

UPSS 支承と制震ダンパーの組み合わせ系 による橋梁の地震応答の制御

白石晴子¹・五十嵐晃²・足立幸郎³・宇野裕恵⁴・加藤祥久⁵・佐藤知明⁶

¹京都大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 修士課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: haruko.s@kes7.ecs.kyoto-u.ac.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 (同上)

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

³阪神高速道路(株) 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

⁴オイレス工業(株) 免制震技術部 部長 (〒108-0075 東京都港区港南1-6-34)

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

⁵阪神高速道路(株) 保全交通部保全企画課 (〒541-0056 大阪府中央区久太郎町4-1-3)

E-mail: yoshihisa-kato@hanshin-exp.co.jp

⁶JIPテクノサイエンス(株) 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

多径間連続橋用の支承に要求される、常時の温度伸縮などによる不静定力の緩和、地震時水平力の分散および水平変位応答の抑制の機能を備えた支承として提案されている反重力すべり支承 (UPSS 支承, Uplifting Slide Shoe) に制震ダンパーを併用した系について検討を行った。上部構造の水平方向のエネルギー吸収に加え、鉛直運動に伴うエネルギー吸収機構を付与することで、同じ水平変位量の制約の中で最大水平荷重の増加を避けながら、高いエネルギー吸収性能を得ることで、地震応答の制御が容易となると考えられる。橋梁モデルを用いた弾塑性応答の時刻歴解析により、UPSS 支承-ダンパー組合せ系の効果を確認した。さらに、効果的な応答制御効果を得るためのパラメータの設計条件に関する仮説を提示し、その妥当性を示した。

Key Words : *Uplifting slide shoe, slide bearing, seismic design, seismic damper, optimal design, friction*

1. 序論

近年では走行性の向上、騒音問題の解消、維持管理コストの低減等の理由から橋桁から伸縮装置の数を減じた多径間連続橋が多く建設されている。この構造においては、地震時に上部工水平反力が特定の橋脚に集中しないよう支承条件を工夫する必要性や、常時の温度変化による桁の伸縮の影響を小さくする必要があることが指摘されている。現在、多くの橋梁で採用されている反力分散支承や免震支承は、このような問題点による影響を緩和しているが、こうした長周期化を伴う支承を採用した橋梁は、一般に橋桁の大変位を伴う構造であり、大型の伸縮装置が必要となる。伸縮装置の大型化は維持管理上の弱点となることが指摘されている。

これらの問題を受け、多径間連続橋用の支承とし

て UPSS (Uplifting Slide Shoe—反重力すべり支承) が提案されている¹⁾。UPSS 支承は通常のすべり支承の両端部に勾配を設けた構造であり、過度の水平変位を抑制し、伸縮装置の大きさを縮小することが可能であると考えられている。UPSS 支承の研究としては、以下のもの挙げられる。五十嵐ら²⁾は、UPSS 支承を有する橋梁上部工モデルを用いて、振動台による動的載荷試験を行うことにより、UPSS 支承の動的挙動を検討した。宇野ら³⁾は UPSS 支承をすべり面に垂直なバネと水平なバネによってモデル化できることを示した。足立ら⁴⁾は、鋼 3 径間連続非合成鈹桁橋を対象に、UPSS 支承の斜面角度を変えて応答計算を行った。その結果、斜面角度が大きくなるにしたがって、上部構造の水平変位は小さくなり、橋脚の応答塑性率は大きくなることを示した。

UPSS 支承は様々な利点を有していると考えられるが、減衰性能を陽に期待しない構造であるため、ダンパーの付加によるエネルギー吸収性能の増加により、本来の目的である橋梁の地震応答の制御の観点からの設計が容易となると考えられる。そこで本研究では、地震時性能の向上と応答制御のため、UPSS 支承と制震ダンパーを併用したシステムを考案した。すべり面設計形状や摩擦係数のパラメータによって応答を制御する UPSS 支承へのダンパーの導入によりもたらされる特性の定量化について検討し、ダンパー抵抗力および UPSS 支承のパラメータの、橋梁の地震時性能から見た最大発揮性能について考察した。

2. UPSS 支承とダンパーの組合せ

(1) 多径間連続橋に要求される地震時性能

多径間連続橋には、常時の温度伸縮などによる不静定力の緩和、地震時水平力の分散などの機能を備えた支承が要求される。また、多径間連続橋において上部工・橋桁を支持する橋脚が、地震時において要求される耐震性能を保持することが、橋としての地震時性能を確保する上で大きな割合を占める。耐震性能の確保のためには、最大塑性率を許容塑性率以内に抑える必要があり、そのためには支承を介した桁から作用する水平力を低減することが望ましいと考えられる。水平力の低減のためには、大地震時の桁の動的応答（加速度）を小さくすることと、支承が橋脚に伝達する水平力そのものが小さくならないような工夫を行うという 2 つの考え方が有効であり、前者の目的のためには、減衰性能をエネルギー吸収の形で与える機能を付与する制震の方法論が効果的である。

(2) UPSS 支承の構造

多径間連続橋用の支承として提案されている UPSS 支承は図-1 に示すように、水平すべり面の両端に斜面部を設けた構造をしており、下査のそれぞれの面に PTFE 製の摩擦材が設置されており上査のステンレス鋼板との間ですべりを生じる機構となっている。常時は上査と下査は水平面部で接触しているため、一般的なすべり支承と同様に、温度変化による伸縮等の常時摺動を許容することができる。一方、地震時に大変位を生じた際には上査の斜面部が

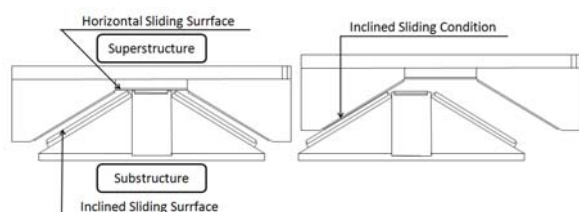


図-1 UPSS 支承

下査の斜面部に衝突して乗り上げ、水平方向の反力を生じるため、過度の水平変位を抑制することが可能である。

なお、図-1 に示すように、水平面部と斜面部がなす角度を“斜面角度”と呼び、すべり支承の中心位置から斜面に達するまでの長さを“クリアランス”と呼ぶこととする。

(3) UPSS 支承—制震ダンパー系の概念と目的

UPSS 支承は、多径間連続橋において常時と地震時に要求される性能を備えた支承であるが、減衰性能を陽に期待しない。そこで、UPSS 支承に制震ダンパーを併用することにより地震応答の制御が容易となると考えられる。通常の支承を用いる場合、上部構造は水平方向のみに運動することが前提となるが、UPSS 支承はすべり面に傾斜のある独特のすべり面形状を持ち、上部構造に鉛直方向の運動量を生じさせることが特徴である。そのため、鉛直運動に伴うエネルギー吸収機構を付与することで、同じ水平変位量の制約の中で最大水平荷重の増加を避けながら、高いエネルギー吸収性能を得る可能性が期待される。一般的にはダンパーは橋桁と橋脚頂部の間に水平方向に配置するが、UPSS 支承の場合はこの目的のためダンパーの配置の仕方として、様々な角度での配置が考えられる（図-2）。

そこで本研究では、UPSS 支承にダンパーを水平方向に配置した場合と鉛直方向に配置した場合の単純化した代表的な 2 つのパターンにおいて、その復元力特性や履歴エネルギー吸収性能がどのように変化するかを考察し、数値解析による検討を行った。

