

振動台実験に基づく免震戸建住宅の変位制御に関する研究

名古屋大学工学部社会環境工学科建築学コース
福和研究室 天埜 貴仁

1. 研究の背景と目的

免震戸建住宅は、国土交通大臣による一般認定を取得した住宅メーカーが現れたため、2000年以降急激に普及し、現在最も多いメーカーで全国に約4000棟建築されている。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(以後3/11本震)では、神奈川県西部の足柄平野にて数棟の免震戸建住宅が想定以上に地盤と共振し、免震装置の許容変位を超える現象が確認された。これは免震ビルと比較して免震戸建住宅は地盤調査が深い所までは十分に行われず、免震戸建住宅の固有周期である2~3秒程度の地盤増幅を正確に予測することが困難なことが一つの原因と考えられる。また、敷地に余裕がなく免震層のクリアランスの限界設計値は35cm程度というのが現状で、想定を超える共振が起きた場合は免震装置の許容変位以内に留めることは非常に難しい。

現在、中部圏には多くの免震戸建住宅が分布し(図1)、東海・東南海・南海地震では揺れも強くなり、免震層の更には大きな変位が予想される。そのため『免震戸建住宅の変位制御』は重要な技術課題である。本研究では『変位依存型』と『速度依存型』の2種類の変位制御方法について、それらを用いた実大免震戸建住宅の振動台実験を行い、その優位性を分析結果に基づいて考察することを目的とする。

2. 実験概要

実大振動台実験で用いる試験体は(図2)、上部構造物は2階建ての在来軸組構法の木造住宅で、免震装置は滑り支承と天然ゴム系積層ゴムで、固有周期は約3秒である。また速度依存型の変位制御装置では性能評価実験も行っており、試験体は転がり支承と天然ゴム系積層ゴムで、試験体の固有周期は約2.7秒である。

実大振動台実験での入力波は、3/11本震時に免震層が40cm以上変位した免震戸建住宅から、約200m離れた地点に設置されていたSK-net岡本消防署で観測された加速度波形(以後岡本波)を用いる。また性能評価実験ではK-NET石巻で観測された加速度波形(以後石巻波)も用いる。これらは

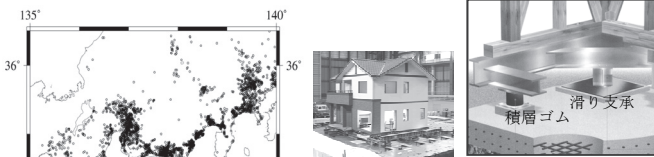


図2 実大振動台実験概要

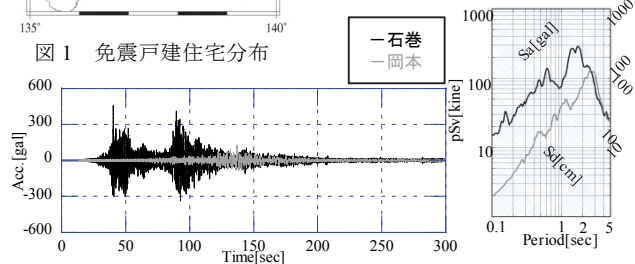


図3 入力波加速度波形、5%擬似速度応答スペクトル

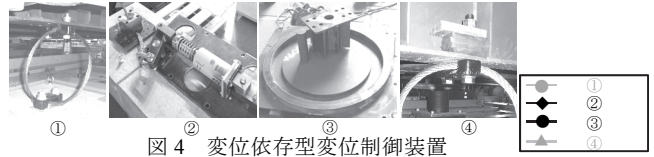


図4 変位依存型変位制御装置
表1 岡本波入力時の最大免震層変位

変位制御装置	免震層変位 [cm]
岡本消防署近隣物件 (変位制御装置無)	40cm 超え
① φ10mm ステンレスリング	38.2
② オイルバッファ	37.7
③ ピンロック	34.2
④ φ14mm ステンレスリング+緩衝ゴム	34.1

