

すべり支承とダンパーを用いた橋梁模型の 振動台実験及び解析的検討

岡田太賀雄¹・運上茂樹²

¹正会員 修(工) 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ(耐震) 研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

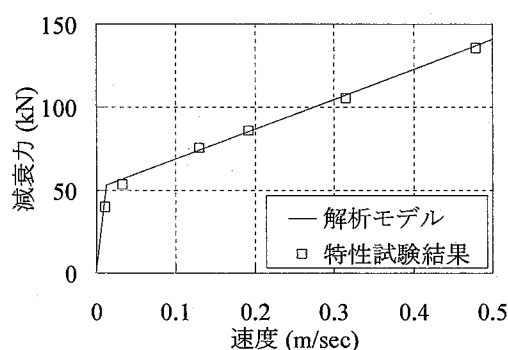
²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ(耐震) 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

1. はじめに

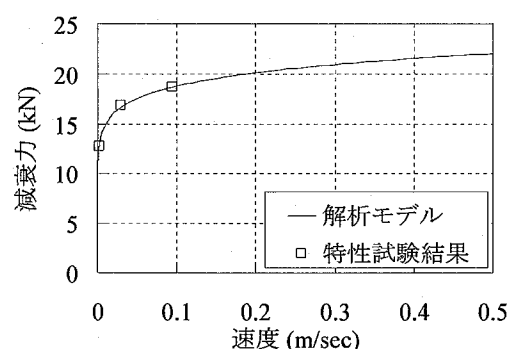
阪神淡路大震災以降、積層ゴム系の免震支承を用いて橋梁の長周期化と高減衰化により地震力の低減と耐震性の向上を図る免震構造が一般的に採用されるようになってきている。また、近年においては、ダンパーを用いて、地震力を分散させ、応答変位を低減させる構造も採用されるようになってきている。ダンパーとしては様々な材料・構造を用いたタイプが開発されつつある。例えば、鋼製ダンパーは鋼材が塑性変形することにより、エネルギーを吸収するタイプの履歴ダンパーであり、オイルダンパー等の粘性ダンパーは、シリンダー内に充填された流体の粘性抵抗を利用してエネルギーを消費させるタイプのダンパーである。また、ある応力までは固体のように振る舞い、ある応力以上になると流体となるビンガム流体を用いることで、摩擦のような履歴を描くダンパーも開発されている。

これらのダンパー個々の減衰特性はダンパー単体を用いた水平ジャッキによる正負交番載荷実験等により検討され、それに基づき設計モデルとして提案されているものの、橋梁模型と組み合わせたシステムとしての検証や振動台を用いた動的挙動の検証及びそれらの実験結果を基に解析モデルの検証を行った例は少ない。

本文では、ダンパーを用いた橋梁の地震時挙動について検討するため、(独)土木研究所所有の3次元大型振動台を用いて、異なる減衰特性を有する2種類の振動制御用のダンパーを用いてすべり支承により支持された橋梁の上部構造を対象とした振動台実験を行った結果及びそのシミュレーション解析の結果について報告する。



a) ダンパーA



b) ダンパーB

図-1 実験に用いたダンパーの減衰力の速度依存性
(ダンパー単体試験に基づく近似解析モデル)

2. 実験概要

(1) ダンパー

本実験には、市販の振動制御用のダンパーを2種類使用した。各ダンパーの減衰特性を図-1に示す。

ダンパーAはオイルダンパーであり、リリーフバルブを用いることである速度で減衰係数が2段階に変化するタイプである。開発者による解析モデルではバイリニアでその特性が表現できると提案されており、低速域では減衰係数が大きく、高速域では小さくなるタイプである。ダンパー単体を用いた特性試験の結果によれば、減衰係数は $C_1=4000\text{kN}/(\text{m}/\text{sec})$ 、 $C_2=180\text{kN}/(\text{m}/\text{sec})$ となり、減衰力は式(1)で評価されている。なお、ストロークは $\pm 120\text{mm}$ である。

