

反重力すべり支承を用いた振動系における 動的挙動時のエネルギー評価

佐藤知明¹・五十嵐晃²・松田泰治³・足立幸郎⁴・宇野裕恵⁵

¹JIPテクノサイエンス株式会社 システム技術研究所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島2-12-11)

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

²京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

³熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻 教授 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail: mazda@kumamoto-u.ac.jp

⁴阪神高速道路株式会社 大阪管理部 (〒552-0006 大阪市港区石田3-1-25)

E-mail: yukio-adachi@hanshin-exp.co.jp

⁵オイレス工業株式会社 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南 1-6-34)

E-mail: h.uno@oiles.co.jp

多径間連続桁の耐震性能の向上策の一つとして、反重力すべり支承 (Uplifting Slide Shoe : UPSS) が提案されている。UPSSは地震時に上部構造が斜面上をすべり上がることで、地震時の水平動による上部構造慣性力 (運動エネルギー) の一部を鉛直方向の力 (位置エネルギー) に変換し、水平方向の応答変位や下部構造の挙動を制御するものである。本研究は、UPSSを用いた振動系における地震時のエネルギー推移の把握を目的とするものであり、1 質点系モデルを用いて、基本的な地震時挙動をエネルギーの変遷から検討した。検討の結果、水平方向に入力された運動エネルギーは、一時的にUPSSの位置エネルギーおよび上部構造の歪エネルギーに貯留され、摩擦および粘性減衰により安定的に消費されていくことを確認した。

Key Words : slide shoe, gravity energy, kinematic energy, potential energy, friction energy, structural damping energy, inclined slope, dynamic behavior, seismic control

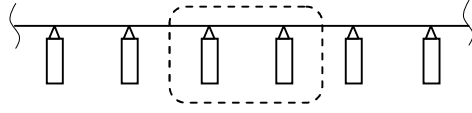
1. はじめに

兵庫県南部地震以降、桁橋の耐震構造として免震橋が一般的となっている。しかし、免震橋では地震時の支承変位が大きくなるため、伸縮装置が過大になることが多い。この結果、車両走行により振動・騒音が励起され、維持管理の手間も増大している。さらに、建設や維持管理のコストが増大するなどの問題を抱えている。これらの問題を解決するために、支承変位を比較的自在に調整できる簡易な支承部構造として、“反重力すべり支承 (Uplifting Slide Shoe : UPSS)” が開発^{1)~6)}されている。UPSS とは、地震時に斜め勾配を有する面をすべらせることにより、地震時の応答を制御する耐震デバイスである。このメカニズムは、地震力による水平方向の運動エネルギーを鉛直方向の位置エネルギーに変換するものである。既往研究⁷⁾によれば、斜め勾配を大きくすれば支承部

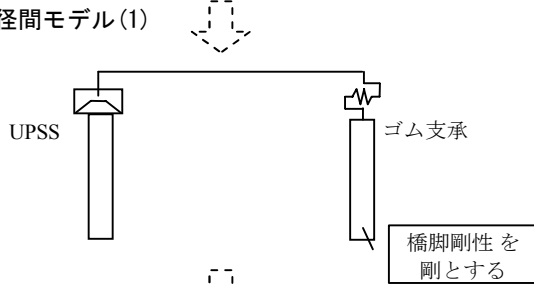
の地震時水平変位の抑制効果が大きくなることが検証されている。これに関与するエネルギーの種類⁸⁾は様々であり、支承部の設計条件の設定によって関与するエネルギーの度合いは大きく変動すると考えられる。

地震時に発現するエネルギーは、貯留エネルギーと消費エネルギーに大別され、前者は歪エネルギーや位置エネルギーであり、後者は摩擦減衰や粘性減衰などである。すなわち、地震時のエネルギーは一時的に貯留されながら同時に減衰していくことになる。そこで、本論文では簡易な 1 質点系のモデルを用いたケーススタディにより、それぞれのエネルギーが変遷する状況を把握した。この結果、反重力すべり支承の耐震性能は、斜め勾配が大きくなると位置エネルギーに大きく依存することを検証した。これらの結果を基に、エネルギー分担の最適化

(a) 連続高架橋



(b) 単径間モデル(1)



(c) 単径間モデル(2)

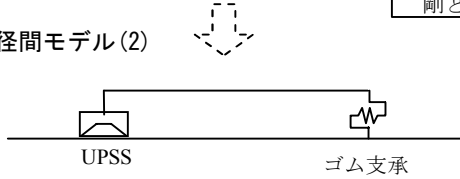


図-1 検討モデルの位置づけ

を考慮する設計体系を構築することも可能と考えられ、多径間連続桁の設計への応用が期待される。

2. UPSSの動的挙動時に係るエネルギーの種類

UPSSが動的挙動する際、さまざまなエネルギーが発現する。そこで本検討では、図-1に示すように多径間連続桁からUPSSを用いた単径間のみを取り出し、簡略化したモデルで検討した。ここで、各種エネルギーについて、図-2に示すUPSSを構成している2平面（水平面部と斜面部）を有する簡易図により、動的挙動時の各状態を考える。

はじめに、エネルギー保存則が成り立つと考えられる摩擦や粘性減衰などの消費エネルギーを考慮しない定常状態について考える。ここでは、静止状態にあるUPSSに初期速度が与えられ（状態①）、水平面をすべり（状態①→②→③）、その後右側斜面をすべり上がることを想定する（状態③→④→⑤）。

UPSSが支える物体の質量を m 、水平方向に与える初期速度を v_0 とすれば、状態①では式(1)に示される運動エネルギー E_K のみ発現する。

$$E_K = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (1)$$

この状態では、質点は平面をすべり続け、移動距離がUPSSの遊間量に達すると、右側の斜面に接触する（状態③）。このとき、右側斜面には衝撃力が発生することがこれまでの検討からわかって

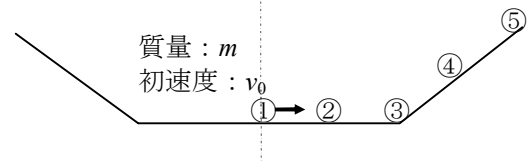


図-2 UPSSの挙動状態説明図

いる²⁾。状態③以降、物体は斜面上を上がっていくため、状態④および⑤では、基準面に対して位置エネルギー

$$E_g = mgh \quad (2)$$

ここで、

g ：重力加速度(=9.80665 m/sec²)

h ：基準面からの高さ(m)

