# 減衰定数に着目した地震時の車両走行性に 関する要注意構造物の簡易抽出法

和田		<sup>む<sup>1</sup>・飯田</sup>	浩平 <sup>2</sup> •	豊岡	亮洋3	・室野	剛隆4
l正会員	(公財)	鉄道総合技術 (〒185-8:	F研究所 銷 540 東京都国	跌道地震 国分寺市	工学研究 光町2-8-3	センター 8)	地震応答制御
2非会員	(公財)	E-mai 鉄道総合技術 (〒185-8:	l:wada.kazu 脣研究所 540 東京都国	nori.73@ 跌道地震 国分寺市	ertri.or.jp 工学研究 光町2-8-3	センター 88)	地震応答制御
3正会員	(公財)	E-ma 鉄道総合技術 (〒185-8:	uil: iida.kohe 际研究所  銷 540 東京都国	i.89@rtr 跌道地震 国分寺市	i.or.jp 工学研究 光町2-8-3	センター 38)	地震応答制御
4正会員		E-mail: toyooka.akihiro.58@rtri.or.jp (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)					
E-mail:murono@rtri.or.jp							

鉄道高架橋・橋梁の減衰定数は、計測事例が少なく未解明な点が多いため、車両の走行性は、 一般的な値(5%)で評価している.しかし、減衰定数が小さい場合は、車両の走行性が相対的 に低下する.著者らはこれまで多数の鉄道橋梁・高架橋で常時微動観測を実施し、減衰定数を 評価してきた.本稿では、この結果を分析し、構造物と地盤の周期比を用いて減衰定数を簡易 に推定する式を提案する.また、減衰定数の大小が車両の応答に及ぼす影響を地震応答解析お よび車両運動解析から評価し、提案した減衰定数の推定式を適用することで、車両の走行安全 性の観点から地震時に注意を要する箇所を抽出する方法を提案する.

Key Words : damping constant, railway viaduct and bridge, natural period, running safety

## 1. はじめに

地震時の構造物の振動特性の中で,減衰特性は発 生メカニズムが複雑であることや,実測事例が少な いため,未解明な点が多い.本研究において減衰特 性とは構造物一地盤系が地震時に主要と思われる振 動モードにおいて発揮される減衰定数(以下,減衰 定数)を対象としている.実橋梁の減衰定数の評価 としては,横浜ベイブリッジやレインボーブリッジ といった長大橋梁に対して,地震観測記録に基づき モード減衰定数を評価した例<sup>1)-3)</sup>があるが,それら は個別具体的な評価事例であり,減衰定数の一般的 な特性を議論するものではない.また,多数の実橋 梁に対する減衰定数の評価としては,実測結果を統 計的に整理した例<sup>4)-10)</sup>があるが,減衰定数の測定方 法が個々で異なっていることや,構造物の種類が多 岐に渡っているのに対して標本数が多くないことか ら、減衰定数の評価方法を確立するまでには至って いない.

このような背景から,鉄道構造物における車両の 走行性を確認する場合には,一般的と思われる条件 での減衰定数(5%)を設定しており<sup>11)</sup>,減衰定数が これよりも小さい場合,地震時に小さな入力でもよ り大きく増幅し,車両の走行性が脅かされる可能性 が相対的に高くなる.鉄道システムは線上に多数の 構造物が並ぶため,その中から地震時に特に注意を 要する可能性がある減衰定数の小さな構造物を抽出 することは重要である.

そこで,著者らは構造型式や地盤条件の異なる多数の鉄道橋梁・高架橋(RC造)について,常時微動観測<sup>12)</sup>を実施し,減衰定数と構造条件・地盤条件の関係性を分析した.その結果,算定した減衰定数



図-1 常時微動観測による構造物の振動特性評価の概要



図-2 常時微動観測を実施した構造物例

から地盤の変形のしやすさと発揮される減衰定数に 正の相関があることを見出した<sup>13)</sup>.

本研究では、この検討結果を踏まえ、構造物と地 盤の周期比を用いて減衰定数を簡易に推定する方法 を提案する.また、減衰定数の大小が車両の応答に 及ぼす影響を地震応答解析および車両運動解析から 評価し、提案した減衰定数の推定式を適用すること で、車両の走行安全性の観点から地震時に注意を要 する箇所を抽出する方法を提案する.

