

# 3ヒンジアーチカルバートの地震時挙動解析

波多野 陽香<sup>1</sup>・土門 剛<sup>2</sup>・西村 和夫<sup>2</sup>・瀬戸 英俊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: hatano-haruka@ed.tmu.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>3</sup>ヒロセ株式会社 補強土事業本部 (〒135-0016 東京都江東区東陽4-1-13)

3ヒンジアーチカルバートは主に施工性に優れた構造物で、近年施工例も増えていたが、2011年の東北地方太平洋沖地震では地震被害を受けた。しかし、3ヒンジアーチカルバートの地震時挙動は明らかになっていないため、その被害原因を特定することが難しい。これは、今後の補強や再構築を行う上で重要な課題となっている。

本研究では、3ヒンジアーチカルバートの地震時挙動特性を明らかにすることを目的としている。3ヒンジアーチカルバート本体、基礎部、地盤および盛土を三次元FEMでモデル化し、動的解析を行うことにより、地震時のカルバートの挙動の検証を行った。その結果、カルバートの基礎的な挙動特性を明らかにできたとともに、地震被害が顕在化したアーチ肩部、クラウン部被害要因に関する知見も得られた。

**Key Words :** 3 hinge arch culvert, behavior at earthquake, dynamic analysis,

## 1. はじめに

3ヒンジアーチカルバートは、短スパン橋梁や現場打ちボックスカルバートに代わるものとして開発されたアーチ構造物(図-1)である。プレキャストで作成された主要部材を、左右交互に組み立てることによりアーチを形成するため、作業性の向上や工期の大幅な短縮が可能となる<sup>1)</sup>。3ヒンジアーチカルバートは主に施工性に優れた構造物であるため、施工例も増えていたが、2011年の東北地方太平洋沖地震では、ひび割れやはく離などの地震被害を受けた<sup>2)</sup>。しかし3ヒンジアーチカルバートの地震時挙動は明らかになっておらず、その被害原因を特定することが難しい。これは、今後の補強や再構築を行う上で重要な課題となっている。

本研究では、カルバートの地震時挙動を再現すること

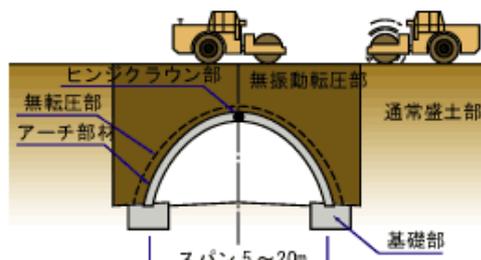


図-1 3ヒンジアーチカルバート概略図

により地震時挙動特性を明らかにすることを目的としている。本論文では、3ヒンジアーチカルバート本体、基礎部、地盤および盛土を三次元FEMでモデル化し、動的解析を行うことにより、地震時における3ヒンジアーチのカルバートの挙動の検証を行った。

## 2. 構造概要

図-2に本研究の対象である3ヒンジアーチカルバートの構造図を示す。本構造物はプレキャストアーチ部材を組み立ててアーチ構造を形成し、その両脚部およびクラウン部をヒンジ構造としたものである。その周辺には盛土を施工する。

