低摩擦型すべり支承の面圧・速度依存性検証と 床組免震構造の設計モデル構築

金治英貞¹・鈴木直人²・家村浩和³・高橋良和⁴・美濃智広⁵・高田佳彦⁶

¹正会員 阪神高速道路株式会社 大阪建設部 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16)

E-mail: kanaji@tech-center.or.jp

²正会員 (株) 建設技術研究所 大阪支社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

E-mail: n-suzuki@ctie.co.jp

³フェロー 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: iemura@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学助手 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: yos@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 (株) 建設技術研究所 大阪支社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

E-mail: mino@ctie.co.jp

⁶正会員 阪神高速道路株式会社 技術管理室 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

E-mail: yoshihiko-takada@hanshin-exp.co.jp

本論文は、長大トラス橋の地震時性能向上を目的とした床組免震構造を対象として、低摩擦型すべり支承と積層ゴムで構成された免震構造の動的特性を実験的、解析的に明らかにしたものである。ここでは、速度依存性、面圧依存性を有する低摩擦型すべり支承と積層ゴム、および上部桁から構成される試験体を用いた振動台実験を実施し、特に、実橋における主構の動特性により増幅された鉛直振動の影響に着目している。次に、低摩擦型すべり支承の特性をモデル化した1質点系モデルによる解析結果と実験結果を比較し、面圧変動を死荷重面圧との関係で無次元化し応答影響を明らかにするとともに、速度依存性が高い低摩擦型すべり支承を用いる場合の実務設計用モデルの構築を等価摩擦係数を用いて行っている。

Key Words: long-span bridge, seismic retrofit, low friction sliding bearing, shaking table test, velocity dependency, pressure dependency, hybrid floor isolation system

1. はじめに

最近の研究により、長大トラス橋のレベル2地震動に対する地震時性能向上策として、道路面である床組構造を免震化させる方法（以下、「床組免震構造」）が有効な手法であることが明らかにされている¹⁾。その装置としてはゴム支承系とすべり支承系に大きく分類できるが、ここでは、既設橋梁への適用の観点から既存支承の設置空間を考慮し、支承高の低いすべり支承を鉛直支持装置とする「すべり免震支承システム」に着目している。つまりここで対象としたのは、「すべり免震支承システム」を用いた「床組免震構造」である。システムと呼んでいるのは、免震機能を期待する装置としてのすべり免震支承（以下、「すべり支承」）の他に、復元力と周期調整、さらに場合によっては減衰付与の役割を果たす装置として水平荷重分散装置（本研究では以下、

「積層ゴム」）が用いられることによる。このすべり免震支承システムは、兵庫県南部地震以降、採用されはじめた構造であり²⁾、今では機能分離支承のひとつの形態としても整理可能である^{3),4)}。

わが国における一般橋に対するすべり支承に関する研究は、兵庫県南部地震以前から岡本らによって実施されており、従来のPTFEすべり材とステンレス鋼板の摩擦による免震機能に関して、実験的あるいは解析的成果が明らかとされている^{5),6)}。ここでは、これらの材料の摩擦係数は、面圧や速度依存性のために変動すること、一般橋を対象とした動的効果に関しては、支承変位を低減させる観点で摩擦係数は大きい方が望ましいことが示されている。また水平・鉛直同時入力に関する実験も行なわれており、鉛直最大加速度約0.4Gの範囲において鉛直動の影響は見られないとの結果が示されている。さらに、速度依存性の影響は考慮する必要がないとの結論を

図-1 トラス主構と免震対象の床組

導いている。また、同様の材料に対するすべり支承のモデル化に関して言えば、川島による研究⁷⁾をはじめとして、最近では、面圧依存性等を考慮した、高橋ら⁸⁾や姫野・運上⁹⁾による研究がある。さらに、振動台実験の逆解析による研究が中谷ら¹⁰⁾によって行われている。

米国ではAASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design¹¹⁾においてすべり免震支承の基準化が進んでおり、1991年版の発行時点からすべり免震支承の適用事例が増加している背景のもと、1999年版¹²⁾ではこの詳細内容が追加されている現状にある。この示方書には、材料から品質試験に至るまですべり免震支承の規定がなされているが、面圧依存性や速度依存性に関する記載は見当たらない。なお、FPSとよばれる摩擦面が球面の支承が開発され規定されていることも特筆できる。

今回対象としている床組免震構造は、図-1に示すような長大トラス橋の主構造中の床組のみを免震化させるものであり、これまでの橋脚に支持された上部構造を免震化させる構造とは異なっている。このため、解析結果から、トラス主構の断面力低減効果を期待する場合、既存のすべり支承より低摩擦（摩擦係数0.05程度）のすべり支承が要求され¹⁾、新材料によるすべり支承が開発された^{13),14)}。

