

砕石とジオシンセティックスを併用した 新設および既設の道路盛土の 液状化時変形抑制工法に関する模型振動実験

吉田 雅穂¹・勝見 大雅²・井波 航大³・川崎 始⁴・橋本 涼⁵

¹正会員 福井工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

E-mail: masaho@fukui-nct.ac.jp

²福井工業高等専門学校 専攻科環境システム工学専攻 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

E-mail: a20202tk@fukui.kosen-ac.jp

³信越化学工業株式会社 第3製造部 (〒915-8515 福井県越前市北府 2-1-5)

⁴正会員 エターナルプレザーブ株式会社 (〒113-0034 東京都文京区湯島 2-10-10 ESS ビル 3F)

E-mail: hajime-kawasaki@etp21.co.jp

⁵正会員 エターナルプレザーブ株式会社 (〒113-0034 東京都文京区湯島 2-10-10 ESS ビル 3F)

E-mail: ryo-hashimoto@etp21.co.jp

地震時の液状化に起因する道路盛土の沈下や側方流動は路面の亀裂や段差などを発生させ、地震後の車両通行に障害をもたらす。救急救命活動や応急復旧作業に多大な影響を与える。本研究は液状化時の盛土の変形抑制を目的として、高強度のジオシンセティックスを透水性の高い砕石で挟み込んだ改良体を用いた工法について、その有効性を 1G 場模型振動実験で検討した。提案する工法は、新設盛土の場合は改良体を盛土全体の直下に設置し、既設盛土の場合は改良体を法面直下のみに設置して法面上にふとん籠等の押え盛土を設置するものである。実験の結果、改良体による過剰間隙水圧の抑制と地盤の剛性向上、また、押え盛土による側方流動抑制の各効果を確認し、その効果が盛土の変形を抑制し、天端の平坦性を維持することを明らかにした。

Key Words: earthquake, lipuefaction, embankment, gravel, geosynthetics, shaking table test

1. はじめに

地震によって道路盛土の基礎地盤が液状化すると盛土の沈下や側方流動が発生し、それによって天端にある路面の段差や亀裂などが生じる。その結果、地震後の車両通行に障害が発生し、救急救命活動や応急復旧作業に多大な影響を与える。図-1 は 2016 年熊本地震における九州自動車道の益城熊本空港 IC と嘉島 JCT 間の道路盛土の崩壊を示したものであり、法面が長さ 30m にわたって側方流動して路面にひび割れや段差が発生し、同区間は 12 日間の通行止めとなった¹⁾。この被災地点の直下は小川を埋め立てた所であり、近くの秋津川周辺では多数の噴砂が確認されていることから、液状化が被害要因の一つと推測できる。

新設の道路盛土の液状化対策の一つとして、図-2 に示すように引張補強材であるジオシンセティックスを透



図-1 九州自動車道の道路盛土被害¹⁾

水性の高い砕石層に挟み込んだ改良体を盛土直下の基礎地盤に設置し、砕石によって過剰間隙水圧を早期に消散させ、さらに改良体の剛性によって直上の盛土変形を抑制する工法が提案されている²⁾。本工法は液状化の発生は許容するが、盛土の沈下や側方流動などの変形を道路の修復限界以内に抑制することで、道路機能を確保する

