

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

Vibrational property of independent piers and completed bridge by using microtremor measurement

中島章典*, 中野貴代美**, 中村晋***

Akinori Nakajima, Kiyomi Nakano and Susumu Nakamura

*工博 宇都宮大学大学院工学研究部学際先端研究部門 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

**工修 オリエンタルコンサルタンツ (〒 151-0071 東京都渋谷区本町 3-12-1)

***工博 日本大学工学部土木工学科 (〒 963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1)

In this research, first the microtremor measurement is conducted for the independent RC piers before the superstructure is constructed and for the completed bridge after the superstructure is constructed. The natural frequencies and the damping ratios of the independent RC piers and the completed bridge are identified including the effect of the ground condition and the embedded soil around the pier from the microtremor measurement. The analytical models of the independent RC piers and the completed bridge are constructed and the eigenvalue analysis is conducted against the models in order to check the applicability of the analytical models.

Key Words : ambient vibration, independent pier, completed viaduct system, natural frequency, damping ratio

キーワード：常時微動，独立橋脚，橋梁完成系，固有振動数，減衰定数

1. はじめに

実橋の耐震設計などに際しては，できるだけ再現性の高い解析モデルの構築が要求される．このための基礎データの収集を目的として，多くの既設橋梁の振動計測が行われ，その固有振動数や減衰定数などを同定し，解析モデルとの比較がなされている．橋梁構造物の固有振動数や減衰定数などを計測する場合，構造物の規模が大きくなればなるほど，それを意図的に振動させることは難しい．これまで，橋梁構造物の振動計測に対しては，起振機や大型車両走行などにより構造物を加振する場合が多いが，外力をほぼ正確に把握できるという長所を持つ反面，導入コストの発生や，対象構造物以外の自由度系が付加させることにより系が複雑になるという短所を併せ持つ^{1),2)}．

これに対して，常時微動計測は加振手段を必要とせず，供用中の橋梁でも簡便に計測できるという長所を持っているため，常時微動を用いて，構造物の振動計測あるいは計測結果を用いた健全度診断に関する研究がこれまで数多く行われてきている^{3)~8)}．

一方，橋梁などの構造物は，一般的に地盤に支持されているため，地盤が橋梁の振動特性に与える影響は大きい．そのため，橋梁や周辺地盤の常時微動計測データを用いて振動特性を明らかにしようという試みや，根入れされている構造物の振動特性を明らかにしようとする研究も行われている⁹⁾．しかし，根入れが橋梁完

成系における動的相互作用に及ぼす影響を検討した例は少ない．これは，橋梁全体系に対して常時微動計測を行った場合，橋梁全体系を構成する上部構造，支承，橋脚といった個々の構成部材に加えて，基礎周辺の地盤もその振動特性に影響を及ぼし，地盤の影響を個別に把握することが難しいためである．

そこで本研究では，まず，上部構造がまだ架設されていない独立状態の RC 橋脚を対象として常時微動計測を行い，根入れを含めた地盤が橋脚の固有振動特性および減衰定数に及ぼす影響について考察する．また，平面はり要素を用いた解析モデルの固有振動解析を行い，地盤条件を段階的に変化させることで，地盤が橋脚の振動特性に与える影響について考察する．

一方，これらの橋脚に上部構造が架設された後の橋梁完成系についても常時微動計測を行い，固有振動特性および減衰定数を確認する．さらに，立体はり要素を用いた橋梁完成系の解析モデルの固有振動解析を行い，独立橋脚時に得られた根入れを含めた地盤の影響を考慮することの効果を確認する．

以上の結果から，根入れを含めた地盤が橋脚の振動特性に与える影響を，橋脚の独立橋脚状態で確認することで，橋脚の根入れの影響など含んだより再現性の高い橋梁完成系の解析モデルの構築に有用な資料を提供することができると考えられる．

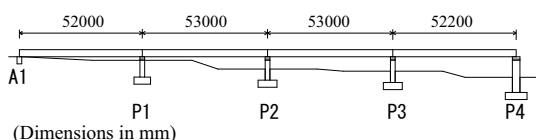


図-1-a A1 橋台-P4 橋脚の径間

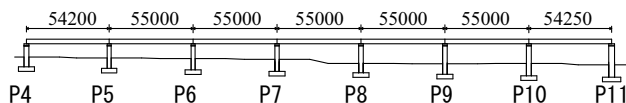


図-1-b P4 橋脚-P11 橋脚の径間

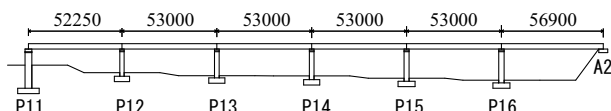


図-1-c P11 橋脚-A2 橋台の径間

図-1 計測した橋梁の概要

2. 常時微動計測

2.1 対象橋梁の概要

本研究で計測の対象とした橋梁は、栃木県宇都宮市内にある板戸大橋であり、図-1 に示すような橋長 920m を有する 4+6+7 径間構成の連続非合成鈹桁橋である。本橋梁は、直接基礎を有する 16 本の小判型断面 RC 橋脚、直接基礎および杭基礎を有する 2 基の橋台、免震支承、3 本主桁の鋼桁および鋼コンクリート合成床版から構成されている。なお、P4、P11 橋脚上の掛け違ひ部には、2 列の免震支承が設置され、それぞれの径間の間には伸縮継手が設けられている。

