

高架橋モデルの固有振動特性に関する実験および解析

中島章典¹・古橋裕²・斉木功³

¹正会員 工博 宇都宮大学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静岡県 (〒420-8601 静岡市追手町 9-6)

³正会員 博(工) 宇都宮大学工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

1. はじめに

連続高架橋の耐震設計に際しては、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。

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定数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定数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特に減衰定数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、簡易な高架橋モデルおよびそれらを構成する上部構造、橋脚の振動実験を行い、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、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モデル化を詳細に検討し、また、それぞれの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剛体ばねモデルを用いた数値解析により、上部構造、橋脚および高架橋モデル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。

2. 実験概要

本研究では、図-1 および写真-1 に示す上部構造、支承、橋脚からなる簡易な高架橋モデルを検討対象とし

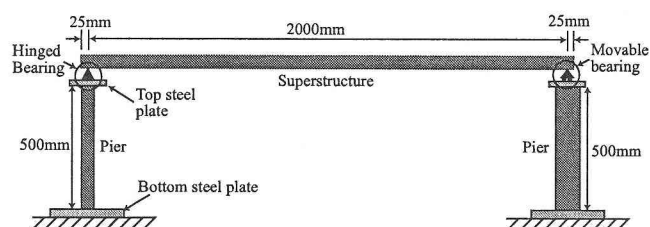


図-1 高架橋モデル試験体の概要

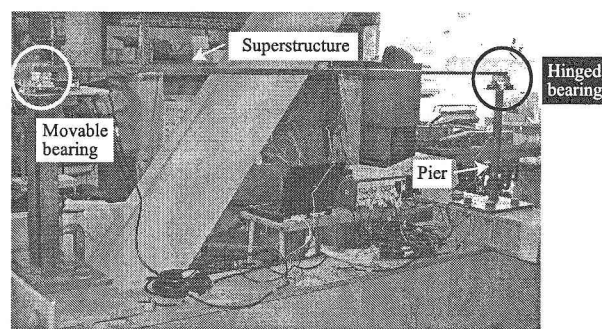


写真-1 高架橋モデルを対象とした実験

た。上部構造には長方形断面の鋼材を用い、そのスパンは2000mmとした。また、橋脚の高さは500mmとし、一方の橋脚上の支承は可動支承で、他方には固定支承を設置した。固定支承側の橋脚には上部構造と同じ断面の鋼材を用い、可動支承側の橋脚には十分剛なH形断面の鋼材を用いた。したがって、高架橋モデルの振動時には、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予想される。

実験で用いた高架橋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は、まず、高架橋を構成する上部構造、橋脚などの構造特性および材料特性を調べる必要がある。さらに各部の減衰要因のメカニズムを明らかにするためには、高架橋モデル全体のみではなく、支承を含む上部構造や橋脚部

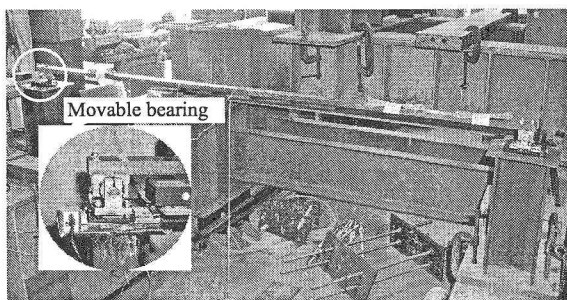


写真-2 上部構造を対象とした単純はり実験

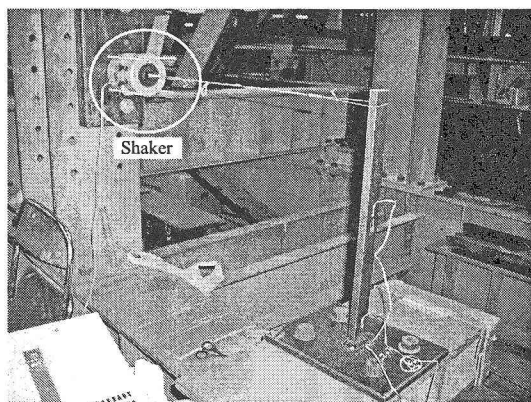


写真-3 橋脚を対象とした片持ち柱実験

分の振動実験も実施する必要がある。そこで、写真-2に示す支承を含む上部構造を対象とした単純はりでの実験および写真-3の橋脚のみを対象とした片持ち柱での実験も行った。

上部構造、支承、橋脚の構造特性および材料特性を精度良く把握するために、それぞれの寸法や重量を正確に計測するとともに、上部構造および橋脚を構成する鋼材の引張試験を実施してヤング係数を求めた。ただし、橋脚の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。

