

木造建物の地震被害推定を
正確かつ迅速に行う手法に関する研究

2021年 3月

中澤駿佑

木造建物の地震被害推定を
正確かつ迅速に行う手法に関する研究

中澤駿佑

システム情報工学研究科

筑波大学

2021年 3月

目次

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 1 |
| 第 2 章 | 建築年代による等価周期の違いを考慮した年代別被害関数 | 8 |
| 2.1 | 背景 | 8 |
| 2.2 | 建物被害と相関のある周期帯の年代別検討 | 8 |
| 2.3 | 建築年代別被害関数の作成 | 10 |
| 2.4 | まとめ | 12 |
| 第 3 章 | 地震発生時の降伏耐力で建物を分類した建物被害推定 | 14 |
| 3.1 | 背景 | 14 |
| 3.2 | 経年劣化とカテゴリを考慮した地震発生時の降伏耐力推定手法 | 14 |
| 3.2.1 | 経年劣化による耐力低下の設定 | 14 |
| 3.2.2 | 建築年代別の建築時の降伏耐力 | 14 |
| 3.2.3 | 建物のカテゴリによる耐力の違い | 15 |
| 3.2.4 | 地震発生時のカテゴリ別降伏耐力 | 18 |
| 3.3 | 経年劣化とカテゴリを考慮した建物群モデルによる解析と実被害の対応 | 23 |
| 3.4 | 地震発生時の耐力別被害関数の作成 | 25 |
| 3.4.1 | 地震発生時の降伏耐力と対応する地震動強さ | 25 |
| 3.4.2 | 被害関数の構築と実被害率の対応 | 26 |
| 3.5 | まとめ | 30 |
| 第 4 章 | 地震動と建物の方向性を考慮して被害推定を行うための地震動の入力方法の検討 | 34 |
| 4.1 | 背景 | 34 |
| 4.2 | 建物の方向を 1 棟ずつ調べた非線形建物群解析 | 34 |
| 4.2.1 | 建物の強軸弱軸方向の設定 | 35 |
| 4.2.2 | 強軸弱軸方向を考慮した建物群のモデル化 | 36 |
| 4.2.3 | 解析結果と実被害の対応 | 38 |
| 4.3 | 平均方向を用いた地震被害推定 | 39 |
| 4.3.1 | 平均方向の被害関数の構築 | 39 |
| 4.3.2 | 最大方向と平均方向の関係性 | 42 |
| 4.4 | まとめ | 45 |
| 結論 | | 48 |
| 謝辞 | | 53 |

第1章 序論

日本は地震が非常に多い国であり、建物の全壊といった大きな被害の生じる地震が度々発生している。過去の地震で大きな被害を受けた建物は、1981年の建築基準法改正以前の物が多く、こうした建物の耐震補強により人的被害の軽減が見込めるものの、費用が高額であるといった理由で耐震化が進まず、2018年時点で全国の耐震化率は87%と推定されており、戸建住宅に至っては81%止まりとなっている¹⁾。そうした中で人的被害を軽減する方法として、地震発生直後の被害推定がある。地震発生直後に、どこでどれだけの被害が生じているかを迅速かつ正確に把握することができれば、救助の遅れによる人命の損失を防ぐことにつながる。そこで、本研究では、木造建物を対象として、地震発生直後に迅速かつ正確に全壊率を推定する手法の検討を行った。ここで、木造建物を対象としたのは、耐震化の進んでいない戸建住宅の92.5%²⁾を木造建物が占めているためである。また、人名の損失につながるような被害を対象とするため、木造建物の被害は全壊以上とし、保有水平耐力を失った状態を対象としている。

地震動から建物被害を推定する手法として、地動最大速度や弾性加速度応答といった地震動強さを説明変数とする被害関数と、建物群を様々な耐力をと非線形の復元力特性を持つ質点系にモデル化した非線形建物群がある。近年の計算機の性能の向上により非線形建物群の計算にかかる時間は短縮されつつあるものの、地震動強さの計算に用いるフーリエ変換や弾性応答解析と比べると依然計算負荷は高い。したがって本研究では迅速な被害推定が可能な被害関数を対象とする。図1に、地震発生直後に被害推定を行うための手順を示す。まず、地震発生直後に公開されるK-NET即時公開データを用い、各観測点における地震動強さを求める。次に、被害率の面的な分布を求めるために、観測点の無い地域メッシュの地震動強さを、周辺の観測点の地震動強さから面的補完を行うことで推定する。そして、各地域メッシュにおける地震動強さから被害関数を用いて被害率を求め、画像やGISデータといった形で推定被害率分布を出力する。本研究では、赤枠で示した地震動強さとそれをを用いる被害関数について、迅速性を維持しつつ被害推定の精度を向上するための検討を行う。

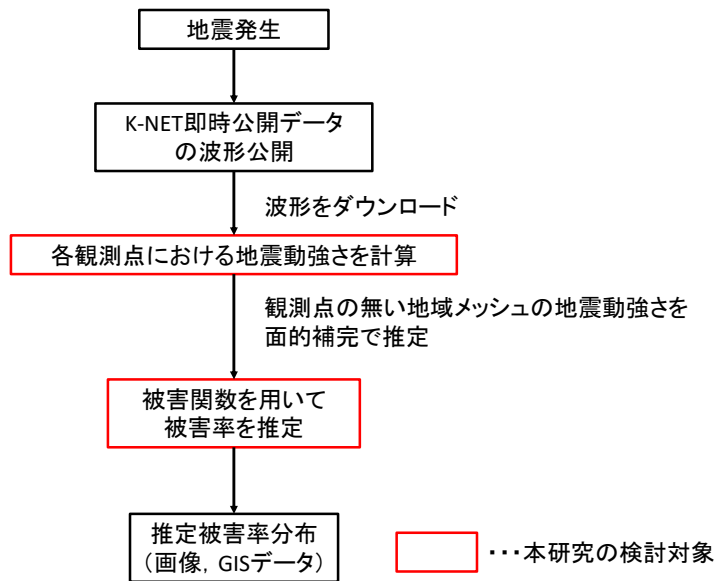


図1 地震発生直後の被害推定の流れ

兵庫県南部地震では多くの強震記録と建物被害データが得られたことから、これらのデータを用いて様々な被害関数が提案され^{3)~7)}など、その後も、様々な地震で得られた強震記録と建物被害データを用いて被害関数の検討が行われてきた。多くの被害関数では、経験的に建物被害との相関が高い地動最大速度 PGV や SI 値を説明変数に用いるが、いずれも建物が被害を受けるメカニズムとの物理的な因果関係が明確ではなく、例えば PGV は長周期の応答が卓越した地震動では被害を過大評価してしまうという課題も指摘されている⁸⁾。また、文献 4) ~6) のように 1995 年兵庫県南部地震で得られた被害データのみを用いて検討された被害関数も多く、その他の地域・年代における建物被害への適応には注意が必要である。そこで、兵庫県南部地震を含む 15 の地震で得られた被害データを元に、建物の大きな被害と相関が高い指標として周期 1-1.5 秒の加速度応答 (以下、1-1.5 秒応答⁹⁾) が提案されている。この周期帯は、木造建物や中低層非木造建物が被害を受けて塑性化した際の等価周期にあたり、建物が被害を受けるメカニズムとの因果関係が明確である。

表 1 の様々な強震観測点について、PGV、1-1.5 秒応答の被害関数と実被害の対応を図 2 に示している。1-1.5 秒応答を用いた被害関数¹⁰⁾により PGV よりも実被害との対応は良くなるものの、依然としてばらつきは存在している。その要因として、強震観測点周辺の建物の性能の違いや、地震動の振幅の異方性の違いが考えられる。1-1.5 秒応答の被害関数は建築年代によらず全ての木造建物の被害を対象に作成されたものであるが、1920 年に施行された建築基準法は度々改正が行われており、近年では 1959 年に壁量規定の強化、1971 年に基礎の布基礎化、1981 年に壁量規定の強化、2000 年に柱・梁接合部の仕様や耐力壁配置のバランスについて定められた。こうした背景から建物の性能は建築年代によって大きく変化すると考えられ、多くの被害関数で建築年代別の検討も行われている^{5)~7)}など。建物の等価周期に基づく被害関数でも、同様に建物の性能の違いを考慮することで、1-1.5 秒応答の被害関数から更に精度を向上させる余地があると考えられる。

表 1 強震観測点周辺の木造全壊率と地震動強さ

| 地震名 | 観測点名 | PGV [cm/s] | 1-1.5秒応答 [cm/s ²] | 木造全壊率 |
|---------------|-------------|---------------|----------------------------------|-------|
| 1994年三陸はるか沖 | 八戸市庁舎 | 50.2 | 386.3 | 1.9% |
| 1995年兵庫県南部 | JR鷹取 | 157.2 | 1225.9 | 59.4% |
| | 葺合 | 130.8 | 1095.6 | 20.2% |
| | NTT神戸 | 88.5 | 557 | 16.1% |
| | JR宝塚 | 96.6 | 626.2 | 7.2% |
| | 本山第一小 | 81.6 | 475.2 | 6.5% |
| | JMA神戸 | 105.0 | 738.6 | 3.2% |
| | 尼崎高架橋 | 56.9 | 440.7 | 2.4% |
| | 尼崎竹谷小 | 51.1 | 393.5 | 1.7% |
| 2000年鳥取県西部 | 関電総合技研 | 59.4 | 360.3 | 0.8% |
| 2003年十勝沖 | 境港測候所 | 84.9 | 415.9 | 1.1% |
| 2004年新潟県中越 | K-NET標津 | 65.2 | 505.9 | 1.3% |
| | 川口町震度計 | 144.7 | 1096.6 | 19.8% |
| 2007年能登半島 | JMA小千谷 | 93.6 | 616 | 1.8% |
| | K-NET穴水 | 103.7 | 904.9 | 18.8% |
| | JMA輪島 | 98.7 | 698.2 | 4.7% |
| | K-NET輪島 | 43.9 | 360.6 | 2.9% |
| 2007年新潟県中越沖 | K-NET柏崎 | 126.9 | 759.1 | 5.3% |
| | 柏崎市中央町震度計 | 125.1 | 726.9 | 7.4% |
| 2011年東北地方太平洋沖 | K-NET小川 | 75.3 | 623.8 | 0.8% |
| | JMA大崎市古川三日町 | 81.6 | 810.6 | 3.0% |
| | 高根沢町石末震度計 | 68.1 | 379.5 | 0.7% |
| | 須賀川市八幡町震度計 | 59.7 | 318.4 | 2.1% |
| | 名取市増田震度計 | 108.6 | 589.8 | 0.6% |
| 2016年熊本 | KIK-net益城 | 131.6 | 1035.4 | 6.3% |

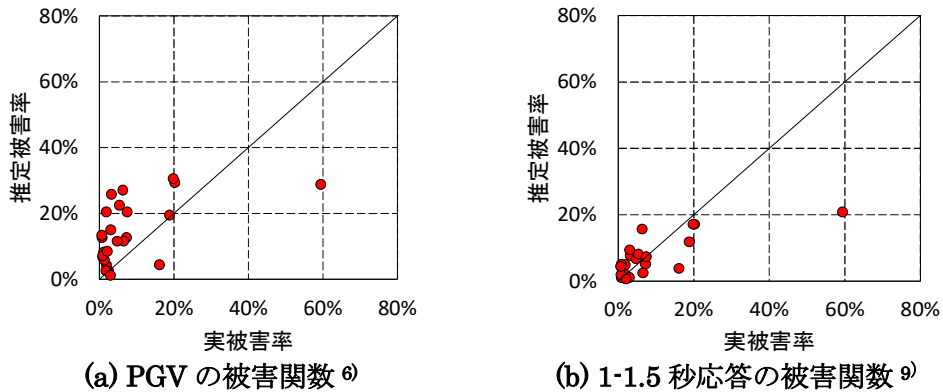


図 2 被害関数による推定被害率と実被害率の対応

また、被害関数の説明変数は地震動の 3 方向または水平 2 方向をベクトル合成して最大となる方向から算出されることが多く、1-1.5 秒応答も水平 2 方向ベクトル合成の最大方向を用いているが、地震動の振幅は断層の破壊伝播方向などの影響で強い異方性を有する場合があることが知られている^{11)~16)}など。一方で、建物は方向による壁量の差から耐力に異方性を有する構造物であり、地震による被害は地震動と建物の双方の方向性が複雑に組み合わさった結果であり、値が最大となる方向へベクトル合成した 1 波形の解析では実際の現象を再現出来ない恐れがある。

これらを踏まえ、本研究では建物の等価周期という考え方にに基づき、地震発生直後の建物被害推定の精度を向上することを目的として、第 2 章、第 3 章では建物の性能の違いを考慮した被害関数を作成し、第 4 章では地震動と建物の方向性を考慮した被害推定の検討を行った。本論文の構成を以下に示す。

第2章 建築年代による等価周期の違いを考慮した年代別被害関数

日本では繰り返し耐震規定が変更されており、建物の性能が建築年代によって大きく異なる。そこで本章では、図1のばらつきの要因のうち建物の性能の違いについて、建築年代の違いに着目して検討を行った。建築年代別被害関数の検討は様々に行われているが、既往の年代別被害関数^{5)~7)}などで用いる地震動強さは地動最大速度PGVやSI値など、建物が被害を受けるメカニズムとの対応が明確ではない。そこで、1-1.5秒応答と同様の考え方にに基づき、建築年代によって異なる等価周期に対応する説明変数を用いることで、より正確な年代別被害関数を作成できると考えて検討を行った。

まず、建物の被害と相関の高い周期帯を建築年代別に調べたところ、相関の高い周期帯が建築年代によって異なることがわかった。そこで、建築年代によって異なる周期帯の加速度応答を用いて年代別被害関数を作成したところ、1-1.5秒応答を用いる従来の被害関数よりも、実被害データとの対応が良くなることがわかった。

第3章 地震発生時の降伏耐力で建物を分類した建物被害推定

木造建物の性能は経年劣化により低下すると考えられており、性能が経年で変化しないと考えるよりも、経年劣化により低下すると考えた方が実被害との対応が良いという検討結果がある¹⁷⁾。このことから、同じ1980年代に建てられた建物でも、1995年兵庫県南部地震と2016年熊本地震では、約20年間の経年の違いによって、地震発生時の建物性能が異なると考えられる。

