

上下動を受ける摩擦減衰型免震支承の地震応答特性

家村 浩和¹・高橋 良和²・中島 一浩³・小川 一志⁴

¹フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工(修) 京都大学助手 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 (株)宮地鐵工所 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通3番地)

⁴正会員 工博 川崎重工業(株) (〒673-0014 兵庫県明石市川崎町1-1)

すべり支承と水平バネを併用した摩擦減衰型免震支承は、従来のゴム系免震支承と同等の免震効果を発揮する支承として認識されているが、すべり支承に上下動が作用した場合、摩擦力の変動によって水平方向の地震応答に影響を及ぼすことが考えられる¹⁾。本論文では、上下動作用下においても地震応答に及ぼす影響は小さいことをハイブリッド地震応答実験により示した。さらに、摩擦係数の面圧依存性及びすべり速度依存性の影響を考慮した地震応答解析により、上下動作用下の挙動を解析的に検証する場合には面圧依存性を考慮した解析が妥当であることなどが明らかになった。

Key Words : Vertical motion , Sliding bridge isolators , Hybrid experiment , Earthquake response

1. はじめに

摩擦減衰型免震支承は、すべり現象による慣性力の打ち効果と摩擦減衰に加えて、振動系の固有周期が水平バネの剛性のみで決定されるため容易に長周期化が可能になる。また、実用面では鉛直荷重を剛な金属製のすべり支承で支持するため沈下の恐れがなく、微振動なども生じにくい免震支承である。従来、実験的な研究によって摩擦減衰型免震支承の地震応答に及ぼす上下動の影響は実用上問題ないという結論が得られているが、そのメカニズムについて解析的に検証された例は少なく、上下動に伴う摩擦係数の面圧依存性の影響については未だ説明されていないのが現状である。

本論文では、摩擦減衰型免震支承の地震応答に及ぼす上下動の影響を明らかにすることを目的として、静的繰返し載荷実験、ハイブリッド地震応答実験及び上下動の影響を考慮した地震応答解析を行った。

2. 実験システム

実験システムの概要を図-1に示す。実験システムは載荷システム、制御システム、解析システム、計測システム、記録システムより成り立っている。載荷装置として3台のアクチュエーターを用い、水平ビームを介して免震支承に水平変形を与えている。上下方向にある2台のアクチュエーターは鉛直荷重を載荷するとともに、水平ビームが水平を保つよう計算制御を行っている。

摩擦減衰型免震支承はすべり支承とゴム支承を併用し

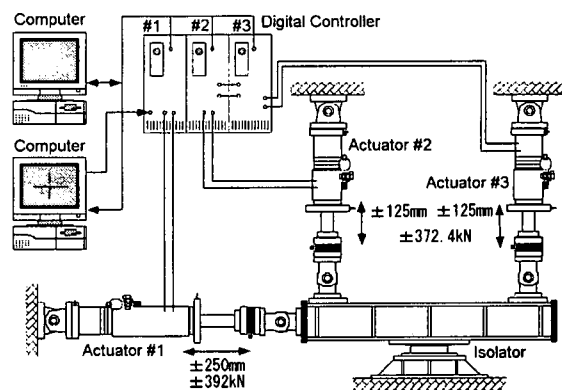


図-1. 実験システム概要

た免震システムであるが、線形バネとして数値モデル化が可能な水平バネについては載荷実験対象外とする。本実験に用いたすべり支承はテフロン板とステンレス鋼の間のすべり摩擦を利用している。すべり支承の縮尺は、実験装置の載荷能力から実物大モデルの1/4とした。供試体の設計死荷重は365.7kN、面圧は12.96MPaである。

3. 静的繰返し載荷実験

(1) 実験方法

摩擦減衰型免震支承を構成するすべり支承の摩擦係数の基本特性を確認するために、正負交番振幅繰返し載荷実験を行った。まず、一定軸力下(367.5kN)において水平方向載荷速度を0.2~3.5kineまで変化させ、摩擦係数のすべり速度依存性を確認した。また、載荷面圧を4.18~15.42MPaまで変化させ摩擦係数の面圧依存性について確認した。

