

建物被害及び地震観測記録に基づく建築物の地震荷重の検討

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2 年 福和研究室 川合 佳穂

1. はじめに

現在、東海地方では南海トラフ巨大地震の発生が懸念されている。地域として抵抗力を高め、地震被害を低減するためには、現状の建物の耐震性能を把握し、将来の耐震設計に生かすことが重要である。現状の建物の耐震性能を把握する手段としては、大地震時における建物被害調査結果や、中小地震時における建物の応答観測記録の活用が挙げられる。大地震時における建物被害量の分析は、建物を群としてとらえるマクロ的な分析ではあるが、観測事実に基づいているという点で、ある程度建物の耐震性能を事実に近い形で把握できると考えられている。一方で、稀に発生する大地震のみでは、建物被害に影響を与える地震動の周期特性や地盤条件、建物の構造種別や規模等、種々の要因について詳細な分析を行うことはなかなか難しい。このことから、大地震による被害データを補うもののひとつとして、中小地震時における建物観測が挙げられる。現在では全国的に建物の強震観測体制の整備が進みつつあり、ここから得られる知見は、現行の地震荷重を検討するための一助となると考える。

以上のような背景を踏まえ、本論では建物被害及び地震観測記録に基づき、建築物の地震荷重について検討を行う。具体的には、過去の地震被害に基づく既往の被害率曲線をレビューした上で、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震における罹災証明結果を用いて、地震動強さと建物被害の関係について建築年代、地域特性に着目した分析を行う。また、名古屋大学内で行っている継続的な地震観測について記録の整理を行い、地震時の建物の応答特性を明らかにすると共に、実測記録から現行の設計法における地震荷重の検討を行う。

2. 過去の建物地震被害と被害率曲線

地震時の建物被害に関する既往の研究について概観する。兵庫県南部地震以後の被害データに基づく既往の研究では、兵庫県南部地震のデータに基づくもの

に比べ、震度の増加による被害率の立ち上がりが急で、立ち上がり始める震度が大きいことを確認した。

3. 東北地方太平洋沖地震の罹災証明結果に基づく建物被害の分析

3.1 用いたデータの概要

用いた被害データは、地方自治体が収集・整理した東北地方太平洋沖地震の罹災調査結果である。建物被害率を求める際の母数は平成 20 年住宅・土地統計調査における市町村の総住家数を均等に分配し、各大字の総建物数として用いる。用いたデータの概要を表 1 に、対象地域を図 1 に示す。全壊・半壊の定義は、内閣府が定める災害の被害認定基準に従う。

3.2 地震動強さの推定

各大字の地震動強さについては、K-NET、KiK-net で観測された地表の計測震度(1627 地点)を基に震度分布を推定した。推定震度分布を図 2 に示す。

3.3 地震動強さと建物被害率の関係

前述のデータより求めた建物被害率と地震動強さの関係を示す。本章では建物被害率を大字ごとに算定せず、同一計測震度における被害率をまとめて算定した。これは大字単位で被害率を求めると分母となる総住家数が少なくなり、データの信頼性が低くなると判断したためである。

3.3.1 既往の被害率曲線との比較

図 3 に Case1 における旧年代と新年代の木造建物被害率と計測震度の関係、既往の被害率曲線(年代別)を併せて示す。兵庫県南部地震の被害データに基づく既往の推定式として、山口・山崎(2000)を、兵庫県南部地震以降の地震被害データに基づく既往の推定式として、翠川ら(2011)を用いた。

図 3 より、兵庫県南部地震の被害データに基づく被害率曲線は、全壊率で震度 5 強程度から、全半壊率で震度 6 弱程度から曲線が緩やかな立ち上がりを見せる一方で、兵庫県南部地震以後の地震被害データに基づく翠川ら(2011)の被害率曲線および本検討では震度 6

弱程度まで被害率が見られない。ただし、震度 6 弱を超えてからも、本論における全壊率は、翠川ら(2011)と比較して低い値を維持している。これら建物被害率に差が生じた要因として、地震動の

