

# すべり免震支承システムのパラメータが 橋梁応答に及ぼす影響

藤田亮一<sup>1</sup>・森 敦<sup>2</sup>・金治英貞<sup>3</sup>・伊津野和行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>日本技術開発株式会社環境防災技術センター防災・リニューアル部 主任  
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail:fujitary@jecc.co.jp

<sup>2</sup>日本技術開発株式会社環境防災技術センター防災・リニューアル部 課長  
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail:moria@jecc.co.jp

<sup>3</sup>阪神高速道路公団大阪建設局建設企画部設計課 課長補佐  
(〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16)

E-mail:hidesada-kanaji@hepc.go.jp

<sup>4</sup>立命館大学理工学部土木工学科 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:izuno@se.ritsume.ac.jp

機能分離型の免震システムである「すべり免震支承システム」による橋梁耐震性の向上においては、すべり支承の摩擦係数に関わる面圧依存性・速度依存性と水平荷重分散装置の剛性が重要なパラメータである。本研究では、レベル2地震動を対象として、すべり免震支承システムを有する一般的な桁形式橋梁の応答特性に関し、摩擦係数と面圧～速度の連成依存性を考慮するとともに、水平荷重分散装置の剛性変化に着目したパラメータスタディーを行った。さらに設計への適用性を考慮し、一般的なバイリニアモデルによるすべり免震システムのモデル化の可能性を検討した。

**Key Words** : *sliding bearing , friction coefficient , effect of velocity , effect of pressure , seismic isolation system*

## 1. はじめに

橋梁の免震化は、地震動の影響を合理的に軽減する上で有効な方法である。橋梁の分野においては、いわゆる免震支承と呼ばれる減衰機能を有する積層ゴム支承が典型的な免震構造として知られているが、建築分野ではすべり支承を用いた免震構造が早い段階から使われてきている<sup>1),2)</sup>。橋梁分野におけるすべり支承を用いた免震構造については、すでにいくつかの研究<sup>3),4),5),6)</sup>や実務での利用<sup>7),8),9)</sup>などが為されてきている。特に伊津野らは、このようなすべり支承を有する免震構造を、鉛直荷重支持と桁回転変位の吸収の常時機能および地震荷重を軽減する減衰効果といった地震時機能を持つすべり支承部分と、上部構造慣性力の分散および長周期化や復元力を発揮する水平荷重分散装置で構成される機能分離型支承(本論文ではすべり免震支承システムと呼ぶ)として定着させてきている。これらにはすべり支承の面圧依存性や速度依存性を含めた摩擦係数の評価に関する研究も多く含まれている。ただし、摩擦係数

の速度依存性に関する既往の研究成果によれば、その影響は小さいとされているものの、検証されている載荷速度が数10kine程度と小さく、実際の地震時に発生すると考えられる100kine以上の高い速度領域での摩擦係数や履歴特性への影響についてはほとんどデータが得られてはいない。

一般に、いわゆる免震支承(機能一体型)に比べて上記のすべり免震支承システム(機能分離型)は、橋梁の免震設計を行う上で自由度が多いといった利点を持っている。しかしながらその一方で、すべり支承の摩擦係数にはばらつきの問題があり、設計においてはその影響について留意する必要がある。このようなすべり免震支承システムを有する橋梁の耐震設計においては、その挙動が単純ではないことから構造全体をモデル化して、動的解析を適用することが合理性と精度の面から必要となる。

本論文は、すべり免震支承システムを適用した実際の高架橋をスタディーモデルとして、各種のパラメータに着目して行った感度分析に関する研究成果について述べたものである。そのため、高架橋全体

