

# 鉄道橋りょう・高架橋群の地震時連成挙動を考慮可能な モデル化方法に関する一考察

和田 一範<sup>1</sup>・坂井 公俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 修士（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御  
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

<sup>2</sup>正会員 博士（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御  
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

## 1. はじめに

道路や鉄道の橋りょう・高架橋は、上部工（桁）や支承を介して複数の下部工（く体～基礎部）が連続した群を構成しているため、振動計測から得られる固有振動数などの振動特性は、隣接構造物の振動の影響を含んだ構造全体系としての値である。これは、道路橋を対象とした橋脚単体と構造全体系の実測比較<sup>1)</sup>や鉄道構造物群の連成に関する実測および解析的検討<sup>2)</sup>などの研究事例を見ても明らかである。しかし、橋りょう・高架橋の耐震設計においては、橋軸方向および橋軸直角方向について、構造物を設計振動単位に区分し、単体の構造物として評価している<sup>3)</sup>。このことは、個々の構造物が独立して挙動すると考えられる大地震に対する評価としては適切と考えられるものの、隣接構造物との連成の影響が含まれると考えられる中小地震に対する評価を行う場合、連続する構造物群としての地震時連成挙動を考慮することが重要と考えられる。

連続する構造物群を対象とした解析的検討に関しては、これまで多数の研究事例がある。例えば道路橋では、支承部挙動の橋りょう全体系への影響検討<sup>4)</sup>、落橋防止装置の検討<sup>5)</sup>、桁間連結工の検討<sup>6)</sup>や免震橋の動的解析<sup>7)</sup>などが挙げられる。また、鉄道橋ではラーメン高架橋における列車走行性に関する検討<sup>2),8)</sup>や大規模地震時の新幹線車両の脱線解析<sup>9)</sup>、桁式高架橋における落橋防止装置の検討<sup>10)</sup>、免震化の検討<sup>11)</sup>などが挙げられる。ここで、連続する構造物群の連成挙動は、橋軸方向に応答が変化する複雑な挙動であるため、各検討では捉えたい現象に応じてモデル化方法が選定されている。しかし、2章で述

べるように、詳細な挙動を表現するためにはモデル構築の手間が大きなモデルを用いる必要があり、設計実務等での活用は難しい場合もある。

本稿では、主に中小地震を対象に連続する鉄道橋りょう・高架橋群の橋軸方向および橋軸直角方向の地震時連成挙動を考慮できるモデル化方法を検討する。このときは鉄道構造物の設計実務等を想定して、モデル化の容易さにも配慮したモデル化方法を提案する。まずは2章において、既往研究のモデル化方法について整理する。そのうえで、3章において鉄道橋りょう・高架橋群のモデル化方法を複数提案する。4章において、提案したモデル化方法と詳細な挙動を表現できる3次元骨組モデルと挙動比較を行い、各モデルの特徴を整理する。なお、本稿では基礎的な検討として、線形条件で挙動比較を行った。

## 2. 既往研究におけるモデル化方法

既往研究において用いられるモデル化方法に関して、**図-1(a)**に示すような2つのラーメン高架橋群をモデル化する場合を例にして特徴を整理する。

まず、3次元骨組モデル（**図-1(b)**）は、最も精度の高いモデル化方法と考えられ、多くの研究で利用されている<sup>4),7),9)</sup>。ただし、当然ながらモデル構築の手間が大きいと、具体的な構造物群を対象に少ない検討ケースで解析するような場面での適用が多い。

次に、2次元骨組モデル（**図-1(c)**）は3次元的效果は表現できないものの、2次元平面内の挙動は精度良く表現できる。そのため、検討対象が橋軸方向のみの挙動の場合に利用される<sup>10),11)</sup>。

