

阪神淡路大震災から10年

Ten Years after the Great Hanshin-Awaji Earthquake

林 康 裕 (はやし やすひろ)

京都大学教授 大学院工学研究科

1 はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震後、約10年が経過しようとしている。同地震か地震工学 耐震工学を専門とする研究者に投げかけた課題は極めて大きかった。特に、木造住宅を始めとする建物の倒壊によって6000人を大きく上回る死者が発生した事と、その直接の原因となった高レベル地震動の衝撃は大きかった。図一1は神戸市域から宝塚市、伊丹市までの地域で推定した最大地動速度の分布¹⁾である。震度Ⅶ地域での最大地動速度は100～150 cm/sで、超高層建物の耐震設計で慣用されてきた50 cm/sの2～3倍の値が推定され、想定外の被害が多く発生した。

震災後、多くの研究者が貴重な被害経験を構造物の耐震設計に反映すべく、10年間にわたって精力的な研究が行われてきた。本論では、筆者が10年間に何を震災経験として学んだかを紹介するとともに、貴重な震災経験の現状の活かされ方について、現在考えていることを記述したい。

2 木造住宅の安全性向上と都市の保全 再生

2.1 「古い」住宅の耐震性

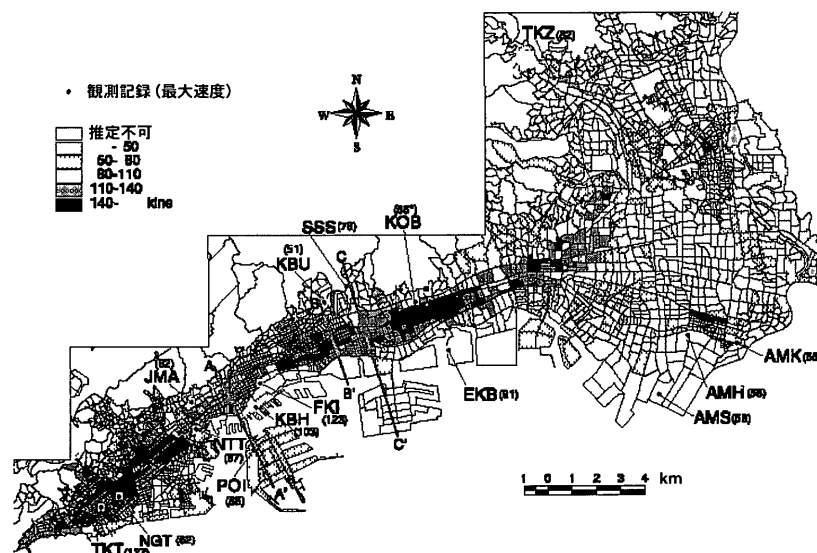
兵庫県南部地震における木造住宅被害の分析の結果、建築年代が古い程被害率が高くなっている傾向が顕著に見られた(図一2(a))。その結果、自治体の被害想定で

は、兵庫県南部地震における被害経験を踏まえるべく、古い瓦屋根の木造住宅ほど被害が多くなる様な被害予測手法を用いてきた。そして、兵庫県南部地震後に発生した多くの地震においても、古い住宅の被害が多かった。

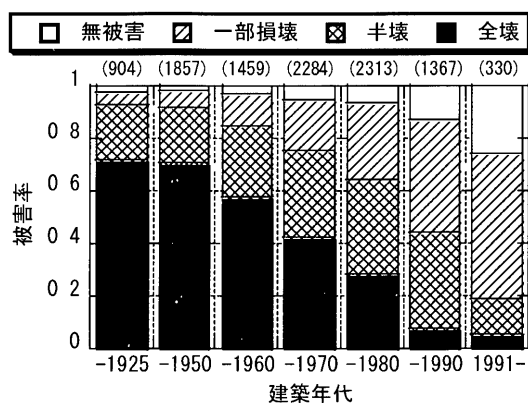
しかし、その程度は地震によって大きく異なっていた。2000年鳥取県西部地震においては、築後100年を経過した木造住宅も含めて、建築年代による被害率の差が小さかった(図一2(b))。その平均的被害率を同じ最大地動速度で兵庫県南部地震時の建設年代別被害率と比較すると、1981年以降に建てられた、いわゆる、「新しい住宅」の被害率とはほぼ等しかった²⁾。2003年宮城県北部の地震においても、被害率は古い住宅ほど高いという傾向は変わらないか、その一方で、築後100～200年以上経過した、屋根の重い木造住宅(図一3)が立派に耐えた事例が少なからず確認されている。それらの木造住宅は、平均活動間隔37年とされる3回以上の宮城県沖地震や1900年と1962年の宮城県北部の地震など、過去数度の被害地震を経験しており、補修を繰り返しながらも立派にそれらの地震に耐えてきている。

