

# 論文 地盤の永久変位を伴う地盤震動を受けるRCアーチ橋の動的応答に対するアーチリング支持条件の影響

大塚 久哲<sup>\*1</sup>・陶 媛媛<sup>\*2</sup>・松永 昭吾<sup>\*3</sup>・古川 愛子<sup>\*4</sup>

**要旨:** 地盤の永久変位を伴う地盤震動を受ける鉄筋コンクリートアーチ橋を対象として、アーチリング支持条件の改変に着目した非線形時刻歴応答解析を行い、応答低減に関する有効性を明らかにした。観測加速度波形を積分して永久変位を有する変位波形を算出し、異なる永久変位を有する2組の変位波形を両側の支点に入力して計算した。計算結果から、アーチリング支点のヒンジ化は、橋軸直角方向の断層変位と、アーチリングが閉じる方向と開く方向の断層変位に対しては効果が確認されたが、着目部材によって効果の程度が異なること、鉛直方向の断層変位には効果のないことを明らかにした。

**キーワード:** RCアーチ橋, アーチリング支持条件, 非線形時刻歴応答解析, 永久変位, 地盤震動

## 1. はじめに

1999年に発生したトルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震では、それぞれ水平方向に4~5m程度、および鉛直方向に9~10m程度に達する断層変位が地表面に出現し、断層による地盤の永久変位が原因となって道路橋を含む多くの構造物が被災している。わが国でも橋梁の耐震設計において、断層変位を考慮する必要性が認識されており、断層変位の影響に関する研究も徐々に蓄積されている<sup>1,2)</sup>。

既往の研究より、どのような橋梁がどの程度の断層変位にたえられるかが明らかになっており、断層変位対策として部材の補強、支点の許容変位の拡大などが提案されている。著者らは断層変位を受けるコンクリートアーチ橋に関して、研究を行ってきた<sup>3)</sup>が、具体的な断層変位対策として、断層の種類によっては支点拘束度の緩和が部材断面力の低減に効果的であることを数値計算によって見いだしたので、その結果を報告する。

## 2. 対象橋梁

図-1に示す鉄筋コンクリート(RC)アーチ橋に断層変位が作用する場合の挙動を解析する。これは文献3)の橋梁と同じであり、1980年版道路橋示方書により設計された既設橋梁をもとに、解析モデルを作成し、2002年版道路橋示方書<sup>4)</sup>を満足するように鋼材量を調整している。解析は骨組解析用の市販ソフトを用いて行う。

解析においては、支承部の損傷は考慮せず、可動範囲、回転範囲の制限は設けていない。

橋長は349.70m、アーチ支間は235.00m、幅員は21.10mで、地盤種別はI種地盤とする。

使用材料は表-1に示すとおりである。

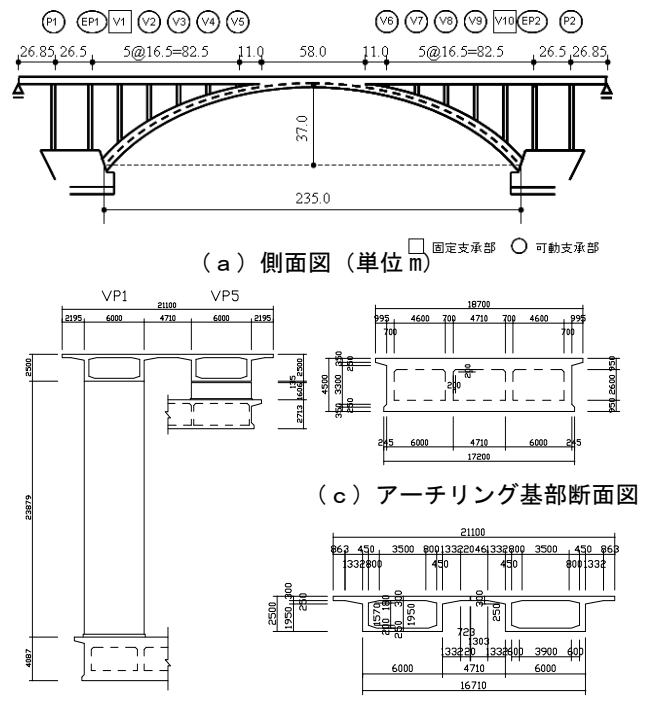


図-1 解析対象橋梁側面図 ((a) 以外の単位mm)

