

地震動強さと建物被害の関係に基づく建物の耐震性能に関する研究

Seismic performance of buildings based on correlation of building damage
with seismic ground motion intensity

宮腰淳一

Jun'ichi MIYAKOSHI

要 旨

甚大な被害が生じた兵庫県南部地震のような地震に対する建物被害を軽減することは急務である。そのためには、建物に作用する地震動特性と実建物の耐震性能の両者の把握が重要であるが、とくに、実建物の耐震性能は兵庫県南部地震以降の現在においても十分に把握できているとは言い難い。また、このような実建物の耐震性能の把握は実被害でしか把握できないといっても過言ではない。本論文では、実建物の耐震性能を把握できうる貴重な建物被害調査結果のある1995年兵庫県南部地震を対象として、地震動強さと建物被害の関係を観測事実に基づいて構築した上で、地震応答解析結果も利用して、建物の耐震性能を把握することを目的とした検討を行った。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景と目的および本論文の構成について述べた。

第2章では、本研究に関連する既往の研究についてレビューした。具体的には、建物被害調査で扱う被災度判定基準、建物被害と相関の高い地震動強さ指標、地震動強さと建物被害を直接関係付ける被害率曲線、建物を群として捉えた場合の建物の耐震性能の平均像に関する既往の研究についてレビューした。被災度判定基準に関しては、1891年濃尾地震から1995年兵庫県南部地震までを対象として、過去の被害地震の建物被害調査資料に記述されている被災度判定基準を調査した結果、被災度判定基準は、「警察及び自治体によるもの」と「専門家によるもの」とに大別されることがわかった。また、1995年兵庫県南部地震では専門家によるものが2種類存在し、計3種類の被災度判定基準の建物被害データが存在した。建物被害と相関の高い地震動強さ指標については、実際の建物被害率や弾塑性地震応答解析結果と観測記録の最大振幅やスペクトル強度などの地震動強さとの相関分析から、少なくとも

も兵庫県南部地震以前まではスペクトル強度あるいは最大速度が建物被害と相関が高いと判断されていたことがわかった。既往の被害率曲線に関する研究では、古くは地震観測記録がなかったことから、地震動強さ分布の推定のために墓石の転倒率から求められる震度と木造住家の全潰率との関係を算定していたが、地震観測記録が得られるようになってからは、実際の建物被害データを用いて被害率曲線が算定され、その扱い易さから地震時の建物被害予測手法として用いられることが多くなってきた。建物群の耐震性能に関する研究では、いくつかの被害地震に対して、主として中低層 RC 造建物を対象とした耐震診断による結果が徐々に蓄積されてきていたが、まだまだ十分なデータ数ではなかった。

第 3 章では、1995 年兵庫県南部地震における神戸市およびその周辺地域の面的な地震動強さ分布を推定した。このとき、地震動強さは最大地動速度を用いた。具体的には、まず、三宮地域における再現地震動強さと木造家屋被害との関係式を構築した上で、より広範な建物被害データのある低層独立住宅の建物被害に基づき、大字単位での最大地動速度分布を推定した。その結果、推定した最大地動速度分布は、低層住宅の建設年代や構造形式の地域性を考慮していないにも関わらず、検討の範囲内では、ほぼ地表での観測記録や墓石の転倒率などと整合性のとれた結果であった。次に、最大地動速度分布の推定地域の細分化と推定範囲の拡大を目的として、低層独立住宅棟数の十分でない地域や町丁目単位での最大地動速度の推定をも併用することを考え、低層独立住宅以外の建物の被害を考慮して最大地動速度分布の再評価を行った。その結果、低層独立住宅被害とそれ以外の建物被害は大字単位でも概ね相関があり、低層独立住宅以外の建物被害も含めて再評価された最大地動速度分布は、低層独立住宅だけから推定された最大地動速度分布とほぼ対応していた。また、再評価で得られた最大地動速度分布は、観測記録や兵庫県南部地震を対象とした神戸市の地震動再現結果と概ね整合したものであることを確認した。ただし、建物被害から推定される最大地動速度は、液状化が確認されたような臨海部で過小評価となること、地震動レベルが急変する地域での推定誤差が大きくなることもわかった。

第 4 章では、第 3 章で推定した最大地動速度と複数の建物被害調査データを用いて、兵庫県南部地震における地震動強さと建物被害を直接関係付ける被害率曲線を建物被害調査毎に構築した。構築した被害率曲線の比較から、構造種別では、RC 造建物、S 造建物、木造建物の順に被害が大きくなり、建設年代が古い程、建物階数が高い程、建物被害が大きくなることがわかった。また、本論文で構築した被害率曲線の特徴と適用上の注意事項をまとめると以下ようになる。(1) 被害率曲線は、100 ~ 150 [cm/sec] 程度の高い地震動レベルまで対応可能である。ただし、被害調査結果によっては被災度 (地震動レベル) の比較的小さな

