

## 常時微動計測を用いたRC橋脚の振動特性に関する検討

中島章典<sup>1</sup>・角田真彦<sup>2</sup>・中野貴代美<sup>3</sup>・中村晋<sup>4</sup>・長瀬政明<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

<sup>2</sup>学生会員 東京工業大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>3</sup>学生会員 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

<sup>4</sup>正会員 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)

<sup>5</sup>栃木県宇都宮土木事務所 (〒321-0974 宇都宮市竹林町 1030-2)

### 1. はじめに

常時微動計測とは、交通振動、風、音などの影響で常に微振動する構造物を、高感度のセンサーを使って計測し、構造物の振動特性を得るものである。特別の加振装置を必要としないため橋梁の振動特性を調べるためにも種々利用されている<sup>1),2)</sup>。

一方で、橋梁などの構造物は地盤に支持されているため、地盤がその振動特性に影響を及ぼすが、橋梁全体系の常時微動計測を行うと、上部構造、支承など各構造要素の振動特性が計測データに反映され、地盤の影響を明確に把握することが難しい。したがって、上部構造がまだ架設されていない橋脚の振動挙動の計測を行えば、地盤と橋脚の振動特性を持つ計測データを得ることができ、地盤が橋脚の振動特性に与える影響を把握しやすいと考えられる。

そこで本研究では、写真-1に示すようなRC橋脚を対象とした常時微動計測を行い、また、地盤の影響を地盤ばねによりモデル化した橋脚-基礎-地盤系の固有振動解析を行って、地盤が橋脚の固有振動特性に与える影響を考察した。まず、独立状態のRC橋脚を対象として、常時微動計測を実施し、計測データに基づいて固有振動数を同定した。次に、固有振動解析においては、解析モデルの地盤条件を段階的に変化させ、固有振動数を算出した。そして、計測結果に基づいて同定した固有振動数と解析から得られた固有振動数を比較し、各モデルの再現性を検討した。

### 2. 常時微動計測概要

本研究において対象とした橋梁は、写真-1に示す宇都宮市内に建設中の新鬼怒川渡河橋である。本橋は全長920mで、4+6+7径間構成の連続非合成鋼鈑桁橋で、直接基礎を有する16本の小判型断面RC橋脚、2基の

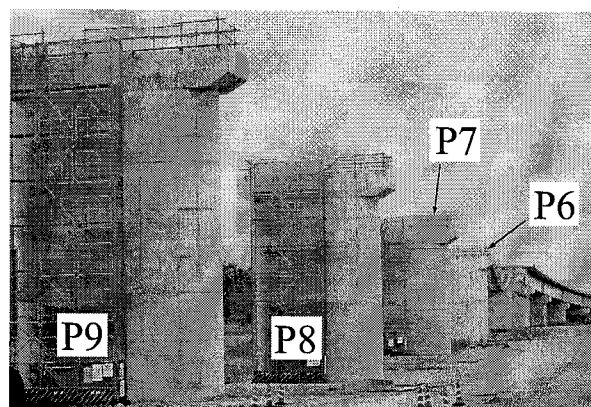


写真-1 対象とした橋脚

橋台、免震支承、鋼コンクリート合成床版からなる。そのうち、2007年3月現在で、P6橋脚からP10橋脚にはまだ上部構造が架設されておらず、それらの橋脚は独立の状態にあった。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、それぞれのN値は30、100とされている。

そこで、それら橋脚単体の振動特性を把握するために、それぞれの橋脚の頂部位置と地盤表面位置の2箇所にサーボ型速度計を設置し、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)計測した。計測においては、1回目に橋軸方向と鉛直方向の計測を行い、2回目に橋軸直角方向と鉛直方向の計測を行った。計測した常時微動の時刻歴データをFFT解析し、フーリエスペクトルを求めた。そして、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位置の振動数からそれぞれの橋脚の固有振動数を同定した。