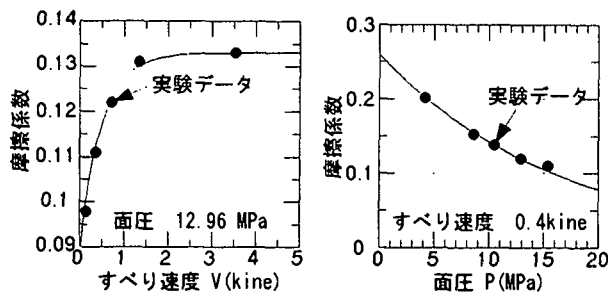


図-2. 摩擦係数のすべり速度及び面圧依存性

(2) 摩擦係数のすべり速度及び面圧依存性

図-2に静的繰返し載荷実験から得られたすべり速度及び面圧と摩擦係数の関係を示す。すべり速度が遅い領域では摩擦係数が急激に大きくなっているが、ある程度すべり速度が速くなれば摩擦係数は一定値に漸近する。実地震波のようなすべり速度が速い領域では摩擦係数のすべり速度依存性による影響は小さく、摩擦係数は安定した値を有することが分かる。本実験に用いたすべり支承の摩擦係数は高すべり速度域で0.133である。

一方、面圧の増加に伴って摩擦係数の値は減少しているが、すべり速度依存性のように摩擦係数が一定値に漸近することではなく線形性を呈している。地震時には上下動によりすべり支承に作用する面圧が常に変化し、時々刻々と摩擦係数が変動するため、上下動作用下の地震応答特性を十分に検討する必要がある。

4. ハイブリッド地震応答実験

(1) 実験方法

5径間連続鋼箱桁橋の設計例²⁾を原橋モデルとする摩擦減衰型免震支承を有する橋梁を、すべり支承と水平バネが橋桁を支持する1自由度系にモデル化する。地震入力には神戸海洋気象台記録波(以下 KOBE)をスケーリングした加速度波形を用いた。

ハイブリッド地震応答実験は、すべり支承の復元力特性を載荷実験より検出し、数値モデル化された水平バネと同時に実験を行うことにより免震システム全体の特性を得ることができる。従って、数値モデル化された水平バネ剛性を変化させることによって、摩擦減衰型免震支承の2次剛性を自由に設定することが可能となる。

ハイブリッド実験ではすべり後の固有周期及び上下動入力スケールに着目し、以下のパラメーターについて検討を行った。

- ・水平バネ剛性 ($k=92.5 \text{ kN/m}$, 1480 kN/m)
一定軸力 367.5 kN , KOBE-NS 36%
- ・上下動入力スケール (一定軸力, KOBE-UD 150%)
水平バネ剛性 658 kN/m , KOBE-NS 56%
- ・上下動作用下の免震効果 ($T=1.0\sim 4.0\text{sec}$)
KOBE-UD 100%, KOBE-NS 36%

