

平成 2009 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19780140  
 研究課題名（和文） 地震時の木造住宅の倒壊過程シミュレーション手法の開発  
 研究課題名（英文） Development of Collapsing Process Simulation Method of Timber Frame Structures under Large Earthquakes  
 研究代表者  
 中川 貴文（NAKAGAWA TAKAFUMI）  
 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ 研究員  
 研究者番号：60414968

研究成果の概要：本研究では地震時の木造軸組躯体の動的挙動及び、倒壊過程を、接合部、部材レベルの構成要素の実験データを入力するだけでシミュレーションできる計算機プログラムの開発を行った。また、振動台実験結果との比較を行い、解析プログラムの精度の検証を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	270,000	2,270,000

研究分野：木質構造

科研費の分科・細目：林産科学・木質工学→木質科学

キーワード：木造住宅、地震時応答解析、個別要素法、数値解析、振動台実験

## 1. 研究開始当初の背景

近年の大規模な地震による既存木造住宅の大きな被害により、木造住宅の耐震性能が注目されるようになった。研究においても震動台を用いた木造住宅の実大実験が行われるようになり、住宅全体の耐震性能評価が行われるようになって来ている。一方で、実大実験はコストが大きい為、多くの仕様を実験することは困難であり、地震時の動的応答挙動を計算機シミュレーションで予測する手法の確立が試みられている。しかし、木造住宅の耐震性に関する従来のシミュレーション手法では、住宅の仕様に応じた強度パラメータを構成単位に設定し、時刻歴応答解析等によって層間変形や最大耐力を予測するとい

うものがほとんどで、建物全体が大きく変形し、損傷、倒壊するまでを解析した例は、国内外を問わず少ない。地震時の木造住宅の倒壊現象では、部材強度、施工精度のばらつきや、損傷の順序の違いなどがあるため、倒壊までをシミュレーションすることは非常に困難であり、たとえ予測できたとしても、それは数多い倒壊パターンの一例に過ぎないと言える。一つのシミュレーション結果を提示するよりも、強度分布を考慮したパラメータを用いて、損傷や倒壊を確率的に示すほうが実用的であると考えられる。

研究代表者はこれまでの研究で、倒壊シミュレーション手法を独自に開発し（後述）、その手法を用いて数種類の木造住宅モデル

に対してシミュレーションを実施することにより、開発した手法が木造住宅の倒壊シミュレーションに適用可能であることを明らかにした。本研究ではそのシミュレーション手法の精度を高め、様々な仕様の木造住宅に適用させようという研究である。

## 2. 研究の目的

本研究では地震時の木造軸組躯体の動的応答及び、倒壊過程を、接合部、部材レベルの構成要素の実験データを入力するだけでシミュレーションできる計算機手法の確立、プログラムの開発を目的としている。また同じ設計プランの住宅に対して何通りものシミュレーションモデルを作成し、それぞれに対してシミュレーションを行い、結果を分類することで、任意の設計プランの住宅の倒壊可能性や、各部材の損傷可能性を定量的に明示できる手法の提案を目指す。具体的に本研究期間内では、不完全な耐震補強を実施した接合部の躯体全体の構造性能に与える影響、外装材の有無が構造躯体へ影響を精度良く予測できる計算機プログラムの開発を行う。またシミュレーションのパラメータを得るために接合部の強度試験、構面の要素実験を実施する。

本研究課題で開発するシミュレーション法は、土木やコンクリートの分野で主に用いられている拡張個別要素法（以下 EDEM）を基本理論としており、木造住宅に適用したのは本研究が初の試みであるため学術的にも独創性の高い研究テーマと言える。

