

部分構造系のエネルギー吸収に基づく全体系の減衰定数の推定法に関する実験的研究

Experimental Investigation on Evaluation of Damping Ratio of Bridges from Energy Dissipation in Structural Components

荒井智代¹, 川島一彦², 庄司学³

Tomoyo Arai, Kazuhiko Kawashima and Gaku Shoji

1 修(工) 特許庁(〒100-8915 東京都千代田区霞ヶ関3-4-3)

2 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

3 修(工) 東京工業大学助手 大学院理工学研究科土木工学専攻(同上)

There are various sources that contribute damping of a bridge structure. Although damping ratio can be evaluated from energy dissipation of structural components, enough scientific knowledge has not yet accumulated so that the procedure can be used in estimating damping ratio in design of a bridge. This paper shows a model shaking table test that was conducted to provide bridge damping for analysis. A bridge model was constructed so that energy dissipation occurred at the rubber bearings and the bottom of columns where elastoplastic plates were placed. From free oscillation decay of the bridge response, damping ratio for the fundamental mode was evaluated. It was compared to the damping ratio evaluated from the energy dissipation at the bearings and columns. Good agreement was observed between the estimated and experimental damping ratios.

Key Words : Damping, Bridge, Energy Dissipation, Seismic Design, Structural Response

1. はじめに

減衰とは運動エネルギーが消散することによって起こる振動の時間的な減少で、空気の粘性、構造材料の履歴、基礎からの逸散、構造部材相互の摩擦等による損失エネルギーが複合化した複雑な現象である。橋の減衰は、支承や橋脚、基礎など、橋を構成する多数の部分構造系の減衰特性によって定まる。減衰に関しては古くから各種の研究がなされており、例えば、Bleich and Tellerは内部摩擦やクーロン摩擦等様々な減衰作用について理論的な考察を加えている¹⁾。

橋の減衰は各種の構造要素のエネルギー吸収によって引き起こされるため、これらを丹念に解析すれば橋全体系としてのエネルギー吸収が評価できるはずである。こうした解析は減衰が小さく、この影響が橋の地震応答に大きな影響を及ぼすことから斜張橋に対していろいろな角度から行われてきた。例えば、Kawashimaらは斜張橋の模型を用いて振動実験を行い、塔、主桁、ケーブル取り付け部の3つの構造要素が主たるエネルギー吸収に寄与する構造部分であることから、これらに対する個別の部分振動実験から構造要素のエネルギー吸収を求め、これを用いれば橋全体系のエネルギー吸収を求められることを実証している²⁾。また、川島らは水郷大橋の強震記録を動的解析でシミュレートし、最も実測値を説明できるという観点から主塔と桁に分けて減衰定数の推定を行

ったり³⁾、可動支承の摩擦に伴う構造減衰が斜張橋の減衰に与える影響を解析している⁴⁾。山口らは、斜張橋のエネルギー論的減衰の評価法を示し、鶴見つばさ橋の実橋振動実験結果の解析に適用している⁵⁾。また、少し構造は異なるが、角本らも単径間吊床版橋を対象に、振動使用性照査に用いる減衰定数の推定法を検討している⁶⁾。基礎の逸散減衰は非常に大きなエネルギー吸収を与えることから、川島らは複素固有値解析により基礎の地下逸散減衰が斜張橋の減衰定数に与える影響の解析法を提案している⁷⁾。

このように斜張橋に対しては各種の要因別減衰定数の解析が行われてきており、これに比較すると一般橋に対する解析はまだ少ないが、たとえば、川島らは免震橋模型の自由振動実験をもとにエネルギー比例減衰法の適用性を検討し、エネルギー損失が卓越する橋脚及び支承の減衰が正しく評価されていれば、エネルギー比例減衰法は免震橋に対しても十分な精度を有していることを示したり⁸⁾、中島、土岐は鋼桁とコンクリート床版からなる桁橋を対象として、可動支承の摩擦力などの減衰作用が桁橋の減衰特性に及ぼす影響を複素固有値解析により評価している⁹⁾。

斜張橋に比較すると一般橋の場合には橋脚の塑性化や地下逸散減衰、さらに免震橋では免震支承のエネルギー吸収が減衰に寄与すると考えられるが、個々の要因がどのように橋梁全体系の減衰定数に寄与するかは今後さら

表-1 実験ケース

実験ケース	ゴム支承 (厚さ)	橋脚基部の粘弾性体
1	剛結	橋脚基部と支持架台を剛結
2	10mm	
3	15mm	
4	剛結	粘弾性体で支持
5	10mm	
6	15mm	

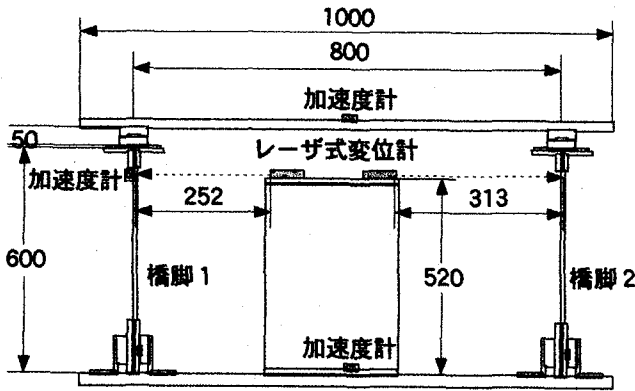


図-1 実験に用いた模型

に検討していく必要がある。

このような観点から、本研究では単径間の高架橋を想定した模型橋を対象に部分構造系のエネルギー吸収から全体系の減衰特性を推定する手法に関して、橋模型の振動台実験とこれに対する動的解析シミュレーションに基づいて検討したので、この結果を示す。

2. 実験に用いた供試体

高架橋を対象として一般橋の減衰特性を検討するために、ここでは、異なったメカニズムでエネルギー吸収が生じる部分構造系からなる模型橋の振動実験を行い、この解析から部分系と全体系のエネルギー吸収特性を検討することとした。模型実験を製作する際の基本方針は以下の通りである。

- 強震動を受ける高架橋のエネルギー吸収は主として橋脚、基礎、支承部等において生じるが、相似則を満足させてこれらを模型で再現することは困難である。このため、相似則に基づいて模型を製作するのではなく、模型橋を小さな実橋とみなして、これに対する解析から解析法の妥当性を検討する。
- 基礎におけるエネルギー吸収は高架橋では大変大きな減衰要因であるが、これに関する研究は別途行われている¹⁰⁾ことから、本研究では基礎を除く構造系におけるエネルギー吸収を対象とする。
- 橋脚の塑性ヒンジにおける履歴吸収エネルギーに関しては各所で検討が行われているが、これを小型模型で再現することは困難であることから、橋脚の回転に伴ってエネルギー吸収できるように、粘弾性材料を橋脚基部

