

静的水平載荷による球面すべり支承の荷重－変位関係

宇都宮大学 学生員 ○ 菊地真紀 武田龍國

正会員 藤倉修一 NGUYEN MINH HAI フェロー会員 中島章典

1. はじめに

我が国では、免震支承として、鉛プラグ入り積層ゴム支承や高減衰積層ゴム支承が一般的に使用されている。しかし、2011年3月の東北地方太平洋沖地震及び2016年4月の熊本地震といった、近年発生した大きな地震において、積層ゴム支承の損傷により橋梁の被害が生じている。このことから、積層ゴム支承の代替となる新たな免震支承の開発が重要であるが、そのような支承はないのが現状である。

アメリカなどの地震地域では、球面すべり支承という凹状の球面上をスライダと呼ぶ可動体が摩擦の影響を受けながら滑る振り子型の免震支承が適用されている。振り子の原理により固有周期はすべり面の球面半径で決まるため、長周期化が容易で周期のばらつきも小さく、すべり面の直径より限界変形量を調節できるなどの特徴を持つ¹⁾。

そこで本研究では、球面すべり支承に関して、我が国の橋梁への適用性を検討するために、支承で支持された橋梁模型桁に対して静的水平載荷試験を行い、荷重－変位関係を実験的及び理論的に比較検討し、免震性能を明らかにすることを目的とする。

2. 球面すべり支承の力学的特性

本研究の実験では、図-1のようなスライダの上下に凹球形面状のすべり面がある二面摺動タイプのダブル球面すべり支承を使用した。また、上下すべり面の摩擦係数 μ 及び球面半径 R は等しいものを用いた。この場合、支承に水平荷重が作用すると、スライダは上下すべり面を同時に滑り始め、その後も上下すべり面に対して同じ変位で移動する。

本研究で利用した支承の荷重－変位関係は理論的には図-2に示すようにバイリニア型モデルとなり、式(1)で表すことができる²⁾。

$$F = \frac{W}{2(R-h)}u + F_f \quad (1)$$

これは、スライダとすべり面の間に発生する力のつり合い式より求めることができる。支承に作用する水平荷重 F が摩擦力 F_f と等しくなったとき、スライダが $W/(2(R-h))$ の傾きで上下すべり面を同時に滑り始める。その後、ある変位に達して水平荷重が反転した場合、摩擦力の2倍に等しい水平荷重 $2F_f$ 分作用した後、反対方向に再び同じ傾きで滑っていく。ここに、図-1に示すように、 W ：鉛直荷重(上部工重量)、 u ：上下すべり面の各水平変位の和、 h ：スライダの高さの1/2である。

3. 試験体概要

本研究で利用したダブル球面すべり支承を図-3に示す。前述したように、凹状に球面加工したすべり面を有するコンケイブプレートが上下にあり、その間に上下凸状に球面加工されたスライダを配置する。

コンケイブプレートはステンレス板(材質 SUS304)であり、同じ材質であるベースプレートと一体化している。スライダ(材質 SS400)は上下面をすべり面と同じ球面半径に加工していて、その表面には PTFE(ポリテトラフルオロエチレン) 織物と接着性を高めた高強度繊維の二重織物からできたすべり材を貼り付けている。