常時微動計測には、サーボ型常時微動計測器を 4～6 個使用した。計測器の測定周波数範囲は 0.2～100Hz、感度は 0.1V/m/s、分解能は 150×10^{-6} kine である。

2.2 RC 橋脚の独立状態における計測

RC 橋脚上に上部構造がまだ架設されていない、図-1-b 中の P6 から P10 の RC 橋脚 5 基に対して図-2 のような独立橋脚状態を対象として常時微動計測を行った。この場合、橋脚の頂部と地表面の 2 箇所に常時微動計測器を設置し、橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向の 3 方向の速度応答を時間刻み 0.01 秒で 180 秒間計測した。

なお、橋脚のフーチング部分には、根入れの土が存在している。独立橋脚計測時における各橋脚の橋脚高さ、根入れ長、根入れ長を橋脚高さで除した根入れ比の値を表-1 に示す。

2.3 橋梁完成系における計測

上部構造が架設された橋梁完成系においては、図-1-b に示す P6 から P10 の 5 箇所でそれぞれ橋梁路面上、

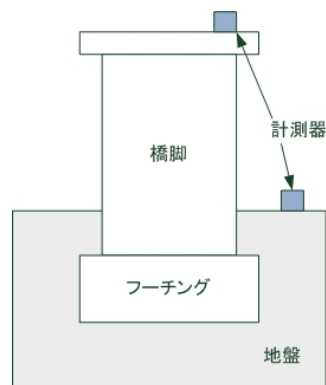


図-2 独立橋脚における常時微動計測位置

表-1 独立橋脚計測時における各橋脚高さおよび根入れ長

橋脚名	P6	P7	P8	P9	P10
橋脚長 (m)	20.1	21.1	22.0	23.0	24.0
根入れ長 (m)	10.4	9.9	9.1	9.6	11.1
根入れ比	0.52	0.47	0.41	0.42	0.46

地表面の 2 箇所に計測器を設置し、橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向の 3 方向の速度応答を同時に計測した。時間刻みは独立橋脚の場合の 1/2 で 0.005 秒とし、120 秒間計測した。また、P7 橋脚から P9 橋脚の橋梁路面上において、計測器を橋軸方向に 6 個 1 直線上に設置し、橋軸方向、橋軸直角方向の常時微動計測を行った。

なお、橋脚のフーチング部分には、根入れの土が存在している。独立橋脚において計測を行ってから 1 年以上が経過し、架設工事の都合で各橋脚の根入れ長が変化している部分があるため、改めて計測を行った。橋梁完成系計測時における各橋脚の橋脚高さ、根入れ長、根入れ長を橋脚高さで除した根入れ比の値を表-2 に示す。

3. 実測からの振動数同定方法

3.1 独立橋脚の振動数同定方法

振動数領域で固有振動数を同定する場合には、構造物基部の入力波に対する構造物上部の応答（出力波）を用いて固有振動数を同定する方法がある^{10),11)}。構造物基部の入力波の時刻歴を $g(t)$ 、構造物頂部の出力波の時刻歴を $f(t)$ とし、それぞれのフーリエ変換を $G(\omega)$ 、 $F(\omega)$ とすると、

$$Z(\omega) = F(\omega)/G(\omega) \quad (1)$$

で定義される $Z(\omega)$ が伝達関数となり、伝達関数の卓越振動数が構造物の固有振動数と一致することが知られている¹²⁾。今回計測した地表面の常時微動データは、橋脚の周りには根入れの地盤が存在しているため、橋脚のフーチング下面のデータではないが、近似的に橋脚

表-2 橋梁完成系計測時における各橋脚高さおよび根入れ長

橋脚名	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
橋脚長 (m)	11.1	12.4	13.4	18.1	19.1	20.1	21.1	22.0
根入れ長 (m)	9.60	7.40	7.40	9.23	9.05	10.82	8.00	8.18
根入れ比	0.86	0.60	0.55	0.51	0.47	0.54	0.38	0.37

橋脚名	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
橋脚長 (m)	23.0	24.0	24.9	18.2	19.1	20.1	21.0	21.9
根入れ長 (m)	10.68	11.38	11.40	4.30	5.42	5.65	5.80	5.10
根入れ比	0.46	0.47	0.46	0.24	0.28	0.28	0.28	0.23

基部付近の地表面で計測したデータを入力波 $g(t)$ とみなし、橋脚頂部で計測されるデータを $f(t)$ とする。そして、計測されたデータ $g(t)$, $f(t)$ の FFT 解析を行い、地表面、橋脚頂部のフーリエスペクトル $G(\omega)$, $F(\omega)$ に変換する。橋脚頂部のフーリエスペクトル $F(\omega)$ を地表面のフーリエスペクトル $G(\omega)$ で除したスペクトル $Z(\omega)$ からそれぞれの橋脚の固有振動数を判断した。