以上の背景から、既往の研究、設計において対象とされていたPTFEすべり材とステンレス鋼板に関する知見とは異なる、新材料による低摩擦型すべり支承の摩擦特性を把握するとともに、その速度依存性や面圧依存性が、すべり支承と積層ゴムを有するシステムとしての動的挙動にどのような影響を与えるのかを評価する必要が生じた。特に今回考案された床組免震構造の鉛直振動は、主構の動特性の影響を受け、基礎位置における水平地震動により励起されるとともに、鉛直地震動により増幅される特性を有している。本研究ではその影響に着目しているこ

図-2 床組免震機構（上）とすべり免震支承（下）

とが特徴である。

具体的には、増幅された鉛直振動を考慮した振動台実験を実施した後、要素実験に基づくすべり支承の数値モデルを用いて再現解析を実施している。また、再現性が確認された詳細モデルを用いて、解析的に死荷重面圧との比率で無次元化された面圧変動の特性検討を実施した上で、実務設計を意識した簡易な設計モデルの提案を行っている。なお、ここで開発された同種の低摩擦型すべり支承を用いた、面圧変化の小さい連続桁橋の免震効果に関する研究が大塚ら¹⁵⁾によって実施されているが、ここでのすべり支承のバイリニアモデルの設定は高速載荷実験で得られた高速度時の摩擦係数に基づき行われている。これに対して、本研究では汎用性をもたせるために、設計速度との関係に基づく等価摩擦係数を用いた剛塑性型バイリニアモデル構築を目的としている。

2. 床組免震構造の振動台実験による動的特性

(1) 床組免震構造と振動台実験概要

対象橋梁の原状床組（鋼床版桁）は、荷重を支承板で支持するタイプの鋼製支承（支承板支承）により、トラス横桁上に固定あるいは可動支持された構造である。しかし、レベル2地震動に対するトラス主構の応答低減が必要となったことから、これらの支承をすべり支承に取り替える対策が採用されている¹⁾。採用されている免震構造を図-2に示す。なお、すべり支承として、平板タイプを採用している。

このシステムの特性は、すべり材の摩擦係数と水平荷重分散装置である積層ゴムの剛性に依存することはよく知られており、一般橋については種々の解

図-3 基礎位置入力地震動と振動台入力加速度の関係

析^{6),16)}が行われマニュアル⁴⁾も整備されている。しかしながら、本橋は一般橋のすべり免震と異なり、重量の大きな主構の中の一部である床組が免震化されるために、PTFE すべり材とステンレス鋼板の摩擦係数とは異なる低摩擦型のすべり支承が必要となった。これまでこのような支承は、わが国の橋梁に採用されたことはなく新たに開発するに至った。このため、その動特性である速度依存性、面圧依存性に着目し、設計照査用入力地震動を用いて求められた床組位置での鉛直振動を考慮した振動台実験により、すべり支承と積層ゴムを併設したすべり免震支承システムとしての性能を検討することとした。

具体的な検討事項は、入力地震動の違いによる応答値の比較、免震効果、鉛直振動の影響、速度・面圧依存性である。

試験体の詳細は後述するが、対象橋梁中の複数ある床組のひとつである 4 径間連続鋼床版 I 桁を抽出し、トラス主構の横桁より上の部分のみの動的挙動に着目している。つまり、振動台実験における振動台はトラス主構の横桁に相当し、これに支持されたすべり支承および積層ゴムと床組を模擬する試験桁により実験を行う。ここで、振動台に入力すべき加速度は、基礎位置における入力地震波形とは異なり、これを用いて 3 次元全橋モデルにより解析して得られたトラス中央部の横桁位置での応答加速度である(図-3参照)。なお、支承モデルは概略設計時の諸元を用いた等価線形モデルを用いている。中央部の

表-1 振動台試験機諸元

最大載荷荷重	150kN (15tf)
振動台	3 軸 6 自由度の振動台 5.0m×3.0m
最大変位	X 方向 ±300mm, Y 方向 ±250mm, Z 方向 ±200mm
最大速度	X, Y, Z 方向 150kine
最大加速度	X, Y, Z 方向 ±1.0G
周波数	0.1~50Hz(上載荷重 15tf の場合)

図-4 振動台試験機構造

表-2 実橋と試験体の相似則

対象	試験体/実橋	対象	試験体/実橋
長さ, 変位	$1/\lambda$	加速度	1
面圧	1	速度	$1/\sqrt{\lambda}$
時間	$1/\sqrt{\lambda}$	周期	$1/\sqrt{\lambda}$
質量	$1/\lambda^2$	慣性力	$1/\lambda^2$
剛性	$1/\lambda$		

床組を対象とした理由は、鉛直振動の振幅が相対的に大きいことによる。

(2) 試験機と試験体

a) 試験機

本実験では3次元入力地震動を再現可能とする京都大学防災研究所に設置されている振動台試験機を用いた。その諸元は表-1、構造は図-4の通りである。

b) 試験体

本実験は面圧・速度変化によるすべり免震支承システムの影響について検討するものである。実験では支承部のすべり現象を十分な精度で再現させることが重要であることから、桁の慣性力とすべり支承の摩擦力の比を実橋と実験モデルで一致させるために、加速度の相似比を1.0とする。加速度の条件に加えて、すべり支承の面圧比を1.0として、長さの比 $1/\lambda$ の条件を考慮すると、相似則¹⁷⁾は表-2のようになり、これに従い算出した試験体諸元は表-3の通りである。

