

# UPSSの橋脚の塑性化を考慮した 消費エネルギーからみた応答評価

佐藤 知明<sup>1</sup>・五十嵐 晃<sup>2</sup>・白石晴子<sup>3</sup>・松田 泰治<sup>4</sup>・土田 智<sup>5</sup>  
足立 幸郎<sup>6</sup>・宇野 裕恵<sup>7</sup>・二木太郎<sup>8</sup>

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

E-mail: tomoaki\_sato@cm.jip-ts.co.jp

<sup>2</sup>正会員 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

<sup>3</sup>学生会員 京都大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: haruko.s@ks7.ecs.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 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

<sup>5</sup>学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail: 117d8822@st.kumamoto-u.ac.jp

<sup>6</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 大阪管理部 保全技術課長 (〒552-0006 大阪市港区石田3-1-25)

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

<sup>7</sup>正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 技師長 (〒108-0075 東京都港区港南 1-6-34)

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

<sup>8</sup>正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 開発推進室 係長  
(〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町4-6-7 本町スクウェアビル9階)

E-mail: t.niki@oiles.co.jp

UPSS (反重力すべり支承) は平面すべりと斜めすべりを組み合わせたすべり支承であり, 地震時のエネルギーは摩擦減衰と粘性減衰, および橋脚の塑性化により消費される. 摩擦減衰は面圧と変位量に, 粘性減衰は速度に依存し, 橋脚の塑性化は UPSS の設定に影響を受ける. これらの要因が複雑に関係してエネルギーが消費されるため, パラメトリックスタディによりそれぞれがエネルギーや応答に与える影響を俯瞰した. 斜面角度が小さい場合には長周期化されるため UPSS の変位は大きくなるが, 橋脚の消費エネルギーは大きく抑制される. 斜面角度が大きくなるにしたがい UPSS の変位は低減し短周期化されて入力加速度が大きくなり, 橋脚の消費エネルギーが大きくなる. さらに短周期化が進むと入力加速度が小さくなり, 特にⅢ種地盤の消費エネルギーは小さい.

**Key Words :** *Uplifting slide shoe, potential energy, energy dissipation, maximum response ductility ratio, non-linear dynamic analysis*

## 1. まえがき

反重力すべり支承 (Uplifting Slide Shoe : 以下, UPSS と呼ぶ) は図-1に示す平面すべり部と斜めすべり部で構成されたすべり支承であり, 斜めすべり部により地震時の応答を制御することができる. すなわち, 地震時の運動エネルギーは, 上部構造が斜めすべり部をすべり上がることにより位置エネルギー<sup>1)</sup>に変換され, その間に摩擦減衰エネルギーや粘性減衰エネルギーにより, 地震力が低減される. 加えて, 橋脚が塑性化する場合, 塑性エ

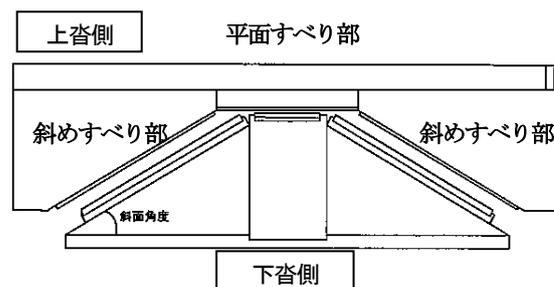


図-1 反重力すべり支承

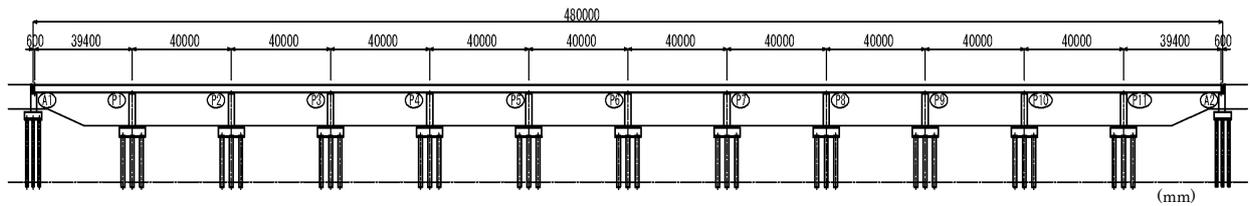


図-2 検討対象橋

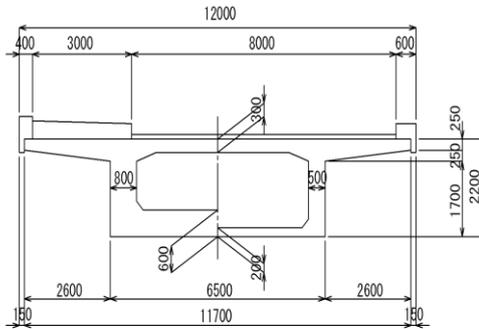


図-3 検討対象橋の上部構造の一般構造図

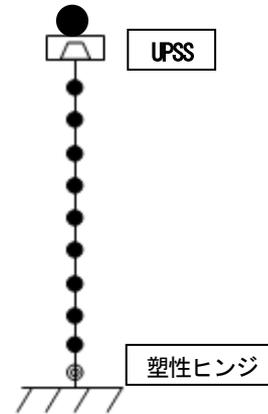


図-4 解析モデル

エネルギーにより運動エネルギーが消費される。この地震時挙動では、斜面角度により応答変位が制御されて応答周期が変化するため、入力加速度が制御されることになる。すなわち、斜面角度が小さい場合には UPSS の摩擦減衰による消費エネルギーが主体となり、斜面角度が大きくなると橋脚の消費エネルギーが大きくなる。さらに短周期化に移行すれば、入力エネルギーを低減することも可能である。本論文では、橋脚の塑性化を含めた消費エネルギーの観点から、UPSS の地震時挙動を考察した。

## 2. 解析モデルと解析条件

解析モデルは、図-2 および図-3 に示す支間 40 m、橋脚高さ 10 m の PCI2 径間連続箱桁橋<sup>2)</sup> から 1 橋脚を抜き出し、上部構造を 1 質点として支承部に UPSS を設置した図-4 に示すような離散型モデルである。橋脚躯体には弾性梁と塑性ヒンジに武田モデルを設定し、基礎を固定とした。UPSS を固定とした場合の固有周期は 0.28 sec である。

