

## 論文 鉄筋コンクリートラーメン構造の挙動に及ぼす地震動の影響

泉 雅史<sup>\*1</sup>・土屋 智史<sup>\*2</sup>・糸山 豊<sup>\*3</sup>・梅原 秀哲<sup>\*4</sup>

**要旨**：兵庫県南部地震で被災した鉄筋コンクリートラーメン高架橋を対象として、示方書の模擬地震動を含む数種類の地震動加速度を用いて 3 次元非線形動的解析を行った。その結果、本解析では兵庫県南部地震と同程度の地震動加速度を想定して設定された模擬地震動が適切であることが確認された。また、基盤面の地震動や地盤条件によって異なる最大加速度と周波数特性が構造物の挙動に影響を及ぼし、破壊に至る可能性があるという結果が得られた。

**キーワード**：ラーメン構造，地震動，地震動加速度，地震応答解析

## 1. はじめに

平成 14 年 12 月に土木学会コンクリート標準示方書「耐震性能照査編」<sup>1)</sup> (以下、示方書と称す。)が改訂され、耐震性能照査に用いる地震動として、模擬地震動の設定方法や時刻歴加速度波形が解説で示された。

このような流れの中、十勝沖地震などの大規模な地震動が相次いで計測された。このことを受けて、本研究では兵庫県南部地震で被災した鉄筋コンクリートラーメン高架橋を対象として、実際に生じた地震動、想定地震動、示方書の模擬地震動を用いて 3 次元非線形動的解析を行い、解析結果を比較することにより、入力した地震動が構造物に与える影響について検討を行うとともに、示方書において示された模擬地震動の適用性についても評価を行うこととした。なお、地盤の影響を確認するため、3 種類の地盤条件を考慮した地震動加速度を入力する。

## 2. 解析手法

本研究では、解析ツールとして **COM3-fiber** を使用した。高架橋のモデルは、橋脚や中間梁は線材要素、スラブは弾性立体要素とし、計算時間を短縮するために簡略したモデルを用いた。

線材要素には、ファイバーモデルに基づき、経路依存型の材料非線形モデルが適用されており、軸力変動を含む 3 次元応答が時々刻々算出される<sup>2)</sup>。解析に用いた減衰モデルについては岡村らのモデルを参考にした<sup>3)</sup>。解析対象は、兵庫県南部地震で実際に被災した 3 径間連続ラーメン高架橋 1 ブロックとし、基礎構造物や地盤・隣接高架橋のモデル化は行わず、地震動加速度は、固定点とした各橋脚基部に同位相で入力する。なお、高架橋の材料特性は、震災後の抜取り試験の値を参考に、できる限り実構造物に近い値を入力している。

応答計算では各時刻における変位履歴と橋脚に作用するせん断力が得られる。破壊判定は、橋軸方向と橋軸直角方向のせん断力の平方和を作用せん断力とし、この値と算定式から得られるせん断耐力を時刻歴で比較することで、高架橋の地震時のせん断に対する安全性を評価する。橋脚のせん断耐力は、コンクリートの寄与分とせん断補強筋の寄与分の和から求めた<sup>4)</sup>。せん断耐力式は、コンクリートの寄与分は二羽式<sup>5)</sup>を、せん断補強筋の寄与分はトラス理論に基づいた式を使用した。

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム工学専攻 (正会員)

\*2 (株)コムスエンジニアリング 博 (工) (正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 修(工) (正会員)

\*4 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

表-1 対象高架橋の概要

| 高架橋名 | 高架橋高さ(m) | 構造形式 | 実被害*1  | 耐力比*2     | 固有振動数(Hz)*3 |      | 解析対象地盤 |       |
|------|----------|------|--------|-----------|-------------|------|--------|-------|
|      |          |      |        |           | LG          | TR   |        |       |
| SK   | R10      | 10.0 | 1層     | 橋脚Mβ      | 1.16        | 2.4  | 2.4    | A,B   |
|      | R11      | 10.5 | 2層     | 中間梁上部橋脚Sα | 0.60        | 3.02 | 3.07   | A,B,C |
| TT   | R11      | 12.9 | 2層/異径間 | 中間梁上部橋脚Sα | 0.56        | 4.85 | 2.56   | A,B   |