試験体設置状況と支承配置状況を図-5に示すが、

表-3 実橋と試験体の諸元 (相似率 $\lambda=8.75$)

	実橋	試験体
上部構造重量	7,500kN	98kN
上部構造固有周期	3.00秒	1.01秒
積層ゴム剛性	1.068kN/mm	0.122kN/mm
すべり支承面圧	19.5N/mm ²	19.5N/mm ²
平均摩擦係数	約0.05	約0.05

a) 試験体全景

b) 免震支承システム詳細

図-5 試験体設置状況

すべり支承は試験桁の四隅に各1個の合計4個、また、積層ゴムは試験桁の短辺中央に各1個、合計2個設置している。なお、本実験では面圧・速度変化による摩擦係数の変化について計測する必要があることから、各々のすべり支承下面に3分力計を設置した。

c) すべり免震支承と積層ゴム

すべり支承試験体を図-6に示す。すべり支承試験体は、実験における所定の変位量を考慮して構造寸法を決定し、すべり材径は面圧の相似則を満足するために40mmとした。材料の組み合わせは低摩擦係数を実現するため、基本性能試験結果から、すべり材に繊維強化熱硬化樹脂、上沓すべり板にフッ素樹脂コーティングを施したステンレス鋼板を用いた。積層ゴム試験体を図-7に示す。ゴム試験体は、実験において必要とされる復元性能、つまり積層ゴム剛性より構造寸法を決定した。

(3) 実験方法

対象橋梁においては、当該地域における複数の想

単位：mm

図-6 すべり免震支承とすべり材 (右下)

単位：mm

図-7 積層ゴム

表-4 実験ケース

実験ケース	対象入力地震動 (基礎位置加速度)	桁位置最大加速度 (振動台最大加速度)
T1	内陸型 I 波 (水平のみ)	水平 6.54m/s ² 鉛直 3.10 m/s ²
T2	内陸型 I 波 (水平+鉛直)	水平 6.83 m/s ² 鉛直 5.75 m/s ²
T3	内陸型 II 波 (水平のみ)	水平 3.28 m/s ² 鉛直 1.50 m/s ²
T4	内陸型 IV 波 (水平のみ)	水平 4.49 m/s ² 鉛直 2.00 m/s ²
T5	海溝型 (水平のみ)	水平 1.70 m/s ² 鉛直 1.02 m/s ²

定地震動を用いた設計が実施されている¹⁾。そこで、これらの地震波である内陸型I波、II波、IV波および海溝型地震波を3次元全橋モデルに入力して解析し、対象とした床組位置での応答加速度を算出した。そして、得られた応答加速度を振動台に入力した。なお、実橋における床組免震構造は、橋軸方向のみ可動で、橋軸直角方向には低摩擦材を貼付したストッパーで変位拘束する構造であることから、水平方向に関しては1方向载荷としている。

実験ケースを表-4に示す。ここで、対象橋梁基礎位置での入力地震動としては、ケース T2 を除き、水平成分のみの入力であるが、振動台入力において

a) 水平加速度

b) 鉛直加速度

図-8 実験ケース T1 の振動台加速度

a) 水平加速度

b) 鉛直加速度

図-9 実験ケース T2 の振動台加速度

は、橋梁全体系における動的特性により水平+鉛直成分入力となる。ケース T1 と T2 の振動台加速度を図-8、図-9に示す。ケース T2 は図-3b)に示すように入力地震動も鉛直成分を入力しており、振動台入力は当然ながら水平+鉛直成分であり、鉛直成分はケース T1 に比べて大きな値となっている。

(4) 実験結果

a) 主要値の比較

各実験ケースにおける桁およびすべり支承の最大応答値を表-5に示す。

桁相対変位は、内陸型 I 波を入力したケース T1 において 81.7mm と最大値を示しており、ケース T3 (内陸型 II 波)、およびケース T4 (内陸型 IV 波) においては、比較的小きな値となっている。桁相対速度および桁相対加速度も桁相対変位と同様に

表-5 実験における桁およびすべり支承の最大応答値

実験ケース	桁相対変位 (mm)	桁相対速度 (m/s)	桁相対加速度 (m/s^2)	摩擦力 (kN)
T1	81.7	0.668	3.65	12.0
T2	58.5	0.533	2.75	11.3
T3	15.7	0.169	1.58	11.1
T4	10.3	0.221	1.36	12.0
T5	4.30	0.068	1.15	11.0

a) ケース T1

b) ケース T3

図-10 すべり支承 (4 個分) の履歴曲線の比較

ケース T1 が最大値を示している。3 分力計で測定したすべり支承の摩擦力は多少ばらつきがみられるものの、ほぼ 11kN~12kN と一定値を示しており、いずれのケースにおいてもすべりが発生していることを示すものである。

