

反重力すべり支承の動的挙動の 振動台実験による検討

五十嵐 晃¹・森本 慎二²・加地 淳志³・樋口 匡輝³・
足立 幸郎⁴・河内山 修⁵・佐藤 知明⁶

¹京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

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

²東日本旅客鉄道(株) (〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-2-2)

³京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 大学院生 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kaji@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp, higuchi@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴阪神高速技術(株) (〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7)

E-mail: yukio-adachi@hex-eng.co.jp

⁵オイレス工業(株) (〒326-0327 足利市羽刈町1000)

E-mail: kouchiyama@oiles.co.jp

⁶JIPテクノサイエンス(株) (〒532-0011 大阪市淀川区西中島2-12-11)

E-mail: tomoaki_sato@cm.jip-ts.co.jp

多径間連続桁の地震時性能の向上策の一つとして反重力すべり支承またはUPSSと称される支承が提案されている。UPSSの動的応答に伴い生じる衝撃力や動的応答を明らかにするため、UPSSを取り付けた桁フレーム模型の振動台実験を実施した。振動台実験より、衝撃力は衝突速度とほぼ比例の関係にあること、衝撃力が生じるような場合においてもすべりによる水平荷重／鉛直荷重の関係が成立すること、また平面すべり支承と比較して動的応答変位が低減する効果があることを示す結果が得られた。得られた計測データに基づいて考察した簡易な力学モデルを検討し、UPSSに特徴的な衝撃力などの動的挙動を表現できることと、ある程度の衝撃力の推定が可能であることを確認した。

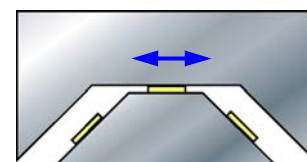
Key Words : *Uplifting slide shoe, shaking table test, seismic isolation, impact load*

1. はじめに

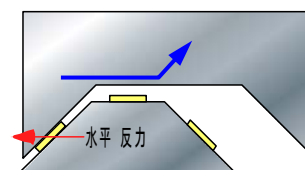
近年、走行性の向上・騒音問題の解消・維持管理コストの低減等を目的として、多径間連続橋が多数採用されている。その際に必要とされる橋桁の温度伸縮の吸収の機能を前提とした構造として、弾性支承や免震支承を利用した水平力分散構造がしばしば採用されているが、地震時の水平応答変位が大きくなるため伸縮装置のコストや維持管理の面で不利となる。この課題を解消する方策の1つとして、図1に示すように常時摺動部を水平面とし、その両端に直線勾配面を設けた構造を持つすべり支承¹⁾が提案されている。このタイプの支承は「反重力すべり支承」「UPSS」などと呼ばれるが、本稿では以下、このタイプの支承をUPSS (UPLifting Slide Shoe) と呼ぶこととする。

常時には上沓と下沓は水平面部で接触し、橋桁の温度収縮は水平面部でのすべりに対応する。一方、

地震時には上沓が下沓の斜面部に乗り上げ、水平反力を生じるとともに、地震応答を鉛直変位（位置エネルギー）に変換する事により、水平変位応答の抑



(a) 常時（温度伸縮）



(b) 地震時

図1 UPSS の概念

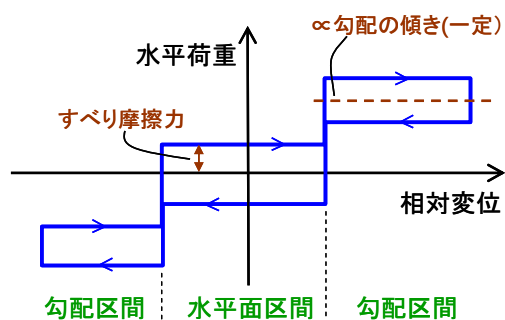
制が期待される。勾配面が水平面となす角を勾配角度、中心から勾配面に衝突するまでの長さを遊間と呼ぶものとする。

UPSSの動的挙動を検討するため、UPSSを有する橋梁上部工モデルを用いて実施した振動台実験について報告する。さらに、本実験の計測データに基づく解析モデルの検討について述べる。

