

高架橋モデルの振動特性に関する実験とその有限要素法解析

笠松正樹¹・中島章典²・横川英彰³・斉木功⁴

¹学生会員 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻（〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

²正会員 工博 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻（〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

³正会員 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻（〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

⁴正会員 博（工） 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06）

1. はじめに

連続高架橋の設計に際しては、対象構造を適切にモデル化し線形あるいは非線形の動的応答解析を実施して、その耐震挙動を確認することも一般的となりつつある。その際、橋脚に加えて、上部構造、各種タイプの支承あるいは基礎構造をも考慮した解析モデルを用いて動的応答解析が実施されている¹⁾。また、上部構造の衝突現象や落橋防止構造の挙動の推定なども試みられている²⁾。一方、性能照査型設計法を取り入れる観点からも、耐震設計に対して構造物の動的応答解析の必要性が高まっている²⁾。

動的応答解析によって実構造の動的挙動をできるだけ精緻に再現するためには、まず、構造物の固有振動数や減衰特性を精度良く再現できる数値解析モデルを用いる必要がある。そのためには、実構造の固有振動数に加えて減衰特性をも実験的に同定し、それに合致するように精緻な解析モデルを構築することが必要である。しかし、実際には、実構造の固有振動数や減衰特性を実験的に同定することは容易ではない。

そこで本研究では、簡易な高架橋模型および、それらを構成する橋脚、上部構造の振動実験を行い、低次の固有振動数および減衰特性を調べた。次に、それぞれの構造の固有振動数をできるだけ精度良く再現するためのモデル化を詳細に検討し、また、減衰特性を特徴づける減衰要因の同定を試みた。そして、それぞれの構造特性や減衰要因を組み込んだ平面骨組のための有限要素法を用いた数値解析により橋脚のみ、上部構造のみ、高架橋模型の固有振動数および減衰特性を精度良く再現することを試みた。

文献3)では、高架橋模型の固有振動特性および減衰特性を、剛体ばねモデル解析を用いて検討している。しかし、非線形解析への適用も考えると、有限要素法を用いた解析の方が汎用性があると言え、ここでは、有限要

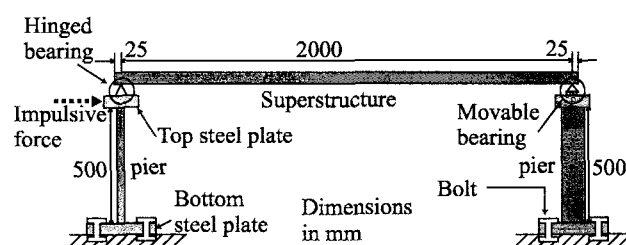


図-1 高架橋模型

素法に基づく動的解析を実施した。

2. 振動実験の概要

本研究では、図-1に示すような橋脚、上部構造、支承からなる簡易な高架橋模型を対象とした固有振動数および減衰特性の再現性の検討を進めた。2本の橋脚の上にそれぞれ固定支承、可動支承を設置した。固定支承側の橋脚に比べて可動支承側の橋脚には十分剛なH型断面の鋼材を用いた。したがって、高架橋模型の振動時には、基本的に上部構造と固定支承側の橋脚が一体となって振動し、可動支承側の橋脚はほとんど振動しないと考えられる。

振動実験で用いた高架橋模型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は、まず、高架橋を構成する橋脚、上部構造、支承の構造特性および材料特性を把握する必要がある。そこで、それぞれの寸法や重量を正確に計測するとともに、橋脚および上部構造に用いた鋼材の引張試験を実施して弾性係数を求めた。ただし、橋脚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。それらの諸量を表-1に示す。さらに各部の減衰要因のメカニズムをできるだけ正確に明らかにするためには、高架橋模型全体のみではなく、高架橋模型を構成する橋脚、上部構造の振

表-1 断面諸量

部材	寸法 (mm)	密度 (t/m ³)	弾性係数 (GN/m ²)	せん断弾性係数 (GN/m ²)
平鋼 1(上部構造)	15.73×38.02	7.771	206.73	81.13
平鋼 2(橋脚)	11.68×19.76	7.734	209.02	82.11
H 鋼	100.15×50.12×6.72×4.97	7.925	204.58	80.29
上鋼板	124.74×99.62×5.57	7.776	-	-
下鋼板	300.33×230.24×15.87	7.759	-	-