表-1 使用材料

| 部材     | コンクリートの設計基準強度            | 鉄筋    | PC鋼材の引張強さ                  |
|--------|--------------------------|-------|----------------------------|
| アーチリング | $\sigma_{ck}=40.0$ [MPa] | SD295 | $\sigma_{pu}=1030.0$ [MPa] |
| 補剛桁    | $\sigma_{ck}=35.0$ [MPa] | SD295 | $\sigma_{pu}=1030.0$ [MPa] |
| 鉛直材    | $\sigma_{ck}=24.0$ [MPa] | SD295 | —                          |
| エンドポスト | $\sigma_{ck}=24.0$ MPa]  | SD295 | —                          |

## 3. 解析モデル

本解析では、図-2に示すとおり、アーチリング、橋脚、鉛直材をファイバー要素で、補剛桁を非線形はり要

\*1九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)

\*2九州大学大学院修士課程 工学府建設システム工学専攻 修士 (非会員)

\*3株式会社建設技術研究所 東京本社構造部 工博 (非会員)

\*4京都大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

素で、橋台を線形はり要素でモデル化している。支点条件は4.2の表-4において説明する。ファイバーモデルを適用した部材のコンクリート部分の材料非線形は指数関数型コンクリートモデル(図-3、表-2)で考慮し、鉄筋とPC鋼材はバイリニアモデル(図-2、表-3)を用いている。補剛桁の履歴特性は武田モデルを適用している。図-5に補剛桁の初期軸力を考慮した水平軸周りの曲げモーメントに関する骨格曲線の例を示す。

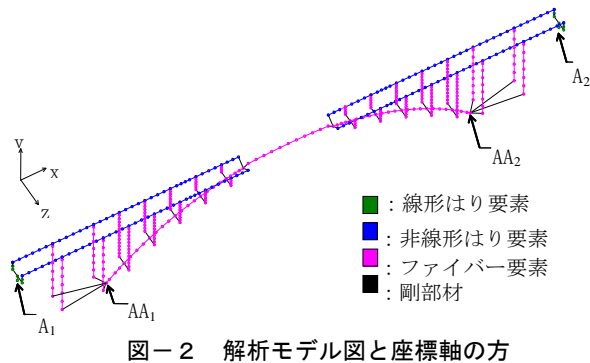


図-2 解析モデル図と座標軸の方

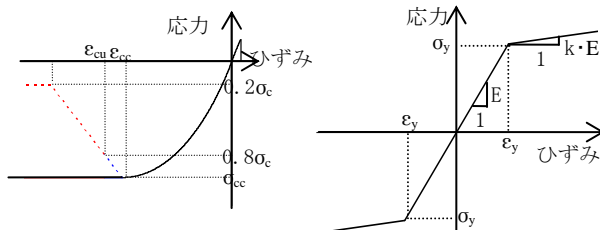


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

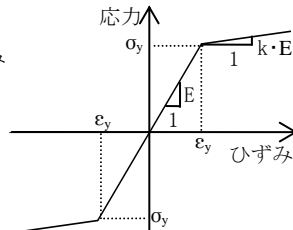


図-4 鉄筋、PC鋼材の応力-ひずみ関係

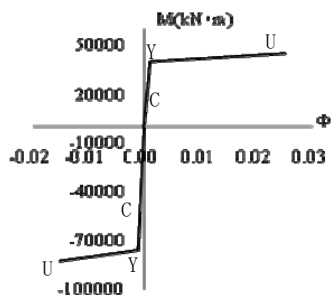


図-5 補剛桁のM-φ関係の例(水平軸周り)

表-2 コンクリート構成則

|        | $\sigma_{cc}$ (MPa) | $\varepsilon_{cc}(\times 10^{-6})$ | $\varepsilon_{cu}(\times 10^{-6})$ |
|--------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| アーチリング | 40.0                | 2000                               | 2800                               |
| 橋脚     | 24.0                | 2107                               | 2253                               |
| エンドポスト | 24.0                | 2107                               | 2253                               |
| 鉛直材    | 24.0                | 2107                               | 2253                               |

表-3 鉄筋及びPC鋼材の構成則

|      | $\sigma_v$ (MPa) | $\varepsilon_v(\times 10^{-6})$ | k      |
|------|------------------|---------------------------------|--------|
| 鉄筋   | 295              | 1475                            | 1/1000 |
| PC鋼材 | 824              | 4120                            | 1/100  |

