

# 論文 走行車両の振動を用いた鉄道構造物の振動特性測定と再現解析

平林 雅也\*1・小林 薫\*2

**要旨：** 走行する鉄道車両の振動を用いて直接基礎形式の橋脚の振動特性測定を実施した。その結果、同じ構造物でも測定ごとに減衰定数にばらつきが生じ、直接基礎形式の橋脚では減衰定数が0.5～5%程度となった。既往の研究等により構造物の高さと振動数の関係や、減衰定数と振動数の関係があることが示されているが、このたびの測定結果からそれらの傾向は現れなかった。また、地盤と構造物の連成モデルにおいて、列車走行解析を行い、構造物のみの減衰定数を2.5%としたときに、測定と解析の振動波形を概ね一致させることができた。

**キーワード：** 振動特性, 減衰定数, 振動数, 解析, 有限要素法

## 1. はじめに

ラーメン高架橋や橋梁のような構造物において、振動特性である卓越振動数や減衰定数は、地震時の構造物挙動評価や走行安全性評価を支配するパラメータである。

振動測定には、不平衡型起振機により発生した振動や、振動可搬式の重錘を衝撃させて発生した振動、微小外乱により生じる常時微動を用いる方法がある<sup>1,2)</sup>。測定した振動波形のフーリエスペクトルを分析することで振動特性を推定している。しかしながら、起振機の使用には多くの費用と時間を要することや、設置できる場所が限られる。

耐震設計における応答スペクトルなどでは、通常5%の減衰定数を用いられている<sup>3,4)</sup>。しかしながら、減衰定数は材料非線形性の影響により、構造物ごとに異なる値を示す。実構造物の減衰定数が小さい場合、構造物の応答値が大きくなる。

また、地震時の構造物の動的挙動を把握するために、地盤と構造物を一体とした解析モデルによる精度のよいシミュレーションを行う方法がある。解析では実験で実施が困難な条件や、再現性の高いメリットがある一方、振動試験の測定データと比較し解析モデルの妥当性を検証する必要がある。

以上の背景から、より大きな外力による振動特性を把握することを目的として、鉄筋コンクリート製の橋脚とラーメン高架橋を対象とした、走行車両を用いた振動測定を実施した。列車走行振動と非接触式のレーザードップラー速度計 (Laser Doppler Vibrometer, 以下LDVと称す)を用いることで、起振機の使用を省略するとともに、測定対象への測定装置の取り付けを不要とし、測定による費用と時間を低減することができる。

さらに、3次元有限要素法解析を実施して、測定結果と比較した。モデルは地盤と構造物の全体系モデルとした。これは、全体系モデルにすることで初期減衰や連成

による減衰を適切に評価できると考えたためである。

## 2. 測定手法

### 2.1 対象構造物

測定対象構造物は、壁式橋脚直接基礎の鉄筋コンクリート製鉄道高架橋とした。測定対象の概要を表-1に示す。また、D橋を例として一般図を図-1に示す。

表-1 測定対象一覧

橋梁名	測定回数	橋脚高さ(m) (フーチング天端～桁座)	基礎形式
A	5	6.79	直接基礎
B	4	6.00	
C	3	7.00	
D	4	8.00	

### 2.2 測定手法

線路直角方向の卓越振動数と減衰定数の振動特性の測定を対象とした。

計測装置として図-2の形状をしたLDV<sup>6)</sup>を用いた。数m～数十m程度離れた場所からの構造物振動測定が可能である。速度の検出原理は、測定対象にレーザーを照射してその反射光を受光し、ドップラー効果による周波数変化を用いるものである。このレーザー式速度計は、測定器内部に加速度計を有しており、測定器自体の振動履歴を加速度の積分により求めている。レーザーで測定した対象構造物と測定器間の相対的な速度履歴から、測定器の速度履歴を引いて対象構造物の速度履歴が算定できる。また、測定器内部に傾斜計を有しており、任意の角度に傾斜させて測定した場合でも、対称構造物の水平方向または鉛直方法の速度履歴に補正することができる。

速度計の設置場所は図-3に示すように、構造物から5m以上離れた箇所とし、構造物の振動の影響を受けにくいようにした。測定点は、ラーメン高架橋の場合はラーメンの中央径間付近の柱の上部とし、壁振動測定は天端付近とした。これは天端付近の大きい測定値を得られ

