

2022年度（第14回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

実大振動台実験と非線形有限要素解析に基づく滑り基礎構造物の地震時挙動の解明

宮津裕次（東京理科大学） 東城峻樹（竹中工務店）

青木 崇（防災科学技術研究所） 富田 愛（東京理科大学）

1. はじめに

設計時の想定を大きく超える強さの地震動の入力に対して、建築物の基礎部を滑動させることで上部構造の損傷を抑制する滑り基礎構造が提案されている^{例え1)}。滑り基礎構造は、一般的な免震構造と比較して、①長周期地震動による共振の心配が小さい、②機構が単純なためにコストダウンが期待できる、③軽量建物への適用も容易である等々の理由から、戸建住宅を中心とする木造建物の耐震性能向上には特に有効な技術となり得る。一方で、実大規模の実験によって滑り基礎構造物の地震応答を評価した研究は少なく、また、転倒モーメントによる滑り面の面圧変動や、滑り面の摩擦係数の速度・面圧依存性が応答に与える影響に着目した研究も少ないことから、実用化のためにはより詳細な検討が必要である。

本研究では、滑り基礎構造を適用した実大2層木造軸組の振動台加振実験により滑り基礎構造の有効性を実証するとともに、滑動中の滑り面の面圧変動を模擬できる解析モデルを構築しその妥当性を検証した。また、今回使用した滑り材の摩擦係数の速度・面圧依存性の評価およびその力学モデルの構築を目的として滑り材単体の振動台加振実験を実施し、非線形 FEM によるシミュレーション解析により力学モデルの妥当性を確認した。

2. 実大2層木造滑り基礎構造の振動台実験

2.1 実験概要

防災科学技術研究所の大型耐震実験施設（つくば本所）にある 14.5×15 m の大型振動台を使用し、水平 1 方向加振を行った。試験体は、木造軸組の土台を振動台に固定した実大2層木造軸組試験体²⁾（以下、固定基礎試験体と称する）と、滑り基礎構造を適用した試験体³⁾（以下、滑り基礎試験体と称する）の2体とした。

振動台に設置した滑り基礎構造試験体の状況を写真1左に示す。上部構造を構成する柱および土台は 120 mm 角の同一等級構成集成材とし、2 階梁は 240×120 mm の異等級構成集成材、R 階梁は 180×120 mm の異等級構成集成材とした。軸組寸法は、柱間：910 mm、土台-2 階梁の材芯間距離：2880 mm、2 階

梁-R 階梁の材芯間距離：2910 mm とした。試験体各部の質量は、RC べた基礎：6.81 t、2 階：2.73 t、R 階：1.77 t である。

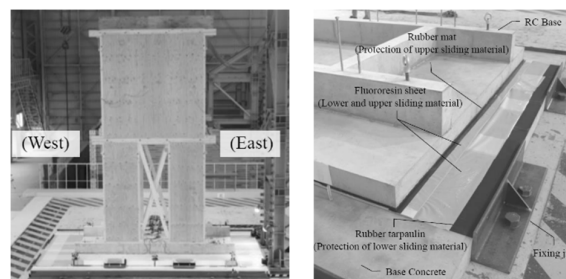


写真1 試験体の全体（左）と滑り基礎部（右）

両試験体とも上部構造は耐震等級3相当となるように壁量を調整し、耐力壁には 45×90 mm のたすき掛け筋かい壁と、12 mm の構造用合板（等級2級）を CN50 釘により 150 mm ピッチで接合した構造用合板壁の2種類を用いた。柱と横架材の接合には 30kN 級の HD 金物を使用し、床材は厚さ 24 mm の構造用合板（等級2級）とした。

滑り基礎試験体の基礎は RC 造べた基礎とし、ベースコンクリートとの間に写真1右に示す通り滑り材（フッ素樹脂シート、 $t=0.2$ mm）、ゴムマット（ $t=5$ mm）およびゴム系防水シート（ $t=2$ mm）を敷設した。フッ素樹脂シート同士の摩擦係数が最も小さいため、滑動は2枚のフッ素樹脂シートの間で生じる。加振中の RC 造べた基礎の平面内の回転を抑制するため、試験体側面には加振方向に沿ってガイドレールを設置した。固定基礎試験体では土台を H 形鋼にアンカーボルトにより固定し、H 形鋼は振動台に固定した。

