

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350473

研究課題名(和文)地震被害を受けた木造住宅の復旧可能性と復旧作業安全性判定のための実験解析

研究課題名(英文) Structural performance tests of timber frames and earthquake response analyses investigating recoverability of timber houses after a severe earthquake and safety of recovery work

研究代表者

津村 浩三 (Tsumura, Kozo)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30145669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は地震動により被害を受けて傾いた木造住宅について、その復旧可能性判定のための材料を整備するためのものである。基本的な木造軸組について、大変形にいたる倒壊実験により確かめ、ばね特性を調べた。調べたばね特性を参考にして既往の木造住宅実大振動台実験の結果を基にばね特性を定式化し、地震被災シミュレーションプログラムにその特性を組み込み、顕著な地震の本震と余震に対し種々の強度の住宅の倒壊可能性について調べた。その結果、検討した多数のケースのうち本震により4°程度傾いても、余震で倒壊するケースは少なかった。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate recoverability of timber houses after a severe earthquake, structural performance tests of timber frames and earthquake response analyses were conducted. Several types of strengthened frames and recovered frames were loaded until they lay down on the basement to obtain their structural characteristics, and based on the data the earthquake response analysis program was fixed. On the program various types of strengthened timber house models were attacked by several famous earthquakes and their aftershocks. As a result, if remain story drift angle due to main shocks were less than 4 degrees, then most of the models were not collapsed by aftershocks.

研究分野：建築構造学

キーワード：地震 災害 木造住宅 復旧 作業安全性 余震

1. 研究開始当初の背景

地震の被災地では、地震後数度から数十度傾いたまま、立っている木造住宅がしばしば見受けられる(住宅ではないが写真1参照のこと)。数度以上傾くと、解体されることが多いようであるが、木材の粘り強さを考えると、数十度傾いても、傾きをもどして使用することが可能な場合が多々あると思われる。

一方、木造建物の耐震設計上目安とされる層間変形角(建物のある階の床に対する上の階の傾き)は $1/120\text{rad}$ (0.5°) である。また、軸組や部材、接合部等の実験はこれまで多数行われてきたが、そのほとんどは層間変形角や部材角等(まとめて θ で表す)にして $\theta = 1/10\text{rad}$ (6°) までの加力実験である。層間変形角で考えると、倒壊の判定基準を $\theta = 90^\circ$ ($1/2\text{rad}$) とすれば、 θ の取り得る範囲は $0 \sim 90^\circ$ (負の場合は省略) とすることができる。つまり、建物において $\theta = 0.5^\circ \sim 90^\circ$ の範囲は設計上ほとんど使われておらず、 $\theta = 6^\circ \sim 90^\circ$ の範囲は実験的に未知の領域であると言える。従って、地震後被害を受けた住宅にどの程度の余力があるか、判断するのに有用なデータは、ほとんどないといつてよい。

復旧に関しては、被災の程度をランク付けするための指針が提案されており、被害の程度を表すのに調査者の評価のばらつきを抑えるのに役立っている。しかし、そのランクは余震あるいは大きな地震に対する安全性とどのような関係にあるのかについては必ずしも定量的に分かっているわけではない。

2. 研究の目的

本研究は地震動により被害を受けて傾いた木造住宅について、その傾きをもどして補修または補強をおこない、再使用することができるかどうか、また、安全に復旧作業が行えるのかについての判断材料を整備するためのものである。木造軸組の復元力特性(ばね特性)について大変形にいたる実験により確かめ、地震被災シミュレーションプログラムにその特性を組み込み、余震や種々のケース地震による被災シミュレーション結果から、どのような構造の住宅で、どの程度の傾きであれば、どの程度安全であるかについて目安となる値を提出する。

3. 研究の方法

前章で述べた目的を達するためにここでは次に示すように(1)実験と(2)計算機によるシミュレーションの2つを行った。

(1)実験

木造住宅が地震でどの程度傾くのかを計算機によって推定できるようにするためには、木造住宅が地震によって水平力を受けたときの抵抗の特性(復元力特性とよぶ)を把握する必要がある。これについて、水平力が一つの方向に限られる場合についての特



