

揺らしてわかる！木造住宅の耐震性能

中川 貴文^{1*}

Seismic performance of wooden houses clarified by shaking table tests and numerical simulations

Takafumi Nakagawa^{1*}

概要

「最近の木造住宅はどの程度の地震に耐えられるか？」家をお持ちの方や購入を検討されている方には非常に興味があるテーマだと思います。阪神淡路大震災以降、実物大の木造住宅を巨大な実験装置の上に再現して揺らし、直接耐震性能を確認する「振動台実験」が数多く行われてきました。また、実大振動台実験をコンピュータ上で再現するシミュレーション手法が開発され、住宅会社等での導入が進み、揺らして耐震性能を確認することが身近になってきています。木造住宅の耐震性能確保の仕組みと、生存圏研究所が無償公開している耐震シミュレーションソフトについて解説します。

1. 地震と木造住宅

日本は3つのプレートの境界に位置していることもあり、古くから何度も地震被害を受けていた歴史がある。写真1は建物の被害が大きかった代表的な地震であるが、どの地震でも耐震性の低い木造住宅が倒壊し多くの命が失われた。記憶にあたらしい所では1995年兵庫県南部地震での死者は6000人を超え、多くが木造住宅の倒壊による圧死と言われている。このような歴史の中で、1950年の福井地震の頃から木造住宅の地震被害の調査が学者によって行われた。この調査から同じ重量だとすると壁の多い建物ほど被害が少ないという傾向が出ている。すなわち壁を入れると耐震性が向上するということである。

日本の耐震基準である建築基準法では、この壁を「耐力壁」と呼んでいる。耐力壁の量が多いほど耐震性が高い建物ということになり、耐震基準では、安全性確保のための耐力壁の最低の量、必要壁量が決められている。必要壁量は地震被害調査の結果を受けて度々見直され、1981年に改正された建築基準法（新耐震基準と呼ばれる）の必要壁量が現在も使われている。2000年には木材を連結する「接合部」の基準や基礎の基準も見直され、現在に至っている。



1923 関東大震災



1948 福井地震



1995 阪神淡路大震災



2016 熊本地震

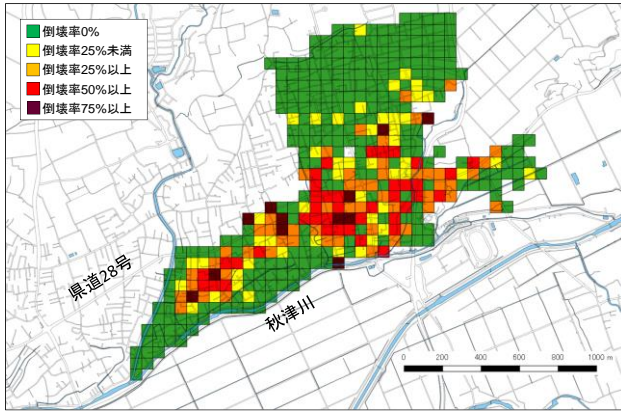
写真1 木造住宅の被害が大きかった地震

2023年9月14日受理

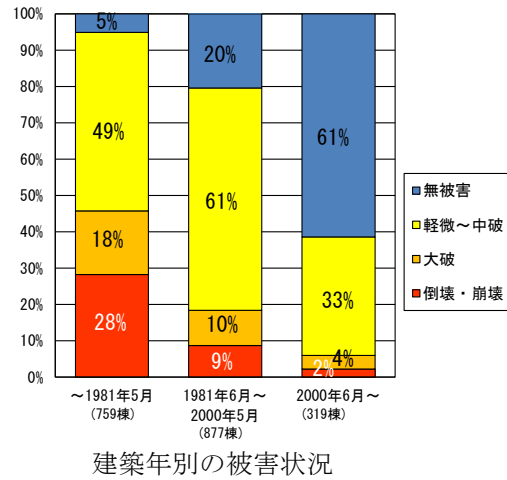
¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生活圏木質構造科学分野

