

低摩擦型球面すべり支承の振動台による動的実験

勝目 進之介¹・藤倉 修一²・大藪 宏文³・Thay Visal⁴

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）

⁴正会員 宇都宮大学助教授 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）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、多くの橋梁に被害が生じ、支承、特に鋼製支承において破損や損傷が確認された。この地震によって、免震構造という考えが広まり、免震支承が広く使われるようになった。免震とは、地震動によって生じる上部構造の慣性力を下部構造に伝えないものであり、その機能を持たせた支承が免震支承である。現在、我が国では、一般的に、免震支承として積層ゴム系支承が用いられている。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震において、経年劣化や地盤変状等の要因も重なり、積層ゴム系支承に破断や亀裂等の被害が確認されている¹⁾。これらの背景から、積層ゴム系支承だけでなく、別のタイプの免震支承の開発も進める必要があり、本研究では新たな免震支承として、我が国の橋梁では適用実績のない球面すべり支承に着目する。

球面すべり支承は、凹型球面上のコンケイブプレート（材質SUS304）をスライダが滑る可動式の免震支承であり、摩擦による減衰機能と振り子運動による復元機能を有している。また、固有周期は上載荷重の影響を受けず、球面半径のみで決まり、積層ゴム系支承に比べ、支承の構造高や平面寸法を小さくすることが可能である²⁾。以上のような特徴を球面すべり支承は有しているが、免震支承としての球面すべり支承の動的挙動については、十分明らかになっていない。そこで、すべり系支承の動的挙動を把握するにあたり、すべり面の摩擦係数は重要なパラメータであることから、本研究では、球面すべり支承の摩擦係数に着

目した。これまでに基準摩擦係数が0.05程度の中摩擦型の球面すべり支承に対する実験的検討を行っている^{3)~6)}。中摩擦型よりも小さい低摩擦係数をすべり面に用いることで、上部構造と下部構造の絶縁機能を高くし、橋脚の断面力の低減を図ることができる。本研究では、球面すべり支承のすべり面における摩擦力の違いによる基本的特性や動的挙動を明らかにするために、4基のシングル球面すべり支承で支持された橋梁模型桁に対して、摩擦係数の異なる2種類のスライダ（中摩擦型および低摩擦型）を用いて振動台による加振実験を行った。

2. 実験供試体

実験に使用したシングル球面すべり支承の概略図を図-1に示す。シングル球面すべり支承はコンケイブプレート（材質SUS304）とヒンジプレート（材質SUS304）、およびその間に位置するスライダから構成される。球面半径が異なる3種類のコンケイブプレートを用い、摺動するスライダも同じ球面半径を有する。コンケイブプレートの球面半径および固有周期、固有振動数を表-1に示す。表-1に示すように、球面半径が大きくなると、固有振動数は小さくなる。このコンケイブプレート上をすべり面とし、スライダが摺動する。中摩擦型、低摩擦型のスライダは直径20mmの凸型球面であり、すべり面に接するスライダの表面には、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を貼付した。ヒンジプレートはスライダの回転に追従できるように関節機能を有しており、ヒン

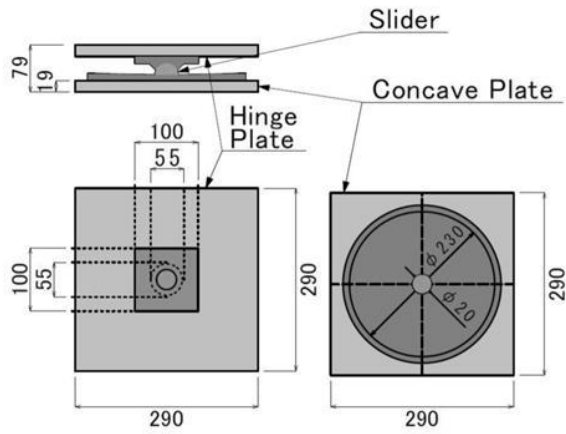


図-1 実験供試体

表-1 球面半径の固有周期

球面半径 $R(\text{mm})$	5000	1000	2500
固有周期 $T_0(\text{s})$	1.42	2.01	3.17
固有振動数 $f(\text{Hz})$	0.70	0.50	0.32