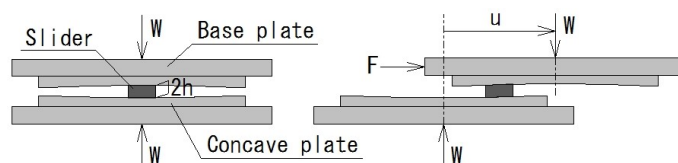


図-1 ダブル球面すべり支承概要図

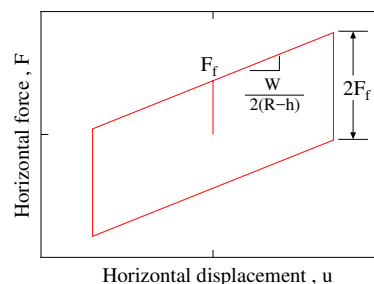


図-2 荷重－変位関係

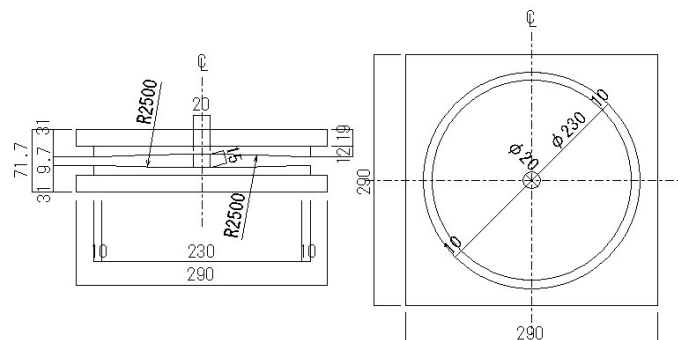


図-3 支承試験体

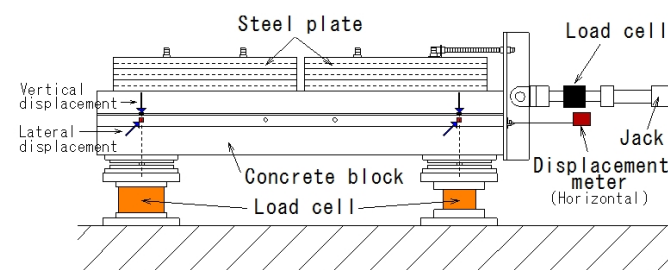


図-4 実験概要図

試験体の寸法は図-3に示すように、支承全体の外形寸法は290×290mm、高さは71.7mmである。すべり面の直径は230mmであり、スライダは直径20mm、高さ15mmである。また、すべり面及びスライダの球面半径はともに2500mmである。

4. 実験方法

実験概要を図-4に示す。4基のダブル球面すべり支承で支持された橋梁模型桁に対して、油圧ジャッキを用いて橋軸方向に水平荷重を載荷する静的水平載荷試験を行った。支承の上に1600×900×250mmのコンクリートブロックを設置し、その上に重りとして1枚0.522kNの鋼板を4ヶ所に均等に載せることで上部工重量を変化させ、重りなし、重り8枚、重り16枚、重り24枚の計4ケースを行った。

水平荷重の載荷方法は、±20mm、±50mm、±100mm、限界変位までの変位漸増振幅繰り返し載荷とした。載荷位置

Key Words: 球面すべり支承、静的水平載荷試験、荷重－変位関係、摩擦係数

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 Tel.028-689-6227

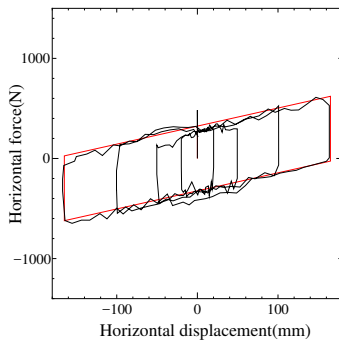


図-5 橋軸 1, 重りなし

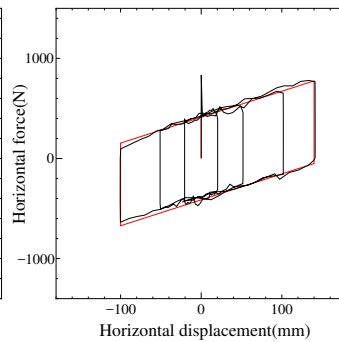


図-6 橋軸 2, 重り 8 枚

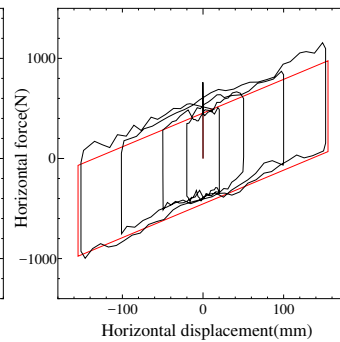


図-7 橋軸 3, 重り 16 枚

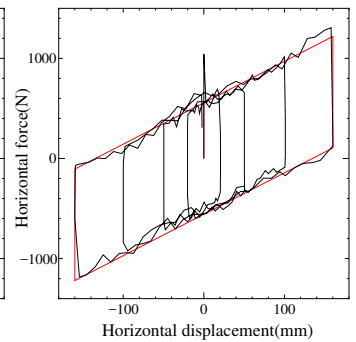


図-8 橋軸 4, 重り 24 枚

表-1 動摩擦係数

実験 ケース	重りの 枚数	上部工重量 (kN)	速度 (mm/s)	温度 (℃)	面圧 (MPa)	各補正係数			動摩擦係数	
						α	β	γ	理論値	実験値
橋軸 1	なし	8.99	0.31	10	7.2	0.453	1.127	1.343	0.032	0.036
橋軸 2	8 枚	12.91	0.21		10.3	0.452		1.277	0.031	0.032
橋軸 3	16 枚	16.80	0.14		13.4	0.451		1.231	0.029	0.027
橋軸 4	24 枚	20.63	0.24		16.4	0.453		1.197	0.029	0.027