3. UPSS 支承—ダンパー系の力学的定式化

(1) 定式化の方針

UPSS 支承のすべり面形状やダンパーの抵抗力の設計を考える上で、UPSS 支承が発揮する支承反力や、UPSS 支承にダンパーを組み合わせた場合に想定される復元力について考察し、その特性を明らかにすることが重要である。UPSS 支承のすべり挙動は、図 2.5 に示す簡易力学モデルによっても表現できる。以下では、この簡易モデルを基に考察する。また、UPSS 支承は左右対称の構造であるので、水平方向の復元力は右側斜面と左側斜面で符号が逆に

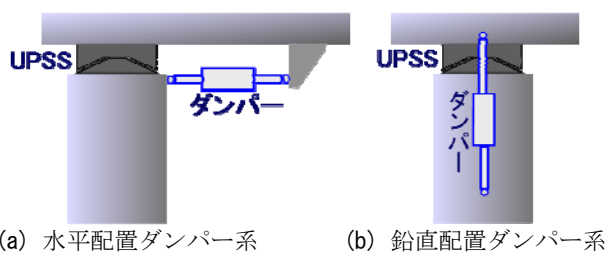


図-2 UPSS 支承 - 制震ダンパー系

なり、鉛直方向の復元力は右側斜面と左側斜面で等しくなる．そこで以下では、質点が水平面上と側斜面上にある場合のみについて考察する．

支承の水平復元力等は、動的なつり合いにより定式化した．この際、すべり面の垂直抗力や上部構造の加速度が未知数となるが、これらを力学的に一意に定めることはできない．そこで大凡の値を求めるため、地震波の影響を無視し、橋桁がすべり面に沿って等加速度運動するという理想的な状態を仮定する．また、ここでは定式化の単純化のため橋脚の影響は考慮しない．

次に、ダンパーについては議論の単純化のため摩擦型ダンパーとし、次式で示すような一定値の荷重 F_D で抵抗するような完全塑性型の復元力を仮定する．

$$F_D = F_F \cdot \text{sgn}(\dot{x}) \quad (1)$$

ここに、 F_F はダンパーの荷重を表す定数、 $\dot{x}$ はダンパーの両端間の相対速度である．

(2) UPSS 支承

a) 動的復元力の算定

UPSS 支承が発揮する反力は、水平面部と斜面部で異なる．水平面部では通常のすべり支承と同様に、上沓と下沓のすべり面の間に摩擦力が作用するとする．すべり面の垂直抗力 N と復元力 Q_x 、 Q_y は、次式のように表される．

$$\begin{aligned} N &= mg \\ Q_x &= \text{sgn}(\dot{x}) \cdot \mu mg \\ Q_y &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 Q_x は復元力の水平成分（左向きを正）、 Q_y は復元力の鉛直成分（下向きを正）、 x は支承相対変位、 μ は動摩擦係数、 g は重力加速度である．なお、復元力の鉛直成分 Q_y は、すべり面から桁に作用する支承反力と、質量 m の桁に作用する重力の和で表現している．

一方、斜面部では、水平方向および鉛直方向の反力は摩擦力による作用と重力による作用を合わせたものとなる．質点が斜面角度 θ の右側斜面上を運動している時、垂直抗力 N 、復元力の水平成分 Q_x 、鉛直成分 Q_y はそれぞれ以下の式のように表される．

$$N = mg \cos \theta$$

$$Q_x = mg \cos \theta (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \quad (3)$$

$$Q_y = mg \sin \theta (\sin \theta \pm \mu \cos \theta)$$

なお、複合符号の上の符号が斜面上昇時、下の符号が斜面下降時を表す．

b) 想定される動的履歴復元力特性

a) で求めた UPSS 支承の復元力より、水平変位の片振幅を A とする 1 サイクルの変位 - 荷重履歴曲線を図示したものを図-4 に示す．ただし、 A はクリアランスの片側長さ l よりも大きいと仮定する．図-4 において、変位 - 荷重履歴曲線は水平成分と鉛直成分に分解し、それぞれ(a)および(b)に分けて示している．図-4(a)に示す水平成分では、履歴曲線は水平すべり面、左右の傾斜すべり面に対応する3つの矩形の形状となる．図-4(b)に示す鉛直成分は、水平すべり面では原点の1点に対応し、左右の斜面が1つの矩形の履歴曲線であり、1サイクルについてこの履歴曲線を2周する．

想定される履歴吸収エネルギーは以下の式で表される．

$$\begin{aligned} \Delta W_x &= 4\mu mgl + 4\mu mg(A-l)\cos^2 \theta \\ \Delta W_y &= 4\mu mg(A-l)\sin^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta W = \Delta W_x + \Delta W_y = 4\mu mgA$$

ここに、 ΔW_x は1サイクルあたりの水平方向の履歴吸収エネルギー、 ΔW_y は1サイクルあたりの鉛直方向の履歴吸収エネルギー、 ΔW は1サイクルあたりの総履歴吸収エネルギーである．

c) 衝撃力の評価

本支承では、上記の復元力に加えてさらに、すべり面が水平面部から斜面部に速度を持って移行する際、運動の方向を変化させる力が衝撃的な荷重として発生する．図-5には衝撃力を考慮した場合に想定される、UPSS 支承の反力特性の概念図を示す．このような衝撃力の発生は過去の実験的研究²⁾において確認されている．この衝撃力により、橋脚や支承の取り付け部分などに損傷が生じる可能性が懸念されるため、衝撃力の大きさ等は重要な検討項目の一つとして挙げられる．衝撃力の大きさ等の特性は過去の研究でも検討されているが、構造物全体の応答

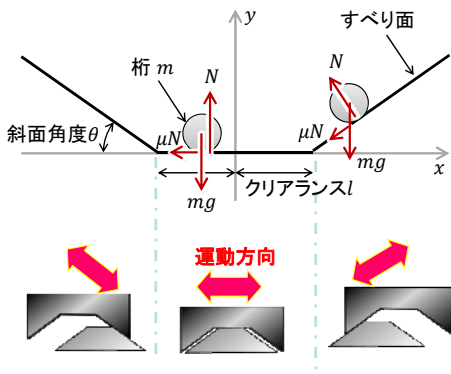


図-3 簡易力学モデル

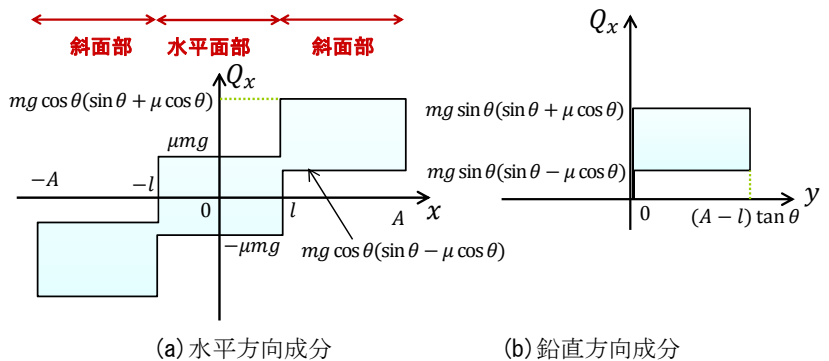


図-4 UPSS 支承の履歴復元力特性

振幅への影響は大きくないことが知られているため、本章における特性評価においては、衝撃力は無視する。

(3) UPSS支承—水平配置ダンパー系

UPSS 支承にダンパーを水平方向に組み合わせた場合において、支承反力に加えて、ダンパーの減衰力 F_F が水平方向に作用することで、想定される復元力や履歴吸収エネルギーがどのように変化するかを示す。

a) 復元力の定式化

動的な力のつりあいより、想定される垂直抗力と復元力は、以下のように表される。

質点が水平面上にあるとき：

$$N = mg$$

$$Q_x = \text{sgn}(\dot{x}) \cdot (\mu mg + F_F) \quad (5)$$

$$Q_y = 0$$

質点が右側斜面上にあるとき：

$$N = mg \cos \theta \mp F_F \sin \theta$$

$$Q_x = mg(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \cos \theta \pm F_F(\cos \theta \mp \mu \sin \theta) \cos \theta$$

$$Q_y = mg(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \sin \theta \pm F_F(\cos \theta \mp \mu \sin \theta) \sin \theta$$