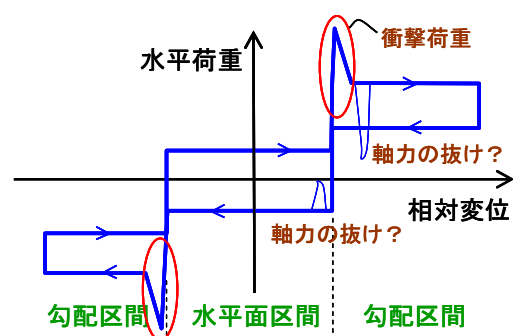
2. 振動台実験

(1) 実験目的

UPSSの予測される反力特性を図2に示す。静的載荷状態においては、水平面区間では摩擦力が、勾配区間では摩擦力に加えて勾配による水平反力（一定値）が作用すると考えられる。しかし、実際の地震時のような動的載荷状態においては、水平面と勾配面との間の移行の際の衝撃力、あるいは軸力変動など、動的現象に伴う挙動の影響が考えられる。そこで本実験では、UPSSを有する橋梁上部工モデルを用いた振動台実験により、UPSSの動的反力特性を調査するとともに、橋梁上部工の応答特性、特に変位低減効果について検討する。



(a) 静的反力特性



(b) 動的反力特性

図2 UPSSの反力特性

(2) 実験概要

UPSS供試体の構造の例を図3に示す。質量10tの鋼フレーム桁模型をUPSSおよび積層ゴム支承それぞれ2ヶにより支持する形で振動台上に設置した。設置図を図4に示す。振動台は京都大学防災研究所

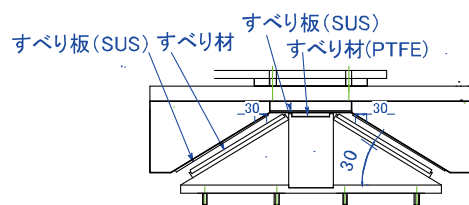


図3 UPSS 供試体の構造 (斜め勾配 30 度)

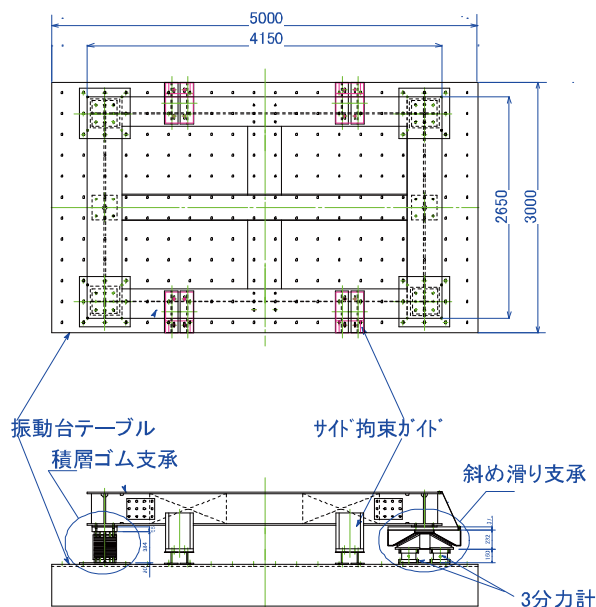


図4 振動台および試験体の設置状況



写真1 UPSS 供試体と 3 分力計

表-1 実験に用いたUPSSおよびすべり支承

種別	斜め勾配 θ	遊間	すべり材寸法	面圧
平面すべり支承	—	—	35mm×35mm	20.4 MPa
UPSS	30度	±42mm	30mm×30mm	27.7 MPa
		±30mm	30mm×60mm	13.9 MPa
	15度	±42mm	30mm×30mm	27.7 MPa
		±42mm	30mm×60mm	13.9 MPa

にあるテーブル寸法5m×3mの3次元大型振動台であり、水平1方向加振（図3左右方向）を行った。積層ゴム支承の剛性は、系の固有周期が1.25sとなるように設定されている。

UPSSを用いた実験との比較対照のため、平面すべり支承の実験もあわせて実施した。実験に用いたUPSSおよび平面すべり支承の一覧を表1に示す。いずれもすべり板にはSUS、すべり材にはPTFEを用いた。

(3) 計測項目

実験に際しての計測項目は、以下の通りである。

- ・3分力計：すべり支承の荷重を3成分
- ・レーザー変位計：振動台の水平2方向、及び4支承付近における桁の応答3方向
- ・加速度計：振動台の水平2方向、及び4支承付近における桁の3方向又は2方向（長手、鉛直）

(4) 加振波形

振動台の加速度入力として、正弦波（0.8～2.0Hz）および地震波を用いた。地震波については、想定した橋梁モデルに、下記の地震波入力とした場合の橋脚の天端応答を算出し、これを振動台加振波としている。

