

排水材と押え盛土に丸太と連結材を併用した 既設道路盛土の液状化時変形抑制に関する 模型振動実験

岩崎 拓¹・吉田 雅穂²

¹ 非会員 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: ti1852140901@stu.kanazawa-u.ac.jp

² 正会員 福井工業高等専門学校教授 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

道路盛土の基礎地盤が地震時の液状化現象によって沈下や側方流動の変形を生じると、路面にはき裂や段差による車両通行障害が発生し、それが幹線交通を担う道路の場合には被災後の応急復旧の遅延や経済的損失に繋がる恐れがある。本研究は既設の道路盛土の液状化時変形抑制を目的として、盛土の法面上に設置した押え盛土と法面に設置した排水材を丸太で支持し、さらにそれらを連結材で固定する工法を提案し、その有効性を 1G 場模型振動実験で検討した。その結果、押え盛土の拘束圧が盛土の側方流動を抑制し、排水材の透水性が基礎地盤の過剰間隙水圧を早期消散し、丸太の支持力が盛土の沈下量を抑制し、排水材と連結材で拘束された丸太が地盤のせん断変形を抑制することを明らかにした。

Key Words: earthquake, liquefaction, embankment, drainage, counterweight fill, log, shaking table test

1. はじめに

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盛土天端にある路面のき裂や段差などを発生させ、特に幹線道路の場合には被災後の救急救命活動や応急復旧の遅延をもたらす恐れがある。図-1 は 2016 年熊本地震で発生した九州自動車道の益城熊本空港 IC と嘉島 JCT 間の道路盛土の被害の様子であり、盛土が長さ 30m にわたって沈下と側方流動を生じたため路面にはき裂や段差が発生し、同区間は 12 日間の通行止めとなった¹⁾。著者らの現地調査によれば、崩壊現場の直下地盤は小川を埋め立てた箇所であり、付近の秋津川周辺では多数の噴砂が確認されたため、盛土基礎地盤の液状化が被害要因の 1 つであると推測する。

このような被害を軽減する新設の道路盛土の対策工法として、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水性の高い碎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、碎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⁾。50G 場における遠心模型振動実験の結果、対策地盤は無対策地盤と比較して盛土沈下量が約 60% 減少する効果が明らかと



図-1 熊本地震における道路盛土の被害

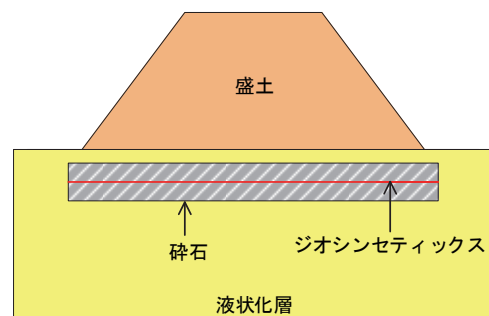


図-2 新設盛土の対策工法

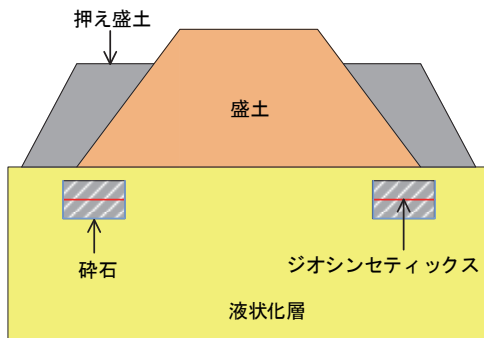


図-3 既設盛土の対策工法

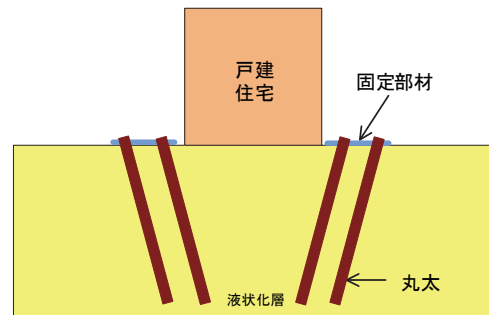


図-4 既設戸建住宅の対策工法

なっている²⁾。また、著者らが行った1G場における模型振動実験の結果、盛土直下の砕石層が剛な盤状構造物となることで、盛土の沈下が抑制されて天端の平坦性が保たれ、さらにその透水性によって砕石層直下地盤のせん断剛性の低下が抑制され、その効果はジオシンセティックスを挟むことで向上することが明らかとなっている³⁾。