が発現して蓄積する。斜面をすべり上がる過程（状態④）では、物体は運動エネルギーを有しているが、やがて運動エネルギーがゼロとなり斜面上で静止する（状態⑤）。このとき物体が持つエネルギーは位置エネルギーのみの状態となり、その後、質点は斜面を下り始める。すなわち、その物体の運動エネルギーは位置エネルギーとして一時的に貯留されたことになる。さらに、値は小さいもののUPSSのすべり材のばねも弾性エネルギーとして、エネルギーの貯留効果を担っている。

次に、摩擦および粘性減衰を考慮する場合を考える。摩擦がある平面上（状態②、④）を物体がすべると、物体には慣性力の方向とは逆向きの摩擦力

$$F = \mu \cdot N \quad (3)$$

ここで、

μ ：動摩擦係数

N ：垂直抗力

が作用する。物体の進行方向を x 方向とすれば、摩擦によるエネルギー消費は、

$$E_\mu = \int_{t=0}^t (F_x \times v_x) dt \quad (4)$$

ここで、

v_x ：各平面におけるすべり方向および面直角方向速度

F_x ：同方向に発生する作用力

で定義される。このほか、消費エネルギーとしては、物体の運動に伴う粘性減衰によるエネルギー消費がある。質点および構造要素の粘性減衰 E_m および E_e は、それぞれ式(5)、式(6)のようになる。

$$E_m = \alpha m \int_{t=0}^t v^2 dt \quad (5)$$

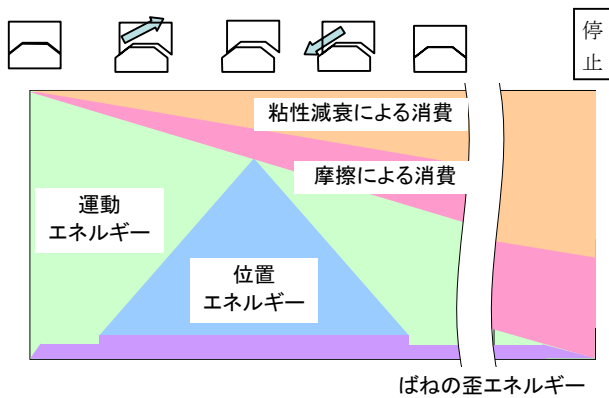


図-3 UPSS の変形状態とエネルギーの模式図

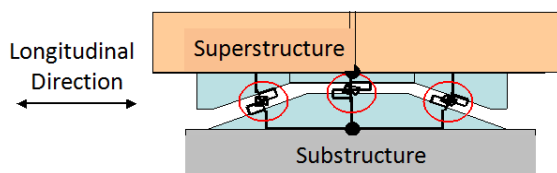


図-4 UPSS の解析モデル

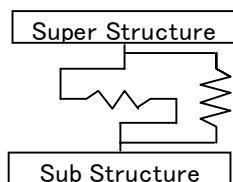


図-5 UPSS のばね要素

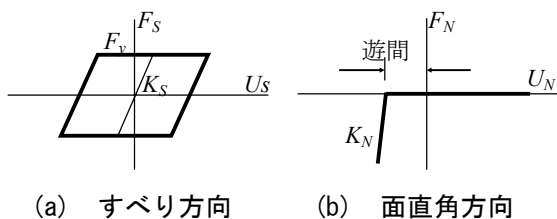


図-6 ばね要素の非線形特性

$$E_e = \beta K_e \int_{t=0}^t v^2 dt \quad (6)$$

ここで、

α および β : Rayleigh減衰で質量および要素剛性にかかる係数

K_e : 要素剛性

これまでに示した貯留または消費される主要なエネルギーの推移とUPSSの変形状態をまとめると、図-3のようになる。物体が持つ運動エネルギーは、UPSSのすべりに伴う摩擦ならびに粘性減衰による消費エネルギーの増加に従い漸減し、やがて運動は停止する。さらに、斜面をすべり上がっている間は、運動エネルギーは、一時的に位置エネルギーに置き換わる。この原理を実橋脚上の支承に適用すると、地震時の挙動制御が期待できる。

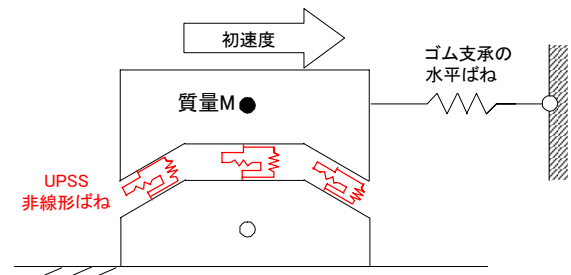


図-7 解析対象モデル

表-1 解析ケース

ケース名	ゴム支承	勾配	摩擦係数	粘性減衰
05-0	なし	5 度	微小値	0
05-1	あり		5%	3%
05-2			10%	
05-3				
15-0	なし	1 5 度	微小値	0
15-1	あり		5%	3%
15-2			10%	
15-3				

表-2 解析モデルの諸元

上部工質量 M	2066.07 ton
UPSS ばね値	
面直角方向	1.887×10^7 kN/m
すべり方向	7.261×10^6 kN/m
ゴム支承ばね値	6.189×10^4 kN/m

3. 解析モデルによる検討

(1) UPSSのモデル化

UPSSの挙動を表現するための解析モデル⁹⁾⁻¹¹⁾を図-4に示す。UPSSの水平面および左右の斜面には、それぞれの局所座標系における鉛直ならびに水平方向のばねを1対として計3組が配置される(図-5)。面直角方向のばねは図-6に示すように圧縮のみに抵抗する非線形特性を有し、すべり方向のばねは完全弾塑性型の非線形ばねである。

(2) 解析モデル

本検討では、UPSSの連続高架橋への適用を念頭に置き、図-7に示すようにUPSSとゴム支承を有する1質点系モデルを用いて検討を行う。このモデルは試設計された12径間の連続高架橋(40m×12)から図-1の順序に従い切り出したモデルである。

