

木造免震住宅の最適ダンパー量の検討

標準的な木造住宅に対する数値実験

杉本 宙威

1. はじめに

木造免震住宅は、民間主導で開発・普及が進められてきたが、表層地盤増幅の評価を目的とした地盤調査の煩雑さとコストの問題から、住宅全体の供給量に比して採用された事例は少ない。これらの問題のうちコスト抑制の解決策として島津らは後述する滑り支承による免震システムの開発に取り組み、そのシミュレーション解析モデルを構築した¹⁾。このシステムは、まだ開発段階にあるため、免震支承自体の改良も続けられているが、免震層にはエネルギー吸収能力を有するダンパーが不可欠で、その投入量を明らかにしておく必要がある。本研究は、これらを背景に、標準的な木造住宅を対象に、免震層の最適ダンパー量を数値実験により検討した結果を述べる。

2. 新たに開発するシステム

2.1 免震システムの基本原理

本研究で構想するシステムの概要を図1に示す。本システムは、自重を復元力に変換できる機構として、伝統工法の石場立てのように柱勝ちとした柱脚部に半球状の金属材料を取り付け、それと対となる凹型の球面を基礎コンクリートに埋め込むものである。ここで対象とする免震システムは境界摩擦による滑りを前提とするため、摩擦係数の影響が強いことが特徴である。

このシステムを採用することで、木造住宅用の免震システムとして標準的な鉄骨架台が不要となり、大幅な導入コストの削減を可能とする。本研究では期待される免震効果を得ることに主眼を置き、免震層に必要とされるダンパー量を検討対象とする。

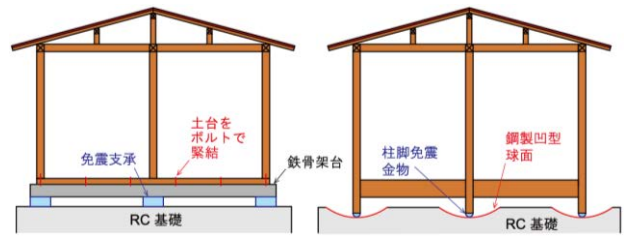
2.2 免震システムの概要

先行研究¹⁾において、本試験体による振動台実験の結果に対するシミュレーション解析として、静止摩擦・動摩擦を考慮した精算法を採用しており、結果として得られた復元力特性はBi-linearに置換されている。本研究では、その際に設定された静止摩擦係数 $\mu_s = 4.0 \times 10^{-2}$ 、免震層の2次剛性 $k_2 = 2.54 \times 10^{-2} (\text{kN/mm})$ 、及び1次剛性 $k_1 = 1500k_2$ を用いて解析を行った。また、後述する標準的な木造住宅の重量 $W(\text{kN})$ から、免震層の降伏せん断力を $\mu_s W(\text{kN})$ として設定した。

3. 検討対象住宅のモデル化と振動特性

3.1 標準的な木造住宅の設定と概要

本研究では、先行研究²⁾で作成された、延べ床面積が 120m^2 程度、階高が 2.8m の木造軸組構法による1~3階建の標準的な木造住宅を対象とした。重量算定のために決定された屋根・壁部の仕様を表1に示す。



(a) 従前の免震システム (b) 新たな免震システム

図1 新たな免震システムの概要¹⁾

表1 屋根と壁の仕様

roof type		wall type	
瓦葺き(葺き土有り) tile roofing soil	最重	土壁 mud wall	重
瓦葺き(葺き土無し) tile roof	重	ラスモルタル las mortar	中
スレート slate plate	軽	サイディング siding board	軽
ガルバリウム鋼板 galvalume steel sheet	最軽		

また、各住宅の平面図を図2に、設計条件を図3に示す。なお、図3における降伏せん断力は、後述する復元力特性の設定により算定された値である。本研究では、窓や壁などの配置は変更していない。以降の解析では、屋根と壁の仕様の組み合わせを軽×軽(スレート屋根×サイディング壁)として、Y方向のみ検討を行った。有効壁長の算出には耐力壁のみならず、準耐力壁も考慮する。

3.2 復元力特性の設定

本研究では、上部構造の耐震要素の復元力特性に五十田ら³⁾の提案したBi-linear + Slipモデルを用いた。同モデルは、各種の実験で再現性が検証されている他、モデルの有効壁長から復元力特性が容易に設定できる特徴がある。モデルの適用範囲は、Slip型の層間変形角 $1/30 \sim 1/20 \text{ rad}$ 間に負剛性を設定することで、木造住宅の安全限界である $1/30 \text{ rad}$ 以降の検討を可能にしているが、同モデルでは考慮していない。免震層の復元力特性は前述したBi-linearモデル¹⁾を用いた。