鋼3径間連続2主箱桁橋

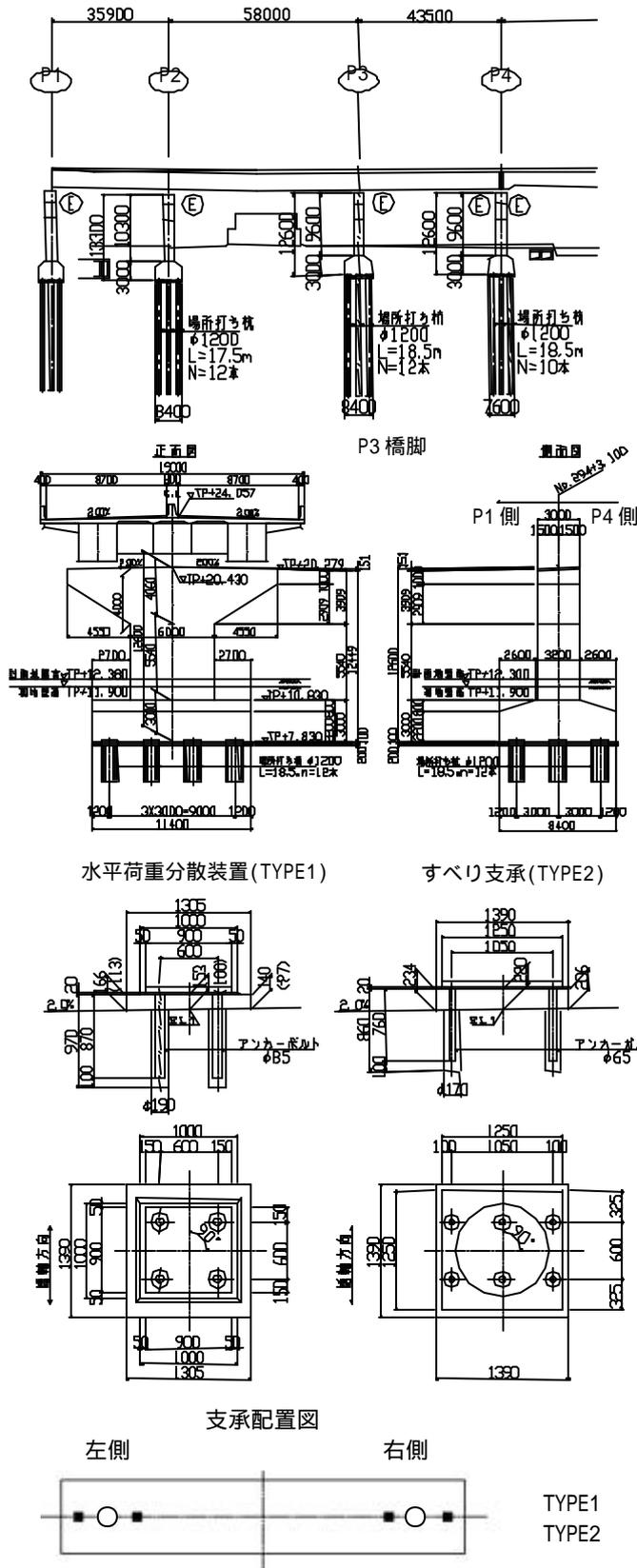


図 - 1 検討対象橋梁

の動的解析においては、別途実験結果にもとづき設定された面圧および速度の両方に依存するすべり支

承の摩擦係数の連成特性を、出来る限り忠実に解析モデルに組み込んだ。本論文では、このようなモデルを用いて、すべり支承の摩擦係数値や水平荷重分散装置の剛性値が、橋梁の耐震設計上重要となる上下部構造相対水平変位や橋脚柱基部の塑性化に及ぼす影響について、実橋梁モデルを用いて検討した結果を示す。また、摩擦係数の高速度領域における特性については不明確ではあるものの、摩擦係数の速度依存性に変化を持たせた特性を数パターン想定し、その橋梁応答に及ぼす影響や耐震設計上の留意事項について考察を加えている。本論文では、上述の検討結果も踏まえ、すべり免震支承システムの耐震設計を行うにあたっての、摩擦係数やすべり免震支承システムのモデル化に着目したひとつの簡便な取り扱い方法について提案するものである。

2. 対象橋梁の概要と検討条件

(1) 対象橋梁の構造諸元

検討対象橋梁は、すべり免震支承システムを有する鋼3径間連続2主箱桁橋である。下部構造はRC単柱橋脚、基礎構造は場所打ち杭基礎である。本橋梁のすべり免震支承システムは、すべり支承にはPTFEとステンレス板を、水平荷重分散装置には積層ゴムデバイスをそれぞれ用いた。対象橋梁の構造一般図を図 - 1 に示す。

(2) 対象橋梁のモデル化

動的解析によるパラメータスタディを行う対象橋梁は、図 - 2 に示す3次元の梁～ばね要素でモデル化した。検討上最も着目する支承については、すべり支承と水平荷重分散装置を個別にばね要素でモデル化して、すべり支承には鉛直力の変動を考慮したバイリニア型の非線形履歴特性を付与した。桁のロッキング振動にともなう鉛直力の変動の影響を考慮するため、同一支承線上の要素を集約せずに、個別にモデル化して桁および橋脚天端とは剛要素で結合した。

橋脚は梁要素でモデル化し、非線形履歴特性としてはRC柱部材の解析に広く用いられている修正武田モデル<sup>10)</sup>を採用した。基礎～地盤は道路橋示方書V耐震設計編<sup>11)</sup>(以下、道示V)に示される手法に従って、集約ばね(線形ばね要素)としてモデル化した。

また、本橋は連続高架橋の一部であり、地震時挙動を考えたときに隣接橋梁の影響を無視することはできない。そこでここでは、隣接径間を支持する支承を架けあわせ橋脚上にばね要素でモデル化し、隣接径間の半スパン分の質量をばね端部に付加することとした。