ここでは、全計測データ 18000 点から 4096 点を 1 回分の抽出点数とし、抽出範囲を 15 秒ずつずらして 10 回分を抽出する。この 10 回分のデータをそれぞれ FFT 解析し、それらを平均化したスペクトルを使用した。

3.2 橋梁完成系の振動数同定方法

上部構造が架設された後の橋梁完成系の場合においても、基本的には独立橋脚の場合と同様の方法でデータを処理し、固有振動数を同定する。この場合、常時微動計測器は地表面と橋梁路面上に設置している。そして、橋梁路面上のフーリエスペクトルを地表面位置のフーリエスペクトルで除したスペクトルからのみではなく、橋梁路面上のフーリエスペクトルも用いた総合的な判断から固有振動数の実測値を同定している。

橋梁完成系の場合、データの計測時間を 120 秒としているので、抽出範囲を 10 秒ずつずらして 10 回分のデータ（1 回分 4096 点のデータ）をそれぞれ FFT 解析し、それらを平均化したスペクトルを使用した。

例として、橋梁完成系における P8 橋脚位置で計測した橋軸方向のフーリエスペクトルを図-3 に示す。図-3-a が橋梁路面上のスペクトル、図-3-b が地表面のスペクトル、図-3-c が橋梁路面上のスペクトルを地表面のスペクトルで除したものである。図-3-c のスペクトルが近似的に橋脚を含む橋梁完成系の伝達関数を表していると考えられ、橋梁完成系の固有振動数を得ることができる。しかし、各橋脚位置で同定された固有振動数にはバラツキが見られたため、橋梁路面上の橋軸方向に 6 個の常時微動計測器を設置して計測したデータも含めて橋梁完成系の固有振動数を同定している。

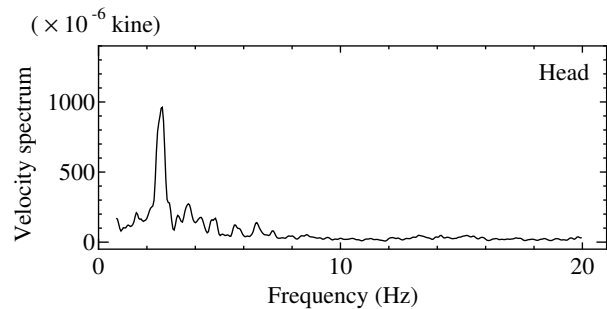


図-3-a 橋梁路面上

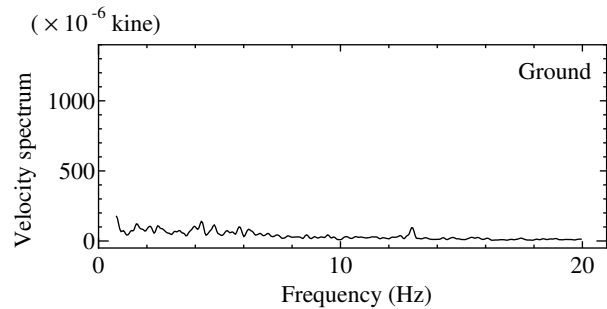


図-3-b 地表面上

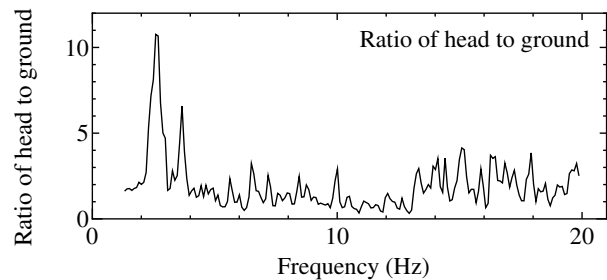


図-3-c 橋梁路面上/地表面上

図-3 P8 橋脚位置での計測データの FFT 解析結果

4. 対象橋梁の固有振動解析

4.1 独立橋脚のモデル化

橋軸方向、橋軸直角方向とも、個々の RC 橋脚を図-4 に示すように、平面はり要素を用いてモデル化し固有振動解析を行う。実橋脚のモデル化にあたり、橋脚下部のフーチング、橋脚頂部付近の張出し部分を考慮し、さらに橋脚のせん断変形の影響を考慮した。なお、橋脚は鉄筋（弾性係数: E_s ）とコンクリート（弾性係

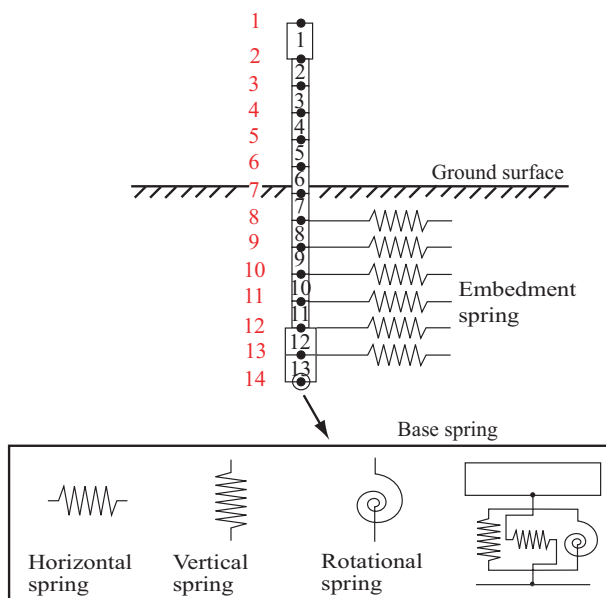


図-4 独立橋脚の解析モデル

数: E_c) とが一体となって断面を構成する RC 部材であるので、実際の断面を均一なコンクリートの換算断面に置換した。解析に用いた橋脚に関する諸量の材料定数を表-3にまとめる。