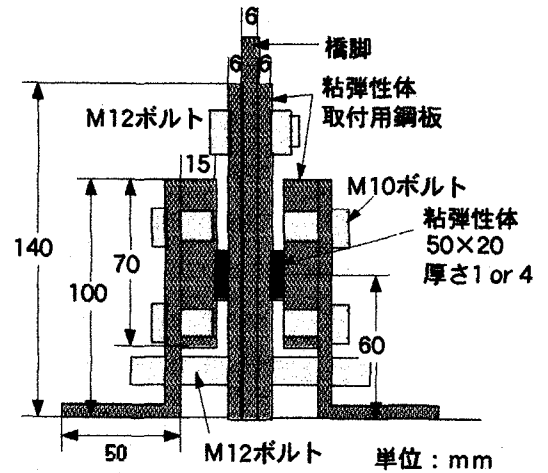


図-2 橋脚基部の粘弾性体の取り付け

に取り付けてこの影響を実験に反映する。

d) ゴム支承の小型模型を用いて、支承部のエネルギー吸収を表す。

e) 部分構造系のエネルギー吸収から全体構造系のエネルギー吸収の算出は模型振動実験結果に対する動的解析シミュレーションを介して行う。

以上のような基本方針に基づき、本実験では図-1に示すように支間長0.8m、桁質量51.81kg、橋脚高さ0.6mの単純桁橋を製作した。模型は鋼製で、桁は幅300mm、厚さ22mm、長さ1000mm、橋脚は高さ600mm、幅50mm、厚さ3mmである。

支承にはせん断弾性係数=1MPaの高減衰ゴムを用い、各橋脚上に2基ずつ設置した。支承の断面は20mm×20mmで、高さは10mmと15mmの2種類とした。小さな模型で積層構造にはできなかったため、中間鋼板は設けることはできなかった。さらに、断面に比較して高さが高かったために、後述するように、本来はせん断変形することを想定してゴム支承を用いたが、実際に振動実験を行うとゴム支承はせん断変形ではなく回転変形した。このため、当初想定したせん断変形による履歴減衰ではなく、回転変形による粘性減衰に着目して、以下の実験を行っている。なお、比較のために、ゴム支承を用いず、直接、桁を橋脚に山形鋼を介して剛結したケースについても実験を行っている。

また、橋脚の減衰を増加させるために、図-2に示すように橋脚基部において橋脚を表す鋼板を両側から挟むように3M製の粘弾性体を2枚ずつ取り付けた場合についても実験を行った。この場合には、橋脚は基部で回転できるようになっており、粘弾性体の変形に伴ってエネルギー吸収することができる。粘弾性体の大きさは高さ20mm、幅50mmとし、厚さは基本固有振動モードに相当する橋全体系の減衰定数が0.05程度となるように1mmとした。粘弾性体を用いない場合には橋脚は山形鋼を介して振動台上に設置された取付架台に剛結した。

以上より、桁を橋脚と剛結したケースと高さの異なる2種類のゴム支承で支持したケース、橋脚基部を取付架台

と粘弾性体で支持したケースと剛結したケースを組み合わせ、表-1に示すように合計6種類のケースに対して、自由振動実験、正弦波加振実験、地震波加振実験を行った。振動実験には建設省土木研究所の電気油圧式サーボ制御方式の振動台を用いた。

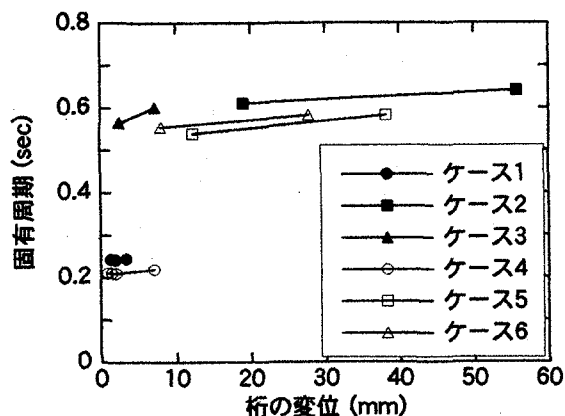


図-3 固有周期の振幅依存性

3. 自由振動実験及び正弦波加振実験

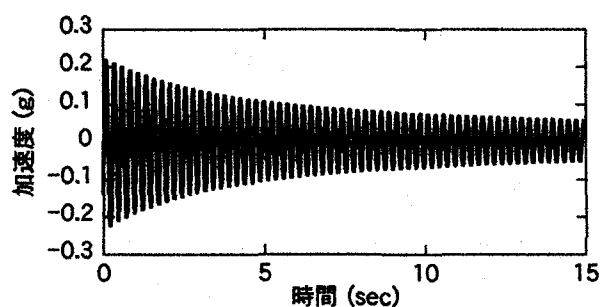
加振に先立って自由振動実験により橋全体系の基本固有周期とこれに対する減衰定数を求めた。図-3は基本固有周期の振幅依存性を示した結果である。桁と橋脚の固定条件や橋脚基部の粘弾性体の有無によって固有周期は変化している。変位振幅は実験ケースによっては小さい場合があるが、いずれのケースもごくわずかに変位振幅の増大とともに固有周期が長くなる特性がある。

図-4は代表的なケースに対する自由振動実験によって求めた桁の加速度応答である。きれいな減衰振動であり、これより次式により対数減衰率 δ を介して減衰定数を求めた。

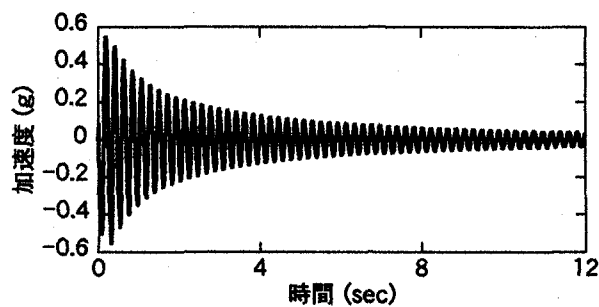
$$\delta = \ln \frac{a_m}{a_{m+1}} \quad (1)$$

ここで、 a_m は自由振動を始めてから m 番めの加速度振幅である。

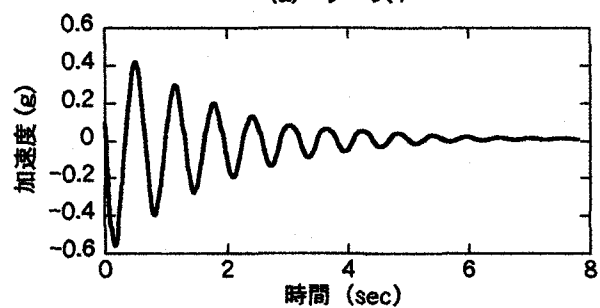
前述したように、ゴム支承で支持した場合には、模型橋を加振すると、ゴム支承はせん断変形ではなく回転変形した。エネルギー吸収の形態が当初意図したせん断型