本検討で採用する UPSS は平面すべり部のない斜めすべり部のみで構成し、斜面角度は 5, 10, 15, 20, 25, 30 度、摩擦係数は 0.05, 0.10, 0.15 とした。橋脚は同橋に設定されている特性を基本とし、橋脚の降伏荷重のみ 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 倍に設定した。地震波の入力は平成 14 年度道路橋示方書に規定されているレベル 2 地震動のタイプ II の標準波<sup>3)</sup>とした。構造減衰は、支承部に 0.03、橋脚に 0.02 を見込んである。

## 3. 解析結果

本検討では、UPSS の斜面角度 (5, 10, 15, 20, 25, 30)、摩擦係数 (0.05, 0.10, 0.15)、地盤種別 (I, II, III 種)、地震波 3 波および橋脚の降伏荷重 (0.3, 0.5, 1.0, 1.5 倍) を組合せて、動的解析を行った。支承の最大応答変位および橋脚の最大応答塑性率を図-5 に示し、地震後の消費エネルギーを図-6 に示す。さらに、橋脚の降伏荷重を基本モデルと 0.3 倍とした場合について、斜面角度 5 度および 20 度に対する時刻歴消費エネルギーをそれぞれ図-7~図-10 に示す。ここで、時刻歴消費エネルギーとは、橋脚の塑性エネルギー、各部位の粘性減衰エネルギーおよび支承部の摩擦減衰エネルギーを時刻歴で累積したものである。以下に、着目項目ごとに説明を加える。

### (1) 支承の最大応答変位と橋脚の最大応答塑性率

図-5 より、斜面角度が小さくなるにしたがい支承の応答変位は大きくなり、斜面角度が大きくなるにしたがい橋脚の最大応答塑性率は大きくなるというトレードオフの関係が見られる。これは、斜面角度が大きくなると斜めすべり部の抵抗力が大きくなるためである。しかし、橋脚の応答塑性率は、斜面角度が 15 度や 20 度辺りをピークとして、斜面角度が大きくなると低下している。これは、地震波の特性に起因するものである。すなわち、斜面角度が小さい場合には長周期されるため振動系に入力される地震力が小さくなり、斜面角度が大きい場合には短周期化されて振動系に入力される地震力が小さくな

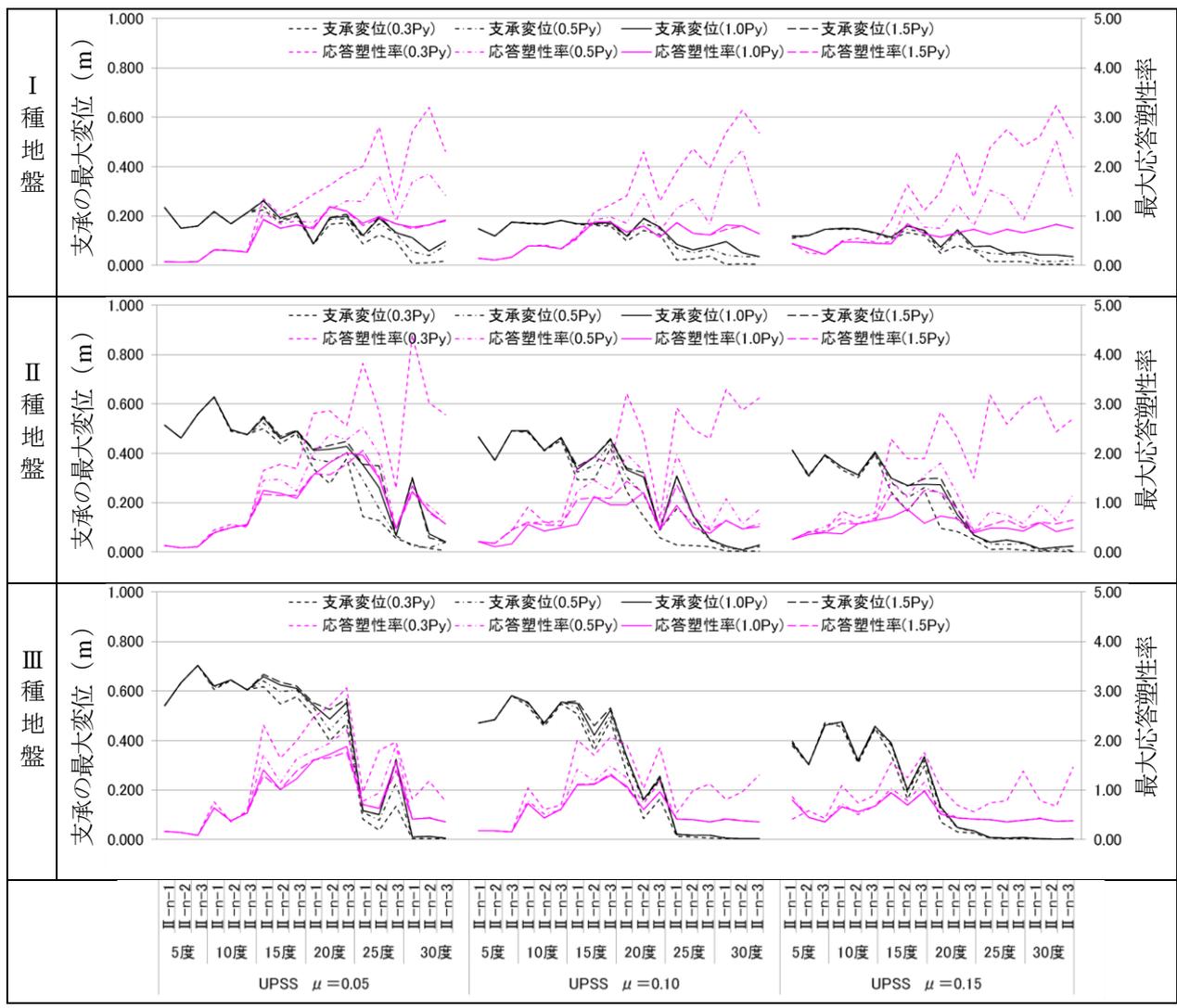


図-5 支承最大応答変位と橋脚最大応答塑性率

るためである。特に、Ⅲ種地盤で斜面角度が大きくなると、橋脚の塑性化は大きく抑制されている。逆に、Ⅰ種地盤で橋脚が塑性化する場合には、橋脚の応答塑性率が大きくなっている。

