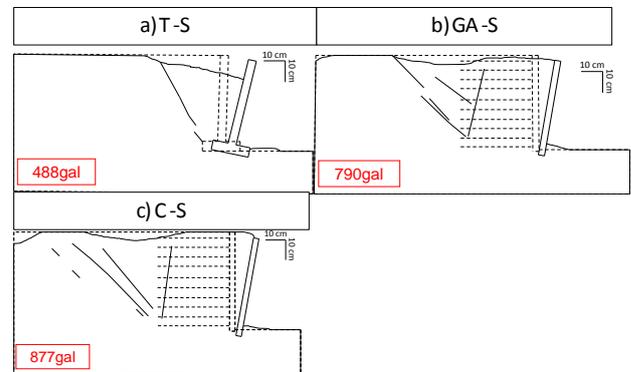


図-6 実験後の模型の破壊状況 (珪砂 7 号) a) 無補強 T 型擁壁 b) ジオグリッド A 補強土擁壁 c) 改良型ジオセル補強土擁壁

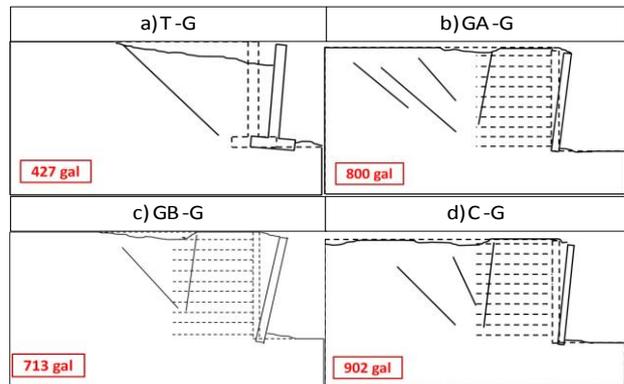


図-7 実験後の模型の破壊状況 (五分礫) a) 無補強 T 型擁壁 b) ジオグリッド A 補強土擁壁 c) ジオグリッド B 補強土擁壁 d) 改良型ジオセル補強土擁壁

図-8に各実験ケースにおける水平移動によって生じた変位と、擁壁の転倒によって生じた変位の関係図を示す。この図より T 型無補強擁壁の主要な破壊モードは滑動であるのに対し、各無補強擁壁はあまり滑動せず、転倒モードが支配的となっていることが分かる。また、T 型無補強擁壁に関して比較すると、地盤材料に五分礫を用いたケースの方は支持力破壊が生じず、大きく水平

移動している。一方、地盤材料に珪砂7号を用いたケースでは比較的早い段階で擁壁つま先部において支持力破壊が生じた結果、水平移動量は抑制されている。このことから擁壁の安定性には転倒に対する安定性と支持地盤の支持力に対する安定性を同時に考慮する必要がある⁵⁾。

(2) 各擁壁の加振時の挙動

図-9、図-10に各擁壁の水平移動量 d_s 、転倒角 θ 、及び擁壁から 360mm 地点における背面盛土沈下比 S/H と振動台加速度 α_b の関係を示す。各値は各加振段階後の残留値であり、振動台加速度は各段階加振における最大値を用いた。これらの図より、T型無補強擁壁は一旦変位が始まると変位は急速に進展している。一方で、各補強土擁壁は高い振動台加速度でも変位は急速に進行せず、大きな変形性能を示していることがわかる。