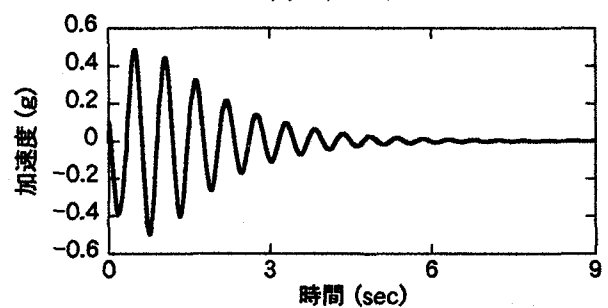
(a) ケース1



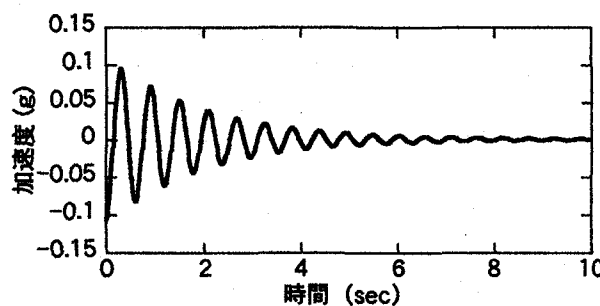
(d) ケース4



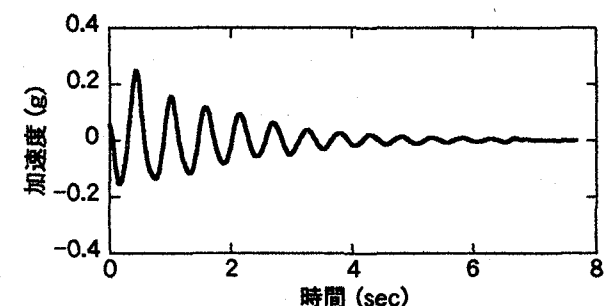
(b) ケース2



(e) ケース5



(c) ケース3



(f) ケース6

図-4 自由振動させた場合の桁の減衰加速度応答

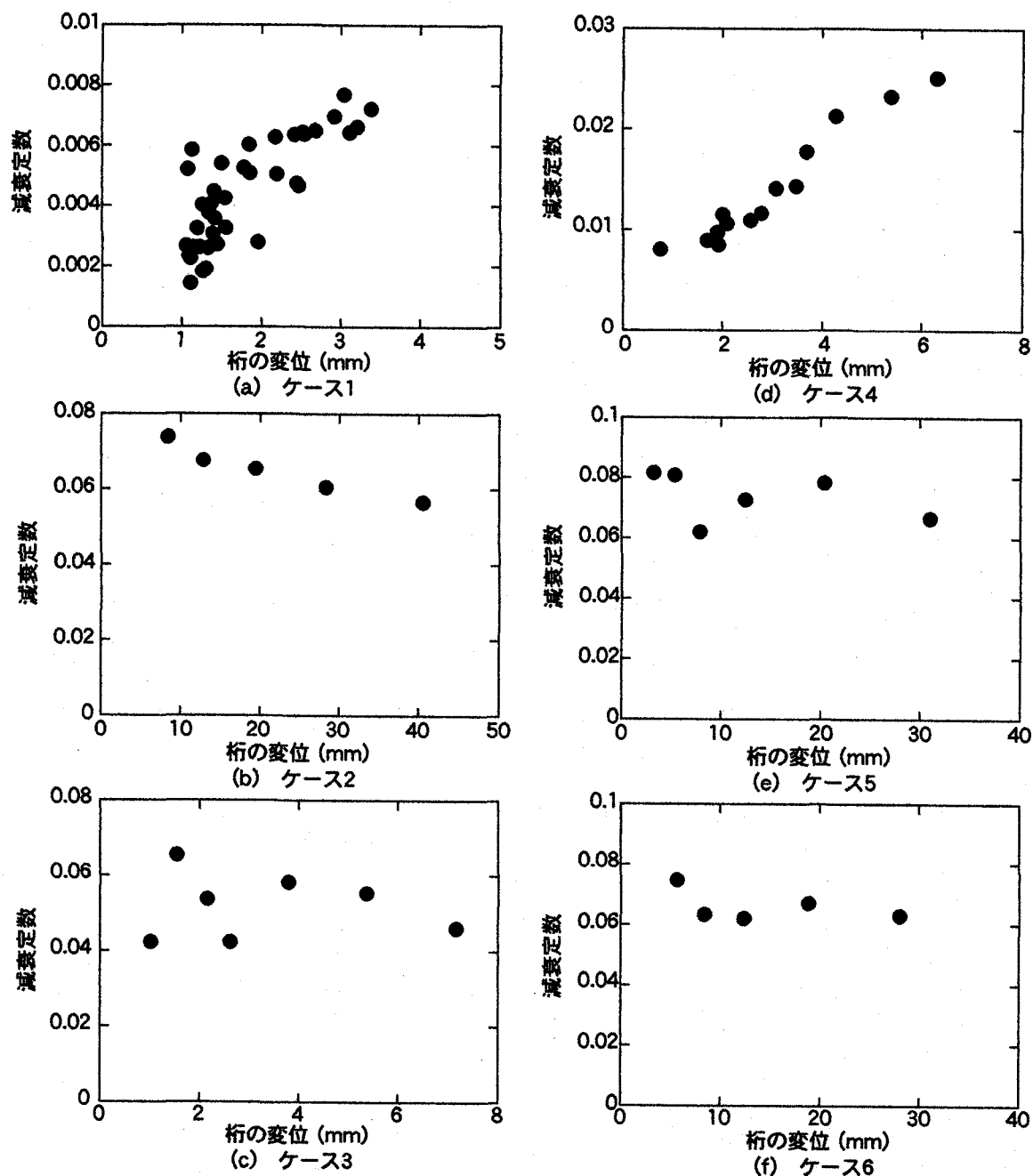


図-5 自由振動実験から求めた減衰定数の振幅依存性

から回転型に変わったが、本研究の目的が部分構造系のエネルギー吸収による全体構造系の減衰定数の推定にあり、エネルギー吸収とそのメカニズムさえ明確であれば、エネルギー吸収の形態は重要ではない。粘弾性体を橋脚基部に設置すると、曲げ変形と同時に粘弾性体を中心として橋脚は回転振動した。これは、粘弾性体の剛性が橋脚の曲げ剛性に対して低く、橋脚基部が回転変形しやすくなるためである。

図-4から基本固有振動モードに対する減衰定数を求めると図-5のようになる。いろいろな変位振幅に対して減衰定数を求め、これを減衰定数に対する変位振幅依存性として結果を示している。これによれば、ケース1、ケース4のように桁と橋脚を剛結させた時には振幅が大き

なるにつれて減衰も大きくなり、反対に、ケース2, 3, 5, 6のように免震支承によって支持した場合には振幅が大きくなるにつれてわずかではあるが減衰定数は小さくなるという振幅依存性が認められる。減衰定数の値に着目すると、ゴム支承も粘弾性体も設けないケース1の場合には、減衰定数は0.002~0.008と大変小さい。これをゴム支承で支持すると、減衰定数は、ゴム支承の厚さが10mmの場合(ケース2)には0.06程度、厚さが15mmの場合(ケース3)には0.055程度と大幅にケース1よりも大きくなる。また、粘弾性体を橋脚基部に取り付けた場合には、ゴム支承で支持しなくても(ケース4)減衰定数は0.01~0.025とケース1に比較して大きくなっており、さらにこれをゴム支承で支持すると、ゴム支承の厚さが