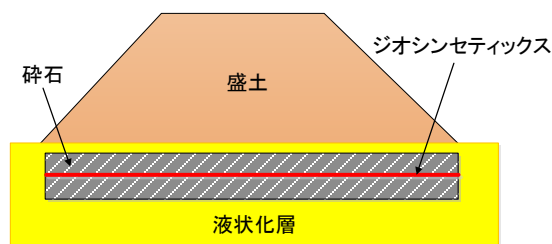


図-2 新設盛土の対策概要

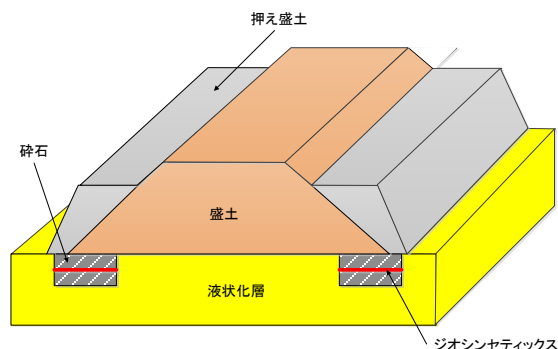


図-3 既設盛土の対策概要

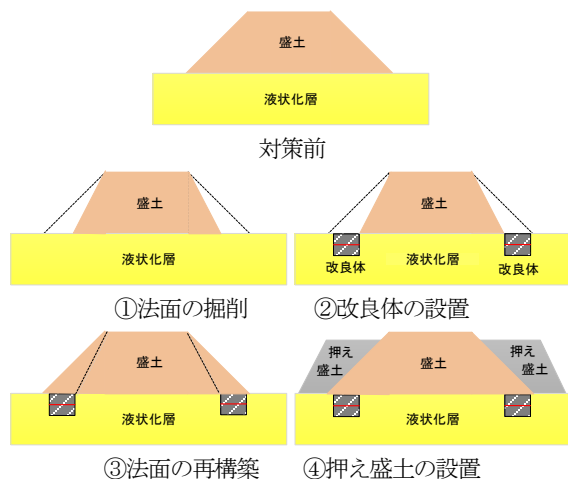


図-4 既設盛土の対策工法施工手順

ことを目的としている。本工法は深部の地盤改良を必要とせず、砕石やジオシンセティックスの設置で特殊な機械を使用しないため、経済性や施工性で他工法と比較して優位な点がある。これまで、新設盛土を対象として遠心場模型振動実験や数値解析²⁾、1G 場模型振動実験³⁾によりその有効性が確認されているが、より経済的かつ効果的な工法とするため砕石やジオシンセティックスの量や配置についてさらに検討する必要がある。

一方、既設の道路盛土の場合は、前述のように盛土直下に改良体を設置することが困難であるため、図-3 に示す新たな対策工法を考案した。その原理は新設盛土の対策を応用したものであり、盛土法面の直下にジオシンセティックスを砕石層に挟み込んだ改良体を設置することで地盤剛性の向上と過剰間隙水圧の早期消散を期待する。さらに、ふとん籠等の押え盛土を法面に設置して盛

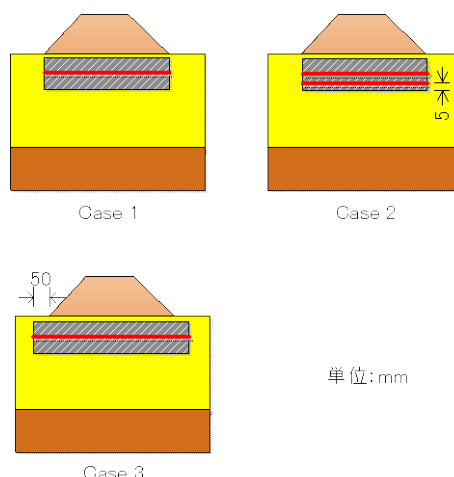


図-5 実験ケース

土の側方変形を抑制し、最終的に盛土天端の平坦性を維持するものである。図-4 にその施工手順を示す。まず、①盛土の安定性を確認しながら法面の一部を掘削し、②その下部地盤にジオシンセティックスを砕石層で挟み込んだ改良体を設置する。その後、③法面を再構築し、④その法面にふとん籠等の押え盛土を設置する。

本研究では道路盛土の液状化時変形抑制を目的として、前述の新設ならびに既設の場合の対策工法を模擬した地盤を用いた 1G 場における振動実験を実施し、本工法の有効性を検討した。

2. 新設の道路盛土に関する模型振動実験

(1) 概説

本章では新設の道路盛土の対策を対象として、図-5 に示す砕石とジオシンセティックスの量と配置を変えた 3 ケースの模型地盤を用いて振動実験を行った。ここで、基本ケースである Case1 は盛土と同じ幅の砕石層の中間にジオシンセティックス 1 枚を設置しており、既往研究³⁾と同一条件である。Case2 は砕石層の中間と下面から 5mm 上方にジオシンセティックスを計 2 枚設置し、ジオシンセティックスによる剛性向上の効果を検討した。Case3 は改良体の幅を左右 50mm ずつ広くして法面直下地盤の剛性向上の影響を検討した。