今回検討の手順として、まずはじめにUPSS単体構造(ゴム支承なし)としての挙動を確認したうえで、復元力が考慮されるモデルとしてゴム支承

を併用した解析を行うこととした（表-1）．解析ケース名の前 2 桁の数値（05 または 15）は斜め勾配の角度を示している．後の数値は，0 のケースが UPSS 単体構造，1 ～ 3 はゴム支承を併用したものである．このうち，1 は摩擦および減衰がないモデル，2 および 3 は道路橋示方書¹¹⁾に従い上部工に対する粘性減衰を 3 %，さらに摩擦を 5 % または 10 % 考慮したものである．

また，実橋を模擬したモデルにおけるゴム支承のばねは，UPSS のすべり量を 300 mm と想定した等価剛性を用いて，UPSS を含む解析モデルの固有振動数が 1 秒程度となるように設定した．

なお，本解析における UPSS の遊間は 30 mm とし，初速度は 120 kine とした．ただし，使用したソフトの制約上，初速度は直接与えることができないため，上部工の節点が所定の速度となるまで一定の加速度を与えた．このほかに解析時に設定した数値を表-2 に示す．

4. 解析結果

(1) UPSS 単体モデル (ケース : 05-5, 15-0)

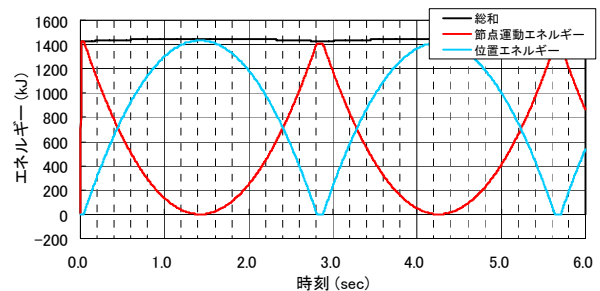
エネルギーの推移に関する結果を図-8 に示す．(a) は斜め勾配 5 度，(b) は 15 度の結果である．このモデルは，UPSS 単体かつ摩擦および粘性減衰を考慮しないケースであるため，結果的に運動エネルギーと位置エネルギーのみが発現する．図より，両者はトレードオフの関係となっていることがわかる．次に，図-9 に水平変位および鉛直変位から得られた変位の応答履歴を示す．斜め勾配の違いから水平変位量は大きく異なるが，鉛直変位量は同値まで上昇している．摩擦および粘性減衰がなく，与えられたエネルギーが同じである場合，角度によらず位置エネルギーを得ることも確認できた．

ところで，図-8 および 9 の (b) 斜め勾配 15 度の結果において波打つ現象が確認できる．そこで，位置エネルギーと鉛直変位との関係を求め図-10 に示した．その結果，両者は線形関係にあることが確認できた．なお，この波打ちについては，(2) 項で見解を述べる．

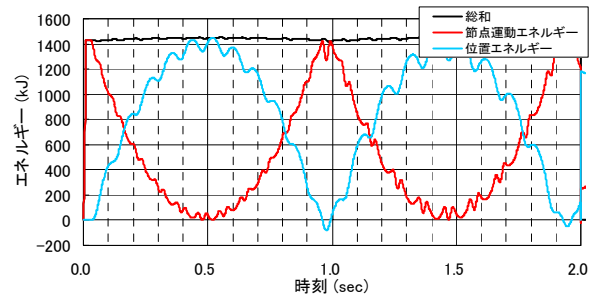
(2) ゴム支承を併用したモデル

復元力を考慮するためにゴム支承を併用した解析モデルに対しては，次の 4 種類の結果を示している．

- (a) : UPSS の水平方向 (X) および鉛直方向 (Y) に対する時刻歴応答変位結果
- (b) : (a) に対する応答変位履歴
- (c) : エネルギーの時刻歴推移
- (d) : UPSS に作用した水平力ー水平変位関係

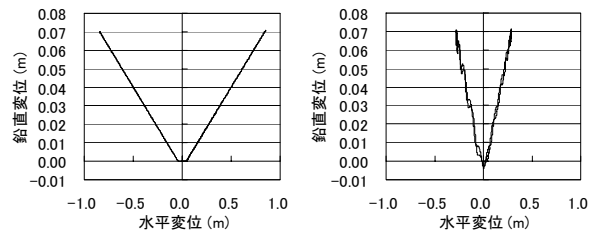


(a) (ケース 05-0)



(b) (ケース 15-0)

図-8 エネルギーの推移



(a) ケース 05-0

(b) ケース 15-0

図-9 変位応答履歴

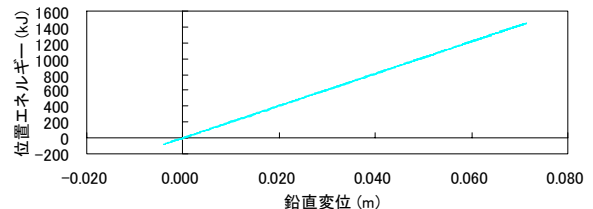


図-10 位置エネルギーー鉛直変位関係

ここで，(c) エネルギーの推移図には，表-3 に示される各種エネルギーが図示されている．これ以降，分析に用いるエネルギーの名称は，表中の名称に従うこととする．また，同表において，1 つの名称に複数のエネルギーの種別が記載されているものがあるが，本検討ではこれらの合計値として取り扱うことにした．また同表には，エネルギーごとに消費エネルギー，貯留エネルギーの別，および算定式も示している．式(1)～式(6)は 2 章において先述したとおりであるが，検討の結果，これ以外に，UPSS の衝突時に発現する，UPSS が面直角方向に受ける仕事 E_n が必要であることがわかった．

