減衰の振幅依存性を有する高架橋模型の振動挙動の再現解析

宇都宮大学　学生員　○ 小川和晃，武田龍國　フェロー会員　中島章典
正会員　NGUYEN MINH HAI　正会員　藤倉修一

1.　はじめに

橋梁構造物の耐震設計に際しては，振動挙動を時刻歴解析により再現することは一般的であり，その際にはできるだけ再現性の高い解析モデルの構築が求められる．このための基礎データの収集を目的として，多くの構造物に対して振動計測が行われ，固有振動数や減衰定数などの同定結果と数値解析結果との比較が行われており，さらに振動挙動の再現が試みられてきた．

これまで，橋脚模型では減衰の振幅依存性を考慮した検討が行われている [1)]．しかし，実際的な橋梁模型ではそのような検討があまり行われていない．

そこで本研究では，実橋梁と比べ容易に振動特性が把握できる高架橋模型を用いて，線形解析および減衰の振幅依存性を考慮できる非線形解析を行い，振動挙動の時刻歴応答解析による再現性を比較，検討する．

2.　試験体概要

本研究に用いた高架橋模型を**図–1** に示す．鋼製橋脚の上鋼板と上部構造として用いた H 鋼はボルトによって固定している．また，振動実験を行う際には高架橋模型の下鋼板を M10 ボルト 4 本を用いて振動台に強固に固定した．実験に用いた高架橋模型各部の寸法と単位体積重量を**表–1** に示す．

3.　高架橋模型における計測

(1)　自由振動実験

初めに，**図–1** に示す高架橋模型に対して自由振動実験を行った．H 鋼上部で計測した最大応答加速度が 0.5m/s^2～7.0m/s^2 程度になるように，強制変位によって加振を行った．微小振動から大振幅まで大きさを変えて加振を行い，応答加速度を時間刻み 0.001 秒で 32768 点計測した．

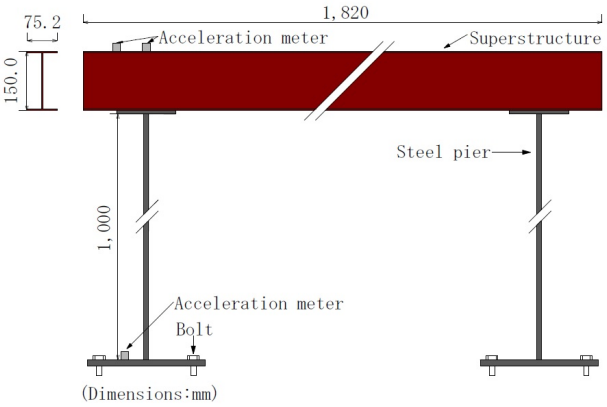
計測器の設置場所として，H 鋼上部には橋軸方向および橋軸直角方向に，下鋼板上には鉛直方向に加速度計を設置した．

(2)　強制振動実験

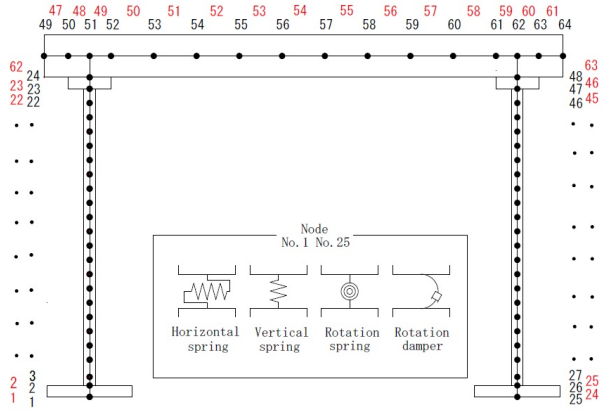
次に，**図–1** に示す高架橋模型に対して強制振動実験を行った．加振に用いた地震波は 1995 年兵庫県南部地震時の JMA 神戸記録波を調整した地震波である．また，JMA 神戸記録波を 50%，25%，10%と調整することで振動レベルが異なる 3 種類の地震波を用いて強制振動実験を行った．計測器の設置場所は，自由振動実験の場合と同じとした．