## 2. 常時微動観測に基づく減衰定数評価の概要

まず,著者らがこれまで実施してきた常時微動観 測に基づく減衰定数評価<sup>13)</sup>の概要を述べる.

#### (1) 観測方法および減衰定数の算定方法

図-1 に常時微動観測に基づく減衰定数の算定方法 を示す.構造物の上部と自然地盤に微動計(株式会 社 ANET の CR4.5-2S)を設置し,200Hz サンプリン グで 20 分間の観測を実施することで,自然地盤の 振動(*z*(*t*))とそれに対する構造物の応答(*x*(*t*))の 時刻歴データを取得した.

次に,観測記録をフーリエ変換し,自然地盤 (z(f))に対する構造物上部(x(f))のフーリエ振幅 比 x(f)/z(f),すなわち自然地盤の振動に対する構造 物の振動の周波数応答関数を算定した.このとき, 構造物の応答の観測記録には,車両通過などに起因 する常時微動ではない振動成分が含まれる場合もあ る.そこで,観測記録を 20.48 秒(4096 個のデー タ)ごとに分割して,常時微動ではない振動成分を 含む時間帯は除いた各時間帯での周波数応答関数を 算定する.そして,各時間帯で算定された周波数応 答関数の平均値(図-1の実線)を観測記録の整理結 果とした.

ここで,鉄道構造物の地震時の主要な振動が,周 波数応答関数の1次の卓越振動数で発揮され,その 挙動は構造物全体が一体で動く1自由度系のような 振る舞いをすることを衝撃振動試験<sup>14</sup>に基づく振動



図-3 構造物上下部の振幅比 a の算出

形状の分析から別途確認している<sup>13)</sup>.これは,先述 の手順で整理した周波数応答関数の1次の卓越振動 数付近が,1自由度系の周波数応答関数の理論解 (伝達関数*H*(*f*))で評価できることを意味する.

そこで、観測記録との残差を最小とするように 1 自由度系の伝達関数をフィッティングさせる(図-1 の点線)ことで、構造物の減衰定数 h,固有振動数  $f_0$ を評価することができる(カーブフィット法  $^{15}$ ).

## (2) 観測対象の構造物

地盤条件や構造型式が多様な136箇所の構造物で 計測を実施した.各構造型式の一例を図-2に示す. 図中のG1~G7の凡例は,耐震設計標準<sup>16)</sup>で定めら れている地盤種別を意味する.

#### (3) 減衰定数の算定結果

図-3に示すように構造物の上部と下部について, 構造物一地盤系の1次の固有振動数でのフーリエ振 幅スペクトルの比α(以下,振幅比α)を定義する. ここで,構造物一地盤系の1次モードの変形(図-3 の右)を仮定しているため,振幅比α=0は構造物の 上下部の相対変形のみが生じ,地中部分が全く変形 しないことを意味する.また,振幅比α=1は構造物 の上下部で相対変形が生じず,地中部分の変形のみ が生じていることを意味する.すなわち,構造物一 地盤系の変形に対する地盤の変形の寄与率に相当す るパラメータと言える.

図-4に振幅比aと減衰定数hの関係を示す.振幅比 aと減衰定数hには正の相関が見られる.これは,振 幅比aが大きい(地盤の変形の寄与率が大きい)と, 地盤の逸散減衰の寄与が大きくなり,構造物一地盤 系の減衰が大きくなるのに対して,振幅比aが小さ い(地盤の変形の寄与率が小さい)と,構造物の内 部減衰の寄与が大きくなり,構造物一地盤系の減衰 が小さくなるためと考えられる.また,比較的軟ら



図-4 振幅比αと減衰定数 hの関係



図-5 地盤と構造物の周期比と減衰定数の関係

かい地盤(G4~G7地盤)ほど,振幅比αが大きく, 地盤が変形している傾向も見られる.

このことより,地盤と構造物の振動特性の関係性 から,減衰定数を評価できる可能性が見出された.