\*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 研究員 修士 (工学) (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主幹研究員 博士 (工学) (正会員)

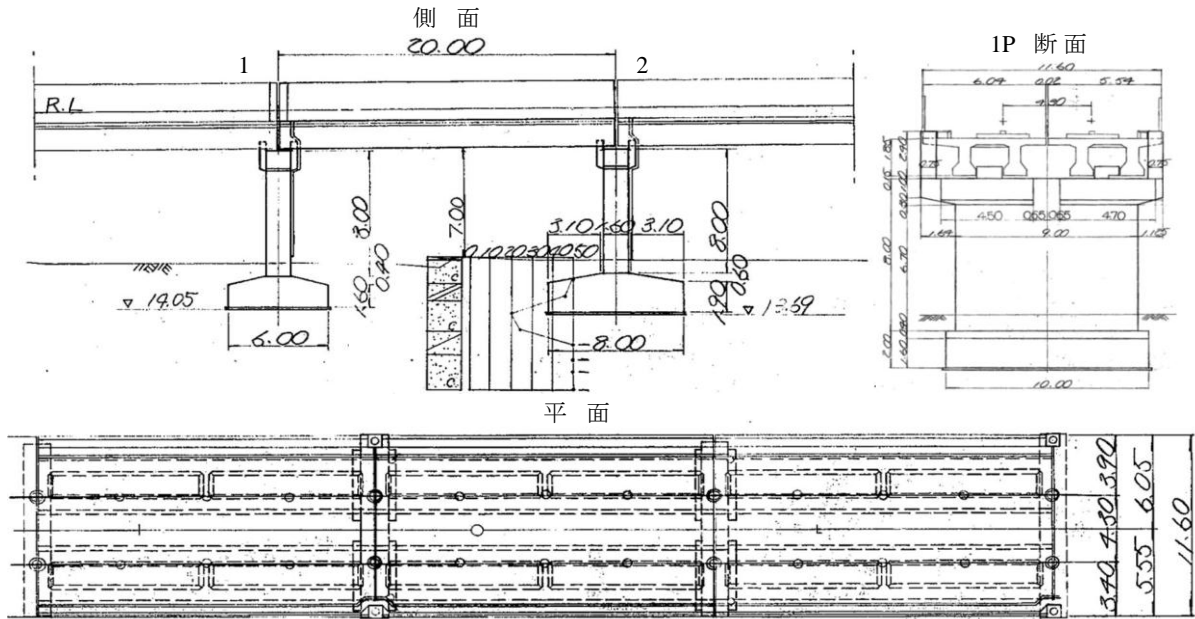


図-1 対象構造物の一般図の例 (D橋)



図-2 LDV 外観

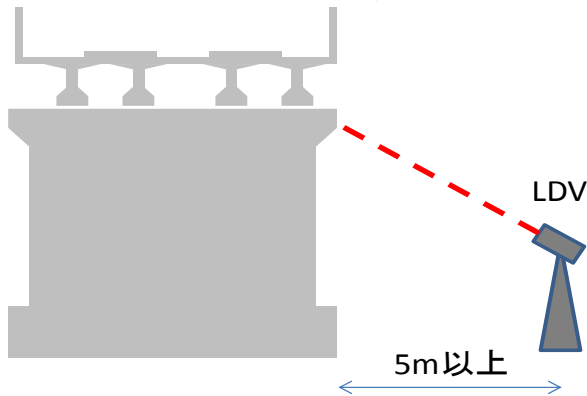


図-3 測定概要

るようにするためである。測定点には、レーザー照射される箇所に反射シールを梯子または高所作業車により貼りつけた。

測定対象は、測定箇所の列車通過振動とし、通過前から通過後 10 秒以上を 500Hz で測定した。測定データから測定後列車通過後の自由振動波形を抽出して分析することとした。通過列車の車両形式や速度などでばらつきと想定されるため、構造物ごとに複数回測定している。