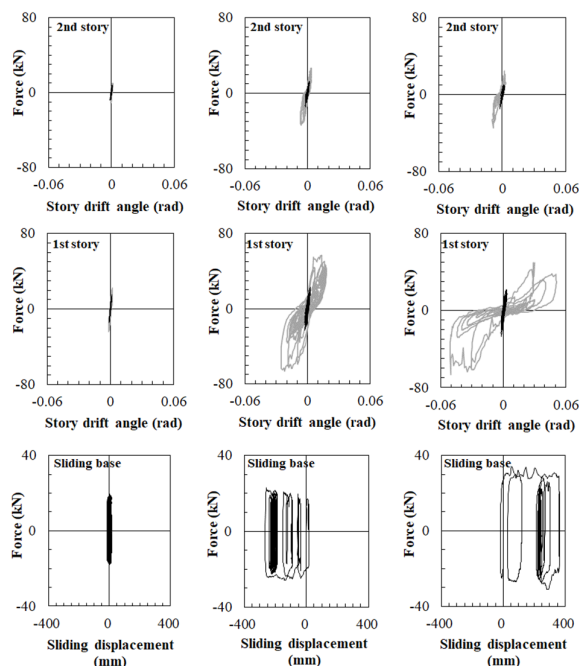
入力波は、日本建築センター模擬波 Lv1 の基準化倍率 50%と 100%、同模擬波 Lv2 の基準化倍率 100%（以下、それぞれ BCJ Lv1 50%、BCJ Lv1 100%および BCJ Lv2 100%と略記）、2016 年熊本地震前震および本震での KiK-net 益城観測波 EW 成分の基準化倍率 75%（以下、それぞれ MSKf 75%、MSKm 75%と略記）、1995 年兵庫県南部地震での JMA 神戸海洋気象台観測波 NS 成分（以下、KOBE と略記）とした。

2.2 実験結果

加振で得られた各層の荷重変形履歴の一例として、

BCJ Lv1 100%、MSKf 75%および KOBE の結果を図 1 に示す。黒線は滑り基礎試験体、灰線は固定基礎試験体を示す。BCJ Lv1 100%では滑りはほとんど生じていないが、MSKf 75%および KOBE では最大で 30~40 cm の滑りが生じることで上部構造の応答を大幅に低減できていることから、大地震に対する滑り基礎構造の有効性が認められる。

滑り基礎部は全体的に安定した摩擦の履歴を示しているものの、KOBE の結果に着目すると滑動中に滑り荷重が変動していることがわかる。滑り荷重が変動する原因は、試験体に生じる転倒モーメントによって生じる柱の軸力変動によるものと考え、3 章のシミュレーション解析ではその現象を考慮するため 2 次元フレームによるモデル化を行った。



(a) BCJ Lv1 100% (b) MSKf 75% (c) KOBE

図 1 各層の荷重変形履歴（黒線：滑り基礎試験体、灰線：固定基礎試験体）

3. 振動台実験のシミュレーション解析

3.1 解析モデル

上下応答を考慮できる 2 次元フレームにより試験体の 1 構面をモデル化した。解析コードには OpenSees⁴⁾を用いた。図 2 に滑り基礎試験体のモデルを示す。壁部分には、破線で示す部分にたすき掛け筋かい壁、実線で示す部分に構造用合板壁を設置した。各節点の質量は、2 階と R 階は支配面積比で、滑り基礎部は RC 造べた基礎の体積比で配分した。

上部構造の耐力壁は拡張 NCL (ENCL) モデル⁵⁾で表現し、梁には梁要素、柱にはトラス要素を用いた。ENCL モデルのパラメータは、事前に実施した壁単体の静的載荷実験で得られた荷重変形履歴を模擬するように決定した。

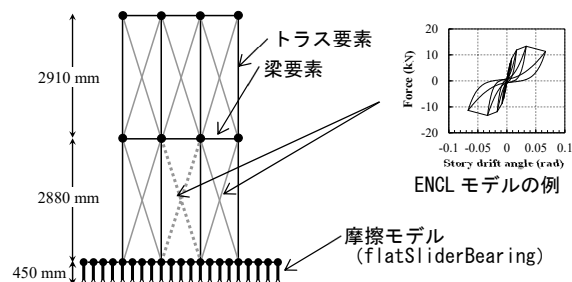
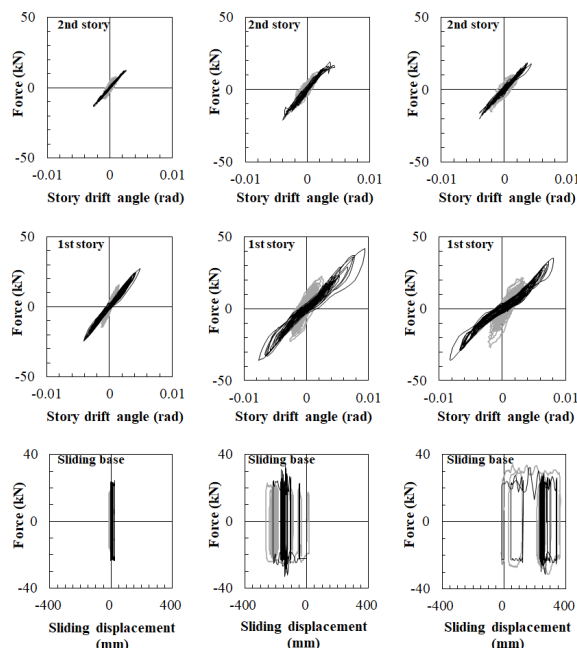