(2) 地盤種別に対する応答傾向

図-6より、橋脚の応答塑性率は、斜面角度が大きいくほど大きくなる傾向にある。これは、斜面角度が大きくなるにしたがいUPSSの応答変位が小さくなることで短周期化した影響によるものである。Ⅰ種地盤では短周期の入力加速度が大きいため、斜面角度が30度あたりでは応答が大きくなり、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤の順に25度、30度での橋脚の応答塑性率は短周期化による入力加速度の低減の影響を受けて、応答塑性率は低減する傾向にある。

この傾向を最大応答値より推定した応答周期を元に考察する。橋脚の降伏荷重を1.0Pyとして各地盤種の1波

目の標準波を用いた斜面角度、摩擦係数および地盤種別に対する応答周期を、道路橋示方書に示されているレベル2タイプⅡの地震動の標準加速度応答スペクトル $S_{II0}$ と対比して図-11に示す。この応答周期は、UPSSの最大応答変位とそれに影響する最大応答加速度から推定した1G相当の変位および橋脚の降伏剛性による変位から、道路橋示方書の固有周期の算定方法により求めたものである。同図では、斜面角度が大きくなると、応答周期は確実に小さくなっている。これは、斜面角度が大きくなると応答変位が小さくなるためである。

Ⅰ種地盤では斜面角度が大きくなるにしたがい応答周期に相当する標準加速度応答スペクトル（以下、標準スペクトルと呼ぶ）は大きくなり、斜面角度30度での応答周期は標準スペクトルが最大となる固有周期帯（0.3～0.7sec）にあるため、大きな加速度が入力されたと推定される。この結果は、図-5の斜面角度が大きくなると橋脚の応答塑性率が大きくなったことに呼応する。Ⅱ種

