

摩擦係数の速度依存性に着目したシングル 球面すべり支承の振動台実験の再現解析

高橋 健太郎¹・藤倉 修一²・大藪 宏文³・Nguyen Minh Hai⁴

¹学生会員 宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科（〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

²正会員 Ph.D. 宇都宮大学准教授 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科
（〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

³正会員 宇都宮大学大学院 工学研究科博士後期課程（〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

⁴The University of Danang - University of Science and Technology, Faculty of Road and Bridge engineering
(54 Nguyen Luong Bang, Da Nang City, Viet Nam)

1. はじめに

日本では、免震支承として積層ゴム系支承が多く用いられているが、積層ゴム系支承には、近年の大地震における破断や経年劣化による損傷といった被害が生じている。これらの事例を踏まえると、積層ゴム系支承とは異なるタイプの支承を開発することは重要である。免震支承は支承機能と絶縁機能を併せ持ち、積層ゴム系支承とすべり系支承がある。積層ゴム系支承としては鉛プラグ入り積層ゴム支承や高減衰ゴム支承等が、すべり系支承としてはすべり支承や球面すべり支承等がある。本研究では、これまでに橋梁への実績のない球面すべり支承に着目し、我が国の橋梁への適用性を検討した。

球面すべり支承は、凹形球面を有するコンケイブプレート上を、凸型に球面加工したスライダと呼ぶ可動体が摺動する振り子型の免震支承であり、振り子運動による復元機構と摩擦力による減衰機構を有している。また、固有周期はコンケイブプレートの球面半径により決まるため、長周期化が容易であるという利点がある。球面すべり支承としては、1面摺動タイプのシングル球面すべり支承、2面摺動タイプのダブル球面すべり支承、さらに摺動面を有するトリプル球面すべり支承などが開発されている。橋梁の免震支承として適用する場合には、桁のたわみに伴う支承部の回転に追随することができる関節機能を有する支承が適している。シングル球面すべり支承には関節機能を有するヒンジが必要であるため、本研究ではシングル球面すべり支承を対象とし

て検討した。

Zayas^ら¹⁾は、球面すべり支承を初めて提案し、シングル球面すべり支承(Spherical sliding bearing: SSB)またはFriction Pendulum System: FPS)に対して振動台実験を行った。球面すべり支承は固有周期が球面半径のみによって決まることや、不均等な鉛直荷重が作用している場合でも、上部構造が回転しないことなどの利点を示した。国内では、建築分野において、ダブル球面すべり支承が実際の建造物に適用されている。中村^ら²⁾は、球面すべり支承の実大試験体により、その基本性能を確認し、さらに、球面すべり支承の縮小試験体により、摩擦係数の面圧・速度・温度依存性を確認し、実験結果から摩擦係数の補正式を導いた。本研究において着目する摩擦係数の速度依存性は、すべり材であるPTFE (polytetrafluoroethylene) の粘弾性的性質によるものだと考えられている。PTFEにおける摩擦係数の速度依存性を考慮する式はこれまでに、幾つか提案されている^{3,4)}。

藤倉^ら^{5,6)}は、球面すべり支承を橋梁に用いることを目的として、スライダに関節機能のないダブル球面すべり支承を対象に静的載荷試験を行ったが、活荷重作用時に桁のたわみに伴う支承部の回転に、支承が追従することができず、応力集中が生じる可能性があることを示した。そこで、ヒンジを有するシングル球面すべり支承に着目し、活荷重を想定した同様の実験を行い、シングル球面すべり支承の活荷重作用時の挙動を明らかにした⁷⁾。さらに、大藪^ら⁸⁾は、シングル球面すべり支承を用いた橋梁模型への振動台実験により、地震動作用時のシングル球

