

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検討

宇都宮大学 学生員 ○ 中野 貴代美
フェロー 中島 章典
日本大学 正会員 中村 晋

1. はじめに

一般に、橋梁などの構造物は地盤に支持されているため、地盤が橋梁の振動特性に影響を及ぼす。これまで、地盤が構造物の振動に及ぼす影響を明らかにするため、構造物-地盤系の動的相互作用などに関する研究が広範になされてきている。この場合、橋脚は根入れされている場合も多く、根入れが構造物-地盤系の動的相互作用に及ぼす影響を検討した研究もなされてきている^{1),2)}。

一方、橋梁全体系などの常時微動計測を行い、橋梁や周辺地盤の振動特性を明らかにしようという試みも盛んに行われている^{3),4)}。しかし、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個々の部材に加えて、基礎周辺の地盤もその振動特性に影響を及ぼすため、地盤の影響を個別に評価することが難しいと考えられる。

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などが橋脚の固有振動数や減衰定数に及ぼす影響を検討している。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ている。さらに、これら独立橋脚および橋梁完成系に対して、特に、根入れ部分に着目した解析モデルを構成して固有振動解析を行い、得られた解析値を実測された固有振動数と比較し、実橋梁の挙動を再現する橋梁のモデル化について検討している。

2. 常時微動計測

本研究で計測の対象とした橋梁は、図-1に示す栃木県宇都宮市内にある板戸大橋であり、橋長920mを有する4+6+7径間構成の連続非合成鋼桁橋である。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、鋼コンクリート合成床版からなっている。

常時微動計測には、サーボ型常時微動計測器を使用した。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。

(1) 独立橋脚状態における計測概要

RC橋脚に上部構造がまだ架設されていない、図-1-bに示すP6からP10の5基の独立橋脚状態を対象として計測を行った。橋脚の頂部と地盤表面の2ヶ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方向について、速度の時刻歴を時間刻み0.01秒で180秒間(18000点)計測を行った。

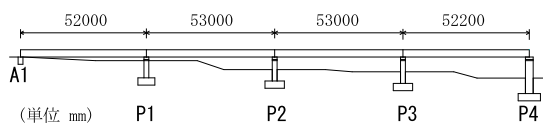


図-1-a A1-P4

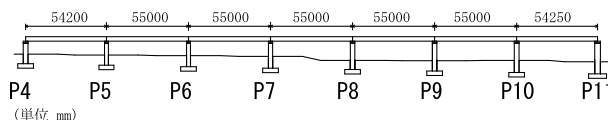


図-1-b P4-P11

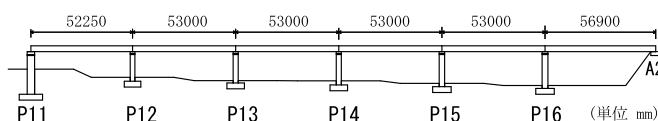


図-1-c P11-A2

図-1 計測した橋梁

(2) 橋梁完成系における計測概要

上部構造が架設された橋梁完成系において、橋梁路面上、地盤表面の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方向について同時に計測を行った。時間刻みは0.005秒で120秒間(24000点)である。図-1-bに示す、P6からP10の5箇所においてそれぞれ計測を行った。なお、各橋脚における橋脚高さ、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。

また、P7からP9の橋梁路面上において、計測器を長手方向に6つ設置し、橋軸方向、橋軸直角方向の計測を同時に行った。

3. 固有振動解析

(1) 独立橋脚のモデル化

a) 橋脚のモデル化

実橋脚を図-2に示すように、平面骨組のための有限要素法に基づきモデル化し、固有振動解析を実施した。実橋脚のモデル化にあたり、フーチング、張り出し部分、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(弾性係数: E_c)とが一体となって断面を構成するRC部材である。このモデル化にあたっては、鉄筋とコンクリートの弾性係数比 $n(=E_s/E_c)$ を求め、鉄筋の断面積を n 倍することで、鉄筋を弾性係数が E_c のコンクリートに置き換え、実断面を均一なコンクリートの換算断面に置換した。

b) 地盤のモデル化

橋脚周辺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、橋脚下の地盤の変形をモデル化するため、図-2に示すように、橋脚基部の節点に水平、鉛