一方、高架橋モデル、上部構造あるいは橋脚の振動実験を行う場合には、写真-1、写真-2、写真-3のような試験状況で加振器により、基本的に対象構造物の1次固有振動数に近い振動数をもつ正弦波を入力して共振状態を生じさせ、その後、外力を取り除き減衰自由振動となったときの対象構造物の着目点のひずみ応答を測定した。

上部構造を対象とした単純はりの実験では、上部構造のスパンの1/2点にひずみゲージを貼付した。一方、橋脚を対象とした片持ち柱の実験では、橋脚の下端から20mmの位置にひずみゲージを貼付した。そして、高架橋モデルを対象とした実験では、上部構造のスパン1/2、1/4点と橋脚基部付近の両方のひずみゲージを用いた。

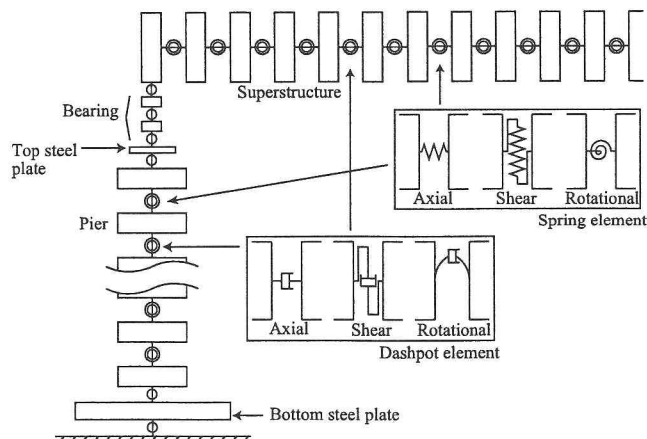


図-2 解析モデル

ひずみデータのサンプリング周波数は2000Hz、すなわち測定間隔は 5×10^{-4} s、測定データ数は16384、計測時間を8.192sとした。なお、得られたデータに対して数値フィルタによる処理は行っていない。

3. 解析概要

本研究では、検討対象モデルの固有振動数および減衰自由振動曲線を再現するために、剛体ばねモデルを用いた複素固有値解析、動的応答解析を行った³⁾。

高架橋モデルを対象とした数値解析モデルの概要を図-2に示す。固有振動数の再現性の検討には、構成部材の断面諸量、ヤング係数、橋脚基部および支承部の固定度などを考慮した。また、減衰特性の検討には、特に影響が大きいと予想される構成部材の材料内部減衰、支承回転部の粘性減衰および可動支承の可動部の摩擦減衰などを考慮した。粘性減衰の影響は各部に配置したダッシュポットにより考慮し、摩擦減衰の影響は可動支承部に配置した摩擦要素により考慮した。

4. 実験結果

図-3および図-4は片持ち柱を対象とし1次振動モードに着目した振動実験より得られた振動波形である。前者が片持ち柱のみで上鋼板がない場合、後者が上鋼板を有する場合である。これらの図より、どちらの場合にも振動波形が指数関数的に減衰していることがわかる。片持ち柱の場合には、柱部材自身の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、柱基部は、下端に溶接した鋼板を径22mmのボルト4本で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、この場合のおもな減衰要因は部材自身の材料内部減衰によるものと判断される。図-5は、上述の片持ち柱の実験

表-1 断面諸量

	寸法	密度	弾性係数	せん断弾性係数
	mm	t/m ³	GN/m ²	GN/m ²
平鋼	15.73 × 38.02	7.77103	206.73	81.13
H 鋼	100.15 × 50.12 × 6.72 × 4.97	7.92494	204.58	80.29
上鋼板	5.93 × 99.69 × 124.30	7.34335	—	—
下鋼板	15.96 × 232.34 × 300.81	7.64790	—	—

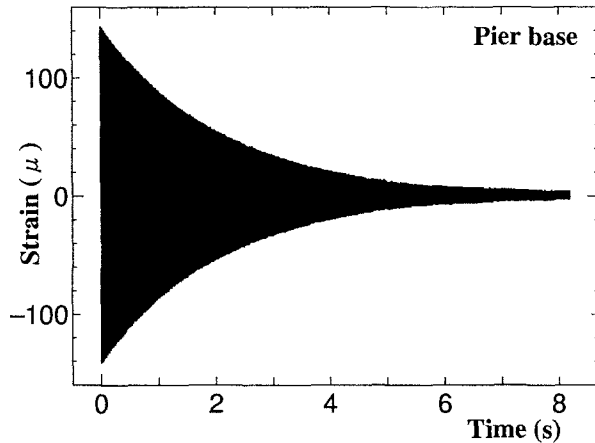


図-3 上鋼板なしの片持ち柱の振動波形 (実験結果)

