

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18148

研究課題名(和文) 偏土圧を受けるヒンジ式プレキャストアーチカルバートの力学挙動の解明

研究課題名(英文) Elucidation of seismic behavior of hinge type precast arch culvert under unsymmetrical earth pressure condition

研究代表者

澤村 康生 (Sawamura, Yasuo)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：20738223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ヒンジ式プレキャストアーチカルバートの設計では、左右の土圧が等しい理想的な条件を前提としているが、実務においては坑口部のアーチカルバートに偏土圧が作用する場合がある。そこで本研究では、偏土圧条件下におけるアーチカルバートの地震時挙動について、遠心模型実験と有限要素解析により検討した。その結果、偏土圧に伴うアーチ部材の不安定な力学状態が、アーチ部材のねじれ変形を引き起こし、頂部ヒンジのずれや目地の開き、部材の曲げひび割れといった被害を引き起こすことを確認した。

研究成果の概要(英文)：In the design of the hinge type precast arch culvert, it is assumed that in the ideal condition, the right and left earth pressures acting on the culvert are equal. In practice, however, unsymmetrical earth pressure may act on the culvert at the mine mouth. In this study, the seismic behavior of the culvert under unsymmetrical earth pressure condition was investigated through centrifugal model tests and finite element analyses. As a result, it is confirmed that the unstable mechanical state of the culvert due to the unsymmetrical earth pressure causes the torsional deformation of the arch members, and the damages such as slippage and joint openings of top hinges and bending cracks of arch members.

研究分野：地盤工学

キーワード：ヒンジ式プレキャストアーチカルバート 偏土圧 加速度応答 遠心模型実験 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

ヒンジ式プレキャストアーチカルバートは、本体断面を分割し、主要部材をプレキャスト製品とすることで高い品質管理と工期の短縮を可能としたカルバートである。さらに、部材同士の連結位置にヒンジ機能を持たせることで部材の変形をある程度許容し、地盤反力を積極的に引き出すことで力学的に安定な構造となる。

一般に従来型のカルバートでは、常時に作用する静止土圧を基に設計が行われている。一方、ヒンジ式プレキャストアーチカルバートでは、Fig. 1に示すように、盛土の高さに応じてカルバートが変形するとして設計が行われている。これは、盛土高さが天端よりも大きい場合には、アーチ直上の鉛直土圧が卓越し、アーチ全体が扁平に変形する (Fig. 1 (b))。その結果、アーチ部材には静止土圧より大きな水平土圧が作用するという考えに基づいている。これにより同構造は、従来型のカルバートと比較して部材厚を小さくすることが可能である。

しかし実施工では、左右の地盤から等しい土圧が作用する理想的な条件ばかりではなく、偏土圧に起因すると考えられる不具合事例も発生している。さらに、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、坑口付近を中心に大きな被害が発生したが[安部・中村, 2014], これらの被災事例はいずれも偏土圧の影響を強く受けたと考えられる (Fig. 2)。