また、ばねマスモデル（**図-1(d)**）は最も簡便な

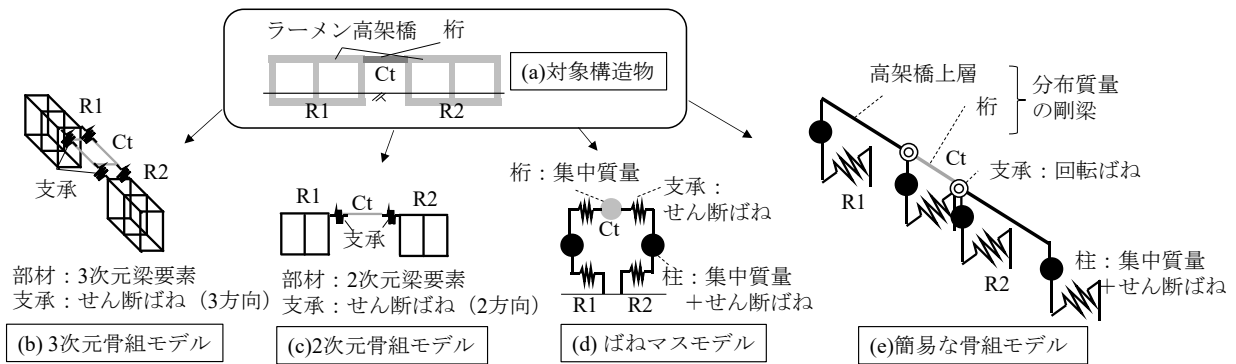


図-1 既往のモデル化方法の例

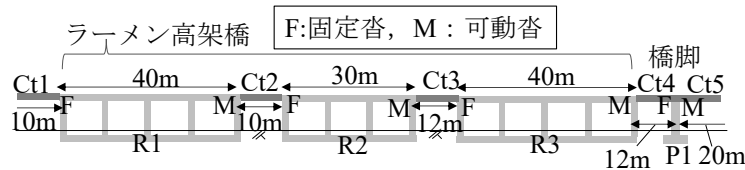


図-2 対象とする鉄道橋りょう・高架橋群

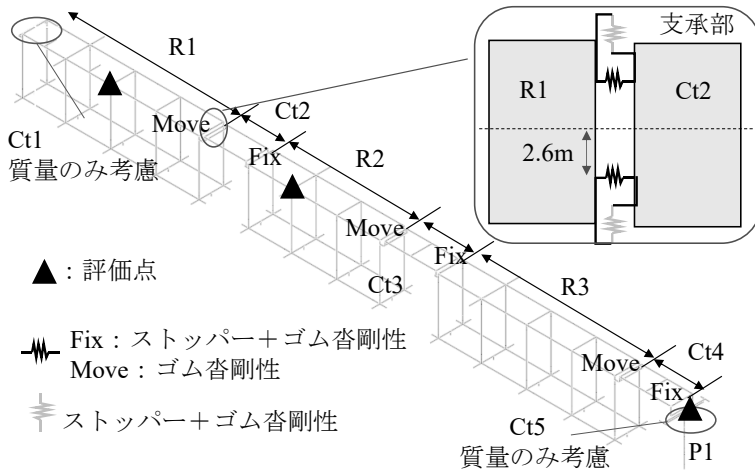


図-3 対象とする鉄道橋りょう・高架橋群の詳細骨組モデル

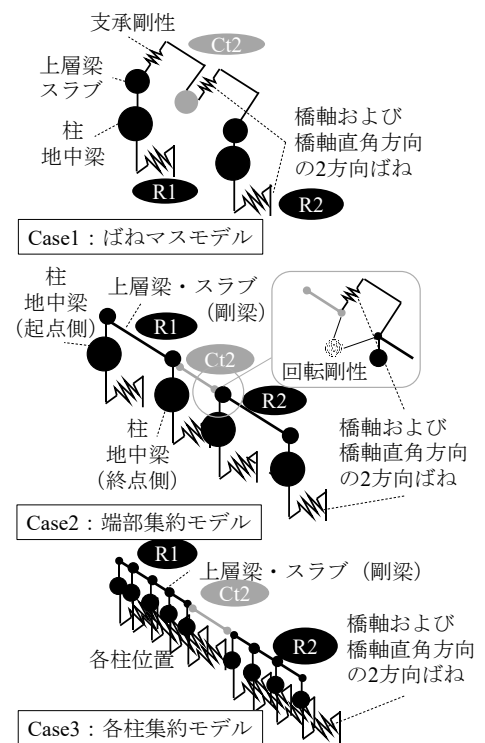


図-4 簡易骨組モデルの検討ケース

モデル化方法であり、現象が比較的単純である橋軸方向の挙動のみに着目する場合に利用されることが多い<sup>5),6)</sup>。

最後に、骨組モデルの一部をばねマスで簡略化したモデル化(図-1(e))は、モデル化の容易さと支承部での鉛直軸回りの回転挙動の評価を可能としており、鉄道高架橋群の橋軸直角方向の挙動評価に利用されている<sup>2),8)</sup>。ただ、通常の骨組モデルに対してどの程度の精度かは不明瞭である。

### 3. 鉄道橋りょう・高架橋群のモデル化方法の提案

本章では、既往研究のモデル化を参考にし、鉄道構造物の設計実務等を想定してモデル化の容易さに

も配慮したモデル化方法を複数提案する。

検討対象とする鉄道橋りょう・高架橋群を図-2に示す。直接基礎形式のラーメン高架橋3連(R1~R3)、橋脚1基(P1)が桁Ct2~Ct4と固定沓(Fix)、可動沓(Move)で接続される構造物群を対象とした。この3次元骨組みモデル(以下、詳細骨組モデル)を図-3に示す。モデル境界は、隣接桁Ct1, Ct5の質量の半分を考慮した。また、本図には4章の検討で加速度波形や伝達関数の算出点として活用する節点位置に三角印を付けている。この詳細骨組モデルの橋軸直角方向の挙動を簡略化したモデルとして図-4、表-1に示すCase1~3の簡易骨組モデルを検討する。Case1は各構造物(R1~R3, P1)および桁(Ct2~Ct4)を1質点で表現し、支承部をせん断ばねで表現した「ばねマスモデル」である。Case2は

表-1 簡易骨組モデルのモデル化方法

Case	ラーメン柱	橋脚く体	上層梁, スラブ, 桁	支承
1	1 質点	1 質点	1 質点	せん断ばね
2	2 質点		剛梁 (起終点に質量)	せん断ばね+回転ばね
3	柱分の質点		剛梁 (各柱位置に質量)	せん断ばね+回転ばね

表-2 単体モデルの固有振動数一覧

構造 方向	高架橋 R1		高架橋 R2		高架橋 R3		橋脚 P1	
	橋軸直角	橋軸	橋軸直角	橋軸	橋軸直角	橋軸	橋軸直角	橋軸
固有振動数(Hz)	1.91	1.99	1.96	2.02	1.89	1.96	6.46	4.82

上層梁・スラブ、桁を剛梁で表現するとともに、ラーメン高架橋の柱は起点側と終点側の2質点で表現した「端部集約モデル」であり、支承部には鉛直軸回りの回転ばねを追加した。Case3は、桁および支承部のモデル化はCase2と同様であるが、ラーメン高架橋の各柱位置で質点を設けることで橋軸方向の質量分布も表現した「各柱集約モデル」である。なお、ラーメン高架橋の柱・地中梁や橋脚く体を質点とせん断ばねに置換する際は、振動に寄与する質量として、柱・地中梁、橋脚く体の質量の40%を考慮し、単体モデルとしての1次固有振動数 $f$ (橋軸方向、橋軸直角方向) (表-2) と等価質量 $m$ からせん断ばねの剛性 $k$ を $k=4\pi^2mf^2$ により算定した。