すべり支承 4 個の合計の履歴曲線を図-10に、支承部の履歴面積および等価減衰定数を表-6および表-7に示す。ここで、積層ゴムの反力は直接計測ができないことから、桁慣性力と桁相対変位から求めた全体系の履歴曲線と 3 分力計によるすべり支承の履歴曲線を用い、この差分を解析することにより推定した。

この結果より、桁応答と同様に、全体系、すべり支承、および積層ゴム履歴面積いずれもケース T1

表-6 実験における支承部履歴面積

実験ケース	履歴面積(kN・mm)		
	全体系	すべり支承	積層ゴム
T1	2,089 (100%)	1,370 (66%)	719 (34%)
T2	1,549 (100%)	1,174 (76%)	375 (24%)
T3	330 (100%)	324 (98%)	6 (2%)
T4	353 (100%)	343 (97%)	10 (3%)
T5	155 (100%)	156 (100%)	0 (0%)

() 値は比率を示す

表-7 実験における支承部等価減衰定数

実験ケース	等価減衰定数	
	すべり支承	積層ゴム
T1	25%	4.7%
T2	32%	4.9%
T3	42%	1.3%
T4	48%	2.7%
T5	60%	0%*

*本値は計測誤差により僅かにマイナス値を示したが 0%と表示とした。

が最大となった．ところで積層ゴムには設計上減衰を考慮しないのが一般的であるが，履歴面積はケース T1 において 34%と大きな比率を占めており，全体系履歴面積が小さくなるほどその比率は小さなものとなっている．これは，変位の増加に伴い減衰が増加する積層ゴムの特性による．ケース T3（内陸型 II 波），ケース T4（内陸型 IV 波），ケース T5（海溝型）においては無視しえる値である．また，等価減衰定数に関しては，ケース T1 および T2 において，すべり支承の値が小さな値となっている．この原因は，すべり支承の速度依存性によるものである．つまり，ケース T1 や T2 においては桁相対速度が大きくなっており，図-10a)に示すようにすべり支承の履歴曲線が，他のケースに見られる剛塑性形と異なり鼓形になっていることに起因している．

b) 免震効果

ケース T1 を例にとり，加速度を指標とした免震効果を考察する．図-11は，横軸を振動台加速度，縦軸を桁応答加速度とした 0.005 秒ごとの各関係である．なお，履歴曲線の折り返し点（すべり支承の摩擦力の符号が反転する範囲）付近のデータは，計測上の問題を含むため除去している．この図において斜めの破線は両指標が同一値を示す線であることから，これより下方にあれば免震効果が発揮されて

図-11 免震効果（ケース T1）

いることになる．

振動台加速度が 2m/s^2 以上の領域においては免震効果が出始め，特に振動台の最大加速度近くなると，桁応答加速度は十分に小さくなり免震効果は大きくなることがわかる．しかしながら， 2m/s^2 以下においては桁応答が増幅されているプロットがある．特に，増幅率が高い時刻は 4 秒前後であることがわっている．この時間帯に着目すると，桁変位の周期は約 1 秒と試験体上部構造の固有周期に近いことから，同調したことが原因と考えられる．これ以外の時間帯では，必ずしも桁変位の周期は 1 秒前後となっておらず同調だけが原因であるとは言い切れない．ただし，その大きさは振動台最大加速度に比較して小さいことから構造安全上の問題は小さいものと考えられる．

c) 鉛直地震動の影響

ここでは，最大の応答を示すケース T1 とこれに基礎鉛直地震動の影響を加味するケース T2 の比較を行うものとする．図-12は，ケース T1 および T2 における桁相対変位，すべり支承摩擦力，面圧，および履歴曲線を比較したものである．時刻歴応答は，両ケースの影響を明瞭にするために 10 秒までのデータを抽出している．図-8，図-9に示すように，振動台の水平加速度はほぼ等しく，鉛直加速度は，4 秒付近において，ケース T2 がケース T1 の 2 倍程度の加速度を有している．

桁相対変位の最大値は，ケース T1 で 81.7mm，ケース T2 で 58.5mm となっており，摩擦力の時刻歴応答は同様の傾向を示している．次にすべり支承の面圧を比較する．図から明らかなように，ケース T1 と T2 で大きな面圧の差が認められ，鉛直地震動の影響が大きいことがわかる．なお，4 個の支承の面圧はほぼ同一であることを確認している．

図-12 ケース T1 および T2 における応答比較

さらに、前述の免震効果をケース T2 について図-13に示す。この図からも 2m/s^2 以上の領域においては T1 と同様の免震効果が得られており、鉛直加速度の大きさの違いは見られない。ただし、 2m/s^2 以下の領域においては増幅影響がやや T1 に比べると低下している。これは、前述の免震効果で述べた同調現象に起因する、ケース T1 と T2 の 2m/s^2 以下の振動台水平加速度の入力誤差が主として影響したものであると考えられる。

