

特集

木造建築の耐震研究 これまでとこれから

五十田博¹

Seismic Research for Wooden Construction Past and Future

Hiroshi ISODA¹

Abstract

Wooden houses were severely damaged in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. More than 90% of the approximately 6,400 fatalities were killed by wooden houses collapsed or were trapped under collapsed buildings and could not be evacuated. Ultimately, most of the victims lost their lives as a result of collapsed wooden houses.

Since then, casualties due to collapsed wooden houses have repeatedly occurred after extremely large earthquakes, such as the 2004 Niigata Chuetsu Earthquake, the 2016 Kumamoto Earthquake, and the 2024 Noto Peninsula Earthquake.

This paper outlines the causes of the continuing damage and the safety of newly constructed houses in relation to building standard laws and regulations. In addition, seismic research for wooden construction has recently shifted from low-rise housing to large-scale and high-rise buildings. A brief overview of this research is also explained.

キーワード：木造，耐震設計，建築基準法，性能設計，耐力壁

Key words: wooden construction, seismic design, Building Standard Law, performance-based design, shear wall

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において木造住宅は甚大な被害を受けた。死者約6,400名余りのうち9割以上の方が，木造住宅の倒壊，もしくは倒れた建物の下敷きになり避難できずに火災被害，つまり，

木造住宅の倒壊を原因として命を落とされた。その後も，2004年新潟県中越地震，2016年熊本地震，2024年能登半島地震など，極大地震が発生すると，木造住宅の倒壊による人的被害が繰り返されている。そして，それらの地震被害調査報告書では，

¹ 京大大学生存圏研究所
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto
University

被害原因を、基準に満たない壁の量（以下、壁量）、耐力壁周辺接合部の不十分さ、耐力壁の釣り合いなど構造計画の不適切さ、などと述べており、同じ原因による被害が繰り返されている。

さて、本論の目的は1995年兵庫県南部地震から30年の木造建築にかかわる学術研究の進展、耐震基準と耐震構造等の現状と今後について論じること、である。地震危険度の高い木造住宅に関する耐震研究については2012年の拙文「(総説) 木造住宅の性能指向型耐震設計に関する研究と経験工学の安全性」¹⁾(以下、総説)にて最新の研究状況を論じている。兵庫県南部地震に関連するものとしては日本建築学会パネルディスカッション「阪神・淡路大震災から20年」(以下、PD)において「耐震設計、耐震基準 ④木造」²⁾として20年の変化を論じた。本稿は20年から30年に至る木造建築の耐震に関する進展を執筆することである。そこで、ここ10年の木造の耐震研究を、日本建築学会構造系論文集で概観すると、伝統木造に関するもの³⁾など、免震、制振構造に関するもの⁴⁾など、ラーメン構造など接合部⁵⁾などを対象にしたもの、CLTなどマスティンバーを用いた大規模木造にかかわる研究⁶⁾など、混構造に関する研究⁷⁾などなどが代表的で、本稿で対象とするような2階建て程度の住宅の耐震研究のうち前述の免震、制振構造以外を探すと、設計法にかかわるもの^{8,9)}など、耐力壁の繰り返し挙動¹⁰⁾など、被災のみえる化¹¹⁾、補強にかかわるもの¹²⁾などはあるが、その数年前の研究に比べて多くない。これは2階建て程度の耐力壁を用いた構造は、ここ10年より前に設計法¹³⁾や耐震診断法¹⁴⁾が構築され、さらに地震時の被害を大きくしている原因はすでにわかっており、研究というより実践活動に重点が置かれているからと予想する。

ではここ10年前までに構築された設計法、評価法が、伝統木造や中高層木造関連の研究に影響を与え研究が変化したか、つまり、兵庫県南部地震を契機として木造に関わる耐震工学が発展し、伝統木造の研究の進展があった、あるいは高層木造建築が可能となった、というような話かというところではない。文化的価値の高い伝統木造を対象

に研究が進められ、二酸化炭素の吸収源、資源循環材料としての木材の有効利用の推進と関連して、中高層木造の研究がすすめられた、というのが実際である。

そこで本稿は兵庫県南部地震30年の特集と割り切り、ここ最近の10年に限らず、これまで書いた総説やPDで述べたことなども盛り込み全体を構成することとさせていただいた。なお、総説の結論は兵庫県南部地震の被害に関して、「控えめな外力と安全側の抵抗力、あいまいな設計法と評価法の微妙なバランスで、設計上要求している地震動よりも大きい1995年兵庫県南部地震に対して「結果オーライ」となった」と述べている。執筆より10年以上が経過しているが、現在の耐震設計もこの状況は変わっていない。

また、木造の耐震研究は、耐力壁や建物の性能評価の研究であり、その進展は確度の高い性能予測を可能とした。しかし、必要壁量が従前のままであるとその結果余力がなくなり、危険な建物が建設されることが危惧される。そのような折、省エネ等住宅の義務化のため、2025年4月より施行令の見直しがされ、簡易な計算である壁量計算も必要壁量は構造計算並みの精度で求める手法として整理がされる。これにより危惧も多少和らいだところである。ただいま現在建っている建物はいまの必要壁量を用いているわけであり、その問題点、そして今後のこと、を多少詳しく本原稿に残しておきたい。

さらに、木造住宅の耐震安全性については最新の研究成果を踏まえ設計が変化するというよりは法令や政策などと密接な関係にあるため、本稿では法令との関係で木造の安全性を論じている部分が多い。読者が建築分野の方でないピンとこないかもしれない。すでに必要壁量などと建築基準法やその関係法令(以下、法令)に関わった用語で書いているが、紙面の都合もあり、多少の解説を加える程度でご容赦いただきたい。