# 3. 地盤と鉄道構造物の周期比に基づく減衰定 数の簡易推定法

図-5に常時微動観測に基づき算定した減衰定数hと,地盤の固有周期 $T_s$ と構造物の弾性固有周期 $T_s$ との周期比 $T_s/T_g$ との関係を示す. $T_s/T_g$ が1より大きいか小さいかで傾向が異なることがわかる.具体的には、 $T_s/T_s>1$ の範囲は減衰定数が小さく、 $T_s/T_g\leq1$ の範囲は減衰定数が小さく、 $T_s/T_g\leq1$ の範囲は減衰に数が小さいものから大きいものまで幅広くばらつく.この傾向は、既往の解析的検討<sup>17)-19)</sup>でも見られるが、 $T_s/T_g\leq1$ の範囲は地盤と構造物それぞれが振動し、構造物の内部減衰(数%)と地盤の逸散減衰(数十%)それぞれが期待できる(図-6(a))が、 $T_s/T_g>1$ の範囲は構造物のみが振動し、内部減衰のみしか期待できないためと考えられる(図-6(b)).また、このメカニズムは、地盤、構造物それぞれの固有周期 $T_s$ , $T_s$ で決定され、各物理量に地



図-7 減衰定数の推定式と実測の関係

盤条件,構造形式の違いによる影響が含まれている. そのため、観測結果は地盤種別・構造形式によらず、 一律の評価が可能と考えられる.

そこで、実測結果に基づき、減衰定数hの簡易推 定式として式(1)を提案する.

$$h = \begin{cases} 0.05 & (T/T_g \le 1) \\ 0.05(T/T_g)^{-0.7} & (T/T_g > 1) \end{cases}$$
(1)

ここで、Tは構造物の弾性固有周期Tsもしくは後述 する走行安全性の評価では等価固有周期Tegである.

観測結果と式(1)による推定線を図-7に示す.ここ で、観測結果は一律の凡例、式(1)の推定線は実線で 示している.式(1)は,逸散減衰が期待できるT/T<sub>e</sub>≤1 の範囲は、一般的な減衰定数としてよく用いられる 5%とし、内部減衰のみしか期待できないT/T<sub>e</sub>>1の範 用は、実測結果の概ね平均値を評価するように設定 した.

## 4. 減衰定数と車両走行性の関係の定量化

3.において、構造物と地盤の周期から発揮される 減衰定数を簡易推定できるようになった. ここでは、 減衰定数の車両の走行安全性の大小に及ぼす影響を 評価するために、構造物の地震応答解析および得ら れた構造物天端の応答波形を車両の加振入力とした



図-9 入力地震動の弾性加速度応答スペクトル(5%減衰)

車両運動解析を多数実施し,ある等価固有周期およ び減衰定数を有する構造物の最大応答およびこの構 造物上を走行する車両の走行安全性の関係を定量化 する.

#### (1) 解析概要

構造物の地震応答解析を行い、得られた構造物天 端の応答波形を車両の加振入力とした車両運動解析 を実施する.本研究ではRC橋梁・高架橋のように, 車両と構造物の質量比が大きく,構造物と車両の連 成挙動の影響が無視できる条件を想定しているため, 構造物と車両の解析を分離して実施した. なお, 車 両運動解析では横方向(線路直角方向)に一様に振 動する構造物上を車両が走行する状態での横方向の 振動変位の影響のみを考慮し,構造物間の不同変位 の影響については考慮していない.

#### a) 構造物の地震応答解析

構造物の地震応答解析は、橋梁・高架橋を線形 1 自由度モデル(図-8)により表現し、このモデルに 地表面地震動を作用させ構造物天端の絶対変位応答 波形を算定した.この解析においては、構造物の減 衰定数 h と等価固有周期 T<sub>eq</sub> をパラメータとした. 減衰定数 h は 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10, 20(%)の 8 ケ ースを設定し,等価固有周期 Tea は降伏点剛性に対 応する構造物周期+地盤の周期として 0.1~2.0 秒ま で 0.1 秒刻みで設定した.

