

研 究 報 告

令和 7 年 3 月 31 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 大阪大学大学院工学研究科

氏 名 : 畑中 祐紀

研究課題名 : 大振幅地震動が入力された免震建物の室内空間の被害評価

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

大振幅地震動が入力された免震建物の室内空間の被害評価

Damage evaluation of indoor space of seismically base-isolated buildings subjected to extreme ground motions

大阪大学大学院工学研究科 助教 畑中 祐紀

（研究計画ないし研究手法の概略）

免震建物に設計外力を超える大振幅地震動が入力された場合、免震建物が周辺擁壁やストッパーに衝突する可能性があることが指摘されている。これらの衝突によって上部構造に衝撃的な加速度が生じ、室内空間の被害に悪影響を及ぼすことが想定される。

本研究では、室内空間の被害、特に、人的被害に直結する「家具の転倒」に着目し、衝撃的な加速度が入力されたときの家具の挙動を明らかにする。

具体的には家具の転倒実験を行い、転倒挙動を再現する転倒解析プログラムを作成する。さらに時刻歴応答解析を実施し、転倒解析プログラムを活用することで家具の転倒挙動を検討する。

【模型振動台実験の計画】

免震建物を想定し、相似則を適用した 1/10 縮小体として模型振動台実験を行う。

使用した治具を図 1 に、実験の諸量を表 1 に示す。振動台とテーブルをガイドレールと引張ばねで接続し、これらは免震層を模擬している。テーブルの諸量は、木片を設置するのに十分な大きさを持ち、かつ木片に対して十分に重くなるように決定する。引張ばねの剛性は、テーブルの周期を実大で 4.0 s に近づくように求め、0.588 N/mm とする。テーブルと木片の接触面には紙やすりを貼り付け、木片のすべりを防止する。テーブルの両サイドにクリアランスを設けて擁壁を模擬した衝突台を設置する。衝突台には引張ばね剛性の約 20 倍である 11.67 N/mm の剛性をもつ圧縮ばねを取り付ける。

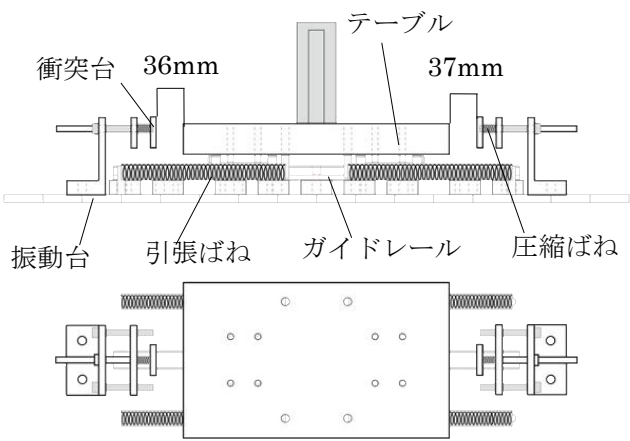


図 1 治具の全体図

表 1 実験の諸量

		縮小率	縮小	実大
テーブル	質量(t)	1/100	0.0232	2.32
	周期(s)	$1/\sqrt{10}$	1.25	3.95

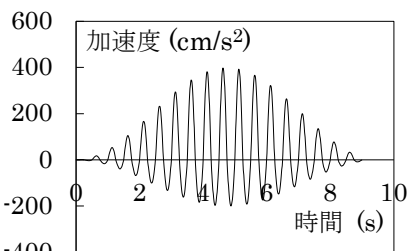


図 2 入力動の一例

表 2 家具の寸法

	2H (cm)	2h (cm)	2B (cm)	2b (cm)	c_{Amax} (cm/s²)
A	200	20	75	7.5	2390
B			60	6.0	2403
C			40	4.0	-1929
D	150	15	75	7.5	転倒なし
E			60	6.0	-8125
F			40	4.0	-4528

入力動は立ち上がり時間を考慮する正弦波とする．最大入力加速度は，テーブルが衝突台に衝突するまで 10 cm/s^2 ずつ漸増させる．図 2 には入力動の一例として，振動数 2 Hz ，最大入力加速度 400 cm/s^2 の正弦波を示す．木片の寸法は，表 2 の通りに設定する．実大の高さと幅をそれぞれ $2H$ ， $2B$ ，縮小の高さと幅を $2h$ ， $2b$ とする．実大寸法として，高さは 200 mm ， 150 mm の 2 種類，幅は 40 mm ， 60 mm ， 75 mm の 3 種類，奥行きは 150 mm とする．これらの寸法は，本棚や食器棚，タンスなどを想定している．

