中島童典

フェロー会員

# 減衰の振幅依存性を有する橋脚模型の高振幅振動台実験とその再現解析

○ 武田龍國

宇都宮大学 学生員 正会員

# 1. はじめに

構造物の非線形動的解析は,設計時の耐震性能の照査お よび既設構造物に減衰装置を付加した場合の耐震補強効果 の確認等に際して多く用いられる.しかし,構造物の振動 挙動の数値解析では,その構造物の低次の固有振動数およ び振動モード等は比較的精度よく再現することが可能であ るが,構造物の地震時挙動を全時間に亘り再現する時刻歴 解析においては,いまだ実挙動と解析値で有意な差が生じ る箇所が見受けられる.

構造物の振動挙動には、構造物の(質量,剛性,境界条 件等により決定される)固有振動数,減衰特性等の動的特 性値が大きく影響を及ぼす.したがって、構造物の動的特 性を正確に把握し,数値解析の中でもこれらを適切にモデ ル化しなければならない. 一般に実構造物の動的特性値を 把握するため,振動実験が行われ<sup>1),2)</sup>,これらの振動実験 によって得られる動的特性値は振動振幅の影響を受け、特 に減衰定数は振動振幅の影響を大きく受けることが知られ ている<sup>3),4)</sup>.さらに、この減衰定数の振幅依存性は、斎藤 ら<sup>4)</sup>, 竹嶋ら<sup>5)</sup>の鋼製および鉄筋コンクリートの橋脚模型 や高架橋模型等を対象とした過去の研究により、振動振幅 が大きくなるにつれて減衰定数は大きくなるが、その増加 率は振動振幅とともに減少する非線形の関係を有すること が明らかになっている.しかし,耐震設計等に用いられて いる数値解析において,一般にこの減衰の振幅依存性は考 慮されてない.中島らは橋脚模型を用いた振動台実験を行 い、橋脚部材が全て弾性域にある範囲において、この減衰 の振幅依存性を数値解析の中で適切にモデル化することに より数値解析の再現精度を上げることができた<sup>6)</sup>.

そこで本研究では、鋼製橋脚模型を用いて振動台実験を 行い、自由振動挙動における動的特性値の振幅依存性の影 響を確認した.また、その橋脚部材の弾塑性範囲における 地震時挙動も確認した.そして、減衰の振幅依存性を考慮 した解析モデルを構築し、この橋脚模型の自由振動挙動お よび地震時挙動の再現を試みた.

## 2. 鋼製橋脚模型実験

# (1) 試験体概要

実験に用いた鋼製橋脚模型の概要を図-1,詳細な断面諸 量を表-1に示す.橋脚部材は上鋼板および下鋼板に溶接に より結合し,下鋼板を M10 ボルト4本で振動台に固定し, おもりは上鋼板に M5 ボルト4本を用いて取り付けた.ま た,図-1に示すように,橋脚天端では水平加振方向および それに直角な方向に,下鋼板では基部の減衰を評価するた め鉛直方向に,振動台上では地震動を計測するために水平



表1	橋脚模型実験の試験体の断面諸量
----	-----------------

部材	寸法	単位体積重量
	(mm)	$(N/mm^3)$
おもり	$48.2 \times 85.8 \times 150.5$	$76.6 \times 10^{-6}$
上鋼板	$9.0 \times 85.4 \times 150.4$	$75.6 \times 10^{-6}$
橋脚部材	$1000 \times 19.9 \times 11.9$	$75.3 \times 10^{-6}$
下鋼板	$15.5 \times 300.4 \times 300.2$	$76.5 \times 10^{-6}$

加振方向に加速度計を設置した. さらに,橋脚部材が塑性 域に達しているかを確認するため,下鋼板から 15mm の箇 所の橋脚部材の両側にひずみゲージを貼付した.

#### (2) 実験方法

図-1 に示す試験体を用いて自由振動実験および実地震波 を用いた強制振動実験を行った.自由振動実験は,おもりに 水平強制変位を与えることにより行い,その変位を変化さ せ,振動振幅の異なる自由振動波形を得た.強制振動実験 は,振動台に1995 年兵庫県南部地震でのJMA 神戸記録を 入力することにより行った.また,弾性域および塑性域に おける橋脚模型の振動挙動を調べるため,JMA 神戸記録の 振動倍率を10%,25%,75%,100% と変化させて与えた. 橋脚模型は振動倍率25% までは全ての部材が弾性域に収ま り,振動倍率75% では橋脚基部の一部が塑性化するように 設計した.さらに,振動倍率100% は,75% の地震波を受 けたのち,残留ひずみを残したまま与えた.



## (3) 実験結果

### a) 自由振動実験

例として,自由振動実験より得られた橋脚天端の水平加 振方向の加速度の時刻歴応答波形を図-2に示す.実験では 水平強制変位を変え,振動振幅の異なる波形を得ているが, ここに示す振動波形はその中の中程度の振幅の波形である. 図-2は振動振幅が時間とともに減衰していることを示す.

