

立体ラーメンが隣接する3径間連続非合成鈑桁橋における 2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価

中西 泰之¹・内田 諭¹・川邊 幸歩²・八木 悟³・山田 雅行⁴・服部 匡洋⁵・篠原 聖二⁶

¹正会員 博士(工学) (株)ニュージェック 道路グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

²非会員 (株)ニュージェック 道路グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

³正会員 修士(工学) (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

⁴正会員 博士(工学) (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

⁵正会員 博士(工学) (一財)阪神高速道路技術センター 調査研究部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7)

⁶正会員 博士(工学) 阪神高速道路(株) 技術部 (〒541-0056 大阪市北区中之島3-2-4)

1. はじめに

2018年6月18日7時58分頃、大阪府北部を震源とした気象庁マグニチュードM_{JMA}6.1の地震(以下、大阪府北部地震と称す)が発生し、大阪府高槻市、箕面市近辺で最大震度6弱を記録した¹⁾。阪神高速道路では地震発生直後に全線交通止めを行い、緊急点検を実施したのち、同日13時頃に交通開放した。阪神高速道路においては1995年兵庫県南部地震よりも前から地震観測システムが整備され、延長260kmの道路ネットワークに22地点の地震観測システムが稼働している²⁾。同地震においても加速度、速度、変位といった合計400成分以上の地震観測データが得られ、地震発生直後にこの地震観測データの加速度応答スペクトルのうち0.3秒前後の短周期帯が卓越していることが確認され、土木構造物への影響は限定的である可能性が高いという実証的知見を即座に得ることができた。このことから、この地震観測システムが有用に機能するものであることが証明され

た。さらに、これらの地震観測データは構造物の地震時挙動の評価や地震応答解析の精度検証などにも活用されている^{2)~7)}。

本検討では、大阪府北部地震において地震動が観測された観測点のうち、阪神高速道路神戸線海老江観測局の大P-79橋脚を対象とし、地表面および橋脚天端における観測地震動を用いて再現解析を行った。再現解析では、道路橋における一般的な動的解析手法を用いた場合の橋脚天端での地震時挙動の再現性を確認を行うとともに、動的解析における支承及び基礎のモデル化の違いに着目し、地震時挙動に与える影響について分析を行った。

2. 対象橋梁のモデル化

(1) 対象橋梁の諸元

対象橋梁の位置と震源との関係を図-1に、橋梁概要を図-2に示す。本橋梁は阪神高速3号神戸線海老江出入路に位置している。1981年竣工の橋長110.5mの3径間連続非合成鈑桁橋であり、昭和48年道路橋示方書に準拠して設計されている。下部構造は、場所打ち杭形式の基礎を有するT型のRC橋脚および直接基礎形式の鋼製立体ラーメン構造からなる。支承条件は大P-78が固定支承、大P-79～大P-81が可動支承であり、地盤種別はⅢ種である。

本橋梁は平成8年に耐震補強工事が実施されており、大P-78、大P-79、および大P-80橋脚を対象に鋼板巻立補強が行われている。



図-1 対象橋梁と震源(気象庁 HP⁸⁾ より引用・加筆)