(6)

なお、 Q_x 、 Q_y は支承およびダンパーから桁に作用する力に重力を加えて評価している。上式に示されるように、ダンパーを組み合わせることで垂直抗力の大きさが変動するため、UPSS 支承より桁に作用する反力が変化することと、ダンパーそのものの力が加えられることの2つの要因で復元力が変化する。水平力の変化は、水平面上では F_F であり、斜面を上昇時は $F_F(\cos \theta - \mu \sin \theta) \cos \theta$ 、斜面を下降時は $F_F(\cos \theta + \mu \sin \theta) \cos \theta$ となる。つまり斜面を上昇時の水平力の増分よりも、下降時の水平力の減少分のほうが大きくなっている。

b) 変位—復元力特性

想定される復元力より履歴曲線を図示したものを図-6 に示す。図-6 において、青色で表した部分が前述の UPSS 支承の履歴曲線である。ダンパーを配置したことによる変化分を、水平方向履歴曲線は赤色ハッチの部分で、鉛直方向は緑色ハッチの部分で示

している。

想定される 1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギーは、以下の式で表される。

$$\Delta W_x = 4l(\mu mg + F_F) + 4(\mu mg + F_F)(A-l) \cos^2 \theta$$

$$\Delta W_y = 4(\mu mg + F_F)(A-l) \sin^2 \theta$$

$$\Delta W = 4\mu mg A + 4F_F A$$

(7)

ダンパーの力は水平方向にしか作用していないが、UPSS 支承とダンパーを併用すると、すべり面が斜面部にあるときはダンパーによる履歴減衰の増加は水平方向と鉛直方向の履歴曲線に分散し、その比は $1:\tan^2 \theta$ となる。

(4) UPSS支承—鉛直配置ダンパー系

UPSS 支承は鉛直方向にも運動するという特徴を持った構造であり、鉛直方向の運動を利用してエネルギー吸収を行えるため、鉛直方向へのダンパーの配置が可能である。以下では、UPSS 支承と鉛直配置ダンパーを組み合わせる場合に、ダンパーの減衰力 F_F が鉛直方向に作用することによる、期待される復元力特性の変化を示す。

a) 復元力の定式化

動的な力のつりあいより、想定される垂直抗力 N と復元力は、以下のように表される。

質点が水平面上にあるとき：

$$N = mg$$

$$Q_x = \text{sgn}(\dot{x}) \cdot \mu mg \quad (8)$$

$$Q_y = 0$$

質点が右側斜面上にあるとき：

$$N = (mg \pm F_F) \cos \theta$$

$$Q_x = (mg \pm F_F)(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \cos \theta \quad (9)$$

$$Q_y = (mg \pm F_F)(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \sin \theta$$

ダンパーを組み合わせることによる水平力の変化は、水平面部では生じず、斜面を上昇時は $F_F(\cos \theta + \mu \sin \theta) \cos \theta$ 、斜面を下降時は $F_F(\cos \theta - \mu \sin \theta) \cos \theta$ となる。斜面では、上昇時の水平力の増分が、下降時の水平力の減少分よりも大きく

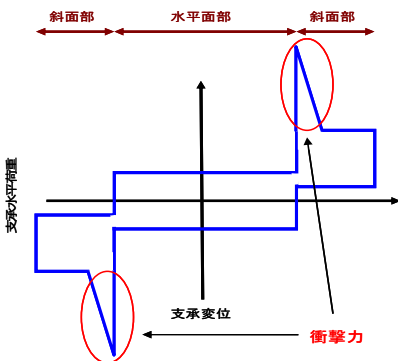


図-5 動的状態における UPSS 支承の復元力特性

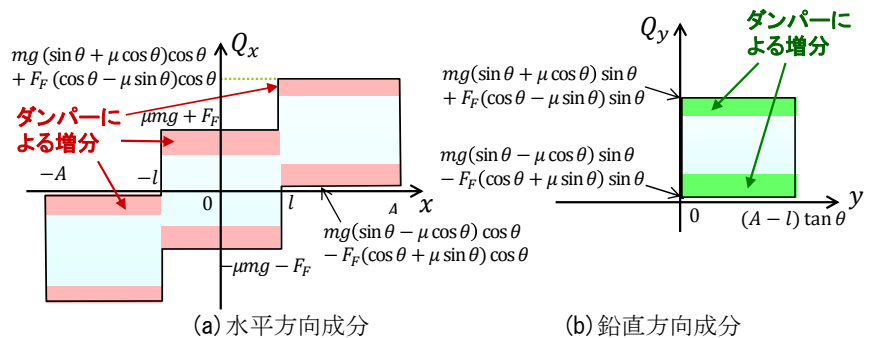


図-6 UPSS 支承 - 水平配置ダンパー系の履歴曲線

なっている。

b) 変位－復元力特性

UPSS 支承に鉛直配置ダンパーを組み合わせた系において想定される復元力より履歴曲線を図示したものを図-7に示す。図-7において青色で表した部分が前述のUPSS 支承の履歴曲線である。ダンパーを配置したことによる変化分を、水平方向履歴曲線は赤色ハッチの部分で、鉛直方向は緑色ハッチの部分で示している。

想定される1サイクルあたりの履歴吸収エネルギーは以下の式で表される。

$$\begin{aligned}\Delta W_x &= 4\mu mgA - 4\mu mg(A-l)\sin^2\theta + 4F_F(A-l)\cos^2\theta \tan\theta \\ \Delta W_y &= 4\mu mg(A-l)\sin^2\theta + 4F_F(A-l)\sin^2\theta \tan\theta \\ \Delta W &= 4\mu mgA + 4F_F(A-l)\tan\theta\end{aligned}\quad (10)$$

ダンパーを鉛直方向に配置した場合は、すべり面が斜面部にあるときのみ効果を発揮する。ダンパーによる履歴減衰の増加は、水平方向と鉛直方向の履歴曲線に分散し、その比は $1:\tan^2\theta$ となる。つまり、ダンパーを水平方向に配置した場合と同様の比で分散する。

図-8、図-9 に、 $\mu=0.1$ 、 $F_F=mg/10$ 、クリアランス 30[mm]、最大変位 100[mm]とした場合の、想定される”最大水平力”と”履歴吸収エネルギー”の、斜面角度 θ の変化に伴う変化を例として示す。

水平ダンパー系では、水平力の増加は、斜面角度が大きくなるにつれて小さくなる。吸収エネルギーの総量は斜面角度に依らないが、鉛直エネルギーの寄与分は θ が増加するにしたがって増大する。

鉛直ダンパー系では、水平力の増加は、斜面角度が大きくなるにつれて大きくなる。吸収エネルギーの総量および鉛直エネルギーの寄与分は斜面角度が

大きくなるにつれて増大する。

(5) UPSS 支承ダンパー系において期待される効果

UPSS 支承は上部構造を鉛直方向にも運動させることが特徴であり、ダンパーを配置する角度を選ぶ。すべり面が斜面部にあるときは、ダンパーをどちらの方向に配置しても、ダンパーによる履歴減衰の増分は、水平方向と鉛直方向に分散され、その比は $1:\tan^2\theta$ となる。つまり、ダンパーとUPSS 支承を併用することで、従来型の支承では期待できない鉛直方向の履歴エネルギー吸収を付加できるため、一定の水平変位振幅の範囲で最大水平力の橋脚負担の増大を抑えながら高いエネルギー吸収性能を得ることが期待できる。