- ・TYPE II-II-1：兵庫県南部地震JR鷹取駅構内地盤上記録N-S成分
- ・TYPE II-II-2：兵庫県南部地震JR鷹取駅構内地盤上記録E-W成分
- ・TYPE II-II-3：兵庫県南部地震大阪ガス葺合供給所構内地盤上記録N27W成分

- ・桃山波：桃山断層による地震動の推定波形
- ・花折波：花折断層による地震動の推定波形

各々の入力波形について、試験装置の制約に達するまで最大振幅を徐々に増加させて加振を行い、合わせて330ケース程度の加振実験を行った。

3. 実験結果

(1) 相対変位と支承水平荷重の関係

図5に、正弦波試験における典型的な桁模型相対変位と支承水平荷重の関係の履歴図を示す。これより、上沓が下沓の斜面上に乗り上げる際に衝撃力が生じていることが分かる。図6に衝撃力と衝突速度の関係を示す。衝突速度とは衝撃荷重により荷重が増大する直前の速度とし、計測変位データより算出した。この結果より、衝突速度と生じる衝撃力の間には概ね比例の関係があることがうかがえる。また、勾配角度が15度の供試体より30度の供試体のほうが大きな衝撃力が生じる。

(2) 正弦波入力時の水平変位応答

正弦波入力時においては、平面すべり支承を用いたケースに比べUPSSを用いたケースの変位は概ね低

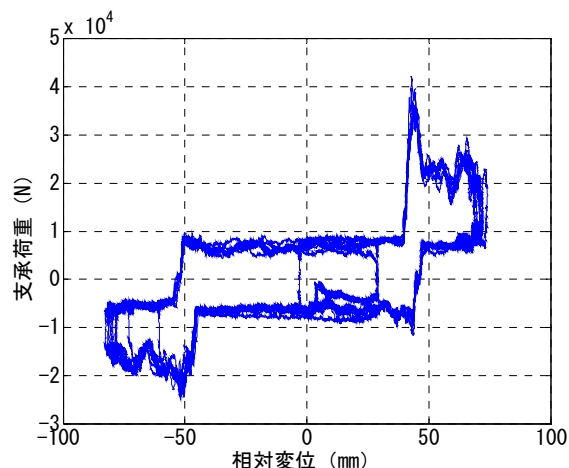


図5 UPSSの水平変位—水平荷重関係

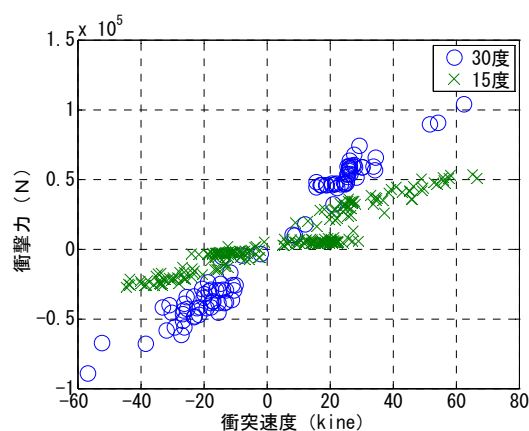


図6 衝突速度—衝撃力関係

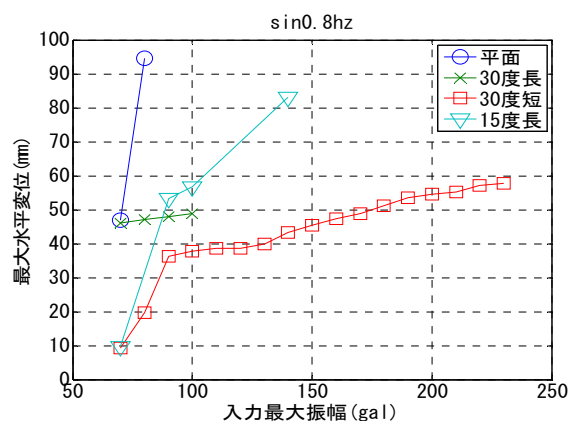


図7 正弦波入力：加速度振幅—水平変位関係

減する傾向が見られた。例として、図7に振動数0.8Hzにおける入力振幅と最大水平変位の関係を示す。特に斜め勾配30度で遊間の短い(±30mm)ケースにおいて最も変位が低減されている。