2. 再考：1995年兵庫県南部地震の象徴的な出来事

PDでは1995年の兵庫県南部地震が木造建築に

もたらした象徴的な出来事として以下の15項目をあげた。なお、この15項目は、私個人が考えた、というよりは日本建築学会構造委員会傘下の木質構造運営委員会で議論いただき、追加修正などしたうえで記述したものである（斜体は引用、以下同じ）。

- ①1981年の新耐震基準以前に建設された木造住宅が倒壊を含む壊滅的な被害を受けた。
- ②1981年以降の建築基準法施行令の仕様規定とその精神規定を遵守した木造住宅は大きな被害を受けたものもあったが倒壊までには至らなかった。
- ③木造住宅の耐震性に対する不信感が社会的な問題となった。特に瓦屋根の建物について耐震性に疑問が投げかけられた。新築建物については、その誤解を払拭するため、多くの実大振動台実験が実施された。
- ④面材耐力壁が増えた。
- ⑤木造住宅の許容応力度計算法の書籍が出版され、実務においても許容応力度計算が一般化した。
- ⑥木造の研究者が増えた。日本建築学会における木質構造での発表件数が増えた。
- ⑦制振住宅、免震住宅が増えた。
- ⑧文化庁の指針、実施要項により木造の文化財に対して耐震診断が実施されることが多くなった。
- ⑨耐震診断、耐震補強が盛んになった。
- ⑩多種多様な接合金物が開発され、市場に出回っている。
- ⑪鉄筋入りコンクリート基礎が増えた。
- ⑫耐震補強が必要な建物はいまだ各地に多数あり、大地震時に倒壊被害が懸念される。
- ⑬任意外力に対する建物の応答や各部の存在応力を求める計算法について研究が進展した。しかし、現象を把握しているだけで、設計行為に至っていない。（実験をして許容耐力を決めるが、破壊を防ぐための設計はなされない）
- ⑭保有水平耐力計算は実験なしには難しい。
- ⑮国産製材のJAS材はいまだ普及していない。
JASが要求される構造計算ルートの際には材料の入手が困難。

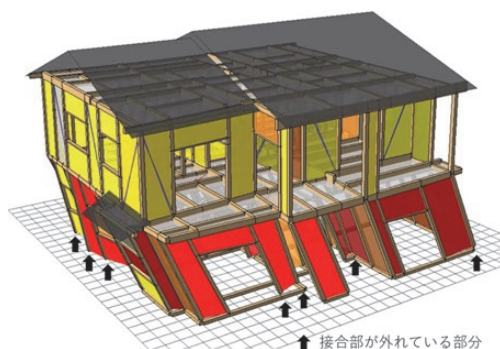


図1 耐力壁周辺接合部の引き抜けによる建物の倒壊

例えば②は具体的には「接合部は緊結すべし」と「壁の釣り合いの良い配置すべし」と書かれているが具体的な記述はなかった。例えば、図1に示すような耐力壁が浮き上がるような構造は法令では想定していないが実際にはそのような被害が多くみられた。接合部が緊結され壁が釣り合い良く配置されている建物には倒壊が少なかったという実態を踏まえ、2000年には、告示として接合の仕様と釣り合いの良い配置が明確化された。

PDから10年が経過した現在も特段の変化はない。あえて内容を多少付け足すとすれば、

⑨の耐震補強の効果は2024年能登半島地震で立証された。

⑫の懸念は現実的なものとなり、2016年熊本地震、2024年能登半島地震で旧耐震住宅に多くの被害が発生した。

といったところであろう。非住宅などで中高層建築に研究が移行している感があることは前述したとおりであるが、そのような状況にあっても⑭保有水平耐力計算、つまり終局状態を考えた設計には実験を伴い、⑮JAS材の普及、つまり規格材の利用は補助金等を出すなど状況が変わっているが、本格的利用にはもう少し時間がかかりそうである。

3. 結果オーライの耐震安全性

設計の耐震要素のみをモデル化し、観測地震動を入力波として時刻歴応答解析をすると、法令で

想定しているような安全限界変形を大きく上回り、予想外の大変形となる。木造の場合、建物自体が軽いので地盤と建物の相互作用による入力低減はほぼないと考えてよい。となると、法令の設計地震動が実地震動より小さいことになる。では現行基準を順守した住宅で倒壊がないという現象が起こっているのはなにゆえだろう。原因の主たるものは建物側の性能を安全側に評価していることによる。そのほかにも予想外の大変形となる要因はいくつかあり、それらについて総説では以下のように説明している(多少原文を修正)。

耐震設計は作用する地震外力と建物の抵抗力を比較し、「外力<抵抗力」をもって安全を確認する作業である。性能設計では外力、存在応力、抵抗力、変形量などがそれぞれ明示されるが、壁量計算とその関係告示ではそれらは不明で本来的に経験工学である。

木造住宅の主な設計法である壁量計算とその関連告示の内容を、実態と比較して、危険側の評価と安全側の評価にわけて示すと、

危険側：外力(地震動)、固定荷重、積雪荷重

安全側：積載荷重、耐力評価、安全限界

である。また、保有耐力接合や偏心計算が略算や

緩和規定として存在するが、耐力壁の種類や接合部との組み合わせによっては不十分な接合や配置になる。以上が現状の設計法であり、控えめな外力と安全側の抵抗力、あいまいな設計法と評価法の微妙なバランスで、設計上要求している地震動よりも大きい1995年兵庫県南部地震に対して「結果オーライ」となった。