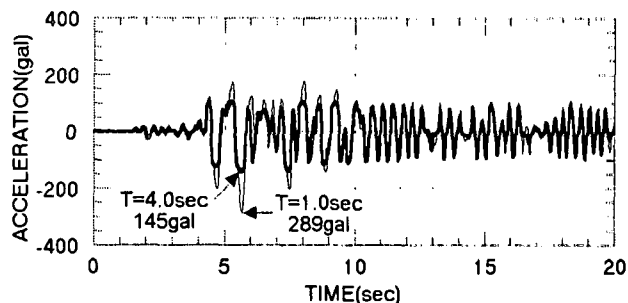


図-3. 水平バネ剛性の影響

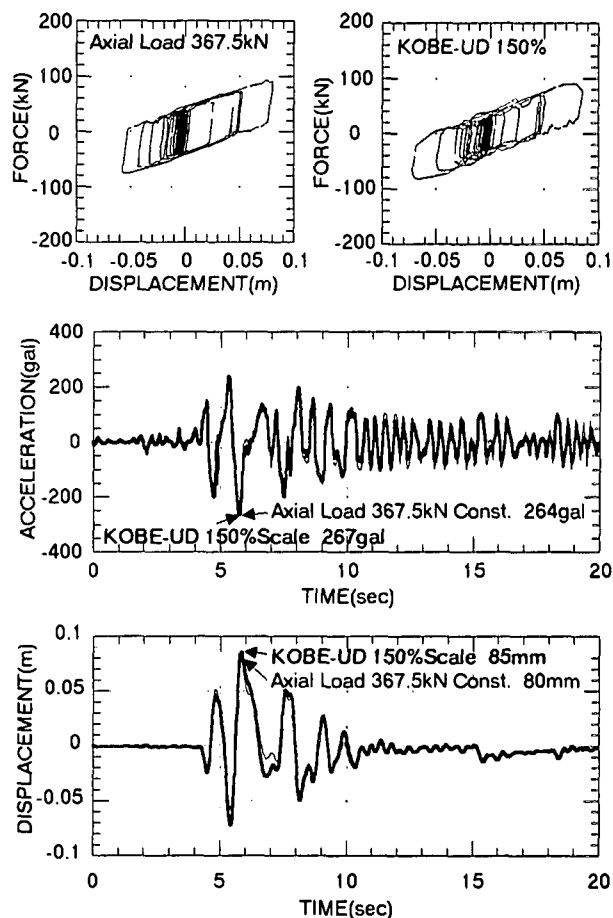


図-4. 上下動入力スケールの影響

(2) 水平バネ剛性の影響

図-3に水平バネ剛性から算出されるすべり後の固有周期1.0sec, 4.0secの応答加速度時刻歴を示す。摩擦減衰型免震支承の2次剛性に相当する水平バネ剛性を小さくし、すべり後の固有周期を長くすればすべり現象によって応答加速度が頭打ちとなり、大きな免震効果が得られることが分かる。すべり後の固有周期を4.0sec程度にすれば、橋脚に作用する慣性力をすべり支承の降伏加速度相当(約130gal)抑えることができる。

(3) 上下動作用下の地震応答

図-4に一定軸力(水平動のみ)及び上下動 KOBE-UD150%を載荷したケースの支承履歴曲線と応答加速度及び応答変位時刻歴を示す。支承の履歴曲線を比較する

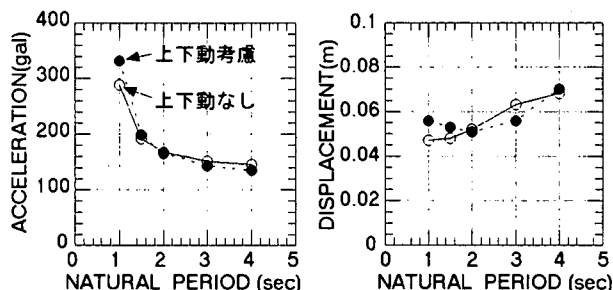


図-5. 上下動作用下の免震効果

と、上下動の影響によって摩擦力が変動しやや丸みを帯びた履歴形状となっている。しかし、応答加速度及び応答変位はほぼ一致しており上下動の影響は認められない。上下動入力によって摩擦力は変動するが、水平方向の地震応答に影響しないことが分かる。

図-5にすべり後の固有周期を変化させた場合の最大応答加速度及び最大応答変位を上下動の有無について比較した図を示す。上下動作用下においてすべり後の固有周期が変化しても免震効果に与える影響は小さく、最大応答値はほぼ一致している。

本実験結果から、摩擦減衰型免震支承の地震応答に及ぼす上下動の影響は小さいことが明らかとなり、上下動の影響を無視した挙動によって摩擦減衰型免震支承の地震応答及び免震効果をほぼ再現できることが分かった。

4. 上下動の影響を考慮した地震応答解析

(1) 解析方法

解析モデルはハイブリッド実験と同様に、摩擦減衰型免震支承を有する1自由度系モデルとする。水平バネ剛性から算出されるすべり後の固有周期は4.0sec($k=92.5$ kN/m)とする。すべり支承に作用する軸力変動は支承部の鉛直剛性を十分剛であると仮定し、上下方向加速度と質量の積で表される上下方向変動荷重がすべり支承に作用するものとする。摩擦係数は、図-2に示した摩擦係数と面圧及びすべり速度の載荷実験データを(1)式及び(2)式に示す近似曲線で定式化する。これらの摩擦係数の依存性を地震応答解析で考慮し、面圧及びすべり速度依存性によって時々刻々と摩擦力が変化する場合の摩擦減衰型免震支承の地震応答特性を検討する。

摩擦係数のすべり速度依存性を以下の近似式で表す³⁾。

$$\mu_v = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \exp(-av) \quad (1)$$

μ_{max} : すべり速度が速い場合の摩擦係数 = 0.133

μ_{min} : すべり速度が遅い場合の摩擦係数 = 0.09

a : 速度依存性を規定する係数 = 2

v : すべり速度 (kine)