* E-mail: nakagawa@rish.kyoto-u.ac.jp

2016年熊本地震では益城町中心部で観測史上初、震度7が2度記録された。旧耐震の木造住宅の多くが倒壊し、新耐震基準で建てられたの木造住宅でも100棟以上の倒壊が確認されている。しかし、2000年以降に建設された木造住宅の倒壊の割合は2%程度であったという調査結果がある(図1)。記録された地震動は相当大きいものであったので、壁量計算が巨大地震でも倒壊しないことを規定する役割を十分果たしたと言える。



益城町中心部での倒壊率の分布



建築年別の被害状況

図1 2016年熊本地震における木造住宅の被害¹⁾

2. 振動台実験 ~究極の耐震性能検証法~

「最近の木造住宅はどの程度の地震に耐えられるか？」そのような疑問に直接回答できる方法がある。人工的に地震動を発生させることができる実験装置「振動台」である。振動台では巨大な鉄のテーブルを何本もの油圧ジャッキで動かし、過去に発生した地震の揺れを再現することができる。木造住宅は鉄筋コンクリート造などに比べると重量が軽いので、振動台実験の上に実物大で建設して、大きな揺れを発生させることができる。日本には阪神淡路大震災以降、多くの振動台実験施設が建造されてきたが、震災から10年後の2005年に世界最大の振動台「E-ディフェンス」¹⁾が建造された。E-ディフェンスは世界中で発生した地震の波形を再現して、建物が完全に倒壊するまで揺らすことができる。



地震動入力前



地震動入力後

写真2 実大振動台実験の様子(E-ディフェンスにて撮影)

3. 倒壊しない住宅から住み続けられる住宅へ

E-ディフェンスなどの振動台を活用して、木造住宅の耐震性検証が行われ、性能向上が図られてきた。図1ではその成果が現在の木造住宅に反映されているともみられるが、熊本地震の2年後に同実施された調査結果²⁾(図2)では2000年以降に建設された木造住宅の約20%が更地になっているか、立て替えられていることが分かった。二つの調査結果が示していることは、倒壊しない耐震性能は壁量計算で担保できたが、住み続けることができないほどダメージを受けた木造住宅が多く存在していたということである。

熊本地震で記録されたような地震動でも住み続けられる耐震性能とはどのようなものか? 振動台で揺らせば答えが明確にわかるが、1回揺らすだけでも膨大な費用がかかってしまうし、建物を建てる度に揺らすことは不可能である。

こんな疑問に明確に回答できる解決策がある。京都大学生存圏研究所がWEB上で無償公開している耐震シミュレーションソフト wallstat (ウォールスタット) である。

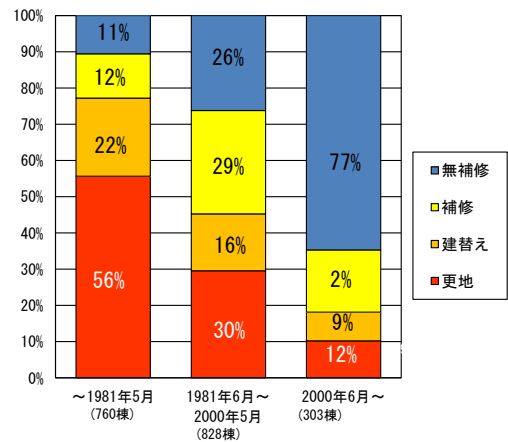


図2 熊本地震から2年後の状況³⁾

4. 耐震シミュレーションソフト「wallstat」

このソフトでは建てる前の木造住宅や、耐震改修を検討している既存木造住宅に振動台実験と同じようにあらゆる地震動を入れて揺らして、計算結果をアニメーションで見ることができる。耐震性が足りないと、振動台と同じくリアルに倒壊する。図3に示した通り動画から建物の弱点等も知ることができる。