本研究では、梯子や高所作業車により照射箇所にシールを貼りつけたが、棒などを使ってシールを貼りつける

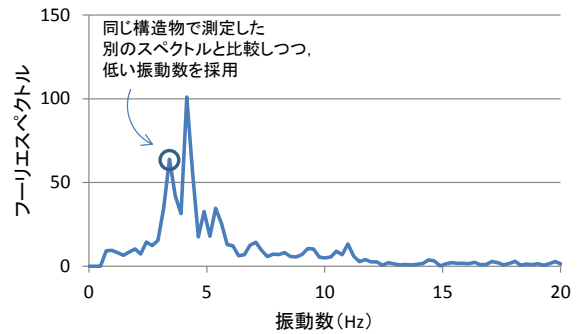


図-4 一次固有振動モードの振動数の同定

工夫をすることにより、地上からの取り付けが可能となるので、従来の橋梁への加速度計等の測定装置を取り付けが不要となり、準備の費用や時間が低減できる。また、この方法は、計測器取り付けによる構造物への軽微な損傷や、作業員の構造物への不用意な接近を避けることができる。

### 3. 測定結果

#### 3.1 一次固有振動モードの振動数と減衰定数の同定

一次固有振動モードは、列車通過後の測定波形に高速フーリエ変換より作成したフーリエスペクトルより、卓越する振動数を採用することを基本とした。ここで、スペクトルにおいて、図-4 に示すような二つ以上の卓越振動数がある場合は、一次固有モードが 1 質点系の単振動の挙動に近いことから、振動数の小さい値を採用することを基本とした。ただし、同一構造物を複数回測定した結果、振動数が大きく異なる場合は、それぞれのスペクトルを比較してお互いに近いと判断される振動数を設定している。

減衰定数は、減衰振動方程式を測定された自由振動波形の減衰曲線にフィッティングする方法と、測定波形の

フーリエスペクトルを用いたハーフパワー法の2種類により推定した。前者は、測定波形のプラス側とマイナス側それぞれにおいて、適当な測定点を結ぶ包絡線により減衰曲線を指数関数でフィッティングし、自然対数 $e$ の乗数 $c$ が角振動数 $\omega$ と減衰定数 $h$ の積であることから、推定される1次固有モードの振動数から式(1)を用いて算定する方法である。

$$h = -\frac{c}{\omega} = -\frac{c}{2\pi f} \quad (1)$$

ここに、 $h$ ：減衰定数

$c$ ：減衰曲線における $e$ の乗数

$\omega$ ：角振動数

$f$ ：一次固有振動モードの固有振動数

測定した波形は、多くの振動モードを有している可能性がある。特に振動数の近いモードが存在する場合、うなりが発生する。うなりを簡単に示すため、図-5に、振動数が近く、等しい振幅および減衰曲線を持つ正弦波を足し合わせた例を示す。2つの波の減衰曲線を足し合わせると、うなりの最大値の減衰の包絡線と概ね一致することがわかる。そのため、うなりが発生していると見られる測定波形については、うなりの最大値と考えられる各点を用い、最小二乗法を用いた指数関数の近似曲線により減衰の包絡線を作成した。

ハーフパワー法については、推定した一次固有振動モードの固有振動数を用い、フーリエスペクトルから式(2)により算定した。

$$h = \frac{f_u - f_d}{2f_c} \quad (2)$$

ここに、 $f_c$ ：一次固有振動モードの固有振動数

$f_u$ ： $f_c$ のスペクトル値を $\sqrt{2}$ で除した値となる、

$f_c$ に最も近い固有振動数で $f_c$ より高い方の値

$f_d$ ： $f_c$ のスペクトル値を $\sqrt{2}$ で除した値となる、

$f_c$ に最も近い固有振動数で $f_c$ より低い方の値

### 3.2 同定結果

図-6に速度の時刻歴の測定全体、抽出波形、検討に用いた修正波形の一例を示す。測定結果や既往の研究<sup>7)</sup>より、構造物の一次固有振動モードの周波数は1~10Hzの間と想定される。測定したデータの波形は、高い周波