UPSS 支承が斜面部で発揮する復元力の大きさは変位に依らずほぼ一定になると想定でき、斜面角度や摩擦係数、ダンパーの減衰力などのパラメータを適切に設定することで、期待する復元力に合わせての設計が可能である。ただし、ダンパーの抵抗力の大きさが過大な場合、地震終了後に桁の水平変位がクリアランスの範囲に復帰しないという状態になる。これは、下方運動時の反力 Q_y が負の値となる場合に相当する。このような制約を考慮してパラメータを設定することで、支承の残留変位が正負どちらか片側に偏ることが抑制される。

また、鉛直方向にダンパーを配置すると、斜面部で減衰力を発揮すると共に桁の跳ねを抑制できると考えられ、すべり摩擦による減衰を適切に発揮させることが出来ると思われる。

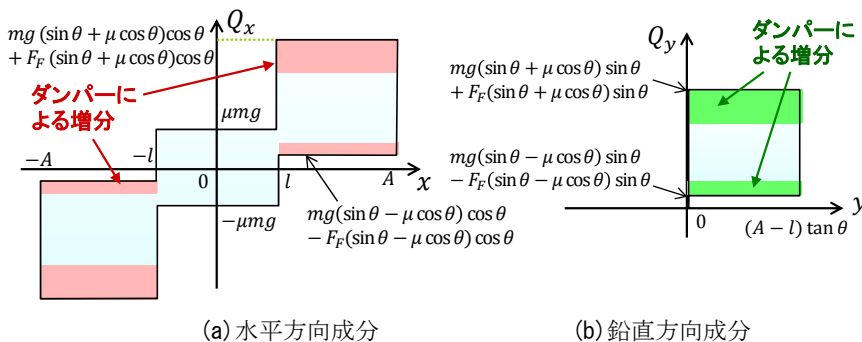


図-7 UPSS 支承 - 鉛直配置ダンパー系の履歴曲線

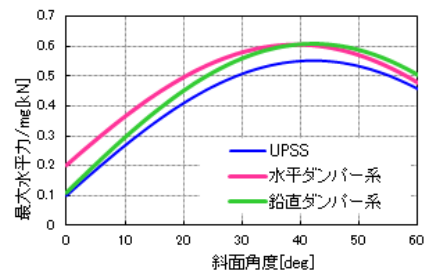


図-8 斜面角度に伴う最大水平力の変化

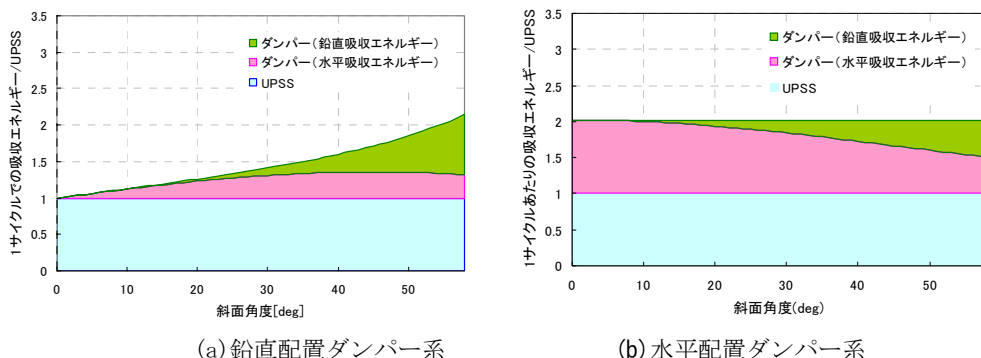


図-9 斜面角度に伴う1サイクルあたりの吸収エネルギーの変化

4. UPSS支承—ダンパー系の数値計算モデル

(1) 概説

UPSS支承とダンパーの組み合わせ系の応答特性をより詳細に調べるためには、現実的なUPSS支承およびダンパーの特性を適切にモデル化する必要がある。本章では、過去に行われた摩擦材の材料実験および桁上部工振動台実験のデータ²⁾に基づき構築したUPSS支承の解析モデル、およびダンパーのモデル化について述べる。

(2) UPSS支承の数値モデル

a) モデル化の考え方

UPSS支承の数値的特性の表現のため、図-10に示すモデルを用いた。解析では桁を質点で表した上で、UPSS支承のそれぞれのすべり面に、垂直抗力を表現する面直角バネと、摩擦力を表現するすべりバネがあると考え、モデル化を行った。解析中、どのバネが働いているかの判定には、図-11のように区間を領域A、領域B、領域Cのように分け、質点位置の属する領域により、領域Aの場合は水平面のバネ、領域Bでは斜面のバネ、領域Cでは水平面と斜面の両方のバネが働くとする方法を用いた。

さらに、領域AとB、領域BとCの境界部に衝突時に働くバネが設定されている。これは、振動台実験の結果から確認されている、橋桁模型は跳ねることなくすべり面に沿って滑ることや、すべり面が水平面部から斜面部に移行する際に発生する衝撃力によりエネルギー損失が生じるという挙動を表すために組み込んだものである²⁾。なお、衝突によるエネルギー損失比 r_E を次式のように定義した。ここでは重力の影響は小さいとして考慮していない。

$$r_E = \frac{mv^2/2 - mv'^2/2}{mv^2/2} = 1 - \left(\frac{v'}{v}\right)^2 \quad (11)$$

この境界部のバネの考え方を図-12で説明する。質点がある平面に対して角度 ϕ の方向から衝突速度 v でぶつかり、衝突後、角度 ϕ' をもち速度 v' で跳ね返される運動を考える。この平面から働く力を、平面の直角方向（ η 方向）の力 F_η と接線方向（ ξ 方向）の力 F_ξ に分けた場合に、その関係を以下のようにクーロン摩擦則に従うと仮定する。

$$\left| \frac{F_\xi}{F_\eta} \right| = \mu' \quad (12)$$

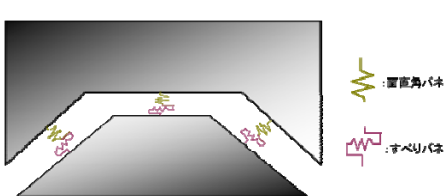


図-10 UPSS 支承のモデル

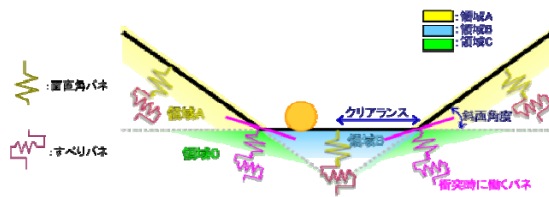


図-11 UPSS 支承モデルのバネ配置（質点表示）

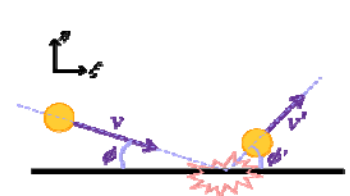


図-12 質点の斜面への衝突

ここに、 μ' は見かけの摩擦係数である。斜面角度 θ に等しい角度だけ運動の方向を変える場合を考えるので、 $\theta = \phi + \phi'$ を満たすとする。