一方、橋脚周辺の地盤のモデル化は以下のように段階的に行った。まず、橋脚周囲の根入れ部分の地盤を考慮しない場合をモデル化した。この場合は、図-4に示すように、橋脚基部の節点に鉛直ばねと、橋軸方向あるいは橋軸直角方向に対応させて、水平および回転ばねを挿入し、フーチング下面の地盤の影響を考慮して解析を行った。ばね定数は、地盤条件に基づき、道路橋示方書 (IV 下部構造編)¹³⁾に記載されている方法を参考にして算出した。

次に、根入れ部分の地盤のモデル化を行った。対象とする橋脚は地盤に根入れされた状態にあることから、周囲の地盤が橋脚の振動を拘束する状態をモデル化する必要がある。橋脚が振動すると周囲の地盤は変形し、その変位量に依存した反力を橋脚に伝えるためである。したがって、橋脚周囲の根入れ地盤の影響を水平ばねを用いてモデル化する。根入ればね定数は、橋脚前後面の水平反力と橋脚側面の水平せん断反力を考慮して算定する。ここで、水平反力と水平せん断反力はそれぞれ相対する2面にばねを設け、合わせて4面のばねを考慮する。

なお、設計に際して用いられた橋脚周辺の地盤条件は、沖積砂礫層の下に比較的浅い位置に泥岩層があり、I種地盤に分類される。対象橋梁の設計計算書¹⁴⁾によると、それぞれのN値は30、100とされているので、基本的にこのN値に基づいて地盤の変形係数を算定する。

ただし、橋脚は周辺の地盤を一度掘削してから架設

表-3 橋脚の材料定数

橋脚の単位体積重量	24.5 kN/m ³
コンクリートの設計基準強度	24.0 N/mm ²
コンクリートの弾性係数	25.0 GN/m ²
鉄筋の弾性係数	200.0 GN/m ²
コンクリートのせん断弾性係数	10.9 GN/m ²
鉄筋のせん断弾性係数	77.0 GN/m ²

表-4 周辺地盤の地盤定数

	変形係数 (MN/m ²)
沖積砂質土層	22.4
沖積砂礫層	14.9
基盤 (泥岩)	400
橋脚周辺の地盤	45.3

しているため、周辺地盤の固さは元の地盤の固さから変化していることが予測され、地盤の変形係数の正確な値を把握することが難しい。そこで本研究では、計測対象とした橋脚の中で、根入れ比の値が中間的な値を示すP10橋脚の橋軸方向の実測値と解析値の固有振動数が一致するように変形係数を決定した。結果的に用いた変形係数の値は45.3MN/m²となった。表-4に示すように、この変形係数の値は、元の周辺地盤の変形係数と比べると、上層部の沖積砂質土層、沖積砂礫層よりも大きく、最下層の基盤と比較すると小さい値となっている。つまり、沖積砂質土層、沖積砂礫層の2層よりも硬く、最下層の基盤よりも柔らかい地盤に相当していると考えられる。この変形係数から単位面積あたりのばね定数を算出し、これに橋脚の各要素の地盤との接触面積を掛けることで根入ればねのばね定数を決定した。

4.2 橋梁完成系のモデル化

橋梁完成系の橋軸方向および橋軸直角方向の固有振動解析を行うため、橋脚、橋台および上部構造には立体はり要素を用いて図-5のようにモデル化した。個々の構成要素のモデル化は以下のようなものである。

(1) 橋脚のモデル化

橋脚は立体はり要素でモデル化するので、独立橋脚のモデル化の際に考慮した橋脚の剛性および地盤ばねを橋軸方向、橋軸直角方向同時に考慮するのに加えて、橋脚のねじりの影響を考慮する。この場合、コンクリート換算断面の諸量をもつ長方形断面としてねじり定数を考慮している。

(2) 上部構造のモデル化

上部構造は、鋼桁 (弾性係数: E_s) と鋼コンクリート合成床版 (弾性係数: E_c) とが一体となって断面を構成

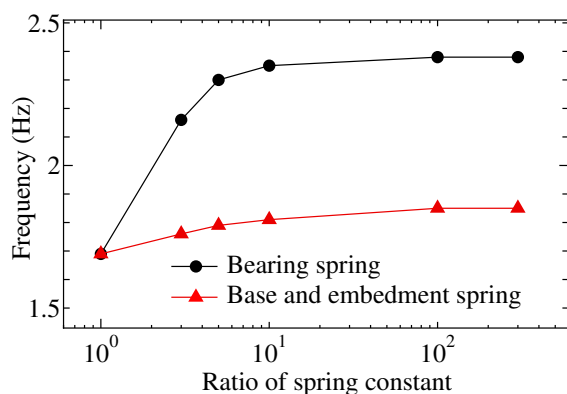


図-6 橋梁完成系における感度解析結果

るゴム支承の微小振動時の実験結果およびここで行った感度解析の結果では支承のばね定数が10倍以上では固有振動数があまり変化しないことを参考にして、支承のばね定数は1次剛性の10倍の値とした。