#### 4. 解析概要

本研究では、アーチリングが断層を跨いでいる状態を想定した動的解析を行う。以下、解析概要について説明する。

##### 4.1 入力用変位波形の作成

時刻歴変位波形に関しては、大きな断層変位が生じた1999年台湾・集集地震で観測された図-6に示す加速度時刻歴波形(TCU068観測点のEW成分)を用いる。この波形を数値積分することにより変位時刻歴波形を算出し、残留変位を有する時刻歴変位波形を作成した<sup>2)</sup>。図-7に示すTW0を基本として、残留変位が50cmずつ増加するTW1~TW8を作成したが、本数値計算では、TW0とTW8を一組とし、これらを別々の支点に作用させることにより、支点に断層変位(永久変位)を生じさせた。断層変位量は両者の残留変位3.69m, 7.69mの差4.00mとなる。

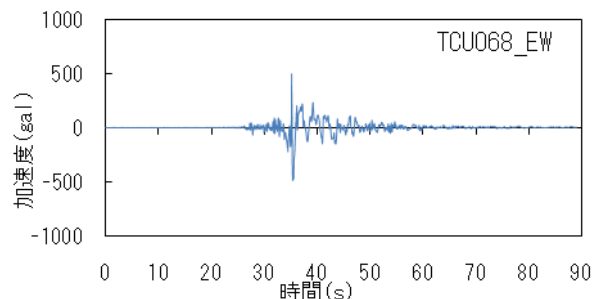


図-6 台湾集集地震における時刻歴加速度波形

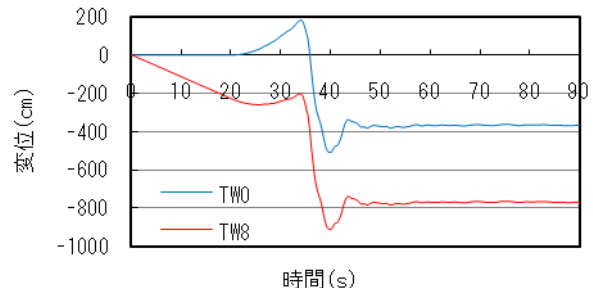


図-7 時刻歴加速度波形より算出した時刻歴変位波形

##### 4.2 解析ケース

表-4に各解析ケースの支点条件を示す。桁両端における支点(図-2に示すA1, A2)においては、全ケースとも、変位に対しては橋軸方向ローラー、橋軸直角(以下、橋直)方向・鉛直方向に対して拘束とし、回転に対してはZ軸まわりのみ自由、X・Y軸まわりは拘束としている。

アーチリング両端における支点(図-2に示すAA1, AA2)においては、変位は3方向とも拘束、回転に対しては表-4に示す自由度を有している。座標軸の方向は、図-2に示す。本解析は、支点の回転に対する拘束度の変化が断層変位への追随性にどのような影響を及ぼすかを明らかにするための検討を行っている。

表-4 解析ケースの回転に関する支点条件

| 解析<br>ケース | 支点条件                             |    |    |                                |    |    |
|-----------|----------------------------------|----|----|--------------------------------|----|----|
|           | AA <sub>1</sub> &AA <sub>2</sub> |    |    | A <sub>1</sub> &A <sub>2</sub> |    |    |
|           | Rx                               | Ry | Rz | Rx                             | Ry | Rz |
| CASE1-1   | ×                                | ×  | ×  |                                |    |    |
| CASE1-2   | ×                                | ×  | ○  |                                |    |    |
| CASE1-3   | ×                                | ×  | ×  |                                |    |    |
| CASE1-4   | ×                                | ×  | ○  |                                |    |    |
| CASE2-1   | ×                                | ×  | ×  | ×                              | ×  | ○  |
| CASE2-2   | ×                                | ○  | ×  |                                |    |    |
| CASE2-3   | ○                                | ○  | ○  |                                |    |    |
| CASE3-1   | ×                                | ×  | ×  |                                |    |    |
| CASE3-2   | ×                                | ×  | ○  |                                |    |    |

(Rx, Ry, RzはそれぞれX軸, Y軸, Z軸まわりの自由度である。×は固定であり, ○は自由である。座標軸の方向及び支点の記号は図-2参照。)