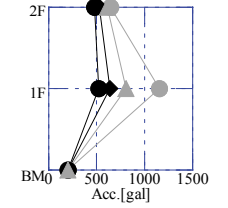


図5 最大応答加速度

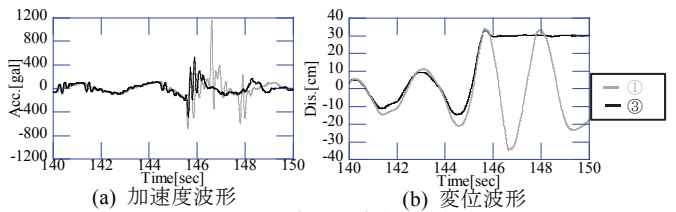


図6 岡本波入力時応答比較

共に、免震建物の応答を増幅させる長周期地震動と考えられる。図3に入力波の加速度波形、5%擬似速度応答スペクトルを示す。

3. 変位依存型変位制御装置を用いた実大振動台実験

実験に用いた変位依存型の変位制御装置は①φ10mm ステンレスリング、②オイルバッファ、③ピンロック、④φ14mm ステンレスリング+緩衝ゴムの4種で、いずれの装置も免震層変位が30cmを超えると変位制御機能が発現するように調整されている。②は装置先端のロープが引っ張られると常に一定の抵抗力を発揮する。③は鉄柱が円周状に掘られた溝に落ちて強制的に免震層を固定する。ただ、円周方向には自由度がある。④はリング状のロープが引っ張られて抵抗する際に、上部構造物への衝撃を緩和するため、上部接合部にゴムを用いている。

岡本波入力時の、各装置での免震層変位の最大値を表1に、各階の最大応答加速度を図5に示す。また、図5において1Fでの応答加速度が一番大きかった①と、一番小さかった③の応答加速度波形と、免震層の変位波形を図6に示す。表1より変位制御装置をつけていない状態と比較して、各変位制御装置によって免震層の変位は制御できているが、図5より各階での応答加速度が入力を超え、非常に大きくなっている。

4. 速度依存型性能可変ダンパーの性能評価実験

速度依存型性能可変ダンパーは、図7のように2つの回路を持つことで、免震層の相対速度に応じてダンパーの抵抗力を変化させ、相対速度が50kine以下の時は抵抗力を上げ

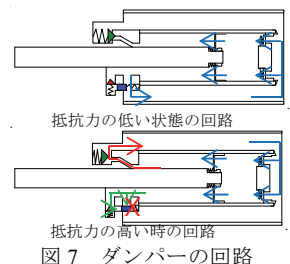


図7 ダンパーの回路

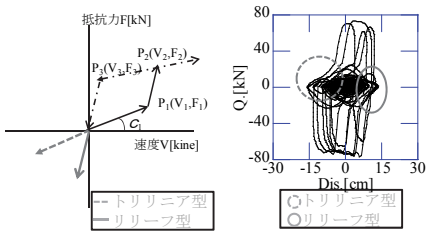


図8 速度-荷重関係 図9 変位荷重関係

ずには免震としての性能を発揮するものである。実験では TypeA,B,C の3種のダンパーを比較し

た。それらは速度と抵抗力の特性において、大きく2種類に分類される。図8のP₃から原点に向かって履歴を描き、その傾きを維持したまま第3象限に向かうのがリリーフ型、原点からまたP₁の傾きになり第3象限に向かうものがトリリニア型と定義する。変位-荷重関係ではトリリニア型は図9中に印で示すような荷重の向きが変化する箇所曲線的に変化するが、リリーフ型は直線的に変化する。TypeAはトリリニア型、TypeBはリリーフ型、TypeCは圧縮から引張と、引張から圧縮で逆の特性を示したためリリーフ・トリリニア型の特性を持っているダンパーである。

石巻波入力時と岡本波入力時のダンパーの履歴ループを図10、図11に示す。なお、ダンパーの荷重は圧縮側を正とする。各入力時の上部構造物での応答加速度と、免震層の相対速度と変位の最大値を表2に示す。TypeBの免震層変位が大きくなっている理由として、図10(b)からTypeBのみ図8でのc₁(減衰係数)が小さいことが挙げられる。c₁が小さいために応答が増幅しやすく、変位が増大したと考えられる。一方、最大応答加速度がTypeCで大きくなる理由は図8でのF₂が大きいためである。岡本波入力時は、図11(a)(b)(c)からTypeBのみ抵抗力が上がっているが石巻波入力時と同様で、TypeBは減衰力が小さいために応答が増幅して50kineに達して上記の結果を示した。以上からc₁が小さいと免震層変位が増幅し危険である。また、全ダンパーで抵抗力が上がった石巻波入力時の応答加速度からF₂が同程度のTypeAとTypeBでは、TypeBの方が小さな値を示した。