ダンパーBは摩擦履歴型のビンガムダンパーであり、開発者による解析モデルでは減衰力は速度の0.1乗で表されると提案されている。ダンパー単体を用いた特性試験の結果から得られた減衰力は式(2)で評価されている。なお、ストロークは $\pm 80\text{mm}$ である。ただし、特性試験として $0.1\text{m}/\text{sec}$ 以上の高速域の試験については試験装置の制約から実施していない。

$$F = Cv = \begin{cases} 4000v & (v < 0.013) \\ 53 + 180(v - 0.013) & (v > 0.013) \end{cases} \quad (1)$$

$$F = Cv = 23.6v^{0.1} \quad (2)$$

ここで、

F : 減衰力 (kN)

C : 減衰係数 (kN/(m/sec))

v : 速度 (m/sec)

(2) 橋梁模型

図-2 に示すように振動台上に橋軸方向（長辺）6.11m（支承中心間距離 5.71m）橋軸直角方向（短辺）1.83m（支承中心間距離 1.43m）の橋桁模型を用いて、カウンタウェイトで重量を調整し、4隅を充填剤入り PTFE と SUS を組み合わせたすべり支承で支持した。このように支持された橋梁模型にダンパーを設置し変位を制御することとし、ダンパーAについては図-3 に示すように短辺中央位置に長辺方向と平行に 1 本設置し、ダンパーBについては図-4 に示すように各支点に長辺方向と平行に 4 本設置した。なお、ダンパーA とダンパーB の本数が異なるのは入手可能なダンパーのサイズに制限があったためである。また、カウンタウェイトの重量については、入力する地震動とダンパーの有する性能とストロークの関係から、予備検討に基づき調整することとし、ダンパーA を設置した場合には総重量が283kN、ダンパーB を設置した場合には総重量が214kNとなるようにカウンタウェイトを設置した。

(3) 計測項目

橋梁模型の動的挙動を確認するために、レーザー変位計・加速度計を用いて、桁の応答変位・応答加速度を計測した。また、すべり支承の下には三分力計を設置し振動時の摩擦力及び鉛直荷重を計測した。ダンパーにより生じる減衰力の計測について、ダンパーAは図-3に示すように軸方向に設置したロードセルにより計測し、ダンパーBは図-4に示すように実験前に荷重と歪み関係を把握した歪みゲージをロードに取り付けることにより計測することとした。

