

鋼単純合成箱桁橋における 2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価

傅斌¹・藤田亮一¹・福島康宏¹・杉山直也²・篠原聖二³

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発（〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39）

²非会員 一般財団法人阪神高速道路技術センター（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）

³正会員 阪神高速道路株式会社（〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-4）

1. はじめに

阪神高速道路では22カ所に地震計を設置し、地表面および構造物の振動を観測することで構造物の地震時挙動を把握するためにデータを蓄積している。2018年6月18日7時58分に大阪府北部で発生した地震においても観測記録が得られており、データの分析が進められている。また、阪神高速道路全線を対象とした構造モデルを作成し、個々の構造物のみに着目するのではなくネットワークとしての地震時挙動をシミュレーションして被害を予測する研究が続けられているが、解析モデルの精度の検証が課題のひとつとなっている。本文では、解析モデルの精度検証に向けた取り組みの一環として、前述の観測記録を用い、鋼単純合成箱桁橋の再現解析を行った結果を報告する。

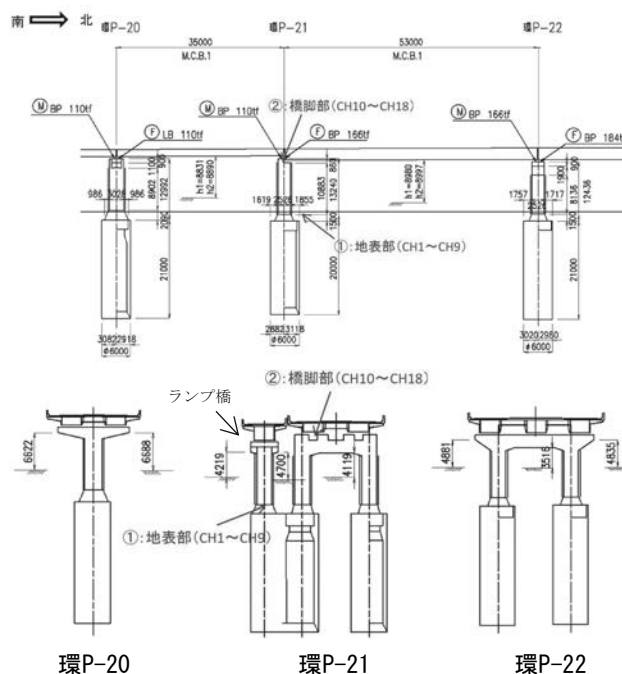


図-1 対象橋梁

2. 対象橋梁

(1) 構造概要

対象橋梁の概要を図-1に示す。橋梁形式は鋼単純合成箱桁橋であり、2018年6月に発生した大阪府北部を震源とする地震の震央からは直線距離で約22kmの位置にある(図-2参照)。地震計が設置されている橋脚(P-21)は2主箱桁と3主箱桁の掛け違い部にあたる。橋脚は一層二柱RCラーメンおよびRC単柱であり、基礎はケーソン基礎である。ランプ橋と隣接しており、P-21橋脚は基礎をランプ橋の橋脚と共有している。周辺地盤は「道路橋示方書¹⁾」の分類でⅡ種地盤に該当する。



図-2 対象橋梁と大阪府北部地震の震央位置



写真-1 地震計が設置された橋脚(P-21)

(2) 設計基準

設計基準は「鋼道路橋設計示方書²⁾」であり、1995年兵庫県南部地震の後に「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様³⁾」に基づいて耐震補強設計(鋼板巻立て補強)が実施されている。

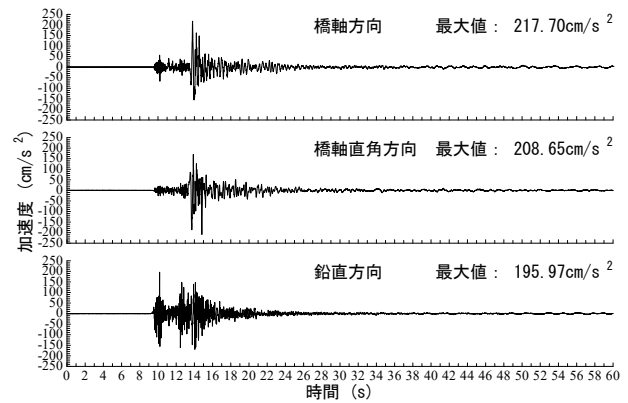
(3) 地震観測点

P-21橋脚近傍の地表面(図-1の①)とP-21橋脚天端(図-1の②)に(株)東京測振製のサーボ型速度計(VSE-355EI)が設置されている。各地震計では橋軸方向、直角方向、鉛直方向の3成分が観測されている。

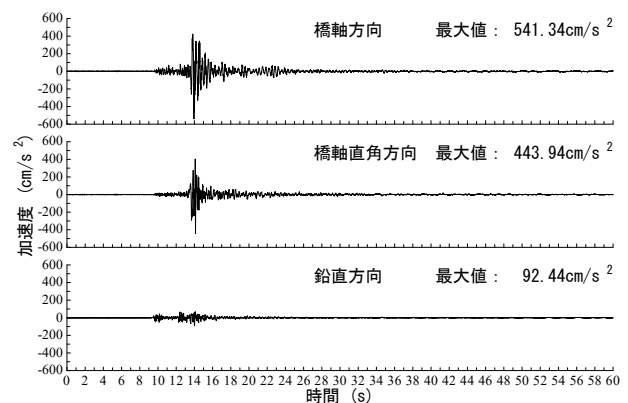
3. 観測記録

対象橋梁の地表面、橋脚天端で観測された加速度時刻歴波形を図-3に示す。地表面、橋脚天端いずれも長周期成分のノイズを除去するため、0.1Hz以下の低周波数成分をカットしている。地表面での水平方向の最大加速度は218gal、橋脚天端では541galであり、約2.5倍に増幅されている。