(2) 実験概要

図-6 に Case1 の模型地盤の概要を示す。振動台上にアクリル製の土層（幅 1200mm×奥行 400mm×高さ 500mm）を設置し、その中に模型地盤を作成した。実験砂は珪砂 7 号（密度 2.66 g/cm^3 、平均粒径 0.17 mm 、透水係数 $4.79 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ）であり、まず、水中落下法で作製した相対密度約 50%の緩詰め飽和砂層を、振動数 5Hz、最大

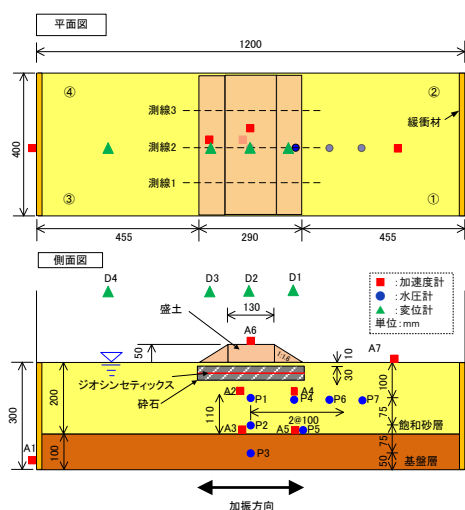


図-6 模型地盤の概要 (Case 1)

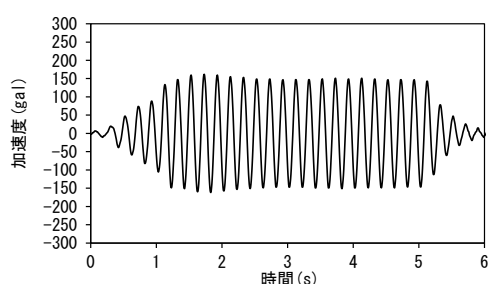


図-7 入力加速度の時刻歴 (A1)

加速度 100gal, 加振時間 30 秒の正弦波で加振し, 相対密度約 90%の基盤層 100mm を作製した. つぎに, その上層に同様な方法で相対密度約 60%の緩詰め飽和砂層 200mm を作製した. 模型地盤の厚さは合計 300mm であり, 地下水位は地表面と一致している.

改良層模型に用いる材料は, 砕石 7 号 (密度 2.72 g/cm³, 平均粒径 3.55 mm, 透水係数 10.9 cm/s) と幅 2mm で厚さ約 50 μ m のポリエチレン製シートを 1mm 間隔で格子状に組んだジオシンセティックス模型 (伸び剛性 60 kN/m) である. 改良体の作製方法は, 模型地盤の層厚が 250mm になった時に地表水を除去し, Case 1 の場合は塩化ビニル製の型枠 (幅 390mm $\times$ 奥行 390mm, 高さ 40mm) を地盤中央に設置し, その中にまず厚さ 15mm の砕石層を設置し, その上部に砕石層と同寸法のジオシンセティックス模型, さらにその上に 15mm の砕石層を設置し, その後水中落打法で 290mm まで飽和砂層を作製して砕石層を安定させて, 最後に型枠を除去した. また, 盛土模型を飽和砂層上で安定化させるために改良層上部にさらに 10mm の飽和砂層を設けた. 盛土模型は昭和ケミカル製の DL クレイに信越化学工業製のシリコンオイルを質量比 22%で混合した土を使用し, 型枠に入

