

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 15 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350468

研究課題名(和文) 木造建築物の余震による倒壊危険性予知に関する安全技術の研究

研究課題名(英文) Study of safety technology concerning collapse prediction of wooden structure by aftershock

研究代表者

高梨 成次 (Takanashi, Seiji)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・建設安全研究グループ・部長代理

研究者番号：60358421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：木造建築物が地震によって損傷を受けた場合、補修工事や解体工事が必要になる。工事中の余震により、建築物が倒壊することによる二次災害の危険性が懸念されている。それを実験と解析で明らかにした。さらに、余震によって倒壊する危険性が高い建物の特徴を外壁の損傷状態から推定する方法を模索した。外壁はサイディングとモルタルの2種類とした。サイディングに関しては、サイディングを固定している釘を起点としたひび割れやサイディングのずれ量から推定できることを示した。モルタルに関しては、開口部周辺のひび割れの幅で評価できることを示した。それは、特別な知識を有しなくても判断ができるほど簡便かつ客観的な指標である。

研究成果の概要(英文)：If wooden buildings are damaged by the earthquake, repair work and demolition work will be necessary. Due to the aftershocks under construction, there is concern about the risk of secondary disasters due to the collapse of buildings. This was clarified by experimental tests and analysis. In addition, we sought a method to estimate the characteristics of buildings with high risk of collapse due to aftershocks based on the damaged state of the outer wall. Two types of outer walls, siding and mortar, were prepared. Regarding siding, it was shown that the degree of damage can be estimated by the crack width around the nail fixing the siding or the sliding amount of the siding. For mortar, it was shown that the degree of damage can be evaluated by the width of the crack around the opening. It is a simple and objective indicator that can be judged without having special knowledge.

研究分野：建築構造(耐震設計)

キーワード：耐震 地震 自然災害 シミュレーション工学

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、旧基準で設計、施工された木造建築物が、東日本大震災後のように震度階5を超えるような大きな余震が複数回発生することによって、本震で受けた損傷が進行し、倒壊する危険性が高いことを示してきた。同時に、余震によって損傷が進行しやすい建物は、本震によって既に最大耐力を発揮した建物であることを示した。さらに、そのことを客観的に判断できる評価手法を確立してきた。しかしながら、同様の知見が最新の設計及び施工技術で建てられた木造建築物においても適応が可能であるのか否かが不明であったため、それらを工学的に調べたいという背景・動機があった。

### 2. 研究の目的

大規模な地震によって、倒壊は免れたものの、一定以上の損傷を受けた木造建築物には、復旧工事あるいは解体工事が必要となる。一般に、これらの工事は緊急性が求められることが多いため、安全性の確認が十分にされる前に工事が着手されることがある。しかしながら、これらの工事中に、東北地方太平洋沖地震時に観測されたように震度階5以上の余震が多数回発生すると当該建築物の損傷は進行して、最終的には倒壊するなどの被害が発生する。このことによって、改修工事等に従事している作業者が2次災害に巻き込まれることが懸念されている。そこで、現在懸念されているような余震による倒壊が、現行の基準で建てられた木造建築物においても起こる可能性があるのかを実験および解析的に調べることを目的とする。

さらに、余震によって倒壊する危険性が高い建物とそうでない建物の仕分けを行うための資料を得ることを目的とする。具体的には、震災後の混乱時においても建築物の外部から目視によって確認することができる外壁やアルミサッシ等の建具の損傷状況から当該建築物の余震に対する倒壊危険性の判定基準を作成することを目的とする。前述した通り、この判定を行うのは震災直後の混乱時であることを考慮し、建築に対する特別な知識を必要とせず、建築学に精通していない者でも容易かつ客観的にできる判定基準となることとした。

### 3. 研究の方法

研究の対象とした建築物は、現行の基準で設計・施工された木造建築物とした。それらの構造的な特性を知るために、従来から行われている純静的な正負漸増繰り返し加力方法による実験を行った。また、同時に本研究では、同建築物の外壁の損傷状況を詳細に把