(3) 動的解析条件

検討に用いる動的解析法は直接積分による非線形時刻歴応答解析とし、各パラメータを表 - 1 に示すように設定した。モデル各部位の材料減衰定数は道示Vを参考に設定したが、全体系の粘性減衰行列は一

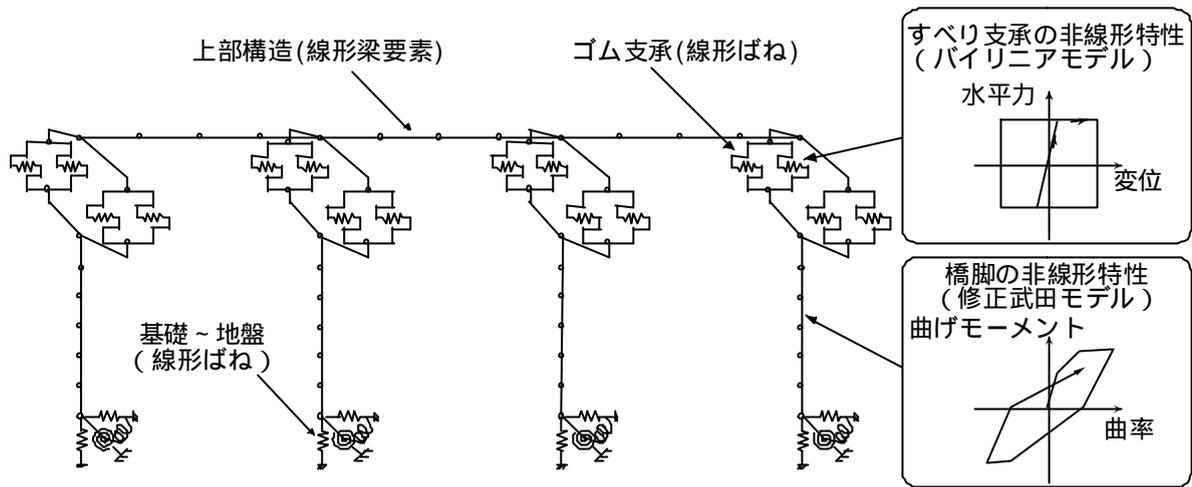


図 - 2 解析モデル概要

表 - 1 解析条件

項目	設定した条件	備考	
動的解析法	時刻歴応答解析		
数値積分法	ニューマーク法		
時間刻み	0.001秒		
解析継続時間	20秒		
モデル	立体骨組みモデル		
質量	離散質量を各節点に付加	フーチングの回転慣性考慮	
橋脚	非線形梁要素	修正武田型	
桁	線形梁要素		
支承	非線形ばね要素	検討パラメータ	
地盤・基礎	線形ばね要素		
減衰マトリックス	要素別Rayleigh減衰	支承部は非減衰	
材料減衰定数	桁	0.02	履歴減衰を別途考慮
	支承	0.00	
	橋脚	0.02	
	基礎	0.20	
入力地震動	道路橋示方書V標準波T2-II-1	レベル2 タイプ2 II種地盤	

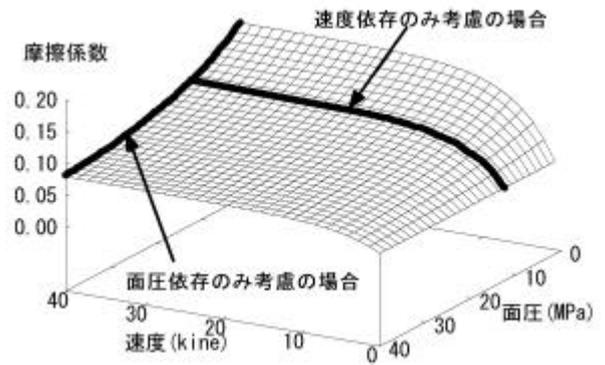


図 - 4 速度・面圧依存特性(高橋らによる実験式)

用いた入力地震動は、当該地の地盤種別に従い道示Vに示されるII種地盤の時刻歴加速度波形(T2-II-1)とした(図-3)。

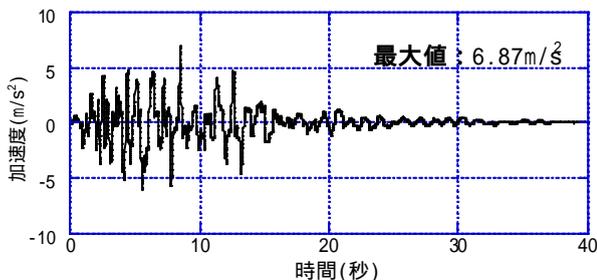


図 - 3 入力地震動(道示V, T2-II-1)