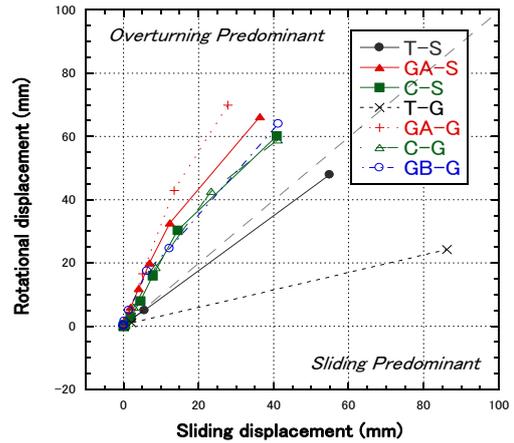


図-8 各擁壁の水平移動量と転倒移動量の関係

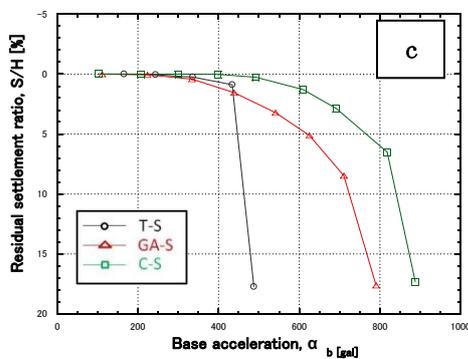
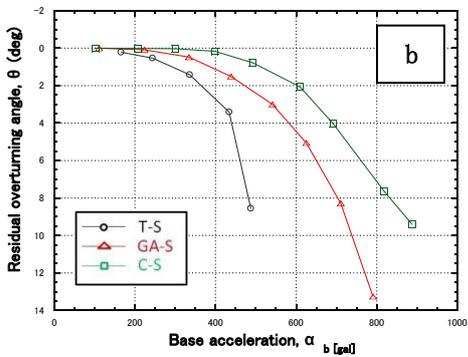
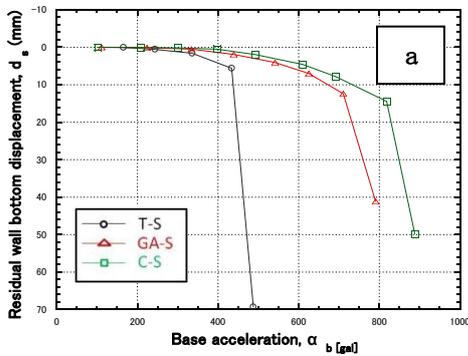


図-9 盛土に珪砂7号を用いた場合の振動台加速度 α_b と a) 擁壁底面水平移動量 d_s b) 擁壁の転倒角 θ c) 背面盛土沈下量 S/H の関係

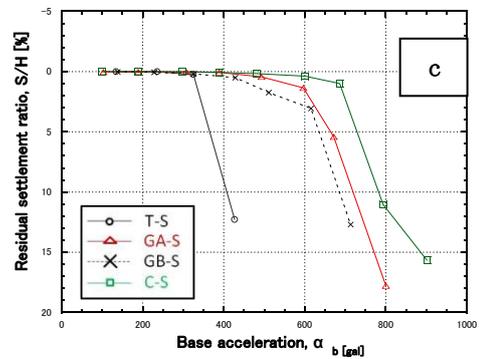
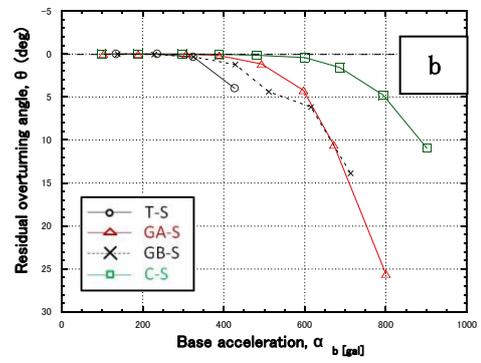
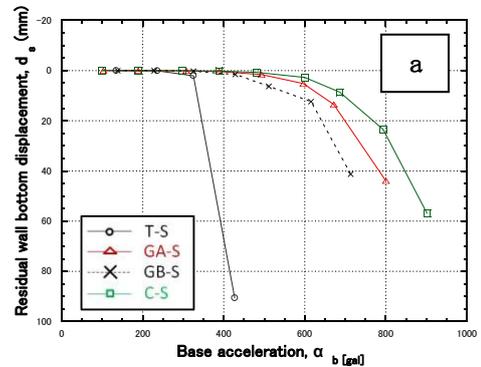


図-10 盛土に五分礫を用いた場合の振動台加速度 α_b と a) 擁壁底面水平移動量 d_s b) 擁壁の転倒角 θ c) 背面盛土沈下量 S/H の関係

この傾向は渡辺, 古関ら^{2,5)}によって行われた既往の振動台実験においても確認されており, 背面盛土からの土圧によって擁壁に作用する転倒モーメントに対する, 各擁壁の抵抗メカニズムの違いに起因するものと考えられる。また盛土に五分礫を用いた実験結果でも同様の結果を示している。また, ジオセルで補強された擁壁は各ジオグリッドで補強された擁壁よりも若干高い耐震性を示していることがわかる。これらの結果からジオセルは様々な粒径の盛土において擁壁の引張り補強材として効果的である可能性がある。

図-9a では, 各ジオグリッドで補強された擁壁とジオセルで補強された擁壁の底面の水平変位量 d_s にあまり差は見られない。一方, 図-9b の転倒角 θ については, ジオセルの方が大きくなるのが遅い。これは, ジオグリッドの方がより低い振動台加速度において背面盛土から引抜けている可能性を示唆している。図-10a, b より, 背面盛土が五分礫の場合, この傾向はさらに大きくなっていることがわかる。これは, 盛土材の粒径が大きい場合でもジオセルはその立体形状に起因する高い引抜き抵抗力を発揮できることを示唆している。ジオグリ