また、2018年北海道胆振東部地震において全壊率6.3%の被害が生じたK-NET 鶴川では、被害を受けた建物は、店舗として使用されていたと見られる2階建て建物に集中しており、間口に大きな開口部を有することから周辺の建物と比べて性能が低かったと考えられる。このことは、建築年代と経年が同じであっても、階数や開口部といった要素の違いから建物性能が異なる可能性を示唆している。そこで本章では、階数や開口部といった要素で建物をカテゴリ分けし、経年劣化とカテゴリを考慮することで地震発生時の建物性能が同程度になるように建物を分類し、第2章よりも建物をさらに細分化して被害関数の検討を行った。

具体的には、まず、降伏ベースシア係数の経年劣化モデルを用いて地震発生時の降伏ベースシア係数を推定する。次に、階数・開口部の有無・屋根の重量という、降伏ベースシア係数に影響を与えると考えられるパラメータによって建物を8カテゴリに分類し、カテゴリ別の耐力比を考慮することで、経年劣化を考慮した地震発生時のカテゴリ別降伏ベースシア係数を推定した。そして、カテゴリ別降伏ベースシア係数が同程度になるようにグループ分けを行い、それぞれのグループで被害関数を作成した。

その結果、第3章で作成した年代別被害関数と比べてやや精度が落ちる結果となった。これは、カテゴリ分けを行うことで建物棟数が不十分なデータを用いて被害関数を決定せざるを得なかったことが原因の一つと考えられ、被害データの蓄積が進むことで十分な精度が得られる可能性があると思われる。

第4章 地震動と建物の方向性を考慮して被害推定を行うための地震動の入力方法の検討

地震動を用いた解析を行う際、NSやEWの1方向の波形を入力することが多く、本研究でも第2章、第3章では水平2方向をベクトル合成して応答が最大となる最大方向を用いた。

しかし、地震動の振幅は断層の破壊伝播方向などの影響により強い異方性を示す場合があり^{11)~16)}など、建物も壁量の差のために耐力が異方性を有する構造物であることから、最大方向1方向の入力では実際の現象を再現できない恐れがある。

そこで本章では、地震被害推定の際に地震動と建物の方向性を考慮する方法について検討を行った。1方向の入力で地震動の方向性を考慮する手法として、地震動を様々な方向に合成したときの弾性加速度応答を調べ、平均値となる方向の波形を用いる平均方向¹⁸⁾が提案されている。しかし、これは様々な方向を向いた建物群に異方性のある地震動が入力されるといふ複雑な現象を、平均的な応答となる方向の波形1波の入力に単純化したものであり、地震動と建物の方向性を考慮するには、本来は実際の建物の方向を個別に調べ、1棟ずつの方向に応じた波形を入力する必要がある。また、平均方向を決定するためには5度ずつ36方向の応答スペクトルの計算が必要となり、地震発生直後の被害推定で用いることを考えると計算負荷が高いという過大もある。そこで、強震観測点周辺の建物の1棟1棟の方向を調べ、それらの方向に応じた波形を用いて非線形建物群による解析を行った結果を、平均方向を用いた場合と比較することで平均方向の妥当性を確認した上で、地震発生直後の被害推定に活用するために計算負荷を低減した新しい平均方向を考案した。

建物被害と相関のある1-1.5秒応答について、新しい平均方向を用いる被害関数を作成し、応答が最大となる最大方向を用いる従来の被害関数と比較したところ、両者の実被害率との対応はほぼ等しくなった。その原因を調べると、平均方向と最大方向の1-1.5秒応答が強い線形関係を有することが原因であり、この線形関係は平均方向と最大方向の1-1.5秒応答の比が限られた範囲に集中することから常に成り立つことがわかった。従って、本研究の第2章、第3章で最大方向を用いて行った被害関数の検討は、平均方向を用いて行った場合でも同様の結論が得られると考えられる。

第5章 結論と今後の展望

本章では、各章における検討で得られた知見のまとめと、今後検討すべき課題について説明を行う。

本論文の構成を図3に示す。

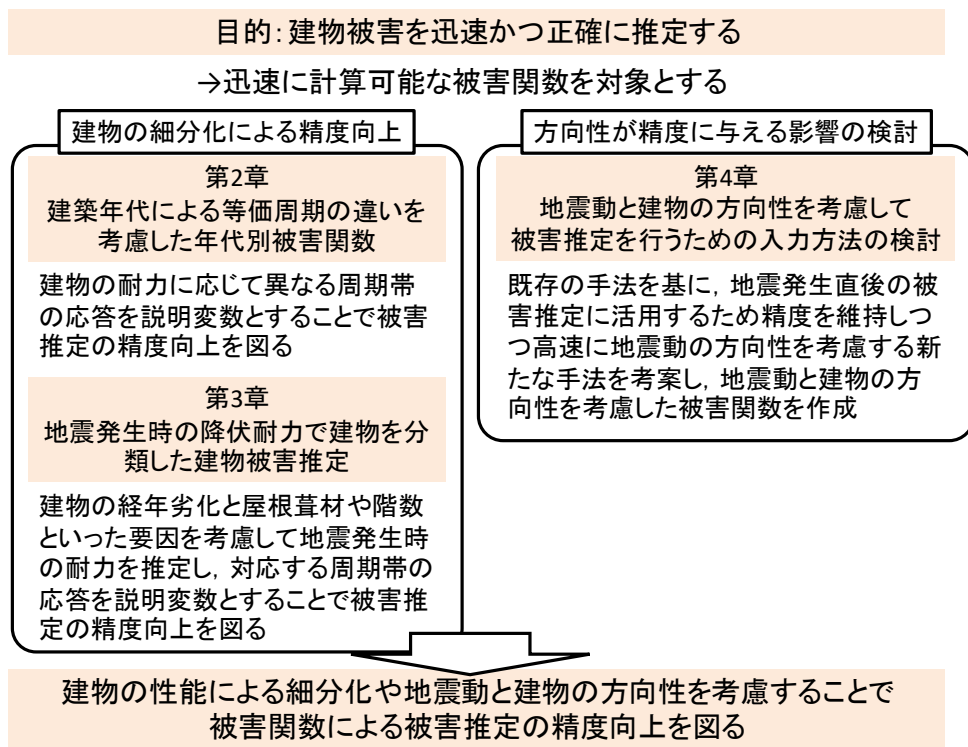


図3 本論文の構成

参考文献

- 1) 住宅・建築物の耐震化の状況について, 国土交通省
(<https://www.mlit.go.jp/common/001364968.pdf>)
- 2) 総務省統計局:平成30年住宅・土地統計調査
(<https://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/tokei/fukyu/tokei/betsu/zyutaku/zyutochi30/kekka.html>)
- 3) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾:被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2299-2304, 1994.
- 4) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 川瀬博:1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第494号, pp.59-66, 1997.4.
- 5) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志:地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測ーその2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例ー, 日本建築学会構造系論文集, 第505号, pp.53-59, 1998.3.
- 6) 村尾修, 山崎文雄:自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第65巻, 第527号, pp.189-196, 2000.1.
- 7) 翠川 三郎, 伊東 佑記, 三浦 弘之:兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討日本地震工学会論文集, 第11巻, 第4号, pp.34-47, 2011.
- 8) 村瀬 詩織, 大村 早紀, 杉野 未奈, 林 康裕:2016年熊本地震における地震動特性と木造住宅の倒壊率の関係, 日本地震工学会論文集, 第18巻, 第2号, pp.147-165, 2018.5.

- 9) 境有紀：建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討－2007年能登半島地震, 新潟県中越沖地震のデータを加えて－, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第642号, pp.1531-1536, 2009.8
- 10) 中澤駿佑, 境有紀, 深部地盤構造が建物被害に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, 1161-1162, 2016.9.
- 11) 久田嘉章: 1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向データの数值化、及び強震記録との関係、日本建築学会構造系論文集、第512号、1998、pp.105-110.
- 12) 源栄正人、竹中宏明、柴田明德: 直下型地震動の方向性と構造物の水平2方向連成応答、第2回都市直下型地震災害シンポジウム、1997、pp.159-162.
- 13) 川瀬博、松島信一: 三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第514号、1998.12、pp. 111-118.
- 14) 瀬藤一起: カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震、科学、Vol. 66, No. 2、1996、pp. 93-97.
- 15) Somerville, P. G, N. F. Smith, and R. W. Graves: Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, Seism, Res. Lett, Vol. 68, 1997, pp. 199-222.
- 16) 神野達夫、三浦賢治: 強震記録に見られる断層破壊の指向性効果とその地震動特性への影響、日本建築学会構造系論文集、第610号、2006、pp. 191-196.
- 17) 林康裕, 更谷安紀子, 森井雄史: 木造住宅の経年劣化と地域地震環境を考慮した地震時損傷度予測手法, 日本建築学会構造系論文集, No.615, 77-84, 2007.
- 18) 境有紀, 熊本匠, 地震動の方向性の定量的な検討と地震被害推定のための平均方向の提案, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第5号, 1-20, 2010.11.

第2章 建築年代による等価周期の違いを考慮した年代別被害関数

2.1 背景

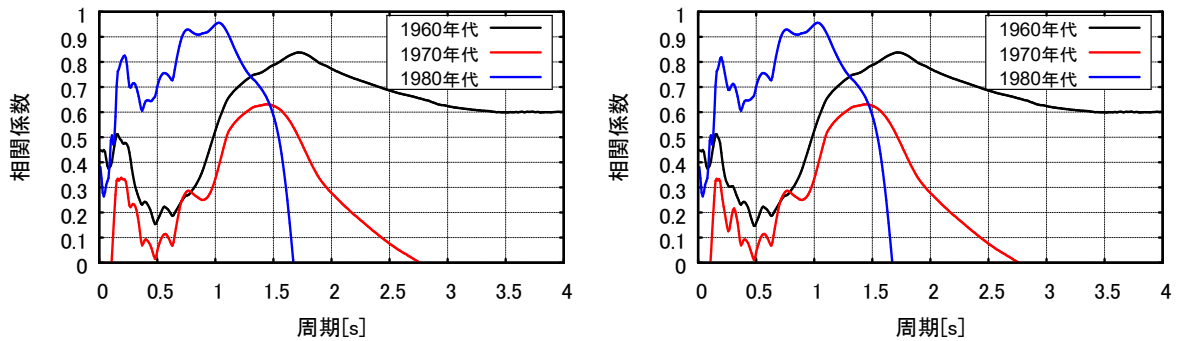
地震動による建物被害を迅速に推定する手法として、地震動強さに基づく被害関数の検討が行われている^{1)~5)}など、建物の性能は建築年代によって異なるため、建築年代別被害関数の検討も行われているが^{3)~5)}など、説明変数として用いられることの多い地動最大速度 PGV は、長周期の応答との相関が高いために 1 秒以下の短周期の応答と対応が良い計測震度や地動最大加速度 PGA に比べて建物被害との対応は良いものの、2016 年熊本地震の西原村小森震度計のように 2 秒以上の長周期が卓越する地震動が発生した場合には、被害を過大評価してしまう⁶⁾という課題がある。そこで本章では、木造建物や中低層非木造建物が塑性化したときの等価周期にあたり、建物の全壊といった大きな被害と相関の高い周期 1-1.5 秒応答⁷⁾と同様の考えに基づき、建物の等価周期に対応する弾性加速度応答を説明変数とする年代別被害関数を構築することで、被害推定の精度を向上するための検討を行った。

2.2 建物被害と相関のある周期帯の年代別検討

表 2 に示す強震記録と、観測点周辺の建物被害率を用いて、建物被害と相関のある周期帯を建築年代別に調べた。ここで建築年代を 10 年単位で分けたのは、建築基準法が 1959 年、1971 年、1981 年と概ね 10 年程度の間隔で改正されており、10 年ごとに性能が異なると考えたためである。2000 年にも建築基準法の改正が行われているが、1990 年代以降は被害関数を作成するのに十分な数の被害データが得られていないため、1980 年代までを対象とした。周期 0~5 秒の範囲について、建物の等価減衰に対応する減衰定数 20%⁷⁾の弾性加速度応答を求め、各周期における加速度応答と木造建物全壊率との相関係数を図 4 に示す。なお、2016 年熊本地震の KiK-net 益城では、4 月 14 日の地震（以下、前震）と 4 月 16 日の地震（以下、本震）で連続して強い揺れを観測しているため、図 4(a)は本震のみ、図 4(b)は前震+本震を連続で入力した結果となっている。図 4(a),(b)を比較すると周期 0.5 秒以下の極短周期で相関係数にごく僅かな違いが見られるものの、周期 0.5 秒以上の周期帯に大きな違いはない。これは、図 5 に示す KiK-net 益城の弾性加速度応答スペクトルが、本震のみと前震+本震を比較した際に周期 0.5 以上でほぼ一致しているためである。図 4 より、予想した通り、建物被害と相関の高い周期帯が建築年代によって異なることがわかる。建築年代が新しいものほど相関の高い周期帯が短周期になっているのは、壁量規定の強化によって多くの耐力壁が存在し、剛性が上がることで建築年代が新しいほど弾性周期が短くなることや、古い建物では経年劣化により剛性が低下していることなどが原因として考えられる。

表 2 強震観測点周辺の建築年代別被害率

| 強震記録 | | 木造全壊率[%] | | | | 木造棟数 | | | |
|-----------------|-----------|----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-----|
| | | 1960年代 | 1970年代 | 1980年代 | 3年代全体 | 1960年代 | 1970年代 | 1980年代 | 合計 |
| 1995年兵庫県南部地震 | 大阪ガス葺合 | 33.6 | 4.5 | 0.0 | 25.8 | 273 | 71 | 13 | 357 |
| | JMA神戸 | 6.9 | 0.0 | 0.0 | 4.1 | 360 | 125 | 89 | 574 |
| | 本山第一小 | 6.4 | 4.0 | 0.0 | 4.2 | 352 | 218 | 134 | 704 |
| | NTT神戸 | 6.4 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 58 | 3 | 0 | 61 |
| 2004年新潟県中越地震 | JR鷹取 | 69.6 | 33.3 | 5.6 | 54.7 | 127 | 32 | 19 | 178 |
| | 川口町震度計 | 37.1 | 9.4 | 4.2 | 18.7 | 45 | 34 | 25 | 104 |
| 2007年能登半島地震 | JMA小千谷 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 19 | 45 | 30 | 94 |
| | JMA輪島 | 9.4 | 0.0 | 0.0 | 4.4 | 128 | 80 | 37 | 245 |
| 2007年新潟県中越沖地震 | K-NET穴水 | 49.0 | 13.4 | 4.2 | 22.1 | 57 | 73 | 25 | 155 |
| | K-NET輪島 | 3.8 | 6.0 | 0.0 | 3.1 | 71 | 86 | 55 | 212 |
| 2007年東北地方太平洋沖地震 | K-NET柏崎 | 22.2 | 2.1 | 1.7 | 3.5 | 14 | 50 | 59 | 123 |
| | 柏崎震度計 | 42.9 | 6.3 | 1.6 | 8.0 | 20 | 55 | 65 | 140 |
| 2011年東北地方太平洋沖地震 | K-NET小川 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 38 | 45 | 31 | 114 |
| | JMA大崎市古川 | 2.3 | 5.3 | 0.0 | 3.3 | 74 | 91 | 40 | 205 |
| 2016年熊本地震 | KiK-net益城 | 15.4 | 10.3 | 7.4 | 8.4 | 25 | 47 | 63 | 135 |