一方、著者らは同工法を既設の道路盛土に適用する図-3の方法を提案している⁴⁾。それは、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排水材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し、さらに、ふとん籠等の押え盛土を法面上に設置して盛土の側方流動を抑制し、最終的に天端の平坦性を維持することを目的としている。1G場における模型振動実験でその有効性を検討した結果、押え盛土によって側方流動の抑制と天端の平坦性を維持する効果は得られたが、押え盛土による重量の増加によって盛土沈下量が増大する問題が生じた⁴⁾。

上記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ことを目的としているため、前述の沈下量増大の問題を克服する必要がある。そこで本研究では、この沈下抑制のために丸太を用いた液状化対策工法を併用することを提案した。著者らは1G場における模型振動実験によって、丸太を液状化の可能性のある飽和砂地盤に打設することで、①周辺地盤の密度増大効果、②丸太の頭部拘束による地盤のせん断変形抑制効果、③丸太周面から地表面への間隙水圧消散効果を確認しており⁵⁾、また、丸太打設地盤上の構造物の沈下抑制効果も明らかにしている⁶⁾。さらに、既設構造物に適用するため構造物基礎地盤の周囲を壁体状に囲うように丸太を打設する方法を提案し、構造物の沈下抑制効果を明らかにし、さらに、図-4に示すように丸太を構造物の下部地盤に傾斜して打設すること、また、丸太頭部を地表面で固定することの有効性を確認している⁷⁾。

建設事業における木材利用は、森林経営の活性化や地

球温暖化緩和に貢献できる付加価値がある。また、木材は地下水位以深では腐朽しにくい特性を持つため、丸太は液状化が問題となる地下水位以深での使用に適した材料と言える。そこで本研究では、図-3に示した既設盛土の対策工法に、図-4に示す丸太を用いた対策工法を併用する方法の有効性について1G場の模型振動実験により検討を行った。

2. 提案する液状化対策工法

図-5に示す本研究で提案する工法の対策原理は以下の通りである。法面直下に砕石とジオシンセティックスから成る排水材を設置し、その透水性によって過剰間隙水圧の上昇を抑制し、早期に消散させる。法面上にはふとん籠等の押え盛土を設置し、法面の側方流動を抑制し、法面直下地盤の拘束圧を増加させる。排水材に頭部を固定した丸太を基盤層まで打設して盛土と押え盛土を支持し、2列に打設して壁状にすることで盛土直下地盤のせん断変形を抑制する。2個の排水材を連結材で繋ぐことで排水材と丸太の側方移動を拘束する。また、図-6では丸太を傾斜打設することで、盛土直下地盤の変形領域を狭くして地盤の側方流動を抑制する。

本提案は、盛土の耐震補強として開発されているシートパイル締切工法を参考にしており、法尻に打設したシートパイルが支持地盤で生じる側方流動を防ぎ、その頭部を結ぶタイロッドがシートパイルの開きを押さえることで、盛土の変形を抑制する工法である。同工法は本研究で対象としている盛土支持地盤の液状化による天端の沈下や法面の側方流動の抑制に効果を示すことが明らかとなっている⁸⁾。本研究では丸太がシートパイルに相当し、さらに、排水材の支持杭としての機能を有し、また、連結材がタイロッドの役目を果たすことを想定している。