(3) 地震波入力時の水平変位応答

地震波入力時の典型的な結果としてTYPE II-II-1入力における入力振幅と最大水平変位の関係を図8に示す。正弦波加振と比べ、顕著な変位応答の低減の傾向は確認されなかった。本実験での加振レベルにおいては、タイプII地震動のパルス的な加振では、振動台の加振能力の限界との関係もあり、斜面部には極少数回の衝突に留まり、斜面部による変位の低減効果が限定的にしか現れなかったものと考えられる。より大きな加振レベルでは、変位応答の低減が期待できると推測される。

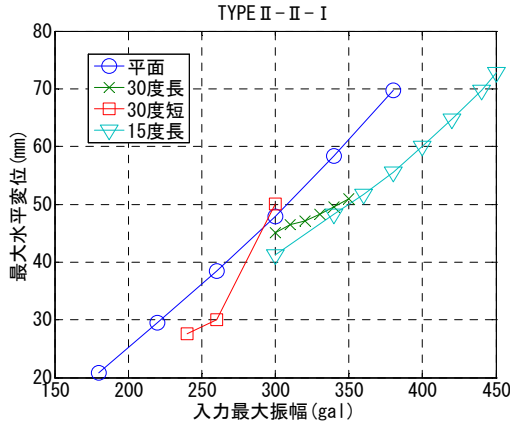


図8 地震波入力：加速度振幅—水平変位関係

(4) 鉛直荷重と水平荷重の関係

上沓が下沓の斜面上にある時、支承が発揮する水平力および鉛直力の絶対値をそれぞれ F_h 、 F_v とすると、勾配面に対する垂直抗力 R 、斜め勾配 θ 、摩擦係数 f を用いて、次式で表される。

$$F_h = R \sin \theta \pm f R \cos \theta \quad (1)$$

$$F_v = R \cos \theta \mp f R \sin \theta$$

ここに、複号は上沓の斜面上の上昇もしくは下降に対応する。よって、支承が発揮する水平力と鉛直力の比は

$$\frac{F_h}{F_v} = \frac{\sin \theta \pm f \cos \theta}{\cos \theta \mp f \sin \theta} \quad (2)$$

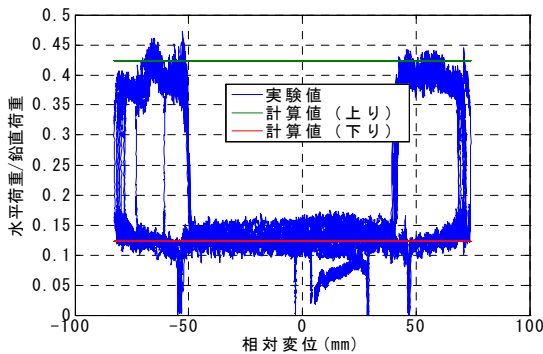


図9 変位と水平力／鉛直力比の関係

となり、垂直抗力 R によらず、斜め勾配 θ および摩擦係数 f によって定まる一定の値となると考えられる。実験により得られた、相対変位と鉛直荷重に対する水平荷重の比の関係を図9に示す。また式(2)による推定値も図9中に併せて示す。両者は概ね一致していると判断できる。また、安定した履歴が得られていることにより、衝撃的な水平力が発生するような場合においても、式(2)の関係は成立していると考えられる。

4. 簡易力学モデルによる衝撃力の評価

衝撃荷重の発生とその値の評価を、質点の拘束運動に基づく単純な力学モデルにより行うを試みた。

(1) 簡易力学モデルの考え方

振動台実験における桁フレームの運動に基づく考察より、図10に示す力学モデルを検討した。質点 m は上沓の下沓に対する相対変位の位置にあり、図示された線上に運動が拘束されていると仮定する。平面区間と斜面区間の境界付近に一定曲率の円弧区間が設定され、円弧区間の運動では質点 m の円運動に伴う遠心力を考慮する。また、 L ：UPSSの遊間の片側長さ、 θ ：斜め勾配、 r ：円弧区間の曲率半径であり、質点の質量 m はUPSSが分担する上部構造質量に対応している。ここでは、振動台実験での積層ゴム支承の水平剛性をばね k でモデルに含めている。

