研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度	
研究課題(タイトル)	ロッキング柱による木造住宅の応答制御と中層木造建物への適用	
	に関する研究	
研究者名※	小澤 雄樹	
所属組織※	芝浦工業大学 建築学部 教授	
研究種別	研究助成	
研究分野	建築技術	
助成金額	150 万円	
発表論文等		

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

()は、報告書提出時所属先。

大林財団2022年度研究助成実施報告書

所属機関名 芝浦工業大学 申請者氏名 小澤雄樹

研究課題

ロッキング柱による木造住宅の応答制御と中層木造建物への適用に関する研究

(概要) ※最大10行まで

大地震が起きるたびに、木造住宅は大きな被害を受けてきた。倒壊に至った建物の多くは、1 階部分の層崩壊が起点となり建物全体の倒壊に至ったケースが非常に多い。しかし、実際の建物 において各々の敷地条件に合わせ居住性を確保しながら平面・立面共にバランスの良い耐力壁配 置を実現することは現実的に容易なことではない。

木造住宅において人命を脅かす危険な層崩壊を防ぐ有効な手段の一つとして、ロッキング柱を 用いる手法がある。剛強な通し柱状の構造要素を建物内に複数本配置することで、各層の層間変 形角を均一化し、保有水平耐力を柱のせん断力を介して再配分することが可能となる。本手法は 建物の安全性を向上させるばかりでなく、必要壁量にとらわれない自由度の高い壁配置を可能と し、中層木造の実現可能性も高まる。本研究では本手法の有効性について、縮小模型を用いた振 動実験により明らかにすることを目的とする。

1. 研究の目的

(注) 必要なページ数をご使用ください。

日本は大地震の度に多くの建築物が被害に遭い、多数の人命が失われてきた。2016 年熊本地震では、木造住宅の倒壊による被害が多数を占めており、その被害報告書によれば木造住宅では1階部分の層破壊による倒壊被害が84%を占める¹⁾。この原因として、日本の戸建住宅では1階にリビングなどの大空間、2階以上に個室を設ける場合が多く、地震力が大きくなる1層部分で壁量が不足する一方、2層では余力を有している場合が多いことが挙げられる。

以上の背景から本研究では、木造住宅の応答を抑制し倒壊可能性を低下させる手法の一つとして鋼製ロッキング柱を提案する。ロッキング柱とは脚部で回転可能な高剛性の通し柱状の耐震要素で、全層に貫通させ配置することで層間変形角を均一化し、上下階の耐震性能の過不足を再分配することで建物全体の安全性を向上させる手法である(図1)。ロッキング柱の効果はRC造の耐震改修事例2)や数値解析を用いた検証により確認されている。本研究ではロッキング柱として鋼製の柱を用いることを想定する。それによりR柱の断面を小さくすることが出来、平面計画の自由度を損なうことなく安全性を向上させることが出来る。

本研究では、木造 2 階建て住宅の挙動を再現可能な実物の 1/6 の大きさを想定した縮小模型を 製作し、振動台を用いた加振実験を行ない、実験結果をもとにロッキング柱の応答抑制効果を明 らかにすることを目的とする。

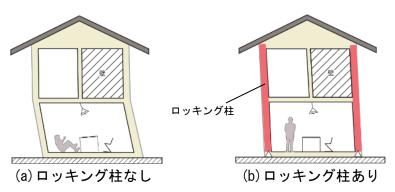


図1 ロッキング柱による効果

- 1) 日本建築学会: 2016 年熊本地震災害調査報告, 2018 年 6 月
- 2)和田章: ロッキング壁による既存 RC 建物の耐震改修 その1・その2 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 623-626, 2010.09
- 3) 大川裕貴: ロッキング壁を利用した木造住宅の応答制御手法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第28巻, 第68

