

## 地盤と鉄道構造物の周期比に基づく減衰定数の 簡易推定法と車両走行性の概略評価法の提案

和田一範<sup>1</sup>・坂井公俊<sup>2</sup>・室野剛隆<sup>3</sup>

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

<sup>3</sup>正会員 博士（工学）（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）

### 1. はじめに

地震時の構造物の振動特性（周期特性、減衰特性）の中で、減衰特性は発生メカニズムが複雑であることや、実測の事例が少ないため、未解明な点が多い。本研究において減衰特性とは構造物—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弱点とな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とともに、車両走行性の概略評価への活用法、具体的には車両走行性を満足するために必要な減衰定数を概略評価するノモグラムを提案する。

### 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

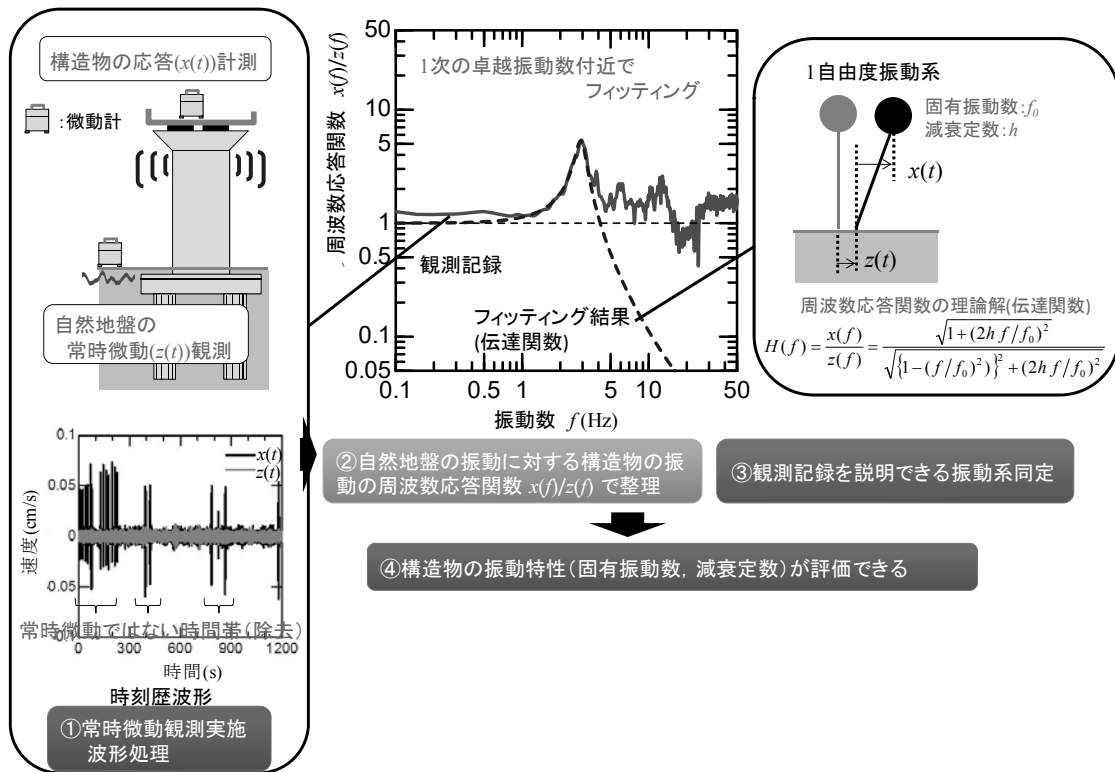


図-1 常時微動観測による構造物の振動特性評価の概要



図-2 常時微動観測を実施した構造物の例

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を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を衝撃振動試験<sup>14)</sup>に基づく振動形状の分析から別途確認している<sup>13)</sup>。これは、前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カーブフィッティング法<sup>15)</sup>によって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。

