

令和 6 年 5 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14241

研究課題名（和文）盛土内に設置されたカルバートの地震時追従性に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental study on seismic followability of culvert installed in embankment

研究代表者

宮崎 祐輔（Miyazaki, Yuusuke）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：10847320

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：過去の地震時被害に関する調査から、液状化層を有する基礎地盤上に建設されたボックスカルバートを含む盛土の構造を三次元にモデル化し、動的遠心力載荷実験を実施した。実験の結果、盛土直下よりもカルバート直下で、液状化が進行し、さらにカルバートの坑口より継ぎ目直下で液状化が進行することが計測的に解明された。この現象を理解するために、土水連成弾塑性有限要素法による動的解析を実施した。数値解析の結果、実験と同様にカルバート直下で液状化が進行する現象が再現された。このことから、カルバートの底板が基礎地盤の有効応力を低下させることに寄与したといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果から、見かけの単位体積重量の小さいカルバートのような構造物が液状化層を有する基礎地盤上に敷設された場合、液状化をより進行させる可能性が示された。このような可能性については、現行のカルバート工の設計指針において何ら留意されていない。このような事象を確認した先行研究が殆どなく、また、一般に上載構造物は基礎地盤内の有効応力を増大させるため、液状化にとって不利に働かないと考えられてきたことが原因と考える。本研究をさらに発展させることで、本事象の発生条件を一般化し、他の社会基盤構造物において同様の懸念がないか、明らかにすることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Based on a survey of past earthquake damage, a three-dimensional model of the structure of an embankment including a box culvert built on a liquefiable foundation was developed and dynamic centrifuge loading experiments were conducted. The experimental results showed that liquefaction progressed more directly under the culvert than under the embankment, and that liquefaction progressed more directly under the joint than at the culvert mouth. To understand this phenomenon, a dynamic soil-water coupled elasto-plastic finite element analysis was conducted. The numerical analysis reproduced the phenomenon of liquefaction just below the culvert as in the experiment. This indicates that the bottom plate of the culvert contributed to the reduction of effective stress in the foundation soil.

研究分野：地盤工学

キーワード：カルバート 液状化 地震時追従性 2016年熊本地震 遠心模型実験 有限要素解析 力覚センサ

## 1. 研究開始当初の背景

近年の地震において、アンダーパスの段差被害や目開きにより、高速道路が地震直後の緊急輸送路としての役割を果たせない事例が繰り返し報告されている<sup>1)~3)</sup>。これらの事例は、2004年新潟県中越地震<sup>1)</sup>、2011年東北太平洋沖地震<sup>2)</sup>、2016年熊本地震<sup>3)</sup>において確認された(図1-1)。いずれも、傾斜地盤、液状化を誘発しやすい旧河道、軟弱地盤上のアンダーパスで発生し、基礎地盤が変状している<sup>4)</sup>。つまり、地質・地形条件、設計条件、外力条件が組み合わさった被害である。高速道路盛土は道路土工指針<sup>5)</sup>により重要度1と定められる。「道路としての通行機能に支障なし」とする地震時要求性能の障壁がこれらの被害である。

これらの被害が繰り返された背景には、盛土-アンダーパスの相互作用に焦点を置く既往研究と基礎地盤に起因する被害の実態との乖離があった。地中構造物は周辺地盤に対して見掛けの単位体積重量が小さく、地震時には周辺地盤と一体的に挙動すると考えられてきた<sup>6)</sup>。本研究ではこの性質を地震時追従性と新たに定義する。この地震時追従性により地中構造物は地震時被害が生じにくいと考えられ、国内外の地震時被害調査からも明らかな傾向である<sup>6),7)</sup>。しかし、1995年の兵庫県南部地震においてアンダーパスの大崩壊が報告された<sup>8)</sup>ことを契機に、アンダーパス躯体の地震時損傷メカニズムを解明する研究が主流となった<sup>9)</sup>。

本研究では、基礎地盤-アンダーパス-盛土の全体系は地震時追従性をいかに失い、交通機能を損なうか、という問いを核心に据えて、研究の流れを転換する。一連の研究成果により、近年の地震において躯体の降伏を主因とする被害は報告されていない<sup>1)~4)</sup>。一方で、段差や目開き被害は盛土や基礎地盤の変形を原因とするため、視座の転換が必要である。すなわち、基礎地盤-アンダーパス-盛土の動的相互作用の解明が求められている。



図1 アンダーパスにおける段差・目開き被害：a) 2004年新潟県中越地震<sup>1)</sup>における目開き，b) 2011年東北太平洋沖地震<sup>2)</sup>における目開きと土砂流入，c) 2016年熊本地震<sup>3)</sup>の段差被害