図 2 滑り基礎構造試験体の解析モデル



(a) BCJ Lv1 100% (b) MSKf 75% (c) KOBE

図 3 実験と解析の荷重変形履歴の比較（黒線：解析結果、灰線：実験結果）

3.2 解析結果

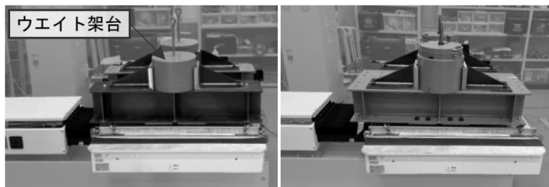
滑り基礎試験体の荷重変形履歴の実験結果と解析結果の比較を図 3 に示す。黒線が解析結果、灰線が実験結果である。上部構造の 1 層においては、解析モデルの剛性が実験結果と比較して若干低いために応答結果に差が生じているが、その他の応答は解析モデルにより実験結果を概ね模擬できている。実験で観測された滑動中の滑り荷重の変動についても、変動の傾向については概ね模擬できていることが認められる。

4. 摩擦係数の速度・面圧依存性の検証実験と FEM によるシミュレーション解析

4.1 実験概要

2 章の実験の試験体に使用した滑り材について、滑り速度および面圧が摩擦係数に与える影響を明らかにするため、滑り材単体の加振実験を行った。滑り面の面圧は、2 章の試験体において試験体重量を滑り面の面積で除して算出した平均面圧に対して 2 倍から 10 倍とした。試験体の一例を写真 2 に示す。

加振方向は水平 1 方向とし、表 1 に示す波形を入力した。入力波は、速度振幅の異なる振動数 2 Hz の正弦波と、1995 年兵庫県南部地震での神戸海洋気象台観測波 NS 成分とした。入力波の略称を表 3 中に示す。滑り材の摩耗の影響を考慮するため、JMA 神戸加振後に再度低速度の Sine 30-2 加振を実施した。



面圧 8 倍 (71.11 kN/m²) 面圧 10 倍 (87.24 kN/m²)

写真 2 面圧 8 倍と 10 倍の試験体の状況

表 1 加振表

加振順	名称 (略称)	最大速度 (cm/s)
1	正弦波 2Hz (Sine 15)	15
2	正弦波 2Hz (Sine 20)	20
3	正弦波 2Hz (Sine 30)	30
4	正弦波 2Hz (Sine 50)	50
5	正弦波 2Hz (Sine 75)	75
6*	正弦波 2Hz (Sine 75-2)	75
7	1995 年兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測波 NS 成分 (JMA 神戸)	90
8	正弦波 2Hz (Sine 30-2)	30
9*	正弦波 2Hz (Sine 50-2)	50

*は面圧 8 倍の加振のみ実施した。

4.2 実験結果

摩擦係数の算出には、滑り面での履歴吸収エネルギーを等価とし、上下応答加速度の影響を考慮した式(1)⁶⁾を用いた。式(1)の分母の符号は、式(2)で示す滑り速度 V の符号により定めた。

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{t=0}^T (N_{t+\Delta t} + N_t)(L_{t+\Delta t} - L_t)}{\sum_{t=0}^T \pm m(2g + a_{t+\Delta t} + a_t)(L_{t+\Delta t} - L_t)} \quad (1)$$

$$V = \frac{(L_{t+\Delta t} - L_t)}{\Delta t} = \frac{\Delta L_t}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 N_t は時刻 t における慣性力から算出した滑り荷重、 L_t は時刻 t における滑り変位、 a_t は時刻 t における上下応答加速度である。 T は地震継続時間、 m は各

