UPSSを適用した橋梁における橋脚の弾塑性吸収エネルギーに基づく耐震性能の評価

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・二木 太郎⁶・白石 晴子⁷・土田 智⁸

¹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

²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

³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

⁴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

⁵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

⁶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 大阪市中央区本町4-6-7)

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

⁷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

⁸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

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, 地震時の運動エネルギーは位置エネルギーに変換されながら, 摩擦減衰, 粘性減衰および橋脚の塑性履歴減衰により消費される. 斜面角度が小さい場合には振動系は長周期化されるので摩擦減衰は大きくなるが, 橋脚の消費エネルギーは小さくなる. 逆に, 斜面角度が大きい場合には短周期化されるので摩擦減衰は小さくなるが, 橋脚の消費エネルギーが大きくなるというトレードオフの関係にある. これは, UPSSでは斜面角度により応答周期を自在に調整できることによるものであり, 本論文では, 応答周期を元に入力地震波の加速度応答スペクトルを用いて応答を評価できることを示した.

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) 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, 斜めすべり部の摺動により地震時の応答を制御する. 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げることで位置エネルギー¹⁾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は, 塑性履歴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

図-1 反重力すべり支承

周期が変化し, 応答が制御される. すなわち, 斜面角度が小さい場合の地震時挙動では UPSS の変位が大きくなり, 長周期化すると共に消費エネルギーは UPSS の摩擦減衰が主体となる. これに対し, 斜面角度が大きくなる

と UPSS の変位が小さくなり、短周期化すると共に橋脚の塑性化による消費エネルギーが大きくなる。さらに、斜面角度を大きくすれば固定支持の挙動に近づき短周期化されるため、標準応答加速度スペクトル³⁾からわかるように、応答加速度が低減される。本論文では、橋脚の塑性化による消費エネルギーを考慮して、UPSS の地震時挙動を考察した。

2. UPSSを適用した橋梁の基本的挙動

(1) 消費エネルギーの算定手法

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り、それぞれは式(1)～(3)で与えられる。

橋脚の塑性エネルギー

$$E_p = \int \int M d\phi dh \quad (1)$$

粘性減衰エネルギー

$$E_c = \int cv dx \quad (2)$$

摩擦減衰エネルギー

$$E_f = \int f N d\delta \quad (3)$$

ここで、

E_p : 橋脚の塑性エネルギー (kN/m)

E_c : 粘性減衰エネルギー (kN/m)

E_f : 摩擦減衰エネルギー (kN/m)

M : 橋脚基部の曲げモーメント (kN・m)

ϕ : 橋脚基部の曲率 (1/m)

h : 橋脚高さ方向の座標の変数 (m)

c : 粘性減衰係数 (kN・sec/m)

v : 応答速度 (m/sec), x : 応答変位 (m)

f : 摩擦係数, N : 面圧 (kN/m²)

δ : すべり量 (m)

図-2 橋脚の履歴モデル (武田モデル)

なお、橋脚の塑性エネルギーとは、図-2 に示すような武田モデルで表される履歴による消費エネルギーである。粘性減衰エネルギーとは、上部構造および橋脚の粘性減衰による消費エネルギーである。また、摩擦減衰エネルギーとは、UPSS の平面および斜めすべり時の面圧に依存する摩擦減衰による消費エネルギーである。

(2) UPSSの基本履歴特性

UPSS の斜めすべり状態における静的挙動時には図-3 に示すような力のつり合いとなり、水平抵抗力は式(4)により与えられる。すなわち、UPSS の履歴は斜面角度に起因する位置エネルギーに大きく依存するので、幾何学的に履歴が決定される。これに摩擦力が累加されることで図-4 に示すような UPSS の静的な履歴が設定される。なお、斜めすべり状態での抵抗力は一定である。

$$F_h = W \tan \theta + fW \quad (4)$$

ここに、

F_h : 水平抵抗力 (kN)

W : 質点重量 (kN)