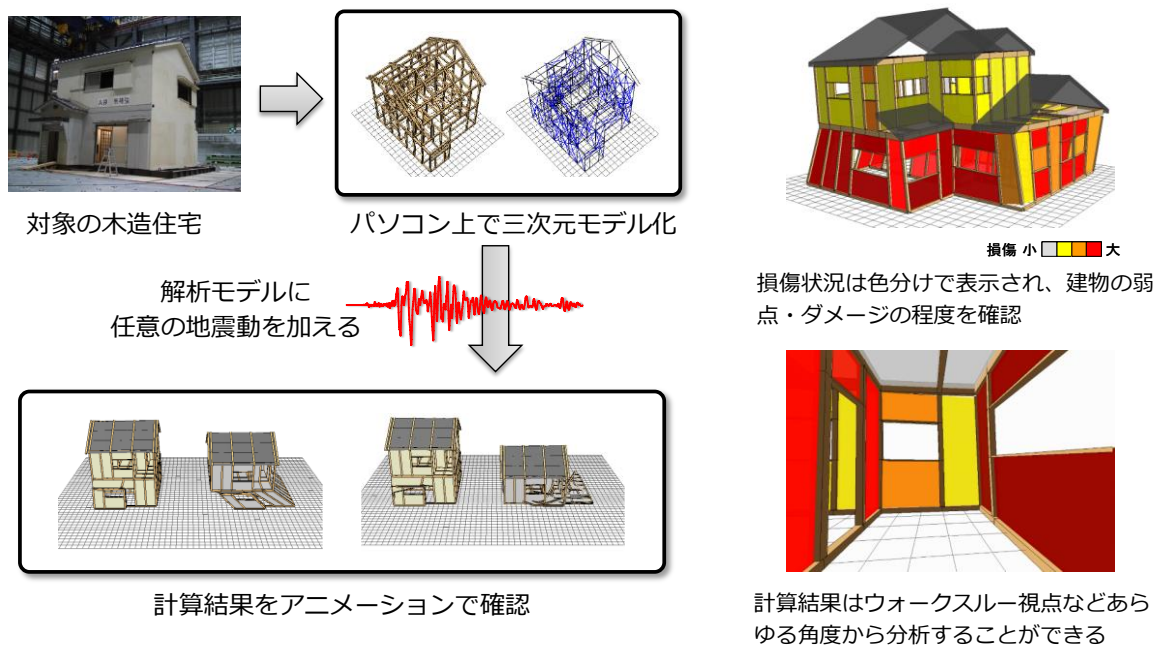


図3 耐震シミュレーションソフト「ウォールスタット」の概要

超高層ビルと同じ「時刻歴応答解析」と呼ばれる高度な計算法を行うソフトであるが、従来の計算手法では困難だった「完全に倒壊する」までを独自の計算理論³⁾で可能となっている。

wallstat は先ほど紹介した実大振動台実験との比較・検証を重ねて改良を続けてきたため、実験に裏付けられたリアルな計算が可能となっている。小規模な住宅会社や工務店にはコスト面で実現が難しかった実大振動台実験がこのソフトにより身近になってきている。耐震性能の目に見える証明につながるため、wallstat を実務で導入する取り組みが工務店・設計事務所等で増えつつある。wallstat はウィンドウズのソフトで簡単な操作でモデル化することができ、図面があれば画面を見ながら木造住宅の解析モデルを作成し、変形の大きさ、損傷状況、倒壊の有無等の解析結果をアニメーションによって確認することができる。数値解析の専門知識が無くても実際に目で見て地震時の木造住宅の応答挙動や、耐震性能を確認できるため、高校生や大学生の教育用ツールとしても使われている。wallstat は誰でも無料でダウンロード可能で、youtube で操作方法を詳しく学ぶこともできるので、興味のある方はぜひ使っていただきたい。

ダウンロード URL : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~nakagawa>
 wallstat の使い方 : <https://www.youtube.com/c/wallstatchannel>



図 4 は過去に行われた実大振動台実験の映像と、wallstat による計算結果を比較した動画のスナップショットである。振動台実験は同じ平面・立面プランで壁の強さや接合部の強さを変えた試験体で、耐震設計法の検証のために実施されたものである。振動台実験で確認された倒壊過程が wallstat のシミュレーションによって精度よく再現されていることがわかる。図 5 は 5 階建ての CLT パネル工法（木材を板状に加工した材料で構成する構法）と五重塔の解析モデルであるが、振動台実験で揺らすことが難しい建物もシミュレーションでは揺らしてみることが実現する。

