

3.4 降雨の影響を考慮した道路土工構造物の耐震設計・耐震補強技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ

（土質・振動）

研究担当者：佐々木哲也、加藤俊二、梶取真一

【要旨】

本研究は、事前降雨等の影響が耐震性に大きく影響すると考えられる道路盛土等の道路土工構造物を対象として、地震時挙動・耐震性に及ぼす事前降雨等の影響の定量的な評価、耐震性照査手法の検討、および合理的で経済的な耐震補強法を検討・提案することを目的として実施するものである。平成 26 年度は、細粒分含有率の高い盛土を対象に動的特性に及ぼす空気間隙率の影響について室内土質試験および遠心力載荷模型試験を行い、適切な締固めと空気間隙率管理により耐震性が向上することを確認した。

キーワード：道路盛土、粘性土、地震時挙動

1. はじめに

近年の地震等において、事前降雨が影響したと考えられる道路盛土等の道路土工構造物の被害により、長期間にわたり道路全体の交通機能を大幅に低下させ、社会問題を引き起こした。このため、道路土工構造物においても耐震性の向上が急務となっている。一方で公共事業費の縮減が求められており、事前降雨等の影響を考慮し適切かつ合理的に道路土工構造物の耐震性を向上させることが求められている。本研究は、事前降雨等の影響が耐震性に大きく影響すると考えられる道路盛土等の道路土工構造物を対象として、変状・被災事例の収集・分析、現地計測、模型実験等を通じて、①道路土工構造物の地震時挙動、耐震性に及ぼす事前降雨等の影響の定量的な評価、②事前降雨等の影響を加味した定量的な耐震性照査手法の提案、③既往の経験・実績に基づく仕様規定（標準のり面勾配、排水工等）が有する性能の明確化、④事前降雨等の影響を加味した合理的で経済的な耐震補強法の提案を目的に実施するものである。

集水地形上に構築された盛土の耐震性に関しては、入念な締固めと適切な排水施設の設置による盛土内水位の低下により、耐震性が向上することが既往の研究により明らかになっている¹⁾。盛土の締固め効果については、これまで良質な材料について締固めとせん断強度・盛土の耐震性への影響について明らかにしているが、細粒分を含む材料については十分には検討されていない。これらの性状は、前者は一般に含水比が高いためオーバーコ

ンパクションにより十分に締め固めることができず、後者は盛土内水位を排水することが難しい。このような盛土材を使用する場合は、施工時の締固め管理として空気間隙率管理（または飽和度管理）されることが一般的である。空気間隙率管理では、間隙における空気の割合を低下させることで、降雨時の浸水による盛土の沈下（コラプス）や強度低下を低減させ、土の恒久性を高めるという考え方で実施しているが、耐震性について必ずしも考慮はされているわけではない。

このため、平成 26 年度は、細粒分含有率の高い盛土を対象に動的特性に及ぼす空気間隙率の影響について、室内土質試験および遠心力載荷模型試験により効果の確認を行った。

2. 空気間隙率管理による耐震性向上に関する検討

2-1 室内土質試験による検討

（1）使用材料と試験方法・条件

細粒分含有率が高く空気間隙率管理による施工管理が想定される盛土材の力学特性を把握することを目的に室内土質試験を実施した。試験に用いた試料は、実盛土で使用されている盛土材を土取り場より採取したものである。試験は異なる空気間隙率のもと、透水試験（変水位法）、圧密非排水三軸圧縮試験（以降、「CUB 試験」）、土の繰返し非排水三軸試験（以降、「液状化試験」）を地盤工学会基準²⁾に従って行った。

本検討で用いた試料は図 1 に示す粒度分布で、細粒分

含有率 $F_c = 94\%$ 、塑性指数 $I_p = 21.7$ の砂混じりシルトである。なお、図1には、2007年能登半島地震で実際に被災した山岳道路盛土において「大規模崩壊が発生した」あるいは「のり面変状や路面のクラックが路床まで達した」(中被害)箇所にて採取した細粒分含有率の高い盛土材の粒度分布も併せて示している。

表-1は試験に用いた試料の主な物性値と3ケースの供試体作製の条件である。本試料を用いて $D_c=90\%$ 、 $V_a=2\%$ 、 5% 、 15% 、を目標に試験盛土(高さ2.6m、天端幅2m、天端延長6m程度)を土木研究所内に作製し、その実測値を供試体作製の目標値とした。