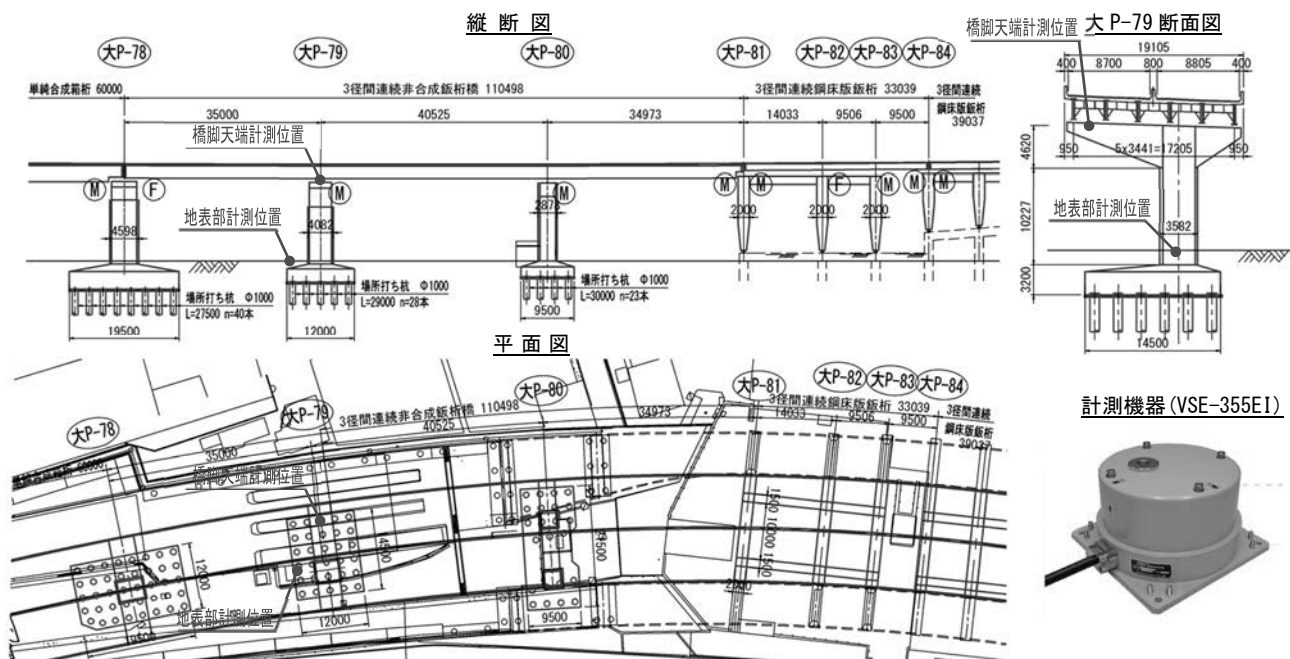


図-2 対象橋梁の概要および地震動計測位置

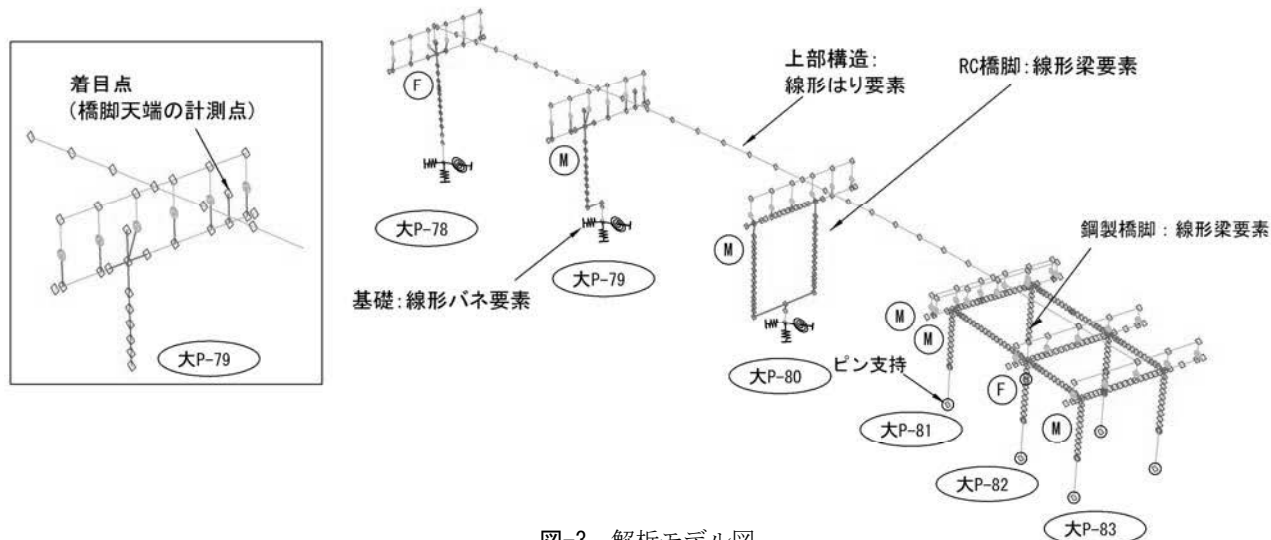


図-3 解析モデル図

(2) 対象橋梁のモデル化

図-3に解析モデルを示す。対象橋梁は大P-78～大P-81橋脚が設計振動単位の範囲であるが、隣接する大P-81～大P-83橋脚区間が鋼製立体ラーメン構造であり、対象橋梁の地震時挙動に影響すると考えられることから、立体ラーメン構造部を含む大P-78～大P-83橋脚の区間をモデル化する。また、大P-78橋脚に載荷される隣接桁の影響は集中質量により考慮する。なお、対象橋梁では、後述するとおり、観測地震動が比較的小さく目立った損傷は生じていないため、橋脚はすべて線形梁要素でモデル化した。また、上部構造は線形梁要素とした。

支承は設計時の考え方に基づき、橋軸方向の水平力が固定支承のみに作用し、可動支承には橋軸方向の水平力が作用しないことを想定しモデル化した。

基礎については、道路橋示方書V耐震設計編⁹⁾に示される基礎バネでモデル化した。

3. 対象地震の観測波形と分析

(1) 地震観測システムと波形処理

地震観測システムは、阪神高速道路総合防災システムのサブシステムであり、図-4に示すように全路線で22地点の構造物、地表面、地中部で合計400成分以上の地震観測データを得ることができる。計測機器はサーボ型速度計¹⁰⁾であり、橋軸、橋軸直角、鉛直の3方向成分を計測することができる。対象橋梁への設置個所数は図-2に示すように、大P-79橋脚の地表部、橋脚天端の合計2箇所であり、いずれも