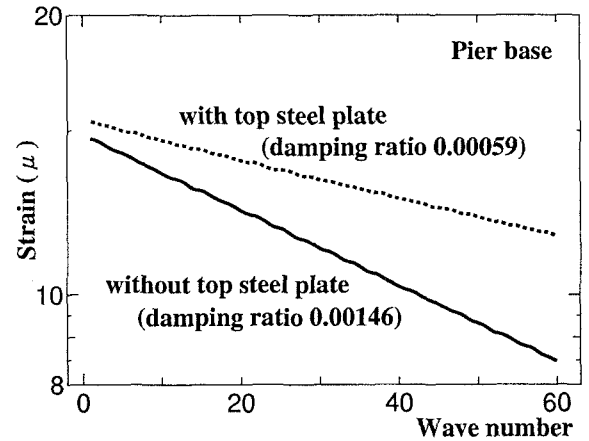


図-5 ひずみピークと振動波数の関係 (片持ち柱)

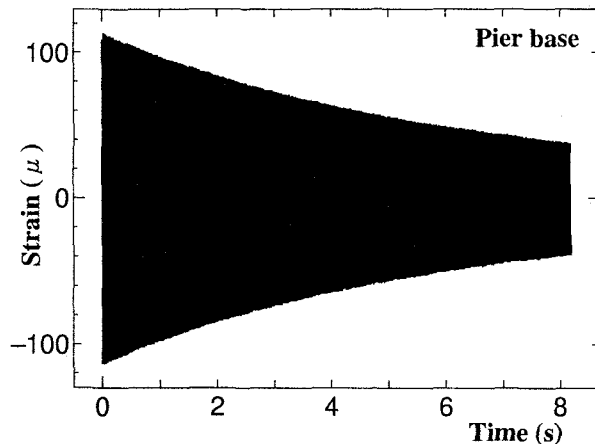


図-4 上鋼板ありの片持ち柱の振動波形 (実験結果)

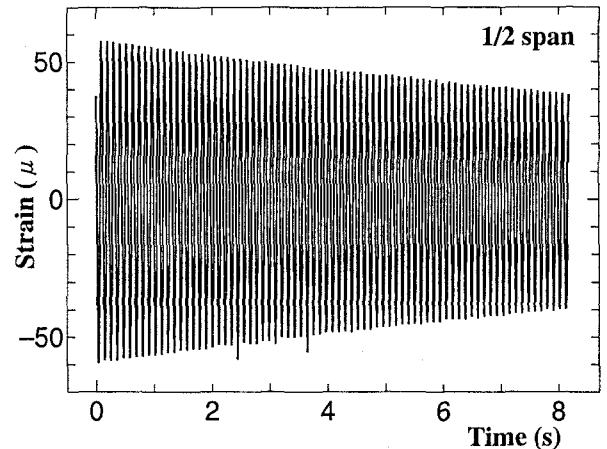


図-6 単純はりの1次振動モードの振動波形 (実験結果)

で得られた振動波形の各ひずみピークと波数の関係を示している。上鋼板あり、上鋼板なしの場合とも、この関係は直線関係を示しており、粘性減衰が支配的であることが確認できる。また、上鋼板なしの場合のほうが粘性減衰の影響が大きいことがわかる。なお、これらの実験結果と以下に示す剛体ばねモデルを用いた複素固有値解析の結果を対応させて、柱部材自身の材料内部減衰による粘性減衰係数を以下で同定する。

一方、単純はりの1次および2次振動モードを対象とした振動実験より得られた振動波形を図-6 および図-7

に示す。対称振動モードである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),3)}が、図-6の結果だけでは摩擦減衰の影響が明確にはわからない。これに対して、逆対称振動モードである2次振動モードでは、既往の研究³⁾においても報告されているように粘性減衰の影響が支配的であることがわかる。ここでも、以上の単純はりの実験で得られた振動波形の各ひずみピークと波数の関係を図-8に示している。この図から、1次振動モードにおいてもこの関係が直線となっていることから、摩擦減衰の影響は小さく、

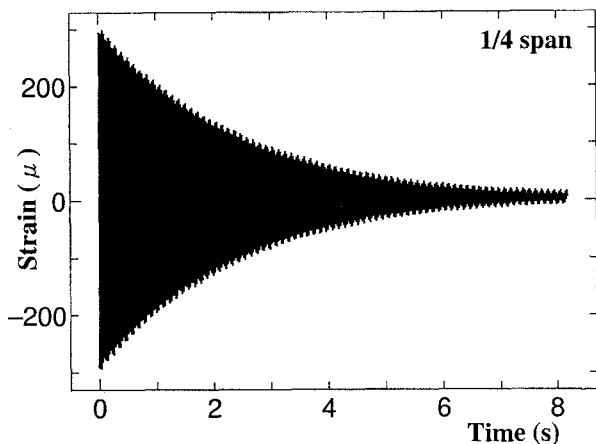


図-7 単純はりの2次振動モードの振動波形 (実験結果)