写真1 地震後傾いたまま立っている土蔵



写真2 木造軸組の実験例、大きく傾いている状態

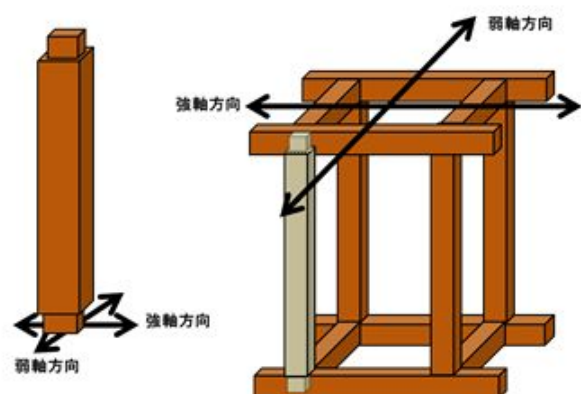


図1 軸組における水平2方向(強軸、弱軸)の概念

性については、多数のデータがあるが、二つの方向から働く水平力の影響についての研究はなされていない。そこで、図1のような

試験体を作り、一方向のみ水平力が加わった時に比べて、別の方向に経験した傾きがどの程度影響を受けるか、別方向の経験した傾きを5°、10°、20°と変えて実験を行い、その影響について調べる実験を行った。

写真2は実験により傾いた試験体を示している。

試験体、材料、加力方法および測定方法

試験体は図1に示すように4本の柱を使用したもので、2列に並んだ門型軸組を梁でつないだ構造である。この試験体上部をチェーンブロックで引張り、倒壊させて実験を行った。同図には水平2方向を表す矢印を示した。柱のほぞの長手方向を強軸方向、それに直交する水平方向を弱軸方向と表示した。柱端は長ほぞとし、水平材との接合はL字型金物を用いた。金物は軸組中心から遠い側の柱側面に取り付けた。軸組を構成する部材には、スプルー集成材105mm角を使用した。

加力点と左右支点間の水平距離は3500mmである。使用する支点を正加力時負加力時で左右入れ替えることにより繰り返し加力を加えた。基本的な加力履歴は層間変形角がそれぞれ0.4°(1/120rad)、1.4°(1/40rad)、5°レベル、20°レベルで2回ずつ正負加力を行い、最後に正方向に倒壊させるというものである。試験体は同じ仕様のもを2シリーズ分10体製作した。

最初のシリーズは強軸方向の耐力(最大転倒モーメント)に対する弱軸方向の最大経験層間変形角(異なる軸で受けたダメージの大きさを表す)の影響を調べるためのものである。ここで強軸シリーズと呼ぶ。

2回目のシリーズは弱軸方向をメインにして見るものでここでは弱軸シリーズと呼ぶ。弱軸シリーズのNo.1は弱軸方向に、No.5には強軸方向に基本的な加力履歴を加えた。No.2からNo.4は強軸方向加力履歴が加えられることによって弱軸方向の復元力特性にどのような影響が与えられるのかを見るためのもので、強軸方向の加力履歴を基本的な加力履歴のうちどこまで行うかを変えたものである。No.2は5°レベルの2回目つまり6サイクルまで、No.3は基本的な加力履歴の20°レベルを10°に変更して2回目の8サイクルまで、No.4は基本的な加力の20°の2回目つまり8サイクルまで強軸方向に加力した後、0°まで戻した後、弱軸方向に基本的な加力履歴を加えた。なお、加力中に柱が抜けるなどして著しく復元力を失った場合には加力中の方向に倒壊させた。また、強軸シリーズは弱軸シリーズの加力履歴において強軸と弱軸を入れ替えたものである。

実験結果

図2には、強軸シリーズ実験から得られた各試験体の強軸方向における層間変形角と転倒モーメントの関係例を示す。弱軸5°までを経験したものの、10°までを経験したものの、20°までを経験したものを強軸のみを経験したものと結果を比較している。やはり、直

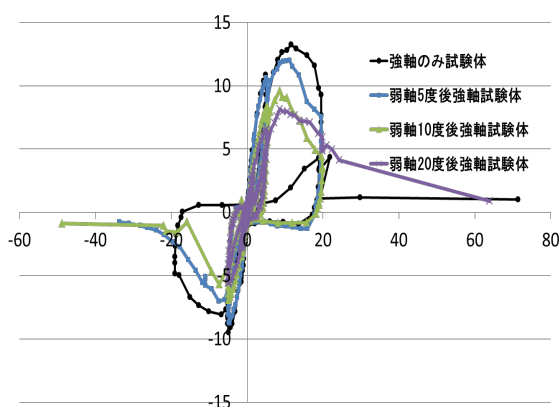


図2 強軸シリーズ実験における弱軸方向層間変形角と転倒モーメントの実験結果例(強軸のみに加力した実験と弱軸5°、10°、20°を経験した後に強軸方向に倒壊するまで加力した実験結果を比較した)