振動振幅を変えたそれぞれの自由振動波形に対して FFT 解析を行い、1次振動モードの固有振動数を求めた.振動 振幅を変えた自由振動波形の1次固有振動数と最大応答加 速度の関係を図-4に黒丸で示す.縦軸に固有振動数,横軸 に橋脚天端加速度の最大応答加速度を示す. 図-4は1次固 有振動数が最大応答加速度によらず一定 (2.41Hz) であるこ とから、本実験における1次固有振動数は振動振幅の影響 をほとんど受けないことを示す. 図-2の自由振動波形はノ イズの影響を含んでいるため、バンドパスフィルター処理 を行い、得られた自由振動波形のそれぞれのサイクルごと のピーク加速度を縦軸に対数で取り、横軸に波数を取った 図を図-3に示す. 図-3の赤線は平均的な傾きを示してお り、この傾きより減衰定数を算出できる。このような処理 をそれぞれの自由振動波形に対して行い、得られた減衰定 数と最大応答加速度の関係を図-5に黒丸で示す.ただし, 横軸の最大応答加速度はフィルター処理を行う前のオリジ ナル波形の最大応答加速度である. 図-5 からばらつきはあ るが、自由振動波形の最大応答加速度の増加とともに減衰 定数も増加する振幅依存性が見られる. この理由は水平方 向の加速度振幅の増加とともに基礎部の減衰の影響が大き くなるためであると考えられる.これについて,図は割愛 するが、下鋼板の鉛直方向加速度振幅が、水平方向の加速 度振幅の増加とともに増加していることを確認している.



# b) 強制振動実験

振動倍率 25%, 75%, 100% の場合について, 強制振動実 験より得られた橋脚天端の水平加振方向加速度の時刻歴応答 波形を図-6 に示す.それぞれの振動倍率における橋脚基部 の最大軸ひずみは, 振動倍率 25% で 692 $\mu$ , 75% で 2347 $\mu$ , 100% で 4612 $\mu$  であった.ここでは割愛するが, 別途行った 試験体に使用した鋼材の引張試験より, 鋼材のヤング係数 は 202kN/mm<sup>2</sup>, 降伏応力は 301N/mm<sup>2</sup> であった.これよ り鋼材の降伏ひずみは 1490 $\mu$  と求めることができ, 設計通 り橋脚部材は振動倍率 25% では弾性域に収まり, 振動倍率 75%, 100% では橋脚基部が塑性化していることが分かる.

# 3. 数值解析

### (1) 解析方法

はり要素を用いた有限要素法を用いて,節点数を110,要 素数を109にして橋脚模型の質量および剛性をモデル化し た.その際には,試験体の断面諸量および重量を正確に計 測した表-1の値を解析に用いる諸量とした.また,橋脚基 部には地盤を模擬した水平ばね,鉛直ばね,回転ばね,回 転ダッシュポットを組み込んだ.解析モデルの概要図を図 -9に示す.解析モデルは橋脚部材および回転ダッシュポッ トのモデル化の違いにより3通り分けられ,表-2にその概 要を示す.以下,解析モデル2の結果は割愛する.

解析モデル1では、橋脚部材の応力一ひずみ関係をバイ リニア型モデルとした非線形で与えており、基部の回転ば ねは減衰の振幅依存性を再現できない、設計で一般的に用 いられる線形モデルとなっている.一方,解析モデル3では 橋脚部材を解析モデル1と同様にモデル化しているが、基部 の回転ばねには減衰の振幅依存性を再現するため、Hardin-Drnevichモデル(以下 HD モデル)で与えた.回転ばねを 非線形モデルで与えたのは、履歴減衰を生じさせ振幅依存 性を再現するためである.また、HD モデルは微小振幅に



図-8 強制振動解析における橋脚天端の時刻歴加速度応答波形 (解析モデル3)



おいても履歴減衰が生じるため、実験結果を適切に再現で きると考えたため採用した.HDモデルは地盤材料の動的 変形特性として一般的に用いられ、その骨格曲線は、降伏 強度  $M_f$ 、初期接線剛性  $K_0$ を決定することにより図-11の ように表される.

橋脚基部の固定状況は不明確なため,解析モデル1,解析 モデル3ともに,橋脚基部の水平ばねおよび鉛直ばねのばね

★-2 解析モデルの概要			
	橋脚部材	回転ばね	
モデル1	非線形	線形	
	(バイリニア)		
モデル2	非線形	非線形	
	(バイリニア)	(バイリニア)	
モデル3	非線形	非線形	
	(バイリニア)	(HD モデル)	

御たて、シュの相声

定数を固定に近い大きい値で与えた.解析モデル1の回転ば ねのばね定数には実験で得られた固有振動数を再現できる 値 (44.6kN·m/rad)を与えた.解析モデル3の回転ばねの復 元力特性では,初期接線剛性  $K_0$ にこの値を与え,降伏強度  $M_f$ は自由振動波形の形を再現できる値 (0.5kN·m)を与え た.また,両解析モデルの回転ダッシュポットの値は,最小振 動振幅の自由振動波形の減衰を再現できる値 (0.25kN·s/m) を与えた.橋脚部材の応力一ひずみ関係にはバイリニア型 モデルを用いているが,1次勾配には引張試験より得られ たヤング係数を,降伏点には降伏強度を,2次勾配には引張 試験結果より1次勾配の2%を与えた.また,幾何剛性を 考慮するため,おもりおよび上鋼板の荷重分 (0.056kN)の 軸力を橋脚部材に与えた.