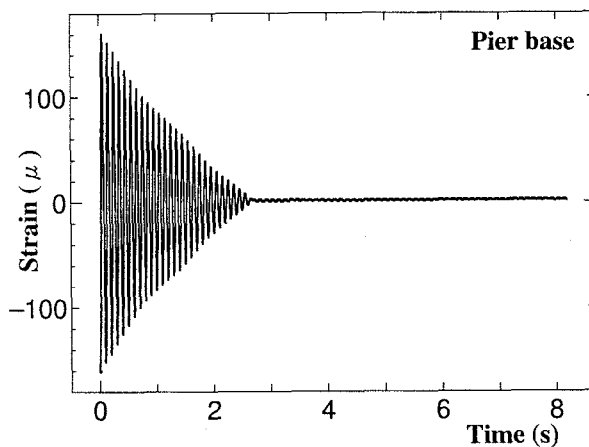


図-10 高架橋モデルの振動波形 (実験結果, 橋脚部データ)

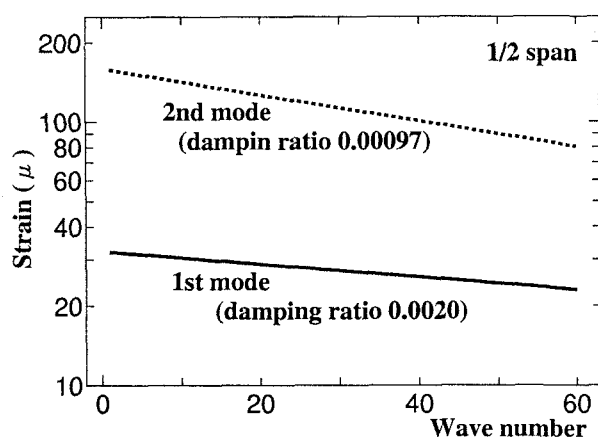


図-8 ひずみピークと振動波数の関係 (単純はり)

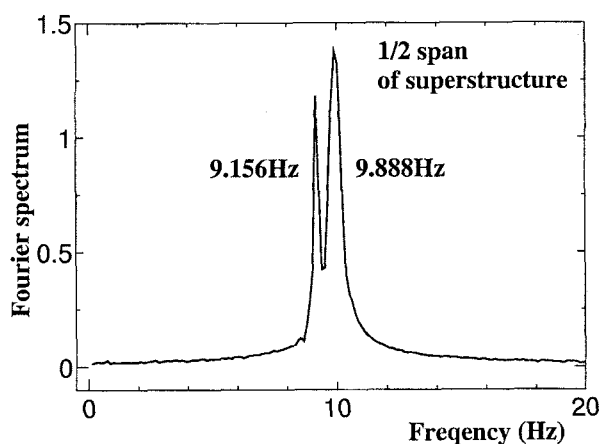


図-11 高架橋モデルのフーリエスペクトル (上部構造データ)

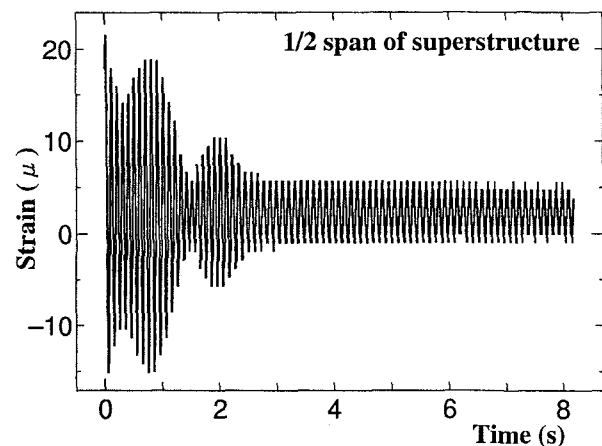


図-9 高架橋モデルの振動波形 (実験結果, 上部構造データ)

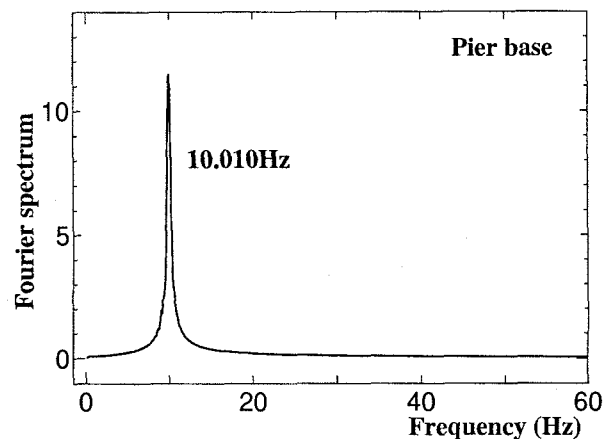


図-12 高架橋モデルのフーリエスペクトル (橋脚部データ)

粘性減衰の影響が大きいことがわかる。ただし、この場合の粘性減衰の要因としては、はり部材自身の材料内部減衰の他に、例えば、支承ベアリング部の減衰の影響なども含まれている可能性がある。