握することを目的としている。そこで、実験で使用した試験体の外壁を、最も一般的であると考えられるサイディング仕上げとモルタル仕上げの2種類とした。

純正の実験の具体的な目的は、地震応答解析を行うための解析モデルを構築するための荷重と変形の間係数を得ることとした。同時に試験体の耐力と損傷状況の関係を調査することとした。特に、最大耐力を発揮する前後の損傷状況の違いを調べることに注力することにした。

同実験で得られた解析モデルを基に地震応答解析用のモデルを構築し、地震応答解析を実施し、どのような地震特性(直下型地震、海洋型地震、長周期地震等)のどのレベル地震(震度階での評価、最大加速度あるいは最大速度での評価)によって、余震によって損傷が進行する危険性が高いかを検討した。

最後に、解析結果の確からしさを確認する目的で仮動的実験を実施した。同時に規則的に破壊された場合とランダムな振幅履歴によって破壊された場合の損傷過程を逐一観察した。

### 4. 研究成果

実験で使用した試験体のプロトタイプは木造2階建て住宅とし、その1階部分の一部分を取り出した物とした。試験体の外観図を写真1に示す。試験体の寸法は幅約3.6m、高さ約2.7mの壁体とした。

図1に外壁をサイディングとした場合の試験体軸組図兼構造用合板割付図を示す。柱と土台は構造用集成材同一等級105mm×105mmとした。桁は構造用集成材対称異等級スプルー105mm×180mmとした。間柱、窓まぐさ、窓台はスギ30mm×105mmとした。柱と土台の仕口は短柄差しとし、N90を2本平行打ちとした。構造用合板の割付を、図1中に破線で示した。構造用合板は、厚

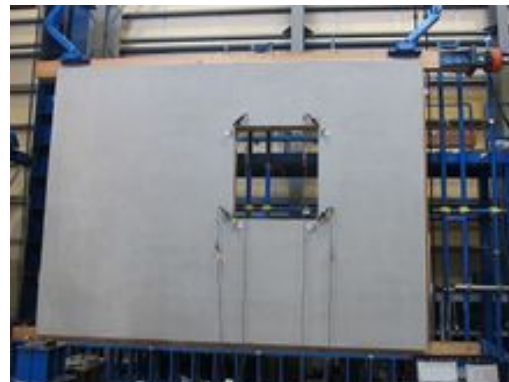


写真1 試験体（モルタル外壁）

さ 9mm として N90 釘を 150mm ピッチで柱、土台、桁および間柱に留め付けた。本試験体は、通気工法仕様としたため、たて胴縁を 455mm 間隔で設置した。たて胴縁は 18mm × 45mm のスギとした。外壁の仕上げはサイディング(JIS 品)とした。サイディングの厚さは 16mm、寸法 455mm × 3030mm とした。サイディング割付図、釘の設置位置図兼固定金具設置位置図を図 2 に示す。サイディングの固定方法は 2 種類とした。一方は胴径 2.3mm、長さ 50mm のステンレスリングネイルで固定した。図 2 に釘の設置位置を丸印で示す。以降、本試験体を釘留め試験体と称す。他方は、専用の金物で固定した。図 2 に固定金物の設置位置を四角印で示す。以降、本試験体を金物留め試験体と称す。

以下に、最大耐力発揮時の損傷状況を示す。釘留め試験体に関しては、釘の拔出し量に着目したが、釘の拔出し量は微小であり、本数も少なかった。これは、試験体の仕様が現在では主流である通気工法であるため、外壁と構造体の一体性が低かったことによるものと考えられる。本試験体の最大耐力は、正側では変形角 +33 × 10<sup>-3</sup>rad. 時に、負側では -20 × 10<sup>-3</sup>rad. 時に発揮した。それらよりも大きく、剛性低下領域にある変形角 1/20 を経験した後であっても、引き抜け量が 1mm に達した釘は 1 本のみであ