表-5 変位波形の入力条件

| 解析<br>ケース   | A <sub>1</sub> とAA <sub>1</sub> |     |     | A <sub>2</sub> とAA <sub>2</sub> |     |     |
|-------------|---------------------------------|-----|-----|---------------------------------|-----|-----|
|             | Tx                              | Ty  | Tz  | Tx                              | Ty  | Tz  |
| CASE1-1,2   | TW0                             |     |     | TW8                             |     |     |
| CASE1-3,4   | TW8                             |     |     | TW0                             |     |     |
| CASE2-1,2,3 |                                 |     | TW0 |                                 |     | TW8 |
| CASE3-1,2   |                                 | TW0 |     |                                 | TW8 |     |

(Tx, Ty, TzはX軸方向, Y軸方向, Z軸方向である。空欄は入力なし。)

表-5に変位波形の入力条件を示す。本検討では対象橋梁が、橋軸方向(X軸方向)、橋直方向(Z軸方向)、鉛直方向(Y軸方向)の各方向に断層変位を受けた場合について動的解析を実施し、それぞれCASE1, CASE2, CASE3とする。断層変位の入力は図-2に示すA<sub>1</sub>とAA<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>とAA<sub>2</sub>に、断層方向に応じて異なる変位波形(TW0, TW8)を与えた。このことから、表-5の各ケースの入力条件は次のような意味をもつ。

CASE1-1,2は、アーチリングが橋軸方向に閉じる方向(逆断層における水平方向の動き)に、CASE1-3,4は開く方向(正断層における水平方向の動き)に断層変位を受けることを想定した解析である。また、CASE2は、アーチリングが橋直方向に左横ずれの断層変位を、CASE3は、アーチリングが鉛直方向に縦ずれの断層変位をそれぞれ受けることを想定した解析である。

### 5. 動的解析結果

本章では、表-5に示す全9ケースの動的解析結果をまとめた。断層種類ごとに、補剛桁、アーチリングの応答断面力の最大値の分布図に基づいて、解析結果の考察を行う。

#### 5.1 アーチリングが橋梁方向に閉じる動きを受ける場合

##### (1) 補剛桁の応答断面力の分布

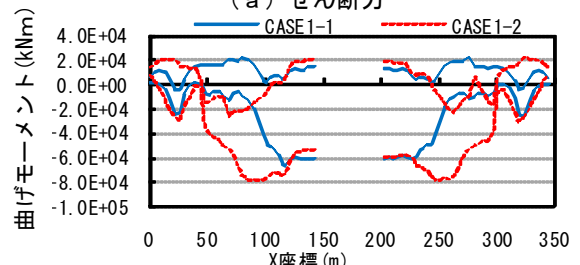
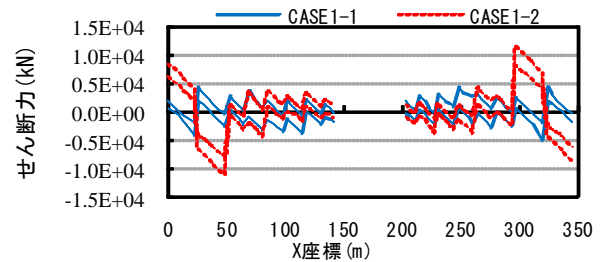


図-8 補剛桁の断面力

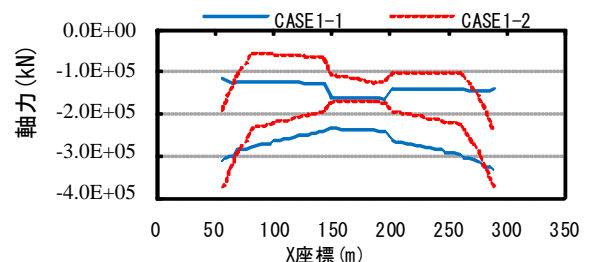
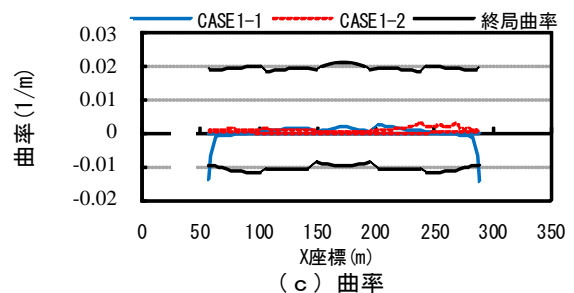
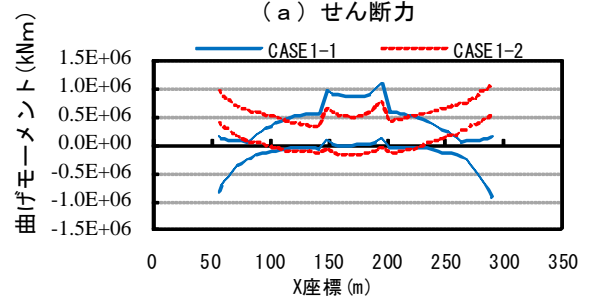
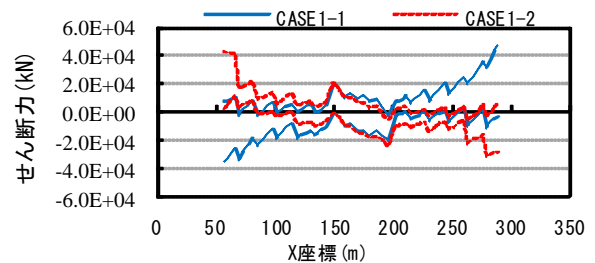