高架橋モデルを対象とした振動実験より得られた振動波形を図-9 および図-10 に示す。前者は、上部構造の中央のひずみゲージで計測されたひずみ振動波形で

あり、後者は橋脚基部付近のひずみゲージで計測されたひずみ振動波形である。この図から、前者の波形では、はっきりとしたうなり現象が見られ、明確な減衰特性の傾向がわからない。それに対して、後者ではうなり現象も幾分認められるが、全体的には直線的な減衰傾向を示しているといえる。

ここで、両者のひずみ波形のフーリエスペクトルを

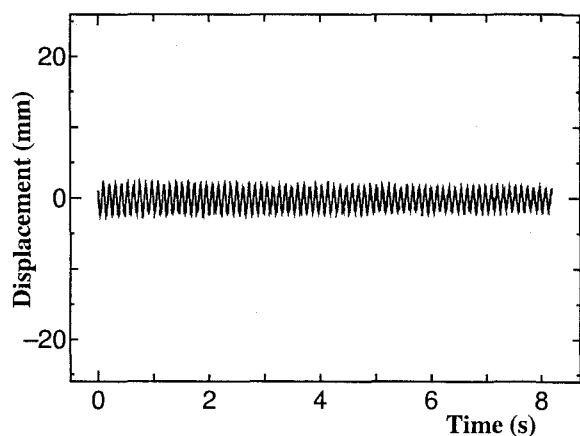


図-13 可動支承部の水平方向相対変位の振動波形 (単純はり)

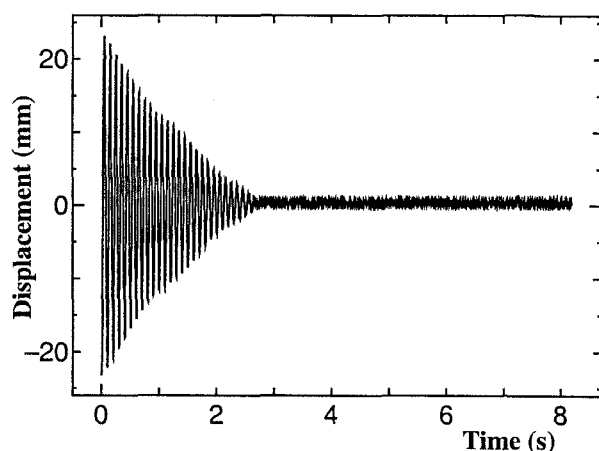


図-14 可動支承部の水平方向相対変位の振動波形 (高架橋モデル)

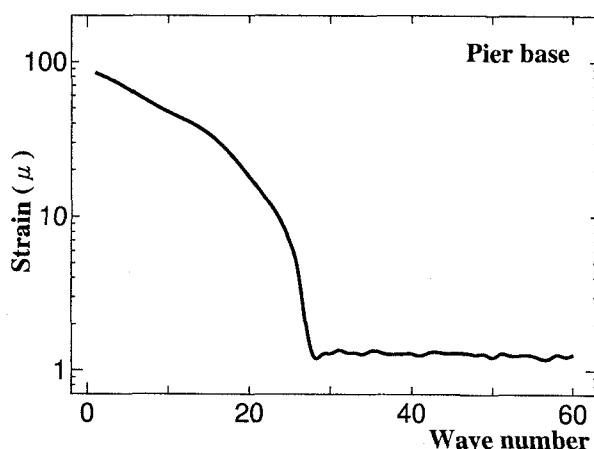


図-15 高架橋モデルの2次振動モードのひずみピークと振動波数の関係

図-11 および図-12 に示す。図-11 では、9.16Hz 付近と 9.9Hz 付近の 2 つのピークを有しており、これらは上部構造のみの単純はりの 1 次振動モードおよび上部構造と橋脚が一体となって振動する高架橋としての 1 次振動モードに対応すると考えられる。また、図-12 の

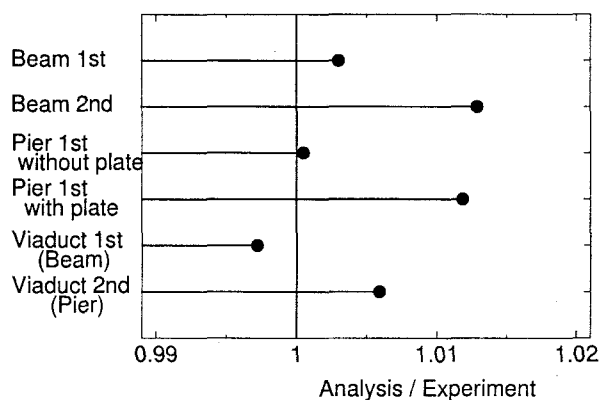


図-16 固有振動特性の検討結果

スペクトルでは、10Hz に 1 つのピークのみが認められる。図-10 では幾分うなり現象が認められるが、上部構造の振動の影響は小さく、橋脚部の振動に対しては、高架橋としての 1 次振動モードが支配的であるためにピークが 1 つのみ現われているものと考えられる。