入力地震動については既往の観測記録および設計 地震動から卓越周期の異なる 22 波を選定した.使 用した全ての入力波について,5%減衰時の弾性加 速度応答スペクトルを図-9 に示す.なお,後述する ように脱線に対する余裕度を入力地震動に対する倍 率(安全限界倍率)で評価するため,最大加速度は 全て100galにスケーリングしている.

#### b) 車両運動解析

次に、構造物天端の絶対変位波形を入力とした地 震時の車両運動解析を実施する.この解析には、車 両運動シミュレータ<sup>20)</sup>を用いた.本シミュレータは、 通常の車両走行シミュレーション機能に加えて、レ ール下から列車の進行方向に対して上下・左右・前 後の並進振動を入力できる機能を備え、車輪がレー ル上でジャンプする挙動や、車両が大きくロール変 位する挙動を解析可能である.

車両モデルの概要を図-10 に示す.本車両モデル は、車体1個、台車2個、輪軸4個の合計7つの剛 体で車両を構成し、各剛体が6自由度を持ち、車両 の8車輪を支えるレールが独立に各2自由度を持つ、 合計58自由度を有している.また、車体-台車枠 間と台車枠-輪軸間に設ける結合要素については、 ばね・ダンパ要素として、まくらばねおよび軸ばね、 左右動ストッパ、軸箱上下動ストッパ、車体異常上 昇止め、左右動ダンパを配置している.車輪・レー ル間作用力にはKalker理論に基づいたモデルを使用 するが、車輪がレールから離れて運動する状態も計 算可能である.軌道条件は直結軌道とし、軌道不整 のない直線区間とした.

以上の車両モデルに対して,先に作成した構造条 件ごとの絶対変位応答波形を入力し解析を実施した. なお,加振は入力波を各軸に同時,同波形で入力す る4軸同相加振により行った.

#### (2) 車両走行安全性の評価方法

本研究では、構造物の応答解析によって得られた 入力加速度 100gal に対する絶対変位波形に対して、 倍率  $\alpha$  を乗じたものを車両への入力波形とし、この  $\alpha$  を 0.01 刻みで変えて車両挙動解析を繰り返し実施 し、後述する脱線判定を実施した.これにより、脱 線が生じる直前の倍率である安全限界倍率  $a_{lim}$ を構 造物の減衰定数ごとに求めた.また、減衰定数 5% の場合の安全限界倍率  $a_{lim}(5\%)$ を基準とし、ある減 衰定数  $h(=0.5\sim4.0, 10,20\%)$ の構造物における安全 限界倍率  $a_{lim}(h_s\%)$ に対する比を、安全限界倍率比  $\gamma$ として式(2)により定義した.

$$\gamma(h\%) = \frac{\alpha_{\rm lim}(h\%)}{\alpha_{\rm lim}(5\%)} \tag{2}$$



図-11 脱線判定の基準

すなわち, γ が 1 を下回るほど,構造物の減衰が 車両の走行安全性に及ぼす影響が大きく,5%減衰 の場合と比較して走行安全性の余裕度が相対的に低 下することを表している.本研究では,この安全限 界倍率比により,減衰が車両走行安全性に与える影 響を評価した.

脱線判定は,変位制限標準の基準を参考として<sup>11)</sup>, 車輪~レール相対左右変位,すなわち車輪踏面中心 とレール頭頂面中心との左右方向の距離により行い, 図-11(a)に示すように,この変位が静止時の車輪の 中正位置から±70 mm 以上生じた際,および輪軸ロ ール変位が大きい場合は図-11(b)のようにレール頭 頂面中心と車輪の中正位置の変位差が±70 mm 以上 生じた際に脱線と判定した.

## (3) 構造物応答と減衰定数の関係

応答解析により、各等価固有周期において地震動





図-13 脱線限界 SI と減衰の関係

と同じ 22 個の応答値が得られるが,この中での最 大絶対応答加速度を各等価固有周期において算定し たものを図-12(a)に示す.また,図-12(b)に,図-12(a)の各等価固有周期における応答について,減 衰定数 5%時の応答を基準としたときの増減率を示 す.