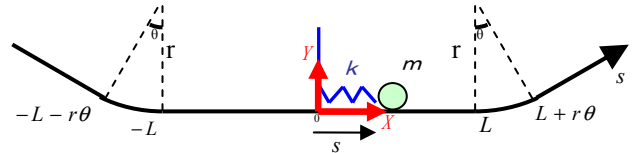


図10 斜め滑り支承の簡易力学モデル

(2) 衝撃力の評価式の導出

質点に作用するすべり面からの垂直抗力、重力、滑り面に沿った方向の摩擦力（摩擦係数 f ）、円運動に伴う遠心力を考慮して運動方程式を定式化すると、接線座標 $s(t)$ が円弧区間内にあり質点位置の軌道の水平面とのなす角を $\phi=(s-L)/r$ と表した時の下部構造に作用する荷重の水平成分で定義される水平力 $H(t)$ およびすべり面の垂直抗力 $R(t)$ は、式(3)で表される。ただし、ここでは説明上の便宜のため、慣性力とゴムによる復元力の項は含めていない。

$$H = f R \cos \phi + R \sin \phi \quad (3)$$

$$R = m g \cos \phi + m \frac{v^2}{r}$$

円弧区間内における水平力 $H(t)$ の最大値を衝撃力の大きさと定義すれば、図10において右側の円弧区

間を質点 m が正の速度で通過する時の水平衝撃力 F は、円弧区間の右端である $\phi(t)=\theta$ の時点で発生すると近似できる。 $\phi(t)=\theta$ における質点 m の速度を衝突後速度 v' と定義する。質点の円弧区間への進入時と円弧区間の最後の時点では、図11に示すようになり、以下のエネルギー保存則が成り立つ。

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + mgr(1 - \cos\theta) + U \quad (4)$$

ここに、 U は円弧区間へ進入してから通過するまでの摩擦によるエネルギー損失であり、次式で表現される。

$$\begin{aligned} U &= \int_0^{\theta} f R ds \\ &= \int_0^{\theta} f \left(mgr \cos \phi + m \frac{v^2}{r} \right) ds \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、速度 v が円弧区間を通過する間に変化するため、その評価が必要である。エネルギー損失の評価に関しては、円弧区間内における質点の速度が衝突速度 v のまま一定と仮定する近似を導入すると、

$$U = f(mgr \sin \theta + mv^2 \theta) \quad (6)$$

となる。式(4)と式(6)から近似的に求めた衝突後速度 v' を式(3)に代入し、衝撃力の評価式を導けば、次式のようになる。

$$I = \frac{um}{r} (1 - 2f\theta)v^2 + umg(-2f \sin \theta + 3 \cos \theta - 2) \quad (7)$$

ここに、 $u = f \cos \theta + \sin \theta$ である。

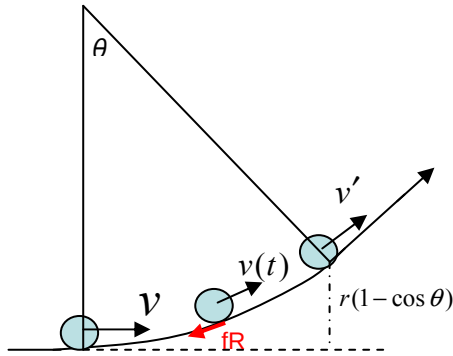


図11 簡易力学モデルにおける衝突前後の状況

(3) 円弧区間曲率半径の推定

簡易力学モデルにおいては、曲率半径 r 以外のパラメータは実験条件より決定されるが、曲率半径 r の値は未決定である。そこで、式(7)で算出される衝撃力 I と実験で得られた衝撃力の実測値が一致するような r の値を推定する。図12に、斜め勾配 $\theta=30$ 度、すべり材の寸法が $30 \times 30 \text{ mm}$ の場合と $30 \times 60 \text{ mm}$ の場合を合わせた平面区間から斜面区間への衝突速度と衝撃力の関係を示す。実験値の正負の符号は、それぞれ座標 s の正側および負側の斜面に衝突する際の衝突速度と衝撃力の関係を表している。既に述べたように、実験データでは衝突速度と衝撃力はほぼ一次関数的な相関があることが観察される。一方、