(a) KiK-net 益城前震のみ (b) KiK-net 益城前震+本震

図 4 各周期の加速度応答と建物被害率の相関 (建築年代別)

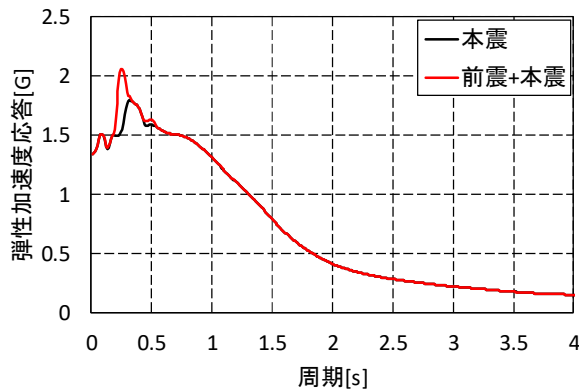


図 5 KiK-net 益城の弾性加速度応答スペクトル (減衰定数 20%, 水平 2 方向ベクトル合成最大方向)

2.3 建築年代別被害関数の作成

建物の被害と相関の高い周期帯が建築年代によって異なることがわかったため、年代によって異なる周期帯の加速度応答を用いて年代別被害関数を作成した。具体的には、1960年代で1.5-2秒、1970年代で1-1.5秒、1980年代で0.5-1秒の応答を用いた。まず、全壊率と弾性加速度応答の関係は式(1)で表される。

$$D = \Phi(\alpha \log A_{1-1.5} + \beta) \quad (1)$$

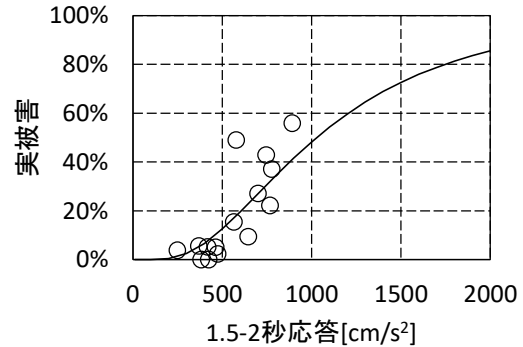
ここで、 Φ は標準正規分布の累積確率、 A は各周期帯の弾性加速度応答を示す。

表3に、被害関数と震度指標の係数 α, β の値、また、被害関数を用いて推定した被害率と実被害率との相関係数 Cor および誤差平均(誤差の絶対値の平均) Err を示す。また、被害関数と実被害の対応を図6に示す。

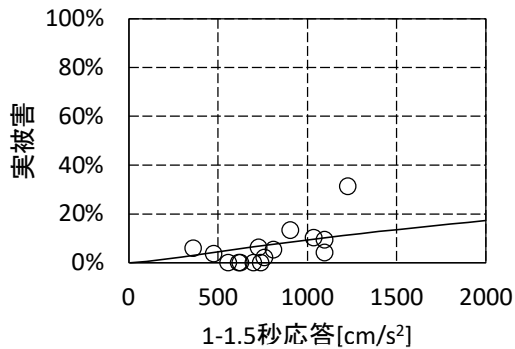
図7に、被害関数による推定被害率と実被害率の対応を示す。上段は翠川ら⁵⁾によるPGVを用いる年代別被害関数と実被害率の対応、下段が本章で作成した年代によって異なる周期帯を用いる年代別被害関数と実被害率の対応である。全体的に見ると誤差平均は全ての建築年代で低下しているが、1970年代では兵庫県南部地震JR鷹取、1960年代では能登半島地震K-NET穴水で誤差が依然として大きい。この原因として、JR鷹取の実被害と対応するように観測点周辺の耐力分布を推定すると、全国の平均的な分布⁸⁾よりも耐力の低い建物が多いという検討結果⁹⁾があることから、比較的耐力の低い建物が多かったことで実被害が大きく

表3 年代別被害関数のパラメータ

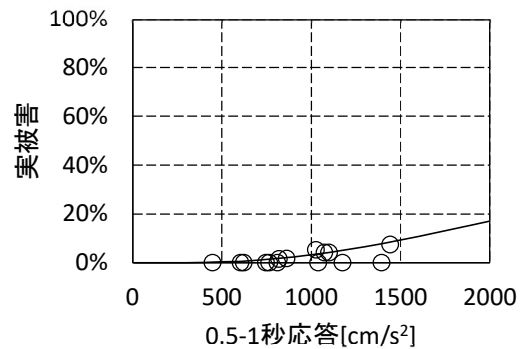
| | 1960年代 | 1970年代 | 1980年代 |
|----------|--------|--------|--------|
| α | 3.66 | 1.25 | 2.96 |
| β | -11.04 | -5.08 | -10.73 |
| 周期帯 | 1.5-2秒 | 1-1.5秒 | 0.5-1秒 |



(a) 1960年代



(b) 1970年代



(c) 1980年代

図6 年代別被害関数と実被害の対応

出たとみられるが、建築年代以外のどのような要因が耐力を低下させているのかを分析するためのデータが無いため、誤差要因についてこれ以上の考察は控える。K-NET 穴水については、観測点周辺に商店のような大きな開口を有する建物が多い⁹⁾ ことで比較的耐力の低い建物が多かった可能性があり、こうした建物の特徴を考慮することで、実被害との対応が改善する可能性があると考えられる。

また、年代別被害率を各年代の建物棟数で重み付けして求めた 3 年代全体の被害率を図 8 に示す。図 8 から、年代別被害関数は従来の被害関数より精度が向上していることが確認できる。したがって、建築年代によって異なる周期帯の応答を用いることで、被害推定の精度が向上することがわかった。

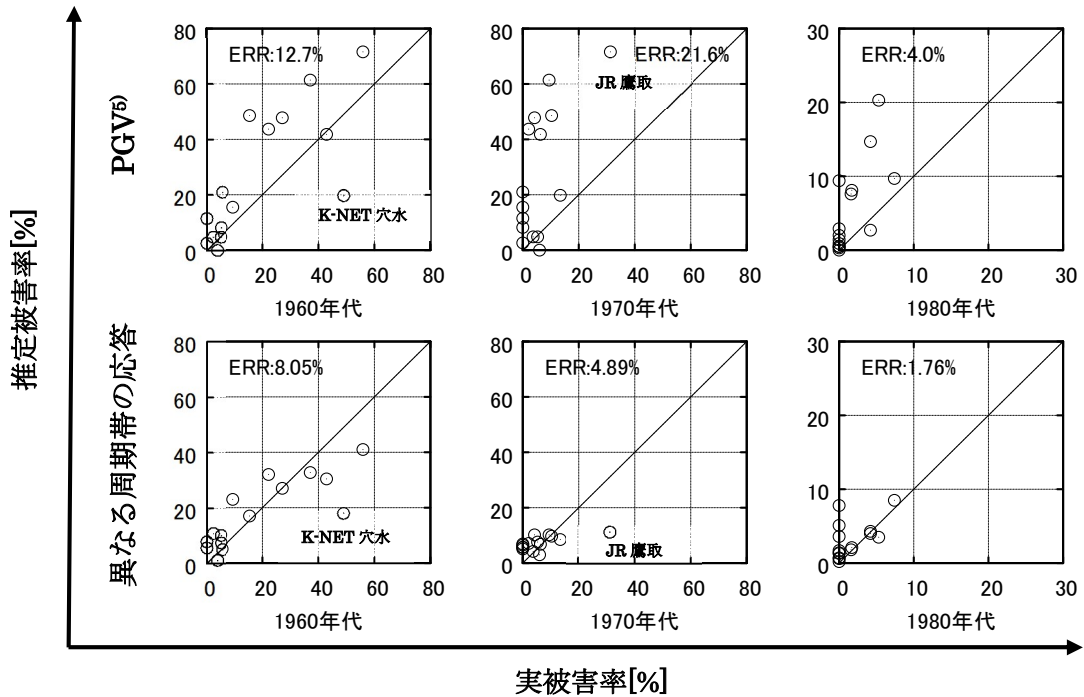


図7 年代別実被害率と被害関数の対応

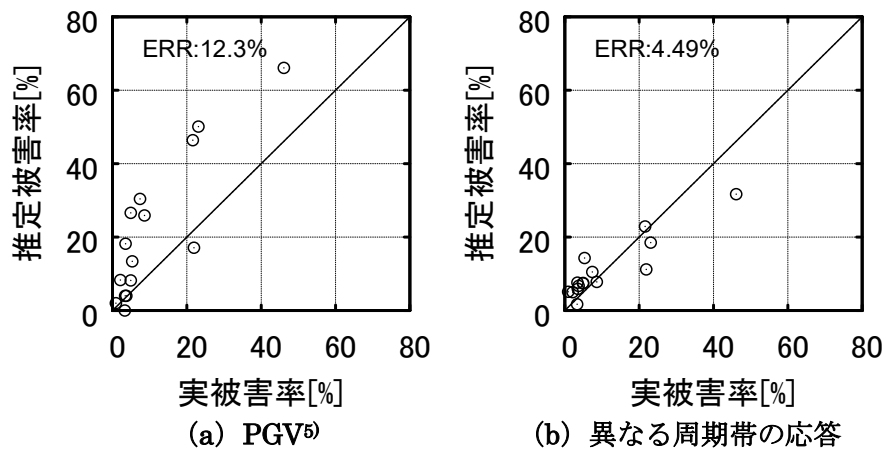


図8 実被害率と被害関数の対応

2.4 まとめ

建物の性能が建築年代によって異なるため、等価周期の応答を用いる被害関数を建築年代別に作ることで被害推定の精度を向上するための検討を行った。まず、強震観測点周辺の建物被害率と相関の高い周期帯を建築年代別に調べたところ、被害と相関の高い周期帯は建築年代によって異なることがわかった。そこで、建築年代によって異なる周期帯の弾性加速度応答を用いて被害関数を構築し、従来の年代別被害関数よりも精度が向上することを確認した。

参考文献

- 1) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2299-2304, 1994.
- 2) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 川瀬博: 1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第494号, pp.59-66, 1997.4.
- 3) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志: 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測ーその2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例ー, 日本建築学会構造系論文集, 第505号, pp.53-59, 1998.3.
- 4) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第65巻, 第527号, pp.189-196, 2000.1.
- 5) 翠川 三郎, 伊東 佑記, 三浦 弘之: 兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討日本地震工学会論文集, 第11巻, 第4号, pp.34-47, 2011.
- 6) 村瀬 詩織, 大村 早紀, 杉野 未奈, 林 康裕: 2016年熊本地震における地震動特性と木造住宅の倒壊率の関係, 日本地震工学会論文集, 第18巻, 第2号, pp.147-165, 2018.5.
- 7) 境有紀: 建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討ー2007年能登半島地震, 新潟県中越沖地震のデータを加えてー, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第642号, pp.1531-1536, 2009.8
- 8) 境有紀, 飯塚裕暁: 非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした平均的な木造建物群モデルの構築, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, pp.32-45, 2009.3.
- 9) Nakazawa, S. and Sakai, Y: Improvement of Fragility Curves by Classifying Building Category, The 17th World Conference on Earthquake Engineering, 6a-0014, 2020.9.

第3章 地震発生時の降伏耐力で建物を分類した建物被害推定

3.1 背景

第2章では、木造建物の性能が建築年代によって異なるとの考えに基づいて、建物被害と関連の高い周期帯を建築年代別に調べ、建築年代によって異なる周期帯の加速度応答を用いる被害関数を作成した。しかし、木造建物の性能は経年劣化に伴って低下することが指摘されており^{1)~3)}など、同じ1980年代の建物でも、1995年兵庫県南部地震と2016年熊本地震では、約20年の経年によって地震発生時の建物の性能に差が生じていると考えられる。

また、2018年北海道胆振東部地震のK-NET 鶴川では、観測点周辺で全壊率6.3%の被害が生じていた⁴⁾が、この全壊率は強震記録の1-1.5秒応答から被害関数⁵⁾を用いて推定した全壊率15.7%の半分以下である。この理由として、観測点周辺の建物に瓦屋根を使用したものがないことから、日本の平均的な建物と比べて比較的耐力の高い建物が多かった可能性がある。また、大きな被害を受けた建物は2階建てで1階が店舗として使用されていたと考えられる建物に集中しており、周辺の平屋や住宅として使用されていた2階建て建物に大きな被害を受けたものは見られなかった。この特徴的な被害を再現するためには、2階建てで重量が重い建物や間口に大きな開口部を有するために壁が少ない建物と、平屋で重量が軽い建物や壁が十分に入った建物を分けて考える必要がある。

そこで本章では、経年劣化による建物性能の劣化を考慮しつつ、階数・屋根葺材・大開口の有無といった建物性能に影響を与えると考えられるパラメータによって建物を複数のカテゴリに分類し、地震発生時の耐力で建物をグループわけすることで、被害推定の精度を向上する検討を行った。

3.2 経年劣化とカテゴリを考慮した地震発生時の降伏耐力推

定手法

3.2.1 経年劣化による耐力低下の設定

本章では、経年劣化により建物の降伏耐力が低下するものとして、建物性能の変化を考慮する。降伏耐力の経年に伴う低下の考慮には、図9に示す三木・境⁶⁾による経年劣化モデルを用いる。三木・境の経年劣化モデルに、建築年代とカテゴリ別の初期降伏耐力を与えることで、地震発生時の建築年代とカテゴリ別の降伏耐力を推定する。建築年代とカテゴリ別の初期降伏耐力を求める手順を以下に示す。