Key Words: 常時微動, 独立橋脚, 橋梁完成系, 固有振動数, 減衰定数

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科科学際先端システム学専攻 Tel.028-689-6208 Fax.028-689-6208

表-1 各橋脚高さおよび根入れ長 (単位: m)

橋脚名	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
橋脚長	11.1	12.4	13.4	18.1	19.1	20.1	21.1	22.0
根入れ長	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	23.0	24.0	24.9	18.2	19.1	20.1	21.0	21.9
根入れ長	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

直, 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. ばね定数の算出に際しては, 地盤条件に基づき, 道路橋示方書⁵⁾に記載されている方法を参考にした.

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 2 面にばねを設けて考慮する. 橋脚前面の水平反力ばね定数, 橋脚両側面の水平せん断反力ばね定数を足し合わせ, 根入ればね定数とした. ただし, 橋脚は周辺の地盤を一度掘削してから架設しているため, 周辺地盤の固さは元の地盤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, 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変形係数を決定した. 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水平ばねのばね定数を決定した.

(2) 橋梁完成系のモデル化

橋梁完成系を図-3 に示すように, 立体骨組のための有限要素法に基づきモデル化し, 固有振動解析を実施した.

a) 橋脚のモデル化

独立橋脚のモデル化の際に考慮した事項に加えて, ねじりの影響を考慮している.

b) 橋台のモデル化

橋台は橋脚と同様な直接基礎 (A1), およびフーチング部分と杭部分からなる杭基礎式 (A2) の構造となっている. フーチング部分は RC 部材で構成されている. フーチング下の杭部分にかかる地盤の抵抗力は橋軸方向, 橋軸直角方向の 2 つの水平ばね, 鉛直ばね, および各軸回りの回転ばねの計 6 つのばねで考慮している.

c) 地盤のモデル化

地盤のモデル化は独立橋脚の際と同様に, 段階的に行った. まず, 橋脚下の地盤の変形をモデル化するため, 橋脚基部の節点に橋軸方向, 橋軸直角方向の 2 つの水平ばね, 鉛直ばね, および各軸回りの回転ばねの計 6 つのばねを挿入することで考慮している. ここでは独立橋脚時に使用し

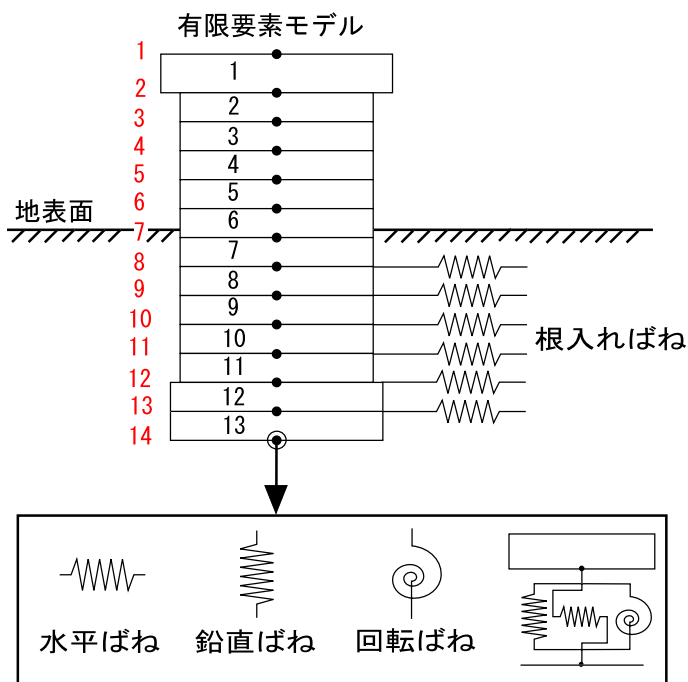


図-2 解析モデル-独立橋脚

たばね定数を用いている. また, 根入ればねは, 根入れ部分の節点に独立橋脚の際に使用した, 橋軸, 橋軸直角方向の水平ばねを挿入することでモデル化を行った. 表-1 に示す結果より, 根入れ深さ部分の各節点に挿入する.

d) 支承のモデル化

対象橋梁に使用されている支承は, 鉛プラグ入り積層ゴム支承である. 積層ゴム支承の剛性は, 水平変位依存性, 面圧依存性, 温度依存性といった特性を持つ. モデル化にあたっては, 支承部に, 橋軸方向, 橋軸直角方向の 2 つの水平ばね, 鉛直ばね, および各軸回りの回転ばねの計 6 つのばねを挿入している.