各供試体は、目標締固め度、 V_a になるように含水調整し、突固めにより作製した。最大乾燥密度は、締固め試験A-c法(JISA 1210:「突固めによる土の締固め試験方法」2009)²⁾により求めた。供試体の V_a 値は、作製時のものであり、CUB試験、液状化試験は供試体作製後に飽和した上で実施している。

供試体は直径50mm、高さ100mmで作製し、所定の有効拘束圧(CUB試験:30、60、120kN/m²、液状化試験:60kN/m²)にて、単調载荷あるいは繰返しせん断を行った。

(2) 透水、圧密非排水三軸圧縮試験の結果

表1に示す透水係数は、ケースAとケースBは同程度であったが、 V_a の大きいケースCになると、ケースA・Bよりも300~600倍程度高かった。同じ締固め度で作製しても、突き固め時の V_a によって、透水係数は大きく異なっている。

応力-軸ひずみの関係を図2に、応力経路を図3に示す。図2に示すように、いずれのケースもひずみの増加に伴い、軸差応力は単調増加した。ケースA・Bの残留強度(ひずみ15%に達するときの軸差応力とする)は、ケースCよりも1.3倍程度大きくなった。

また、図3の応力経路を見ても、ケースA・Bは概ね同様な傾向であるが、ケースCは傾向が異なる。拘束圧30

N/m²・60kN/m²の経路では、変相点後にケースA・Bはせん断応力が増加するが、ケースCではその傾向は全く見られない。拘束圧120kN/m²の経路では、ケースCの変相点後も若干のせん断応力の増加が見られるが、ケースA・Bと比べると、その程度は小さい。

(3) 繰返し非排水三軸試験の結果

図4に液状化試験における圧密前、圧密後(繰返しせ

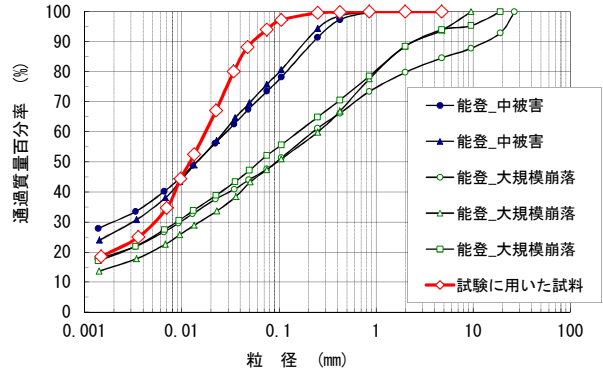
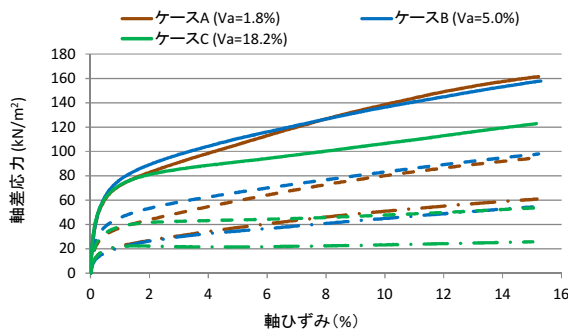


図1 室内土質試験に用いた粒度分布(赤色)

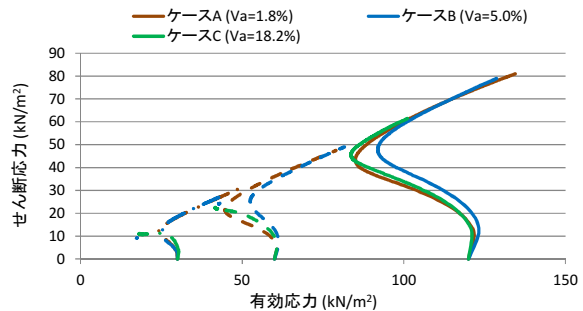
表1 盛土材の主な物性値と各ケースの供試体作製条件

ケース	A	B	C
細粒含有率 F_c (%)	94.0		
粘土分 (%)	65.6		
シルト分 (%)	28.4		
塑性指数 I_p	21.7		
自然含水比 (%)	43.5		
目標締固め度 D_c (%)	90.0	91.4	90.2
目標空気間隙率 V_a (%)	1.8	5.0	18.2
供試体作製時の含水比 (%)	47.4	43.4	33.1
透水係数 (m/s)	2.63×10^8	1.37×10^8	8.24×10^6



(実線: 120kN/m², 破線: 60kN/m², 鎖線: 30kN/m²)