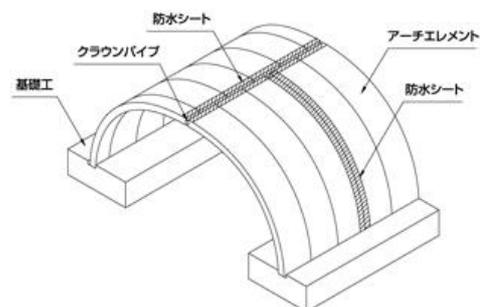


図-2 構造概要

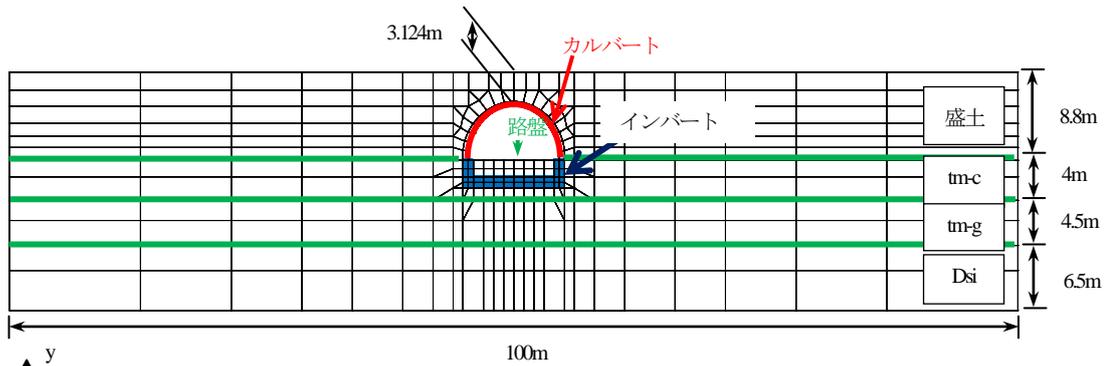


図-3 解析モデル横断面

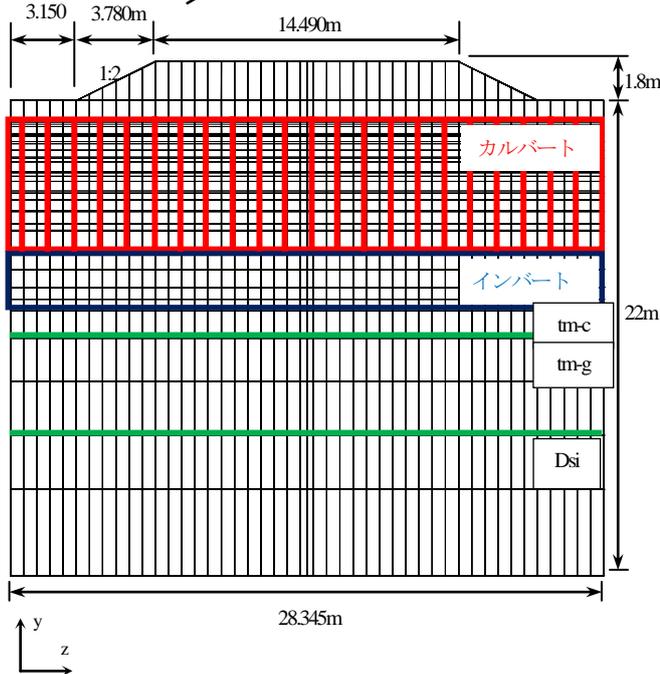


図-4 解析モデル縦断面

### 3. 解析手法

本研究では後述する部材間、部材-地盤間の滑りはく離モデルの妥当性の検証と構造系の基本的な動的挙動の把握を目的として、地盤を線形弾性として時刻歴応答解析を行った。

#### (1) 解析ケースおよび入力地震波

解析ケースは加振方向がトンネルモデル底面に対して横断方向(横断方向加振)と縦断方向(縦断方向加振)の2ケースとした。入力地震波は最大加速度が100galで16波長の正弦波を用いた。正弦波の振動数は、各ケースの卓越振動数を用いた。

#### (2) 解析モデル寸法および物性値

図-3、図-4に解析モデルの横断面図および縦断面図をそれぞれ示す。地盤はカルバート脚部から下方にそれぞれ層厚4m、4.5m、6.5mでtm-c(礫混じり粘土)、tm-g(玉石混じり砂礫)、DSi(細粒砂岩)の3層構造とした。盛土は、縦断

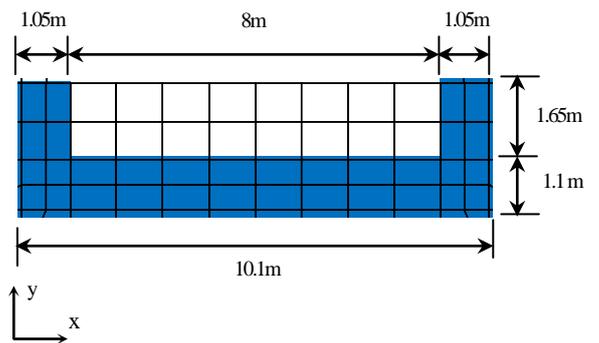


図-5 インバート概要

表-1 盛土・地盤物性値

|      | G[MN/m <sup>2</sup> ] | γ[kN/m <sup>3</sup> ] | v    | c[kN/m <sup>2</sup> ] | φ[deg] |
|------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|--------|
| 盛土   | 18.5                  | 18                    | 0.35 | 20                    | 35     |
| 路盤   | 27.8                  | 19                    | 0.35 | 20                    | 37.5   |
| tm-c | 7.4                   | 16                    | 0.35 | 20                    | 30     |
| tm-g | 18.5                  | 18                    | 0.35 | 20                    | 35     |
| Dsi  | 37                    | 20                    | 0.35 | 20                    | 40     |

表-2 カルバート・基礎部物性値

|       | Ec[G/m <sup>2</sup> ] | γ <sub>c</sub> [kN/m <sup>3</sup> ] | v   | 減衰比  |
|-------|-----------------------|-------------------------------------|-----|------|
| カルバート | 29.5                  | 25                                  | 0.2 | 0.05 |
| 基礎    | 28                    | 25                                  | 0.2 | 0.05 |

方向に斜面を設け、勾配は1:2とした。

カルバートは内空幅8.8m、内空高さ5.3m、覆工厚を250mmとした。基礎部は深さ2.75m、幅10.1mのインバート構造とし、内側に深さ1.65mの路盤を設置した(図-5)。

表-1、表-2に盛土・地盤およびカルバート・基礎部の物性値をそれぞれ示す。なお盛土、路盤、地盤の減衰比は0.1とした。

### (3) 解析モデルにおける滑りはく離および回転ばね

本研究の対象である3ヒンジアーチカルバートはアーチ部材を千鳥配置に組み立て、クラウン部および脚部で突合せ構造としている。突合せ部はヒンジ構造とみなし、回転を許容している。したがって、隣り合うアーチ部材間では滑りはく離が生じ、突合せ部では回転が生じる。これらのカルバートの構造特性を詳細に再現するために、隣り合うアーチ部材間および盛土-アーチ部材間に滑りはく離を再現する非線形ばね要素(以下すべりを再現するばね:滑りばね, はく離を再現するばね:はく離ばね)を用いた。またヒンジ部では回転抵抗を再現する非線形形のばね要素(回転ばね)を用いた。

滑りばね, はく離ばねの物性値を表-3, 表-4に示す。また, 滑りばね, はく離ばね, 回転ばねの構成則を図-6 ~ 図-8に示す。

表-3 滑りばね物性値

|      | 降伏バネ反力<br>$F[kN]$ | 降伏変位<br>$u[m]$ |
|------|-------------------|----------------|
| 滑りばね | 30                | 0.001          |

表-4 はく離ばね物性値

|       | ばね剛性<br>$[kN/mm]$ |
|-------|-------------------|
| はく離ばね | 295               |