図2は設計性能で求まる層の許容水平耐力と実大振動台実験の結果から算出されるそれを比較したものである¹⁵⁾。法令で評価可能な壁のみであれば実態性能は平均で2.26倍ある。垂れ壁、腰壁や上下空きのような準耐力壁を含むと平均1.96倍となるが、設計性能の2倍程度の実力がある。また、安全側と書いた積載荷重は、古い資料であるが実態は設計の平均値である600 N/m²である¹⁶⁾。ただし、積載物が固定されていないため約1/3程度まで地震力算定用重量が下がることがわかっている¹⁷⁾。これにより入力が多少小さくなっている。さらに建物側の性能は耐力のほかに変形能があるが、安全限界変形は一般には層間変形角で1/30、壁倍率の業務方法書などでは最大1/15までとってよいとしている。木造以外の構造からみると極めて大きな変形であろうが、実際の倒壊変形は1/3を超えてからということがわかっている¹⁸⁾。

図3に示すように現行の設計用地震動は観測地

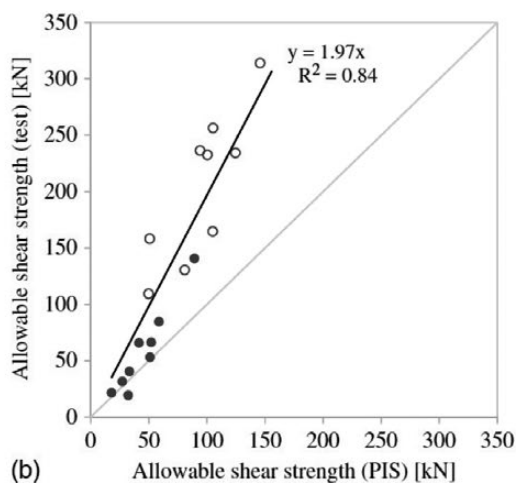
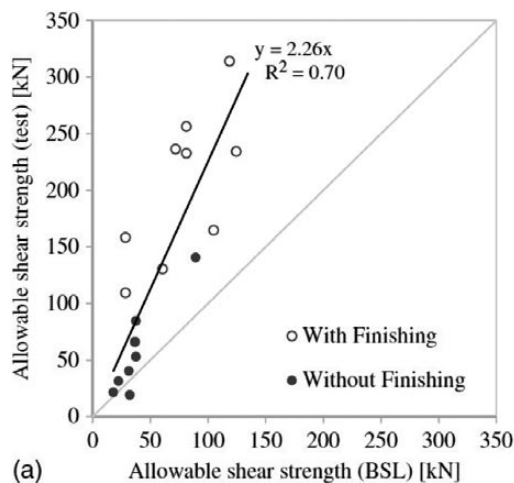


図2 層の許容せん断耐力 設計(横軸)と実大実験(縦軸)の比較

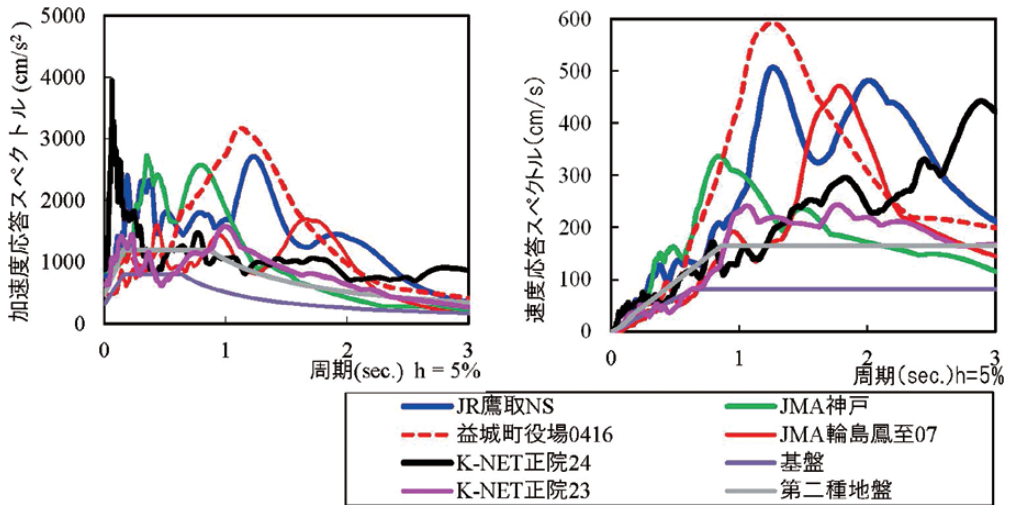


図3 地震動の応答スペクトル比較

震動と比べると非常に小さい。2階建て程度の木造住宅の周期は初期で0.2秒、変形が進んで倒壊近くなると1.0秒を超える。この範囲でもっとも建物の被害に直接的に影響すると考えられる速度入力を考えると法令の設計用地震動の2〜3倍程度である。前述した通り、2000年以降建てられている建物が倒壊をしない、「結果オーライ」となっているのは、積載荷重を大きく見積もって入力を安全側に見積もっていること、実際には設計上の耐力に対して平均で2倍を超える耐力があり、さらに倒壊までの余裕があることである。

最近の住宅は性能表示制度（以下、品確法）で耐震等級3の設計壁量が1.5倍とするなど耐震性能を高めているものが商材として用意されている。このような住宅では2016年熊本地震にあっても被害が軽微であることがわかっている¹⁹⁾。それを図4に示した。このように高性能化を図り、無被害住宅を目指した研究が民間企業を主に進められている。民間企業が主体であるため学術研究として表に出るものは限られているが、2024年能登半島地震で観測された地震動に対して耐震等級3であれば軽微な被害にとどまることも振動台実験で確認ができています。本実験は数か月前に終了したばかりであり今後報告を予定している。

