

# 減衰に着目した高架橋モデルの非線形挙動に関する 振動台実験とその数値解析

宇都宮大学 ○ 学生員 笠松 正樹  
宇都宮大学 正会員 中島 章典  
宇都宮大学 学生員 緒方 友一  
オイレス工業 正会員 横川 英彰

## 1. はじめに

近年、兵庫県南部地震や新潟県中越地震などの大規模地震が発生する中、橋梁構造物の耐震設計において、事前に構造物の非線形動的挙動を予測し設計に反映させる必要性が高まっている。したがって、非線形動的解析によって求められる対象構造モデルの応答値が、実構造物の挙動を精度良く再現している必要がある。

現状において、橋梁構造物の固有振動特性については、線形動的解析時にある程度再現されていると言える。また、減衰特性については、多数の実測資料を基に、その一般的傾向および要因の影響の検討がなされている<sup>1),2)</sup>が、減衰要因は非常に複雑であり、さらに検討の余地がある。

筆者らは、橋脚、上部構造、支承からなる高架橋モデルの振動実験を行い、固有振動数および減衰特性の再現性を検討している<sup>3)</sup>が、さらに本研究では、鋼製部材の一部が非線形挙動に至る強制振動実験を行う。また、その非線形動的挙動を再現できる解析プログラムを構築し、実験と解析両者の結果を比較する。また、実際に耐震設計などで利用される解析プログラムの再現性を確認することを目的としている。この場合、高架橋モデルはできるだけ簡易なものとし、モデル化の際には、高架橋を構成する部材それぞれの要素実験によって得られた材料特性および減衰特性を組み込み、材料非線形および幾何学的非線形を考慮した平面骨組のための有限要素法と、ニューマークの $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )および修正ニュートンラフソン法を併用した非線形動的解析を用い、振動実験結果と数値解析結果の再現性の検討を行う。

ここで、高架橋モデルの振動実験結果と数値解析結果の再現性の検討については現在進行中であるため、現段階までに行った、仮想的に重りを上部構造と考えた重りあり橋脚においての振動実験結果と数値解析結果の再現性について述べる。

## 2. 実験概要

振動実験においては図-1に示すような、仮想的に重りを上部構造と考えた重りあり橋脚モデルを対象として振動実験を行った。ここで要素実験として、この重りあり橋脚モデルにおいて、重りも上鋼板もない片持柱モデルの振動実験も併せて行った。

振動実験で用いた重りあり橋脚モデルおよび片持柱モデルの固有振動数あるいは減衰特性を、数値解析モデルにより再現するために、模型各部材のそれぞれの寸法や重量を正確に計測するとともに、模型に用いた鋼材の引張試験を実施して弾性係数を求めた。振動実験に用いた試験体の各部材の諸元

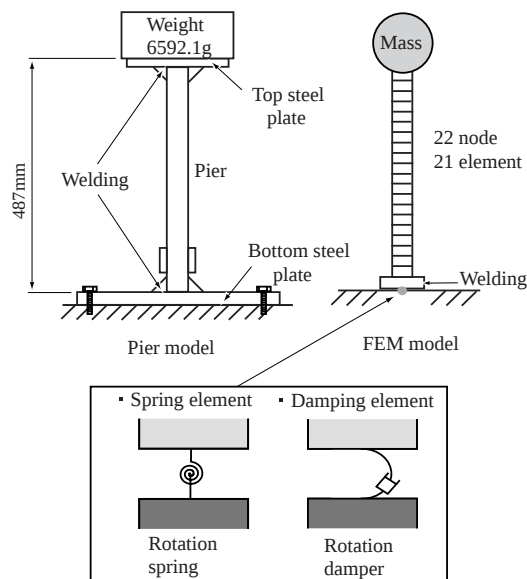


図-1 橋脚模型および有限要素モデル

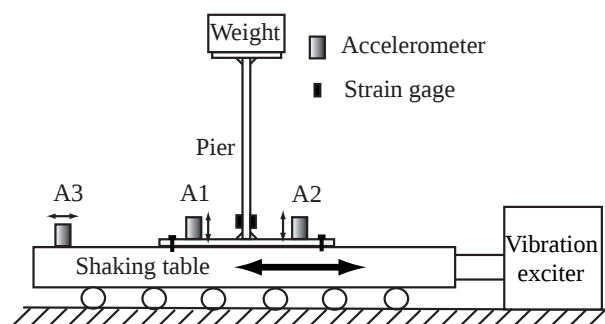


図-2 強制振動実験概要

を表-1に示す。なお、引張試験によって求めた平鋼の弾性係数、降伏応力、降伏ひずみはそれぞれ、 $208.4\text{GN/m}^2$ 、 $304.5\text{MN/m}^2$ 、 $1460\mu$ となった。ただし、橋脚模型頂部および基部に配置した鋼板については寸法と重量のみを測定した。