図-9 アーチリングの断面力と曲率

図-8に見られるように、アーチ端部のヒンジ化(CASE1-2)により補剛桁のせん断力と曲げモーメントはともに増加することがわかる。

(2) アーチリングの応答断面力と曲率の分布

図-9(a)より、CASE1-1とCASE1-2では、アーチリングのせん断力は方向が逆になっているが、絶対値はほとんど同じとなっていること、アーチクラウンのせん断力は方向と値ともにほとんど変わらないことがわかる。

図-9(b)より、アーチ端のヒンジ化によって、アーチリングの曲げモーメントの応答方向がCASE1-1と逆になり、絶対値はクラウンの近くで小さくなるが、スプリングの近くで逆に大きくなること分る。

(3) エンドポストの応答断面力の分布(図は省略)

アーチリングの支点が回転自由なCASE1-2は回転拘束されたCASE1-1より、エンドポストのせん断力および曲げモーメントの最大値は小さくなった。

(4) 支承部の最大応答変位

表-6に支承部の最大応答変位量を示しているが、補剛桁の支点変位量の差はほとんどない。

(5) 5.1のまとめ

表-7にCASE1-2とCASE1-1の最大値の比を示す。表中Sはせん断力、Mは曲げモーメントを意味する。(以下の表も同様である。)

両ケースのS(M)の算出箇所は同一ではないので、前述の応答値の分布を基にした考察とは必ずしも一致しないが、アーチリング両端のヒンジ化によって、補剛桁とアーチリングの曲げモーメント及び補剛桁とアーチクラウンのせん断力は逆効果となっているが、アーチリングやエンドポストのせん断力、及びアーチクラウンの曲げモーメントでは応答が小さくなっている。

このように部材位置と断面力の種類によって、支点のヒンジ化の影響は異なるが、例えばアーチリングやエンドポストのせん断耐力が設計上厳しい場合には、水平方向に閉じる断層に対しては支点のヒンジ化が効果を発揮するといえる。