号, pp. 143-148, 2022. 2

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

1. 壁性能試験

振動実験に先立ち、使用される壁の構造性能を確認するための壁性能試験を行った。2層モデルに壁4枚を取り付け、1階床及び屋根レベルを固定し2階床レベルを左右に押し引きすることで水平力に対する壁の構造性能を確認した。壁構面は厚さ3mmのラワン合板と縦枠材からなる壁パネルを、模型本体の管柱間にはめ込みM4ボルト8本で固定する構成となっている。

2 階床部分の載荷点の水平変位を計測し、これを模型の層間距離(450mm)で除したものを見かけの変位角とする。変位角が 1/300、1/120、1/75、1/45、1/30、1/18、1/12[rad]に達するまで正負3回ずつの交番繰り返し載荷を行った。壁を釘4本で設置したモデルを K_4 、釘8本で設置したモデルを K_8 とし、これを各モデル4体ずつの試験体 ($No.1 \sim No.4$) に対して載荷を行った。

2. 振動実験

2.1 縮小モデルの作成

図 2 に振動実験に用いた縮小モデルの詳細を示す。床構面及び錘には PL-6(SN400B)を用いており、床構面 1 枚は約 9.4kg、錘は 1 枚約 2.45kg で 2 階床には計 8 枚、R 階床には計 4 枚の錘を載せている。重量としては 2 階床重量が 29.0 kg、R 階床重量が 19.2 kg、総重量は約 60 kgとなっている。水平力を負担する要素は壁構面のみとし、柱梁接合部は 3D プリンタによって製作した接合部により一軸方向ピンとしている。ロッキング柱の接合部はモーメント抵抗がなく取り外し可能な設計としている。

2.2 振動実験の概要

縮小模型を振動台に固定し、1 軸方向にのみ地震波を入力する。実験パラメータはロッキング柱の有無、1 層 2 層の壁の強度とする。計測項目は振動台及び各層の加速度 3 カ所、各層の水平変位 3 カ所、ロッキング柱 2 本の中央部のひずみ 4 カ所の計 10 項目である。これらは加速度計、レーザー変位計、ひずみゲージによって記録される。また、模型の完全な倒壊を防ぐために転倒防止ワイヤーを設け、各層で 100 mm以上の層間変形が生じないようにしている。

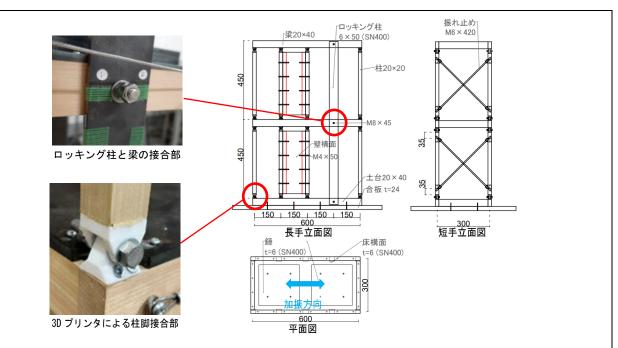


図2 作成した縮小モデルの概要

2.3 実験のパラメータ

(1)ロッキング柱

ロッキング柱の有無の2種類。ロッキング柱ありのモデルをRモデル、無しのモデルをNモデルとする。

(2)壁の強度

釘 4 本使用 (K_4) 、釘 8 本使用 (K_8) 、壁無しのモデルの 3 種類用意した。1 階層に壁を 2 枚ずつ入れ、モデル名称は 1 層壁—2 層壁の順で壁に使われた釘の本数を示しており、組み合わせとしては 4-4、4-8、8-8 モデルの 3 種類及び、これとは別にロッキング柱ありのモデルのみ 0-4, 0-8 モデルの 2 種類のモデルについて実験を行う。

2.4 入力波と加振スケジュール

(1)スイープ加振

目標加速度は 0.02[G]に固定し、周波数を 2[Hz]から 16[Hz]まで時間経過とともに変化させ、往復 6 分かけて行った。これを地震波入力前後に行うことで、地震波入力による壁構面の損傷状態を固有振動数の変化によって確認した。