### (1) 自由振動実験

重りあり橋脚モデルおよび片持柱モデルの固有振動数や減衰特性を把握するためにそれぞれの自由振動実験を行った。手法としては、模型頂部の水平方向に瞬間的な外力を加え、後の自由振動状態における模型基部のひずみを測定した。ここで、片持柱モデルの自由振動実験では、基部からの逸散減衰が極力生じないように十分な剛性を有する鋼部材に万力4つで下鋼板を強固に固定して振動実験を行った。

Key Words: 高架橋模型, 振動台実験, 非線形動的解析, モデル化, 減衰要因

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6210

表-1 断面諸量

| 部材  | 寸法 (mm)             | 密度 (kN/m <sup>3</sup> ) | 弾性係数 (GN/m <sup>2</sup> ) |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| 平鋼  | 11.64×19.76         | 76.97                   | 208.41                    |
| 上鋼板 | 125.89×100.05×8.69  | 75.58                   | -                         |
| 下鋼板 | 300.97×300.98×11.61 | 75.86                   | -                         |

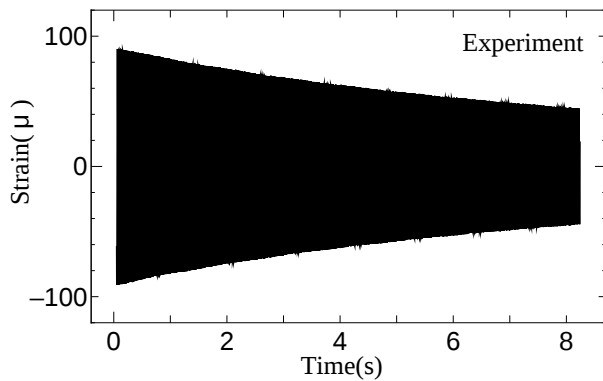


図-3 片持柱模型基部のひずみ

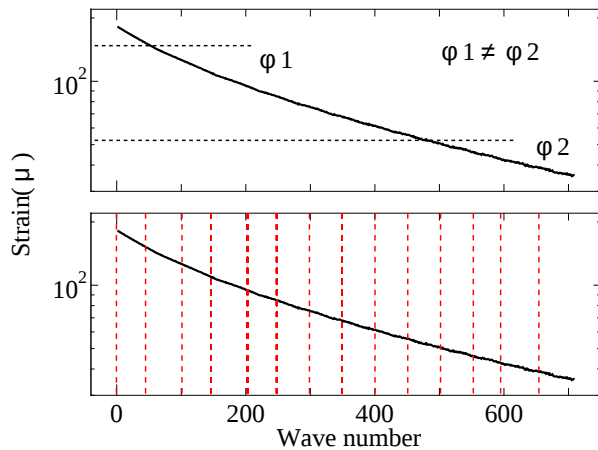


図-4 片持柱模型基部のひずみ振幅と振動波数の関係

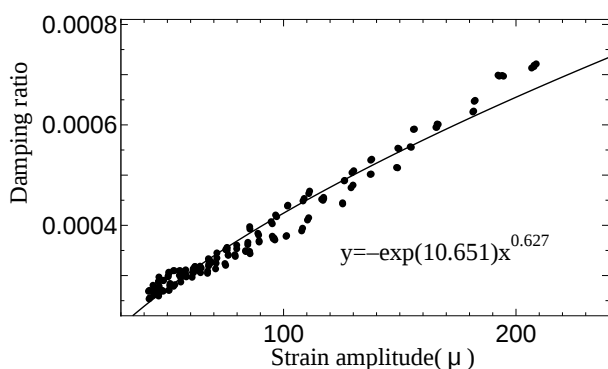


図-5 片持柱模型基部のひずみ振幅と減衰定数の関係

また、重りあり橋脚模型の自由振動実験では振動台の性能上、M10のボルト4本で下鋼板を固定して自由振動実験を行った。各データのサンプリング周波数は1000Hz、すなわち計測間隔は1.0ms、計測時間を16.384sとした。