表 1 用いたデータの概要

区分	Case1 (木造非木造) 建築年代 (1980以前/1981以後)	Case2 用途 (住家非住家)
対象地震	2011年東北地方太平洋沖地震	
対象地域	岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県のうち津波被害のない内陸部	
地震動強さ	計測震度	
取扱単位	大字ごとに計測震度を推定後、同じ計測震度で集約し、被害率算定	
調査棟数	調査棟数 = 各市町村の住宅総数 で推定 各市町村の大字数 ※住宅総数、大字数は平成20年住宅・土地統計調査参照	
被害棟数	地方自治体の罹災証明結果	

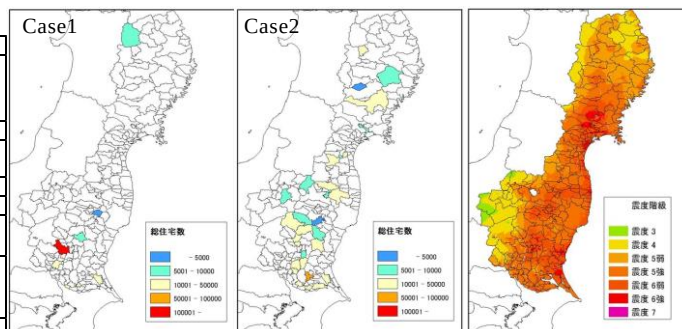


図 1 対象地域の総住宅数

図 2 推定震度分布

周期特性の違い、被害率算定方法の違い、木造建物の耐震性能の地域差、度重なる強い揺れの経験等が挙げられる。

旧年代、新年代の木造において、計測震度 5.5～5.7 の全半壊率と計測震度 5.8 以上の全半壊率で異なる傾向を示している。強震動に見舞われる地域が広域に渡る地震動では、耐震性能の地域差や過去の強い揺れの経験の有無により建物被害の大きさが異なることが予想される。地域特性と被害率の関係については、3.3.2 で検討する。

3.3.2 建物の地域特性に関する分析

過去の中規模以上の地震経験の有無が被害にもたらす影響を検討する。表 2 に示す 2011 年 3 月 11 日以前の 10 年間に発生した震度 5 弱以上を観測した 19 地震を対象とした。図 5 に市町村別の震度 5 弱以上の地震経験回数を示す。Case2 の市町村において耐震性能と中規模の地震経験の有無によりグループ分類を行い、被害率の比較を行う。各市町村の耐震性能については、平成 20 年住宅・土地統計調査に基づき、持家総数に対する耐震性能が確保されていない持家数の割合(以下、耐震性能未確保率と呼称する)により評価した。グループ分類の内訳を表 3 に示す。分類したグループ別に算定した建物被害率と計測震度の関係を図 6 に、グループ別の被害率の比と計測震度の関係を図 7 示す。図 6 より、全壊、半壊の被害が生じ始める震度は B、C、A の順に小さい。また、図 7 より地震経験のある A、C は、経験のある震度 5 弱までは被害率に差が見られない。これは、過去に経験のある震度までは、耐震性能の低い建物が淘汰されることで被害率が低減され、被害率の立ち上がり始める震度が大きくなることを示している。また、耐震性能が同程度である A、B を比較すると、経験のない震度 5 強以上においても、震度 5 弱以上の地震経験がある A で全壊率、全半壊率が小さくなっている。このことから、耐震性能が同程度の場合では、過去の中規模地震経験の有無が、経験のない大地震時においても建物被害に影響を与える可能性があると言える。

4. 地震観測記録に基づく中低層建物の応答分析

4.1 対象建物及び観測体制の概要

本章で分析を行う建物は、名古屋大学東山キャンパス構内に立地する 8 棟の中低層建物である。図 8 に建物の概形と強震計配置、表 4 に建物の概要を示す。

4.2 地震観測記録に基づく建物応答特性と許容応力度設計の関係

4.2.1 加速度応答増幅の比較

対象建物において、地震時の実測値と設計値に基づく応答増幅の比較を行う。実測値に基づく応答増幅は、建物の屋上と 1F で観測された最大加速度の比とした。設計値に基づく応答増幅は、地盤種別を第 2 種地盤、重量を一様分布、周期は設計用 1 次固有周期として 2