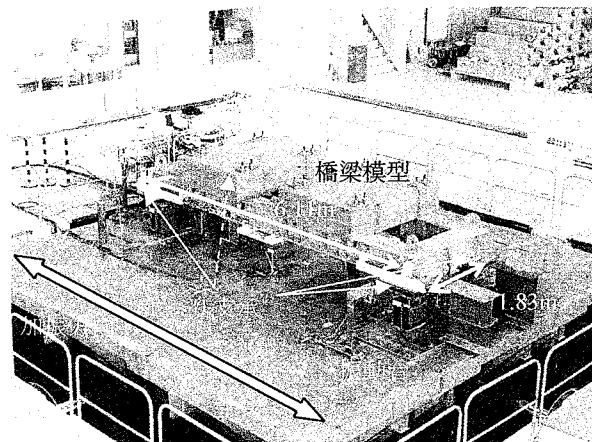


図-2 橋梁模型の設置状況

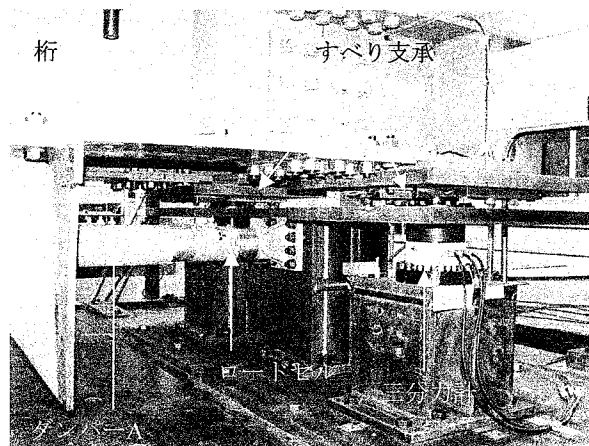


図-3 ダンパーAの設置状況

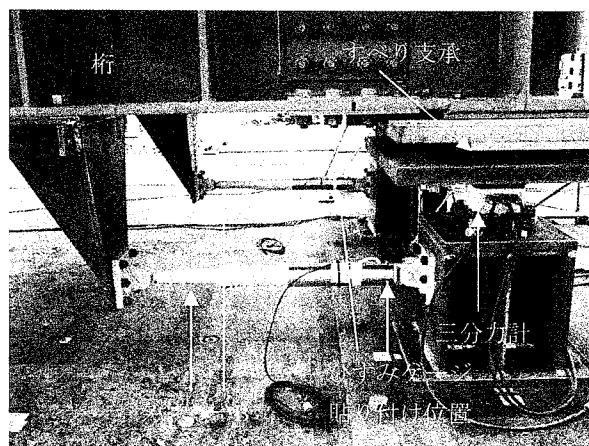


図-4 ダンパーBの設置状況

(4) 入力地震動及び加振ケース

入力波としては図-5に示す1995年兵庫県南部地震の際のJR西日本鷹取駅構内における観測記録(NS・UD方向)(以下鷹取波)を用いることとし、加速度振幅を変化させて入力することとした。各ダンパーを用いた際の加振ケースを表-1に示す。なお、時間軸については圧縮していない。また、地震波の100%入力時に関しては、水平一方向のみ入力した場合と水平+上下動を入力した場合をそれぞれ行い、橋梁模型の地震時挙動への上下動の及ぼす影響についても検討することとした。

3. 実験結果

各ケースの主要な最大応答値について表-2に示す。なお、ダンパーBを用いたケースについてのダンパー荷重については4本の和である。すべり支承のみで支持した場合、摩擦力以上の慣性力を発生させる加速度が生じると滑るため、摩擦力以上の加速度は生じないことになるが、ダンパーを設置しているので、入力加速度の増加に応じて、桁の応答加速度は増加し、ダンパーに生じる減衰力も増加している。しかしながら、いずれのケースにおいても、桁の応答加速度は入力地震動に対して増幅されることがなく低減されていることが確認できる。

また、上下動を入力したケースについて、時刻歴図応答及び摩擦力・ダンパー荷重の履歴について、ダンパーAを用いた場合(ケース3と4の比較)を図-6に、ダンパーBを用いた場合(ケース7と8の比較)を図-7に示す。上下動を入力したケースの方が、どちらのダンパーを用いた場合においても、加速度応答については高振動数での応答が付加され、スパイク状のピークがみられる。また、本橋梁模型ではすべり支承を用いたため、摩擦力については鉛直荷重の変動に伴い摩擦力が変動し、上下動を入力したケースの方が、摩擦力が瞬間的に増減したものの、いずれのケースにおいてもダンパーの荷重や、水平方向の応答値についても大きな差は生じていないことが確認できる。本実験の条件においては、上下動を入力したケースにおいてもダンパーは水平動のみを入力したケースと同様に挙動することが確認できる。

4. シミュレーション解析

(1) 解析条件及びモデル化

水平方向のみ入力した結果と水平+上下動を入力した結果の水平方向の応答値について、大きな差は

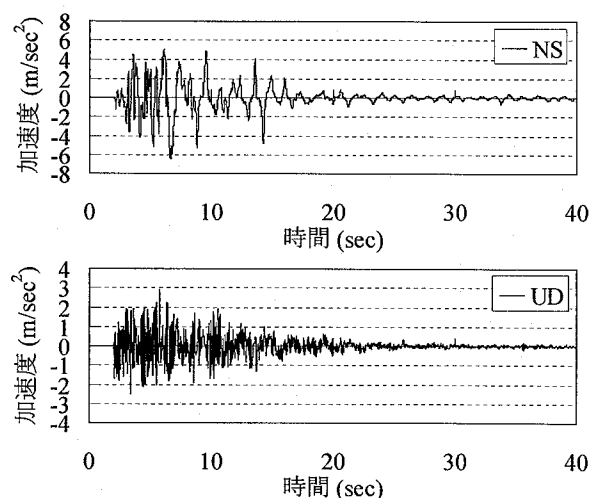


図-5 入力加速度(鷹取波 NS,UD)