6. 固有振動数の比較結果

6.1 独立橋脚

(1) 根入れを考慮しない場合

独立橋脚において、実測値から同定した固有振動数と固有振動解析から得られた結果の比較を図-7に示す。図-7-aは橋軸方向、図-7-bは橋軸直角方向の比較結果である。縦軸は1次固有振動数を、横軸は橋脚名を表している。図中の黒のマークは常時微動計測から得られた実測値を表しており、青のマークが橋脚のフーチング下面に地盤ばねを挿入した解析値である。なお、橋軸直角方向のP7橋脚のプロットがないのは、計測に失敗したからである。橋軸方向、橋軸直角方向ともに地盤ばねを挿入した解析モデルの固有振動数は、実測値よりも低い結果となった。ここで、実測値と地盤ばねを挿入した解析モデルの固有振動数を比べると、橋脚ごとに両者の差が異なる。

橋軸方向においては、実測値と解析値の差が最も小さいP8橋脚で16%、最も大きいP6橋脚で23%という結果になった。これに対して、橋軸直角方向においては、実測値と解析値の差が最も小さいP8橋脚で5%、最も差の大きいP10橋脚で23%という結果になった。

独立橋脚状態の各橋脚の根入れ比と図-7における固有振動数の実測値と解析値の差を比較すると、根入れ比が大きいほど差が大きいことがわかる。つまり、根入れ部分の影響を解析モデルに組み込まなかったことが実測値と解析値に差が生じた原因の1つであると考えられる。

(2) 根入れを考慮した場合

図-7において、赤のマークがフーチング下面の地盤ばねに加えて、根入れ部分にも水平ばねを挿入した解析値である。この実測値と解析値を比較する。

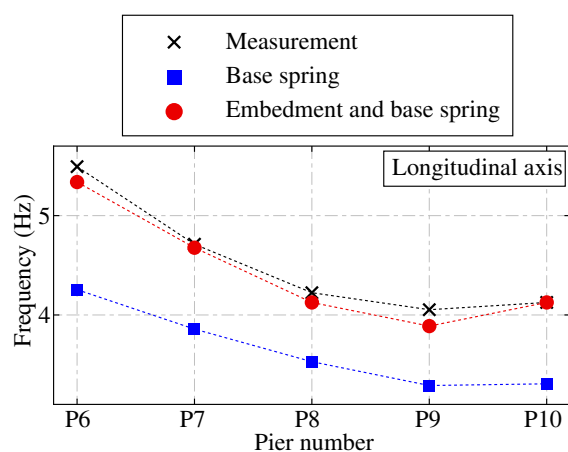


図-7-a 橋軸方向

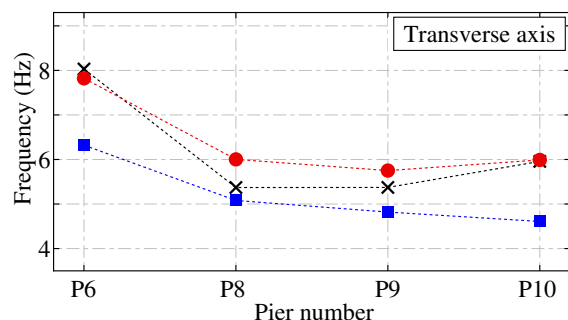


図-7-b 橋軸直角方向

図-7 独立橋脚における固有振動数の実測値と解析値

なお、根入ればねのばね定数は、上述したように地盤の変形係数を用いて算出される値であり、ここでは、独立橋脚P10の橋軸方向の実測値と解析値の固有振動数が一致するように根入れ部分の変形係数を決定している。

根入れ部分を考慮したモデルでは、根入れの地盤によって、橋脚のフーチング下面に地盤ばねを挿入した場合から固有振動数が上昇していることがわかる。

橋軸方向において、実測値と解析値との差を比較すると、P6橋脚では2.8%、P7橋脚では0.7%、P8橋脚では2.3%、P9橋脚では4.1%となり、根入れを考慮しない場合に比べて、解析値は実測値よりは小さいが近い結果となった。

一方、橋軸直角方向においても実測値と解析値との差を比較すると、P6橋脚では2.6%、P8橋脚では-11.7%、P9橋脚では-7.1%、P10橋脚では-1.0%となり、橋軸直角方向に関しても解析値が実測値に近い結果となった。また、橋軸直角方向に関しては、表-1に示す独立橋脚状態の各橋脚の根入れ比を考慮すると、根入れ比が大きいほど実測値と解析値の差が小さい傾向がある。

さらに、橋軸方向および橋軸直角方向とも、図-7に示す橋脚ごとの実測値と解析値の固有振動数の大きさの傾向、つまり、実測値と解析値のマークを線で結んだ折れ線の形状が似ており、ここで用いた解析モデルにおいて根入れ部分の地盤反力が橋脚の固有振動特性

