第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

摩擦係数温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

谷本　靖斗[1]・藤倉　修一[2]・勝目　進之介[3]・大藪　宏文[4]・Visal THAY[5]

[1]学生会員　宇都宮大学大学院　地域創生科学研究科博士前期課程（〒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]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）
[4]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）
[5]正会員　宇都宮大学助教　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において，道路橋の鋼製支承に多くの被害が確認された．この被害を受けて，一般的な鋼製支承よりも変形性能に優れた免震支承がわが国の橋梁に広く適用されるようになった．免震支承とは，上部構造を水平方向にやわらかく支持する機能と，地震のエネルギーを吸収する機能を併せ持つ支承のことである．現在わが国の橋梁では，免震支承として一般に鉛プラグ入り積層ゴム支承や，高減衰積層ゴム支承が採用されている．しかし，近年の大地震においてこれらの積層ゴム系支承には破断等の損傷が確認されていることや，積層ゴム系支承はある程度の構造高があり，既設鋼製支承と取り換えるのが困難な場合があることから，積層ゴム系支承とは別タイプの免震支承の開発が必要である．

積層ゴム系支承とは別タイプの免震支承として，積層ゴム系支承と比較して構造高が低く，免震支承としての利用が可能な球面すべり支承が開発されている[1)]．球面すべり支承は，わが国の橋梁分野への適用実績はないものの，海外では橋梁の免震支承として用いられており[2)]，日本国内の橋梁における適用が期待される．球面すべり支承とは，コンケイブプレートという凹型球面を，凸型すべり面を持つスライダー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する．また，固有周期は球面半径のみで決まり，上載荷重の影響を受けない．さらに，球面すべり支承の特徴として，すべり面には摩擦係数の速度・面圧・温度等の各種依存性があることが報告されている[1)]．これらの各種依存性は，球面すべり支承の動的挙動に影響を与える可能性があり，特に，気候に地域差があり，さらに，季節による温度変化がある日本国内において，球面すべり支承を橋梁に適用するためには，温度による摩擦係数への影響を把握することが重要である．しかしながら，摩擦係数温度依存性が球面すべり支承の動的挙動に与える影響については，十分に明らかになっておらず，詳細な検討が必要である．そこで本研究では，外気温の変化が球面すべり支承の動的挙動に与える影響を明らかにするため，振動台を用いた加振実験を行った．すべり材による影響を調べるために，中摩擦型と低摩擦型の2種類のすべり材を用いて，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加振実験を行った．

2.　試験体および加振実験概要

(1)　球面すべり支承試験体

実験に使用したシングル球面すべり支承の試験体を**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），スライダー（材質SUS400），ヒンジプレート（材質SUS304）から構成される．コンケイブプレートには，球面半径R=500mm，1000mm，2500mmの3種類のプレートを

用いた．また，スライダーの表面には，中摩擦型と低摩擦型の2種類のすべり材を貼付した．中摩擦型のすべり材は，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であり，中摩擦型のすべり材にシリコーンオイルを含浸して摩擦抵抗を低減させたものを低摩擦型のすべり材とした．以下，中摩擦型のすべり材を用いたシングル球面すべり支承を中摩擦型，低摩擦型のすべり材を用いたシングル球面すべり支承を低摩擦型と呼ぶ．

(2) 加振実験概要

加振実験状況を**図-2**に示す．上部構造模型として，0.90×0.16×0.25m^{3}の鉄筋コンクリートブロックの上に錘鋼板を合計16枚設置したものを用い，これを4基の球面すべり支承で支持した．各支承の下には橋脚を想定した鋼管柱（ϕ=101.6mm，t=3.2mm，L=400mm）を設置し，これらの鋼管柱を振動台にボルトで固定した．

振動台実験は，夏，秋，冬の3つのシーズンで行った．外気温は夏，秋，冬で，それぞれ，25℃～30℃程度，15℃～20℃程度，5℃～10℃程度であった．試験体の長手方向を橋軸方向として，橋軸方向に1方向加振し，正弦波で加振した．正弦波による加振条件を**表-1**に示す．周波数1.0Hz，加速度振幅は中摩擦型の試験体に対して0.15m/s^2，低摩擦型では0.08m/s^{2}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．加振周波数と加速度振幅は，振動台の性能と，実験の安全性を考慮して定めた．