般に用いられるRayleigh減衰ではなく、桁や橋脚等の各部分毎にRayleigh型の減衰行列を作成してそれを重ね合わせる要素別Rayleigh減衰を採用した。本モデルではすべり支承の非線形特性をバイリニア型としているが、初期剛性が大きいため、単純に構造全体に対してRayleigh減衰を適用するとすべり支承部分の剛性比例減衰分が極端に大きくなり、解析精度が低下する問題が生じる(履歴減衰に加えて本来は存在しない大きな粘性減衰が発揮されてしまう)。このような問題を回避するために支承部分については比例係数をゼロとし、粘性減衰を見込まないようにした。

### 3. すべり支承のモデル化

#### (1) 鉛直力の影響の考慮

すべり支承の履歴復元力特性は、鉛直力が一定の場合、完全弾塑性型を近似したバイリニアモデルで表現できる。ところが、鉛直力が変動する場合には摩擦係数が一定でも摩擦力が変化するため、単純なバイリニアでは表現できない複雑な履歴復元力特性を呈する。本検討ではこの効果を忠実に反映させた履歴モデルを用い、鉛直力の変動による構造物の動的挙動への影響を考慮した解析を実施した。

#### (2) 摩擦係数の速度・面圧依存特性の考慮

すべり現象では、鉛直力に比例して摩擦力が変化だけでなく、すべり速度や面圧(鉛直力)の大きさに応じて摩擦係数が変化することが知られている。これらの依存特性を考慮した解析検討もこれまでに行われているが、速度依存特性もしくは面圧依存特性のどちらかに着目している場合が多い。本論文ではこれら2つの依存特性を同時に考慮した場合、および個別に考慮した場合について検討を行った。

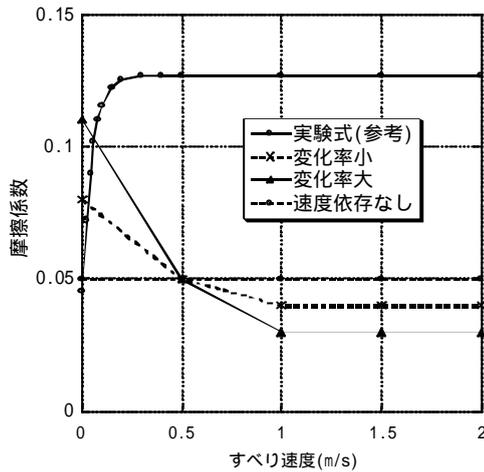


図 - 5 速度依存特性モデル

表 - 2 検討ケース

パラメータ	検討ケース
摩擦係数の速度・面圧依存特性	(1)面圧依存の有無 (2)速度依存の有無 上記の組み合わせで計4ケース
摩擦係数の速度依存モデルの違い	(1)速度依存無し (2)変化率大 (3)変化率小 (4)実験式(参考) 計4ケース
水平荷重分散装置の剛性とすべり支承の摩擦係数	(1)剛性3種類(1.0倍、2.0倍、0.5倍) (2)摩擦係数7種類 (0.05,0.07,0.10,0.15,0.20,0.30,0.40) 上記の組み合わせで計21ケース

速度・面圧依存特性としては、高橋らにより提案されたモデル<sup>12)13)</sup>を用いた(図 - 4)。これは、本検討と同じ橋梁を対象とした模型実験の結果に基づいて速度・面圧依存特性を定式化した実験式であり、以下のような式で表される。

$$\mu = 1.3787 \times \left[ \frac{1 - \exp(-0.1967v)}{1 - \exp(-0.1017P)} \right] + 0.0458 \quad (1)$$

( $\mu$  : 摩擦係数,  $v$  : すべり速度,  $P$  : 面圧)

速度依存特性のみを考慮する場合には面圧を死荷重用作用時の値(12MPa)で固定し、面圧依存特性のみを考慮する場合にはすべり速度を0.4m/s(モデルの最大値)で固定して用いた。

また、速度依存特性については、すべり材の種類によってはすべり速度の増加につれて摩擦係数が低下するものもあるため、図 - 5 に示すようなモデルを用いた場合についても比較検討した。

### (3) バイリニアモデルによる簡易なモデル化

前述した方法による支承のモデル化は詳細ではあるが、実設計への適用を考えた場合には設定するパラメータも多く、要素数も多くなりやや煩雑であるといえる。すべり免震支承システムを構成するすべり支承と水平荷重分散装置の履歴復元力特性は、それぞれバイリニア(2次剛性=0.0)とリニアであるため、システム全体としてはバイリニア型の履歴復元力特性を有することとなる。ここでは、すべり免震支承システムの非線形特性を一般的なバイリニアモデルで近似した場合と前述の詳細なモデルを用いた場合を比較検討し、簡易な方法の適用性について検証した。