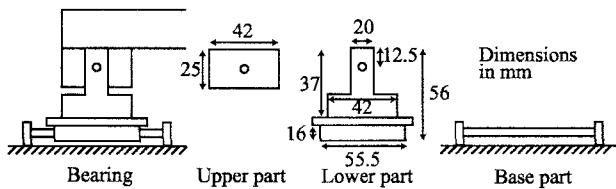


図-2 支承部詳細

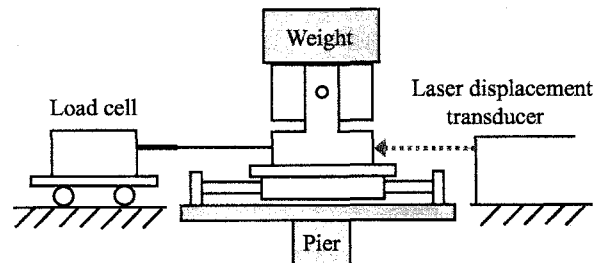


図-3 動摩擦係数試験

動実験も実施することが望ましい。

振動実験に際しては、各構造系の適切な所に手動で外力を加えて、その後、自由振動中に橋脚基部、上部構造スパン中央のひずみを測定した。また、可動支承部の水平変位を非接触式変位計（レーザー変位センサ）を用いて計測した。加振位置については、橋脚のみの場合は橋脚頂部を水平に加振し、上部構造のみの場合は上部構造スパン中央を鉛直に加振、高架橋模型の場合は固定側の橋脚頂部を水平に加振させた。振動実験時には橋脚の下鋼板を基盤に M22 のボルト 4 本で強固に固定して、逸散減衰の影響が極力生じないように配慮した。

図-2は支承部の詳細を示す。支承は大きく分けて、上沓、下沓、基部から構成される。支承の質量は固定支承で 571.5g、可動支承で 853.3g である。ここで、可動支承部の動摩擦係数を得るために試験を行った結果、平均的な値として動摩擦係数 0.013 を得た。一般的に、動摩擦係数は、接触し合う面の種類や状態によって定まるので、上部構造を対象とした振動実験の前後、高架橋模型を対象とした振動実験の前後で、動摩擦係数を得るための試験を行った。ここでは、図-3に示すように上沓の上に支承に作用する支点反力に対応する重りを載せて、下沓を容量 5N の小型の引張圧縮型のロードセルを用いて引張り、その引張力を計測した。また、その時の可動支承の下沓の変位を非接触式変位計で計測した。試験は数回ずつ行い、得られた値の平均値より上記の動摩擦係数を算出した。今回の振動実験において、ひずみおよび水平変位のデータ測定にはデジタル動ひずみ測定器を使用した。各データのサンプリング周波数は

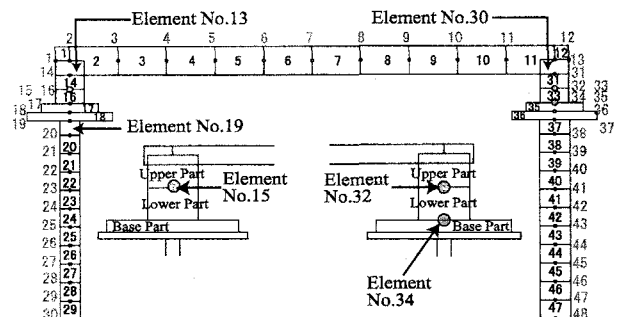


図-4 有限要素モデル

2000Hz、すなわち計測間隔は 5×10^{-4} s、計測時間を 8.192s とした。

3. 数値解析の概要

例えば、高架橋全体模型に対しては、図-4に示すように要素分割して、平面骨組のための有限要素法による固有値解析、時刻歴応答解析を行った。固有値解析、時刻歴応答解析どちらにおいても支承のモデル化、幾何剛性、せん断変形、断面の回転慣性、上部構造の張り出し部分、上鋼板と橋脚の溶接部分の影響を考慮した。支承の構造は複雑で正確にモデル化することは難しいので、支承を図-4中に示すように上沓、下沓、基部の3つの

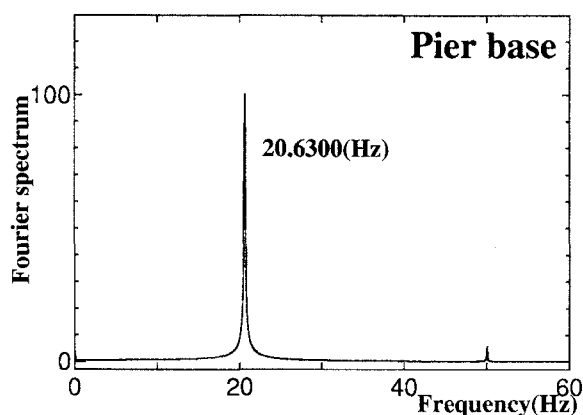


図-5 橋脚のフーリエスペクトル (実験結果)

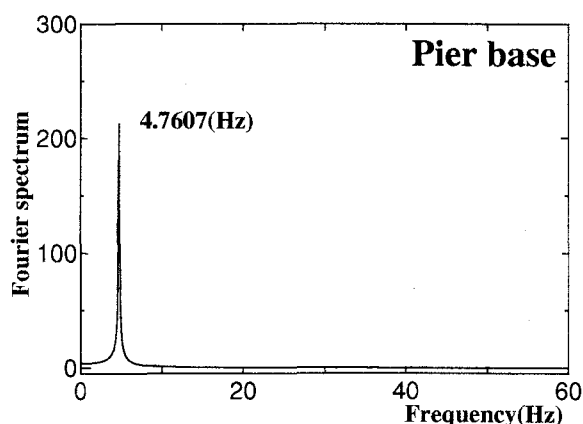


図-7 高架橋模型の橋脚のフーリエスペクトル (実験結果)