EDEM は非連続体解析手法であり、他の連続体解析法（例えば FEM など）よりも容易にモデルの構築を行うことが出来る。これまでの研究で開発したシミュレーション手法では、図に示したように例えば一本の釘接合部の挙動、部材の曲げ、筋かいの座屈等の詳細な破壊過程現象まで追えるようにモデル化を行っている。図のような木造住宅モデルでは自由度が 20,000 を超えるが、EDEM であれば上記理由から容易にモデル構築が可能であり、実用の計算時間内でシミュレーションを実施することが出来る。他のシミュレーション手法ではこの自由度レベルの計算は非常に困難である。また木造住宅全体を釘一本からシミュレーションモデル化した研究例は国内外を問わず他にみられない。本研究では、強度分布を持った何通りものシミュレーションモデルの解析結果から損傷や倒壊を確率的に示すという試みであるため、木造住宅の耐震性評価ツールとして実用性は高いと考える。研究目的が達成されれば、木造住宅の地震時の損傷、倒壊確率を具体的に示し、耐震補強の必要性を明らかにできるため、地震被害軽減のボトルネックとなっている既存木造住宅の耐震補強の普及率が向

上することも予想される。

## 3. 研究の方法

### (1) 解析理論

建築物の時刻歴応答解析にはマトリックス法に代表される有限要素法（Finite Element Method：以下 FEM）を用いた数値計算が一般的に用いられている。破壊までを解析的に追跡するためには、幾何学非線形、材料非線形を考慮する必要があり、汎用の計算ソフトを用いる場合でも、研究用に自作したプログラムでも、相当の計算テクニックを要する。特に部材の破断（木材の折損）、亀裂の進展といった極端に破壊が進行する場合には、計算の中で不釣り合い力をどう処理するかという問題が生じる。

これらの問題を解決し、倒壊までを追跡できる解析手法を確立するために、研究代表者らは個別要素法（Distinct Element Method：以下 DEM）を基本理論として採用した木造住宅の倒壊解析プログラムの開発を行った。DEM は、図 1 に示したような岩盤の崩壊を計算する為に開発された「非連続体解析法（バラバラな物体の挙動を計算する手法）」であり、大変形・倒壊解析を自然に行うことが可能である。しかし建築分野で DEM を用いた研究例はほとんど無く、研究代表者らはこれまでの研究で、DEM を建築物の応答・倒壊解析手法として用いるために様々な研究開発を行ってきた。

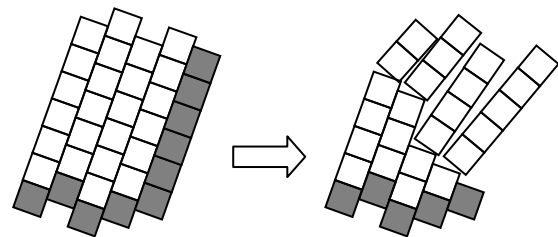


図 1 岩盤の崩壊シミュレーション

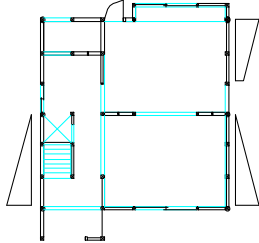
以下に、木造住宅の震動台実験を解析対象として行った研究成果について示す。

## 4. 研究成果

### (1) 解析対象木造住宅

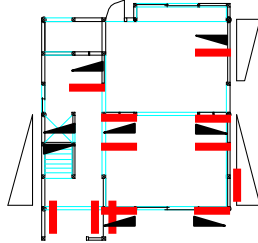
解析対象の木造住宅は、図 2 に示した通り、E-ディフェンス震動台実験で用いられた試験体 2 棟（A 棟、B 棟）で、兵庫県明石市で実在した築 31 年の木造軸組構法 2 階建て住宅である。2 つの木造住宅の平面プランはほぼ同じで、片方（B 棟）に耐震補強を施した。耐震診断（精密診断）による評点は A 棟が 0.5 であり、B 棟は補強後 1.8 となった。

A棟(無補強)



1階 平面図

B棟(補強)