ここで, 常時微動のような微小振幅時における支承の水平荷重は, 1 次剛性時の水平荷重と比較すると大きい値となるため, 支承の剛性が上昇する.

そこで, 積層ゴム支承の特徴である水平変位依存性を考慮する必要がある. 本研究では, 阿部ら⁶⁾によるゴム支承の微小振幅時における実験結果より, 支承のばね定数は 1 次剛性の 10 倍の値とした.

(3) 上部構造のモデル化

上部構造は, 鋼桁 (弾性係数: E_s) とコンクリート床版 (弾性係数: E_c) とが一体となって断面を構成している. モデル化にあたっては, 橋脚と同様に, 鋼桁とコンクリートの弾性係数比 $n (=E_s/E_c)$ を求め, 鋼桁の断面積を n 倍するこ

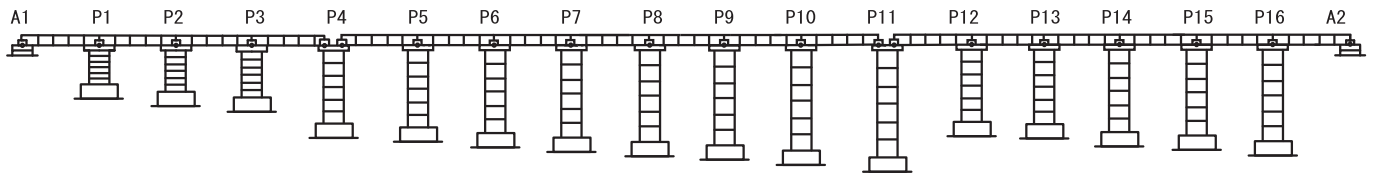


図-3 解析モデルー橋梁完成系

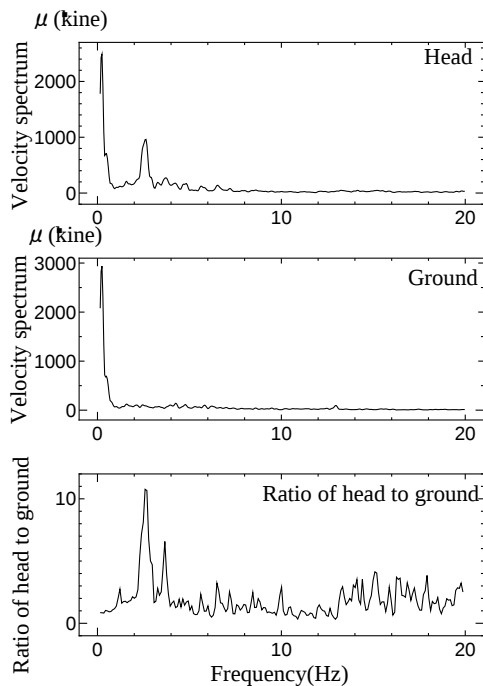


図-4 FFT 解析結果

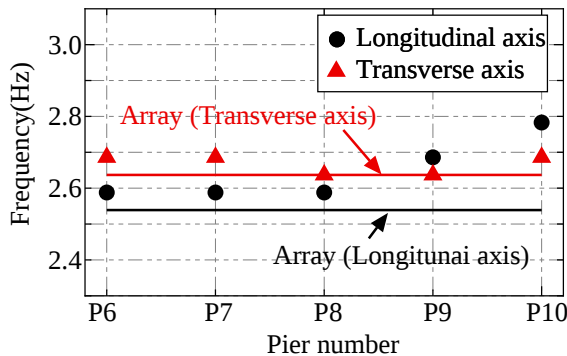


図-5 FFT 解析結果 (橋梁完成系)