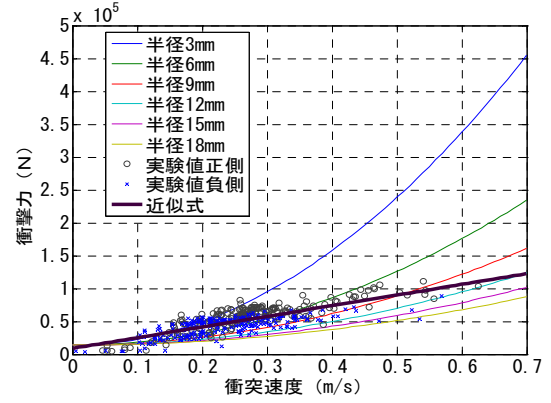


図12 簡易力学モデルに基づく衝突速度 - 衝撃力関係

力学モデルの円弧区間の曲率半径を一定とした場合、すなわち $r=3, 6, \dots, 18 \text{ mm}$ で一定とした式(7)の衝撃力の評価式から衝突速度と衝撃力の関係を求めると、図12の2次関数となる。最小二乗法による実験データの回帰直線とあわせて検討すれば、この結果は衝突速度が増加するにつれて曲率半径の値が増加すると解釈することが考えられる。

そこで、曲率半径 r を衝突速度 v の関数とみなし、振動台実験の回帰式 $F(v) = 162011.34v + 9244.38$ (30度の場合)と、力学モデルに基づく衝撃力の評価式(7)より、同じ衝突速度で両式の衝撃力 I が等しくなるように衝突速度 v と曲率半径 r の関係を導くことで、

$$r = \frac{um(1 - 2\mu\theta)v^2}{av - \beta + b} \quad (8)$$

の関係式が得られた。ここに、 a, b, β はこれまでの近似式に対応して得られる定数である。この関係を図示したものを図13に示す。

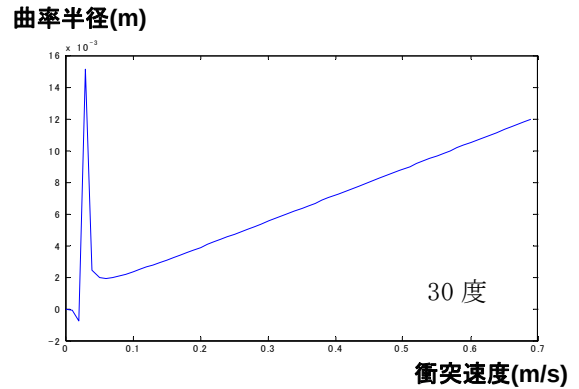


図13 簡易力学モデルでの衝突速度 - 曲率半径関係

衝突速度 v が 0.1 m/s 以上の領域に着目すると、斜め勾配 $\theta=30$ 度の場合の $r-v$ 関係は

$$r(v) = 0.0166v + 0.00056 \quad [\text{m}] \quad (9)$$

により近似できる。

(4) 衝撃力の推定

斜め勾配30度するとき、前節で得られた $r-v$ 関係(9)を衝撃力の評価式(7)に代入し、衝撃力の推定を行

った。力学モデルに基づく衝撃力の推定値と実験値の回帰式を比較したものを図14に示す。

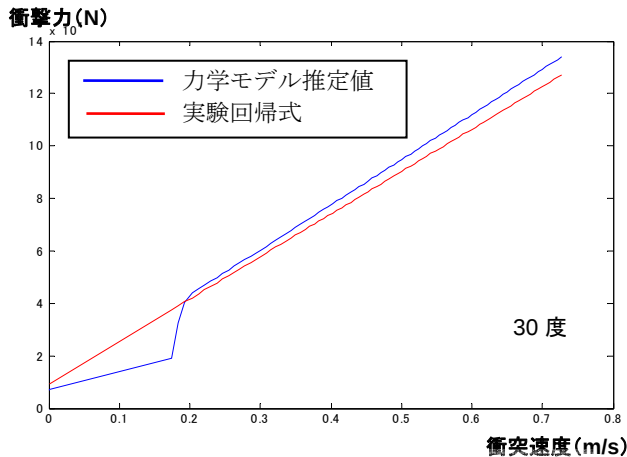


図 14 力学モデルによる衝撃力の算定値
(斜め勾配 30 度の場合)

(5) 力学モデルに基づく衝突時エネルギー損失評価

UPSS の上査と下査の水平面・斜面境界部への衝突によるエネルギー損失は、力学モデルにおける質点の円弧区間進入時の力学エネルギーと円弧区間から出る時点の力学エネルギーの差により表現される。そこで、エネルギー損失比 Q を次式で定義する。

$$Q = \frac{\frac{1}{2}mv^2 - \left\{ \frac{1}{2}mv'^2 + mgr(1 - \cos\theta) \right\}}{\frac{1}{2}mv^2} \quad (10)$$

斜め勾配30度の場合における衝突速度 v とエネルギー損失比 Q の関係を、図15に示す。この力学モデルの場合、エネルギー損失比 Q は衝突速度が大きくなると10%程度の値に漸近することがわかる。