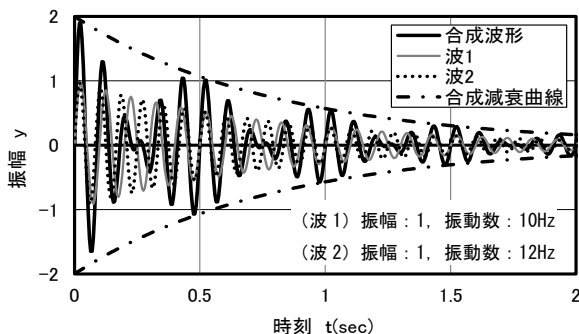


図-5 減衰波形の合成例

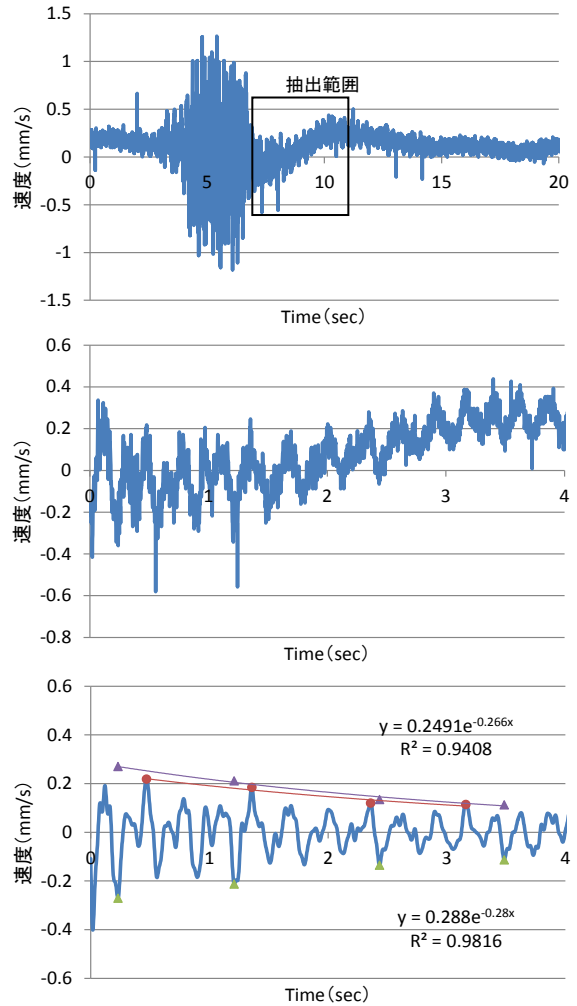


図-6 速度履歴：測定（上）、抽出（中）、修正（下）

数により波の一部がパルス波のような形状で大きく立ち上がっている箇所があることや、基軸がずれていること、1Hz以下の長周期成分が含まれてしまい全体的にうねりが生じていることがある。それらの影響を削除するために0.5~30Hzのバンドパスフィルタを用いて高周波成分や長周期成分を削除した。長周期成分と見なせる波形の基線ずれもこの方法を用いることで修正している。

測定データより3.1の方法を用いて振動数、減衰定数を求めた結果を表-2に示す。減衰定数は0.5~5%程度に分布し、同じ構造物を測定した場合でも、振動数、減衰定数ともにばらつきがでることが確認できる。図-7に同定した構造物の一次固有振動モードの振動数と構造物高さの関係を示す。既往の研究<sup>7)</sup>では、高さが大きいほど、弾性固有振動数が小さくなる傾向があるが、このたびの測定結果においてもバラつきが大きいと同様の傾向が見られる。振動数においては算定した振動数の平均値に対するバラつきは20%以内となった。これは、走行した列車の車種や速度が異なるためだと考えられる。振動数の分布においては、既往の研究<sup>7)</sup>では1.5~5.0Hzの間であり、多くが2Hz以上にあったことに対し、本研究では3.0~7.0Hzの間で、多くが5Hz付近に分布しているため、

比較的大きな値を示す傾向となった。既往の研究は杭基礎、本測定対象は直接基礎である。直接基礎の比較的固い地盤によって相対的な剛性が高くなり、振動数が比較的高い値となったと考えられる。また、

波形より減衰曲線を設定し求めた減衰定数について、構造物高さ減衰定数の関係を図-8に、固有周期と減衰定数の関係を図-9に示す。それぞれに傾向はみられない結果となった。設計標準等<sup>35)</sup>では、減衰定数と固有周期の間に反比例関係が示されているが、その傾向もみられなかった。

図-10に測定波形を自由振動波形の減衰曲線にフィッティングさせる方法により求めた減衰定数と、フーリエスペクトルを用いたハーフパワー法により求めた減衰定数の関係を示す。ハーフパワー法により求めた減衰定数の方が比較的大きな値を示す傾向にあることがわかった。これは、多くの振動数を有する構造物の振動波形から求めたフーリエスペクトルには、一次振動モードの固有振動数の頂点から広がりを持ったスペクトル形状になる傾向にあり、 $f_u$ と $f_a$ の間の幅が大きくなり、裾野の広がった山形を描くので、ハーフパワー法により求まる $h$ が大きくなるのが原因だと考えられる。