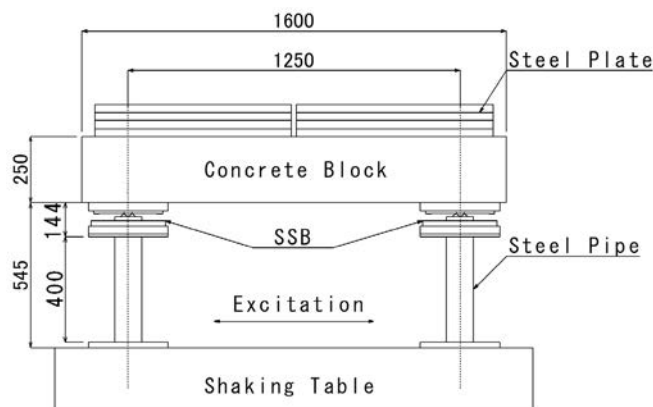


図-1 橋梁模型試験体および実験状況（側面図）

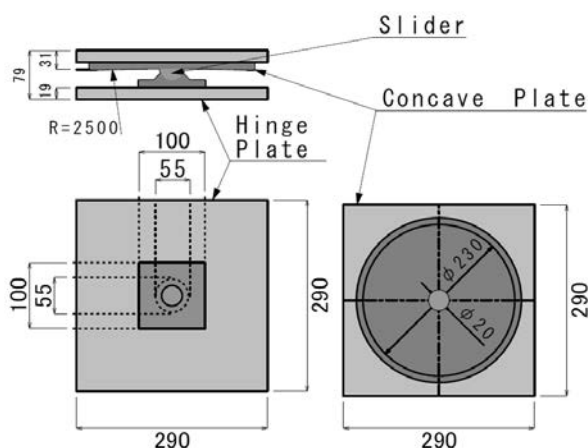


図-2 シングル球面すべり支承

面すべり支承の挙動を調べた。本研究では、大藪ら⁸⁾が行ったシングル球面すべり支承の振動台実験に対して、橋脚—支承—上部構造をモデル化した解析モデルによる非線形動的解析を行った。一連の解析から実験結果を再現するとともに、特に、摩擦係数の速度依存性が応答値に与える影響について検討した。

2. 振動台実験概要

(1) 試験体概要

過年度に行った振動台実験の橋梁模型試験体および実験状況を図-1に示す。上部構造模型は、 $0.90 \times 1.60 \times 0.25\text{m}^3$ の鉄筋コンクリートブロックであり、その上に鋼板を合計16枚設置した。上部構造の総重量は17.16kNであり、支承1基あたりに平均4.29kNの軸力が作用する。この上部構造を4基のシングル球面すべり支承によって支持し、各支承の下に橋脚を想定した鋼管柱（ $\phi = 101.6\text{mm}$ ， $t = 3.2\text{mm}$ ， $L = 400\text{mm}$ ）を設置して、これらを振動台にボルトで固定した。

実験に使用したシングル球面すべり支承を図-2に示す。シングル球面すべり支承は、球面半径2500mmの凹型曲面を持つコンケイブプレート、凸型曲面を持つ直径20mmのスライダおよびスライダの回転に対応するヒンジプレートから構成される。スライダ表面にはPTFE織物と接着性を高めた高強度繊維の二重織物から成るすべり材が貼付されている。なお、シングル球面すべり支承では、コンケイブプレートとヒンジプレートの上下位置を入れ替えることができるが、本稿では、図-2に示すように、コンケイブプレートを上側、ヒンジプレートを下側に配置した場合の検討を示す。

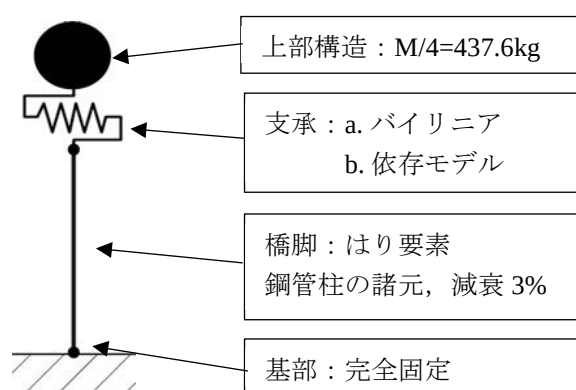


図-3 解析モデル概要

(2) 振動台実験方法

主な測定項目は、上部構造の加速度、変位および振動台の加速度、変位である。振動の加振方向は試験体の長手方向である橋軸方向とし、一方向に加振した。入力波は、周波数0.8Hz、加速度振幅 1.5m/s^2 の正弦波である。

3. 解析概要

(1) 解析モデル概要

解析モデルには、図-3に示すような、一つの橋脚—支承—上部構造からなるモデルを用いた。橋脚は線形はり要素を用いて鋼管柱の諸元を設定し、減衰定数を3%とした。鋼管柱の基部は、ボルトで固定したため、剛結とした。上部構造には、上部構造全体質量の1/4として、集中質量437.6kgを用いた。支承部には、非線形バネ要素を用いた。球面すべり支承の履歴曲線は、剛塑性型となることから、非線形特性はバイリニアの剛塑性型でモデル化されることが多い。しかし、実験結果から、バイリニアの剛塑