図-13 免震効果 (ケース T2)

図-14 摩擦係数の速度依存性比較

なお、鉛直加速度の影響については、これらの実験結果から定量的な評価を行うことは困難であることから、後述の解析でこれらの結果を検証する。

d) 速度・面圧依存性

ケース T1 と T2 の 0.005 秒間隔での各すべり速度と摩擦係数の関係を図-14に示す。この図より、 $0 \sim 0.1\text{m/s}$ の範囲では $\mu=0 \sim 0.13$ 程度となり、 0.5m/s を超えると $\mu=0.03 \sim 0.04$ に漸近することがわかる。この速度依存性は、従来の PTFE すべり材とステンレス鋼板の組み合わせによるすべり支承の特性、つまり、すべり速度が増加すると摩擦係数が増加し $0.1 \sim 0.15$ に漸近する傾向と大きく異なっている。また、図上データは 0.005 秒間隔のデータであることから、摩擦係数のばらつきは大きく表現されているが、平均的な摩擦係数による設計可能性は後述する。

ケース T1 と T2 を比較すると、同様の速度依存性が見られるが、すべり速度 $0.1 \sim 0.2\text{m/s}$ においては T2 の方がやや大きな値を示している。これは、このすべり速度域において面圧が低かったものと想定される。これを明らかにするために、面圧と摩擦

図-15 摩擦係数の面圧依存性

図-16 振動台実験結果から求めた面圧分布

図-17 振動台実験結果から求めたすべり速度分布

係数の関係を調べた（図-15参照）。この図より明らかなように摩擦係数が 0.1 以上であるデータにおいて、面圧 10kN/mm² 以下は、ケース T2 のものが支配的となっており、上記の推定に一致するものである。さらに、面圧およびすべり速度の変動を確認するために、確率密度を求めた。その結果は、図-16、図-17に示すとおりである。面圧に関しては、ケース T1 と T2 とともに死荷重時面圧 19.5N/mm² の値を中心とした分布を示しているが、鉛直加速度の大きい T2 の変動幅の方が大きいことがこの図からも明らかである。すべり速度の変動に関しては、

図-18 1自由度系モデル

図-19 積層ゴムの特性

T1, T2 とともにほぼ同様であるが、T1 の方がやや大きい最大速度を示している。

3. 振動台実験の解析的検証と設計モデル構築

(1) 解析モデルと入力加速度

振動台実験を図-18のような1自由度系にモデル化し、実験結果の再現解析を実施するとともに、設計モデル構築を行った。

具体的には、図のモデルに、実験における振動台の加速度波形を入力し、桁の応答および床組免震系（すべり支承、積層ゴム）の履歴特性を比較する。各要素のモデル化は下記のとおりである。

a) 積層ゴムモデル

積層ゴムモデルを評価するに際して、振動台実験結果より、次式により積層ゴムに作用している反力を逆算した。

$$F_r = M_g \cdot A_g - F_s \quad (1)$$

ここで、 M_g ：桁質量、 A_g ：桁加速度、 F_s ：すべり支承摩擦力、 F_r ：積層ゴム反力である。

上記の結果により求めた実験ケース T1 と T2 の反力・変位関係を図-19に示す。ケース T3, T4 お

図-20 要素実験によるすべり速度-摩擦係数の関係

図-21 摩擦係数のすべり速度・面圧依存性

図-22 摩擦力のすべり速度・面圧依存性

よび T5 の等価剛性も各々、同様の値を示したことから、積層ゴム等価剛性として、5 ケース平均値の $K=0.17\text{kN/mm}$ を以降採用することとした。

積層ゴムの減衰については、粘性減衰にてモデル化した。減衰定数としては、実験ケース T1 の等価減衰定数 4.7% を参考に 5% を設定した他、一般的な値である 2% も比較の意味で設定した。

b) すべり支承モデル

別途実施されたすべり支承要素実験結果から、すべり支承に発生する速度 - 摩擦係数の関係を求めた結果を図-20に示す。

ここでは、高橋らの研究⁸⁾を参考に、要素実験結果から求めた速度 - 面圧 - 摩擦係数の関係より、最小 2 乗法による近似曲線を設定し、速度 - 面圧依存モデルを式(2)のとおり構築した。なお、第 1 項目は速度依存性に関する部分で、速度が増すにつれ摩擦係数が減少する特性を表現し、第 2 項目は面圧に関する部分で面圧が高いほど摩擦係数が減少する特性を表している。

$$\mu = [s_{\min} + s_0 \cdot \exp(-n \cdot v)] \frac{[1 - \exp(-k \cdot p)]}{p} \quad (2)$$

ここで、 v : すべり速度(m/s)、 p : 面圧(N/mm^2)、 s_0 : 静摩擦係数に対応するせん断強さに関するパラメータ、 $s_{\min}$: 動摩擦係数最小値に対応するせん断強さのパラメータ、 n : 速度依存のパラメータ、 k : 面圧依存のパラメータである。