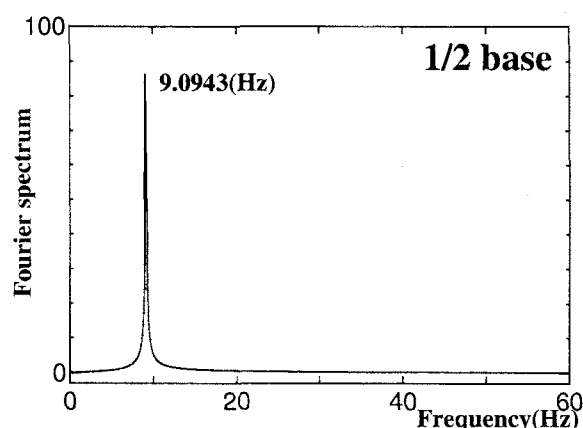


図-6 上部構造のフーリエスペクトル (実験結果)

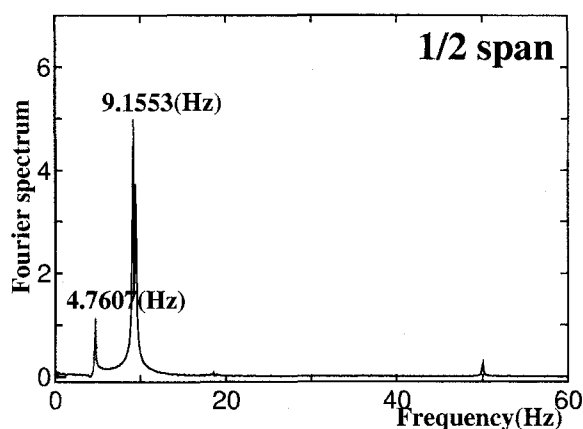


図-8 高架橋模型の上部構造のフーリエスペクトル (実験結果)

要素に分けてモデル化した。図-4の要素番号 15, 32 に対応する上沓 - 下沓間のヒンジ部には、ばね要素を配置し、水平 (橋軸) 方向、鉛直方向には剛な結合条件を満たすようなばね定数を用い、回転方向にはヒンジの条件を満たすように、ばね定数を 0 とした。可動支承側の要素番号 34 に対応する下沓 - 基部間にもばね要素を配置し、鉛直方向、回転方向には剛な結合条件を満たすようなばね定数を用い、水平方向においては可動支承の条件を満たすように、摩擦要素を挿入した。

橋脚に用いた平鋼と上鋼板は溶接により接合されているため、溶接部の質量は上鋼板直下の平鋼の要素 (図-4の要素番号 19) に含まれるものとした。上部構造と支承を結合する要素番号 13, 30 は質量を考慮しない仮想要素とした。

既往の研究⁴⁾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。そして、高架橋全体系の解析に際しては、橋脚に対応する減衰マトリックスと上部構造に対応する減衰マトリックスを組合せて高架橋の減衰マトリックスを構成した。次に、可

動支承部の摩擦を考慮した摩擦減衰は摩擦要素を導入して考慮した。

ここで、高架橋模型を構成する橋脚、上部構造のそれぞれ部材ごとの振動実験で得られたひずみの振動波形から、縦軸にひずみの最大振幅、横軸に波の数をとったひずみの振幅と振動波数の関係を求めた。それぞれのひずみの振幅と振動波数の関係において、最小二乗近似線より傾きを求め、そこから基本振動数に対応する減衰定数を算出した。

4. 数値解析結果と振動実験結果の比較

4.1 固有振動数の再現性

振動実験によって得られたひずみの振動波形に高速フーリエ変換 (FFT) をを行い、振動実験による固有振動数を得た。橋脚のみ、支承部を含む上部構造のみの振動実験によって得られたフーリエスペクトルをそれぞれ図-5、図-6に示す。図-5より橋脚のみの場合は 20.63Hz

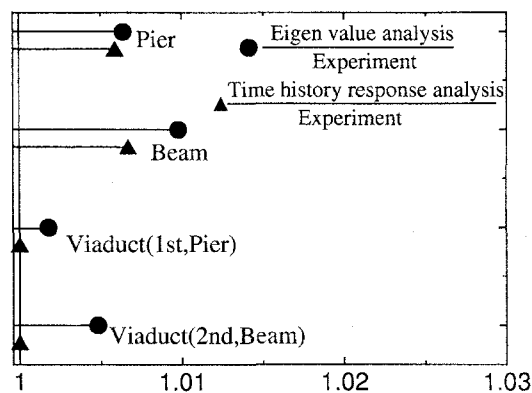


図-9 固有振動数の検討

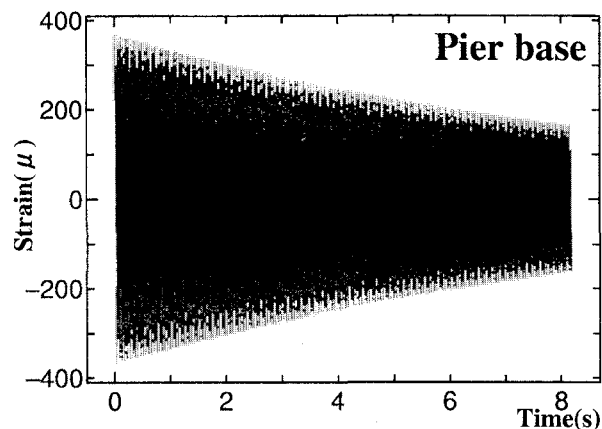


図-11 橋脚の1次振動モードの振動波形(解析結果)

