

高速鉄道高架橋の列車走行時の振動解析

川谷充郎¹・何 興文²・白神 亮³・関 雅樹⁴・西山誠治⁵・吉田幸司⁶

¹フェロー 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail : m-kawa@kobe-u.ac.jp

²学生員 神戸大学大学院自然科学研究科 学生(研究当時) (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail : kakobun@kobe-u.ac.jp

³正会員 大阪大学大学院工学研究科 学生(研究当時) (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

⁴フェロー 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33)

E-mail : m.seki@jr-central.co.jp

⁵正会員 (株)日建設計シビル 技術開発部 (〒162-0822 東京都新宿区下宮比町 2-23)

E-mail : nishiyama@nikken.co.jp

⁶正会員 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33)

E-mail : k-yoshida@jr-central.co.jp

高速鉄道は都市間の旅客輸送の大役を担っており、今後も機能を維持向上することは元より、更なる周辺環境への配慮も必要と考えられる。そのためには、列車と高架橋との動的相互作用を考慮し、列車走行時の高架橋の振動特性を明らかにすることが肝要である。

本研究では、平面 2 自由度と 6 自由度、さらに立体 9 自由度振動系列車モデルを提案し、列車と高架橋の連成を考慮した三次元的応答解析手法を構築した。本手法を用いて高架橋の振動を再現し、実測値との比較検討よりその妥当性を確認した。さらに高架橋の振動特性を踏まえて同連成解析手法の応用例として、高架橋の振動軽減対策についても検討し、振動特性の改善効果を確認した。

Key Words : *dynamic response analysis, train-induced vibration of bridges, Shinkansen, nine-degree-of-freedom train model*

1. まえがき

鉄道高架橋や道路橋などの土木構造物は、都市機能や都市機能ネットワークを担う重要な社会資本である。特に、1964年に開業した東海道新幹線は、我が国の経済活動の大動脈として重要な役割を果たしてきた。今後も適正な健全度を維持しながら継続的に供用される必要がある。また、一部の区間においては、沿線の地盤振動の課題にも配慮する必要がある^{1),2)}。

列車走行時地盤振動の発生伝播メカニズムおよび振動軽減対策は完全には解明されていない。既往の研究内容の多くは、地盤振動実測データに基づく統計分析報告である。例えば、江島³⁾、吉岡⁴⁾は既設新幹線の鉄道高架橋における実測データの統計的な調査分析結果をまとめている。その研究の中で、鉄道高架橋における列車走行時の地盤振動については、車両速度、構造物、基礎ならびに地盤のそれぞれの特性が相互に影響すると報告している。具体例として、RC構造物の質量および剛性が大きいほど沿線地盤振動の発生が小さく、線路周辺では列車荷重により生じる振動の鉛直成分が大きいこと等の報告が

ある。しかし、現状の実測値から新しい地盤振動軽減対策工法の導入効果および将来の列車速度向上に伴う地盤振動値を予測することは、精度上課題があった。このため、解析的に精度の高い予測手法の開発が必要であった。

鉄道車両と橋梁に関する振動の理論的な研究は1960年代後半から行われている。列車走行性に係る構造物の動的応答に関する研究としては、松浦^{5),6)}が単純支持桁と単軸およびボギー形式の質点系車両との連成を考慮した動的応答解析を実施し、さらに、車両モデルの改良や解析手法の精度向上の研究^{7),8),9)}がなされている。国外においても鉄道列車-橋梁相互作用を解明するための研究がなされている^{10),11),12)}。また、鉄道高架橋以外でも、道路橋を対象とした橋梁の走行車両による動的特性の研究も盛んに行われ^{13),14),15),16)}、衝撃係数の検討という形でまとめられている。さらに、川谷・西山¹⁷⁾は路面凹凸の影響など、振動への各種影響要因を適切に評価するための走行車両モデル改良等の精度向上の研究を実施している。最近では、川谷ら¹⁸⁾による8自由度系の三次元車両モデルを用いた三次元的動的応答解析が行われている。しかしながら、地盤振動の課題に焦点

を当てた研究は少なく、特に高速走行列車による鉄道高架橋を対象とした車両と構造物の連成振動を扱った地盤振動に関する既往の研究は見当たらない。

鉄道高架橋における列車走行時の地盤振動についての最近の研究では、原ら¹⁹⁾が実測と解析の両方から高架橋とその周辺の地盤振動特性の解明を試みている。その成果として、特定の振動数成分に振動低減効果のある高架橋振動対策工法を提案している。しかし、解析においては、実測データに合うように定めた等価的な加振力を用いており、車両と高架橋との連成を直接的に考慮していない。そのため、等価加振力を設定するために実測を必要とする点が課題である。また、吉田・関²⁰⁾は、新幹線高架橋の地盤振動実測結果に基づく報告において、高架橋の三次元性による効果や列車と構造物の相互作用などの解明のために連成解析手法の開発の重要性を示唆している。

そこで、本研究では、鉄道高架橋の振動特性を正確に把握するために、固有振動数や加速度応答が測定された鉄道高架橋の事例²⁰⁾をもとに、列車と鉄道高架橋との連成を考慮した動的応答解析手法を構築する。高速鉄道の高架橋を対象に、列車と構造物との連成解析の適用性を検討した研究事例はない。したがって、その適用性を確認することは、今後の地盤振動低減対策への取組みに有用な事例となると考える。

なお、走行列車モデルは、解析精度と効率化の面から重要な要因であることから、連成解析手法構築の上で比較検討する。これらの車両モデルの詳細な影響は、車両を一定の等価加振力で扱った場合には、表現しえない点であり、連成解析の有効性を示唆するものである。

これらの観点から、同連成解析手法を用いて、列車通過時鉄道高架橋の振動特性について報告する。また、連成解析結果から得られた振動特性を踏まえ、同解析手法の応用例として、当該高架橋の振動低減を目的とした対策工をモデル化し、列車と高架橋の連成を考慮した振動特性の改善効果について報告す

る²¹⁾。さらに、具体的な振動低減対策事例¹⁹⁾への同解析手法の適用についても報告する。

2. 三次元動的応答解析²²⁾

(1) 解析手法²³⁾

鉄道高架橋部分を三次元有限要素でモデル化し、モード法により定式化を行い、振動系である車両との連成振動微分方程式を、Newmark's β 法を用いて逐次積分をして動的応答解析を行う。このとき、 $\beta = 1/4$ とし、各時間間隔における収束判定は $1/1000$ とする。