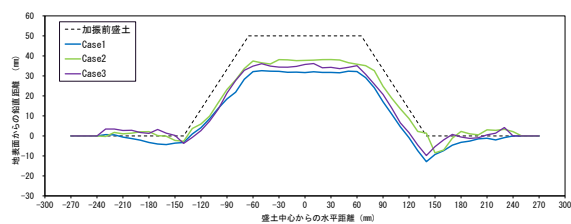


図-8 盛土の形状

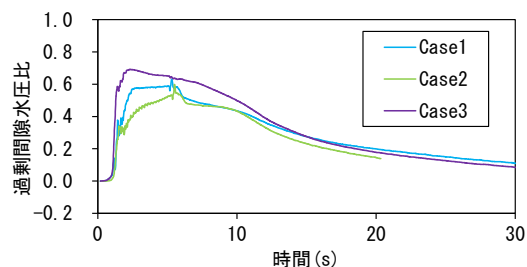


図-9 過剰間隙水圧比の時刻歴 (P1)

れて目標単位体積重量 15kN/m³になるよう突き固めて整形し, 振動実験直前に飽和砂層上に乱れないように静置した. その目標寸法は高さ 50mm, 天端幅 130mm, 法尻幅 290mm (実物寸法の高さ 4m, 天端幅 10m, 法尻幅 22m の 75 分の 1 を想定) である.

入力波は図-7 に示す振動数 5Hz, 目標最大加速度 140gal, 加振時間 6 秒の正弦波である. 実験中は入力加速度 (A1), 地盤の応答加速度 (A2 $\sim$ A7) と過剰間隙水圧 (P1 $\sim$ P7), 地盤の鉛直方向変位量 (D1 $\sim$ D4) を計測した. また, 盛土の 3 測線において基準点から 1cm ごとにポイントゲージを用いて加振後の盛土の鉛直変位量を計測した.

(3) 実験結果および考察

図-8 に加振後の盛土の形状を示す. ここで, 縦軸は加振前の砂地盤表面を原点とした時の相対高であり, 盛土の変形による影響範囲外にある 4 箇所 (図-6 の① $\sim$ ④) の地盤沈下量の平均値を差し引いており, 横軸の 2.5 倍の尺度となっている. 基本ケースである Case1 に対して最も沈下を抑制したのは Case2 であった. 改良体の幅と砕石量は同じであるため, ジオシンセティックスを 2 枚に増やして下部に設置したことで, 改良体の曲げ剛性が向上した効果と考えられる. Case3 は Case1 と比較すると沈下を抑制しているが, Case2 より劣った原因としては, 砕石量が多いため自重が大きく揺すり込み沈下の影響が生じたためと考えられる. 天端の平坦性については, 全ケースで多少の不同沈下があるものの大きな凹凸が生じることはなかった.

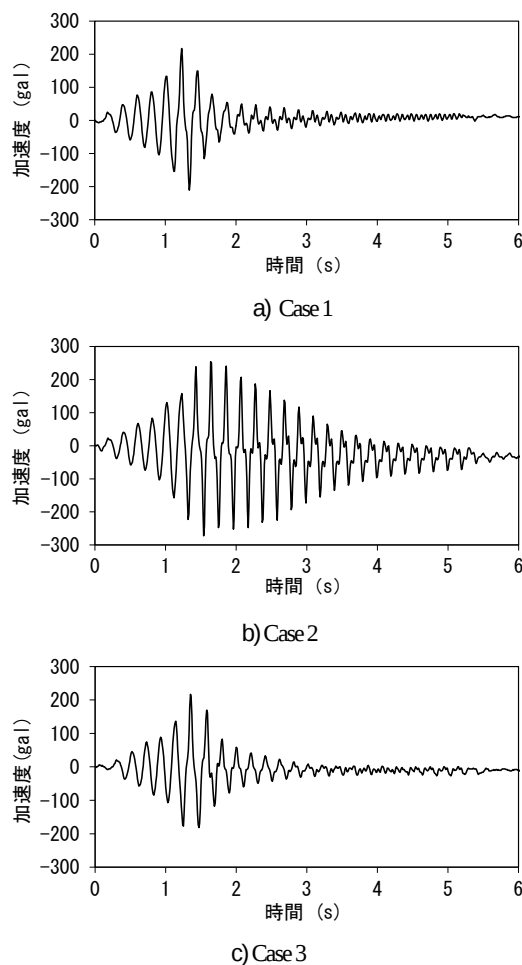


図-10 盛土の応答加速度 (A6)