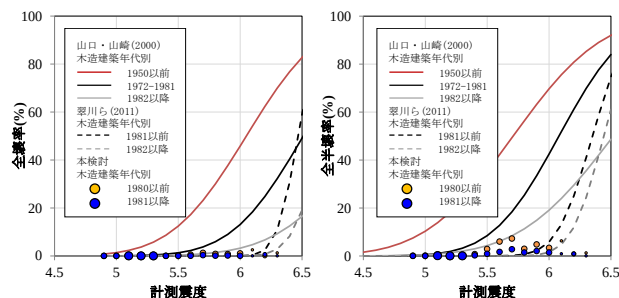


図 3 木造建物の被害率と計測震度の関係

表 2 分析に用いた地震概要

発生日	震源位置	マグニチュード
2001/12/2	岩手県内陸南部	M6.4
2002/2/12	茨城県沖	M5.5
2002/11/3	宮城県沖	M6.1
2003/7/26	宮城県北部	M5.6
2003/7/26	宮城県北部	M6.4
2003/7/26	宮城県北部	M5.5
2003/7/28	宮城県北部	M5.1
2004/8/10	岩手県沖	M5.8
2004/10/6	茨城県南部	M5.7
2005/2/16	茨城県南部	M5.4
2005/4/11	千葉県北東部	M6.1
2005/8/16	宮城県沖	M7.2
2005/10/19	茨城県沖	M6.3
2008/5/8	茨城県沖	M7.0
2008/7/5	茨城県沖	M5.2
2008/7/24	岩手県沿岸北部	M6.8
2010/3/14	福島県沖	M6.7
2010/6/13	福島県沖	M6.2
2010/7/23	千葉県北東部	M4.9

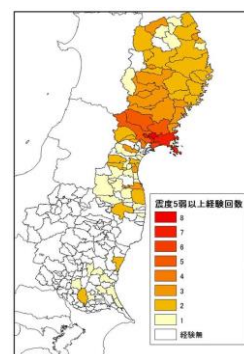


図 5 震度 5 弱以上地震経験回数

表 3 グループ分類内訳

分類	震度 5 弱以上経験	耐震性能未確保率	市町村数
Group A	有	30%未満	6
Group B	無	30%未満	15
Group C	有	30%以上	5
Group D	無	30%以上	1

※Group Dはデータ数がないため検討から除外する

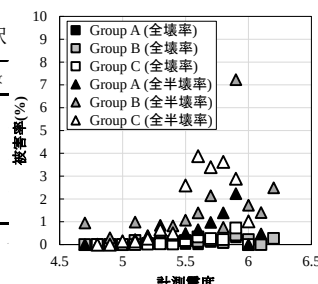


図 6 建物被害率と計測震度の関係(グループ別)

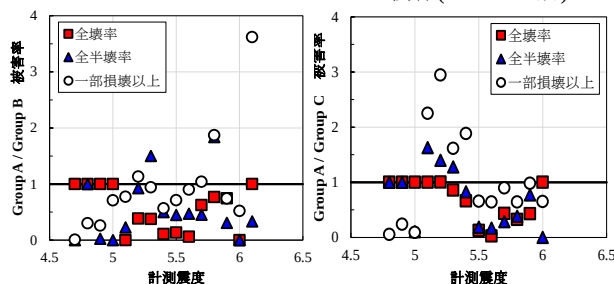


図 7 被害率の比と計測震度の関係(グループ別)