地域の建物被害データの不足から、比較的低い地震動レベルに対しては精度が落ちる場合がある。(2) 建物棟数および最大地動速度の推定密度が高いため、比較的精度の高い被害率曲線が得られていると考えている。(3) 新耐震設計法によって設計された建物の被害率曲線を含むほか、建物の用途・階数・建設年代・被災度の定義など多様な区分について構築されている。(4) 兵庫県南部地震における地震動は周期 1 秒前後に明瞭な卓越を有し、継続時間が短いという特徴を有している。当然、被害率曲線にもこのような地震動特性が反映されたものとなっており、その適用に当たっては十分な注意が必要である。また、木造建物については、地域によって耐震性能が異なる場合があり、同様に適用上注意が必要である。(5) 被害率曲線は液状化したと考えられる地域の建物被害データを除いて構築しており、液状化地域に対しては適用できない。次に、被害率曲線を用いた以下の検討を行った。まず、被災度判定基準の異なる被害率曲線を、地震動強さレベルや建設年代別の建物棟数比を同じ条件にした上で互いに比較した結果、各建物被害調査における被災度の対応関係を定量的に示すことができた。これは、様々な機関によって公表される建物被害統計量を読み間違いない意味でも重要な結果である。最後に、被害率曲線の適用例として、1944 年の東南海地震タイプの地震を想定した場合に、距離減衰式と被害率曲線を用いた簡便な方法による地震時の建物被害想定結果を示した。これより、どのような被災度判定の建物被害データに基づいた被害率曲線を用いるかによって想定結果が異なることを明示した。すなわち、建物被害想定を行う場合、その結果を何に役立てるのかという目的が重要であることを指摘した。

第 5 章では、1999 年台湾集集地震を対象として、建物被害と相関の高い地震動強さ指標について検討した。具体的には、この地震で得られた 400 を超える多数の地震観測点の強震記録から計算される、最大加速度、最大速度、SI 値および計測震度の 4 つの地震動強さ指標と、地震観測点がある学校とその周辺における 5 階建て以下の RC 造建物を対象とした建物被害調査結果との関係について分析した。その結果、次のことを指摘した。まず、地震動強さが大きいにも関わらず建物被害が小さい地域もあったが、最大加速度が 400 [cm/sec²] 以下、最大速度が 50 [cm/sec] 以下、計測震度が 5.5 以下の地域では、地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率が 5 [%] 以上の被害はほとんど無かった。また、建物周期と地震動の周期特性を関係付けるものとして (最大加速度 / 最大速度) という値を考え、簡単な建物モデルを用いた地震応答解析結果から (最大加速度 / 最大速度) の値が 4 ~ 16 程度の範囲の地点で応答変形と建物被害率の相関が良かった。そして、それらの地点を対象として、地震動強さ指標と建物被害の相関性について検討した結果、すべての地震動強さ指標において、全調査地点を用いた場合の相関係数よりも高くなった。また、台湾の RC 造建物の周期特性を考慮して積分範囲を 0.2 ~ 0.9 秒とした SI 値が建物被害と最も相関が高かった。以上のことが

ら、建物被害と地震動強さ指標を関係付けるためには、対象とする建物と地震動の周期特性を考慮することが重要であることを指摘した。

第6章では、入力地震動レベルと建物の耐震性能を関連づけた上で地震応答解析より被害率曲線を求め、建物被害データから求めた被害率曲線と対比させることによって逆に建物の耐震性能を算定した。このとき、解析パラメータは被災度に対応させた建物の応答変形(限界層間変形角)および建物の耐力(降伏ベースシア係数)分布とした。パラメータ解析の結果、建物被害データに基づく被害率曲線を比較的良く説明できるように、限界層間変形角および建物の降伏ベースシア係数の分布を特徴付けるパラメータを設定することができた。次に、愛知県および名古屋市の公共施設の耐震診断結果を利用して、構造耐震指標 I_s 値や累積強度指標値の統計量について分析した。対象とした建物の多くが学校であり、その特性を多く含んでいるものの、 I_s 値や累積強度指標値の平均値は、建設年代が新しいほど大きくなり、建物階数が高いほど小さくなることを示した。最後に、本論文で算定した降伏ベースシア係数の平均値と被災度に対応させた限界層間変形角について、愛知県や名古屋市の耐震診断結果および既往の実験結果や調査結果と比較した。その結果、木造建物に対しては概ね良い対応であったが、RC造建物を想定した建物モデルに対しては推定した値の方が大きかった。しかし、ここで推定した値は建物の被害の要因を全て耐力分布に押しつけた場合の見かけのものであると考えられ、定量的評価に関してはまだ十分ではない。その解決策の一つとして、地震応答解析に基づく被害率曲線を算定するための仮定の変化が、推定される耐力分布にどの程度の影響を与えるかについて分析した。その結果、ある耐力を有する建物でも被害を受けるものと受けないものがあるということを考慮することによって、既往の調査結果や実験結果との差が小さくなることが可能であることを示した。

最後に、第7章では、本論文の結論と積み残した課題についてまとめ、今後の展望について述べた。

これまで述べてきたように、本論文では、兵庫県南部地震の観測記録の少なさを補うために推定した最大地動速度分布と複数の建物被害調査結果とを関係付けた被害率曲線を構築し、その関係に基づいて、実建物の耐震性能、とくに建物の強度(耐力)に関する指標を地震応答解析結果を用いて分析した。得られた結果は、今後の耐震設計や耐震診断において建物被害を意識させる動機付けに有用であると考えている。しかし、本論文では検討しなかった幾つかの課題も残されており、実建物の耐震性能をより精度良く把握できるように今後も取り組んでいきたい。