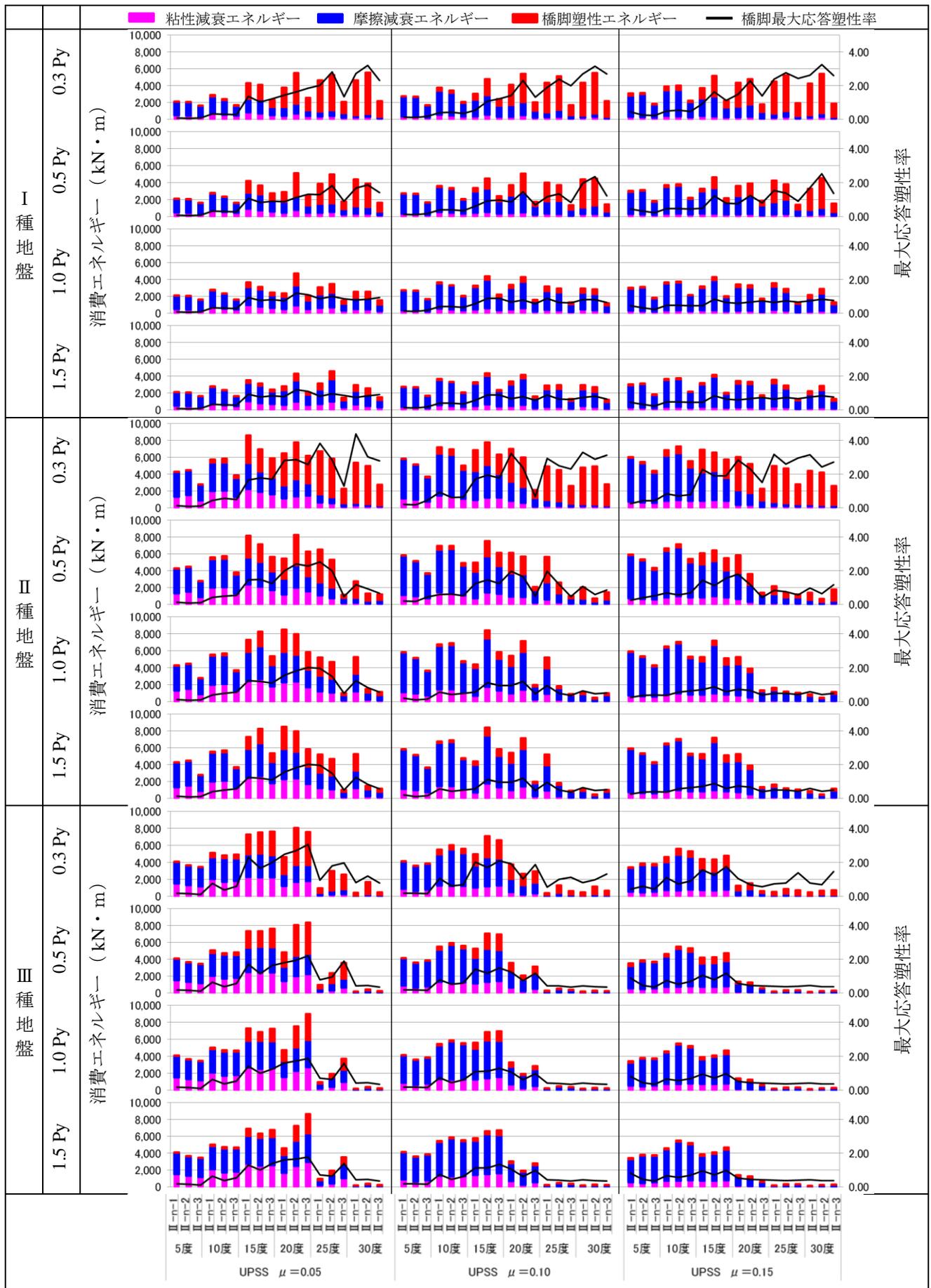


図-6 地震後の消費エネルギー

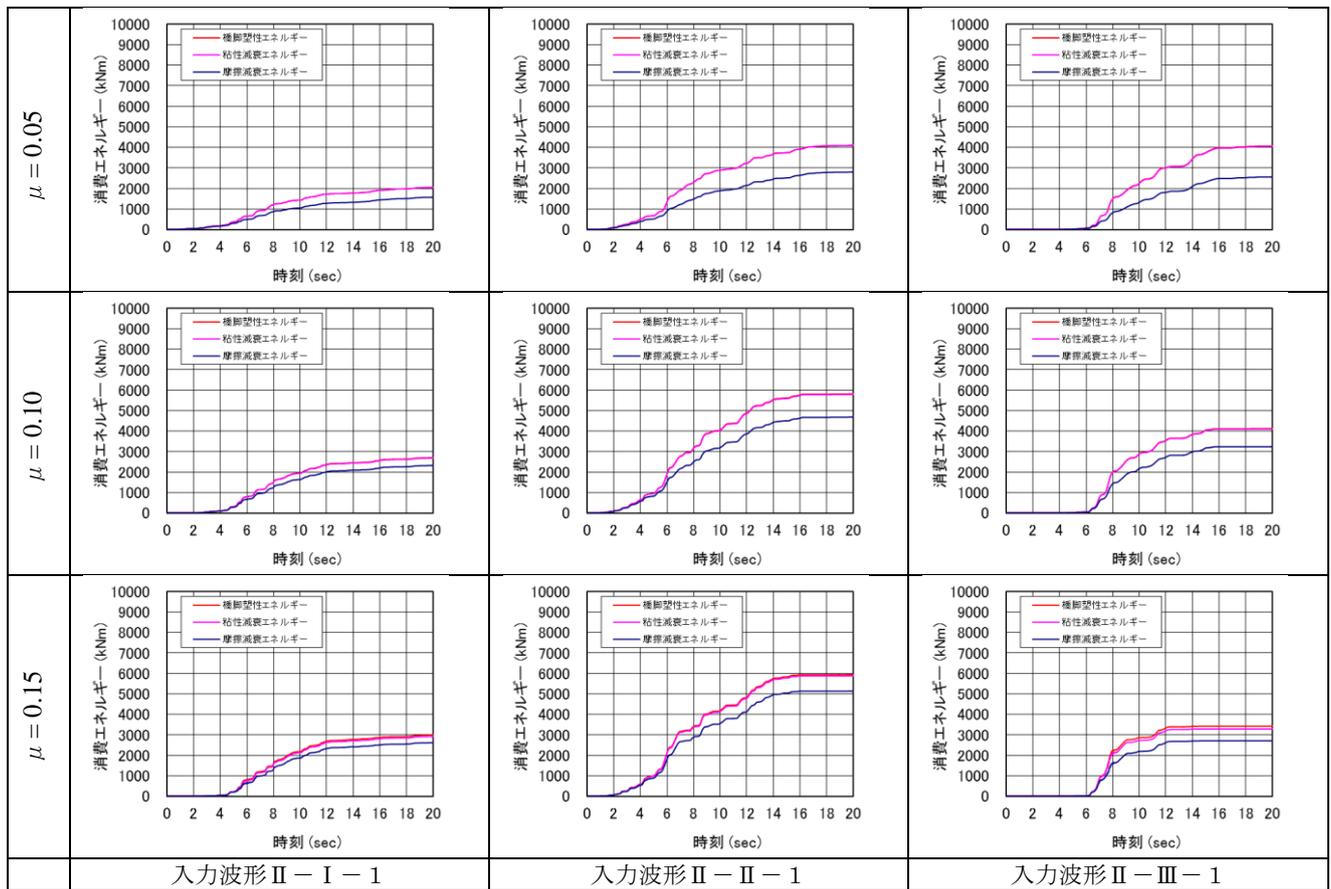


図-7 地震波による時刻歴消費エネルギー（1.0 Py モデル，斜面角度 5 度）

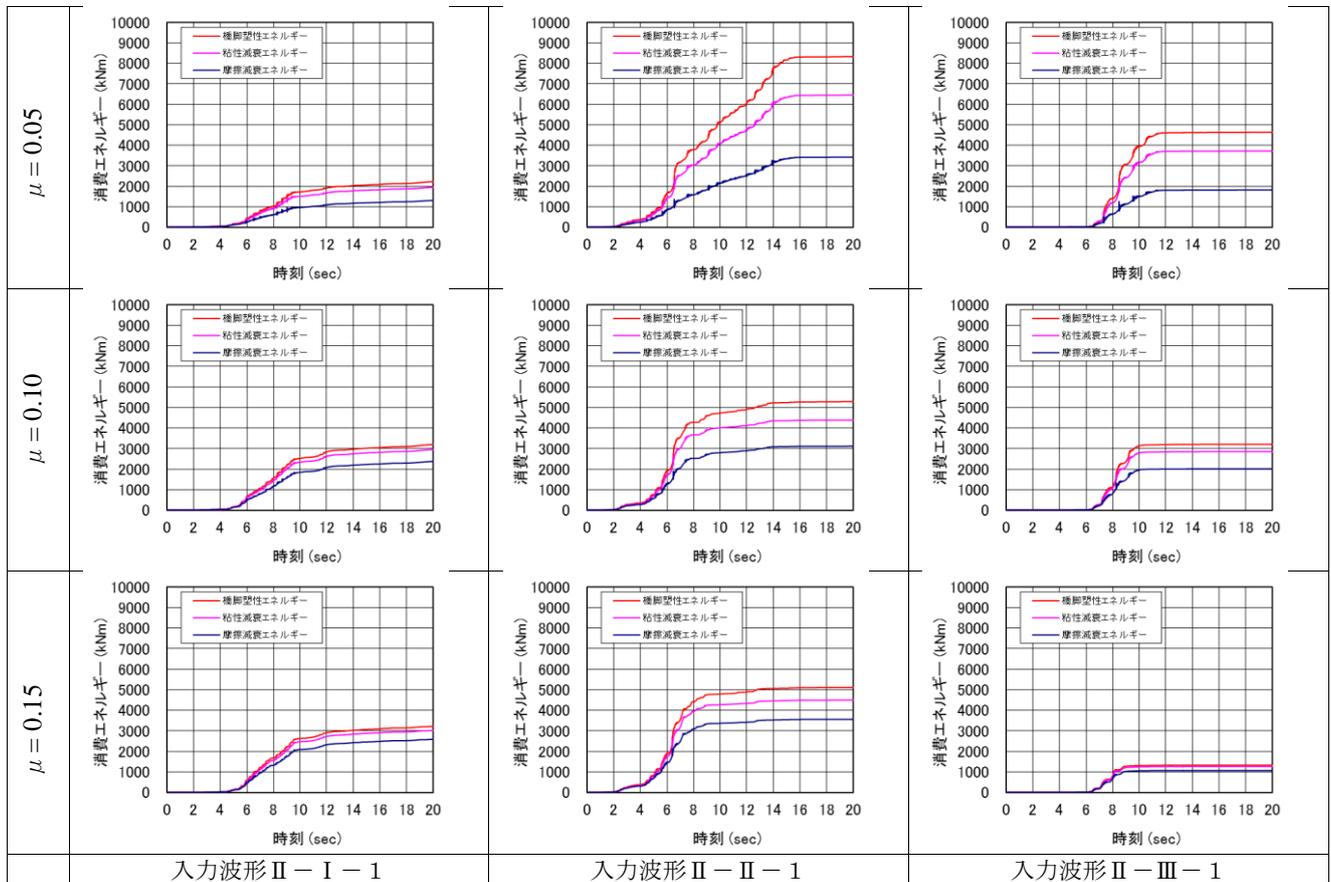