図-21は、式(2)を用いて、面圧とすべり速度を変化させた低摩擦型すべり支承の摩擦係数特性を表している。この図から、面圧が上昇すれば摩擦係数は低下し、すべり速度が上昇すれば摩擦係数が低下する特性が連続的に表現されていることがわかる。

また、面圧は上記の摩擦係数の変動要因であるとともに、鉛直力の変動要因であることを踏まえ、直接、摩擦力特性を把握するために、面圧-速度-摩擦係数関係を図-22に示す。なお、摩擦係数算定に必要な諸元は試験体に合わせている。この図から、 20N/mm^2 程度までは面圧が増加するにつれ摩擦係数が増加するが、それ以降においては摩擦係数の低下の影響が大きくなり、いずれのすべり速度においても摩擦係数は頭打ち傾向を示すことがわかる。

(2) 再現解析

式(2)により設定した速度 - 面圧依存性のモデルの妥当性を検証するために、代表的な実験ケースの再現解析を行った。すべり速度、面圧については実験結果を用いている。検討ケースは、表-8の A1～A8 である。A1～A3 は T1, A4, A5 は T2, A7 は T3, A8 は T4 の再現解析である。なお、A6 は T2 の鉛直加速度を 2 倍にした仮想ケースである。主要な応答値は表-9～表-11に示すとおりである。

表-8 解析ケース一覧

目的	解析ケース	再現ケース	すべり支承モデル	積層ゴムモデル	
				剛性(kN/mm)	減衰定数
再現解析	A1	T1	速度一面圧依存モデル	0.170	2.0%
	A2		速度一面圧依存モデル	0.170	5.0%
	A3		速度依存モデル	0.170	5.0%
	A4	T2	速度一面圧依存モデル	0.170	5.0%
	A5		速度依存モデル	0.170	5.0%
	A6	T2'	速度一面圧依存モデル	0.170	5.0%
	A7	T3	速度一面圧依存モデル	0.170	5.0%
	A8	T4	速度一面圧依存モデル	0.170	5.0%

注) A6はT2の鉛直加速度を2倍にしたケース

表-9 桁相対変位, すべり支承摩擦力の最大応答値比較

解析ケース	解析		実験	
	桁相対変位(mm)	摩擦力(kN)	桁相対変位(mm)	摩擦力(kN)
A1	89.8	8.7	81.7	12.0
A2	82.0	8.7		
A3	79.2	8.1		
A4	60.6	9.1	58.5	11.3
A5	59.6	7.8		
A6	66.7	9.8		
A7	17.8	8.2	15.7	11.1
A8	11.6	8.4	10.3	12.0

積層ゴムの減衰に着目すると, ケース A1 ($h=2\%$) と A2 ($h=5\%$) の比較において, 後者の方が, 解析値と実験値はいずれの応答も良好な一致をみている. これは, 解析対象としている実験ケース T1 の積層ゴム等価減衰定数が約 5%であったことと整合している. この結果をもとに A3 以降のケースの積層ゴム減衰定数を 5%と設定している.

次に, 代表的なケースとして, 図-23にケース A2 の桁相対変位, 摩擦力の時刻歴応答, およびすべり支承の履歴曲線を各実験値と比較する. 全体的に, いずれも実験値をよく再現していることがわかるが, 摩擦力の時刻歴の振動初期 (1~2 秒前後) において実験値の方が大きくなる傾向がみられる. 表-9における摩擦力の相違は, このように初ループの摩擦係数が高くなるすべり回数依存性によるものと判断される. また, すべり支承の履歴曲線から変

表-10 支承部履歴面積比較

解析ケース	解析(kN・mm)		実験(kN・mm)	
	全体系	すべり支承	全体系	すべり支承
A1	1610	1014	2,089	1,370
A2	1767	942		
A3	1773	1005		
A4	1395	890	1,549	1,174
A5	1317	834		
A6	1537	944		
A7	443	407	330	324
A8	269	234	353	343

表-11 支承部等価減衰定数比較

解析ケース	解析		実験	
	全体系	すべり支承	全体系	すべり支承
A1	9%	21%	11%	25%
A2	10%	22%		
A3	11%	26%		
A4	14%	26%	17%	32%
A5	13%	29%		
A6	14%	23%		
A7	36%	52%	32%	42%
A8	32%	40%	44%	48%

位 0 付近で摩擦力が最小となる鼓形の特性が見られ, 低摩擦型すべり支承の特性が良く表現されていることがわかる. なお, 実験ケース T3, T4 に相当する地震動に対しても同様のモデルを用いてその再現性を検討した結果, 非常に小さな応答ながら解析値と実験値はほぼ同じ値を示していることを確認した.

表-9に示される桁相対変位に着目して面圧依存性について考察する. 面圧変動の小さな実験ケース T1 の再現解析における, 面圧依存性考慮モデル (解析ケース A2) と面圧依存性無視モデル (解析ケース A3) の差異は 82mm と 79.2mm と小さく, 面圧依存性考慮の影響は小さいと判断される.