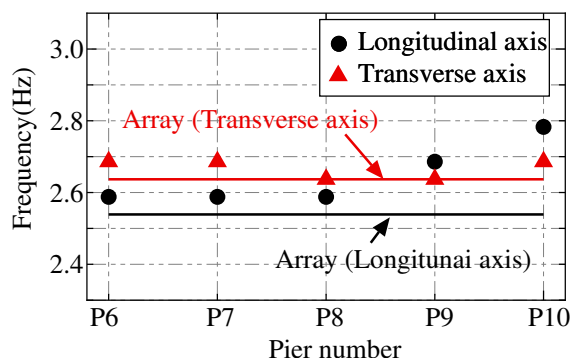


図-8 橋梁完成系の固有振動数の実測値

表-5 橋梁完成系における固有振動解析結果 (Hz)

方向	実測値	解析値		誤差 (%)
		1次剛性	10倍	
橋軸	2.59	1.68	2.41	6.9
橋軸直角	2.64	1.92	2.79	5.7

に与える影響を良好に再現できたと考えられる。

なお、橋軸方向では解析値が実測値よりも小さい値であり、橋軸直角方向では解析値が実測値よりも大きい値となっている。これは、各橋脚位置の根入れ部分の地盤の変形係数は、P10 橋脚で用いた値と近い値ではあると予想されるが、必ずしもまったく同じ値とは限らないためであると考えられる。

6.2 橋梁完成系

まず、各橋脚位置の計測データから同定された橋梁完成系の 1 次固有振動数の実測値を図-8 に示す。縦軸が固有振動数で、横軸は橋脚名を表している。黒丸で示すのが橋軸方向、赤三角で示すのが橋軸直角方向の結果である。

橋梁完成系の場合、地表面で計測している波形は実際には基盤入力波ではなく、ここで求めた伝達関数には誤差が含まれることから、結果的に同定した橋軸方向、橋軸直角方向の固有振動数にはバラツキが認められる。そこで、橋梁路面上の橋軸方向に 6 個の常時微動計測器を設置して計測したデータと比較する。図-8 における実線が橋軸方向に計測器を設置した場合のスペクトルピークから読み取った固有振動数の実測値であり、黒線が橋軸方向、赤線が橋軸直角方向の結果である。6 個の計測データから得られたフーリエスペクトルにおいて、5 個で同じ振動数でピークを示しているの、その振動数を実線で示している。橋軸方向では P6 橋脚から P8 橋脚で、橋軸直角方向では、P8, P9 橋脚においてマークと実線との値に近い結果になった。橋梁完成系は、連続している部分が一体となって振動していると考えられ、固有振動数も一定の値となると考

えられる。したがって、橋軸方向では、P6 橋脚から P8 橋脚の実測値である 2.59Hz、橋軸直角方向では、P8, P9 橋脚の実測値である 2.64Hz を固有振動数とする。

次に、これらの実測値を解析値と比較する。独立橋脚の状態では、地盤の変形係数 45.3MN/m^2 を使用すれば、橋脚-地盤系の振動特性を再現できていることから、橋梁完成系の根入ればね定数を算出する際にも、地盤の変形係数 45.3MN/m^2 を使用した。この根入ればねを、橋梁完成系の解析モデルにおける根入れ深さに相当する節点に組み込んだ。

まず、橋脚、橋台、上部構造においては、対象橋梁の設計計算書¹⁴⁾に示されている値から、コンクリートおよび鉄筋の単位体積重量、弾性係数、せん断弾性係数、および断面積を参考とし、支承においては 1 次剛性の値を用いた場合と微振動下での支承の挙動を考慮して 1 次剛性の 10 倍の値を用いた場合を解析した。地盤においては、橋脚下の地盤の変形をモデル化した地盤ばねを橋脚のフーチング下面に挿入し、さらに根入れの土が存在する部分に根入ればねを挿入した。

橋梁完成系における上述の実測値と解析値の比較を表-5 に示す。支承の剛性を 1 次剛性の値とした解析値と実測値には、橋軸方向で 35.0%、強軸直角方向 27.2% と大きな差異が生じている。これに対して、支承の剛性を 1 次剛性の 10 倍とした解析値と実測値との差は、橋軸方向では 6.8%、橋軸直角方向では 5.8% となり、橋軸方向、橋軸直角方向において振動特性を再現できたと言える。

以上より、橋脚の周囲の根入れをモデル化し、支承の剛性に微振動時における剛性の値を考慮することで、実橋梁の挙動を再現する橋梁の解析モデルを構築することができた。

7. 減衰定数

7.1 減衰定数の同定方法

本研究においては、常時微動計測より得られた時刻歴波形に RD 法^{12),16)}を適用することで得られた自由振動波形より減衰定数を算出した。ここでは、常時微動計測した速度の時刻歴波形を 3 秒ずつに区切り、その間の最大値が重なるように波形を 60 波重ね合わせて自由振動波形の近似波形を取り出した。その一例として P8 橋脚の橋軸方向の結果を図-9 に示す。このような自由振動波形より 1 次モードの減衰定数を求めた。