表-1 加振ケース

ケース	ダンパー	水平方向	鉛直方向
1	ダンパーA	鷹取波NS70%	
2		鷹取波NS90%	
3		鷹取波NS100%	
4		鷹取波NS100%	鷹取波UD100%
5	ダンパーB	鷹取波NS90%	
6		鷹取波NS95%	
7		鷹取波NS100%	
8		鷹取波NS100%	鷹取波UD100%

表-2 最大応答値

ケース	最大入力 加速度 (m/sec ²)	最大応答 加速度 (m/sec ²)	最大応答 変位 (mm)	ダンパー 荷重 (kN)
1	4.62	3.92	29.9	68.2
2	6.12	4.52	70.2	87.5
3	6.95	4.67	92.7	99.4
4	6.72	5.60	95.7	102.5
5	6.16	1.89	31.0	71.9
6	6.58	5.08	40.8	76.5
7	6.99	5.11	55.0	75.8
8	6.96	6.01	52.7	76.2

確認されなかったもので、水平方向のみ入力した結果についてシミュレーション解析を行った。本実験はすべり支承による摩擦力とダンパーによる減衰力が水平方向に作用する簡単な機構であることから図-8に示す1質点系の解析モデルとした。解析ソフトにはDYNA2Eを用いた。非線形時刻歴応答解析における数値積分法にはNewmark β 法($\beta=1/4$)を用い、積分時間間隔を1/1000とした。また、粘性減衰については、質量や剛性に比例する形で一般的に与えられるが、本実験は前述のように橋梁模型が桁とウェイトからなる簡単な構造ではほぼ剛体的に振動することから、粘性減衰については考慮しないモデルとした。