本研究では、鉄道高架橋の死荷重に対する活荷重の割合が大きく、活荷重が高速移動する対象を扱っているが、列車走行中の高架橋の挙動は弾性範囲内にあり、モード法が適用できる。また、列車を振動系として高架橋との連成振動方程式を解くことにより、列車の移動による応答周波数の変化を表現できる¹⁷⁾。

(2) 走行列車モデル²⁴⁾

走行列車について、解析精度および解析の効率化の両面を満たす車両モデルを提案する目的から、異なる車両モデルが振動解析に及ぼす影響について検討する。

一般に、車両工学分野など、車両の走行性や挙動等、車両の動特性に着目した研究においては、車両モデルの自由度は、把握したい事象により異なるものの、多いもので数十自由度が用いられている²⁵⁾。一方、列車荷重により生じる高架橋沿線での地盤振動については鉛直成分が大きいことから^{3), 4)}、本研究では、高架橋の鉛直方向の振動応答に着目し、鉛直方向の挙動を再現する車両モデルの構築を主眼とする。構造物の鉛直方向の振動応答に着目する場合、鉛直応答に寄与するバウンシング、ピッチングおよびローリング振動のみを考慮した低自由度の車両モデルで、十分に構造物の応答を評価できる^{18), 23)}。

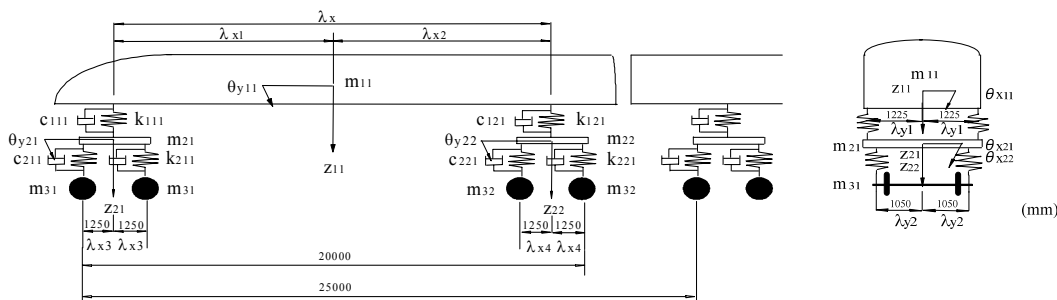


Fig. 1 Shinkansen train model

Table 1 Dynamic properties of moving trains

Mass (t)	m_1 (Body)	32.818
	m_2 (Bogies)	2.639
	m_3 (Wheels)	0.9025
Spring constant k (N/m)	k_u (Upper)	8.86×10^5
	k_l (Lower)	2.42×10^6
Damping coefficient c (N·s/m)	c_u (Upper)	4.32×10^4
	c_l (Lower)	3.92×10^4
Natural frequency (Hz)	f_u (Upper)	1.07
	f_l (Lower)	7.41

列車が走行する際において過大な横圧の発生は、曲線区間、レール継目部または大きな軌道狂い箇所に限定される。しかしながら、本研究の対象では全線ロングレールであるため、継目部は考慮しない。また、本検討対象は、地盤振動が課題となる最高速度での走行が可能な直線区間の高架橋であることから、通常の保守状態では車輪フランジが接触するような現象は発生していない。したがって、左右方向やヨーイング方向の運動は除外することとした。

車両と構造との相互作用において、本解析では、輪軸の質量が車両全体質量に占める割合が少ないこと、さらに庄司ら²⁶⁾の実測に基づく報告によれば、直線区間において軌道が適切な維持管理状態にあれば、実測による輪重変動が少ないことから、車輪質量の鉛直方向加速度による慣性力の変動を考慮しないモデルとした。また、本研究では、車輪は接触点におけるレールと変位を共有するものとする。車両の挙動をより厳密に表現するためには、涌井ら⁹⁾が検討しているような車輪とレールとの接触力を算定できる接触モデルを考慮するのが望ましい。しかし、正確な接触モデルを導入するのが複雑な上に、軌道状態が適切な維持管理状態にある直線区間を対象としていること、車両の自重が支配的な鉛直方向の橋梁応答に着眼した橋梁応答には、車輪とレールと変位を共有するものとしても橋梁の応答に大きな影響がないと考えられる。ここで、軌道不整等による高周波数域での車輪の滑りによる輪重変動やレール振動などを表現できないため、高周波数領域で橋梁の振動を評価するのに精度上限界がある。

そこで本研究では、一車両についてそれぞればね下振動を無視して車体だけのバウンシングおよびピッチングを考慮する平面の2自由度振動系モデルと、ばね下の前后台車の振動も考慮する平面の6自由度振動系モデル、さらに、ばね上とばね下のローリングも考慮する立体の9自由度振動系モデルを構築する。立体の9自由度車両モデルをFig.1に示す。これらの各モデルより、解析精度と解析効率化を勘案

して、妥当なモデルを提案する。なお、6自由度振動系および9自由度振動系では、ばね下の車輪の質量も考慮する。

16両編成の新幹線列車を想定し、車両1両についてそれらの構造諸元をTable 1に示す。走行速度は実際の運行速度270 km/hとし、走行位置は立体車両の場合はFig.3に示す下り線に相当する位置とし、平面車両モデルの場合はその中心位置とする。

Fig.1に示す9自由度振動系の三次元車両モデルについて車両の振動を定式化し、その方程式を以下に示す。6自由度および2自由度車両モデルの振動方程式は9自由度車両モデルの振動方程式を単純化することより導くことが容易にできる。

a) 車両本体に関する振動方程式

車両本体のばね上振動に関する上下振動(bouncing)、縦揺れ振動(pitching)、横揺れ振動(rolling)は、それぞれ式(1)~(3)で表される。

$$m_{11}\ddot{z}_{11} + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 v_{lm}(t) = 0 \quad (1)$$

$$m_{11}\lambda_{x1}\lambda_{x2}\ddot{\theta}_{y11} - \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^l \lambda_{xl}v_{lm}(t) = 0 \quad (2)$$

$$m_{11}\lambda_{y1}^2\ddot{\theta}_{x11} + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{yl}v_{lm}(t) = 0 \quad (3)$$