図-8 地震波による時刻歴消費エネルギー（1.0 Py モデル，斜面角度 20 度）

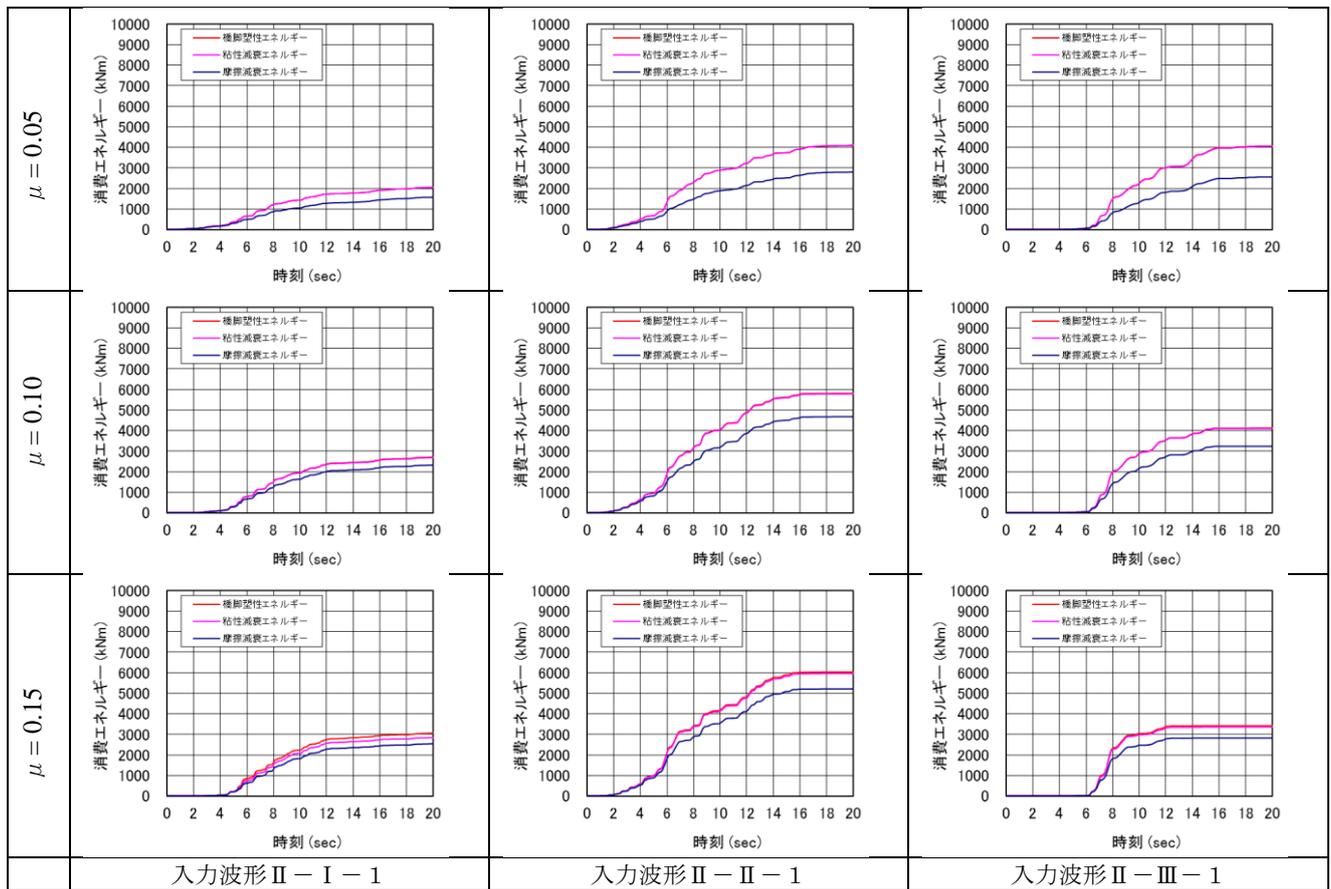


図-9 地震波による時刻歴消費エネルギー（0.3 Py モデル，斜面角度 5 度）

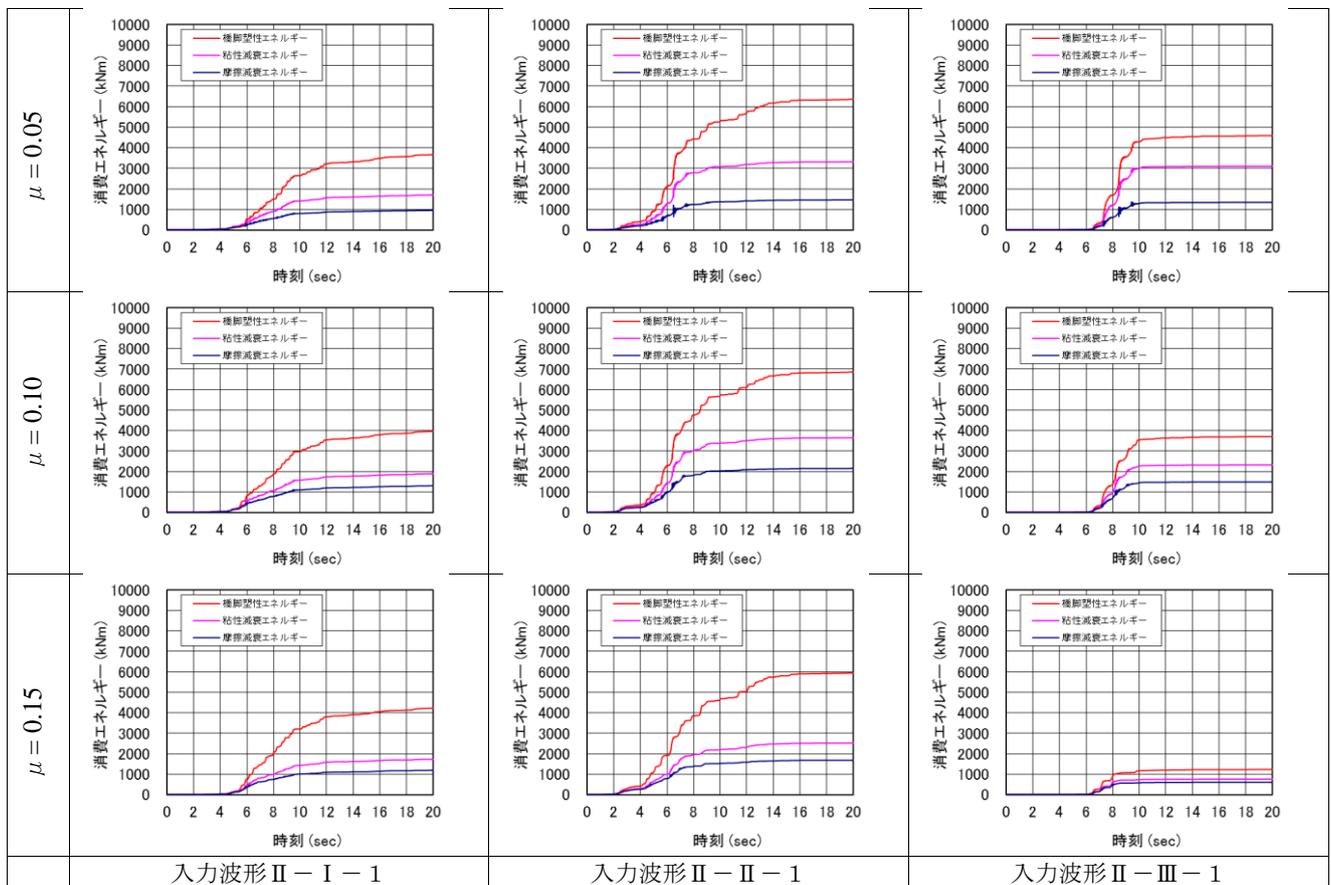