すべり面鉛直方向バネに減衰が無い場合、平面に直角方向（ η 方向）の速度成分は保存されるので次式が成り立つ。

$$v \sin \phi = v' \sin \phi' \quad (13)$$

衝突前後での運動量の変化分を用いると、見かけの摩擦係数 μ' は次式のように表される。

$$\mu' = \left| \frac{\int F_\xi dt}{\int F_\eta dt} \right| = \left| \frac{v' \cos \phi' - v \cos \phi}{2v \sin \phi} \right| \quad (14)$$

以上の関係から、設定した μ' と θ に対応するエネルギー損失比を算出することができる。斜面角度 $\theta = 30^\circ$ および $\theta = 15^\circ$ の場合の、エネルギー損失比と見かけの摩擦係数 μ' との関係を図-13に示す。

斜面から水平面に移行する際にも、水平面から斜面に移行する際と同等のエネルギー損失が生じると仮定し、同様に運動量の変化から考えると、水平面に移行する際の衝突現象は、水平面から ϕ' の角度で摩擦係数が μ' の斜面に衝突する運動で表すことができることが導かれる。そこで数値モデルでは、 ϕ と ϕ' の平均である $\theta/2$ の角度を持ち摩擦係数が μ の平面を境界部に組み込むことで、衝突現象を表すモデルを採用した。

b) パラメータの設定

UPSS支承に用いる30mm×30mmのPTFE摩擦材を垂直に衝突させる要素実験を行った結果が得られており⁵⁾、その要素実験の圧縮長さ－反発力関係から面直角バネの剛性を決定した。なお、衝突時の速度は約90[mm/sec]である。面直角バネの剛性は最大圧縮時の反発力で計算した結果、 6.27×10^4 [kN/m]となった。またこれ以降の解析では、面直角方向の振動を適切に収束させるため、10%の粘性減衰を与えた。

すべり面が水平面部から斜面部へ移行する際、面直角バネが縮む速度が大きく、大きな粘性減衰を発揮し、本来の挙動と違った効果を示すことが危惧される。そこで、図-11の領域Bで働く面直角バネと、衝突時に働くバネの減衰定数を0とした。また、衝突時に働く境界部バネの剛性により衝撃力の大きさおよび作用時間が変化し、見かけの摩擦係数により衝突によるエネルギー損失比が変化するため、実験値と概ね一致する値を試行錯誤により調整することで定めた。採用したUPSS支承のパラメータを表-1

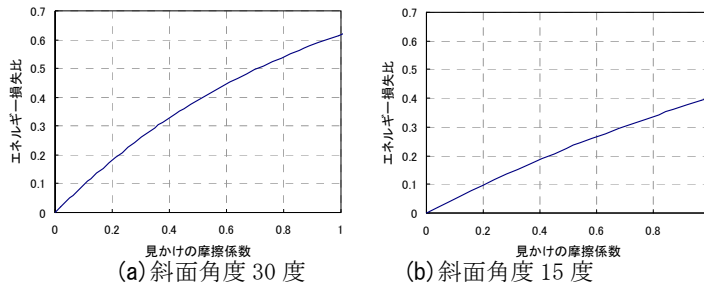


図-13 エネルギー損失比と見かけの摩擦係数の関係

表-1 UPSS 支承のパラメータ

面直角バネ	剛性	6,270,000 kN/m	
	減衰定数	領域 A,B	領域 C
		0.10	0
衝突バネ	剛性	12,540,000 kN/m	
	減衰定数	0	
	摩擦係数	すべりバネの摩擦係数の2.25倍	

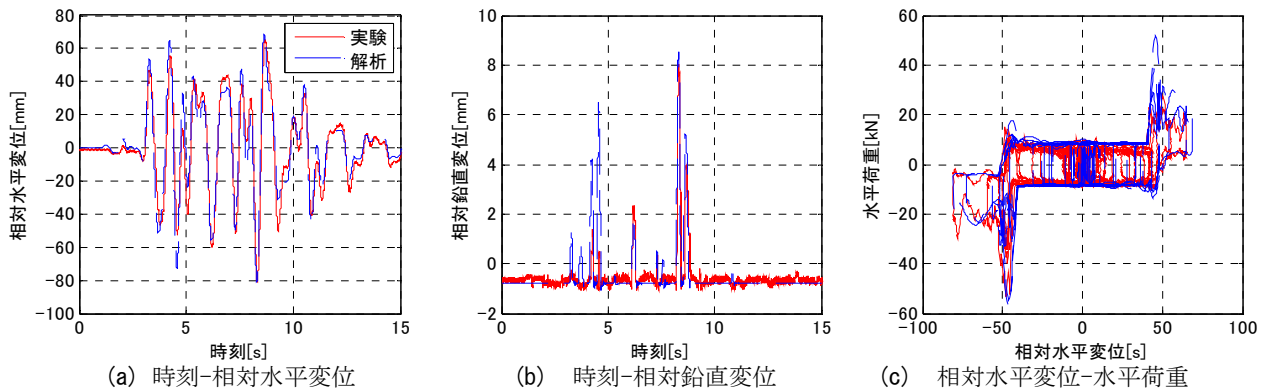


図-14 実験結果と解析結果の比較

にまとめて示す。

c) 振動台実験データに基づくパラメータ設定

UPSS支承の検証のために実施された、UPSS支承供試体と鋼桁模型を用いた振動台実験²⁾の実験結果と解析結果の比較を行い、UPSS支承の数値パラメータの設定およびモデルの妥当性の検証を行った。例として、斜面角度15°、クリアランス42mmのUPSS支承に道路橋示方書の標準地震波形であるレベル2のタイプII、II種地盤用地震動2（以下、II-II-2）最大振幅420galを入力したケースの結果を図14に示す。図14において(a)はUPSS支承の相対水平変位、(b)はUPSS支承の相対鉛直変位、(c)はUPSS支承の相対水平変位—水平荷重関係である。実験値は赤線で示し、解析値は青線で示す。

d) 考察

実験結果と解析結果の各履歴、時刻歴はともに概ね一致している。衝撃力の最大絶対値は、負側では解析値より実験値の方が若干小さい程度で概ね等しい。一方、正側では解析値に比べ実験値がかなり小さい。これは振動台実験において桁の分担質量に偏りがあることや、反重力すべり支承の衝突角度が正側と負側で異なっていることなどが原因として考えられる²⁾。

以上より、提案したUPSS支承の解析モデルは、動的挙動を概ね表現できるモデルであるといえる。

(3) ダンパーのモデル化

a) ダンパーの復元力特性

ダンパーの減衰力モデルは、速度指数比例型(指数=0.1)とし、ダンパーの減衰力 F_D は次式を用いて計算した。

$$F_D = -\text{sgn}(\dot{u}) \cdot F_F \quad [\text{kN}] \quad (15)$$

$$F_F = a \cdot \dot{u}^{0.1}$$

ここに、 F_F は抵抗力[kN]、 $\dot{u}$ はダンパー両端間の相対速度[m/s]、 a は定数である。

b) 水平配置ダンパー

桁と橋脚頂部の間に水平方向に設置したダンパー（図-2a）を、ここでは“水平配置ダンパー”と呼ぶことにする。UPSS支承は桁に鉛直変位を生じさせる支承であるので、ダンパーの両端はヒンジで固定し、ダンパーの回転を許容する必要がある。しかしここでは、ダンパー長に比べて鉛直変位が十分に小さく、その影響は小さくなると想定されるため、常に水平方向に抵抗力を発揮すると仮定する。

c) 鉛直配置ダンパー

桁と橋脚中部の間に鉛直方向に設置したダンパー（図-2b）を、“鉛直配置ダンパー”と呼ぶことにする。水平配置ダンパーと同じく、ダンパーの両端はヒンジで固定し、回転を許容させる必要がある。桁の運動に伴ってダンパーが抵抗力を発揮する角度は随時変化するが、ダンパー長が十分に大きいと仮定し、その影響を無視して常に鉛直方向に抵抗力を発揮すると仮定する。