\*1 ; S はせん断, M は曲げによる被害。α は破壊, β は損傷。

\*2 ; C2 橋脚のせん断と曲げの耐力比。この値が 1.0 より小さくなると, せん断破壊先行型となる可能性が高いと予想される。

\*3 ; 表中の LG は橋軸, TR は橋軸直角方向を示している。

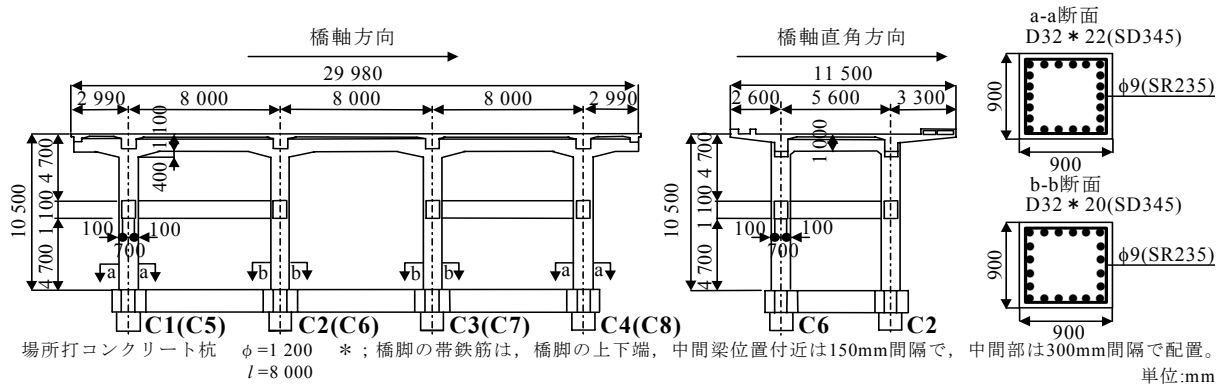


図-1 SK 高架橋 R11 構造図

3. 対象高架橋

本研究で解析対象とした高架橋の概要を表-1に示す。また、図-1に構造図の例を示す。表-1の解析対象地盤は、A、Bは名古屋市の地盤Cは高架橋地点の地盤であり、次節で説明する地震動加速度の推定時に用いた。なお、各橋脚を図-1のようにC1~C8と便宜的に示す。

解析対象とした高架橋は、まず比較の基準として、せん断破壊した高架橋のうち、構造形式

や被害状況が他の高架橋と比較しやすい標準の2層構造であるSK高架橋R11を選択した。SK高架橋R10はSK高架橋R11に隣接する高架橋でせん断破壊に至らず、構造形式が1層である。TT高架橋R11はSK高架橋R11と同じく2層構造であるが、異径間構造の形式をとっている。

4. 入力地震動

本研究で用いた入力地震動の加速度の概要を

表-2 地震動加速度の概要

| 地震名          | 発生日             | 最大加速度 (gal) |      |      |      |      |      | 卓越振動数 (Hz) |      |      |      |      |      |
|--------------|-----------------|-------------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|
|              |                 | A地点         |      | B地点  |      | C地点  |      | A地点        |      | B地点  |      | C地点  |      |
|              |                 | LG          | TR   | LG   | TR   | LG   | TR   | LG         | TR   | LG   | TR   | LG   | TR   |
| ① 想定東海地震     |                 | 110         |      | 123  |      | -166 |      | 4.04       |      | 1.28 |      | 1.94 |      |
| ② 想定東南海地震    |                 | 199         |      | 211  |      | 223  |      | 3.66       |      | 1.10 |      | 1.74 |      |
| ③ 東海・東南海複合地震 |                 | 199         |      | 212  |      | -226 |      | 3.43       |      | 1.03 |      | 2.18 |      |
| ④ 兵庫県南部地震    | 1995/1/17       | -428        | -283 | 438  | 378  | -675 | -494 | 0.50       | 2.90 | 0.50 | 0.83 | 1.37 | 1.43 |
| ⑤ 2003年十勝沖地震 | 2003/9/26       | 253         | -222 | 212  | -204 | 311  | -283 | 5.10       | 6.75 | 5.10 | 1.85 | 5.10 | 6.75 |
| ⑥ 三陸南地震      | 2003/5/26       | -228        | 173  | -197 | 166  | -247 | 247  | 1.40       | 4.47 | 1.40 | 4.47 | 4.40 | 4.47 |
| 示<br>方<br>書  | ⑦ レベル1地震動       | 128         |      | 188  |      | 145  |      | 0.60       |      | 0.60 |      | 0.60 |      |
|              | ⑧ レベル2地震動(海洋型①) | 378         |      | 458  |      | 557  |      | 0.80       |      | 0.80 |      | 0.80 |      |
|              | ⑨ レベル2地震動(海洋型②) | -395        |      | 400  |      | -591 |      | 2.35       |      | 0.85 |      | 1.45 |      |
|              | ⑩ レベル2地震動(内陸型①) | 836         |      | 767  |      | 1104 |      | 1.33       |      | 0.87 |      | 1.33 |      |
|              | ⑪ レベル2地震動(内陸型②) | -735        |      | -625 |      | -942 |      | 0.53       |      | 0.53 |      | 1.20 |      |