図-10 地震波による時刻歴消費エネルギー（0.3 Py モデル，斜面角度 20 度）

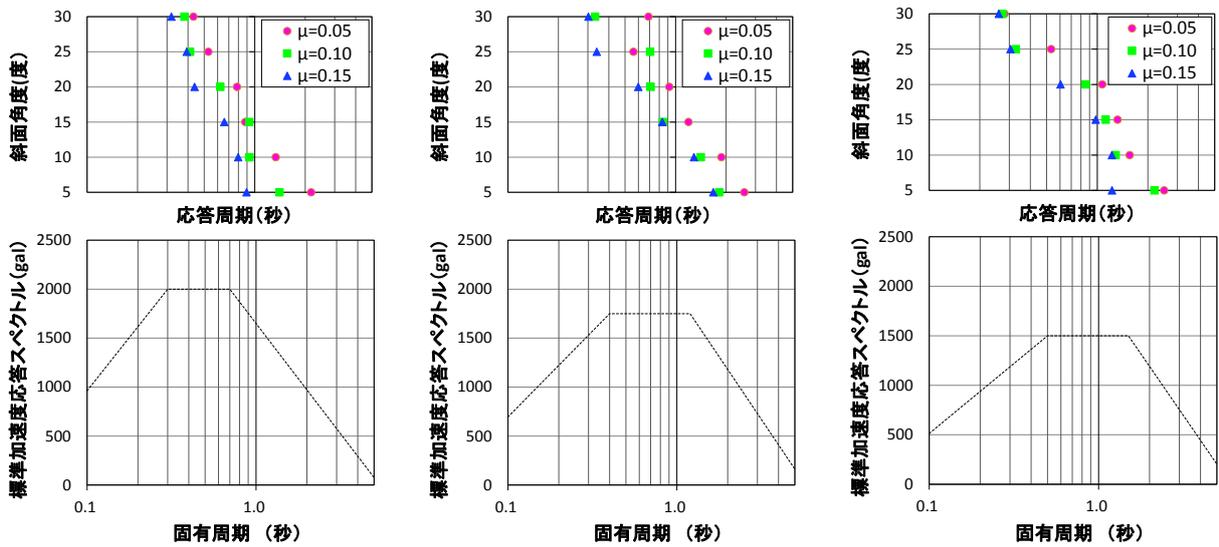


図-11 標準加速度応答スペクトル  $S_{II0}$  と応答周期

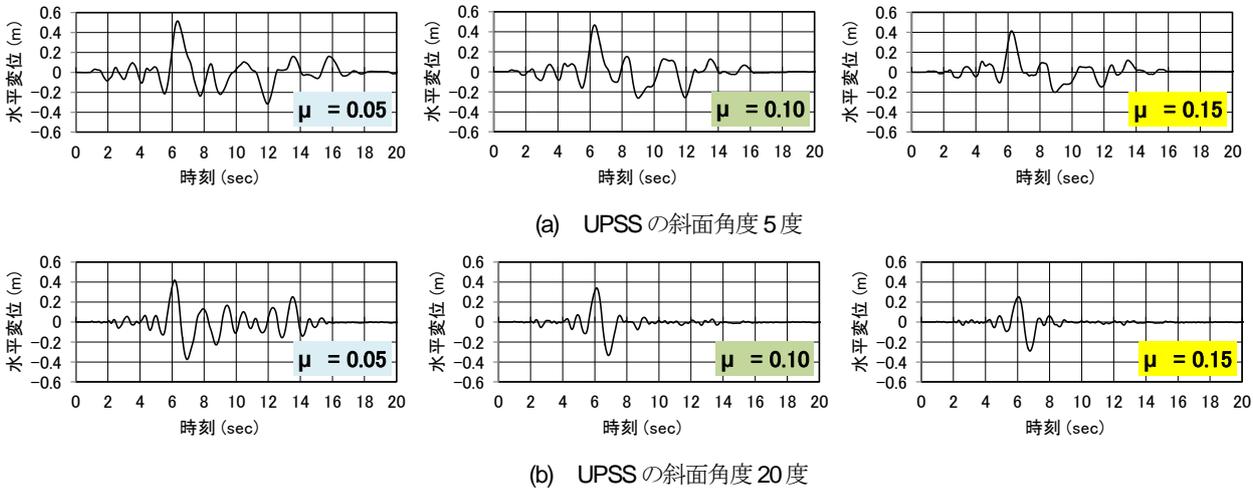


図-12 摩擦係数に対する時刻歴水平応答変位 (II-II-1)