図2 軸差応力と軸ひずみの関係



(実線: 120kN/m², 破線: 60kN/m², 鎖線: 30kN/m²)

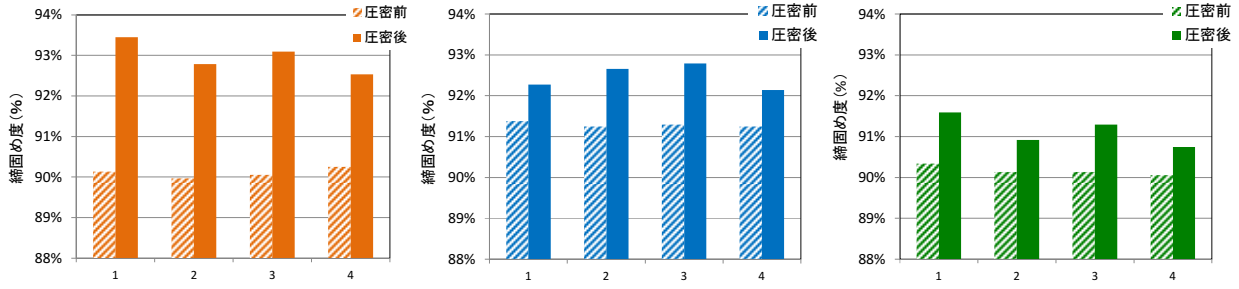
図3 せん断応力と有効応力の関係

ん断前)の供試体の密度変化を締固め度で示す。ケースA・Bの圧密後の締固め度は、92~93%程度、ケースCは91%前後であり、各供試体は同程度の締固め度で繰返し載荷を行っている。

図5に各ケースの液状化試験の結果を示す。それぞれケースAは(a)に、ケースBは(b)に、ケースCは(c)に示し、左図に液状化強度曲線を、中央図に応力経路を、右図に応力-軸ひずみ関係を示す。中央図・右図は、各ケ