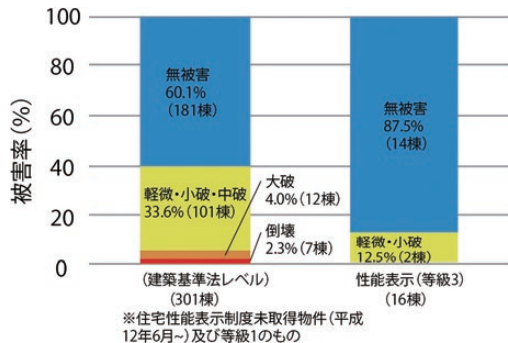


図4 耐震等級1と耐震等級3の被害の比較

4. 2016年熊本地震と2024年能登半島地震で分かったこと 同じ被害が繰り返される

残念ながら法令は既存建物まで訴求はされず、いわゆる既存不適格建築物が残ったままとなる。木造の現行基準は1995年兵庫県南部地震の木造建築物の甚大な被害を受けて、2000年に耐力壁周辺接合部、耐力壁の釣り合いの良い配置などを明確化したと前述した。この際、壁量の見直しは実施していない。このように基準の変遷による各部の必要性能の不足を示した資料が日本建築防災協会「木造住宅の耐震補強の実務—リフォームにあわせた耐震補強のすすめ」²⁰⁾で整理されており、そ

表1 着工時期による各部位の耐震性に関わる水準

着工時期	耐力壁量	耐力壁配置	軸組接合部	床・屋根の強さ	基礎
～1981年5月	C	B	C	B	C
1981年6月～2000年5月	A	B	B	B	B
2000年6月～	A	A	A	B	A

注：A 建築基準法で明確に規定されており、基本的にすべての住宅に義務付けられている内容
 B 建築基準法で記述されているが、明確な規定がなく、施工者に任されている内容
 C 建築基準法に記述がない、または記述されている水準が低い内容

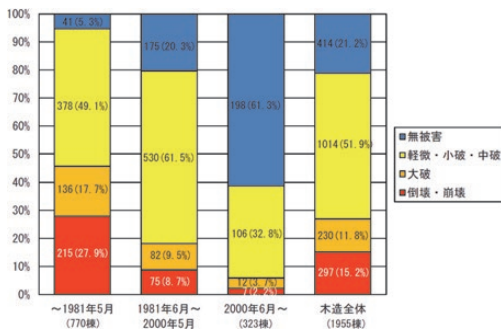


図5 2016年熊本地震益城町悉皆調査の結果

れを表1に示した。旧耐震は壁量、接合部、釣合いの良い配置、水平構面、基礎、全てにわたって現行と比較して不足している。図5は2016年熊本地震においては被害が甚大であった益城町で悉皆調査を実施し、国土交通省の協力を得て正確に建設年代を特定して作成した建設年代別の木造住宅の被害状況である。各年代で調査件数が異なるため、着工年代別に比較する場合にはそれぞれの割合を確認すればよく、旧耐震が27.9%、1981年～2000年が8.7%、2000年以降が2.2%と旧耐震の危険性がここからもわかる。また、旧耐震の耐震診断の結果についてはいくつかの公表資料がある。当方で補強建物を対象に評点を調べたものがありPDで整理した情報であるがそれを再掲する(図番号は修正)。

ここで、壁量と施工の実態、1995年前後の変化をみておく。調査の一例を図6に示した。1937年から2006年までに建築された木造住宅は67件で、や

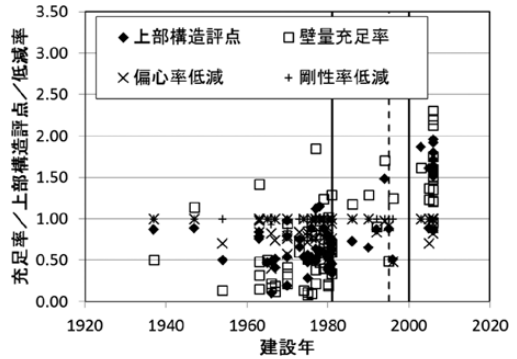


図6 建設年別耐震診断の評点

やサンプル数が少ないが、1981年以降であっても壁量を満足していないものが存在することがわかる。さらに、耐震診断を実施すると偏心低減がわかり、上部構造評点1.0を満足しないものがある。サンプル数が少ないので、数多く実施している宮澤による調査²¹⁾を引くと、1981年で壁量が急激に増えているわけではなく、徐々に増加傾向にあるとしている。また、施工の実態に関する調査では、図面と現場での施工状況の比較において、現場の壁量が設計に比べ少なくなる傾向を示したとか、規定の金物が使用されていないケースが多くある、などの指摘がされている²²⁾。また、住宅金融公庫の融資を受けた建物では検査があるためまともなものも多く、被害が小さいとの見解も調査報告²³⁾で示されている。

また、耐震補強した住宅の368件の元データを整理²⁴⁾したものが図7である。耐震診断の評点、ここでは各階、各方向の最小値、は年代によらず0.5を下回る。公開されているデータを参照する