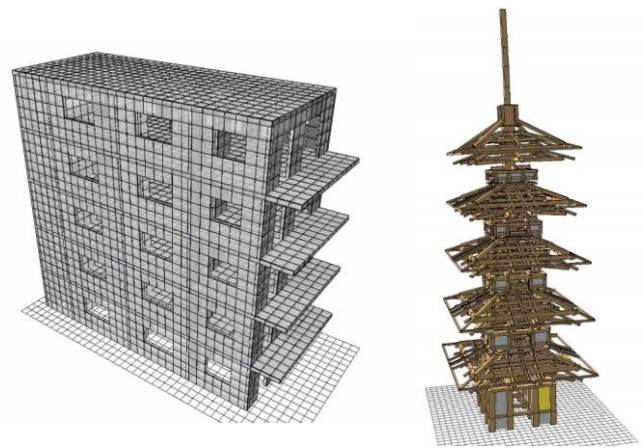
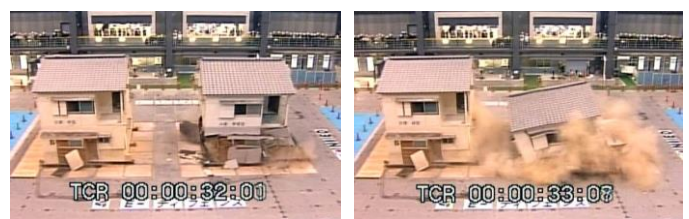


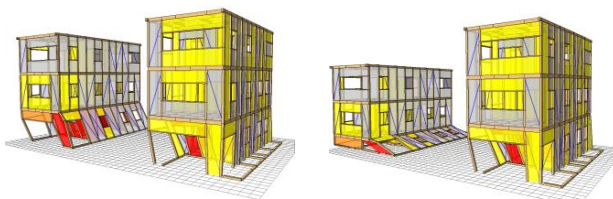
図 5 wallstat の解析モデル（CLT パネル工法、五重塔）



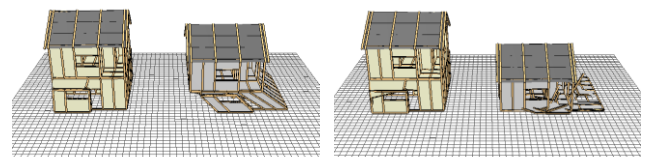
3 階建て実大木造住宅の振動台実験



2 階建て実大木造住宅の振動台実験



wallstat の計算結果



wallstat の計算結果

図 4 実大振動台実験と wallstat の計算結果の比較映像

5. 耐震性能の見える化の取り組み

wallstat は 2010 年からインターネットで公開を開始したが、現在（2022 年）まで、図 6 に示した通り、5 万件以上のダウンロードを記録している。これまでユーザーの要望を取り入れて、バージョンアップを重ねてきたが、実務者の利用が急速に増えたのが、CAD（キャド）連携機能の追加である。木造住宅を設計する際には、建築士がパソコンを活用して三次元的な図面を作成する。その設計のためのソフトを CAD（Computer Aided Design）ソフトと呼ぶが、wallstat は日本で販売されているほとんどの CAD ソフトとデータ連携する機能を持っていて、建築士が作成した図面情報があれば、ボタンひとつで簡単にシミュレーション用の解析モデルを作成することができる。特に木造住宅を構成する木材を建設時に機会加工（プレカット）するための設計図はプレカット図面と呼ばれているが、現在、木造軸組構法のプレカットの利用率が 90%を超えていて、ほとんどの木造住宅が生産時の情報を活用して wallstat のシミュレーションを簡単に実行できる状況にある。

