静的水平載荷試験による球面すべり支承の荷重一変位関係

セントラルコンサルタント株式会社　正会員　○ 菊地真紀
宇都宮大学　正会員　藤倉修一　NGUYEN MINH HAI　フェロー会員　中島章典
新日鉄住金エンジニアリング株式会社　正会員　山崎伸介

1.　はじめに

我が国では，1995 年の兵庫県南部地震以降，免震設計という考え方が広まり，橋梁構造物では，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多く使用されている．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，新たな免震支承の開発が重要となっている．

そこで本研究では，アメリカやトルコといった地震地域では適用実績のある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，基本的な力学的特性を実験的及び理論的に明らかにすることを目的とした．支承の復元力特性の理論モデルを求め，さらに 4 基の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，実験から得られた荷重一変位関係と理論モデルから求めた計算結果を比較検討した．

2.　球面すべり支承について

球面すべり支承は，凹状の球面上をスライダー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である．球面すべり支承の固有周期 T は，摩擦がないと仮定すると，振り子の原理より $T = 2\pi\sqrt{2R/g}$(g：重力加速度) で求められ，すべり面の球面半径 R 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，さらにすべり面の直径より限界変形量を調節することができる．また，すべり面の摩擦によって減衰を確保すること，振り子運動の復元力によって残留変位を低減することができるという利点もある [1]．

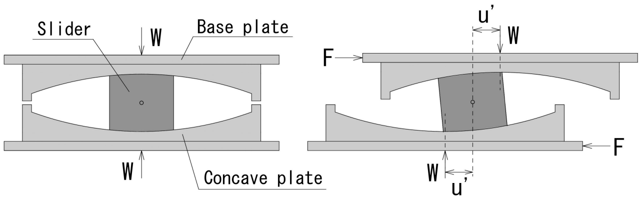
これまでに開発された球面すべり支承は，一面摺動タイプのシングル球面すべり支承，二面摺動タイプのダブル球面すべり支承，そしてトリプル球面すべり支承がある．本研究では，**図–1** のようなスライダーの上下に凹形球面状のすべり面がある二面摺動タイプのダブル球面すべり支承を使用した．ダブル球面すべり支承は二面摺動なので，一面摺動のシングル球面すべり支承に比べ，同じ外形寸法の場合，約 2 倍の限界変形量を確保することができる．また，2 つのすべり面がそれぞれ異なる摩擦係数と球面半径を用いることで，さまざまな地震に対応することができる [2]．

3.　球面すべり支承の復元力特性

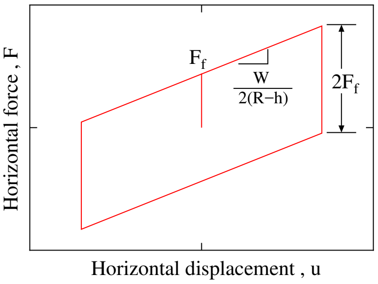
本研究で使用したダブル球面すべり支承は，上下すべり面の摩擦係数 μ 及び球面半径 R は等しいものを用いた．この場合，支承に水平荷重が作用すると，スライダーは上下すべり面を同時に滑り始め，その後も上下すべり面に対して同じ変位で移動する．

本研究で使用した支承の荷重一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，直線部分は式 (1) で表すことができる [2]．