具体的には、橋脚頂部で計測した速度波形  $f(t)$  と地表

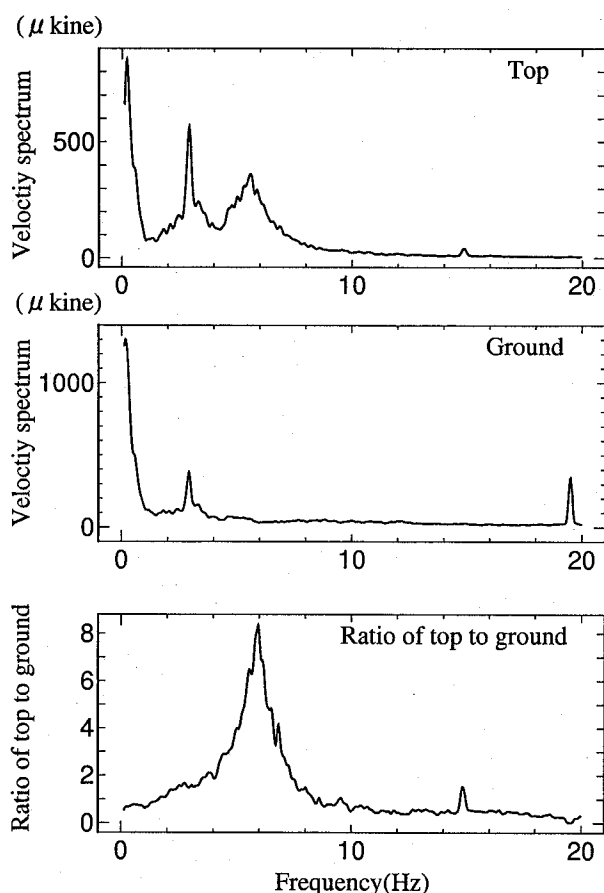


図-1 常時微動データのスペクトル図

表-1 橋脚高さと根入れ長さ

| 橋脚名    | P6   | P7   | P8   | P9   | P10  |
|--------|------|------|------|------|------|
| L (m)  | 20.1 | 21.1 | 22.0 | 23.0 | 24.0 |
| EL (m) | 10.4 | 9.9  | 9.1  | 9.6  | 11.1 |

面で計測した速度波形  $g(t)$  のフーリエスペクトル  $F(\omega)$ ,  $G(\omega)$  を求め、このスペクトルの比  $F(\omega)/G(\omega)$  から橋脚の伝達関数を算定する。その卓越振動数から橋脚の固有振動数を同定した。ただし、地表面の速度波形  $g(t)$  は、実際には橋脚基部の入力波とは異なるが、近似的にこれを橋脚基部の入力波とみなした。

また、それぞれの時刻歴データからフーリエスペクトルを求める際には、4096 点を 1 回分のデータとし、全 18000 点のデータから取り出すデータ範囲を 15 秒ずつずらして 10 回分のデータを取り出して FFT 解析を行った。以下では、10 回分のデータから得られたスペクトルを平均化したものを実測データとした。

一例として、P10 橋脚の橋軸直角方向のスペクトル図を図-1 に示す。上から、橋脚頂部、地表面上、橋脚頂部のスペクトルを地表面上のスペクトルで除したものである。一番下のスペクトル比の図から、P10 橋脚の 1 次固有振動数は 5.96Hz と同定された。

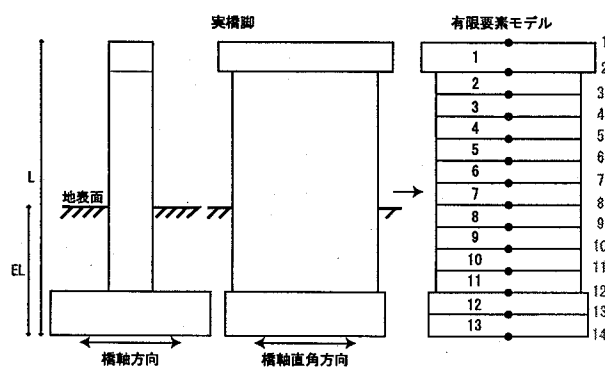


図-2 実橋脚と有限要素モデル

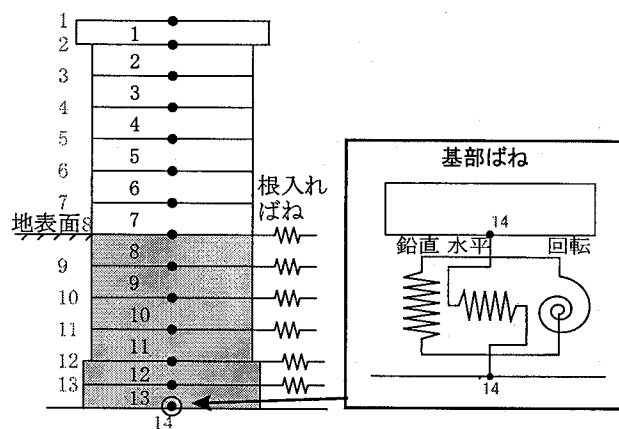


図-3 根入ればねを有する橋脚-地盤系の有限要素モデル

### 3. 解析概要

#### 3.1 橋脚のモデル化

対象とした RC 橋脚を図-2 に示すように、フーチングを含めて平面骨組要素でモデル化した。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  $n(=E_s/E_c)$  を使い、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。また、固有振動解析においては橋脚躯体のせん断変形および回転慣性の影響も考慮した。