5. 速度依存型性能可変ダンパーを用いた実大振動台実験

3節で応答加速度が非常に大きくなった結果を踏まえ、4節で用いたTypeBのc₁を大きくしたものをを用いて実大振動台実験を行った。岡本波入力時の免震層変位の最大値を、3節で応答加速度が一番小さかった③ピンロックと併せて表3に示す。また、その際の各階での最大応答加速度を図12に示し、1Fでの加速度波形と免震層の変位波形を図13に示す。図13(c)の速度-荷重関係では抵抗力は低い状態のままであったが、ダンパーを装着したことで速度に応じた減衰力が付加され、免震層変位が制御されたと同時に、応答加速度もピンロックに対して1/3程度に低減された。

6. 結論と今後の課題

本研究では、速度依存型性能可変ダンパーを用いることで変位依存型の制御装置と比較し上部構造物での応答加速度を抑えつつ、免震層の変位を制御することができた。ただ、抵抗力が低い状態での免震性能への影響に関しては別途検討が必要である。また、ダンパーの機構やc₁、F₂を変化させるパラメトリックスタディにより、入力地震動の特

性に応じた最適解を見つけることが重要である。さらに変位依存型の場合も2段階で変位を制御するなどして、上部構造物での応答を低減させることが必要である。

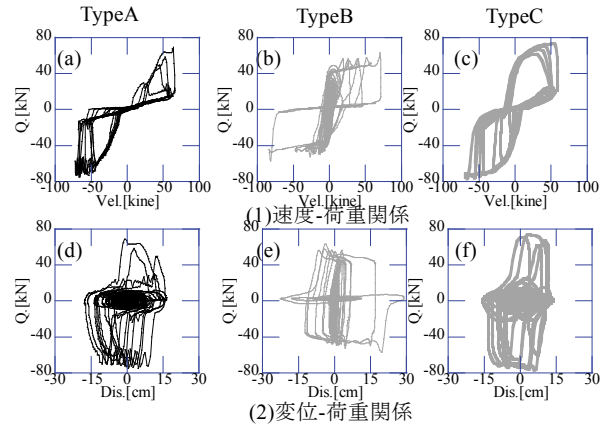


図10 石巻波入力時ダンパー履歴ループ

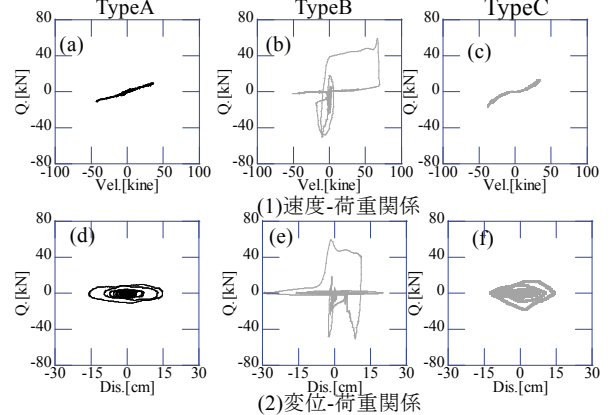


図11 岡本波入力時ダンパー履歴ループ
表2 最大応答値

	石巻波入力時			岡本波入力時		
	応答加速度 [gal]	相対速度 [kine]	免震層変位 [cm]	応答加速度 [gal]	相対速度 [kine]	免震層変位 [cm]
TypeA	384	72	18	123	42	16
TypeB	337	84	29	260	69	29
TypeC	503	69	16	134	38	14
フリー免震	305	157	56	275	117	51

※フリー免震とは変位制御装置を用いていない状態

表3 岡本波入力時最大免震層変位

変位制御装置	免震層変位 [cm]
岡本消防署近隣物件 (変位制御装置無)	40cm超え
③ピンロック	34.2
TypeB	21.7

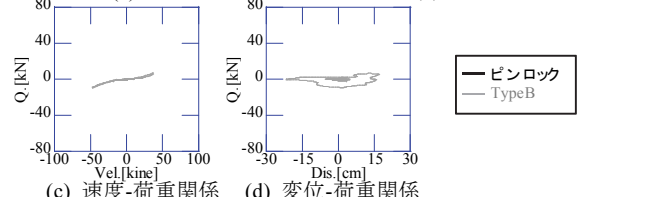
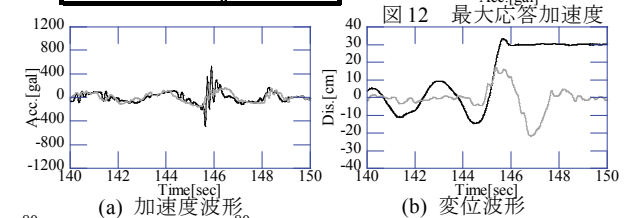


図13 岡本波入力時応答比較