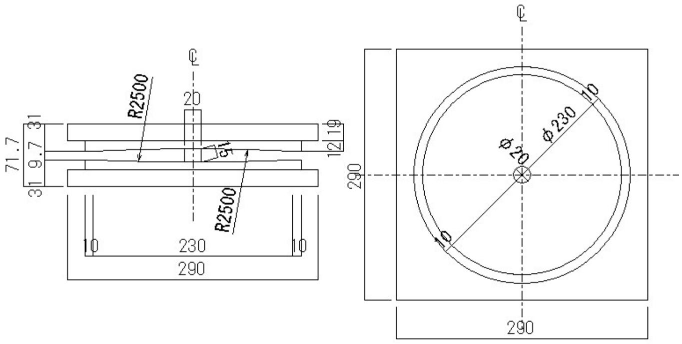
$$F = \frac{W}{2(R-h)}u + F_f \tag{1}$$



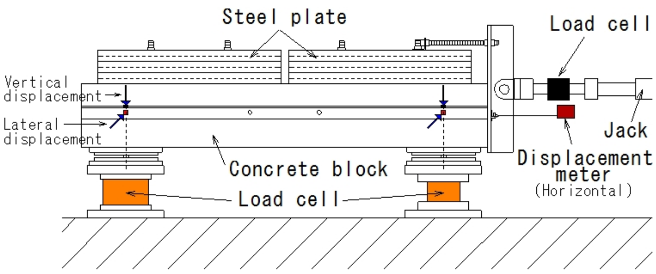
図–1　ダブル球面すべり支承概要図



図–2　荷重一変位関係



図–3　支承試験体

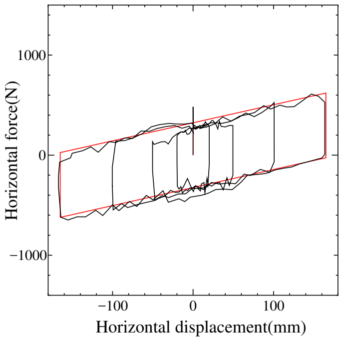


図–4　実験概要図

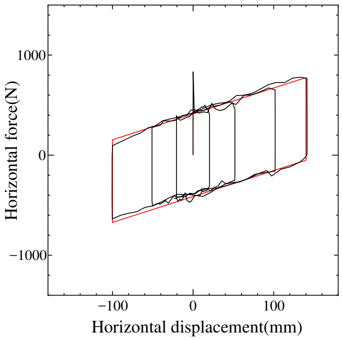
これは，スライダーとすべり面の間に発生する力のつり合い式より求めることができる．支承に作用する水平荷重 F が摩擦力 F_f と等しくなったとき，スライダーが $W/(2(R-h))$ の傾きで上下すべり面を同時に滑り始める．その後，ある変位に達して水平荷重が反転した場合，摩擦力の 2 倍に等しい水平荷重 $2F_f$ 分作用した後，反対方向に再び同じ傾きで滑っていく．ここに，**図–1** に示すように，W：各支承に作用する軸力の合計，u：上下すべり面の各水平変位の和，h：スライダーの 1/2 高さである．

Key Words: 球面すべり支承，静的水平載荷試験，荷重一変位関係，摩擦係数

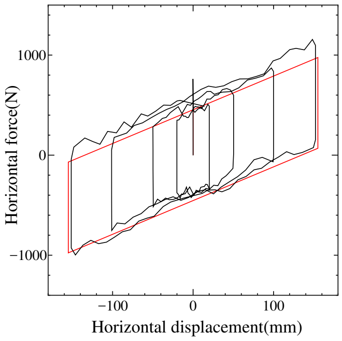
〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科　Tel.028-689-6227



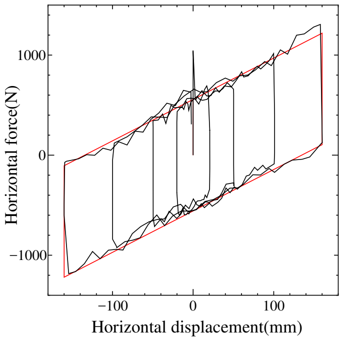
図–5　橋軸 1，重りなし



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

4.　試験体概要

本研究で使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ーを配置する．

コンケイブプレートはステンレス板 (材質 SUS304) より製作し，同じ材質であるベースプレートと一体化している．スライダー (材質 SS400) は上下面をすべり面と同じ球面半径に加工し，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．

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，スライダーは直径 20mm，高さ 15mm である．また，すべり面及びスライダーの球面半径はともに 2500mm である．

5.　実験方法

実験概要を**図–4** に示す．固定された振動台の上に圧縮型ロードセルとダブル球面すべり支承をそれぞれ 4 基ずつ設置し，その上にコンクリートブロックと重り鋼板を載せた橋梁模型桁に対して，反力フレームに取り付けた油圧ジャッキを用いて静的水平載荷試験を行った．水平荷重の載荷方法は，±20mm，±50mm，±100mm，最大変位までの変位漸増振幅繰り返し載荷とした．載荷位置は，上部構造重量の重心位置とした．

コンクリートブロックの大きさは 1600×900×250mm であり，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構造重量を変化させ，重りなし (9.3kN)，重り 8 枚 (13.5kN)，重り 16 枚 (17.7kN)，重り 24 枚 (21.8kN) の計 4 ケースとした．

4 基の支承の下に設置した圧縮型ロードセルで各支承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．

6.　荷重一変位関係の実験結果及び考察

荷重一変位関係の実験及び計算結果の比較を**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) より求めた計算結果である．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合計軸力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で示した計算結果のバイリニア型モデルと一致している．また，上部構造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，直線の傾きは軸力に比例し，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，静的載荷試験におけるダブル球面すべり支承の復元力特性は**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，鉛直方向には上部構造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．実験結果と計算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．

7.　まとめ

本研究では，ダブル球面すべり支承の復元力特性の理論モデルを求め，4 基の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，荷重一変位関係の実験結果と計算結果の比較から，以下の結果を得た．

1. 球面すべり支承の復元力特性の理論モデルは，スライダーとすべり面の間に発生する力のつり合い式から荷重一変位関係の傾きが求まり，バイリニア型の関係で表されることが分かった．
2. 実験から得られた荷重一変位関係は，解析結果と概ね一致したバイリニア型モデルであり，直線の傾きは軸力に比例し，スライダーが反対方向に滑る際に摩擦力の 2 倍に等しい水平荷重が作用していたことから，静的載荷試験における支承の復元力特性が確認された．
3. 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．

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.