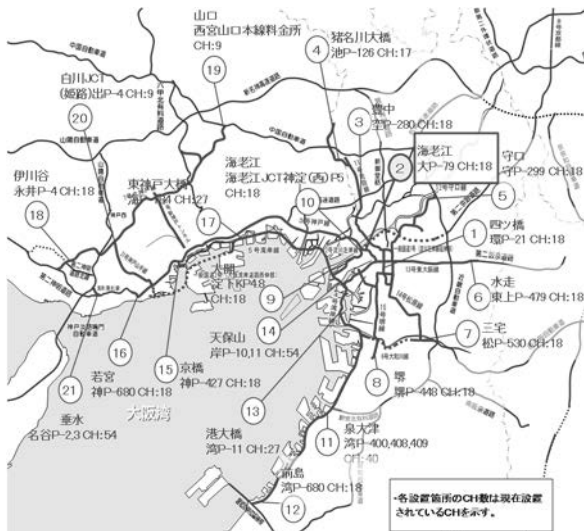


図-4 地震計設置個所一覧

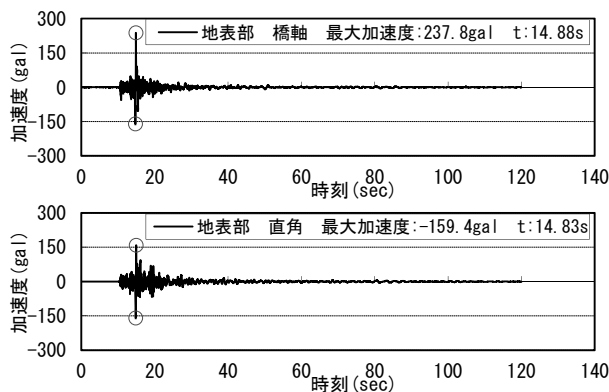


図-5 地表部における加速度時刻歴波形
(上段: 橋軸, 下段: 橋軸直角)

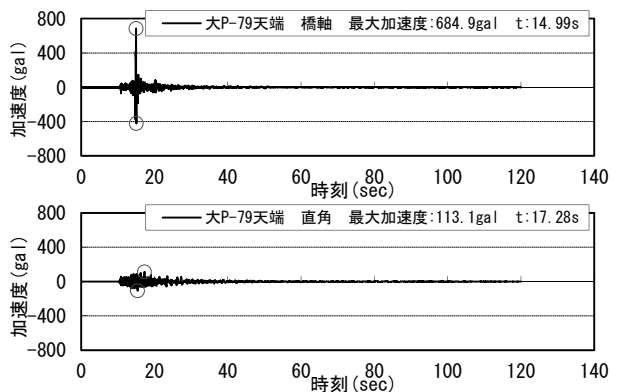
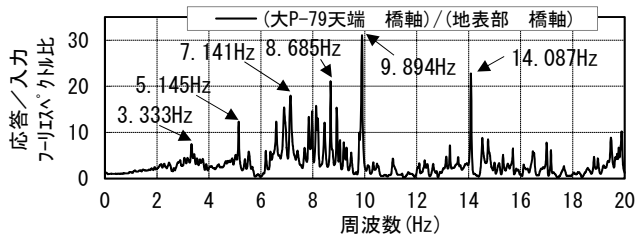
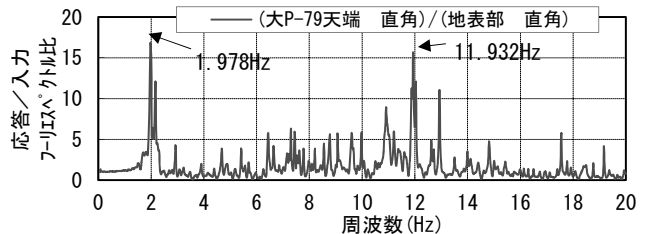


図-6 橋脚天端における加速度時刻歴波形
(上段: 橋軸, 下段: 橋軸直角)

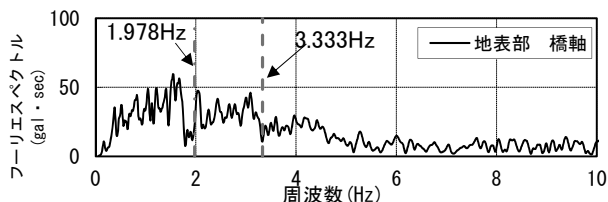


(a) 橋軸方向

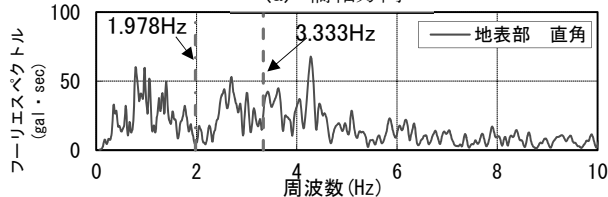


(b) 橋軸直角方向

図-7 観測波のフーリエスペクトル比



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-8 地表部におけるフーリエスペクトル

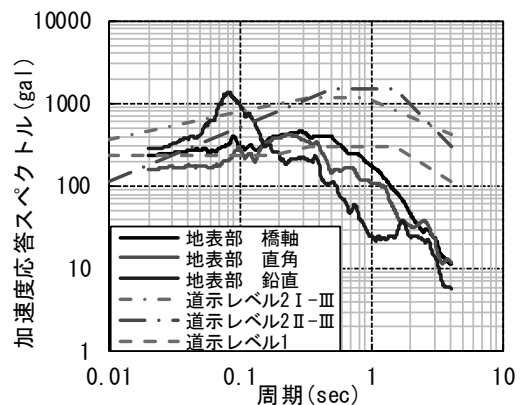


図-9 加速度応答スペクトル(減衰 5%)

サーボコイルで計測した加速度と、これをコンデンサで積分した速度が出力される。

(2) 対象地震の観測波形

計測結果のうち、加速度波形を図-5および図-6に、橋脚天端にて得られた加速度波形のフーリエスペクトルを地表部における波形のフーリエスペクトルにて除したフーリエスペクトル比を図-7にそれぞれ示す。

まず、加速度波形に着目すると、対象地点の地表部においては、橋軸方向に238gal、橋軸直角方向に159galの最大加速度が生じている。橋脚天端においては、橋軸方向に685galの最大応答加速度が生じており、地表部に対して約2.9倍の加速度応