図-12から,減衰の大小により同じ等価固有周期 でも応答が大きく変動していることが分かる.減衰 定数が低い場合,等価固有周期による増減幅の変動 が大きい.一方で,減衰定数が高くなると応答が低 減・平滑化されるため,この変動の程度は相対的に 低下している.この結果により,構造物の等価固有 周期および減衰定数を与えることで,地震動の非定 常性や構造物と地震動の共振の影響を加味した上で, 構造物の最大応答,および耐震設計で一般に想定す る減衰定数 5%時の応答に対する増減割合を推定で きる.

## (4) 脱線限界値と減衰定数の関係

車両の脱線挙動には、①構造物天端の応答値が減 衰定数により増減する影響、および②脱線限界値が 減衰定数により変動する影響、の2つが要因として 考えられる.①の影響は前節で評価しているので、 ここでは②について、脱線直前の応答波形を用いて 変位制限標準の手法により計算した脱線限界 *SI*<sup>11,21</sup> についての減衰による変動を確認した.ここで、SI



は式(3)で示すように構造物天端の加速度応答波に対 する速度応答スペクトル  $S_V(h,T)$  を周期 T につい て積分することで算定される.

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_V(h, T) dT$$
(3)

図-13(a)は、各地震動、構造物の等価固有周期に ついて、脱線限界 SI の最小値を減衰定数ごとに表 示したものである.図-13(b)は、各等価固有周期に おいて減衰定数 5%における限界値を基準とした変 動倍率を表す.

この図から,脱線限界 SI の減衰による変動は ±10%程度であり,減衰定数による構造物応答の変 動割合と比較すると軽微な変動である.さらに,構 造物の応答と異なり,必ずしも減衰定数の大小と限 界値の大小関係が一致しているわけではないことが



た行安全性を評価することが可能となった.また, この評価に必要な構造物の減衰定数については,実 測をもとに構造物および地盤の固有周期を説明変数 として3.でモデル化を行った.

そこで、構造物の等価固有周期および地盤の固有 周期をパラメータとし、対応する構造物の減衰定数 を 3.の手法で算定するとともに、この減衰定数およ び構造物の等価固有周期に対応する構造物および車 両の応答を 4.から推定することで、実構造物の減衰 の特性を反映して、構造物の最大応答および車両走 行安全性が向上する条件および低下する条件を明ら かにする推定図を作成する.

まず,構造物の等価固有周期および地盤の固有周 期として,それぞれ 0.1~2.0 秒の範囲を設定し,式 (1)から,ある構造物および地盤の固有周期の組合せ に対応する減衰定数を推定する.次に,図-12,図-14 を用い,構造物の等価固有周期および推定した 減衰定数に対応する値を読み取ることで,構造物の 最大応答および車両の安全限界倍率比を推定するこ とができる.なお,この際には任意の減衰定数に対 する構造物応答および安全限界倍率比の値が必要と なるが,4.での検討においては離散的な減衰定数に 対して計算を行っているため,構造物の等価固有周 期ごとに減衰と最大応答の関係をプロットし,この 関係を3次曲線で補間することで任意の減衰時にお ける構造物の最大応答および安全限界倍率の推定値 を算定した.

図-15には以上の手順および図-12により算定した,構造物の等価固有周期,地盤の固有周期と構造物の絶対最大応答加速度の関係を表す推定図を示す. 図-16は図-14を用いた車両の安全限界倍率比に関する同様の推定図を示す.これらの図は,それぞれ

(5) 安全限界倍率と減衰定数の関係

前節より,脱線限界 SI に及ぼす減衰の影響は, 構造物応答の減衰による変動割合と比較すると軽微 な変動であるため,車両走行性に及ぼす減衰の影響 は,主に低減衰の場合における構造物の応答増大が 支配要因となると考えられる.そこで,脱線直前の 構造物天端の最大応答を表す安全限界倍率の減衰定 数依存性について評価する.

