

摩擦係数の速度依存性を考慮した シングル球面すべり支承の振動台実験の再現解析

宇都宮大学 学生員 ○ 高橋健太郎 正会員 藤倉修一 正会員 大藪宏文

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、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。本研究では、海外の地震地域において橋梁へ適用実績のある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。本研究では、大藪ら¹⁾が行っ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

大藪ら¹⁾が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、 $0.90 \times 1.60 \times 0.25m^3$ 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（ $\phi=101.6mm$, $t=3.2mm$, $L=400mm$ ）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。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

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0.03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。

球面すべり支承の摩擦係数の値が常に一定という仮定の下では、そ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。

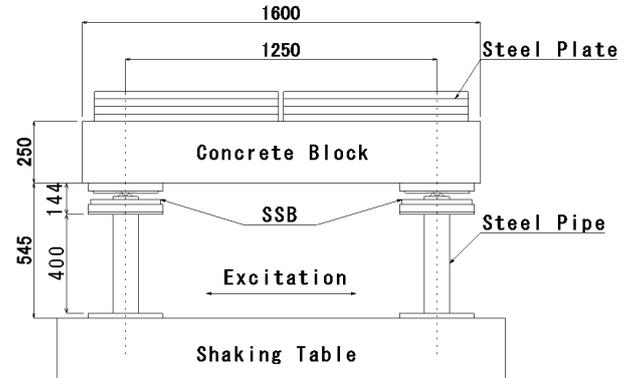


図-1 橋梁模型試験体および実験状況（側面図）

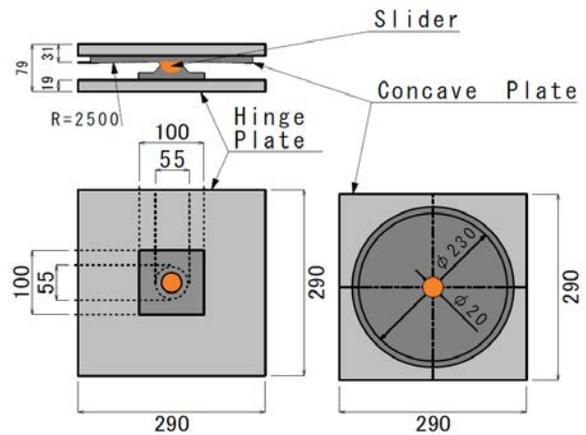


図-2 シングル球面すべり支承

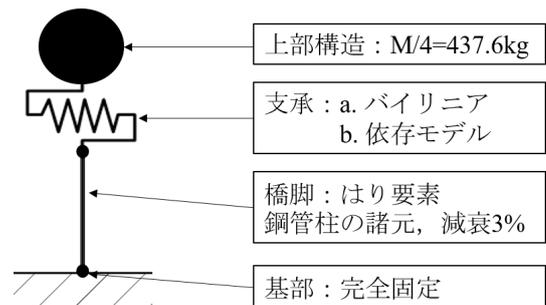


図-3 解析モデル概要図

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。中村ら²⁾の実験から求めた式を基に、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 の摩擦係数の評価式は、影響を表す補正係数を乗ずる形とした。その評価式を式(1)に示す。

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

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。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、速度依存性を考慮したモデル（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。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. 解析結果及び考察

(1) 摩擦係数-変位履歴曲線

周波数 0.8Hz、加速度振幅 1.5m/s^2 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、支承の揺動変位である。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 $\pm 13\text{mm}$ 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いている。依存性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 $0\sim 80\text{mm/s}$ 程度であったと推測できる。図-4 に示すように、速度が $0\sim 80\text{mm/s}$ 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. おわりに

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

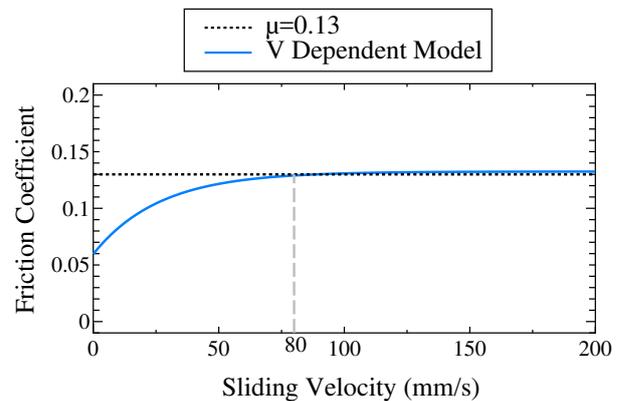


図-4 摩擦係数の速度依存性

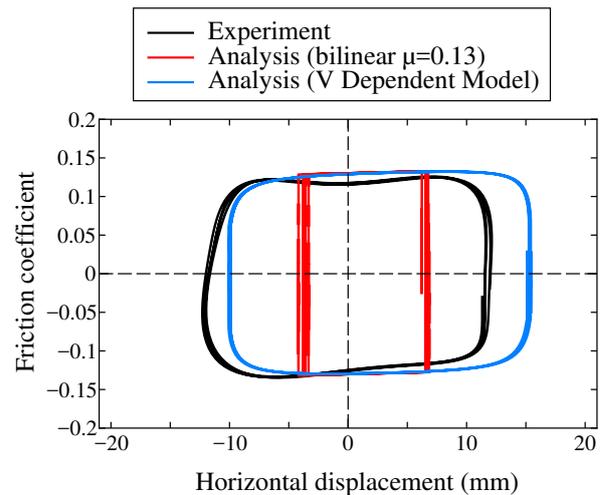


図-5 摩擦係数-変位履歴曲線

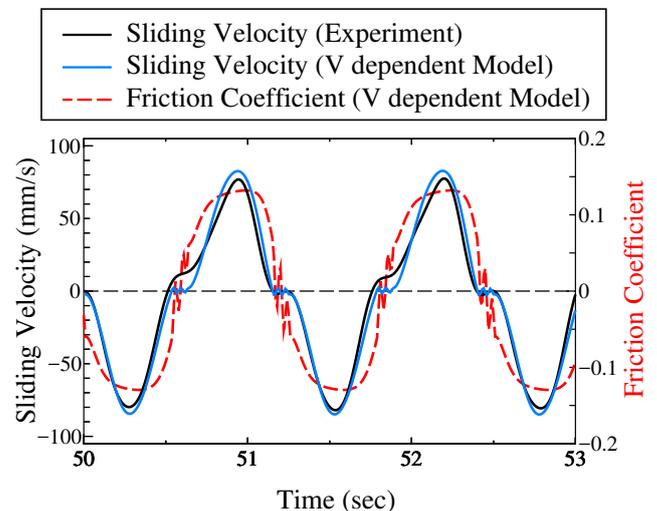


図-6 速度および摩擦係数の時刻歴応答

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、実験結果をより近く再現できるという結果であった。

参考文献

- 1) 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.
- 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.