地盤でも斜面角度が大きくなるにしたがい応答周期に相当する標準スペクトルは大きくなるものの、25度や30度での応答周期は標準スペクトルが最大となる固有周期帯(0.4~1.2 sec)より小さくなっているため入力加速度は小さくなる。この結果、橋脚の応答塑性率の発現状況では、応答周期は標準スペクトルが最大となる固有周期帯にある15度や20度より小さくなったことに呼応している。III種地盤でもII種地盤と同様な状況であるが、II種地盤に比べて25度や30度での応答周期は、標準スペクトルが最大となる固有周期帯(0.5~1.5 sec)からの低減が大きいため入力加速度の低減が大きく、橋脚の応答塑性率の発現状況は15度や20度より大きく低減したものと考えられる。

### (3) 摩擦係数による応答傾向

橋脚の消費エネルギーは任意時刻での最大値ではなく累積で示している。したがって、継続時間や大きな振幅

の振動回数等が影響するので、消費エネルギーは必ずしも最大応答値と同じ傾向ではない。消費エネルギーは図-7~図-10からわかるように、II種地盤とIII種地盤で大きい傾向にあるが、摩擦係数が0.10, 0.15と大きくなるにしたがい、消費エネルギーは斜面角度の増大と共に極端に小さくなっている。本解析の条件では、摩擦係数が大きくなっても摩擦力の増大により摩擦減衰エネルギーの累積が大きくなるわけではないようである。例えば、地震波II-II-1を入力した摩擦係数の相違による応答変位を示した図-12では、6 sec付近で発生する主要動以降の水平変位が小さくなっており、特に斜面角度20度の場合が顕著である。これは、摩擦力の増大によりすべり変位が小さくなったため、元々抵抗力の小さい5度では抵抗力の時刻変動は小さいためである。

摩擦係数による応答周期への影響は、図-12から摩擦係数が小さいほど長周期化されていることがわかる。その差の程度は地盤種別や斜面角度によって異なっており、

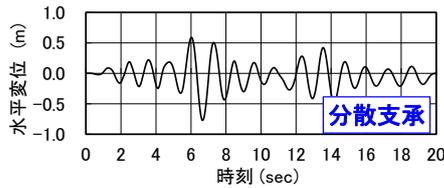


図-13 分散支承の時刻歴応答変位 (II-II-1, 1.0Py)

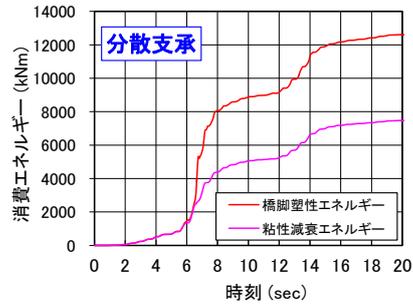


図-14 分散支承の時刻歴消費エネルギー (II-II-1, 1.0Py)

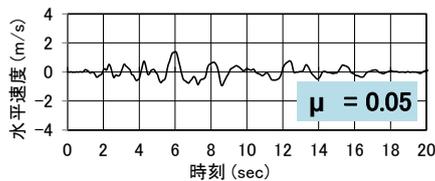


図-15 UPSS ( $\theta=20$ 度,  $\mu=0.05$ ) の時刻歴応答速度 (II-II-1)

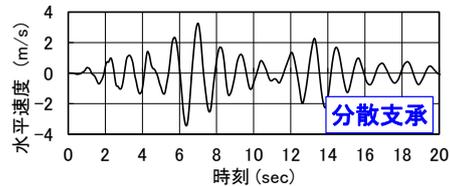


図-16 分散支承の時刻歴応答速度 (II-II-1, 1.0Py)

応答周期が標準スペクトルの最大となる固有周期帯と低減区間とにまたがっている場合に影響が大きい。これは、入力加速度の線形性が大きく損なわれているためと考えられる。

また、摩擦係数が大きいほど単位すべり長さあたりの摩擦減衰エネルギーは大きいですが、消費エネルギーの差は小さく、むしろ摩擦係数の小さい方が大きな消費エネルギーになる傾向にある。これは、摩擦係数が小さい方がすべり量が大きいことに関係している。橋脚の最大応答塑性率との関係では、I種地盤では摩擦係数の大きい方がやや大きい傾向にあるが、II種、III種地盤では摩擦係数が大きい方が橋脚の最大応答塑性率が小さくなる傾向にある。それに呼応して、消費エネルギーも摩擦係数が大きい方が小さくなる傾向にある。これは、摩擦減衰エネルギーが小さくなると橋脚の塑性エネルギーで運動エネルギーを消費するようになるためと考えられる。

#### (4) 橋脚の降伏荷重に対する応答評価

図-6より、橋脚が塑性化する場合、橋脚の降伏荷重が小さくなると橋脚の塑性化が進行しやすくなり、橋脚による消費エネルギーが大きくなっている。この結果、UPSSには力が集まりにくくなり、UPSSの消費エネルギーは小さくなる。また、斜面角度が小さくなるにしたがい橋脚は塑性化しなくなるため、全体の消費エネルギーも小さくなるが、UPSSの応答変位が大きくなるため、UPSSの摩擦減衰だけでも十分なエネルギー消費が得られるようになる。ただし、全体の消費エネルギーは斜面角度が大きくない場合には橋脚の降伏荷重に対する変動は小さくなく、橋脚の塑性エネルギーとUPSSの摩擦減衰エネルギーにトレードオフの関係が見られる。これに

対し、斜面角度が大きくなると橋脚の降伏荷重が小さい場合の方が橋脚の塑性エネルギーの増大により、全体の消費エネルギーは大きくなる傾向にあるが、これは応答周期と標準スペクトルとの関係がある。

#### (5) 時刻歴消費エネルギーに対する応答評価

図-7~10を見ると、地震動が主要動に至るまでの時刻帯では、主として摩擦減衰による消費エネルギーのみが発現し、II-II-1では2sec、II-II-2では4sec、II-II-3では6secあたりから粘性減衰および橋脚の塑性エネルギーが発現し始めている。これは、主要動に至るまでは応答速度が遅いため速度に依存する粘性減衰が小さくなること、および応答加速度が小さいため橋脚が塑性化していないためである。ただし、橋脚の降伏荷重が1.0Pyでは橋脚が塑性化に達していないケースが多いのに対し、0.3Pyの場合には多くの橋脚が塑性化し、4secより早い時刻より橋脚の塑性エネルギーが発現している。