ここに、

$$\begin{aligned} v_{lm}(t) = & k_{lm}\{z_{11} - (-1)^l \lambda_{xl}\theta_{y11} \\ & + (-1)^m \lambda_{yl}\theta_{x11} - z_{2l} - (-1)^m \lambda_{yl}\theta_{x2l}\} \\ & + c_{lm}\{\dot{z}_{11} - (-1)^l \lambda_{xl}\dot{\theta}_{y11} \\ & + (-1)^m \lambda_{yl}\dot{\theta}_{x11} - \dot{z}_{2l} - (-1)^m \lambda_{yl}\dot{\theta}_{x2l}\} \end{aligned} \quad (4)$$

サフィックス l, m はばね上振動に関し、 $l=1, 2$: 前后台車; $m=1, 2$: 左右側を表す。

m_{11} は車体の質量で、 z_{11} 、 θ_{y11} と θ_{x11} はそれぞれ車体の鉛直方向変位、横軸と縦軸まわりの角変位である。 λ_{x1} および λ_{x2} は縦方向における車体の中心から前后台車の中心までの距離で、 λ_{y1} は横方向における車体重心から上下まくらばねまでの距離を表す。 c と k はそれぞれのサフィックスの対応する減衰係数とばね定数である。

b) 前后台車に関する振動方程式

ばね下の前后台車の振動に関する上下振動(parallel hop)、縦揺れ振動(windup)、横揺れ振動(axle tramp)は、それぞれ式(5)~(7)で表される。

$$m_{21}\ddot{z}_{21} - \sum_{m=1}^2 v_{1m}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 v_{1km}(t) = 0 \quad (5)$$

$$m_{21}\lambda_{x3}^2\ddot{\theta}_{y21} - \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 (-1)^k \lambda_{x3}v_{1km}(t) = 0 \quad (6)$$

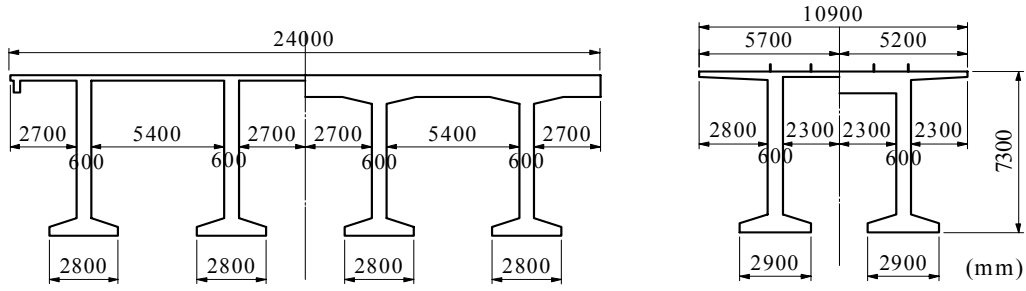


Fig.2 Elevated railway bridge

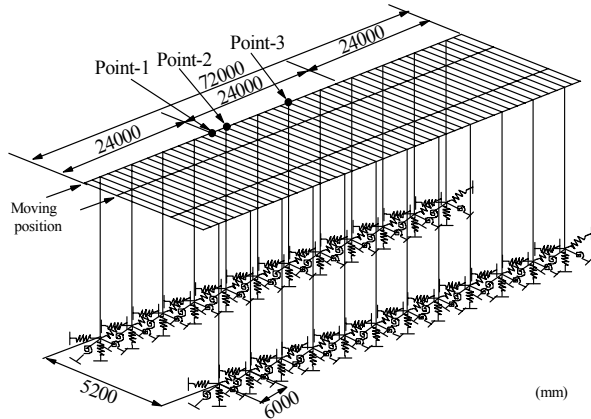


Fig.3 Analytical model of bridge

$$m_{21}\lambda_{y2}^2\ddot{\theta}_{x21} - \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y1} v_{1m}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y2} v_{1km}(t) = 0 \quad (7)$$

ここに,

$$v_{1km}(t) = k_{21m} \{ z_{21} - (-1)^k \lambda_{x3} \theta_{y21} + (-1)^m \lambda_{y2} \theta_{x21} - w_{j1km} \} + c_{21m} \{ \dot{z}_{21} - (-1)^k \lambda_{x3} \dot{\theta}_{y21} + (-1)^m \lambda_{y2} \dot{\theta}_{x21} - \dot{w}_{j1km} \} \quad (8)$$

サフィックス k, m は前台車の振動に関し, $k=1, 2$: 前後軸; $m=1, 2$: 左右側を表す.

z_{21}, θ_{y21} と θ_{x21} はそれぞれ前台車の鉛直方向変位, 横軸と縦軸まわりの角変位である. λ_{x3} は縦方向における台車の中心から前後軸までの距離で, λ_{y2} は横方向における台車重心から台車 - 輪軸間鉛直ばねまでの距離を表す.

c) 後台車に関する振動方程式

ばね下の後台車の振動に関する上下振動 (parallel hop), 縦揺れ振動 (windup), 横揺れ振動 (axle tramp) は, それぞれ式(9)~(11)で表される.

$$m_{22}\ddot{z}_{22} - \sum_{m=1}^2 v_{2m}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 v_{2km}(t) = 0 \quad (9)$$

$$m_{22}\lambda_{x4}^2\ddot{\theta}_{y22} - \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^k \lambda_{x4} v_{2km}(t) = 0 \quad (10)$$

$$m_{22}\lambda_{y2}^2\ddot{\theta}_{x22} - \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y1} v_{2m}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y2} v_{2km}(t) = 0 \quad (11)$$

ここに,

$$v_{2km}(t) = k_{22m} \{ z_{22} - (-1)^k \lambda_{x4} \theta_{y22} + (-1)^m \lambda_{y2} \theta_{x22} - w_{j2km} \} + c_{22m} \{ \dot{z}_{22} - (-1)^k \lambda_{x4} \dot{\theta}_{y22} + (-1)^m \lambda_{y2} \dot{\theta}_{x22} - \dot{w}_{j2km} \} \quad (12)$$

サフィックス k, m は後台車の振動に関し, $k=1, 2$: 前後軸, $m=1, 2$: 左右側を表す.

z_{22}, θ_{y22} と θ_{x22} はそれぞれ後台車の鉛直方向変位, 横軸と縦軸まわりの角変位である. λ_{x4} は縦方向における台車の中心から前後軸までの距離を表す.

w_{j2km} はレールの変位と踏面凹凸による車輪の変位で, 以下のように示す.

$$w_{j2km} = w(t, x_{j2km}) - z_0(x_{j2km})$$

ここに, $w(t, x_{j2km})$ と $z_0(x_{j2km})$ は車輪とレールとの接触点におけるレールの変位と凹凸を表す.