計測項目は，**図-2**に示すように，上部構造加速度（a_A，a_B）および上部構造変位（d_A，d_B），振動台加速度（a_T）および振動台変位（d_T）である．

3. 実験結果

(1) 履歴曲線

図-3に履歴曲線を示す．(a)～(c)が中摩擦型，(d)～(f)が低摩擦型の実験結果である．いずれも，振動台の加速度振幅が定常状態に達してから3サイクル分を示している．横軸は支承部におけるコンケイブプレートとヒンジプレートの相対変位であり，支承の摺動変位を表している．縦軸は，上部構造の計測加速度から求めた水平力を鉛直荷重で除した値である．摩擦係数の定義により，このグラフにおけるy切片は摩擦係数の値となる．中摩擦型の摩擦係数を，正側および負側の摩擦係数の平均値として求

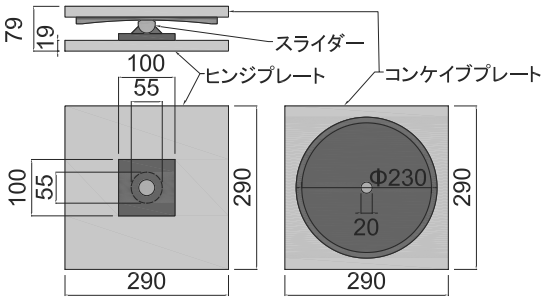


図-1 シングル球面すべり支承試験体

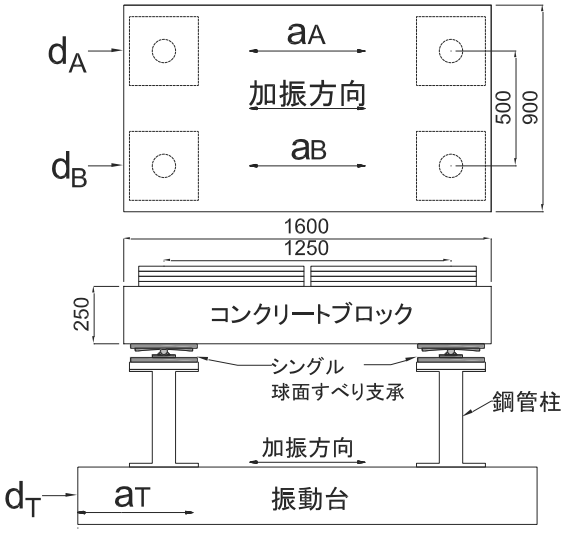


図-2 実験状況

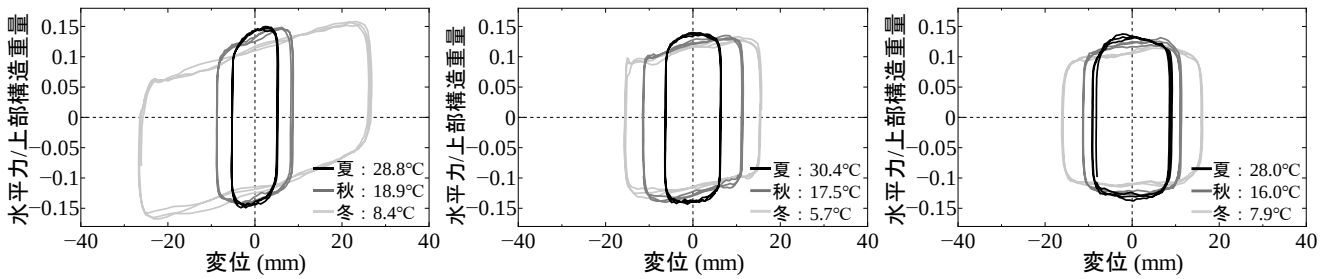
表-1 正弦波による加振条件

スライダーの すべり材	周波数 (Hz)	加速度振幅 (m/s^2)
中摩擦型 (PTFE)	1.0	0.08
低摩擦型 (PTFE+ シリコーンオイル)	1.0	0.15