以上の様な事例を紹介する時、「それは立派なお家だったんでしょう？」という反応が返ってくる場合がある。確かにそうかもしれない。しかし、このような地震に強い、しかも長寿な「立派な」住宅こそ残していくべきであるし、それらの構法や地域で育んできた住環境 住文化から学ぶべきことは多い。

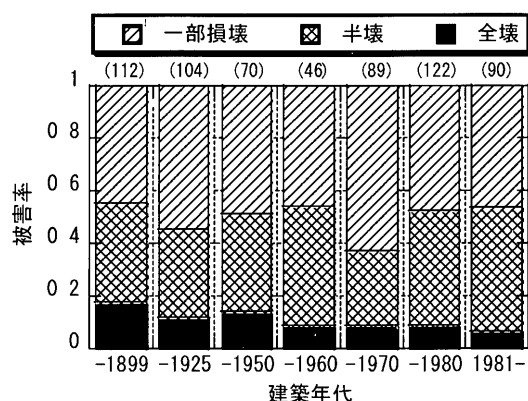
例えば、南海トラフにおけるプレート境界型の巨大地震である南海地震や東南海地震の長期予測によれば、30年後の発生確率は40～50%とされている。予測結果が公表された2001年時点で、被害率が低かったとされる比較的新しい住宅、例えば1985年に建てられた木造住宅は、兵庫県南部地震当時には築10年と比較的新しかった。しかし、地震から10年が経過する2005年には築20年となり、今後、30年後には築50年となって、「古く」なっている。これが、活断層による内陸地殻内地震を対象として考えてみると、いくら切迫性が高いと言われても、地震発生時点における推定建築年数ののはらつきは大きすぎると言わざるを得な



図一1 兵庫県南部地震における推定最大地動速度分布



(a) 兵庫県南部地震 芦屋市



(b) 鳥取県西部地震 日野町

図-2 木造建物の建築年代別被害 (() 内は棟数)

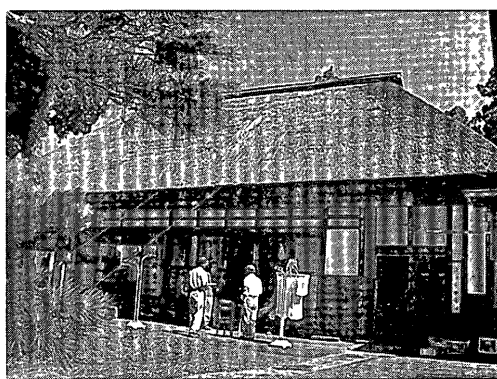


図-3 宮城県北部の震源域に建つ地区

い。

また、一口に「古い」といっても、建築年代（建築基準法の改訂）を意味するのか、築年数や劣化（経年劣化・生物劣化）を意味するのかによって、木造被害・人的被害の予測結果や防災対策のあり方が全く異なってくる。例えば、建築年代だけに依存すると考えれば、現時点での耐震補強の実効性は高いと考えられる。ところが、築年数や経年劣化が木造住宅被害と相関が高いのであれば、新築住宅や耐震補強された住宅であっても、今後、維持管理が適切になされなければ、30年後には大きな被害を被る可能性は高くなる。逆に、古い建物でも適切に維持管理されれば、甚大な被害を免れる住宅が少なからず

存在している。実際、兵庫県南部地震で被害を受けた木造住宅の分析結果によっても、腐朽・蟻害の影響が無い事が確認できれば、建築年代は被害率に大きな影響を与えなくなり、蟻害や腐朽がなければ、築30年以上の古い住宅であっても、1981年以降に建てられた新しい住宅の平均的被害率（蟻害や腐朽がある場合を含む）と同程度か、むしろ小さくなる事が確認されている²⁾。

2.2 木造住宅の安全性向上に向けて

以上の様に考えると、工事実施時点では耐震性能の向上が大きいと期待できる耐震補強法であっても、例えば、結露を誘発して生物劣化を促進してしまう様な構法では、肝心の大地震時には耐震性能を維持できないかもしれない。また、被害予測の面から考えても、例えば、兵庫県南部地震当時の建築年代別被害率曲線（最大地動速度と被害率の関係³⁾）か、30年後の地震の被害予測に適用できるとは思えないし、予測される被害の様相も大きく変容してしまう。つまり、地震に対する木造住宅の被害予測や備えに対するフレームワークを抜本的に改める必要性がある。以下では、木造住宅の安全性向上に必要な、現状の課題と今後の方向性について考えるところをまとめる。