## (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、鉄道構造物の耐震設計標準<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地上部の上端と下端について、構造物—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  $\alpha$  (以下、振幅比  $\alpha$ ) を定義する。ここで、構造物—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  $\alpha=0$  は地上部の上下端の相対変形のみが生じ、地中部が全く変形しないことを意味する。また、振幅比  $\alpha=1$  は地上部の上下端で相対変形が生じず、地中部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—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  $\alpha$  と減衰定数  $h$  の関係を示す。振幅比

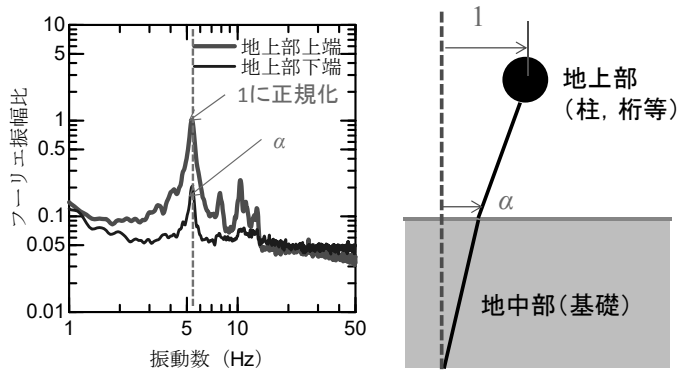


図-3 地上部の上下端の振幅比  $\alpha$  の算出

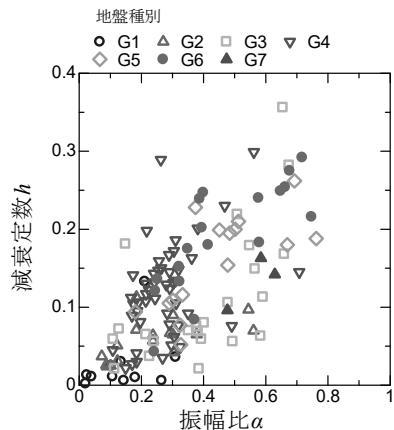


図-4 振幅比  $\alpha$  と減衰定数  $h$  の関係

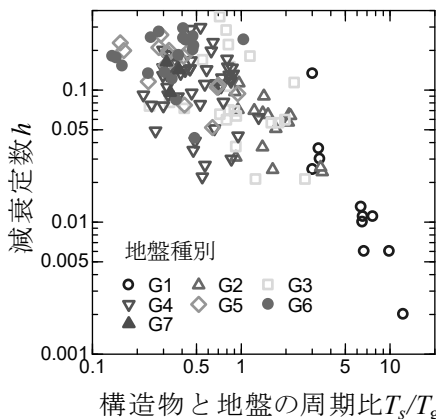


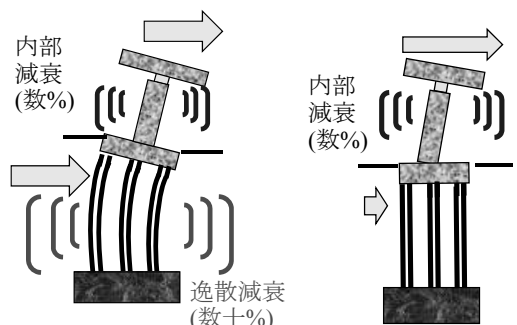
図-5 地盤と構造物の周期比と減衰定数の関係

$\alpha$  と減衰定数  $h$  には正の相関が見られる。これは、振幅比  $\alpha$  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—地盤系の減衰が大きくなるのに対して、振幅比  $\alpha$  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—地盤系の減衰が小さくなるためと考えられる。また、比較的軟らかい地盤（G4～G7地盤）ほど、振幅比  $\alpha$  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  $T_g$  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、  $T_s/T_g > 1$  の範囲は減衰定数が小さく、  $T_s/T_g < 1$  の範囲は減衰定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、  $T_s/T_g < 1$  の範囲は地盤と構造物それぞ