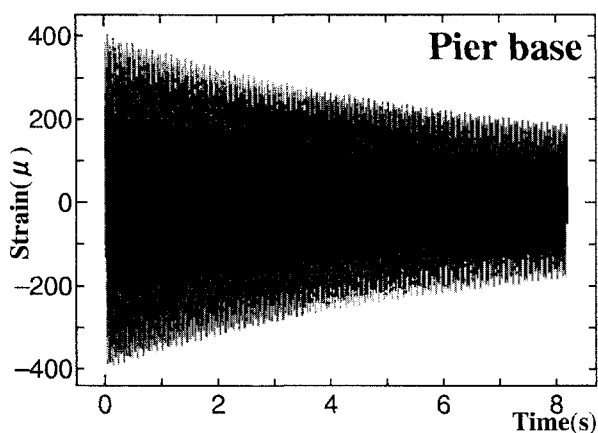


図-10 橋脚の1次振動モードの振動波形(実験結果)

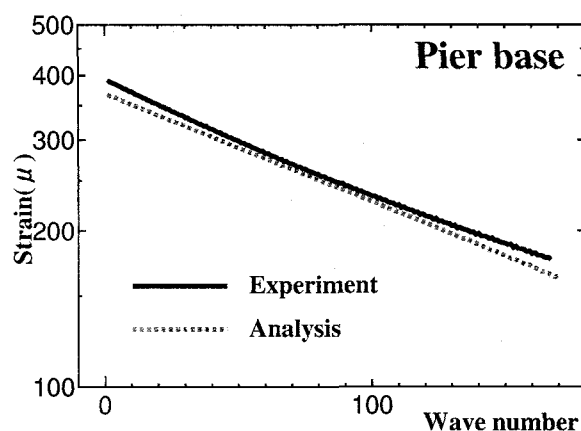


図-12 ひずみの振幅と振動波数の関係(橋脚)

付近、図-6より上部構造のみの場合は9.09Hz付近に強い卓越振動数が認められる。高架橋全体模型の振動実験によって得られた橋脚基部および上部構造スパン中央のひずみの振動波形のフーリエスペクトルを図-7、図-8に示す。図-7より高架橋模型橋脚では、4.76Hz付近にピークが認められる。図-8より高架橋模型上部構造では、4.76Hz付近と9.16Hz付近にピークを有しており、後者は上部構造のみの場合の1次固有振動数9.09Hzにほぼ一致する。よって、高架橋の1次振動モードは橋脚の曲げ振動が卓越し、2次振動モードは上部構造の曲げ1次振動が卓越していると考えられる。

以上の結果を踏まえ、固有振動数の実験結果と解析結果の比較を図-9に示す。図-9の縦軸は対象とする橋脚のみ、上部構造のみ、高架橋橋脚、高架橋上部構造を表し、横軸は解析結果の固有振動数を実験結果の固有振動数で除したものである。図-9中の記号の黒丸は非減衰系の固有値解析により得られた固有振動数を実験で得られた固有振動数で除したものである。また、黒三角は減衰の影響を考慮した時刻歴応答解析による振動波形にFFTを行い、得られた固有振動数を実験で得られた固有

振動数で除したものである。

その結果、固有値解析によって得られた固有振動数および、時刻歴応答解析による振動波形にFFTを行い得られた固有振動数は、どちらも実験によって得られた固有振動数に近づき差異は1%以内に収まる結果となる。

4.2 減衰特性の再現性

4.2.1 橋脚のみの場合

橋脚のみを対象とした振動実験によって得られた、橋脚基部のひずみの振動波形を図-10に示す。図-10より、振動波形が指数関数的に減衰しているのが分かる。橋脚のみの場合の減衰要因としては、材料内部減衰および基部での逸散減衰などが主な減衰要因であると考えられる。しかし、橋脚基部は、下端に溶接した下鋼板を径22mmのボルト4本で基盤に強固に固定しているので、逸散減衰の影響は小さいと考えられる。したがって、この場合の主な減衰要因は部材自身の材料内部減衰によるものと考えられる。また、橋脚のみの時刻歴応答解析により得られる対応したひずみ振動波形を図-11に示し、振動波形の再現性を検討した。その結果、時刻歴応答解