(2)入力波

実験は JR 鷹取 Ns、BCJ-L2、E1-Centro NS、JMA Kobe NS の 4 つの地震波(以下、それぞれ「JR 波」、「BCJ 波」「E1 波」「JMA 波」とする)を最大加速度で 0.1G、0.2G、0.3G に基準化したものを用いる。予備試験の結果、JR 波と BCJ 波は比較的応答が大きかったため、基準となる 4-8 モデルについては全 4 波、それ以外ののモデルについては JR 波と BCJ 波の 2 波のみ入力する。

入力波の時間刻みは試験体の縮尺に合わせ調整して入力する。本来は 1/6 を想定した場合の時間刻みは (1/6) 0. 5=1/2. 45 となるが、振動台への入力の都合上、1/3. 2 倍の時間刻みで入力した。 (3) 加振スケジュール

スイープ加振と地震波を表 1 に示すスケジュールで入力する。最大加速度を順番に上げていき、

スイープ加振5回目までは全試験体で共通して行い、その後は変位増幅が見られる場合は層崩壊に至るまで繰り返し実験を行う。変位の増加が見られない場合は3回連続で変位増分が0.5mm以下になった場合に加振を終了した。

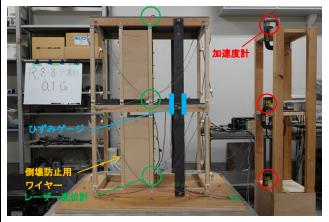


図2 作成した縮小モデルの概要

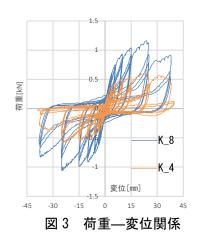
= 1	加振スケジュー	
表 1	加振スケンユー	ル

順		目標最大加速度	
順	人刀板	[G]	[m/s²]
1	スイープ加振(1回目)	0.02	0.196
2	地震波_0.1G	0.1	0.98
3	スイープ加振 (2回目)	0.02	0.196
4	地震波_0.2G	0.2	1.96
5	スイープ加振(3回目)	0.02	0.196
6	地震波_0.3G(1回目)	0.3	2.94
7	スイープ加振(4回目)	0.02	0.196
8	地震波_0.3G(2回目)	0.3	2.94
9	地震波_0.3G(3回目)	0.3	2.94
10	スイープ加振 (5回目)	0.02	0.196
11	地震波_0.3G(4回目)	0.0	2.04
	地震波_0.3G (n回目)	0.3 2.94	

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

1. 壁性能試験の実験結果



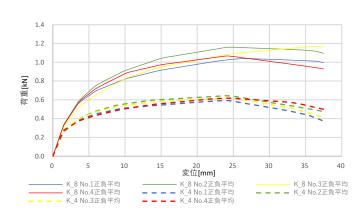


図 4 荷重-変位関係の包絡線

代表的な実験結果を図 3 に、 K_4 と K_8 の包絡線をまとめたものを図 4 に示す。変形角が 1/18[rad] (変位 25mm)程度までは各モデルでほぼ同様の挙動を示し、変位が大きくなるにつれて 試験体ごとにバラつきが生じる。これは破壊性状が試験体によって異なるためである。

 K_-4 、 K_-8 での壁 1 枚当たりの最大荷重 P_{max} はそれぞれ 0.150kN、0.271kN であり、 K_-8 は K_-4 の約 1.81 倍となっている。 釘本数が 2 倍になっているのに対して最大荷重の増加率がそれより 小さくなっているのは、 K_-4 では壁の 4 隅で釘打ちしているのに対し、 K_-8 で追加で打った釘 4 本が壁の回転中心から近い位置にあるためと考えられる。 初期剛性 K_1 については、 K_-8 は K_-4 の 約 1.2 倍であり、これも同様の理由によると考えられる。