3.2.2 建築年代別の建築時の降伏耐力

各年代における建築時の初期降伏耐力は、図10に示す三木⁷⁾が文献8)~20)より収集した各年代の壁量充足率（現行の建築基準法で定められた必要壁量に対する存在壁量）から求

めた結果を用いる。この検討では、充足率が 1981 年の建築基準法改正前後で 2 段に変化する耐震規定モデルを仮定している。このとき、1960 年代と 1970 年代の充足率は 0.88、1980 年代の充足率は 1.29 となる。求めた年代別充足率に、Shiomitsu et al²¹⁾による壁量充足率から降伏耐力を求める係数 0.73 を乗ずることで、建築年代別の降伏耐力を求めている。建築基準法では、壁量充足率を 0.2 倍することで降伏耐力を求めるが、このときの降伏耐力は耐力壁のみの壁量から計算され、石膏ボード等の非構造部材を考慮しない値となっており、実際の建物の降伏耐力は更に大きいと考えられる。そこで、汐満らは、内壁・外壁といった仕上げまで施された実大実験の結果から求めた壁量充足率と実際の降伏耐力の関係を調べ、実際の降伏耐力が壁量充足率の 0.73 倍という関係を導いている。よって本研究では三木⁷⁾同様壁量充足率を 0.73 倍することで各年代の降伏耐力を設定した。

3.2.3 建物のカテゴリによる耐力の違い

建物の重量が増えれば地震時荷重は大きくなり、壁量が少なくなれば建物の強度は低下する。そこで、屋根仕様・階数という重量に影響を与えるパラメータと、大きな開口部の有無という壁量に影響を与えるパラメータの 3 パラメータを用いて、強震観測点周辺の建物を 8 カテゴリに細分化した。

カテゴリ別の耐力比は、早川による検討²²⁾結果を用いた。この検討では、屋根仕様と階数ごとの耐力比を、耐震診断に用いる必要壁量(表 4²³⁾)より決定している。日本の木造建物は重い屋根で 2 階建てのものが多くことから、表 5 右下を基準として、屋根仕様と階数ごとの耐力比は表 6 のように求まる。

表 5 屋根葺材と階数別の必要壁量

| | 軽い屋根 | 重い屋根 |
|----|------|------|
| 1階 | 0.28 | 0.40 |
| 2階 | 0.83 | 1.06 |

表 6 屋根葺材と階数別の耐力比

| | 軽い屋根 | 重い屋根 |
|----|------|------|
| 1階 | 3.79 | 2.65 |
| 2階 | 1.27 | 1.00 |

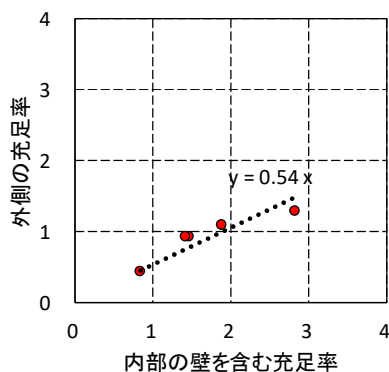


図 11 外壁と全体の壁量充足率の関係

次に、大開口の有無による耐力比を、被害調査で収集した建物の外観写真より決定する。実大試験体の平面図が記載された文献^{24)~28)}より、建物の外壁のみの壁量と全体の壁量の間関係を調べたところ、図 11 に示すように、外壁の壁量充足率は全体の壁量充足率の 0.54 倍となることがわかった。そこで、開口が大きい建物の外壁が開口の小さい建物と比較してどの程度少ないかを調べることで、全体的な耐力の比率を推定する。ただし、外観から耐力壁か

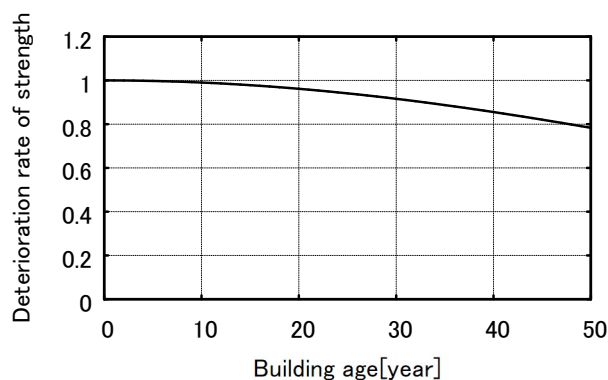


図 9 耐力低下モデル (三木・境)⁸⁾

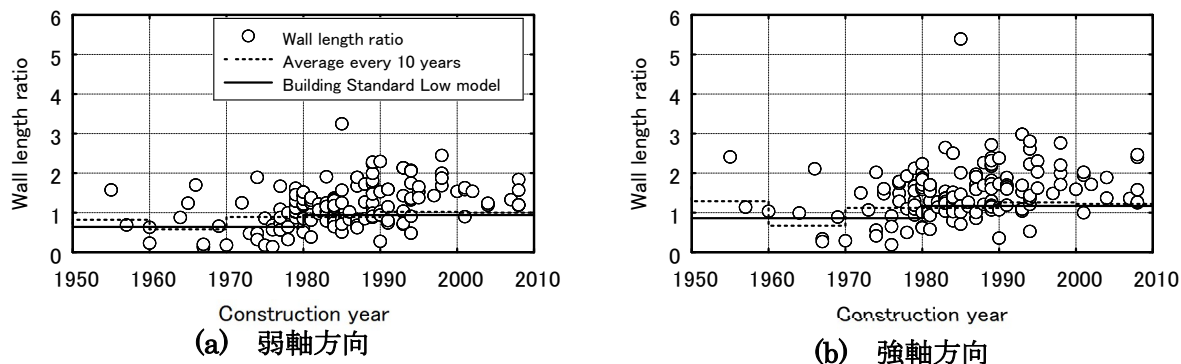
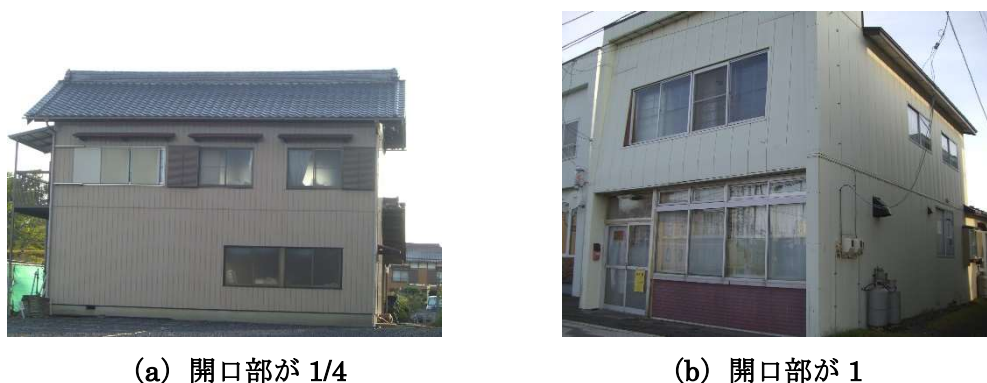


図 10 建築年と壁量充足率の関係^{7)~20)}

非耐力壁か、耐力壁ならば筋交いか構造用合板かといったことは判断できないため、本章で行った外観調査は壁＝耐力壁と単純化している。

次に、大開口の有無でどの程度耐力に差が生じるかを設定するため、表 3 に示す様々な強震観測点周辺の建物について、1 階部分の壁面積のうち開口部の占める割合を調べた。図 12 に判定結果の例を示す。表 7 に、強震観測点周辺（観測点から半径 200m 円内）の建物の写真判定結果を示す。開口部の面積について重み付け平均を求めた結果、開口が大きい建物の間口に存在する壁量は、開口が小さい建物の 0.42 倍であることがわかった。この結果を図 11 と合わせると、開口が大きい建物では、全体の壁量の 0.54 倍である外壁部分の壁量が、開口が小さい建物の 0.42 倍となる。したがって、開口が大きい建物の壁量は $(0.54 \times 0.42) + 0.46$ より、開口が小さい建物の 0.69 倍と設定した。以上の条件で設定した、屋根仕様・階数・開口によるカテゴリ別の耐力比を表 8 に示す。表 7 より、開口の小さい建物の方が多いことから、重い屋根で 2 階建てのものが多くことと合わせて「重い屋根で 2 階建ての開口が小さい建物」の耐力を基準としている。



(a) 開口部が 1/4

(b) 開口部が 1

図 12 開口部の判定例

表 7 開口の大きさごとの建物棟数

| 地震 | 観測点 | 小開口 | | | 大開口 | | |
|-----------------|-----------|-------|---------|-------|---------|---------|-------|
| | | 1/4以下 | 1/4~1/3 | 1/2以下 | 1/2~2/3 | 2/3~3/4 | 3/4以上 |
| 2004年新潟県中越地震 | 川口町震度計 | 12 | 25 | 42 | 10 | 16 | 9 |
| | JMA小千谷 | 25 | 15 | 42 | 10 | 9 | 14 |
| 2007年能登半島地震 | JMA輪島 | 42 | 49 | 87 | 21 | 28 | 29 |
| | K-NET穴水 | 23 | 28 | 54 | 7 | 19 | 34 |
| | K-NET輪島 | 53 | 65 | 45 | 4 | 23 | 12 |
| 2007年新潟県中越沖地震 | K-NET柏崎 | 69 | 47 | 28 | 2 | 3 | 5 |
| | 柏崎震度計 | 16 | 11 | 11 | 0 | 5 | 7 |
| 2011年東北地方太平洋沖地震 | K-NET小川 | 37 | 39 | 19 | 5 | 10 | 7 |
| | JMA古川 | 70 | 26 | 44 | 10 | 20 | 26 |
| 2016年熊本地震 | KiK-net益城 | 103 | 61 | 42 | 2 | 3 | 1 |
| | 益城町震度計 | 47 | 29 | 26 | 1 | 3 | 2 |
| 2018年北海道胆振東部地震 | K-NET鶴川 | 56 | 17 | 14 | 2 | 7 | 6 |

表 8 屋根仕様と階数ごとの必要壁量

| | 開口が小さい | | 開口が大きい | |
|-----|--------|------|--------|------|
| | 軽い屋根 | 重い屋根 | 軽い屋根 | 重い屋根 |
| 1 階 | 3.79 | 2.65 | 2.62 | 1.83 |
| 2 階 | 1.28 | 1.00 | 0.88 | 0.69 |

3.2.4 地震発生時のカテゴリ別降伏耐力

表 9 の強震観測点周辺の建物を対象に、上記の方法で経年劣化による耐力低下とカテゴリの違いによる耐力比を考慮して求めた、1960～1980 年代までの 3 年代 8 カテゴリの地震発生時の降伏耐力 C_y を、カテゴリ別の被害率 D_w ・建物棟数 N_i とともに表 10 に示す。

表 10 の C_y を地震発生時の平均 C_y とし、変動係数を与えることで、地震発生時の耐力分布を対数正規分布で近似した建物群モデルを構築できる。従来の平均的な耐力分布に従う建物群モデルでは、変動係数を 0.5 として耐力分布を与えたが、Shiomitsu et al²¹⁾の検討より、建物の壁量充足率の変動係数は建築年代別によって異なることがわかっている。そこで、図 4(a)に示す壁量充足率を建築年代とカテゴリによって細分化し、カテゴリ別の変動係数を与えることを考えた。ただし、壁量充足率のデータセットは全て 2 階建て建物であるため、屋根仕様と大開口の有無についてのみ検討を行う。

表 9 強震観測点周辺の年代別木造全壊率

| 地震 | 観測点 | コード | 木造全壊率 | | | |
|---------------|-----------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 1960年代 | 1970年代 | 1980年代 | 合計 |
| 2004年新潟県中越 | JMA小千谷 | ngcojj | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| 2007年能登半島 | JMA輪島 | nthjwj | 10.1% | 0.0% | 0.0% | 5.3% |
| | K-NET穴水 | nthkan | 42.1% | 12.3% | 4.0% | 21.9% |
| | K-NET輪島 | nthkwj | 4.3% | 4.7% | 0.0% | 3.3% |
| 2007年新潟県中越沖 | K-NET柏崎 | ncokzk | 16.7% | 2.0% | 1.7% | 3.3% |
| | 柏崎震度計 | ncokzs | 36.8% | 5.5% | 1.5% | 7.9% |
| 2011年東北地方太平洋沖 | K-NET小川 | ttokog | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| | JMA古川 | ttojfr | 1.4% | 4.4% | 0.0% | 2.5% |
| 2016年熊本 | KiK-net益城 | kmmkms | 12.0% | 6.4% | 6.3% | 7.4% |
| 2018年北海道胆振東部 | K-NET鷓川 | hkdmkw | 23.5% | 9.5% | 3.8% | 11.8% |

