

三層骨組振動台実験で測定した振り子摩擦支承の挙動

中村 壮志

1. はじめに

振り子力による原点回帰性能と摩擦によるエネルギー吸収の2つの機構を組み合わせた振り子摩擦支承 (Friction Pendulum Bearing, FPB) は、1980年代に米国で開発され、世界中に普及した。2024年7月から8月にかけて、台湾国家地震工程研究中心 (NCREE)、名古屋大学、日鉄エンジニアリング、台湾成功大学と北海道大学が共同で、三層鋼構造物の振動台実験を実施し、FPBの性能と免震効果を検証したので、ここに報告する。

2. 実験計画

図1に、試験体の立面図を、計測器の配置とともに示す。上部構造は、柱芯間距離5mで柱間1×1スパン、階高約4mで3層の鋼ラーメン構造であった。各層に厚さ12cmのRCスラブが付けられ、一階床に置いたコンクリート錘を合わせて、総重量は57.2tであった。図には、1階と振動台の間に免震装置を設置した場合(免震)を示すが、1階梁を振動台に直接緊結した場合(基礎固定)についても、振動台実験を実施した。

図2に示すように、免震装置を、柱芯位置の4か所に、振動台上に設置した。図3に示すように、免震装置は鋼製のFPB(日鉄エンジニアリングNS-SSB®)で、球面半径 $R = 4500$ mm、摩擦係数 $n = 0.043$ であった。式(1)で求められる固有周期 T は、6.0秒と算定された。

$$T = 2\pi\sqrt{2R/g} \quad (1)$$

ここに、 R は球面半径、 g は重力加速度である。

慣性力や部材力を測定する目的で、3方向加速度計を振動台と各階に設置し、ひずみゲージを1階の各柱に2断面ずつ、各断面に4枚ずつ設置した。免震装置の変形を測定する目的で、図2に示すように、振動台と免震層の相対変位を6基の変位計で計測した。基礎梁が剛で、免震装置の下部が振動台と一体で剛に変形すると仮定して、各免震装置のXY変位を算定した。免震装置の反力を測定する目的で、免震装置と基礎梁の間に三分力計を設置した。

周波数256Hzと100Hzの2つの装置で収録したデータを、後者をアップサンプルすること

で256Hzに統一し、振動台のX方向加速度の自己相関関数を比較することで同期させた。加速度、変位計のデータに対しては、バンドパスフィルターを用いて15Hz以上を除去した。

入力地震動にはWhite noise、X・Y・Z各方向への一方向のスweep加振、JMA Kobe、2024年花蓮地震で計測されたHWA Hospital、HWA Libraryを用いた。

図5に、R階(図1の6)のX方向加速度を出力、振動台(図1の1)のX方向加速度を入力として、White Noise加振から求めた伝達関数を示す。伝達関数のピークに基づいて、上部構造の一次固有周期を0.91秒と算定した。

3. 結果

X方向へのスweep加振で得たX方向応答を分析する。図6に、免震と基礎固定のそれぞれで、最大応答を得た時刻帯の加速度応答を示す。免震

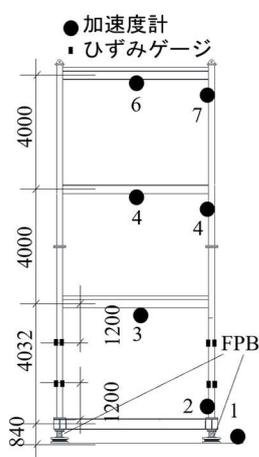


図1 北側立面図

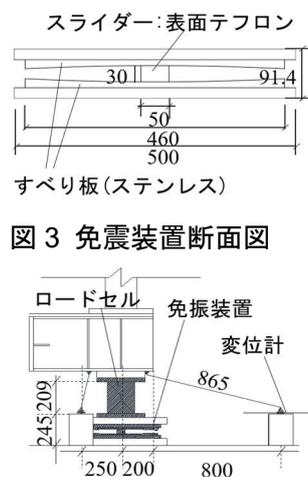


図3 免震装置断面図

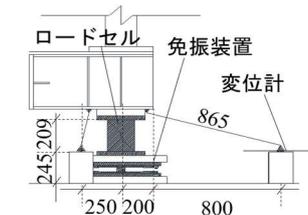


図4 測定機器

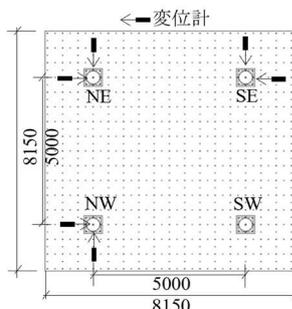


図2 免震装置配置図

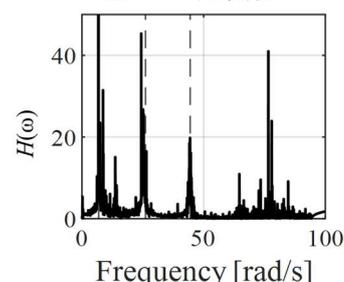


図5 RFLの伝達関数

では、高周波数成分が一階で目立ったが、上層になかった。基礎固定では、高周波数成分はなかった。この高周波数成分は、振り子摩擦支承特有の現象であった。

図7は、図6で帯に示す時刻帯について、免震層のX方向の層せん断力と変位の関係と、一階の加速度応答を対比している。太線①から④は、両図で対応しており、①や③で応答が線形から非線形に移行する過程よりも、②や④の除荷過程で、高周波数成分が現れた。免震装置のスライダーが除荷過程で微小に振動することで、高周波数成分を生じた可能性がある。