答の増幅が認められる。一方で橋軸直角方向には113galとほとんど応答していない。

次に、図-7に示すフーリエスペクトル比に着目すると、最も低次の卓越振動数は、橋軸直角方向において1.98Hzとなる。橋軸方向においては3.33Hz、5.15Hz、9.89Hz、14.09Hz等に卓越が認められる。

また、地表部におけるフーリエスペクトルを図-8に示す。同図に示すとおり、橋軸直角方向における固有周波数であると推定される1.98Hzにおいて、地震動の周波数成分が少ないため、橋軸直角方向に対して優位な加速度の増幅が認められなかったと考えられる。なお、地震動に1.98Hz付近の周波数成分が少ない傾向については、近隣観測点においても確認されている¹¹⁾。

図-9には、観測記録の加速度応答スペクトルを道路橋示方書Ⅴ耐震設計編⁹⁾に示される加速度応答スペクトルと併せて示す。今回の観測記録はレベル2地震動と比較して小さく、レベル1地震動をやや超過する程度の大きさであった。そのため、平成8年に耐震補強工事が実施された海老江橋においては、大阪府北部地震において損傷が認められず、弾性応答に留まったと考えられる。なお、現地踏査を実施した結果、損傷は確認されなかった。

4. 固有振動特性

固有値解析の結果として、主要な固有振動モードを図-10に示す。

橋軸方向には、固定条件である大P-78橋脚が主に変形する振動モードが最も低次にて現れ、固有周波数は $f=1.73\text{Hz}$ ($=0.58\text{s}$)となる。また、今回地震計を設置した大P-79橋脚の変形が卓越する振動モードは、 $f=3.68\text{Hz}$ ($=0.272\text{s}$)において現れ、フーリエスペクトルより確認された卓越振動数3.33Hzと概ね一致が認められた。

橋軸直角方向に対しては、大P-78橋脚、大P-79橋脚、鋼製立体ラーメン構造が大きく変形するモードが最も低次にて確認された。固有周波数は $f=1.88\text{Hz}$ ($=0.53\text{s}$)となり、波形解析により得られた卓越振動数($=1.98\text{Hz}$)と概ね一致した。

5. 地震時の再現

(1) 解析条件

解析条件を表-1に示す。地震動の加振方向は、計測された地表部加速度を用いて、3方向の同時加振とする。使用した解析ソフトウェアは構造解析プログラムFRAME3D (ver5.01.16)¹²⁾である。