図-14 に、減衰定数および構造物の各等価固有周 期に対して、減衰定数 5%時の安全限界倍率を基準 として式(2)で算定した安全限界倍率比γを示す.こ こで、安全限界倍率比を算定する際に事前に計算し た安全限界倍率は、安全側の評価を行うため、各等 価固有周期および減衰定数に対して、22の地震波の 安全限界倍率の最小値を採用している.この図から、 減衰定数により結果に明確な差が生じており、5% よりも低い減衰定数を設定した場合、全ての周期帯 域で相対的に車両走行安全性が低下していることが 分かる.また、局所的な周期におけるγの増減傾向 についても、減衰定数が低い場合の構造物応答の増 減傾向(図-12(b))とほぼ逆の傾向で生じており、 構造応答の減衰依存性が車両走行性にも大きく影響 していると考えられる.

以上より,図-14 によれば,構造物の減衰定数と 等価固有周期が与えられた場合,変位制限標準等で 想定する減衰定数 5%時の車両走行安全性に対する 相対的な安全余裕度を推定することができる.

## 5. 地震時要注意構造物の簡易抽出法

4. での検討により、構造物の減衰定数と等価固有

耐震設計で想定する減衰定数 5%時の応答に対する 応答の増減率で表示している.

ここで、図-15 および図-16 では構造物の絶対加 速度応答および安全限界倍率比の増減率を具体的に 示しているが、この値は、図-12 および図-14 にお いて述べたように、22 波の地震動について、構造物 応答については最大値、車両の安全限界倍率につい ては最小値をそれぞれ採用していることに注意する 必要がある.また、構造物の減衰についても、図-7 で示したように上限値を 5%として設定しているが、 特に  $T_s/T_s \le 1$ の領域では実際にはこれよりも大きな 減衰が生じており、結果として図-15 および図-16 は安全側の値を示している.これは、本研究では路 線内から低減衰構造に着目して要注意箇所を抽出す る一次スクリーニングを行うことを目的としている ことから、危険箇所の取りこぼしが生じないように 配慮したものである.

図-15においては1.0を上回るほど絶対加速度応 答が増幅し、図-16においては1.0を下回るほど車 両走行安全性が相対的に低下することになり、これ らの図から、等価固有周期が長く地盤の固有周期が 短い構造物が相対的な弱点箇所となり得ると考えら れる.これらの図から路線内から相対的に構造物応 答の増大や車両走行安全性の低下が大きい要注意箇 所を抽出することができる.なお、これらの推定図 を実際の構造物に当てはめる際には構造物の等価固 有周期および地盤の固有周期が必要となるが、これ は2.で示したような詳細な観測を実施する以外にも、 設計図書等に記載されている構造物高さや地盤条件 等を用いた簡易な手法によっても利用可能である<sup>22)</sup>.

## 6. おわりに

本論文では,多数の鉄道構造物について,常時微 動観測を基に算定した減衰定数結果を分析し,減衰 定数の推定する方法を検討した.また,構造物の地 震応答解析および車両運動解析を多数実施し,減衰 定数の大小が車両の走行安全性へ与える影響を分析 し,地震時に走行安全性の観点から特に注意を要す る箇所の簡易抽出法を検討した.得られた結果を以 下に示す.

- 構造物の固有周期 *T* と地盤の固有周期 *T<sub>g</sub>*の比 *T<sub>s</sub>*/*T<sub>g</sub>*が大きいほど減衰定数 *h* が小さくなる傾向 を確認し、周期比 *T<sub>s</sub>*/*T<sub>g</sub>*から減衰定数 *h* を簡易 推定する式を提案した.
- 2) 構造物~地盤の固有周期,減衰,地震動をパラ メータとした地震応答解析および車両運動解

析を多数実施し,耐震設計で一般に想定される5%減衰時の応答を基準として,減衰による 構造物応答および車両走行性の変動量を推定 する判定図を作成した.

3) 2)の判定図を 1)の減衰推定式と組み合わせ,路 線内から相対的に構造物応答の増大や車両走 行安全性の低下が大きい要注意箇所を抽出す る手法を提案した.

なお,本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助 金を受けて実施した.

#### 参考文献

1) Siringoringo, D. M. and Fujino, Y. : Observed dynamic performance of the Yokohama-Bay Bridge from system identification using seismic records, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.13, pp.226-244, 2006.

2) Siringoringo, D. M. and Fujino, Y. : Dynamic characteristics of a curved cable-stayed bridge identified from strong motion records, *Engineering Structures*, Vol.29, pp.2001-2017, 2007.