図-9は盛土直下の地表面から100mmの位置における過剰間隙水圧比(P1)の時刻歴であり、移動平均法により平滑化してある。なお、Case2の加振20秒以降は計測器の不調によりデータが欠如している。3ケースを比較すると、過剰間隙水圧比を最も抑制したのはCase2であった。Case2の碎石量はCase1と同じであるため透水性能は同等であるが、下部のジオシンセティックスが砂の混入による目詰まりを防ぎ、さらに、2枚のジオシンセティックスによる剛性向上が、周辺地盤の軟化による碎石層のはらみ等の変形を防いだことが透水性能向上に寄与したと考えられる。Case3は前述の揺すり込み沈下の影響で水圧が一気に上昇したが加振の終了した6秒後は他ケースより多い碎石量の影響で速やかに水圧が消散した。

図-10に盛土天端の応答加速度(A6)の時刻歴を示す。Case1とCase3は共に加振から約1.5秒以降に地盤が軟化して応答が減衰している。一方、Case2では減衰することなく軟化が抑制されている。これは、前述のCase2が最も過剰間隙水圧を抑制し、沈下量を低減したことで調和的である。

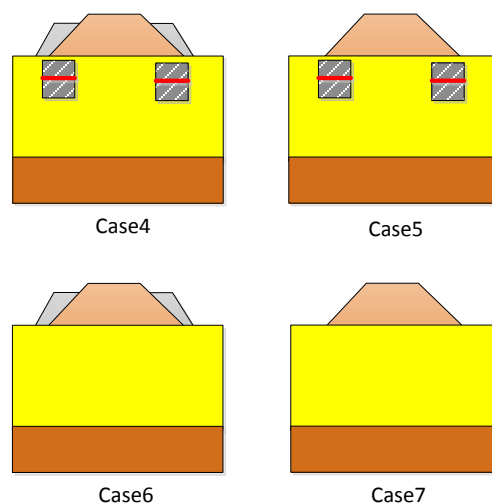


図-11 実験ケース

3. 既設の道路盛土に関する模型振動実験

(1) 概説

前章では、新設の道路盛土を対象とした実験を行い、碎石層に挟み込むジオシンセティックスの枚数を増やすことで改良体の剛性と透水性が向上し、盛土の変形が抑制されることを明らかにした。本章はこの改良体を既設盛土の対策に応用するものである。しかし、既に盛土が構築されているため盛土直下に改良体を設置できないため、図-11のCase4に示すように法面直下にのみに設置することで周辺地盤の剛性を向上し、また、過剰間隙水圧を早期に消散させ、さらに、ふとん籠等の押え盛土を法面に設置することで盛土の側方変位を抑制することを目的としている。そして、これらの効果によって最終的に盛土天端の平坦性を維持することを期待している。模型地盤はCase4を基本ケースとして、改良体だけのCase5、押え盛土だけのCase6、無対策のCase7の計4ケースの実験結果を比較することで、改良体と押え盛土が盛土の変形抑制に与える影響を明らかにした。

(2) 実験概要

図-12にCase4の模型地盤の概要を示す。砂地盤と盛土は2章と同条件であるため異なる点のみ以下に示す。改良体は、法面直下の地表面から10mm以深に碎石7号を用いて厚さ50mm(幅48mm,奥行き390mm)の碎石層を作製し、その中間に同寸法のジオシンセティックス模型を挟み込むことで作製した。押え盛土(上幅50mm,下幅20mm,高さ35mm,奥行き390mm)は粒径2.5~4.75mmの碎石を約2mm四方の格子状に組まれた金網(直径0.47mm)で作製した型枠に目標空隙率35%で投入し、盛土の法面上に設置した。加振条件はまず、図-13に示す振動数5Hzの正弦波で目標最大加速度140gal

