## 異なる振動レベルにおけるRC橋脚を有する橋 梁の振動特性の変化に関する研究

竹嶋竜司<sup>1</sup>・リーム アル セナウィ<sup>2</sup>・中島章典<sup>3</sup>・中村晋<sup>4</sup>・横川英彰<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社 IHI インフラシステム建設部計画 1 課(〒 590-0977 堺市堺区大浜西町 3 番地) Email: ryuji\_takeshima@iis.ihi.co.jp

<sup>2</sup>学生会員 宇都宮大学大学院工学研究科 博士後期課程システム創成工学専攻(〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)
<sup>3</sup>フェロー会員 宇都宮大学大学院 工学研究部循環生産研究部門(〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)
Email: akinorin@cc.utsunomiya-u.ac.jp

<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) E-mail:s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp <sup>5</sup>正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 技術開発部 (〒 108-0075 東京都港区港南 1-6-34) E-mail:yokokawa@oiles.co.jp

本研究では、比較的容易に加振することができる RC 橋脚の縮尺模型を対象として、まず微小振動から実地 震動レベルの大きな振動下で把握した振動特性の変化を検討し、上部構造を設置した橋梁完成系 RC 橋梁模型 の状態でも同様の検討を行う.また、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 に対して微振動下の異なるレベルで振動計測を行った後、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を検討する.さらに、鋼製橋梁模型でも同様に振動実験を実施し、RC 橋梁模型との振動特 性の変化の違いを検討する.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 RC 橋脚を有する橋梁の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.

Key Words : vibration measurement, vibration level, natural frequency, damping ratio, amplitude dependency, concrete bridge pier

## 1. はじめに

橋梁構造物などの固有振動数や減衰定数などの振動 特性は構造物の動的挙動に大きな影響を与え、また、一 般に設計値と完成後の実際の値は異なることもあるた め、それらの振動特性を振動計測により確認すること 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ている<sup>1)-7)</sup>.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 要な労力などの観点から既設橋梁の振動計測が敬遠さ れる場合もある.

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<sup>8)-15)</sup>.しかし、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比 較的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<sup>15)-17)</sup>.

これは、実橋梁のような大きな構造物に対して振動

特性を確認できるある程度の大きさの振動を起こすこ とは容易ではないことや、実地震動レベルの大きな振 動で加振することが難しいなどの理由から、これらの 関係を詳細に検討した事例は少ないためである.

著者ら<sup>18)</sup>は、鋼製橋梁模型を対象として、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 ける振動実験を行い、それぞれの振動レベルに対応し た固有振動数および減衰定数の振動特性を調べた.し かし、対象とした模型は小型であり、また、実橋にお ける振動特性の変化の状況を確認していない.

そこで本研究では、比較的容易に加振することがで きる RC 橋脚の縮尺模型を対象として、まず微小振動 から実地震動レベルの大きな振動下で把握した振動特 性の変化を検討し、上部構造を設置した橋梁完成系 RC 橋梁模型の状態でも同様の検討を行う.また、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基に対して微振動下の異なるレベルで振動計測 を行った後、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を検討する.さらに、鋼 製橋梁模型でも同様に振動実験を実施し、RC 橋梁模型 との振動特性の変化の違いを検討する.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



図-2 積層ゴム支承の詳細

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 RC 橋脚を有する橋梁の固有振動数や減衰 定数などの振動特性の変化について考察する.

## 2. 計測対象と振動実験の概要

#### RC 橋脚を有する橋梁模型

RC橋脚を有する高架橋を模擬した橋梁の振動実験を 実施するため、図-1のような縮尺模型を作製した.以 下,橋脚の上に上部構造を設置した橋梁完成系の状態 を RC 橋梁模型,上部構造を設置しない独立橋脚の状 態をRC橋脚模型と呼ぶ.そして、RC橋梁模型とそれ を構成する2体のRC橋脚模型を対象として異なる振 動レベルで自由振動実験を実施した. RC 橋梁模型では 設置の都合上図−1のように、振動台とH鋼梁を φ10 ボ ルト7本で固定した後,H 鋼梁の上に RC 橋脚模型を 定している.また,RC橋脚模型頂部と鉄筋コンクリー トの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 66 ボルト6本を利用して 両者を剛に接続し、支承部での減衰をできるだけ低減 したモデルと,実橋を模擬して両者の間に積層ゴム支 承を配置したモデルについて検討している. なお, 上



写真-1 積層ゴム支承を用いた RC 橋梁模型の設置状況



**写真-2** RC 橋脚模型頂部と上部構造の鋼板による剛な接続 時の設置状況

部構造を模擬した RC 梁の重量は約 3kN である.