表 10 地震発生時のカテゴリ別降伏耐力
(a)1960年代

| 1960s | | カテゴリ | | | | | | | | 年代棟数 |
|--------|----|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| ngcojj | Dw | | 0.0% | | | 0.0% | | | 0.0% | 17 |
| | Cy | | 1.46 | | | 2.09 | | | 1.23 | |
| | Ni | | 1 | | | 9 | | | 7 | |
| nthkwj | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 13.0% | 0.0% | 20.0% | 0.0% | | 62 |
| | Cy | 0.54 | 1.43 | 0.69 | 0.32 | 2.04 | 0.84 | 0.41 | | |
| | Ni | 31 | 7 | 2 | 15 | 1 | 5 | 1 | | |
| nthkan | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 13.0% | 0.0% | 20.0% | 0.0% | 0.0% | 57 |
| | Cy | 0.54 | 1.43 | 0.69 | 0.32 | 2.04 | 0.84 | 0.41 | 1.20 | |
| | Ni | 15 | 4 | 3 | 25 | 2 | 2 | 1 | 5 | |
| nthjwj | Dw | 5.0% | 33.0% | 0.0% | 18.0% | | 33.0% | 0.0% | 0.0% | 129 |
| | Cy | 0.54 | 1.43 | 0.69 | 0.32 | | 0.84 | 0.41 | 1.20 | |
| | Ni | 80 | 6 | 2 | 33 | | 3 | 4 | 1 | |
| ncokzk | Dw | 50.0% | | 0.0% | 0.0% | | | | | 14 |
| | Cy | 0.54 | | 0.69 | 0.32 | | | | | |
| | Ni | 8 | | 5 | 1 | | | | | |
| ncokzs | Dw | 80.0% | 0.0% | 0.0% | 40.0% | | | 0.0% | | 20 |
| | Cy | 0.54 | 1.43 | 0.69 | 0.32 | | | 0.41 | | |
| | Ni | 5 | 2 | 2 | 10 | | | 1 | | |
| ttojfr | Dw | 17.0% | 0.0% | 9.0% | 0.0% | 0.0% | | 0.0% | 0.0% | 74 |
| | Cy | 0.52 | 1.38 | 0.67 | 0.31 | 1.97 | | 0.39 | 1.16 | |
| | Ni | 6 | 4 | 22 | 1 | 16 | | 17 | 8 | |
| ttokog | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 37 |
| | Cy | 0.52 | 1.38 | 0.67 | 0.31 | 1.97 | 0.81 | 0.39 | 1.16 | |
| | Ni | 5 | 6 | 8 | 2 | 10 | 2 | 2 | 2 | |
| kmmkms | Dw | 9.0% | 18.0% | | | | 0.0% | 0.0% | | 25 |
| | Cy | 0.50 | 1.32 | | | | 0.78 | 0.37 | | |
| | Ni | 11 | 11 | | | | 2 | 1 | | |
| hkdmkw | Dw | | | 0.0% | | 0.0% | | 67.0% | | 17 |
| | Cy | | | 0.62 | | 1.84 | | 0.37 | | |
| | Ni | | | 5 | | 6 | | 6 | | |

表 10 (b)1970年代

| 1970s | | カテゴリ | | | | | | | | 年代棟数 |
|--------|----|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| ngcojj | Dw | | 0.0% | | | 0.0% | 0.0% | | 0.0% | 43 |
| | Cy | | 1.56 | | | 2.23 | 0.92 | | 1.32 | |
| | Ni | | 7 | | | 28 | 3 | | 5 | |
| nthkwj | Dw | 0.0% | 12.0% | 0.0% | 11.0% | 0.0% | 0.0% | 33.0% | | 74 |
| | Cy | 0.58 | 1.53 | 0.74 | 0.34 | 2.19 | 0.91 | 0.44 | | |
| | Ni | 34 | 8 | 5 | 18 | 4 | 2 | 3 | | |
| nthkan | Dw | 8.0% | 0.0% | 27.0% | 17.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 72 |
| | Cy | 0.58 | 1.53 | 0.74 | 0.34 | 2.19 | 0.91 | 0.44 | 1.29 | |
| | Ni | 36 | 3 | 11 | 12 | 1 | 1 | 7 | 1 | |
| nthjwj | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | | | 0.0% | | 79 |
| | Cy | 0.58 | 1.53 | 0.74 | 0.34 | | | 0.44 | | |
| | Ni | 60 | 3 | 2 | 11 | | | 3 | | |
| ncokzk | Dw | 3.0% | | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 50 |
| | Cy | 0.58 | | 0.74 | 0.34 | 2.19 | 0.91 | 0.44 | 1.29 | |
| | Ni | 29 | | 9 | 6 | 2 | 1 | 2 | 1 | |
| ncokzs | Dw | 4.0% | 0.0% | 12.0% | 7.0% | | | 0.0% | | 55 |
| | Cy | 0.58 | 1.53 | 0.74 | 0.34 | | | 0.44 | | |
| | Ni | 24 | 2 | 8 | 15 | | | 6 | | |
| ttojfr | Dw | 0.0% | | 0.0% | 25.0% | 0.0% | | 15.0% | 0.0% | 91 |
| | Cy | 0.56 | | 0.72 | 0.33 | 2.14 | | 0.43 | 1.26 | |
| | Ni | 7 | | 44 | 4 | 14 | | 20 | 2 | |
| ttokog | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 45 |
| | Cy | 0.56 | 1.49 | 0.72 | 0.33 | 2.14 | 0.88 | 0.43 | 1.26 | |
| | Ni | 8 | 1 | 11 | 6 | 9 | 2 | 3 | 5 | |
| kmmkms | Dw | 4.0% | 0.0% | 33.0% | 50.0% | 0.0% | 0.0% | | | 47 |
| | Cy | 0.54 | 1.44 | 0.70 | 0.32 | 2.06 | 0.85 | | | |
| | Ni | 25 | 14 | 3 | 2 | 2 | 1 | | | |
| hkdmkw | Dw | | | 0.0% | | 0.0% | | 33.0% | 0.0% | 21 |
| | Cy | | | 0.68 | | 2.02 | | 0.40 | 1.19 | |
| | Ni | | | 8 | | 6 | | 6 | 1 | |

表 10 (c)1980 年代

| 1980s | | カテゴリ | | | | | | | | 年代棟数 |
|--------|----|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| ngcojj | Dw | | 0.0% | | | 0.0% | 0.0% | | 0.0% | 31 |
| | Cy | | 2.40 | | | 3.44 | 1.42 | | 2.03 | |
| | Ni | | 4 | | | 19 | 1 | | 7 | |
| nthkwj | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | | 0.0% | 0.0% | | 42 |
| | Cy | 0.90 | 2.38 | 1.15 | 0.53 | | 1.40 | 0.68 | | |
| | Ni | 22 | 3 | 4 | 11 | | 1 | 1 | | |
| nthkan | Dw | 0.0% | | 0.0% | 25.0% | | | 0.0% | 0.0% | 25 |
| | Cy | 0.90 | | 1.15 | 0.53 | | | 0.68 | 2.00 | |
| | Ni | 12 | | 5 | 4 | | | 3 | 1 | |
| nthjwj | Dw | 0.0% | | 0.0% | 0.0% | | | 0.0% | | 35 |
| | Cy | 0.90 | | 1.15 | 0.53 | | | 0.68 | | |
| | Ni | 30 | | 3 | 1 | | | 1 | | |
| ncokzk | Dw | 3.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | | | 0.0% | | 59 |
| | Cy | 0.90 | 2.38 | 1.15 | 0.53 | | | 0.68 | | |
| | Ni | 30 | 4 | 16 | 6 | | | 3 | | |
| ncokzs | Dw | 0.0% | | 0.0% | 0.0% | | | 25.0% | | 65 |
| | Cy | 0.90 | | 1.15 | 0.53 | | | 0.68 | | |
| | Ni | 45 | | 8 | 8 | | | 4 | | |
| ttojfr | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | | 0.0% | | 0.0% | 0.0% | 37 |
| | Cy | 0.88 | 2.33 | 1.13 | | 3.34 | | 0.66 | 1.97 | |
| | Ni | 4 | 1 | 23 | | 3 | | 5 | 1 | |
| ttokog | Dw | 0.0% | 0.0% | 0.0% | | 0.0% | 0.0% | 0.0% | | 31 |
| | Cy | 0.88 | 2.33 | 1.13 | | 3.34 | 1.38 | 0.66 | | |
| | Ni | 6 | 7 | 5 | | 9 | 2 | 2 | | |
| kmmkms | Dw | 3.0% | 0.0% | 11.0% | 50.0% | 0.0% | | | | 63 |
| | Cy | 0.86 | 2.27 | 1.10 | 0.50 | 3.24 | | | | |
| | Ni | 33 | 6 | 19 | 2 | 3 | | | | |
| hkdmkw | Dw | | | 0.0% | | 0.0% | | 20.0% | 0.0% | 26 |
| | Cy | | | 1.08 | | 3.20 | | 0.64 | 1.89 | |
| | Ni | | | 12 | | 8 | | 5 | 1 | |

表 10 (d) 各カテゴリのパラメータ

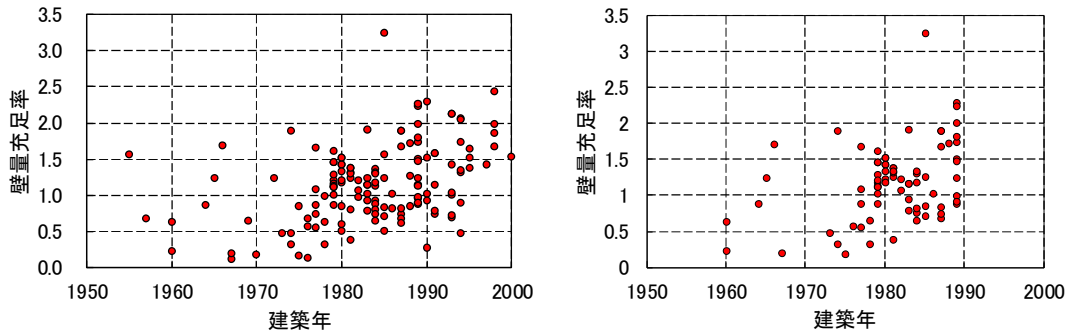
| category | parameters | | |
|----------|------------|-------|-----------------|
| | story | roof | opening in wall |
| 1 | 2 | heavy | normal |
| 2 | 1 | heavy | normal |
| 3 | 2 | light | normal |
| 4 | 2 | heavy | large |
| 5 | 1 | light | normal |
| 6 | 1 | heavy | large |
| 7 | 2 | light | large |
| 8 | 1 | light | large |

本研究において大開口と判定するためには建物の外観写真を用いたが、図 13(a)の壁量充足率のデータセットに含まれる建物の外観は不明である。そこで、被害調査で収集した建物の中で、大開口・小開口と判定した建物がどれだけ存在したかを調べ、その割合に応じて壁量充足率のデータセットを分けることにした。表 11 に、開口の判定を行った建物について、開口の大小別の建物棟数を示す。大開口建物の棟数は全体の 21%であることから、カテゴリわけに必要な情報が含まれるデータを抽出した図 13(b)のデータセットのうち、壁量充足率の下位 21%までの建物を大開口として検討を行った。なお、データの抽出前後で建築年代別の変動係数を比較した図 14 より、抽出後もデータセットの傾向は保たれていることが確認でき、抽出後のデータセットから求めたカテゴリ別変動係数を全体に適用しても問題はないと考えられる。

表 11 強震観測点周辺の開口判定結果

| 地震 | 観測点 | 小開口 | 大開口 |
|-----------------|-----------|------|-----|
| 2004年新潟県中越地震 | 川口町震度計 | 79 | 35 |
| | JMA小千谷 | 82 | 33 |
| 2007年能登半島地震 | JMA輪島 | 178 | 78 |
| | K-NET穴水 | 105 | 60 |
| | K-NET輪島 | 163 | 39 |
| 2007年新潟県中越沖地震 | K-NET柏崎 | 144 | 10 |
| | 柏崎震度計 | 38 | 12 |
| 2011年東北地方太平洋沖地震 | K-NET小川 | 95 | 22 |
| | JMA古川 | 140 | 56 |
| 2016年熊本地震 | KiK-net益城 | 206 | 6 |
| | 益城町震度計 | 102 | 6 |
| 2018年北海道胆振東部地震 | K-NET鷗川 | 87 | 15 |
| 合計 | | 1419 | 372 |

図 13(b)のデータを対象に、建築年代別にカテゴリ別の変動係数を求め、図 15 に示す。ただし、1960 年代についてはデータが少なく、屋根が重く壁が少ないカテゴリの変動係数しか求まらないため、1970 年代、1980 年代と、年代分けしない場合について示している。壁が多い場合は屋根が軽い方が変動係数は大きいですが、壁が少ない場合は逆に屋根が軽いほうが変動係数は小さい。また、壁が多い場合は建築年代が新しいほうが変動係数は大きく、壁が少ない場合は建築年代が新しいほうが変動係数は小さい。つまり、屋根の重さや壁の量と変動係数の間に何らかの関係があるとは考えられず、カテゴリ別の変動係数を用いるべきと言えるだけの情報が得られない。したがって、本研究においては、図 14 の建築年代別の変動係数を用いてカテゴリ別耐力分布を設定することとした。



(a) 初期ベースシア係数の決定に
用いた充足率分布

(b) カテゴリわけに必要な情報
があるものだけを抽出

図 13 建築年代別充足率分布

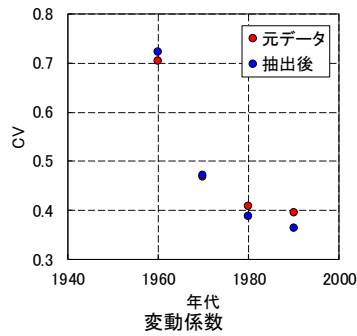
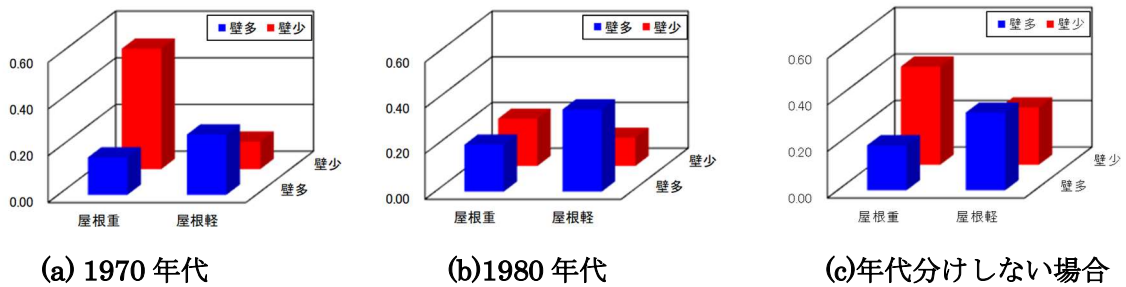


図 14 データ抽出前後の建築年代別変動係数の比較



(a) 1970年代

(b) 1980年代

(c) 年代分けしない場合

図 15 カテゴリ別の変動係数

(1960年代はカテゴリ別変動係数が求まらないため除外)

3.3 経年劣化とカテゴリを考慮した建物群モデルによる解析

と実被害の対応

表 13 の観測点を対象に、上記の手法で推定した地震発生時のカテゴリ別耐力分布を用いて非線形建物群モデルによる解析を行い、カテゴリ分けを行うことで被害推定の精度が向上するか検証を行った。復元力特性は図 16 に示す修正 Takeda-Slip モデル²⁹⁾を用い、パラメータは文献 30)より表 12 に示す値を与えた。計算の手順を以下に示す。

