異なる振動レベルにおけるコンクリート橋の 振動特性の変化に関する研究

> 宇都宮大学 学生員 ○竹嶋竜司 フェロー会員 中島章典 学生員 リーム アルセナウィ 学生員 伊藤悠 日本大学 正会員 中村晋

1. はじめに

橋梁構造物などの固有振動数や減衰定数は構造物の動 的挙動に大きな影響を与えるため、それらの振動特性を 振動計測より確認することは重要である。そのため、これ までに様々な橋梁構造物に対して振動計測が行われてきた ¹⁾⁻⁵⁾.それらの中には、振動挙動を確認するために起振 機などの大型器材を導入している事例も多く見られるが、 これらの方法では振動特性を確認するための有意な振動レ ベルの振動挙動が得られる一方で、大型器材導入のために 必要な労力を理由に既設橋梁を対象とした振動計測は簡単 ではないとされている⁴⁾.

そこで最近では、加振手段を必要とせず振動データが容易に得られるという利点から常時微動を用いた振動計測事 例が数多く見られる³⁾⁻⁵⁾.しかしながら、一般に構造物の 振動特性は振動振幅の影響を受けることが知られており、 特に常時微動のような微小振動下で得られた振動特性と、 設計上問題となる実地震動のような大きな振動下で得られ た振動特性との対応が疑問視されることがある^{4),5)}.

そこで本研究では、まず比較的容易に加振することがで きる鉄筋コンクリート橋脚模型について微小振動から実地 震動レベルの大きな振動下で把握した振動特性の変化につ いて検討した後、上部構造を設置した橋梁完成系模型の状 態でも同様の検討を行う.

その後,実際の2径間連続桁橋の上部構造がまだ架設されていない独立橋脚1基について微振動下の異なるレベルで振動計測行った後,上部構造架設後の橋梁完成系についても同様の計測を行いその振動特性について検討を行う.

以上の橋梁模型と実橋梁構造物を対象とした検討より, 常時微動のような微振動下から,実地震動レベルの大きな 振動下で把握した固有振動数や減衰定数などの振動特性の 変化について考察する.

2. 計測対象

(1) RC 橋梁模型

橋梁模型を対象とした振動実験を実施するため,鉄筋コ ンクリートを用いて図-1のような模型を作製した.これ よりこの模型について表現する場合,橋梁完成系の状態を 橋梁模型,独立橋脚の状態を橋脚模型とした.自由振動実 験は橋梁模型とそれを構成する2体の橋脚模型を対象と して異なる振動レベルで実施した.橋梁模型は設置の都合 上図-1のように,振動台とH鋼梁をボルトで固定した後, H鋼梁の上に橋脚模型を置いてフーチング部をボルトでH 鋼梁と固定している.また,橋脚模型頂部と上部構造模型 の間に鋼板を挟み,それぞれの模型から突き出すように配 置したボルトを利用して図-1のように橋脚模型と上部構



図-2 橋脚模型の自由振動波形例

造模型を接合している.

橋脚模型では橋脚頂部に,橋梁模型では上部構造の上面 に橋軸水平方向の加速度を計測するよう高感度加速度計を 設置した.また,どの計測でも基部の固定度を確認するた めフーチングの上面鉛直方向の加速度を計測している.

自由振動実験より得られた波形の一例を図-2に示す.図 -2は橋梁模型を構成する橋脚模型を対象として計測を実施した時の波形であり、上段が橋脚頂部の橋軸水平方向の 自由振動波形で、下段がこの時に同時に計測されたフーチ ング上面鉛直方向の自由振動波形である.どの振動レベル の計測でも、フーチング上面鉛直方向で自由振動波形が確 認されたことより、H 鋼梁とボルトを用いて橋脚模型の基 部を固定してもフーチング部がわずかながら振動してしまい、エネルギーの逸散が生じていることが予想される.

(2) 実橋梁(新田代橋)

実橋梁の計測対象は栃木県那須塩原市内にある新田代橋 である.形式は2径間連続桁橋であり、橋脚は小判型張り 出し式 RC 橋脚となっている.橋脚の高さは15.4m,地表 面から橋脚頂部までが実測5.65m,基礎は直接基礎形式で

Key Words: 振動計測,振動レベル,固有振動数,減衰定数,コンクリート橋
 〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6210



写真-1 新田代橋(独立橋脚状態)



写真-2 新田代橋 (橋梁完成系)

フーチング部が根入地盤に埋まっている.2010 年度に上 部構造がまだ架設されていない独立橋脚状態で振動計測を 実施した.2011 年度に上部構造が設置されたため,橋梁 完成系についても振動計測を実施している.写真-1 は独 立橋脚状態,写真-2 は橋梁完成系での振動計測時の写真 である.