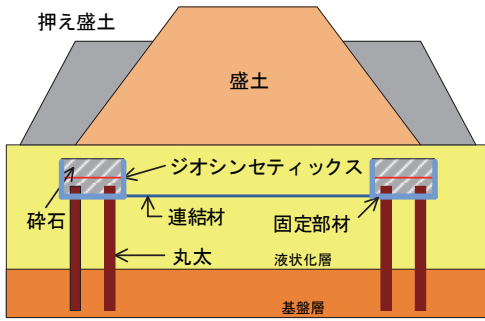


図-5 提案工法 1

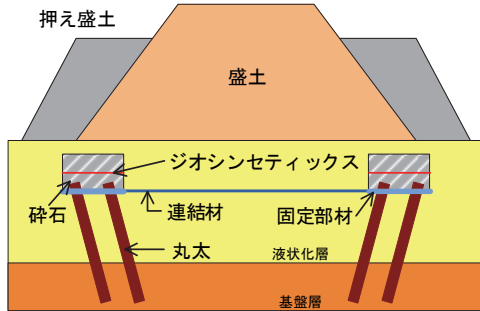


図-6 提案工法 2

3. 実験概要

(1)概説

本章では既設の道路盛土の液状化対策として、既に提案している排水材と押え盛土を用いた方法に丸太と連結材を併用する工法を模擬した模型地盤を対象として 1G 場での振動実験を行った。実験ケースは無対策地盤のケース 1, 図-3 に示す既往研究の排水材と押え盛土を用いたケース 2, 図-5 に示す本研究で提案する丸太と連結材を併用したケース 3 (以後、連結材を省略して丸太を併用したケースと称す。), 図-6 に示す丸太を傾斜打設したケース 4 の計 4 ケースである。

なお、本研究では深さ 15m の液状化層上にある高さ 4m の道路盛土を対象としており、これを現有的実験土槽内にモデル化するため井合の相似則⁹⁾に基づき縮尺 75 分の 1 の模型地盤を作製したが、地盤の透水係数や入力波の時間等については相似則を適用していない。そこで本章では、実験より得られる計測データの定性的な違いを比較することで、各ケースの有効性を把握することに重点を置いている。

(2)実験装置と材料

図-7 にケース 4 の実験装置の概要を示す。振動台上にアクリル製の土槽(幅 1200mm×奥行 400mm×高さ 500mm)を設置し、その中に珪砂 7 号(密度 2.66g/cm³, 平均粒径 0.17mm, 透水係数 4.79×10⁻³cm/s)を用いて模型地盤を作成した。地盤の全層厚は 300mm であり、まず土槽に投入

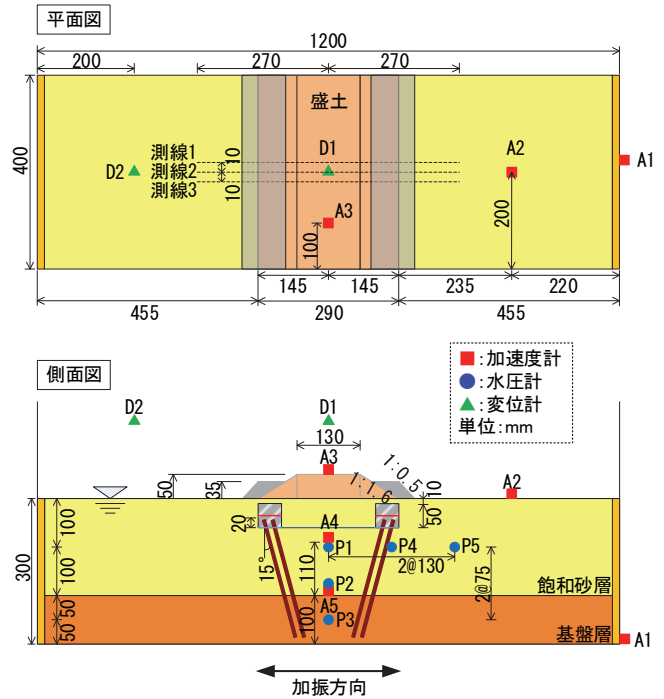


図-7 実験装置の概要 (ケース 4)

した既定量の砂と水を振動台で加振して目標相対密度 90%で層厚 100mm の基盤層を作製した。その後、基盤層上に水中落下法で飽和砂層を作製し、振動数 5Hz の正弦波を目標最大加速度 100gal で 30 秒間加振して目標相対密度 60%で層厚 200mm に調整した。地下水位は地表面と一致している。

盛土模型は昭和ケミカル製 DL クレーと信越化学工業製シリコンオイルを質量比 22%で混合した材料を用い、質量 6.27kg, 高さ 50mm, 天端幅 130mm, 法面勾配 1:1.6, 法尻幅 290mm, 単位体積重量 15kN/m³に成形した。これは、高さ 4m, 天端幅 10m, 法面勾配 1:1.5, 法尻幅 22m, 単位体積重量 15kN/m³, 設置圧 60kN/m³の盛土の 75 分の 1 を想定しており、一般的な片側 1 車線の道路盛土である。