5. UPSS支承—ダンパー系を適用した橋梁の動的応答解析

(1) 概説

UPSS支承とダンパーの組み合わせを適用することにより、レベル2地震時の橋梁の地震応答がどの

ように変化し、地震時性能の向上が期待できるかを、橋梁モデルの地震応答解析を行うことで検討した。解析モデルは、UPSS支承を用いた連続桁橋の一橋脚を対象に、上部構造と橋脚の2質点系モデルに、前3章で構築したUPSS支承およびダンパーのモデルを組み込んだ多自由度モデルを用いた。

(2) 解析モデル

a) 橋梁モデル

解析対象とするのは、UPSS支承を用いた多径間連続桁橋のうち、1基の橋脚とそれが支持する上部構造部分から構成される構造系である。

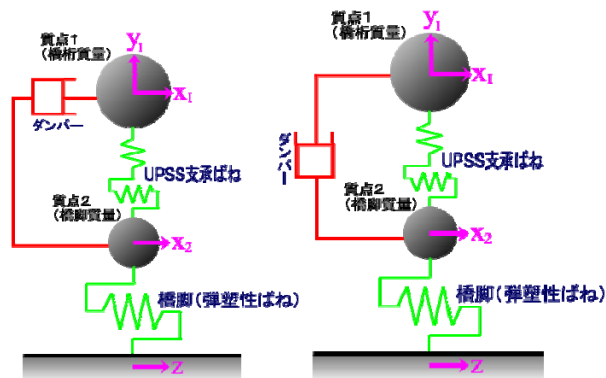
解析では、橋軸方向の応答を対象とし、図-15に示すように水平・鉛直2次元の2質点系モデルを用いた。モデルの構成要素は、橋脚・橋桁・支承・ダンパーの4つであり、地盤及び基礎の影響はここでは無視するものとする。図-15において、質点1を橋桁、質点1・質点2間の復元力をUPSS支承とし、質点2から地表までを橋脚とした。質点1は橋桁質量、質点2は橋脚質量である。

橋脚部には弾塑性バネ要素を適用した。履歴モデルにはClough型バイリニアモデルを使用し、第2勾配比 α は0.05、除荷時の剛性低下指数 β は0.2とした(図-16)。橋脚質量は $m_1=300\text{ton}$ とし、橋脚と橋桁が剛結されている場合の弾性固有周期を $T_1=0.5\text{sec}$ と設定した。降伏震度は $K_h=0.66g$ とし、降伏耐力を $P_y=K_h(1+A)m_1g$ (A は橋脚質量に対する橋桁質量の比であり、ここでは3とした。 g は重力加速度)、初期剛性を $k_p=(1+A)m_1(2\pi/T_1)^2$ とした。減衰は考慮しないものとした。橋桁の質量は、橋脚質量の A 倍とした。

b) UPSS支承-ダンパー系を適用した場合

用いたUPSS支承のパラメータは、面圧が3章のモデルと概ね同じ値となるように、摩擦材の面積を設定し、摩擦材の鉛直剛性は、面積に比例すると仮定した。それ以外のパラメータ、斜面角度 θ 、クリアランス l 、摩擦係数 μ は、後述のとおり変化させて計算を行う。

ダンパーのモデル化は、4.(3)節で示した通りであり、ダンパー力の大きさを決める定数 a を変化させて計算を行う。ダンパーを水平方向に配置する場合と、鉛直方向に配置する場合を考える。



(a) 水平配置ダンパー系 (b) 鉛直配置ダンパー系
図-15 2質点系解析モデルの概略図

(3) 入力地震波と解析条件

本解析では、入力地震波として道路橋示方書⁶⁾における標準波II-II-1、II-II-2、II-II-3およびI-II-2を用いた。最大加速度はそれぞれ686.8gal、672.6gal、736.3gal、384.9galである。数値積分法にはニューマーク β 法($\beta=1/4$)を用い、積分時間間隔を0.001秒として解析を行った。

UPSS支承の斜面角度、クリアランス、摩擦係数や、ダンパーの抵抗力のパラメータを変化させて解析を行った。なお、ここでのダンパーの抵抗力とは、ダンパーの両端間の相対速度が1[m/s]である場合に発揮される抵抗力としている。

解析に用いたパラメータは、斜面角度は5~30度の範囲を5度刻み、クリアランスは10、20、30mmの三種類、摩擦係数は0.05、0.10、0.15の三種類、ダンパーの抵抗力は水平配置ダンパーの場合は450~2700kNの範囲で450kN刻み、鉛直配置ダンパーの場合は900~8100kNの間で900kN刻みとした。鉛直配置ダンパーでは、ダンパーの抵抗力は大きい値まで解析対象とした。

(4) 解析結果

以下では、入力地震波としてII-II-2地震動を用いた場合における、代表的なケースの解析結果を示す。一つのケースにつき、(a)支承変位-水平荷重関係、(b)桁変位の時刻歴応答、(c)橋脚変位-橋脚復元力関係の3つの結果を示した。

a) UPSS支承の場合

UPSS支承のみを適用し、斜面角度が 20° 、クリアランスは30mm、摩擦係数は0.15のケースの解析結果について図-17に示す。最大桁変位は203.2mm、最大支承変位は168.7mmに抑えられ、橋脚塑性率は1.87である。

b) UPSS支承-水平配置ダンパーの場合

斜面角度が 15° 、クリアランスは20mm、摩擦係数が0.15、ダンパーの抵抗力が1350kNのケースの解析結果を図-18に示す。最大桁変位は143.6mm、最大支承変位は129.9mm、橋脚塑性率は1.06となり、橋脚はほとんど塑性化せず、優れた免震効果を示している。しかし、20秒以降でも橋脚の振動が収束せ