\* ; 表中の LG は橋軸, TR は橋軸直角方向を示している。

①~③,⑦~⑪に関してはLG,TR 同地震動を入力した。

表-2に示す。なお、地震動は水平2方向にのみ入力した。また、便宜的に各地震動加速度を表中に示す通り①～⑪と称することとする。卓越振動数は解析対象時間内における数値である。それほど顕著に表れていないものについても表記した。

地表面相当の地震動加速度は、それぞれ工学的基盤面の地震動加速度を推定し、解析対象地点の地盤条件を考慮した地震応答解析<sup>6)</sup>を行うことにより求めた。工学的基盤面に入力される地震動について、①～④は、これまでの国内の主要な強震記録と各地の断層パラメータを用い推定した<sup>7),8)</sup>。⑤については KIK-NET<sup>9)</sup>、⑥については K-NET<sup>10)</sup>の地中データを使用し、地盤の地震応答解析により工学的基盤面の地震動に変換したものを使用した。

本研究では、地盤の影響を確認するため地表面相当の地震動加速度を得る際、名古屋市内の良好な地盤と軟弱な地盤の2種類の地盤条件(A地点、B地点)を使用した。またSK高架橋R11については、高架橋立地地点の地盤(C地点)も対象とした。

地震動加速度の例として、④兵庫県南部地震

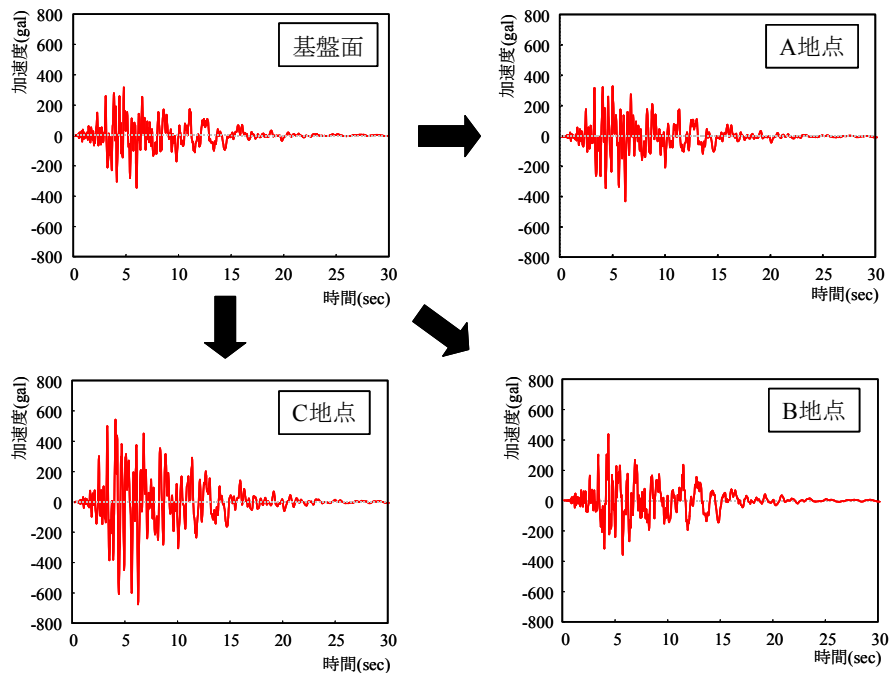


図-2 ④兵庫県南部地震の地震動加速度(LG方向)