θ : 斜面角度 (度)

f : 摩擦係数

動的挙動時は、厳密には斜めすべり面で応答加速度の変動により面圧が変動するため、摩擦力が変化する。このため、図-5 のような力のつり合い状態となり、水平抵抗力と鉛直抵抗力は式(5)および式(6)の形になる。したがって、水平抵抗力と鉛直抵抗力の関係は式(7)のように、斜面角度 θ と摩擦係数 f により一義的に決定される。この場合、UPSS の動的な履歴は図-6 に示されるようになり、面圧が大きくなると摩擦力が大きくなるため、変位の増大と共に摩擦力が小さくなり抵抗力が低減する。さらに、平面すべりから斜めすべりに移行する時点で変位方向が急激に変化するため、同図の三角形部分のような衝撃力が発現する。このように、UPSS の履歴は地震波の特性や振動系の構造特性に影響を受けるため、時刻歴応答解析を行わなければ動的挙動時の履歴を特定することができない。

水平抵抗力

$$F_h = N \sin \theta \pm f N \cos \theta \quad (5)$$

鉛直抵抗力

$$F_v = N \cos \theta \mp f N \sin \theta \quad (6)$$

水平抵抗力と鉛直抵抗力の関係

$$\frac{F_h}{F_v} = \frac{\sin \theta \pm f \cos \theta}{\cos \theta \mp f \sin \theta} \quad (7)$$

図-3 UPSS斜面方向の静的つり合い

図-5 UPSSの動的つり合い

図-4 UPSSの静的履歴基本形状

図-6 UPSSの動的履歴基本形状

ここに,

F_h : 水平抵抗力 (kN)

F_v : 鉛直抵抗力 (kN)

N : すべり面の垂直抗力 (kN)

θ : 斜面角度 (度)

f : 摩擦係数

また、地震時挙動の比較対象のために分散ゴム支承を用いた場合についても同条件で解析を行った。履歴形状の対比のため、図-4 および図-6 に分散ゴム支承の履歴形状も併記する。

3. 解析モデルと解析条件

解析モデルは、分散ゴム支承を適用した図-7および図-8に示す支間 40 m, 橋脚高さ 10 m の PC12 径間連続箱桁橋²⁾ から 1 橋脚とそれが支持する上部工質量を取り出し、上部構造を 1 質点として支承部に UPSS を設置した図-9 に示す離散系モデルである。橋脚躯体には弾性梁を、塑性ヒンジには武田モデルを設定し、基礎を固定とした。UPSS を固定支承に替え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、図-10 に示すような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

表-1 解析条件

UPSSの斜面角度 θ	5, 10, 15, 20, 25, 30 度
摩擦係数 f	0.05, 0.10, 0.15
地盤種別	I, II, III 種
地震波形	レベル 2 地震動タイプ II の各地盤種別に対する 3 波
橋脚の降伏荷重	設計値に対して 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 倍

5, 10, 15, 20, 25, 30 度、摩擦係数は 0.05, 0.10, 0.15 とした。橋脚は文献²⁾ に示されている同橋の特性を基本とし、橋脚の降伏荷重のみ 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 倍に設定した。入力地震波は平成 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³⁾ とした。これらの解析条件を表-1 にまとめた。構造減衰は、上部構造に 0.03, 橋脚に 0.02 を見込んでいる。

一方、分散ゴム支承は、平面寸法 1,620 × 1,620 mm, 総ゴム層厚は 48 mm を 5 層であり、橋脚上に 2 基設置した。このばね定数は 26,244 kN/m である。ここで、本解析に用いた UPSS と分散ゴム支承の特性の差異を把握するため、摩擦を考慮しない UPSS の静的履歴および分散ゴム支承の履歴を図-11 に示す。同図のように UPSS の抵抗力は斜面角度により最大抵抗力は一定となり、変位が大きくなると分散ゴム支承に比べて小さな抵抗力となる。

図-7 検討対象橋

図-8 検討対象橋の上部構造の一般構造図

図-9 解析モデル

図-10 検討に用いたUPSS例(平面すべりなし)

図-11 対象UPSSの静的履歴形状

エネルギーを図-13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-14～図-17に示す。以下に、応答結果を考察する。

(1) 支承の最大応答変位と橋脚の最大応答塑性率

図-12より、斜面角度が小さくするにしたがい支承の応答変位が大きくなり、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度あたりをピークとして、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応答変位が大きくなって長周期されるため応答加速度が小さくなり、斜面角度が大きい場合には短周期化されるため応答加速度が大きくなるためである。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るが、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。

