

# 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基礎的検討

和田 一範<sup>1</sup>・坂井 公俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 (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)

E-mail: wada.kazunori.73@rtri.or.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 (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)

E-mail: sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

鉄道橋りょう・高架橋群の地震時連成挙動を解析的に評価する方法としては、3次元骨組モデルが有効であり、特定の構造物群を対象に評価した事例は多数存在する。ただし、設計実務で延長の長い鉄道橋りょう・高架橋の地震時連成挙動を評価するためにはモデルの自由度数にも配慮する必要がある。そこで、鉄道橋りょう・高架橋群の地震時連成挙動を簡易かつ適切に表現できるモデル化方法を検討した。具体的には、耐震設計で用いられる設計振動単位ごとの質点モデルを基に、それを連ねた簡易なモデルを構築して、周波数応答関数や応答波形について3次元骨組モデルと比較した。その結果、支承部での鉛直軸回りの回転挙動を表現すれば、柱やく体を質点に集約した簡易なモデルでも周波数応答関数や応答波形を概ね表現できることがわかった。

**Key Words:** railway bridge and viaduct, seismic interaction behavior, simple modeling method

## 1. はじめに

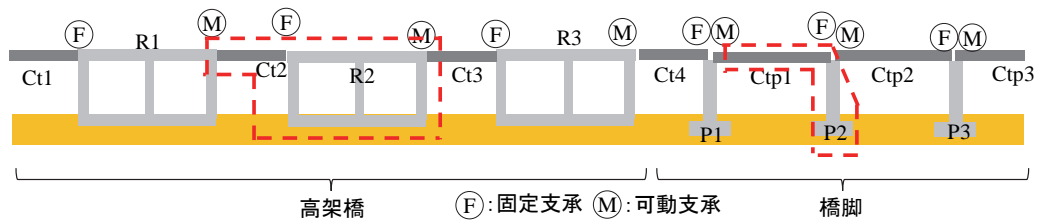
道路や鉄道の橋りょう・高架橋は、桁や支承を介して複数のく体が連続した群を構成しているため、振動計測から得られる固有振動数などの振動特性は、隣接構造物の振動の影響を含んだ構造全体系としての値である。これは、道路橋を対象とした橋脚単体と構造全体系の実測比較<sup>1)</sup>や鉄道構造物群の連成に関する実測および解析的検討<sup>2)</sup>などの研究事例を見ても明らかである。

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>3)</sup>、落橋防止装置の検討<sup>4)</sup>、桁間連結工の検討<sup>5)</sup>や免震橋の動的解析<sup>6)</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>7)</sup>や大規模地震時の新幹線車両の脱線解析<sup>8)</sup>、桁式高架橋における落橋防止装置の検討<sup>9)</sup>、免震化の検討<sup>10)</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、2章で述べるように各検討では捉えたい現象に応じて適切なモデル化方法が選定され

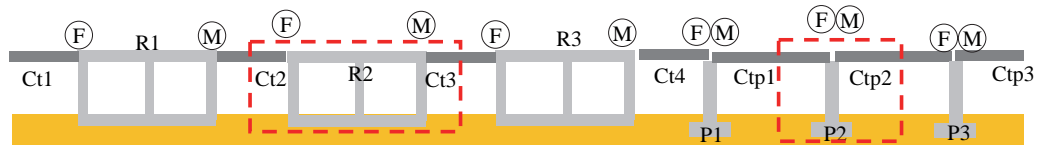
ている。

一方で、鉄道構造物の耐震設計<sup>11)</sup>では、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(図-1の赤点線枠)に区分して単体の構造物として評価している。このとき、構造物間の地震時連成挙動の影響は無視されているが、橋りょう・高架橋の境界付近や地盤物性の空間的な変化を大きい箇所など、構造物・地盤系の周期特性が大きく変化する可能性がある区間では、地震時連成挙動の影響は大きいと考えられる。また、周期特性が類似する構造物・地盤が連なる区間であっても、地震時に支承部が損傷することなどにより、構造物間の連結の程度が変化し、地震時連成挙動の影響が変化する可能性もある。そのため、今後、耐震設計を高度化していくためには、地震時連成挙動の考慮は重要な検討事柄のひとつと考えられる。

このような設計実務においては、解析モデルの自由度数も配慮すべきである。現在の鉄道構造物の耐震設計<sup>11)</sup>では設計振動単位の振動特性(固有周期や降伏震度)を算定するために、2次元骨組モデルのプッシュ・オーバー解析を用いることが多い。しかし、地震時連成挙動を

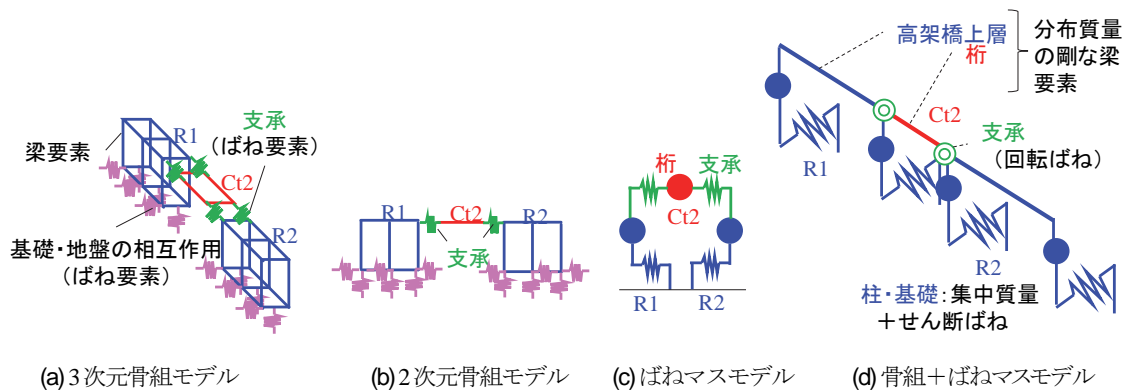


(a) 橋軸方向(ラーメン高架橋 R2 および橋脚 P2 をモデル化する場合)