積層ゴム支承はゴム層 4mm×4 層と内部鋼板 1.6mm×3 枚で構成されている. 積層ゴム支承の模型 詳細を図-2 に示す. また,実際に積層ゴム支承を用い て上部構造を設置した状況を写真-1 に示し,鋼板を用 いて RC 橋脚模型と上部構造を接続した状況を写真-2 に示す.

RC 橋脚模型では橋脚頂部に, RC 橋梁模型では上部 構造の上面に高感度加速度計を設置し橋軸水平方向の 加速度を計測した.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.

RC橋脚模型を対象とした自由振動実験より得られ た振幅最小時と振幅最大時の加速度波形を図-3と図-4 に示す.それぞれ図の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.振幅 最小時の計測ではフーチング上面鉛直方向の加速度は ノイズ程度の大きさしか確認できないのに対して,振 幅最大時の計測では有意な値の加速度が確認された.し



図-3 RC 橋脚模型の自由振動波形の例(振幅最小時)



図-4 RC 橋脚模型の自由振動波形の例(振幅最大時)



図-5 鋼製橋梁模型の概要

たがって,H 鋼梁とボルトを用いて RC 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ロッキン グ振動を起こし,エネルギーの逸散が生じていること が予想される.

#### (2) 鋼製橋梁模型

RC橋梁模型と比較するため鋼製橋梁模型についても 自由振動実験を実施した.図-5に鋼製橋梁模型の全体 の概要を示し、図-6に鋼製橋梁模型を構成する橋脚の 概要を示す.鋼製橋梁模型はH形鋼の上部構造と平鋼 の橋脚部から構成されており、両部材を φ6 の全ネジで 固定し、ほぼ剛結合としている.さらに、橋脚基部の



図-6 鋼製橋梁模型を構成する橋脚の詳細



図-7 鋼製橋梁模型の自由振動波形の例(振幅最小時)



図-8 鋼製橋梁模型の自由振動波形の例(振幅最大時)

下鋼板を φ10 のボルトで強固に固定することで,支承 部や橋脚などの部材連結間で生じる減衰をできるだけ 低減した.鋼板を用いて RC 橋脚模型頂部と上部構造 を剛に接続した RC 橋梁模型と鋼製橋梁模型の両者を 比較することで,同様の固定条件における鋼製橋梁模 型と RC 橋梁模型の振動特性の変化の違いについて検 討している.

鋼製橋梁模型の自由振動実験で得られた振幅最小時 と振幅最大時の加速度波形の一例を図-7と図-8に示 す.上段は上部構造の上で計測した橋軸水平方向の自 由振動波形であり、下段はフーチング上面鉛直方向の



写真-3 新田代橋(橋梁完成系)



図-9 新田代橋の RC 橋脚の諸元

自由振動波形である. 鋼製橋梁模型でも RC 橋梁模型 と同様に振幅最小時の波形では,フーチング上面鉛直 方向にノイズ程度の加速度しか確認されていないのに 対して,振幅最大時の波形では有意な値の加速度が確 認されたため,フーチング部がわずかながらロッキン グ振動を生じており,エネルギーの逸散が生じている ことが予想される.しかし,鋼製橋梁模型と RC 橋梁 模型のフーチング上面鉛直方向の加速度を比較すると, どの振動レベル下における計測でも鋼製橋梁模型の加 速度レベルが RC 橋梁模型の値より全体的に小さい.

#### (3) 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径間連続鋼I桁橋(34.4+34.4m) であり、橋脚は小判型張り出し式 RC 橋脚となってい



図-10 新田代橋の時刻歴波形(橋梁完成系の橋軸方向)

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.また, 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-3**は新田代橋 の橋梁完成系における振動計測時の写真であり,**図-9** は RC 橋脚の諸元である.