表-3 分析に用いるエネルギー

名称	エネルギーの種類		算定式
節点粘性 E	粘性減衰	消費	式(5)
UPSS 水平 E	摩擦による減衰	消費	式(4)
	粘性減衰	消費	式(6)
	面直角方向に受ける仕事	貯留	式(7)
	すべり方向ばねの歪エネルギー	貯留	※
	面直角方向ばねの歪エネルギー	貯留	※
UPSS 右 E	摩擦による減衰	消費	式(4)
	粘性減衰	消費	式(6)
	面直角方向に受ける仕事	貯留	式(7)
	すべり方向ばねの歪エネルギー	貯留	※
	面直角方向ばねの歪エネルギー	貯留	※
UPSS 左 E	摩擦による減衰	消費	式(4)
	粘性減衰	消費	式(6)
	面直角方向に受ける仕事	貯留	式(7)
	すべり方向ばねの歪エネルギー	貯留	※
	面直角方向ばねの歪エネルギー	貯留	※
運動 E	運動エネルギー	変動	式(1)
ゴム支承 E	ゴム支承ばねの歪エネルギー	貯留	式(6)
位置 E	UPSS の位置エネルギー	貯留	式(2)

※ 本検討では微小であったため考慮しない。

$$E_n = \int_{t=0}^t (F_y \times v_y) dt \quad (7)$$

ここで、

v_y : 各平面におけるすべり方向および面直角方向速度

F_y : 同方向に発生する作用力

(c) エネルギーの推移図に話を戻すが、位置E，ゴム支承E については時刻 0 から順に累積加算し、一方、節点粘性E，UPSS水平E，UPSS右E およびUPSS左E は総エネルギーから順に減じて示した。したがって、ある任意の時刻における質点の運動Eは、消費エネルギーと貯留エネルギーの差で表現される。

a) 斜め勾配 5 度の結果（ケース：05-1，05-2，05-3）

斜め勾配 5 度に対する解析結果を図-11から図-13に示す。

例えば、減衰のない解析ケース 05-1 の結果（図-11）より、 $t = 0.24$ 秒付近で水平変位が正側の最大値となり、(b) に示されるように水平面、斜面上ともに滑らかな挙動を示している。エネルギー推移(c) に着目すると、 $t = 0.24$ 秒付近では、位置E とゴム支承E の和が総エネルギーに一致し、このときの運動E はゼロとなっている。最後に (d) に示す水平力ー水平変位関係からは、斜面上で発生している水平力は約 1800 kN と、静的挙動として取り扱った場合の算定値 1733 kN に近い値を示している。

続いて、摩擦係数を 5 %，粘性減衰を 3 %とした

表-4 貯留エネルギーの最大値(斜め勾配 5 度)

	ケース 05-1 摩擦なし	ケース 05-2 摩擦 5%	ケース 05-3 摩擦 10%
位置 E	270.6 kJ (18.9 %)	227.9 kJ (16.1 %)	206.6 kJ (14.6 %)
ゴム支承 E	1157.9 kJ (81.1 %)	908.9 kJ (64.2 %)	782.2 kJ (55.4 %)
貯留エネルギー合計	1428.5 kJ (100 %)	1136.8 kJ (80.3 %)	988.8 kJ (70.0 %)

解析結果を図-12に示し、さらに摩擦係数を 10 %と大きくした解析結果を図-13に示す。(c) エネルギーの推移結果からは、節点粘性E，UPSS水平E，UPSS右E，さらにUPSS左E によりエネルギーが安定して消費されていることがわかる。今回のモデルでは、水平変位がプラスのとき、UPSSは右側斜面が接触面となっている。例えば、図-12(c)において、 $t = 0.04$ 秒から 0.48 秒付近まで右側斜面でエネルギー消費が増え、続いて $t = 0.56$ 秒付近までは水平面の要素がエネルギーを消費している。その後は、左側斜面により消費されている。また、エネルギーを消費する平面が切り替わるタイミングは、位置E の発生および休止の時刻であり、各平面間でのエネルギー変換が円滑に行われているようである。

次に、摩擦係数および粘性減衰を組合せたこれらの結果から、貯留エネルギーである位置E とゴム支承E の最大値を表-4にまとめた。貯留されたエネルギーの和は、摩擦がない場合は 100 %，摩擦が 5 %，10 %のケースでそれぞれ 80.3 %，70.0 %となり、100 %に満たない相当分が消費エネルギーである。それぞれの分担としては、位置E が 14.6 ~ 18.9 %，ゴム支承E が 55.4 ~ 81.1 %であった。

b) 斜め勾配 15 度の結果（ケース：15-1，15-2，15-3）

同様に、斜め勾配 15 度の結果を図-14から図-16に示す。(b) の応答変位履歴によると、斜面上では滑らかな挙動を示していないことがわかる。さらに、図-14(b)では、水平変位 0 mm 付近で鉛直変位がマイナスの状態が確認できる。これは物体が右斜面から跳躍しながら下ってきたために、水平面に設置された面直角ばねを計算上押し込んだために生じたものである。さらに、この跳躍現象は、(d) の水平力ー水平変位関係において、瞬間値として 15000 kN を超える大きな水平力が発生すると共にまもなく水平力が消滅していることから推察できる。

摩擦および粘性減衰がないケース 15-1 のエネルギー推移結果（図-14(c)）において、位置E に斜め勾配 5 度では見られなかった波打ちが生じている。さらに、図中上部に示されている総エネルギー付