まず、「新しい」住宅であっても、また、耐震補強された住宅を、30年後に発生する巨大地震に対しても安全性を保つには、適切に維持・管理される必要がある。住宅の維持管理状況や、それを改善しようとする「すまいて」の意識によって劣化程度（ひいては、被害程度）が大きく変化すると考えられるから、耐震補強を行った事で、すまいの安全性について関心を失ってしまえば、むしろ逆効果である。今後の地震防災を考える時、合理的な耐震補強が重要であることは論を待たないにしても、現時点での耐震補強の効果や、適切な維持管理による耐震性能の低下抑止効果などについて定量的に明らかにしていく必要がある。

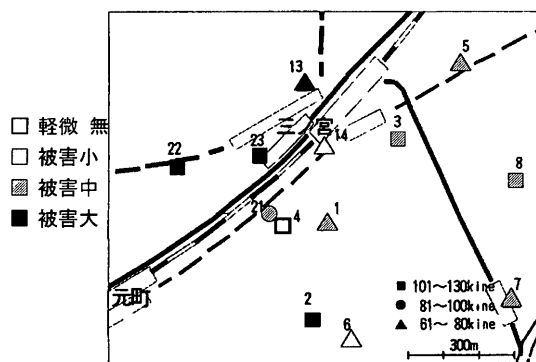
また、中古住宅に対する定期的性能検査と売買時の性能表示の義務付け、検査結果と地震保険制度や被災後の復興支援施策との連動など、「すまいて」による維持管理に対するインセンティブ向上につながる施策も必要であろう。一方、「すまいて」の維持管理を適切に行っていくためには、単に技術的な問題の解決だけでは不十分で、地域の木造住宅の構法や特性を十分に理解した技術者・大工を育成するなど、地域環境の維持管理体制の整備やその支援策が必要となろう。

3 非木造建物の地震時挙動評価と耐震設計

3.1 建物の被害は説明がついたのか

芳村⁴⁾は、兵庫県南部地震における震度Ⅶ地域で被害を受けた建物の地震応答解析を行って実被害と対応する地震動レベルとの照合を行っている研究について網羅的な文献調査を行っている。調査結果によれば、応答解析の対象となった建物の階数は、25階建ての1棟を除き5階～13階建てである。その結果の一部を図-4に示すか、神戸市中央区三宮駅周辺の狭い地域においても、建

論文

図-4 建物の被害程度と整合する地震動強さ⁴⁾

物被害程度と整合する最大速度は61～130 cm/s と大きくはらつく結果となっている。

しかし、推定地震動や観測記録などを総合して考えると、震度Ⅶ地域内では100 cm/s 以上の地震動が推定される(図-1)。また、三宮駅周辺のマクロな被害状況から判断しても、地震動レベルに大きな差が見られるとは考えにくい。さらに、相互作用効果による入力地震動低減効果は、最大地動速度では約1割程度であったと見積もられており、大きくない。したかつて、建物被害から推定される地震動レベルか推定地震動レベル(100 cm/s 以上)と整合していない解析事例が多く見られた。

特に、建物被害が軽微であった建物をシミュレーションしてきたのは、わずか1例⁵⁾に過ぎない。実際、地震動レベルかあまりにも高いために、ある程度以上の被害が生じている場合には被害程度の説明はそれほど難しくない。しかし、軽微や無被害の場合のシミュレーション解析は困難を極める。前述のただ1例の成功事例においても、構造設計時に考慮されていなかった非構造要素を考慮するだけでは全く説明が付かず、スレンダーな立面形状に着目して、基礎の浮上りを考慮した解析モデルを用いる必要があった。

この様に軽微や無被害の建物のシミュレーション解析が困難な状況は、震災後10年を経過しようとしている現時点においてもほとんど変わっていない。軽微 無被害といった大きな被害を受けなかった理由が説明できなければ、大きな被害を受ける場合と受けない場合の差を解析で区別できないだけでなく、本当に大きな被害を受けるのかどうか説明できない。大地震時の安全性向上のために耐震補強が必要であると主張しても、説得力を持たない。比較的軽微な被害を被った建物のシミュレーション解析は、依然として重要な研究課題である。