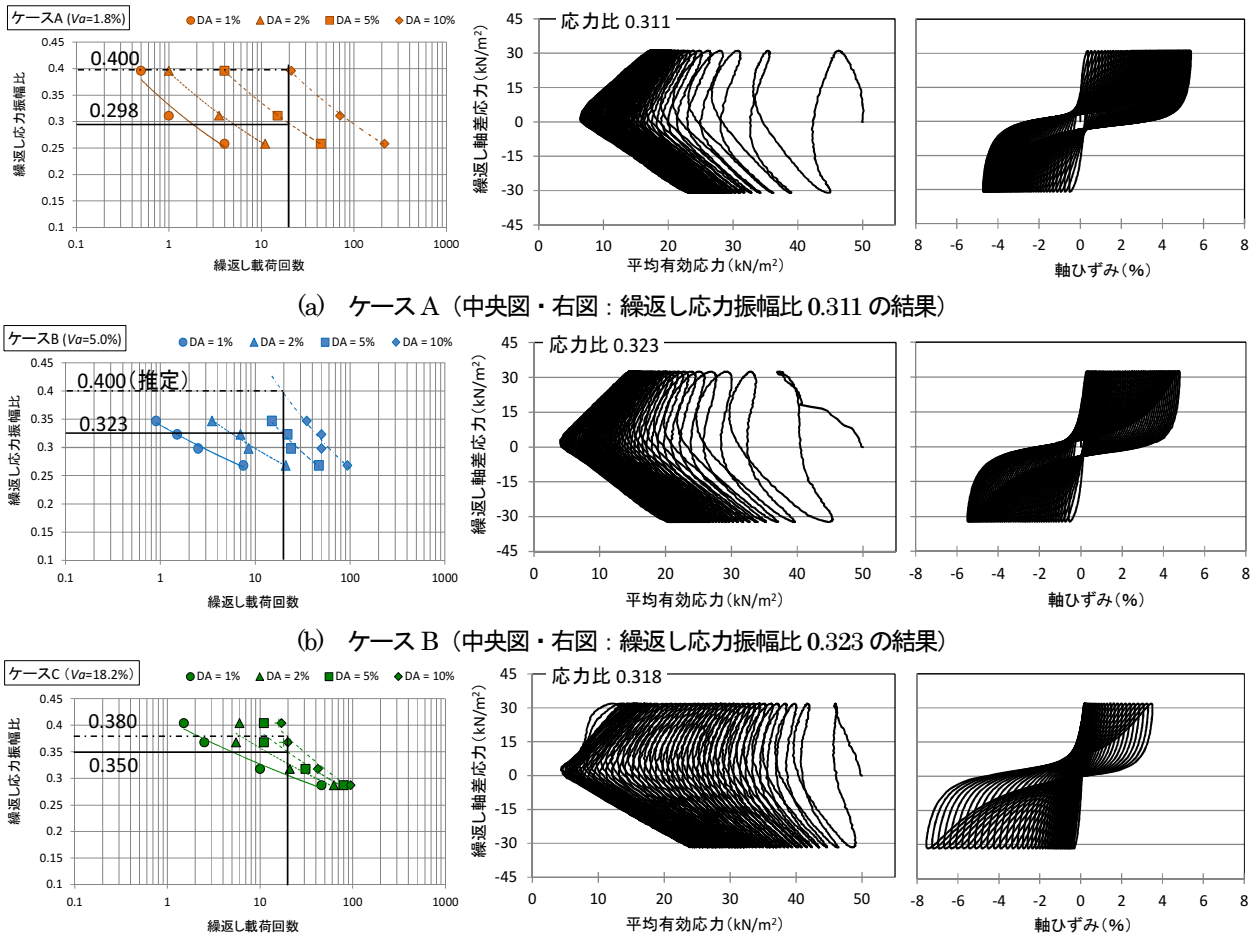
ースの同程度の繰返し応力振幅比の試験結果を示したものである。

各ケースの液状化強度曲線を比較すると、実務でよく用いられるDA5%に達する液状化強度比 RL_{20} (繰返し載荷回数20回)は、ケースAが0.298と最も小さく、ケースCの0.350が最も大きくなるが、DA10%に達する液状化強度比 RL_{20} (繰返し載荷回数20回)で見ると、ケースAの0.400が最も大きく、ケースCの0.380が最小となる。



(左図：ケースA, 中央図：ケースB, 右図：ケースC)

図4 液状化試験における圧密前、圧密後（繰返しせん断開始前）の各供試体の密度



(a) ケースA (中央図・右図：繰返し応力振幅比0.311の結果)

(b) ケースB (中央図・右図：繰返し応力振幅比0.323の結果)

(c) ケースC (中央図・右図：繰返し応力振幅比0.311~0.323の結果)

図5 液状化試験の結果

3.4 降雨の影響を考慮した道路土工構造物の耐震設計・耐震補強技術に関する研究

図6に各ケースの過剰間隙水圧比が95%に達する液状化強度曲線を示す。ケースAはケースBに比べて明らかに $\Delta u=95\%$ に達する繰返し载荷回数が多い。一般にきれいな砂質土ではDA5%と過剰間隙水圧比95%の繰返し回数は一致するが、今回用いた盛土材のケースA、Bでは一致しない。細粒分が多いため、砂質土を対象にした液状化強度比では盛土材の液状化強度を比較できない可能性がある。

また、液状化強度曲線の傾きやひずみの進行程度に着目すると、ケースAは、DA=1、2、5、10%の各曲線が開いており、密な試料の傾向を示している。一方、ケースCのDA=1、2、5、10%の各曲線は、ケースAと比べるとその間隔は狭く、緩い試料と解釈できる傾向を示している。ケースBは、ケースAとケースCのちょうど中間的な形状である。

図5に示す応力-ひずみ関係を見ると、ケースCはケースA・Bよりもひずみの進行が早い。ケースA・Bは徐々に変形が進むため、図では密になっており、 V_a の小さい方が変形が進行しにくいことが示唆された。

以上より、同じ締固め度であっても V_a が小さい方が繰返し载荷による変形が進行しにくいことが示唆された。なお、いずれの供試体でも、圧密による密度増加に大きな違いは見られず、このため供試体作製時の含水比の違いにより、形成される粒子の骨格構造が異なることが影響している可能性が考えられる。

2-2 遠心力载荷模型試験

(1) 使用材料と試験方法・条件

前述の室内土質試験において、細粒分を多く含む盛土材料に関しては、新設時に適切な締固めと空気間隙率の管理を行うことで、耐震性が向上することが確認できた。ここでは、遠心力载荷模型試験により空気間隙率の違いによる地震時の変形状況の確認を行った。