(b) 橋軸直角方向(ラーメン高架橋 R2 および橋脚 P2 をモデル化する場合)

図-1 鉄道構造物の耐震設計<sup>1)</sup>における設計振動単位の考え方



(a) 3次元骨組モデル

(b) 2次元骨組モデル

(c) ばねマスモデル

(d) 骨組+ばねマスモデル

図-2 既往研究における鉄道橋りょう・高架橋群のモデル化方法の例

考慮するために延長の長い鉄道橋りょう・高架橋群をモデル化する場合、このような骨組モデルを多数連結させると自由度数が膨大となり、設計実務には適さないと考えられる。

そこで本稿では、鉄道橋りょう・高架橋群の地震時連成挙動を簡易かつ適切に表現できるモデル化方法を検討する。まずは、鉄道橋りょう・高架橋群の地震時連成挙動を考慮できるモデル化方法について既往研究の特徴を整理したうえで、有用と思われるモデル化方法を複数提案する。その後、詳細な挙動を表現できる3次元骨組モデルと提案するモデル化方法で同じ鉄道橋りょう・高架橋群をモデル化し、周波数応答関数や応答波形などを比較することで提案するモデル化方法の妥当性を検証する。なお、本稿は線形条件における基礎的な検討である。

## 2. 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

### (1) 既往研究におけるモデル化方法

既往研究における地震時連成挙動を考慮可能なモデル化方法を図-2に整理する。モデル化の対象構造物は、図

-1に示すラーメン高架橋R1～Ct2～R2の範囲とする。

まず、3次元骨組モデル(図-2(a))が挙げられる。これは、ラーメン高架橋R1, R2の柱や梁、あるいは桁Ct2といった部材を並進3成分、回転3成分の計6自由度を有する梁要素でモデル化するとともに、構造物間をつなぐ支承および基礎と地盤の相互作用については水平2方向、鉛直方向のばね要素でモデル化する。各構造部材や付帯設備の質量は、梁要素を構成する節点に集中質量として考慮する。また、モデル範囲外の隣接桁Ct1, Ct3については、質量の半分をモデル境界の梁部に考慮する。本モデルは橋軸方向、橋軸直角方向の地震時連成挙動をひとつのモデルで表現可能であり、多くの研究で利用されている<sup>3)6)8)</sup>。

次に、2次元骨組モデルを図-2(b)に示す。各要素のモデル化方法は、3次元骨組モデルと同様であるが、検討対象とする2次元平面内のみに自由度を設定する。具体的には、梁要素は2次元平面内の並進2成分、回転1成分の3自由度、ばね要素は2次元平面内の2方向で設定する。本モデルは、橋軸方向あるいは橋軸直角方向など、検討対象の断面を設定した検討に利用されている<sup>9)10)</sup>。

続いて、ばねマスモデルを図-2(c)に示す。本モデルで

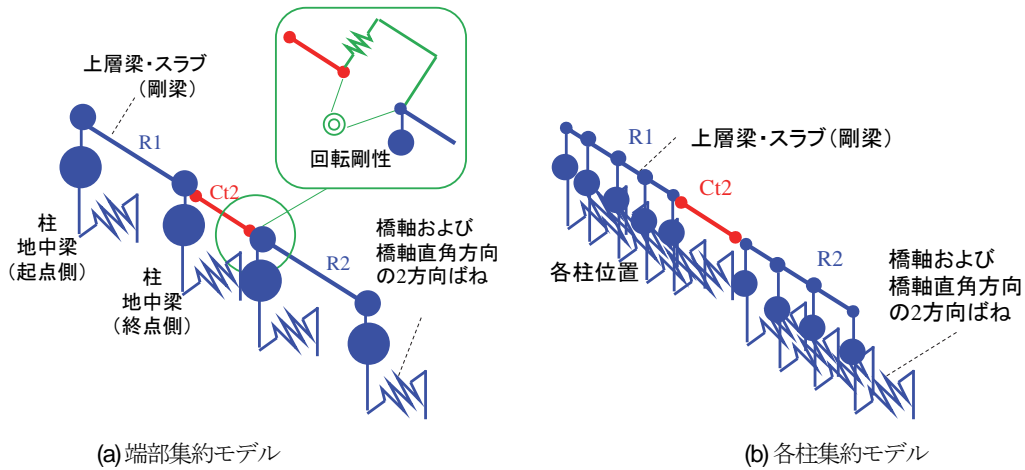


図-3 提案するモデル化方法

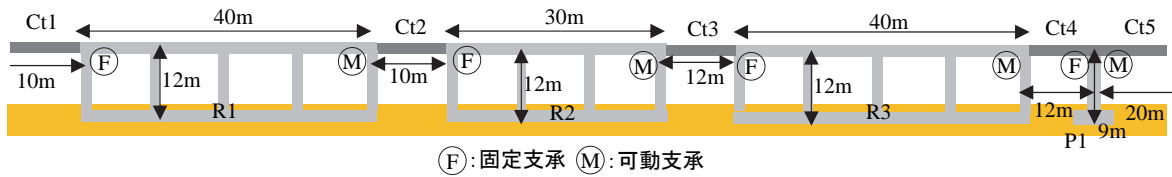


図-4 検討対象とする鉄道橋りょう・高架橋群

は、ラーメン高架橋R1と隣接桁Ct1，ラーメン高架橋R2と隣接桁Ct3および桁Ct2をそれぞれ1つの質点で表現し、支承は水平1方向のばね要素で表現する。また、柱や梁といった構造部材と基礎や地盤抵抗も踏まえたラーメン高架橋1連の剛性も水平1方向のばね要素で表現する。本モデルは、前述した骨組モデルと比較して自由度数が非常に少ないモデルであり、基本的な挙動分析に利用される<sup>45)</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を図-2(d)に示す。本モデルでは、ラーメン高架橋の柱～基礎部を起点側と終点側で分け、ばねマスモデルと同様の1つの質点とばね要素で表現する。また、上層梁～スラブ・付帯設備や桁については分布質量を有する剛な梁要素で表現する。モデル範囲外の隣接桁については、上記梁要素の端部に集中質量として考慮する。支承部については、回転ばねを用いて鉛直軸回りの桁の回転挙動を表現する。本モデルは、鉄道高架橋群の挙動評価に利用されている<sup>27)</sup>。