設定したRayleigh減衰を図-11に示す。橋脚天端の

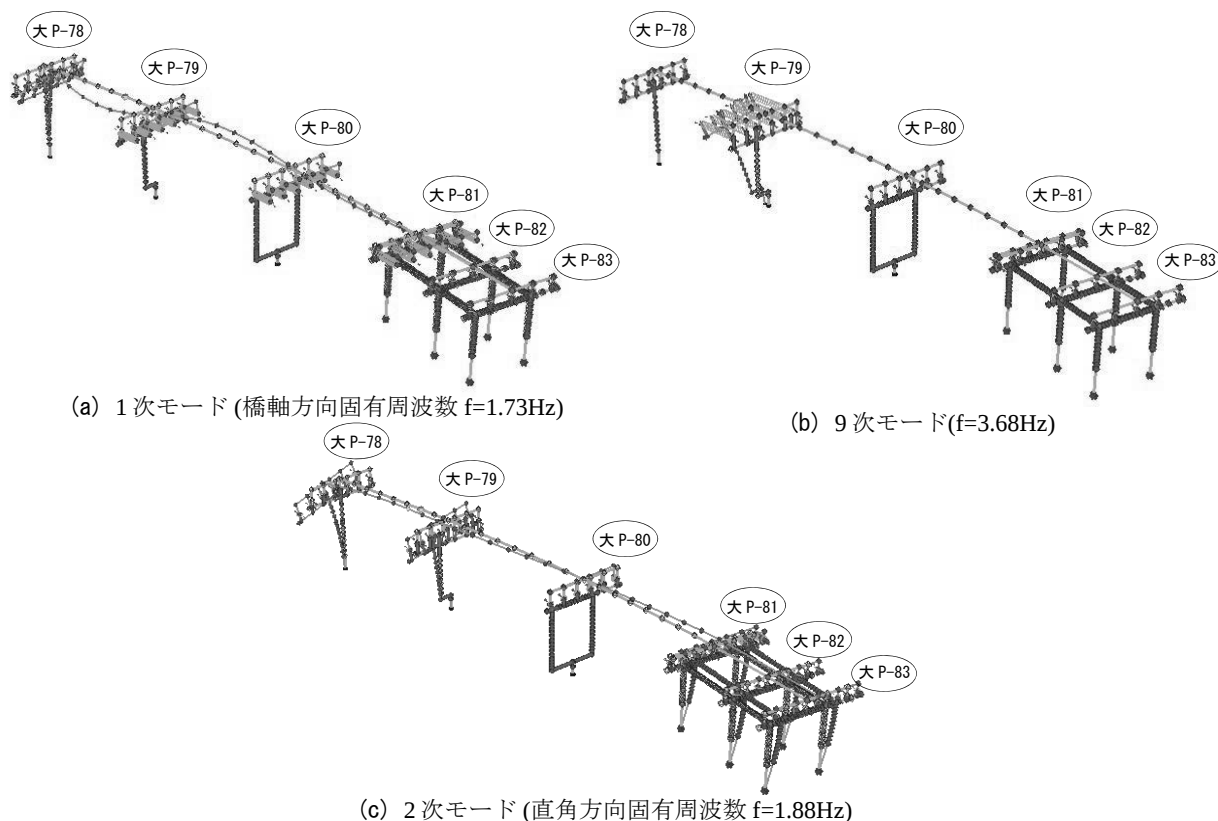


図-10 主要振動モード図

地震計の設置位置は梁端部であるため、当該位置での地震時応答には、水平2方向だけでなく上下方向の固有振動モード寄与すると考えられる。よって、再現解析にあたってのRayleigh型粘性減衰の比例定数は、水平2方向と上下方向のモード寄与率のベクトル和を重み係数として最小2乗法によって求めた¹³⁾。また、各要素の等価減衰定数は道路橋示方書V耐震設計編⁹⁾を参考に表-2に示すとおりである。

(2) 再現解析結果

加速度に関する結果を図-12に、変位に関する結果を図-13にそれぞれ計測結果と比較して示す。なお、変位に関する計測結果は、計測された速度波形に対して、0.2Hz～20Hzバンドパスフィルター処理を施し、基線補正を行った上で直接積分して算定した値である。また、図-13に示す変位は橋脚部での応答と地表面での応答の相対変位を示している。

図-12および図-13に示すとおり、固有周波数につ

表-1 解析条件

ソフト名	FRAME3D ver5.01.16
要素	線形梁要素 (オイラー梁)
時間積分法	直接積分法(ニューマークβ法)
幾何学的非線形	微小変位理論
減衰特性	レイリー減衰

表-2 等価減衰定数⁹⁾

項目	等価減衰定数
上部構造 (鋼桁・弾性)	2%
鋼製橋脚 (弾性)	3%
RC 橋脚 (弾性)	5%
杭基礎 (大 P-78～大 P-80)	20%
直接基礎 (大 P-81～大 P-83)	10%

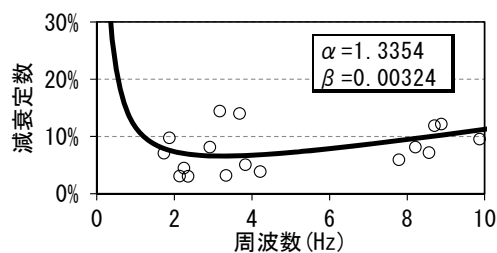
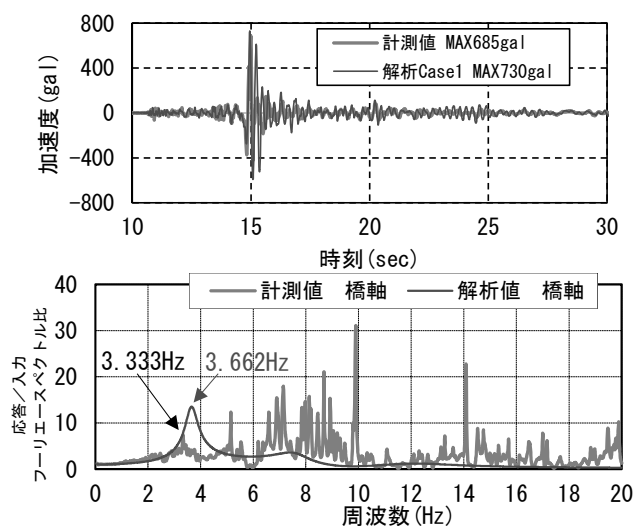
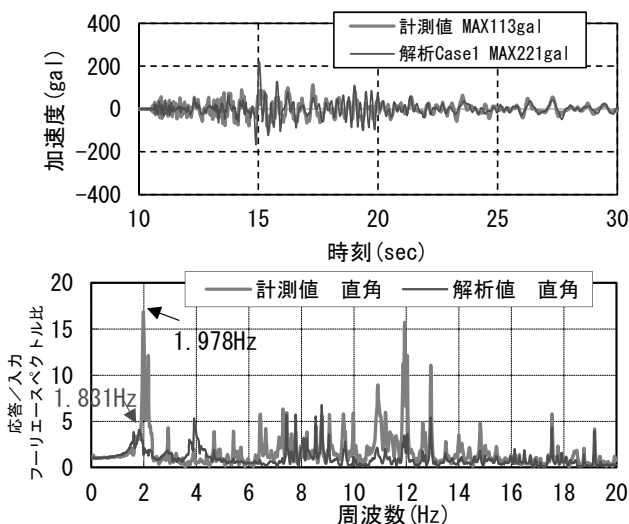


図-11 設定したレイリー減衰(基本ケース)