排水材模型(幅 48mm, 高さ 50mm, 長さ 390mm)は、砕石 7 号(密度 2.56g/cm³, 平均粒径 3.55mm, 透水係数 10.9cm/s)で形成した砕石層の中間に、幅 2mm で厚さ約 50μm のポリエチレン製シートを 1mm 間隔で格子状に編んだジオシンセティックス模型(幅 48mm×長さ 390mm, 伸び剛性 60kN/m)を挟み込むことで作製した。設置位置は上面が盛土模型の両法尻直下の G.L.-10mm であり、2 個の排水材模型の側面間隔は 210mm である。

押え盛土(上幅 50mm, 下幅 20mm, 高さ 35mm, 奥行き 390mm)は 2mm 四方の格子状に組まれた金網(直径 0.47mm)で作成した型枠に、目標空隙率 35%で砕石 7 号を投入し、盛土の法面上に設置した。

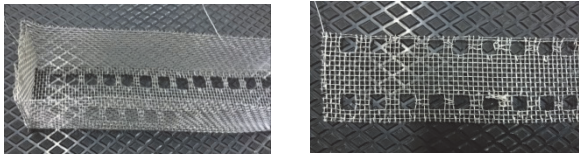


図-8 固定部材 (ケース 3) 図-9 固定部材 (ケース 4)

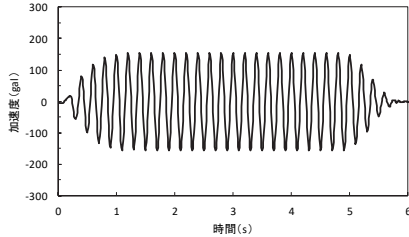


図-10 入力加速度の時刻歴 (6 秒加振)

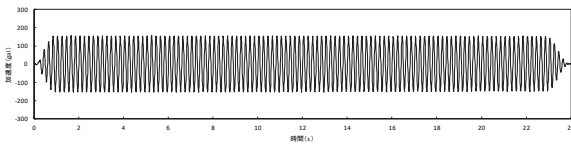


図-11 入力加速度の時刻歴 (24 秒加振)

丸太 (直径 6mm, 長さ 250mm) は, まず排水材直下の盛土縦断方向に間隔 15mm で 1 列打設し, さらに横断方向に 30mm 離れた位置に 1 列打設して, 計 2 列の四角形配置とした. 打設は静的に圧入する方法とし, 先端は基盤層に 90mm 根入れし, 頭部は排水材に 20mm 挿入して一体化した. 固定部材はケース 3 では前述の金網を加工して作製した箱型 (図-8), ケース 4 では平面型 (図-9) とした. 連結材は 3 本の金属線 (直径 0.47mm) を用い, 両法面直下に設置した 2 個の固定部材を連結した.

(3)加振条件と測定項目

加振条件はまず, 図-10 に示す振動数 5Hz の正弦波で目標最大加速度 140gal 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-11 に示す加振時間 24 秒の入力波を与えた. 前者は加振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, 後者は液状化発生後の振動による影響を調べるための条件である.

測定項目は入力加速度 (A1), 自由地盤地表面の応答加速度 (A2), 盛土天端の応答加速度 (A3), 盛土中央直下地盤の応答加速度 (A4, A5), 地盤内の過剰間隙水圧 (P1~P5), 盛土天端と自由地盤の鉛直変位 (D1, D2) である. また, 盛土の 3 側線と自由地盤の任意点においてポイントゲージで加振前後の鉛直変位を計測した.

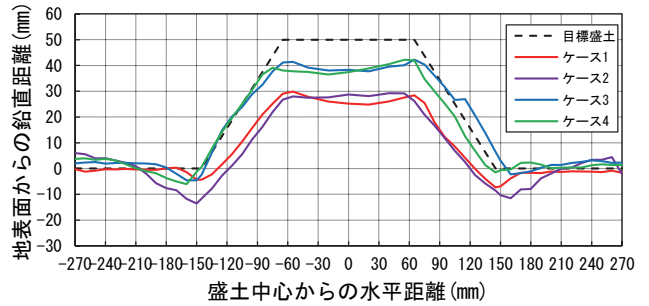


図-12 盛土断面の形状 (6 秒加振)