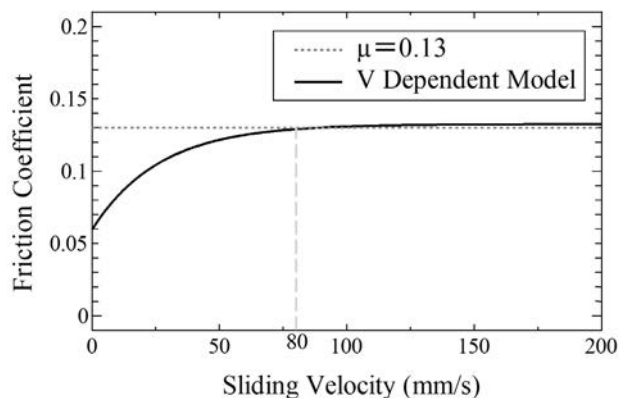


図-4 摩擦係数の速度依存性

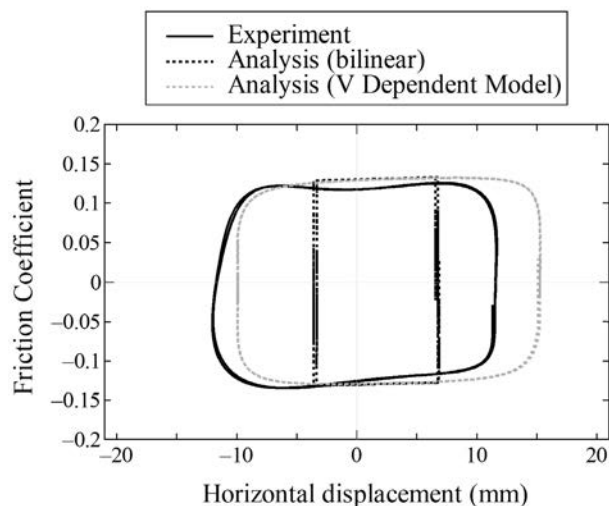


図-5 摩擦係数-変位履歴曲線

性型ではなく、丸みを帯びた履歴曲線を描いている。これは、球面すべり支承の摩擦係数の速度依存性の影響であると考えられる。本研究では、摩擦係数の速度依存性を考慮するため、バイリニアの骨格曲線を基本とし、摩擦係数が速度により変化した場合に、剛性変化点において丸みを帯びる履歴曲線モデルを用いた。摩擦係数の評価式は、中村ら²⁾の実験から求めた式を基に、式(1)に示すような基準摩擦係数 μ_0 に対して、支承部すべり速度 v および支承部面圧 σ の影響を表す補正係数を乗ずる形とした。

$$\mu(v) = \mu_0(1 - 0.55e^{-0.038v})(1.746\sigma^{-0.141}) \quad (1)$$

ここで、基準摩擦係数は本実験結果から $\mu_0 = 0.11$ とした。式(1)を図示すると、図-4のようになる。式(1)におけるすべり速度は、2面摺動でのすべり速度であるため、1つのすべり面でのすべり速度は半分である。本研究では、1面摺動に換算するために、すべり速度にかかる係数を2倍としている。また、本解析モデルでは、支承の面圧は変化せず、 $\sigma = 13.6\text{MPa}$ である。本研究では、速度依存を考慮したモデル（以下、依存モデルと呼ぶ）および球面すべり支承の解析で多く用いられるバイリニアモデルの2つのモデルで比較検討を行った。バイリニアモデルでは、摩擦係数 $\mu = 0.13$ で一定な値とした。これは、基準摩擦係数 $\mu_0 = 0.11$ に対して、面圧の影響を考慮したためである。なお、中村ら²⁾の実験と本実験で用いた支承の滑り材およびコンクリートプレートは同じ材質を用いている。

(2) 解析方法

本研究の解析では、非線形時刻歴応答解析プログラムTDAP III⁹⁾を用いた。数値積分法はNewmark β 法($\beta=1/4$)を用いて、積分時間間隔は0.0002秒とした。

減衰にはひずみエネルギー比例減衰を用い、橋脚の粘性減衰のみを考慮することとした。支承は履歴減衰のみを考慮し、粘性減衰は考慮していない。解析で入力した加速度は、実験時に振動台で計測した加速度とした。

4. 解析結果および考察

(1) 摩擦係数-変位履歴曲線

周波数 0.8Hz、加速度振幅 1.5m/s² の正弦波加振による摩擦係数-変位履歴曲線を図-5に示す。図-5では、実験結果、バイリニアモデルおよび依存モデルによる解析結果を比較している。なお、履歴曲線の縦軸は水平荷重で表すことが多いが、ここでは、上部構造の計測加速度から求めた水平荷重を平均鉛直荷重(=4.29kN)で除した値を摩擦係数として示している。横軸は支承部の相対変位であり、支承の摺動変位である。また、図-5は加振してから定常状態となった後の3サイクル程度の履歴を示している。

図-5より、実験結果の履歴曲線はバイリニアの剛塑性型に対して丸みを帯びていることが確認できる。最大変位は±13mm程度であった。バイリニアモデルによる解析では、剛塑性に近い挙動を示しており、実験結果と比較すると、変位は半分程度の値であった。依存モデルでは、摩擦係数の速度依存性により、履歴曲線が丸みを帯び、実験結果に似た履歴を描く結果となった。依存式による変位結果は若干+側に偏ってはいるものの、振幅は実験結果と同程度であった。