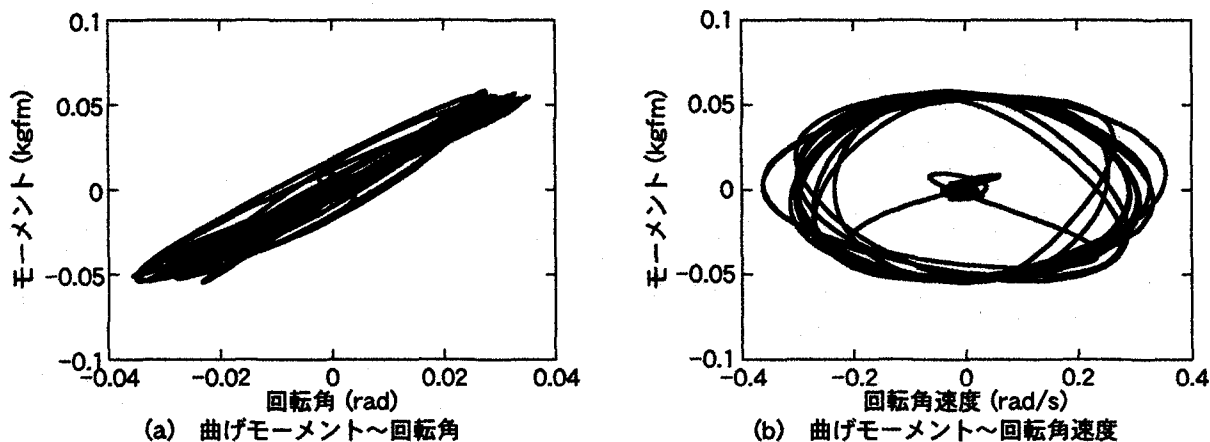


図-6 ゴム支承の曲げモーメント～回転角および回転角速度の関係（ケース6，加振振動数1.5Hzの場合）

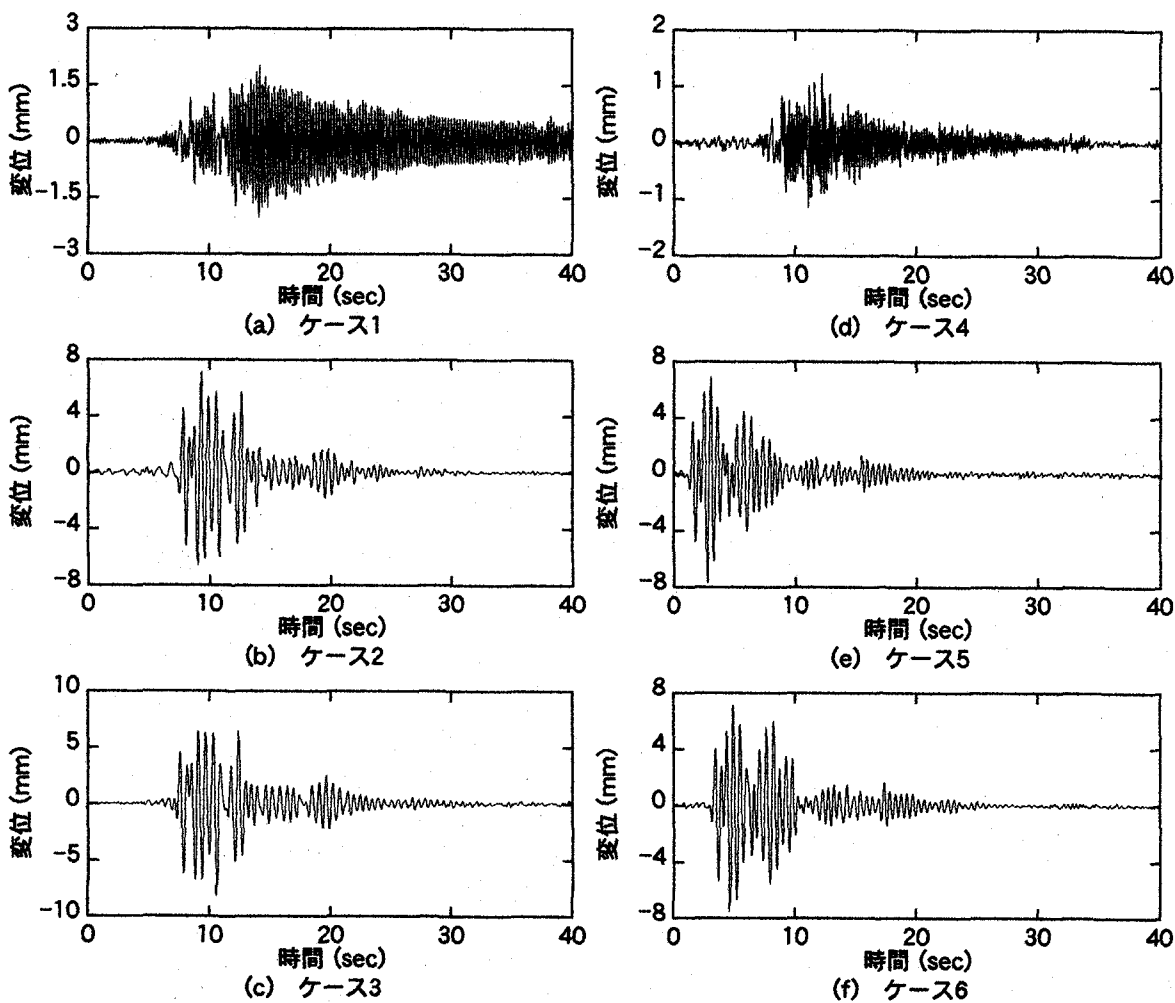


図-7 加震実験による変位応答

10mmの場合（ケース5）には0.07程度，15mmの場合（ケース6）には0.065程度となる。ケース1やケース4の振幅範囲が他のケースに比較して小さいが，これはゴム支承で支持した場合にはゴム支承の変形によって桁の変位が大きくなるためである。

次に，加振振動数や加速度振幅を変化させて正弦波加振を行った。ゴム支承で支持した場合にはゴム支承が回転変形したこと，また，粘弾性体を橋脚基部に設置した

場合には，橋脚の曲げ変形と同時に粘弾性体を中心として橋脚には回転変位も生じたことは自由振動実験の場合と同じである。ゴム支承のエネルギー吸収特性を明らかにするために，ゴム支承に作用するモーメント M_B と回転角 θ_B を次式で求めた。

$$M_B = -m_D a_D h_D \quad (2)$$

$$\theta_B = \frac{u_B}{h_B} \quad (3)$$

ここで、 m_D ：1基の橋脚が支持する上部構造の質量(25.92kg)、 a_D ：桁の応答加速度、 h_D ：桁の中心からゴム支承上面までの高さ(31mm)、 u_B ：ゴム支承の上下面間に生じる水平方向変位、 h_B ：上下面間のゴム支承の高さである。

これより1次固有振動数で加振した場合にゴム支承に作用させたモーメント～回転角およびモーメント～回転角速度の関係をケース6に対して示すと図-6のようになる。これによれば、ゴム支承には履歴減衰が生じていることがわかる。

4. 地震波加震実験

1995年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された記録の振幅を5%～6.8%にスケールダウンして模型橋に作用させた場合の応答を示すとそれぞれ図-7のようになる。ケース1の場合には、前述したように橋脚～桁、橋脚～振動台固定用取付治具を剛結しているため、短い周期で振動している。減衰は小さいが、ゴム支承がないため、桁の振動変位は2mm程度と小さい。ケース3とケース6はほぼ同程度の応答変位となっており、最大変位は、桁では約7mm、橋脚およびゴム支承ではそれぞれ約6mm、1mmである。