なお、本稿では設計実務への活用を想定した自由度数の少ないモデル化を目指しているため、骨組モデルやばねマスモデルの紹介を行ったが、本来は有限要素モデルといったより自由度数が大きい精緻なモデル化方法も存在する。

## (2) 提案するモデル化方法

本稿では、既往研究のモデル化方法を参考にし、延長の長い鉄道橋りょう・高架橋を想定して自由度数にも配

慮したモデル化方法として「端部集約モデル」および「各柱集約モデル」を提案する(図-3)。

端部集約モデル(図-3(a))は、図-2(d)で示した既往研究<sup>27)</sup>のモデル化方法を基本としつつ、柱～基礎部のばね要素を水平2成分で表現している点、支承部のばね要素を水平2成分、回転1成分で表現している点、桁や上層梁の質量を端部に集約している点を変更している。このようなモデル化を行うことで、橋軸方向、橋軸直角方向をひとつのモデルで表現できる。また、各構造物を質点に集約する際には、鉄道構造物の耐震設計<sup>14)</sup>で検討される設計振動単位ごとの振動特性を基に設定する。

一方、各柱集約モデル(図-3(b))は、桁および支承部のモデル化は端部集約モデルと同様であるが、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する。このことで、端部集約モデルよりも、精緻な挙動表現が期待できるが、当然ながら自由度数も多くなる。

## 3. 提案するモデル化方法の妥当性検証

### (1) 検討条件

検討対象とする鉄道橋りょう・高架橋群を図-4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と固定支承、可動支承で接続される構造物群を対象とした。この構造物群に対して、表-1で述べる3ケースでモデル化を行う。Case1は既往研究

表-2 単体モデルの固有振動数一覧

構造	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

表-1 検討ケース

Case	モデル
1	ばねマス
2	端部集約
3	各柱集約

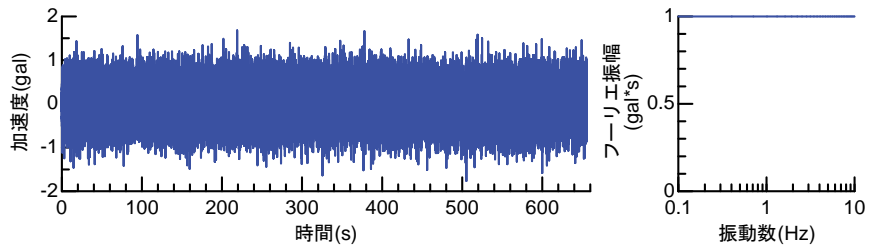


図-5 入力波の時刻歴波形・フーリエ振幅スペクトル

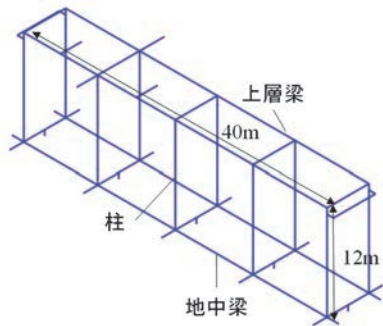


図-6 ラーメン高架橋 R1 の 3次元骨組モデル

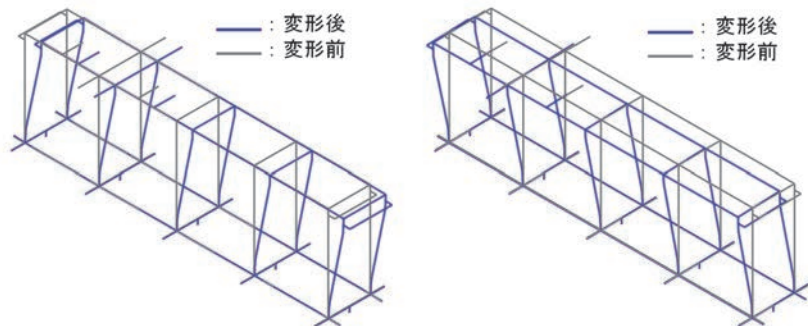


図-7 ラーメン高架橋 R1 (3次元骨組モデル) の固有モード

45)で実績のあるばねマスモデル, Case2, 3は提案する端部集約モデルおよび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, 設計振動単位としての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. また, 正解値に相当する結果として, 3次元骨組モデルでもモデル化を行った.

各モデルに対して, 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, 応答波形や周波数応答関数を算定する. ここで, 周波数応答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. 減衰は, 0.5Hzと10Hzで3%となるRayleigh減衰で設定した.

本章では, まずは高架橋単体モデルに着目して各ケースと3次元骨組モデルの挙動比較を行い, その後に橋りょう・高架橋群モデルを対象とした検討を行う.

## (2) 高架橋単体モデルの場合

単体モデルの基本的な情報として, 3次元骨組モデルのモデル図を図-6に示し, 橋軸方向, 橋軸直角方向の1次固有モードを図-7, 固有値解析の結果を表-3に示す.