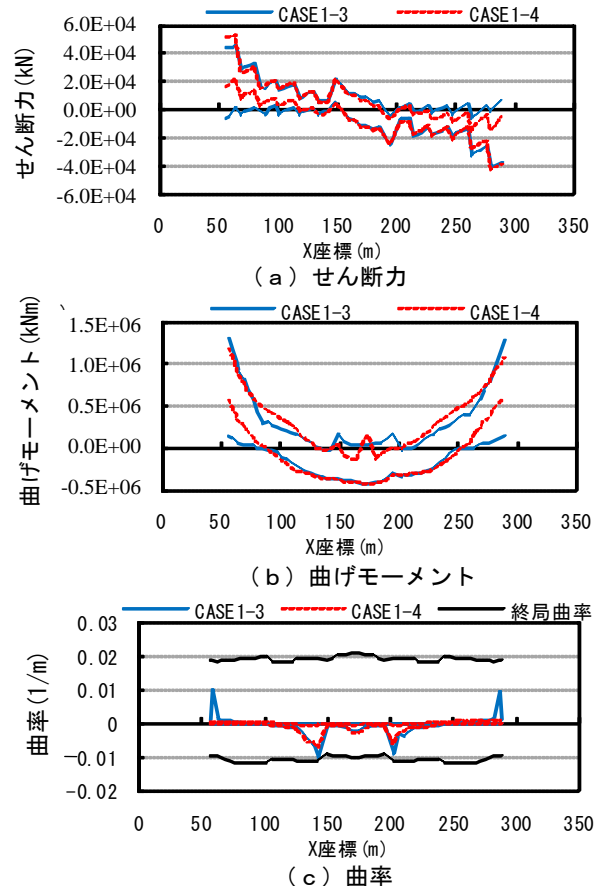
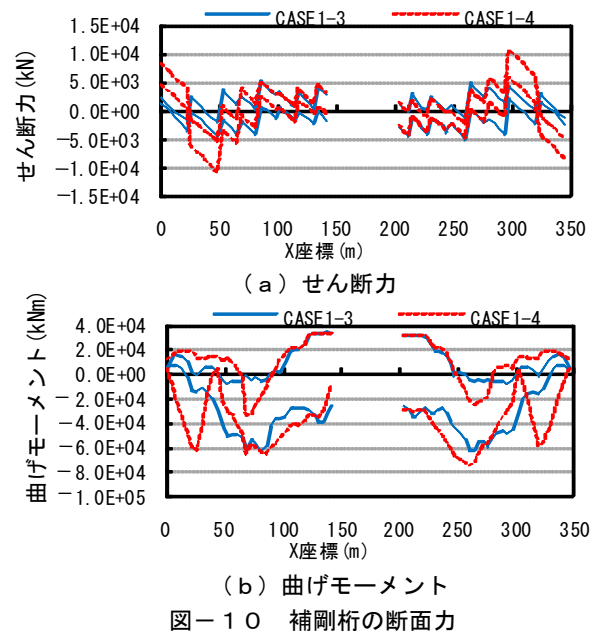
表-6 支承部の最大応答変位

| ケース     | 変位(m)          |                | 回転角(rad)        |                 |
|---------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|         | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | AA <sub>1</sub> | AA <sub>2</sub> |
| CASE1-1 | 2.00           | 3.77           | 0               | 0               |
| CASE1-2 | 1.97           | 3.75           | 0.08            | 0.12            |

表-7 CASE1-2とCASE1-1の最大値の比

|         | CASE1-2/CASE1-1 |
|---------|-----------------|
| 補剛桁     | S=2.4, M=1.2    |
| アーチリング  | S=0.9, M=1.2    |
| アーチクラウン | S=1.2, M=0.7    |
| エンドポスト  | S=0.9, M=1.0    |

(注)アーチクラウンは図-2で補剛桁のないアーチリング部を指す。(以下の表も同様である。)



## 5.2 アーチリングが橋軸方向に開く動きを受ける場合

前節と同様に、断面力と曲率を図-10、11に示す。アーチリングの支点が回転自由なCASE1-4は、CASE1-3と比べて補剛桁のせん断力と曲げモーメントは共に増加、アーチリング端部のせん断力も大きくなっている。一方、アーチリング端部の曲げモーメントとエンドポスのせん断力・曲げモーメントは小さくなり、これらにヒンジ化の効果が現れている。また、表-8に支承部の応答変位を示すが、補剛桁の変位はほとんど同じである。

表-9にCASE1-4とCASE1-3の最大値の比を示している。アーチリング端のヒンジ化は、橋軸方向に開く断層に対しては、アーチリングの曲げモーメント、エンドポスのせん断力・曲げモーメントの減少に効果がある。

## 5.3 左横ずれの断層変位を受ける場合

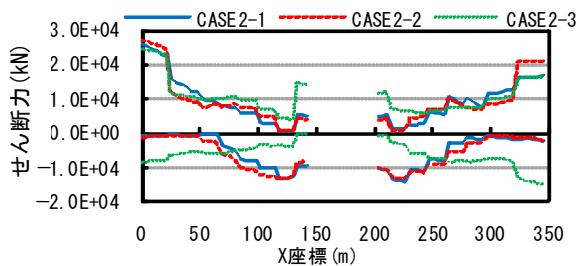
前節と同様に、断面力と曲率を図-12、13に示す。アーチリングの支点がY軸まわりに回転自由なCASE2-2と回転拘束されたCASE2-1を比較すると、補剛桁のせん断力はほぼ同じである。3軸まわりとも自由としたCASE2-3では、アーチクラウンと交わる位置でせん断力