また輪重 $P_{l2km}(t)$ は次の式で計算される.

$$P_{l2km}(t) = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\lambda_{xl}}{\lambda_x} \right) m_{11}g + \frac{1}{4} m_{21}g + m_{31}g + v_{l2km}(t)$$

(3) 鉄道高架橋モデル^{27), 28)}

対象とする鉄道高架橋は, Fig.2 に示すような一般的な形式である 1 層 2 柱式 3 径間の鉄筋コンクリートのラーメン高架橋で, 列車走行時の高架橋の鉛直方向の加速度応答が実測²⁰⁾された箇所をモデル化する. 高架橋本体は 1 ブロック単位で構造的に独立しているが, 連続する複数のブロックは, 橋軸方向に軌道で繋がっている. そのため, 検討対象とする 1 ブロック 24m の高架橋の両側に各 1 ブロック配置し, 計 3 ブロック 72m について Fig.3 に示すような有限要素にモデル化する. この結果, 検討対象とする鉄道高架橋への走行列車の進入および退出における軌道の影響つまり端部境界条件を考慮することが可能となる.

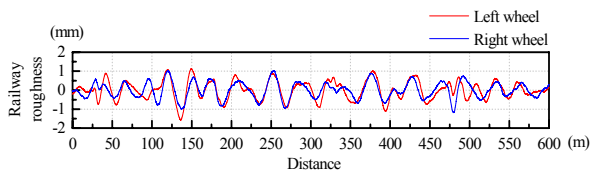


Fig. 4 Railway roughness

Table 2 Ground spring constant

Sort of spring	Longitudinal	Transverse
Vertical spring of pile top (kN/m)	3.86×10^6	
Rotating spring of pile top (kN·m/rad)	3.64×10^6	2.42×10^6
Horizontal spring of footing (kN/m)	4.84×10^3	4.72×10^3
Horizontal spring of pile top (kN/m)	8.22×10^4	8.08×10^4

Table 3 Property of railway

Area (m ²)	7.75×10^{-3}
Mass (t/m)	0.0608
Moment of inertia (m ⁴)	3.09×10^{-5}
Spring constant of track (MN/m)	70

高架橋のモデルは一節点 6 自由度を有する三次元はり要素である。質量は節点集中質量とし、高架橋部分の死荷重（鉄筋コンクリート質量）および付加死荷重（軌道部質量）を考慮する。高架橋は橋軸直角方向に張出し構造となっているが、この部分の質量および剛性は、最外側の節点と要素にそれぞれ付加する。なお、3 ブロック高架橋モデルの両端部の境界条件は軌道構造まではモデル化しないフリーである。

今回事例研究としてモデル化した高架橋の地盤は、軟弱地盤上に位置し、表層が SPT-N 値 1 程度の軟弱なシルト層で、その下部に N 値 10 程度の砂層、GL-18m で N 値 40 以上の礫層である。基礎形式は既成 RC 打込み杭で、設計上の支持層まで打ち込まれている²⁰⁾。事例モデルでは、柱下端部に、基礎および地盤の影響を考慮するため二重節点²⁹⁾を定義し、地盤ばねを設ける。地盤ばねの値を Table 2 に示す。地盤ばねの値は群杭およびフーチングの地盤反力係数により得られる設計値³⁰⁾を固有振動数に与える影響を考慮して 2 倍した値とする。これは、鉄道高架橋の健全度判定に用いる衝撃振動試験²⁰⁾による固有振動数の実測結果のシミュレーションでは、実際の基礎ばねの値は設計用値の 1 ~ 10 倍程