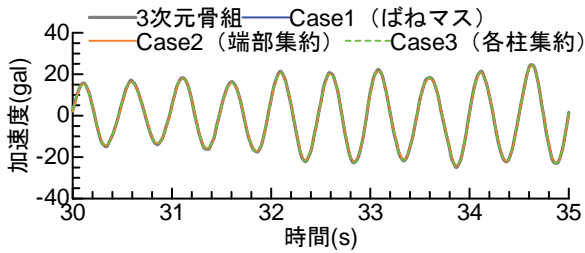
表-3 ラーメン高架橋 R1 (3次元骨組モデル) の固有値解析結果の一覧

次数	固有振動数 (Hz)	有効質量比		
		橋軸	橋軸直角	鉛直
1	1.91	0.00	0.73	0.00
2	1.99	0.74	0.00	0.00
3	2.24	0.00	0.00	0.00
4	14.16	0.00	0.00	0.00
5	15.00	0.00	0.00	0.59

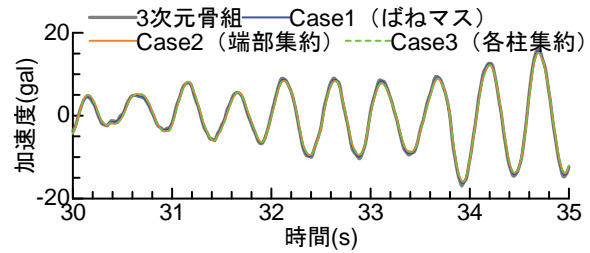
モード図および固有値解析結果より, 本構造は橋軸, 橋軸直角方向それぞれに単純な1次モードが卓越することがわかる.

次に, 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場合の高架橋天端の加速度の時刻歴波形の比較を図-8に示す. 本図を見ると, どのケースでも3次元骨組モデルと同等の結果となることがわかる. また, 橋軸方向および橋軸直角方向の周波数応答関数の比較を図-9に示す. 本図より, 周波数応答関数の卓越振動数が1つであり, それが各ケースで一致していること, さらに表-3で示した各方向の1次固有振動数と一致していることがわかる.

次に橋軸方向と橋軸直角方向それぞれの1次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-4に

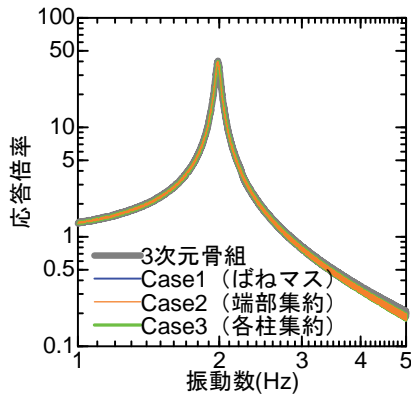


(a) 橋軸方向

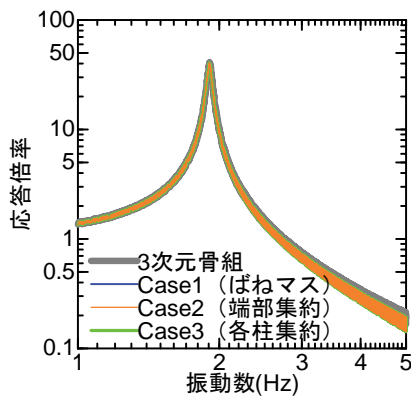


(b) 橋軸直角方向

図-8 ラーメン高架橋 R1 における天端の加速度波形の比較



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

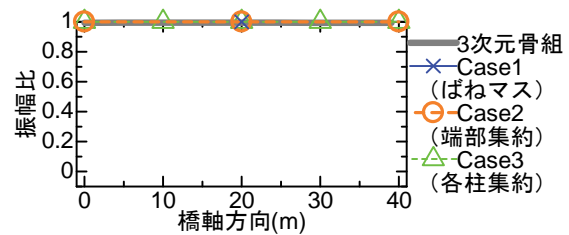
図-9 高架橋単体モデルにおける天端の周波数応答関数

示す。周波数応答関数の比較で明らかなように、ほとんどのケースで3次元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で2つのモードが発現するため、2種類 (Case2, Case2') 併記している。

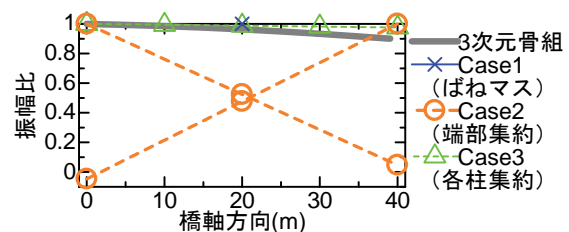
最後に各方向の1次モード形状として各ケースの上層梁・桁・橋脚位置の固有モード (最大振幅を1に正規化) を図-10に示す。本図において、橋軸方向については3次元骨組モデルの固有モードが橋軸方向に沿ってほぼ一様に振幅比1となっており、この挙動が各ケースで表現できていることがわかる。橋軸直角方向についても概ね同様の傾向であるが、Case2については、起終点それぞれ

表-4 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 (Hz)	刺激係数	有効質量比
3次元骨組	1.99	1.02	0.74
Case1	1.99	1.00	1.00
Case2	1.99	1.00	1.00
Case3	1.99	1.00	1.00
(b) 橋軸直角方向			
ケース	固有振動数 (Hz)	刺激係数	有効質量比
3次元骨組	1.91	1.05	0.73
Case1	1.91	1.00	1.00
Case2	1.91	1.04	0.55
Case2'	1.91	0.95	0.45
Case3	1.91	1.01	1.00



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-10 高架橋単体モデルの主要モード形状比較

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-5に示した2種類のモードに該当し、固有振動数が全く同じで、いずれの刺激係数もほぼ1に近い。そのため、周波数応答関数 (図-9(b)) としては他のケースと同様に3次元骨組モデルと整合する結果となる。