図-3で示した観測記録のフーリエ振幅スペクトルを図-4、図-5に示す。水平成分では2.8Hzが卓越しており、これが対象橋梁地点のサイト増幅特性の卓越周波数に対応するものと考えられる。また、地表面での観測記録の加速度応答スペクトルを図-6に示す。固有周期0.1～0.6秒程度では、道路橋示方書のレベル1地震動を上回るが、レベル2地震動と比べると十分小さな地震動であったことがわかる。橋軸方向では固有周期0.4秒弱、橋軸直角方向では固有周期0.3秒弱で応答が大きくなっている。

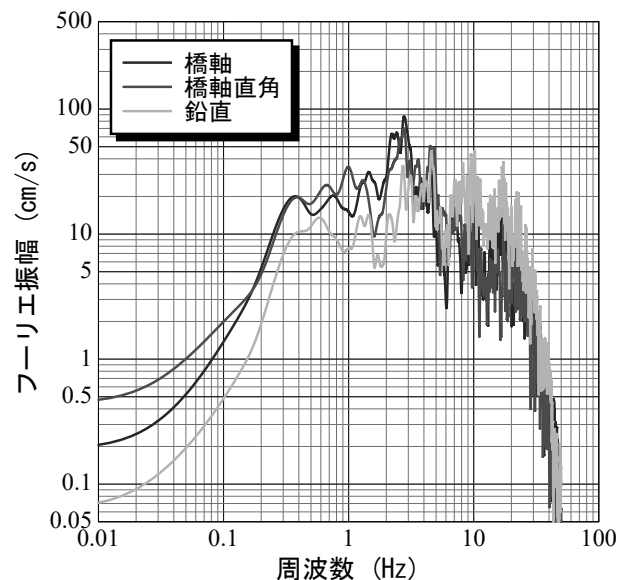


(1) 地表面



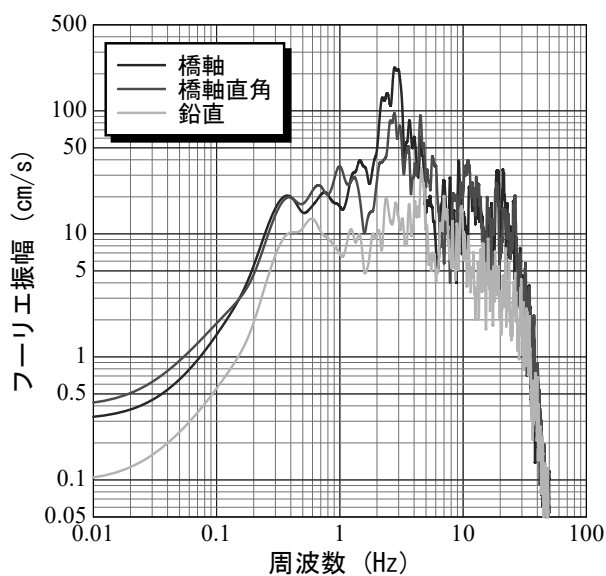
(2) 橋脚天端

図-3 大阪府北部地震の加速度時刻歴波形



(1) 地表面

図-4 大阪府北部地震のフーリエ振幅スペクトル



(2) 橋脚天端

図-5 大阪府北部地震のフーリエ振幅スペクトル

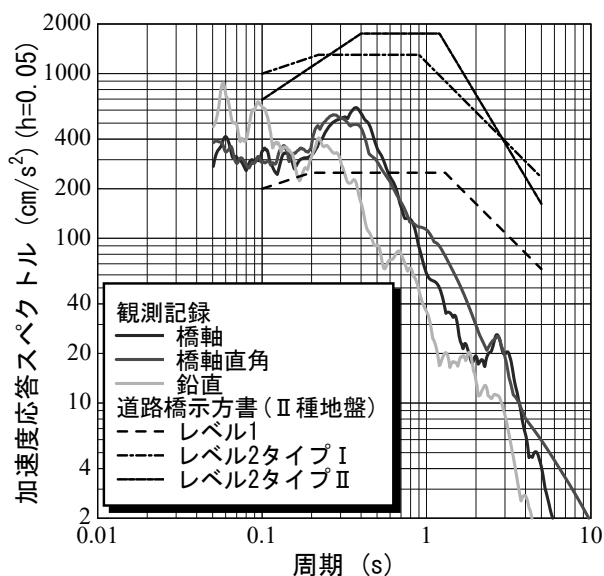


図-6 大阪府北部地震の加速度応答スペクトル(地表面)

4. 再現解析

(1) 解析モデル

再現解析のために、図-7のような骨組みモデルを作成した。モデル化の範囲を橋脚単体とした場合(単体モデル)と、隣接橋脚と上部構造を含めた範囲とした場合(2径間モデル)のそれぞれについてモデルを作成した。