試験体の総質量、 g は重力加速度 (9.8 m/s²)、 Δt はサンプリング時間 (本実験では 0.01 秒) である。

図 4 には、式(2)で得られた滑り速度の最大値と摩擦係数の関係と、滑り面の面圧と摩擦係数の関係を示す。黒塗りのプロットは正弦波および JMA 神戸の結果を、白抜きのプロットは高速度後の低速度の正弦波の結果を示す。摩擦係数は、滑り速度が 20 cm/s 以下では 0.1~0.2 程度、20 cm/s 以上では 0.2~0.3 程度であり、速度依存性が認められる。滑り面の面圧による影響については、面圧が大きくなるに従い滑り速度による摩擦係数のばらつきが小さくなり、摩擦係数も小さくなる傾向であった。

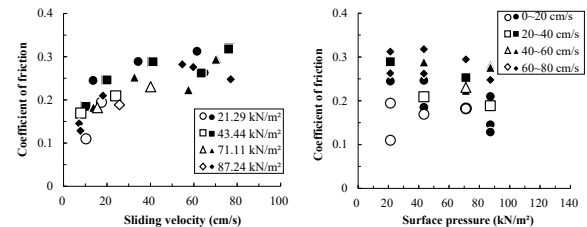


図 4 滑り速度と摩擦係数の関係 (左) と面圧と摩擦係数の関係 (右)

4.3 FEM によるシミュレーション解析の概要

図 5 に解析モデルの立面、平面および鳥観図を示す。滑り基礎部は、滑り材を Joint 要素、滑り材上面の鋼板をシェル要素でモデル化する。鋼板 (St.) および Joint 要素の諸元を表 2 に示す。Joint 要素の水平方向は、表 2 の初期剛性 k_s を与え、式(3)を用いて面圧および速度依存性を考慮したせん断強度 $\tau_s^{(7)}$ を考慮する。鉛直方向は、圧縮剛性を k_n 、引張剛性を 0 とする浮上り非線形⁸⁾を考慮する。同表の各減衰定数は、数値解析時の安定性を考慮して設定した。

$$\tau_s = P\mu \quad (3)$$

$$\mu = s'(1 - e^{-nV})(1 - e^{-kP})/P + \alpha$$

ここで、 P は圧力、 V は滑り速度、 μ は摩擦係数、 s' 、 n 、 k 、 α は材料特性に関するパラメータであり、本報では表 3 とした。同表の各値は、図 6 に示す実験時の滑り速度と摩擦係数の関係 (Sine 30 以上が対象) に基づき、既報³⁾を参考に摩擦係数 μ の下限値を 0.16 として、式(3)で求まる回帰曲線と実験 (面圧 2~10 倍を SP2~SP10 で表す) との各面圧での誤差の平均が最小となるよう設定した。

摩擦係数は、式(3)を用いた場合 (PVDP) に加えて、Sine 30 以上の各加振で得られた摩擦係数の平均値を用いた場合 (CNST とし、各依存性は非考慮) の 2

ケースを実施する。面圧は、SP2 および SP10 を対象とし、事前に自重解析を行い、Joint 要素に初期応力を考慮する。各加振時には、実験条件を考慮して加振直交およびねじれ方向の変形を拘束し、振動台上で得られた加速度応答を、解析モデルの長辺方向へ単独で入力する。Newmark β 法 ($\beta=0.25$) による時刻歴応答解析を行い、解析および出力時間刻みはそれぞれ 1/500s、1/100s とする。

4.4 解析結果

代表で SP10 の JMA 神戸を対象に、図 7(a), (b)に、実験および各解析における試験体上部の加速度時刻歴波形の比較を、図 8(a), (b)に、滑り速度または滑り変位および摩擦係数の関係の比較をそれぞれ示す。図 7 より、双方の解析とも、最大応答をやや大きく評価する傾向があるものの、実験と双方の解析の応答は概ね良く対応している。図 8 より、(a) PVDP は、(b) CNST に比べて、加振中における滑り速度、または滑り変位に応じた摩擦係数の履歴形状を比較的良く再現できていることがわかる。一方、最大応答や摩擦耐力は、実験に比べて各解析がやや小さく、これらのモデル化精度を高めていくことでより応答の再現性が向上する可能性がある。