LG方向の工学的基盤面および各地点での地表面地震動加速度を図-2に示す。16秒以降は主要部分に対し加速度が極端に小さいため解析対象外とした。

図-2より各地点において最大加速度、波形とも異なっていることがわかる。

## 5. 解析結果および考察

### 5.1 最大加速度の与える影響

解析例として、SK高架橋R11の④兵庫県南部地震の結果について述べる。解析結果を図-3に示す。図-3は各地点における中間梁下部のC2橋脚に作用するせん断力Sとせん断耐力Vの経時変化である。

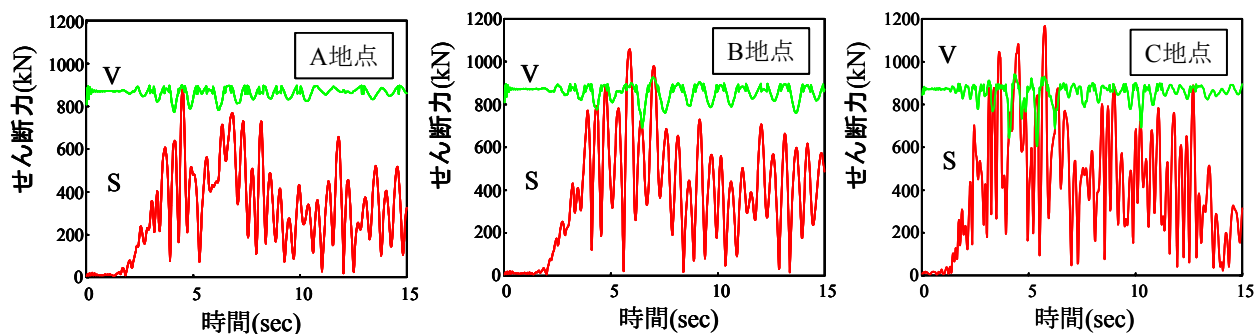


図-3 SK高架橋R11解析結果(作用せん断力-せん断耐力経時変化)

解析結果では、A 地点ではせん断破壊していないが、B、C 地点ではせん断破壊している。

④地震の最大加速度は表-2より、C 地点、B 地点、A 地点の順で大きい。卓越振動数は、A 地点の TR 方向のみが高架橋の固有振動数と近い値を示しているが、最大加速度は A、B 両地点を比べると LG 方向の方が大きく、LG、TR 両方向ともに B 地点の方が大きい。また、A 地点と B 地点における地震動加速度はほぼ同様の減衰が確認できる。

この結果より、地盤条件が構造物の挙動に大きな影響を与えることが本解析から確認された。

### 5.2 卓越振動数の与える影響

解析結果として SK 高架橋 R11 の③東海・東南海複合地震と⑥三陸南地震の A 地点の結果を図-4に示す。

表-2より最大加速度は⑥地震の方が、LG、TR 両方向ともに大きい。しかし、解析結果では、作用せん断力の値から③地震の方が危険であることは明白である。固有振動数に着目すると、③地震が SK 高架橋 R11 の固有振動数に最も近いことが確認できる。

そこで、それぞれの地震動加速度をフーリエ変換により周波数成分に分解したものを図-5に示す。地震動加速度の時間が③は 50 秒、⑥は 15 秒であり差はあるが、SK 高架橋 R11 の固有振動数である 3Hz 付近に着目すると、③地震は大きいスペクトルを示している。逆に、⑥地震動は 3Hz 成分が少なく、この差が解析結果の差に現れたと考えられる。

この結果より、地震動加速度の卓越振動数が構造物の挙動に大きな影響を与えることが確認された。

### 5.3 地震動波形の与える影響

解析結果として、図-6に SK 高架橋 R11 の⑤2003 年十勝沖地震の A 地点、LG 方向のせん断力および変位履歴を示す。また、⑤地震 A 地点の LG 方向の地震動加速度を図-7に示す。図-7より、地震動加速度は、比較的大きな振動終了後は減衰して小さくなっているのが確認でき