図-10 兵庫県南部地震 75% の橋脚天端の時刻歴加速度応答波形のフーリエスペクトル

#### (2) 解析結果

### a) 自由振動解析

以上の解析モデルを用いて自由振動解析を行い,1次固 有振動数と最大応答加速度の関係を図-4,減衰定数と最大 応答加速度の関係を図-5に示す.赤丸は解析モデル1の結 果,青丸は解析モデル3の結果を表す.1次固有振動数は 解析モデル1,3ともに実験値を精度よく再現しており振幅 依存性がない.図-4は解析モデル1,3の減衰定数がとも に振幅依存性を有することを示す.解析モデル1では回転 ばねを線形でモデル化しているが,橋脚部材の幾何学的非 線形性の影響によると考えられる減衰の振幅依存性が生じ た.解析モデル3では幾何学的非線形性と基部の回転ばね の履歴減衰により減衰の振幅依存性が生じた.

### b) 強制振動解析

自由振動解析の解析モデルを用いて強制振動解析を行った.解析モデル1と解析モデル3の結果をそれぞれ図-7, 図-8に示す.弾性域(振動倍率25%)での振動挙動は両モ デルとも精度よく再現している.しかし,弾塑性域では,解 析モデル1,3ともに最大振幅が実験値より小さいことが分 かる.これは,実験で橋脚天端の変位が大きく出たため,計 測に用いた加速度計に重力加速度の水平成分が含まれたこ とにより振幅が大きくなったためであると考えられる.

強制振動解析結果の比較を行うため,振動倍率75%で得 られた時刻歴応答波形に対してFFT解析を行った.その 結果を図-10に示す.図中の数字は加速度スペクトルの最 大値とそのときの振動数(以下,卓越振動数)を示す.実験 結果と解析モデル1の結果を比較すると,加速度スペクト ルの最大値および卓越振動数が異なることが分かる.一方, 解析モデル3と実験結果を比較すると,卓越振動数は一致 するが,そのピーク値は解析モデル3の方が小さい.これ は、上述のように実験では計測に用いた加速度計に橋脚天 端に生じた回転角分の重力加速度の水平成分が含まれたこ とにより振幅が大きくなったためであると考えられる.以 上の結果と別途行ったスペクトルの比による考察より,解 析モデル3が解析モデル1より精度よく実験結果を再現し ていた.

## 4. まとめ

本研究では鋼製橋脚模型を対象として,自由振動挙動に おける動的特性値の振幅依存性の検討および振動台を用い



図-11 HD モデルの骨格曲線

た強制振動実験より弾性域および弾塑性域における振動挙動の確認を行った.また,その模型の振動挙動を再現する 減衰の振幅依存性を考慮した解析モデルを組み立て,自由 振動挙動および強制振動挙動の再現を試みた.その結果を まとめると以下のようになる.

- 1. 鋼製橋脚模型の自由振動実験より減衰定数の振幅依存 性を確認できた.一方,1次固有振動数の振幅依存性 は見られない.
- 減衰の振幅依存性をモデル化しない解析モデルにおいても、幾何学的非線形性による減衰が含まれ、減衰に振幅依存性が生じた.
- 3. 橋脚部材が弾塑性域で振動する場合においても,減衰 の振幅依存性を数値解析でモデル化した結果の方がそ うでない場合より実験結果を精度よく再現できた.

参考文献

- 岡内功,宮田利雄,辰巳証明,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.
- 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板斜張橋の自由振動特性,構造工学論文集, Vol.47A, pp.1093-1102, 2001.3.
- 3) 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.
   4) 斎藤拓哉,中島章典,竹嶋竜司,リームアルセナウィ:異な
- 4) 斎藤拓哉,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動的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.
  5) 竹嶋竜司,リームアルセナウィ,中島章典,中村晋,横川英
- 5) 竹嶋竜司, リームアルセナウィ, 中島章典, 中村晋, 横川英 彰: 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, 土木学会論文集 A1(構造・地震 工学) Vol. 70, No.4, pp.I 130-I 139, 2014.7.
- 6) 中島章典,丸山祥平, Reem AlSehnawi,武田龍國, Nguyen Minh Hai,藤倉修一:減衰の振幅依存性を有する橋脚模型 の振動挙動の再現解析の試み,構造工学論文集, Vol.63A, pp.196-208, 2017.3.