ッドA, Bで補強された擁壁を比較すると, ジオグリッドBで補強された擁壁の方がより小さい加速度で変位, 転倒が始まっている。この結果より, 盛土材粒径に対して小さい目合いのジオグリッドでは, 盛土材と補強材との噛み合わせ効果が低下してしまい, 効果的に耐震性を発揮できなくなる可能性が考えられる。

参考までに, 振動台実験で用いたものと同じジオグリッドと改良型ジオセルを珪砂7号と五分礫から引抜いた土中引抜き試験結果を図-11に示す。引抜き方向の変位は水平変位計を用いて土層左端から60mmの地点で計測している。実験装置, 実験方法の詳細については参考文献⁴⁾を参照されたい。限られた実験条件での比較ではあるが, 改良型ジオセルは盛土地盤材料の粒径によらず高い引抜き抵抗力を示している。盛土材に五分礫を用いた試験では, 各補強材の引抜き抵抗力和振動台実験における耐震性の関係は一致している。また, ジオグリッドA及び改良型ジオセルについては, 盛土材に五分礫を用いた方が, 珪砂の場合よりも高い引抜き抵抗を示したが, 振動台実験でもこの関係が反映された結果が得られている。

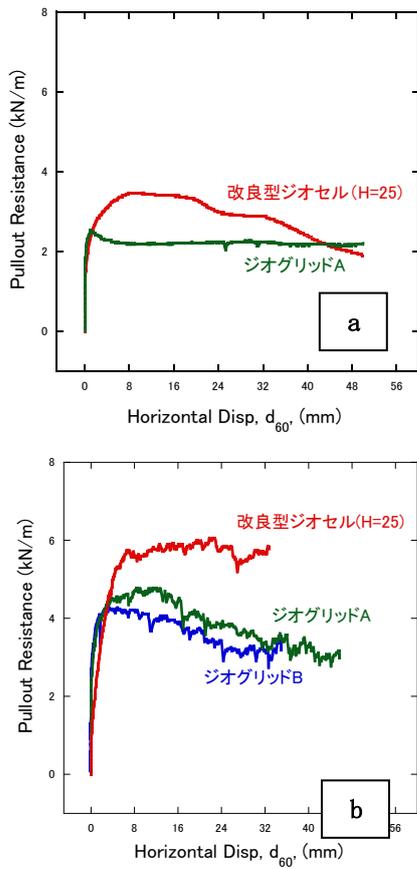


図-11 改良型ジオセルとジオグリッドの土中引抜き試験結果 a) 珪砂7号 b) 五分礫

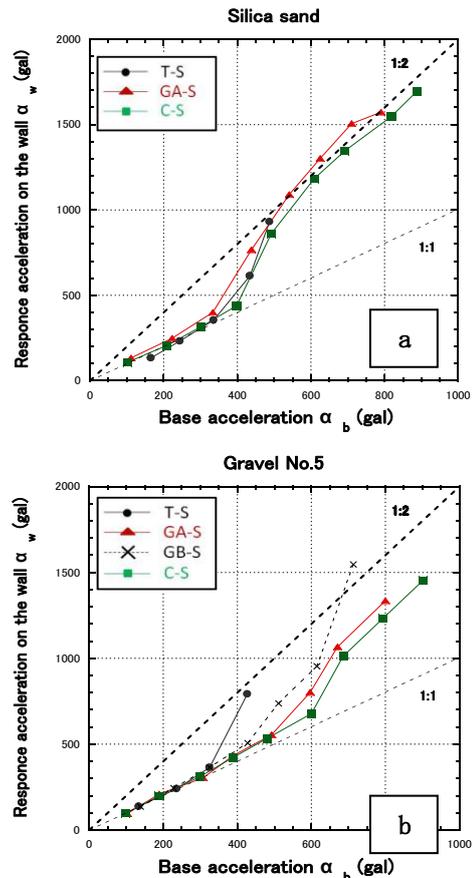


図-12 振動台加速度と擁壁応答加速度の関係 a) 珪砂7号 b) 五分礫

(3) 各擁壁の応答加速度

図-12に擁壁上端で計測された応答加速度と振動台加速度の関係を示す。入力加速度が増加すると、それに対する擁壁応答加速度の比が次第に増加している。これは盛土上部の補強材が擁壁から慣性力を受け、次第に補強材が引抜けていることを示している⁹⁾。盛土上部の補強材が引抜け始めると、擁壁が下端を中心として回転しやすくなり、擁壁上端が主動方向へ大きく変位して崩壊に至る。