表-8 支承部の最大応答変位

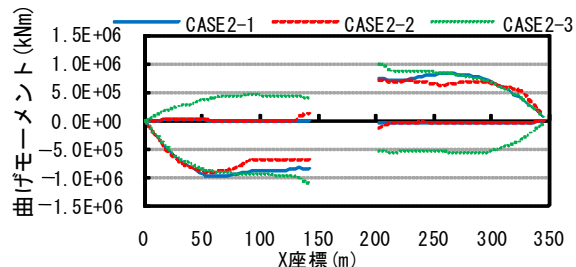
| ケース     | 変位(m)          |                | 回転角(rad)        |                 |
|---------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|         | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | AA <sub>1</sub> | AA <sub>2</sub> |
| CASE1-3 | 3.77           | 1.99           | 0               | 0               |
| CASE1-4 | 3.76           | 1.98           | 0.08            | 0.06            |

表-9 CASE1-4とCASE1-3の最大値の比

|         | CASE1-4/CASE1-3 |
|---------|-----------------|
| 補剛桁     | S=2.0, M=1.2    |
| アーチリング  | S=1.2, M=0.8    |
| アーチクラウン | S=0.99, M=1.01  |
| エンドポスト  | S=0.7, M=0.9    |



(a) せん断力



(b) 曲げモーメント

図-12 補剛桁の断面力

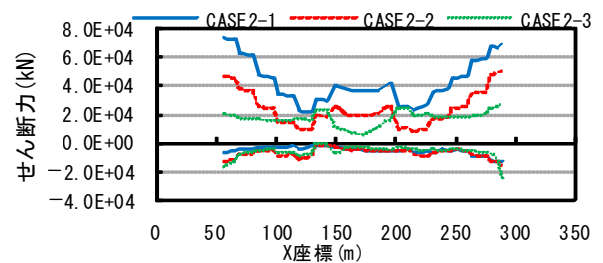
は大きくなるが、最大値はほとんど変わらない。補剛桁の曲げモーメントはCASE2-2の方がCASE2-1より若干小さくなるが、CASE2-3では逆に大きくなる。

CASE2-2のアーチリングのせん断力はCASE2-1より小さくなり、CASE2-3では更に小さくなる。アーチリングの曲げモーメントは端部ではせん断力と同様の傾向であるが、クラウン部では逆に、CASE2-3がCASE2-1より大きい。

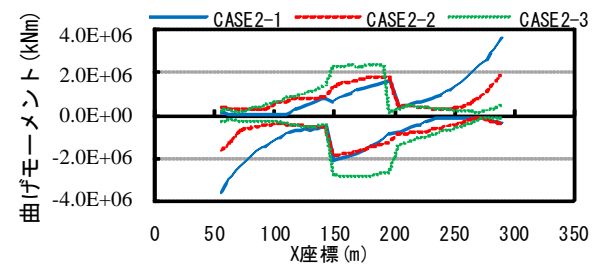
CASE2-2のエンドポスのせん断力と曲げモーメントともにCASE2-1と変わらないが、CASE2-3の方は特に下端部で小さくなった。

表-10より、支幹部の変位量は共に小さいことがわかる。

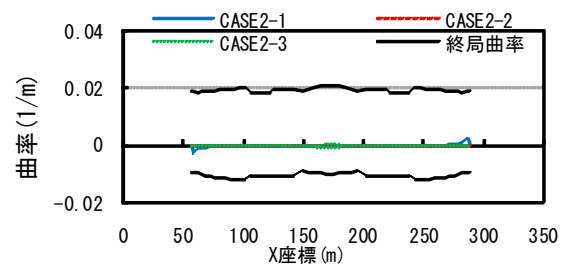
表-11にCASE2-2およびCASE2-3とCASE2-1の最大



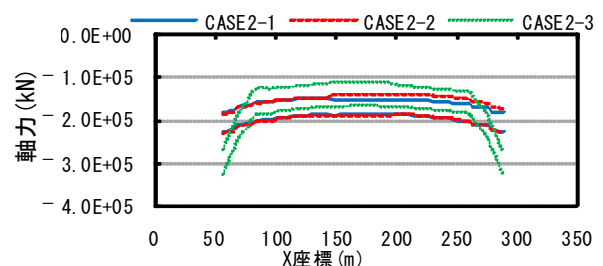
(a) せん断力



(b) 曲げモーメント



(c) 曲率



(d) 軸力

図-13 アーチリングの断面力と曲率

表-10 支承部の最大応答変位

| ケース     | 変位(m)          |                | 回転角(rad)        |                 |
|---------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|         | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | AA <sub>1</sub> | AA <sub>2</sub> |
| CASE2-1 | 0              | 0.001          | 0               | 0               |
| CASE2-2 | 0.001          | 0.001          | 0.03            | 0.03            |
| CASE2-3 | 0.001          | 0              | 0.02            | 0.03            |