■ 合板による補強  
 ▲ 筋かいによる補強  
 ※2階も一部補強

図2 解析対象試験体

(3) 解析モデル概要

図3に示したように軸組は塑性ヒンジ+弾性梁要素でモデル化を行い、使用された木材の各樹種に対して、事前に行った強度調査や文献値から弾性係数、曲げ強度を設定した。既存の壁、耐震補強で増設した耐力壁は、トラス要素によるブレース置換でモデル化した。水平構面、屋根面は壁と同様にトラス要素でモデル化を行った。

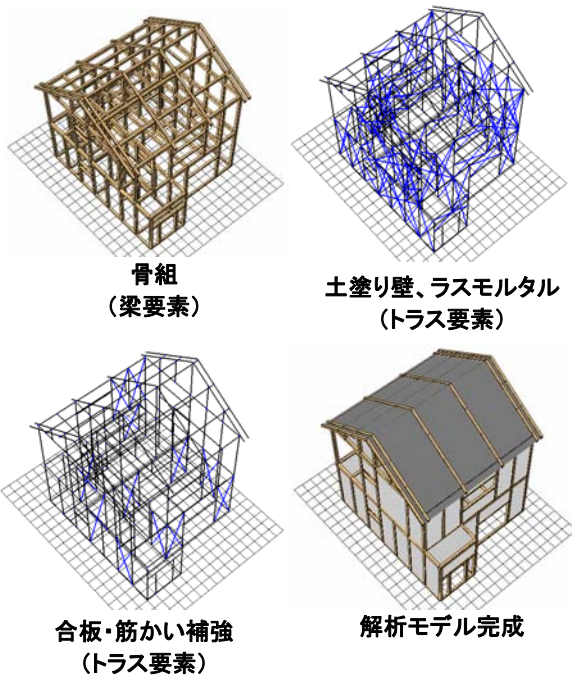


図3 解析モデルの概要

(4) 軸組

軸組は図3に示したような塑性回転バネ+弾性梁要素でモデル化を行った。履歴特性は鉄骨部材に用いられる加藤・秋山履歴則を用いた。曲げ強度を40 N/mm<sup>2</sup>として断面係数に従い最大曲げモーメントを設定した。ヤング係数は6.5 kN/mm<sup>2</sup>とした。通し柱は断面欠損を考慮し、断面係数を全断面の75%とした。

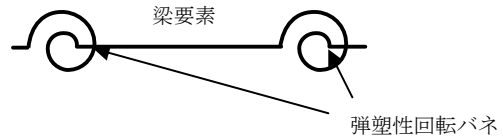
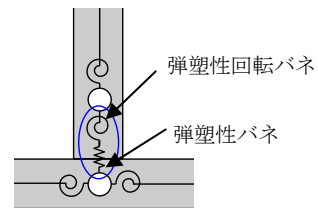