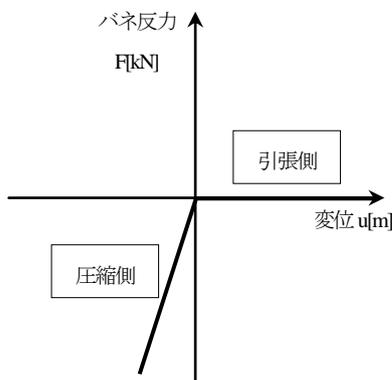


図-6 はく離ばね構成則

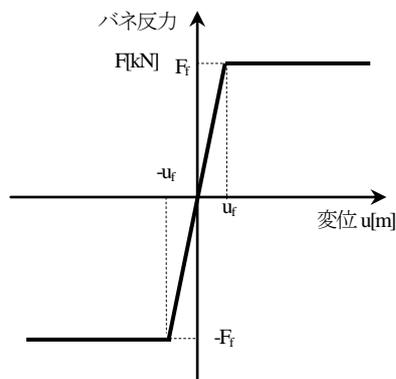


図-7 滑りばね構成則

### 4. トンネル横断方向加振解析結果

#### (1) 境界条件

表-5に横断方向加振ケースの境界条件を示す。また, 図-9に各境界の概要図を示す。横断方向は半無限を想定しているので水平ローラーとした。底面は完全固定とした。

#### (2) 入力地震波

図-10に入力地震波として用いた正弦波の波形を示す。16波長の正弦波で5波目に最大加速度をとり, 最後の1波長は収束して0とした。

表-5 境界条件

|     | x 並進 | y 並進 | z 並進 | x 軸<br>回転 | y 軸<br>回転 | z 軸<br>回転 |
|-----|------|------|------|-----------|-----------|-----------|
| 横断面 | 自由   | 固定   | 自由   | 固定        | 固定        | 固定        |
| 縦断面 | 自由   | 固定   | 自由   | 固定        | 固定        | 固定        |
| 底面  | 固定   | 固定   | 固定   | 固定        | 固定        | 固定        |

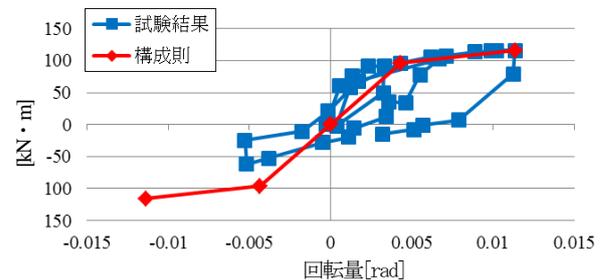


図-8 回転ばね構成則

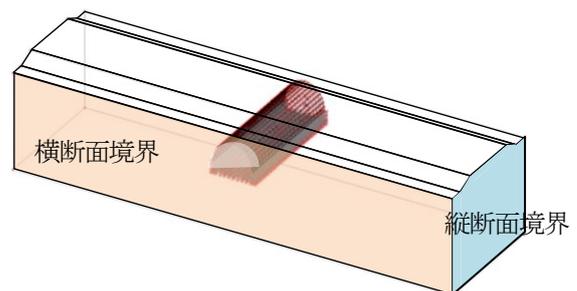


図-9 境界構造図

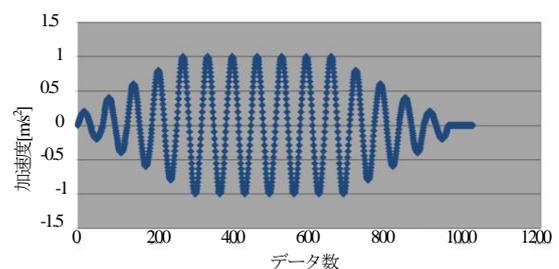


図-10 入力正弦波

### (3) カルバート本体断面力コンター図

本解析では、カルバート本体のモデル化において平面要素であるシェル要素を用いた。この要素は解析モデル上厚さがなく、物性値として厚さを入力する要素である。そのため結果が断面力で表され、各断面力は要素座標系で表される。図-11に解析に用いたカルバートの要素(シェル要素)の要素座標系を示す。また、図-12に要素座標系における各断面力について示す。

#### a) 軸力

$N_x$ (トンネル周面方向軸力)および $N_z$ (トンネル奥行き方向軸力)の最大値および最小値のコンター図について示す。なお $N_x$ 、 $N_z$ は正が引張で負が圧縮である。

図-13に $N_x$ (トンネル周面方向軸力)のコンター図を示す。アーチ肩部において卓越していることがわかる。これは、地盤のせん断変形に追従してカルバートがせん

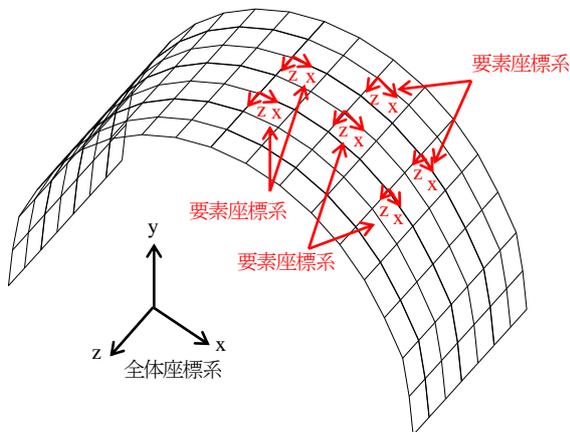


図-11 カルバート要素(シェル要素)座標系

断変形して卓越したと考えられる。

図-14に $N_z$ (トンネル縦断方向軸力)のコンター図を示す。 $N_x$ と比較して1オーダー小さいが脚部を支点とするトンネル縦断方向の弱いアーチ型分布の引張り力および圧縮力が発生していることが分かる。これは、横断方向に加振していても、アーチ部材の千鳥配置のため、わずかにトンネル縦断方向に変位が生じているためである。

#### b) 曲げモーメント

$M_x$ (周面方向曲げモーメント)および $M_z$ (縦断方向曲げモーメント)のコンター図について示す。なお、最大値と最小値で発生個所及び値が同様だったので結果は最大値のみ載せた。