4. 解析結果

本検討では、表-1に示すUPSSの斜面角度、摩擦係数、地盤種別、地震波3波および橋脚の降伏荷重を組合せて、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-12に示し、地震後の消費エ

(2) 地盤種別に対する応答傾向

橋脚の応答塑性率は、図-12および図-13より斜面角度が大きい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って短周期化したことによるものである。Ⅰ種地盤では

図-12 支承最大応答変位と橋脚最大応答塑性率

短周期領域での応答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応答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。

この傾向を応答周期より考察する。ここで、応答周期は上部構造の応答変位から推定する。一般に、応答周期は上部構造の時刻歴応答変位から求められるフーリエスペクトルにより求めることができる。分散ゴム支承のような図-18(a) で表される線形のばねを有する振動系では、フーリエスペクトルで特定の周期が卓越するので固有周期を明快に求めることができるが、免震支承のような図-18(b) で表されるバイリニアのばねを有する場合には、応答変位と応答抵抗力が変化が異なるため等価剛性が変化し、フーリエスペクトルで卓越する周期帯に幅をもつため、明確な応答周期は得られにくい。これに対し、UPSS の基本的な履歴は図-18(c) で表されるように変位に対する抵抗力が一定となる極めて非線形の高い履歴

であるため、応答変位に対する等価剛性の変化は免震支承よりも大きく、フーリエスペクトルで卓越する周期帯に大きな幅を持ちやすくなる。このため、フーリエスペクトルから固有周期を推定することは難しい。例えば、橋脚の降伏荷重 1.0 Py、摩擦係数 0.05、斜面角度 20 度の UPSS に II 種地盤の地震波 II-II-1 を入力した場合の上部構造の時刻歴応答変位波形は図-19 のようであり、そのフーリエスペクトルは図-20 のようになる。図-20 には応答周期を破線で示した。

応答周期の算定は、得られた時刻歴応答解析結果を元に 10 個のピーク変位における変位と抵抗力の値を用いて等価剛性を算出し、道路橋示方書³⁾の手法に基づき求めたものである。これより、最大応答変位を用いて推定した応答周期 (図中、太破線) は約 0.92 秒となり、フーリエスペクトルに現れている 1 つめの卓越周期 0.97 秒と近い値を示した。しかし、細破線で示される最大応答変位以外の極値の応答変位から推定される応答周期については、フーリエスペクトルの卓越周期 (1.3 秒, 1.7 秒)

図-13 地震後の消費エネルギー

図-14 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-15 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-16 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-17 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-18 分散ゴム支承, 免震支承, UPSS の履歴形状例と等価剛性

とは一致しない。また, 最大応答変位を 70 %に低減して固有周期を求めることも考えられるが, ここでは全体の振動状態に着目するのではなく, 最大応答変位に着目しているため, 最大応答変位から推定される固有周期を用いた⁹⁾。

橋脚の降伏荷重を 1.0Py として斜面角度, 摩擦係数および地盤種別毎に標準波の第一波目を入力して得られた最大応答変位 ($\delta_{\max}$) から算定される応答周期を, 道路橋示方書に示されているレベル 2 タイプ II 地震動の標準加速度応答スペクトル S_{II0} と並べて図-21 に示す。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。

つづいて, 図-21 に示した応答周期をもとに標準加速度応答スペクトルを算定し, 図-22 に整理した。図-21 および図-22 より, 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は大きくなり, 斜面角度 30 度での応答周期は標準加速度応答スペクトルが最大となる固有周期帯 (0.3~0.7 sec) 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-12 に示されているように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加速度応答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加速度応答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応答加速度は小さくなる。この結果, 橋脚の応答塑性率は, 応答周期が標準加速度応答スペクトルの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

図-19 上部構造の時刻歴応答変位
(1.0Py, $\theta=20$ 度, $f=0.05$, II-II-1)

---: 正側極大時, ---: 負側極大時, - - - : 最大変位時
図-20 応答変位のフーリエスペクトルと極値上部構造応答変位から推定した応答周期
(1.0Py, $\theta=20$ 度, $f=0.05$, II-II-1)

べて 25 度や 30 度での応答周期は, 標準加速度応答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応答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。これらは, 斜面角度を大きくすると UPSS の変位が小さくなることで短周期化し, 応答周期は固定とした場合の固有周期 0.28 sec に近づくが, I 種地盤では 0.30 sec より短周期しにくいものの, II 種地