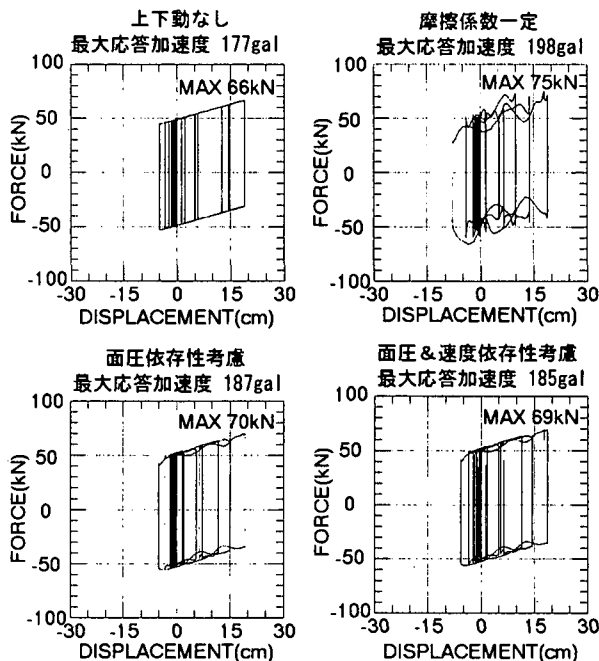


図-6. 上下動作用下の地震応答

摩擦係数の面圧依存性を以下の近似式で表す⁴⁾。

$$\mu_p = 0.26 \exp(-0.06 \sigma_p) \quad (2)$$

σ_p : 面圧 (MPa)

すべり支承の非線形モデルは1次剛性を無限大とした剛塑性型とし、摩擦力を速度-荷重関係で表す。また、解析ではすべり支承の摩擦力が作用力より大きければ滑動せずに静止するという滑動判定を考慮した。数値積分はRunge-Kutta法を用い、積分間隔は0.002secとした。地震入力は神戸海洋気象台記録波(以下KOBE)を用いた。解析プログラムはMATLAB-Simulink⁵⁾により作成した。

(2) 上下動作用下の地震応答

図-6にKOBE-NS、KOBE-UDによる摩擦減衰型免震支承の履歴曲線を摩擦係数の依存性について比較した図を示す。上下動作用下において摩擦係数を一定として解析を行った場合、摩擦力は上下動の変動に依存するため複雑な履歴形状となり、摩擦力の最大値は上下動なしのケースに対し約14%大きくなっている。また、最大応答加速度は約12%大きくなっており、ハイブリッド実験の結果とは大きく異なっている。ハイブリッド実験から上下動の影響は小さいことが明らかになっているが、摩擦係数を一定とした解析ではすべり支承の挙動を再現出来ないことが分かる。

一方、摩擦係数の面圧依存性を考慮すると、滑動中に上下動の影響を受けて摩擦力が変化しているが、上下動なしのケースと良く一致した履歴形状を示している。上下動の変動によって摩擦係数は0.107~0.179まで変動し

ているが、摩擦係数と上下方向荷重の積で表される摩擦力は上下動による変動は小さいことが分かる。上下動なしのケースに対して最大摩擦力、最大応答加速度とも約6%の差である。つまり上下動の影響を考慮した地震応答解析を行う場合には、摩擦係数の面圧依存性を考慮した解析が妥当であり、摩擦減衰型免震支承の挙動を良く再現できる。また、従来から一般的に行われている摩擦係数を一定とし、上下動を考慮しない解析によっても、地震応答をほぼ再現出来る。

摩擦係数の面圧依存性とすべり速度依存性を同時に考慮したケースと面圧依存性のみを考慮したケースを比較すると、両者は良く一致している。摩擦係数のすべり速度依存性を考慮した解析的研究³⁾から明らかになっているように、実地震波レベルではすべり速度が速いため摩擦係数のすべり速度依存性は地震応答に影響しない。

(3) 正弦波によるすべり支承の応答

実地震波の水平動及び上下動はお互いに時々刻々と変化しているが、すべり支承に作用する上下動が変化し摩擦力が小さくなるような瞬間に大きな水平動が入力された場合にはすべり支承の変位が過大になる恐れもある。そこで、定常な正弦波地動による解析によって、すべり支承に水平動と上下動が作用した場合の基本的な応答特性について検討した。水平動及び上下動の入力位相は等しく、正弦波のピークは一致している。入力加速度振幅及び周期は水平動・上下動ともに200gal、1.0Hzとした。尚、本解析ではすべり支承の応答特性を明確にする目的で、水平バネを無視している。