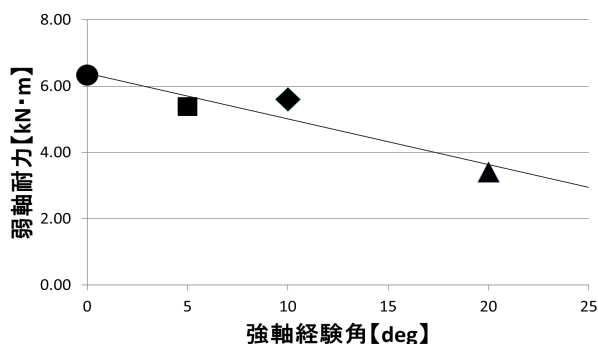


図3 強軸経験角と弱軸耐力の関係

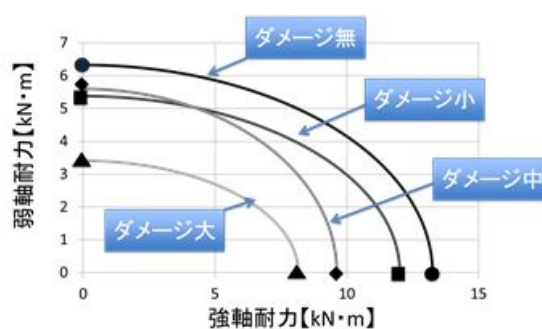


図4 強軸経験角と弱軸耐力の関係

交方向(この場合は弱軸)で経験した変形角が大きい方が大きく最大耐力が低下していることがわかる。

図3は弱軸シリーズの結果を示したもので、強軸方向で経験した最大の層間変形角(強軸経験角と呼ぶ)と弱軸耐力の関係を示したものである。横軸の5°と10°の時点で傾向が逆転しているものの、同図中に示した

回帰直線を見ると右肩下がりの傾向が明らかである。

強軸シリーズの実験結果と弱軸シリーズの実験結果を総合的に示したものが図4である。図中グラフの上下方向が弱軸方向、左右方向が強軸方向である。ダメージ無しと示されているのが当該方向の軸上に黒丸印でプロットされたものである。各軸上のシンボルは図3のシンボルと対応しており、各シンボル試験体の直交方向経験角は図3の横軸の角度と対応している。縦軸上と横軸上で対応する（つまり直交方向経験角が同じ）実験結果は鉄筋コンクリート柱等の耐力曲面を意識して楕円で結んだが、この形状については実験等による確認が必要である。とは言え何らかの形状の境界線が存在するはずであり、その境界線が、変形空間上の経験位置に応じて縮退する様子が見えてくる。

結論

実験により、木造軸組における復元力特性の多軸相関が認められた。特に、変形空間上の経験位置に応じて耐力局面が縮退する様子が見えてきた。

(2) 計算機によるシミュレーション

本研究では、本震と余震のペアとなる地震動データを複数用いて倒壊に至るまでの追跡が可能な地震応答解析を行ったものである。研究計画では、種々のケースの補強について行った実験に基づくばね特性（復元力特性）を用いてシミュレーションを行う予定であったが、住宅建築すべての復元力特性を代表できる実験結果が得られなかった。そこで、近年さかんに行われた実大振動台実験結果を次のように利用することとした。

植本(2006)、室星(2005)、伊藤(2005)、田中(1997)、綿引(2006)が行った6つの木造実大振動実験結果とそこで使用された木造試験体から6つの復元力モデルを作成した。ここでは、プログラムの適応性を改善するため、最大強度が正側と負側で約1.5倍も違う室星の実験の結果を取り除き、復元力モデルごとに繰り返し荷重時におけるエネルギー吸収能を変化させて適応性を高めた。5つの実験結果とプログラムでの解析結果を比較したところ、倒壊の有無は一致していた。また平均誤差率が0.146だったことからプログラムは適用可能と判断した。