消費エネルギーの増加速度は、地震波、UPSSおよび橋脚の条件によって異なり、橋脚1.0Py、斜面角度20度のII-II-1の場合では、摩擦係数が大きくなると消費エネルギーが早期に増加しなくなるが、同条件の斜面角度5度では顕著に現れていない。これは、5度の場合には元々長周期特性を有しているため、摩擦の影響は消費エネルギーを増大させるものの、抵抗力は小さいためすべりが継続していたためである。これに対して20度の場合には図-12のように摩擦係数が大きくなると抵抗力が大きくなり、主要動以降の質点の振動が大きく抑制されるためである。

一方、橋脚の降伏荷重を0.3Pyとした場合、橋脚が塑性化しなければ降伏荷重1.0Pyとほぼ同じ時刻歴消費エ

エネルギーの状態であるが、橋脚が塑性化する場合には橋脚の塑性エネルギーが大きくなり、全体の累積消費エネルギーも大きくなっている。ただし、UPSSの摩擦減衰エネルギーは小さくなっている。これは、橋脚が塑性化することにより、UPSSのすべり量が小さくなって摩擦減衰エネルギーは小さくなったことによると考えられる。

## (6) 分散支承との応答比較

対象橋梁に設定されている分散支承（□1,620×48 mm・5層）を用いた振動系に対して、地震波 II-II-1 を入力した時刻歴応答変位を図-13に示す。一方、図-12(b)に示した斜面角度 20 度および摩擦係数 0.05 を設定した UPSS の応答変位結果では 2 sec あたりから徐々にすべり始め、15 sec あたり以降ではほとんどすべりが生じていないのに対し、分散支承では地震直後から変形し始め、地震の継続時間にわたって振動が続いている。これは、UPSS は摩擦抵抗および摩擦減衰があるのに対し、分散支承は剛性が小さいこと、および、粘性減衰が小さいためである。このように、UPSS は分散支承に比べて耐震性は高いと言える<sup>4)</sup>。

つづいて、分散支承の時刻歴消費エネルギーを図-14に示す。分散支承では応答の低減が遅く、14 sec 辺りからも大きなエネルギー消費となっている。橋脚の塑性エネルギーも UPSS の斜面角度 20 度に比べて大きく、分散支承の耐震性には橋脚の塑性化に期待せざるをえないと考えられる。

また、UPSS および分散支承共に時刻歴消費エネルギーの約 6 sec までの状態では、粘性減衰エネルギーはほとんど発現していない。粘性減衰は応答速度に依存することから、橋脚の降伏荷重 1.0 Py における UPSS の斜面角度 20 度および分散支承の II-II-1 による応答速度を図-15 および図-16 にそれぞれ示す。両結果から、6 sec までの応答速度は小さくなっていることが確認できる。

## 5. まとめ

以上の結果より、UPSS の特徴をまとめる。

- ① UPSS の斜面角度により、UPSS の最大応答変位と橋脚の最大応答塑性率にトレードオフの関係が見られる。すなわち、斜面角度が大きくなるにしたがい UPSS の最大応答変位は小さくなり、UPSS の摩擦減衰エネルギーが主体となる。これに対し、橋脚の応答塑性率は大きくなり、橋脚の塑性エネルギーが大きくなる。さらに、斜面角度が大きい場合には入力加速度が小さくなって、橋脚の応答塑性率が小さくなる。

- ② 地盤種別により標準加速度応答スペクトルが最大となる固有周期帯が異なるため、UPSS を用いた振動系では斜面角度により応答が大きくなる応答周期が異なる。したがって、標準加速度応答スペクトルを参考に応答周期を想定し、斜面角度を選定することで耐震性を制御することができる。
- ③ 橋脚の降伏荷重が大きくなると、UPSS の変位量は大きくなり摩擦減衰エネルギーを主としてエネルギー消費する。逆に、橋脚の降伏荷重が小さくなると橋脚の塑性化が進むので UPSS の変位は小さくなり UPSS の摩擦エネルギーは小さくなるが、橋脚の塑性エネルギーは大きくなる。したがって、UPSS の変位が適正となる範囲で、橋脚に期待する塑性エネルギーを設定するのがよい。
- ④ UPSS の摩擦係数を大きくすると、UPSS の変位量は小さくなるが、摩擦減衰エネルギーは増加する。しかし、摩擦係数が大きくなると応答周期は小さくなるので、入力加速度が大きくなり、橋脚の塑性化を促進することがある。

## 6. あとがき

UPSS は斜面角度、摩擦係数、平面すべり区間などの設定により様々な耐震性を発現することができる。連続桁では支承部毎に設定することも容易であり、耐震性設定の自由度も大きい。特に、斜面角度により入力エネルギーを制御することが可能であり、塑性エネルギーを期待する橋脚上での UPSS には斜面角度を大きくし、塑性化させたくない橋脚上での UPSS には斜面角度を小さくするなど、耐震性を自在に制御することが可能である。

## 参考文献

- 1) 佐藤知明, 五十嵐晃, 松田泰治, 足立幸郎, 宇野裕恵: 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, 土木学会論文集, A1S, Vol.67, No.4, 2012.3.
- 2) 松田泰治, 宇野裕恵, 宮本宏一, 柚木浩一: 温度による桁の伸縮を考慮した橋梁の応答評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1039-1044, 2008.7.
- 3) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3.
- 4) 宇野裕恵, 二木太郎, 五十嵐晃, 白石晴子, 松田泰治, 土田 智, 足立幸郎, 佐藤知明: UPSS, 免震支承, 分散支承のエネルギーから見た特性比較, 第 67 回土木学会年次講演概要集, I-064, 2012.9

(?受付)

## EVALUATION FOR THE SEISMIC RESPONSE OF UPSS IN CONSIDERING OF PLASTICITY OF PIER ON ENERGY DISSIPATION

Tomoaki SATO, Akira IGARASHI, Taiji MATSUDA, Yukio ADACHI,  
Hiroshige UNO, Taro NIKI, Haruko SHIRAIKI and Tomo TSUCHIDA

UPSS(Uplifting Slide Shoe) is a kind of sliding bearing which is combined with level plane and inclined plane for both sides. The seismic energy is dissipated by the sliding friction, the structural damping and the plasticity of pier. In this paper, setting the inclined angle, the friction coefficient of UPSS and the yielding load of pier parametrically, the seismic behavior is investigated. As a result, it is confirmed that there is a trade-off relationship between the displacement of UPSS and the plasticity of pier. Namely, it is noticed that the larger the inclined angle, the shorter the upss displacement and the greater the plastic energy of pier. Because, the seismic behavior changes havily depending on the response period based on each ground type. Hence, it is capable to design the seismic behavior arbitrary by means of upss configuration.