なお、表-1 には、対象とした橋脚の高さおよび根入れ長さを示している。いずれの橋脚も橋脚高さの 50% ほどが根入れされていることがわかる。

#### 3.2 地盤のモデル化

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、橋脚周り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、橋脚基部フーチング下の節点を水平、鉛直、回転方向に完全拘束した場合（基部固定条件）および橋脚基部フーチング下の節点に水

平, 鉛直, 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た場合(地盤ばね考慮)の2通りで解析を行った。

次に, 根入れ部分の地盤の影響を考慮することを試みた。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, 橋脚周り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と考えられる。したがって, 橋脚周りの根入れ地盤の影響もばねを用いてモデル化した。つまり, 図-3に示すように地表面以下の節点に水平ばねを挿入する。このとき, 単位面積あたりの水平ばねのばね定数は地盤の変形係数に基づいて決定されるが, 本研究では, 橋軸方向のP10の実測値と地盤ばねおよび根入れ部分の地盤の影響を考慮した解析値の1次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, 橋軸方向および橋軸直角方向の水平ばねのばね定数を決定した<sup>3)</sup>。

#### 4. 解析結果と実測結果の比較

図-4は, 実測に基づいて同定した橋脚の固有振動数と解析値の比較を橋軸方向, 橋軸直角方向について示している。縦軸は各橋脚の1次固有振動数を表し, 横軸は橋脚名を表す。図中の×, ■, △, ●がそれぞれ実測値, 橋脚基部を固定とした解析値, 橋脚基部に地盤ばねを考慮した解析値, 橋脚基部の地盤ばねに加えて根入れの影響も考慮した解析値である。

図に示す実測値と橋脚基部を固定した場合の解析値を比較すると, 橋軸方向, 橋軸直角方向とも差異が認められ, 特に, 後者で差異が大きい。図-4-aに示す橋軸方向では, 実測値よりも解析値が低く, 図-4-bに示す橋軸直角方向では, 逆に実測値よりも解析値が高く, 方向によって傾向が異なることがわかる。これは, 地盤の影響によるものと考えられるが, いずれにしても橋脚基部を固定した解析モデルは橋脚-基礎-地盤系の固有振動特性を表すことができていない。

これに対して, 橋脚基部にばねを挿入すると, 両方向ともに実測値より▲で示す解析値の固有振動数の方が低く, 特に, 橋軸直角方向でその低下の度合いが大きい。これは, 橋脚の剛性が高い橋軸直角方向で地盤の影響が大きく, 橋脚の剛性がそれより低い橋軸方向で地盤の影響が小さいためと考えられる。このため, 橋脚基部にばねを挿入した解析モデルも実際の橋脚-基礎-地盤系の振動特性を再現できていない。