#### 4. 提案するモデル化方法の妥当性検証

##### (1) 検討条件

図-5に示すホワイトノイズを橋軸方向または橋軸直角方向に入力した線形動的解析を実行し、応答波形や伝達関数を評価した。ここで、伝達関数は入力加速度波形のフーリエ振幅に対する応答加速度波形のフーリエ振幅を指す。動的解析時の減衰は、0.5Hzと10Hzで3%となるRayleigh減衰で設定した。

本章ではまずラーメン高架橋R1だけを抜き出した高架橋単体モデルで検討した後に、ラーメン高架橋3連と橋脚1基を連成させた橋りょう・高架橋モデルで検討を行う。

##### (2) 高架橋単体モデルの場合

ホワイトノイズを橋軸直角方向に入力した場合の高架橋天端の加速度の時刻歴波形の比較を図-6に示す。本図を見ると、当然であるが、ラーメン1連であれば連成挙動が無く、単純な1次モードが卓越するため、どのケースであっても詳細骨組モデルと同等の結果となる。また、橋軸直角方向の伝達関数の比較を図-7に示す。時刻歴波形の比較で明らかのように、伝達関数の明瞭なピークが1つあること、そ

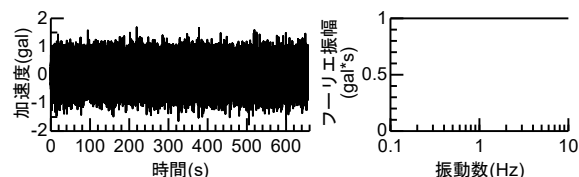
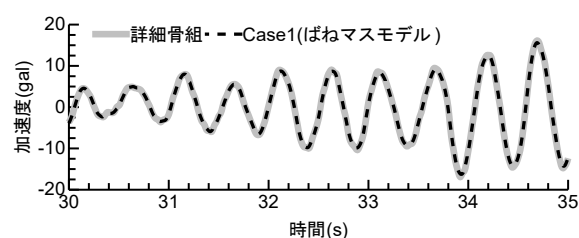
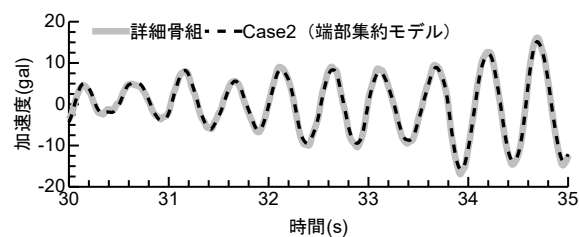


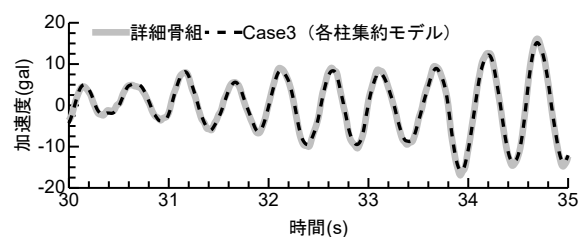
図-5 入力波の時刻歴波形・フーリエ振幅スペクトル



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図-6 高架橋単体モデルにおける天端の加速度波形 (橋軸直角方向入力)