5. 動的解析による振動台実験結果の解析

(1) 解析の基本方針

部分構造系のエネルギー吸収特性から全体構造系の減衰特性を検討する前に、前述した自由振動実験及び振動台実験結果を動的解析によってどの程度再現できるかを検討した。解析モデルとしては図-8に示すような離散型の骨組構造モデルを用いた。モデル化の基本方針は以下の通りである。

1) 供試体を構成する各要素の剛性は断面寸法や弾性係数から理論的に求めることができるが、桁～橋脚～取付架台の固定度は完全に剛ではなく、さらに、各実験ケースごとにも様ではない。このため、自由振動実験より求めた基本固有周期に一致するように橋脚の剛性を微調整する。

2) 図-6に示したゴム支承の曲げモーメント～回転角の関係を次式のように線形の回転ばねとダッシュポットの組み合わせによってモデル化する。

$$k_{\theta B} = \frac{M_B}{\theta_B} \quad (4)$$

$$c_B = \frac{F_{D\theta B}}{\dot{\theta}_B} \quad (5)$$

ここで、 $k_{\theta B}$ ：ゴム支承の回転ばね剛性、 M_B 、 θ_B ：ゴム支承に作用するモーメントとゴム支承に生じる回転角、 c_B ：ゴム支承の回転に伴う粘性減衰係数、 $F_{D\theta B}$ 、 $\dot{\theta}_B$ ：ゴム支承の回転に伴う減衰力と回転角速度である。支承の回転ばね剛性 $k_{\theta B}$ は、図-6に示したゴム支承のモーメ

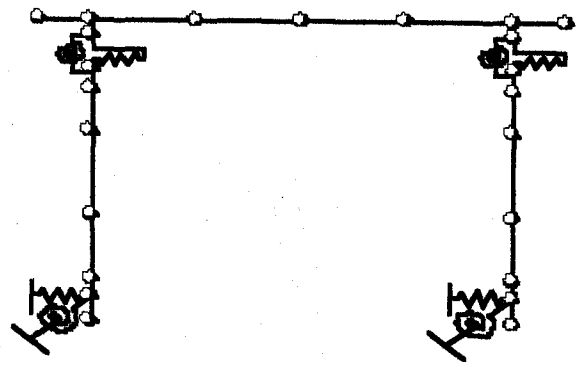


図-8 動的解析モデル

ント～回転角の関係から、また、粘性減衰係数 c_B はケース2および3に対する自由振動実験による変位応答の減衰波形を最もよく解析で再現できるように定める。

3) 粘弾性体もゴム支承と同様に線形回転ばねと回転ダッシュポットの組み合わせで次式のようにモデル化する。

$$k_{\theta P} = \frac{M_P}{\theta_P} \quad (6)$$

$$c_P = \frac{F_{D\theta P}}{\dot{\theta}_P} \quad (7)$$

ここで、 $k_{\theta P}$ ：粘弾性体による橋脚の回転ばね剛性、 M_P 、 θ_P ：粘弾性体に作用するモーメントと粘弾性体に生じる回転角、 $F_{D\theta P}$ ：粘弾性体の回転に伴う減衰力、 c_P ：粘弾性体の回転に伴う粘性減衰係数、 $\dot{\theta}_P$ ：粘弾性体の回転角速度である。粘弾性体の回転剛性 $k_{\theta P}$ 、粘性減衰係数 c_P はそれぞれケース4の自由振動実験から求められる基本固有周期および減衰応答を最もよく再現するように定める。

4) 図-5(a)に示したケース1の自由振動実験からもわかるように、式(5)、式(7)による減衰以外にも、模型橋には橋脚基礎からの逸散減衰や空気との摩擦等、他の要因による減衰作用がわずかに存在する。これをここではレーリー減衰として与えることとした。1次および2次固有振動に対するモード減衰定数を仮定することによりレーリー減衰のパラメーターを定めたが、この際、振動の大きな箇所における実験結果との一致度が最も良くなるように0.002～0.008の範囲で1次及び2次モード減衰定数を与えた。

このようにして、ケース1からケース6に対して、基本固有周期、減衰定数をそれぞれ求めると、0.247秒、0.637秒、0.592秒、0.219秒、0.568秒、0.576秒、0.006、0.052、0.051、0.018、0.060、0.065となる。