3.2 耐震設計の現状

兵庫県南部地震の約5年後の2000年6月には、建築基準法が改正され、限界耐力計算法が導入された。限界耐力計算法の最大の特徴は、地震動を解放工学的基盤上の加速度応答スペクトルとして規定したことであり、表層地盤における地震動増幅効果を考慮する事が可能となって、地盤条件を反映した耐震設計が可能となり、地震荷重設定手順の現象説明能力が向上した事にある。では、その実態はとうていだろうか。

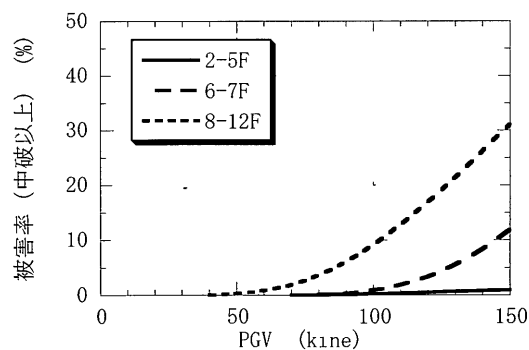
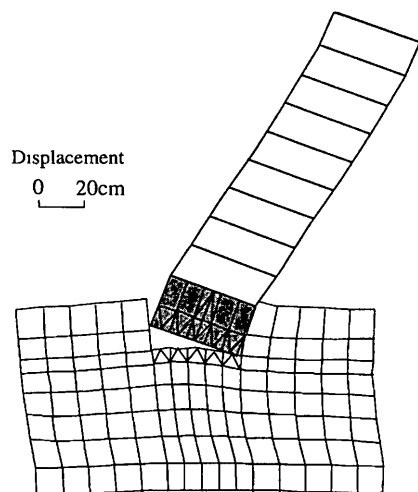


図-5 新耐震設計法による建物の階数別被害

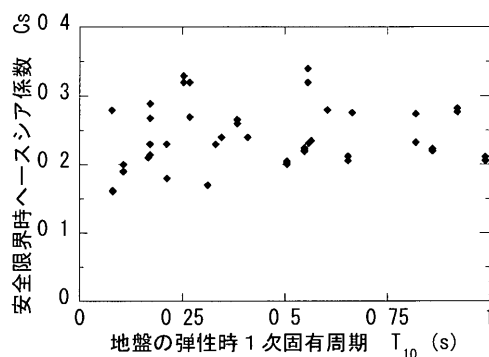
ここでは、限界耐力計算法による設計事例50棟について統計的整理 分析を行った結果⁶⁾について紹介する。分析対象建物の用途はすべて共同住宅で、構造種別はSRC造3棟を除きすべてRC造である。架構種別は主として、桁行方向は純ラーメン架構、張間方向は耐震壁付ラーメン架構である。建物高さは25～60 mで、40～45 mが27棟と約半数を占める。そして、設計事例の特徴的な傾向は、純ラーメン架構の安全限界時ヘースシア係数 C_s が0.2を下回る建物か少なからず見られたことである。

図-5には、阪神淡路大震災においても被害が少なかったとされる新耐震設計法(1981年施行)による建物の被害率曲線を示す。ただし、被害が顕著に見られたとされるピロティ建物は除いている。同図より明らかな様に、中破程度以上の被害率は、階数とともに被害率は増加し、震度Ⅶ領域に相当する最大地動速度 $PGV > 100$ cm/s になると、8～12階建て建物の中破率が10%以上と決して小さくないことが分かる。つまり、新耐震設計法による建物であっても、10階前後の建物の被害率は小さくなかった。これに対して北村⁷⁾は、兵庫県南部地震における同規模の被災建物の分析に基づき、直下型地震に対しても大きな被害を免れて安全性を確保するためには、靱性に大きく期待して耐力を低くし、さらに建物周期を長くして地震力を低減する設計から、保有水平耐力を十分に確保し、適度な変形性能を確保すれば良い設計に方向転換すべきであるとしているが、筆者も全く同じ意見である。では、なぜ、被害経験が十分に反映されていないのだろうか。

図-7には、地盤の弾性時1次固有周期 T_{10} と C_s の関係を示す。 T_{10} が0.3秒以下の比較的良好な地盤上に立地している建物で、表層地盤の地震動増幅率が小さくなり、その結果として安全限界時ヘースシア係数 C_s が0.2以下と小さくなっている事が分かる。この結果は、地盤条件が良好であれば地震荷重を低減できるとする、設計法の意図どおりの結果であるとも言える。しかし、表層地盤条件が良好な場合であっても、直下に活断層が存在している場合や、深い堆積地盤構造に起因した地震動増幅効果が無視できない場合も少なくない。さらには、告示の地震動レベルを大きく超えた地震動が生じる可能性も否定できない。告示に示された方法は、建物の耐震性