次に面圧変動の大きな実験ケース T2 の再現解析ケースである A4, A5 および面圧変動を 2 倍とした A6 を比較すると, 各値は, 60.6mm, 59.6mm, 66.7mm となっている. つまり, 実験レベルの鉛直加速度であれば面圧変動の影響は小さいが, その 2 倍程度の鉛直加速度を与えると面圧変動の増加に伴い桁相対変位が若干増加する傾向が見られる.

ところで, 面圧変動による最大応答変位は, 面圧変動の大きさとともに水平振動と鉛直振動の位相にも関係すると考えられる. そこで, 面圧変動および位相差をパラメータとして, 桁の最大応答変位の変化を検討した.

図-23 ケース A2 (速度-面圧依存モデル) による再現性

図-24 模擬地震波による鉛直加速度

図-25 無次元化した面圧変動と桁最大変位の関係

ここで、面圧変動の大きさは鉛直振動による面圧振幅と死荷重時面圧の比率により無次元化した。水平、鉛直加速度の位相差については、鉛直入力加速度と桁の水平応答加速度波形との相互相関係数をパラメータとして検討を行った。相互相関係数が 1.0 の波形としては、桁の水平応答加速度波形を、相互相関係数 0 の波形としては、ホワイトノイズを設定した(図-24)。また、相互相関係数=0.8 の波形は、両者を時間領域で加算した上で最大加速度を適合させることにより作成した。

これらの振幅調整された波形による解析結果を図-25に示す。この図から、対死荷重比が 0.5 程度であれば、いずれのケースも桁の最大変位比(面圧変動が無い場合の桁最大変位に対する比率)はほぼ 1.0 であり影響は少ないが、対死荷重比が 1.0 程度となると桁最大変位比は最大 1.1 を上回り、やや影響が見られることがわかる。

位相特性に着目すると、相互相関係数 1.0 の場合には、桁最大応答比に与える影響が比較的大きく、鉛直振動と水平振動が無相関の場合には影響が小さい結果となっている。なお、実験ケース T2 を再現した解析ケース A4 の場合、桁の水平応答加速度と鉛直加速度の相関係数は 0.24 程度、対死荷重比は 0.63 であり、上記の解析結果と整合していることが確認できる。

(3) 設計モデル構築

実務設計、特に複雑な長大橋の設計においては、すべり支承の履歴モデルを簡便なものとするのが望ましい。そこで、速度依存性が動的挙動へ与える影響を確認するために、実験結果と速度依存性を考慮しない剛塑性モデルによる解析結果との比較を実施した。なお、面圧依存性については、前述の解析結果に基づき考慮しない。

図-26 等価摩擦係数 (μ_{eq})

図-27 剛塑性モデル ($\mu=0.033$)

解析モデルとしては、2 ケースを設定した。一つは、最大すべり速度時の摩擦係数に着目したモデルで、式(2)に振動台実験時の最大すべり速度 $v=0.70\text{m/s}$ を考慮した摩擦係数 $\mu=0.033$ に対応する摩擦力を塑性値とする剛塑性モデルである。もう一つは、式(2)より得られる速度-摩擦係数曲線の等価面積により得られる等価摩擦係数に着目して、 μ_{eq}

図-28 剛塑性モデル ($\mu_{eq}=0.051$)

$=0.051$ に対応する摩擦力を塑性値とする剛塑性モデルである (図-26参照)。

剛塑性モデル $\mu=0.033$ の結果を図-27、 $\mu_{eq}=0.051$ の結果を図-28 に示す。桁相対変位、支承摩擦力、および履歴曲線とともに、後者の等価摩擦係数モデルの適合性が高いことがわかる。これは、結果的に後者のモデルがすべり支承の最大履歴曲線に着目して、この履歴を等価な矩形モデルに置き換えたことによるためである。

つまり、最大履歴曲線におけるすべり速度は、ゼロから最大すべり速度の間で分布しており、これを平均化したモデル設定の考え方が妥当であることを示すものである。

以上の結果から、速度依存性曲線において設計で想定される最大すべり速度における等価面積を与える等価摩擦係数に対応する摩擦力を塑性値とした剛塑性モデルを便宜上、設計に用いて良いことが示された。なお、最大すべり速度を求める際に支承モデルが必要になり、実設計においては繰り返しによる収束計算が必要になる場合がある。

4. 結論

長大トラス橋に採用されている床組免震構造において新たに開発された低摩擦型すべり免震支承と積層ゴムからなるシステムの振動台実験および解析的検証を実施した。ここでは、特に、本構造の特徴であるトラス主構により増幅された鉛直振動による影響に着目した。本検討により得られた結論は以下のとおりである。