図-7に正弦波入力による定常状態5秒間におけるすべり支承の履歴曲線を示す。上下動を考慮し、摩擦係数を一定とした場合は応答加速度、応答変位ともに上下動なしのケースと比べて大きな応答を示している。摩擦力は摩擦係数と鉛直荷重の積で表されるため、摩擦係数が一定ならば面圧が小さくなる場合に応答が大きくなる。

一方、摩擦係数の面圧依存性を考慮すると、摩擦係数を一定とした場合よりも応答が低減される。しかし、摩擦係数の面圧依存性を考慮しても上下動なしのケースよりも応答が大きくなっている。摩擦係数の面圧依存性は面圧が大きくなる程摩擦係数が小さくなるため、面圧が大きくなる場合に応答が大きくなる。実地震波では水平動と上下動がランダムに変化しているが、ある瞬間に水平動と上下動のピークが一致し滑動する場合には応答が大きくなる可能性があることを示している。

5. 結論

上下動を受ける摩擦減衰型免震支承のハイブリッド地震応答実験及び上下動の影響を考慮した地震応答解析を

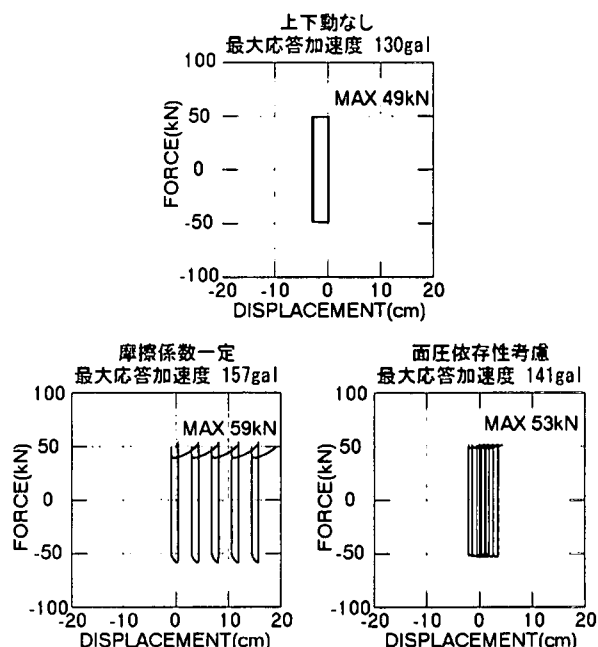


図-7. 正弦波によるすべり支承の応答

行い以下の結論を得た。

- (1) 摩擦係数の面圧依存性により摩擦係数が変化するが摩擦力の変動は小さく、上下動が水平方向の地震応答に及ぼす影響は小さい。また、水平動のみの挙動でも上下動作用下の地震応答をほぼ再現出来る。
- (2) 上下動作用下でも水平バネ剛性を小さくすることによって大きな免震効果が得られる。
- (3) 上下動を受ける摩擦減衰型免震支承の地震応答解析を行う場合、摩擦係数を一定とした解析では実挙動の再現が難しく、摩擦係数の面圧依存性を考慮した解析を行うことが妥当である。
- (4) 摩擦係数のすべり速度依存性を考慮した解析を行い、地震応答に及ぼすすべり速度の影響は小さいことを確認した。
- (5) 正弦波地動による解析から水平動と上下動のピークが一致し滑動する場合には応答が大きくなる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 岡本晋：すべり方式免震橋梁の地震時挙動に及ぼす上下動の影響に関する基礎的研究，第23回地震工学研究発表会，pp517-520，1995年7月
- 2) 財団法人土木研究センター：建設省・道路橋の免震設計法マニュアル(案)，平成4年10月
- 3) 岡本晋・深沢泰晴・藤井俊二・尾崎大輔：すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性，土木学会論文集N0.513/1-31，pp191-200，1995年4月
- 4) 林章二・北村佳久・猿田正明：積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム，pp2807-2812，1998年11月
- 5) The Math Works, Inc.: SIMULINK Dynamic System Simulation for MATLAB, 1997.