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、アンダーパスがいかに地震時追従性を喪失するか、そのメカニズムを三次元的に解明して、基礎地盤-アンダーパス-盛土全体系の交通機能を損なうパターン(図2)を体系化する。本研究グループ<sup>10)</sup>および七澤ら<sup>4)</sup>の研究を通じて、アンダーパスの段差被害や目開き被害は、基礎地盤の液状化や粘土地盤の変形を原因とすることが明らかになっている。この事例を踏まえて、アンダーパスが基礎地盤の液状化や軟弱地盤の変形に寄与し、全体系の地震時追従性を喪失しているとの仮説を立て、この仮説を模型実験、数値解析により検証する。

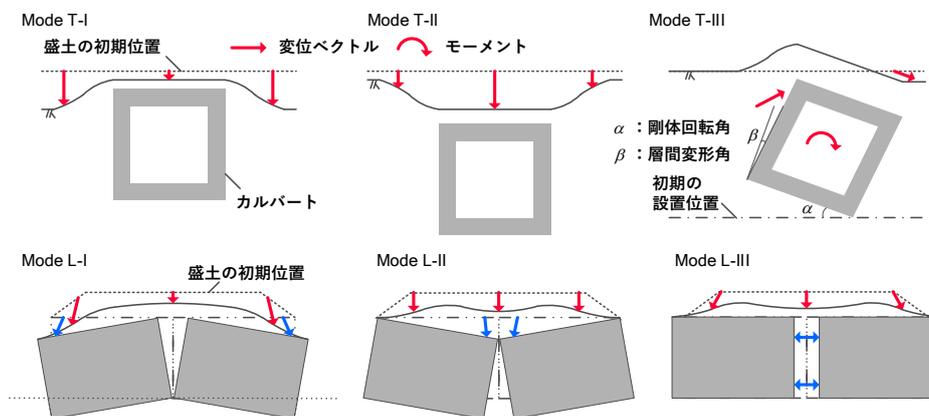


図2 交通機能を損なう基礎地盤-アンダーパス-盛土の推定変形モード

### 3. 研究の方法

ボックスカルバートの目開き被害の発生メカニズムを理解するためには、盛土・カルバート・基礎地盤の複雑な相互作用をモデル化した実験的・解析的検討が不可欠であると考えられる。

まず、本研究では過去の地震時被害に関する調査を行い、被害の形態、設計条件、地質条件等を整理した。被害の程度と設計諸元の関係を分類し、代表的な設計条件を抽出し、それらの条件と実験条件の制約を満足するカルバート模型を設計した。このカルバート模型に対して、軟弱地盤、液状化層を有する基礎地盤にそれぞれ建設されたカルバートを含む盛土模型に対する動的遠心力载荷実験を実施した。

つぎに、実施した動的遠心力载荷実験と既往の研究のレビューから、ボックスカルバートの直下において、液状化が進行しやすいとの仮説を立て、これを数値解析から説明することを試みた。土水連成弾塑性有限要素法による動的解析を実施し、排水条件と、液状化層厚の異なるボックスカルバート軸方向の地震時挙動を調べた。

さいごに、カルバートと周辺地盤の応力伝達状態の変化から、地震時追従性を計測的に評価可能か検証することを目的に、三軸力覚センサを用いた構造物に作用する直応力・せん断応力の計測方法の確立を試みた。

### 4. 研究成果

遠心模型実験では、5.0 m の液状化層を有する基礎地盤上に建設されたボックスカルバートを含む盛土模型を三次元にモデル化した (図 3)。基礎地盤の変状を観察することを目的に、ボックスカルバートの半断面をモデル化している。なお、本模型はカルバートのウィング壁までモデル化している。50G の遠心加速度を载荷し、1 Hz, 20 波の正弦波を最大入力加速度  $0.5 \text{ m/s}^2$ ,  $1.5 \text{ m/s}^2$  に調整して、この順に入力した。実験の結果、ボックスカルバートは全体的に沈下しつつ、坑口に向かって倒れこんだ。また、被災事例で確認された噴砂による継ぎ目部への土砂流入も再現された。基礎地盤内に設置した、土圧計、間隙水圧計から一次元の有効応力を算出し、初期有効応力と過剰間隙の関係から、液状化の進行程度を評価した。この結果から、カルバートと盛土では、カルバート直下で液状化がより進行し、カルバートの中では、坑口よりも継ぎ目直下で液状化が進行することが分かった。このことから、カルバートの存在が局所的に液状化を進行させる原因になったと推察される。この仮説を検証するため、数値解析を実施した。