上部構造と橋脚は弾性梁要素でモデル化した。図-6で示したように、観測された地震動が道路橋示方書のレベル1地震動をやや上回る程度であり、また、

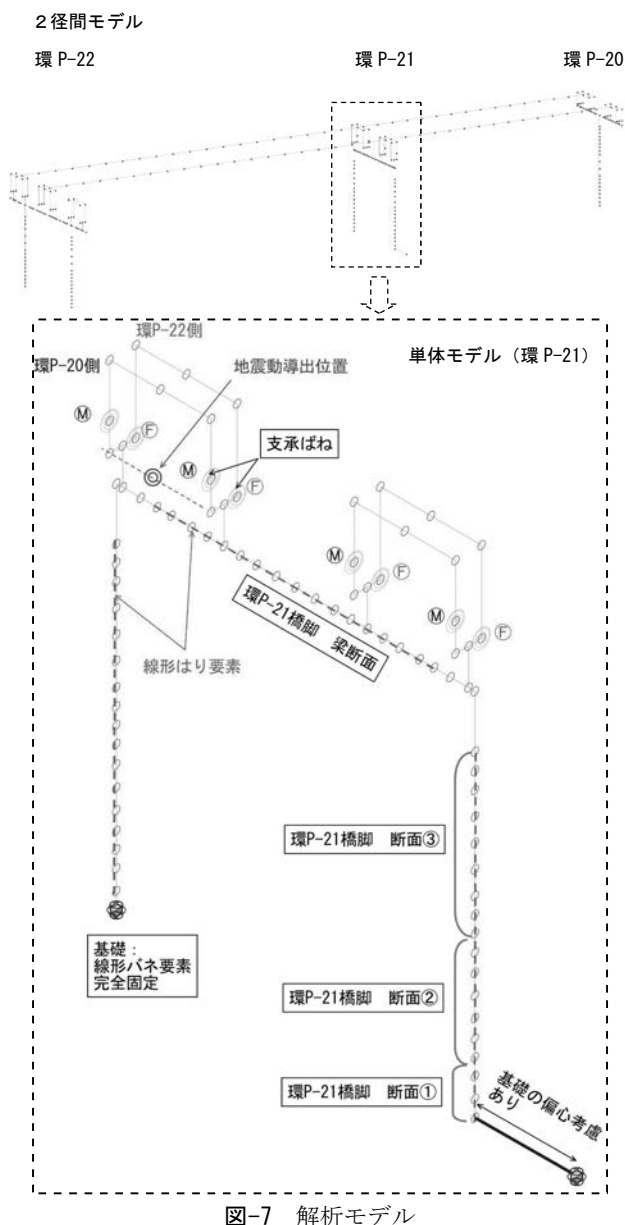


図-7 解析モデル

現地踏査の結果、地震後に大きな変状が見られなかったことから、橋脚や上部構造は降伏していないと判断して非線形性は考慮しなかった。

基礎については道路橋示方書に準拠して集約ばねとしてモデル化したが、橋梁の地震時挙動に与える基礎の影響を確認するために、橋脚基部を固定としたケースについても試算した。支承はばね要素でモデル化し、可動支承はばね剛性を十分小さくし、固定支承はばね剛性を大きくした。可動支承の摩擦を考慮する場合には、摩擦係数を0.1とした場合に対応する荷重を降伏点とするバイリニア型の非線形特性を付与した⁵⁾。

減衰定数は、道路橋示方書を参考に上部構造3%、橋脚5%、基礎20%とし、減衰行列はレイリー減衰を仮定して設定した。

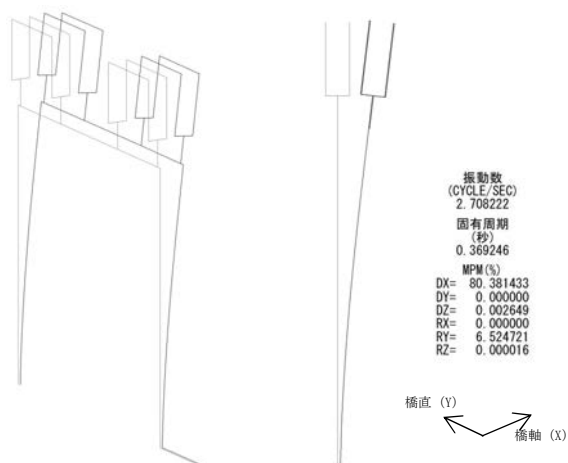


図-8 一次振動モード(単体モデル, 橋軸方向)

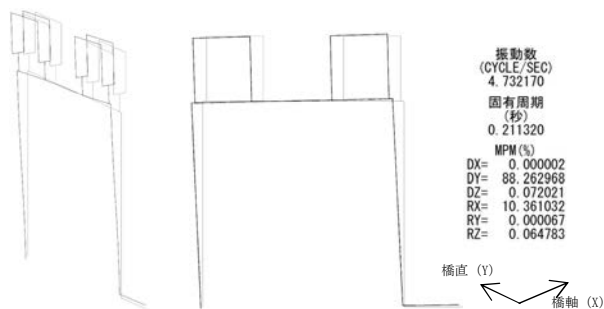


図-9 一次振動モード(単体モデル, 直角方向)

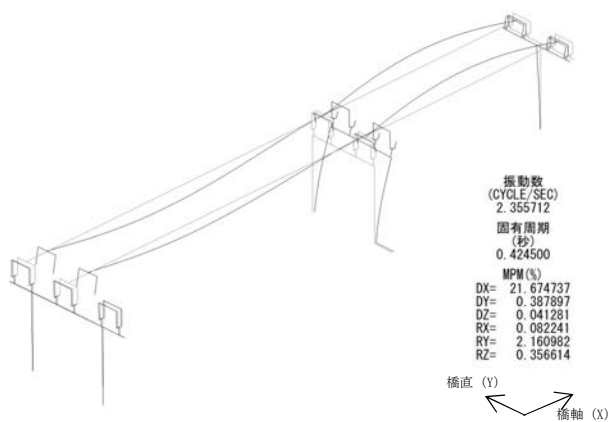


図-10 一次振動モード(2径間モデル, 橋軸方向)