データの取得には画像計測を用いる．ただし，後述のように加速度計のデータとの対応を確認している．

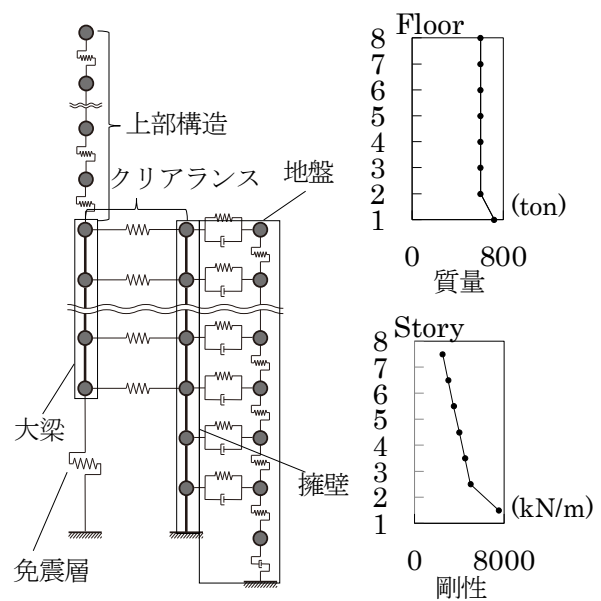


図 3 解析モデル

表 3 入力地震動

地震動	長周期地震動				パルス性地震動	
	CH1		SZ1		西原村小森 EW	
入力倍率	1.00	1.25	1.00	1.25	0.5	0.6

図 3 に地震応答解析の解析モデルを示す．解析モデルは，7 階建 RC 造免震建物を想定している．上部構造は 8 質点系モデルを用いる．質量は 1 階を 720 ton ，それ以上の階を 600 ton で一定とする．上部構造の復元力特性は武田モデルとする．剛性は 1 階を 7500 kN/mm ，それ以上の階では 2 階で 5000 kN/mm ，最上階で 2500 kN/mm とする台形分布とする．上部構造の減衰は剛性比例型とし 3% の減衰を与える．

基礎部分は文献 1) のモデルを参照する．すなわち大梁，擁壁はコンクリートとし，背後地盤は一様な砂質土とする．クリアランスは 600 mm とする．免震層はアイソレータとダンパーからなる．アイソレータは弾性とし，免震周期が 4.0 s となるように，水平剛性を 12.09 kN/mm とする．ダンパーは完全弾塑性型の復元力特性とする．ダンパーの降伏耐力は，降伏せん断力係数 α_s が 0.03 となるように設定し，降伏変位 d_y は 30 mm とする．表 3 に入力地震動を示す．入力地震動は国土交通省の建築基準整備促進事業で作成された長周期地震動である CH1，SZ1 と 2016 年熊本地震本震で観測されたパルス性地震動である西原村小森 EW とする．

転倒解析で想定する家具の寸法は，実験の木片 C の寸法を実大換算したものとする．

(実験調査によって得られた新しい知見)

【模型振動台実験結果】

図 4 に画像計測と加速度計の加速度データを重ね合わせたテーブルの加速度時刻歴を示す．3 秒までは画像計測の方でノイズが多く見られたが，加速度に大きな変化のあった 3 秒以降のデータはほとんど一致している．そのため，画像計測を用いても信頼性は損なわれない．

図 5 に各木片の回転角時刻歴を示す．ただし，実線が実験結果，点線が後述のプログラムによる解析結果である．また，表 2 に転倒直前の衝突時の最大床加速度 $cA_{\max}$ の値を示す．

木片 D は、最大入力加速度が 450 cm/s^2 になるまで加振を行ったが転倒しなかったため、省略する。これらの結果から、一度ロッキングしてもとに戻る最中に衝突が発生し、加速して逆方向に転倒していることがわかる。高さが 200 mm の木片 A, B, C は、およそ 2000 cm/s^2 を超える加速度が木片に入力されると転倒する。一方で、高さが 150 mm の木片 E, F はさらに大きな加速度が入力されることで転倒する。また、幅が広い木片ほど転倒しにくい傾向があり、転倒に必要な加速度がわずかに大きくなることが確認できる。

次に剛体の回転運動を解析するプログラムを作成する。本解析では、剛体のすべりや床からの完全な浮き上がりはないものと仮定する。剛体の運動を図 6 のように静止状態、左支点でのロッキング、右支点でのロッキングに分けてモデル化し、運動方程式を解くことで、回転運動を数値的に解析できるようにする²⁾。なお、家具が床に衝突して支点が切り替わるときには、エネルギー減衰を考慮する必要がある。角速度の減衰は、後述する解析結果と対応するよう決定する。具体的には、衝突後の角速度は衝突前の角速度の 0.7 倍とする。