図-6 に示す単純はりの 1 次振動モードの実験では摩擦減衰の影響が小さかったのに対し、高架橋モデルの実験では図-10 のように摩擦減衰の影響が比較的大きく認められる。これは、それぞれの実験において計測される可動支承部の水平方向相対変位の大きさが、前者で小さく、後者で大きいためであると考えられる。実際に、可動支承部の水平方向相対変位の振動波形を図-13 および図-14 に示すが、図-14 の変位振幅は図-13 の場合よりも大きく、摩擦減衰が大きいという結果と対応している。さらに、高架橋モデル橋脚基部付近で計測したひずみ振動波形のピークひずみと波数の関係を図-15 に示すが、時間が 20 秒辺りまではこの関係が上に凸の関係を示しており明らかに摩擦減衰の影響が認められる。

5. 数値解析結果と実験結果の比較

5.1 固有振動数の再現性

試験体の寸法、材料試験で求められた材料特性および質量などを考慮して、それぞれの構造系の数値解析モデルを構築し、固有値解析を行った。単純はり、片持ち柱および高架橋のそれぞれの 1 次あるいは 2 次振動モードの固有振動数の実験値と解析値の比較を図-16 に示す。縦軸はモデルのタイプあるいは振動次数を表し、横軸は実験値に対する数値解析結果の比を表している。この図から、単純はりの 2 次振動モードおよび上鋼板を有する橋脚の 1 次振動モードで解析値の精度が幾分低く、高架橋モデルの 1 次振動モードで解析値が実験値を下回っている。しかし、概ね 1% 程度の範囲で両者は一致していると言える。

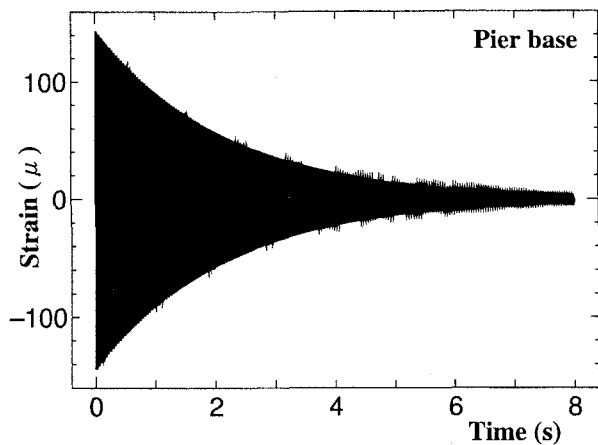


図-17 上鋼板なしの片持ち柱の振動波形 (解析結果)

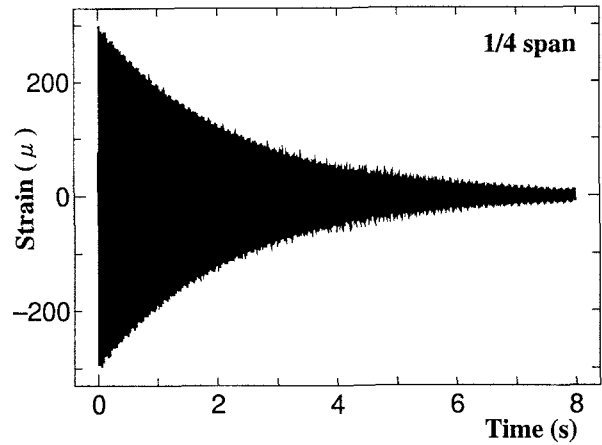


図-20 単純はりの2次振動モードの振動波形 (解析結果)

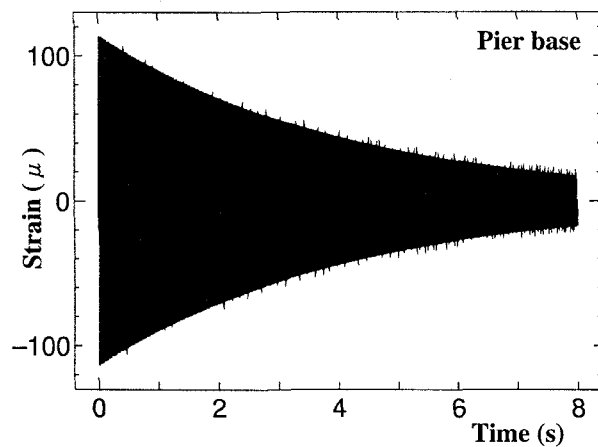


図-18 上鋼板ありの片持ち柱の振動波形 (解析結果)