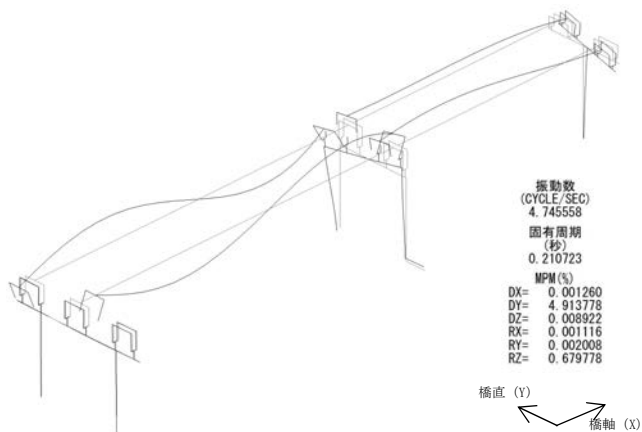
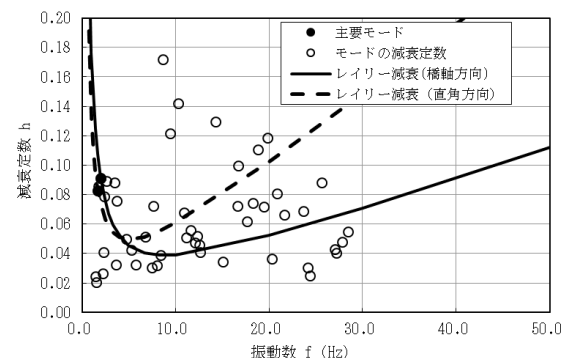
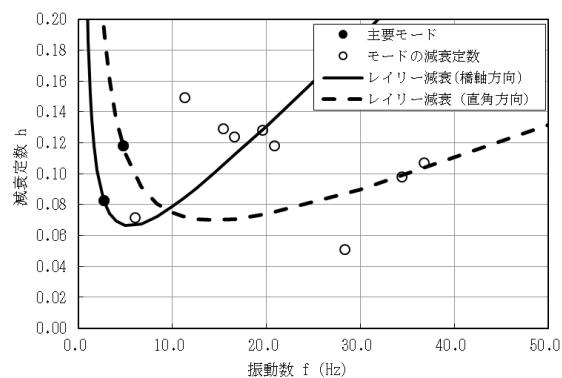
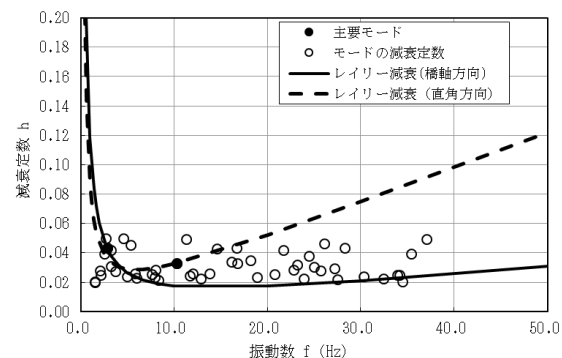
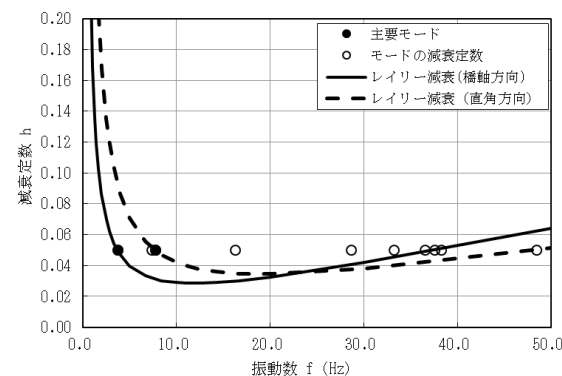


図-11 一次振動モード(2径間モデル, 直角方向)



(1) 基礎ばね考慮(上: 単体モデル, 下: 2径間モデル)



(2) 基礎ばね無視(上: 単体モデル, 下: 2径間モデル)

図-12 レイリー減衰の設定

(2) 固有値解析

作成した2つのモデル(基本ケース)を用いて固有値解析を行った。以下に固有振動モードを図-8～図-11に示す。単体モデルの橋軸方向の一次振動数は2.7Hz, 直角方向は4.7Hz, 2径間モデルの橋軸方向

の一次振動数は2.4Hz、直角方向は4.7Hzであり、単体モデルと2径間モデルに大きな差は見られなかった。前述のとおり基礎を固定とした場合についても計算を行っているが、その場合の固有振動数は、単体モデルでは橋軸方向で3.7Hz、直角方向で6.4Hzとなった。2径間モデルでは橋軸方向で3.2Hz、直角方向で10.3Hzとなった。

固有値解析結果をふまえて図-12に示すようにレイリー減衰を設定した。基礎ばねを考慮したケースでは基礎の減衰の影響が大きいため、モード減衰定数が基礎ばねを無視した場合に比べて大きくなる傾向であった。橋軸方向と直角方向それぞれに対して、レイリー減衰の曲線が各モードの減衰定数を包絡できるように設定した。