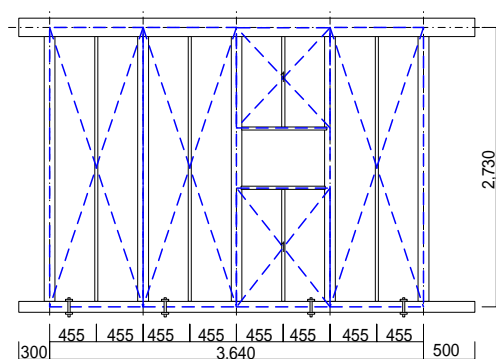


図 1 試験体軸組図兼構造用合板割付図

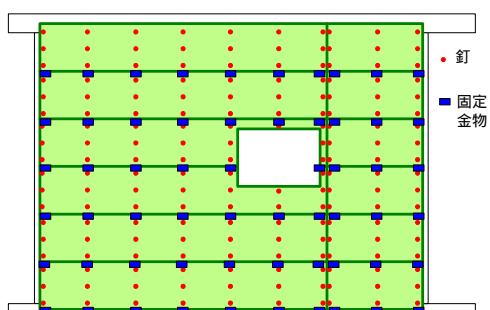


図 2 サイディング割付図、釘設置位置

り既往の研究結果と比べて非常に少なかった。これより、釘の抜け出し状況から最大耐力発揮経験の有無を推定することは困難であることが分かった。

釘の抜け出しの他、サイディングの損傷として、釘を起点としたサイディングのひび割れが 2 箇所確認された。これらは最大耐力を発揮する以前に観測されたが、安全側の評価として、釘を起点としたひび割れが確認されたら、当該建築物は既に最大耐力を発揮する変形角を経験したと評価することができると思われることにした。

金物留め試験体では、開口部周辺のひび割れ幅をクラックゲージによって測定した。また、サイディング間の水平相対ズレ量の計測を行った結果から、安全側の評価をすれば、開口部周辺で 0.45mm 以上のひび割れ幅あるいは 12.5mm 以上のズレ量を確認したら、当該建築物は既に最大耐力を発揮しており、剛性低下の領域にあるものと考えられる。そのため、それらの損傷を確認したら当該建物への近接、侵入は避けるべきであると思われる。

次いで、外壁をモルタルとした試験体においても同様の実験を行った。試験体の軸組図を図 1 で示した通りである。外壁工法は通気工法と非通気工法の 2 種類で検討した。両試験体を用いて仮動的実験を実施した。仮動的実験に用いた地震波は兵庫県南部地震(1995 年)の NS 成分とした。初震の入力レベルは、予備解析により、通気あり試験体および通気なし試験体それぞれが、最大耐力を発揮する変形角に到達する大きさとした。その結果、通気あり試験体に対しては観測波の 100%、通気なし試験体に対しては観測波の 60% の大きさとした。以降、初震を 1 波目と称す。後震はそれぞれの初震の 80% の大きさとした。後震はそれぞれ 2 回入力した。以降、各後震を 2 波目、3 波目と称す。

通気あり試験体を用いた実験で入力した地震波の時刻歴波形を図 3 に示す。図 4 に通気あり試験体の応答変形角の時刻歴波形を示す。1 波目(本震)後に、それより小さな余震(2 波目、3 波目)が入力される度に変形角が大きくなっていく様子が分かる。これは、1 波目が入力された時に試験体が既に最大耐力を発揮したことに原因がある。図 5 に通気あり試験体の荷重と変形角の関係を示す。写真 1 に示したように、試験体には窓を模して開口部を設けた。

実験中、開口部の 4 隅に発生したひび割れ幅を計測した。通気あり試験体の変形角とひび割れ幅の関係を図 6 に示す。ひび割れ幅と試験体の変形角の関係は概ね比例関係にあることが分かるが、1 波目の入力終了した時点のひび割れ幅を図 6 中に丸で囲んで示し