#### 4. 解析

##### 4.1 解析モデル

列車走行による振動の解析的に再現するため、ここではD橋を図-11に示すような解析モデルを3次元有限要素法により橋梁および地盤をモデル化した。全体をモデルにしたのは、初期減衰や地盤と構造物の連成挙動による減衰が評価できるためだと考えられるためである。ここで、モデル化していない部材（路盤コンクリート、軌きょう、ダクト、高欄）の荷重は、軌道中心に分布荷重として与えている。地盤のサイズは、橋脚フーチングの幅・奥行の10倍程度とし、基盤より10m深くした。

各箇所諸元を表-3に示す。地盤のデータは、ボーリングによる地盤材料とN値のみであったため、地盤材

表-2 測定結果

橋脚高さ(m)	測定No.	振動数(Hz)	平均値との差(%)	周期(sec)	減衰定数(%)		
					+側	-側	ハーフパワー法
A橋	A-1	5.13	0.89	0.20	1.85	1.47	4.01
	A-2	5.37	3.75	0.19	2.40	2.02	2.14
	A-3	4.88	5.72	0.20	0.61	0.46	2.97
	A-4	5.37	3.75	0.10	2.12	1.56	3.30
	A-5	5.13	0.89	0.20	1.59	1.07	4.84
B橋	B-1	3.91	11.04	0.26	2.05	1.78	3.98
	B-2	4.88	11.04	0.20	0.77	1.16	2.27
	B-3	3.66	16.72	0.27	2.32	2.59	5.91
	B-4	5.13	16.72	0.20	1.47	1.24	2.22
C橋	C-1	6.1	3.98	0.16	3.22	2.81	4.42
	C-2	6.13	4.49	0.20	4.83	5.09	6.43
	C-3	5.37	8.47	0.19	3.98	3.58	5.45
D橋	D-1	3.91	8.54	0.26	1.28	1.29	4.06
	D-2	2.93	18.67	0.34	4.07	3.00	8.84
	D-3	3.66	1.60	0.27	2.28	1.81	6.75
	D-4	3.91	8.54	0.26	1.25	1.05	4.17

料を中砂と決めた上で、鉄道構造物設計標準および道路橋示方書より各種数値を準用した。

せん断波速度  $V_s$  およびせん断剛性  $G$  の算定については、以下の式を用いている。

$$V_s = 80 \times N^{1/3} \quad (N \geq 2) \quad (3)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