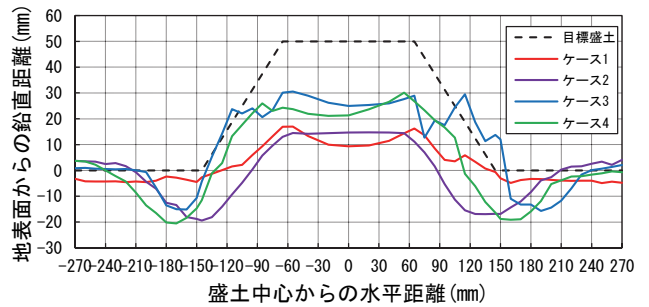


図-13 盛土断面の形状 (24 秒加振)

4. 実験結果および考察

(1)盛土断面の変形

図-12 に 6 秒加振の各ケースの盛土断面の形状を示す. ここで, 縦軸は加振前の飽和砂地盤表面を原点とした時の相対高であり, 横軸は盛土中心を原点とした各測点までの距離である. ケース 1・2 と比較して丸太を併用したケース 3・4 の沈下量が小さくなっており, 提案工法の沈下抑制効果が確認できる. また, 図-13 の 24 秒加振の場合でも同様の効果が得られた. 特にケース 1 の無対策地盤では, 長時間の振動で法面が側方流動により大きく変形しているのに対し, ケース 2~4 で明らかなように押え盛土を設置することで法面の変形が抑制された.

図-14 に天端平均沈下量を示す. これは天端の各測定点における加振前の高さに加振後の高さの差を天端全体で平均した結果であり, 正で値が大きいと天端全体が大きく沈下したことを示す. 同図より, 丸太を併用したケース 3 と 4 を比較すると, 6 秒加振では傾斜打設のケース 4 が小さく, 24 秒加振では鉛直打設のケース 3 が小さく, 累計ではほぼ等しい値となった. 加振の影響の少ない 6 秒加振では傾斜打設によって盛土直下の液状化による地盤変形領域が小さくなったことが即時沈下の抑制に影響したと考えられる. しかし, 24 秒加振のように振動による揺すり込み沈下が発生する場合には, その効果は限定的であると考えられる. しかし, 両ケースの沈下量

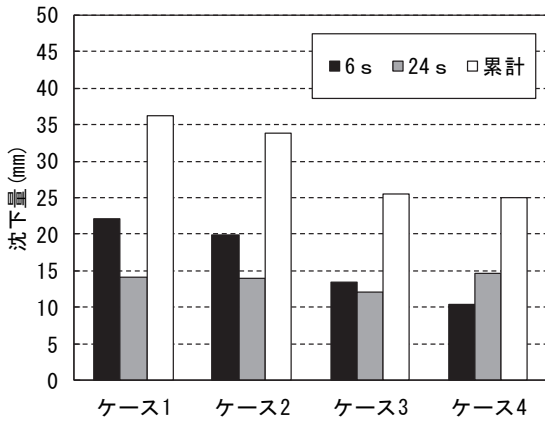


図-14 天端平均沈下量

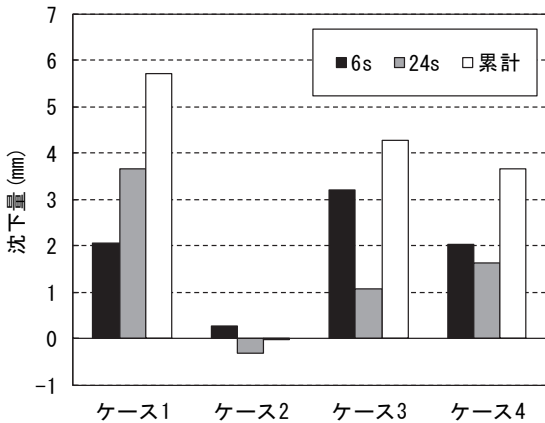


図-15 天端不同沈下量

は丸太のないケース 1・2 の約 70%に低減されており、その沈下抑制効果は明らかである。

図-15 に天端不同沈下量を示す。これは天端中央の沈下量から天端の左右法肩の沈下量の平均値を引いた値であり、正で値が大きいと凹型に変形したことを示す。各ケースの累計をケース 1 の無対策地盤と比較すると、対策することで不同沈下が抑制されることは明らかである。しかし、丸太を打設した場合、法面での沈下抑制がより向上することで、天端中心部での抑制効果との差が相対的に大きくなり、ケース 2 の丸太を用いない場合が最も不同沈下を抑制する結果を示した。したがって、本実験条件では丸太先端が基盤層に達していたが、基盤層で支持させない方法の検討が必要である。