以上より、高架橋単体では、3次元骨組モデル自体が

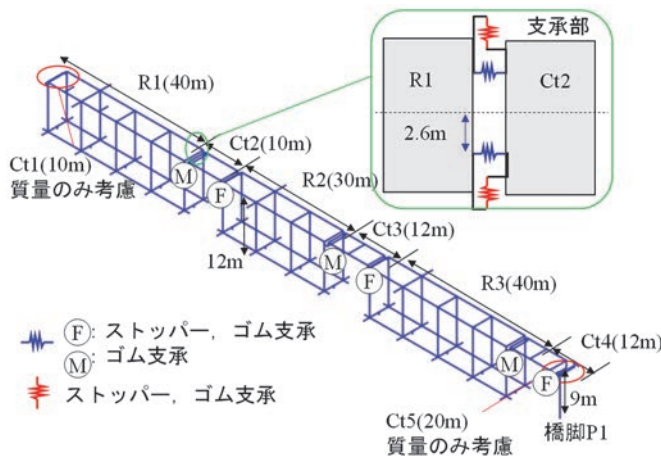
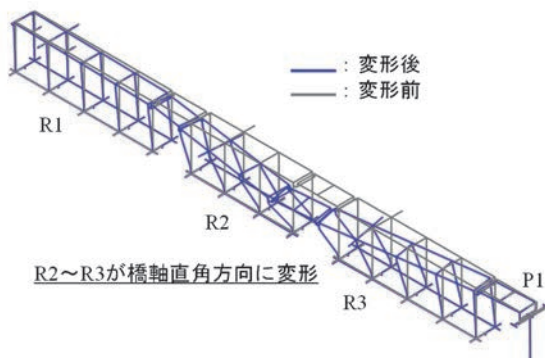


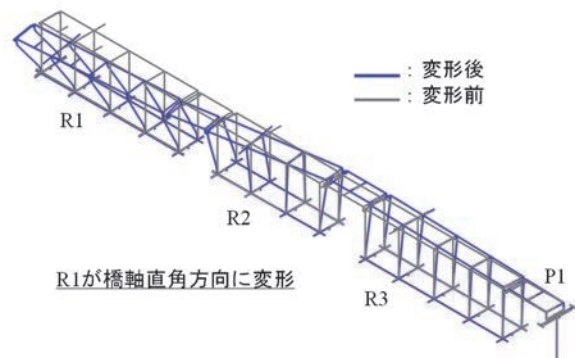
図-11 橋りょう・高架橋群の3次元骨組モデル

表-6 橋りょう・高架橋群（3次元骨組モデル）の固有値解析結果の一覧

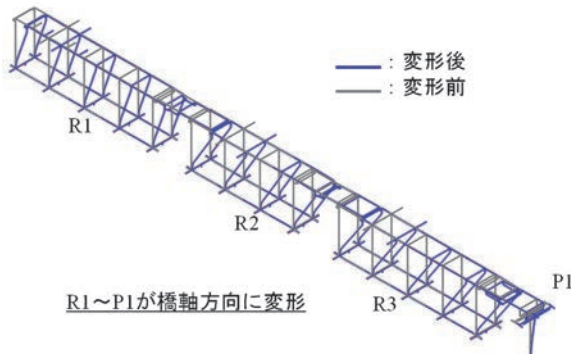
次数	固有振動数 (Hz)	有効質量比		
		橋軸	橋軸直角	鉛直
1	1.71	0.00	0.44	0.00
2	1.75	0.00	0.17	0.00
3	1.82	0.00	0.00	0.00
4	1.84	0.67	0.00	0.00
5	1.92	0.00	0.09	0.00
6	1.94	0.02	0.00	0.00
7	2.09	0.01	0.00	0.00
8	2.56	0.06	0.00	0.00
9	2.58	0.00	0.00	0.00
10	3.21	0.00	0.00	0.00
11	4.06	0.00	0.06	0.00



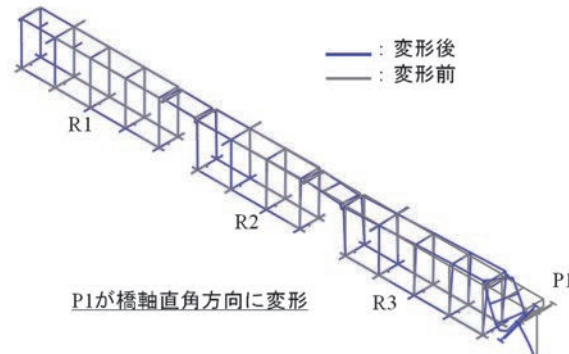
(a) 全体1次モード (1.71Hz)



(b) 全体2次モード (1.75Hz)



(c) 全体4次モード (1.84Hz)



(d) 全体11次モード (4.06Hz)

図-12 橋りょう・高架橋群（3次元骨組モデル）の主要な固有モード

単純な1自由度の挙動を示すため、いずれのケース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

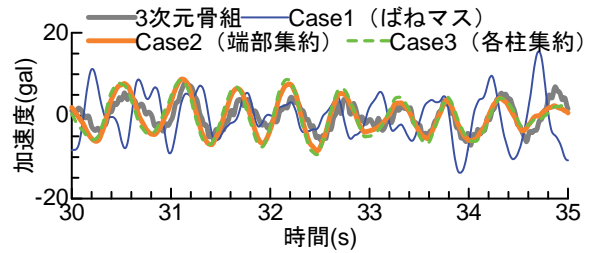
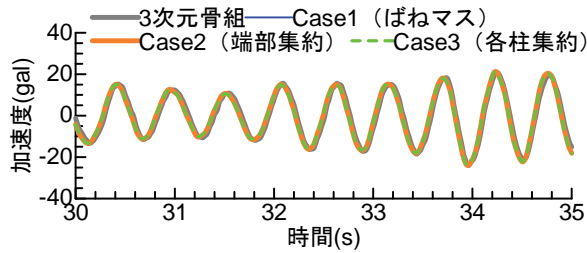
橋りょう・高架橋群モデルの基本的な情報として、3次元骨組モデルのモデル図を図-11に示し、橋軸方向、橋軸直角方向の主要モードを図-12、固有値解析の結果を表-6に示す。これらの結果より、本構造物群が橋軸直角方向および橋軸方向に複数の主要モードを有し、複雑な挙動をすることがわかる。このような橋りょう・高架