ダンパーについては速度依存の非線形減衰要素でモデル化し、前述の特性試験の結果から得られた式

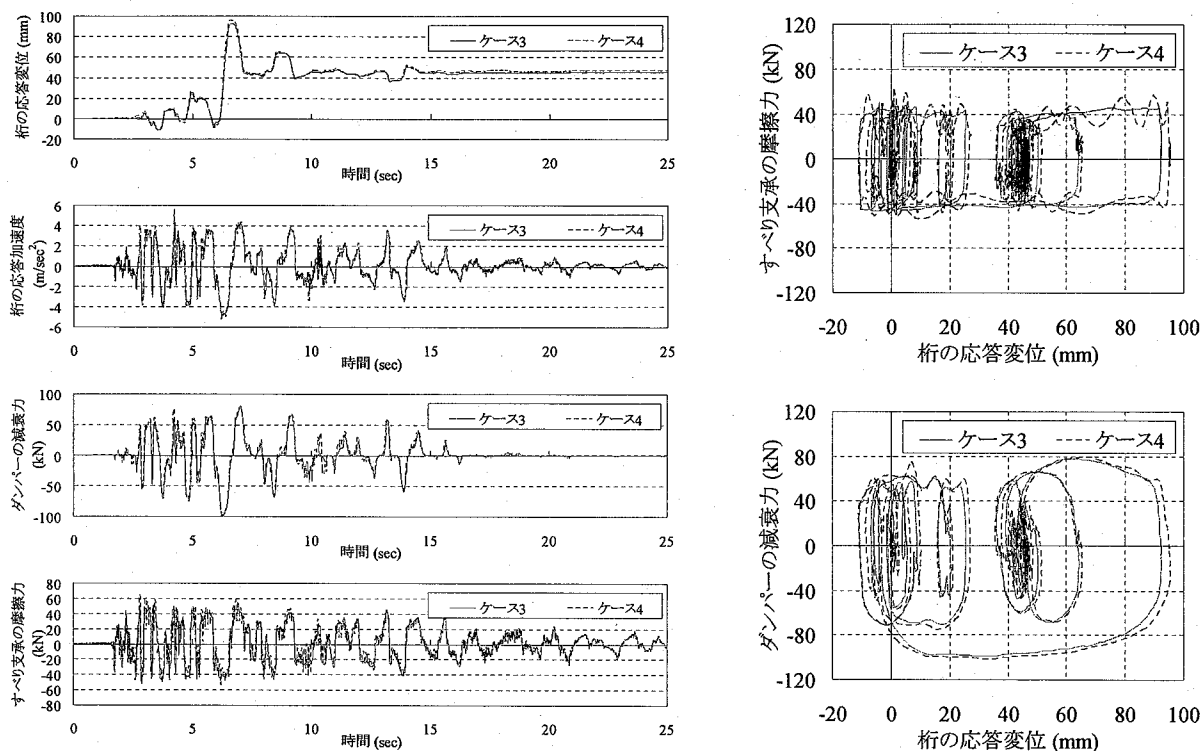


図-6 ダンパーAの時刻歴図及び履歴図の比較 (ケース3(NS100%)とケース4(NS,UD100%))

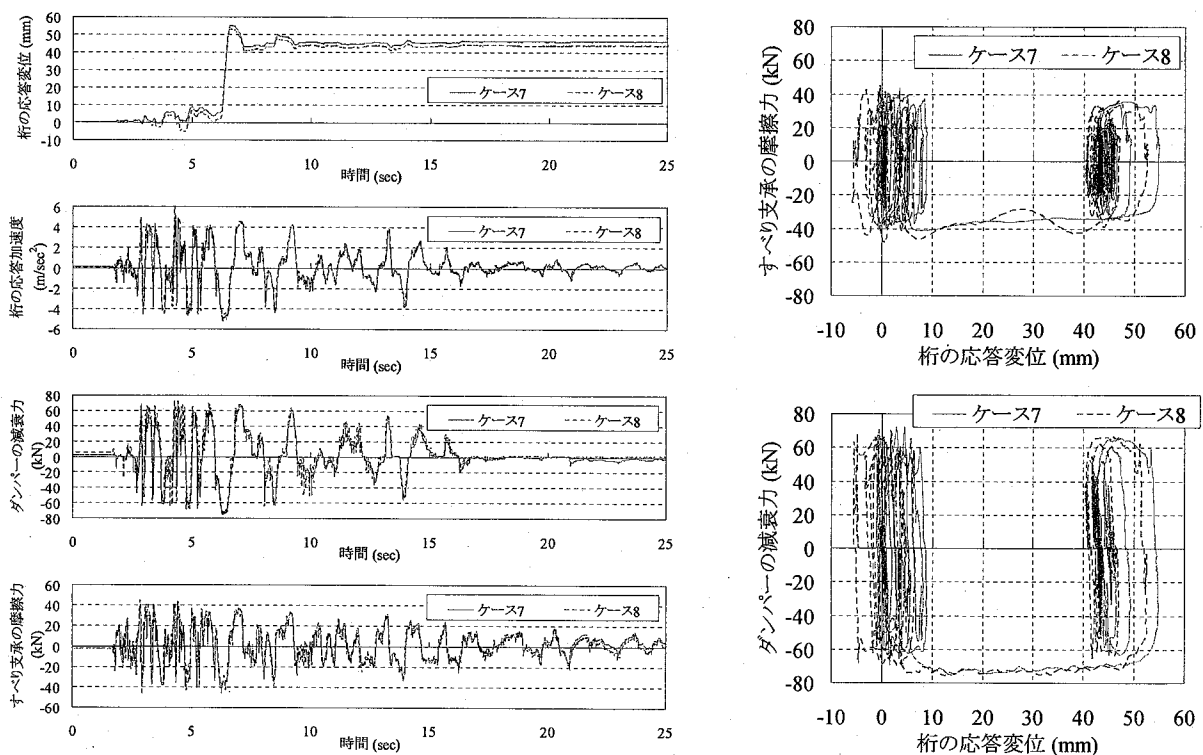


図-7 ダンパーBの時刻歴図及び履歴図の比較 (ケース7(NS100%)とケース8(NS,UD100%))

(1)及び式(2)で表される減衰特性とした。ダンパーBについては4箇所配置したが、ここでは1つの減衰要素にまとめてモデル化した。また、ダンパーBについては、変位-減衰力関係が剛塑性型に近似できるとされていることから、4つのダンパーを1つにまとめた剛塑性バイリニアバネ要素を用いた解析に