(2) 自由振動実験結果のシミュレーション

以上の方針に基づき、まず、桁～橋脚～支持架台を固定結合したケース1に対する自由振動実験結果と基本固有周期が一致するように橋脚の剛性 k_P を微調整した。

これを用いて、ゴム支承で支持したケース2、ケース3に対する自由振動実験から求めた基本固有周期及び減衰応答を最もよく近似できるようにゴム支承の回転ばね定

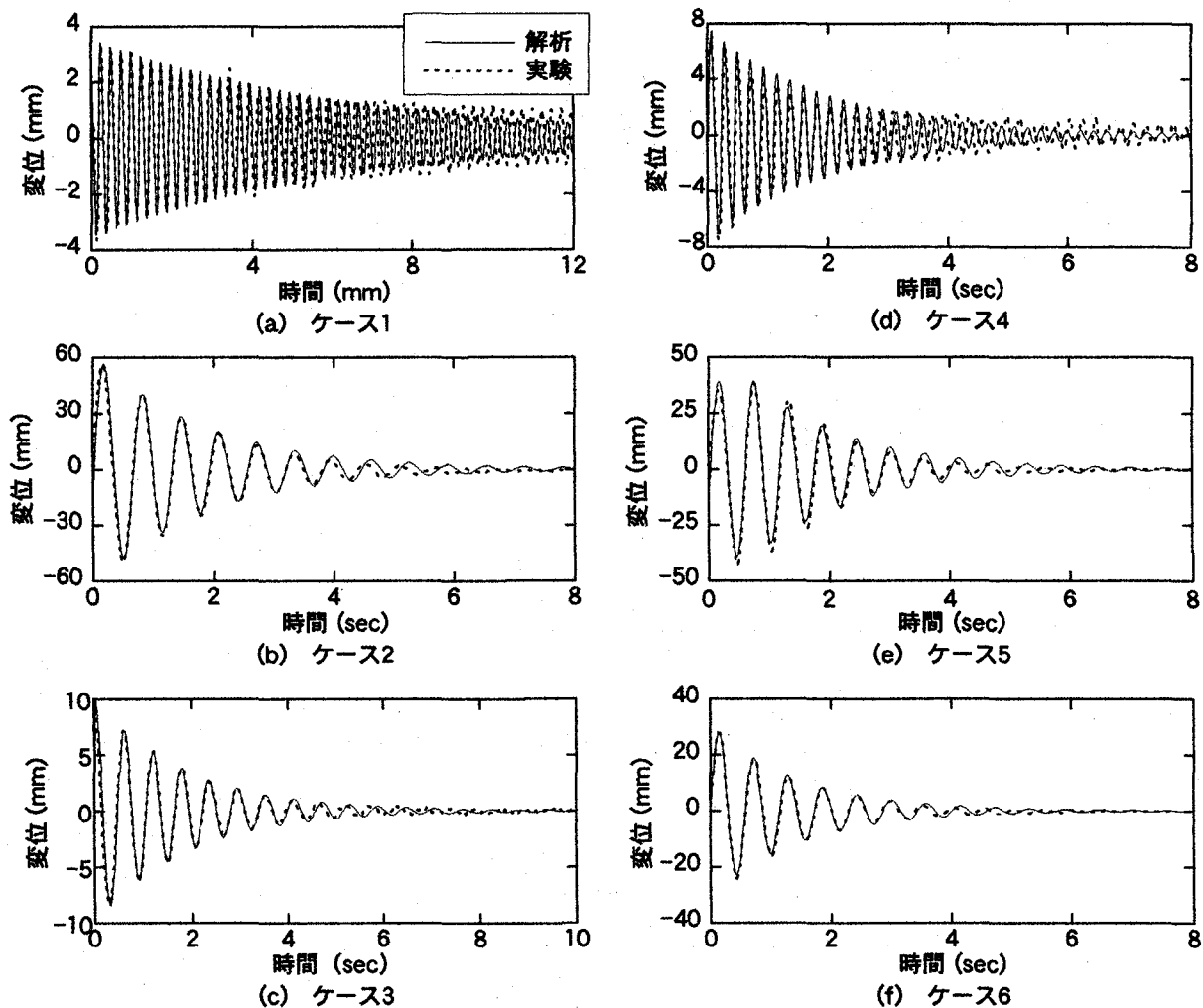


図-9 自由振動実験に対する解析シュミレーション

数 $k_{\theta\theta}$ 及び回転に伴う粘性減衰係数 c_B を定めた。

次に、橋脚基部に粘弾性体を取り付けたケース4の基本固有周期及び減衰応答から粘弾性体の回転ばね定数 $k_{\theta\theta}$ および回転に伴う粘性減衰係数 c_P を定めた。

以上のようにして、橋脚の剛性 k_P 、ゴム支承及び粘弾性体の回転ばね定数 $k_{\theta\theta}$ 、 $k_{\theta P}$ 及び粘性減衰係数 c_B 、 c_P を定めることができたため、これらの値を用いて残りのケース5、ケース6に対するシミュレーションを行った。

以上のようにして解析した模型橋の自由振動実験結果を実験値と比較すると、図-9のようになる。前述したように、自由振動実験から求めた固有周期及び減衰定数には変位振幅依存性があり、振幅の大きい箇所において実験値との一致度がよいようにばね定数や粘性減衰係数を定めたため、振幅が小さくなると実験値との一致度がやや低下するものがあるが、全体としては解析結果は実験結果をよく表しているといえる。

(3) 地震動加震実験結果のシミュレーション

以上のモデルを用いて地震動加震実験結果に対する解析を行った。解析結果を実験値（図-7参照）と比較して示すと図-10のようになる。自由振動実験の場合と同様

に、変位振幅が小さくなると解析の精度が多少低下する場合があるが、これは上述したゴム支承および粘弾性体のばね定数や粘性減衰係数の変位振幅依存性によるものである。全体としては、解析結果は実験結果をよく再現しているといえる。

6. 部分構造系のエネルギー吸収をもとにした橋全体系の減衰定数の推定

(1) 橋全体系の減衰定数の推定法

模型橋を構成する部分構造系のエネルギー吸収特性が分かれば、模型橋の減衰特性は推定可能なはずである。ここでは、模型橋の基本振動を等価線形1自由度系にモデル化することにより、基本固有振動モードに対する減衰定数を求めることとする。等価1自由度系にモデル化した場合の模型橋の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (8)$$

ここで、 m 、 c 、 k ：質量、粘性減衰係数、ばね定数であり、 $p(t)$ ：外力である。

減衰力 $c\dot{u}$ による部分構造系の吸収エネルギー ΔW は、

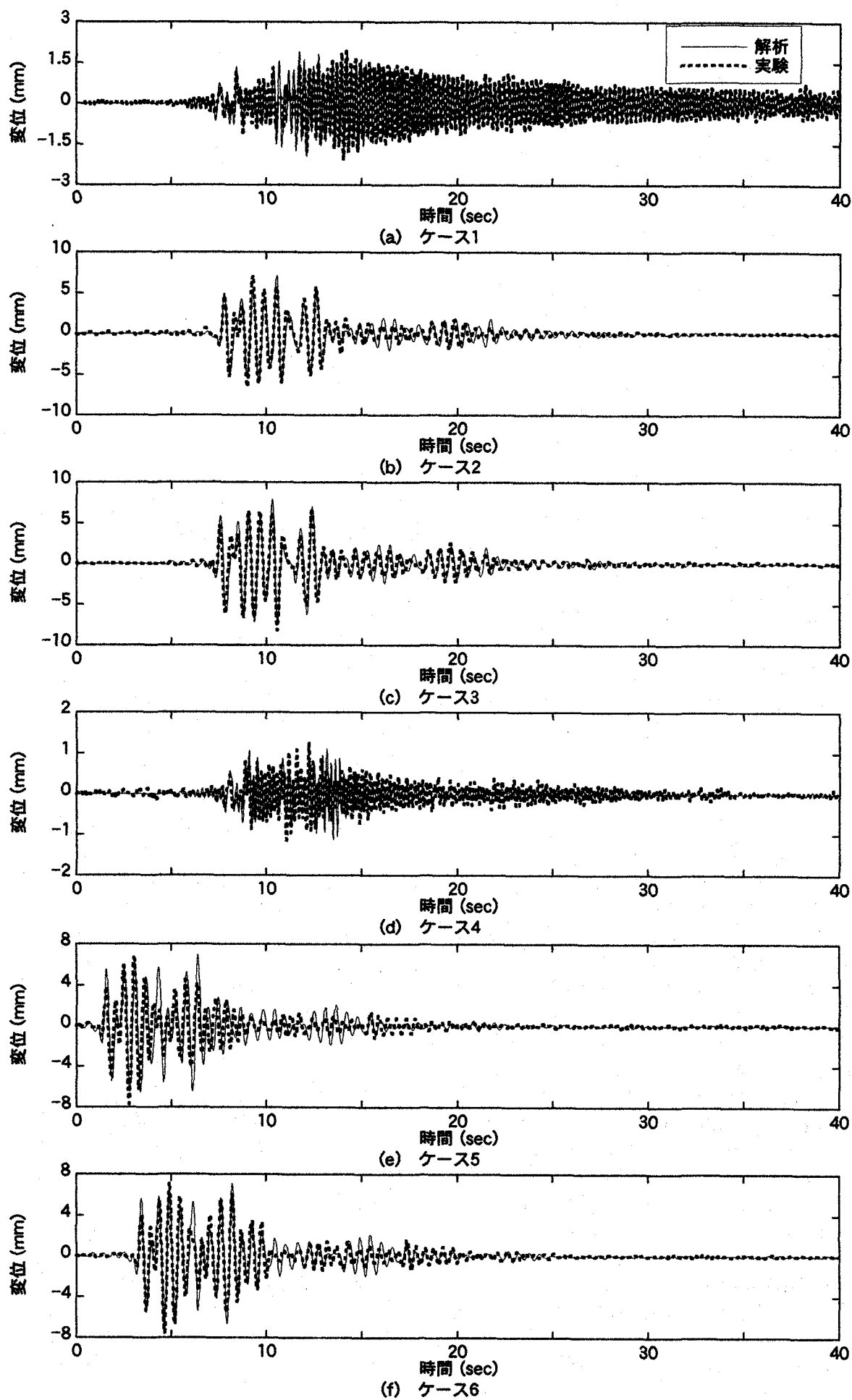
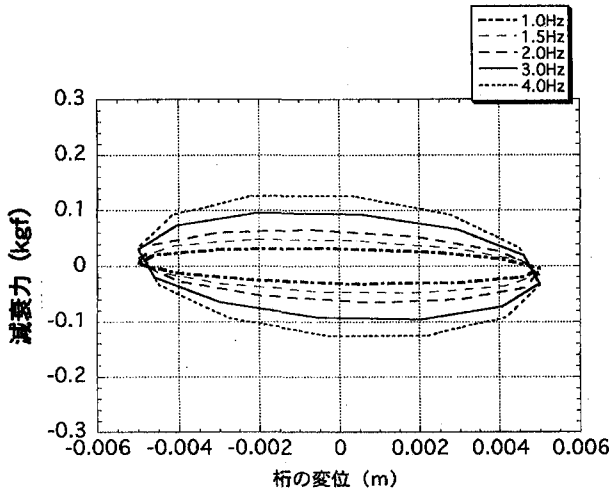
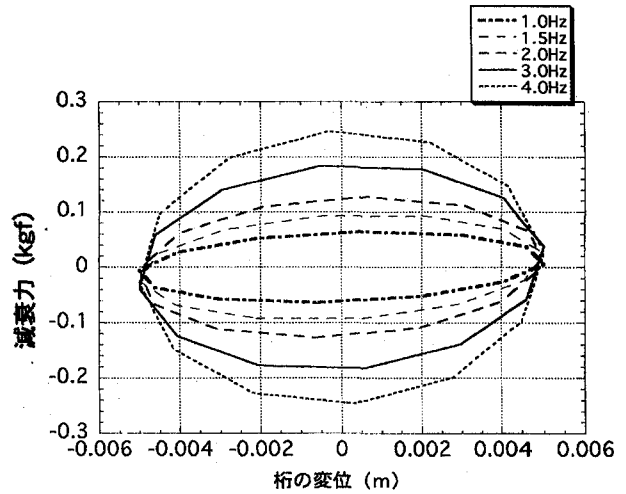