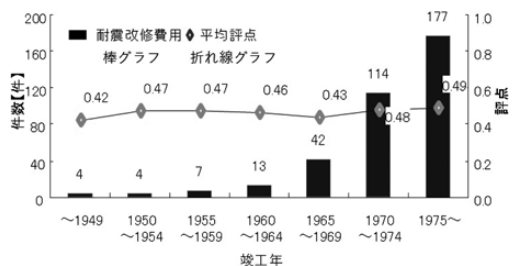


図7 建設年別平均評点

限りここでの資料は耐震補強に至った住宅であるが補強だから特別低いわけではなく、基準で求める性能の半分程度しかない。

1981年以前に建てられた旧耐震の住宅は日本中至る所にある。益城町の住宅の耐震化率²⁵⁾は63.3%，輪島市の住宅の耐震化率²⁶⁾は45%で、全国平均約81%²⁷⁾より低いが、この地域が特別というわけではない。あえて例示は避けるが、地方では都市部であってもこの平均値を下回った市は多く、都市周辺部では益城町や輪島市と似た数値の耐震化率にとどまっている。

一方、前述の図6を見る限り1981年～2000年までの間の建物でも倒壊の危険性が高いこともわかる。壁量充足率は満足できているものの耐力壁周辺接合部や釣り合いが良くないことにより診断評点は1.0を下回るケースがある。この年代については不十分な接合部や釣り合いの悪い配置の住宅を見つけることが重要である。しかし自治体の診断等の補助金は、旧耐震住宅を優先、限定のため、実際にはなかなか診断に至るケースはまれである。そこでこれらの不十分な住宅の見分け方や注意事項を、学術経験者の協力のもと国土交通省が「新耐震基準の木造住宅の耐震性能検証法」²⁸⁾にて整理している。これは新しい研究が実施されて取りまとめがなされたわけではなく、これまでの知見を整理したものである。

最後に現行基準の安全性であるが、すでに高性能な住宅が増えている件については前述したとおりである。2016年熊本地震である程度確認ができ、さらに現在整理途中であるが、2024年能登半島地震においても再確認がされたと考えられる。熊本地震では7棟の2000年以降の倒壊があるが、そのうち3棟は接合部が2000年基準を満足していなかった。また、1棟は地盤変状による被害であった。2024年能登半島地震ではこれまで(2024年8月末現在)のところ4棟の2000年以降で倒壊の住宅が見つかり、そのうち2棟が現行基準の壁量を満たしていない疑いがある。残りの2棟のうち1棟は壁配置が基準を満たしていない。1棟は不明であるが、倒壊を防ぐ最低限の基準として現行基準はほぼ妥当であるといえよう。

5. 2016年熊本地震と2024年能登半島地震で分かったこと 性能設計の目標と補強の有効性

さて、性能表示制度では被害が軽微で済んでいることが統計的に実証されたことを前述した。では被害をどの程度のレベルに抑えておけばよいか、その一例について2016年熊本地震での2年後調査を紹介したい。図8は日本建築学会の悉皆調査の地域を対象に、その建物の状況を整理したものである²⁹⁾。調査項目は2年後に更地になっているか、建て替えがされているか、補修がされているか、そのまま残っているか、の外観調査の結果である。倒壊、全壊住宅のあった場所で更地、建て替えが多く、建物が取り壊されたのは当然ともいえるが、半壊建物の80%以上が取り壊されている。つまり取り壊さず、継続利用を考慮するのであれば、外観上の被害を一部損壊レベルに抑える必要がある。なお旧耐震は建て替え時期に近い状況で被害を受け、地震被害が契機となり建て替えられたとも考えられる。そこで、建設年代別に整理したものが図9である。2000年以降の建物であっても20%が

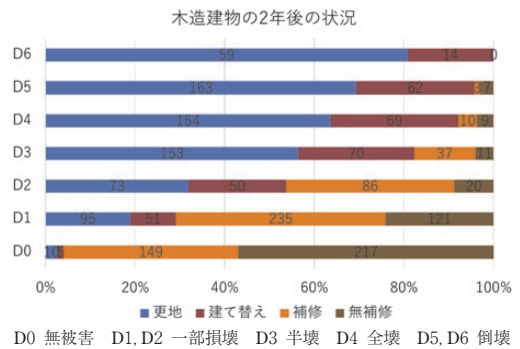


図8 被害と復旧状況の関係

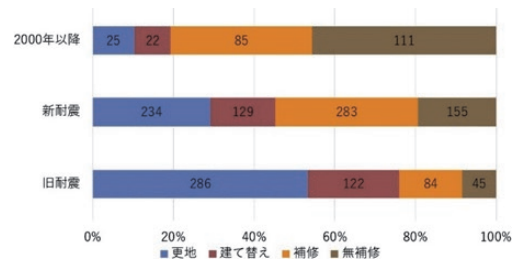


図9 年代別の復旧状況



写真1 耐震補強した店舗併用住宅（輪島市）

取り壊されており、損傷レベルを低く抑えることが重要ということがわかる。法令が目指しているレベルは倒壊を防ぐことであるが、継続利用を考えた場合には高耐震化が必要、性能設計であれば、少なくとも一部損壊レベルに被害を抑えることが求められる。

旧耐震の住宅の被害を繰り返さないためには耐震補強が急務であることは間違いない。耐震補強の技術については一般的な耐力壁に加えて、材料メーカーやハウスメーカーなどの民間企業で耐震補強用の商材を用意し、さらに公共団体等と学術研究者が協力して開発を進めているケースも数多くある。耐震補強の技術の有効性を振動台実験を通じて確認した研究などもこれまで実施されている。一例は文部科学省大都市大震災軽減化プロジェクトで実施された補強・無補強建物の実験であり、1995年兵庫県南部地震に対して補強の有効性が確認されている³⁰⁾。