独立橋脚の場合、橋軸方向は全計測データ 180 秒から 3 秒ずつ抽出範囲をずらし、橋軸直角方向は 2 秒ずつ抽出範囲をずらして RD 法を適用した。橋梁完成系の場合は、全計測データ 120 秒から 3 秒ずつ抽出範囲をずらして RD 法を適用した。

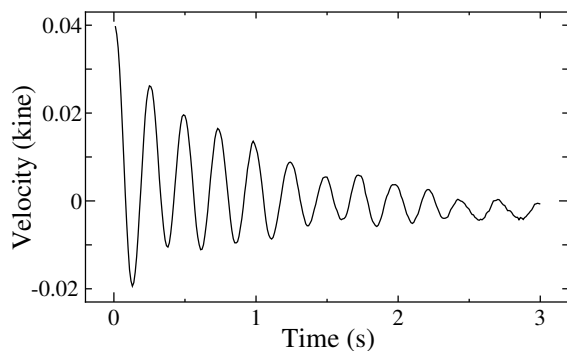


図-9 RD法より得られた自由振動波形の例（独立橋脚P8の橋軸方向）

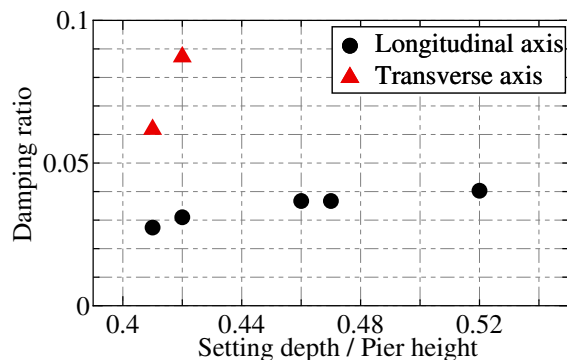


図-10 独立橋脚の減衰定数と値入れ比の関係

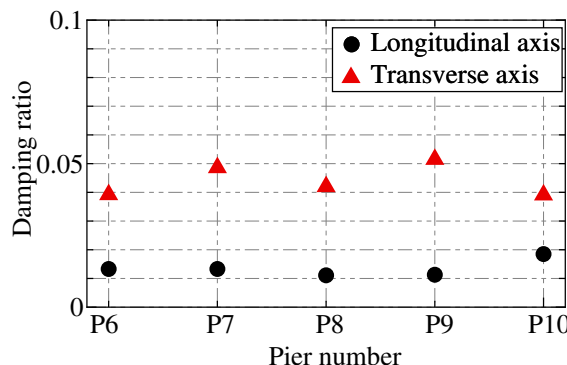


図-11 橋梁完成系の減衰定数

7.2 減衰定数の同定結果

上述の方法で得られた自由振動波形より求めた、それぞれの独立橋脚の1次モードの減衰定数を図-10に示す。縦軸に減衰定数を、横軸に各橋脚の根入れ深さを橋脚高さで除した根入れ比の値を示す。黒丸が橋軸方向の値で、赤三角が橋軸直角方向の値である。この図から、橋軸方向、橋軸直角方向ともに根入れ比が大きくなるに従って減衰定数が大きくなる傾向がわかる。また、減衰定数は橋軸方向に比べて、橋軸直角方向の値が大きいことが読み取れる。これは、橋脚に対する地盤のせん断反力によるエネルギー損失が大きいためだと考えられる。

次に、橋梁完成系における減衰定数の同定結果を図-11に示す。縦軸に減衰定数、横軸に計測を行った路

表-6 解析に使用した各構造要素の等価減衰定数

構造要素	等価減衰定数
上部構造	0.01
免震支承	0.0
橋脚	0.01
基礎	0.1

表-7 解析より求めた減衰定数

橋梁全体系	0.010
P6	0.018
P7	0.013
P8	0.011
P9	0.012
P10	0.016

面上付近の橋脚名を示す。黒丸が橋軸方向の値で、赤三角が橋軸直角方向の値である。橋軸方向の減衰定数は0.01～0.02、橋軸直角方向は0.04～0.05となり、独立橋脚状態と同様に橋軸方向に比べて、橋軸直角方向の減衰定数の値が大きいことが読み取れる。また、橋梁完成系の減衰定数は、独立橋脚の減衰定数に比べて小さい値であることがわかる。これは、地盤の減衰が上部構造などの減衰によって平均化されるためと考えられる。

7.3 ひずみエネルギー比例減衰法を用いた減衰定数の推定

橋梁全体系の減衰定数を、橋梁を構成する各構造要素の減衰定数から推定する方法として、ひずみエネルギー比例減衰法が提案されている¹²⁾。

道路橋示方書（V耐震設計編）¹⁷⁾には、各構造要素の等価減衰定数の参考値が記載されている。しかし、本研究では、常時微動時における橋梁全体系の振動を対象としているため、これらの値よりも減衰定数は小さいと考えられる。そこで、道路橋示方書（V耐震設計編）に示される値の約1/10の大きさの減衰定数を使用し、定性的傾向を確認するため橋軸方向のみについて独立橋脚および橋梁完成系における減衰定数を推定した。解析に使用した各構造要素の減衰定数を表-6に示す。