図-10 加震実験による変位応答の比較



(a) ゴム支承



(b) 橋脚基部の粘弾性体

図-11 式(5), (7)による減衰力 (ケース5の場合)

$$\Delta W = \int_0^{2\pi/\omega} c u^2 dt \quad (9)$$

ここで、 $\omega = \sqrt{k/m}$ は角固有振動数である。外力 $p = p_0 \cos \omega t$ が作用して定常振動していると考え、振幅を d 、位相を φ とすると、質点の運動 u は、

$$u = d \cos(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

であるから、式(9)は次式となる。

$$\Delta W = \pi \omega c d^2 \quad (11)$$

一方、ひずみエネルギーの最大値 W は、

$$W = \frac{1}{2} k d^2 \quad (12)$$

であるから、部分構造系の吸収エネルギー ΔW とひずみエネルギーの最大値 W の比は、

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\pi \omega c d^2}{(1/2) k d^2} = 4\pi h \quad (13)$$

したがって、減衰定数 h は次式のようにになる。

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (14)$$

振動実験では支承および粘弾性体は回転変形したため、エネルギー吸収 ΔW は次式のように求められる。

$$\Delta W = \int_0^{2\pi/\omega} c_B \dot{\theta}_B^2 dt + \int_0^{2\pi/\omega} c_P \dot{\theta}_P^2 dt + \int_0^{2\pi/\omega} c_L \dot{u}^2 dt \quad (15)$$

ここで、 $\dot{\theta}_B$: 支承の回転角速度、 $\dot{\theta}_P$: 粘弾性体部分の回転角速度、 c_B : 支承の粘性減衰係数、 c_P : 粘弾性体の粘性減衰係数、 c_L : 5(1)に示したレーリー減衰係数、 $\dot{u}$: 桁の速度応答である。ただし、レーリー減衰の影響は支承や橋脚基部の粘弾性体に比較して小さいため、以下、式(15)の第3項は無視することとする。

一方、模型橋のひずみエネルギー (運動エネルギー) の最大値は次式で与えられる。

$$W = \frac{1}{2} m_D a_D u_D^2 + \frac{1}{2} k_P u_P^2 \quad (16)$$

ここで、 m_D 、 a_D 、 u_D はそれぞれ桁の質量、応答加速度、応答変位、 k_P 、 u_P は橋脚の剛性、応答変位である。橋脚

のひずみエネルギーは桁の運動エネルギーに比較して小さいため、以下、式(16)の第2項は簡単のため無視することとする。

以上の関係を用いると、式(14)より橋全体系の減衰定数 h は、次式のように求められる。

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\int_0^{2\pi/\omega} c_B \dot{\theta}_B^2 dt + \int_0^{2\pi/\omega} c_P \dot{\theta}_P^2 dt}{\frac{1}{2} m_D a_D u_D} \quad (17)$$

(2) 橋全体系の減衰定数の推定と実験値との比較

式(17)を用いて正弦波加振実験による応答からケース5およびケース6を対象に模型橋の減衰定数 h を推定する。ここで、ケース5、ケース6を対象としたのは、免震支承と橋脚基部の粘弾性体の2箇所エネルギー吸収があり、模型橋の減衰の評価に適していると考えたためである。前述したように、振動実験では支承や橋脚基部の粘弾性体の回転角速度 $\dot{\theta}_B$ 、 $\dot{\theta}_P$ が求められており、また、自由振動実験結果を最もよく再現するゴム支承および粘弾性体の粘性減衰係数 c_B 、 c_P も求められている。したがって、たとえば、支承及び粘弾性体に作用する減衰力 $F_{D_{\theta B}}$ 、 $F_{D_{\theta P}}$ をそれぞれ式(5)、式(7)から求めると、図-11のようになる。これはケース5に対する結果を示したものであり、 $c_B = 4$ 、 $c_P = 100.0$ (Ns/m)としている。粘性減衰であるため、減衰力 $F_{D_{\theta B}}$ 、 $F_{D_{\theta P}}$ は振動数依存性を持っており、橋脚基部の粘弾性体の減衰力 $F_{D_{\theta P}}$ の方がゴム支承の減衰力 $F_{D_{\theta B}}$ よりも2倍程度大きい。

以上のようにして、加振振動数を変化させた正弦波加振実験結果を基に、式(17)より模型橋の減衰定数 h を求めた結果をケース5、ケース6を例に図-12に示す。上述した図-11からもわかるように、減衰定数 h は振動数に比例して増加する。