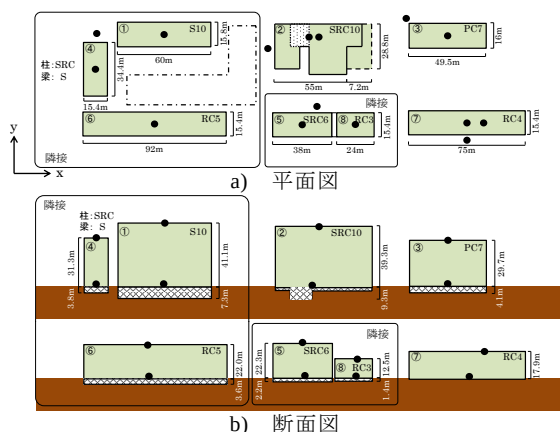


図 8 建物の概形と強震計配置

$$T=0.0244H \quad (1)$$

4.2.2 地震時のモード形状に基づく A_i 分布の検討

2013 年 4 月 13 日に発生した淡路島

表 4 建物の概要

建物No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
構造種別	S造	SRC造	PC造	柱・SRC造梁・S造	SRC造	RC造	RC造	RC造
階数	地上 10階 地下 1階	10階 1階	7階 1階	7階 -	6階 -	5階 1階	4階 -	3階 -
軒高	41.1m	39.3m	29.7m	31.3m	22.3m	22.m	17.9m	12.5m
建築面積	987㎡	1501㎡	852㎡	529㎡	374㎡	1416㎡	1155㎡	604㎡
骨組形式	耐震壁付 桁行 ラーメン構造		耐震壁付 ラーメン構造		耐震壁付 ラーメン構造		耐震壁付 ラーメン構造	耐震壁付 ラーメン構造
	造		造		造		造	造
	耐震壁付 梁間 ラーメン構造		耐震壁付 ラーメン構造		耐震壁付 ラーメン構造		耐震壁付 ラーメン構造	耐震壁付 ラーメン構造
	造		造		造		造	造
基礎・杭種別	場所打ち杭	PHC杭	PHC杭	PC杭	PC杭	PHC杭	RC杭	直接基礎
杭長	41.7m	48.0m	36.0m	23.0m	12.0m	24.0m	6.0m	
根入深さ	GL-7.3m	GL-2.5m	GL-4.1m	GL-3.8m	GL-2.2m	GL-3.5m	GL-0.m	GL-1.4m
地盤建物連成系	桁行 1.10sec	0.58sec	0.40sec	0.41sec	0.27sec	0.28sec	0.23sec	0.21sec
固有周期	梁間 1.23sec	0.65sec	0.48sec	0.38sec	0.30sec	0.28sec	0.23sec	0.20sec
スウェー固定系	桁行 1.08sec	0.53sec	0.38sec	0.40sec	0.23sec	0.27sec	0.23sec	0.09sec
固有周期	梁間 1.14sec	0.59sec	0.44sec	0.36sec	0.28sec	0.26sec	0.22sec	0.09sec
設計1次固有周期	1.23sec	0.79sec	0.59sec	0.76sec	0.45sec	0.44sec	0.36sec	0.25sec
平均S波速度	250m/s	220m/s	280m/s	250m/s	302m/s	250m/s	244m/s	302m/s
観測された地震記録数	164	61	344	164	89	164	74	55
観測期間	2004.7～	1999.3～	2004.5～	2004.7～	1999.3～	2004.7～	2002.3～2009.8	2000.3～