表–1　高架橋模型の断面諸量

部材	寸法 (mm)	単位体積重量 (kN/m^3)
上鋼板	8.9 × 85.3 × 150.4	75.6
橋脚部材	1000 × 19.9 × 11.7	75.3
下鋼板	15.6 × 300 × 300	76.2
H 鋼	150 × 75.2 × 4.3 × 4.3	74.8



図–1　高架橋モデル



図–2　線形解析モデル

4.　高架橋模型のモデル化

梁要素を用いた有限要素法を用いて，高架橋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．解析モデルの概要を**図–2** に示す．

(1)　線形解析モデル

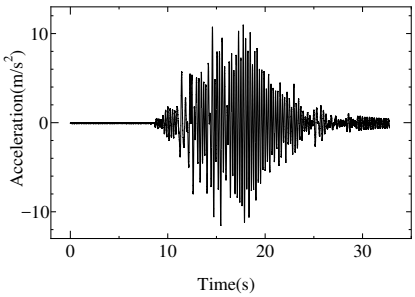
高架橋模型の解析モデルを**図–2** に示す．解析モデルは基本的に梁要素で構成し，節点数 64，要素数 63 とした．

黒字が節点，赤字が要素の番号を表している．**図–2** に示す解析モデルの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み，時刻歴応答解析を行った．まず，解析モデルの固有振動数が実験結果である 4.12Hz になるように回転地盤ばね定数を設定した．その次に，自由振動実験で得られた減衰性状に合うように橋脚部材の材料内部減衰に対応する減衰定数および橋脚基部の回転ダッシュポットを決定し，解析モデルを構築した．

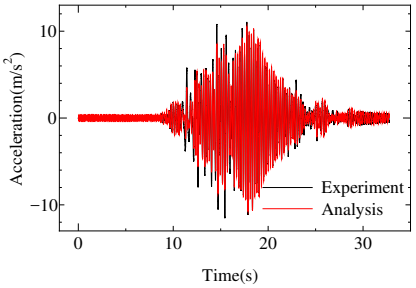
(2)　非線形解析モデル

振幅依存性を有する橋脚基部の減衰の影響を考慮するために組み込んだ回転ばねの非線形復元特性として，ここでは

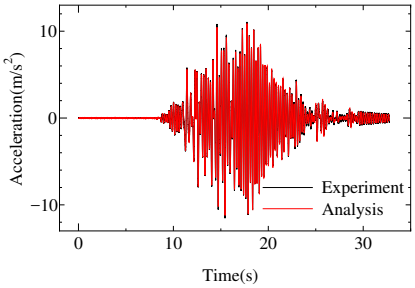
Key Words: 高架橋模型，振動実験，減衰の振幅依存性，非線形動的解析
〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科　Tel.028-689-6210　Fax.028-689-6210