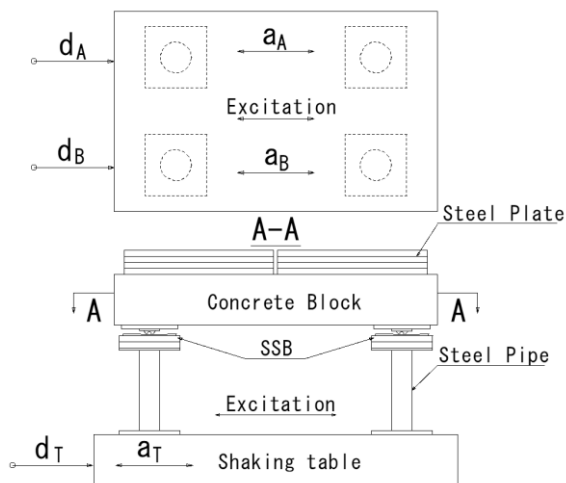
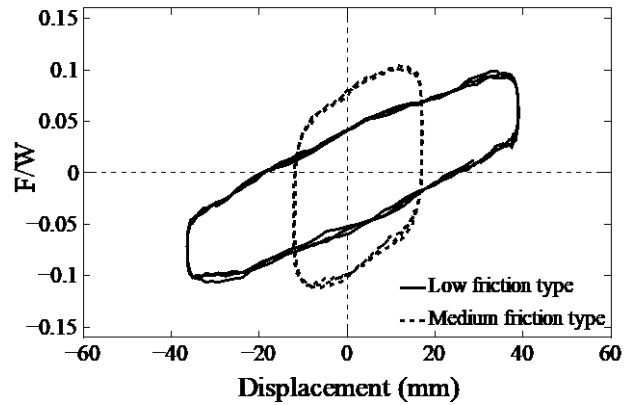


図-2 加振実験状況

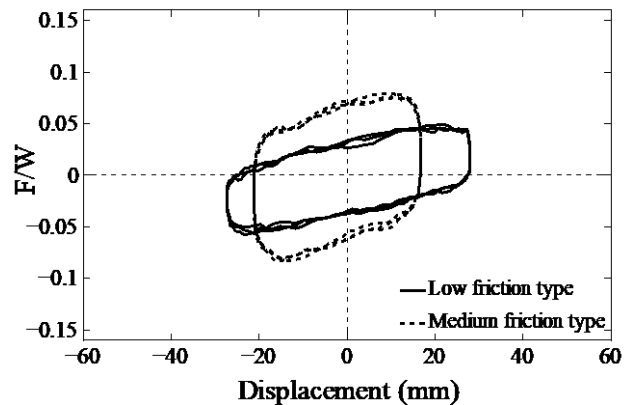
ジプレートとスライダが接する面の摩擦を低減するために、潤滑油を塗った。

3. 加振実験状況

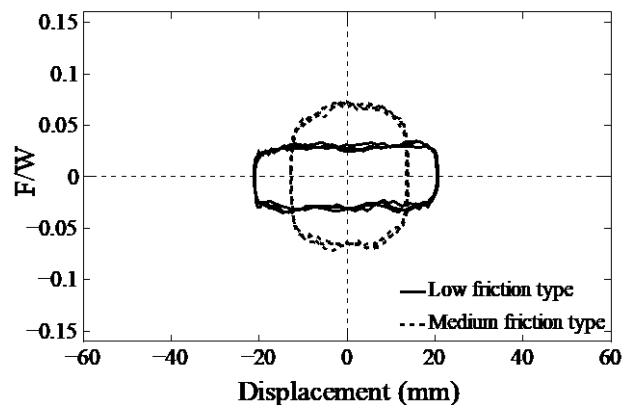
振動台実験による加振実験状況を図-2に示す。上部構造模型は $0.90 \times 1.60 \times 0.25\text{m}^3$ のコンクリートブロックを用い、その上に鋼板を計16枚設置し、これを4基のシングル球面すべり支承によって支持した。上部構造の総重量は17.16kNであり、支承1基あたり平均4.29kNの軸力が作用する。各支承の下に橋脚を想定した鋼管柱($\phi=101.6\text{mm}$, $t=3.2\text{mm}$, $L=400\text{mm}$)を設置し、これらを振動台に



(a) 球面半径 500mm



(b) 球面半径 1000mm



(c) 球面半径 2500mm

図-3 各球面半径の摩擦係数-変位関係

ボルトで固定した。加振方向については、試験体の長手方向を橋軸方向として加振した。加振方法については、正弦波加振とし、所定の加速度に至るまで漸増させ、所定の加速度振幅で約20秒間加振した。用いた正弦波は、周波数1.0Hz、加速度振幅 1.0m/s^2 である。図-2に示すように計測項目は、上部構造加速度(a_A , a_B)、変位(d_A , d_B)及び、振動台加速度(a_T)、変位(d_T)である。用いた正弦波は、周波数1.0Hz、加速度振幅 1.0m/s^2 である。