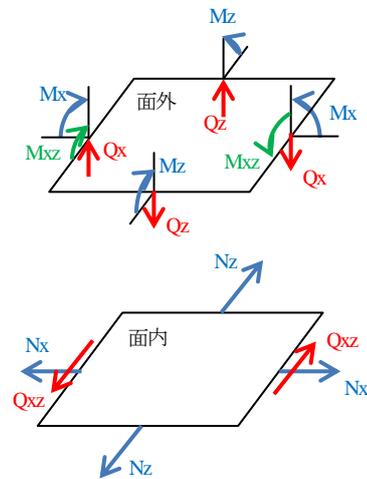


図-12 カルバート要素(シェル要素)断面力概要

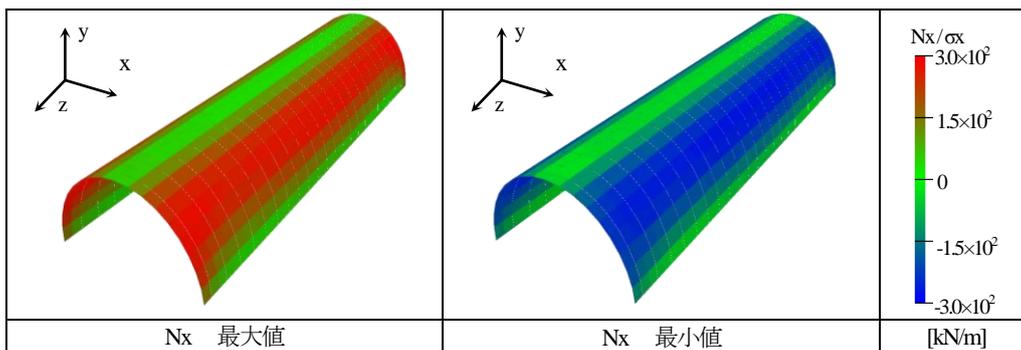


図-13  $N_x$ (横断方向加振)

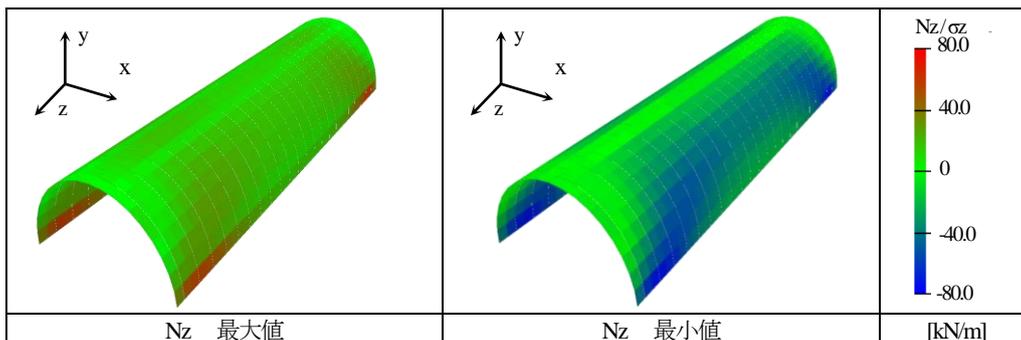


図-14  $N_z$ (横断方向加振)

図-15に $M_x$  (周面方向曲げモーメント)および $M_z$  (縦断方向曲げモーメント)の絶対値のコンター図を示す。 $M_x$  および $M_z$ ともアーチ肩部において、卓越していることが確認できる。これは、軸力と同様に地盤のせん断変形に追従してカルバートが変形し、アーチ肩部において断面力が卓越したと考えられる。また、ヒンジ構造の脚部において曲げモーメントが発生していることが確認できる。これは、ヒンジ構造ではあるが回転ばねを設置したため、そのばねの回転抵抗により発生したと考えられる。

c) せん断力

$Q_{xz}$  (面内せん断力),  $Q_x$  (周面方向の面外せん断力)および $Q_z$  (縦断方向の面外せん断力)のコンター図を示す。なお、最大値と最小値で発生個所及び値が同様だったので $Q_x$  (周面方向の面外せん断力)および $Q_z$ (縦断方向の面外せん断力)の結果は絶対値の最大のみを示す。

図-16に $Q_{xz}$  (面内せん断力)のコンター図を示す。 $N_x$ と比較して1オーダー小さいが中央付近および

坑口付近のクラウン部で断面力小さく、その他の箇所では断面力大きいことがわかる。これは、盛土の土被りが小さい箇所では変形が大きく、土被りが大きい中央部と坑口付近のクラウン部は変形が小さくなったことによるものと考えられる。

図-17に $Q_x$  (周面方向の面外せん断力)および $Q_z$ (縦断方向の面外せん断力)のコンター図を示す。 $Q_x$ に関しては、脚部において卓越していることがわかる。これは、横断方向加振のため、カルバートと底面との角度が90度に近い箇所ではせん断力が卓越したことによるものと考えられる。また、曲げモーメントと同様に回転ばねにより回転抵抗が発生した事によるものと考えられる。 $Q_z$ に関しては、 $Q_{xz}$ と同様に中央部および坑口付近で断面力が小さく、それ以外の箇所で大いことがわかる。これは、 $Q_{xz}$ と同様に斜面による土被りの違いによるものと考えられる。