2. 振動実験の実験結果

(a) 時刻歴応答の比較

図5に4-8モデルのJR波及びBCJ波に対する代表的な層間変位応答の結果を示す。

Nモデルにおいてはすべての地震波で1層で大きな層間変位が観測された一方、2層では変位 応答が極めて小さくなった。これは1層の剛性率が低く1層に損傷が集中したためである。一方、Rモデルではロッキング柱の作用により1層、2層の変位応答がほぼ同一となることが確認された。また、Nモデルでは加振終了時に大きな残留変形を生じているモデルが多数見られたが、Rモデルではほとんど発生していないことがわかる。

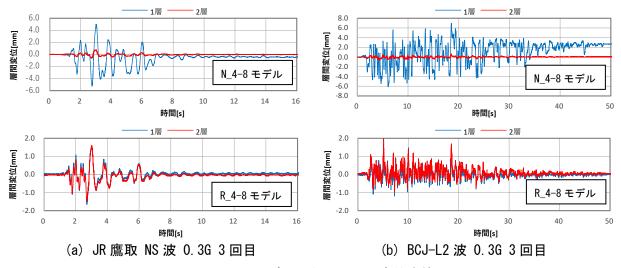


図5 4-8 モデルにおける層間変位応答

(b) 固有振動数の推移

スイープ加振時の応答のフーリエスペクトルを取り、卓越振動数を読み取ることで試験体の固有振動数を求める。図 6 に JR 波及び BCJ 波を入力した場合のスイープ加振 5 回目までの 1 次固有振動数の推移を示す。

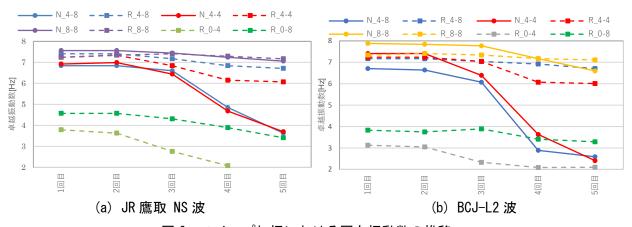


図 6 スイープ加振における固有振動数の推移

JR 波、BCJ 波共に、N モデルでは損傷が生じることで固有振動数が徐々に下がっていく様子が確認できる。特に 0.3G を最初に入力した前後の 3回目から 4回目にかけての低下が大きい。R_0-4、

 R_0 -8 を除いた R モデルは比較的低下が緩やかである。また R_0 -4 の 4 回目が 2Hz となっているのは、本スイープ加振の掃引範囲が $2\sim10Hz$ であったため、正確に計測できていないと考える。

(c)最大応答の推移

図7に JR波及びBCJ波入力時の最大変位応答の推移を示す。

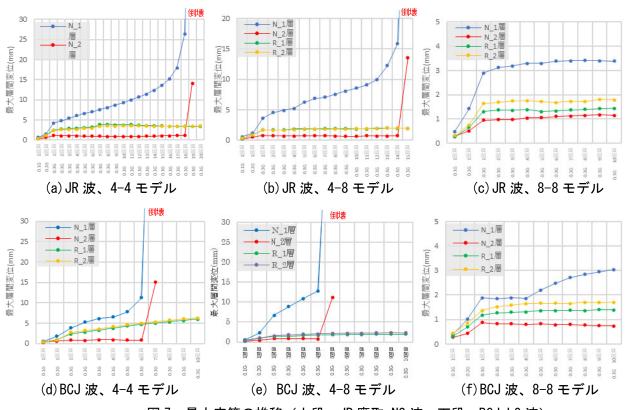


図 7 最大応答の推移(上段: JR 鷹取 NS 波、下段: BCJ-L2 波)

• JR 鷹取 NS 波(図 7 上段)