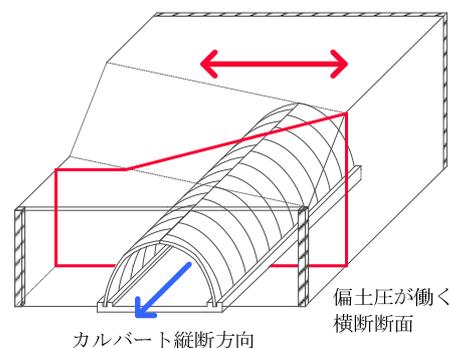
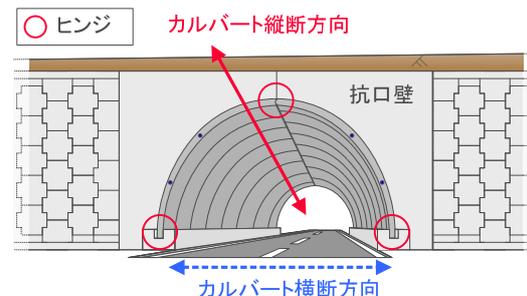
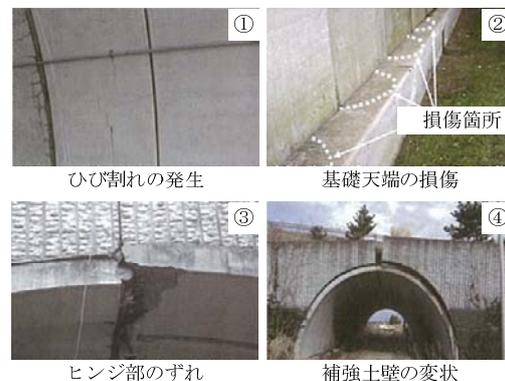
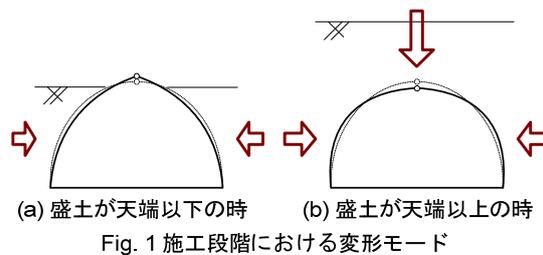
ボックスカルバートに代表される従来型カルバートでは、土被りと断面の大きさにより部材厚が決定されることから、偏土圧に対して余裕度の高い構造であると予想される。一方、ヒンジ式プレキャストアーチカルバートは、周辺地盤の地盤反力を有効に活用する設計思想に基づいているため、周辺地盤の影響を大きく受ける構造であり、設計における前提が成り立たない条件について、十分に検討する必要がある。

2. 研究の目的

ヒンジ式のプレキャストアーチカルバートは、従来型のボックスカルバート同様、高速道路等の高規格道路と立体交差させるために用いるのが一般的である。カルバートの力学的な安定性を考えた場合には、盛土の橋軸方向に対して直角にカルバートが設置されていることが望ましいが、実際には盛土の橋軸方向とカルバートが平面交差角を有し、坑口部において不均等な上載荷重 (偏土圧) がカルバートに作用するような構造が多い。

上述した通り、ヒンジ式プレキャストアーチカルバートは、ヒンジ機能により部材の変形を許容し、周辺地盤の反力を積極的に活用する構造である。そこで本研究では、特に地震時の挙動に着目し、偏土圧を受ける条件下における同構造の力学挙動を解明する。

地中構造物の耐震性を議論する際には、地震動の伝搬方向とカルバートの設置方向を



関連させて考えるのが一般的である。ここでは、Fig. 3に示す通り、地震動の方向と盛土の延長方向が同一である場合をカルバート横断方向、直角である場合をカルバート縦断方向とする。Fig. 4に盛土の延長方向とカルバートの設置方向が射角を有する場合の模式図を示す。同図より、坑口付近においては、カルバート横断方向・縦断方向それぞれについてカルバートに偏土圧が作用していることがわかる。そこで本研究では、カルバート横断方向・縦断方向のそれぞれについて、偏土圧を受ける場合の地震時挙動を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、京都大学防災研究所所有の遠心力載荷装置を用いて、カルバート横断方向・縦断方向それぞれについて、遠心力 50G 場での振動台実験を実施した。また、カルバート縦断方向については、弾塑性有限要素法を用いた数値解析を併せて実施した。

3.1 カルバート横断方向

Fig. 5 に実験模型の概略図を示す。本実験では、幅 630 mm × 高さ 500 mm × 奥行 150 mm の剛土槽を用いた。実験ケースは土被りと偏土圧の有無をパラメータに決定した。具体的には、カルバート直上の土被りは 1.0 m と 4.0 m の 2 種類とし、左右の盛土高さが等しいケースを Case-1_Even, Case-2_Even, 異なるケースを Case-1_Uneven, Case-2_Uneven とした (Fig. 5)。カルバート模型はアルミ合金を使用し、RC 製の実構造と曲げ剛性が同程度になるように部材厚 ($t = 3$ mm, プロトタイプ換算で 150 mm) を決定した。地盤材料には江戸崎砂を使用した。入力波形には、1Hz テーパー付き正弦波 20 波を、最大加速度を 0.5 m/s^2 から 4.0 m/s^2 まで、 0.5 m/s^2 ずつ増大させながら計 8 回入力した。