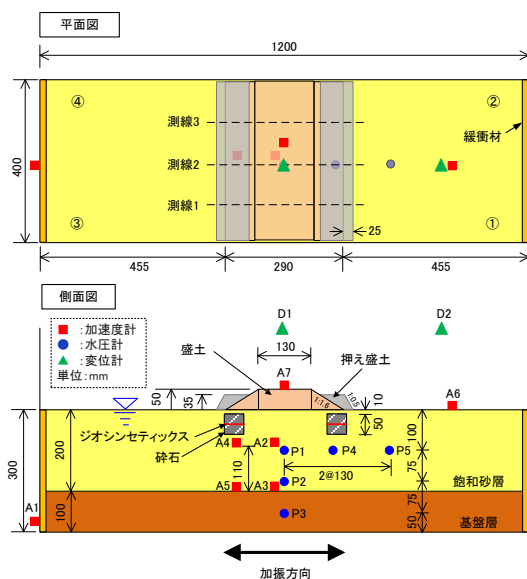


図-12 模型地盤の概要 (Case4)

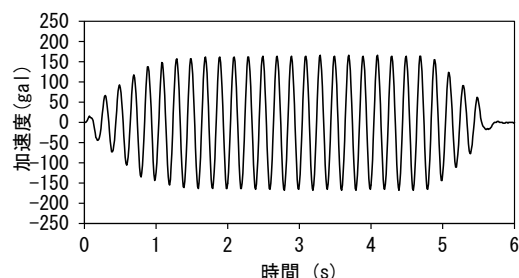


図-13 入力加速度の時刻歴 (加振時間 6 秒, A1)

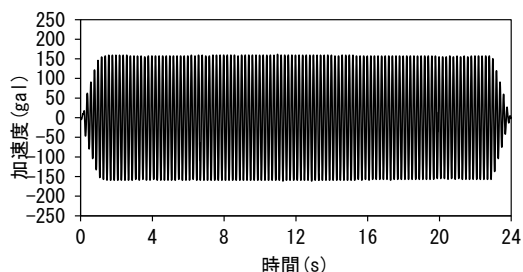


図-14 入力加速度の時刻歴 (加振時間 24 秒, A1)

となる加振時間 6 秒の入力波を用いた実験を行い、計測終了後、同一地盤に図-14 に示す加振時間 24 秒の入力波を与えた。実験中は入力加速度 (A1)、地盤の応答加速度 (A2～A7) と過剰間隙水圧 (P1～P5)、地盤の鉛直方向変位量 (D1～D2) を計測した。また、盛土の 3 測線において基準点から 1cm ごとにポイントゲージを用いて加振後の盛土の鉛直変位量を計測した。

(3) 実験結果および考察

図-15 に加振時間 6 秒の各ケースの盛土形状を示す。ここで、縦軸は加振前の砂地盤表面を原点とした時の相対高であり、盛土の変形による影響範囲外にある 4 箇所 (図-12 の①～④) の地盤沈下量の平均値を差し引いており、横軸の 2.5 倍の尺度となっている。本実験は加振

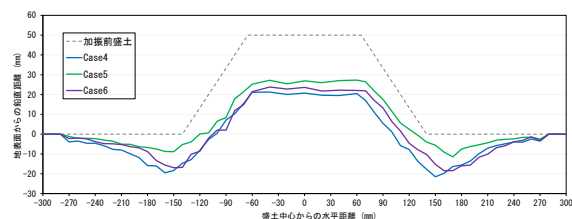


図-15 盛土の形状 (加振時間 6 秒)

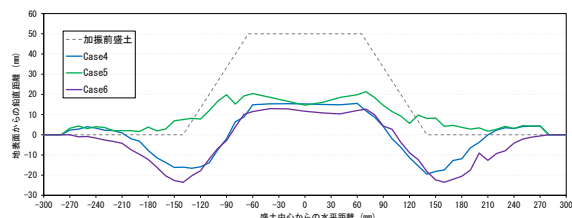


図-16 盛土の形状 (加振時間 24 秒)

の影響を少なくして盛土基礎地盤の液状化による支持力低下の影響を調べた実験である。押え盛土がない場合 (Case5) と比較して、押え盛土を施した場合 (Case4, Case6) は両ケースとも沈下が大きく、これは押え盛土の荷重増加による影響と考えられる。また、改良体がない場合 (Case6) と比較して、ある場合 (Case4) の方が法尻と天端の沈下が大きく、これは改良体が液状化層の単位体積重量より大きいことによる影響と考えられる。3 ケースの盛土法面の加振後の勾配に大きな差はないので、基礎の支持力を失った盛土が形状を保ったまま沈下し、沈下量の差はそれぞれの自重に支配されていたと考えられる。