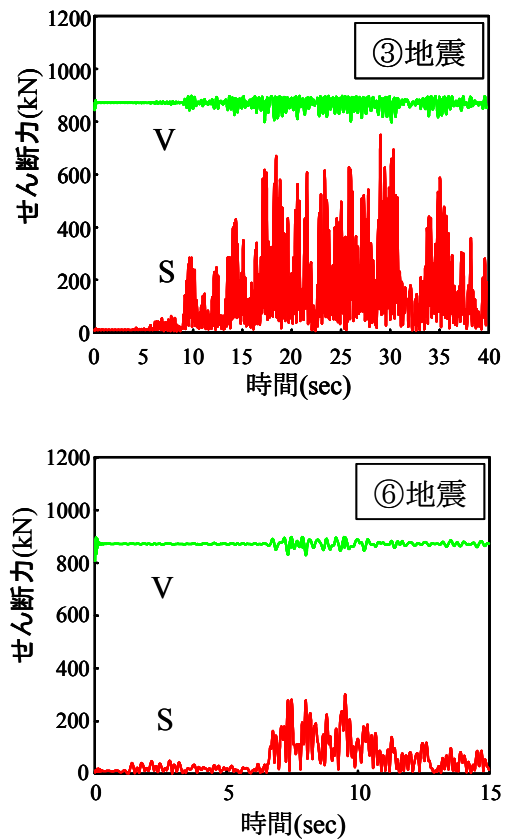


図-4 SK 高架橋 R11A 地点解析結果  
(作用せん断力-せん断耐力経時変化)

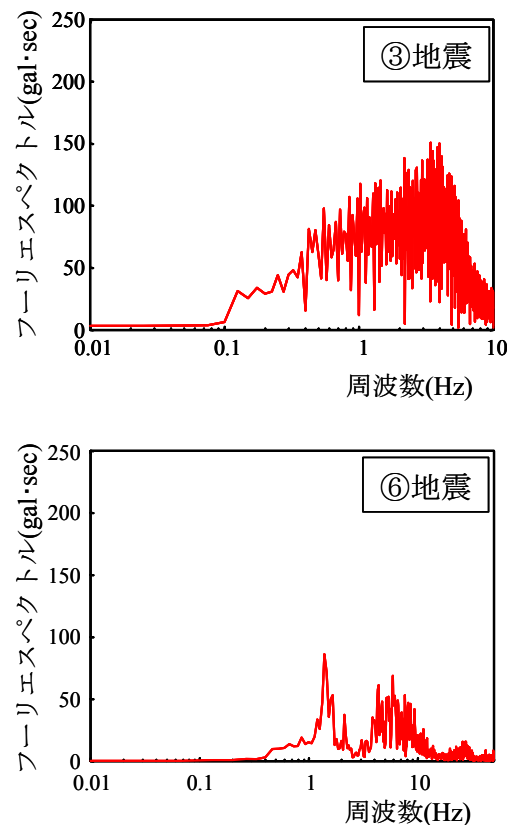


図-5 地震動加速度  
(周波数領域)

る。しかし、作用せん断力経時変化と橋脚天端の変位履歴とともに、比較的大きな振動終了後も、大きなせん断力が作用する結果が得られた。TR 方向にも同様の結果が見られたことから、せん断破壊に至ることはなかったが、比較的大きな振動より小さい加速度でも、構造物に与える影響が大きくなる場合があること示唆する結果となった。

#### 5.4 模擬地震動による解析結果

示方書に示された模擬地震動を解析対象として、得られた結果について、全ての高架橋におけるせん断力  $S$  とせん断耐力  $V$  の比をまとめたものを表-3に示す。