(2) 時刻歴すべり速度および摩擦係数

図-6に依存モデル解析による支承部のすべり速度の時刻歴応答の実験結果および依存モデルによる解

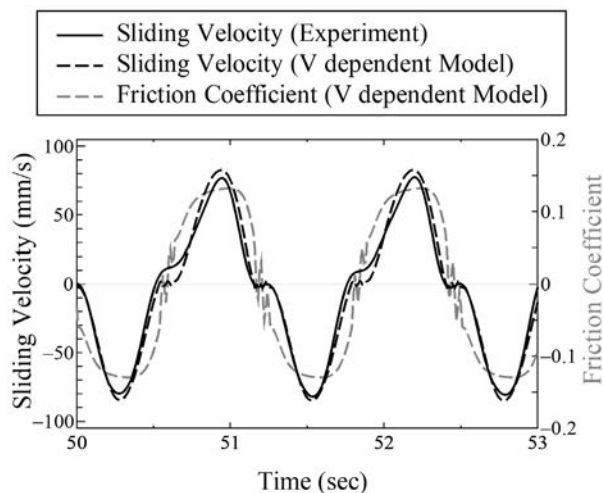


図-6 変位および摩擦係数の時刻歴応答

析結果の比較を左側の縦軸に示す。併せて、依存モデル解析による摩擦係数の時刻歴応答を実線で右側の縦軸に示す。すべり速度が大きくなると、摩擦係数も大きくなる。これは、式(1)および図-4 に示した速度依存性の影響である。

また、図-6 より、最大すべり速度は 80mm/s 程度である。図-4 に示す縦の点線から速度 80mm/s における摩擦係数を求めると、摩擦係数は約 0.13 である。これは、実験結果による摩擦係数である図-5 の黒実線における y 切片の値と概ね一致する。さらに、図-6 より、実験におけるすべり速度は 0~80mm/s 程度であったと推測できる。図-4 に示すように、速度が 0~80mm/s の範囲では、摩擦係数は大きく変化する。そのため、実験では、摩擦係数を一定と仮定したバイリニアモデルに比べ、摩擦係数の速度依存性を考慮したモデルの方が、実験結果を精度良く再現できたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、過年度に行われたシングル球面すべり支承で支持された橋梁模型試験体の加振実験を再現するために、非線形動的解析を行った。特に、摩擦係数の速度依存性に着目して、摩擦係数の速度依存性が応答値に与える影響について検討した。

加振実験の結果と、バイリニアモデルでの解析および摩擦係数の速度依存性を考慮したモデルでの解析結果を比較すると、速度依存性を考慮したモデル

の方が実験結果に近く、バイリニアの剛塑性型を基本として剛性変化点で丸みを帯びた履歴曲線が得られた。本研究で対象とした試験体のように、球面すべり支承が 80mm/s 程度以下の比較的低速で滑る場合には、摩擦係数は大きく変化する領域であるため、摩擦係数の速度依存性を考慮した方が、実験結果をより近く再現できる。

参考文献

- 1) Zayas, V. A., Low, S. S. and Mahin, S. A. : The FPS Earthquake Resisting System: Experimental Report, Earthquake Engineering Research Center, Technical Report, UBC/EERC-87/01, 1987.
- 2) 中村秀司, 西本晃治, 富本淳: 球面すべり支承 NS-SSB®の開発〜高面圧で周期のばらつきが小さい免震支承〜, 新日鉄住金エンジニアリング技報 Vol.6, pp.28-35, 新日鉄住金エンジニアリング株式会社, 2015.
- 3) 姫野岳彦, 運上茂樹: 支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, 2003.
- 4) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和: 各種依存性を考慮したすべり型免震支承の数値モデルに関する一考察, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 701-708, 2005.
- 5) 藤倉修一, 菊地真紀, Nguyen Minh Hai, 武田龍國, 中島章典: 静的正負交番荷重実験によるダブル球面すべり支承の復元力特性, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 283-292, 2018.
- 6) 藤倉修一, Nguyen Minh Hai, 竹内小織, 中島章典: ダブル球面すべり支承で支持された橋梁桁の活荷重作用時挙動に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 178-187, 2019.
- 7) 大藪宏文, 藤倉修一, 前鶴菜摘, Nguyen Minh Hai, 中島章典: シングル球面すべり支承で支持された橋梁の活荷重時挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 274-282, 2020.
- 8) 大藪宏文, 藤倉修一, 高橋健太郎, Nguyen, Minh. Hai, 中島章典: 下部構造への影響に着目したシングル球面すべり支承を有する橋梁模型の振動台実験, 第40回地震工学研究発表会講演論文, B12-1646, 2020.
- 9) アーク情報システム: TDAP III, Ver.3.09, 理論説明書, 2017.