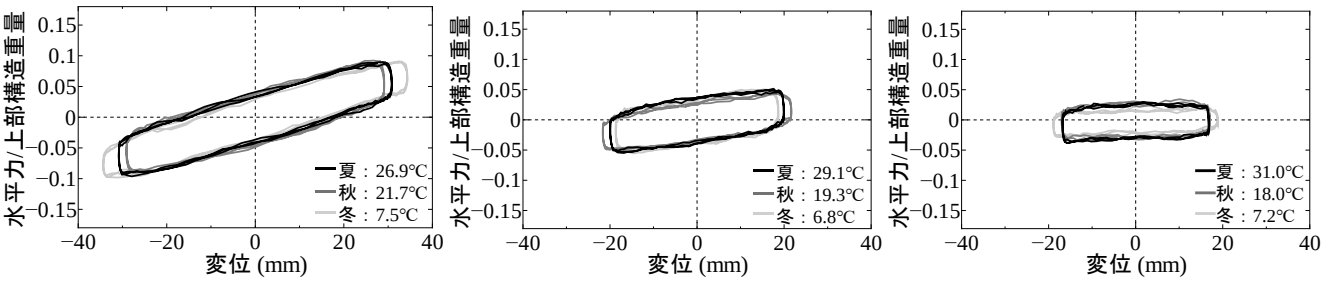
めると，R=500mmでは外気温28.8℃，18.9℃，8.4℃で，それぞれ0.117，0.132，0.142となり，外気温が低下するにつれて，摩擦係数が増加し，支承部の相対変位は，外気温の低下とともに減少している．また，R=1000mm，2500mmにおいても同様に，外気温の低下に伴い摩擦係数が増加し，支承部の相対変位が減少する結果となった．一方，低摩擦型では，異なる外気温において履歴曲線の明確な変化は確認されなかった．

(2) 速度の摩擦係数への影響

すべり面の摩擦係数には，温度依存性に加えて速度依存性もある．そこで，PTFEとステンレス間の滑り摩擦型免震支承に関する研究[3)4)]を参考に，R=500mmにおける速度－摩擦係数関係を**図-4**に示

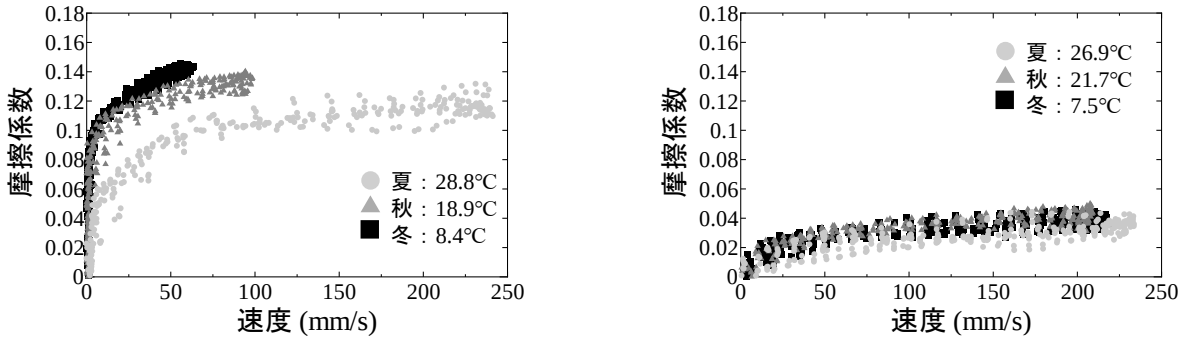


（a） 中摩擦型 (R=500mm)　（b） 中摩擦型 (R=1000mm)　（c） 中摩擦型 (R=2500mm)



（d） 低摩擦型 (R=500mm)　（e） 低摩擦型 (R=1000mm)　（f） 低摩擦型 (R=2500mm)

図-3 履歴曲線



（a）中摩擦型　（b）低摩擦型

図-4 速度-摩擦係数関係 (R=500mm)

す．横軸は支承部の相対変位を数値微分した相対速度，縦軸は摩擦係数である．摩擦係数μは，シングル球面すべり支承の荷重変位関係式[5]から算出し，式(1)により表される．

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W \tag{1}$$

ここで，Fは水平力，Wは上部構造重量，Rはシングル球面すべり支承の球面半径，uは支承部の相対変位である．中摩擦型と低摩擦型のいずれにおいても，速度の増加とともに摩擦係数が増加する速度依存性が確認された．また，中摩擦型では，外気温が低下するとともに摩擦係数が増加している．田中らは，PTFEの摩擦係数は速度の増加とともに増加し，摩擦速度が等しい場合，温度が高くなると摩擦係数が減少することを示しており[6]，中摩擦型の結果はこの報告と一致する．一方，低摩擦型では，外気温の増加とともに摩擦係数も若干増加しているものの，中摩擦型ほどの摩擦係数の増加は確認されなかった．