表-11 CASE2-2・CASE2-3とCASE2-1の最大値の比

|         | CASE2-2<br>/CASE2-1 | CASE2-3<br>/CASE2-1 |
|---------|---------------------|---------------------|
| 補剛桁     | S=1.05, M=0.9       | S=0.9, M=1.1        |
| アーチリング  | S=0.7, M=0.5        | S=0.4, M=0.6        |
| アーチクラウン | S=0.6, M=0.9        | S=0.4, M=1.3        |
| エンドポスト  | S=1.0, M=1.0        | S=0.6, M=0.5        |

表-12 CASE3-2とCASE3-1の最大値の比

|         | CASE1-2/CASE1-1 |
|---------|-----------------|
| 補剛桁     | S=2.1, M=1.3    |
| アーチリング  | S=1.7, M=1.6    |
| アーチクラウン | S=1.2, M=0.99   |
| エンドポスト  | S=5.0, M=6.2    |

表-13 支承部の最大応答変位

| ケース     | 変位(m)          |                | 回転角(rad)        |                 |
|---------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|         | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | AA <sub>1</sub> | AA <sub>2</sub> |
| CASE3-1 | 0.056          | 0.056          | 0               | 0               |
| CASE3-2 | 0.076          | 0.076          | 0.01            | 0.03            |

値の比を示している。支点のY軸(鉛直軸)まわりのヒンジ化はアーチリングとアーチクラウンに対して効果がある。支点を全軸まわりにヒンジ化すると、アーチリング・エンドポストに対してはせん断力と曲げモーメントともに、補剛桁とアーチクラウンに対してはせん断力に対して効果が顕著である。このように支持条件の変更は横ずれ断層変位に対して有効である。

本研究では、実際の支承構造の詳しい検討は行っていないが、CASE2\_2ではヒンジ軸を変更した支承構造の設置を、CASE2\_3ではユニバーサル支承を設置することにより支持条件が満足されるものと考えている。

#### 5.4 縦ずれの断層変位を受ける場合

表-12, 13に見られるように、支持条件の変更は縦ずれ断層変位にとっては逆効果であり、同断層変位に対しては、固定支持の方がよいことがわかる。

#### 6. まとめ

本研究は、RCアーチ橋を対象とし、各方向の断層変位に対して有利なアーチリング支持条件を明らかにすることを目的として、永久地盤変位を生じる変位波形を作成の上、時刻歴応答解析を行った。断層変位が生じる方向は橋軸、橋直および鉛直方向の3方向とし、主に応答断面力と曲率を分析し、有利な支持条件を考察した。それによると、

①アーチリングが閉じる方向の断層変位が生じる場合には、アーチリング端部のヒンジ化は、アーチリング・エンドポストのせん断力減少に効果があり、アーチリングが開く場合には、アーチリング・エンドポスト部の曲げモーメント及びエンドポストのせん断力の減少に効果のあることが分かった。

②橋軸直角方向に断層変位が生じる場合には、支点のY軸(鉛直軸)まわりのヒンジ化は、アーチリングとアーチクラウンに対しては効果があり、支点の全軸まわりのヒンジ化は、アーチリングおよびエンドポストに対して有効となることが分かった。

③鉛直方向に断層変位が生じる場合には、固定支持の方が有利であること、などの知見が得られた。

以上のようにアーチリング両端のヒンジ化の影響は、想定する断層変位の方向および対象となる構造部位によって異なるが、地震時の安全性が厳しくなるアーチリブやエンドポストに対しては効果のあることが分かった。実設計においては地震後の修復の容易性や初期断面の余裕度、経済性などを考慮することが必要であるが、断面補強などと共に支持条件の適切な選択も断層変位対策として有効であることを示唆している。

#### 参考文献

- 1) コンクリート工学協会九州支部：断層変位を受けるコンクリート系橋梁の耐震安全性に関する研究専門委員会報告書，2002.11.
- 2) 土木学会地震工学委員会：断層変位を受ける橋梁の計画・耐震設計に関する研究小委員会報告書，2008.7.
- 3) 松永昭吾・大塚久哲：断層変位を受けるコンクリートアーチ橋の耐震特性，第30回土木学会地震工学研究発表会論文集，2009.12.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，耐震設計編，丸善，2002.