橋群モデルに対して、ラーメン高架橋と橋脚のそれぞれの挙動に着目して分析を行う。

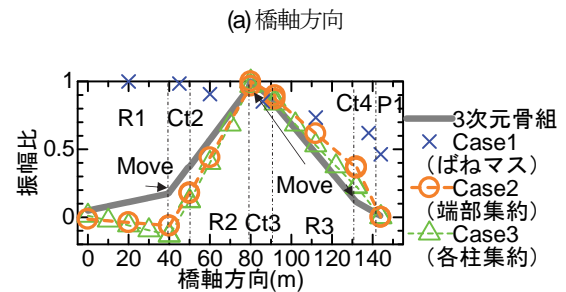
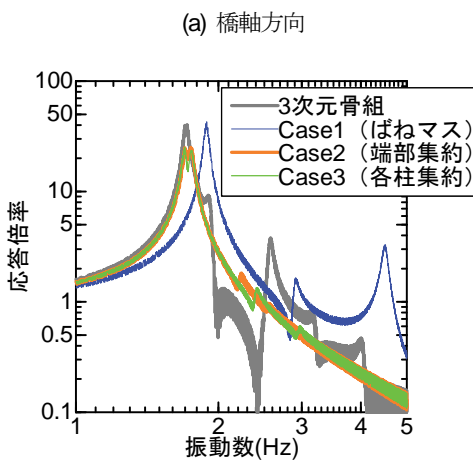
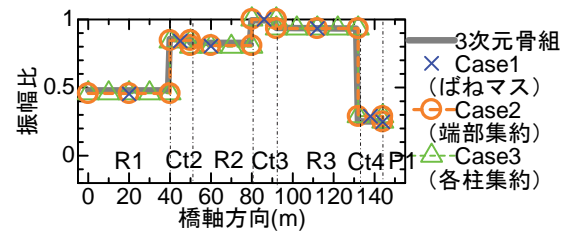
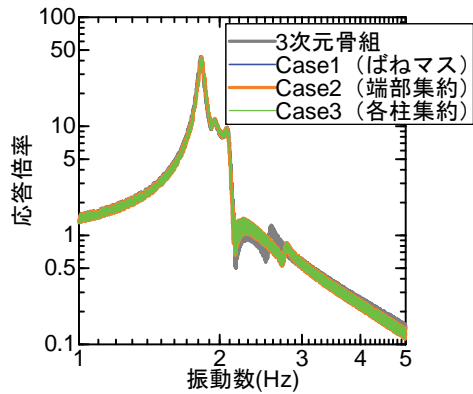
#### a) ラーメン高架橋の挙動

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-13に示す。本図を見ると、橋軸方向については、各ケースが3次元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3次元骨組モデルの再現性が低いものの、Case2, 3は良好に表現できていることがわかる。

続いて、各モデルの周波数応答関数の比較を図-14に



(a) 橋軸方向 (b) 橋軸直角方向  
 図-13 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



(a) 橋軸方向 (b) 橋軸直角方向  
 図-15 ラーメン高架橋 R2 が主体的に動く固有モード

図-14 橋りょう・高架橋群モデルにおけるラーメン高架橋 R2 天端の周波数応答関数

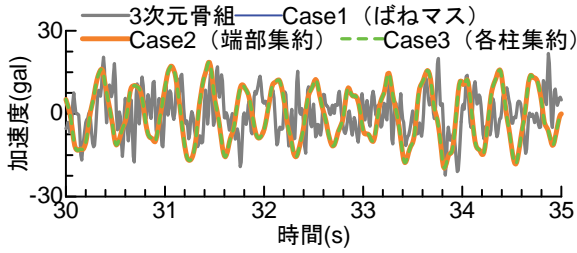
示す。本図より橋軸方向は、ばねマスモデルでも3次元骨組モデルと周波数応答関数がほぼ一致することがわかる。一方で、橋軸直角方向については、Case1は3次元骨組モデルと1次の卓越振動数に乖離があるが、Case2, 3は3次元骨組モデルと1次の卓越振動数付近の傾向は概ね一致している。

次に、ラーメン高架橋 R2 が主体的に動くモードにおける、上層梁・桁・橋脚の固有モードの比較を図-15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

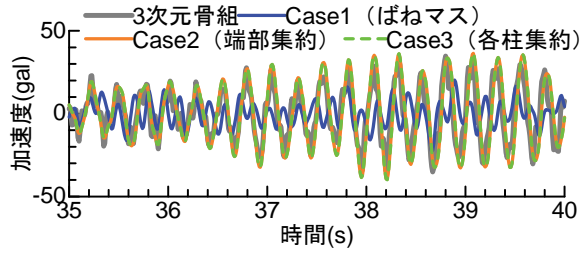
をするため、Case1 でも 3 次元骨組モデルの挙動が十分表現できることがわかる。一方で、橋軸直角方向は可動支承位置 (図-15(b)で“Move”と記載の箇所) で鉛直軸回りに回転する挙動となるため、回転ばねをモデル化していない Case1 では再現が難しいことがわかる。一方、Case2, 3 では完全な再現は難しいものの、可動支承位置での回転挙動は表現できており、3 次元骨組モデルと概ね整合する固有モードとなっている。なお、紙面の都合で説明は省略するが、他のラーメン高架橋 R1, R3 についても、同様の傾向が確認されている。

#### 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-16に示す。本図を見ると、橋軸方向については各モデルが3次元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3次元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、各ケースの周波数応答関数の比較を図-17に示す。本図より、橋軸方向について、1.8Hz付近の卓越振動数は3次元骨組モデルと各ケースで良好に一致