(3) 外気温の摩擦係数への影響

図-4より，中摩擦型と低摩擦型において，摩擦係数の速度依存性が確認されたが，夏，秋，冬に行われた実験では，最大すべり速度が異なる．摩擦係数には温度および速度の両方による影響が含まれているため，外気温の変化が摩擦係数に及ぼす影響を把握するためには，同一速度における摩擦係数を比較する必要がある．そこで，同一速度60mm/sにおける摩擦係数を縦軸に取り，横軸を外気温として**図-5**に示した．図より，中摩擦型では外気温の増加とともに摩擦係数が減少する温度依存性が確認されたが，低摩擦型では，外気温の変化に伴う摩擦係数の明確

な変化は確認されなかった．これは，すべり材に含浸したシリコーンオイルの影響により，中摩擦型よりも外気温の変化による摩擦係数の影響を受けにくいためであると推察される．

4. まとめ

本研究では，外気温の変化がシングル球面すべり支承の摩擦係数や動的挙動に与える影響を明らかにするために，外気温が異なる夏，秋，冬の時期に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振動台実験を行った．以下に本研究で得られた知見を示す．

1) 中摩擦型のすべり材を用いた場合は，外気温が低下するとともに摩擦係数が増加し，それに伴い相対変位が減少したが，低摩擦型スライダーを用いた場合は，履歴曲線に中摩擦型ほどの明確な変化は確認されなかった．
2) 中摩擦型および低摩擦型のすべり材のいずれにおいても，速度の増加とともに摩擦係数が増加する速度依存性が確認された．
3) 同一速度における摩擦係数を比較した結果，中摩擦型のすべり材を用いた場合は，外気温の増加とともに摩擦係数が減少する温度依存性が確認されたが，低摩擦型の場合は温度変化による摩擦係数の明確な違いが確認されなかった．

謝辞：本研究は，（株）高速道路総合技術研究所，宇都宮大学，日鉄エンジニアリング（株）および（一社）日本支承協会の共同研究の一環として実施したものである．ここに記して関係各位に感謝の意を表する．

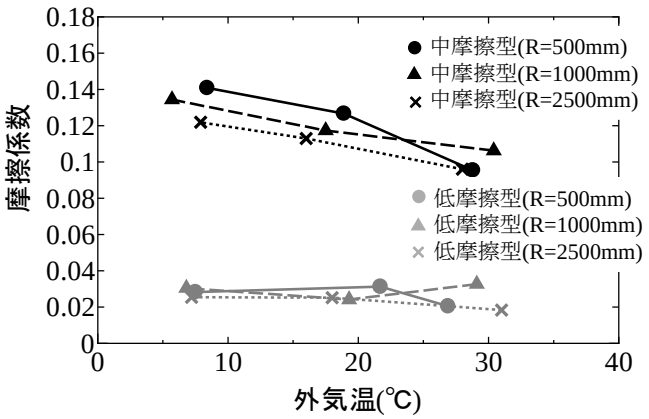


図-5 外気温－摩擦係数関係

参考文献

1) 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.28-35，2015.
2) Zayas, V., Imbsen, R., Mokha, A. and Low, S.: Seismic design for resilient and sustainable bridges, Proc. of 7th New York City Bridge Conference, New York, 2013.
3) 岡本晋，藤井俊二，尾崎大輔，Constantinou, M.C.，Tsopelas, P.C.：すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する研究，土木学会論文集，No.507，Ⅰ-30，pp.167-177，1995.
4) 高橋良和，長瀬浩明：温度依存性に着目した滑り摩擦支承モデルの一考察，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.71-76，2008.
5) Constantiou, M.C., Tsopelas, P., Kim, Y-S. and Okamoto, S.: NCEER-Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of a Friction Pendulum System (FPS), Technical Report NCEER-93-0020, 1993.
6) Tanaka, K., Uchiyama, Y. and Toyooka, S.: The Mechanism of Wear of Polytetrafluoroetylene, Wear, 23, pp.153-172, 1973.