## 4. パラメータスタディ検討

### (1) 検討ケースと評価上の着目点

すべり支承の速度・面圧依存特性や摩擦係数、水平荷重分散装置の剛性等に着目して、検討ケースを表 - 2 に示すように設定した。

解析結果の評価は、設計上重要となる最大応答値に着目して行うこととし、各ケースの支承の変位量(上下部構造相対変位)と橋脚基部の曲率塑性率を比較した。なお、ここで着目した橋脚は、境界条件の影響を受けやすい端部橋脚を避け、中間のP3橋脚とした。

### (2) 摩擦係数の速度・面圧依存特性に着目した検討

速度・面圧依存特性の有無を組み合わせで解析した結果を図 - 6 に示す。同図に示すとおり、橋脚基部曲率塑性率についてはいずれのケースにおいても5.0~6.0の範囲であり、各依存特性の有無に対する最大応答値の感度が小さいことが確認された。また、支承変位量についても、依存性を全く考慮しない場合以外の3ケースについては1.0cm程度の差しか生じなかった。

最大応答値の感度が小さいことの理由については、橋梁の応答値が主に水平荷重分散装置の剛性に支配されている可能性が考えられる。すなわち、すべりが生じると免震システムとしての剛性は水平荷重分散装置の剛性が支配することになり、橋梁全体としての周期特性もそれに依存するため、時々刻々の摩擦係数の変動はあるものの、各ケースにおける橋梁の応答特性はほぼ等しくなったものと思われる。

また、依存無しの場合の応答値が他の3ケースに比べて大きいのは、設定した摩擦係数(0.1)が依存性を考慮した場合の平均的な摩擦係数(約0.13)よりも小さく、免震システムの減衰効果が小さかったためと考えられる。

次に、図 - 5 に示す速度依存特性を用いて応答値の比較を行った。結果は図 - 7 に示すとおりであり、支承変位量と橋脚基部曲率塑性率には顕著な差異は見られなかった。一般に摩擦係数の速度依存特性は、速度の増加に伴って摩擦係数が増加もしくは減少し