表-3 模擬地震動による解析結果

| 地震 | $S/V^{*1}$  |             |             |
|----|-------------|-------------|-------------|
|    | SK高架橋R11    |             |             |
|    | A地点         | B地点         | C地点         |
| ⑦  | 0.48        | 0.46        | 0.80        |
| ⑧  | 1.26(21.1)  | 1.42(21.2)  | 1.32(21.94) |
| ⑨  | 1.24(10.58) | 1.21(10.68) | 1.18(10.72) |
| ⑩  | 1.36(1.22)  | 1.40(1.60)  | 1.29(1.66)  |
| ⑪  | 1.24(3.68)  | 1.19(3.78)  | 1.24(3.84)  |

| 地震 | $S/V^{*1}$ |            |
|----|------------|------------|
|    | SK高架橋R10   |            |
|    | A地点        | B地点        |
| ⑦  | 0.49       | 0.69       |
| ⑧  | 0.95       | 0.95       |
| ⑨  | 0.90       | 0.90       |
| ⑩  | 1.04(2.00) | 1.09(2.20) |
| ⑪  | 0.95       | 0.97       |

| 地震 | $S/V^{*1}$  |             |
|----|-------------|-------------|
|    | TT高架橋R11    |             |
|    | A地点         | B地点         |
| ⑦  | 0.62        | 0.61        |
| ⑧  | 1.64(20.78) | 1.72(21.24) |
| ⑨  | 1.57(10.86) | 1.59(10.70) |
| ⑩  | 1.62(1.24)  | 1.65(1.64)  |
| ⑪  | 1.51(6.80)  | 1.52(6.87)  |

\*<sup>1</sup>;  $S/V$  はせん断力  $S$  とせん断耐力  $V$  の比。1 を超えるとせん断破壊。

SK高架橋R11

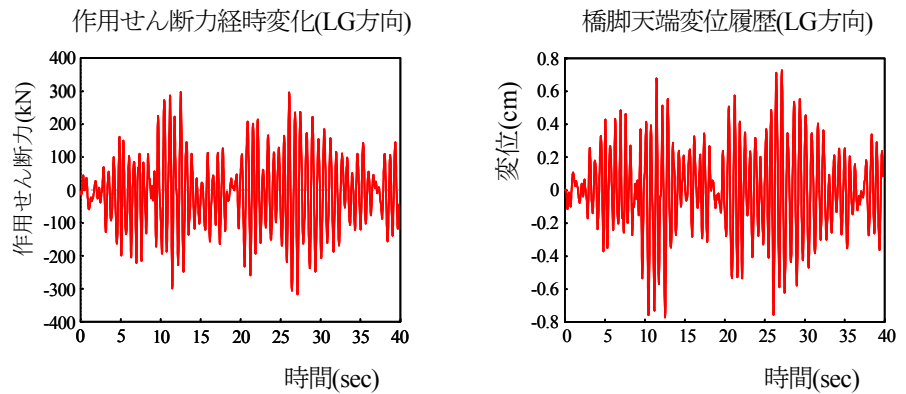


図-6 ⑤地震 A 地点解析結果 (LG 方向)

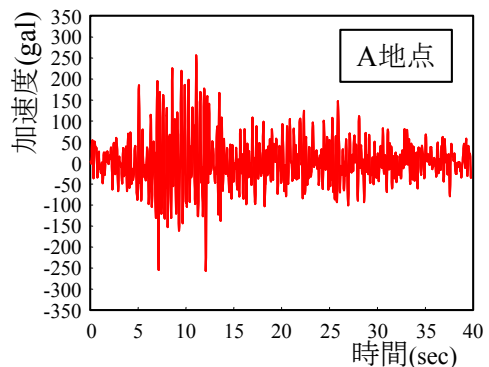


図-7 ⑤地震 A 地点地震動加速度 (LG 方向)

レベル 1 地震動においてはすべての高架橋のどの地点でもせん断破壊に至っていない。

レベル 2 地震動では、兵庫県南部地震で破壊した SK 高架橋 R11 と TT 高架橋 R11 がどちらの地点でもせん断破壊を示していることから、本解析では兵庫県南部地震と同程度の地震動加速度を想定して設定されたレベル 2 地震動が適切であることが確認された。

#### 5.5 想定および実際に生じた地震動による解析結果

想定および実際に生じた地震動における解析結果の例として、TT 高架橋 R11 の結果をまとめたものを、表-4に示す。②、③地震では、解析上せん断破壊に至っており、同様の構造物において実際に地震が発生した場合、せん断破壊に至ることが考えられる。④、⑤、⑥地震では実被害が最も大きかった④地震のみがせん断破壊に至った。