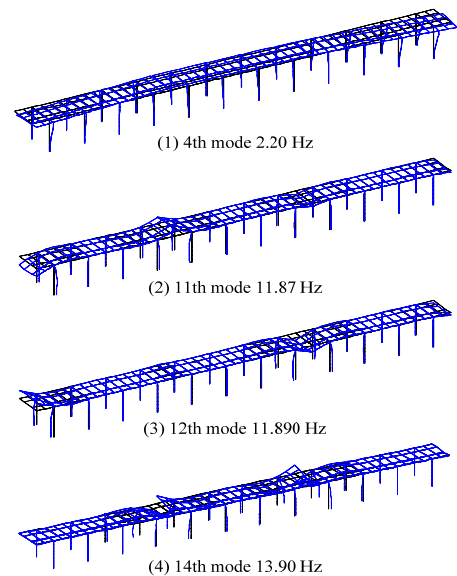


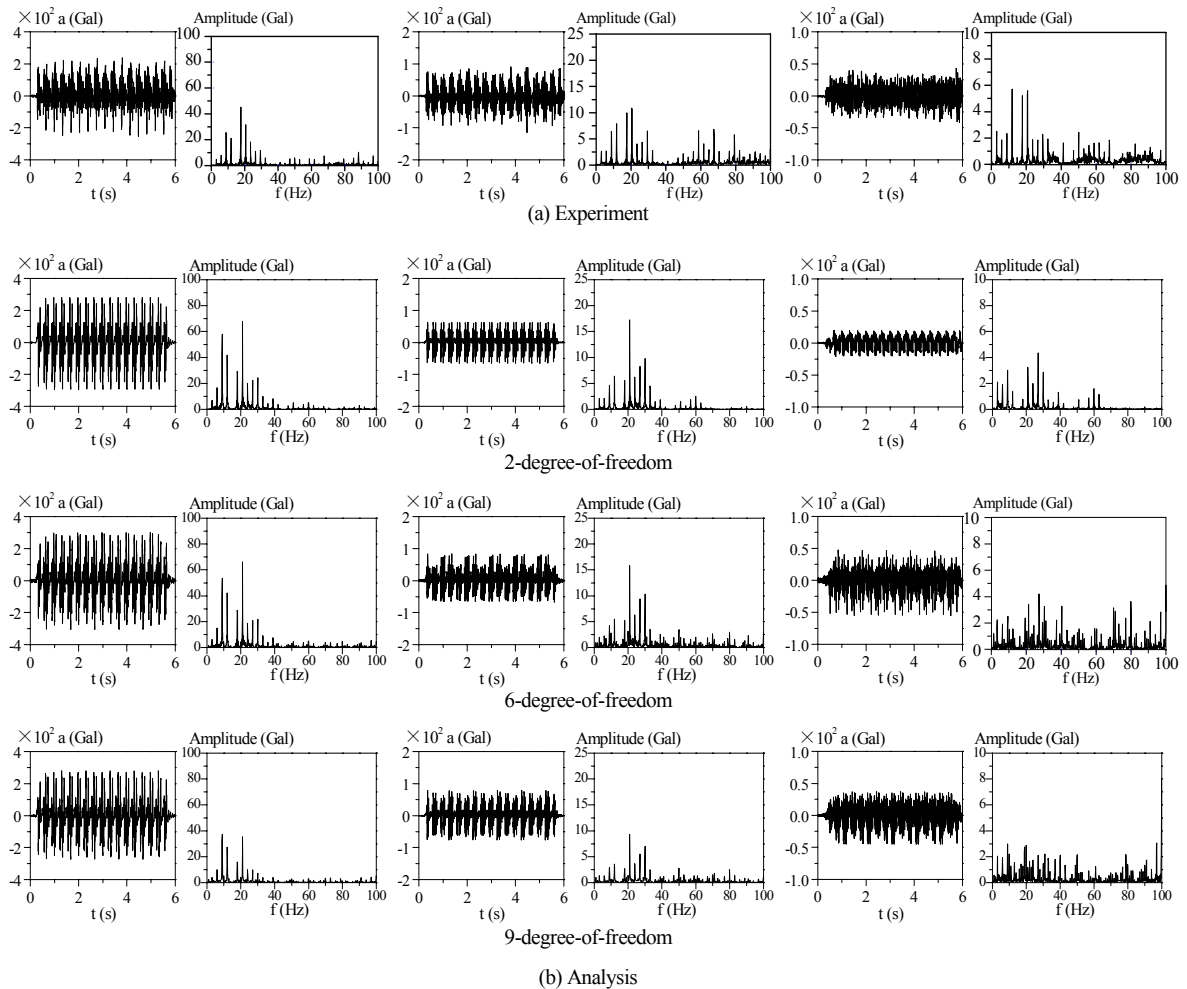
Fig. 5 Natural mode shapes and frequencies of bridge

度の大きさであることが示されており³¹⁾、平均的には設計値の 2 倍程度は見込めると考えられる。

高架橋モデルの減衰定数については、レイリー減衰を用いて評価する³²⁾。この方法では、1 次と 2 次振動モードに対する減衰定数を与えれば、3 次以降の減衰定数は質量マトリックスと剛性マトリックスの線形和で表現される。この場合、高次モードになる程、減衰を大きく評価することになる。本解析では、鉄道高架橋を対象とした既往の振動試験結果³³⁾より 1 次と 2 次振動モードに対して減衰定数を 0.03 とする。

(4)軌道モデル

対象とする鉄道高架橋の軌道構造はバラスト軌道である。そこで、軌道モデルについては、レールを一節点 6 自由度を有する三次元はり要素でモデル化する。軌道支持部の構造はマクラギ位置下端にマクラギ間隔で二重節点を定義し、回転を除いた各方向にばねを設ける。レールの剛性諸元、軌道のばね係数を Table 3 に示す。鉛直方向の軌道ばね係数は、輪重とレールの上下変位の比で求めた値を用いる。また、水平方向の軌道ばね係数は鉛直方向の 1/3 の値とする。これは、バラスト軌道であることから、基礎の地盤ばねを参考に、水平方向の地盤ばねが鉛直方向の 1/3 程度であることから定めた³¹⁾。軌道狂いについては高低狂いのみ考慮する。レール踏面凹凸の実測値を Fig. 4 に示す。



Point-1

Point-2

Point-3

Fig. 6 Acceleration of bridge

Table 4 Maximum acceleration and rms value (v=270km/h)

Point No.	Maximum acceleration (Gal)				rms value (Gal)			
	Experiment	Analysis			Experiment	Analysis		
		2 DOF	6 DOF	9 DOF		2 DOF	6 DOF	9 DOF
Point-1	239.4	293.3	305.4	279.4	79.8	119.7	116.1	106.5
Point-2	91.4	65.8	83.5	78.3	29.0	26.9	28.6	26.8
Point-3	43.1	21.2	55.2	44.9	14.9	8.8	14.6	14.8

3. 解析結果

(1) 固有振動特性

前章でモデル化した高架橋モデルの固有値解析結果としてモード図をFig.5に示す。1次～9次モードは水平に振動するモードである。橋軸直角方向に水平に動くモードの固有振動数は2.20Hzである。衝撃振動試験による実測値では、橋軸直角方向水平に振動するモードの値は2.19Hzであり、解析値は実測値に近く、解析モデルの妥当性が伺える。

鉛直方向の曲げ振動が卓越する振動数は 11.9Hz前後であり、ねじり振動が卓越する振動数は 13.9Hz

前後である。また、地盤振動に関して実測条件として 100Hz 以下の周波数領域に着目しており、連成解析時に考慮するモード次数は 277 次($f=102\text{Hz}$)とする。

(2) 車両モデルが加速度応答に及ぼす影響

車両モデルが振動解析に及ぼす影響を検討するため、解析結果と実測値と共に、Fig.3 に示す Point-1～3 各点について比較する。Point-1 は高架橋進入側の橋軸方向の張出し構造部分であり、Point-2 は張り出し構造部分から橋軸方向に 1 本目の柱上端、Point-3 は張り出し構造部分から 3 本目の柱上端であ

る。本研究に用いた実測値は、解析モデルで着目する3つの着目点(Point-1~3)において、測定線側を1編成16両の列車が270 km/h走行した際の鉛直方向の加速度応答を加速度計にて同時計測したものである。また、測定は加速度計からアンプを介し、データレコーダで記録する。データのサンプリングレートは512 Hzである。本研究では、高架橋の剛性が高いことや列車高速走行等を勘案し、考慮する最高振動数を100 Hzまでとするが、それ以上の高周波は地盤振動に影響が少ないと考えられることから、実測および解析値とともに100 Hzローパスフィルタで処理し比較検討する。