転倒解析プログラムでの解析結果を模型振動台実験の結果と比較し、転倒解析プログラムの妥当性を検討する。図 5 の回転角時刻歴のうち、点線がプログラムでの解析結果を示している。5 つの木片の結果において、数値の誤差はあるがロッキングして転倒する等の挙動自体は精度良く追従できていることが確認できる。したがって、このプログラムの結果は妥当である。

【時刻歴応答解析結果】

時刻歴応答解析の結果、1 階の床加速度が最も高くなったため、1 階に限定して家具の転倒解析を行う。図 7 に地震応答解析による床加速度時刻歴や転倒解析による家具の回転角時刻歴を示し、衝突したタイミングを矢印で表す。図 7 (f) の西原村小森 EW (入力倍率 0.6) では 6000 cm/s^2 を超える加速度が家具に入力されて転倒している。図 7 (b) の CH1 (入力倍率 1.25) などでは、 4000 cm/s^2 程度までの床加速度では転倒せずロッキングする。そのロッキング中に複数回衝突することで転倒している。このことから、転倒するケースには 1 回の衝突で転倒するケースと、ロッキング中に衝突が発生して転倒するケースの 2 つがあることが

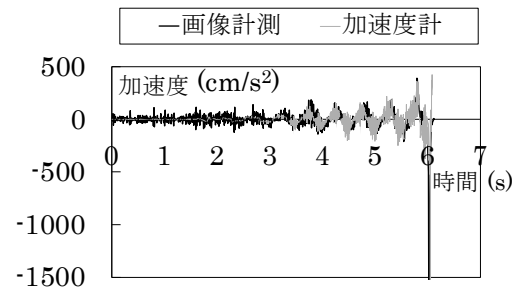


図 4 テーブルの加速度時刻歴 (木片 C)

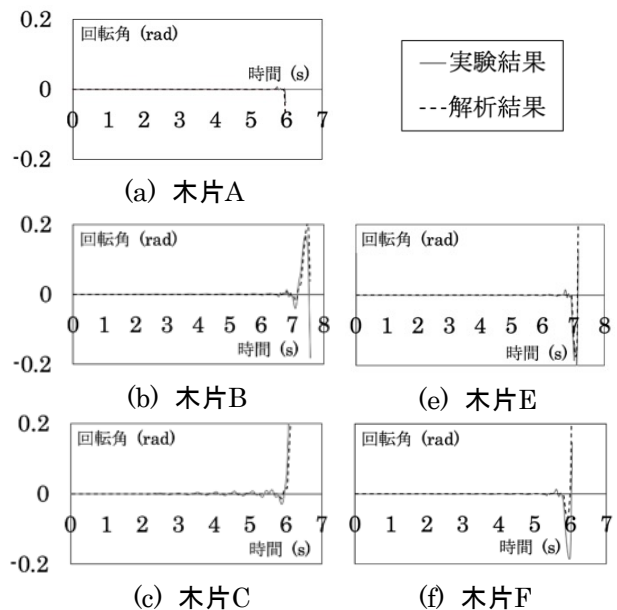


図 5 各木片の回転角時刻歴

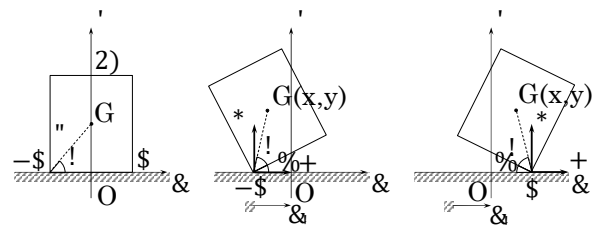


図 6 剛体の転倒モデル

わかる．家具の転倒には家具に入力される加速度の大きさが関係していると考えられる．一方で，図 7 (c)の SZ1 (入力倍率 1.00) のように，ロッキング中に複数回の衝突が発生していても転倒に至らないケースもある．これには，衝突時の回転角が関係しているのではないかと考えられる．

本研究では，家具の転倒挙動の特徴を模型振動台実験および転倒解析で検討した．今後は，今回得られた知見をもとにさらに詳細な検討を行い，家具の転倒条件を明らかにする予定である．