実験は、江戸崎砂とSA-400を1:1で混合した試料を用いて、図7に示すように模型スケール:1/50で、盛土高さ15mを想定した片盛土模型(のり面勾配:1:1.8)を作製し、水を用いて背面から給水して間隙水圧計により確認しながら盛土内の水位を調整し、50Gの遠心場で兵庫県南部地震の神戸波を与えて地震時の変形状況を確認した。図8に試料の粒度分布を、図9に試料の締固め曲線と空気間隙率の関係を、表2に試験条件を示す。目標とする盛土の締固め度は90%とし、ケース1と2は、空気間隙率10%を目安として最適含水率よりも湿潤側で作製し、盛土内水位の違いによる耐震性の違いの確認を目的としたものである。過去の実験よりの尻付

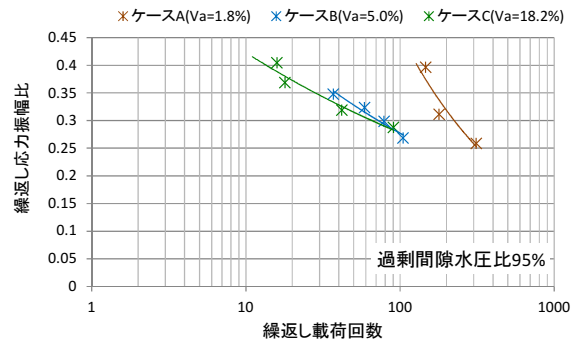


図6 過剰間隙水圧比95%に達する液状化強度曲線

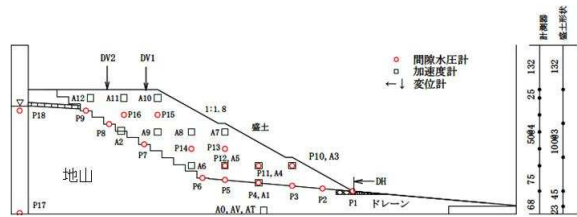


図7 実験模型断面図

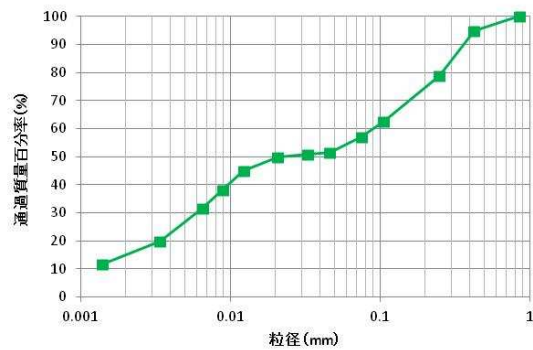


図8 試料の粒度分布

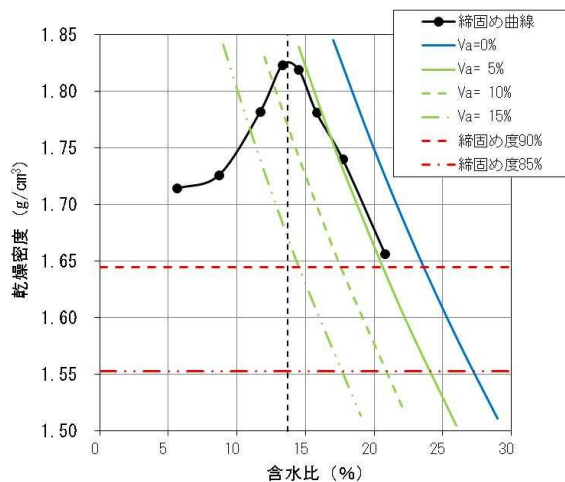


図9 試料の締固め特性曲線と空気間隙率の関係

近での盛土内水位が盛土高の1/2を超えると大きく崩壊し、1/3程度以下であると崩壊が抑制されることが確認されていることから、それぞれ盛土高の1/3と1/2を目安として水位を与え、表の数値は第1小段位置での間隙水圧計による計測値を実スケールに換算したものである。ケース3は空気間隙率の違いによる耐震性の違いの確認を目的としたものである。

(2) 試験結果

図10に加振後の天端およびのり肩の鉛直変位量について、ケース1およびケース2、ケース2およびケース3で比較した結果を、写真1に各ケースの加振後の変形状況を示す。今回用いた試料では、締固め度90%で施工した場合に空気間隙率が10%程度となるように最適含水率よりも湿潤側に調整し作製したケースでは、加振後の変形量を見ると盛土内水位の影響はほとんど無く、加振時ののり尻付近の水位が盛土高さの1/2を超える場合でもほとんど変形していない。一方、締固め時の空気間隙率が15%程度になるように最適含水率付近で調整した試料でのり尻付近の盛土内水位が盛土高の1/2を超えるケース3では、天端、のり肩が大きく変形している。前述の室内土質試験および遠心力載荷模型試験の結果を踏まえると、施工時に適切な締固めおよび空気間隙率を管理することで、耐震性の向上を図れるものと考えられる。