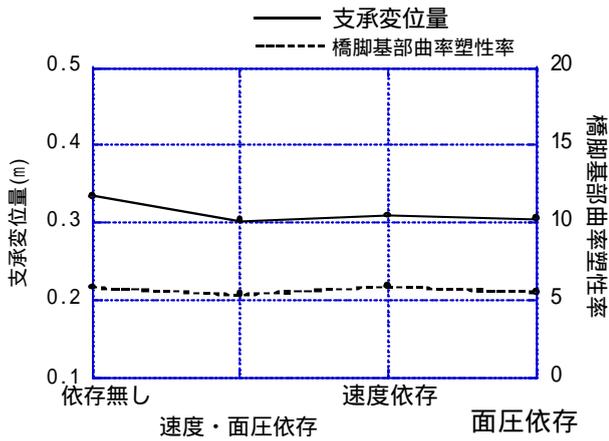


図 - 6 速度・面圧依存特性に着目した検討結果

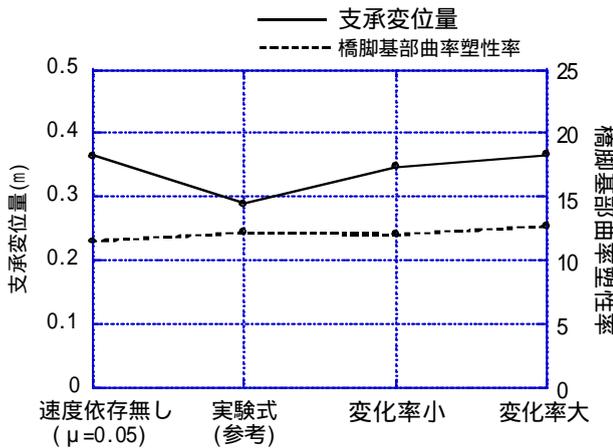


図 - 7 速度依存特性のモデル化に着目した検討結果

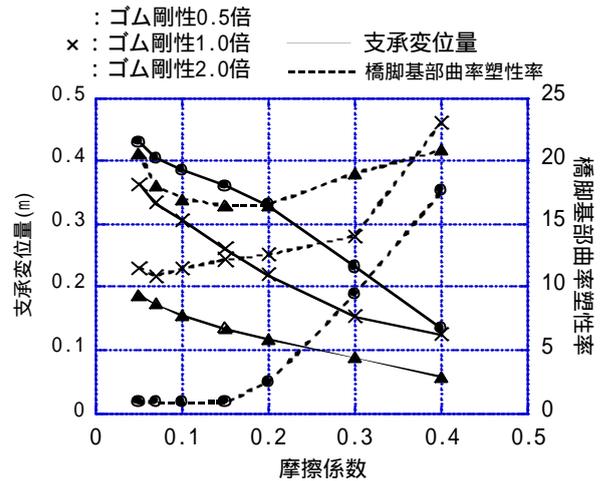


図 - 8 水平荷重分散装置の剛性とすべり支承の摩擦係数に着目した検討結果

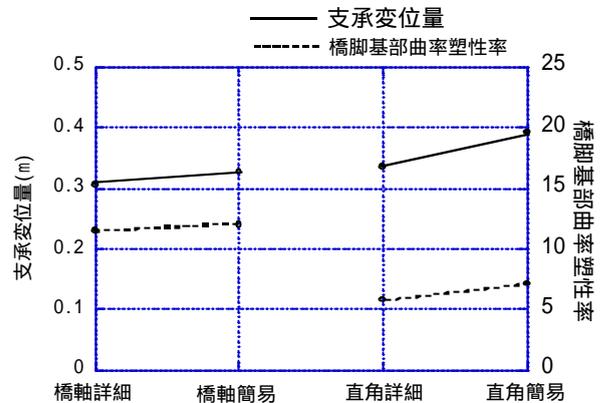


図 - 9 バイリニアモデルの適用性に関する検討結果

ていき、ある程度速度が大きくなった時点で頭打ちになる傾向がある。本研究では入力地震動にレベル2を設定しているため、最大応答速度が1.5m/s程度となり、摩擦係数の変化が頭打ちになる領域に達している。このため、低速度領域で顕著である速度依存特性が最大応答値に及ぼす影響は小さくなっていると考えられる。

(3) 水平荷重分散装置の剛性とすべり支承の摩擦係数に着目した検討

水平荷重分散装置の剛性とすべり支承の摩擦係数に着目した検討結果を示す。(2)での検討により、摩擦係数の速度・面圧依存特性の感度が小さいことが確認されたため、ここでの検討では摩擦係数を一定として取り扱っている。

各ケースの最大応答値を図 - 8 にまとめて示す。まず水平荷重分散装置の剛性に着目してみると、剛性が増加（×）するにつれて支承変位量が減少し、逆に橋脚の応答は増加する傾向が見られた。摩擦係数が小さい(0.05~0.20)範囲ではその傾向が特に顕著であり、摩擦係数が0.4近くまで大きくなると支承と橋脚の応答値が剛性の変化に対してあまり感度を持たなくなることが確認された。

次に、摩擦係数に着目してみると、摩擦係数が小

さいほど支承変位量が大きくなり、橋脚の応答値が小さくなる傾向が見られた。特に摩擦係数が0.2以上の範囲では変化が大きく、逆に0.2以下の範囲では感度が小さかった。

これらの結果から、水平荷重分散装置の剛性と摩擦係数を小さくすると支承変位量が増加し、橋脚の応答値が小さくなる傾向が明らかになった。また、これら2つのパラメータの値にかかわらず、支承変位量と橋脚の応答値がトレードオフの関係にあることが確認できた。

このような傾向が見られる原因としては、水平荷重分散装置の剛性が小さくなり、摩擦係数が小さくなると、支承の変位量にもよるが一般に上部構造から橋脚に作用する慣性力が小さくなり、橋脚の応答値が小さくなっていると考えられる。水平荷重分散装置の剛性は固有振動特性に直接関係しているため、入力地震動との関係から長周期化により橋脚の応答値が低減されていることも考えられる。

(4) バイリニアモデルの適用性に関する検討

免震システムを集約してバイリニアモデルとした場合（簡易モデル）と、すべり支承と水平荷重分散装置を個別にモデル化した場合（詳細モデル）を比較した結果を図 - 9 に示す。橋軸・直角方向ともに、

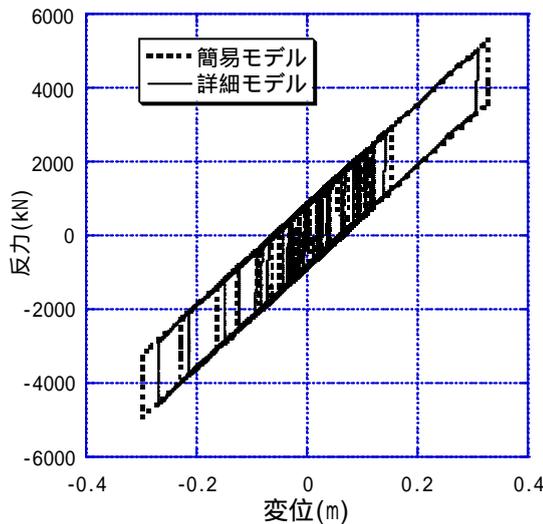


図 - 10 履歴曲線の比較(橋軸方向)