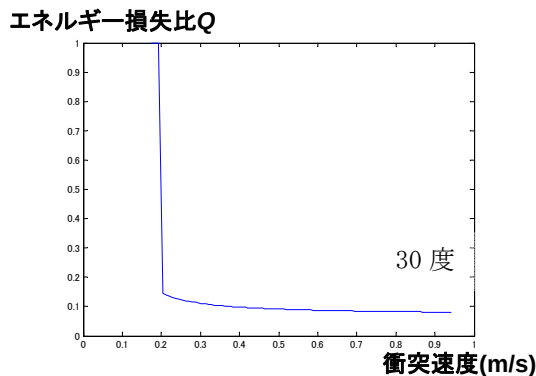


図 15 衝突速度 - エネルギー損失比関係

5. 簡易力学モデルに基づくUPSSの動的応答

前述の簡易力学モデルを用いて振動台実験におけるUPSSの動的応答の算出を行い、実験で得られたUPSSの挙動の説明への適用性を検討した。解析条件は積層ゴム支承2基に対応するばね剛性 $k=256$

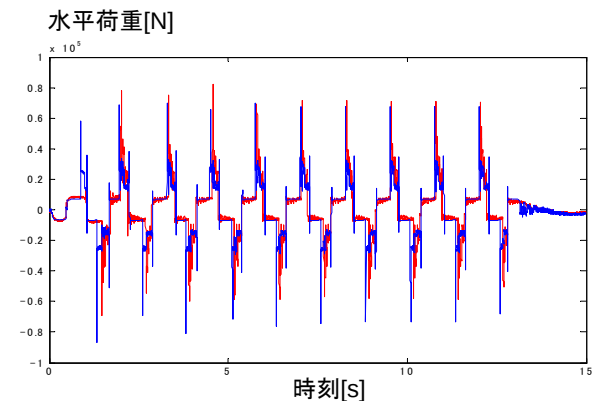
kN/m、鋼フレーム桁の質量 $M=10$ tonとした。UPSSの分担する質量 m はここでは桁の質量の半分である5 tonで一定と仮定した。数値時間積分は線形加速度法を用い時間刻み1/80000[sec]で行った。それぞれのグラフで赤線が実験値、青線が解析値である。

(1) 正弦波応答（遊間 $L=42$ mm, 斜め勾配30度）

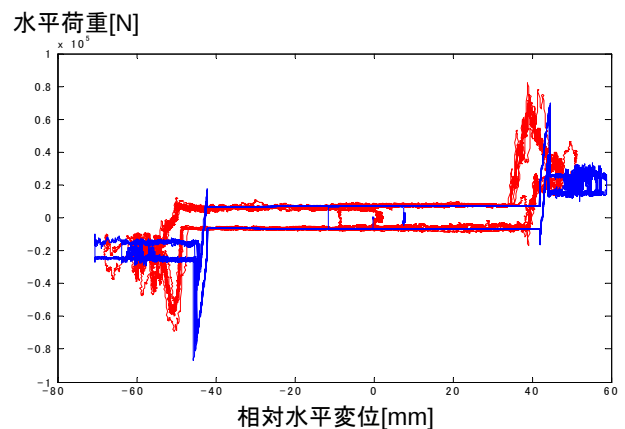
振幅160gal、周波数0.8Hzの正弦波を入力として用いた。荷重時刻歴および水平変位—水平力関係の実験値と解析値の比較を図16に示す。履歴復元力に特徴的に現れる衝撃力は力学モデルでも表現されており、荷重の評価に関しても特に正符号側は概ね良好である。負符号側の衝撃力の相違は、実験結果が小さいことによるもので、発生する荷重にばらつきがあるためと考えられる。

(2) 地震波応答（遊間 $L=30$ mm, 斜め勾配30度）

加速度入力、前述のTYPE II - II-1の橋脚天端応答波形である。実験値と解析値の比較を図17に示す。こちらも正弦波のケースと同様、衝撃力は力学モデルでも表現されていること、衝撃力の値については正符号負符号側で良好な評価が得られる場合とやや相違がある場合が現れることなどは共通している。