た。4本のひび割れの幅は1mm~2mmの範囲に収まった。そのため安全側の判断として、1波目(本震)後に残留ひび割れ幅1mmを見つけたのであれば、当該木造建築物は既に最大耐力を發揮しており、本震の80%程度の大きさの余震によって倒壊する危険性が高いと判断できると結論付けることにした。

図7に通気なし試験体の荷重と変形角の関係を示す。最大耐力は通気あり試験体に対して著しく小さいが、通気あり試験体を用いた実験と同様に、1波目の80%の大きさの2波目、3波目の入力によって変形角が大きくなっていることが分かる。

図8に通気あり試験体の変形角とひび割れ幅の関係を示す。同図より通気あり試験体の結果と概ね同様の結果が得られていることが分かる。このことより、通気の有無にかかわらず本震が終了した後に残留ひび割れ幅1

mmを確認したら、当該木造建築物は既に最大耐力を發揮しており、余震により倒壊する危険性が高いと判断することができることが分かった。

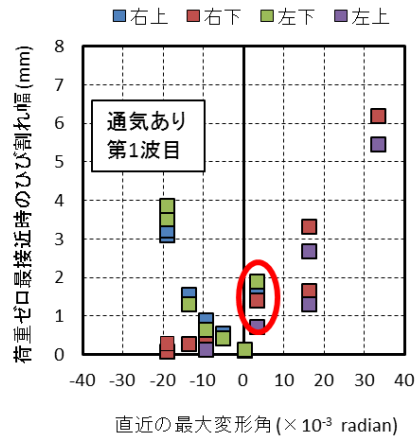


図6 ひび割れ幅と変形角の関係 (通気あり)

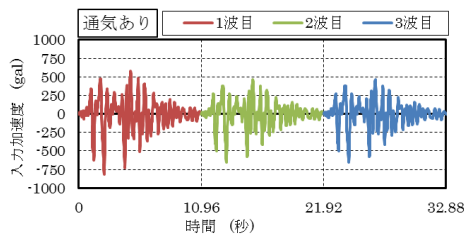


図3 入力地震波の時刻歴波形

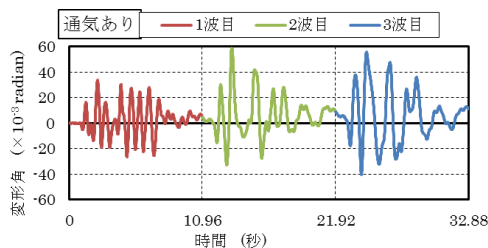


図4 応答変形角の時刻歴波形

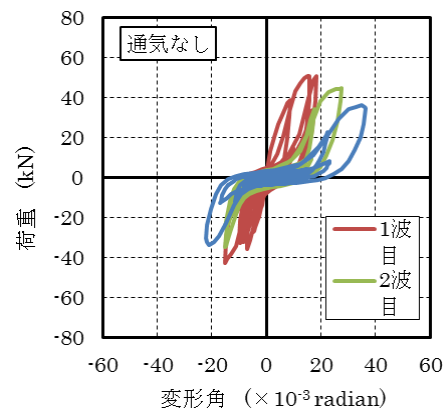


図7 荷重と変形角の関係(通気なし)

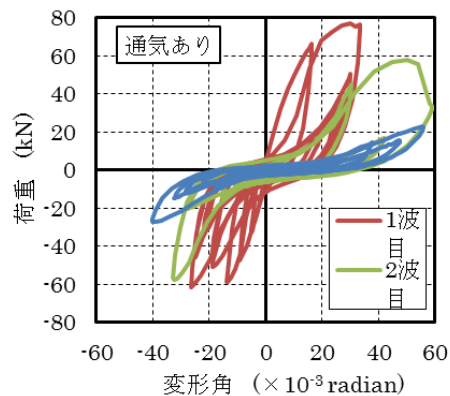


図5 荷重と変形角の関係(通気あり)