微小振動領域ではあるが振動レベルに可能な限り差 をつけて振動計測を実施した.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.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のみに橋 軸,橋軸直角,鉛直方向の3方向の常時微動計を設置 し速度応答を計測した.

新田代橋橋梁完成系の計測で得られた応答波形の一 例を図-10に示す.図-10の,上段が常時微動時,下 段が人力加振時橋軸水平方向の応答波形である.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) RC 橋梁模型と RC 橋脚模型

RC橋梁模型やRC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 リエスペクトルの卓越振動数を固有振動数としている。 例として、図-11にRC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-11を見るとフーリエ スペクトルに2つの卓越振動数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。



図-11 RC 橋脚模型で得られた自由振動波形の FFT 解析結 果の一例



図-12 RC 橋脚模型のフィルタ処理後の自由振動波形と減衰 性状(1次モード)

また、図-4に示すような RC 橋脚模型の振動実験に よって得られた自由振動波形に対して、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 数の関係より減衰定数を同定した.しかし、計測する 振動レベルによっては、高次の雑音などの影響で自由 振動波形の各ピークの加速度振幅とサイクル数の関係 が必ずしも滑らかにならない場合もあるため、減衰定 数を同定する時には計測によって得られた自由振動波 形に対し FIR 型のバンドパスフィルター処理を施した. なお、バンド幅は同定した固有振動数の上下 5%の幅と した.

例として, RC 橋脚模型の自由振動実験によって得 られた図-4に示す自由振動波形に対して,1次モード に着目しフィルタ処理を施したものを図-12の上段に, 2次モードに着目しフィルタ処理を施したものを図-13 の上段に示す.また,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-12と図-13の下段に 示す.なお,図中の赤線は自由振動波形のサイクル毎 の正側のピーク値を示したものであり,青線はサイク ル毎の負側のピーク値の絶対値を片対数で示している. また,それぞれの色の点線はピーク値を対数近似した ものであり,この傾きから求めた減衰定数の平均を図



図-13 RC 橋脚模型のフィルタ処理後の自由振動波形と減衰 性状(2次モード)



図-14 鋼製橋梁模型で得られた自由振動波形の FFT 解析結 果の一例

中に示している.

図-12の下段に示す各サイクルのピーク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、ほぼ直線関係と見なせることより1次モードは粘性的な減衰性状を示していると言える.また、図−13の下段に示す2次モードの各サイクルのピークの加速度振幅とサイクル数の関係を見ても、多少脈動しているがほぼ直線関係を示しており、この場合もほぼ粘性的な減衰性状を示していた.

#### (2) 鋼製橋梁模型

鋼製橋梁模型も RC 橋梁模型と同様な方法で固有振動数および減衰定数を同定している. 鋼製橋梁模型の 上部構造で計測された自由振動波形に対して FFT 解析 を実施した結果の例を図-14 に示す. 鋼製橋梁模型の 自由振動波形より得たスペクトルでは, どの振動レベ ルでも図-14 のような1つの卓越振動数しか確認でき なかったため, この卓越振動数を1次モードの固有振 動数とした.

同定した固有振動数の5%幅で施したバンドパスフィ ルタ処理により得られた振動振幅とサイクル数の関係 より減衰定数を同定した.図-15の上段に振幅最大時の 自由振波形に対してフィルタ処理を施したものを示し,



図-15 鋼製橋梁模型のフィルタ処理後の自由振動波形と減 衰性状



図-16 新田代橋橋梁完成系における橋軸方向の伝達関数の例

下段にその振動振幅とサイクル数の例を示す.図-15の 下段に示す各サイクルのピークの加速度振幅とサイク ル数の関係を見ると鋼製橋梁模型でも,RC橋梁模型と 同様にわずかに下に凸の形を示し振幅依存性を示して いるが,ほぼ直線関係と見なせる.

#### (3) 新田代橋

新田代橋の計測データではノイズなどの影響が大き いため、実橋梁の常時微動計測で得られた波形にはク 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 FFT 波形から伝達関数を算出し、 その卓越振動数を固有振動数とした<sup>19)</sup>.また、人力加 振では、複数回の加振で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-16 に新田代橋の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-16 に示すようなフーリエスペ クトルにおいて最も卓越した振動数を1次モードの固 有振動数とした.