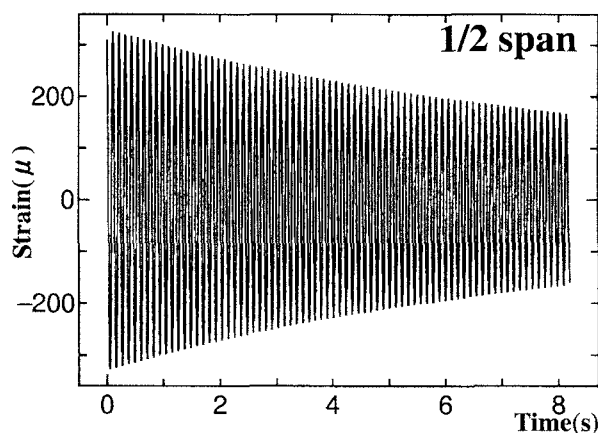


図-13 上部構造の1次振動モードの振動波形 (実験結果)

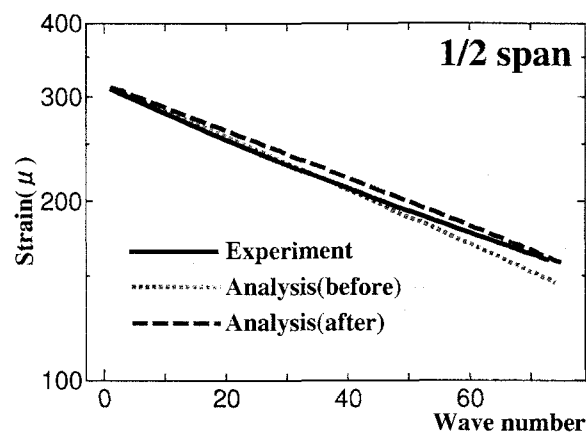


図-15 ひずみの振幅と振動波数の関係 (上部構造)

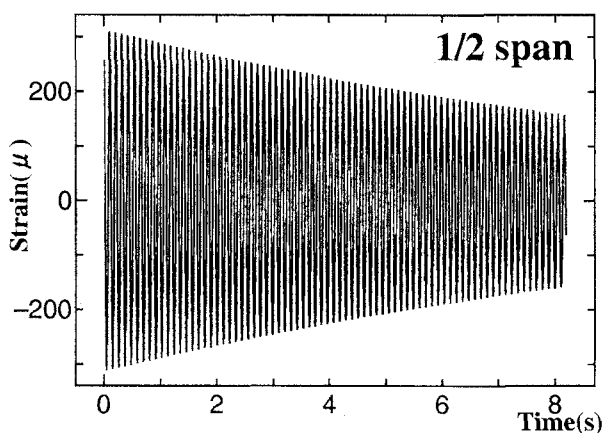


図-14 上部構造の1次振動モードの振動波形 (解析結果)

析によって得られた振動波形は実験によって得られた自由振動波形を定性的に再現することができた。

ここで、減衰特性を定量的に評価するために、縦軸にひずみの最大振幅、横軸に波の数をとったひずみ振幅と振動波数の関係を図-12を示した。この関係の最小二乗近似線より傾きを求め、そこから減衰定数を算出した。その結果、振動実験により得られた減衰定数は0.00077となり、これを剛性比例型として考慮した橋脚の時刻歴応答解析に用いることにより、時刻歴応答解析によって得られた減衰定数は0.00077となる。

4.2.2 上部構造のみの場合

支承部を含む上部構造のみを対象とした振動実験によって得られた上部構造スパン中央のひずみの振動波形を図-13に示す。これは1次振動モードに着目した振動波形であり、1次振動モードでは摩擦減衰の影響が支配的であることが報告されている^{4),5)}が、図-13の結果だけでは摩擦減衰の影響が明確には分からない。上部構造のみの場合の他の減衰の要因としては、上部構造自身の材料内部減衰などの影響が考えられる。

また、上部構造のみの時刻歴応答解析により求められ

たスパン中央のひずみの振動波形を、図-14に示し、振動実験によって得られた結果と比較した。その結果、時刻歴応答解析によって得られた振動波形は実験によって得られた自由振動波形を定性的に再現することができた。ここで、減衰特性を定量的に評価するために、図-15にひずみの振幅と振動波数の関係を示した。実験により得られた関係の最小二乗近似線より傾きを求め、そこから減衰定数を算出すると、0.00146となるが、これは、可動支承部の摩擦減衰の影響を含んでいる。時刻歴応答解析では粘性減衰を剛性比例型で表す際に減衰定数を用いるが、可動支承部の摩擦減衰の影響は摩擦要素により考慮している。そのため、振動実験で得られた減衰定数をそのまま時刻歴応答解析に用いると摩擦減衰の影響が実験と解析で二重に評価されてしまい、図-15の点線で示すように見かけ上、粘性減衰の影響が大きくなる。そこで、時刻歴応答解析に用いる減衰定数を0.00129とし、振動実験と時刻歴応答解析により得られた減衰定数が両者とも0.00146になるようにし、摩擦減衰の影響が二重に評価されないようにした。

上部構造のみを対象とした振動実験および時刻歴応答解析によって得られた可動支承部の水平変位の振動波形をそれぞれ図-16、図-17に示す。変位の振幅はどちらもほぼ同程度である。しかし、振動実験の振動波形を表す図-16では正側の変位振幅が負側の変位振幅より小さくなる。この理由として、可動支承の水平変位が上部構造の幾何学的非線形の影響を受けるためと考えられる。一方、時刻歴応答解析の振動波形を表す図-17では、幾何学的非線形を考慮していないので、正側と負側の変位振幅がほぼ同じになる。なお、図-16、図-17に示す可動支承の変位振幅はそれほど大きくはない。そのため、図-13、図-14のように振動波形がほぼ指数関数的に減衰していると考えられる。