各実測点について実測値と2自由度振動系、6自由度振動系、9自由度振動系の各車両モデルによる解析結果の鉛直方向の加速度波形とフーリエスペクトルをFig.6に、また、加速度振幅の最大値および加速度のrms値をTable 4にそれぞれ示す。

はじめに、加速度応答の全体傾向について見ると、実測値において、Point-1>Point-2>Point-3の大小関係が見られる。また、周波数成分としては、各Pointともに10Hz付近、20Hzに卓越が見られる。この傾向は、2、6、9自由度系の各車両モデルでの解析値においても表現されている。

しかし、実測値と各モデルの解析値の最大値およびrms値を比較した場合(Table 4参照)、ばね下質量を考慮していない2自由度振動系より、ばね下質量を考慮している6自由度および9自由度振動系の方が、より実測値に近い値が得られている。特に、実効値となるrms値を比較した場合、2自由度振動系では、Point-1において約1.5倍と過大評価、Point-3において約0.6倍と過小評価している。

次に、周波数成分を比較した場合、Point-2およびPoint-3で実測値に見られる50Hz以上の高周波数振動成分については、2自由度振動系では極めて小さく、車体より固有振動数の高いばね下質量の振動を考慮しなくては、加速度応答の高周波成分を再現できないことがわかる。また、実測値で卓越する10Hz、20Hzでの振動成分について、Point-1、Point-2では、2自由度、6自由度振動系において実測値の約1.5倍程度と大きく、鉛直方向加速度応答の主たる振動成分については、9自由度振動系がより実測値に近い。これは、平面6自由度モデルに加えればね下およびばね下のローリング振動の影響ではないかと考えられる。ばね下ローリング振動の固有振動数は、その上下振動の固有振動数と比べて高いため、より橋梁の高い振動数領域に影響を与えると推測している。また、Point-1とPoint-2への影響が比較的大きく、Point-3への影響が小さいことについて、

Point-1はフリーな張り出し部で振動しやすく、Point-2は剛性の高い柱上にあるが、Point-3よりPoint-1に距離が近く影響を受けやすいのではないかと考えられる。さらに、Point-1の応答が下がる現象については、車両を立体的な振動系にモデル化することにより、荷重の分散効果があり、衝撃効果が緩和され、より現実に近づけるためと考えられる。

以上より、列車走行時の高架橋の鉛直方向の応答に着目した振動解析に用いる車両モデルとしては、100Hzまでの周波数領域を見ていく上では、ばね下を考慮したモデル(6自由度振動系、9自由度振動系)を用いるのがよいと考えられる。さらに、卓越する10Hz、20Hz付近の振動成分に着目するためには、ローリング振動を考慮できる立体9自由度車両モデルを用いることが望ましいといえる。

(3) 高架橋の加速度応答と卓越周波数

高架橋の加速度応答の傾向について、実測値ならびに最も実測値を表現しうると考える9自由度振動系の場合について考察する。Fig.6で示しているように、解析と実測で加速度波形は類似しており、フーリエスペクトルについても、実測値と同様に10Hz、20Hz付近に卓越振動数が見られ、本解析手法の妥当性が伺える。

前節で述べたように、Point-1>Point-2>Point-3の大小関係が見られる。しかし、詳細に見た場合、Point-1(張り出し構造部)での加速度応答は解析結果の方が大きく、最大値で約1.2倍、rms値で約1.3倍である。これは、隣接する高架橋の張り出し端部の境界条件として、解析ではレールのみで繋がっているのに対し、実際の高架橋では連続したバラストによる応力分散の影響によるものと考えられる。

また、柱上のPoint-2、3では、Point-1(張り出し構造部)と比べて60Hzから100Hz付近の高周波数の振動が相対的に大きいことが分かる。

4. 張り出し構造部補強による振動軽減対策

(1) 振動低減工の高架橋モデル

具体的な高架橋の振動軽減対策工をモデル化した事例¹⁹⁾について、提案する連成振動解析手法を適用して対策工の有効性を検討する。3.(3)節での検討により、高架橋の加速度応答はPoint-1(張り出し構造部)が大きくなっている。この振動特性に着目し、張り出し構造部を補強する場合について連成振動解析を行い、高架橋振動特性の改善効果について確認する。

対象とする高架橋モデルは、2.(3)節と同じ高架橋

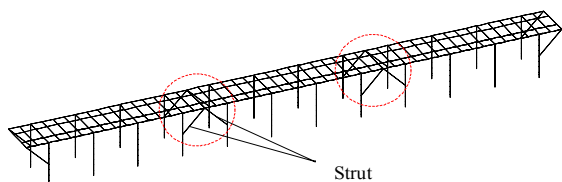


Fig. 7 Analytical model of bridge with strut

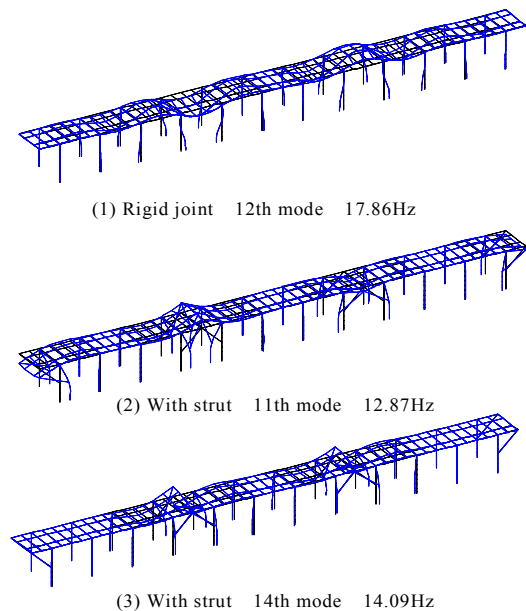


Fig.8 Natural mode shapes and frequencies of bridge

Table 5 Maximum acceleration of bridge (Gal)

	Point-1	Point-2	Point-3
Without reinforcement	279.4	78.3	44.9
Rigid joint	93.1	65.8	62.4
With strut	157.2	72.0	65.4