(i)  $T_s/T_g < 1$  のとき (ii)  $T_s/T_g > 1$  のとき

図-6 周期比と発揮される減衰の概念

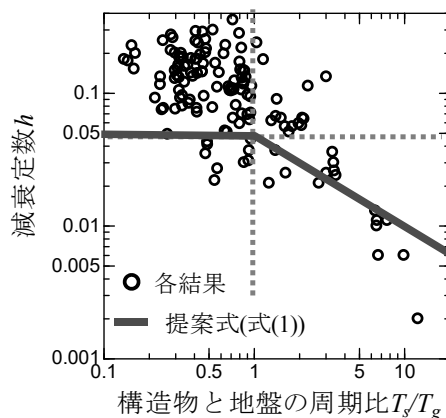


図-7 減衰定数の推定式と実測の関係

れが振動し、構造物の内部減衰（数％）と地盤の逸散減衰（数十％）それぞれの寄与が期待できる（図-6(a)）が、  $T_s/T_g > 1$  の範囲は地上部の振動が支配的となり、内部減衰の寄与が大きくなるためと考えられる（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  $T_g$ 、  $T_s$  で決定され、各物理量に地盤条件、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。

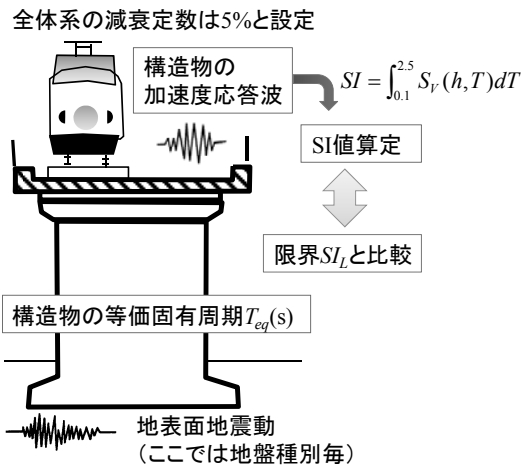


図-8 走行安全性評価の概要

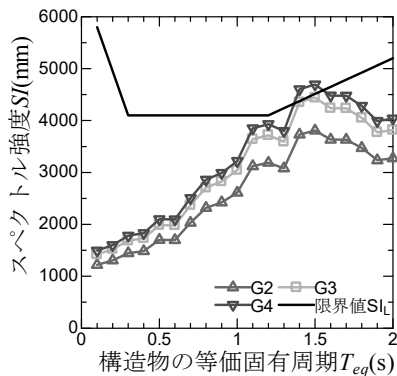


図-9 等価固有周期  $T_{eq}$  とスペクトル強度  $SI$  の例

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

ここで、 $T$ は構造物の弾性固有周期 $T_g$ もしくは後述する走行安全性の評価では等価固有周期 $T_{eq}$ 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 $T/T_g < 1$ 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、内部減衰の寄与が大きい期待できない $T/T_g > 1$ の範囲は、実測結果の概ね平均値を評価するように設定した。

#### 4. 車両走行性に基づく限界減衰定数

地震時の車両の走行性に関して、鉄道構造物の設計標準(変位制限)<sup>11)</sup>では図-8に示すような評価を行う。具体的には、等価固有周期 $T_{eq}$ の構造物について、地震応答解析により地表面地震動(L1地震動)に対する構造物天端の加速度応答波を算定し、それに対する速度応答スペクトル $S_V(h, T)$ を求め、周期 $T$ について積分することでスペクトル強度 $SI$ <sup>11)</sup>を算

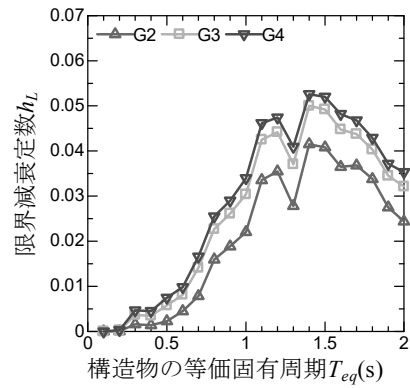


図-10 等価固有周期  $T_{eq}$  と限界減衰定数  $h_L$  の例

定する。スペクトル強度 $SI$ は、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 $S_V(h, T)$ を求め、式(2)のように周期 $T$ について積分することで算定される。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_V(h, T) dT \quad (2)$$