1. これまで明らかとされていなかった積層ゴムを併設したシステムにおける低摩擦型すべり支承の速度および面圧依存性を明らかにするとともに、すべり速度の速いケースにおける履歴曲線が鼓形を呈することを確認した。
2. 低摩擦型すべり支承に関して、面圧および速度依存性を考慮した数式モデルを構築し、振動台実験結果と比較した結果、桁相対変位、摩擦力、履歴曲線において比較的良好な適合性が見られ、解析モデルの妥当性が示された。
3. 妥当性の認められたモデルを用いて、鉛直振動の影響を検討したが、設計地震動レベルでは影響はほとんどないことが確認された。しかし、鉛直面圧変動と死荷重時面圧の比率が0.5を上回ると桁相対変位増大の傾向が見られることがわかった。
4. 静止時から設計最大すべり速度における、すべり速度-摩擦係数曲線の面積と等価な面積を与える摩擦係数を等価摩擦係数とすることを提案し、この摩擦力を塑性値とした剛塑性モデルを設計に用いて良いことを示した。

謝辞：本実験については、阪神高速道路株式会社技術審議会耐震設計分科会（主査：高田至郎神戸大学教授）の委員にご審議していただき貴重なご意見を頂いた。低摩擦型すべり支承の開発および試験データ提供に際してはオイレス工業（株）の関係者に、また、実験試験体設計に際しては、港大橋耐震補強工事 JV 東谷修氏、大濱浩二氏にご協力頂いた。また、解析においては中央復建コンサルタンツ（株）中谷武弘氏に貴重なご意見を頂いた。ここに皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 金治英貞，鈴木直人，香川敬生，渡邊英一：長大トラス橋の対震性能向上化における設計入力地震動と損傷制御構造，土木学会論文集，No.787/I-71, pp.1-19, 2005.4.

- 2) 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，1996.11.
- 3) 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, 2000.7.
- 4) 阪神高速道路公団：すべり免震支承システム設計手引き，2003.5.
- 5) 岡本晋，藤井俊二，尾崎大輔，Constantinou, M.C., Tsopelas, P.C.：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/I-30, pp.167-177, 1995.1.
- 6) 岡本晋，深沢泰晴，藤井俊二，尾崎大輔：すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.191-200, 1995.4.
- 7) 川島一彦：動的解析における摩擦力のモデル化に関する一考察，土木学会論文集，No.309, pp.151-154, 1981.
- 8) 高橋良和，日比雅一，家村浩和：各種依存性を考慮した滑り型免震支承の数値モデルに関する一考察，土木学会応用力学論文集，Vol.8, pp.701-708, 2005.8.
- 9) 姫野岳彦，運上茂樹：支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討，土木学会地震工学論文集，Vol.27, 2003.12.
- 10) 中谷武弘，廣瀬彰則，高橋良和，家村浩和：すべり摩擦支承の振動台実験に関する解析的検証，第 8 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，2005.2.
- 11) AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 2nd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1999.
- 12) 金治英貞：米国カリフォルニア州の長大橋の耐震補強と日米設計法の比較，第 5 回 橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会テキスト，土木学会 地震工学委員会 地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会，2002.10.
- 13) 高田佳彦，浜田信彦，金治英貞：長大ゲルバートラス橋の床組免震化における低摩擦係数型すべり支承の特性検討，第 25 回日本道路会議論文集，2003.11.
- 14) 宮崎充，金治英貞，高田佳彦，東谷修，荒水照夫：長大トラス橋の床組免震構造におけるすべり免震支承の設計と性能，第 8 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，2005.2.
- 15) 大塚久哲，田中弘紀，横川英彰，金山亨，清水晋作，

- 夏青：低摩擦すべり支承を有する連続桁橋の耐震性に関する一考察，土木学会構造工学論文集，Vol.51A，2005.3.
- 16) 藤田亮一，森敦，金治英貞，伊津野和行：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，土木学会地震工学論文集，Vol.27，2003.12.
- 17) Krawinkler, H. and Moncarz, P.D. : “ Similitude requirements for dynamic models” , Dynamic Modeling of Concrete Structures SP 73-1, Am. Concr. Inst., pp.1-22, 1982.
- (2006.1.5 受付)

SHAKING TABLE TEST AND ANALYTICAL STUDY ON LOW FRICTION SLIDING BEARINGS FOR FLOOR DECK ISOLATION SYSTEM

Hidesada KANAJI, Naoto SUZUKI, Hirokazu IEMURA, Yoshikazu TAKAHASHI,
Tomohiro MINO and Yoshihiko TAKADA

Properties for low-friction bearings, which have been developed for the floor isolation system of a long-span truss bridge, have not revealed. Therefore shaking table tests and analytical studies considering amplified vertical acceleration by main structure as well as horizontal acceleration have been carried out. The results show that the friction coefficient under the high speed is smaller than that under the low speed, and the effect of vertical input can be neglected under the design ground motion. In addition, a simplified design model is here proposed. It is rigid-plastic model applying the equivalent coefficient concept considering the velocity-friction coefficient curve below the design maximum velocity.