3.2 カルバート縦断方向

(1) 遠心模型実験

Fig. 6 に実験模型と計測項目の概略図を示す。本実験では、幅 450 mm × 高さ 340 mm × 奥行 300 mm の剛土槽を用いた。実験ケースは、盛土上部道路に対してカルバートが直角に設置されているケース (Case-Even), 一定の射角を有しているケース (Case-Uneven) とした。抗口壁のモデル化に際しては、実構造の特徴を考慮するため、抗口壁は二枚の亚克力板によって中央で分割された壁面構造とし、アルミ部材を用いて帯鋼補強土壁でモデル化した。

カルバート模型は、アーチ部材を左右に組み合わせて、実施工と同様の千鳥構造を模擬した。アーチ模型には、横断方向の実験と同様にアルミ合金を用いた。その他、模型地盤の作製方法等についてはカルバート横断方向の実験と同様である。入力波形には、1 Hz, 20 波のテーパー付き連続波とし、1 ステップごとに最大入力加速度を 0.5 m/s^2 ずつ増やし、最大入力加速度を $0.5 \sim 5.0 \text{ m/s}^2$ とする計 10 ステップにより加振した。

(2) 数値解析

カルバート縦断方向の地震時挙動について、カルバート上部の盛土形状が振動特性に与える影響を検討するため、3 次元弾塑性有限要素解析を実施した。Fig. 7 に解析メッシュと諸条件を示す。本解析においては、土被り 1.0 m を縦断方向に一定に施した Case-1, 最大土被り 5.0 m となるよう上載盛土を設けた Case-2 の 2 ケース実施した (Fig. 7)。アーチ断面は、東日本大震災における被災が集中

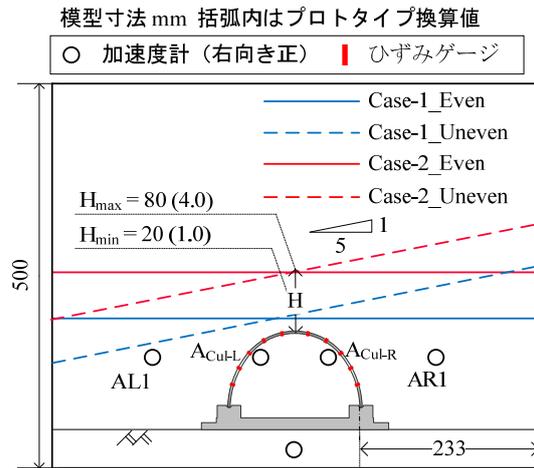


Fig. 5 カルバートを含む盛土模型の概略図

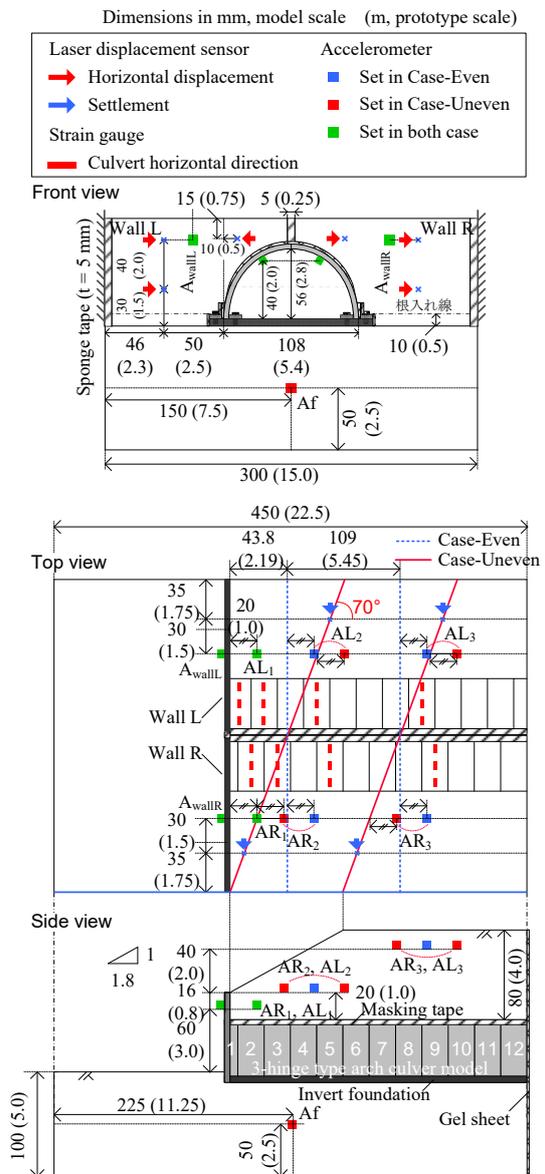


Fig. 6 実験模型と計測項目の概略図

した断面寸法を分析し、内空幅 10.0 m, 最大土被り 5.0 m の条件で設計した。アーチ部材は、実施工と同様に千鳥配置し、部材同士の縦断方向の連結は Spring 要素によりモデル化