(2)過剰間隙水圧比

図-16 に 6 秒加振における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) の時刻歴を示す。加振時の水圧上昇過程を見るために横軸の時間を対数表示とした。丸太のないケース 1・2 では加振後すぐに水圧比が 0.8 程度まで上昇し、その後は動的成分が卓越している。一方、丸太を併用したケース 3・4 では水圧上昇が比較的緩やかであり動的成分も少なく、特にケー

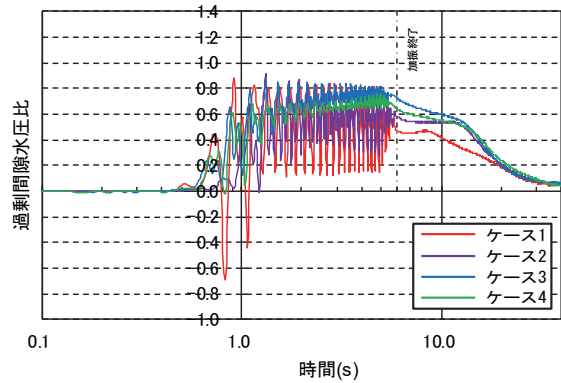


図-16 過剰間隙水圧比 (6 秒加振, P1)

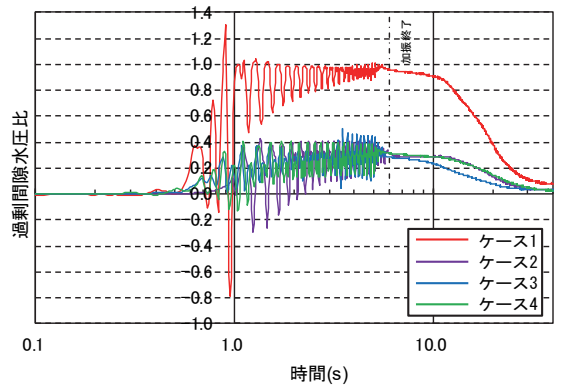


図-17 過剰間隙水圧比 (6 秒加振, P4)

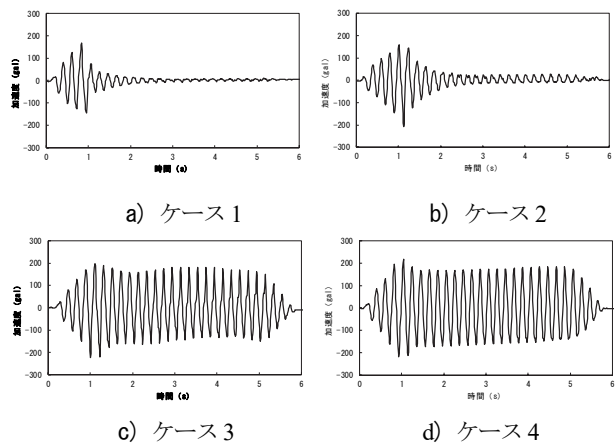


図-18 盛土天端の応答加速度 (6 秒加振, A3)

ス 4 の傾斜打設の方がその傾向が強く、丸太による地盤のせん断変形抑制による液状化抵抗の増加が確認できる。

図-17 は同じく排水材直下の過剰間隙水圧比 (P4) の時刻歴である。ケース 1 の無対策地盤に対して排水材を設置したケース 2~4 では顕著な水圧抑制効果が確認できる。これは排水材による透水性能の向上と押え盛土による有効拘束圧の増加の影響と考えられる。一方、丸太打設による影響は特に確認できない。