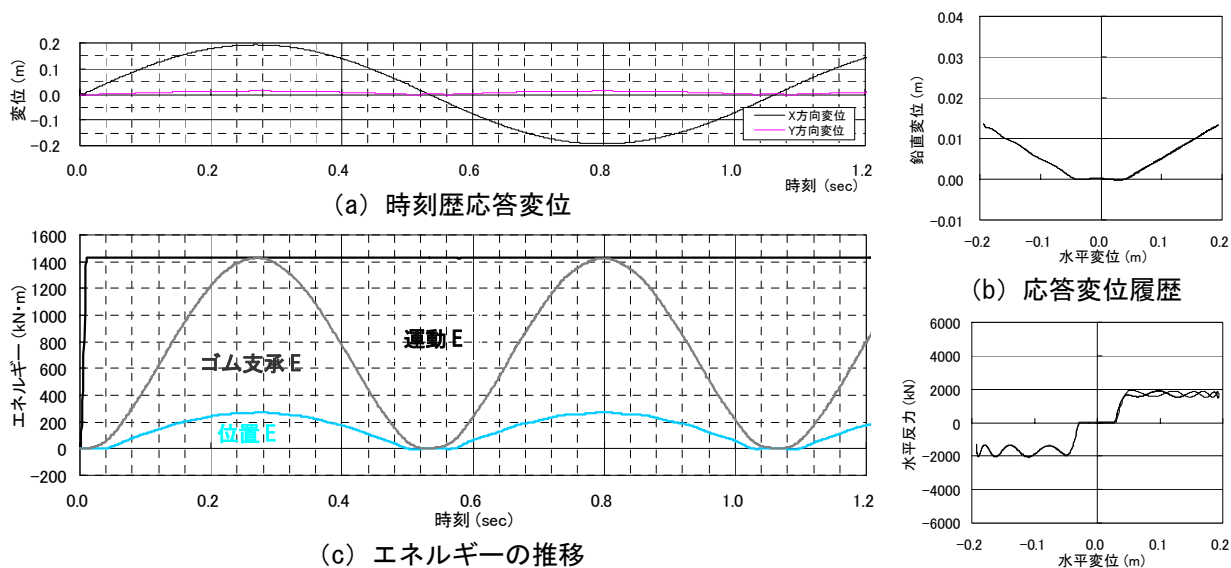


図-11 ケース 05-1 解析結果 (5 度, 動摩擦係数=微小値, 粘性減衰無し) (d) 水平力 - 水平変位関係

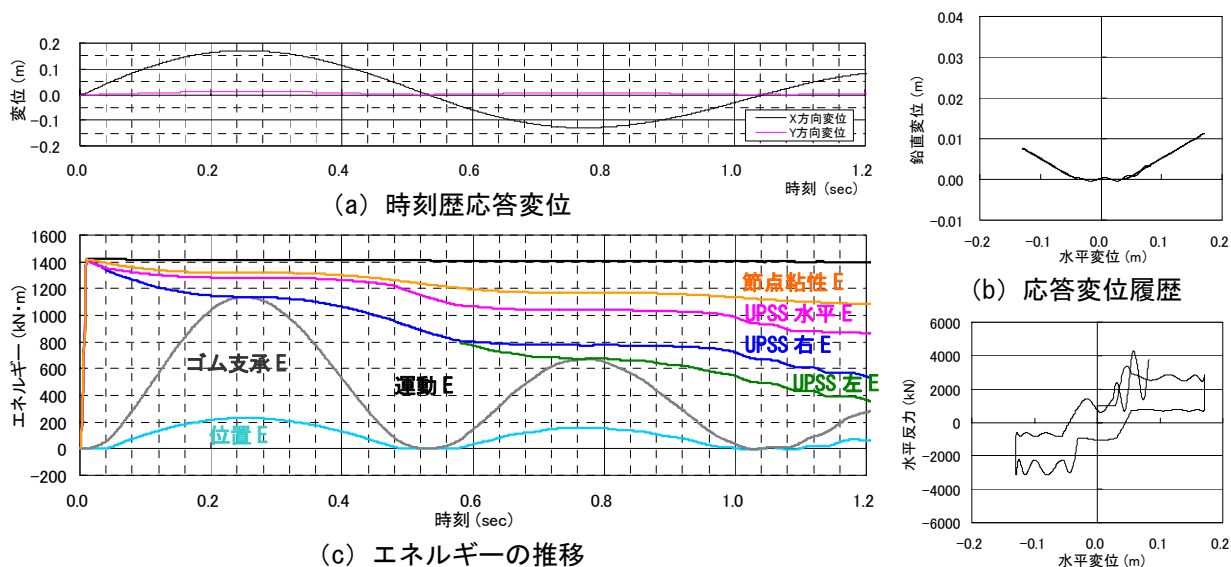


図-12 ケース 05-2 解析結果 (5 度, 動摩擦係数 5%, 粘性減衰 3%)

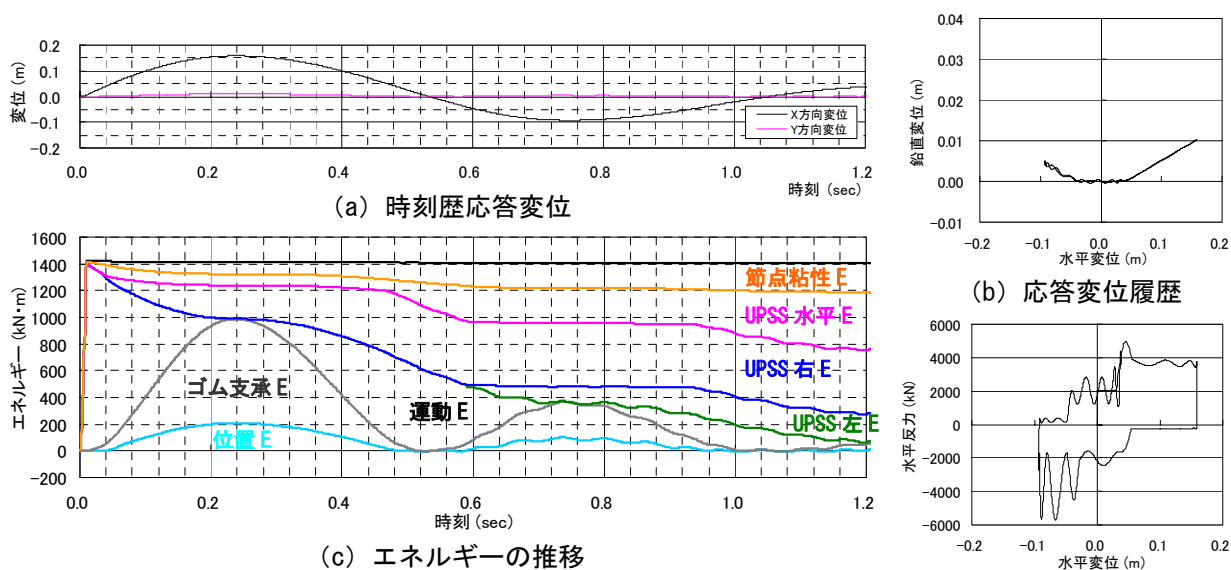
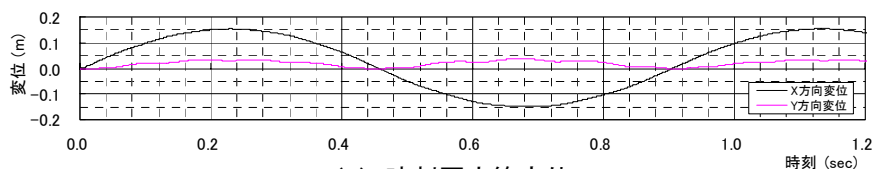
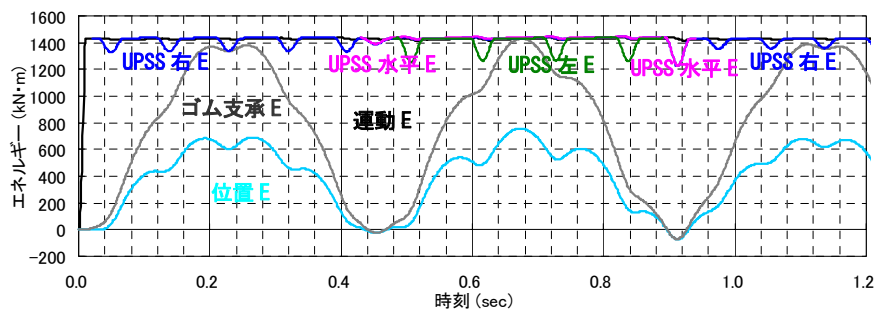