振動計測は微小振動領域ではあるが振動レベルに可能な 限り差をつけて実施した.まず,常時微動計測を実施した 後,複数人が橋脚の頂部に集まり同時に跳ぶことで加振し その振動を計測した.

計測器はサーボ型の常時微動計を使用し,常時微動計測 時には橋脚頂部と地表面に,人力加振時には頂部にのみに 設置をした.それぞれの計測では,橋軸,橋軸直角,鉛直 方向の3方向の速度応答を計測している.

新田代橋の計測で得られた応答波形の一例を図-3に示 す.図-3は橋梁完成系で計測した橋軸水平方向の応答波 形であり、上段が常時微動、下段が人力加振時となってい る.常時微動計測では最大応答速度が約0.002kineと非常 に微小でランダムな時刻歴波形を得た.また、人力加振時 には最大応答速度が0.01kine 程度の複数回の自由振動波 形を得た.

3. 振動特性の同定

(1) 橋梁模型と橋脚模型

橋梁模型や橋脚模型では頂部の計測で得られた自由振動波形に対して FFT 解析を実施し、フーリエスペクトル 波形の卓越振動数を固有振動数としている。例として、図 -4に橋脚模型で得られた自由振動波形の FFT 解析結果を 示す。図-4を見るとスペクトル波形に2つの卓越を確認 することができ、振動数の小さい方の卓越振動数から1次





モード,2次モードの固有振動数とした.

減衰定数は図-5の上段に示すような橋脚模型の振動実 験によって得られた自由振動波形にフィルタ処理を施した 後,その波形における各サイクルのピークごとの加速度振 幅とサイクル数の関係より同定した.各サイクルのピーク ごとの加速度振幅とサイクル数の関係を図-5の下段に示 す.図-5の下段に示す各サイクルのピークごとの加速度 振幅とサイクル数の関係を見るとわずかに下に凸の形を示 し振幅依存性を示しているが,ほぼ直線の関係を示してい ることより粘性減衰性状を示していると言える.

(2) 新田代橋

ノイズなどの影響が多い実橋梁の常時微動計測ではクロ ススペクトルを用いてノイズの影響を低減した後に橋脚頂 部と地表面の伝達関数を算出し、その卓越振動数を固有振



図-6 新田代橋の独立橋脚状態で橋軸方向の計測より推定した伝 達関数の例



図-7 RD 法によって同定した自由振動波形と減衰性状(新田代橋-独立橋脚橋軸方向)

動数とした.また,人力加振では複数回加振し得られたそれぞれの自由振動波形に対してFFT解析を実施し固有振動数を同定した.例として図-6に新田代橋橋梁完成系の常時微動計測データから算出した橋軸方向の伝達関数を示す.新田代橋の計測では,図-6に示すようなスペクトル波形が1番卓越した振動数を1次モードの固有振動数とした.

得られた時刻歴波形にフィルタ処理を施した後,自己相 関関数と RD 法を用いて図-7の上段に示すような自由振 動波形を形成し,その自由振動波形の各サイクルのピーク とサイクル数の関係より減衰定数を同定した. RD 法では 計測時間によって異なるが最大で約100 波ほど波形を重ね 合わせている. 図-7の下段に減衰定数同定の例として,図 -7の上段に示す自由振動波形の各サイクルのピークとサ イクル数の関係を示す. これは独立橋脚状態で計測した橋 軸方向の常時微動のデータである. 各サイクルのピークと サイクル数の関係が直線の関係を示しているため,橋梁模 型と同様に粘性的減衰性状を示していることがわかる.

4. 振動実験結果

(1) 橋梁模型と橋脚模型

橋梁模型とそれを構成する2体の橋脚模型を対象とした 自由振動実験結果を示す.同定したそれぞれの振動レベル における1次の固有振動数を図-8の上段に,2次の固有 振動数を図-8の下段に示す.それぞれの図では横軸に振 動レベルとして実験で得られた自由振動波形の最大応答加 速度を示し,縦軸に固有振動数を示した.また,2体の橋 脚模型を橋脚1と橋脚2として赤丸と青丸でそれぞれの橋



脚で同定した値を示している.これらの図より,独立橋脚 状態の固有振動数は1次でも2次でも振動レベルの増加に 伴って減少する傾向にあることがわかる.

また同様に、橋脚模型の自由振動実験より同定したそれ ぞれの振動レベルにおける1次モードの減衰定数を図-9の 上段に、2次モードの減衰定数を図-9の下段に示す.これ らの図より、振動レベルの増加に伴い減衰定数は1次でも 2次でも増加する関係が見られるが、その増加割合は振動 レベルが増加するにつれて減少する非線形の関係を示して いることがわかる.