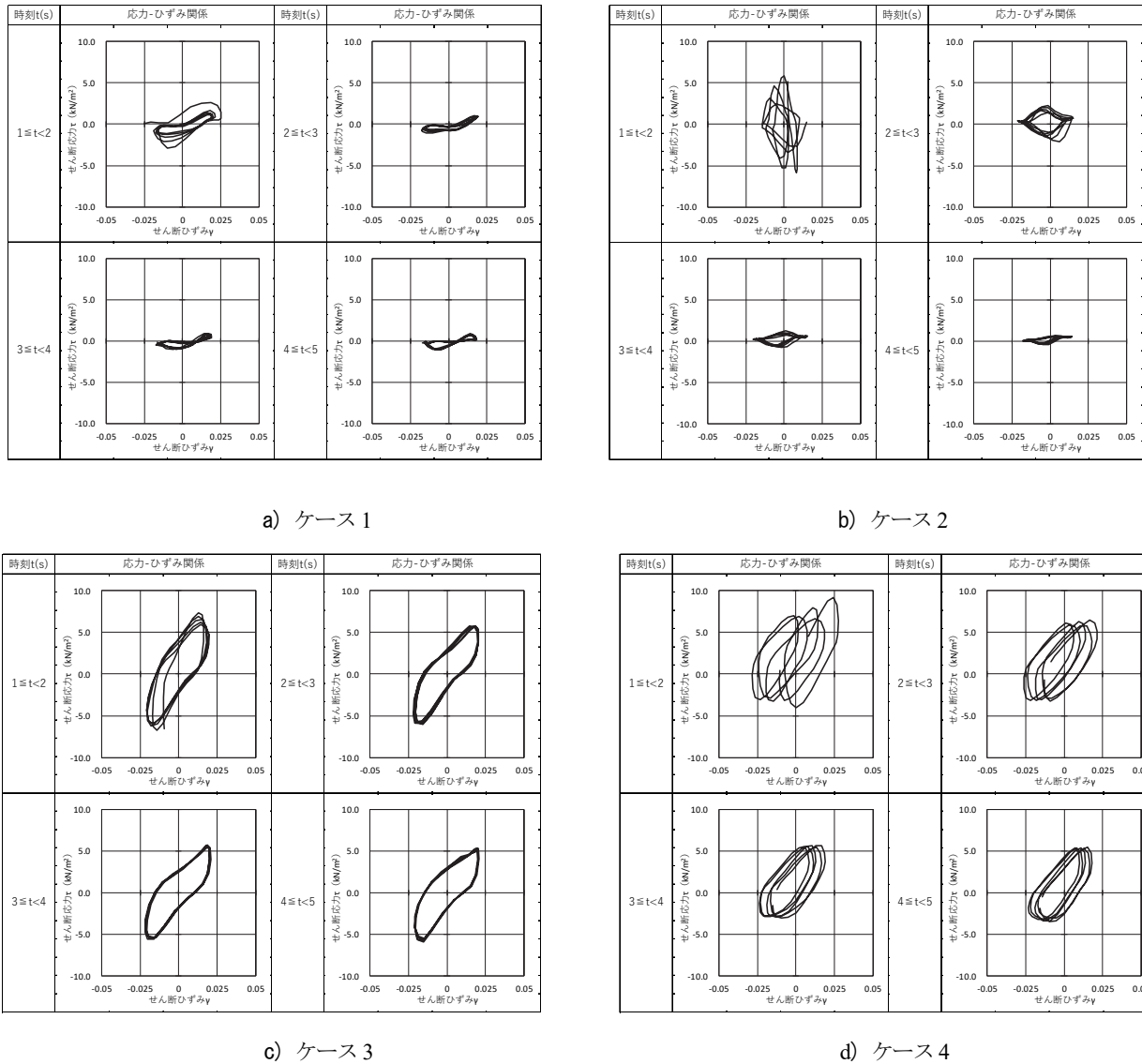


図-19 盛土直下地盤のせん断応力とせん断ひずみの関係 (6秒加振)

(3)盛土の応答加速度

図-18に各ケースの6秒加振における盛土天端の応答加速度(A3)の時刻歴を示す。丸太のないケース1・2では加振1秒後には基礎地盤の軟化によって応答加速度が減少するが、ケース3・4の丸太を併用した場合はケース3で入力加速度の1.43倍、ケース4で1.37倍の応答加速度となっており、基盤層の振動が丸太を介して天端に作用したと考えられる。この傾向は24秒加振でも同様であり、盛土の振動の影響を検討する際は注意を要する。

(4)盛土直下地盤の応力ひずみ関係

図-19は6秒加振におけるケース1~4の盛土直下G.L.-90~200mmの層における平均的なせん断応力とせん断ひずみの関係を、加振開始後1秒から5秒まで示したも

のである。ここで、せん断ひずみは同層上下端の地盤応答加速度(A4, A5)の2回積分より求めた絶対変位を層厚110mmで除して求めた。また、前述の地盤応答加速度と層厚、そして、地盤密度を用いて風間ら¹⁰⁾の方法で同層中間点におけるせん断応力を求めた。