次に余震の影響を調べるためのパラメトリック解析を行った。各復元力モデルのベースシア係数を変動させることで、実験結果から得た復元力モデルを比例的に変化させ、様々な建物を表現した(計70戸の建物に相当)。地震動データは、平成12年鳥取県西部地震、平成13年芸予地震、平成15年十勝沖地震、平成16年新潟県中越地震、平成19年能登半島地震、平成19年新潟県中越沖地震、平成20年岩手・宮城内陸地震、平成23年東北地方太平洋沖地震の本震と余震の地動加速度をつなげた8つのデータを使用した。こ

れらを拡張個別要素法に基づいた応答解析プログラムに入力し、各復元力モデルによる応答結果を得た。

解析結果として、本震で倒壊せず余震で倒壊した復元力モデルは新潟県中越地震での2モデル、能登半島地震での1モデル、東北地方太平洋沖地震での4モデルだった。余震で倒壊しなかった最大値は、新潟県中越地震の場合で最大変形4.76°、残留変形4.28°だった。能登半島地震の場合で最大変形6.47°、残留変形6.24°だった。しかし、東北地方太平洋沖地震の場合は最大変形2.12°、残留変形1.12°でも倒壊した。

表1 シミュレーションに使用した本震

地震	観測点コード	観測点地名
平成12年 鳥取県西部地震	TTRH02	鳥取県日野郡日野町
平成13年 芸予地震	HRS009	広島県広島市佐伯区湯来
平成15年 十勝沖地震	HKD100	北海道広尾郡広尾町
平成16年 新潟県中越地震	NIG019	新潟県小千谷市
平成19年 能登半島地震	ISK005	石川県鳳珠郡穴水町
平成19年 新潟県中越沖地震	NIG018	新潟県柏崎市
平成20年 岩手・宮城内陸地震	AKTH04	秋田県雄勝郡東成瀬村
平成23年 東北地方太平洋沖地震	IWT010	岩手県一関市

本震の地動データと余震の地動データを連続して入力

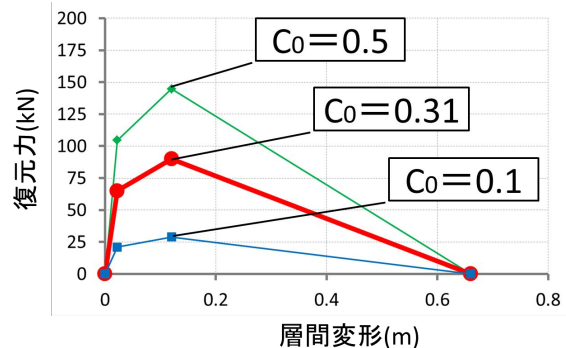
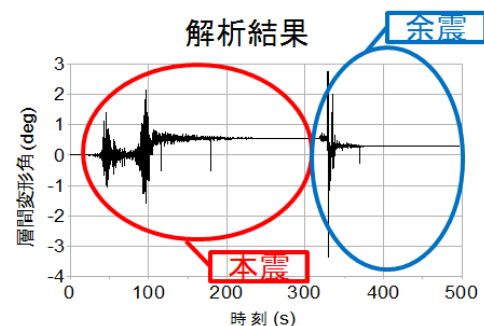


図5 実大振動実験から求めた復元力特性 ($C_0=0.31$)の倒壊可能性検討用の復元力特性の例 ($C_0=0.1, 0.5$)