実地震に対して補強の有効性を確認できたのは2024年能登半島地震である。輪島市や珠洲市などでは補強住宅が多くあり、日本建築学会北陸支部が主導して実施している輪島市、珠洲市、穴水町を対象とした悉皆調査の範囲にも補強建物がある。今のところ倒壊住宅はない。その一例として輪島市の例を写真1に示した。店舗併用住宅で前面の開口部を筋かい補強した事例である。現段階では数棟の調査が終了したところで、今後補強建物の安全性に関しての整理を進めていく予定である。

6. 木造住宅にかかわる法令改正と地震時安全性

2024年4月より確認申請、仕様規定で建てられる範囲が大きく変わる。木造建築に係る建築確認の対象は、これまでは3階建て以上又は500 m²超えであって、それが2階建て以上又は延べ面積200 m²超の建築物に変わる。つまり、これまで四号特例と呼ばれていた2階建て以下、かつ500 m²以内の建築確認検査の審査省略が、平家かつ延べ面積200 m²以下の建築物に縮小となる。仕様規定で建てられる範囲も確認検査の審査省略と同じであったが、今後300 m²を超えるものは構造計算が必須となる。また、仕様規定の内容自体もZEH水準等による建物の重量化を背景に見直しがされ、重い屋根、軽い屋根ではなく実態に近い値となる。図10はこれまで構造計算とほぼ同じ数値が算出されていた性能表示制度や耐震診断の壁量と現在の法令の壁量を比較したものである。1階と2階の面積比1.0で比較すると、法令の1階が33 cm/m²なのに対して品確法と耐震診断はほぼ重なり、46 cm/m²程度である。現行の壁量は部分2階のうち、面積が1階の半分以下となると漸く安全側となる。

一方で省エネ水準等の壁量 L_w は次式により算定する。

$$L_w = (A_1 \cdot C_0 \cdot \Sigma w_i) / (0.0196 \cdot A_f)$$

L_w : 床面積あたりの必要な壁量 (cm/m²)

A_1 : 層せん断力分布係数

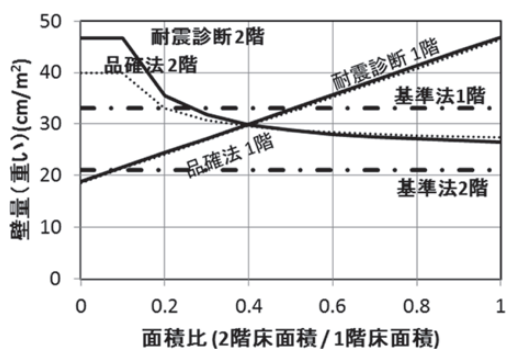


図10 壁量の比較 (品確法は耐震等級1相当に計算)

$$A_i = 1 + \{1/\sqrt{\alpha_i} - \alpha_i\} \times 2T/(1+3T)$$

固有周期 $T=0.03h$ (秒)

α_i : 建築物の A_i を算出しようとする高さの部分が支える部分の固定荷重と積載荷重との和を当該建築物の地上部分の固定荷重と積載荷重との和で除した数値

h : 建築物の高さ (m)

C_0 : 標準せん断力係数 0.2とする。

Σw_i : 当該階が地震時に負担する固定荷重と積載荷重の和 (kN)

Af_i : 当該階の床面積 (m²)

地域係数 Z はこれまでの壁量計算を踏襲して考慮しないものの、建物の重量に基づき、いわゆる1次設計で求められる必要性能が壁量として精算される。この計算方法を用いると、ZEH水準等は、品確法の等級2程度になる。前述の図10に示した品確法の値の1.25倍重い屋根では58 cm/m²であるが、準耐力壁なども設計に取り入れることができ、さらに壁倍率の上限も7倍まで引き上げられるので、これまで建ててきた住宅より壁の量が極端に増えるわけではない。

研究結果が反映されて法令ならびに関係規定が見直されたわけではないが、これまで地震被害を多く受けてきた2階建て程度の設計が変わり、壁量は増えることになり、重い屋根、軽い屋根等の2区分でかつ壁量が少なかったものが、重量に応じて適正に必要な性能が求められるようになる。その結果として、平均的には新築住宅に関しては地震時安全性が高まるものと考えられる。また、熊本地震、能登半島地震において2000年以降着工で倒壊した住宅が基準を満足していないこともわかっている。確認検査によって今後このような建築物がなくなることも期待できる。

7. 最近の研究成果と耐震基準

法令は地震被害のたびに見直され、いわば後追いをしてきた。一方で、規制緩和につながるような技術的な検討や実務的な要望にもとづいて告示などが追加されている。国土交通省基準整備促進

事業のうち木造住宅に関わるものとして「木造建築物における壁倍率の仕様の追加に関する検討」、「木造建築物の耐力壁に係る基準の合理化等に関する検討」、「大臣認定耐力壁(真壁)の適用範囲の合理化に関する検討」で実務に直結する技術的であったり、学術的な側面も併せ持つ研究的な検討が実施されてきている。例えば面材相互の接触を考慮した抵抗機構なども解明されている³¹⁾。

また、法令に関わる新たな材料や構造形式に対する検討も実施されている。CLTを用いた構造については、平成24年度「木造長期優良住宅の総合的検証事業」、平成25年「建築基準整備促進事業」、平成26～27年度「CLTを用いた木造建築基準の高度化推進事業」などの国土交通省の事業が実施され、その結果、平成28年4月1日国土交通省告示第611号「CLTパネル工法を用いた建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める等の件」となった。これらの研究成果は写真2に示す振動台実験³²⁾を始めとして、日本建築学会大会学術講演梗概集などで報告されている。