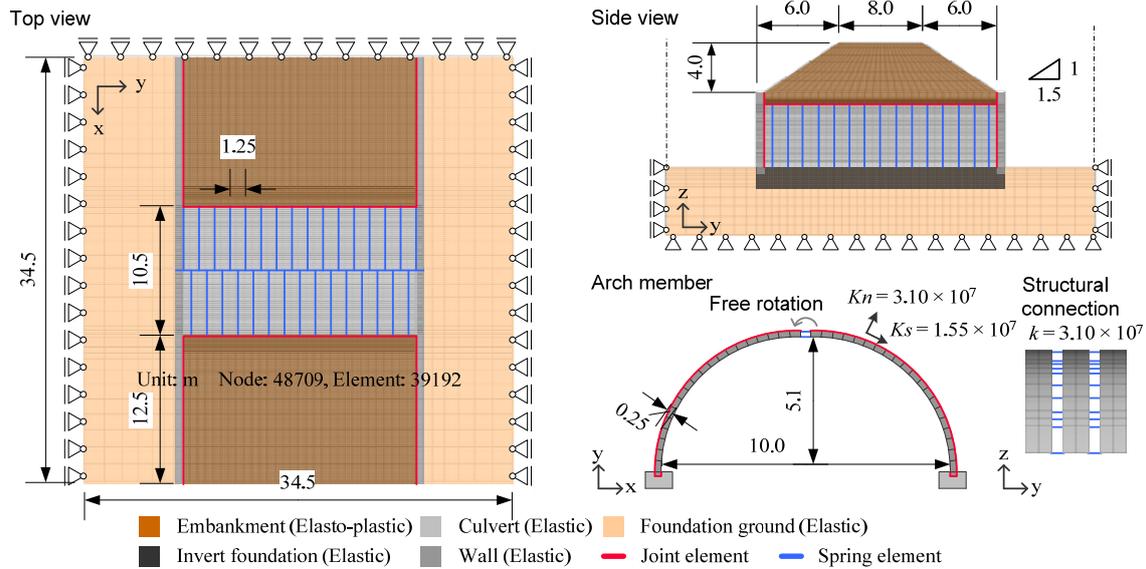


Fig. 7 解析メッシュと諸条件

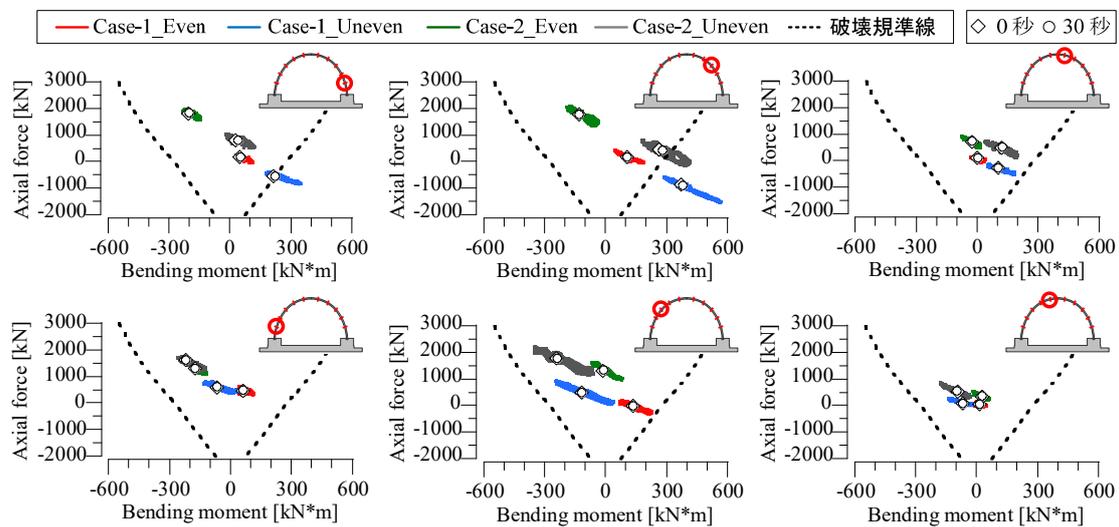


Fig. 8 曲げモーメントー軸力関係

した。Spring 要素の剛性は、部材同士が剛結されていることを前提に、アーチ部材と同等の剛性とした。アーチ頂部のヒンジは、回転剛性ゼロの Spring 要素とすることでモデル化した。入力波には、基本的な地震時挙動を把握することを目的に、1 Hz 3 波、最大振幅 3.0 m/s² の正弦波を用いた。

4. 研究成果

4.1 カルバート横断方向

Fig. 8 に最大加速度 4.0 m/s² の正弦波を入力した際の曲げモーメントー軸力関係を示す。同図には、参考のため、軸力の影響を考慮した場合の RC 部材における終局曲げモーメントを併記する。

偏土圧を受ける場合、脚部や頂部に比べて肩部において加振前からの軸力や曲げモーメントの変化量がより大きい。その結果、相対的に土被りの大きい右側では内空側への曲げモーメントが増大し、負の軸力が生じる。特に Case-1_Uneven の右側では、肩部から脚

部においても軸力が小さく、さらに内空側への曲げモーメントが大きい。破壊規準線と比較すると、Case-1_Uneven と Case-2_Uneven の右肩部において、アーチカルバートが不安定な状態になっているといえる。ただし、土被りの増加に伴って、アーチカルバートは安定することがわかる。

つまり、偏土圧を受ける場合、アーチカルバートは土被りの大きい側でアーチ内空側の曲げが卓越し、土被りの小さい側でアーチ外空側の曲げが卓越するモードとなる。このとき、アーチの土被りが小さいと、アーチに生じる軸力が減少するため、より不安定な状態となることが明らかとなった。

4.2 カルバート縦断方向

(1) 遠心模型実験

Fig. 9 に、坑口付近のアーチ部材に発生する加振後の断面力分布を示す。ここでは、上載盛土法尻直下に位置する Ring 2L と Ring 3R を組み合わせるもので評価を行う。Fig. 9