図-16 に加振時間 24 秒の各ケースの盛土形状を示す。本実験は液状化後の加振の影響を加えた実験である。押え盛土がある場合 (Case4, Case6) はその荷重増加により両ケースとも沈下大きい。しかし、改良体がある場合 (Case4) はない場合 (Case6) よりも法尻での沈下が低減されており、天端の沈下も抑制されている。これは、加振時間が長く地盤変形が促進される場合には、法尻下部の改良体の剛性が側方流動を抑止する働きを示すことを示唆している。押え盛土がない場合 (Case5) は法面の側方流動が卓越して盛土は完全に崩壊し、天端中央が凹型に落ち込む変形が生じている。

図-17 は図-16 に無対策地盤 (Case7) の結果を加えたものである。無対策地盤は押え盛土がない場合 (Case5) と同様に、法面の側方流動が卓越して盛土は完全に崩壊し、天端中央が落ち込む変形が生じている。したがって、改良体を盛土法面直下に設置するだけでは、盛土の変形抑制効果は得られないことが明らかとなった。

図-18 に各ケースの加振時間 24 秒後の盛土の鉛直変位

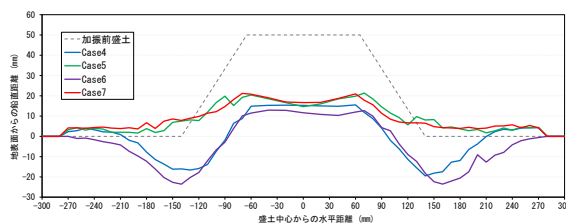


図-17 盛土の形状 (加振時間 24 秒)

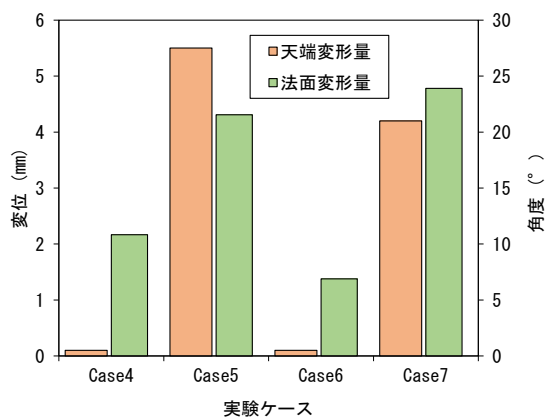


図-18 盛土の天端と法面の変形量

より算出した天端変形量と法面変形量を示す。ここで、天端変形量とは加振後の天端の左右法肩の地表面からの距離の平均値から天端中心の地表面からの距離を引いた値であり、正で数値が大きいと凹型に変形したことを示す。また、法面変形量とは加振後の法面角度を測定値の一次回帰直線より求めて加振前の法面角度 32° から引いた値であり、正で数値が大きいと側方流動で勾配がなだらかになったことを示す。天端変形量を見ると、押え盛土がある場合 (Case4, Case6) の変形量が極めて小さく、押え盛土による側方流動抑制が天端の平坦性維持に非常に有効であることがわかる。法面変形量についても同様の結果を得た。

図-19 に Case4 の加振時間 24 秒における盛土天端の地盤応答加速度 (A7) の時刻歴を示す。過剰間隙水圧の上昇過程で一瞬だけ応答が増幅するがその後は入力加速度を下回っていた。したがって、周辺地盤の液状化によって慣性力が盛土に与える影響は大きくない。図-20 は加振時間 6 秒時の法面直下の地表面から 100mm の位置における過剰間隙水圧比 (P4) の時刻歴であり、移動平均法により平滑化してある。改良体がある場合 (Case4, Case5) は過剰間隙水圧比の最大値が抑制されており、碎石の透水性が発揮されている。一方、押え盛土のある場合 (Case4, Case6) は消散開始時間が遅れており、これらの傾向は加振時間 24 秒でも同様であった。この要因として、沈下した押え盛土が地表面方向への上向き浸透流に影響を与えたことが考えられる。