3) Siringoringo, D. M. and Fujino, Y. : System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.37, pp.361-386, 2007.

4) 伊藤学, 片山恒雄:橋梁構造の振動減衰, 土木学会論 文報告集, No.117, pp.12-21, 1965.

5) 加藤雅史, 島田静雄:橋梁実測振動特性の統計解析,

土木学会論文報告集, No.311, pp. 49-58, 1981.

 6)加藤雅史,島田静雄:橋脚振動特性の実測データによる統計分析,土木学会論文報告集,No.338, pp. 229-232, 1983.

7) 栗林栄一,岩崎敏男:橋梁の耐震設計に関する研究
 (Ⅲ) -橋梁の振動減衰に関する実測結果-,土木研究
 所報告, No.139, 1970.

8) 川島一彦,運上茂樹,吾田洋一:斜張橋の耐震性に関 する研究(その1) 振動実験から見た斜張橋の振動特性,

土木研究所資料, No.2388, 1986.

9)山口宏樹,伊藤学,坂本邦宏,R.アディカリ:斜張橋の振動減衰に関するデータベース構築と性状分析,鋼構造年次論文報告集,Vol.1, pp. 359-364, 1993.

10) 竹田哲夫,山野辺慎一,新原雄二:実測データに基づ くPC斜張橋の減衰特性について,土木学会論文集,

No.626 / I-48, pp.147-161, 1999.

国土交通省監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物
 等設計標準・同解説 変位制限,丸善出版,2006.

12)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.
13)和田一範,坂井公俊,室野剛隆:実測に基づく鉄道構 造物の減衰特性の概略評価,鉄道総研報告, Vol.30, No.5, 19):
pp.35-40, 2016. 大学
14) 西村昭彦,棚村史郎:既設橋梁橋脚の健全度判定法に 20) (
関する研究,鉄道総研報告, Vol.3, No.8, 1989. 学動
15)日本建築学会:建築物の減衰,丸善出版, 2000. pp.12
16)国土交通省監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物 21) (
等設計標準・同解説 耐震設計,丸善出版, 2012. 車走
17)若原敏裕,川島一彦:剛体基礎で支持される道路橋橋 24, 脚の地下逸散減衰,土木学会論文集, No.432/I-16, 22) (
pp.145-154, 1991. 測定
18)室野剛隆:強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭 木学
基礎の耐震設計法に関する研究,京都大学博士論文, 1999.

19) 土岐憲三:橋脚基礎の地震応答解析と耐震設計,京都 大学防災研究所年報,Vol.21A, pp.1-24, 1978.

20) 宮本岳史,石田弘明,松尾雅樹:地震時の鉄道車両の 挙動解析,日本機械学会論文集C編, Vol.64, No.626, pp.1236-1243, 1998.

21) 羅休, 宮本岳史: 地震時の構造物振動変位に対する列
 車走行性の照査法, 鉄道総研報告 Vol.20, No.12, pp.19-24, 2006.

22) 徳永宗正,曽我部正道,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, Vol.71, No.1, pp.72-86, 2015.

( ..受付)

## EXTRACTION METHOD OF LOW DAMPING RAILWAY STRUCTRES REGARDING RUNNING SAFETY ON THE SEISMIC CONDITION

## Kazunori WADA, Kohei IIDA, Akihiro TOYOOKA and Yoshitaka MURONO

Running safety on the seismic condition is evaluated by using the general damping constant (5 %) of railway viaducts and bridges because there are only a few measurement examples for damping properties and the occurrence factors of damping are very complex. However, if the damping constant is lower than 5 %, running safety declines relatively. Authors evaluated damping constants of railway viaducts of various structural types and in various ground conditions by using vibration measurement methods. In this paper, we analysed the measurement results and proposed the estimation method of damping constants of railway viaducts and bridges by using the ratio of the structural period to the ground's ones. Furthermore, effects of the structural damping, nonlinear character and soil condition on behavior of the high-speed train were studied by combining the structural analysis and vehicle dynamics simulation and we proposed the extraction method of low damping viaducts and bridges regarding running safety by applying the proposed estimation method.