ついても行うこととし、実験結果から平均的な減衰力を想定し、最大減衰力を70kNと仮定し解析を行った。

すべり支承の摩擦係数については面圧・速度依存性があることが知られているが、ここでは簡便のため摩擦係数一定のモデルとし、剛塑性バイリニアバネ

要素でモデル化した。4支点にそれぞれすべり支承を配置したが、ここでは1つのバネ要素にまとめてモデル化した。実験結果から平均的な摩擦力を想定し、ダンパーAと組み合わせた場合は40kN、ダンパーBと組み合わせた場合は30kNの摩擦力と仮定して解析を行った。

(2) 解析結果

ダンパーAの結果について図-9に示す。桁の応答変位についてはいずれも解析結果の方が実験結果よりも若干小さく算出されたが、入力加速度を大きくした場合の方がその差は小さくなり、より再現性が高い結果となった。すべり支承の摩擦力及びダンパーの減衰力についても概ね再現できている。しかしながら残留変位についてはいずれも再現性が低くなっている。

ダンパーBの結果について図-10に示す。ダンパーAと同様に、桁の応答変位についてはいずれも解析結果の方が実験結果よりも小さく算出されたが、入力加速度を大きくした場合の方がその差は小さくなった。しかし、ダンパーAと比べると、実験で生じていた比較的小振幅の変位が解析では再現されず、大きな加速度が入力された場合にのみ変位が生じる結果となった。また、すべり支承の摩擦力及びダンパーの減衰力については、非線形減衰要素を用いた場合、大きく異なる挙動を示し、摩擦力の時刻歴図からは、設定した摩擦力以外の大きさですべり挙動となる結果となった。これは、解析上すべり支承を剛と仮定した微小な変形時には微小な速度となり、式(2)で表される減衰力モデルでは低速時に減衰係数が大きくなるため、ほとんど変位の増分が生じなかったためと考えられる。しかし、実挙動としてはこのような微小な速度で大きな減衰力の増分が生じているわけではないと考えられ、こうした低速度域でのモデル化の方法について検討が必要と考えられる。

これに対して、剛塑性バイリニアバネ要素を用いた解析ではすべり支承の摩擦力及びダンパーの減衰力を概ね再現できている事がわかる。ただし、主要動後の入力が小さい時間帯において、収束が悪くなっているが、モデル上剛と仮定した初期剛性の範囲で振動を繰り返しているため、応答変位にはほとんど影響は無いと考えられる。

(3) ダンパーの制震効果について

上記解析モデルのうち、比較的応答特性を再現できたダンパーAを用いた橋梁モデルの解析モデルを用いて、ケース3（加速度振幅100%）の結果についてダンパー無しのモデル解析を実施し、ダンパーの制

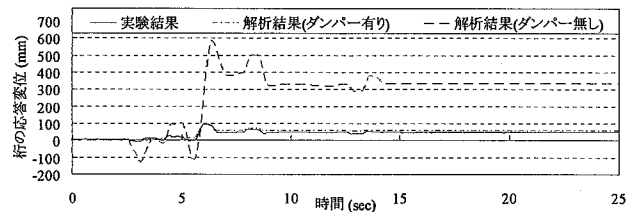
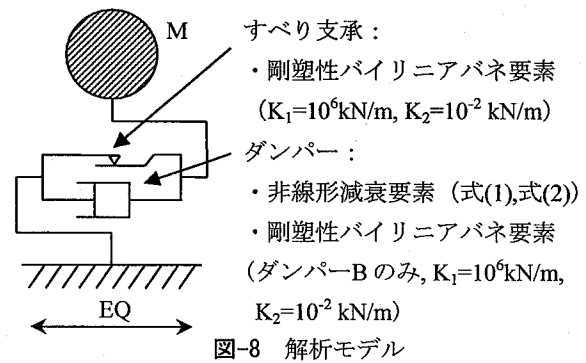