その結果と、走行安全性に係る変位の限界値 $SI_L$ とを比較することで走行安全性を評価し、 $SI > SI_L$ であれば、車両走行性を満足すると判断される。このとき、減衰定数 $h$ は5%として算定されており、5%より減衰定数が小さい場合は応答値を過小評価する恐れがあると注記されている。

図-9に $SI_L$ と代表的な地盤種別ごとのL1地震動に対する $SI$ を示す。構造物の等価固有周期が小さい領域は、限界値 $SI_L$ に対する地盤種別ごとの $SI$ の余裕が大きいのに対して、構造物の等価固有周期が大きい領域は、限界値 $SI_L$ に対する地盤種別ごとの $SI$ の余裕が小さい。このように、同じ減衰定数(5%)の場合、車両走行性への余裕度は、等価固有周期・地盤種別によって異なる。

そこで、車両走行性への減衰定数の影響を評価するために、各地盤種別・等価固有周期の構造物に対して、減衰定数をパラメータとして $SI$ を計算し、 $SI_L$ に一致する減衰定数、すなわちL1地震動によって走行性が満足できる最小の減衰定数 $h_L$ (以下、限界減衰定数と呼ぶ)を算定する。ここで、構造物は弾性体として扱い、部材の非線形などは考慮しない。

図-10に地盤種別ごとの限界減衰定数 $h_L$ を示す。減衰定数5%の場合に限界 $SI_L$ に対する余裕が大きかった等価固有周期が小さい領域は、限界減衰定数が小さくなり、余裕が小さかった等価固有周期が大きい領域は、限界減衰定数が大きくなる。本図より、例えば、G3地盤上に建設される等価固有周期 $T_{eq} = 1.0s$ の構造物は、減衰定数が約3%を下回ると、車両走行安全性を満足できなくなる可能性があるかと判定される。

## 5. 車両走行性の概略評価法

以上の成果を踏まえると、地盤の固有周期  $T_g$ 、構造物の等価固有周期  $T_{eq}$  が算定できれば、限界減衰定数  $h_L$  と式(1)より実際の減衰定数  $h$  が評価できるので、 $h_L$  に対する  $h$  の差分  $\Delta h = h_L - h$  が算定できる。これは、走行安全性を満たす最小の減衰定数  $h_L$  に対して、必要な減衰定数を表し、本論文では「必要減衰定数」と呼ぶこととする。なお、必要減衰定数を算定する際、式(1)の  $T$  は等価固有周期  $T_{eq}$  として評価する。これは、発揮される減衰が、弾性固有周期や等価固有周期に関わらず、ある地震動に対して揺れている構造物と地盤の周期比で決まると考えられるためである。

図-11に地盤周期 $T_g$ 、構造物の等価固有周期 $T_{eq}$ ごとの必要減衰定数 $\Delta h$ のコンターを示す。なお、図中には $\Delta h=0$ 、すなわち、実際の減衰定数と限界減衰定数が一致する線を合わせて示す。図-11より $T_g$ が小さいほど、また、 $T_{eq}$ が大きいほど、 $\Delta h>0$ となる可能性が高いことがわかる。これは、硬い地盤 ( $T_g$  小) で、構造物高さが高い ( $T_{eq}$  大) ほど、必要減衰定数が大きく、走行性安全上、注意を要する傾向があることを意味する。このような傾向は、3章で述べたように、 $T_{eq}$ が大きく、 $T_g$ が小さいと式(1)より、発揮される減衰定数 $h$ が小さくなることと、4章で述べたように、構造物の等価固有周期が大きいほど、限界値 $SI_L$ に対する地盤種別ごとの $SI$ の余裕が小さく、限界減衰定数 $h_L$ が小さいことによってもたらされると考えられる。