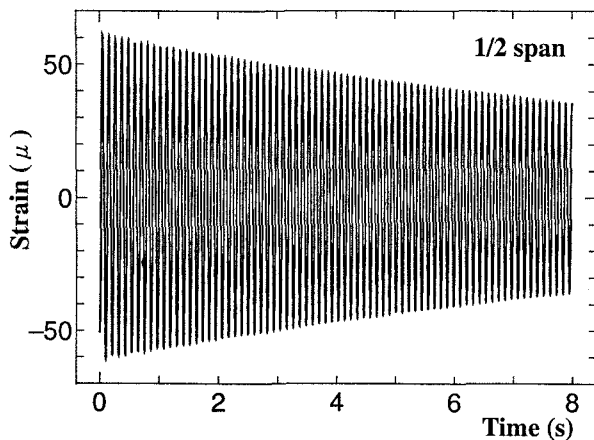


図-19 単純はりの1次振動モードの振動波形 (解析結果)

なお、これらのモデル化にあたって、橋脚基部の固定条件、支承の拘束条件はそれぞれ対応する位置のばね定数を適切に仮定することによって考慮している。ただし、これらのばね定数の値が各モデルの固有振動数に及ぼす影響は敏感ではないことを付記する。

5.2 減衰自由振動曲線の再現性

図-3 および図-4 に示したように片持ち柱モデルでは、粘性減衰が支配的であった。その主な減衰要因は橋脚部材の材料内部減衰であると考えられるので、上鋼板なしの片持ち柱の1次振動モードの減衰定数に一致するように、複素固有値解析を用いて橋脚部材のダッシュポットの粘性減衰係数を同定した。その結果、上鋼板ありの場合の減衰定数は、上鋼板なしの場合の減衰定数よりも大きくなり、この点は実験結果を定性的には説明できている。それぞれ時刻歴応答解析で求められた対応する減衰自由振動曲線を図-17 および図-18 に示す。なお、片持ち柱基部は、径22mmのボルト4本を用いて強固に固定しているので、その部分の逸散減衰の影響はあまり大きくないと考えられる。

次に、単純はりの場合を考える。単純はりモデルに用いたはり部材は前述の片持ち柱モデルに用いたものと同じ部材であるので、材料内部減衰は片持ち柱の場合と同程度であると考えられる。したがって、部材のダッシュポットの粘性減衰係数も片持ち柱と同じ値を用いた。しかし、その粘性減衰係数を仮定した単純はりの1次振動モードの減衰定数を求めると、図-6、図-8 に示す実験結果の同じ振動モードの減衰定数よりも小さい値となった。つまり、単純はりの状態では、はり部材の材料内部減衰以外の減衰要因が存在すると考えられる。単純はりの振動状態から、その減衰要因としては、実験の観察から支承回転ヒンジを模擬したベアリング部の粘性減衰であると予想された。

そこで、数値解析モデルの1次振動モードの減衰定数が対応する実験値に一致するように、支承回転ヒンジ部に挿入したダッシュポットの粘性減衰係数を同定した。それぞれ時刻歴応答解析で求められた対応する減衰自由振動曲線を図-19 および図-20 に示す。なお、可動支承部には簡易実験で求められた摩擦係数0.08を仮定しているが、1次振動モードにおいても摩擦減衰の

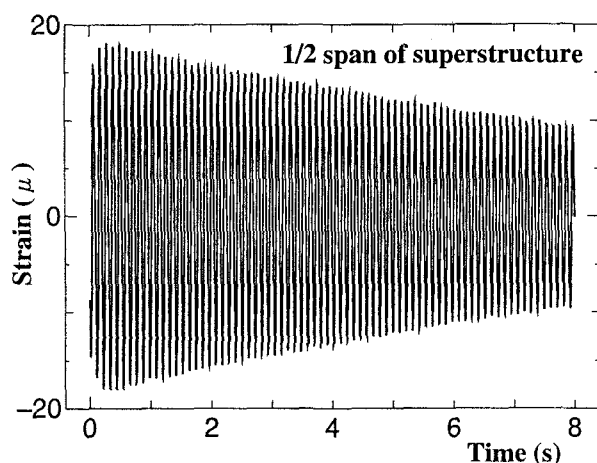


図-21 高架橋モデルの1次振動モードの振動波形(解析結果)(動摩擦係数: 0.08)

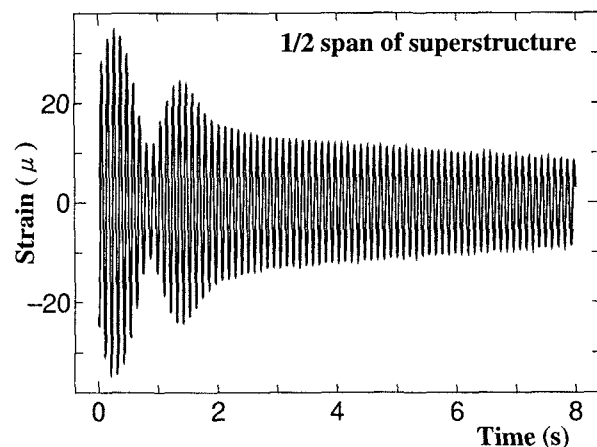


図-23 高架橋モデルの1次振動モードの振動波形(解析結果)(動摩擦係数: 0.02)