橋梁完成系および独立橋脚における1次モードの減衰定数の解析値を表-7に示す。以上の結果から、橋梁完成系の減衰定数は、独立橋脚の減衰定数に比べて小さい値となり、また、独立橋脚では、値入れ比が大きいほど減衰定数が大きくなるなど、実測値とほぼ同様の傾向が確認された。

8. おわりに

本研究では、上部構造がまだ架設されていない独立状態の RC 橋脚 5 基を対象として常時微動計測を行い、橋脚周りの根入れを含めた地盤が独立状態の橋脚の固有振動数や減衰定数に及ぼす影響を検討した。また、これらの橋脚に上部構造が架設された後の橋梁完成系についても常時微動計測を行い、同様に固有振動数や減衰定数を確認した。

さらに、独立橋脚および橋梁完成系を対象として、地盤ばねに加えて根入れをモデル化したばねを考慮した 2 次元あるいは 3 次元の解析モデルを構築し、固有振動解析を行い、常時微動状態の独立橋脚および橋梁完成系のモデル化の妥当性を検討した。ただし、根入れ部分の変形係数は不明なため、独立橋脚 P10 の橋軸方向の 1 次固有振動数の実測値と解析値が一致するように変形係数を決定した。

以上のような本研究の検討を通して得られたおもな結論を以下に示す。

1. 独立橋脚の常時微動計測から同定した橋軸方向および橋軸直角方向の固有振動数は、基礎地盤の影響はもちろん橋脚周囲の根入れ地盤の影響も受けることを確認した。また、同定した独立橋脚の減衰定数も根入れ地盤の影響を受け、根入れの割合が大きいほど減衰定数が大きくなり、橋軸方向よりも橋軸直角方向の減衰定数の方が大きい。
2. 橋梁完成系の常時微動計測から同定した橋軸方向および橋軸直角方向の減衰定数は、独立橋脚時の減衰定数よりも小さくなり、やはり橋軸方向よりも橋軸直角方向の減衰定数の方が大きい。
3. 橋脚基礎地盤の影響に加えて、橋脚周囲の根入れの影響を考慮した独立橋脚の解析モデルにより求められる固有振動数の解析値は、根入れの影響を受ける独立橋脚の固有振動数の実測値を適切に再現することができた。また、この独立橋脚の解析モデルを組込んだ橋梁完成系の解析モデルにより求められる固有振動数の解析値は、常時微動時の免震支承の剛性を考慮することによって、橋梁完成系の固有振動数の実測値をある程度再現することができた。

今回の検討では、常時微動という微振動状態で計測されたデータに基づいて橋梁完成系のモデル化を検討しているが、さらに再現性の高い解析モデルの構築のためには、独立橋脚および橋梁完成系の常時モニタリングなどを行い、地震時など振動レベルの異なる状態におけるデータを収集、検討していくことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岡林隆敏，山森和博，讃岐康博，田村太一朗：近接固有値を有する構造物の振動特性推定，土木学会論文集，No.633/I-49，pp.93-102，1999.10.
- 3) 奥松俊博：橋梁維持管理のための振動遠隔モニタリングシステムの開発および実橋梁への適用，長崎大学大学院博士論文，2008.3.
- 4) 阿部雅人，藤野陽三，長山智則，池田憲二：常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.261-274，2001.
- 5) 小坪清真，鳥野清：常時微動測定による構造物の振動性状解析，土木学会論文集，No.222，pp.25-36，1974.2.
- 6) 大町達夫，紺野克昭，遠藤達哉，年縄巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定法の改良と適用，土木学会論文集，No.489/I-27，pp.251-260，1994.4.
- 7) 吉岡勉，原田政彦，山口宏樹，伊藤信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討，構造工学論文集，Vol.54A，pp.199-208，2008.3.
- 8) 岡林隆敏，奥松俊博，中宮義貴：常時微動に基づく AR モデルによる構造物振動数の高精度自由推定，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.271-282，2004.4.
- 9) 風間基樹，稲富隆昌：剛体-ばねモデルを用いた根入れのある剛体構造物の地震応答解析，土木学会論文集，No.410/I-12，pp.425-434，1989.10.
- 10) 高橋広人，福和伸夫，林宏一，飛田潤：地盤モデルに基づく 2 地点間の伝達関数と地盤観測記録を用いた任意地点における地震動の推定，日本建築学会構造系論文集，No.609，pp.81-88，2006.11.
- 11) 内藤幸雄，石橋敏久：常時微動から求めた建物の伝達関数が風の影響で見かけ上変化するメカニズムの検討，日本建築学会構造系論文集，No.497，pp.57-64，1997.7.
- 12) 日本建築学会：建築物の減衰，丸善，2000.10.
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I 共通編，IV 下部構造編），丸善，2002.3.
- 14) 株式会社富貴沢建設コンサルタンツ：新鬼怒川渡河道路橋梁詳細設計業務委託報告書，2003.3.
- 15) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三：免震用積層ゴム支承の水平 2 方向を含む復元力特性とそのモデル化，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.125-144，2002.1.
- 16) 土木学会構造工学委員会：橋梁振動モニタリング

のガイドライン，構造工学シリーズ 10，2000.10.
17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設

計編），丸善，2002.3.

(2009 年 9 月 24 日 受付)