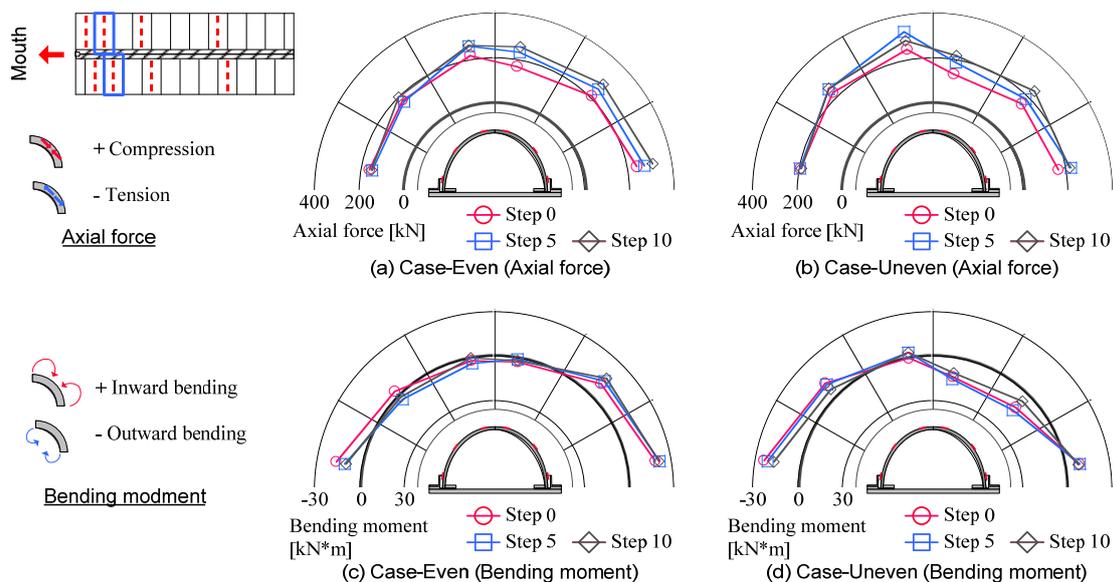


Fig. 9 坑口付近のアーチ部材に発生する加振後の断面力

(a), (b) より、アーチ部材に発生する軸力は、繰り返しの加振に伴い、初期の軸力分布状態と相似形に増加する傾向がみられる。また、Case Uneven では、土破りが相対的に大きい Wall R 側で軸力が小さくなっていることが確認できる。さらに、Fig. 9 (c), (d) より、Case Uneven では、Ring 3R において内空側に大きな曲げモーメントが発生しており、偏土圧の影響を大きく受けていると考えられる。これらの曲げモーメントおよび軸力の発生状況は、カルバート横断方向の実験で得られた傾向と同様である。

Fig. 10 に、最大加速度 4.0 m/s^2 の正弦波を入力した際における、盛土法肩 (AR3, AL3) で計測した加速度応答を示す。Case Even では、AR3, AL3 の応答が概ね一致している。一方、Case Uneven では、AR3 の応答が AL3 の応答より大きく、位相にもずれが生じている。それぞれの応答加速度についてフーリエスペクトルを算出し、その応答を比較すると、AR3の方がAL3より1 Hzで16%、3 Hzで25%大きい。このことから、カルバートの左右で上載盛土が異なる場合には、カルバート縦断方向の地震動に対してもその応答が異なることが明らかとなった。

(2) 数値解析

Fig. 11 に、Case-1, 2 について、縦断方向の連結部に配した Spring 要素における軸力の時刻歴を示す。Fig. 11 (a) より、Case-1 は坑口に向かうにつれて加振中に生じる軸力の振幅が小さくなる傾向を示した。一方 Fig. 11 (b) より、Case-2 では各位置における軸力の大小関係は Case-1 と同様であるが、振幅は Case-1 の 2 倍以上となった。盛土形状を考慮すると、Case-1 より Case-2 の方が、盛土からアーチに働く拘束圧がより大きくなると考えられる。したがって、Case-2 では盛土から大きな周面せん断力が作用し、その結果、より大きく軸力変動を示したと考えられる。

軸力の残留値は、Case-1, 2 とともに、いずれの位置も引張りとなる。それぞれのケースに注目すると、Case-1 においては、Pos 1~3 の残留値は同程度であったのに対して、Case-2 では、Pos 3 のみその他に比べて小さい。連結部の軸力が引張り方向に残留するのは、縦断方向の加振により盛土が両側にはらみだすように変形することで、アーチが坑口側に傾くためであると考えられる。そして、この影響は上載盛土を有する Case-2 において顕著であった。これは、上載盛土を有する Case-2 においてより大きく盛土が変形するためと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) 宮崎祐輔, 澤村康生, 岸田 潔, 木村亮: 盛土形状をパラメータとしたカルバート縦断方向の動的遠心模型実験, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol.73, No.4, pp.429-441, 2017. <https://doi.org/10.2208/jscejge.73.429>
- 2) Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M., 2017. Evaluation of dynamic behavior of embankment with precast arch culverts considering connecting condition of culverts in culvert longitudinal direction, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol.5, No.2, pp.95-100. <http://doi.org/10.3208/jgsspp.v05.020>

[学会発表] (計 11 件)

- 1) Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Dynamic Centrifuge Model Tests on the Stress State of the Culverts Due to Patterns of Embankment Shape, *Proc. of the 2nd Asian Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ASIAFUGE 2016)*, pp.208-213, Shanghai, China, 2016-12.