3.3 固有値解析によるモデルの振動特性把握

表 2 に検討モデルの上部構造の 1 次固有周期と免震周期を示す。また、図 4 に 2 階建、3 階建モデルにおける上部構造の 1 次固有モード図を示す。上部構造の固有値解析は Jacobi 法により初期剛性を用いて行った。また、免震周期は上部構造を剛体、減衰係数 c を 0 とした場合に、免震層が 45cm 変位した時の割線剛性を用いて算出した。変位を 45cm とした理由は、先行研究¹⁾の試験体における鋼製凹型球面の半径が 50cm であり、柱脚が変位可能な寸法は約 45cm であったためである。

4. 入力地震波と解析条件

4.1 入力地震波

本研究では、様々な周期特性を持つ地震波に対する応答を調べるため、過去に発生した代表的な地震 4 波 (El Centro-NS, Hachinohe-EW, Kobe-Ns, Taft-EW) の位相特性にランダム位相を加えた告示波 5 波を、Lv.1, Lv.2 の 2 つの異なる入力レベルとして計 10 波を採用した。入力地震波の疑似速度応答スペクトルを図 5 に示す。

4.2 解析条件

数値積分には変位増分による Newmark β 法を用いた。

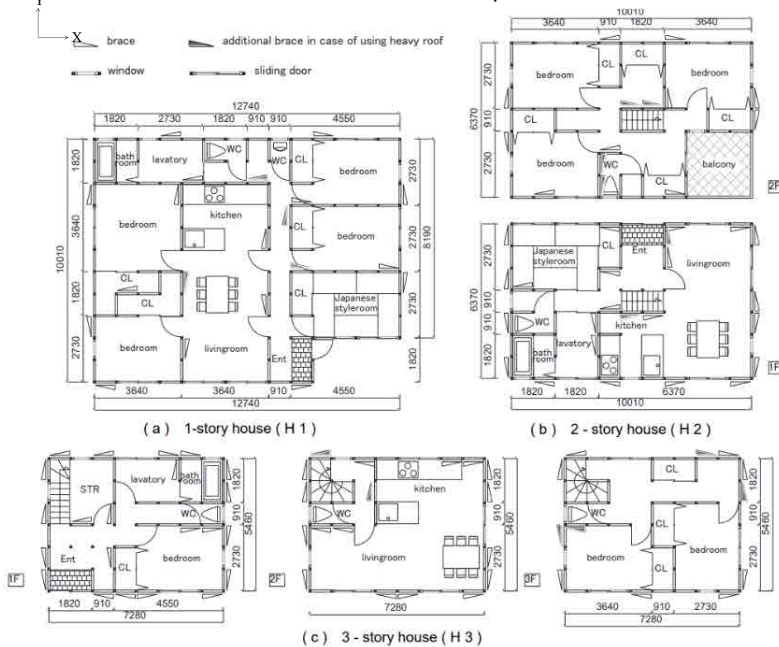


図 2 検討対象として設定した木造住宅の平面図²⁾

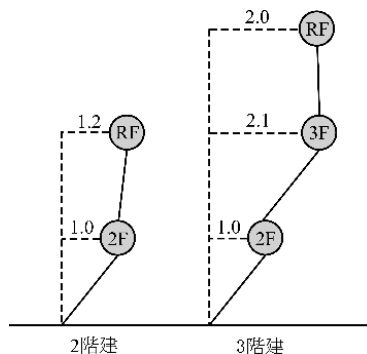


図 4 上部構造の 1 次固有モード図

計算刻みは $\Delta t = 1/1000s$ とし、免震層の減衰項は 0~0.6kN/(cm/s)までを 0.05kN/(cm/s)毎に、計 13 種を用いて検討した。上部構造の減衰は耐震要素の復元力特性に対して $h = 3\%$ を見込み、減衰項は固有値解析から求まる上部構造の 1 次固有振動数により算出された瞬間剛性比例減衰を用いた。

5. 解析結果

各モデル 3 種、各地震波 10 種、免震層の各減衰係数 13 種における応答変位、応答加速度、復元力の最大値を算出した。図 6 に、各地震波における各最大応答値の最大最小値及び、それらの平均値をモデル及び減衰係数毎に示した。

5.1 最大層間変位

図 6(a)より、最大変位は全てのモデルにおいて減衰係数が増加する程、上部構造では大きくなる傾向がある。また、地震波 Lv.1 より地震波 Lv.2 の方が最大最小値の差が大きい傾向がみられる。平屋について、 $c=0.15, 0.3 \sim 0.45kN/(cm/s)$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、平均値の差は最大で約 0.04cm であり、 $c=0.35kN/(cm/s)$ において免震層の最大変位は 45cm を