【参考文献】

- 1) 犬伏徹志，宮本裕司，荏本孝久，山下忠道：擁壁が弾塑性特性を有する場合の簡易評価法への適用，日本建築学会構造系論文集，第 81 巻，第 730 号，pp.1993-2003, 2016.12
- 2) 小寺忠，山田泰裕：ロッキングにおける分岐現象，福井大学工学部研究報告，第 49 巻，第 1 号，pp.9-16, 2001.3

(発 表 論 文)

- 1) 畑中祐紀，中野尊治，武下昂平：衝撃的な床加速度を受ける家具の模型転倒実験および数値解析，日本地震工学会第 18 回年次大会梗概集，2024.12
- 2) 武下昂平，畑中祐紀，中野尊治：衝撃的な床加速度を受ける家具の模型振動台実験および転倒挙動に関する数値解析，日本建築学会近畿支部研究報告集，2025.6（予定）
- 3) 武下昂平，畑中祐紀，中野尊治：免震建物の擁壁衝突を考慮した家具の転倒挙動に関する数値解析，日本建築学会大会学術公園梗概集，2025.9（予定）

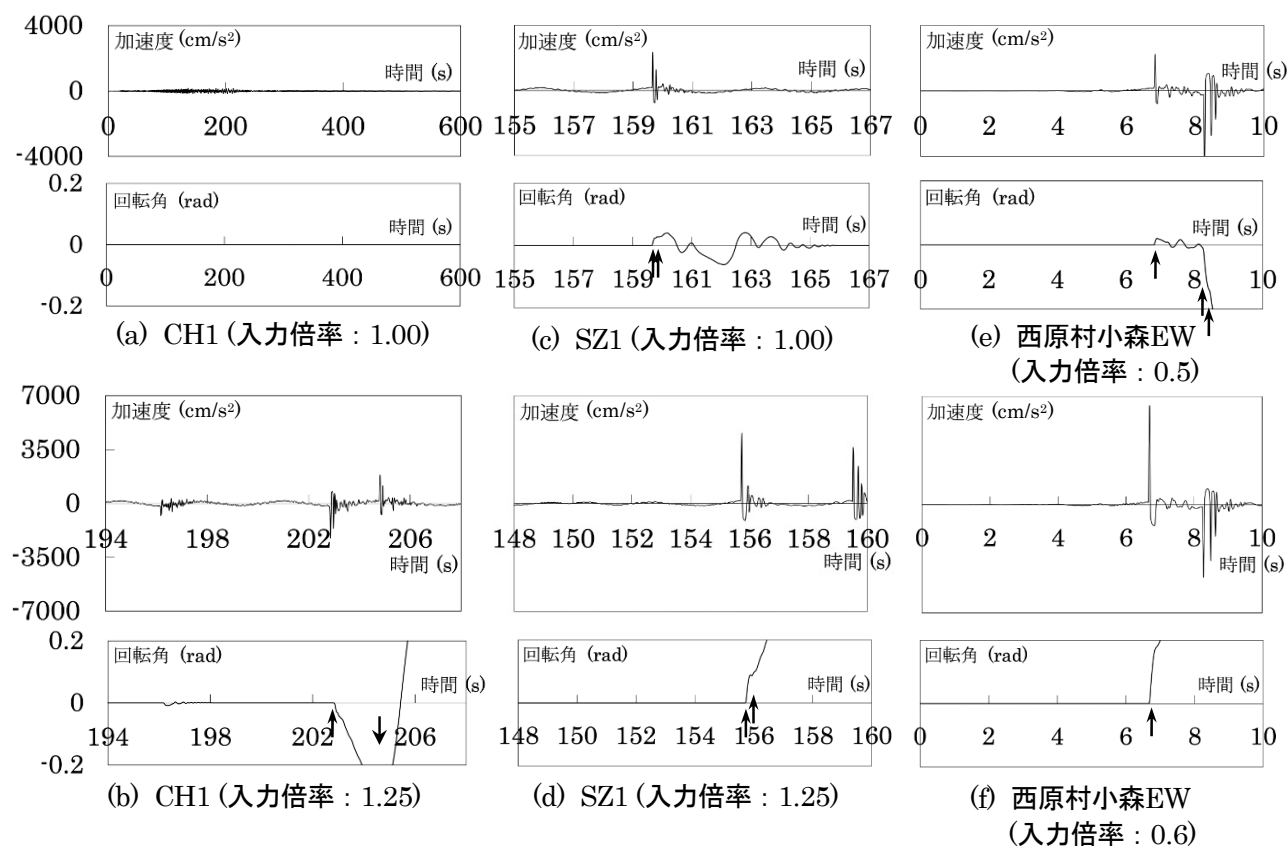


図 7 床の加速度時刻歴と回転角時刻歴