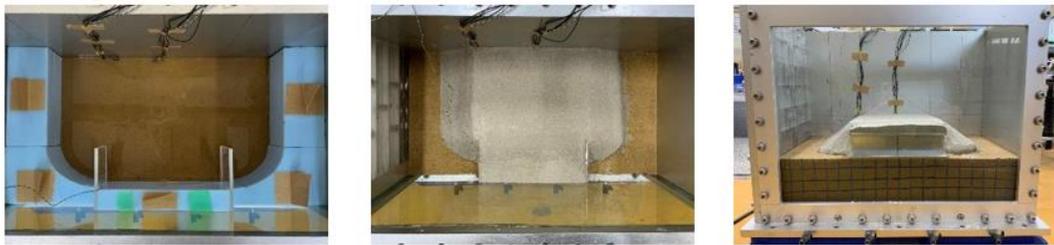


図3 ボックスカルバートを含む盛土模型の構築過程

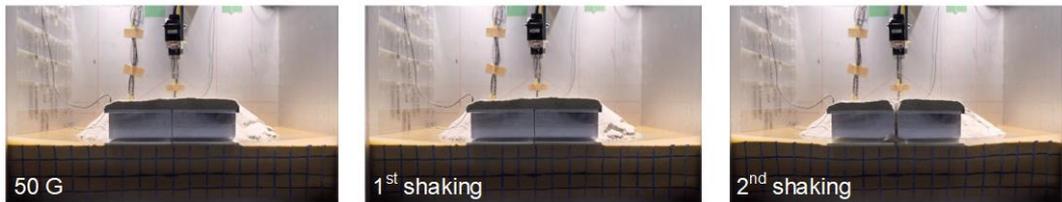


図4 地震動入力前後における目開き状態の変遷

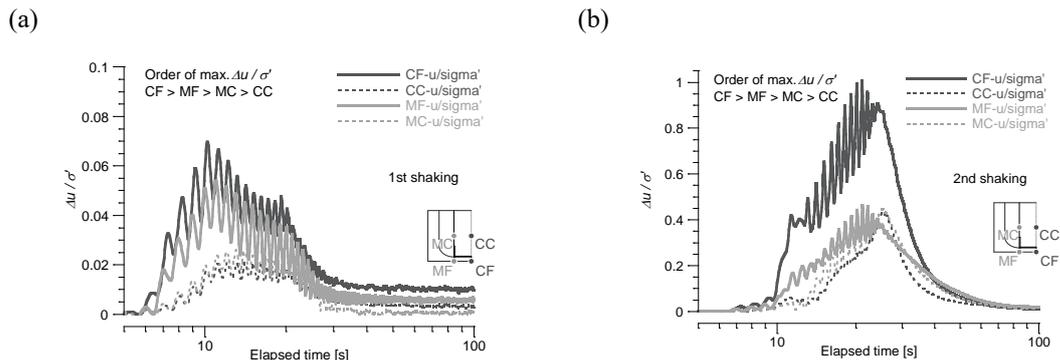


図5 過剰間隙水圧比の推移：(a) 最大入力加速度  $0.5 \text{ m/s}^2$ ，(b) 最大入力加速度  $1.5 \text{ m/s}^2$

実験結果から、カルバートが遮水壁として働き、過剰間隙水圧を高めたとの仮説を立て、数値解析によりその影響を調べた。解析モデルでは、カルバート底版の排水条件（完全排水、非排水の二条件）、液状化層厚の影響を調べた。本解析では、カルバートを弾性体として扱い、土被りは考慮せず、基礎地盤は弾塑性体として扱った。解析モデルは七澤ら<sup>4)</sup>の検討を参考にした。基礎地盤については、豊浦砂の物性値を使用し、その力学特性は、回転硬化の概念に基づく弾塑性構成則である Cyclic mobility model<sup>11)</sup>を用いてモデル化した。解析結果の一例を示す。

図 6 に、解析終了時点（地震動入力後、50 秒経過時点）の有効応力減少比に関するコンターを示す。有効応力減少比は  $1 - \sigma / \sigma_0$  ( $\sigma_0$ :初期有効応力,  $\sigma$ :任意の時刻における有効応力) で定義され<sup>12)</sup>、1 に近いほど液状化が進行し、-1 に近いほど初期よりも拘束圧が上昇し、密になったことをそれぞれ意味する。図より、カルバート直下が排水条件として作用する場合、非排水条件に比べて、液状化領域が殆ど消失することわかる。また、非排水条件かつ液状化層厚が浅い場合と深い場合で、カルバートの目開きのモードが異なった。違いが出た理由は、液状化層厚が 10 m のケースでは液状化領域が深さ方向に拡大し、カルバートの継ぎ目部が沈下することを基礎地盤が許容できたため、と考えられる。