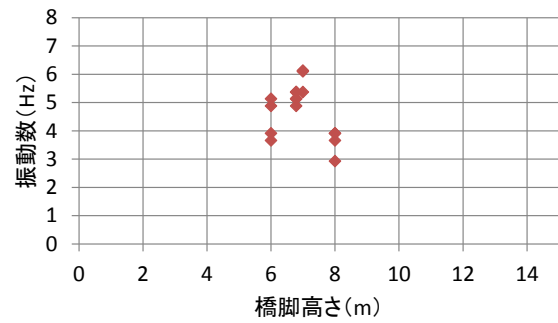


図-7 橋脚高さ と 振動数の関係

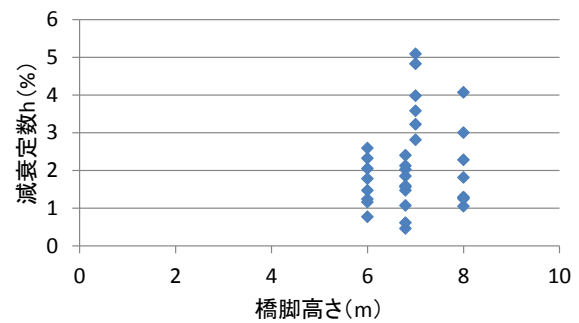


図-8 橋脚高さ と 減衰定数の関係

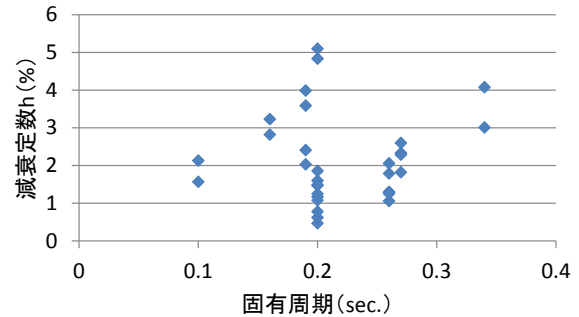


図-9 固有周期 と 減衰定数の関係

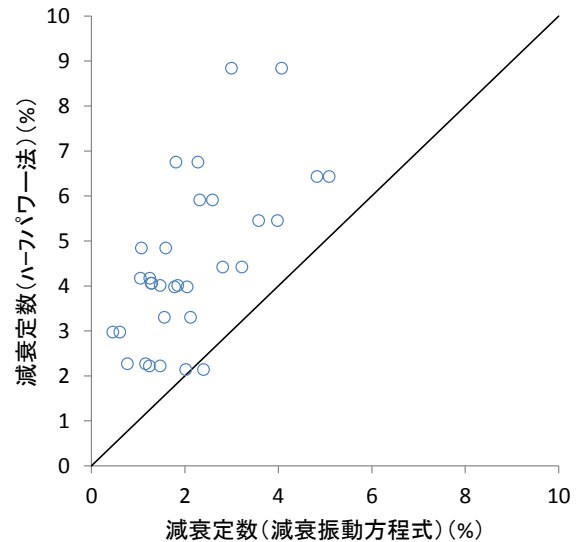


図-10 算定法の違いによる減衰定数の比較

地盤の変形履歴には鉄道構造物設計標準にも記載されている GHE-S モデル<sup>8)</sup>を用いており、せん断ひずみの大きさにより、紡錘型とスリップ型の変形履歴を描く材料特性を有し、振動での地盤の変形履歴による減衰を再現するためである。GHE-S モデルの各種パラメータは表-4 に示す通りとし、詳細は参考資料 8)を参照とする。平均粒径 D50 として、安田らの式<sup>9)</sup>により、せん断ひずみ  $\gamma$  と剛性低下率  $G/G_0$  の関係および、せん断ひずみと減衰定数  $h$  の関係を求めた上で、各種係数を設定している。

構造物の要素に剛性比例減衰を設定し、直接基礎下面を固定とした場合の固有値解析により減衰定数が 5% となるように設定した。

境界条件は、地盤モデル周囲の反射を防ぐために粘性境界を設定し、桁の端部には橋軸方向の移動拘束を設定することで、半分の桁のモデルで疑似的に桁全体をモデル化している。

この橋脚には固定沓の桁と可動沓の桁が乗っているため、固定沓は沓の接地面積を要素で再現して、橋脚と桁を一体化している。可動沓は、桁と沓の間にバイリニアのバネ境界を設定し、静止摩擦係数 0.2 を設定している。

その後各種パラメータを変更し、測定結果と比較した。

#### 4.2 解析条件

解析条件は次の通りとした。なお、列車が桁を通過した後の振動が再現できればいいので、橋脚にかかる 2 つの桁長の合計より長い編成数にすることとし、実際より少ない 3 両編成としている。

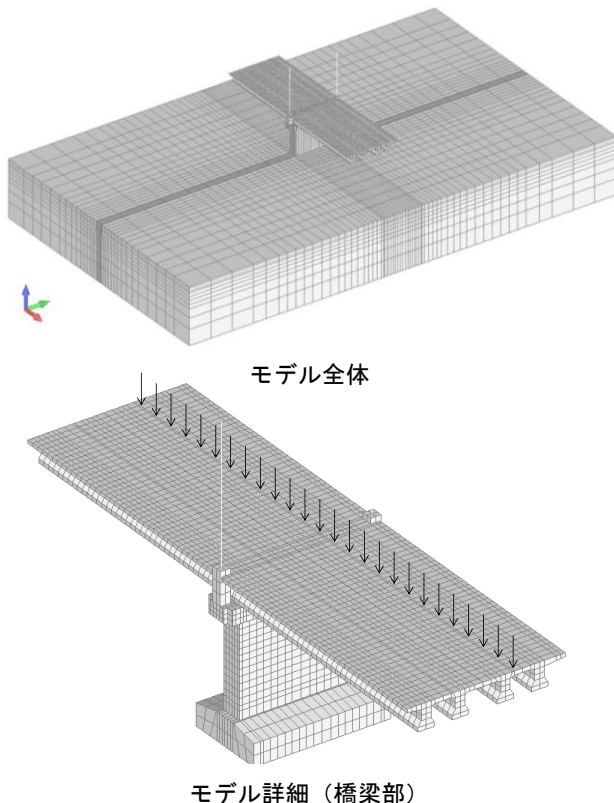


図-11 解析モデル

- ・直接積分法による時刻歴応答解析
- ・走行履歴を軌道中心へ入力(図-11 矢印上の接点)
  - 速度: 275km/h
  - 編成数: 3 両
  - 荷重: 110kN/軸
- ・積分間隔  $2.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  秒