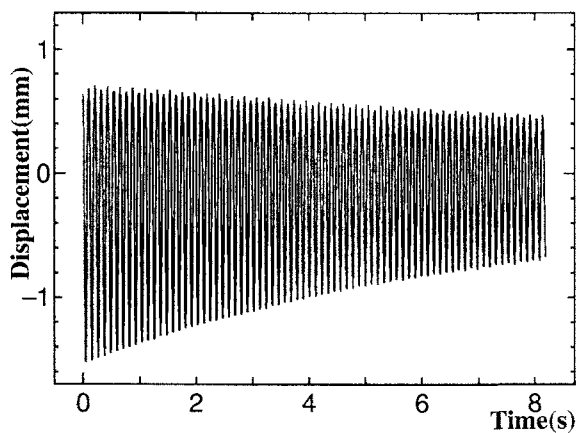


図-16 可動支承部の水平方向変位の振動波形 (実験結果)

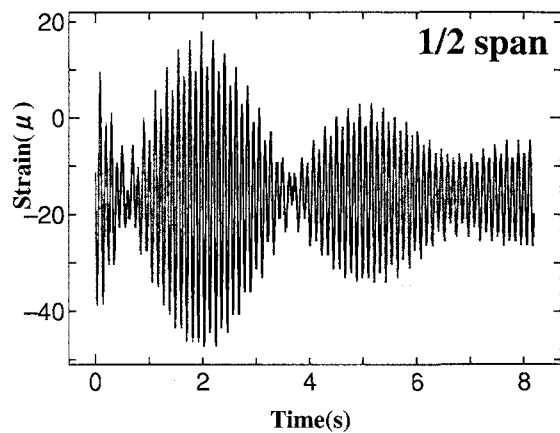


図-19 高架橋模型の上部構造の振動波形 (実験結果)

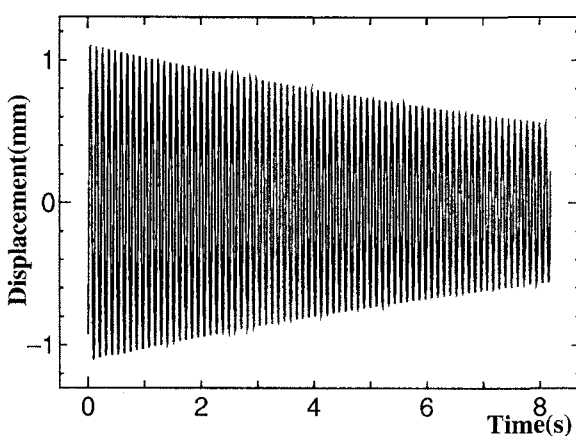


図-17 可動支承部の水平方向変位の振動波形 (解析結果)

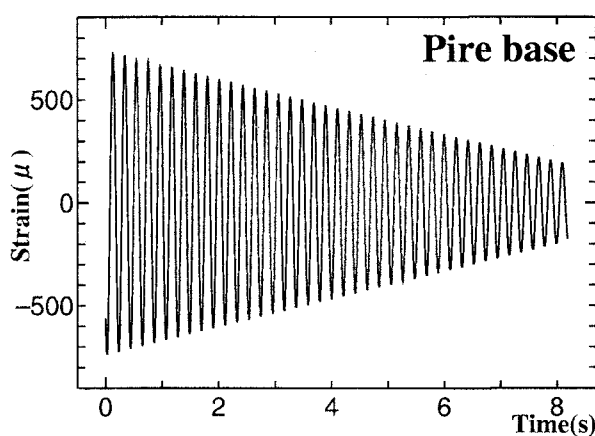


図-20 高架橋模型の橋脚の振動波形 (解析結果)

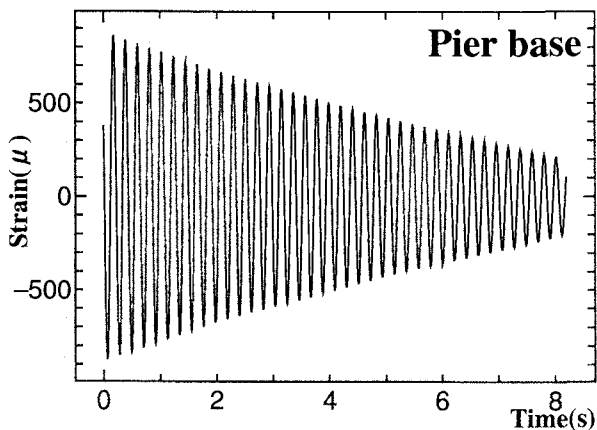


図-18 高架橋模型の橋脚の振動波形 (実験結果)