図-11 ダンパーの制震効果

震効果について解析的に検討した。

図-11に実験結果との比較を示す。ダンパー無しの解析結果では応答変位が60cm程度となりダンパーにより応答値が1/6程度になったことが推定される。

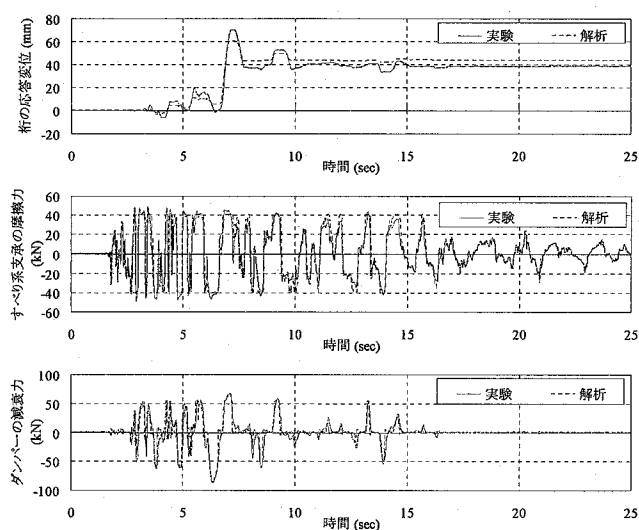
5. まとめ

異なる減衰特性を有する市販の2種類のダンパーを用いて、PTFEとSUSの組み合わせたすべり支承によって支持された橋梁の上部構造を対象とした振動台実験によりダンパーの動的挙動の検討を行った。また、一般に想定される解析モデルを用いてシミュレーション解析を行い、解析モデルについて検討を行った。本研究の結果をまとめると以下の通りである。

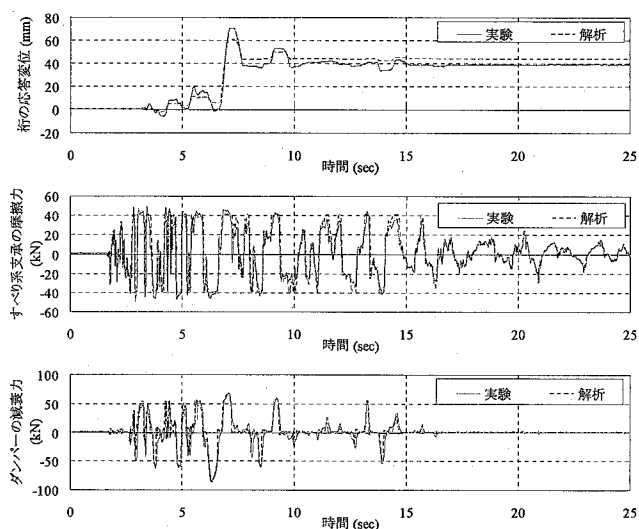
- 1) 本実験で用いたすべり支承とダンパーの組み合わせにおいて、JR 西日本鷹取駅の観測波形を入力した場合の橋梁モデルの動的挙動においては、上下動の影響は大きく無いことを確認した。
- 2) ダンパーAを用いた場合、シミュレーション解析により概ね地震時挙動を再現できることを確認した。また、ケース3（加速度振幅100%）の結果についてダンパー無しのモデルによる動的解析を実施し、ダンパーの制震効果について解析的に確認した。
- 3) ダンパーBを用いた場合、減衰力が低速域において強非線形性を有することとなり、非線形減衰要素を用いたシミュレーション解析では地震時挙動を再現できず、剛塑性バイリニアバネ要素を用いた方がより再現性が高いことを確認した。

謝辞：本実験で使用した三分力計は(独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターより借用したも

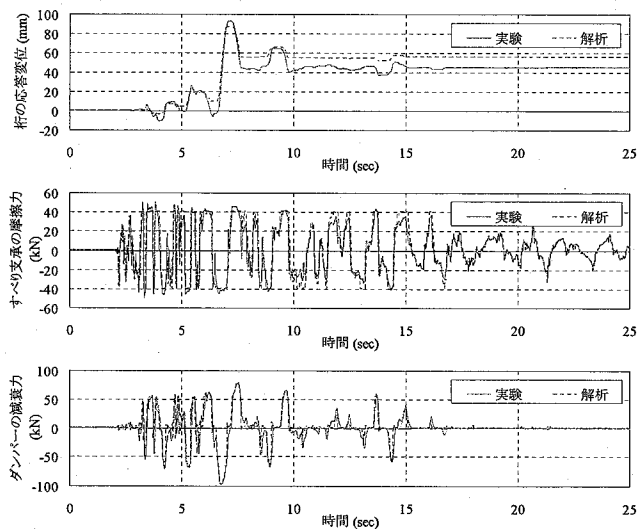
のであり、松森主任研究員には大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。