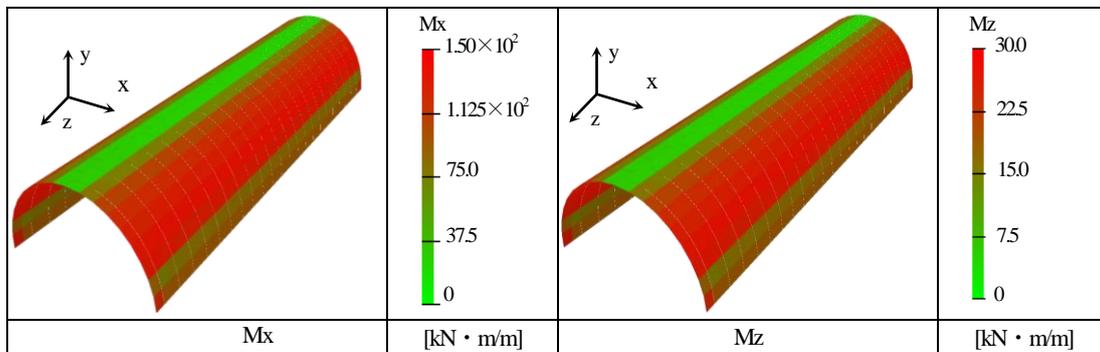


図-15 曲げモーメント(横断方向加振)

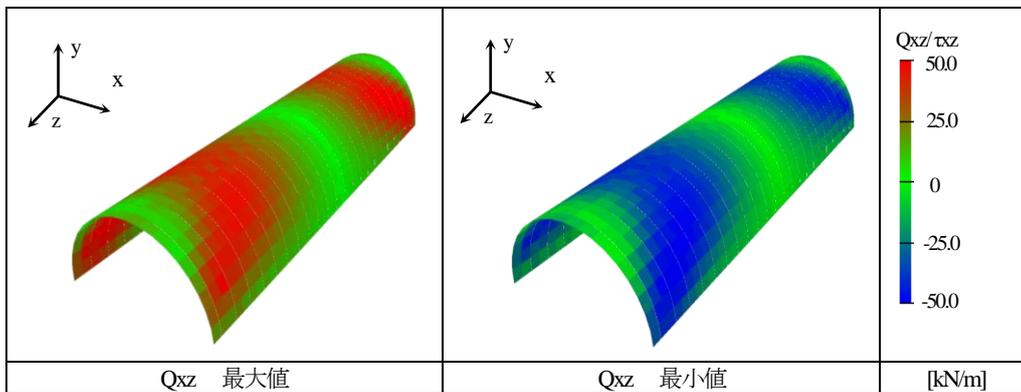


図-16  $Q_{xz}$  (面内せん断力) (横断方向加振)

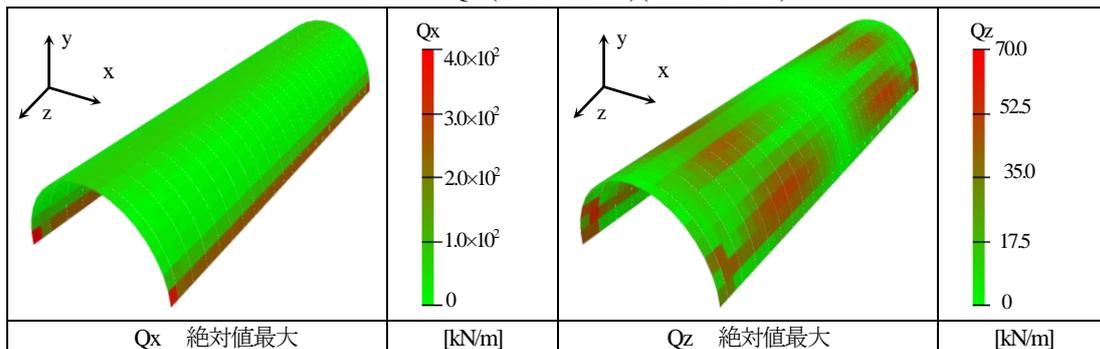


図-17  $Q_x, Q_z$  (面外せん断力) (横断方向加振)

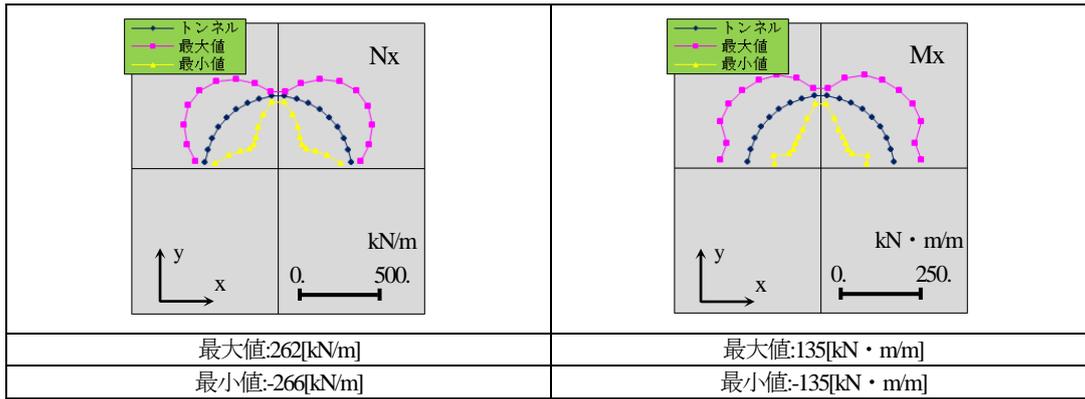


図-18 最大・最小断面力図(横断方向加振)

表-6 境界条件

|             | X並進 | y並進 | z並進 | x軸回転 | y軸回転 | z軸回転 |
|-------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| 横断面<br>地表以上 | 自由  | 自由  | 自由  | 固定   | 固定   | 固定   |
| 横断面<br>地表以下 | 自由  | 固定  | 自由  | 固定   | 固定   | 固定   |
| 縦断面         | 固定  | 固定  | 自由  | 固定   | 固定   | 固定   |
| 底面          | 固定  | 固定  | 固定  | 固定   | 固定   | 固定   |