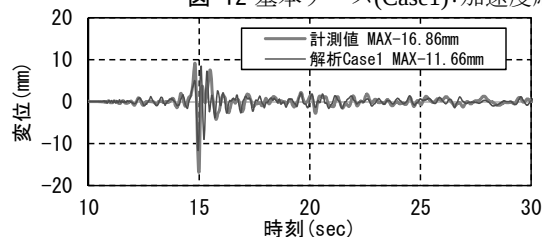


(a) 橋軸方向

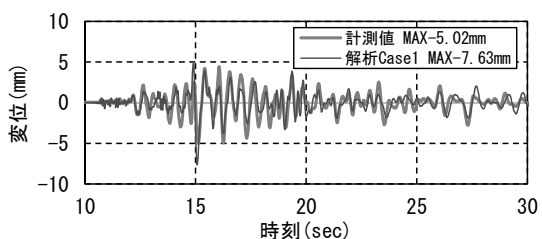


(b) 橋軸直角方向

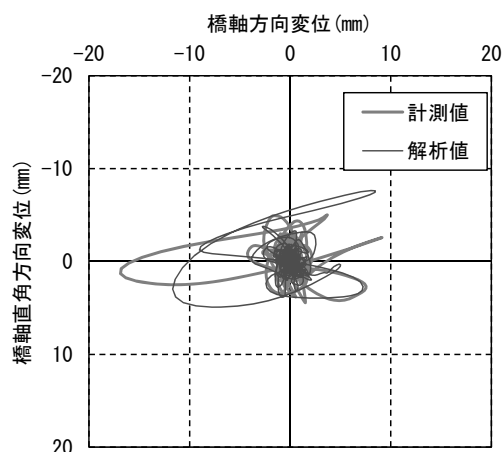
図-12 基本ケース(Case1): 加速度応答時刻歴 (上段) とフーリエスペクトル



(a) 橋軸方向時刻歴



(b) 橋軸直角方向時刻歴



(c) 橋軸-橋軸直角方向の関係

図-13 変位計測値 (観測速度波形より算定) と基本ケース(Case1)解析値の比較

いて再現できており、応答波形の性状についても概ね整合が確認できた。ただし、最大加速度については解析結果が若干過大に評価している傾向が認められる。これは、可動支承を橋軸方向にフリーとしたため、橋軸方向のフーリエスペクトル比に示すように、高次モードの振動による影響が考慮できていないためと考える。

また、橋軸直角方向に対しても、固有周波数や振動性状については再現できているものの、最大加速度や最大変位については、解析結果がやや過大に評価する傾向が認められた。これらについては、基礎のモデル化手法による影響などが考えられる。

(3) 支承・基礎のモデル化に関するパラメータ分析

再現解析の結果、支承部ならびに基礎ばねのモデル化手法が地震時挙動に与える影響が考えられたため、これらのモデル化手法に着目してパラメータ解析を実施した。

a) 解析ケース

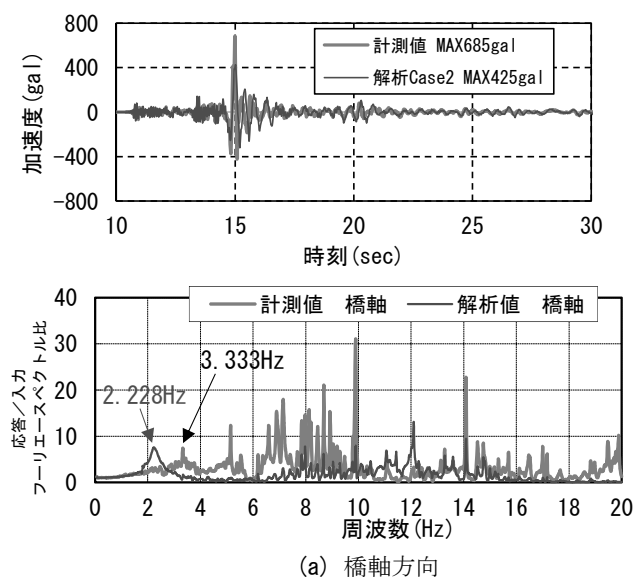
検討ケースは表-3に示すとおりであり、各解析ケースの着目点は以下である。

Case2は、対象橋梁の観測地震動が小さいため、

表-3 解析ケース

解析ケース	支承のモデル化	基礎のモデル化
Case1(基本ケース) 支承可動・基礎ばね考慮ケース	固定支承：固定 可動支承：可動	基礎ばね
Case2 支承ピン・基礎ばね考慮ケース	固定支承：固定 可動支承：固定	基礎ばね
Case3 支承摩擦・基礎ばね考慮ケース	固定支承：固定 可動支承：履歴減衰	基礎ばね
Case4 支承摩擦・基礎固定ケース	固定支承：固定 可動支承：履歴減衰	固定

赤字は基本ケースからの変更点を示す



可動支承に作用する水平力が静摩擦力以下となり、可動支承が固定状態に留まることを想定したケースである。具体的には、基本ケースから、可動支承の支承条件を固定に変更しモデル化している。

Case3は、地震動の作用中において、可動支承に作用する水平力が静摩擦力を超えた時にすべることを想定し、基本ケースから可動支承の支承条件を、摩擦を考慮した履歴減衰モデルに変更したケースである。なお、支承は、設計図書を参考に、静摩擦係数0.15とし、静摩擦係数に死荷重反力を乗じた値を上回る水平力が作用した場合には、可動化するようにモデル化した。