さらに、「木質系混構造建築物の保有水平耐力計算の方法」、「併用構造や特殊な鉄骨造等の建築



写真2 CLTによる5階建て振動台実験

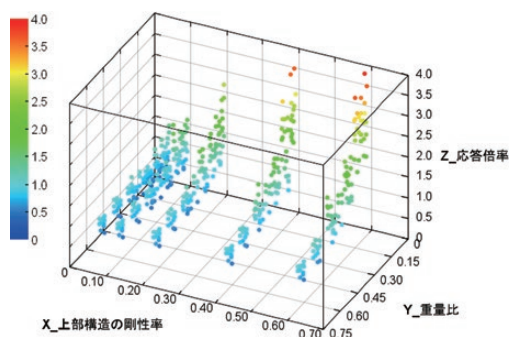


図11 上部構造と下部構造の剛性率と重量比による応答倍率

物における高さ等によって異なる構造計算ルート等の合理化に関する検討」など、木質材料を用いた新たな建築構造の研究も実施されている。耐火の要求時間の関係から下階を鉄筋コンクリート造として上階を木造とした構造が注目されている。図11はその場合に応答性状がどのようになるかを整理したものである³³⁾。層の剛性が急変する場合、やわらかい層に地震エネルギーが集中するため剛性率が導入されている。ただし、下階がかたくなる分には、上の階の応答が極端に大きくはならないことがわかり、緩和の方向で法令改正の検討が進められている。

ここまでは筆者が関連しているものを中心に記述したが、鉄筋入り集成材³⁴⁾など新たな部材開発や構法開発も学術研究として、さらには企業による開発研究として数多く実施されている。

8. おわりに

1995年兵庫県南部地震以降、木造建築に関わる技術者は増えている。地震被害を踏まえ、関連告示などが明確化されたり、耐震診断法の高度化が図られたが、それらは新たな研究の成果というより、理論やこれまでの実験を背景として構築されたモデル化によるパラメータスタディによる現象の整理というべきものである。また、許容応力度設計ができる環境の整備のために研究がすすめられ、それらは2000年前半に取りまとめがなされた。耐震補強が進まない現状では、大地震が発生するとまた既存不適格建築物が倒壊するというこ

とは避けることができない。耐震補強については技術は整備されているもののなかなか進まない。公的補助も個人の資産に対しては限界がある。今一度、行政、研究者、各種団体の協力体制の整備が必要であろう。一方で、地震動が想定範囲内であれば、新築に関しては上記の法令、設計法の整備に加え、今後の省エネ住宅の普及促進と関連して木造建築の地震時安全性が確保されるであろう。

近年の木造の研究課題は高層化と高層建築で木質材料が使える建物の範囲を増やすことである。CLTなどマスティンバーの研究はその緒に就いたばかりで、合理的に10階建てを建てる環境にはまだまだ至ってはいない。国土交通省、林野庁では普及のためのロードマップを作成しており、喫緊の課題に取り組んでいるところである。限られた時間と人材での技術的な課題の整理は、加速度的にというよりは着実に進んでいるというものであるが、本格的な普及にはもう少し時間がかかりそうである。

謝辞

本稿の作成にあたり中川貴文氏(京都大学准教授)の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 五十田博：木造住宅の性能指向型耐震設計に関する研究と経験工学の安全性，木材学会誌，60巻，4号，pp.195-205，2014。
- 2) 五十田博：耐震設計，耐震基準 ④木造，日本建築学会パネルディスカッション「阪神・淡路大震災から20年」，2014。
- 3) 青木和雄・杉野未奈・林康裕：伝統木造建物における込栓接合部ほぞ引抜降伏耐力の評価精度向上に関する研究，日本建築学会構造系論文集，88巻，807号，pp.814-825，2023。
- 4) 富田愛・宮津裕次・東城峻樹・青木崇・脇田健裕・永野正行：滑り基礎構造を適用した実大2層木造軸組の振動台加振実験，日本建築学会構造系論文集，89巻，816号，pp.168-179，2024。
- 5) 小谷竜城・林拓磨・村上雅英：木質ラーメン構造における柱-梁接合部のせん断設計法に関する研究(その1)：ラグスクリーボルトを用いた接合部におけるせん断応力度の評価方法に関