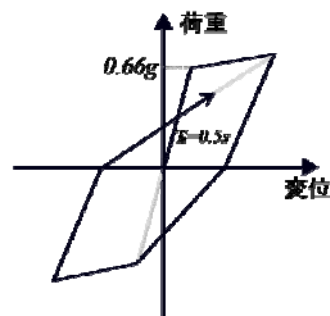


図-16 Clough型バイリニアモデルの履歴曲線の概略図

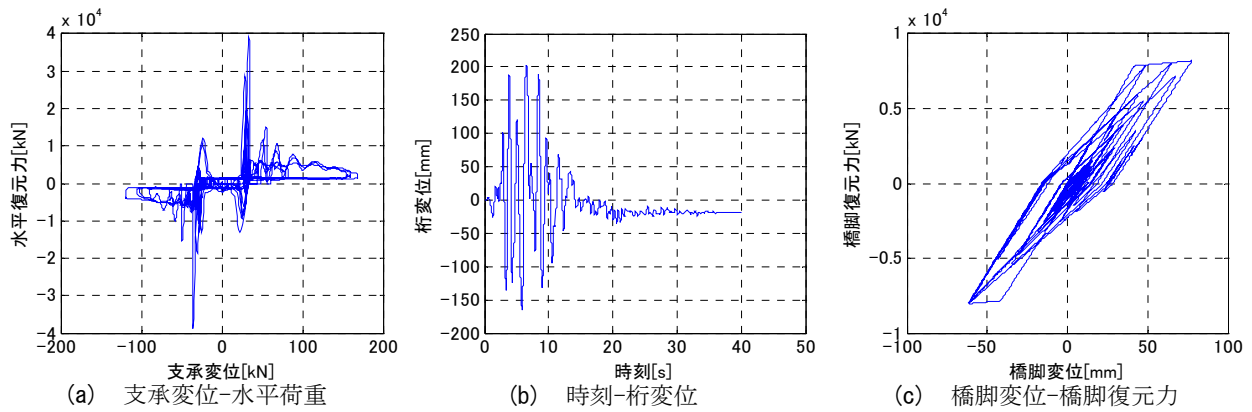


図-17 UPSS 支承の解析結果

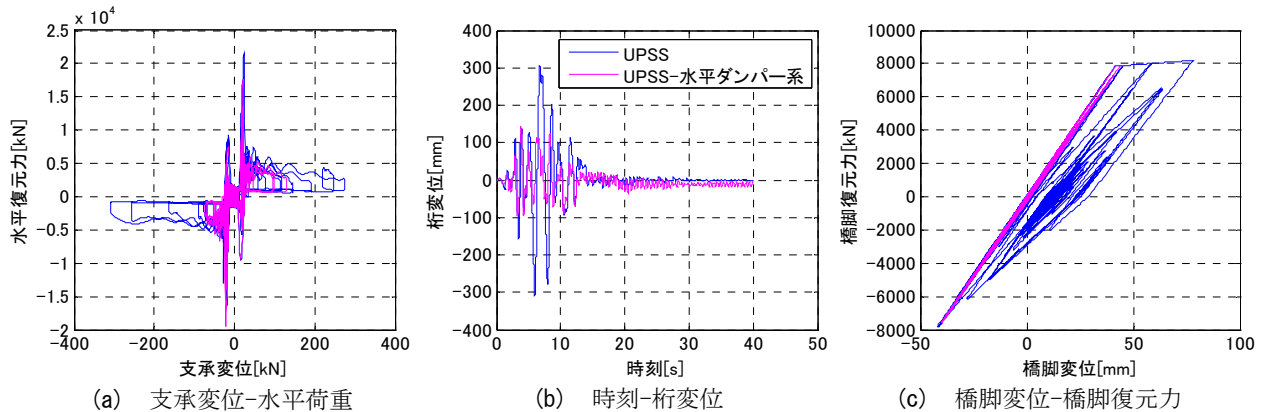


図-18 UPSS 支承 - 水平配置ダンパー系の解析結果

ず、桁と橋脚がダンパーによってロックされて、ダンパーやすべりによる減衰効果を發揮できていない。

b) UPSS支承-鉛直配置ダンパーの場合

斜面角度が 15° ，クリアランスが10mm，摩擦係数が0.15，ダンパーの抵抗力が3600kNのケースについて図-19に示す。最大桁変位は163.2mm，最大支承変位は136.2mm，橋脚塑性率は1.75である。水平配置ダンパーのケースに比べて，応答変位や橋脚塑性率は少し大きな値となっているが，水平部でダンパーが働かないため，橋脚がロックされることが無く，振動はUPSS支承の場合と同じように収束している。また，残留変位も生じにくいと考えられる。

(5) 考察

a) 着目する指標

支承の応答を把握するためには変位応答，速度応答，加速度応答などさまざまな指標があるが，本解析では，桁変位，支承の変位，橋脚の応答塑性率の三指標について検討することとした。桁変位は伸縮装置の大きさを決める指標であり，橋脚の応答塑性率は橋脚の損傷の程度を表す重要な指標である。なお，支承の変位とは，質点1と質点2の間の相対変位であり，落橋等の重大な被害の発生を判断する指標となる。

次節より，最大桁変位 - 橋脚応答塑性率関係および最大支承変位 - 橋脚応答塑性率関係を表した図を用いる。桁変位も，支承変位も，橋脚応答塑性率も基本的に小さい方が良いと考えられるため，この図

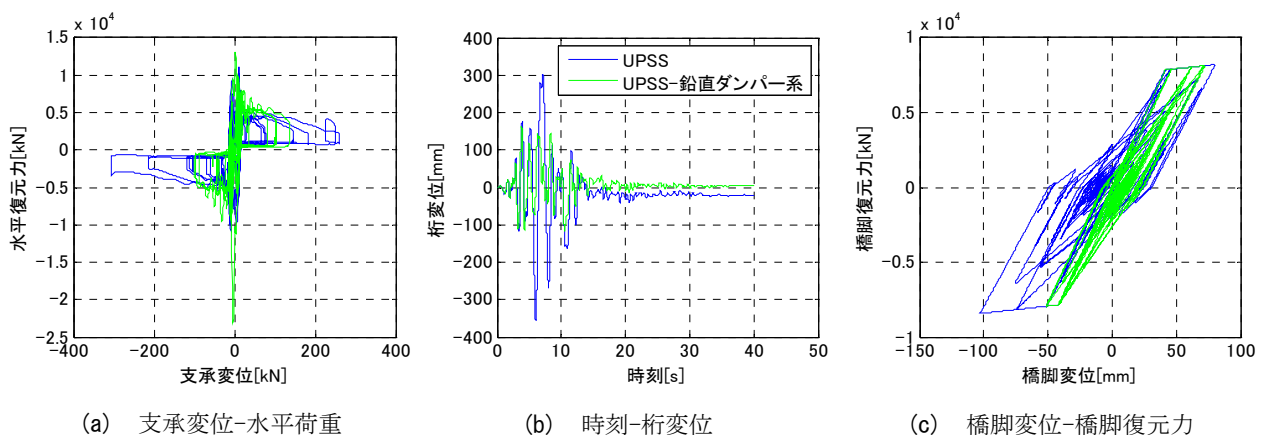


図-19 UPSS 支承 - 鉛直配置ダンパー系の解析結果

において左下に行くことが望ましい。しかし、一般的に桁変位や支承変位と橋脚応答塑性率はトレードオフの関係にある。

例として、免震支承と固定支承が図の中でどの位置に属するかの概念図を図-20に示す。免震支承の場合、上部工の慣性力が橋脚に伝わりにくく、橋脚応答塑性率が小さい領域で設計される。その一方で、免震支承は支承変位が大きいことがデメリットである。固定支承の場合、支承変位が小さく抑えられるというメリットがある。しかし橋脚応答塑性率は大きくなる傾向がある。

構造物の共振及び減衰を考慮した場合、結果はより複雑になるものの、基本的にこのようなトレードオフの関係が成り立つと考えられるが、UPSS支承とダンパーの組み合わせ系において、両者の平面状でより原点に近い状態が実現できるかどうかに着目して整理および考察を行う。

b) 橋脚応答塑性率-最大支承変位関係および橋脚応答塑性率-最大桁変位関係

まず、全ケースの応答値を最大桁変位 - 橋脚応答塑性率及び最大支承変位 - 橋脚応答塑性率の座標平

面上にプロットすると、図-21、図-22が得られる。座標平面の原点に近い応答は、桁変位と橋脚塑性率の双方が小さく、望ましい応答であると考えられる。

そのような高い地震時性能を得るためのパラメータの組合せの条件を、(1) 斜面上昇時の水平復元力が橋脚の降伏荷重よりも小さい、(2) 自然状態で斜面を下降可能、(3) 履歴吸収エネルギーが大きいという3つの条件と想定し、その妥当性を検討した。桁変位 - 橋脚応答塑性率関係において条件に該当する10ケースはを選んでプロットしたものが、図-23、図-24における赤色の点である。

どの地震波においても桁変位、橋脚応答塑性率が共に小さくなる位置に集中して分布している。支承変位 - 橋脚塑性率関係においても、同様の傾向が確認でき、望ましい応答制御効果を得る設計条件としての仮説は妥当であると考えられる。

また、タイプI地震動による応答は、全体的に小さくなっているが、タイプII地震動と応答の傾向は同じであることが分かる。タイプI地震動に関しては、UPSS支承のみによる応答制御も可能であると考えられるが、ダンパーを配置することで、タイプ