図–3-a 実験結果

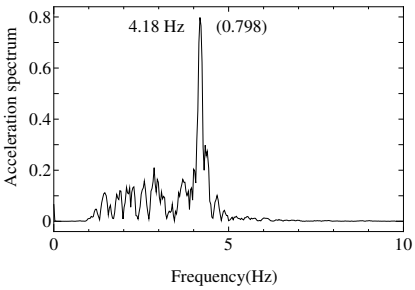


図–3-b 実験結果と解析結果（線形動的応答解析）

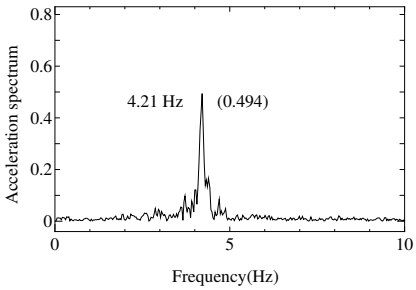


図–3-c 実験結果と解析結果 (バイリニア型モデル）

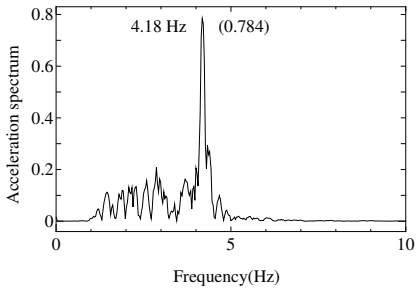
図–3 時刻歴応答加速度波形の実験結果と解析結果の比較



図–4-a 実験結果

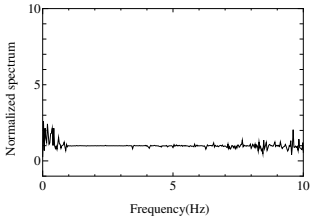


図–4-b 解析結果（線形動的応答解析）

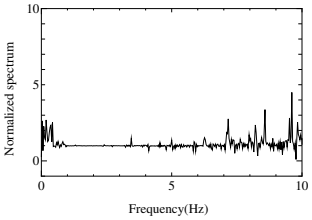


図–4-c 解析結果（バイリニア型モデル）

図–4 フーリエスペクトルの実験結果と解析結果の比較



図–5-a バイリニア型モデル



図–5-b HD モデル

図–5 フーリエスペクトルの比

バイリニア型モデルと Hardin-Drnevich モデル（以下，HD モデル）の 2 種類を用いた．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．回転ばねをバイリニア型モデルとした解析モデルについてのみ説明し，回転ばねを HD モデルとした解析モデル結果については割愛する．また，橋脚部材の材料内部減衰は線形解析モデルと同じ値を用いた．

5. 時刻歴応答解析

(1) 実験結果と線形解析結果の比較

神戸記録波 50%で加振した実験結果と，時刻歴応答解析結果の応答加速度の時刻歴波形とそのフーリエスペクトルを比較する．

強制振動実験結果を**図–3-a** に，フーリエスペクトルを**図–4-a** に示す．強制振動実験結果と線形動的応答解析結果との比較を**図–3-b** に，線形動的応答解析結果のフーリエスペクトルを**図–4-b** に示す．**図–3-b** において，黒線は実験結果，赤線は解析結果である．**図–3-b** より解析結果である赤線のほうが実験結果である黒線に比べて応答加速度が幾分小さいことがわかる．**図–4-a**，**図–4-b** よりフーリエスペクトルが実験結果と解析結果では大きく異なり，実験結果に比べて解析結果のフーリエスペクトルのピーク値では，卓越振動数の誤差が 0.7%，加速度スペクトル値の誤差が-38.1%となった．以上より，振動挙動の線形解析による再現性は必ずしも高くない．

(2) 実験結果と非線形解析結果の比較

実験結果と橋脚基部の回転ばねにバイリニア型モデルを用いた非線形解析結果との比較を**図–3-c** に，この時の解析結果のフーリエスペクトルを**図–4-c** に示す．**図–3-c** より時刻歴波形の実験結果を概ね再現できているといえる．また，**図–4-c** よりフーリエスペクトルのピーク値は実験結果と比べて卓越振動数の誤差が 0%, 加速度スペクトル値の誤差が-1.75%となった．実験結果と橋脚基部の回転ばねに HD モデルを用いた結果との比較では，**図–3-c** の場合と似たような結果であるため図は省略する．また，各解析結果の加速度フーリエスペクトルを実験結果の加速度フーリエスペクトルの値で除した加速度フーリエスペクトルの比を求め，**図–5-a**，**図–5-b** に示す．全体的に，HD モデルを用いた場合よりもバイリニア型モデルを用いた場合の再現性が高いことがわかる．

6. おわりに

本研究では，高架橋模型の振動挙動の数値解析による再現性を比較，検討した．本研究の検討を通して得られた主な結論を以下に示す．

1. 時刻歴応答解析により構造物の振動挙動を再現する際，減衰定数の振幅依存性が再現性に影響する．
2. 減衰の振幅依存性を考慮したモデルの結果のほうが，減衰の振幅依存性を考慮しない場合よりも実験結果を精度よく再現できた．

参考文献

1) 中島章典，丸山祥平，Reem AISehnawi，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，pp196-208，2017.3.