れが各ケースで一致していることがわかる。なお、紙面の都合で記載は省略するが、橋軸方向の時刻歴波形や伝達関数も同様の傾向となった。

次に各モデルの橋軸方向と橋軸直角方向それぞれ

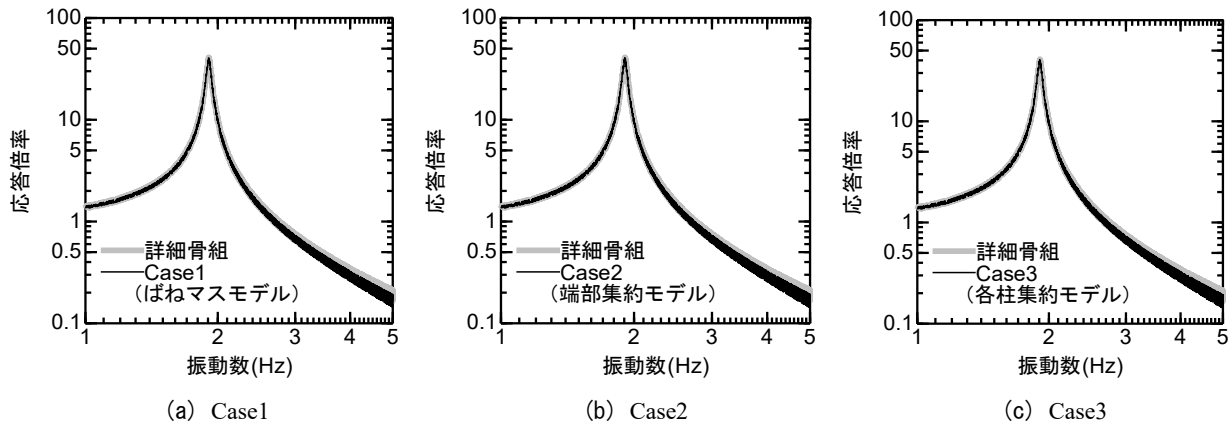


図-7 高架橋単体モデルにおける天端の伝達関数（橋軸直角方向）

表-3 高架橋単体モデルの主要モードにおける固有振動数，刺激係数，有効質量比

(a) 橋軸方向

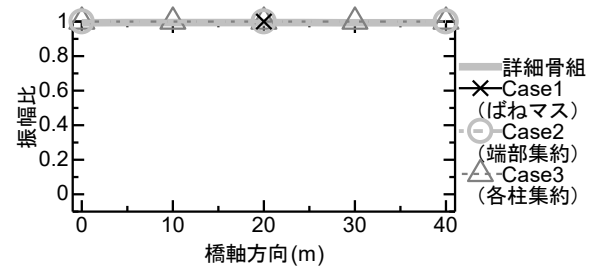
ケース	固有振動数	刺激係数	有効質量比
詳細骨組	1.99Hz	29.22	0.74
Case1	1.99Hz	30.08	1.00
Case2	1.99Hz	30.08	1.00
Case3	1.99Hz	30.08	1.00

(b) 橋軸直角方向

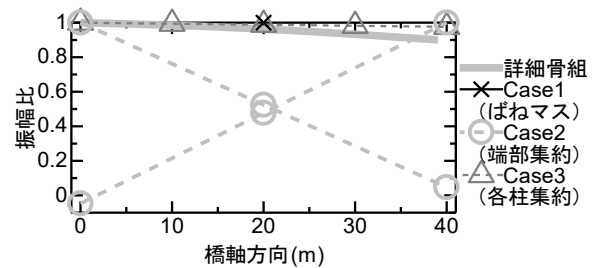
ケース	固有振動数	刺激係数	有効質量比
詳細骨組	1.91Hz	29.21	0.73
Case1	1.91Hz	30.08	1.00
Case2	1.91Hz	22.24	0.55
Case2'	1.91Hz	20.25	0.45
Case3	1.91Hz	30.08	1.00

の主要モードに関する固有振動数，刺激係数および有効質量比を表-3に示す。伝達関数の比較で明らかのように，ほとんどのケースで詳細骨組モデルの固有振動数と概ね整合している。なお，Case2の橋軸直角方向については，後述する理由で同じ固有振動数，刺激係数，有効質量比で2つのモードが発現するため，Case2，Case2'と表記している。

最後に主要モード形状として各モデルの上層梁・桁・橋脚位置の固有モード（最大振幅を1に正規化）を図-8に示す。本図において，橋軸方向については詳細骨組モデルの固有モードが橋軸方向に沿ってほぼ一様に振幅比1となっており，この挙動が各ケースで表現できていることがわかる。橋軸直角方向についても概ね同様の傾向であるが，Case2については，起終点それぞれの質点のみが変形する2つのモードが現れる。これは，表-3に示したCase2，Case2'のモードに該当し，固有振動数，刺激係数が全く同じである。そのため，伝達関数（図-7(b)）としては他のモデルと同様に詳細骨組モデルと整合する結果となる。



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-8 高架橋単体モデルの主要モード形状比較

以上より，高架橋単体では，詳細骨組モデル自体が単純な1次モード挙動であり，Case1~3のどのモデルでも十分に表現可能であることがわかる。

### (3) 橋りょう・高架橋群モデルの場合

#### a) 高架橋の挙動

ラーメン高架橋R2を例として，構造物天端の加速度の時刻歴波形の比較を図-9に示す。なお，応答波形の出力位置は図-3の三角印の節点である。本図を見ると，橋軸方向については，すべてのケースで詳細骨組モデルを良好に表現できていることがわかる。一方で，橋軸直角方向についてはCase1は詳細骨組モデルの再現性が低いものの，Case2，Case3は良好に表現できていることがわかる。