3. まとめ

土質の違いにより施工性の観点等から最適となる空気間隙率は異なり、条件によって効果は異なるものと考えられるが、今回の検討結果では、細粒分を多く含む盛土材の場合、新設時には適切な締固めと空気間隙率管理を行うことで耐震性が向上することが確認できた。

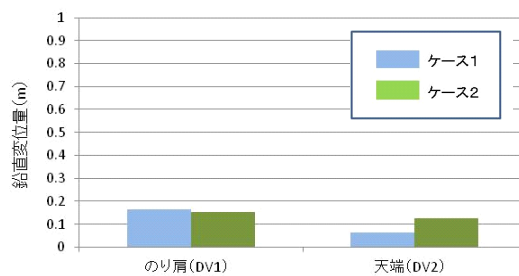
今後は、更にデータの蓄積を図るとともに、既設盛土を想定した模型実験等を行い耐震補強法に関する検討を行う予定である。

参考文献

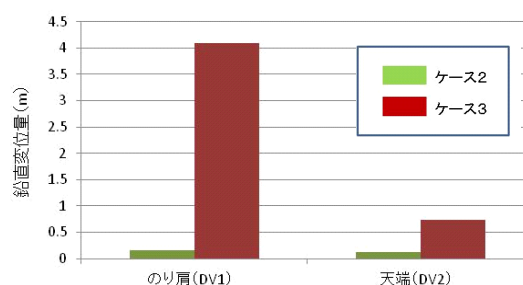
- 1) 大川寛、杉田秀樹、佐々木哲也、水橋正典：山岳道路盛土の耐震性能照査手法に関する検討、土木構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム
- 2) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2009

表2 試験条件

	ケース1	ケース2	ケース3
締固め度	90.8%	90.1%	90.1%
盛土作製時の含水比	17.2% 湿潤側	16.6% 湿潤側	13.4% ≒最適含水比
空気間隙率	9.7%	11.5%	16.6%
最下段の小段部の盛土内水位(盛土高さ: 4.35m)	1.64m	2.45m	2.57m



(a) 盛土内水位の比較



(b) 空気間隙率の違いによる比較

図10 加振後の変位量の比較結果

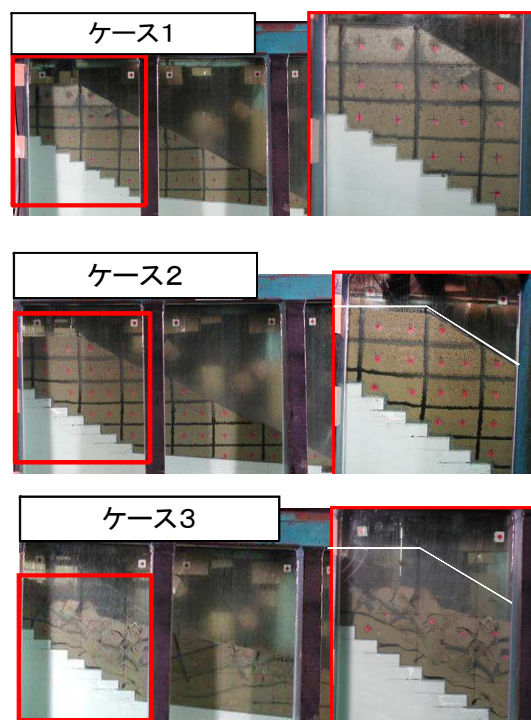


写真1 加振後の変形状況

RESEARCH ON THE SEISMIC DESIGNS AND RETROFITS CONSIDERED INFLUENCE OF THE RAINFALL FOR EARTH WORKS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Geology and Geotechnical
Engineering Research Group
(Soil Mechanics and Dynamics)

Author : Tetsuya SASAKI

Shunji KATO

Shinichi KAJITORI

Abstract : This study is carried out for suggesting the quantitative evaluation methods on influence of the prior rain to behavior, quake resistance due to earthquake, and rational and economical seismic strengthening method on road earthwork structures. In 2014FY, it was carried out dynamics properties examination and centrifugal force loading model examination on the soil which a lot of infinitesimal grains are included. As the result, it was confirmed that quake resistance improved by appropriate management of appropriate compaction and air porosity.

Key words : seismic designs and retrofits, road earthworks, prior rainfall