本図を用いれば、地盤の固有周期と構造物の等価固有周期がわかれば、走行安全上、要注意な箇所と当該箇所に必要な減衰定数を概略評価できる。そこで、上記で提案した必要減衰定数の算定ノモグラムを用いて、走行安全性の観点で注意を要する箇所を沿線全体の中から選択する手順の例を示す。

- Step1：周辺に存在する地盤のボーリングデータから、固有周期  $T_g$  を算定する。
- Step2：対象路線における構造物の等価固有周期  $T_{eq}$  を算定する。  $T_{eq}$  は近年の設計では算定されているが、より簡易に評価するためには弾性固有周期を微動観測等から実測し、これを換算する手法<sup>例えば 20)</sup>や、構造物高さ等から簡易に推定する方法も考えられる。
- Step3：上記の  $T_g$  と  $T_{eq}$  を図-11 にプロットし、各構造物の必要減衰定数  $\Delta h$  を算定する。
- Step4：  $\Delta h$  が大きい箇所から走行安全性の観点か

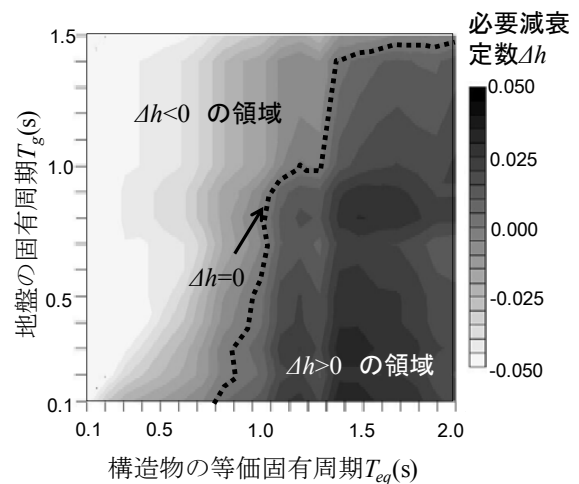


図-11 必要減衰定数  $\Delta h$  の算定ノモグラム

ら注意を要する構造として抽出する。

なお、各々の構造物の対策の要否判断は、別途詳細な検討を行う必要があるが、本ノモグラムを用いることで、そのような詳細な検討を必要とする構造物を優先的に抽出することができるため、効率的な安全性の向上が可能となると考えられる。

## 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、減衰定数の推定法と車両走行性への影響を分析した。得られた知見を以下に示す。

- ・構造物の固有周期  $T_s$  と地盤の固有周期  $T_g$  の比  $T_s/T_g$  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  $T_s/T_g$  から減衰定数  $h$  を簡易推定する式を提案した。
- ・減衰定数をパラメータとし、地盤種別・等価固有周期ごとにスペクトル強度を算定することで、車両の走行性を満足できる最小の減衰定数（限界減衰定数  $h_L$ ）を算定した。
- ・減衰定数の簡易推定式で得られる減衰定数  $h$  と限界減衰定数  $h_L$  の差分  $\Delta h = h_L - h$  を必要減衰定数と定義し、地盤の固有周期、構造物の等価固有周期から必要減衰定数を概略評価するノモグラムを提案した。

本成果より、走行安全上、要注意な箇所の抽出とそこで必要な減衰定数を簡易に評価可能となると考えられる。今後は、振動計測を再現した数値解析を多様な構造型式・地盤条件で実施することで、地盤と構造物それぞれの減衰定数の評価方法

を検討する予定である。

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.
- 11) 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, pp.35-40, 2016.
- 14) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.8, 1989.
- 15) 日本建築学会: 建築物の減衰, 丸善出版, 2000.
- 16) 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 耐震設計, 丸善出版, 2012.
- 17) 若原敏裕, 川島一彦: 剛体基礎で支持される道路橋橋脚の地下逸散減衰, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.145-154, 1991.
- 18) 室野剛隆: 強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭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) 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, Vol.71, No.1, pp.72-86, 2015.