図-13 ケース 05-3 解析結果 (5 度, 動摩擦係数 10%, 粘性減衰 3%)

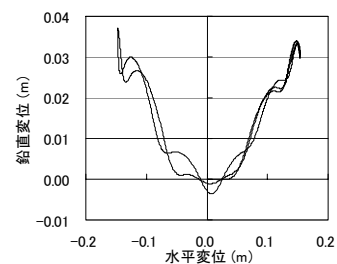
(d) 水平力 - 水平変位関係



(a) 時刻歴応答変位



(c) エネルギーの推移



(b) 応答変位履歴

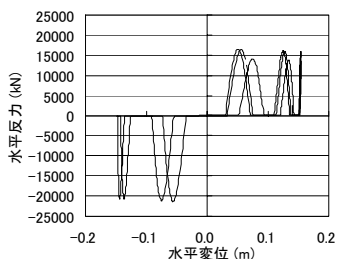
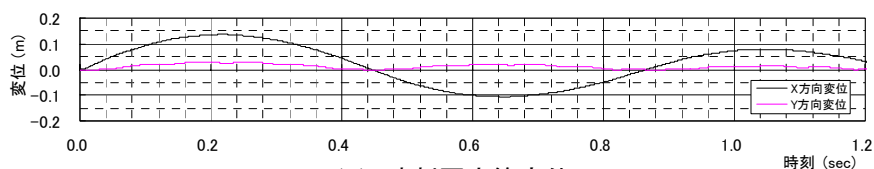
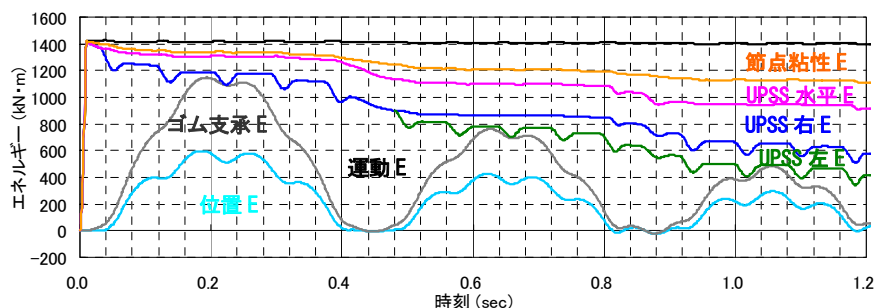


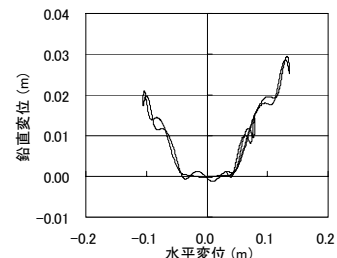
図-14 ケース 15-1 解析結果 (15 度, 動摩擦係数=微小値, 粘性減衰無し) (d) 水平力 - 水平変位関係



(a) 時刻歴応答変位



(c) エネルギーの推移



(b) 応答変位履歴

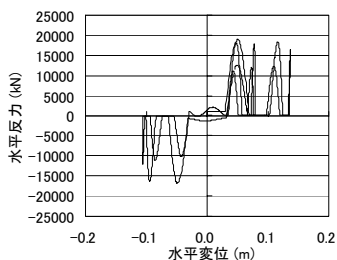
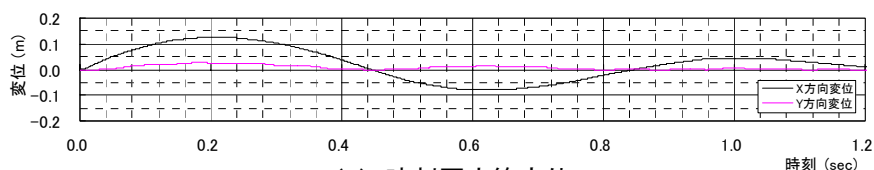
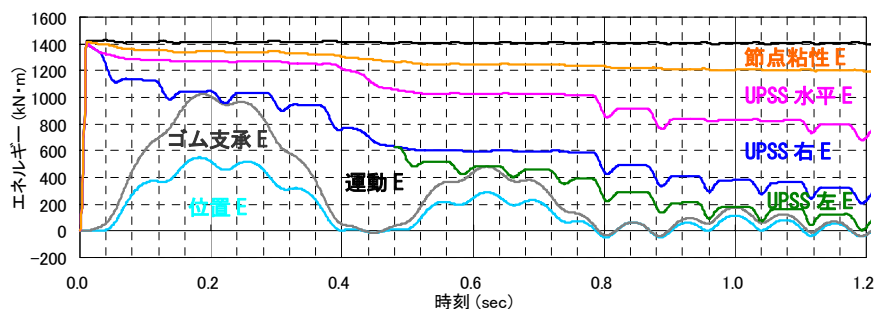


図-15 ケース 15-2 解析結果 (15 度, 動摩擦係数 5%, 粘性減衰 3%)