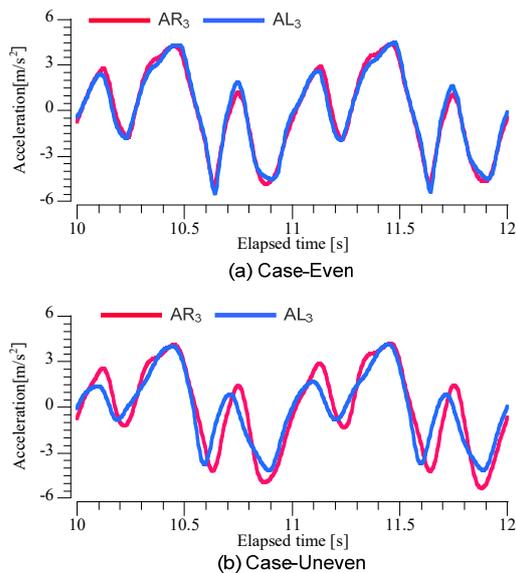


Fig. 10 肩 (AR3, AL3) における加速度応答の時刻歴

- 2) 宮崎祐輔, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: 不均一な上載荷重を受けるヒンジ式アーチカルバート縦断方向の動的遠心模型実験, 平成 28 年度 京都大学防災研究所研究発表講演会, 2017-2.
- 3) Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Dynamic centrifuge model tests on seismic performance in culvert longitudinal direction of precast arch culverts, 2nd JSCE CICHE Joint Workshop, Tokyo, Japan, 2017-5.
- 4) 宮崎祐輔, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: 偏土圧の影響を受けるアーチカルバートの縦断方向の地震時挙動に関する遠心模型実験, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1075-1076, 名古屋市, 2017-7.
- 5) 宮崎祐輔, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: 偏土圧の影響に着目した 3 ヒンジ式アーチカルバートの横断方向の地震時挙動, 第 72 回土木学会年次学術講演会, III-377, pp.753-754, 福岡市, 2017-9.
- 6) Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Seismic performance in culvert longitudinal direction of the hinge type precast arch culverts due to the uneven overburden, Proc. of the 30th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, KU42, Taipei, Taiwan, 2017-11.
- 7) 塩梅恭平, 宮崎祐輔, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: 偏土圧を受ける 3 ヒンジ式アーチカルバートの動的遠心模型実験ーカルバートと地盤の応答加速度の関係ー, 平成 30 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 神戸市, 2018-6. (発表決定済み)
- 8) Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Dynamic behavior of three-hinge type precast arch culverts installed in embankment with various patterns of overburden in culvert

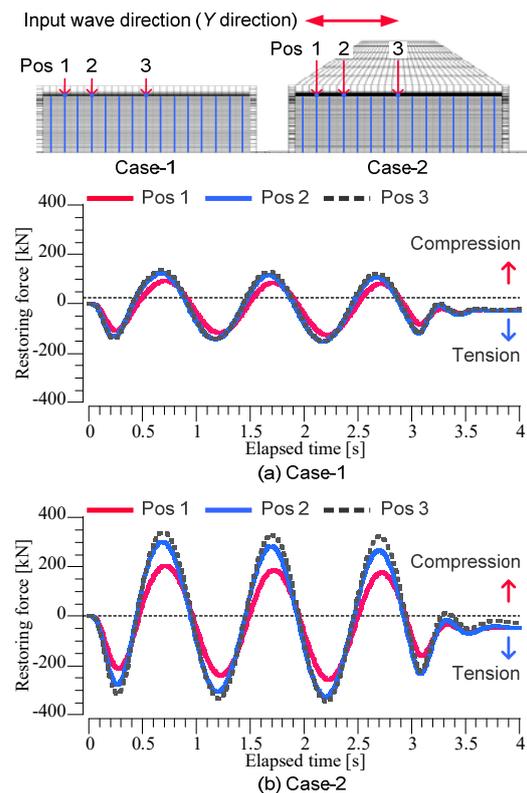


Fig. 11 縦断方向の連結部に発生する軸力の時刻歴

- 9) longitudinal direction, Proc. of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, London, United Kingdom, 2018-7. (発表決定済み)
- 10) 宮崎祐輔, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: 偏土圧の影響を受けるアーチカルバートの縦断方向の地震時挙動に関する遠心模型実験, 第 53 回地盤工学研究発表会, 高松市, 2018-7. (発表決定済み)
- 11) 塩梅恭平, 宮崎祐輔, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: 偏土圧を受ける 3 ヒンジ式アーチカルバートの動的遠心模型実験ー曲げモーメント・軸力関係ー, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 福岡市, 2018-9. (発表決定済み)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://geomechanics.kuciv.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

澤村 康生 (Yasuo Sawamura)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20738223