盛土に珪砂7号を用いた場合、約400galを境に全てのケースにおいて応答加速度の比は増加し、最終的に約2倍まで増加した。各補強土擁壁が応答加速度の比が上昇しながら高い耐震性を示したのは、引抜きが始まった後も補強材が高い残留引抜き抵抗を示していたからであると考えられる。一方、盛土に五分礫を用いた場合、砂のケースと比較して各補強土擁壁の応答加速度の増加率は抑制されている。これは、盛土上部の補強材が引抜け始めた後に生じる擁壁下端を中心とした回転運動に対して、擁壁上部に連結された各補強材が引張り抵抗力を効果的に発揮しているためと考えられる。また、一般的に変形に伴う剛性が小さいほど応答加速度の増加は早くなるが、補強材が配置されていることにより、補強領域内の剛性が高く保たれていることも一因であると考えられる。ジオグリッドBで補強された擁壁はジオグリッドA、及びジオセルで補強された擁壁よりも応答加速度の増加率の上昇が若干速かった。これは、前述した噛み合わせ効果の低下により比較的小さい加速度で引抜きが始まっていることを示唆している。各補強土擁壁について比較すると若干ではあるが、改良型ジオセルで補強された擁壁の方が、擁壁応答加速度の増加する割合は抑制されていることが分かった。

4. まとめ

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 盛土を改良型ジオセルで補強した擁壁の地震時安定性は、無補強T型擁壁よりも相当高く、ジオグリッド補強土擁壁よりも若干高い。このことは、盛土の改良型ジオセルにより補強することで耐震化が可能であることを示している。
- 2) 改良型ジオセルで補強された擁壁の転倒角はジオグリッドで補強された擁壁の転倒角と比べて大きく抑制されている。このことは、改良型ジオセルの方がより効果的に引抜き抵抗力を発揮している可能性を示唆している。
- 3) 大粒径の盛土材を用いた方が、擁壁の応答加速度の増加率は低い。これは、各補強材がより効果的に引抜き抵抗力を発揮していること、及び大粒径の盛土材の方が変形に伴う剛性の低下率が低いことが要因であると考えられる。
- 4) 盛土材粒径に対して小さい目合いのジオグリッドでは、盛土材と補強材との噛み合わせ効果が低下して

しまい、効果的に耐震性を発揮できなくなる可能性がある。

5. 参考文献

- 1) 例えば、安食貴章・奥山道明・矢澤一樹・金子賢治・堀江征信・熊谷浩二：ジオセル補強地盤の支持力特性，ジオシンセティックス論文集，Vo.22, pp. 227-232, 2007.
- 2) 古関潤一・加藤範久・渡辺健治・館山勝：補強土擁壁と重力式擁壁の地震時変位量の簡易計算手法，ジオシンセティックス論文集，Vo.18, pp. 367-374, 2003.
- 3) 黒田哲也・相馬亮一・Munoz, H.・太田準一郎・清田隆・原田道幸・龍岡文夫：盛土をジオセル補強した一体橋梁の地震時安定性，ジオシンセティックス論文集，Vo.25, pp. 147-152, 2010.
- 4) Xinye HAN, 清田隆, 米良有玄, 原田道幸, 龍岡文夫：改良型ジオセルの礫盛土からの引抜き特性に関する研究，ジオシンセティックス論文集，Vo.28, pp. 199-206, 2013.
- 5) 渡辺健治・古関潤一・館山勝・小島謙一：補強土擁壁の地震時安定性に関する傾斜・振動台実験（その2），ジオシンセティックス論文集，Vo.15, pp. 254-263, 2000.
- 6) 相馬亮一・龍岡文夫・平川大貴・野尻峯広・相澤宏幸・錦織大樹・渡辺健治・清田隆：盛土をジオグリッド補強したインテグラルブリッジの常時及び耐震性能に及ぼす構造諸条件の影響，ジオシンセティックス論文集，Vo.24, pp.211-218, 2009.

Seismic stability of geosynthetics-reinforced soil retaining wall with a new-type of geocell embedded in sandy and gravelly backfills

Tomoharu MERA, Xinye HAN, Takashi KIYOTA, Toshihiko KATAGIRI, Michiyuki HARATA

For the last two decades, geosynthetic-reinforced soil retaining walls (GRS RWs) have been constructed for important facilities such as railways and highways. In order to achieve greater seismic performance, a new-type of geocell which have three dimensional structures, having straight longitudinal members with transversal members was developed. In this paper, in order to investigate the seismic stability of the new-type of geocell reinforced retaining, a series of shaking table model tests was carried out by using the new-type geocell and geogrids as tensile-reinforcement in the sandy and gravelly backfills. Furthermore, an unreinforced retaining wall (T-shape) model was also tested for comparison. It was found that new-type geocell reinforced soil retaining wall model exhibited higher seismic performance than both geogrid reinforced soil retaining wall model and unreinforced retaining wall model.

KEYWORDS: Geocell, Geogrid, Retaining wall, shaking table test