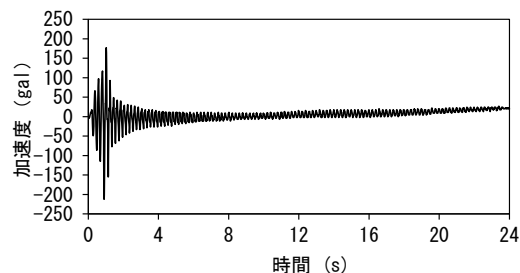


図-19 地盤応答加速度の時刻歴
(加振時間 24 秒, Case4, A7)

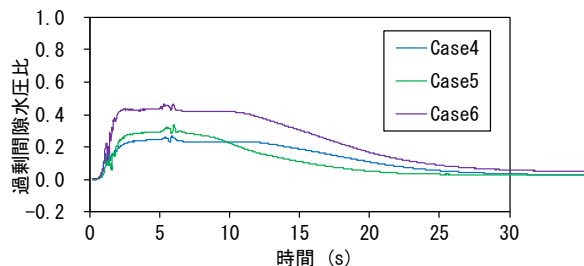


図-20 過剰間隙水圧比の時刻歴
(加振時間 6 秒, P4)

4. おわりに

本研究では道路盛土の液状化時変形抑制を目的として、ジオシンセティックス碎石で挟みこんだ改良体と押え盛土を用いた対策工法を、新設および既設の道路盛土に適用し、その有効性を 1G 場模型振動実験で検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 新設盛土の場合、碎石層に挟み込むジオシンセティックスの枚数を増やすことで、過剰間隙水圧の上昇が抑制され、盛土天端の沈下が低減した。これは、ジオシンセティックスにより碎石層の剛性が向上し、下部に設置したジオシンセティックスが砂の混入による透水性の低下を抑制したことが要因である。一方、改良体の幅を広くした場合、自重の増加により沈下抑制効果が低下した。
- (2) 既設盛土の場合、法面直下に改良体を、法面に押え盛土を設置することで盛土天端の平坦性が維持された。これは、押え盛土による法面の側方流動抑制が要因である。しかし、押え盛土の自重が大きいため法尻部が大きく沈下し、盛土天端の沈下量は無対策の場合を上回った。また、改良体の自重増加は沈下抑制効果を低下させたが、加振時間が長い場合には改良体の剛性が側方流動を抑制する働きを示した。

謝辞：実験では福井工業高等専門学校専攻科の松浦透氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション：緊急現地報告熊本大地震，5月9日号，日経BP社，p.10，2016.
- 2) 村上清基，久保幹男，松本正士，大河内保彦：ジオシンセティックスを用いた液状化変形抑制工法に関する遠心模型実験，ジオシンセティックス論文集，Vol.25，pp.133-140，2010.
- 3) 橋本涼，吉田雅穂，橋本芹菜，倉知禎直：碎石とジオシンセティックスを併用した道路盛土の液状化時変形抑制工法に関する模型振動実験，ジオシンセティックス論文集，Vol.31，pp.255-260，2016.

SHAKING TABLE TESTS ON A DEFORMATION MITIGATION METHOD FOR NEW AND EXISTING ROAD EMBANKMENT DURING LIQUEFACTION BY USING GRAVEL AND GEOSYNTHETICS

Masaho YOSHIDA, Taiga KATSUMI, Kouta INAMI, Hajime KAWASAKI
and Ryo HASHIMOTO

Small scale shaking table tests in a 1-g gravity field were carried out to evaluate effectiveness of a deformation mitigation method for new and existing road embankment during liquefaction by using geosynthetics sandwiched between gravel layer and a gabion. The reinforced gravel layer could dissipate an excess pore water pressure during liquefaction immediately, and perform as a rigid plate below the embankment. Furthermore, the gabion could confine the slope of embankment and restrain the lateral movement of slope. As a result, these functions could restrain the deformation of embankment, and keep the shape of embankment and flatness of crest.