## (2) 強制振動実験

重りあり橋脚模型を対象に強制振動実験を行った。強制振動実験においては、振動台を付属の制御装置で、過去の地震

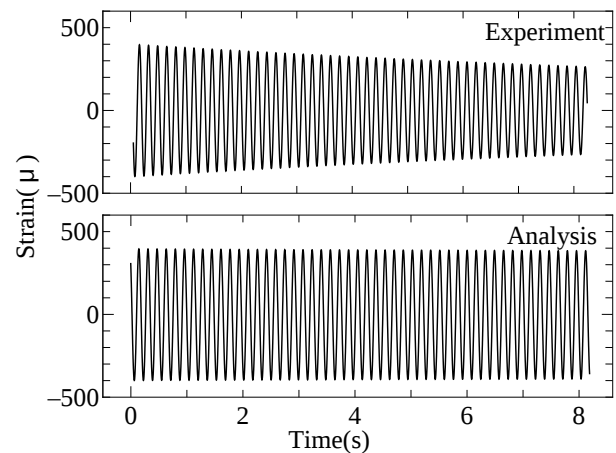


図-6 重りあり橋脚模型基部のひずみの振動波形

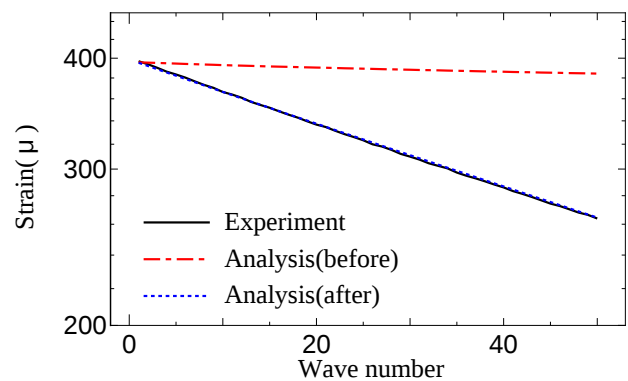


図-7 重りあり橋脚模型基部のひずみ振幅と波数の関係

より観測された加速度データを入力して加振し、その時の橋脚基部のひずみを計測した。本研究の強制振動実験においては、釧路沖地震時のJMA 釧路記録波および兵庫県南部地震時のJMA 神戸記録波を調整した加速度データを用いた。その際、数値解析に用いる入力加速度を得るために、振動台上に容量10m/s<sup>2</sup>の加速度計(図-2のA3)を設置し加速度を計測した。

各データのサンプリング周波数は1000Hz、すなわち計測間隔は1.0ms、計測時間を32.768sとした。

## 3. 解析概要

本研究では、数値解析法として、材料非線形および幾何学的非線形を考慮した平面骨組のための有限要素法と、ニューマークのβ法(β=1/4)および修正ニュートンラフソン法を併用した非線形動的解析法を用いた。鋼材の材料特性は完全弾塑性関係として考慮し、数値計算の際には、溶接部のモデル化も含め、図-1に示すように試験体をモデル化した。振動実験では、主に橋脚基部付近が塑性化すると予想されるが、溶接部は断面が大きく塑性化は考えにくいいため、溶接部を橋脚部とは別にモデルに組込む必要がある。橋脚部は溶接