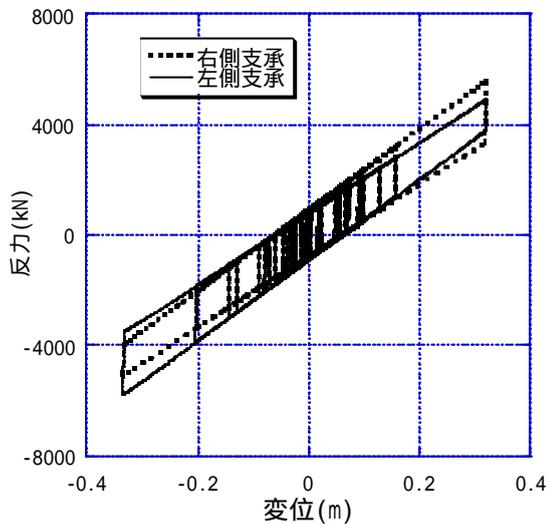


図 - 11 直角方向の履歴曲線

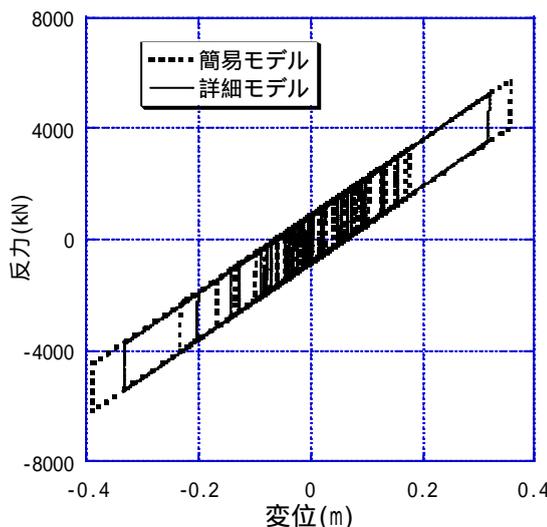


図 - 12 履歴曲線の比較(直角方向)

簡易モデルの方が詳細モデルよりも支承と橋脚の応答値が大きくなった。摩擦係数の速度・面圧依存性を無視しているため、両モデルの差は鉛直力の変動による摩擦力の変化の有無のみであり、最大応答値の差はこの影響によるものと判断できる。桁のロッキング振動に伴って鉛直力の変動が大きくなる直角方向において応答値の差が大きくなっている点も同様な理由で説明できる。

さらに、非線形応答履歴曲線についても比較を行った。橋軸方向の結果を図 - 10 に示す。同図から明らかなように、簡易モデルと詳細モデルで若干の最大応答値の違いはあるものの、ほぼ同じ挙動をしていたと判断できる。直角方向については、桁のロッキング振動に伴う鉛直力の変動が大きいため、左右の支承で応答が異なっており、図 - 11 に示すような左右非対称の履歴曲線になった。これは簡易モデルでは表現できない挙動であるが、桁全体の動きに着目するために左右の支承の応答を平均してみると、図 - 12 に示すように簡易モデルとほぼ同様の履歴曲線が得られ、同一支承線上の支承をトータルで考えると詳細モデルと簡易モデルはほぼ同じ挙動をしていたと考えられた。

以上の結果から、橋軸方向については両モデルの差の原因となる鉛直力の変動が小さいため、簡易モデルの適用に問題は無いと考えられた。直角方向については個々の支承の応答に差があるものの、トータルとしての桁の挙動は簡易モデルでもほぼ表現できており、設計への適用性は高いものと判断できた。

## 5. まとめ

以上の検討の結果得られた知見を以下にまとめる。

- 1) すべり免震支承システムを有する鋼3径間連続2主箱桁橋を対象として、すべり支承の摩擦係数が有する速度・面圧依存性を同時に考慮して動的解析を実施した。その結果、各依存性の有無が橋梁全体系の最大応答値におよぼす影響が小さいことが確認できた。したがって、すべり免震支承システムを有する本研究で対象とした形式の構造においてレベル2地震動に対する最大応答値を求める際には、すべり支承の摩擦係数の速度・面圧依存性を厳密にモデル化する必要性は低いと考えられた。
- 2) 特に速度依存特性については、一般に低速度領域(0.5m/s程度以下)での摩擦係数の変動が大きく、高速度領域では変動が小さくなることから、レベル2地震動のような大きな入力に対して最大応答値を求める場合には速度依存性を考慮する必要性は低いと判断された。
- 3) 水平荷重分散装置の剛性とすべり支承の摩擦係数を小さくすると支承変位量は増大し、橋脚塑性率は低減される傾向が確認でき、パラメータの設定