表 2 検討モデルの固有周期と免震周期

	平屋	2階建	3階建
1次固有周期(s)	0.24	0.37	0.49
免震周期(s)	4.73	4.69	4.67

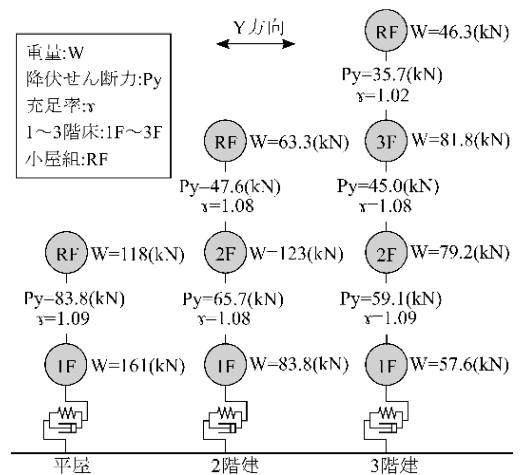


図 3 各モデルの設計条件

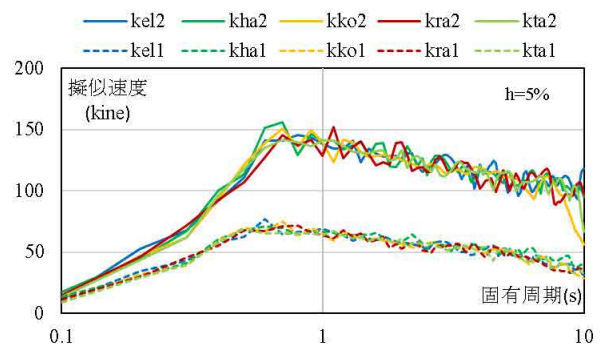


図 5 入力地震波の疑似速度応答スペクトル

超えていた。2階建について、 $c=0\sim 0.35\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、平均値の差は最大で約0.4cmであり、 $c=0, 0.05, 0.2\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ において免震層の最大変位が45cmを超えていた。3階建について、 $c=0.15\sim 0.35\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、平均値の差は最大で約0.3cmであった。また、2階建における最大変位は2層、1層の順で大きく、3階建においては3層、1層、2層の順で大きくなっている。

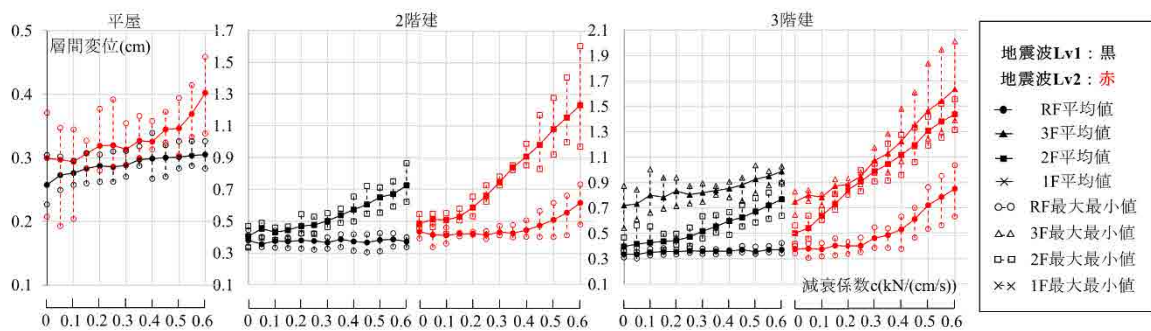
5.2 最大加速度

図6(b)より、最大加速度は全てのモデルにおいて減衰係数が増加する程大きくなり、1Fと直上階は概ね逆の挙動を示す傾向がある。平屋について、 $c=0.15\sim 0.4\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、平均値の差は最大で約8.8galであった。また $c=0.3, 0.4\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ において、地震波Lv.2のRF最大加速度は減少している。2階建について、地震波Lv.1における最大最小値の差及び平均値は、減衰係数による変