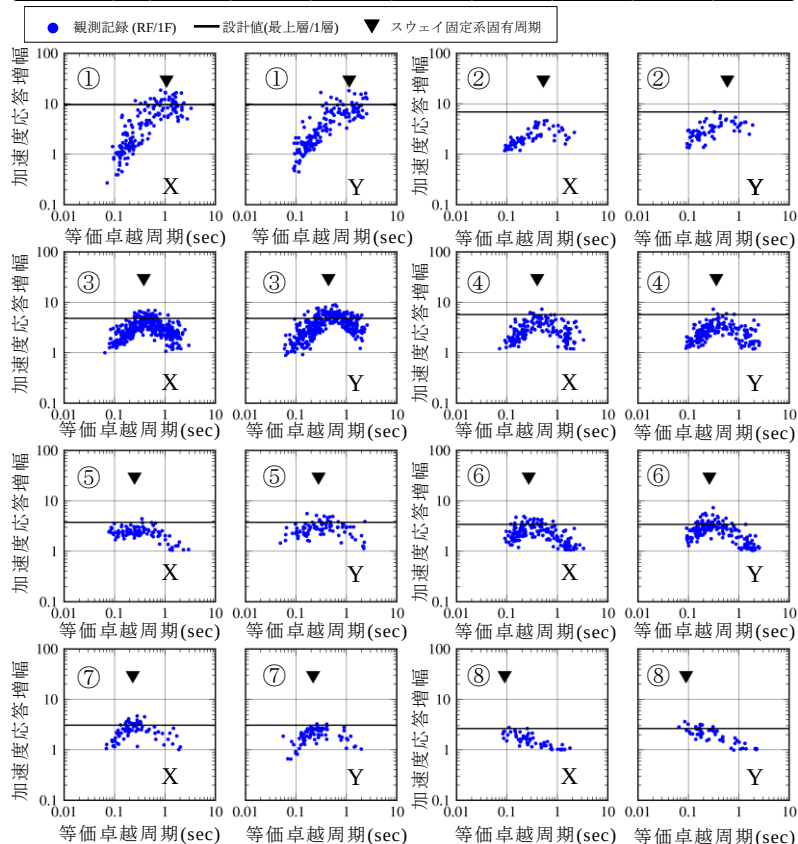


図9 実測値と設計値に基づく応答増幅と等価卓越振動数の関係

速度比から求めたモード形状を併せて示す。

図 10、11、12 より、建物の 1 次固有振動数付近で地震動の卓越が見られる淡路島地震では、実体波部において長辺短辺共に 1 次モードでの応答が見られる。短辺方向では上部建物全体でロッキングしているような応答が見られ、最上階で A_1 分布に基づく応答加速度比を上回る応答が見られる。後続波では、長辺短辺ともに剛体的な応答を示す。一方で図 13、14、15 より、長辺短辺ともに実体波部で 2 次モード含む高次モードの影響を確認できる。最上階での応答は非常に小さいが、3F など中間階で A_1 分布に基づくモード形状を上回る応答が見られた。後続波では、地震動の卓越周期の低下により、1 次モードでの応答が見られた。対象建

物においては、 A_i 分布に基づくモード形状が示すような頂部での鞭振り現象は見られなかった。

4.2.3 R_t 曲線と加速度応答スペクトルの比較

地表で観測された加速度波形の最大値を 0.33G、0.2G で基準化したのち求めた加速度応答スペクトル($h=5\%$)と R_t 曲線の比較を図 16 に示す。図 16 より、0.33G で基準化したのち求めた加速度応答スペクトルは、短周期域で R_t 曲線を上回る応答を示す地震動が存在するのに対し、0.2G で基準化したのち求めた応答スペクトルは、短周期域で R_t 曲線と概ね対応が見られる。このことから、応答スペクトルを建物の等価 1 質点系の応答と考えると、2 次設計では想定している地動加速度が 0.2G 程度である可能性がある。

5. まとめ

本論では建築物の地震荷重について、東北地方太平洋沖地震による建物被害、複数の中低層建物における地震観測記録の観点から分析を行った。東北地方太平洋沖地震による住家被害は二次設計での地震荷重に相当する震度 6 強でも低い被害率を示した。これは、地震動の周期特性や建物の地域特性等様々な要因によるものと考えられるが、現状では強震域での被害データ量は十分でなく、今後のデータの充実をもって検討すべき課題である。また中低層建物における地震観測記録では、建物と地盤の共振点付近で設計値と実測値に基づく建物の応答増幅に対応が見られたが、地震動の周期特性により建物のモード形状が異なること、高次モードの影響が大きい場合、最上階の応答は小さいが中間階で A_i 分布に基づく応答加速度比を上回る可能性があることを示した。また、応答スペクトルを建物の等価 1 質点系の応答と考えると、2 次設計では、想定している地動加速度が 0.2G 程度である可能性を示した。

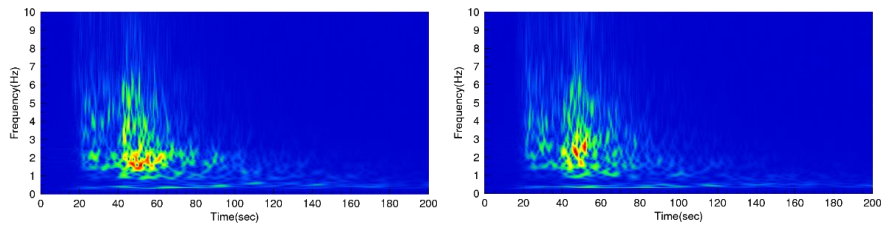


図 10 加速度非定常スペクトル(淡路島地震、左：長辺、右：短辺)