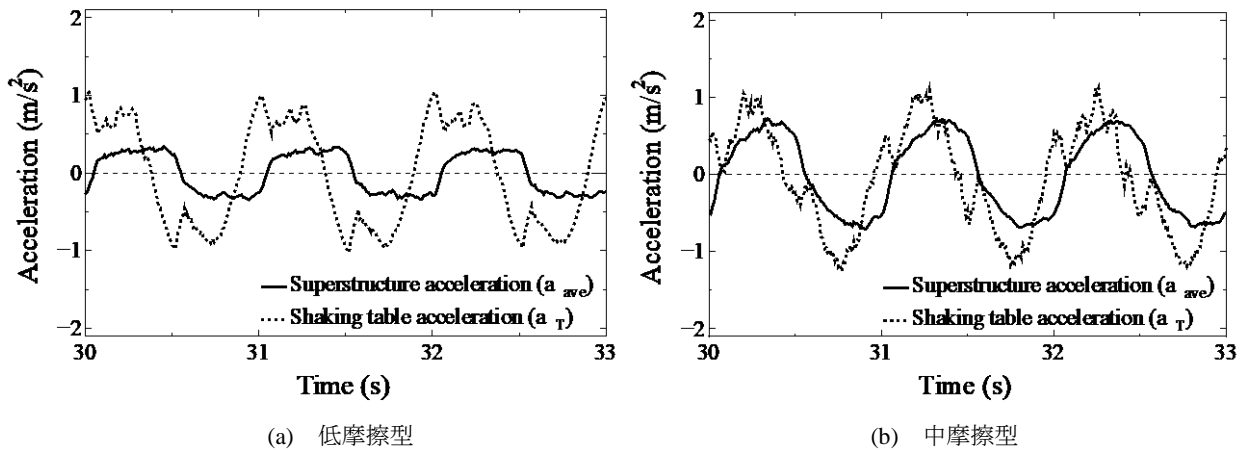


図-4 時刻歴応答加速度

4. 実験結果

(1) 摩擦係数-変位関係

図-3 に各球面半径における摩擦係数-変位関係を示す。(a)~(c)は、それぞれ球面半径 500mm, 1000mm, 2500mm の結果である。(a)~(c)の実線は低摩擦型、点線は中摩擦型の実験結果を示しており、加速度振幅が定常状態に達してから3サイクル程度を示している。横軸の変位は2箇所計測した上部構造変位の平均から振動台の変位を差し引いた相対変位である。縦軸の F/W は、上部構造重量に対する水平荷重の比を表しており、上部構造加速度に上部構造質量 $M=1750\text{kg}$ を乗じて求めた水平力 F を上部構造重量 $W=17.2\text{kN}$ で除した値となる。ここで摩擦係数は、相対変位が0の時として、これらのグラフのy切片から求めた。中摩擦型では、約0.070程度、低摩擦型では約0.035程度であり、低摩擦型は中摩擦型の概ね1/2程度となった。低摩擦型の方が中摩擦型より低い荷重で滑り出すことから、相対変位が大きく、横に長い形状をしている。また、いずれも履歴曲線は角が丸みを帯びた形状をしており、これは摩擦係数の速度依存性によるものである⁷⁾。

(2) 加速度応答

図-4 は、球面半径 2500mm における振動台加速度と上部構造加速度の比較を時刻歴で示す。(a)は低摩擦型、(b)は中摩擦型の結果である。点線は振動台加速度、実線は上部構造加速度を示している。上部構造加速度には計測した2箇所の平均 (a_{ave}) を用いている。それぞれ定常状態の3秒間を示している。図-4 より、振動台の最大加速度約 1.0m/s^2 に対して、上部構造の最大加速度は、低摩擦型で約 0.3m/s^2 、中摩擦型で約 0.7m/s^2 であり、スライダ-

が摺動することによって、免震効果が生じるため、どちらも上部構造加速度が振動台加速度を下回っている。低摩擦型の方が、より低い水平力で滑り出すため、中摩擦型より上部構造加速度が小さい。