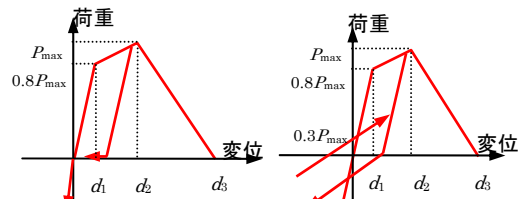
図4 軸組の概念図

(5) 部材・接合部のモデル化

接合部は法線方向バネと、回転バネでモデル化し、各接合部の引張試験・モーメント抵抗試験の荷重変形関係を近似して、骨格曲線を決定した。



接合部のバネ



接合部(左)、耐力壁(右)の履歴特性

図5 接合部バネの骨格曲線と履歴特性

耐力壁の履歴特性はバイリニア+スリップ型を採用し、骨格曲線は壁単体の要素実験の結果から決定した。

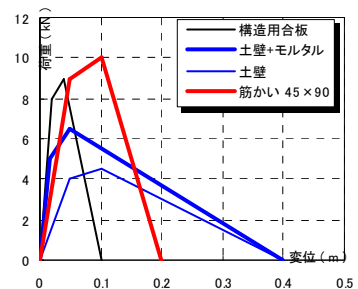


図6 耐力壁の骨格曲線と履歴特性

(6) 解析結果

解析モデルに入力した地震波は、震動台実験と同じく 1995 年兵庫県南部地震において JR 鷹取駅で観測された波形である。図 7 に解析結果の 1 階桁行方向層間変位を震動台実験結果と比較して示した。解析の応答変位は実験とよく一致していることが分かる。図 8 にシミュレーションと震動台実験の倒壊過程を示した。無補強の A 棟が倒壊にいたる過程、補強した B 棟の振動性状を本解析手法で再現可能であることがわかった。

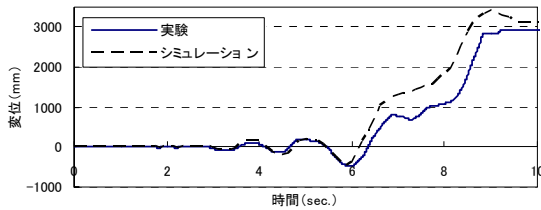


図 7 1F 桁行方向層間変位の比較

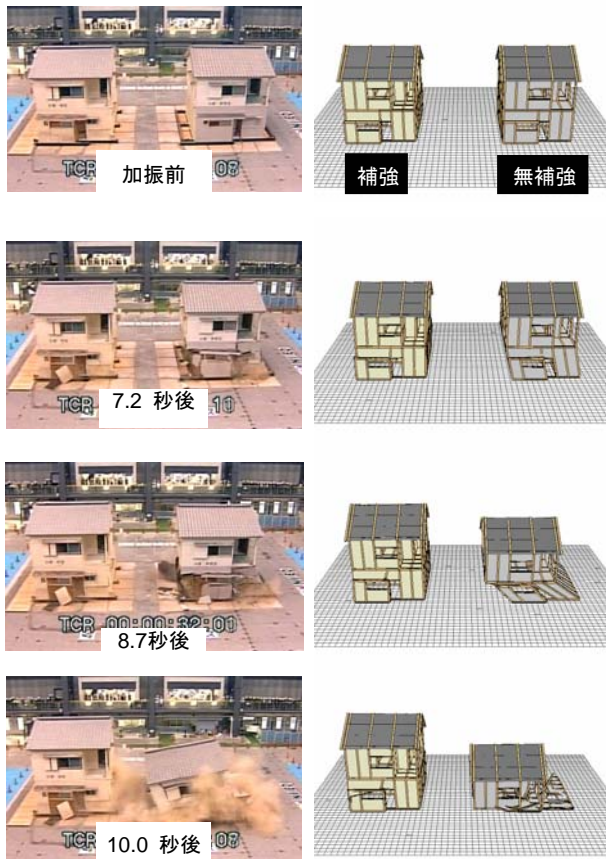


図 8 解析と実験結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① T. Nakagawa, N. Kawai, T. Tsuchimoto, M. Ohta, "Collapsing Process Simulations of Wooden Houses by the Extended Distinct Element Method", 10th World Conference on Timber Structures, Miyazaki, p.282(CD に 6P の論文), (2008)
- ② 中川貴文、河合直人、槌本敬大、太田正光 : 「動的負荷を受ける木質構造物の破壊過程シミュレーション(7)-既存木造住宅の振動台実験の解析-」日本木材学会大会研究発表要旨集(つくば), p.43(CD に 2P の論文), 2008
- ③ 中川貴文、河合直人、槌本敬大、太田正光 : 「震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験 その 26 拡張個別要素法による倒壊シミュレーション」日本建築学会学術講演梗概集,C-1, pp.489-490, 2007

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等:なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 貴文 (NAKAGAWA TAKAFUMI)

独立行政法人建築研究所

材料研究グループ 研究員

研究者番号 : 60414968