振動計測で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-17の上段 に示すような自由振動波形を形成し,同図の下段に示 すように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



図-17 RD 法によって同定した自由振動波形と減衰性状(新 田代橋の独立橋脚橋軸方向)



図-18 RC 橋脚模型の最大応答加速度と固有振動数の関係

間によって異なるが最大で約100波の波形を重ね合わ せている.これは独立橋脚状態で計測した橋軸方向の 常時微動計測のデータである.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と言える.

### 4. 振動振幅と振動特性の関係

#### (1) RC 橋梁模型と RC 橋脚模型

RC橋梁模型とそれを構成する2体のRC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-18 の上段に、2次の固有振動数を図-18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. なお、1次モード、2次モードとも、2体の橋脚の固有



図-19 RC 橋脚模型の最大応答加速度と減衰定数の関係



図-20 RC 橋梁模型の最大応答加速度と振動特性の関係(橋 脚と上部構造の結合条件の影響)

振動数に10%程度の差異があるが、これは、橋脚模型の諸元が小さく、2つの橋脚のプロポーション正確にを 一致させるのが容易ではなかったためであると考えられる.

また, RC 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-19の上段に,2次モードの減衰定数を図-19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.また, ばらつきはあるものの2体の橋脚において同様の傾向 を示している.

1次モードと2次モードの減衰定数を比較すると,2 次よりも1次の減衰定数の方が大きい.一般に,橋梁な どでは,高次モードになるほどどちらかと言えば減衰 定数が大きくなると考えられているが,ここで得られ た結果では逆の傾向を示している.図-11に示すFFT 解析結果を見てもわかるように,本研究で得られた橋 脚模型の自由振動波形は2次モードよりも1次モード の振動の方が支配的であるため,計測によって得られた



図-21 鋼製橋梁模型と RC 橋梁模型の最大応答加速度と振動特性の関係

自由振動波形の中に存在する2次モードに関係する振動振幅は1次モードのそれに比して微小なものと予想できる.そして、2次モードに対して同定された減衰定数は1次モードに比して小さい振幅で同定されたものと考えられる.しかし、図-19下段の振動振幅と2次モードの減衰定数の関係を示した場合に、1次モードが支配的な自由振動波形の最大振幅を横軸としたため、2次モードの減衰定数は小さく表現されたものと考えられる.

次に, RC 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-20の上段 に,減衰定数を図-20の下段に示す.図-20では積層 ゴム支承を用いたモデルの結果を赤丸で,鋼板を用い て上部構造と RC 橋脚模型を剛に接続したモデルの結 果を青丸で示している. RC 橋梁模型の自由振動実験で はフーリエスペクトルに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 RC 橋脚模型と同 様の傾向が確認された.また,積層ゴム支承を用いた モデルの方が,振幅依存性による振動特性の変化は大 きい結果となった.

フーチング上面で計測した鉛直方向の加速度より,振動特性の振幅依存性は橋脚基部で生じるエネルギーの 逸散が関係していると考えられる.また,積層ゴム支 承を用いたモデルよりも橋脚と上部構造を剛に接続し たモデルの方が振幅依存性による振動特性の変化が小 さいことより,支承部も振動特性の変化に関係してい ることが予想できる.

#### (2) 鋼製橋梁模型とRC橋梁模型の比較

鋼製橋梁模型の異なる振動レベルで実施した自由振 動実験の結果を, RC 橋梁模型の結果と比較して示す.



図-22 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)

RC橋脚模型では,橋脚と上部構造を比較的剛に接続し たモデルの結果を用いる.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-21の上段に,減衰定数 を図-21の下段に示す.青色で示す鋼製橋梁模型の固 有振動数は振動レベルに関わらずほぼ一定の値となっ ている.一方,相対的な大きさは異なるが,鋼製橋梁 模型の減衰定数はRC橋梁模型の場合と同様に振動レ ベルの増加に伴い増加する傾向が認められる.