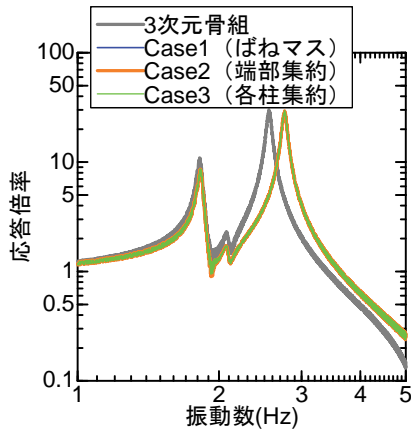


(a) 橋軸方向

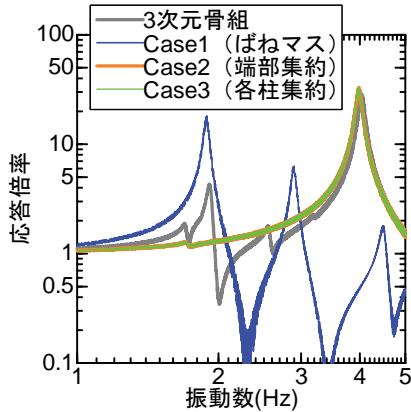


(b) 橋軸直角方向

図-16 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



(a) 橋軸方向

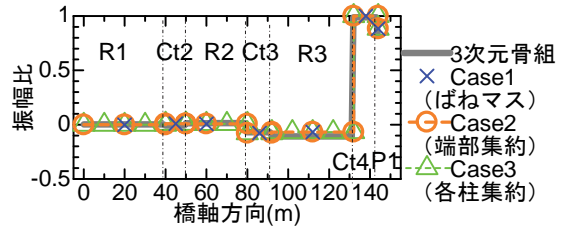


(b) 橋軸直角方向

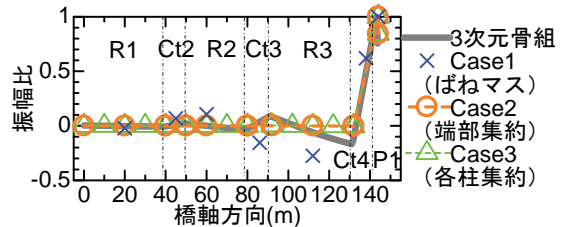
図-17 橋りょう・高架橋群モデルにおけるラーメン高架橋R2天端の周波数応答関数

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、3次元骨組モデルと各ケースで乖離が見られる。一方で、橋軸直角方向については、Case1は3次元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、3次元骨組みモデルを表現できていないのに対して、Case2、Case3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。

次に、橋脚P1が主体的に動くモードにおける上層梁・



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

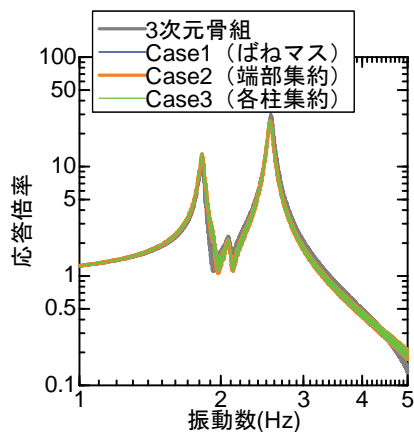
図-18 ラーメン高架橋R2が主体的に動く固有モード

桁・橋脚の固有モードの比較を図-18に示す。本図を見ると、時刻歴波形や周波数応答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。

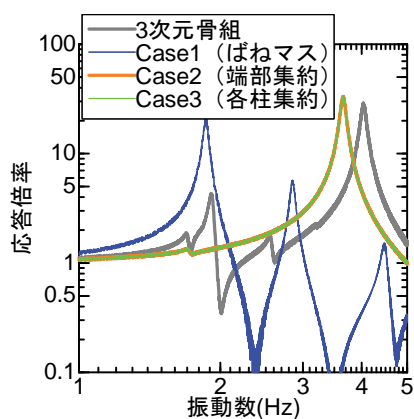
### c) 橋脚く体の等価質量の影響

b)で述べた橋脚の橋軸方向の周波数応答関数の乖離について、その要因を考察する。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の周波数応答関数を算定したものを図-19に示す。図-19と図-17を比較すると、図-19の方が橋脚P1の主要モ



(a) 橋軸方向



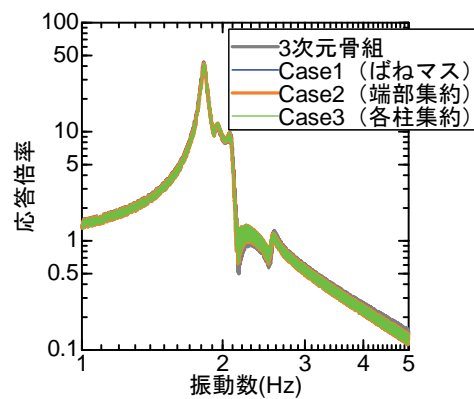
(b) 橋軸直角方向

図-19 橋りょう・高架橋群モデルにおける橋脚P1の周波数応答関数（橋脚の等価質量30%）

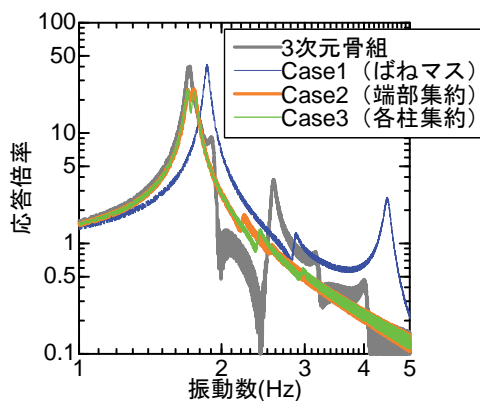
ードにおける卓越振動数が小さくなるのがわかる。これは、橋脚く体の等価質量が40%から30%へ小さくなると、単体の固有振動数が橋脚よりも小さいラーメン高架橋の振動特性の寄与が大きくなるため、構造全体系としての橋脚の卓越振動数が小さくなったと考えられる。結果的には、橋軸方向については、等価質量30%（図-19(a)）でモデル化した方が3次元骨組モデルを良好に表現できることがわかる。一方で、橋軸直角方向については、等価質量30%（図-19(b)）でモデル化すると、等価質量40%（図-17(b)）でモデル化していたときよりも、3次元骨組モデルとの乖離が大きくなってしまふ。