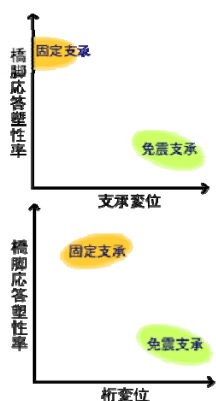


図-20 着目する指標

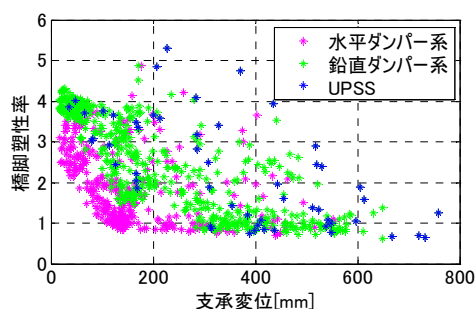


図-21 支承変位 - 橋脚塑性率

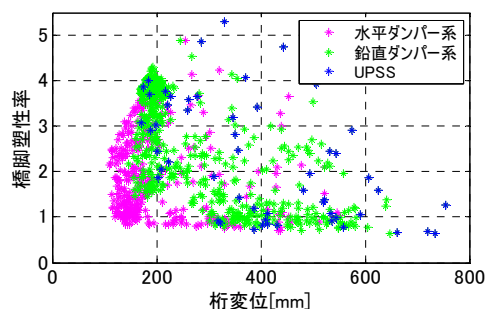


図-22 桁変位 - 橋脚塑性率

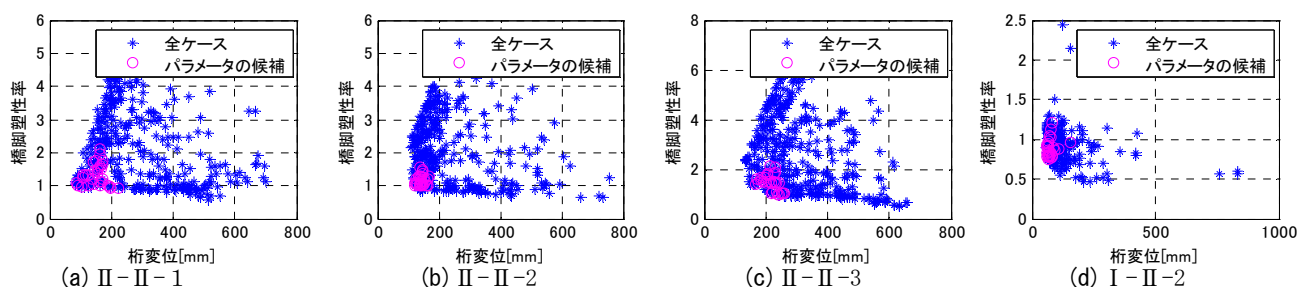


図-23 UPSS - 水平配置ダンパー系のパラメータの候補

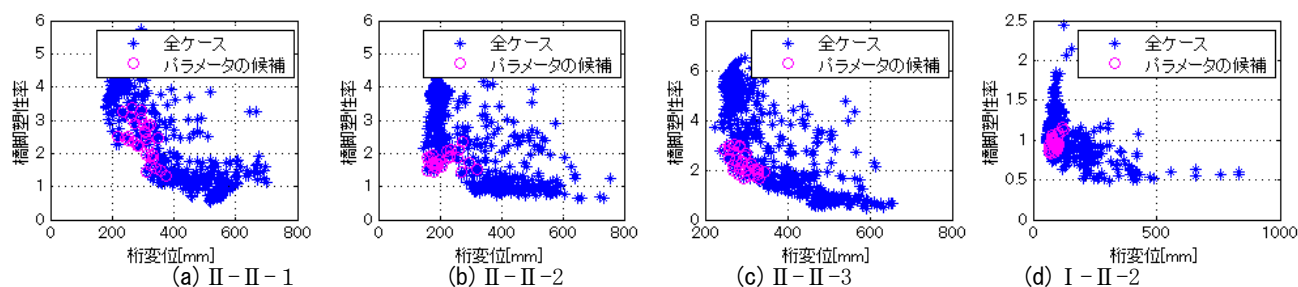


図-24 UPSS - 鉛直配置ダンパー系のパラメータの候補

I地震動, タイプII地震動の双方における要求耐震性を満たす橋梁の設計が可能になると考えられる.

6. 結論

本研究では, UPSS 支承と制震ダンパーを併用したシステムに関して, 力学的考察と, 2 質点モデルによる応答解析を行い, 地震応答の制御特性と地震時性能の向上の可能性について検討を行った. UPSS 支承にダンパーを水平方向に配置した場合と鉛直方向に配置した場合の単純化した代表的な 2 つのパターンにおいて検討を行った. 得られた成果をまとめれば, 次の通りである.

- (1) 力学的考察により, 復元力特性, 履歴吸収エネルギーの理論的評価を導いた.
- (2) 動的応答解析を行い, ダンパーの導入により, 支承変位, 桁変位, 橋脚塑性率の全てを小さくできることを確認した.
- (3) 望ましい応答制御効果を得るためのパラメータの設定法として, 斜面を上昇時の水平復元力が橋脚の降伏荷重よりも小さく, 斜面を下降可能であると想定されるケースの内, 大きな履歴吸収エネルギーが期待されることが条件であるという仮説を提示し, 応答計算結果によりその妥当性を示した.

参考文献

- 1) 足立幸郎, 加藤祥久, 岩里泰幸, 竹之内勇, 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回年次学術講演会概要集, 2008.
- 2) 五十嵐晃, 樋口匡輝, 森本慎二, 足立幸郎, 宇野裕恵, 長田修一, 河内山修, 加藤祥久, 篠原聖二, 佐藤知明: 反重力すべり支承の開発 ②-1~②-3, 土木学会第64回年次学術講演会概要集, 2009.
- 3) 五十嵐晃, 樋口匡輝, 森本慎二, 足立幸郎, 宇野裕恵, 長田修一, 河内山修, 加藤祥久, 篠原聖二, 佐藤知明, 横川英彰, 松田宏: 反重力すべり支承の開発 ③-1~③-3, 土木学会第64回年次学術講演会概要集, 2009.
- 4) 足立幸郎, 加藤祥久, 五十嵐晃, 宇野裕恵, 宮崎貞義, 松田宏: 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回年次学術講演会概要集, 2009.
- 5) オイレス工業(株)社内資料, 摩擦材の圧縮特性評価資料, 2008.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp.15-19, 2002.
- 7) 日本道路協会: コンクリート道路橋設計便覧, pp.285-289, 1994.

SEISMIC RESPONSE CONTROL OF BRIDGES USING THE COMBINATION OF UPSS BEARING AND ENERGY DISSIPATION DEVICES

Haruko SHIRAISHI, Akira IGARASHI, Yukio ADACHI, Hiroshige UNO, Yoshihisa KATO and Tomoaki SATO

The Uplifting Slide Shoe (UPSS) is a type of bearing proposed to deal with the thermal expansion and contraction of bridge girders, to disperse the seismic horizontal forces to multiple columns and to control horizontal displacement response of the continuous girder bridges. In this study, a combination of the UPSS bearings and seismic dampers for girder bridges is investigated. The aim of the system is to effectively enhance the energy dissipation mechanism utilizing vertical motions of the girder induced by UPSS bearings, in addition to the existing horizontal energy dissipation capabilities. The effectiveness of the system in reducing the seismic response of the bridge and validity of the assumed optimal parameter settings for the most effective response control is successfully shown by numerical dynamic response analysis.