鋼製橋梁模型とRC橋梁模型では、両者の固有振動 数が異なり、また、振幅の範囲も大きく異なるので単 純な比較はできないが、図-21に示すように、振動レ ベルが増加するとともに、RC橋梁模型の固有振動数は 幾分小さくなっているのに対して、鋼製橋梁模型の固 有振動数はほとんど変わらない.一方、鋼製橋梁模型 の減衰定数に対して、RC橋梁模型の減衰定数は全体的 に大きな値を示しており、また、振動レベルに伴う減 衰定数の変化も大きいことがわかる.これは、RC橋梁 模型の場合の方が、橋脚基部からの逸散減衰が大きく、 さらに.特に小さい振動レベルの範囲の減衰定数にお いても、同様の傾向が認められることから、RC部材の 材料内部減衰が鋼製部材のそれよりも大きいことによ ると考えられる.

#### (3) 新田代橋

新田代橋の独立橋脚状態について、常時微動時、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-22の上段に、減衰定数を図-22 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,橋軸直角方向とも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る 傾向がある.





図-23 新田代橋の最大応答速度と振動特性の関係(橋梁完 成系)



図-24 新田代橋と RC 橋梁模型の振動レベルと減衰定数の 関係

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-23の上段に,減衰定数を図-23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,橋軸直角方向とも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 いると言える.

以上の結果より橋梁完成系,独立橋脚状態ともに,RC 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.しかし特に,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ばらつきも見 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(独立橋脚状態で実測値 が約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. そのため, フィル タ処理などを行い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 が見られたものと考えられる.したがって、実橋梁の 振動特性の適切な把握のためには、振動計測において 着目している振動モード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必要であると考えられる.

新田代橋の橋梁完成系でも RC 橋梁模型と同様に積 層ゴム支承を用いているため, RC 橋梁模型の積層ゴム 支承を用いたモデルの自由振動実験より得られた振動 レベルと減衰定数の関係と、新田代橋の橋梁完成系の 振動計測より得られた振動レベルと減衰定数の関係を 図-24 に示し比較した. 図-24 に示す赤三角は新田代 橋の橋梁完成系の橋軸方向で計測したそれぞれの振動 レベルに対応する減衰定数であり、青丸は RC 橋梁模 型の積層ゴム支承を用いたモデルで計測した減衰定数 である.新田代橋の速度振幅に2πf(f:固有振動数)を 乗じることで仮想的に加速度振幅として同じ図上に示 した.新田代橋の計測では大きな振動レベルで加振す ることができなかったため微小振動下の範囲ではある が、図-24 を見ると新田代橋も RC 橋梁模型も同様の 振動特性と減衰定数の関係を示した.また、両者の固有 振動数は新田代橋が約3.0Hz, RC橋梁模型が約5.0Hz と大きくは異ならないため、大きな振動レベル下では 新田代橋でも図-24の RC 橋梁模型のような振動特性 の変化を示すことが予想される.

## 5. おわりに

本研究では、RC橋脚を有する橋梁模型とそれを構成 する RC橋脚模型や鋼製橋梁模型に対して、微小振幅 から実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 特性を調べた.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 振動特性の変化を検討した.その結果、得られた知見 をまとめると以下のようになる.

- 1. RC橋脚模型の自由振動実験より、振動レベルが大 きくなるにつれて固有振動数は減少し、減衰定数 は増加する振幅依存性が確認された.また、2次 モードの振動特性においても1次モードと同様の 振幅依存性を有することがわかった.この場合、そ れぞれのモードに対応する振動の大きさの差異に より、1次モードの減衰定数に比較して2次モード の減衰定数の方が小さい.
- 2. 橋脚基部や支承部の接続方法が異なる RC 橋梁模 型の自由振動実験より,橋梁模型の振動特性の変 化は橋脚基部の逸散減衰と支承部の状態が大きく 影響していることを確認した.
- 3. 材料内部での減衰が支配的である微小振動下の計 測では, RC 橋梁模型の方が鋼製橋梁模型より減衰 定数の値が大きい傾向にあり, RC 部材の方が鋼製 部材よりも材料内部減衰は大きいと言える.
- 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.