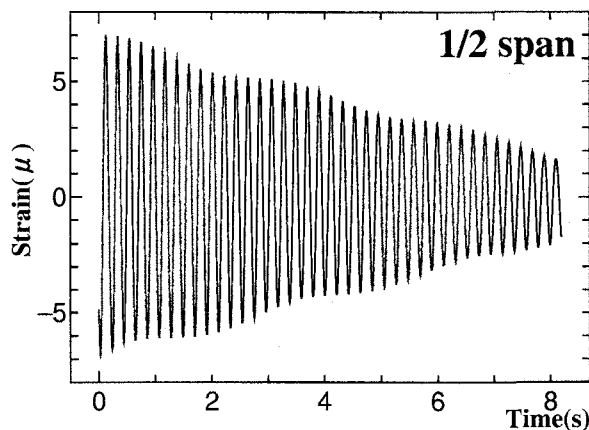


図-21 高架橋模型の上部構造の振動波形 (解析結果)

4.2.3 高架橋全体模型の場合

高架橋全体模型のモデル化に際しては、高架橋を構成する橋脚、上部構造、支承の構造特性や材料特性を把握した。また、剛性比例型の粘性減衰を表すのに、橋脚のみ、上部構造のみのそれぞれの部材ごとの振動実験により得られた、橋脚の減衰定数 0.00077, 上部構造の減衰定数 0.00129 を用いた。摩擦減衰に対しては前述の試験

により得られた可動支承部の動摩擦係数の平均的な値として 0.013 を用いた。

高架橋全体模型を対象とした振動実験によって得られた橋脚基部、上部構造スパン中央のひずみの振動波形を図-18、図-19に示す。また、振動実験によって得られたひずみデータに、FFTを行ったフーリエスペクトルをそれぞれ図-7、図-8に示す。前述のように図

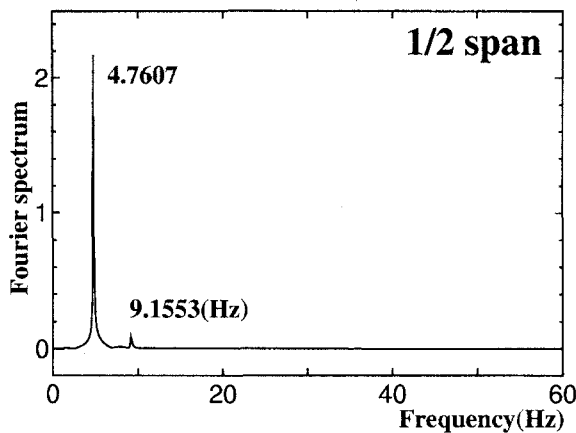


図-22 高架橋模型の上部構造のフーリエスペクトル (解析結果)

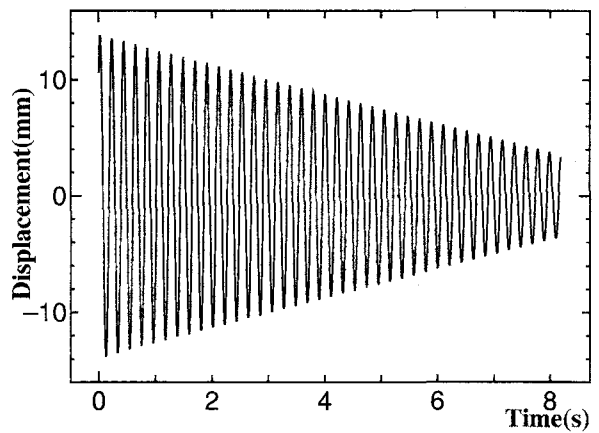


図-24 可動支承部の水平方向変位の振動波形 (解析結果)

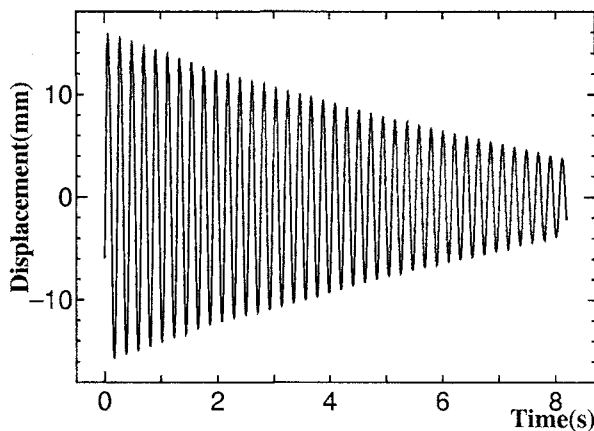


図-23 可動支承部の水平変位の振動波形 (実験結果)

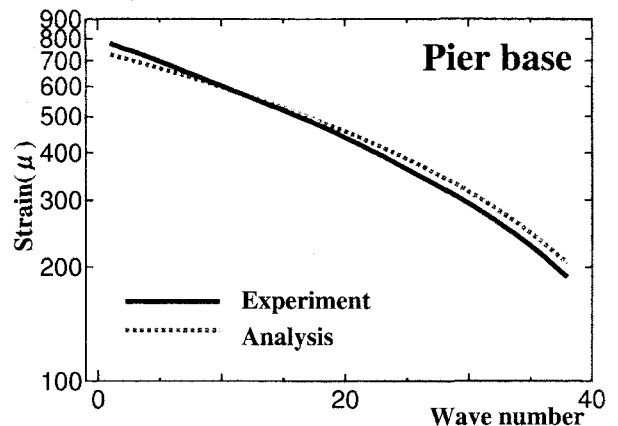


図-25 ひずみの振幅と振動波数の関係 (高架橋模型橋脚)