- 1) ある年代においてカテゴリ別に耐力分布を作り、解析被害率 D_i を求める
- 2) カテゴリ別解析被害率 D_i に、表 10(a)~(c)に示すカテゴリ別棟数 N_i で重み付けを行い、その年代の解析被害率 D_y を求める

$$D_y = (\sum_{i=1}^8 D_i \times N_i) / \sum_{i=1}^8 N_i \quad (i: \text{カテゴリ } 1 \sim 8 \text{ を示す})$$

- 3) 2 で求めた年代別被害率に、表 10(a)~(c)の年代別建物棟数で重み付けすることで、全体の被害率を求める

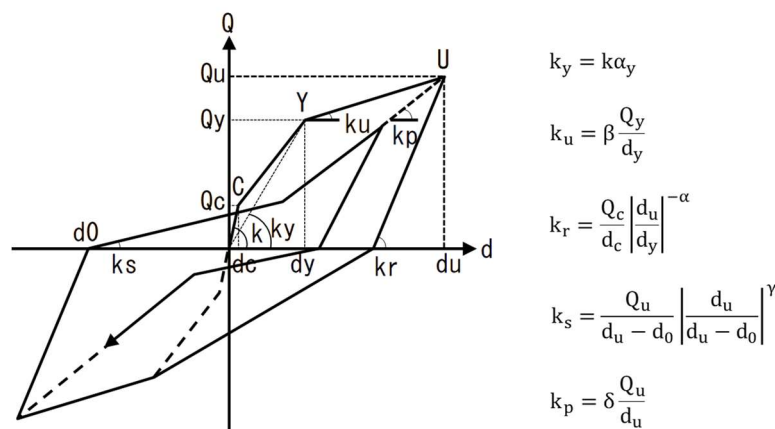


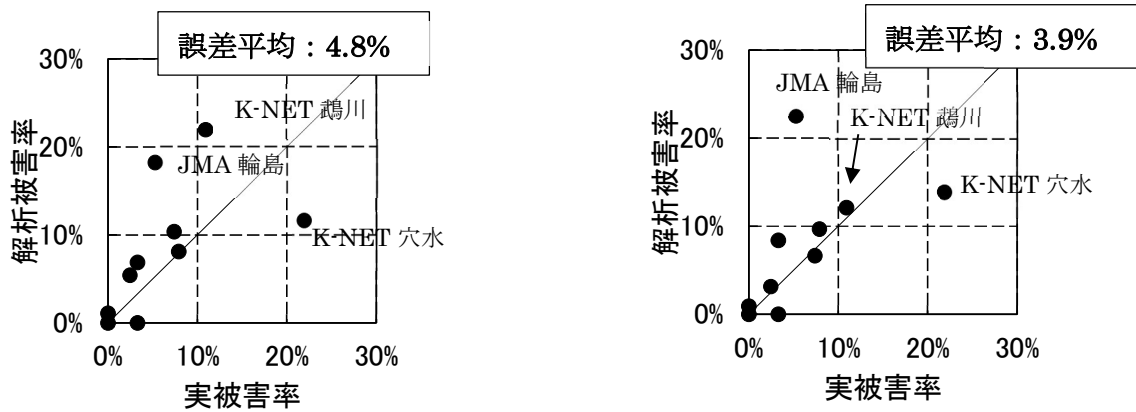
図 16 修正 Takeda-Slip モデル²⁹⁾

表 12 修正 Takeda-Slip モデルのパラメータ

| α_y | Q_y/Q_c | α | β | γ | δ |
|------------|-----------|----------|---------|----------|----------|
| 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.15 | 3.0 | 1.0 |

表 13 強震観測点周辺の木造全壊率

| 地震 | 観測点 | コード | 木造全壊率 | | | |
|---------------|-----------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 1960年代 | 1970年代 | 1980年代 | 合計 |
| 2004年新潟県中越 | JMA小千谷 | ngcoij | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| | JMA輪島 | nthjwj | 10.1% | 0.0% | 0.0% | 5.3% |
| 2007年能登半島 | K-NET穴水 | nthkan | 42.1% | 12.3% | 4.0% | 21.9% |
| | K-NET輪島 | nthkwj | 4.3% | 4.7% | 0.0% | 3.3% |
| 2007年新潟県中越沖 | K-NET柏崎 | ncokzk | 16.7% | 2.0% | 1.7% | 3.3% |
| | 柏崎震度計 | ncokzs | 36.8% | 5.5% | 1.5% | 7.9% |
| 2011年東北地方太平洋沖 | K-NET小川 | ttokog | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| | JMA古川 | ttojfr | 1.4% | 4.4% | 0.0% | 2.5% |
| 2016年熊本 | KiK-net益城 | kmmkms | 12.0% | 6.4% | 6.3% | 7.4% |
| 2018年北海道胆振東部 | K-NET鶴川 | hkdmkw | 23.5% | 9.5% | 3.8% | 11.8% |



(a) 経年劣化を考慮した年代別耐力分布 (b) 経年劣化・カテゴリ分けを考慮した耐力分布

図 17 実被害と解析被害率の対応

解析被害率は、降伏層間変計画 $1/120\text{rad}$ と全壊に相当する層間変形角 $1/15\text{rad}$ ³¹⁾ より塑性率 8 以上となった場合を全壊として算出した。表 13 の強震観測点を対象に求めた解析被害率の、実被害との対応を図 17 に示す。KiK-net 益城については、前震+本震を連続して入力して解析を行った。誤差の絶対値の平均から求めた誤差平均は、経年劣化とカテゴリ分けを考慮することで低下しており、実被害率との対応が良くなったことがわかる。

軽量の屋根と平屋の建物が多いことから、建物をカテゴリ分けすることを思いつくきっかけとなった K-NET 鷗川について見ると、経年劣化のみを考慮した耐力分布を用いた場合に比べカテゴリ分けを行った耐力分布では実被害との対応が改善していることがわかる。K-NET 鷗川のほか K-NET 穴水でも誤差が大きいが、この観測点では観測点周辺の建物に大きな開口を有する建物が多いために、実際の建物群では解析で用いた建物群よりも耐力の低い建物が多かった可能性がある。K-NET 穴水と、その他 6 観測点について、各カテゴリの建物がどの程度存在するかを調べると、図 18 に示すように、K-NET 穴水では壁が少ない建物が他の観測点の 2 倍ほど存在し、特に屋根瓦によって重量が重く壁が少ない建物が多い事がわかる。図 17 を見ると、経年劣化のみを考慮した年代別耐力分布に比べて K-NET 穴水の誤差は小さくなっており、開口の大きな建物が多いことが K-NET 穴水の誤差の一因であったと考えられるが、K-NET 鷗川に比べて変化は小さく、他の要因で誤差が残っている可能性が考えられる。一方で能登半島地震 JMA 輪島では誤差が拡大しているが、この要因については今

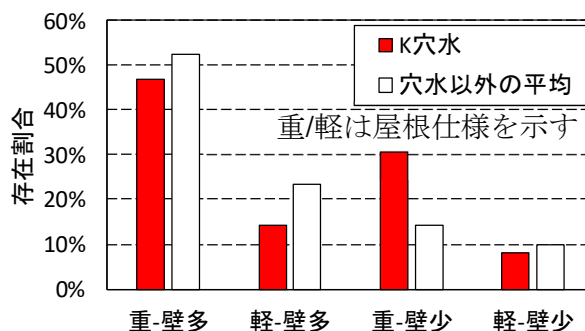


図 18 建物のカテゴリ別存在割合

後の課題としたい。

3.4 地震発生時の耐力別被害関数の作成

経年劣化に加えてカテゴリによる耐力の変化まで考慮することで、実被害との対応が向上することが確認できたが、非線形建物群の解析は地震発生直後の被害推定で用いるには計算負荷が高い。そこで、経年劣化とカテゴリを考慮した被害関数を作成することで、経年劣化とカテゴリを考慮して迅速に被害推定を行うことを考えた。

具体的には、経年劣化とカテゴリを考慮して求めた地震発生時の降伏耐力が同程度になるように実被害データをグループ分けし、地震発生時の耐力と対応する等価周期の弾性加速度応答を説明変数として被害関数のフィッティングを行った。

3.4.1 地震発生時の降伏耐力と対応する地震動強さ

従来の被害関数では、建物被害との相関が高い地震動強さを経験的に選んできた。本研究で用いた 1-1.5 秒応答や、建築年代別の地震動強さ（0.5-1 秒応答，1-1.5 秒応答，1.5-2 秒応答）も、木造建物や中低層非木造建物が被害を受けて塑性化したときの等価周期に対応するという物理的背景はあるものの、被害との相関が高い周期帯を選んだものである。しかし、今回の解析では、地震発生時の降伏耐力が求まることから、等価線形化手法を用いて地震動強さに用いる周期帯を決定することが可能である。すなわち、推定した地震発生時の降伏耐力を持つ非線形系を、等価な周期と減衰の線形系に置換することで、被害と対応する等価周期を経験的にではなく、理論的に決定することができる。以下に、等価線形化手法を用いて地震動強さを求める手順を示す。

非線形の復元力特性には、図 16 に示す修正 Takeda-Slip モデル²⁹⁾を用いた。このとき、建物の降伏耐力 C_y と弾性周期 T の関係は式(4)で表され、この弾性周期を用いて、割線周期 T' は式(5)で表される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h\alpha_y R_y}{C_y g}} \quad (4)$$

$$T' = T \sqrt{\frac{\mu}{(\beta\mu - \beta + 1)\alpha_y}} \quad (5)$$

ここで、 h : 2階建て建物を 1 自由度系に置換したときの等価高さ ($h=4.5$ [m])、 g : 重力加速度 ($g=9.8$ [m/s²])、 R_y : 降伏に相当する層間変形角 1/120[rad]である。

ここで、白井³²⁾の検討により、等価周期を割線周期と等しい値ではなく、等価周期を割線周期の 0.74 倍とした場合に、等価線形化手法を用いて非線形系の必要耐力スペクトルを最もよく再現できることから、式(5)で得られた割線周期を 0.74 倍したものを等価周期とした。

また、等価減衰は式(6)～式(8)で表される。

$$h_{eq} = \frac{B + B^2 \cdot \frac{A}{1-A} \cdot \frac{1}{\mu}}{2\pi\mu} \quad (6)$$

$$A = \left(\frac{\beta}{\beta + \mu} \right)^{\gamma+1} \quad (7)$$

$$B = \mu - \frac{\{(\mu - 1)\beta + 1\} \frac{d_c}{d_y} \mu^\alpha}{Q_c / Q_y} \quad (8)$$

修正 Takeda-Slip モデルのパラメータは、表 12 に示す値を用い、全壊に相当する塑性率 μ は 8 とした。以上の式で求めた等価周期を中心とする 0.5 秒幅の弾性加速度応答スペクトル（減衰定数 h_{eq} ）の平均値を、等価周期応答として被害関数の説明変数に用いる。ここで、等価周期そのものではなく 0.5 秒の幅をとったのは、周期帯にある程度の幅を持たせることで、固有周期の僅かな違いによる応答スペクトルの変化で等価周期応答の値が大きく変わることを防ぐためである。

3.4.2 被害関数の構築と実被害率の対応

表 9 に示している地震発生時の耐力と被害率が紐付けられた実被害データと、地震発生時の耐力に対応する地震動強さを用いて、地震発生時の降伏耐力別被害関数の構築を行った。被害関数は、等価周期応答 A_{eq} と定数 $\alpha \cdot \beta$ を用いて式(9)で表される。

$$D = \Phi(\alpha \log A_{eq} + \beta) \quad (9)$$

地震発生時の耐力 C_y が $0.3 \leq C_y \leq 1.3$ の範囲は、被害関数を作成するために十分な数のデータが含まれるため、この範囲を対象として被害関数を構築した。表 9 のデータを $C_y 0.2$ 刻みでグループ化し、同じグループ内のデータについて、被害率と等価周期応答を用いて式 (9)

表 14 強震観測点周辺の年代別木造全壊率

| 地震 | 観測点 | コード | 木造全壊率 | | | |
|---------------|-----------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 1960年代 | 1970年代 | 1980年代 | 合計 |
| 2004年新潟県中越 | JMA小千谷 | ngcoj | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| 2007年能登半島 | JMA輪島 | nthjwj | 10.1% | 0.0% | 0.0% | 5.3% |
| | K-NET穴水 | nthkan | 42.1% | 12.3% | 4.0% | 21.9% |
| | K-NET輪島 | nthkwj | 4.3% | 4.7% | 0.0% | 3.3% |
| 2007年新潟県中越沖 | K-NET柏崎 | ncokzk | 16.7% | 2.0% | 1.7% | 3.3% |
| | 柏崎震度計 | ncokzs | 36.8% | 5.5% | 1.5% | 7.9% |
| 2011年東北地方太平洋沖 | K-NET小川 | ttokog | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| | JMA古川 | ttojfr | 1.4% | 4.4% | 0.0% | 2.5% |
| 2016年熊本 | KiK-net益城 | kmmkms | 12.0% | 6.4% | 6.3% | 7.4% |
| 2018年北海道胆振東部 | K-NET鷓川 | hkdmkw | 23.5% | 9.5% | 3.8% | 11.8% |

表 15 被害関数のパラメータ

| | $0.9 \leq C_y < 1.3$ | $0.7 \leq C_y < 0.9$ | $0.5 \leq C_y < 0.7$ | $0.3 \leq C_y < 0.5$ |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| α | 0.52 | 0.31 | 0.65 | 1.70 |
| β | -1.14 | -1.55 | -1.39 | -0.65 |

のパラメータを決定した。ただし、 $Cy0.7-0.9$ の関数は、そのままのデータでは加速度応答が大きいほど被害率が低下する非現実的なパラメータとなったため、これを防ぐために加速度応答 0cm/s^2 で被害 0% のデータを 1 点だけ与えた。また、建物棟数が 20 棟未満のデータが多く含まれることから、対数正規分布の累積確率関数とのフィッティングを行う際、各データの建物棟数に基づき重み付けを行った。すなわち、建物棟数が 5 棟のデータよりも建物棟数が 50 棟のデータのほうが実被害率の信頼性が高いので、後者に 10 倍重きを置いたことになる。各グループの被害関数のパラメータを表 14 に、被害関数と実被害率との対応を図 20 に示す。また、推定被害率と実被害率の対応を年代別被害関数と比較して図 21 で示す。図 20, 21 では、建物が 20 棟未満のカテゴリを小さな丸、20 棟以上のカテゴリを大きな丸で示している。全体的にばらつきが大きく、棟数が多いカテゴリに限って実被害との対応を見た場合でも、対応が改善するのは Cy が 0.3 以上 0.7 未満の場合のみである。