続いて，各ケースの伝達関数の比較を図-10に示す。なお，図-9の波形比較で明らかのように，橋軸方向に関するCase1~Case3の伝達関数および，橋軸

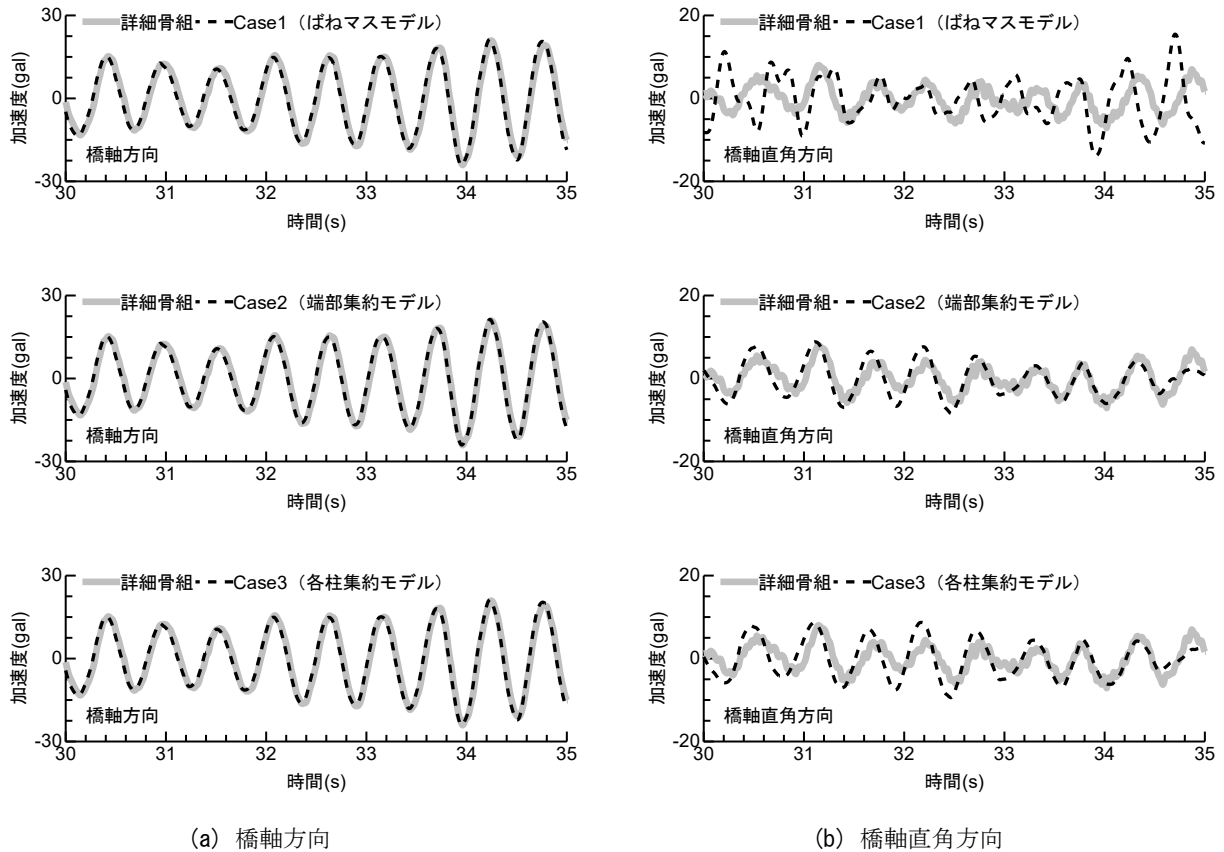


図-9 橋りょう・高架橋群モデルにおけるラーメン高架橋 R2 天端の加速度波形

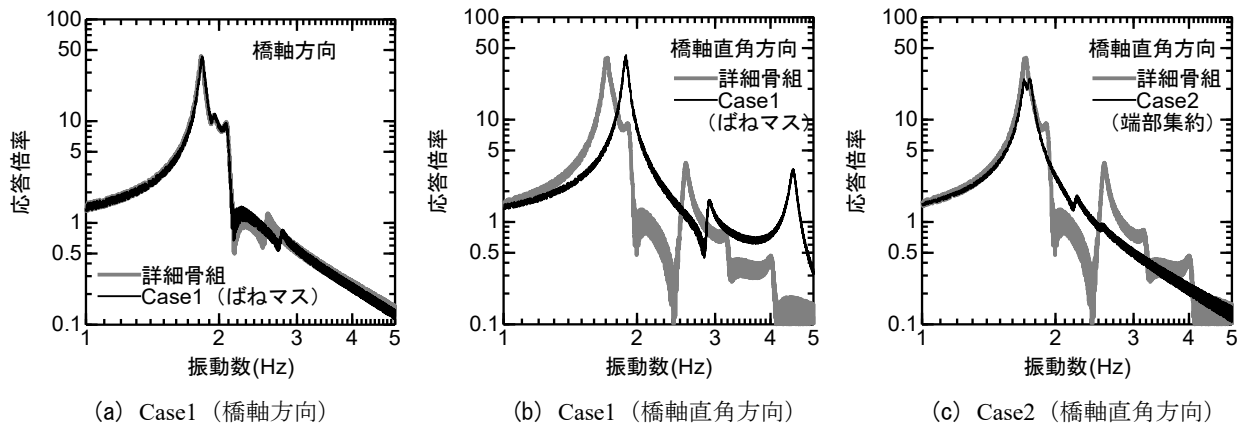


図-10 橋りょう・高架橋群モデルにおけるラーメン高架橋 R2 天端の伝達関数

直角方向のCase2, Case3の伝達関数はほぼ一致するので、ここでは橋軸方向のCase1および橋軸直角方向のCase1, Case2の比較のみ示した。本図より橋軸方向は、最も単純なCase1であっても詳細骨組モデルと伝達関数がほぼ一致することがわかる。一方で、橋軸直角方向については、Case1は詳細骨組モデルと1次の卓越振動数に乖離があるが、Case2は詳細骨組モデルと1次の卓越振動数付近の傾向は概ね一致している。

次に、固有値解析から得られる固有モードや刺激係数を参考に、ラーメン高架橋R2が主体的に動くモ

ードを選定し、そのときの upper beam・桁・橋脚の固有モードの比較を図-11に示す。本図の横軸0はR1高架橋の起点位置を意味する。本図を見ると、橋軸方向は各構造物が1自由度系の挙動をするため、Case1でも詳細骨組モデルの挙動が十分表現できることがわかる。一方で、橋軸直角方向は可動査位置(図-11右で"Move"と記載の箇所)で鉛直軸回りに回転する挙動となるため、回転ばねをモデル化していないCase1では再現が難しいことがわかる。一方、Case2, Case3では完全な再現は難しいものの、可動査位置での回転挙動は表現できており、詳細骨組モデルと