は、スライダより上の重量の重心位置とした。

4 基の支承の下には圧縮型ロードセルをそれぞれ設置し、スライダに作用する軸力を計測した。また、水平荷重は油圧ジャッキの先端に圧縮引張型ロードセルを取り付けて計測し、水平変位は巻き込み変位計を用いて載荷面の左右 2ヶ所で計測した。さらに、上部構造の横移動及び浮き上がり量を確認するために、載荷面に垂直な側面において、CDP 変位計を用いて横変位と鉛直変位をそれぞれ左右 2ヶ所で計測した。

5. 実験結果および考察

(1) 荷重一変位関係

荷重一変位関係の実験及び解析結果の比較を図-5～図-8 に示す。横軸は水平変位、縦軸は水平荷重であり、水平変位は横変位を用いて補正した値である。油圧ジャッキで橋梁模型桁を引いたときを水平変位のプラス側とし、押したときをマイナス側とする。また、図に示す赤線は、実験から得られた摩擦係数を用いて、式 (1) より求めた解析結果である。摩擦係数については、荷重一変位関係における水平変位 0mm のときの水平荷重を上部工重量で除した値を動摩擦係数として、各実験ケースごとに算出した。

実験から得られた荷重一変位関係は概ね赤線の解析結果のバイリニア型モデルと一致している。また、上部工重量の増加すなわち、支承への軸力が大きくなるにつれて直線の傾きが大きくなっている。このことから、直線の傾きは上部工重量に比例し、ある変位に達して反対方向に滑り始めるまでに、2 倍の摩擦力が作用することも確認され、ダブル球面すべり支承の荷重一変位関係は図-2 に示した関係で表されることが分かった。また、4 基の各支承に作用する軸力を見ると、水平変位とともに変動していたが、鉛直方向には上部工の自重が作用しているだけなので、4 基合計の軸力に変動はなかった。実験と解析結果がほぼ一致していることから、この各支承における軸力変動は、橋梁模型桁全体としての荷重一変位関係に影響はないことが分かる。

(2) 摩擦係数

動摩擦係数は、載荷速度 V 、温度 t 及びスライダの面圧 σ による依存性が指摘されており、式 (2) に示す動摩擦係数の変化率の近似式が提案されている³⁾。

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_0 \times \alpha \times \beta \times \gamma \\ &= \mu_0 \times (1 - 0.55e^{-0.019V}) \times (1.258e^{-0.011t}) \\ &\quad \times (1.746\sigma^{-0.141} + 0.02)\end{aligned}\quad (2)$$

ここに、 μ_0 ：基準の動摩擦係数 (=0.047)、 α ：速度補正係数、 β ：温度補正係数、 γ ：面圧補正係数である。基準の動摩擦係数 0.047 は、本実験で使用した球面すべり支承と同様のすべり面とすべり材を用いたスライダで構成されたダブル球面すべり支承のせん断試験より求めたものであり、基準速度 400mm/s、基準温度 20℃、基準面圧 60MPa という条件下での実験結果である¹⁾。

基準となる動摩擦係数を式 (2) を用いて補正し、実験値と補正值の比較を行った。各実験ケースの動摩擦係数の実験結果及び補正結果を表-1 に示す。動摩擦係数は、補正值と概ね一致しているため、速度、温度、面圧の依存性は式 (2) で近似されることが確認された。また、上部工重量が大きくなるほど動摩擦係数は小さくなっている。これは、載荷速度と温度による変化率 α と β はほぼ等しいことから、面圧による影響が大きいと考えられる。

6. まとめ

本研究では、4 基のダブル球面すべり支承で支持された橋梁模型桁に対して静的水平載荷試験を行い、以下の結果を得た。

1. 荷重一変位関係は、上部工重量が増加するにつれて傾きが大きくなり、解析値と概ね一致した結果が得られたことから、理論式による荷重一変位関係が確認された。
2. 水平変位とともに 4 基の支承に作用する各軸力は変動していたが、軸力の合計は変わらず、橋梁模型桁全体としての荷重一変位関係に影響はなかった。
3. 実験より求めた動摩擦係数は、基準の動摩擦係数を速度、温度、面圧の依存式によって補正した値と概ね一致していたことから、各種依存性が確認された。

謝辞

本実験の実施にあたっては、新日鉄住金エンジニアリング (株) の山崎伸介氏、野呂直以氏からは多大なご支援を頂いた。ここに記して厚くお礼を申し上げる次第である。

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、新日鉄住金エンジニアリング技報、Vol.6, pp.28-35, 2015.
- 2) Daniel M.Fenz, Michael C.Constantinou: Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings, Technical Report MCEER-08-0007, pp.37-47, 2008.3.
- 3) 西本晃治、中村秀司、長谷川久巳、脇田直弥：球面すべり支承 (SSB) の実大試験体による面圧・速度依存性確認実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、2016.8.