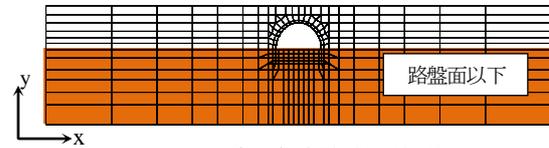


図-19 境界条件路盤面以下部

#### (4) トンネル縦断方向中央部断面力図

図-18に横断方向加振時のトンネル縦断方向中央部における最大・最小の断面力図を示す。なお軸力および曲げモーメントともに周面方向の断面力である。軸力および曲げモーメントともにアーチ肩部において卓越していることが確認できる。なお、中央部以外の断面においても同様の結果が得られた。

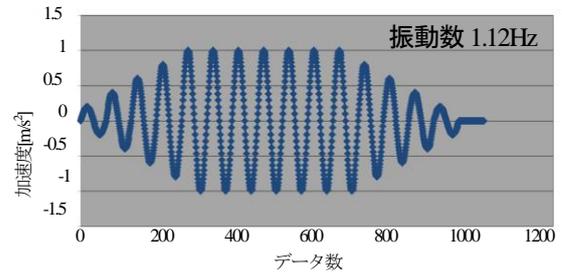


図-20 入力正弦波

### 5. トンネル縦断方向加振解析結果

#### (1) 境界条件

表-6に縦断方向加振ケースの境界条件を示す。縦断方向加振ケースでは縦断方向の変位が卓越するため、縦断方向に直交する横断面境界を路盤面以上の部分と路盤面以下の部分の2つに分けた。図-19に各境界の概要図を示す。横断面境界の路盤面以下の部分は半無限を想定しているので水平ローラーとし、路盤面以上は3方向の並進を自由とした。なお、路盤面以下の境界で縦断方向(±z方向)水平ローラーでは、縦断方向加振時に、縦断方向

が半無限のモデルと異なり、路盤面以下の地盤の慣性力が大きく作用していることも考えられる。しかし、境界要素の制約、要素総数、解析容量の制約、また、構造系には厳しくなるモデルであることを勘案し、水平ローラーとした。

#### (2) 入力地震波

図-20に、用いた正弦波の波形を示す。図中に示したように、横断方向加振とは振動数が異なる。

(3) カルバート本体断面力コンター図

a) 軸力

$N_x$  (トンネル周面方向軸力)および $N_z$  (トンネル奥行き方向軸力)の最大値および最小値のコンター図について示す。なお $N_x$ ,  $N_z$ は正が引張で負が圧縮である。

図-21に $N_x$  (トンネル周面方向軸力)の最大値および最小値のコンター図を示す。また、図-22にスケールを小さくした $N_x$ の最大値、最小値のコンター図を示す。図-21および図-22をみると、坑口部付近の脚部において断面力が卓越していることがわかる。これは、斜面の影響により、坑口部で断面力が卓越し、また、インバートとの突合せのために脚部において大きな軸力が発生したと考えられる。

図-23に $N_z$  (トンネル奥行き方向軸力)の最大値および最小値のコンター図を示す。脚部において圧縮力が卓越していることがわかる。これは、インバートとの突合せ

で回転が生じた影響によるものと考えられる。また、クラウン部において引っ張り力が卓越していることが確認できる。これは、縦断方向に加振し、クラウン部の突合せ構造で回転が生じた影響によるものと考えられる。

b) 曲げモーメント

$M_x$  (周面方向曲げモーメント)および $M_z$  (縦断方向曲げモーメント)のコンター図について示す。なお、最大値と最小値で発生個所及び値が同様だったので結果は最大値のみ載せた。

図-24に $M_x$  (周面方向曲げモーメント)のおよび $M_z$  (縦断方向曲げモーメント)の絶対値のコンター図を示す。 $M_x$ および $M_z$ とも横断方向加振時に比べるとはるかに小さい値であることがわかる。これは、縦断方向加振のため周面方向の断面力への影響が小さいためと考えられる。しかし、アーチ部材が千鳥配置のため周面方向の断面力は完全に0にはならなかった。

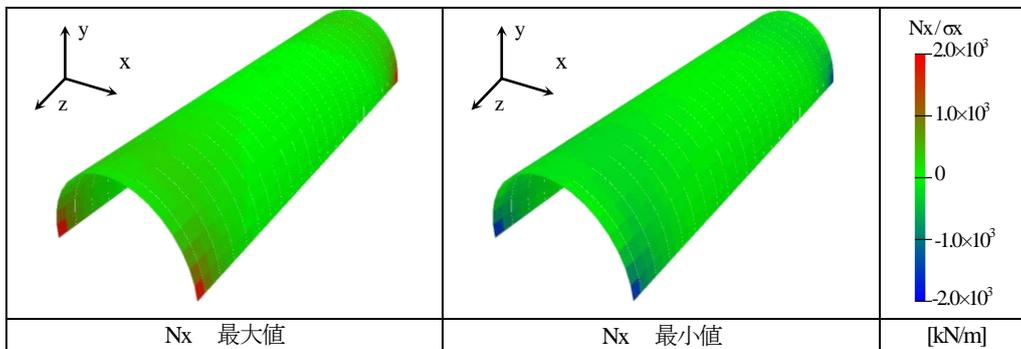


図-21  $N_x$  (縦断方向加振)