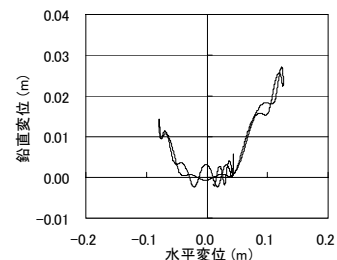
(d) 水平力 - 水平変位関係



(a) 時刻歴応答変位



(c) エネルギーの推移



(b) 応答変位履歴

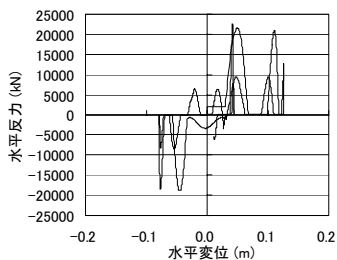


図-16 ケース 15-3 解析結果 (15 度, 動摩擦係数 10%, 粘性減衰 3%)

(d) 水平力 - 水平変位関係

表-5 貯留エネルギーの最大値(斜め勾配 15 度)

	ケース 15-1 摩擦なし	ケース 15-2 摩擦 5%	ケース 15-3 摩擦 10%
位置 E	754.9 kJ (47.9 %)	595.8 kJ (42.3 %)	545.2 kJ (38.8 %)
ゴム支承 E	678.2 kJ (47.1 %)	572.9 kJ (38.4 %)	499.5 kJ (33.4 %)
貯留エネルギー合計	1433.1 kJ (95.0 %)	1168.7 kJ (80.1%)	1044.7 kJ (72.2 %)

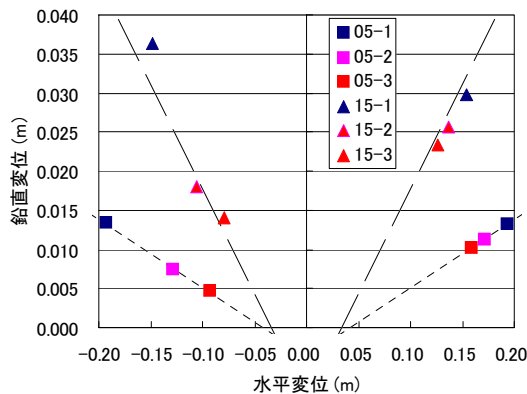


図-17 最大応答変位

近において周期的にUPSS右E，UPSS水平E，UPSS左E，さらにUPSS水平E，UPSS右Eの順に100～200 kN・m 程度のエネルギーが発現している。これは式(7)として追加した面直角方向になされる仕事が生じているためである。

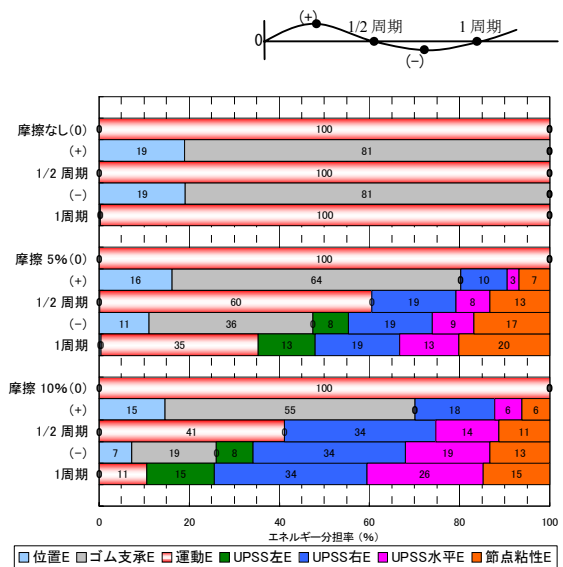
また、この仕事は Y 方向変位で見られる波打ち現象とも関連しており、変位が低い時間に発現することからも、この間、物体は水平面または斜面に接触しているものと判断できる。

続いて、5 度の場合と同様に、エネルギーの推移結果および貯留エネルギーの最大値を表-5にまとめた。15 度の結果は位置エネルギーに 38.8 ～ 47.9 %貯留されていた。

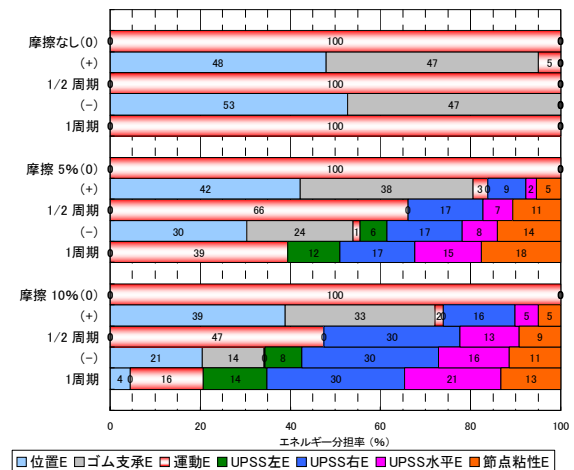
一方、摩擦および粘性減衰があるケースでは、先述したように一時的な面直角方向への仕事が発生するが、全体的には安定してエネルギーを消費していることが確認できる。

5. 斜め勾配の違いに対する検討

前章では、UPSSの持つ斜め勾配の角度を 5 度および 15 度とした検討結果を示したが、「4. (2) ゴム支承を併用したモデル」の解析結果について、角度の違いによる結果の差異について検討を加える。



(a) 斜め勾配 5 度



(b) 斜め勾配 15 度
図-18 エネルギーの分担率

(1) 応答変位について

全解析結果について正負の最大応答変位を図-17にプロットした。図中点線は 5 度、破線は 15 度の設定斜面勾配線である。5 度の結果は正負ともに設定ライン上にプロットされているが、15 度の結果は特に負側で乱れが確認できる。

本検討では初速度を正方向に与えており、先の応答変位履歴にも示したとおり、左斜面では大きく跳躍したことによるものと考えられる。しかしながら、実際の地震動入力では、入力エネルギーの方向が複雑に変化する。今後、今回見受けられた跳躍現象の発生を含むUPSSの動的挙動について、種々の入力波形を用いて検討しておく必要があるものと考えられる。

(2) エネルギーの推移について

UPSSが1周期挙動するなかで代表的なタイミングとして、水平変位の正負最大時および水平変位が0となる1/2および1周期時におけるエネルギーの分担を図-18にまとめた。