一方で、ラーメン高架橋R2の周波数応答関数を図-20に示すが、図-14とほぼ同様であり、Case2, 3は3次元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、鉄道橋りょう・高架橋群を簡易にモデル化する場合、橋脚の挙動を3次元骨組モデルのように



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-20 橋りょう・高架橋群モデルにおける高架橋 R2 の周波数応答関数（橋脚の等価質量30%）

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。

#### 4. おわりに

本稿では、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した。このときは設計実務で延長の長い鉄道橋りょう・高架橋をモデル化することを想定し、複数の簡易なモデル方法を提案し、3次元骨組モデルとの挙動比較を行った。

検討内容および得られた知見は以下の通りである。

- 端部集約モデルおよび各柱集約モデルと呼称するモデル化方法を提案した。前者は、ラーメン高架橋の柱～基礎部を起終点の2つの質点・ばね要素（水平2方向の自由度）で表現し、上層梁～スラブ・付帯設備や桁を剛な梁要素で表現し、支承を水平ばねおよび鉛直軸回りの回転ばねで表現したモデルである。後者は、ラー

メン高架橋の柱～基礎部を各柱位置で質点・ばね要素で表現し、その他は端部集約モデルと同様のモデル化方法である。

- ・鉄道橋りょう・高架橋群を対象に、提案するモデル化方法、既往の単純なばねマスモデルおよび詳細な3次元骨組モデルでモデル化を行い、線形条件で周波数応答関数および応答波形を比較した。
- ・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、提案モデルは元より既往のばねマスモデルでも3次元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、可動支承における鉛直軸回りの回転挙動が生じるため、既往の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している提案モデルは、3次元骨組モデルの挙動を良好に表現できる。

なお、提案するモデル化方法においては、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。

## REFERENCES

- 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. [Nakajima, A, Nakano, K and Nakamura, S.: Vibration property of independent piers and completed bridge by using microtremor measurement, *Journal of Structural Engineering*, 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. [Tokunaga, M, Sogabe, M, Tanimura, H and Ono, K.: Method for Evaluating Equivalent Natural Period with Microtremor Measurement, *Proceedings of JSCE A1*, Vol.71, No.1, pp.72-86, 2015.]
- 3) 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. [Sato, Y, Sakai, M and Ohtomo, K.: Effects of steel bearing performance on global seismic response of a bridge, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 53A, pp.513-524, 2010.]
- 4) 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. [Kajita, Y, Watanabe, E, Sugiura, K, Maruyama, T and Nagata, K.: Seismic Response of Elevated Bridges Considering the Failure of Steel Bearings and Assessment on Effectiveness of Fall-off Prevention Devices, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 45A, pp.903-914, 1999.]
- 5) 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.710I-60, pp.297-310, 2002. [Kajita, Y, Sugiura, K, and Watanabe, E.: Seismic Response of Elevated Bridges with Girder-to-girder Connector Subjected to Strong Ground Motions, *Proceedings of JSCE*, No.710I-60, pp.297-310, 2002.]
- 6) 林秀侃, 梶川康男, 深田幸史, 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.605I-45, pp.49-60, 1998. [Hayashi, H, Kajikawa, Y, Fukada, S, Sugimoto, M and Hama, Hirokazu.: Dynamic Analysis of 19-span Continuous Space Frame Bridge with Lead Rubber Bearings Based on Vibration Tests, *Proceedings of JSCE*, No.605I-45, pp.49-60, 1998.]
- 7) 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. [Tokunaga, M, Sogabe, M, Watanabe, T, Kawamura, C and Ono, K.: Seismic Design Method of Railway Structures Which Takes Dynamic Effect of Railway Vehicles into Account, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 70, No.2, pp.265-281, 2014.]
- 8) 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. [Railway Technical Research Institute: Simulation Analysis on Derailment of Shinkansen Vehicles due to the 2016 Kumamoto Earthquake, *RTRI Report*, 2018.]
- 9) 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.689I-57, pp.275-288, 2001. [Murata, K, Takayama, T, Goto, T, Yamada, M, Ikoma, N and Ukishima, T.: Seismic Retrofit Effect by a Bridge Restrainer with Energy Absorption, *Proceedings of JSCE*, No.689I-57, pp.275-288, 2001]
- 10) 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. [Ikeda, M, Toyooka, A, Iemura, H, Iwata, S, Murata, K and Ichikawa, A.: Effects of Track Structures on Seismic Behavior of Railway Bridges Supported by Isolation Rubber Bearings, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 70, No.1, pp.1-16, 2014.]
- 11) 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. [Railway Technical Research Institute: Design standards for railway structures and commentary

(Seismic Design), Maruzen, 2012.]

- 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. [Railway Technical Research Institute:

Design standards for railway structures and commentary

(Seismic Design), Maruzen, 1999.]

## BASIC STUDY ON MODELING METHOD CONSIDERING SEISMIC INTERACTION BEHAVIOR OF RAILWAY BRIDGES AND VIADUCT GROUPS

Kazunori WADA and Kimitoshi SAKAI

Construction of a 3D frame model is effective as a method of analytically evaluating the entire structural system, and there are many examples of evaluating a specific group of structures. However, in design practice, it is necessary to consider the number of degrees of freedom of the model in order to evaluate the seismic interaction behavior of long railway bridges and viaducts. Therefore, we investigated a modeling method that can express the seismic interaction behavior of railway bridges and viaducts simply and appropriately. Specifically, based on the model of the design vibration unit used in seismic design, a simple frame model was constructed by connecting them, and the response was compared with the 3D frame model by frequency response function and response waveform. As a result, it was found that the frequency response function and response waveform can be roughly expressed even with a simple model in which columns and frames are aggregated into mass points, if the rotational behavior around the vertical axis at the bearing is expressed.