図8と図9に、JMA Kobe 加振で測定した、免震層の復元力と相対変位の関係を示す（ここに示す三分力計の測定値は、補正する必要がある）。図8に、XY変位軌跡の特定時点で、その瞬間に生じた復元力を重ねた。摩擦力が軌跡に沿って逆方向に作用すると仮定して、三分力計から得られた免震層の復元力を摩擦力と振り子力に分解した。振り子力は、必ずしも中心点を指向しなかったが、おおよそ中心方向を向いた。

図9に、図8の応答における、NEとSWの応答を示す。最大変位を記録した時刻点で、転倒モーメントの影響で鉛直力はNEで大きくSWで小さかったため、それに応じて振り子力ベクトル、摩擦力ベクトルの大きさが異なった。

4. まとめ

- 1) FPBによる免震試験体は、一階に高周波数の加速度応答を生じた。除荷過程で、FPBが小さく振動する可能性がある。
- 2) FPBの復元力を、変位軌跡に沿う摩擦力と、おおよそ中心方向に向かう振り子力に分解でき、どちらの力も鉛直力に比例した。

参考文献

- 1) 山崎伸介, 渡辺厚, NS-SSB 振動台実験報告 球面すべり支承を用いた3層免震建屋の振動台実験報告日鉄エンジニアリング技報 (14), 4-17, 2023
- 2) 佐藤圭祐ほか: 多段摩擦振り子支承及び鉛プラグ入り積層ゴム支承の有効性を検証する実大免震建物実験 その5 多段摩擦振り子支承の鉛直応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 761-762, 2013

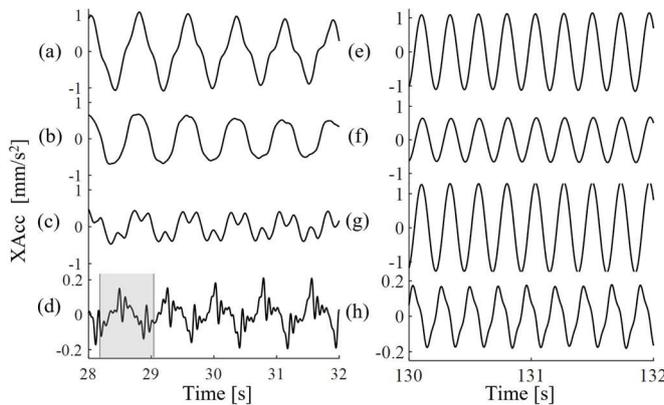


図6 加速度応答：免震の(a)RFL; (b)3FL; (c)2FL; (d)1FL; 基礎固定の(e)RFL; (f)3FL; (g)2FL; (h)1FL

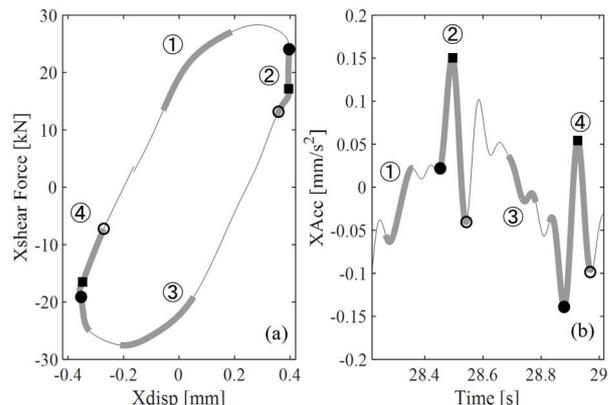


図7 荷重変位関係との対応: (a)免震層の荷重変位関係; (b)一階加速度

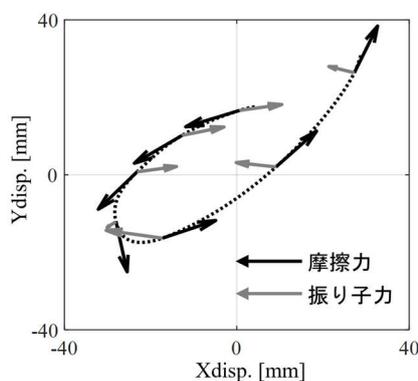


図8 復元力の軌跡:

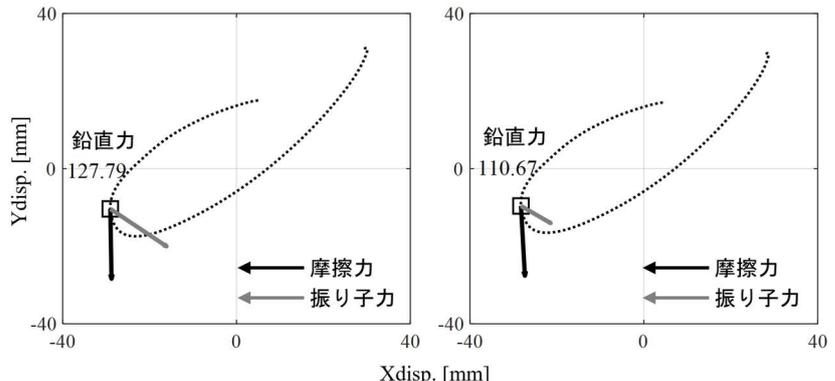


図9 復元力の特性: (a)NE; (b)SW