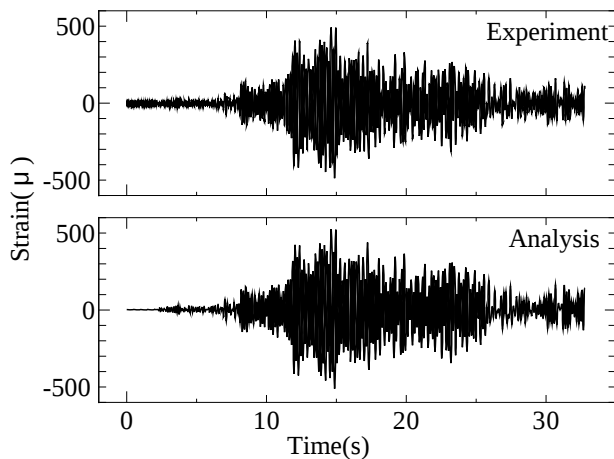


図-8 重りあり橋脚模型基部のひずみの振動波形

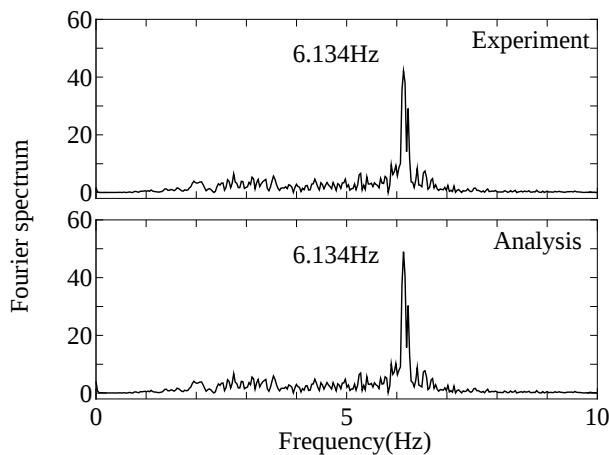


図-9 重りあり橋脚模型基部のひずみのスペクトル解析結果

部も含めて、22 節点 21 要素でモデル化し、上鋼板および重りは質点としてモデル化した。また、図-1 に示すように基部の節点には回転方向の地盤ばねおよびダッシュポットを考慮し、基部からの逸散減衰を再現できるようにした。また、モデル化の際には、対象モデルの固有値解析を行い、実験から得られた固有振動数との再現性を確認した。

また、既往の研究<sup>4)</sup>を参考にして、鋼材の材料内部減衰に起因する粘性減衰を剛性比例型でモデル化した。片持柱模型の自由振動実験において算定した 1 次振動モードの減衰定数および固有円振動数を用いて減衰係数を算出し、その係数を剛性マトリックスに乗じたものを減衰マトリックスとした。ここで、減衰マトリックスは不変として取り扱うのが一般的であるため、初期の剛性マトリックスに比例する初期剛性比例型を用いて減衰マトリックスを構築した<sup>5)</sup>。

#### 4. 振動実験結果と解析結果の比較

##### (1) 片持柱模型の自由振動

まず、片持柱模型の自由振動実験で得られた基部のひずみの自由振動波形を図-3 に示す。縦軸はひずみ、横軸は時間である。ここで、自由振動実験によって得られたひずみデータを FFT 処理して得られた 1 次固有振動数は 43.52Hz、また、固有値解析結果は 43.61Hz となり、モデルのモデル化の妥当性が確認できる。