図-21 標準加速度応答スペクトル S_{II0} と応答周期 (1.0Py)

図-22 応答周期をもとに算定した標準加速度応答スペクトル (1.0Py)

盤では 0.4 sec, III種地盤では 0.4 sec より短周期に設定できていることを意味するものである。

(3) 摩擦係数による応答傾向

橋脚の消費エネルギーは、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にはならない。消費エネルギーは図-14～図-17 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必ずしも大きくなるわけではないようである。例えば、図-14 の地震波 II-I-1 を入力した時刻歴消費エネルギー結果では、摩擦係数 0.10 で摩擦減衰エネルギーが最も大きくなっている。また、図-23 の地震波 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、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応答加速度が小さい時間帯ではすべり変位

が極端に小さくなり、摩擦減衰エネルギーの累積は必ずしも大きくならないことによる。

摩擦係数による応答周期への影響は、図-23 から時刻歴応答変位波形に大きな差異はないが、摩擦係数が小さいほど応答変位が大きくなっていることから、長周期化されていると類推できる。また、応答変位は地盤種別や斜面角度によっても異なり、応答周期が標準スペクトルの最大となる固有周期帯近傍となっている場合に影響が大きい。これは、UPSS を用いた振動系では履歴特性に線形性はなく、応答周期は応答変位に応じて変化することから、こうした場合には応答変位が大きくなり、みかけの応答周期が長くなったためであると考えられる。

一方、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、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を発現する傾向にある。これは、摩擦係数が小さい方がすべり量が大きくなるためである。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

図-23 摩擦係数に対する時刻歴水平応答変位 (1.0Py, II-II-1)

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、橋脚の塑性エネルギーが運動エネルギーを消費するようになると、摩擦減衰エネルギーが小さくなるためである。

(4) 橋脚の降伏荷重に対する応答評価

図-13 より、橋脚が塑性化する場合、橋脚の降伏荷重が小さい場合には橋脚の塑性化が進行しやすくなるので、橋脚による消費エネルギーが大きくなる。この結果、UPSS には慣性力が集まりにくくなり、UPSS による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と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 による摩擦減衰が大きくなる。これは、応答周期の影響を強く受け、応答周期が標準加速度応答スペクトルの大きい周期帯近傍であると応答変位が大きくなるので、全体の消費エネルギーは大きくなる。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の影響は小さくなく、橋脚の塑性エネルギーと UPSS の摩擦減衰エネルギーの間には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には橋脚の塑性化が進行し、全体の消費エネルギーは大きくなる傾向にある。これは、UPSS の応答変位が小さくなることにより短周期化され、応答周期が標準加速度応答スペクトルの最大となる周期領域付近の値となるためである。

(5) 時刻歴消費エネルギーに対する応答評価

図-14~17 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 2 sec, II-II-2 では 4 sec, II-II-3 では 6 sec 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 1.0 Py 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、0.3 Py の場合には多くの橋脚が塑性化し、4 sec 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 1.0 Py, 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-23 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 0.3 Py とした場合、橋脚が塑性化しなければ降伏荷重 1.0 Py とほぼ同じ時刻歴消費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) 分散ゴム支承との応答比較

対象橋梁に設定されている分散ゴム支承を用いた振動系²⁾に対して、地震波 II-II-1 を入力した時刻歴応答変位を図-24 に示す。最大応答変位は、図-23 (b) と比べると斜面角度 5 度程度の UPSS とほぼ同じであり、図-11 からわかるように分散ゴム支承の方が UPSS より相当大きな抵抗力を発現していることを考えると、UPSS の方が

図-24 分散ゴム支承の時刻歴応答変位 (1.0Py, II-II-1)

図-26 UPSS ($\theta=20$ 度, $f=0.05$) の時刻歴応答速度 (II-II-1)

図-25 分散ゴム支承の時刻歴消費エネルギー (1.0Py, II-II-1)

図-27 分散ゴム支承の時刻歴応答速度 (1.0Py, II-II-1)