- する理論的研究, 日本建築学会構造系論文集, 87巻, 791号, pp.93-103, 2022.
- 6) 中島昌一・三木徳人・秋山信彦・荒木康弘: 鋼板挿入 CLT ドリフトピン接合部の最大耐力, 降伏耐力および初期剛性の推定と実験による検証, 日本建築学会構造系論文集, 86巻, 783号, pp.793-803, 2021.
 - 7) 梁田真史・栗原嵩明・宇佐美徹・花井厚周・中根一臣: CLT と RC 骨組からなる耐震壁の構造性能, 日本建築学会構造系論文集, 88巻, 811号, pp.1369-1379, 2023.
 - 8) 村上雅英・灰原和人: 面材張り大壁の受け材・間柱と柱の仕口のせん断検定法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 87巻, 798号, pp.780-788, 2022.
 - 9) 中太郎・小谷竜城・村上雅英・青木謙治・稲山正弘: 木造耐力壁構造の柱脚接合部の保証設計法に関する研究(その3): 接合部設計応力算定法の妥当性の検証, 日本建築学会構造系論文集, 88巻, 804号, pp.255-265, 2023.
 - 10) 山崎義弘・神田健吾・坂田弘安: 任意変形履歴を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能-繰返し地震動を受ける木質構造物の劣化挙動に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 84巻, 765号, pp.1443-1451, 2019.
 - 11) 千田紘之・高橋典之・山田朋幸: 深層学習を用いた木造住宅の地震損傷画像診断手法の提案と振動台実験に基づく検証, 88巻, 803号, pp.91-101, 2023.
 - 12) 河内遙・井戸田秀樹: 関係者間連携に着目した木造住宅の耐震改修促進に向けた5つの提案, 日本建築学会計画系論文集, 87巻, 802号, pp.2504-2514, 2022.
 - 13) 日本住宅・木材技術センター: 木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017年版), 2017.
 - 14) 日本建築防災協会: 2012年改訂版 木造住宅の耐震診断と補強方法, 2012.
 - 15) Isoda, H., Matsuda, M., Tesfamariam, S., Tamori, S.: Shake Table Test of Full-Size Wooden Houses versus Wall Test Result: Comparison of Load-Deformation Relationship; Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, Vol.35, Issue 5, 2021.
 - 16) 石川孝重・田中美知: 住宅の積載荷重に関する研究-(その1) 100住戸に対する調査-掲載: 1987年, 日本建築学会大会学術講演梗概集1987年度 B 分冊, pp.139-140, 1987.
 - 17) 長岡修・五十田博・槌本敬大・清水秀丸: 木造軸組構法住宅の倒壊限界変形に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 77巻, 680号, pp.1561-1568, 2012.
 - 18) 岡崎友也・五十田博・小塚直人・若島嘉朗: 家具類の地震時挙動と有効質量に関する実験, 日本建築学会構造系論文集, 74巻, 646号, pp.2199-2208, 2009.
 - 19) 国土交通省, 熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書について, https://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000633.html, 2024年8月16日.
 - 20) 日本建築防災協会: 木造住宅の耐震補強の実務-リフォームにあわせた耐震補強のすすめ, 2020.
 - 21) 宮澤健二: 目で見える木造住宅の耐震性[第2版], 東洋書店, 2008.
 - 22) 鈴木有・小島和芳: 金沢地域における在来構法木造住宅の耐震性能に関する調査研究, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第26号, 昭和58年6月.
 - 23) 木造住宅等震災調査委員会: 平成7年阪神・淡路大震災 木造住宅等震災調査報告書, 財団法人日本住宅・木材技術センター, 1995.
 - 24) 小澤亮公・五十田博: 木造住宅の耐震診断の現状に関する一考察, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 53号, pp.127-130, 2010.
 - 25) 平成23年度益城町耐震改修促進計画.
 - 26) 令和元年度: 輪島市耐震改修促進計画, 令和2年4月.
 - 27) 国土交通省, 住宅の耐震化率, <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/content/001726319.pdf>, 2024年8月16日.
 - 28) 国土交通省, 新耐震基準の木造住宅の耐震性能検証法, <https://www.mlit.go.jp/common/001184898.pdf>, 2024年8月16日.
 - 29) 角田功太郎・五十田博・井上涼・森拓郎・田中圭・佐藤利昭: 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集, 19(1), pp.1_21-1_33, 2019.
 - 30) 佐藤友彦・五十田博・槌本敬大・河合直人・清水秀丸: 既存木造住宅と補強した住宅の動的耐震診断とその精度検証, 日本建築学会構造系論文集, 72巻, 618号, pp.159-166, 2007.
 - 31) 加藤百合子・五十田博・今西達也: 木造軸組大壁耐力壁の面材相互の接触を考慮した抵抗機構

- と耐力に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 88巻, 814号, pp.1674-1683, 2023.
- 32) Sato, M., Isoda, H., Araki, Y., Nakagawa, T., Kawai, N., Miyake, T.: A seismic behavior and numerical model of narrow paneled cross-laminated timber building, *Engineering Structures*, 179, pp.9-22, 2019.
- 33) 辻拓也・五十田博・荒木康弘：中高層を対象とした立面的併用構造の地震時挙動の分析と耐震設計の合理化の検討, 日本建築学会技術報告集, 29巻, 73号, pp.1344-1349, 2023.
- 34) 塩屋晋一：鉄筋を複合する木質集成材梁の短期載荷時の曲げ性能と評価式, 日本建築学会構造系論文集, 84巻, 756号, pp.247-256, 2019.
- 33) 辻拓也・五十田博・荒木康弘：中高層を対象と (投稿受理：2024年8月19日)

要 旨

木造住宅は全国至るところに建設されている。それらは現行規定に合致しない既存不適格の1981年以前に建設された旧耐震, そして1995年兵庫県南部地震の地震被害を踏まえて明確された法令で建てられている2000年以降のもの, さらに旧耐震と2000年以前の耐力壁周辺接合部や耐力壁の釣り合いの良い配置に問題のある1981年以降2000年までの三世代で構成されている。大地震が起こると, 旧耐震の住宅で倒壊を含む大きな被害が発生する。そして1981年以降で設計に不備があるようなものが狙いうちされ倒壊に至ってしまう。それらを耐震化する方法はすでに確立されており, 技術としてあるが, 補強や診断などは進まず, 結局のところ大地震が起こるたびに同じ被害が繰り返されてしまっている。2024年4月に法令が改正される。それは省エネ住宅に関わる改正であるが, 建物重量を考慮して適正な耐震化も図られる。最近の木造建築の課題はCLTといったマスティンバーの利用や他構造と木質材料を組み合わせた構造に関する研究である。また, 制振や集成材を使ったラーメン構造なども依然研究対象である。