(3) 単体モデルを用いた動的解析

単体モデルを用いた解析ケースと主要なパラメータを表-2に示す。各ケースのモデルを用いて地表面で観測された加速度波形を入力して動的解析を行い、橋脚天端の応答加速度を観測記録と比較した。

基礎ばねについては道路橋示方書に基づく設定とした基本ケース(基礎ばね考慮)と、固定としたもの(基礎ばね無視)の両方について計算した。図-13に橋軸方向の解析結果を示す。上段が基礎ばねを考慮したケース、下段が基礎ばねを無視したケースである。基礎ばねを考慮した場合、解析結果の方が観測記録よりもやや長周期で振動しており、かつ最大値の発生が遅れている。基礎を固定するとこれらの傾向が改善され、おおむね振動周期と最大値発生のタイミングが一致することが確認できた。当該橋梁はケーソン基礎で剛性の高い基礎であり、今回のようなやや小さい地震に対してはあまり基礎が応答しなかったと考えられる。道路橋示方書の手法で算出する基礎ばねはレベル2地震動のような大規模地震を想定して地盤の軟化を考慮したものとなっていることから、今回のような中小規模の地震応答の再現に用いるには剛性が小さ過ぎ、観測記録に比べ長周期で評価されたと考えられる。

橋軸直角方向の結果は図-14のとおりであり、橋軸方向と同様に基礎ばねを考慮した基本ケースでは解析結果の方が観測記録よりもやや長周期で振動しており、最大値が発生するタイミングも遅い。基礎を固定するとこれらの傾向が改善されたが、観測記録では14.1秒付近で短周期のパルス状の振動が生じ、ここで最大値が発生しているのに対し、再現解析ではこの特徴が表現できていない。

表-2 単体モデルの解析ケース

解析ケース	基礎ばね	支承摩擦	ランプ部	補足
P-1	考慮	非考慮	無し	基本ケース
P-2	無視	非考慮	無し	図-13, 14
P-3	考慮	非考慮	有り	図-16

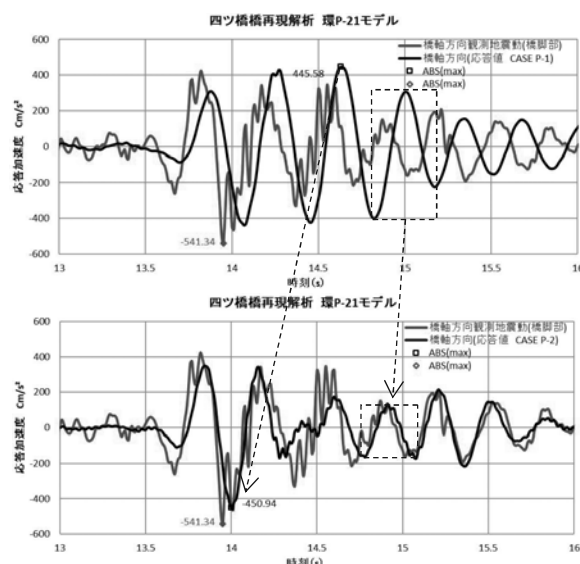


図-13 解析結果(橋軸方向, 上: 基礎ばね考慮, 下: 基礎ばね無視, 黒線: 解析結果)

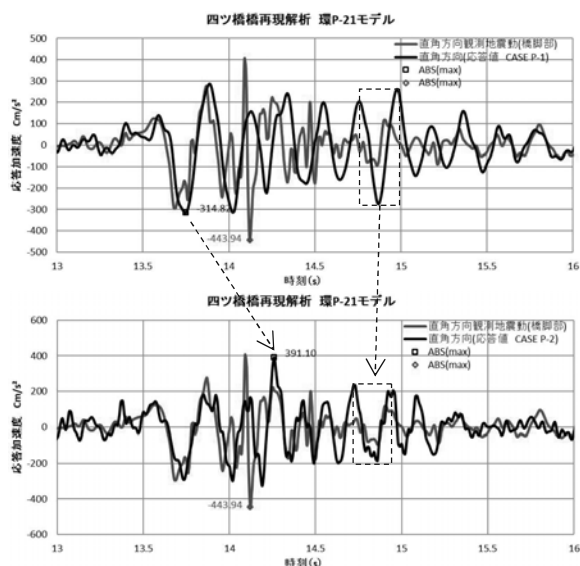


図-14 解析結果(直角方向, 上: 基礎ばね考慮, 下: 基礎ばね無視, 黒線: 解析結果)

そこで、この振動の原因が基礎を共有するランプ部の振動に起因すると仮定し、その検証のためランプ部を基本ケースに組み込んで再計算を行った。ランプ部を追加したモデルを図-15に示す。

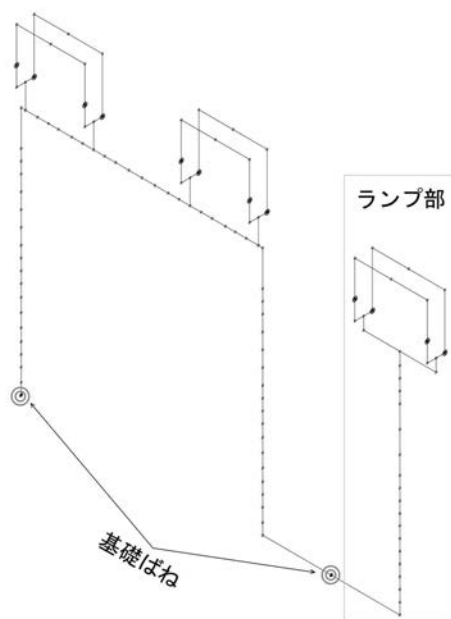


図-15 解析モデル(ランプ部追加)