Case4は、入力地震動として採用した地震記録が、概ねフーチング上端付近の地盤上での観測記録であることから、入力地震動には地盤や基礎バネによる相互作用をある程度含んでいると考え、基礎のモデル化有無による影響について着目し、基礎を固定としたケースである。

b) Case2：可動支承を固定とした解析結果

Case2の解析結果を図-14に示す。Case2においては、計測値と比較して、橋軸方向の固有周波数に差異があり、最大加速度を過小に評価している傾向が認められた。対象橋梁の可動支承は、地震時には静摩擦力を上回る水平力が作用し、可動状態となっていたことがわかる。

c) Case3：可動支承の摩擦を考慮した解析結果

Case3の解析結果を図-15に示す。Case3では、基本ケースと同様に、橋軸・直角方向ともに固有周波数について計測値を再現できている。また、高次モードの影響についても基本ケースに比べて一致が認めており、最大加速度等についても基本ケースと比べて観測記録を精度よく再現できている。

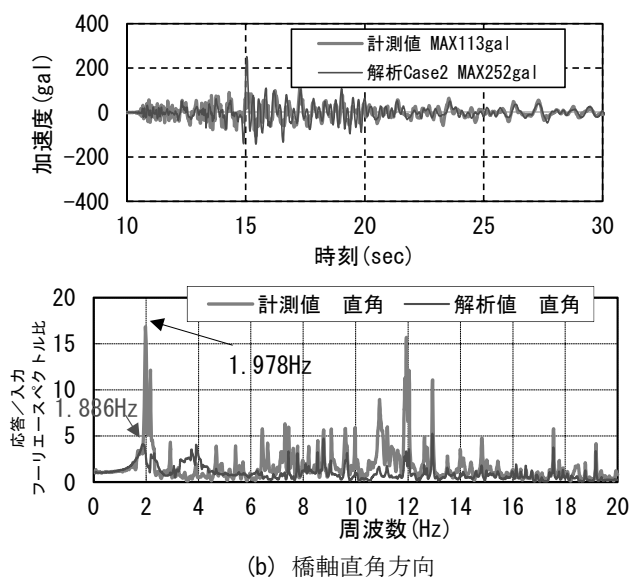


図-14 Case2: 加速度応答時刻歴（上段）とフーリエスペクトル比（下段）

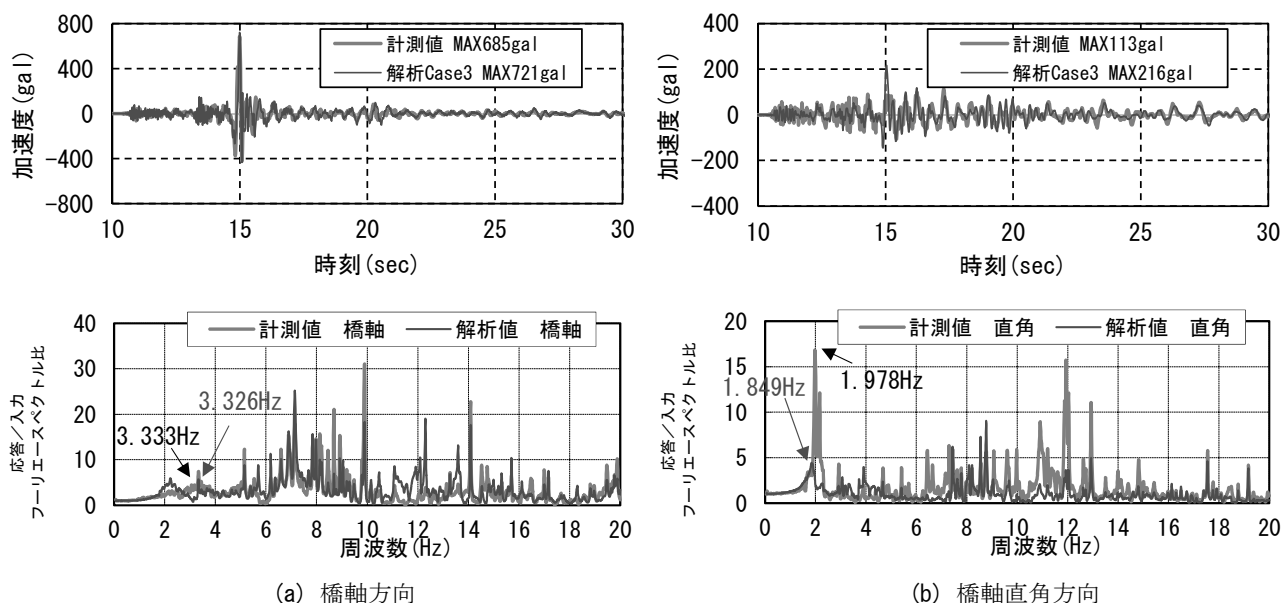


図-15 Case3:加速度応答時刻歴（上段）とフーリエスペクトル比（下段）

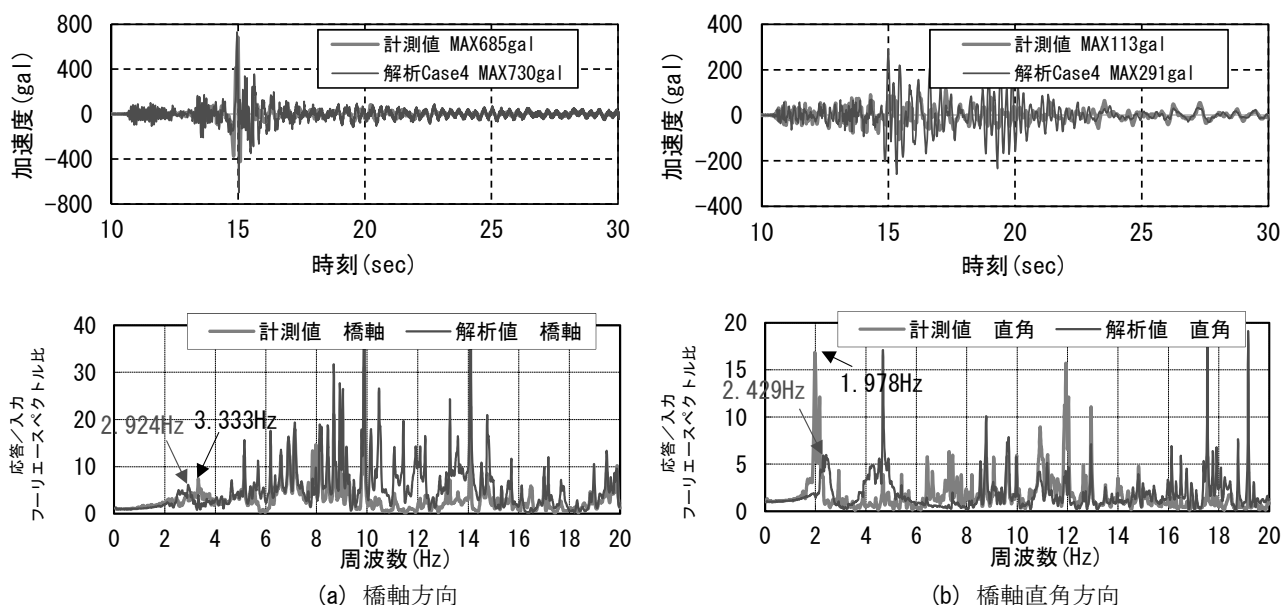


図-16 Case4:加速度応答時刻歴（上段）とフーリエスペクトル比（下段）

d) Case4：基礎のモデル化に着目した解析結果

基礎のモデル化による影響に着目し、図-15に示すCase3とCase4を比較すると、基礎バネを考慮しないCase4においては固有周波数が一致せず、応答性状にも差異が生じる。基礎付近の地盤上で得られた観測波形を対象とし地震時挙動を再現する場合においても、基礎ばねをモデル化する必要があると考える。

以上から、支承や基礎のモデル化が橋梁の応答性状に与える影響は大きく、本検討ケースにおいては支承の摩擦を評価し、基礎ばねを考慮することにより、再現解析の精度が向上した。

6. まとめ

本検討では、道路橋において一般的に用いられる動的解析モデルの再現性を検討するとともに、地震時挙動の再現性向上のためのモデル化手法を検討するために、海老江橋を対象とする大阪府北部地震の再現解析を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 再現解析の結果、本検討で対象とした連続桁の可動橋脚では、道路橋において一般的に用いられるモデル化手法（基本ケース）を適用することで、対象橋梁の固有振動特性や振動性状を概ね再現することがわかった。

- (2) 再現解析の結果、支承のモデル化が橋梁の応答性状に与える影響は大きく、本検討ケースにおいては支承の摩擦による影響についてモデル化することにより、再現解析の精度が向上した。地震時挙動の再現を行う場合には、作用する地震動のレベルに応じて支承条件を適切にモデル化する必要があると考える。