建物棟数が 20 棟以上のデータが多い Cy0.5-0.7 の被害関数では精度が向上することから、棟数が少ないデータを用いたことが誤差の一因と考えられる。建物棟数が 20 棟以上のデータについて見ると、Cy0.5-0.7 の被害関数以外では 3 点以下で、被害関数の決定に用いたデータのほとんどは建物棟数が少ないものとなっている。そこで、図 21 の Cy0.5-0.7 の被害関数について、建物棟数が 20 棟以上のデータのみを対象として実被害率と比較すると、建築年代別被害関数では 10.0% だった誤差平均は、耐力別被害関数では 7.3% まで低下している。非線形建物群モデルを用いた場合には、カテゴリ分けを行うことで実被害との対応が向上していることも踏まえると、建物棟数が 20 棟未満と少ないデータを被害関数の作成に用いたことが、

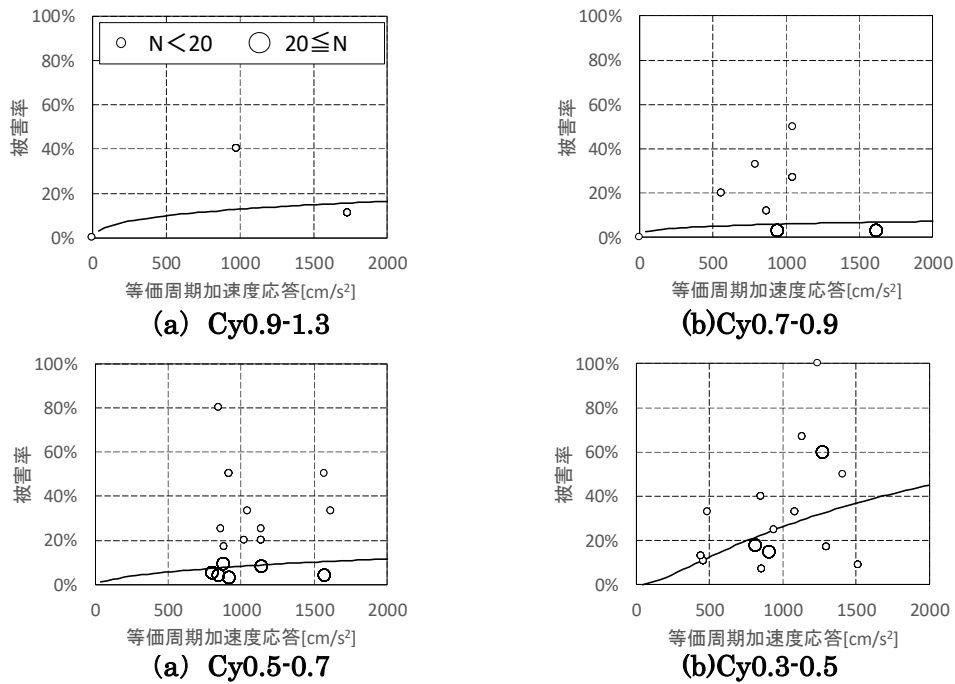


図 20 被害関数と実被害の対応

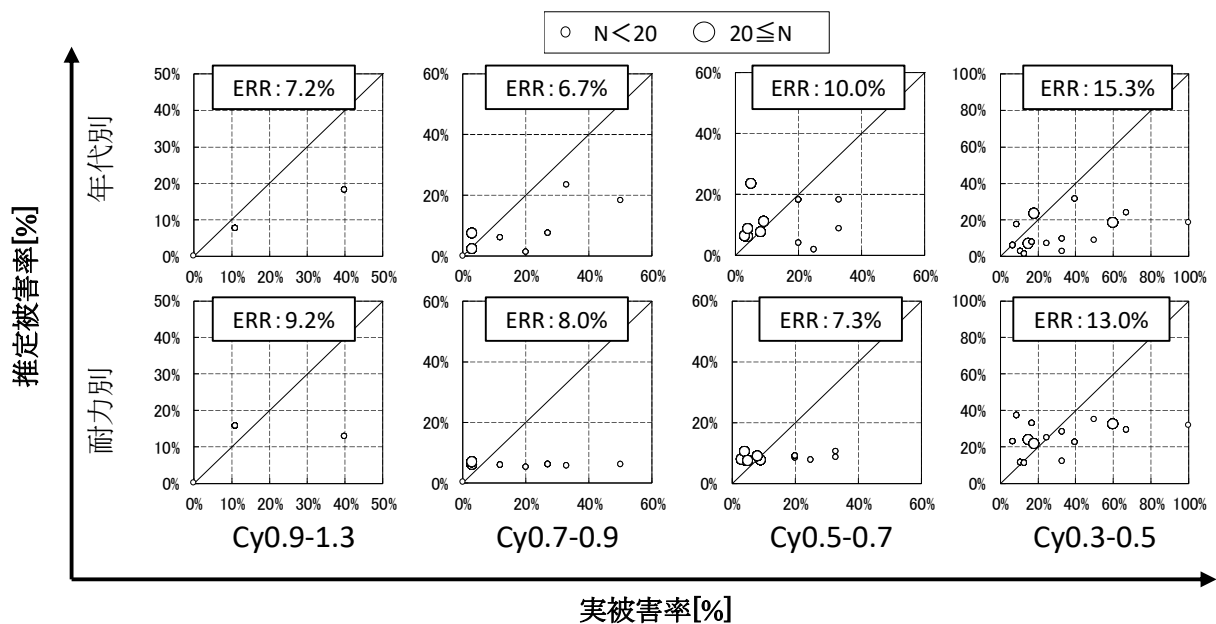


図 21 地震発生時耐力別被害関数の実被害との対応

精度が落ちる要因の一つであると考えられる。しかし、棟数が多いデータだけでは地震発生時の Cy が 0.7 以上の場合に被害関数を作るのに十分な数の実被害データが得られず、広い範囲の Cy について被害推定が不可能になってしまうため、現状では棟数が少ないデータも含めざるを得ない。今後も実被害データの収集を行い、カテゴリ分けを行っても十分な棟数を有する実被害データの数があれば、精度の良い地震時耐力別被害関数の作成が可能になる可能性はあるが、現時点では年代別被害関数の方が良いということになる。

また、等価周期と等価減衰を決定するための非線形復元力特性のパラメータが影響を与えた可能性も考えられる。表 12 で示した復元力特性のパラメータは、平均的な耐力分布を用いた際に実被害との対応が良いもの

地震時耐力別被害関数による被害率の推定方法はやや煩雑であるので、2020 年に地震が発生した場合の、1960 年代に建てられた 2 階建て・軽い屋根・大きな開口の無い建物（カテゴリ 3）を例にとり、以下に手順を示す。

- ① 耐力低下モデルを用いて、2020 年における 1960 年代建物の標準的な建物（カテゴリ 1）の耐力 $Cy1$ を求めると、 $Cy1=0.49$ である。
- ② 耐力 $Cy1$ に、表 4 で示したカテゴリ 3 の係数をかけて耐力 $Cy2$ を求めると、 $Cy2=Cy1*1.28=0.62$ である。従って、 $0.5 \leq Cy < 0.7$ の関数を使用する。
- ③ $Cy2$ に対応する等価周期を式 2~式 6 から求めると 0.6 秒である。減衰定数 he の弾性加速度応答スペクトルから 0.6 秒を中心とする 0.5 秒幅分のスペクトル値を読み取り、被害関数に代入する。

以上で、カテゴリ 3 の被害率が求まる。その他のカテゴリも同様の手順で被害率を求め、各カテゴリの存在割合で重み付けを行うことで、全体的な被害率を求める。各カテゴリに含まれる建物の割合で重み付けを行った推定被害率と、実際の被害率との対応を図 22 に示す。ここで用いた 1-1.5 秒応答の被害関数は、1980 年代までの被害率を対象とするものである。1-1.5 秒応答の被害関数は本来建築年代に関わらず全ての木造建物を対象としているが、1980 年代以前のデータのみを用いて作成した年代別被害関数と、1980 年代以降のデータも用いた 1-1.5 秒応答の被害関数を比較すると、精度の違いがデータセットの違いによるものか、説明変数の違いによるものか分離できない。そこで、条件を揃えて比較を行うために、表 14 の 3 年代の実被害データをもとに 1980 年代までを対象とする 1-1.5 秒応答の被害関数を作成し

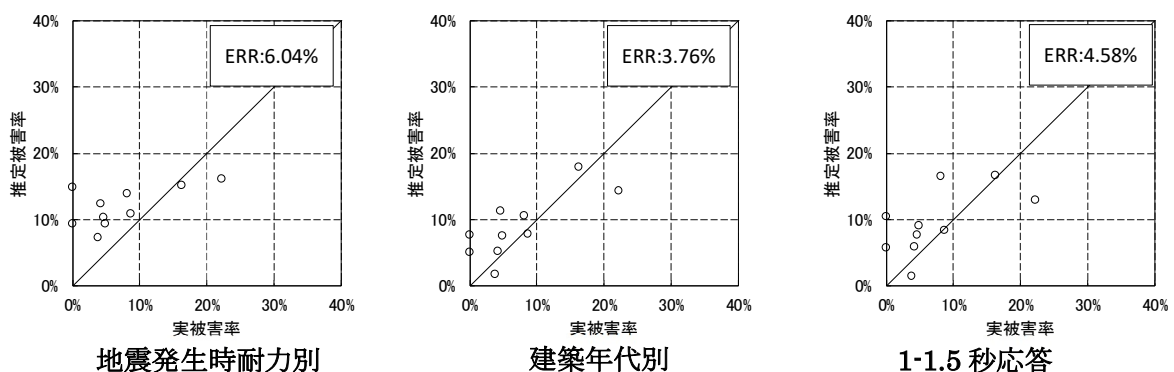


図 22 各被害関数の実被害との対応

て比較を行っている。1980年代までを対象とする1-1.5秒応答の被害関数のパラメータおよび実被害との対応を表16、図23に示す。

図22に示す各被害関数と実被害率の対応を見ると、地震発生時耐力別被害関数の誤差の絶対値の平均は年代別被害関数よりも1%ほど大きくなり、図21と同様に年代別被害関数の方が実被害との対応が良く、1-1.5秒応答の被害関数よりも実被害との対応が悪いという結果になった。

年代別被害関数の方が実被害との対応が良いことに加え、地震発生時の耐力別被害関数は必要となる情報量が多い点にも留意する必要がある。年代別被害関数で必要となる情報は観測点周辺の建物の建築年代のみであったが、カテゴリ分けを行うには個々の建物について「建築年代、階数、屋根仕様、開口部」の情報が必要となり、精度と実用性の両方の面で、現時点では年代別被害関数の方が優れていると言える。将来、十分な建物被害データから地震発生時の耐力別被害関数を再構築して被害推定の精度が向上した場合でも、年代別被害関数と地震発生時耐力別被害関数のどちらを用いるべきかについては、運用に必要な情報量と被害推定精度のバランスから判断する必要があるだろう。

表16 1-1.5秒応答の被害関数のパラメータ

| | 全年代対象 | 1980年代まで対象 |
|----------|-------|------------|
| α | 2.80 | 2.68 |
| β | -9.46 | -9.06 |

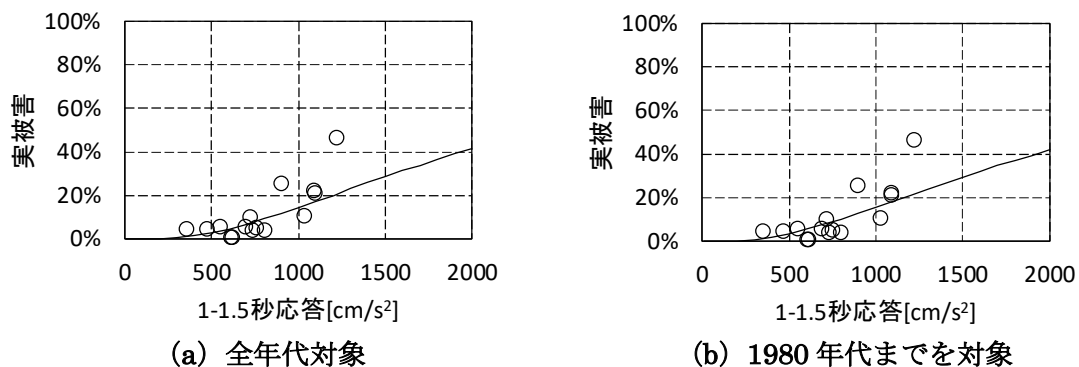


図23 1-1.5秒応答の被害関数と実被害の対応

3.5 まとめ

建物の耐力は、同じ建築年代であっても屋根仕様や階数によって差が生じるため、屋根仕様・階数・開口の有無によって建物をカテゴリ分けした被害推定手法の検討を行った。経年劣化による耐力低下を考慮して、地震発生時の耐力をカテゴリ別に求め、非線形建物群に入力する解析を行い、カテゴリ分けを行うことで実被害との対応が向上することを確認した。そこで、建物を地震発生時の耐力別にグループ分けした被害関数を作成し、実被害との対応を第3章で作成した建築年代別被害関数や、既往の1-1.5秒応答の被害関数と比較した。

その結果、1-1.5秒応答の被害関数と比べて実被害との対応は向上するものの、建築年代別被害関数と比べると実被害との対応は低下した。しかし、建物棟数が20棟以上のカテゴリのみを対象に実被害との対応を見ると、建築年代別被害関数よりも対応が良くなっていることから、カテゴリ分けを行ったことで十分な建物棟数を有する実被害データが少なくなったことが、精度が低下した一因と考えられる。そのため、今後実被害データの蓄積が進むことで精度の良い地震発生時耐力別被害関数の作成が可能となる可能性があるものの、現時点では建築年代別被害関数の方が精度に優れる結果となった。