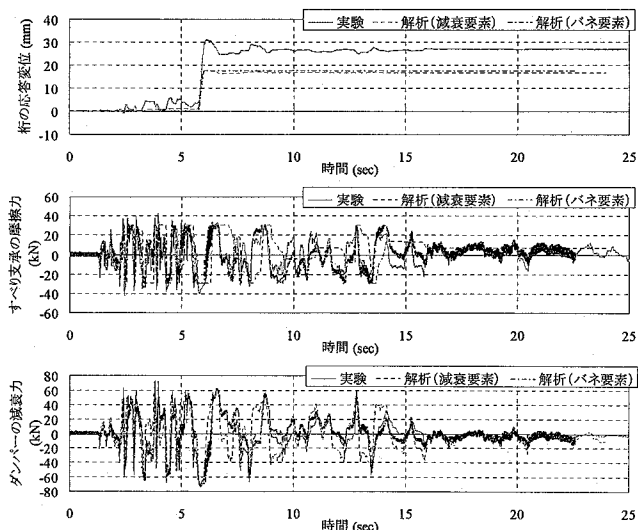
a) ケース 1 (NS70%)



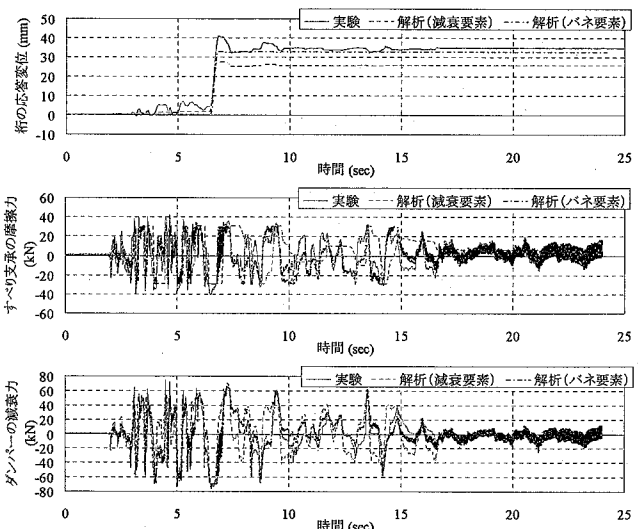
b) ケース 2 (NS90%)



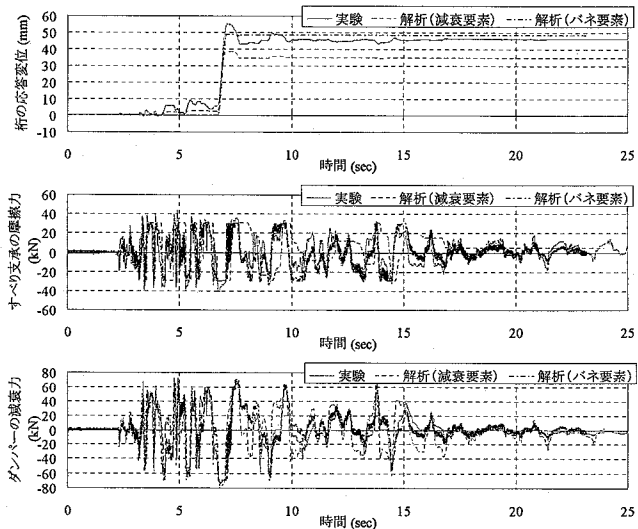
c) ケース 3 (NS100%)



a) ケース 5 (NS90%)



b) ケース 6 (NS95%)



c) ケース 7 (NS100%)

図-9 解析結果と実験結果の比較 (ダンパーA)

図-10 解析結果と実験結果の比較 (ダンパーB)