表－４ 想定および実際に生じた地震動による解析結果（TT 高架橋 R11）

| 地震 | A地点       |          |           |          |           |          | S/V <sup>*1</sup> |
|----|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-------------------|
|    | 橋軸方向      |          | 橋軸直角方向    |          | 斜め方向      |          |                   |
|    | 最大変位 (cm) | 最大 S(kN) | 最大変位 (cm) | 最大 S(kN) | 最大変位 (cm) | 最大 S(kN) |                   |
| ①  | 0.97      | 571.60   | 1.21      | 615.68   | 1.52      | 800.10   | 0.58              |
| ②  | 2.60      | 981.31   | 2.89      | 1247.75  | 3.85      | 1489.07  | 1.06(18.26)       |
| ③  | 2.62      | 984.25   | 2.91      | 1261.67  | 3.88      | 1508.58  | 1.06(18.26)       |
| ④  | 3.78      | 1549.72  | 3.01      | 1308.79  | 4.20      | 1720.57  | 1.16(5.62)        |
| ⑤  | 0.92      | 557.58   | 0.76      | 448.83   | 1.12      | 652.83   | 0.47              |
| ⑥  | 0.56      | 372.39   | 1.21      | 627.46   | 1.22      | 637.13   | 0.47              |

| 地震 | B地点       |          |           |          |           |          | S/V <sup>*1</sup> |
|----|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-------------------|
|    | 橋軸方向      |          | 橋軸直角方向    |          | 斜め方向      |          |                   |
|    | 最大変位 (cm) | 最大 S(kN) | 最大変位 (cm) | 最大 S(kN) | 最大変位 (cm) | 最大 S(kN) |                   |
| ①  | 0.96      | 526.63   | 1.30      | 603.55   | 1.62      | 800.03   | 0.61              |
| ②  | 2.31      | 959.27   | 3.08      | 1326.25  | 3.83      | 1624.98  | 1.09(29.06)       |
| ③  | 2.35      | 967.40   | 3.15      | 1348.37  | 3.92      | 1652.79  | 1.10(29.12)       |
| ④  | 6.32      | 1846.77  | 5.29      | 1688.44  | 7.10      | 2066.77  | 1.38(4.36)        |
| ⑤  | 1.46      | 768.42   | 1.32      | 716.29   | 1.51      | 815.22   | 0.56              |
| ⑥  | 0.85      | 543.24   | 2.44      | 1199.28  | 2.46      | 1211.88  | 0.82              |

\*1； S/V はせん断力 S とせん断耐力 V の比。1 を超えるとせん断破壊。

## 6. まとめ

兵庫県南部地震で被災した鉄筋コンクリートラーメン高架橋を対象として、実際に生じた地震動、想定地震動、示方書の模擬地震動を用いて3次元非線形動的解析を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 基盤面の地震動加速度が同じでも、地盤条件によっては、せん断破壊に至ることが明らかとなった。また、地震動加速度の卓越振動数や比較的大きな振動終了後の波形が構造物の挙動に影響を及ぼすことが明らかとなった。
- (2) 今回の解析結果から、レベル1、レベル2地震動ともに、適切であることが明らかになった。
- (3) 想定地震動について解析を行った結果、対象構造物建設時の基準で設計した場合、せん断破壊に至る可能性が高い構造物が存在することが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 平成14年制定コンクリート標準示方書耐震性能照査編，2002.
- 2) Tsuchiya, S. et al. : Seismic Performance Evaluation of RC Frames in Railroad Viaducts Using Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Analysis, Concrete Library International, No.38, pp.105-120, JSCE, Dec.2001
- 3) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5
- 4) 太田智久: 兵庫県南部地震で被災した鉄道高架橋の地震応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol24, No2, pp1021-1026, 2002.7
- 5) 二羽淳一郎ほか: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 6) 杉戸真太ほか: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集 No.493/III-27, pp.49-58, 1994.6
- 7) 古本吉倫ほか: 非常常スペクトル重ね合わせによる強震動予測法の再検討, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, I-B, pp.550-551, 1998.10.
- 8) 古本吉倫ほか: 兵庫県南部地震により被災したコンクリート橋脚地点における強震動シミュレーション, 平成11年度自然災害総合研究班中部地区シンポジウム発表論文集, pp.35-44, 1999.12
- 9) 防災科学技術研究所 KIK-NET ホームページ: <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 10) 防災科学技術研究所 K-NET ホームページ: <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>