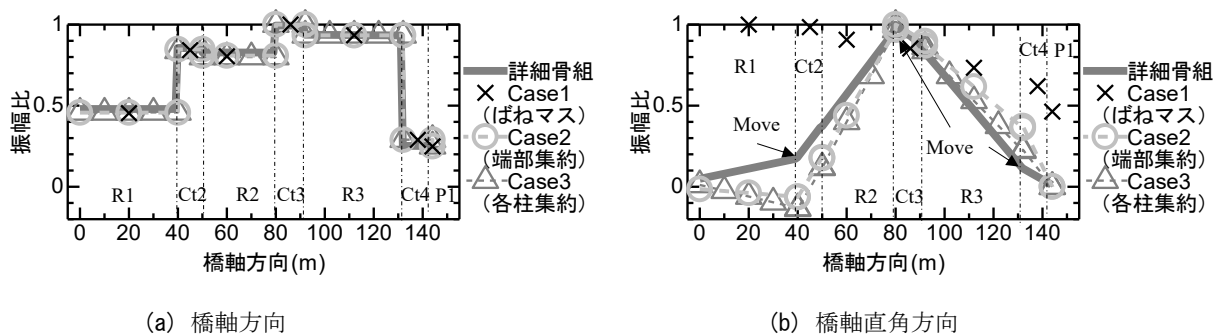


図-11 ラーメン高架橋 R2 が主体的に動く固有モード

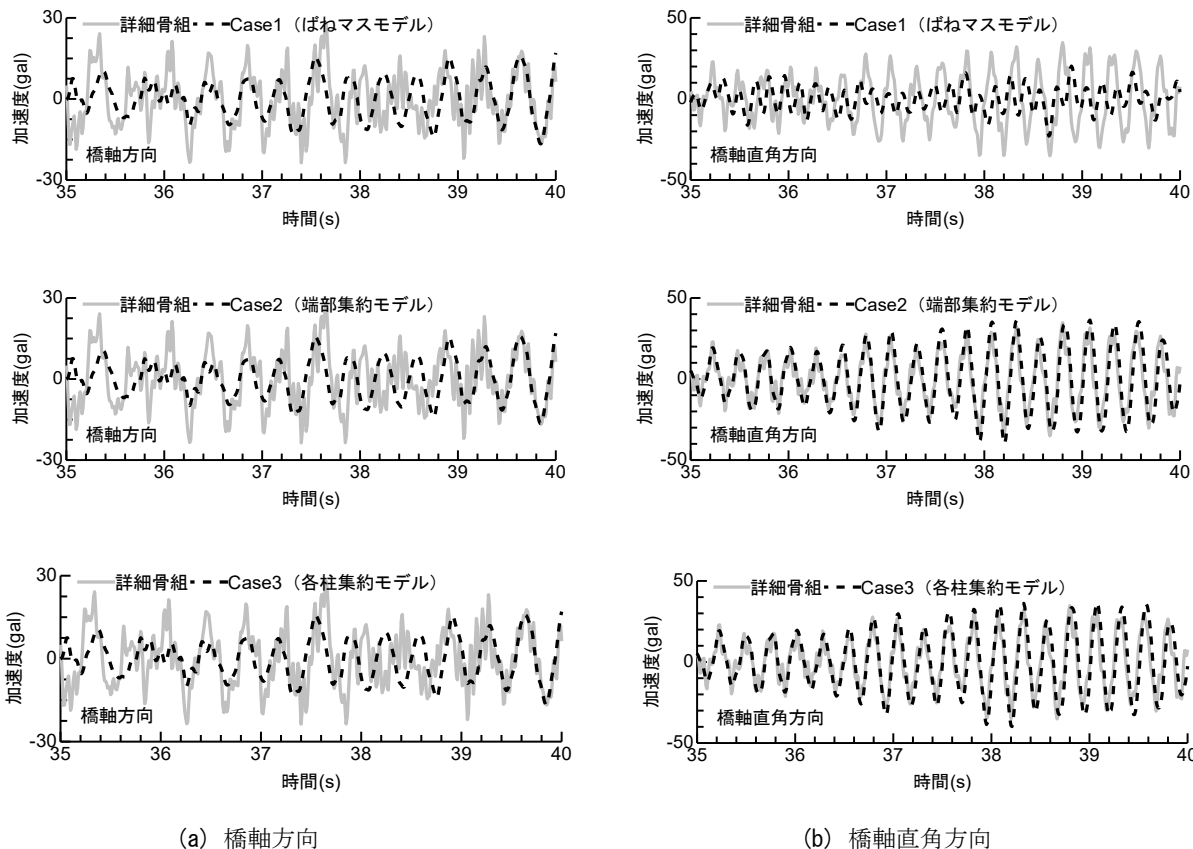


図-12 橋りょう・高架橋群モデルにおける橋脚 P1 天端の加速度波形

概ね整合する固有モードとなっている。なお、紙面の都合で説明は省略するが、他のラーメン高架橋 R1, R3 についても、同様の傾向が確認される。

b) 橋脚の挙動

橋脚 P1 についての構造物天端の加速度の時刻歴波形の比較を図-12 に示す。本図を見ると、橋軸方向については全ケースで詳細骨組モデルとやや乖離した挙動に見えるのに対して、橋軸直角方向については Case2, Case3 は詳細骨組モデルの挙動を概ね表現できていることがわかる。続いて、各ケースの伝達関数の比較を図-13 に示す。なお、図-12 の波形比較で明らかなように、橋軸方向に関する Case1~Case3 の伝達関数および橋軸直角方向の Case2, Case3 の伝

達関数はほぼ一致するので、ここでは橋軸方向の Case1 および橋軸直角方向の Case1, Case2 の比較のみを示す。本図より、橋軸方向について、1.8Hz 付近の卓越振動数は詳細骨組モデルと Case1 で良好に一致しているが、2.5~3Hz 付近の応答倍率が最大となる橋脚 P1 の主要モードの振動数は、詳細骨組モデルと Case1 で乖離が見られる。このため、時刻歴波形としてもやや乖離が見られる。一方で、橋軸直角方向については、Case1 は詳細骨組モデルと卓越振動数の位置や応答倍率の大きさが全く異なり、詳細骨組モデルを表現できていないのに対して、Case2 は 4Hz 付近の応答倍率が最大となる橋脚 P1 の主要モードの傾向を良好に表現できている。そのため、