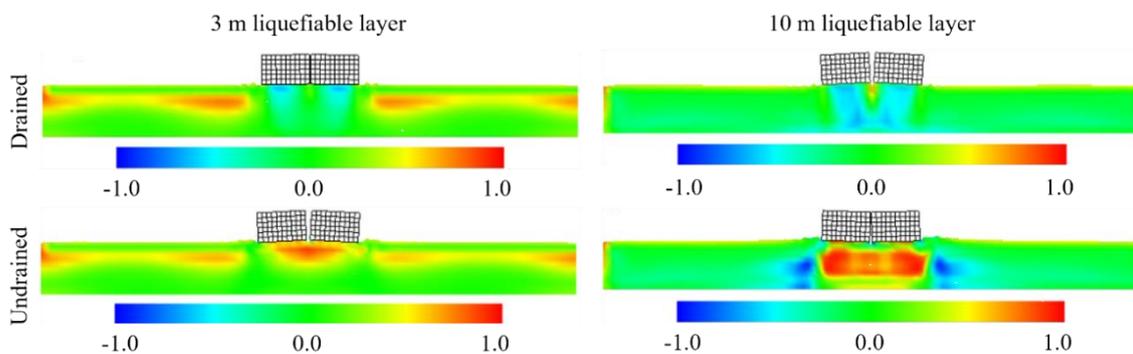


図 6 地震動入力後 50 秒経過時点の有効応力減少比のコンター図：カルバート底部を排水・非排水条件に設定した条件と、液状化層厚が 3.0 m, 10.0 m の条件を組み合わせた 4 通り。

一連の模型実験と数値解析により、カルバートが供用性を喪失する条件を概ね特定することができた。これらの現象を地震時追従性の概念と紐づけて説明するためには、盛土-構造物-基礎地盤の動的な相互作用、あるいは動的な応力の伝達状態が弾性的な範囲から、塑性的な範囲に移行する状態を計測することが必要と考えた。そこで、同一点で、直応力・せん断応力を計測可能なセンサをカルバートに搭載し、応力の伝達状態の遷移を明らかにする。ロボット工学で現在活用される三軸力覚センサは、この要件を満たしており、定圧一面せん断試験によりその精度を知らべた。実験結果の一例を以下に示す。

図 7 に、78.4, 156.8 kPa の垂直応力条件における、せん断応力と垂直応力の比の推移を示す。図より、小型三軸力覚センサから求めた応力比は、比較的良い一致を示している。繰返しせん断過程において、78.4 kPa のケースでは、せん断装置による計測機器と比較して、3 軸力覚センサが最大で 1.5 倍程度大きな応力比になるが、156.8 kPa のケースでは、最小で 0.5 倍程度の小さな応力比が計測される。この原因について、実験手順の影響や、センサと治具の干渉状態の調査など精査が必要である。

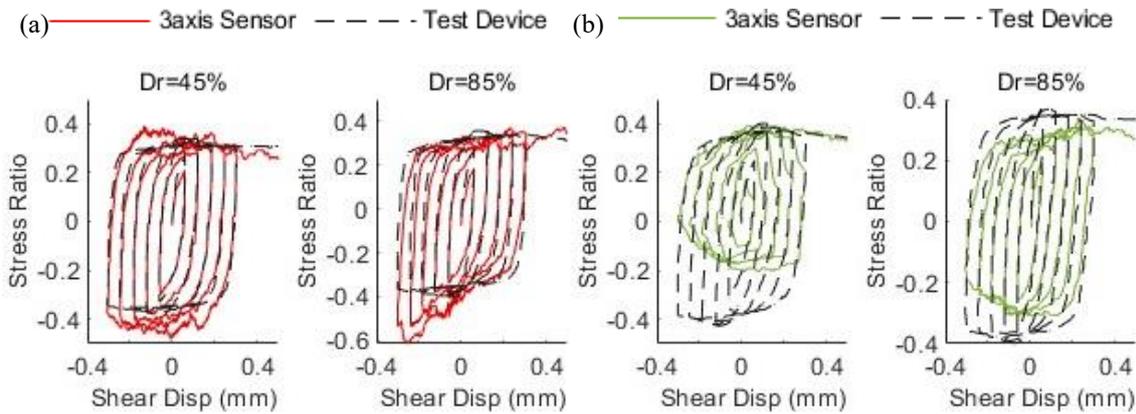


図7 2種の垂直応力条件におけるせん断過程の応力比の推移：(a) 垂直載荷圧 78.4 kPa, (b) 垂直載荷圧 156.8 kPa.  $D_r$  は豊浦砂の相対密度.