- (3) 再現解析の結果、基礎付近の地盤上で得られた観測波形を対象とし地震時挙動を再現する場合においても、基礎ばねをモデル化することにより再現解析の精度が向上することがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会：2018年6月18日大阪府北部の地震の調査報告会，土木学会・地震工学委員会，2018.7.23.
- 2) 服部匡洋，大石秀雄，加藤祥久，中村真貴，馬越一也，篠原聖二：長大トラス橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，第38回地震工学研究発表会，A21-1364，2018.
- 3) 馬越一也，中村真貴，服部匡洋，大石秀雄，篠原聖二：長大斜張橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，第38回地震工学研究発表会，A21-1335，2018.
- 4) 松本崇志，光川直宏，服部匡洋，馬越一也，篠原聖二：免震支承を有する4径間連続鋼箱桁橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，第38回地震工学研究発表会，A21-1312，2018.
- 5) 佐々木達生，徳橋亮治，服部匡洋，馬越一也，篠原聖二：10径間連続PC箱桁橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，第38回地震工学研究発表会，A21-1357，2018.
- 6) 富健一，許佳奕，服部匡洋，馬越一也，篠原聖二：ケーソン基礎を有する鋼単純合成鈹桁における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，第38回地震工学研究発表会，A21-1305，2018.
- 7) 服部匡洋，安藤高士，大石秀雄，馬越一也，中村真貴，篠原聖二，高田佳彦，西岡勉：広域道路ネットワーク地震応答解析における地震被災危険度評価に関する検討，第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2018.
- 8) 国土交通省気象庁：震度データベース検索，<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V，2012.
- 10) (株)東京測振：ブロードバンド地震観測と被害予測に適したサーボ型速度計，<http://www.tosoku.co.jp/products/servo/pdf/vse355ei-je.pdf>
- 11) 関西地震観測研究協議会 福島観測点：<http://www.ceorka.org/>
- 12) 甲斐義隆，矢部正明，秦吉弥：非線形梁要素を用いた動的解析による曲線橋を支持する免震支承の損傷の再現性，第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2016.
- 13) 臺原直，大月哲，矢部正明：非線形動的解析に用いるRayleigh減衰のモデル化に関する提案，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.371-378，1998.