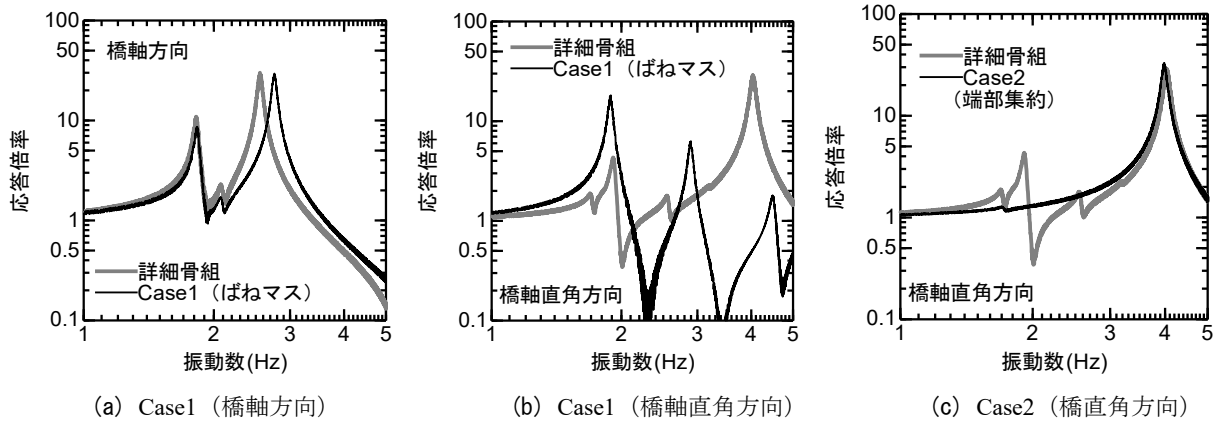


図-13 橋りょう・高架橋群モデルにおける橋脚 P1 天端の伝達関数

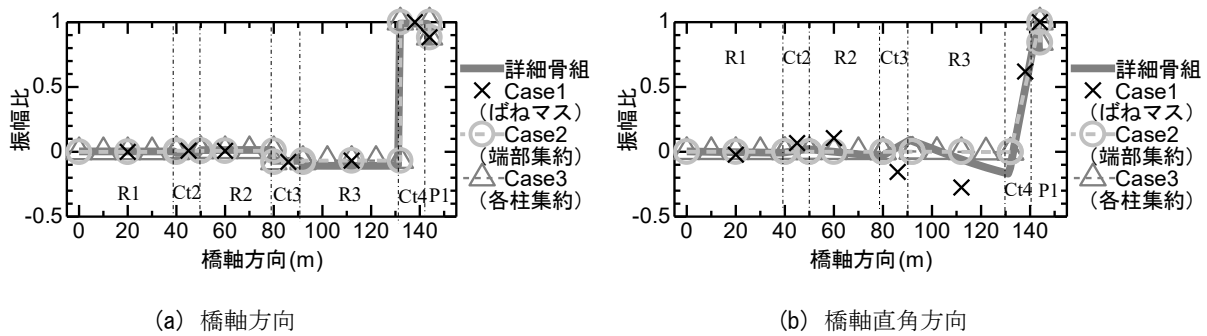


図-14 橋脚 P1 が主体的に動く固有モード

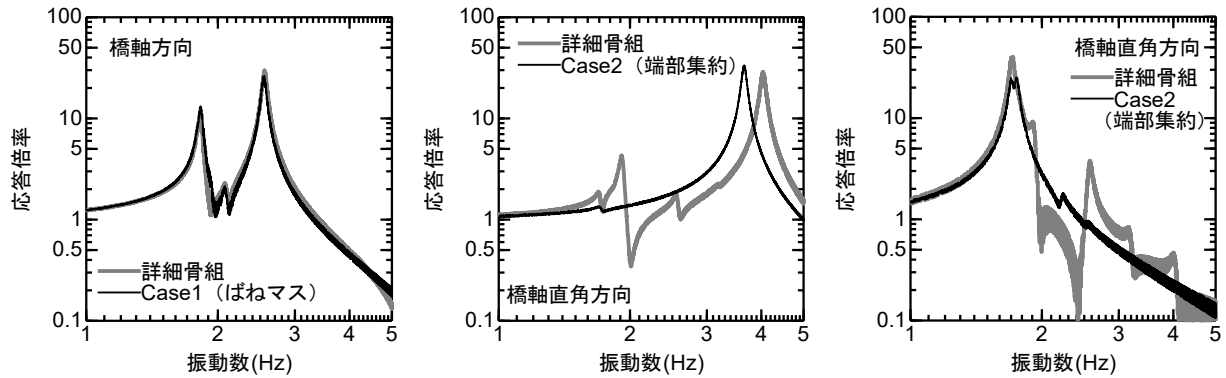


図-15 橋脚 P1 の伝達関数 (橋脚の等価質量 30%)

図-16 ラーメン高架橋 R2 の伝達関数 (橋脚の等価質量 30%)

時刻歴波形でも詳細骨組モデルを概ね表現できる。

次に、固有値解析から得られる固有モードや刺激係数を参考に、橋脚P1が主体的に動くモードを選定し、そのときの層梁・桁・橋脚の固有モードの比較を図-14に示す。本図を見ると、時刻歴波形や伝達関数に大きな乖離が見られた橋軸直角方向のCase1以外を除く全てのケースについて、詳細骨組モデルの変形形状を良好に表現できていることがわかる。ただし、橋軸方向については図-13で確認したように詳細骨組モデルと各ケースで卓越振動数にやや乖離が見られた。