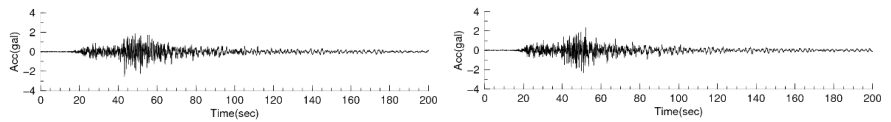


図 11 地表加速度波形(淡路島地震、左：長辺、右：短辺)

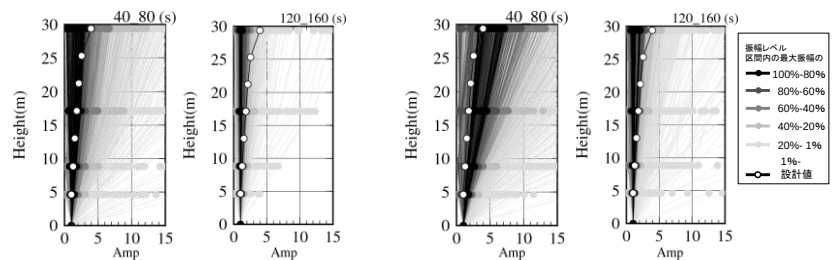


図 12 モード形状(淡路島地震、左：長辺、右：短辺)

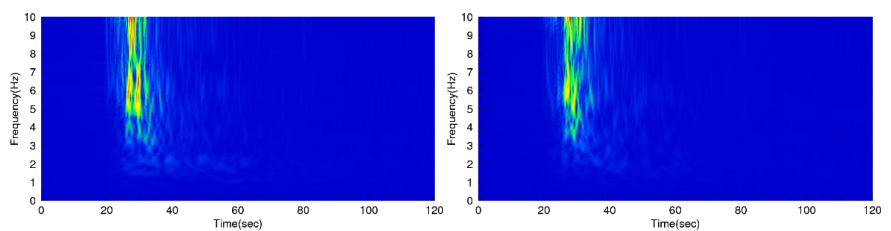


図 13 加速度非定常スペクトル(愛知県西部の地震、左：長辺、右：短辺)

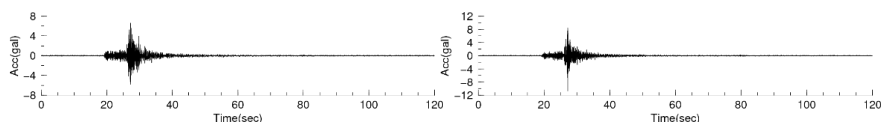


図 14 地表加速度波形(愛知県西部の地震、左：長辺、右：短辺)

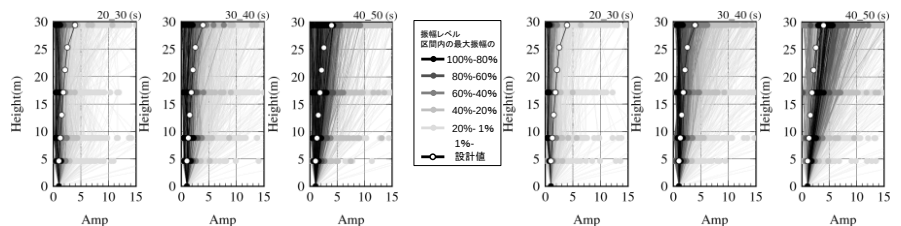


図 15 モード形状(愛知県西部の地震、左：長辺、右：短辺)

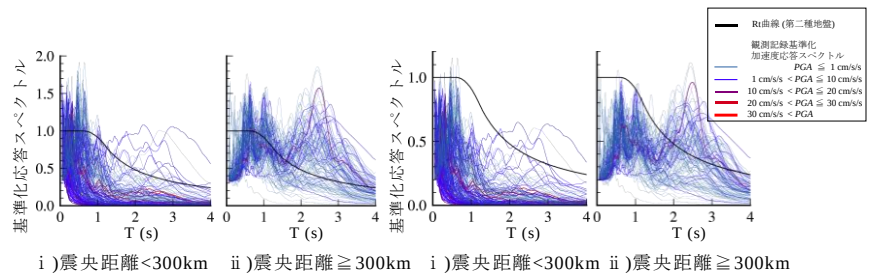


図 16 震央距離別基準化応答スペクトル(左：0.33G、右：0.2G で基準化)