図-5に示した自由振動実験から求められた減衰定数は

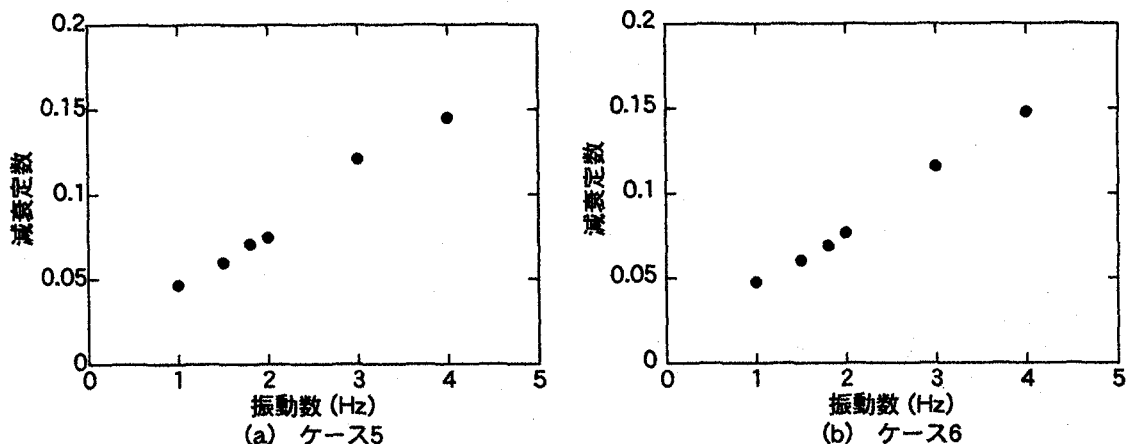


図-12 式(17)から推定した模型橋の減衰定数

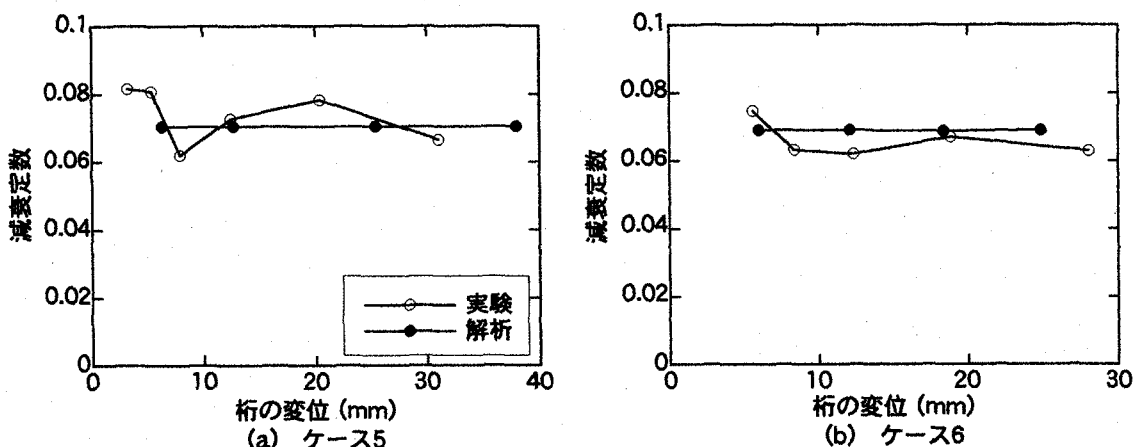


図-13 式(17)から推定した基本固有振動モードに対する橋全体系の減衰定数と実験結果の比較

基本固有振動数に相当する振動数で加振した場合の減衰定数を与えている。このため、図-12に示した解析結果の中から基本固有振動数1.8Hzの場合の減衰定数を取り出し、これを図-5に示した実験値とケース5、ケース6に対して比較した結果が、図-13である。前述したように、自由振動実験から求めた模型橋の減衰定数 k は、ケース5では0.07、ケース6では0.065程度である。これに対して、式(17)による解析値は、ケース5、ケース6ではそれぞれ0.07、0.069であり、実験値とよく一致している。

7. 結論

本研究では、異なった減衰特性を有する部分構造系からなる単径間の高架橋を想定した橋模型の振動実験と動的解析によるシミュレーションによって、部分構造系のエネルギー吸収に基づいて橋全体系の減衰定数を推定する手法について検討した。本検討の結果得られた結論をまとめると以下の通りである。

1) 模型橋では、主として橋脚基部に設置した粘弾性体とゴム支承においてそれぞれ橋脚の回転、ゴム支承の回転に伴ってエネルギー吸収が行われ、ともに振動数依存性の粘性タイプの減衰力が与えられた。これらを、式(4)～

式(7)のように線形回転ばねおよび回転に抵抗するダッシュポットとし動的解析においてモデル化することにより、模型橋の自由振動および地震応答を精度良く再現することができる。

2) 橋脚基部の粘弾性体およびゴム支承のエネルギー吸収特性を正しく評価できれば、式(17)より基本固有振動モードに相当する模型橋の等価減衰定数を精度良く推定することができる。

謝辞：本研究における振動実験は平成10年11月に建設省土木研究所中型振動台を用いて行ったものである。振動実験に際しては、耐震研究室の運上茂樹、足立幸郎、近藤益夫、長屋和宏、東京工業大学川島研究室のAnat Ruangrassamee、渡邊学歩、細入圭介、星恵津子の各氏に大変お世話になりました。また、支承は横浜ゴム、粘弾性体は住友3Mに御提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Bleich, Fr. and Teller, L. W. : Structural Damping in Suspension Bridges, ASCE Trans., Vol.117, 1952.
- 2) Kawashima, K., Unjoh, S. and Tunomoto, M. : Estimation of Damping Ratio of Cable-Stayed Bridges for Seismic

- Design, Journal of Struct. Eng., ASCE, Vol.119, No.4, pp. 1015-1031, 1993.
- 3) Kawashima, K., Unjoh, S. and Azuta, Y.: Analysis of Damping Characteristics of a Cable Stayed Bridge based on Strong Motion Records, Structural Engineering and Earthquake Engineering, Proc. JSCE, No. 416/I-13, pp. 169-178, 1990.
- 4) Kawashima, K. and Unjoh, S.: Damping Characteristics of Cable-Stayed Bridges Associated with Energy Dissipation at Movable Supports, Structural Engineering and Earthquake Engineering, Proc. JSCE, No. 404/I-11, pp. 123-130, 1989.
- 5) 山口宏樹, 高野晴夫, 小笠原政文, 下里哲弘, 加藤真志, 加藤久人: 斜張橋振動減衰のエネルギー的評価と鶴見つばさ橋への適用, 土木学会論文集, No. 543/I-36, pp. 217-227, 1996.
- 6) 角本周, 梶川康男, 岡林隆敏: 吊床版橋の振動使用性照査における減衰特性の影響, 土木学会第52回年次学術講演会, pp. 458-459, 1997.
- 7) 川島一彦, 運上茂樹, 角本周: 基礎からのエネルギー逸散による斜張橋の減衰特性, 土木技術資料, 32-9, pp. 33-39, 1990.
- 8) 川島一彦, 長島寛之, 岩崎秀明: エネルギー比例減衰法による免震橋のモード減衰定数の推定精度, 土木技術資料, 35-5, pp. 62-67, 1993.
- 9) 中島章典, 土岐浩之: 剛体ばねモデル解析を用いた桁橋の構造減衰特性に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.44A, pp. 793-800, 1998.3.
- 10) 若原敏裕, 川島一彦: 剛体基礎で支持される道路橋橋脚の地下逸散減衰, 土木学会論文集, No. 432/I-16, pp. 145-154, 1991.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.

(2000年9月14日受付)