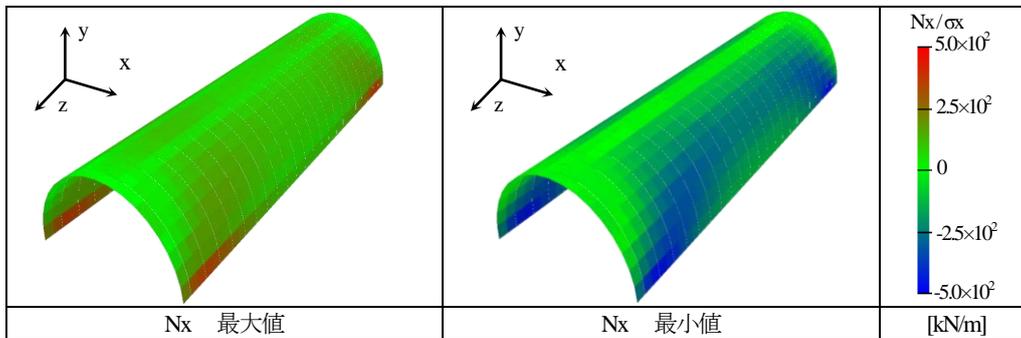


図-22  $N_x$  (縦断方向加振) スケール小

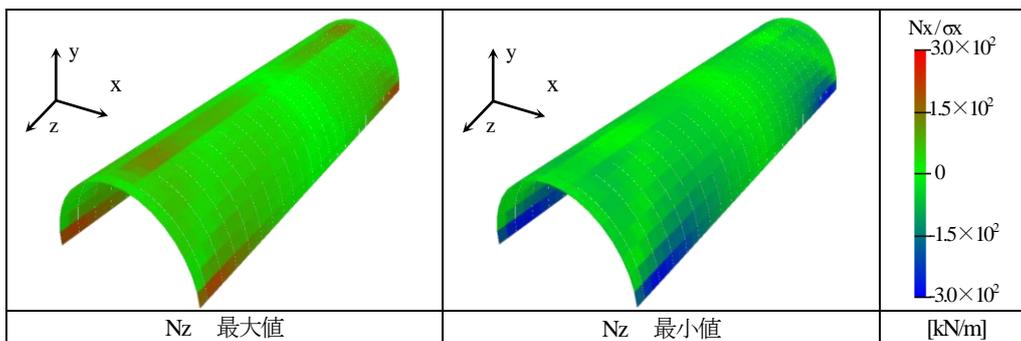


図-23  $N_z$  (縦断方向加振)

c) せん断力

$Q_{xz}$  (面内せん断力),  $Q_x$  (周面方向の面外せん断力)および $Q_z$  (縦断方向の面外せん断力) のコンター図を示す。なお、最大値と最小値で発生箇所及び値が同様だったので $Q_x$  (周面方向の面外せん断力)および $Q_z$  (縦断方向の面外せん断力)の結果は最大値のみ載せた。

図-25に $Q_{xz}$  (周面方向の面外せん断力)のコンター図を示す。脚部から肩部にかけて広範囲にせん断力が生じていることがわかる。これは、縦断方向加振により千鳥配置になっているアーチ部材が前倒れ(縦断方向に倒れる)を起こしたことによりせん断変形が発生したと考えられる。

図-26に $Q_x$  (周面方向の面外せん断力)および $Q_z$  (縦断方向の面外せん断力)のコンター図を示す。 $Q_x$ に関しては

脚部において生じていることがわかる。これは、インバートとの突合せ構造で回転が生じた影響によるものと考えられる。 $Q_z$ に関してはクラウン部において卓越していることがわかる。これは縦断方向加振によりカルバートが前倒れを起こし、アーチ部材のクラウン部において鉛直変位が生じたためと考えられる。

(4) トンネル縦断方向中央部断面力図

図-27に縦断方向加振時のトンネル縦断方向中央部における最大・最小の断面力図を示す。なお軸力および曲げモーメントともに周面方向の断面力である。軸力は脚部、曲げモーメントはクラウン部において卓越していることが確認できる。これはアーチ部材の千鳥配置およびインバートとの突合せの影響によるものと考えられる。

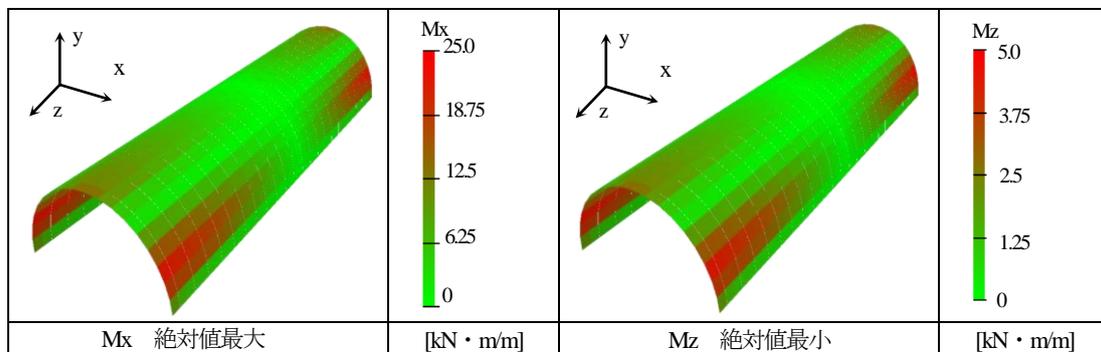


図-24 曲げモーメント(縦断方向加振)

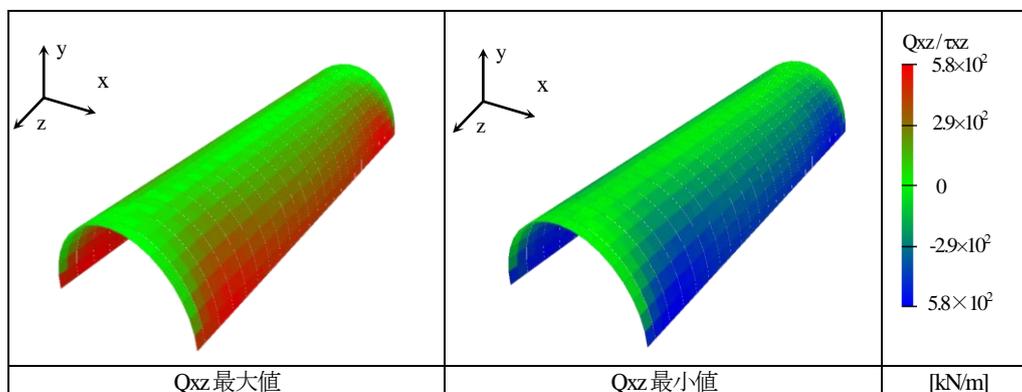


図-25  $Q_{xz}$  (面内せん断力) (縦断方向加振)