走行履歴を抜粋したものが図-12 となる。載荷点が接点と接点の間である場合は、接点からの距離で按分した。

#### 4.3 解析結果

走行解析を行った速度の時刻歴を図-13 に示す。これは、基礎固定による固有値解析により構造物のみの減衰定数が 5% となるモデルに対し、地盤と構造物の連成モデルで解析した結果である。この波形の振動数と減衰定数は、図-14 に示す D-2 の測定結果に最も近くなった。ただし、一次振動モードの振動数は一致しているが、解析の減衰定数が 5.85~6.12% であることにに対し、測定における 3.00~4.07% であるため、解析モデルの減衰定数が大きくなっている。そのため、解析モデルにおける構造物のみの減衰定数を変更して解析した。解析結果を図-15 に示す。構造物のみの減衰定数の増減と、全体系モデルの減衰定数の増減の傾向が同様となり、固有振動数に大きな変化は見られなかった。ここで、構造物のみの

表-3 各種材料の諸元

【コンクリート(弾性体)】

単位 体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比	ヤング率 (kN/m <sup>2</sup> )
24.5	0.16667	2.56E+07

【地盤(GHE-Sモデル)】

	深さ (m)	層厚 (m)	種類	N値	単位 体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波 速度 (m/sec)	ポアソン 比	せん断 剛性 (kN/m <sup>2</sup> )
1	-0.35	0.35	砂	22	18	224	0.45	92.200
2	-3.95	3.60	砂:水中	22	20	224	0.49	102.000
3	-4.90	0.95	砂:水中	24	20	231	0.49	109.000
4	-13.00	8.10	砂:水中	50	20	295	0.49	178.000

表-4 基準ひずみおよび GHE-S パラメータ<sup>8)</sup>

$\gamma_r$	$\gamma_{ri}$	C1(0)	C1( $\infty$ )	C2(0)	C2( $\infty$ )
7.37E-04	7.37E-05	1	0.9	0.25	2.5
$\alpha$	$\beta$	hmax	k	$\gamma_0$	Gmin/Gmax
3.202	2.227	0.25	1.1	0.0006	0.18

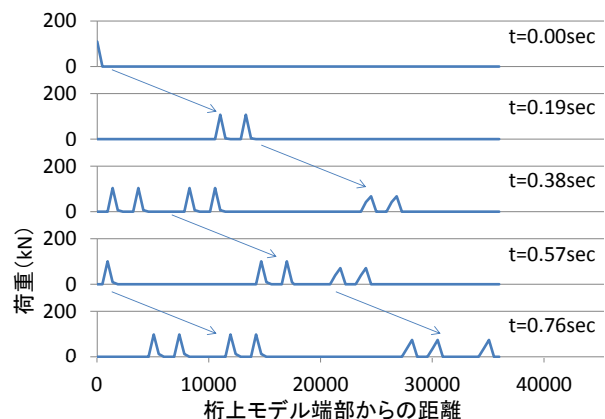


図-12 走行解析における載荷履歴の抜粋

減衰定数を 2.5%としたときに、振動数 2.93Hz と減衰定数 4.06%となり測定結果と一致する結果となった。このときの波形と D-2 の測定波形は、それぞれが線路直角方向の速度波形であるものの、波形測定の違いなどが原因と考えられる最大値の差異が生じているため、最大値で割ることで正規化して、重ね合わせることで比較をした(図-16)。これより波形は概ね一致することがわかり、減衰定数を 2.5%としたときに、1 次の固有振動数ならびに減衰定数の値が実構造物と一致した。

## 5. まとめ

走行車両の振動を用いることで振動特性を測定し、地盤と構造物の連成解析を実施した。その結果を以下にまとめる。

- ・ 同じ構造物でも測定ごとに減衰定数にばらつきが生じた。
- ・ このたび測定した直接基礎形式の橋脚では、減衰定数が 0.5~5%程度となった。
- ・ 既往の研究等では、構造物の高さと振動数の関係や、減衰定数と振動数の関係が示されているが、このたびの測定結果から同様の傾向が見られなかった。
- ・ 地盤と構造物の連成モデルにおいて、構造物のみの減衰定数を 2.5%と設定し、列車走行解析を行うことで、測定と解析の振動波形を概ね一致させることができた。