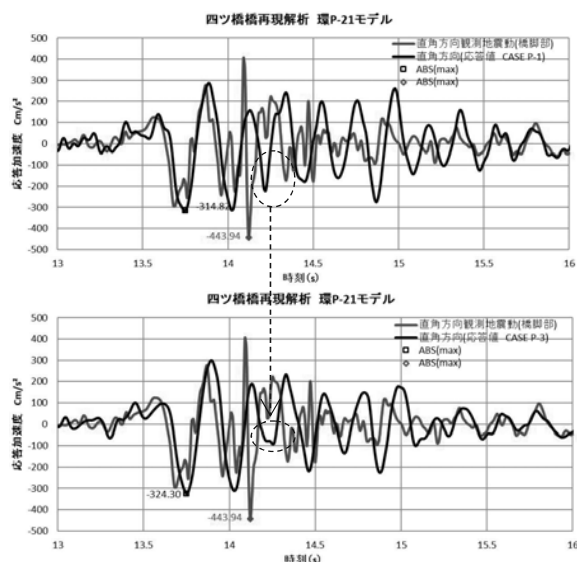


図-16 解析結果(直角方向, 上: ランプ部無し, 下: ランプ部追加, 黒線: 解析結果)

基礎を共有しているためP-21橋脚とランプ部の橋脚の基部を剛梁で接合し、その中央に基礎ばねを設置した。ランプ部の橋脚や支承のモデル化は本線と同様とした。解析結果を図-16に示す。同図の上段はランプ部無しのケース、下段はランプ部を追加したケースであるが、両者に大きな違いは認められない。ランプ部を追加したケースの方が主要動以降の振動が小さくなっており、これがランプ部の振動に起因するものと考えられるが、観測記録に見られるような大きな振動は再現できなかった。したがって、この短周期の振動はその他の要因で生じたと考えられる。

表-3 2径間モデルの解析ケース

解析ケース	基礎ばね	支承摩擦	ランプ部	補足
A-1	考慮	非考慮	無し	実務モデル
A-2	非考慮	非考慮	無し	図-17, 18
A-3	非考慮	考慮	無し	図-19, 20
A-4	考慮	非考慮	有り	図-21, 22

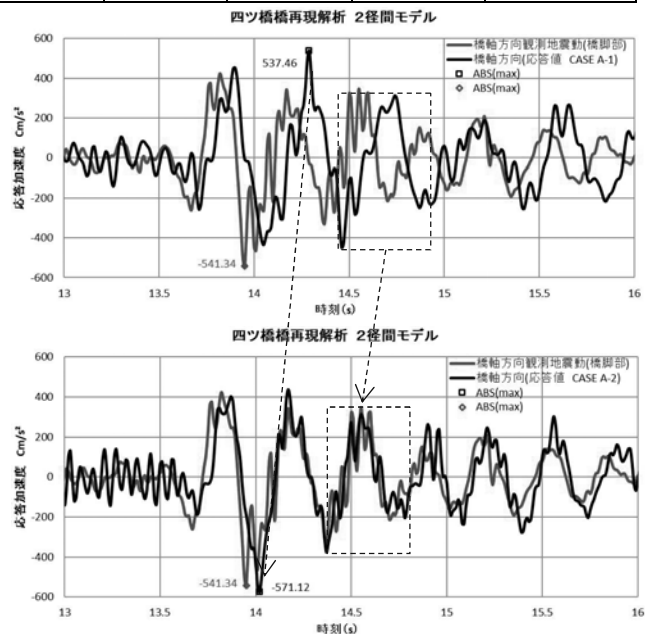


図-17 解析結果(橋軸方向, 上: 基礎ばね考慮, 下: 基礎ばね無視, 黒線: 解析結果)

(4) 2径間モデルを用いた動的解析

2径間モデルを用いた解析ケースと主要なパラメータを表-3に示す。

単体モデルと同様に、基礎ばねを考慮した場合(CASE A-1)と無視した場合(橋脚基部を固定とした場合)について計算を行った。図-17に橋軸方向の解析結果を示す。上段が基礎ばねを考慮したケース、下段が基礎ばねを無視したケースである。基礎ばねを考慮した場合、周期0.4秒程度の主要な振動に短周期の振動が付加された応答波形になっており、単体モデルに比べて複雑な挙動になっている。2径間モデルでは橋脚の橋軸方向の挙動が桁の水平・鉛直方向の振動の影響を受けるため、単体モデルよりも高次モードの影響が大きくなり応答波形の形状が複雑になっていると考えられる。基礎ばねの影響に着目してみると、単体モデルと同様に基礎ばねを付加したモデルでは計算結果が観測記録よりもやや長周期の応答になっている。基礎を固定するとこれらの傾向が改善され、おおむね振動周期と最大値が一致することが確認できた。