4-4 モデルではロッキング柱による応答抑制効果が明確に確認でき、N モデルでは 0.3G 19 回目に層崩壊を起こしたが、R モデルでは各層 1/120[rad]以内の変形角に収まった。4-8 モデルでは 4-4 モデルと似た傾向がみられ、N モデルでは 0.3G 15 回目に倒壊したが、R モデルでは 1 層間変形角が 1/230[rad]に抑えられた。8-8 モデルでは N モデルにおいても大幅な変位増大は見られなかったが、ロッキング柱による応答抑制効果は確認できた。

• BCJ-L2 波(図7下段)

4-4 モデルの N モデルでは 0.36 7 回目に層崩壊を起こし、R モデルでは回数を増すごとに変位に増加傾向がみられたものの、倒壊には至らなかった。4-8 モデルでは N モデルは 0.364 回目で層崩壊を起こしたが、R モデルでは 0.36 10 回目入力でも 1 層の層間変形角 1/225 [rad]以下に抑えられ、各層変位が均一化されている。8-8 モデルは JR 波と同様に N モデルでも変位の増大がみられなかったが、R モデルの変位を全体的に抑えることができた。

3. まとめ

R 柱による応答抑制効果、倒壊防止効果を確認するために、縮小モデル試験体を用いた振動実験を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ・今回実施したモデルにおいて、R 柱のない N モデルではいずれも 1 層部分の応答が卓越し、2 階部分は層間変形が小さくなった。これは剛性率のバランスが悪いため、1 層部分に損傷が集中したためであると考えられる。
- ・R 柱を挿入することで、1 層と 2 層の層間変形を均一化する効果が明確に確認できた。またそれにより、1 層の応答は N モデルと比較して大幅に抑えることができた。
- ・繰り返し地震動を入力することで、N モデルでは損傷が蓄積していき固有振動数が低下することが確認できた。また、最大応答が増大していき、N_4-4 モデル、N_4-8 モデルでは JR 鷹取 NS 波、BCJ-L2 波共に最終的に倒壊に至った。
- ・一方、Rモデルでは繰り返しの地震動入力による固有振動数低下の度合は比較的小さく、応答の増大もほとんど見られなかった。

以上より、ロッキング柱を建物内に挿入し各層の層間変形角を均一化することで、最大応答を抑制し、建物の倒壊危険性を大幅に低下させる効果が確認できた。本手法は木造住宅の安全性を向上させるだけでなく、壁配置の自由度を高め、さらには安全性の高い中層木造建物の実現にも寄与できるものと考えられる。

発表論文(2024年5月時点)

- 1) 竹塚駿也、迫野玲、山本菜生、小澤雄樹:鋼製ロッキング柱を利用した木造建物の縮小モデルを用いた 振動実験 その1 試験体と実験の概要、日本建築学会学術講演梗概集、2024年8月
- 2) 迫野玲、竹塚駿也、山本菜生、小澤雄樹:鋼製ロッキング柱を利用した木造建物の縮小モデルを用いた 振動実験 その1 試験体と実験の概要、日本建築学会学術講演梗概集、2024 年 8 月
- 3) 山本菜生、竹塚駿也、迫野玲、小澤雄樹:鋼製ロッキング柱を利用した木造建物の縮小モデルを用いた 振動実験 その3 考察とロッキング柱の性能評価、日本建築学会学術講演梗概集、2024年8月

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

以下が今後の課題として挙げられる。

- ・今回は1年と限られた研究期間のため、解析結果と実験結果を比較するまでには至らなかった。 現在、倒壊解析ソフトウェア wallstat を用いて解析モデルを作成中であり、今後比較検討を行っていく。
- ・今後、実験パラメータを増やしより広範なモデルについて検討を進める必要がある。
- ・本実験では整形な建物かつ1方向のみ加振を行ったが、今後、偏心等を有するより一般的な建物を対象に検討を進めることが望ましい。
- ・中層建物への適用可能性についても今後、wallstatを用いたシミュレーションを実施予定である。可能であれば中層モデルについても実験的な検討を進めていく。