Table 6 rms value of bridge (Gal)

	Point-1	Point-2	Point-3
Without reinforcement	106.5	26.8	14.8
Rigid joint	24.5	14.5	17.0
With strut	55.4	20.1	16.6

とし、補強方法は、張出し構造部分を隣接する高架橋と剛結合する方法と、Fig.7に示すようにストラットで補強する方法との2ケースを考える。ストラット補強をする場合、補強材は橋脚と比べて約2分の1程度の剛性を持ったH型鋼と想定する。補強材と高架橋の接合条件は剛結合とする。レール踏面凹凸は2.(4)で示したものをを用いる。走行車両モデルは2.(2)で示す9自由度振動系モデルとする。車両走行速度は270km/hとする。

固有値解析結果のモード図をFig.8に示す。ストラット補強の場合、張出し構造部の鉛直方向の曲げの振動が卓越する振動数は12.87Hzで、補強しない場合と比べて振動数が約1Hz高くなっている。また、ねじり振動が卓越する振動数は14.09Hzである。剛結合の場合、張出し構造部の鉛直方向の曲げの振動が卓越する振動数は17.86Hzである。

(2) 張り出し構造部の補強効果

補強効果を確認するため補強前とストラット補強をする場合と剛結合をする場合の鉛直方向の加速度波形とフーリエスペクトルをFig.9に示す。張出し構造部を剛結合する場合、ストラットで補強する場合ともに加速度の振幅は小さくなっている。特に10Hzから30Hz付近の振幅が小さくなっている。加速度振幅最大値をTable 5にrms値をTable 6に示す。張出し構造部に近く影響を受けやすいPoint-2 (第1柱)では加速度振幅は小さくなっているが、Point-3(第3柱)では加速度振幅は補強前後であり変化がない。Point-2(第1柱)では加速度最大振幅は剛結合の場合約16%、ストラット補強の場合で約8%低減している。またrms値では剛結合の場合で46%、ストラット補強の場合で25%低減している。

このように、橋軸方向に張り出し構造を持つ高架橋では、張り出し構造部の剛性を高める補強を実施することで、高架橋の振動特性の改善効果が得られる。高架橋自体の振動特性が改善されることで、周辺への振動低減に繋がるものと考えられる。

(3) 具体的な対策事例の解析評価

本連成解析手法の適用例として、実際に現場施工された地盤振動対策工の低減効果を、提案する連成振動解析にて確認する。対象とする事例は、前節での議論と同様に高架橋の張り出し端部を補強する観点から、原らにより提案された対策工¹⁹⁾であり、Fig. 10に構造一般図を示す。

本事例の高架橋は、高架橋高さが6.3mと短い点、地盤および基礎条件が異なる点以外は、概ね前章から検討してきた高架橋と同様である。そのため、高架橋モデルは、Fig. 2の3ブロック高架橋モデルに対し、柱部材長、柱下端の地盤ばねを変更して用いる。地盤ばねの値をTable 7に示す。

また、対策工は、Fig. 10よりモデル化し、3ブロック高架橋モデルの中央ブロックと隣接ブロック間の張り出し部に設ける。なお、本対策工では高架橋の張り出し部と補強工の接合条件は、水平方向フリーの沓が設けられており、補強工の沓部に二重節点を用いてモデル化している。

5. 結論

高速鉄道高架橋の列車走行時の動的応答特性を解明するため、列車と高架橋との連成を考慮した三次元動的応答解析手法を構築し、実測値との比較により、その妥当性と有効性を実証した。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 立体高架橋モデルと列車モデルを用い、実高架橋における列車走行時の鉛直方向の振動特性を再現可能な列車と高架橋の連成を考慮した三次元動的応答解析手法を構築した。列車と高架橋の連成を考慮した鉄道高架橋の振動特性が解析的に評価可能となることから、今後の地盤振動の課題への取組みに本連成振動解析手法は有効な手法となると考える。

(2) 連成振動解析では、車両モデル自由度の違いにより高架橋の加速度応答に差異があり、鉄道高架橋の振動問題として、鉛直方向の加速度応答に着目した場合、立体でばね下も考慮する車両モデル（9自由度振動系モデル）を用いることで、最大値、rms値だけでなく、周波数領域での卓越する振動成分においても実測結果を表現しうる解析精度を得ることができる。

これらの車両の詳細な影響は、車両を一定の等価加振力で扱った場合には、表現しえない点である。言い換えると、高架橋の高次の振動は、車両・高架橋の連成の影響を受けるということであり、詳細な検討には、車両・高架橋の連成を考慮する必要性を示唆するものである。

(3) 連成振動解析の結果、橋軸方向に張り出し構造を持つ高架橋では、張出し構造部分が最も振動が大きくなる。また同じ柱上端の点であっても張出し構造部分に近い柱上端のほうが、中央付近の柱よりも大きな加速度等々を示す。これは、実測ならびに、既往の知見に合致する。

(4) 連成解析の有効性を示すため、高架橋の振動低減モデルの検討例を示した。連成振動解析により、張出し構造部分の剛性を高める補強を実施した場合、張出し部分の加速度応答は小さくなり、高架橋振動特性の改善効果が認められた。

(5) 原らにより提案された具体的な地盤振動低減対策の工事例の評価についても実施し、高架橋の振動特性が改善されることで、周辺への地盤振動低減効果を確認した。このことは、高架橋の張出し端部の振動を低減させる原らの提案する対策の有効性を支持するものである。

(6) 一方、本解析手法によれば、実測データに基づく等価的な加振力の設定も不要であり、仮想の車両条件や列車速度の場合など、実測ができない条件に

においても高架橋の振動特性を把握することが可能となる。したがって、本連成解析手法により、仮想の列車速度や構造物諸元、対策工等が与える高架橋の振動特性への影響評価が可能になる。