-7より高架橋の橋脚の1次固有振動数は4.76Hz、図-8より高架橋の上部構造の1次固有振動数は4.76Hz、2次固有振動数は9.16Hzとなる。ここで、高架橋の上部構造の2次固有振動数は上部構造のみの1次固有振動数の9.09Hzとほぼ一致する。よって、高架橋の1次振動モードは橋脚の曲げ振動が卓越、2次振動モードは上部構造の曲げ1次振動が卓越していると考えられる。また、時刻歴応答解析によって得られた橋脚基部、上部構造スパン中央のひずみの振動波形をそれぞれ図-20、図-21に示し、振動実験によって得られた振動波形を表した図-18、図-19との再現性を検討した。その結果、橋脚基部の場合において、時刻歴応答解析による振動波形は振動実験によって得られた振動波形を定性的に再現することができた。

しかし、上部構造スパン中央のひずみの振動波形においては時刻歴応答解析による振動波形は振動実験によって得られた振動波形を定性的に再現することができなかった。

ここで、振動実験による振動波形を表す図-19ではう

なりの現象が確認でき、ひずみの最大振幅は約 30μ である。一方、時刻歴応答解析による振動波形を表す図-21ではうなりの現象は確認できず、最大振幅は約 5μ である。この原因として、実験によって得られた高架橋の上部構造の振動波形においては、橋脚卓越の1次振動モードと上部構造卓越の2次振動モードの影響が連成しているが、時刻歴応答解析では橋脚卓越の1次振動モードの影響のみが支配的であるためと考えられる。

実際に、時刻歴応答解析による上部構造スパン中央のひずみ振動波形のフーリエスペクトルを図-22に示すが、高架橋1次振動モードが卓越しているのが分かる。この原因として、時刻歴応答解析では高架橋模型を構成する橋脚と上部構造の連成を考慮していないためと考えられる。

高架橋全体模型を対象とした振動実験および時刻歴応答解析によって得られた可動支承部のそれぞれの水平変位の振動波形を図-23、図-24に示し、両者の再現性を検討した結果、精度良く再現することができた。

次に、時刻歴応答解析による橋脚基部の振動波形にお

ける減衰特性の再現性を確認するために、振動実験結果と時刻歴応答解析結果においてのひずみの振幅と振動波数の関係を図-25示した。その結果、高架橋模型を構成する橋脚、上部構造のそれぞれの部材ごとの振動実験によって得られた減衰定数、簡単な試験によって得られた動摩擦係数を用いることにより、高架橋模型の橋脚の時刻歴応答解析結果は振動実験結果を精度良く再現することができた。

また、図-25のひずみ振幅と振動波数の関係は、上に凸の関係となっており、摩擦減衰の影響が大きく認められる。これは、図-16に示すように、この場合に計測された水平方向の変位の大きさが大きいためであると考えられる。

5. おわりに

本研究では、高架橋模型を対象とした振動実験と平面骨組のための有限要素法を用いた数値解析を行い、固有振動数および減衰特性の再現性を検討した。

まず、高架橋全体系および、高架橋模型を構成する橋脚や上部構造の振動実験を行い、それぞれの低次の固有振動数および減衰特性を調べた。次に、固有振動数を精度良く再現するためのモデル化を詳細に検討し、また、減衰特性を特徴づける減衰要因の同定を試みた。そして、それぞれの構造特性や減衰要因を組み込んだ平面骨組のための有限要素法を用いた数値解析により、橋脚、上部構造および高架橋模型の固有振動数および減衰特性を精度良く再現することを試みた。

部材ごとの材料特性および構造特性を把握しモデル化を行った結果、平面骨組のための固有値解析によって得られた固有振動数は、実験によって得られた固有振動数を精度良く再現することができた。また、高架橋模型を構成する橋脚、上部構造の部材ごとの減衰定数、可動支承部の動摩擦係数を把握し、これを時刻歴応答解析に組み込むことによって、高架橋模型の減衰特性も精度良く再現することができた。

参考文献

- 1) JSSC：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策，日本鋼構造協会，鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会，2003.10.
- 2) 例えば，岡崎真，津田久嗣，堂垣正博：鋼製支承の破損を考慮した連続免震高架橋の地震応答，構造工学論文集，Vol.48A，pp319-328，2002.3.
- 3) 中島章典，古橋裕，斉木功：高架橋モデルの固有振動特性に関する実験および解析，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp135-142，2004.1.
- 4) 中島章典，内川直洋，斉木功：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，Vol.49A,pp.319-328，2002.3.
- 5) 米田昌弘：橋梁の可動支承部における摩擦力に起因した構造減衰特性に関する2，3の考察，土木学会論文集，No.492/VI-23，pp.137-145，1994.6.