5. まとめ

実大振動台加振実験により、滑り基礎構造を適用することで強い地震動に対する上部構造の層間変形を大幅に低減できることを示した。また、2 次元フレームでモデル化することで、滑動中に滑り荷重が変動する傾向も模擬できることを示した。さらに、要素試験に基づいて摩擦係数の速度・面圧依存性をモデル化し、非線形 FEM によるシミュレーション解析によりその妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 曾田ほか: 滑り基礎を用いた構造物の応答制御に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概, pp. 957-958, 2007
- 2) 片田宇彦, 宮津裕次, 陰山翔太, 森拓郎, 五十田博: 通し面材工法による木造軸組住宅の層崩壊抑制に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 27 巻 67 号, pp. 1243-1248, 2021.10
- 3) 富田愛, 宮津裕次, 脇田健裕, 東城峻樹, 青木崇, 永野正行: 滑り基礎構造を適用した 2 層木造軸組の実大振動台加振実験, 日本地震工学会年次大会論文梗概集, Paper No. T2021-064, 2021
- 4) PEER: OpenSees, http://www.jpma.jp/data/manyuaru-2/manyuaru-2_pr.pdf, (参照 2023-5-23)
- 5) 松永裕樹, 宮津裕次, 曾田五月也: 木造軸組耐力壁/非耐力壁の汎用モデル化手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 74(639), pp. 889-896, 2009.5
- 6) 富田愛, 宮津裕次, 東城峻樹: 滑り基礎構造における摩擦係数の評価法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 631-632, 2022
- 7) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和: 各種依存性を考慮した滑

- 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) 東城峻樹, 宮津裕次, 富田愛: 基礎浮上りが滑り基礎構造物の建物応答に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 67B, pp. 615-623, 2021.4

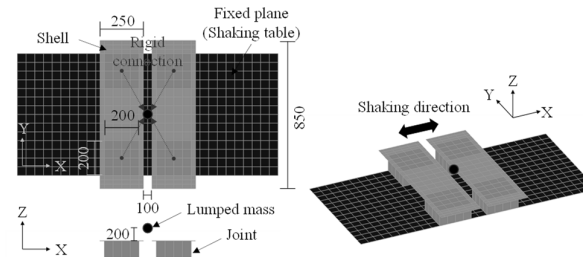


図 5 解析モデル(左:立面・平面図, 右:鳥観図)

表 2 基礎部の諸元

St. thick. (m)	St. Stiff. & damp. (10 ⁷ kN/m ²) (%)	St. dens. (t/m ³)	Joint stiff. & damp. (10 ⁶ kN/m/m ²) (%)
t	E G h_s^*	ρ	k_s k_n h_J^{**}
0.064	20.5 7.88 2	7.85	1.49 2.36 0.01

* Rayleigh damping ($f_1 = f_2/2$, $f_1 = 25$ Hz).

** Stiffness proportional damping ($f_{ref} = 100$ Hz).

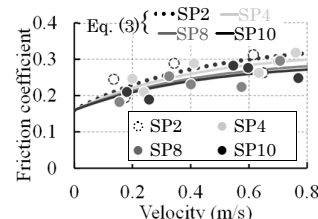


図 6 滑り速度と摩擦係数の関係

表 3 材料特性パラメータ

s'	18.2
n	2.32
k	0.0115
α	0.16

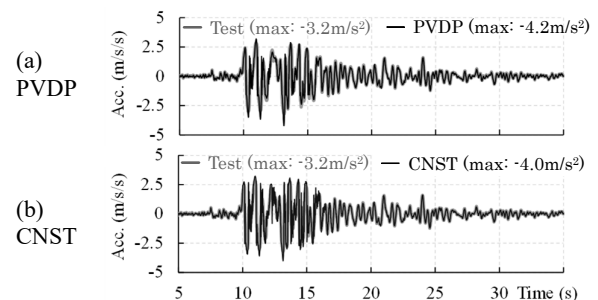


図 7 加速度時刻歴波形の比較 (SP10, JMA 神戸)

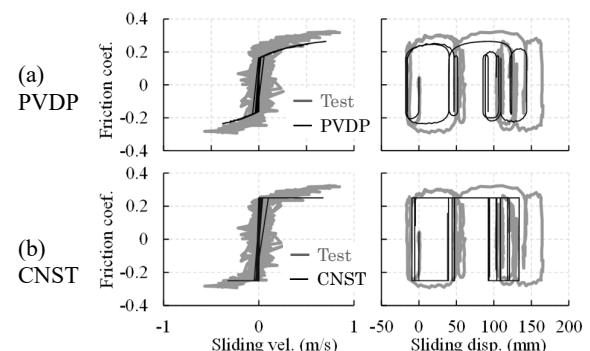


図 8 滑り速度 V 、滑り変位 δ および摩擦係数 μ の関係 (SP10, JMA 神戸, 左: V & μ , 右: δ & μ)