<引用文献>

- 1) Tokida et al., (2007): Damage level of road infrastructure and road traffic performance in the mid Niigata prefecture earthquake of 2004, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, JSCE, Vol. 24, No. 1, pp. 51-61.
- 2) 風間基樹：2011年東北地方太平洋沖地震被害の概要と地盤工学的課題，*地盤工学ジャーナル*，Vol. 7, No. 1 pp. 1-12.
- 3) Yuusuke Miyazaki, Shizuka Eshiro, Mutua Brian Mwendwa, Toshinori Yoshimura, Satoshi Tayama, Yu Fujiwara, Hirofumi Hisada, Hiroaki Hoshino: Traffic disruptions in box-type embankment-underpasses due to past earthquakes in Japan, 5th International Conference on Transportation Geotechnics, ID-480, Sydney, Australia, 2024-11.
- 4) 七澤ら：地震時の液状化の影響によるカルバートの挙動に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，第1219号，2022.
- 5) 社団法人日本道路協会：道路土工 カルバート工指針（平成21年度版），丸善出版，2010.
- 6) Owen, G., N., and Scholl, R., E. (1981): Earthquake engineering of large underground structures, Report No. FHWA/RD-80/195, Federal Highway Administration and Natural Science Foundation.
- 7) Kawashima, K. (2000): Seismic design of underground structures in soft ground – a review, In: Kusakabe, Fujita, Miyazaki (eds) *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, Balkema.
- 8) 本田国保, 足立正信, 石川博之, 長谷川俊昭：水平載荷によるボックスカルバートの変形性能の実験的研究，*コンクリート工学年次論文報告集*，Vol.21, No.3, pp.1261-1266, 1999.
- 9) 八ツ元仁：道路ボックスカルバートの耐震設計手法の確立に関する研究，京都大学博士学位論文，2018.
- 10) Miyazaki et al., (2022): Seismic behaviour of embankment containing multi-segmented rigid bodies placed on liquefiable ground, *Book of Abstracts of 15th WCCM-XV and APCOM-VIII*.
- 11) Zhang F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. And Nakai, K. : Explanation of cyclic mobility of soils, Approach by stress-induced anisotropy, *Soil and Foundations*, Vol.47, No.4, pp.635-648, 2007.
- 12) Oka, F., Hirokazu, Y., Sayuri, K., & Teppei, K. (2016), "New Evaluation Method for Liquefaction of Ground Using Dynamic Liquefaction Analysis Method and Its Application", *International Journal of Geomechanics*, ASCE.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuusuke Miyazaki, Shizuka Eshiro, Mutua Brian Mwendwa, Toshinori Yoshimura, Satoshi Tayama, Yu Fujiwara, Hirofumi Hisada, Hiroaki Hoshino
2. 発表標題 Traffic disruptions in box-type embankment-underpasses due to past earthquakes in Japan
3. 学会等名 5th International Conference on Transportation Geotechnics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Brian Mwendwa Mutua, Yuusuke Miyazaki
2. 発表標題 Two-dimensional longitudinal dynamic response of two-units box culvert on a liquefiable ground
3. 学会等名 8th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉村俊則, 宮崎祐輔
2. 発表標題 相対密度の異なる豊浦砂の定圧一面せん断過程における小型3軸力覚センサの応答
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉村俊則, 宮崎祐輔
2. 発表標題 豊浦砂の定圧繰返し一面せん断試験における小型3軸力覚センサの応答
3. 学会等名 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Brian Mwendwa Mutua, and Yuusuke Miyazaki
2. 発表標題 Effect of deep liquefiable ground on RBC(s) joint opening mechanism considering varied drainage conditions
3. 学会等名 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Brian Mwendwa MUTUA, Yuusuke MIYAZAKI
2. 発表標題 DRAINAGE AND UNIT-NUMBER EFFECT ON DYNAMIC RESPONSE OF RIGID BOX CULVERTS DUE TO LIQUEFACTION OF THE FOUNDATION GROUND
3. 学会等名 第16回日本地震工学シンポジウム論文集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Mutua Brian Mwendwa, Yuusuke Miyazaki
2. 発表標題 2D FE analysis on culvert longitudinal soil-structure interaction of 2-units box culvert on liquefiable ground
3. 学会等名 77th Annual Conference of Japan Society of Civil Engineers
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuusuke Miyazaki
2. 発表標題 Seismic behaviour of embankment containing multi-segmented rigid bodies placed on liquefiable ground
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics, 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------