有効性が高いと言える。

一方、図-23(b)に示した斜面角度 20 度、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、分散ゴム支承では地震直後に変形し始め、地震の継続時間にわたって顕著な振動が続いている。これは、UPSS は摩擦抵抗することおよび摩擦減衰を発現することにより、上部構造慣性力が小さくなると変位しにくくなるのに対し、分散ゴム支承は剛性が線形でありかつ粘性減衰が小さいため、上部構造慣性力が小さくても変位しやすいためである。このように、UPSS は分散ゴム支承に比べて耐震性は高いと言える⁴⁾。

つづいて、分散ゴム支承の時刻歴消費エネルギーを図-25に示す。分散ゴム支承では応答の低減が遅いため、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、分散ゴム支承の耐震性には橋脚の塑性化に期待せざるをえない。

また、UPSS および分散ゴム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 度および分散ゴム支承の II-II-1 による応答速度を図-26 および図-27 にそれぞれ示す。両結果から、6 sec までの応答速度は小さいことが確認できる。

5. まとめ

以上の結果より、UPSS の特徴をまとめる。

- ① UPSS の斜面角度が小さい場合には UPSS の応答変位が大きくなって長周期され、橋脚が塑性化しにくくなるので、UPSS の摩擦減衰エネルギーにより多くの運動エネルギーが消費される。これに対し、斜面角度が大きくなると UPSS の応答変位が小さくなって短周期化され、橋脚の塑性化が進展するので、橋脚の塑性エネルギーにより多くの運動エネルギーが消費される。また、斜面角度を大きくなると固定支持に近づくことにより、大きく短周期化されることにより、特にⅡ種地盤やⅢ種地盤では応答加速度が低減されるので、橋脚の塑性化が抑制される。
- 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設定し、斜面角度を適切に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塑性化しにくくなるため、UPSS に上部構造慣性力が集まりやすくなる。そのため、上部構造の応答変位量が大きくなることで、主として摩擦減衰エネルギーにより運動エネルギーを消費することになる。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 に上部構造慣性力が集まりにくくなるため、変位量が小さくなることで UPSS の摩擦エネルギーは小さくな

るが、橋脚に上部構造慣性力が集まるため塑性エネルギーにより運動エネルギーを消費する傾向にある。したがって、UPSSの変位が適正で、橋脚の塑性化が適切となる範囲で斜面角度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傾向にある。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、応答加速度が大きくなり、橋脚の塑性化を促進することに留意を要する。

6. あとがき

UPSSは斜面角度、摩擦係数、平面すべり長などの設定により様々な耐震性に設定することができる。連続桁では支承部毎にUPSSの仕様を設定することも容易であり、耐震設計の自由度も大きい。特に、斜面角度の調整により入力エネルギーを制御することが可能であるので、塑性エネルギーを期待する橋脚上のUPSSの斜面角度を大きくし、塑性化させたくない橋脚上でのUPSSの斜面角度を小さくするなどにより、耐震性を制御することが

可能である。適用状況に応じたUPSSの選定における具体的なパラメータの決定については、今後検討を進める予定である。

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 A1(構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, pp. L660-L671, 2012
- 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
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002
- 4) 佐藤知明, 五十嵐晃, 松田泰治, 足立幸郎, 宇野裕恵, 二木太郎: UPSS 支承の消費エネルギーによる耐震性のパラメータ評価, 第 67 回土木学会年次講演概要集, I-065, 2012
- 5) 宇野裕恵, 松田泰治, 麻生稔彦, 田中健司, 池田利徳: 上下部構造の位相差に着目したゴム支承の設計に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 599-610, 2003

(2012.11.16 受付, 2013.2.8 修正, 2013.2.23 受理)

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF UPSS IN TERMS OF ENERGY DISSIPATION CONSIDERING NONLINEAR PIER RESPONSE

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

UPSS (Uplifting Slide Shoe) is a kind of sliding bearing which is combined with a horizontal plane and inclined planes on both sides. The seismic energy is dissipated by the sliding friction, the structural damping and the hysteresis energy dissipation of the pier. In this paper, influence of the inclined angle, the friction coefficient of UPSS and the yielding load of the pier to 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 response ductility factor of the pier. Namely, it is observed that the larger the inclined angle, the shorter the UPSS displacement and the greater the absorbed energy of the pier. The reason is that the seismic behavior changes heavily depending on the response period for each ground type. This finding can be used to design appropriate UPSS configuration based on the target seismic behavior.