東北地方太平洋沖地震層間変形角時刻歴 筋かい壁12枚モデル

図6 本震と余震を組み合わせた事前シミュレーション例、本震により0.5°ほど傾きが残り、余震で最大3°程度まで倒れた後、0.3°程度傾きが残った

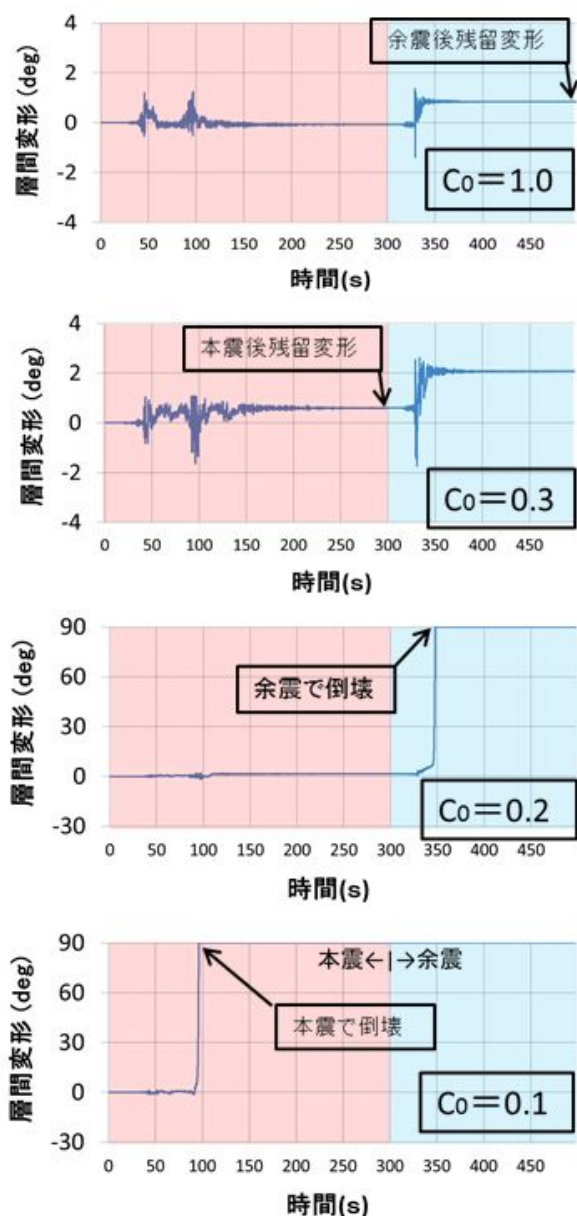


図7 シミュレーション結果の例、図中の C_0 は建物の強さに対応する。大きいほど強く小さいほど弱い。

4. 研究成果

(1)本震による残留変形(傾き)が1°程度でも余震で倒壊したケースが得られたため残留変形4°で安全であるとは言い切れないが、本震で4°程傾いていても、余震で倒壊するケースは少ないという結果が得られた。

なお、本研究では実際の運用に適用できるほどの統計的に十分なシミュレーション結果が得られたとはいいがたいが、近年整備された地震動の観測網により強い地震動に関するデータが蓄積されれば、同様の手法により統計的な評価が可能になるものと思われる。

(2) 本研究の基礎となる分野における成果として、木造軸組の実験により木造軸組の水

平2方向(例えば東西方向と南北方向)における復元力特性(地震に対する抵抗力の指標となるばね特性)が方向ごとに独立ではないことが確認された。この性質は鉄筋コンクリート柱などの部材レベルでは確認されているが、木造部材や木造軸組、鉄筋コンクリート構造物を含めて構造物全体で確認されたことは今まで無いと思われる。

<引用文献>

植本敬大ほか：実大三次元震動台を活用した既存木造住宅の耐震性向上に関する研究(その1)、第12回日本地震工学シンポジウム論文集、2006年11月、pp.1086-1089.

室星啓和ほか：実大木造住宅の振動台実験手法に関する研究(その5)、大会梗概集、C-1、2005年9月、pp.9-10.

伊藤嘉則ほか：実大木造住宅の振動台実験手法に関する研究(その8)、大会梗概集、C-1、2005年9月、pp.15-16.

田中裕樹ほか：JR 鷹取波加振による軸組構法木造住宅の実大振動実験(その3)、大会梗概集、C-1、1997年9月、pp.157-158.

綿引誠ほか：実物大建物振動台実験に基づく木造軸組構法住宅の耐震性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.599、2006年1月、pp.103-110.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計3件)

津村浩三：木造軸組の地震被災後の使用可能性に関する大変形加力実験(その6 水平2方向加力実験)、日本建築学会学術講演梗概集掲載決定、構造1、No.20143、2016年、C-1分冊、2016.8.24(福岡大学)発表予定

津村浩三：木造軸組の地震被災後の使用可能性に関する大変形加力実験(その5 水平2方向加力実験)、日本建築学会学術講演梗概集、構造、No.20119、2015年、C-1分冊、p.237-238、2015.9.4発表(東海大学湘南キャンパス)

津村浩三：地震により被災した木造住宅が余震により倒壊する可能性に関する大変形地震応答解析、日本建築学会学術講演梗概集、No.22065、p.129-130、発表日、2014.9.13(神戸大学)発表

6. 研究組織

(1)研究代表者

津村 浩三(TSUMURA KOZO)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30145669