(3) 球面半径による影響

図-3 の摩擦係数-変位関係から、球面半径が大きくなるにつれて相対変位が小さくなっている。このことを調べるために変位共振曲線から考察する。正弦波外力による1自由度系の変位共振曲線を図-5に示す。(a)は低摩擦型、(b)は中摩擦型の結果である。横軸は各球面半径における固有振動数 f_0 と加振振動数 f の比、縦軸は静的外力作用時の変位 u_{st} に対する正弦波外力作用時の振動振幅 u の比を示している。また、変位共振曲線は減衰定数 h によって変化するが、ここでは、各球面半径の実験結果の履歴曲線から求めた等価減衰定数を用いた。各球面半径の等価減衰定数を図-5中に示す。ここで、変位共振曲線とともに、各球面半径における u/u_{st} を併せて示す。 u は実験結果の振動振幅を用い、 u_{st} は以下に示すシングル球面すべり支承の水平荷重 F と水平変位 u の関係式(1)から静的外力作用時の変位 u_{st} を求め、各球面半径における固有振動数 f_0 と加振振動数 1Hz の比に u/u_{st} をプロットした。

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W \quad (1)$$

ここで、 W は上部構造重量、 R はコンケイブプレート球面半径、 μ は摩擦係数である。また、水平荷重 F は上部構造質量に加速度 $0.1g$ を乗じたものである。変位共振曲線の固有振動数と加振振動数が近い f/f_0 が1付近の時、 u/u_{st} が最大値を取り、この状態が共振である。低摩擦型、中摩擦型ともに、球面半径が大きくなると、変位共振曲線と求めた u/u_{st} は、小さくなっており、同様の傾向を示している。

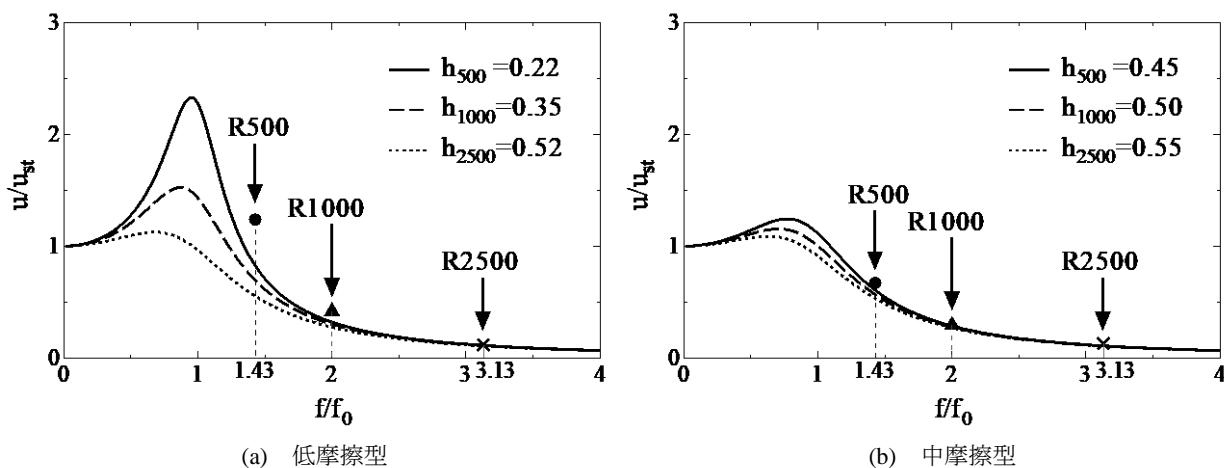


図-5 変位共振曲線

これにより、加振振動数 1Hz から各球面半径における固有振動数が離れることで、共振を避けるため、球面半径が大きくなると、変位応答は小さくなることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、シングル球面すべり支承の動的挙動を明らかにするために、摩擦力の違いに着目した振動台による加振実験を行った。本研究で得られた結果および知見は以下ようになる。

1. 摩擦係数は低摩擦型で約 0.035、中摩擦型で約 0.070 程度となり、低摩擦型は中摩擦型のおおよそ 1/2 程度であった。また、低摩擦型の方が低い荷重で滑り出すことから相対変位が大きく、履歴曲線は横に長い形状をしている。
2. 低摩擦型、中摩擦型ともに、スライダが摺動することによって生じる免震効果により、上部構造加速度は低減された。低摩擦型の方が、より低い水平力で滑り出すため、中摩擦型より上部構造加速度は低減される。
3. 加振振動数 1Hz および加速度 0.1g で加振した結果、低摩擦型、中摩擦型ともに、加振振動数から各球面半径の固有振動数が離れることによって共振を避け、変位応答は小さかった。

参考文献

- 1) 藤倉修一, 川島一彦: 2016 年熊本地震による道路橋の被害概要, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.161-168, 2016.
- 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) 藤倉修一, 菊地真紀, Nguyen Minh Hai, 武田龍國, 中島章典: 静的正負交番載荷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, 2018.3.
- 4) 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, 2019.3.
- 5) 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用時挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 274-282, 2020.3.
- 6) 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, 2020.10.
- 7) 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, 2005.8.