謝辞:本研究で用いた RC 橋梁模型の試験体製作にあ 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りました.また,新田代橋の振 動計測に際しては,栃木県大田原土木事務所の北川貴 之様をはじめ関係各位に大変お世話になりました.こ こに記して謝意を表します.

#### 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.
- 藤原亨,玉越隆史,植田利夫,南条正洋,小林義和:マ ルチケーブル複合構造形式斜張橋の固有振動特性,構造 工学論文集,Vol.39A,pp.831-839,1993.3.
- 5) 和田克哉,高野晴夫,林寛之,小山次郎,津村直宜:横浜ベ イブリッジの振動実験,橋梁と基礎, Vol.26, pp.15-18, 1992.2.
- 6)和泉公比古,小田桐直幸,萩原充信,矢部順一,落合盛人,大垣賀津雄,渡辺保之:ダブルデッキ2 ヒンジ吊橋の振動実験,構造工学論文集,Vol.40A, pp.721-733,1994.3.
- 7) 新山惇, 佐藤昌志, 小室雅人, 岸徳光: 供用後 27 年経 過した三径間連続鋼床版斜張橋の自由振動特性, 構造工 学論文集, Vol.47A, pp.1093-1102, 2001.3.
- 8) 田村幸雄,佐々木淳,塚越治夫:RD法による構造物の ランダム振動時の減衰評価,日本建築学会構造系論文報 告集,第454号, pp.29-38, 1993,12.
- 9) 阿部雅人,藤野陽三,長山智則,池田憲二:RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価,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,第57号,pp.261-274,2001.10.
- 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,第57号,pp.261-274,2001.10.
- 11) 新原雄二,酒向孝裕,近藤勝俊,河野哲也,山野辺慎一: 士狩大橋上部工/橋脚の振動実験,第55回土木学会年次 学術講演会講演概要集,I-109,2000.9.
- 12) C.E.Ventura, R.Brincker, P.Andersen : Dynamic properties of the Painter Street Overpass at different levels of vibration, Millipress rotterdam ISBN, pp.167-174,2005.
- 13)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.
- 14) Md. Rajab ALI, Toshihiro OKUMATSU, Takatoshi OKABAYASHI and Bashir Ahmed JAWAID : Dynamic characteristics estimation from the ambient vibration of existing bridge by realization theories, 構造 工学論文集, Vol.55A, pp.284-294, 2009.3.
- 15) 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.
- 16) 森本淳,千葉一樹,栗田哲:連続振動モニタリングに基づく建物の振動特性の変動と風速の関係,日本建築学会

大会学術講演梗概集, pp.713-714, 2009.8.

- 17) 荒川利治,吉瀬維昭:実測データに基づく鉄骨構造物に おける振動特性の評価と振幅依存性に関する研究,日本 建築学会技術報告集,第22号,pp157-162,2005.12.
- 18) 齋藤拓哉,中島章典,竹嶋竜司,リームアルセナウィ:異なる振動レベルにおける模型橋梁の振動特性の変化に関

する基礎実験,構造工学論文集, Vol.59A, pp.261-271, 2013.3.

19) 中島章典, 齋藤拓哉, 竹嶋竜司, 中村晋: 微小振動下にお ける実橋脚と RC 橋脚模型の振動特性の把握に関する研 究, 橋梁振動コロキウム 2011 論文集, pp.90-97, 2011.9.

## A STUDY ON CHANGE OF VIBRATION PROPERTY OF BRIDGE STRUCTURE WITH RC PIER IN DIFFERENT VIBRATION LEVEL

# Ryuji TAKESHIMA, Reem Al SEHNAWI, Akinori NAKAJIMA, Susumu NAKAMURA and Hideaki YOKOKAWA

In this research, the vibration test employing the scaled RC pier model is conducted under various vibration levels, and the change of the vibration properties such as the natural period and the damping ratio is investigated under the respective vibration level. The change of the vibration properties of the entire bridge model with the superstructure is also investigated under various vibration levels. Furthermore, the vibration property of an actual bridge which has two-span continuous superstructure and an RC pier, and its single RC pier without the superstructure are investigated under small vibration level. As a result, a couple of the findings about the change of the vibration property under different vibration level are obtained through the vibration tests.