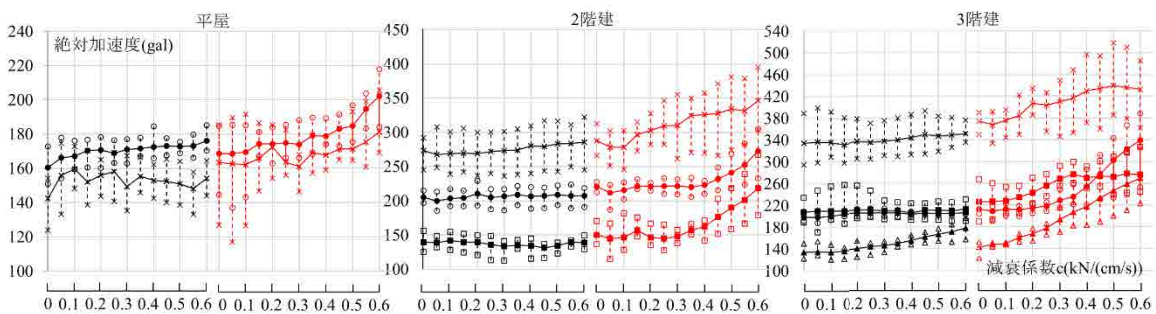
化が小さいことが分かる。また、地震波Lv.2では $c=0, 0.15\sim 0.4\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差が小さく、RFでは $c=0.3, 0.35\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ 、2Fでは $c=0.2, 0.25\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ で減少している。3階建について、地震波Lv.1における3F以外の平均値は、減衰係数による変化が小さいことが分かる。また、 $c=0.25\sim 0.35\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、 $c=0.25\sim 0.35\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ の順に、地震波Lv.1では小さくなり、地震波Lv.2では大きくなっている。同様の範囲における平均値の差は最大で約29.5galであった。

5.3 最大復元力

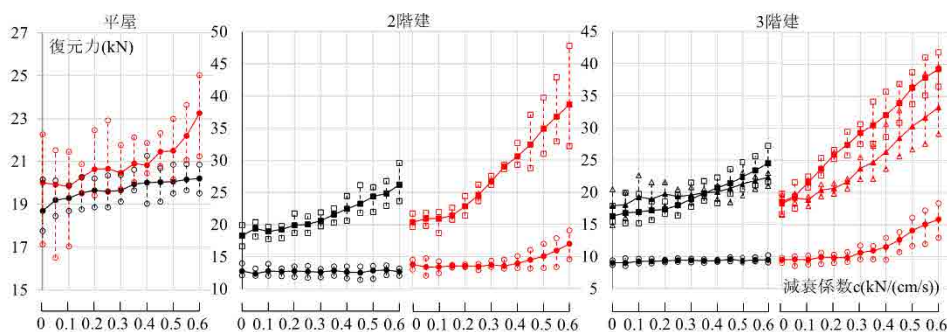
図6(c)より、上部構造における復元力と変位は近い挙動を示していることが分かる。また、最大復元力は減衰係数が増加する程大きくなる傾向がある。平屋について、 $c=0.15, 0.3\sim 0.4\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、 $c=0.3, 0.4\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ で減少する傾向がある。2階建について、 $c=0.15\sim 0.35\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、平均値の差



(a) 上部構造の最大変位



(b) 免震層及び上部構造の最大加速度



(c) 上部構造の最大復元力

図6 各条件における最大応答値

は最大で約 7.6kN である。3 階建について、 $c=0.15\sim 0.3\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における上部構造の最大最小値の差は小さく、平均値の差は最大で約 5.6kN であった。

6. 免震層の最適な減衰係数の考察

5 章より、モデル毎に異なる性質の地震波を入力した際の、各減衰係数における最大応答値の平均値と最大最小値の差が小さくなること、及び免震層の最大変位が変位可能な 45cm を超えていないことを基準に、免震層の減衰係数を推定した。推定した免震層の最適な減衰係数を表 3 に示す。推定した減衰係数における免震効果を確認するため、例として入力地震波（El Centro-NS）と、2 階建の $c=0\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ 及びモデル別の最適な減衰係数の推定値 $c=0.25\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における応答値を図 7 に示し、比較を行う。まず、免震層の減衰の有無による応答の変化について、図 7 (b)~(d)から、 $c=0\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ より $c=0.25\text{kN}/(\text{cm}/\text{s})$ における応答値の方が上部構造では大きくなり、免震層では小さくなる傾向が見られ、上部構造の応答変位及び応答加速度の変化は 0.9~1.4 倍であった。免震層の応答変位については、最大応答値は大きく変わらないが、振動の減衰は大きくなることを確認できる。次に、入力地震波の加速度と 2 階建の応答加速度について、図 7(a),(c)より、本免震システムを採用することで、上部構造の応答加速度は入力地震波の加速度より概ね小さくなり、最大で 1/2 程度に減少することが確認できる。

7. まとめ

本研究では、対象とする免震システムを採用した標準的な木造住宅を対象として、免震層に限定しての必要とされるダンパー量を推定することを目的に、解析的に検討した。得られた知見は次の通りである。