次に,橋梁模型の自由振動実験より同定したそれぞれの 振動レベルにおける固有振動数を図-10の上段に,減衰定 数を図-10の下段に示す.橋梁完成系の自由振動実験では スペクトル波形に1次モードの卓越しか見られなかったた め,1次の固有振動数と減衰定数のみを示した.これらの 図に示した振動レベルと振動特性の関係より,固有振動数 は振動レベルの増加に伴い減少し,減衰定数は振動レベル に伴い増加するが,その増加割合は減少するという橋脚模 型と同様の傾向が確認された.

(2) 新田代橋

新田代橋の独立橋脚状態について、常時微動、人力加振時の振動計測より同定した橋軸方向と橋軸直角方向の固有振動数を図-11の上段に、減衰定数を図-11の下段に示す. それぞれの計測で得られた速度応答の最大値を横軸としている.独立橋脚状態での固有振動数は橋軸方向、橋軸直角方向共にわずかながら振動振幅の増加に伴い小さくなって



いる.また,ばらつきはあるが減衰定数は振動振幅の増加 に伴い大きくなっている.

橋梁完成系の常時微動,人力加振時の振動計測より同定 した橋軸方向と橋軸直角方向の固有振動数を図-12の上段 に,減衰定数を図-12の下段に示す.独立橋脚状態と同じ く橋梁完成系での固有振動数は橋軸方向,橋軸直角方向共 にわずかながら振動振幅の増加に伴い小さくなっており, 減衰定数は大きくなっている.

以上の結果より橋梁完成系,独立橋脚状態共に橋梁模型 と同様な振動特性の振幅依存性を確認することができた. しかしながら,橋軸直角方向の固有振動数,減衰定数には 振幅依存性とは考えにくいバラツキも見られた.これは, 新田代橋の橋軸方向と橋軸直角方向の固有振動数が近接し ており(独立橋脚状態で約4.5Hzと6.0Hz,橋梁完成系で 約3.0Hzと4.0Hz),橋軸直角方向で計測された振動波形 に橋軸方向の振動の影響が混在したためと考えられる.し たがって,フィルタ処理などのデータ解析上で橋軸直角方 向の振動成分のみに着目しようとしても橋軸方向の振動の 影響を避けることが難しく,橋軸直角方向で同定した振動 特性にばらつきがみられたものと考えられる.

実橋梁の振動計測では着目している系以外の振動成分の 影響をできるだけ混在させず,データ解析でも十分にノイ ズの影響を低減させることが適切な振動特性の把握のため には必要であると考えられる.

5. おわりに

本研究では、橋梁模型とそれを構成する橋脚模型に対し て、微小振幅から地震動レベルの振幅までの異なる振動レ ベルにおける自由振動実験を行い、それぞれの振動レベル に対応した橋梁模型の固有振動数および減衰定数の振動特 性について調べた.また、実橋梁構造物である新田代橋に ついても異なる振動レベルで振動計測を実施し、その振動 特性について検討した.

- 橋梁模型の自由振動実験より固有振動数は振動レベル が大きくなるにつれて減少し、その減衰定数は増加す る振幅依存性を示した.また、2次モードの振動特性 についても1次モードと同様の振幅依存性を有するこ とを示した.
- 微小振動領域ではあるが、新田代橋に対して異なる振動レベルで振動実験を行うことで実橋梁構造物でも橋



図-11 新田代橋の最大応答速度と振動特性の関係(独立橋脚 状態)



図-12 新田代橋の最大応答速度と振動特性の関係(橋梁完成系)

梁模型と同様な振動特性の振幅依存性を有することが 確認できた.

実橋梁構造物について、さらに同様の検討を行いデータ を蓄積することで異なる振動レベルで推定した振動特性の 対応を明らかにし微小振動データをより有効に利用できる のではないかと考えられる.また、橋梁構造物の振動特性 は橋脚基部の状態が大きく影響するものと考えられため、 今後は解析を用いて橋脚基部の影響を検討する予定である. 試験体の製作にあたっては宇都宮大学の鈴木康夫助教を はじめ研究室の皆様に大変お世話になったことを付記し、

ここに謝意を表します.

参考文献

- 岡内功,宮田利雄,辰巳正明,佐々木伸幸:大振幅加振による 長大斜張橋の実橋振動実験,土木学会論文集,No.455/I-21, pp.75-84, 1992.10
- 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, 1997.7.
- 山口宏樹,高野晴夫,小笠原政文,下里哲弘,加藤真志,岡 田淳:鶴見つばさ橋の振動特性による動的特性の同定,土 木学会論文集,No.543/I-36, pp.247-258, 1996.7.
- 4)新山惇,佐藤昌志,池田憲二,菅原登志也,佐藤浩一:白鳥大橋の固有振動数評価に関する常時微動観測法の適用性,構造工学論文集,Vol.47A,pp.469-477,2001.3.
 5)吉岡勉,原田政彦,山口宏樹,伊藤信:斜材の実損傷によ
- 5) 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.