## 参考文献

- 1) 西村昭彦：衝撃振動試験による基礎構造物の健全度診断，第 8 回日本地震工学シンポジウム，pp.2163-2168, 1990
- 2) 小坪清真，島野 清：常時微動測定による構造物の振動性状解析，土木学会論文報告集，No.222，pp.25-35, 1974
- 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，丸善，2012.9
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説，2013.7
- 5) 齊藤正人，西村昭彦：逸散減衰効果を考慮した所要降伏震度スペクトルに与える減衰定数についての研究，土木学会第 54 回年次学術講演会，pp.822-823, 1999.9
- 6) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドブラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21, No.12, pp.17-22, 2007
- 7) 徳永宗正，曾我部正道，上半文昭，谷村幸裕，室野剛隆，小野潔：常時微動による鉄道構造物の等価固

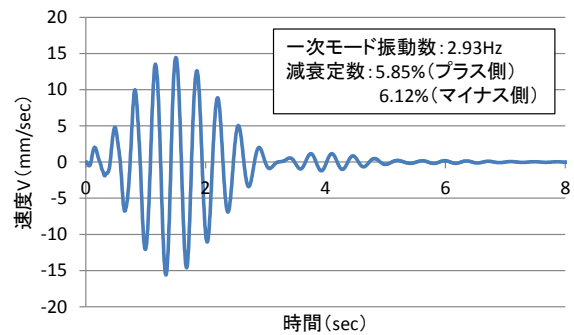


図-13 解析波形

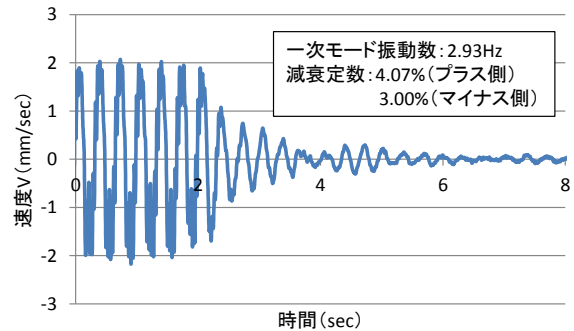


図-14 測定波形 (D-2)

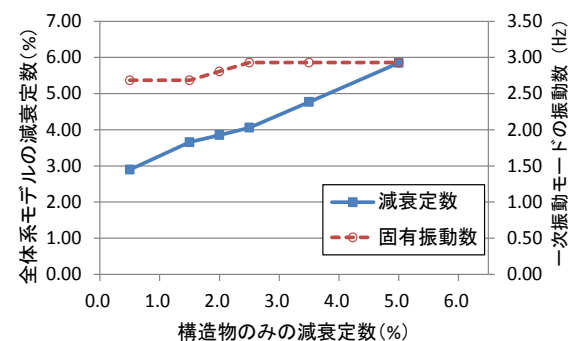


図-15 構造物だけのモデルでの減衰定数と全体系モデルでの減衰定数，振動数の関係

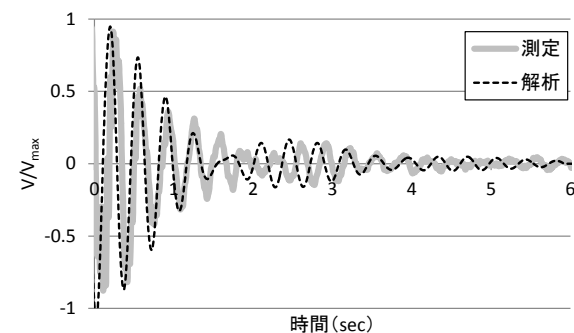


図-16 振動波形の比較

有周期推定手法，鉄道総研報告，Vol.25, No.6, pp.35-40, 2011

- 8) 室野剛隆，野上雄太，田上和也，坂井公俊：GHE-Sモデルによる土の動的非線形挙動の評価方法，鉄道総研報告，Vol.25, No.9, 2011
- 9) 安田 進，山口 勇：種々の不攪乱土における動的変形特性，第 20 回土質工学研究発表会，pp.539-542, 1985