によっては橋脚の応答を降伏以下に抑えることも可能であった。これら2つのパラメータの設定により、橋梁の最大応答値を一定の範囲内で制御可能であることが確認された。

- 4) 速度・面圧依存性を考慮しなければ免震システムを簡便なバイリニアモデルで表現できると考えられたため、詳細なモデルと比較検討を行った。その結果、両者の最大応答値は若干異なるものの、支承の履歴復元力特性はほぼ再現できていることから、設計計算においてはバイリニアモデルを適用することで適切な精度の結果が得られると考えられた。

## 6. おわりに

本研究は、すべり免震支承システムを採用した連続形式の高架橋をモデルとして、すべり支承の摩擦係数が有する面圧・速度依存性を出来る限り実験結果等に忠実なモデルとして動的解析に取り込み、橋梁応答への影響と耐震設計にあたっての留意事項等に関する考察を行った。本研究で設定した限られた範囲の条件に対してではあるが、すべり免震支承システムが本来有する複雑な挙動を単純なバイリニアタイプの履歴モデルに置き換えることの妥当性が確認された。また、高速度領域におけるすべり支承の摩擦係数や履歴特性（減衰性能）の変化については、データが整備されておらず不明確な部分ではあるが、本研究での想定範囲ではその橋梁応答への影響はあまりなく、耐震設計の実施にあたっての有益な知見が得られたものと考えられる。しかし、すべり免震支承システムのより広範囲での適用性を確認するためには、各種の材料に対する高速度領域のすべり挙動の検証、入力地震動の周期・振幅特性等の影響やそれによる残留変位の発生特性の把握などにも着目するとともに、それらの様々な構造形式への適用性も含めて今後さらに研究・検討が為されていくことが望まれる。

## 謝 辞

本研究の実施にあたっては、京都大学大学院高橋良和助手、大成建設技術センター岡本晋氏、川崎重工業技術研究所玉木利裕氏との有益な議論をする機会に恵まれたことに加え、各氏からの適切で丁寧な

助言を多く頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 井上豊, 古川忠稔: 建築構造物における免震・制震技術, 土木学会 第1回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.1-4, 1996年11月
- 2) Kawamura, S. et al.: Study on a sliding-type base isolation system - System composition and element properties -, Proc. Of 9WCEE, pp.735-740, 1988.8
- 3) 岡本晋, 藤井俊二, 尾崎大輔, M.C.Constantinou, P.C.Tsopelas: すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.507 -30, pp.167-177, 1995年1月
- 4) 伊津野和行, 袴田文雄, 中村一平: 機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究, 土木学会論文集 No.654 I-52, pp.233-244, 2000年7月
- 5) 玉木利裕, 小川一志, 河東鎬, 鶴野禎史, 比志島康久: 摩擦減衰型免震装置の摩擦特性に関する実験的検討, 鋼構造年次論文報告集第7巻, pp.89-94, 1999年11月
- 6) 伊津野和行, 袴田文雄, 志村敦: 機能分離型免震支承システムのすべり摩擦特性に関する研究, 土木学会第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.729-732, 1999年7月
- 7) 建設省: 道路橋の免震設計法マニュアル(案), 財団法人 土木研究センター, 平成4年10月
- 8) 吉川実, 金治英貞, 宇野裕恵: 兵庫県南部地震により被災した既設PC高架橋の免震復旧構造, 土木学会第1回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.85-92, 1996年11月
- 9) 南雲広幸, 日紫喜剛啓, 竹田哲夫: 新しい免震工法の応答特性の確認, 土木学会 第1回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.275-282, 1996年11月
- 10) 武田寿一: 鉄筋コンクリート建物の動的計算, コンクリート・ジャーナル Vol.12, No.8, pp.33-41, 1974年8月
- 11) (社)日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 平成14年3月
- 12) 高橋良和, 家村浩和, 日比雅一: 滑り型免震支承の速度・面圧依存型数値モデルの提案, 土木学会関西支部年次大会, 2003年
- 13) 日比雅一, 高橋良和, 家村浩和: 振動台実験による滑り免震支承の速度・面圧依存型数値モデルの検証, 土木学会第58回年次学術講演会, 平成15年9月

(2003.6.30 受付)

## A PARAMETER STUDY ON SEISMICALLY ISOLATED BRIDGE WITH SLIDING TYPED BEARING SYSTEM

Ryoichi FUJITA, Atsushi MORI, Hidesada KANAJI and Kazuyuki IZUNO

In this paper, the effect of characteristics of a sliding typed seismic isolation system on earthquake response of a bridge is discussed. The system consists of sliding bearing and rubber restoring force devices, and the value of sliding coefficient of friction is strongly affected by relative sliding velocity and vertical pressure on the system. Considering these two effects simultaneously, dynamic analyses with various characteristics of the system are carried out. As the results of the study, it is clarified that effects of velocity and pressure are not sensitive to maximum response values of the bridge, and the bilinear model can simulate the dynamic behavior of the sliding typed seismic isolation system at adequate accuracy.