また、この自由振動波形から得られる各サイクルのひずみの振幅と振動波数の関係を図-4 (上) に示す。図-4 の縦軸

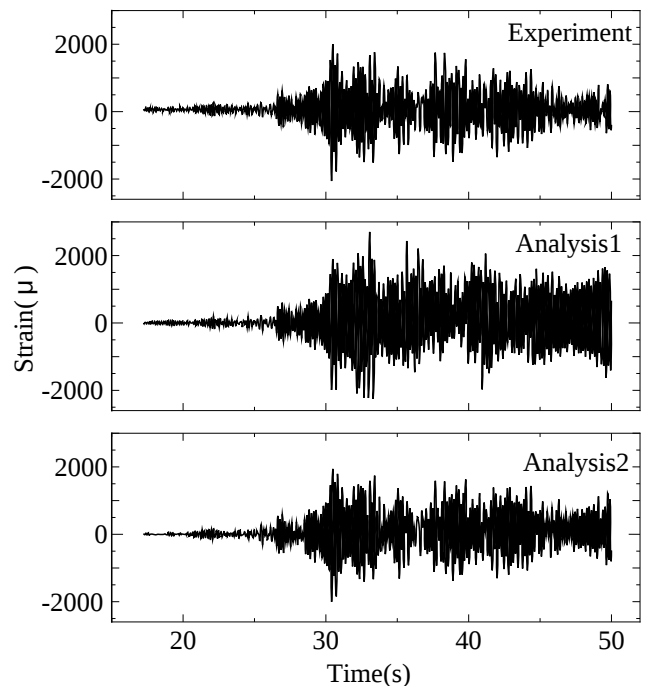


図-10 重りあり橋脚模型基部のひずみの振動波形

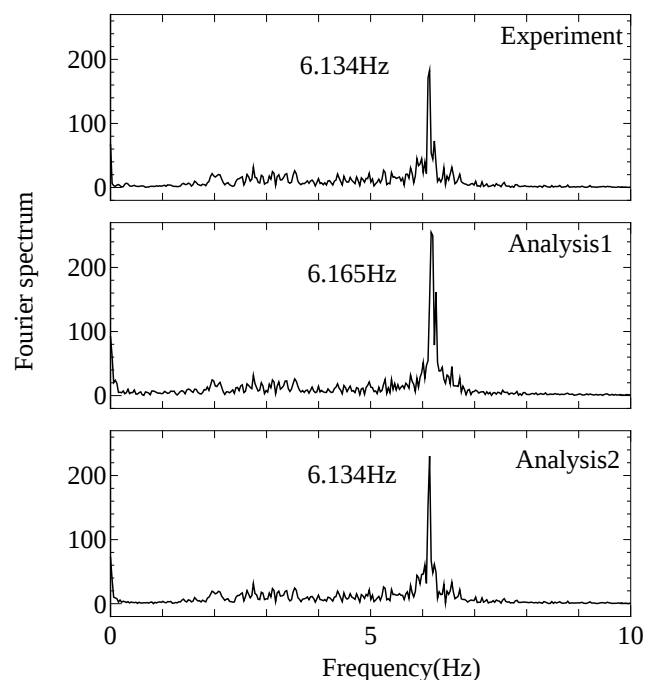


図-11 重りあり橋脚模型基部のひずみのスペクトル解析結果

は自由振動波形の各サイクルのひずみ振幅を対数で、横軸は振動波数を表している。本来なら振動実験によって得られたこの関係の傾きより、減衰定数を算出するのだが、本研究では、自由振動実験から得られる減衰定数には振幅依存性が見られる。そこで大きさの異なるひずみ振幅毎の傾きを求めた。つまり、図-4 (下) に示すように、ひとつの自由振動状態の応答ひずみから振動波数を 50 波毎にとった区間で区切り、その区間での近似直線の傾きから減衰定数を求めた。その結果、図-5 に示すような減衰定数とひずみの関係が求まり、実験式を得ることができた。その結果、100μ 時の減衰定数を代表値として減衰定数 0.000424 を算出した。この値

を数値解析における橋脚部の減衰マトリックスの構成に用いた。

## (2) 重りあり橋脚模型の自由振動

重りあり橋脚模型の自由振動実験で得られた橋脚基部のひずみの自由振動波形を図-6 (上) に示す。また、自由振動実験から得られる各サイクルのひずみの振幅と振動波数の関係を図-7 (実線) に示す。

ここで、片持柱模型の自由振動実験結果から同定した減衰定数を用いて、重りあり橋脚模型の数値解析モデルに用いた。その結果、図-6 (下) の自由振動波形を得た。また、そのひずみの振幅と振動波数の関係を図-7 (一点鎖線) に示す。この図から分かるように、数値解析の減衰が振動実験の減衰よりも小さいことが分かる。つまりは振動実験時に、橋脚の内部粘性減衰の他に減衰要因があると考えられる。そこで、図-2 の A1, A2 に示すように、容量  $10\text{m/s}^2$  の加速度計を設置し加速度を計測したところ鉛直方向に加速度を確認することができ、逸散減衰の影響があるのではないかと考えた。そこで、数値解析においては、図-1 に示すように、橋脚基部に回転ばねおよび回転ダッシュポットを考慮した。それぞれの値について、回転ばねのばね定数は解析モデルの固有振動数が実験値に一致するように、回転ダッシュポットの減衰係数は、自由振動波形が一致するように同定した。その結果、ひずみの振幅と振動波数の関係は図-7 (点線) に示すようになり、振動実験と解析結果の減衰定数を一致させた。

## (3) 重りあり橋脚模型の強制振動実験

前述の自由振動の際に用いた重りあり橋脚模型において、振動台を用いて、基部のひずみが線形範囲における強制振動実験を行った。ここで用いた地震波は釧路沖地震の JMA 釧路記録波を加工したものである。その結果、橋脚基部において図-8 (上) に示すような振動波形を得た。また、得られたひずみデータを FFT 処理した結果を図-9 (上) に示す。またこの際、前述の重りあり橋脚模型の自由振動の際に用いた解析モデルと同じものを用いて、数値解析を行った。その解析結果を図-8 (下) に示し、そのひずみデータを FFT 処理したものを図-9 (下) に示す。振動実験結果および数値解析結果の両者を比較すると、振動波形および卓越振動数ともに定性的、定量的に再現することができた。