とで、鋼桁を弾性係数が E_c のコンクリートに置き換え、実断面を均一なコンクリートの換算断面に置換した。また、橋脚と同様に、ねじりの影響を考慮した。

4. 実測からの振動数算定方法

常時微動計測より得られた時刻歴波形をFFT解析することで固有振動数の実測値を求めている。独立橋脚の場合、橋脚頂部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のピークの位置の振動数から固有振動数の実測値を求めた。

一方、橋梁完成系の場合、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

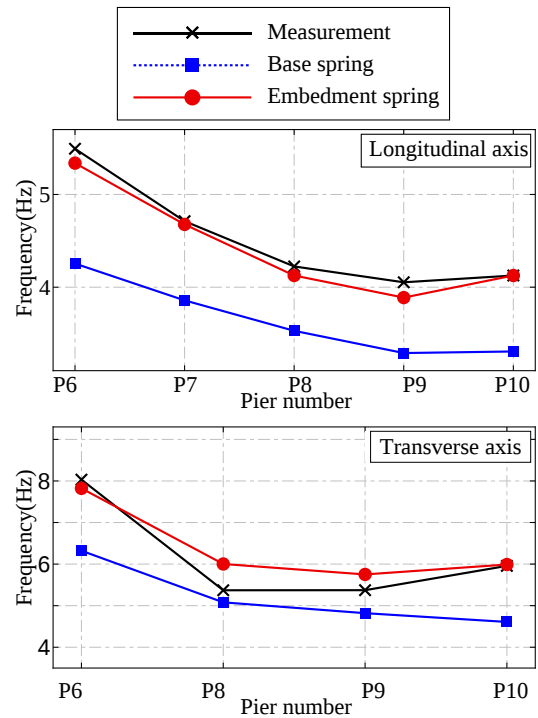


図-6 独立橋脚における実測値と解析値

ルピークの位置の振動数から固有振動数の実測値と、橋梁路面上のフーリエスペクトルを総合的に判断して求めた。

例として、橋梁完成系におけるP8橋軸方向の結果を図-4に示す。上段が橋梁路面上のスペクトル図、中段が地表面のスペクトル図、下段が橋梁橋梁路面上のスペクトル図を地表面のスペクトルで除したものである。

ここで、橋梁完成系での各橋脚における実測結果を図-5に示す。●で示しているのが橋軸方向、△で示しているのが橋軸直角方向の結果である。

橋梁完成系の場合、橋軸方向、橋軸直角方向の固有振動数が近接しているため、お互いに影響を及ぼしていると考えられ、振動数にバラツキが見られる。そこで、橋梁路面上の長手方向に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-5における実線が長手方向に計測器を設置した場合である。橋軸方向ではP6からP8で、橋軸直角方向では、P8、9でマークと実線との値に近い値をとるという結果になった。よって橋軸方向では、P6からP8の実測値である2.588Hz、橋軸直角方向では、P8、9の実測値である2.637Hzを固有振動数とする。

5. 固有振動数の比較結果

独立橋脚において、実測結果から同定した固有振動数と解析結果の比較を図-6に示す。縦軸は1次固有振動数を表わし、横軸は橋脚名を表している。

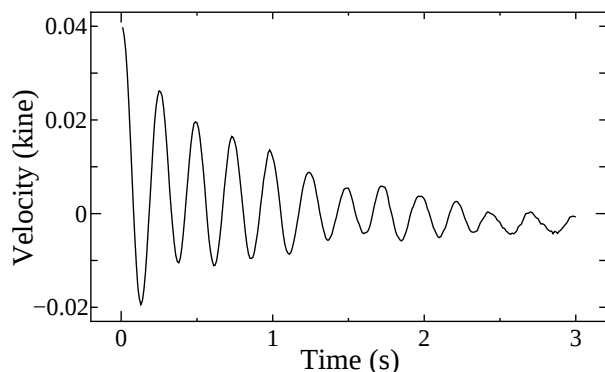


図-7 RD 法より得られた自由振動波形

橋軸方向、橋軸直角方向ともに根入れ部分をモデル化した場合では、根入れの地盤によって、基部にばねを挿入した場合から固有振動数が上昇している。根入れ部分の地盤の反力が橋脚の固有振動特性に与える影響が表れていると言える。