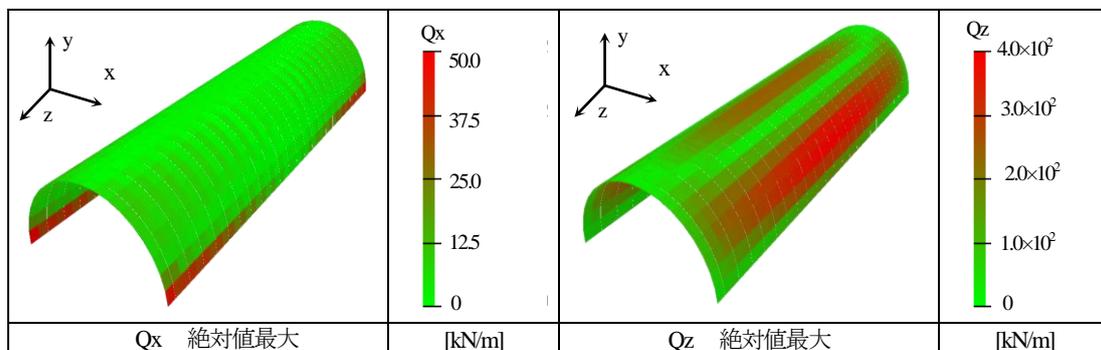


図-26  $Q_x$ ,  $Q_z$  (面外せん断力) (縦断方向加振)

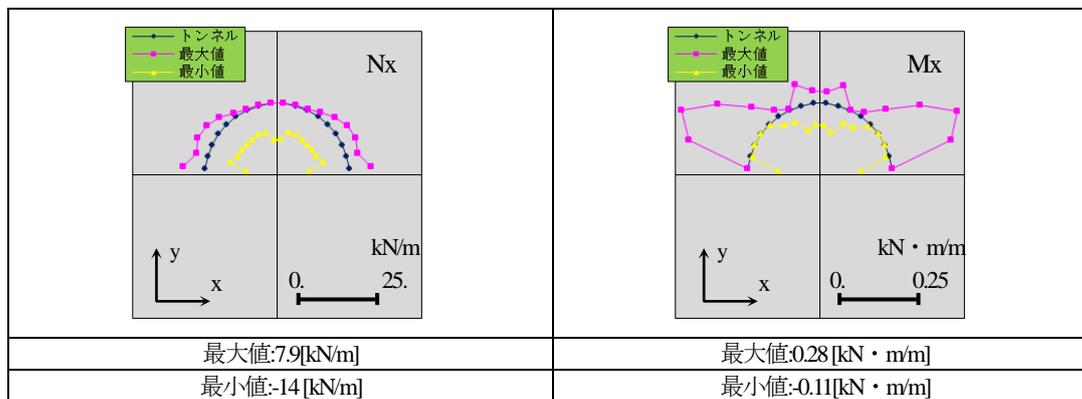


図-27 最大・最小断面力図(縦断方向加振)

## 6. まとめ

今回の解析結果から、横断方向加振時にアーチ肩部において断面力が卓越することが分かった。また、縦断方向加振時にアーチ部材の前倒れが発生し、クラウン部においてせん断力が卓越することが確認できた。これらの解析結果より、アーチ肩部では、トンネル横断方向の振動により盛土がせん断変形し、その変形に追従することにより断面力が卓越すると考えられる。アーチクラウン部ではトンネル縦断方向の振動により、縦断方向に変形し、荷重が突合せ部の隅角部に集中すると考えられる。

## 7. 結論および今後の課題

今回の解析により、アーチ肩部の地震時挙動はトンネル横断方向の振動が影響する可能性があることが分かった。また、クラウン部の地震時挙動はトンネル縦断方向の振

動が影響する可能性があることが分かった。

今後は、実波を入射し、実際の地震発生時の断面力や変形を調べる必要がある。

### 参考文献

- 1) 阿部 昌弘, 西村 和夫, 土門 剛: 動的解析による3ヒンジアーチカルバートの耐震性の評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, 第58巻, pp.9-10, 2003.
- 2) 日本テクスパン協会, テクスパン工法技術検討委員会: 非対称型クラウン部回転性能確認試験報告書, pp.1-18, 2009.
- 3) テクスパン工法設計施工マニュアル検討委員会: テクスパン工法設計施工マニュアル(案), pp.1-179, 1998.

(2014.9.15 受付)

## EARTHQUAKE BEHAVIOR ANALYSIS OF 3 HINGE ARCH CULVERT

Haruka HATANO, Tsuyoshi DOMON, Kazuo NISHIMURA and Hidetoshi SETO

3 hinge arch culvert received earthquake damage by Great East Japan Earthquake disaster of 2011. Mechanism of deformation and detailed behavior of 3 hinge arch culvert remains unclear, because the earthquake behavior of the culvert is complicated. Therefore identification of the cause of earthquake damage is difficult. This thing is an important issue in performing reconstruction and reinforcement of the future. This study is aimed to make clear the seismic behavior characteristics of culvert. By performing the dynamic analysis by modeling the 3 hinge arch culvert in three dimensions FEM, then investigated the behavior of a detailed culvert earthquake.