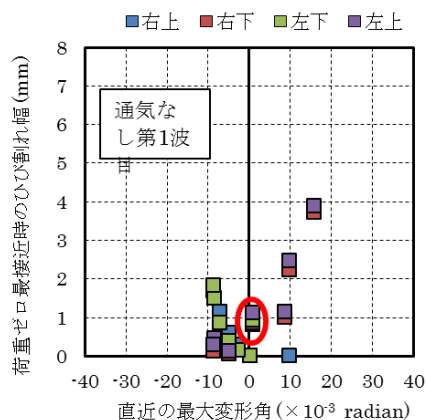


図8 ひび割れ幅と変形角の関係 (通気なし)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

— 高梨成次、大幢勝利、高橋弘樹、旧基準で建てられた木造住宅の残余水平耐力と損傷状況に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読あり、Vol.80, No712、2015年、pp.895-904

[学会発表](計7件)

土屋江利佳、旧基準で建てられた木造住宅の倒壊に対する安全限界の研究(その22 試験体および仮動的実験の概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)構造、591-592、H26年9月12日、神戸大学(兵庫県神戸市)

高梨成次、旧基準で建てられた木造住宅の倒壊に対する安全限界の研究(その23 仮動的実験による余震による変形量の増大の検証)、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)構造、593-594、H26年9月12日、神戸大学(兵庫県神戸市)

高梨成次、大幢勝利、高橋弘樹、旧基準で建てられた木造住宅の外壁の損傷状況と最大耐力発揮経験有無の関係、日本建築学会関東支部2014年度研究報告会、CD-ROM、H27年2月27日、日本大学(東京都千代田区)

高梨成次、大幢勝利、高橋弘樹、木造住宅のサイディング外壁の損傷状況と残余水平耐力の関係に関する研究、安全工学シンポジウム2015、講演予稿集、pp.386-389、H27年7月3日、日本学術会議(東京都港区)

土屋江利佳、木造住宅の損傷状況と倒壊危険性に関する研究(その1 実験概要および力学的特性)、平成27年度日本建築学会全国大会、pp.233-234、CD-ROM、H27年9月5日、倒壊大学(神奈川県平塚市)

高梨成次、木造住宅の損傷状況と倒壊危険性に関する研究(その2 外壁がサイディングの場合の損傷状況の評価)、平成27年度日本建築学会全国大会、pp.235-236、CD-ROM、H27年9月5日、倒壊大学(神奈川県平塚市)

Seiji Takanashi、Katsutoshi Ohdo、Hiroki Takahashi、STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN DAMAGE AND RESIDUAL STRENGTH OF WOODEN HOUSE BUILT ACCORDING TO JAPANESE OLD STANDARD、査読あり、World Conference on Timber Engineering 2016 CD-ROM、2016年8月24日、ウィーン(オーストリア)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

高梨 成次 (TAKANASHI, Seiji)  
(独)労働安全衛生総合研究所  
建設安全研究グループ 部長代理  
研究者番号: 60358421

### (2)研究分担者

高橋 弘樹 (TAKAHASHI, Hiroki)  
(独)労働安全衛生総合研究所  
建設安全研究グループ 上席研究員  
研究者番号: 90342617

### (3)連携研究者

大幢 勝利 (OHDO, Katsutoshi)  
(独)労働安全衛生総合研究所  
研究推進・国際センター センター長  
研究者番号: 50358420

### (4)研究協力者

道場 信義 (MICHIBA, Nobuyoshi)  
ハウスプラス確認検査(株)  
評定部 主任研究員

### (5)研究協力者

坂槇 義夫 (SAKAMAKI, Yoshio)  
ハウスプラス住宅保証(株)  
常務取締役

### (6)研究協力者

大橋 好光 (OHASHI, Yoshimitsu)  
東京都市大学 工学部建築学科 教授