

減衰の振幅依存性を有する鋼製橋脚模型の弾塑性振動挙動の再現解析

大日本コンサルタント(株)
宇都宮大学
同上

正会員
フェロー会員
正会員

○ 武田龍國

中島章典

Nguyen Minh Hai 正会員 藤倉修一

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や既設構造物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^{1),2)}が行われるが、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^{3),4)}。さらに、この減衰定数の振幅依存性は、斎藤⁴⁾、竹嶋⁵⁾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性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いない。中島⁶⁾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。

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に示す。図-1に示すように、橋脚天端では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、振動台上では入力地震動を計測するために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、弾性域および弾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。振動

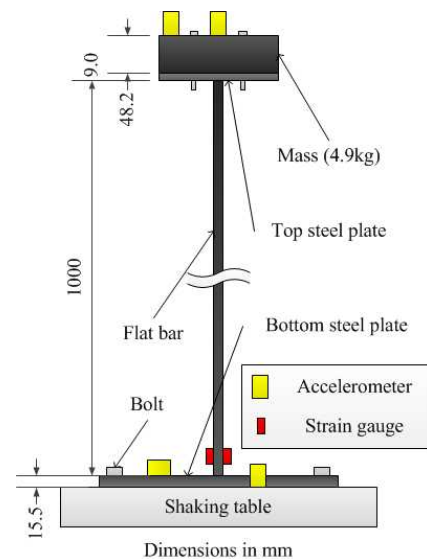


図-1 試験体概要

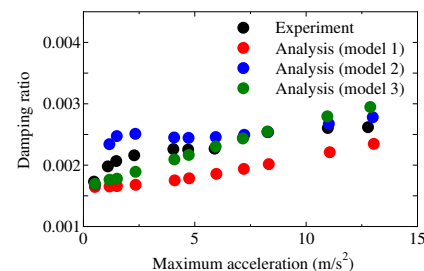


図-2 減衰定数と最大応答加速度の関係の比較

倍率 25% までは橋脚模型の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、75% の地震波を与えたのち、橋脚部材の残留ひずみを残したまま振動倍率 100% の地震波を与えた。

(3) 実験結果

a) 自由振動実験

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。1次固有振動数は最大応答加速度によらず一定な値(2.41Hz)であった。この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が分かる。また、固有振動数付近の振動数成分を取り出すため、各自由振動波形に対してバンドパスフィルター処理を行い、得られた波形より減衰定数を求めた。得られた減衰定数と最大応答加速度の関係を図-2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-2からばらつきはあるが、やはり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。

b) 強制振動実験

振動倍率 75% の場合について、強制振動実験より得られた橋脚天端加振方向加速度の時刻歴応答波形を図-3に黒線

Key Words: 鋼製橋脚模型, 振動実験, 減衰の振幅依存性, 非線形動的解析

〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 Tel.028-689-6208

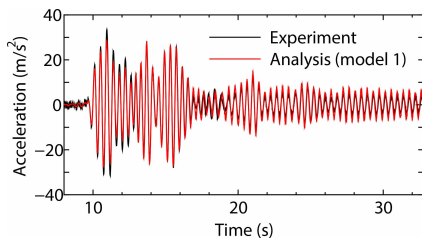


図-3-a 解析モデル 1

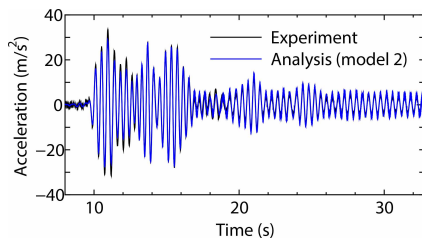


図-3-b 解析モデル 2

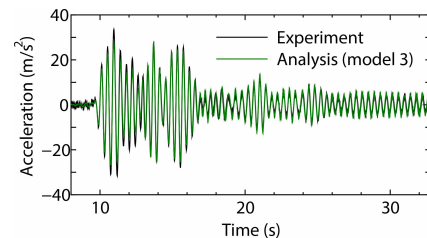


図-3-c 解析モデル 3

図-3 強制振動実験における橋脚天端の時刻歴加速度応答波形(兵庫県南部地震 75%)

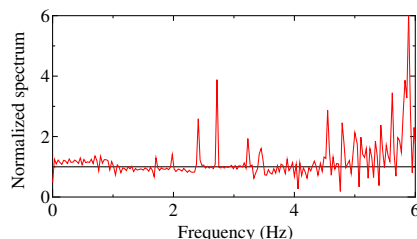


図-4-a 解析モデル 1

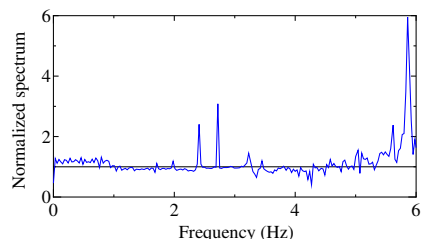


図-4-b 解析モデル 2

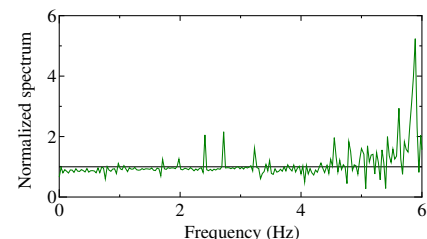


図-4-c 解析モデル

図-4 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比

で示す。この時の橋脚基部の最大軸ひずみは 2347μ であった。なお別途行った試験体を使用した鋼材の引張試験より、鋼材のヤング係数は 202kN/mm^2 、降伏応力は 301N/mm^2 であった。これより鋼材の降伏ひずみは 1490μ と求めることができ、設計通り橋脚部材は振動倍率 75% では塑性化していることが分かる。

3. 数値解析

(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。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。解析モデルは橋脚部材および回転ばねのモデル化の違いにより 3 通り分けられる。解析モデル 1 では、橋脚部材の応力-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 2 および解析モデル 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、それぞれバイリニア型モデル、Hardin-Drnevich モデルで与えた。

(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 次固有振動数および減衰定数を求めた。1 次固有振動数は全ての解析モデルが実験結果を精度よく再現しており振幅依存性は生じなかった。減衰定数と最大応答加速度の関係を図-2 に示す。赤丸は解析モデル 1 の結果、青丸は解析モデル 2 の結果、緑丸は解析モデル 3 の結果を表す。図-2 は全ての解析モデルの減衰定数が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、解析モデル 2、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

解析結果を図-3 に示す。図-3 より全ての解析モデルの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なったため、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。また、強制振動解析結果の比較を行うため、時刻歴波形に対して FFT 解析を行い、実験結果のフーリエスペクトルとの比を取った。その結果を図-4 に示す。フーリエスペクトル比は解析結果のフーリエスペクトルを実験結果のそれで除しているため、実験結果に対する再現性が良くなると 1 のラインに近づくことから、図-4 より解析モデル 3 が最も精度よく実験結果を再現していることが分かる。

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。
2. 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

- 1) 岡内功ら：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.
- 2) 新山惇ら：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，pp.157-162，2005.12.
- 4) 斎藤拓哉ら：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) 竹嶋竜司ら：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) 中島章典ら：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.