橋梁完成系における実測結果から同定した固有振動数と解析結果の比較を表-2に示す。計測より得られた実測値、および支承の剛性に1次剛性の値を使用した解析値、および10倍を使用した解析値の結果を示す。

支承の剛性を1次剛性の値とした解析値と実測値との誤差は、橋軸方向で35.0%，強軸直角方向で27.2%という結果になった。一方、実測値と支承の剛性を1次剛性の10倍の値を使用した解析値の誤差は、橋軸方向では6.8%，橋軸直角方向では5.8%という結果となり、橋梁完成系においては、地盤の影響に加えて、支承の剛性が固有振動数に与える影響が大きいことが言える。

6. 減衰定数の算定

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。例として、図-7に独立橋脚のP8橋軸方向に対して求められた自由振動波形を示す。また、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減衰定数を図-8に示す。縦軸に減衰定数、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。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、橋梁完成系の結果を図-9に示す。縦軸に減衰定数、横軸に計測を行った路面上付近の橋脚名を示す。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、独立橋脚時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からだと考えられる。

7. 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橋脚を対象として常時微動計測を行い、根入れ部分を含む地盤

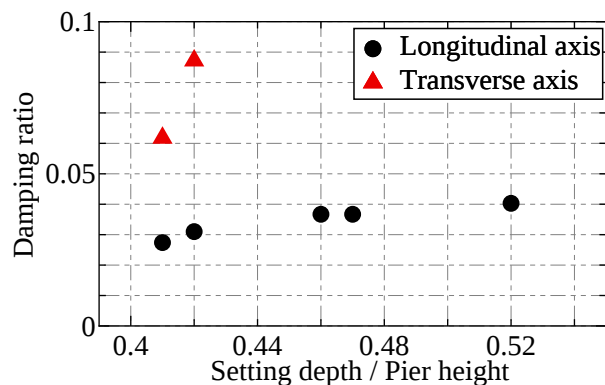


図-8 独立橋脚の減衰定数

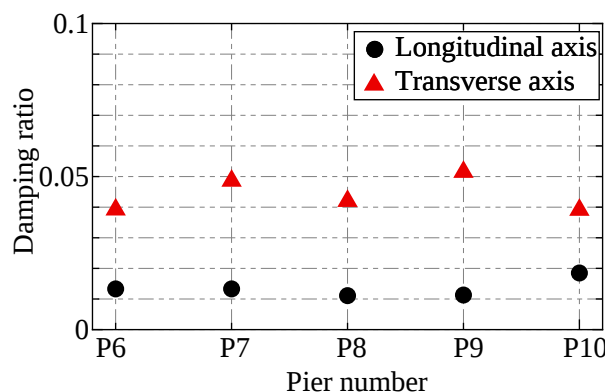


図-9 橋梁完成系の減衰定数

表-2 橋梁完成系における固有振動解析結果 (Hz)

	実測値	解析値		誤差 (%)
		1次剛性	10倍	
橋軸	2.588	1.683	2.413	6.8
橋軸直角	2.637	1.920	2.789	5.8

が橋脚の固有振動数および減衰定数に及ぼす影響を確認した。次に、上部構造が架設された橋梁完成系を対象としても常時微動計測を行い、橋梁完成系の固有振動数および減衰定数を確認した。さらに、これら独立橋脚および橋梁完成系について、特に、根入れ部分に着目した解析モデルを用いて固有振動解析を行い、得られた解析値を実測値と比較して、解析モデルの妥当性を確認している。

参考文献

- 1) 小坪清真, 高西照彦: 杭基礎-地盤系における地盤係数の振動特性と付加質量, 土木学会論文集, 第305号, pp.35-46, 1981.1.
- 2) 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, 第410号, pp.425-434, 1989.10.
- 3) 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, 第489号, pp.251-260, 1994.4.
- 4) 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動推定, 土木学会論文集, 第759号, pp.271-282, 2004.4.
- 5) 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.
- 6) 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, 第58号, pp.125-144, 2002.1.
- 7) 中島章典, 角田真彦, 中野貴代美, 中村晋, 長瀬政明: 常時微動計測を用いたRC橋脚の振動特性に関する検討, 第11回保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム, pp.137-140, 2008.1.