著者が代表である一般社団法人耐震性能見える化協会⁴⁾では、wallstat の技術者の認定を行っている（2022 年の登録者数：470 人）。住宅の購入を検討している消費者が、耐震シミュレーションで購入予定の自宅を揺らしてみたいと思えば、近所の認定技術者に相談できる体制も整いつつある。住宅会社の中には、施工する木造住宅全棟を事前に wallstat で揺らしてみしてから耐震性能をチェックして販売する会社も増えてきている。今後もこのような取り組みが増えて、耐震性能のさらなる向上につながることに期待したい。

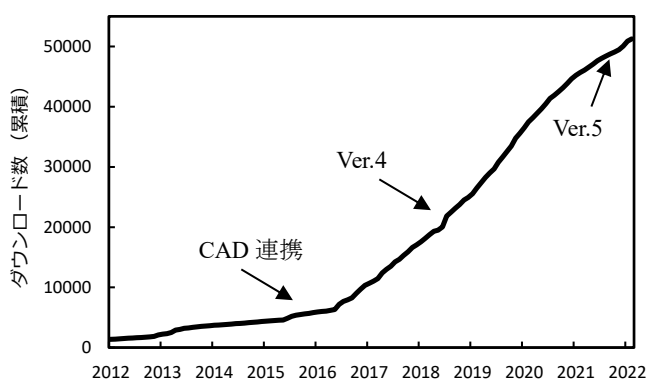


図 6 wallstat のダウンロード数の推移

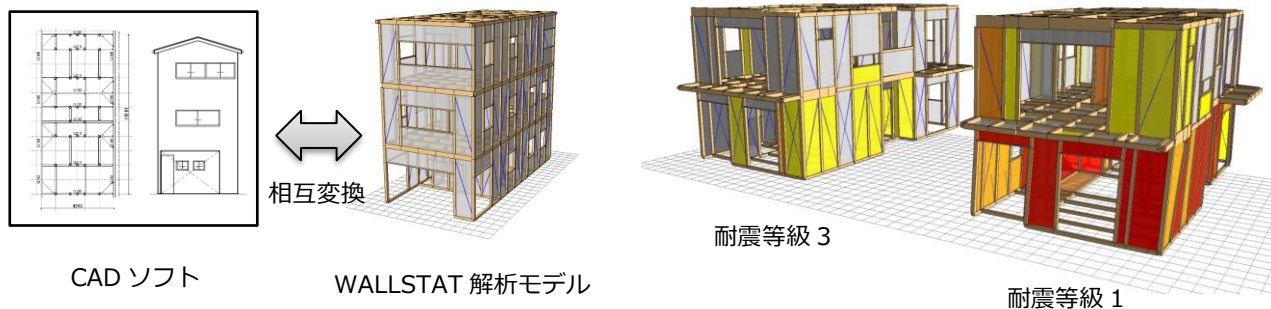


図 7 耐震等級の比較シミュレーション

3. おわりに

壁量計算では倒壊しない基準を定めているが、巨大地震でも住み続けられる性能までは規定していない。熊本地震で記録されたような地震動でも住み続けられる耐震性能とはどのようなものか？ wallstat を使えば明確に回答できる。wallstat を用いた耐震基準+アルファの見える化が普及し、耐震等級の取得や施主が求める耐震性能の実現に繋がることを目指して、今後も研究開発と普及活動を継続していきたい。

参考文献

- 1) 熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会報告書
- 2) 角田ほか「2016 年熊本地震から2 年経過した益城町市街地の被災建物の現況調査」日本地震工学会論文, 2019, 第19巻1号, pp.21-33
- 3) 中川貴文：「大地震動時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発」建築研究資料, 第128号
- 4) 一般社団法人耐震性能見える化協会HP <https://www.wallstat.jp/>

著者プロフィール



中川 貴文 (Takafumi Nakagawa)

<略歴> 1998 年東京大学農学部卒業 / 2003 年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了 / 民間企業を経て 2005 年～国土交通省国土技術政策総合研究所・(国研) 建築研究所 / 2018 年～現在 京大大学生存圏研究所准教授 / (一社) 耐震性能見える化協会 代表理事 / 博士 (農学)・博士 (工学) <主な研究> 巨大地震の際の被害軽減を目的とした木造の耐震研究、耐震化推進に資する教育・普及活動