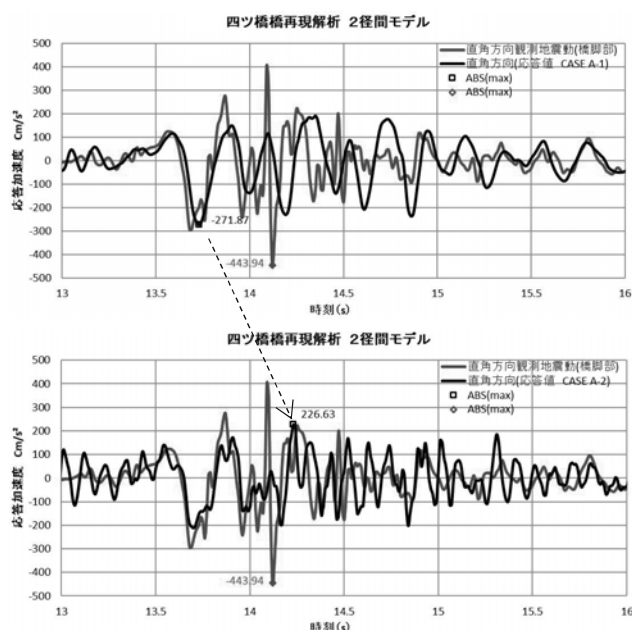


図-18 解析結果(直角方向, 上: 基礎ばね考慮,
下: 基礎ばね無視, 黒線: 解析結果)

直角方向の結果は図-18のとおりであり, 橋軸方向と同様に基礎ばねを考慮したケースでは解析結果の方が観測記録よりもやや長周期で振動している。基礎を固定するとこれらの傾向が改善されたが, 観測記録の14.1秒付近で生じている短周期振動が表現できていないのは単体モデルと同様である。隣接部(前後の橋脚と上部構造)をモデル化してもこの特徴を解析で表現できていないことから, 隣接部の影響で生じた振動ではないと考えられる。

次に, 可動支承の摩擦抵抗の影響を考慮した試算を行った。基礎を固定したモデルを用いて摩擦を考慮したケースと無視したケースを比較した。図-19に橋軸方向の解析結果を示す。上段が支承摩擦を無視したケース, 下段が支承摩擦を考慮したケースである。支承摩擦を考慮しても大きな変化は認められないが, 主要動より前の部分が観測記録に近づいている点と, 主要動より後の部分の高周波数成分の振動が観測記録に近づいている点は改善点と言える。

橋軸直角方向の結果は図-20のとおりである。支承の摩擦は橋軸方向の桁の移動に影響するため, 橋軸直角方向への影響は小さいが, 14.1秒付近で生じている短周期振動の部分がやや強調されるようになっている。摩擦力をより大きく設定したり, より大きな衝撃力が生じるように桁や耐震連結装置の衝突を考慮することで, 観測記録に見られるパルス状の応答を再現できる可能性があると考えられ, 今後の課題である。

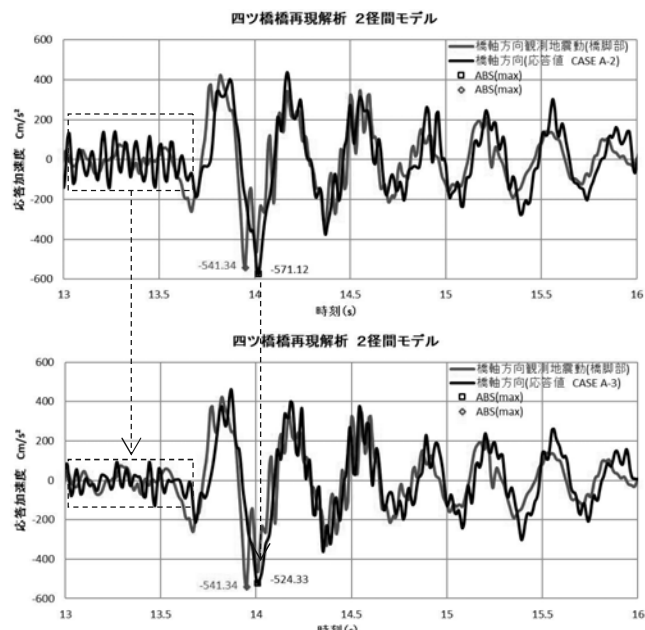


図-19 解析結果(橋軸方向, 上: 支承摩擦無視,
下: 支承摩擦考慮, 黒線: 解析結果)

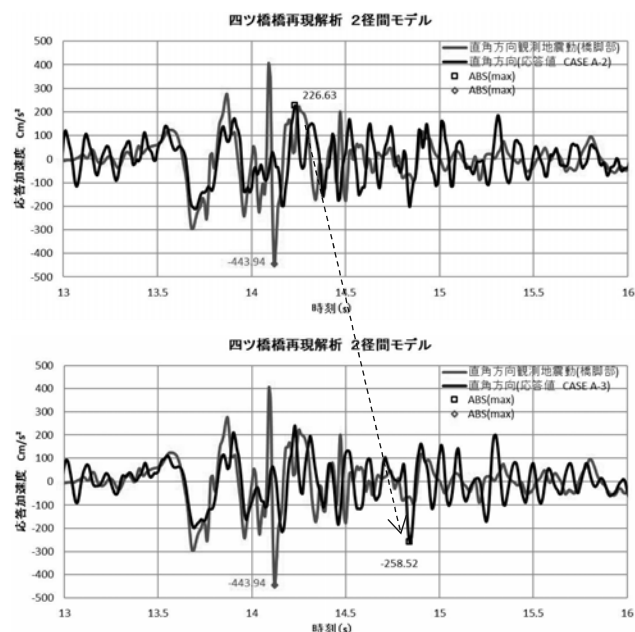


図-20 解析結果(橋軸直角方向, 上: 支承摩擦無視,
下: 支承摩擦考慮, 黒線: 解析結果)