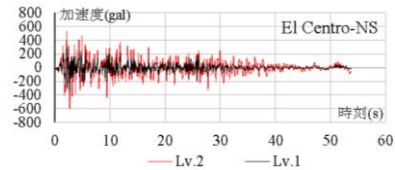
- 1) モデル、地震波及び減衰係数の違いを考慮した免震建物の応答計算を構築し、各条件における最大応答値の比較により最適な減衰係数を推定した。
- 2) 推定した減衰係数の免震システムにより、期待した免震効果が確認されたため、今後、免震金物の改良等を進めるとともに、異なる摩擦係数や、現在改良中の免震システムで同様の検討を行い、本免震システムと比較することが必要である。

参考文献

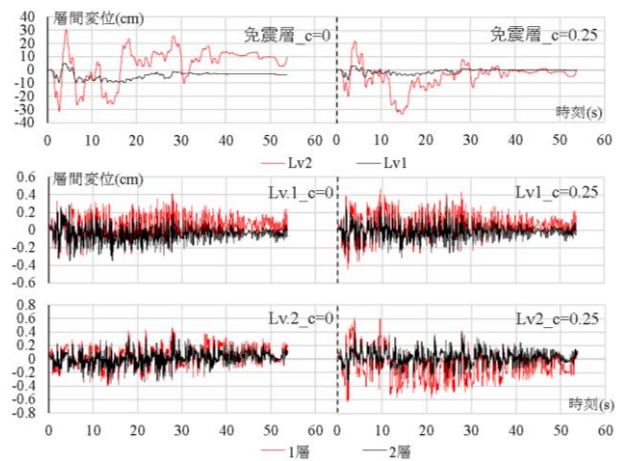
- 1) 島津由貴, 他:木造住宅を対象とした免震システムの開発-基礎実験に基づく応答計算手法の検証, 日本建築学会技術報告集, 第 68 号, 2022.2 (掲載予定)
- 2) 光武大貴, 他:壁量計算で計画された木造住宅の地震応答評価その 1 仕様の違いによる木造住宅の重量・質量, 大会学術講演梗概集, No.495-496, 2019.9
- 3) 五十田博, 他: 木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル-木造建物の地震時挙動に関する研究-, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, pp.157-163, 2007.6

表 3 最適な免震層の減衰係数の推定値

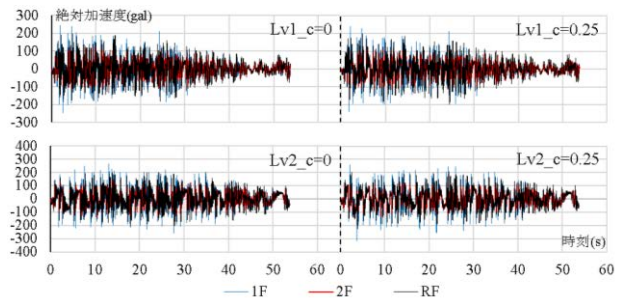
	減衰係数(kN/(cm/s))		
	推定範囲	推定値	
		モデル別	共通
平屋	0.15, 0.3, 0.4	0.15	0.3
2階建	0.25~0.35	0.25	
3階建	0.25~0.35	0.25	



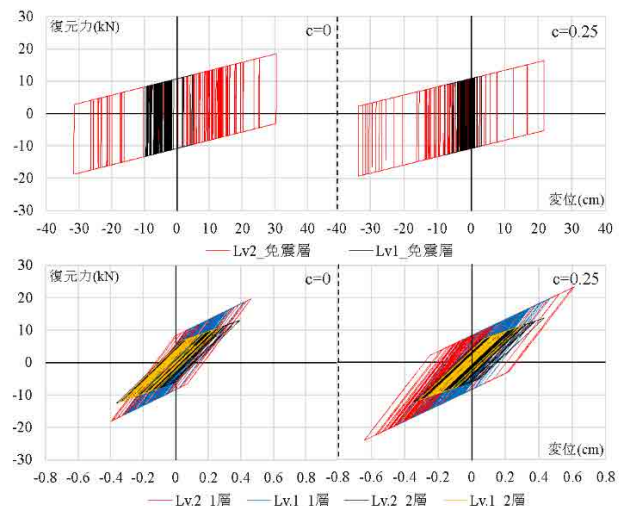
(a) 入力地震波の加速度波形



(b) 免震層及び上部構造の応答変位



(c) 免震層及び上部構造の応答加速度



(d) 免震層及び上部構造の復元力特性

図 7 入力地震波と 2 階建の応答値