### c) 橋脚く体の等価質量の影響

b) で述べた橋軸方向の伝達関数の乖離について、その要因を考察する。本稿で検討している簡易骨組モデルCase1~Case3において、ラーメン柱や橋脚く体の質量は等価質量で与えている。これは、鉄道橋りょう・高架橋がトップヘビーな地震時挙動を示すことが知られているため、その変形に寄与する分だけの質量に換算する処理である。本稿では、従来よく用いられている全質量の40%という割合で等価質量を一律で設定したが、本来、高架橋や橋脚では振動モードも異なるため、その質量バランスが異なる可能性があり、この割合には設定の任意性がある。

参考として、文献12)に示されている橋脚く体30%、ラーメン高架橋柱40%という割合で等価質量を設定し、橋脚P1の伝達関数を計算したものを図-15に示す。図-15と図-13を比較すると、図-15の方が橋脚P1の主要モードにおける卓越振動数が小さくなっていることがわかる。これは、橋脚く体の等価質量が40%から30%へ小さくなると、単体の固有振動数が橋脚よりも小さいラーメン高架橋の振動特性の寄与が大きくなるため、構造全体系としての橋脚の卓越振動数が小さくなったと考えられる。その結果、橋軸方向は図-13よりも図-15の方が詳細骨組モデルと良好に一致しているが、橋軸直角方向は、図-15よりも図-13の方が良好に一致することとなった。

一方で、ラーメン高架橋R2の橋軸直角方向の伝達関数を図-16に示すが、図-10(c)とほぼ同様で詳細骨組モデルを良好に表現できている。これは、ラーメン高架橋の方が質量が大きいいため、橋脚く体の等価質量を多少変化させても、ラーメン高架橋の主要モードへはほとんど影響しないためである。

以上の結果は、簡易なモデル化において、橋脚の挙動を詳細骨組モデルのように表現するためには、適切な質量の設定を行う必要性を示唆している。

## 5. おわりに

本稿では、主に中小地震を対象に連続する鉄道橋りょう・高架橋群の橋軸方向および橋軸直角方向の連成挙動を考慮できるモデル化方法を検討した。このとき、鉄道構造物の設計実務等を想定してモデル化の容易さにも配慮して、いくつかの簡易な骨組モデル手法を提案するとともに、詳細骨組モデルとの比較を行った。なお、本稿では基礎的な検討として、線形条件での比較を行った。

得られた知見は以下の通りである。

- ・橋軸方向については、各構造物の挙動としては1自由度系の挙動が卓越するため、最も単純なばねマスを用いたモデル化方法でも詳細骨組モデルの挙動を良好に表現できる。
- ・橋軸直角方向については、可動沓における鉛直軸回りの回転挙動が生じるため、ばねマスモデルでは十分な表現ができない。それに対して、支承部に回転ばねを考慮すれば、橋脚く体やラーメン高架橋柱は起終点にばねマスを集約したような簡易なモデル方法であっても、詳細骨組モデルの挙動を良好に表現できることがわかった。

なお、簡易なモデル化においては、ラーメン高架橋柱や橋脚く体の等価質量の設定に任意性が残されて

おり、橋脚の卓越振動数を精度良く表現するためには、等価質量の適切な設定法を検討する必要がある。この点については、今後の検討課題としたい。また、本稿の検討は線形条件に限っているが、ラーメン高架橋柱や橋脚く体、支承部の非線形性を考慮した場合の検討も今後実施する予定である。

## 参考文献

- 1) 中島章典, 中野喜代美, 中村晋: 常時微動に基づく独立橋脚および橋梁完成系の振動特性の把握, 構造工学論文集 Vol.56A, pp.305-315, 2010
- 2) 徳永宗正, 曾我部正道, 谷村幸裕, 小野潔: 常時微動測定に基づく鉄道高架橋の等価固有周期の推定手法, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.1, pp.72-86, 2015
- 3) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012
- 4) 佐藤雄亮, 酒井理哉, 大友敬三: 鋼製支承の挙動が橋梁全体系地震応答に与える影響評価, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.513-524, 2007.
- 5) 梶田幸秀, 渡邊英一, 杉浦邦征, 丸山忠明, 永田和寿: 鋼製支承の破損を考慮した連続高架橋の地震時応答性状と落橋防止装置の有効性の検討, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.903-914, 1999.
- 6) 梶田幸秀, 杉浦邦征, 渡邊英一: 緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震時応答性状, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.297-310, 2002.
- 7) 林秀侃, 梶川康男, 深田宰史, 杵本正信, 浜博和: 19径間連続立体免震橋の振動実験に基づく動的解析, 土木学会論文集, No.605/I-45, pp.49-60, 1998.
- 8) 徳永宗正, 曾我部正道, 渡辺勉, 川村力, 小野潔: 鉄道車両の動的影響を考慮した鉄道構造物の耐震設計法, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.2, pp.265-281, 2014.
- 9) 鉄道総合技術研究所編: 熊本地震における新幹線の脱線シミュレーション解析, 鉄道総研報告特別号, 2018.
- 10) 村田清満, 高山智宏, 後藤貴士, 山田正人, 生駒信康, 浮島徹: エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.275-288, 2001.
- 11) 池田学, 豊岡亮洋, 家村浩和, 岩田秀治, 村田清満, 市川篤司: ゴム支承を用いた鉄道橋の地震時挙動に及ぼす軌道の影響, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.1, pp.1-16, 2014.
- 12) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物設計標準・同解説 耐震設計, 1999.