また, 単体モデルと同様にランプ部を追加したケースについても試算した。ランプ部のモデル化の方法は単体モデルと同様である。

図-21に橋軸方向の解析結果を示す。上段がランプ部無しのケース, 下段がランプ部を追加したケースである。ランプ部を追加する事で最大値の増加が確認されたが, 観測記録との整合という点ではランプ部が無いケースの方が優れている。

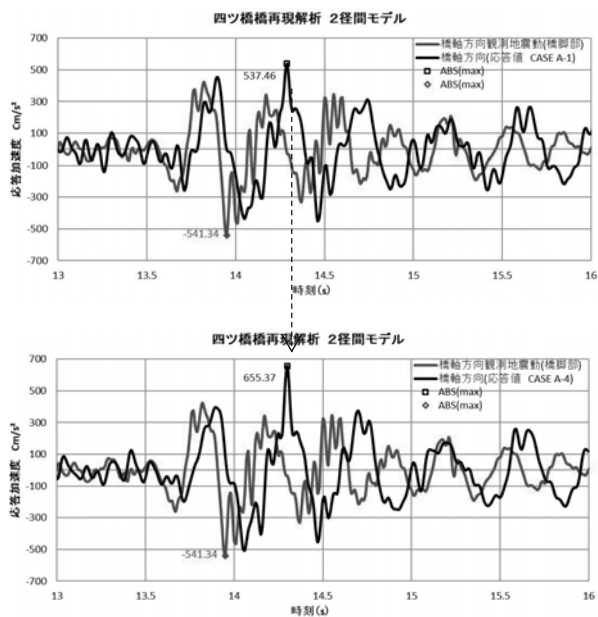


図-21 解析結果(橋軸方向, 上: ランプ部無し, 下: ランプ部追加, 黒線: 解析結果)

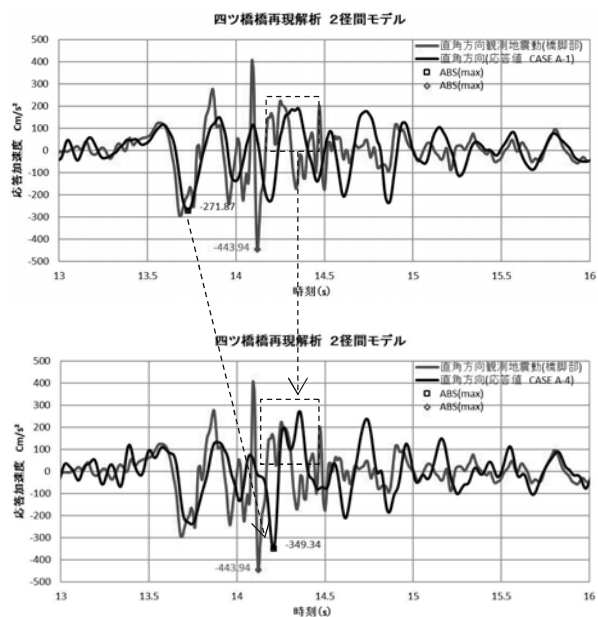


図-22 解析結果(直角方向, 上: ランプ部のなし, 下: ランプ部追加, 黒線: 解析結果)

橋軸直角方向の結果は図-22のとおりであり, ランプ部を考慮すると短周期の振動が強調され, 課題であった14.1秒付近のパルスも観測記録に比べると小さいが改善される傾向である. 本モデルではランプ部を単柱としているが, ランプ部の桁も含めてモデル化することで, より再現性を高められる可能性が考えられる.

5. おわりに

本文では, 2018 年大阪府北部地震の際に観測された加速度を用い, 鋼単純合成箱桁橋の再現解析を行った結果を報告した. 解析の結果, 道路橋の耐震設計に用いられる一般的なモデルでは観測記録を十分再現できなかったが, 基礎を固定とすることで最大値や波形の形状をおおむね再現することができ, 解析モデルが妥当であることが確認できた. ただし, 直角方向の応答については一部再現性が低いところが残されている.

本検討で得られた知見と今後の課題を以下にまとめる.

- ① 基礎ばねを考慮したモデルでは基礎ばねの剛性が小さいため応答波形が観測記録よりも長周期になり, 再現性が低い結果となった.
- ② 基礎を固定条件とすると観測記録と整合する応答波形となったが, 直角方向については最大値付近の短周期の波を表現できなかった.
- ③ ②の短周期の波を生じた原因としては, 基礎を共有する隣接ランプの影響や桁端・耐震連結装置等の衝突の影響が考えられる.
- ④ 隣接ランプの影響を考慮した試算を行ったが, 十分に再現性を高めることはできなかった. 改善方法としてランプ部のモデルをより実構造物に近いものに変更したり, 桁や耐震連結装置等の衝突をモデルに組み込むことが考えられ, 今後の検討課題である.

参考文献

- 1) (社)日本道路橋協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成29年
- 2) (社)日本道路橋協会: 鋼道路橋設計示方書, 昭和31年
- 3) (社)日本道路橋協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995.
- 4) (財)震災予防協会 強震動アレー観測記録データベース推進委員会: 強震動アレー観測, Vol.3, CD-R, 1998.
- 5) (社)日本道路橋協会: 道路橋支承便覧, 平成30年12月