図一六 基礎浮上りによる上部構造の応答（変形）低減効果



図一七 地盤条件と建物の安全係数

能の最低水準を規定するためのルールであると考えれば、告示の制約条件下で最適設計する事は危険である。建築地点の地震危険度や地盤条件を適切に考慮し、安全性を確保するために必要な耐震性能を建物に付与するために、震災経験を活かした高度な工学的判断が設計者に求められる。

3.3 強震動評価の設計への反映

兵庫県南部地震後、建物に甚大な被害をもたらした原因である強震動を高精度で予測・評価することの重要性が一般に認識された。そして、地震後に配備された高密度地震観測網（K-NETやKiK-net）による観測記録の蓄積、深い堆積地盤構造を対象とした地下構造調査や活断層調査結果の蓄積などに後押しされて、強震動評価技術の高精度化が実現しつつある。すなわち、強震動評価結果を建物の耐震設計へ反映可能な基盤が整いつつある。近年では、南海トラフの巨大地震についても強震動評価がなされ、東京、大阪、名古屋地域を対象とした長周期地震動が推定され、長周期構造物に対する安全性検討が精力的に行われている。

しかし、想定地震に対する強震動が高精度に評価されたとしても、高レベル地震動下における建物の挙動や耐

震性能が十分に解明されていない以上、合理的な耐震設計には反映できるとは思えない。建物の高レベル地震動下の挙動を高精度に評価する解析手法の構築には、建物の地震観測網の整備が必要であるとの指摘が多くなされている。筆者も賛成ではあるが、高レベル地震動下の挙動解明には大地震を待たざるを得ず、多様な構造種別や規模を有する建物で十分な観測記録が得られるまでに多くの犠牲が避け難いことを考えると効率的な戦略とは言えない。「E-ティフェンス（実大三次元震動破壊実験施設）」などを有効活用した、実大規模実証実験の実施が期待される。その際、高レベル地震動下における被害低減効果を解明するためには、基礎浮上り現象をはじめとする地盤－建物連成系の非線形相互作用効果を考慮し、確認できる震動実験の実施が必要と考えている。

4 まとめ

阪神・淡路大震災後10年が経過しようとしているが、その間にも多くの建物が被害を被った。その様な被害経験に学び、安全で安心できる社会を実現していくには、被害経験からどのように学ぶのか重要と考えている。特に、技術的な慣習や基準類にしがらみを持たない自由な発想が必要である。例えば、木造住宅の安全性を考える上では、地震発生時期や木造の劣化など、現時点からの長期的な時間経過を考慮することか重要である。また、建物地震被害の分析でも、被害低減を目的とした「大被害の要因分析」から、建物の保有耐震性能把握と被害低減要因の説明能力向上を目的とした「被害軽微で済んだ原因の分析」へとパラダイムシフトする必要がある。

参考文献

- 1) 林 康裕 宮腰淳一 田村和夫 1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No 502, pp 61~68, 1997
- 2) 林 康裕 木造住宅の地震被害率と建築年代の関係に関する考察—兵庫県南部地震と鳥取県西部地震の被害経験を踏まえて—, 日本建築学会総合論文誌, pp 52~56, 2003
- 3) 林 康裕 宮腰淳一 兵庫県南部地震における被害率曲線, 日本建築学会大会 災害部門PD, 地震動の特性と建物の被害—経験と予測—, pp 15~20, 1998
- 4) 芳村 学 構造物被害と構造物への入力地震動—一般建物—, 兵庫県南部地震強震記録と設計用地震動との関係, 日本建築学会, pp 53~60, 1997
- 5) 林 康裕 直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果, 日本建築学会構造系論文集, No 485, pp 53~62, 1996
- 6) 有木寛江 林 康裕 南 宏一 井上 豊 限界耐力計算法による設計建物の保有耐力の分析—表層地盤の増幅特性と相互作用効果の評価について—, 日本建築学会技術報告集, 第18号, pp 61~66, 2003
- 7) 北村春幸 設計実務から見た新規定—耐震設計をどこに導こうとしているのか—, 第29回地盤震動シンポジウム, pp 47~54, 2001

(原稿受理 2004 11 15)