(a) (b)より、位置Eが最も貯留される水平変位の正負最大時に着目すると、摩擦の有無にかかわらず、15度モデルでの位置Eは5度のそれよりも大きく変換されている。これは、全ケースとも15度の鉛直変位が5度の結果に比べて大きいためである。一方、15度モデルでのゴム支承Eは5度の結果よりも小さくなっているが、これは水平変位に支配されていることを示している。

このような位置Eとゴム支承Eの貯留効果を見ても、UPSSは斜め勾配を変化させることにより、UPSS自身が受け持つエネルギーと、同一振動系内の他の橋脚へ配分するエネルギー量を調整できることを示している。

(3) 消費エネルギーについて

消費エネルギーについては、図-18のうち摩擦のあるケースについて着目する。図中右側の消費エネルギー（節点粘性E、UPSS水平E、UPSS右E、UPSS左E）が、UPSSの変形に追従して順次安定して増加していることが確認できる。

続いて、UPSSが1周期挙動する間の消費エネルギーについて考える。今回の解析では、入力エネルギーは初期に与えられるエネルギーのみであるので、消費エネルギーはその時点で残っている運動エネルギーを確認すればよいことになる。そこで、1周期挙動時の運動エネルギーは、(a)斜め勾配5度では、摩擦5%の場合34.9%、10%の場合10.7%、(b)15度ではそれぞれ39.4%、16.2%であった、したがって、今回の検討ケースでは角度による消費エネルギーの違いは小さいものと考えられる。

6. おわりに

反重力すべり支承の動的挙動をエネルギーの観点から評価した。この挙動で現れるエネルギーは、位置エネルギーや歪エネルギーなどの貯留エネルギーと、摩擦減衰エネルギーや粘性減衰エネルギーなどの消費エネルギーに大別される。そこで、ケーススタディにより初速度により発生した運動エネルギーは、消費と貯留を繰返しなが安定して低減する推移を確認した。

引き続き、今後は斜め勾配の角度を変えた検討や、さまざまな入力波形に対する検討を行い、位置エネルギーが耐震性能に有効に機能するか確認していく必要がある。

7. 参考文献

- 1) 竹ノ内勇, 加藤祥久, 足立幸郎, 岩里泰幸, 宇野裕恵, 宮崎貞義, 河内山修: 斜めすべり支承による位置エネルギー変換システム, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, pp.805-806, 2008.9
- 2) 五十嵐晃, 森本慎二, 加地淳志, 樋口匡輝, 足立幸郎, 河内山修, 佐藤知明: 反重力すべり支承の動的挙動の振動台実験による検討, 土木学会地震工学論文集, pp.426-433, 2010.2
- 3) Akira Igarashi, Tempei Takahashi, Yukio Adachi, Hiroshige Uno, Yoshihisa Kato, Masatsugu Shinohara, Tomoaki Sato: Uplifting Slide Bearing (1) - Characterization of Dynamic Properties -, Proceedings of 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, VENICE 2010, Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanized Areas, Vol.97, A512, pp. 1-8, 2010.9
- 4) Hiroshige Uno, Akira Igarashi, Yukio Adachi, Yoshihisa Kato, Masatsugu Shinohara: Uplifting Slide Bearing (2) - Verification Tests of Seismic Response -, Proceedings of 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, VENICE 2010, Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanized Areas, Vol.97, A556, pp.1-8, 2010.9
- 5) Tomoaki Sato, Akira Igarashi, Yukio Adachi, Hiroshige Uno, Yoshihisa Kato, Masatsugu Shinohara: Uplifting Slide Bearing (3) - Development of the Analytical Model -, Proceedings of 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, VENICE 2010, Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanized Areas, Vol.97, A558, pp. 1-8, 2010.9
- 6) Yoshihisa Kato, Akira Igarashi, Yukio Adachi, Hiroshige Uno, Tomoaki Sato, Masatsugu Shinohara: Uplifting Slide Bearing (4) - Application for a 3-Span Steel Girder -, Proceedings of 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, VENICE 2010, Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanized Areas, Vol.97, A551, pp.1-8, 2010.9
- 7) 篠原聖二, 足立幸郎, 加藤祥久, 五十嵐晃, 宇野裕恵, 宮崎貞義, 松田宏, 佐藤知明: 反重力すべり支承の開発④-1 (鋼3径間連続非合成鋼桁橋の地震時応答特性), 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, pp.803-804, 2009.9
- 8) 佐藤知明, 松田宏, 五十嵐晃, 足立幸郎, 加藤祥久, 篠原聖二, 宇野裕恵, 宮崎貞義: 反重力すべり支承の位置エネルギー効果に関する一考察, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, pp.59-60, 2010.9
- 9) 松田宏, 佐藤知明, 五十嵐晃, 足立幸郎, 宇野裕恵, 横川英彰: 反重力すべり支承の開発③-

- 1 (反重力すべり支承を有する橋の耐震解析モデルの構築), 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, pp.797-798, 2009.9
- 10) 加藤祥久, 足立幸郎, 篠原, 五十嵐晃, 宇野裕恵, 横川英彰, 松田宏, 佐藤知明: 反重力すべり支承の開発③-2 (解析モデルの妥当性検証), 第 64 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.799-800, 2009.9
- 11) 佐藤知明, 松田宏, 五十嵐晃, 足立幸郎, 宇野裕恵, 横川英彰: 反重力すべり支承の開発③-3 (反重力すべり支承に作用する衝撃力に関する検討), 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, pp.801-802, 2009.9
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, p. 115, 2002.3

Fundamental Study of Energy Transition in Basic Dynamic Systems controlled by Uplifting Slide Shoe

The Uplifting Slide Shoe (UPSS) is proposed as one of the method for upgrading the seismic performance of multi-span continuous girders. UPSS transfers the kinetic energy to the potential energy in the vertical direction by sliding girders up on the inclined slope during earthquake, and restricts horizontal displacement. This study is aimed at grasping the energy transferring during earthquake using UPSS. A basic dynamic problem was examined by using single mass system in this paper. The result shows that the horizontal energy was temporarily transferred to the potential energy of UPSS and the strain energy of the superstructure, and was reduced steady by friction and viscous damping.