一方, 橋脚基部にばねを挿入した上に, 根入れ部分の影響を考慮した●で示す解析値は, P10橋脚以外でも, 両方向ともある程度実測値に近い結果になって

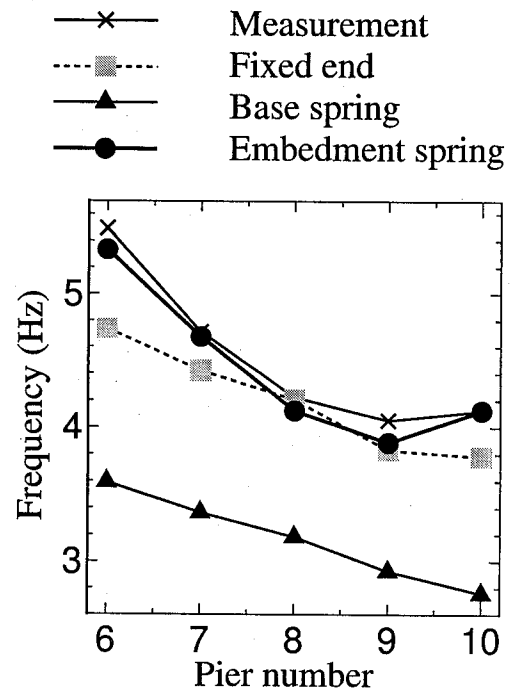


図-4-a 橋軸方向

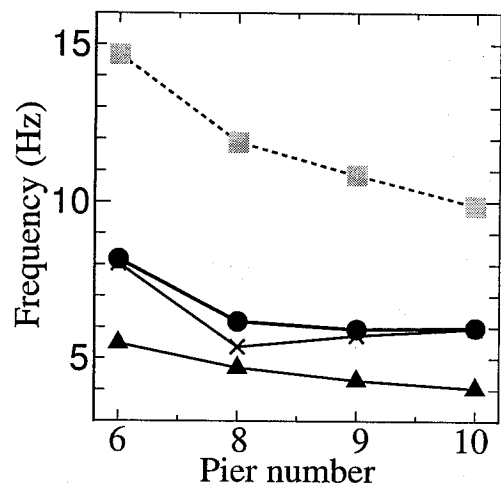


図-4-b 橋軸直角方向

図-4 固有振動数の実測値と解析値の比較

いる。橋軸方向では, 根入れ部分で地盤に直交して接触する橋脚の面積が大きいのにに対して, 橋軸直角方向では相対的にその面積が小さいので, 橋軸方向で根入れの影響を考慮することによる固有振動数の増加が大きい。

#### 5. 固有振動モードの比較

図-5にP10橋脚の1次固有振動モードを示す, 横軸は無次元化した変位を表し, 縦軸は橋脚の高さを表す。■, ▲, ●がそれぞれ橋脚基部を固定とした解析モデル, 橋脚基部に地盤ばねを考慮した解析モデル, 橋脚基部の地盤ばねに加えて根入れ部分の地盤ばねも考慮

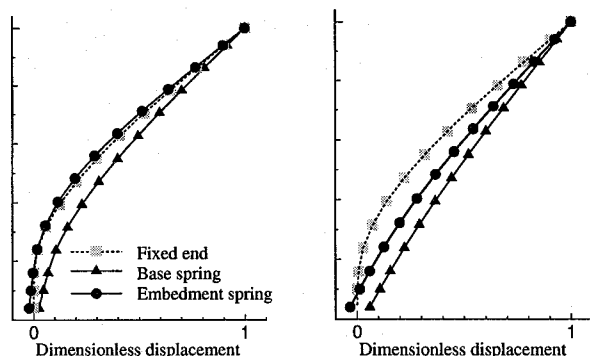


図-5-a 橋軸方向

図-5-b 橋軸直角方向

図-5 1次固有振動モード

した解析モデルの固有振動モードである。

図-4において、橋脚基部を固定した場合と橋脚基部にばねを挿入した場合の解析結果を比較すると、橋軸方向、橋軸直角方向ともに橋脚基部にばねを挿入したモデルの固有振動数が橋脚基部を固定したモデルの固有振動数よりも低い結果となった。つまり、橋脚の下地の地盤は固有振動数を低下させる働きをしている。特に、橋軸直角方向では、橋脚基部にばねを挿入したモデルの固有振動数が橋脚基部を固定したモデルの固有振動数よりも大幅に低くなった。これに対応して、図-5を見ると、橋脚基部に地盤ばねを考慮した解析モデルの橋軸直角方向のモード形状は橋軸方向のモード形状よりも直線的であることも確認できる。これは、橋軸直角方向では、橋脚の剛性が高いためだと考えられる。つまり、基部にばねを挿入すると、橋軸直角方向では、固有振動数が大幅に低くなり、橋脚のモード形状が直線的で橋脚基部の回転変位も大きくなる。

一方、図-4に示したように、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、橋脚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。また、橋軸方向では、橋脚基部を固定した場合の固有振動数よりも根入れを考慮した場合の固有振動数が高く、根入れの影響が強く現れている。図-5の根入れを考慮したモデルのモード形状を見ると、橋軸方向では、根入れを考慮したことで橋脚に曲げ変形が再び生じ、橋脚基部の回転変形も減少している。これに対して、橋軸直角方向では、根入れを考慮しても橋脚は直線的に変形し、橋脚基部の回転変形にもあまり変化が見られない。

このように、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は、橋軸直角方向よりも橋軸方向で強く現れている。これは、地盤の水平反力を受ける橋脚の面積が橋軸直角方向よりも橋軸方向の方が広く、地盤からの拘束力が強いからだと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、独立のRC橋脚を対象とした常時微動計測を行い、また、地盤の影響を地盤ばねによりモデル化した橋脚-基礎-地盤系の固有振動解析を行って、地盤、特に、根入れ部分が橋脚の固有振動特性に与える影響を考察した。

その結果、根入れ部分は橋脚の固有振動数に大きい影響を与え、この影響は橋軸方向と橋軸直角方向で傾向が異なることがわかった。また、このような橋脚の特性を根入れ部分も考慮した固有振動解析によりある程度再現することができた。

## 参考文献

- 1) 土木学会：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，2000.10.
- 2) 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例，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.261-274，2001.10.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），丸善，1996.12.