今後の研究課題として、連成解析により得られる高架橋の応答特性を地盤振動解析につなげ、周辺環境への影響評価へと発展させていきたいと考える。

参考文献

- 1) 原 恒雄：東海道新幹線の高速化技術発展の歴史，運輸と経済，(財)運輸調査局，第63巻，第12号，pp. 32-44，2003.12.
- 2) Seki, M., Inoue, Y. and Naganuma, Y.: Reduction of subgrade vibration and track maintenance for Tokaido Shinkansen, WCRR' 97, Vol. E, 1997.
- 3) 江島 淳：地盤振動と対策，pp. 146-154, 吉井書店，1979.6.
- 4) 吉岡 修：新幹線鉄道振動の発生・伝搬モデルとその防振対策法への応用，鉄道総研報告，特別第30号，1999.10.
- 5) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，土木学会論文報告集，No.256，pp. 35-47，1976.12.
- 6) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1074，1978.3.
- 7) 松浦章夫，涌井 一：2軸貨車の走行性から見た長大吊橋の折れ角限度，鉄道技術研究報告，No.1086，1978.7.
- 8) 涌井 一：新幹線車両の走行性から見た長大吊橋の折れ角限度，鉄道技術研究報告，No.1087，1978.7.
- 9) 涌井 一，松本信之，松浦章夫，田辺 誠：鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp. 129-138，1995.4.
- 10) Fryba, L.: Vibration of solids and structures under moving load, Noordhoff International, 1972.
- 11) Diana, G., Cheli, F. and Bruni, S.: Railway Runnability and Train-Track Interaction in Long Span Cable Supported Bridges, *Advances in structural dynamics*, Vol. 1, pp. 43-54. Elsevier Science Ltd., 2000.
- 12) Xia, H., G. Roeck, D., Zhang, H. R. and Zhang, N.: Dynamic Analysis of Train-Bridge system and Its Application in Steel Girder Reinforcement, *Computers and Structures*, Vol. 79, pp. 1851-1860, 2001.
- 13) 山田善一，小堀為雄：活荷重に対する道路橋の動的応答－衝撃係数－に関する考察，土木学会論文報告集，No.148号，pp. 40-50，1967.12.
- 14) 本田秀行，小堀為雄，山田善一：多径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数に関する考察，土木学会論文報告集，No.331，pp. 65-73，1983.3.
- 15) 本田秀行，小堀為雄，山田善一：道路鋼桁橋の走行荷重による動的影響評価，土木学会論文集，No.350/I-2，pp. 359-362，1984.10.

- 16) 川谷充郎, 小松定夫, 佐々木 孝: 走行自動車荷重を受けるプレートガーダー橋の動的応答特性に関する研究, 土木学会論文集, No.392/I-9, pp. 351-358, 1988.4.
- 17) 川谷充郎, 西山誠治: 路面凹凸を考慮した道路橋の走行車両による動的応答特性, 構造工学論文集, Vol.39A, pp. 733-740, 1993.3.
- 18) 川谷充郎, 山田靖則, 嶽下裕一: 三次元車両モデルによる桁橋の動的応答解析, 土木学会論文集, No.584/I-42, pp. 79-86, 1998.1.
- 19) 原 恒雄, 吉岡 修, 神田 仁, 舟橋秀麿, 根岸 裕, 藤野陽三, 吉田一博: 新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高架橋補強工の開発, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp. 325-338, 2004.7.
- 20) 吉田幸司, 関 雅樹: RCラーメン高架橋の柱剛性向上による鉄道振動への影響, 構造工学論文集, Vol. 50A, pp. 403-412, 2004.3.
- 21) 川谷充郎, 関 雅樹, 西山誠治, 白神 亮, 神薗卓海, 西村宣男: 高速鉄道高架橋の張出し構造補強による振動軽減対策, 土木学会56回年次学術講演会講演概要集, I-A165, 2001.10.
- 22) 橋梁振動研究会編: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993.10.
- 23) Kawatani, M., Kobayashi, Y. and Kawaki, H.: Influence of Elastomeric Bearings on Traffic-Induced Vibration of Highway Bridges, Transportation Research Record, No.1696, Vol.2, pp. 76-82, 2000 (5th International Bridge Engineering Conference, Tampa, USA, April 3-5, 2000).
- 24) 川谷充郎, 関 雅樹, 西山誠治, 白神 亮, 神薗卓海, 西村宣男: 高速鉄道高架橋の交通振動解析に及ぼす車両モデルの影響, 土木学会57回年次学術講演会講演概要集, I-553, 2002.9.
- 25) 日本機械学会編: 鉄道車両のダイナミクスー最新の台車テクノロジー, 電気車研究会, 1994.12.
- 26) 庄司朋宏, 伊藤裕一, 関 雅樹: 高速列車の輪重分布と鋼桁部材の発生応力分布における研究, 土木学会59回年次学術講演会講演概要集, I-078, 2004.9.
- 27) 鷺津久一郎, 宮本 博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠彦 共著: 有限要素法ハンドブック, I 基礎編, 培風館, 1981.
- 28) 鷺津久一郎, 宮本 博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠彦 共著: 有限要素法ハンドブック, II 応用編, 培風館, 1981.
- 29) 小堀為雄, 久保雅邦: 弾性節点・弾性支点を有する連続桁橋の汎用的な動的解析法, 土木学会論文集, No. 356/I-3, pp. 395-403, 1985.4.
- 30) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物・抗土圧構造物), 丸善, 1997.3.
- 31) 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価手法の研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.9, 1990.9.
- 32) Agabein, M. E.: The Effect of Various Damping Assumptions on the Dynamic Response of Structure, Bulletin of International Institute of Seismology and Earthquake Eng., Vol. 8, pp. 217-236, 1971.
- 33) 鬼頭 誠, 西村昭彦: 高架橋の振動試験, 構造物設計資料, No. 35, pp. 33-36, 1973. 9.

(2005. 3. 31 受付)

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF ELEVATED RAILWAY BRIDGES DUE TO SHINKANSEN TRAINS

Mitsuo KAWATANI, Xingwen HE, Ryo SHIRAGA, Masaki SEKI,
Seiji NISHIYAMA and Koji YOSHIDA

The dynamic characteristics of elevated bridges due to Shinkansen trains are investigated by means of three-dimensional dynamic analysis, considering the train-bridge interaction. Trains modeled as two-, six-, and nine-degree-of-freedom dynamic systems are adopted as analytical models and the influences of different train models are examined to find the rational one. Analytical results are compared with experimental ones to demonstrate the validity of the analytical procedure. The vibration characteristics of the bridge are evaluated according to the analytical results. As an application of this analytical procedure, countermeasures to reduce the undesirable vibration are proposed and examined.