次に同じ重りあり橋脚模型を用いて橋脚基部のひずみが非線形挙動に至るように振動台で加振する強制振動実験を行った。JMA 釧路記録波を用いて振動実験を行った結果を図-10 (上) に示す。また、得られたひずみデータを FFT 処理した結果を図-11 (上) に示す。また、前述の重りあり橋脚模型の自由振動の際に用いた解析モデルと同じものを用いて、数値解析を行った。その結果を図-10 (中) に示し、そのひずみデータを FFT 処理したものを図-11 (中) に示す。振動実験結果および数値解析結果を比較すると振動波形および卓越振動数ともに一致しない結果となった。ここで考えられる原因として、基部の固定の緩みによる振動系の剛性の変化にあるのではと考えた。そこで、解析において、回転ばねのばね定数および回転ダッシュポットの係数を実験結果と数値解析結果における卓越振動数が一致するように同定した (図-11 (下))。その結果、図-10 (下) に示すような振動波形を得

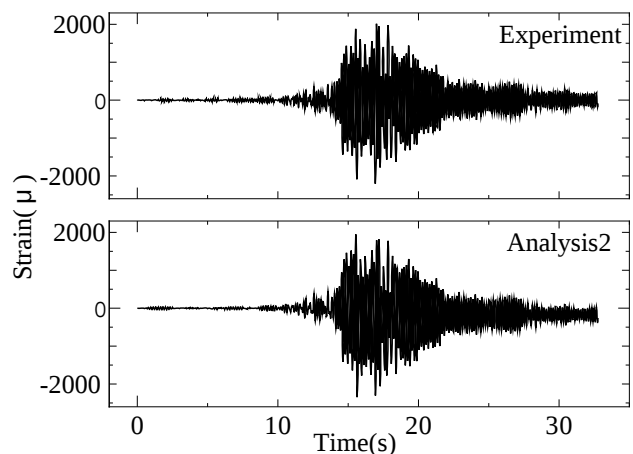


図-12 重りあり橋脚模型基部のひずみの振動波形

ることができ、再現性が確認できた。また、同じパラメータを用いた解析モデルを用いて、兵庫県南部地震の JMA 神戸記録波による振動実験結果と解析結果を比較したものが図-12 になるが、この場合も再現性が確認できた。

## 5. おわりに

仮想的に重りを上部構造と考えた橋脚を対象として、非線形挙動に至る振動実験結果と数値解析結果の再現性を確認しようとした。その際、材料内部減衰や基部からの逸散減衰に着目し検討した。その結果から得られた主な事項は以下に示す。

1. 重りあり橋脚模型を対象とした数値解析において、片持柱模型の自由振動実験結果から得られた減衰定数、基部の回転ばねおよび回転ダッシュポットを組み込んだ数値解析モデルを用いることにより、線形範囲における強制振動実験結果と数値解析結果の減衰特性において再現性を確認することができた。
2. 非線形に至る強制振動実験結果と数値解析結果を比較すると、振動波形および卓越振動数ともに一致しなかった。その原因として、基部の固定の緩みによる振動系の剛性の変化にあるのではと考え、実験結果と解析結果の卓越振動数が一致するように回転ばねのばね定数および回転ダッシュポットの係数を微調整すると再現性が得られる結果となった。

## 参考文献

- 1) 伊藤学, 片岡恒雄: 橋梁構造の振動減衰, 土木学会論文集, 第 117 号, pp.12-22, 1965.5.
- 2) 加藤雅史, 島田静雄: 橋梁振動特性の実測データによる統計分析, 土木学会論文集, 第 338 号, pp. 229-232, 1983.10.
- 3) A.Nakajima, M.kasamatsu, *et al.*: Experimental study on vibration characteristics of simple viaduct model and its reproduction by numerical model, 2nd Asia Conference on Earthquake Engineering, 2006.3.
- 4) 中島章典, 内川直洋, 齊木功: 単純な橋梁モデルの固有振動特性に関する基礎的検討, 構造工学論文集, Vol49A, pp.319-328, 2002.3.
- 5) 緒方友一, 中島章典, 笠松正樹, 横川英彰, 日野秀幸: 第 10 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2007.2.