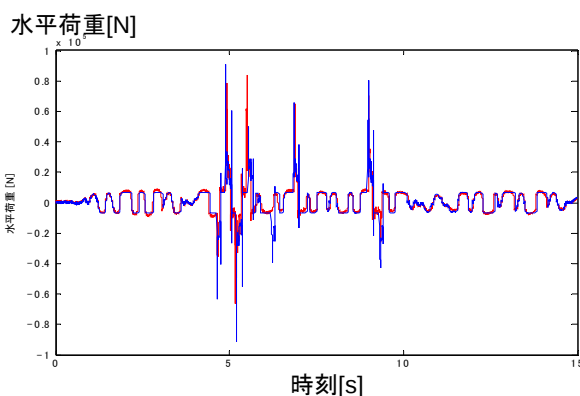


(a) 水平荷重時刻歴

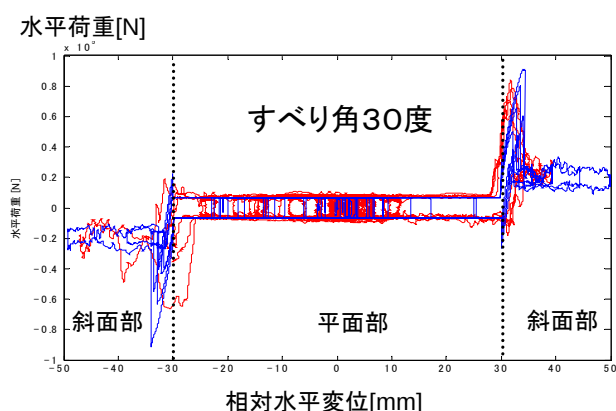


(b) 変位—荷重関係

図 16 正弦波入力時のUPSSの動的挙動



(a) 水平荷重時刻歴



(b) 変位—荷重関係

図 17 地震波入力時の UPSS の動的挙動

6. 結論

反重力すべり支承またはUPSSと称される支承の動的挙動を調べるため、振動台実験を行った。得られた知見をまとめれば、以下のとおりである。

- ・上査が下査の水平面から斜面部に移行する際に衝撃力が発生する。この衝撃力の大きさは、衝突速度と比例の関係があることを示す結果が得られた。
- ・平面すべり支承と比較してUPSSによる応答変位低減効果があることが確認された。この効果は正弦波加振時には顕著であるが、ここで用いた地震波入力の場合はこの効果は限定的であった。これは衝突や斜面部への乗り上げが限られていたことによるもので、入力波の特性や振幅によるものと考えられる。
- ・水平力／鉛直力の比は、予測した一定の値に従うことが確認され、これは衝撃力が発生する場合でも成り立つ。したがって、UPSSの荷重に関してはすべりの条件における理論に従った挙動を示すことを意味する。
- ・振動台実験で見られたUPSSの動的挙動を説明するための簡易な力学モデルを構築し、このモデルでもUPSSの動的挙動の主要な特徴を説明できる。
- ・力学モデルにより衝撃力の推定を試みたところ、良好な推定値が得られる場合と実験結果とやや相違が生じる場合があった。発生する衝撃力のばらつきによるものと推定される。
- ・衝撃力の実験値の最大値は正側で発生する。よって、衝撃力の最大値はこのモデルで評価できると考えられる。

参考文献

- 1) 足立幸郎ほか：UPSSによる位置エネルギー変換システム，土木学会第63回年次学術講演会，2008年。
- 2) Maria.Q.Feng and Susumu Okamoto：Shaking table tests on base-isolated bridge with sliding system, Proc. 3rd U.S.-Japan workshop on earthquake protective systems for bridges, pp.2-23 - 2-37, NCEER-94-0009, 1994.

INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF UPLIFTING SLIDE SHOES BY SHAKE TABLE TESTS

Akira IGARASHI, Shinji MORIMOTO, Atsushi KAJI, Masaki HIGUCHI, Yukio ADACHI, Osamu KOCHIYAMA and Tomoaki SATO

The Uplifting Slide Shoe (UPSS) is proposed as one of the methods for upgrading the seismic performance of continuous span bridges. To clarify the impact loads inherently associated with the use of planes for slope sections of the UPSS and dynamic behavior, a series of shaking table tests were carried out. The result shows that the relationship of the impact loads and collision velocity is almost linearly proportional, the ratio of horizontal load / vertical load can be explained by the sliding action, and the use of UPSS is quite effective in reducing maximum displacement of the girder under sinusoidal excitation. Based on the results of the test, a simplified mechanical model is proposed to represent and to predict the dynamic responses and impact loads. The mechanical model successfully provides the dynamic behavior of UPSS under cyclic and seismic excitation.