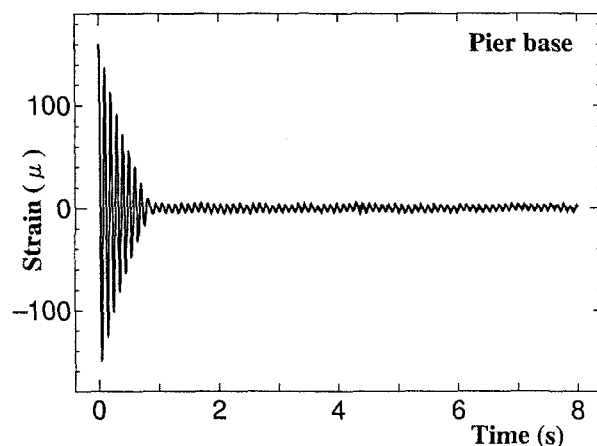


図-22 高架橋モデルの2次振動モードの振動波形(解析結果)(動摩擦係数: 0.08)

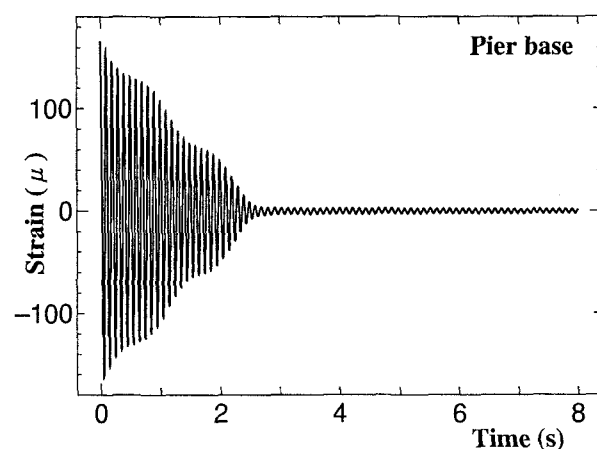


図-24 高架橋モデルの2次振動モードの振動波形(解析結果)(動摩擦係数: 0.02)

影響は非常に小さく、粘性減衰が支配的であることがわかる。

最後に、高架橋モデルの場合を考える。この場合には、固定支承側の橋脚と上部構造が振動単位を形成して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。したがって、可動支承部の摩擦減衰の影響が大きいと考えられる。そこで、まず簡易実験によって求められた摩擦係数 0.08 を仮定した場合の減衰自由振動曲線を時刻歴応答解析により求めた。その結果を図-21、図-22 に示す。これらの図より、図-9 および図-10 に示す対応する実験結果とまったく異なる減衰自由振動曲線が得られた。この理由は、簡易実験によって求められた可動支承の摩擦係数の値が不正確であるためと考えられる。

そこで、フラットベアリングである可動部の摩擦係数を製品の実験値から推定して、摩擦係数を 0.02 とした。その結果、得られた減衰自由振動曲線の時刻歴応答解析結果を図-23、図-24 に示すが、上部構造の曲げ

振動が支配的な1次振動モードおよび橋脚の振動が支配的な2次振動モードとも、うなり現象が認められるなど、図-9 および図-10 の実験結果と定性的によい一致を示す結果が得られた。

6. おわりに

そこで本研究では、簡易な高架橋モデルおよびそれらを構成する上部構造、橋脚の振動実験を行い、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、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モデル化を詳細に検討し、また、それぞれの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剛体ばねモデルを用いた数値解析により、上部構造、橋脚および高架橋モデル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。

その結果、部材の断面諸量、弾性係数などを剛体ばねモデル解析に用いることにより、高架橋モデルおよ

びそれらを構成する上部構造，橋脚の 1 次固有振動数をかなり精度よく再現することができた．また，減衰特性についても，同定した各部の粘性減衰係数などを剛体ばねモデル解析のダッシュポットに組み込むことによりある程度再現することができた．

しかし，数値解析の精度をさらに高めるためには，可動支承の摩擦係数を正確に把握するなどの改善が必要であると考えられる．

参考文献

- 1) 例えば，中島章典，工藤忠，庄司泰啓，斉木功：簡易モデルによる高架橋の弾塑性地震応答性状の再現性，構造工学論文集，Vol.47A，pp.831－842，2001.3.
- 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.49A，pp.553-561，2003.3.
- 3) 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.48A，pp.319-328，2002.3.
- 4) 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.