ケース1の無対策地盤の場合、過剰間隙水圧比が最大となる約2秒後以降は地盤が軟化してせん断応力が発生しない状態となっている。丸太のないケース2でも3秒以降は同様である。一方、丸太を併用したケース3・4ではせん断応力が低下することはなく、剛性のある丸太が地盤内に壁体状に存在することで、地盤のせん断剛性が向上したと考えられる。また、丸太の頭部を排水材と一体化し、先端を基盤層に根入れし、さらに、連結材で排水材と丸太の水平移動を拘束したことも、壁体の安定化に寄与したと考えられる。

5. おわりに

本研究では既に提案されている排水材と押え盛土を利用した既設の道路盛土の液状化対策工法に、丸太と連結材を用いた液状化対策工法を併用することを提案し、1G場模型振動実験によりその有効性を検討した。以下にその併用による影響について明らかとなった知見を示す。

- 1) 押え盛土と排水材の直下に丸太を打設することは、液状化発生時の盛土全体の沈下抑制に寄与する。しかし、丸太によって法面部と天端中心部での支持力に差が生じることが天端における不同沈下の要因となる。
- 2) 丸太を壁体状に打設することで、盛土直下地盤のせん断剛性が向上する。その安定性は、丸太の頭部を排水材と一体化し、先端を基盤層に根入れし、また、連結材で排水材と丸太の水平移動を拘束することで保たれる。しかし、それにより天端に地盤振動が伝播しやすくなる。
- 3) 上記の結果は丸太先端が基盤層に達していた実験条件に起因すると推測されるため、今後は基盤層で支持させない方法の検討が必要である。

謝辞：実験では福井工業高等専門学校の元学生、市橋有咲氏、スポジトマテウス氏、橋本拓弥氏、山本花凜氏の協力を得た。また、本研究はエターナルプレザーブ株式会社と共同で実施した。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：砕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。
- 4) 吉田雅穂，勝見大雅，井波航大，川崎始，橋本涼：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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.75，No.4，地震工学論文集第38巻，pp.326-332，2019。
- 5) 吉田雅穂，沼田淳紀，上杉章雄，久保光，宮島昌克：スギ丸太を用いた液状化対策工法の検討，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集，pp.43-44，2008。
- 6) 吉田雅穂，宮島昌克，沼田淳紀，木内貴之，渡邊雄大，内藤法子：スギ丸太を利用した液状化対策工法に関する模型振動実験，第44回地盤工学研究発表会平成21年度発表講演集，pp.1425-1426，2009。
- 7) 芹川由布子，吉田雅穂，宮島昌克：既設戸建住宅を対象とした丸太を用いた液状化対策工法に関する基礎的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72，No.4，地震工学論文集第35巻，pp.489-495，2016。
- 8) 大木基裕，関雅樹，永尾拓洋，中野正樹：鉄道盛土における5つの地震時破壊形態の実験検証と合理的な耐震補強の提案，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.69，No.2，pp.174-185，2013。
- 9) Iai, S.: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol.27, No.3, pp.3-24, 1988.
- 10) 風間基樹，豊田浩史，東畑郁生，柳沢栄司：遠心振動実験から求めた砂地盤の応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.535/III-34，pp.73-82，1996。

(Received October 16, 2020)

(Accepted January 31, 2021)

SHAKING TABLE TESTS ON A DEFORMATION MITIGATION METHOD FOR EXISTING ROAD EMBANKMENT DURING LIQUEFACTION BY USING DRAINAGE, COUNTERWEIGHT FILL, TIE ROD AND LOG

Taku IWASAKI and Masaho YOSHIDA

Small scale shaking table tests in a 1-g gravity field were carried out to evaluate effectiveness of a deformation mitigation method for an existing road embankment during liquefaction by using drainage materials made with geosynthetics sandwiched between gravel layer, counterweight fills made of gabion and piling logs connected by tie rods. The gravel layer could dissipate an excess pore water pressure during liquefaction immediately. The gabion could confine the slope of embankment and restrain the lateral movement of slope. The piling logs could support the slope of embankment and restrained the shear deformation of ground below the embankment. As a result, these functions could restrain the deformation of embankment, however the differential settlement between crest and slope increased in the case of using logs.