参考文献

- 1) 林 康裕, 更谷 安紀子, 森井 雄史: 木造住宅の経年劣化と地域地震環境を考慮した地震時損傷度予測手法, 日本建築学会構造系論文集, 第72巻, 第615号, pp.77-84, 2007.
- 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(第4部 学術論文, 災害からの復興と防災フロンティア). 総合論誌. 一般社団法人日本建築学会. (2004) no.2, p.71-75.
- 3) 鈴木達矢, 境有紀, 年代別被害関数を用いた木造建物の経年劣化と耐震規定による耐力変化の推定, 日本地震工学会論文集, 第11巻, 第3号, 73-84, 2011.8.
- 4) 中澤駿佑, 境有紀, 汐満将史, 三木彩加, 新井蒼太, 2018年北海道胆振東部地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集, Vol.19, No.7, 67-104, 2019.11
- 5) 中澤駿佑, 境有紀, 深部地盤構造が建物被害に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, 1161-1162, 2016.9.
- 6) 三木彩加, 境有紀, 実被害データと微動計測結果を用いた木造建物の耐震性能と経年劣化の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, 405-406, 2019.9.
- 7) 三木彩加: 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2020.
- 8) 岩井哲: 木造在来構法住宅の耐震壁量と常時微動特性ならびに地震被害の関係, 広島工業大学紀要研究編, 第41巻, pp.61-65, 2007
- 9) 近藤皓彦, 岩井哲: 既存木造家屋の建築年代別壁量充足率と耐震診断値の実態調査, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第35巻, pp-145-148, 2012
- 10) 1994年北海道東方沖地震災害調査報告 1994年三陸はるか沖地震災害調査報告, 日本建築学会, 1996.
- 11) 平成7年阪神・淡路大震災木造住宅等震災調査報告, 木造住宅等震災調査委員会, 1995
- 12) 岩西正晴, 岩井哲: 木造新築住宅の耐震壁量と常時微動特性, 日本建築学会中国支部研究報告集, pp.1-4, 2009
- 13) 鈴木祥之, 中治弘行, 平山貴之, 秋山真一: 常時微動計測による木造住宅の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.221-222, 1998.7.
- 14) 神鳥和志, 岩井哲: 木造在来軸組構法住宅の常時微動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.241-242, 2004
- 15) 水沼祥一, 腰原幹雄, 坂本功, 杉本健一, 槌本敬大, 五十田博: 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究: その2 既存木造住宅実験(築26年の木造住宅), 日本建築学会大

- 会学術講演梗概集, C-1, pp.201-202, 2003.7.
- 16) 杉本健一, 青井秀樹, 槌本敬大, 腰原幹雄, 水沼祥一, 神谷文夫: 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究その3.既存木造住宅実験(築35年の木造住宅), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.203-204, 2003.7.
 - 17) 鈴木祥之, 中治弘行, 岩井哲, 北原昭男: 在来構法木造住宅の実大水平力載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, 第62巻, 第499号, pp.69-79, 1997.9
 - 18) 田中宏明, 川瀬博: 実測データに基づく木造住宅の三次元非線形動的挙動解析モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 第70巻, 第592号, pp.121-128, 2005.6.
 - 19) 岩西正晴, 岩井哲: 木造伝統的軸組構法住宅の耐震診断評価と常時微動性能, 広島工業大学紀要研究編, 第43巻, pp.259-264, 2009.
 - 20) 田中宏明, 川瀬博: 常時微動計測による木造住宅の振動特性に関する研究, 日本建築学会研究報告九州支部, 第43巻, pp.337-340, 2004.3.
 - 21) Shiomitsu, M., Sakai, Y., Isoda, H. and Araki, Y.: A Wooden Houses Cluster Model Considering the Behavior of Shear Walls for Earthquake Damage Estimation, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 2020.9
 - 22) 早川森: 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2020.
 - 23) 財団法人日本建築防災協会: 木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と補強方法 (改訂版)
 - 24) 綿引誠, 町田健一, 大橋好光, 坂本功: 実物大建物振動台実験に基づく木造軸組工法住宅の耐震性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第71巻, 第599号, pp.103-110, 2006.
 - 25) 五十田博, 平野茂, 三宅辰哉, 古屋治, 箕輪親宏: 建築基準法の最低壁量を満足する新築木造住宅の倒壊実験, 日本建築学会構造系論文集, 618, 167-173, 2007.8.
 - 26) 橋本敏男, 坂本功, 大橋好光, 河合直人, 五十田博, 腰原幹雄, 川上修, 高橋仁: 実大木造住宅の振動台実験手法に関する研究 その2 標準試験体の研究概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.3-4, 2005.
 - 27) 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, 第72巻, 第618号, pp.159-166, 2007
 - 28) 津田千尋, 服部大介, 佐藤友彦, 五十田博, 宮沢健二: 実在木造住宅移築加振実験, 日本建築学会技術報告集, 第23号, pp149-154, 2006.6.
 - 29) 飯塚裕暁, 境有紀, 木造建物における一自由度系地震応答解析のための復元力特性モデルの提案, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, 113-127, 2009.2.
 - 30) 境有紀, 飯塚裕暁: 非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした平均的な木造建物群モデルの構築, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, pp.32-45, 2009.3.
 - 31) 損害保険料率算定会: 木造住宅の損壊被害率に関する研究 その2, 地震保険調査研究22, 1988.
 - 32) 白井周: 筑波大学大学院修士論文, 2017

第4章 地震動と建物の方向性を考慮して被害推定を行うための地震動の入力方法の検討

4.1 背景

本研究では 1-1.5 秒応答をはじめとする被害関数の説明変数を、水平 2 方向をベクトル合成して応答が最大となる方向から求めてきたが、地震動の振幅は断層の破壊伝播方向などの影響により強い異方性を示す場合がある。一方で、建物も壁量の差から耐力が異方性を有する構造物であり、地震による被害は地震動と建物の双方の方向性に影響を受けている。したがって、第 2 章、第 3 章で行った検討も、本来は最大方向ではなく地震動の方向性を考慮した入力を行う必要があると考えられる。

1 方向の入力で地震動の方向性を考慮した被害推定を行う手法として、平均方向⁴⁾が提案されている。これは、「強軸・弱軸 2 方向を持つ建物が様々な方向に配置された建物群に対する、地震動の 2 方向入力」という複雑な現象を、「建物が被害を受けることの多い弱軸方向に、水平面内の各方向の中で平均的な応答となる方向の地震動が入力する」と単純化するものである。具体的には、5 度ずつ 36 方向にベクトル合成した波形の周期 0-3 秒の応答を調べ、その値が平均値となる方向を平均方向として用いるが、36 方向の応答スペクトルを計算するために地震発生直後の被害推定で用いるには計算負荷が高いという課題があり、本研究では計算負荷の少ない最大方向を用いてきた。しかし、地震動と建物の方向性が複雑に組み合わせる生じる建物被害の検討を行うためには、本来は地震動の方向性を考慮する必要があると考えられることから、本章では地震発生後の被害推定に活用できるように平均方向の計算負荷を低減した上で、最大方向を用いて行われた第 2 章、第 3 章の結論の妥当性について検討する。

4.2 建物の方向を 1 棟ずつ調べた非線形建物群解析

地震動と建物の方向性を考慮して被害推定を行うためには、本来、建物がどの方向を向いているかを調べ、その方向に波形を入力する必要がある。そこで、平均方向の妥当性を検証するために、図 23 のように強震観測点周辺の全ての木造建物の強軸・弱軸方向の分布を調べ、それぞれの方向の波形を建物群モデルに入力して地震応答解析を行った。以下に、解析の手順および結果を示す。

4.2.1 建物の強軸弱軸方向の設定

建物の強軸・弱軸方向を調べるには建物の図面が必要となるが、全ての建物の図面を入手することは困難であることから、過去に行った被害調査^(例えば5)の際に収集した建物の外観写真と住宅地図という既存の情報から、強軸・弱軸方向を与えることにした。図24に示す例のように、被害調査で撮影した写真を元に大きな開口部を有する面を調べ、この面と平行な方向を弱軸方向、直交方向を強軸方向とした。建物には強軸弱軸2方向で異なる耐力を設定し、それぞれの方向に地震動を入力する解析を行い、より応答の大きい方を用いて全壊するかどうかを判定する。

建物の強軸弱軸それぞれの方向の耐力は、日本の平均的な木造建物の耐力分布を再現した平均的な耐力分布⁶⁾(以下、平均的な建物群モデル)を用いた。この耐力分布は木造建物の微動計測結果のうち、周期の長い弱軸方向の値を用いて構築されたため、弱軸方向の耐力分布となっており、強軸方向の耐力分布は別に与える必要がある。ここでは、平均的な耐力分布の構築に用いられた微動計測データ⁷⁻¹⁷⁾より、図25に示す強軸方向と弱軸方向の周期の比率を求め、その平均から強軸方向の固有周期を弱軸方向の固有周期の0.85倍として耐力分布を設定した。



図24 建物の強軸弱軸方向の例

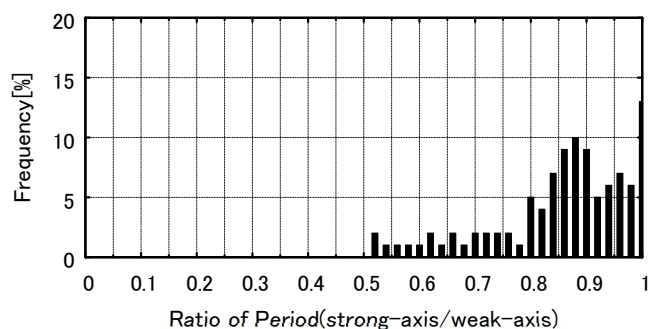
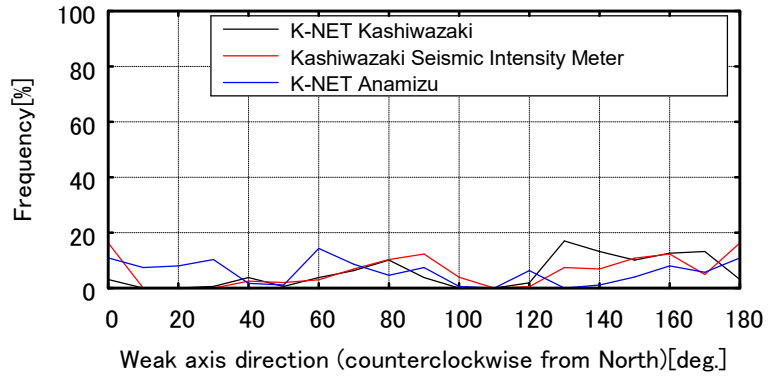


図25 強軸弱軸の固有周期比の分布

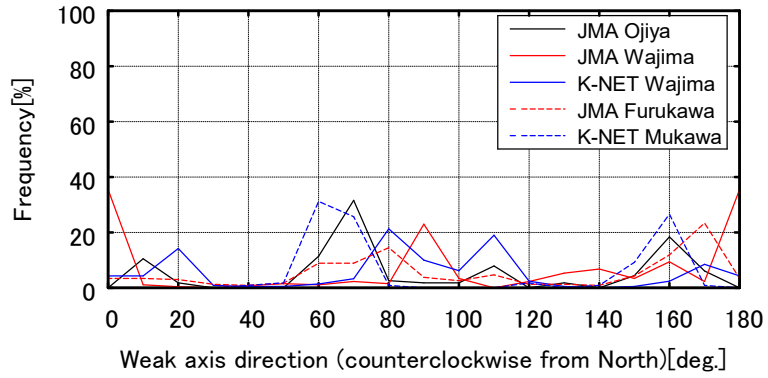
4.2.2 強軸弱軸方向を考慮した建物群のモデル化

建物群の方向は、表 17 に示す強震観測点周辺の建物を対象として求めた。過去に行った被害調査と同様に、観測点を中心とする半径 200m 円内の建物について、図 24 の要領で強軸弱軸方向（北から反時計回り）を集計した。横軸に弱軸方向をとり、各方向の建物の存在割合を図 26 に示す。建物群の弱軸方向が(a)のようにランダムなものだけでなく、(b)のように方向がやや揃ったもの、(c)のように方向がほぼ 1 方向に揃ったものも含んでおり、様々な方向性を有する建物群を対象に平均方向の妥当性を検証することが出来る。

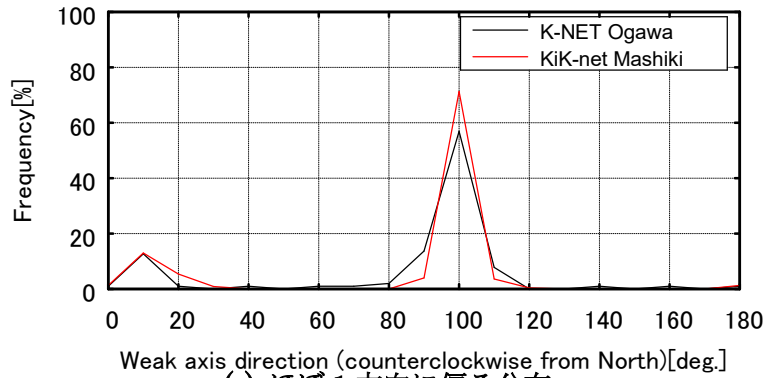
復元力特性には、図 27 に示す木造建物の挙動を再現するよう構築された修正 Takeda-Slip モデル¹⁸⁾を用い、パラメータは文献 6) より表 18 に示す値を与えた。応答塑性率が一定の値を超えたものを全壊と判定し、その基準とする許容塑性率 μ は全壊時の層間変形角 1/15¹⁹⁾と降伏層間変形角 1/120 より $\mu=8$ と設定した。



(a) ランダムな分布



(b) 2,3 方向に偏る分布



(c) ほぼ 1 方向に偏る分布

図 26 弱軸方向（北から反時計回り）の分布

表 17 強震観測点周辺の木造全壊率

| 地震 | 観測点 | 木造全壊率 |
|------------------|------------|-------|
| 2004 年新潟中越地震 | JMA 小千谷 | 1.8% |
| 2007 年能登半島地震 | K-NET 輪島 | 2.9% |
| | K-NET 穴水 | 18.8% |
| 2007 年新潟県中越沖地震 | JMA 輪島 | 4.7% |
| | K-NET 柏崎 | 5.3% |
| 2011 年東北地方太平洋沖地震 | 柏崎市震度計 | 7.4% |
| | K-NET 小川 | 0.8% |
| 2016 年熊本地震 | JMA 古川 | 3.0% |
| | KiK-net 益城 | 6.3% |
| 2018 年北海道胆振東部地震 | K-NET 鶴川 | 6.3% |

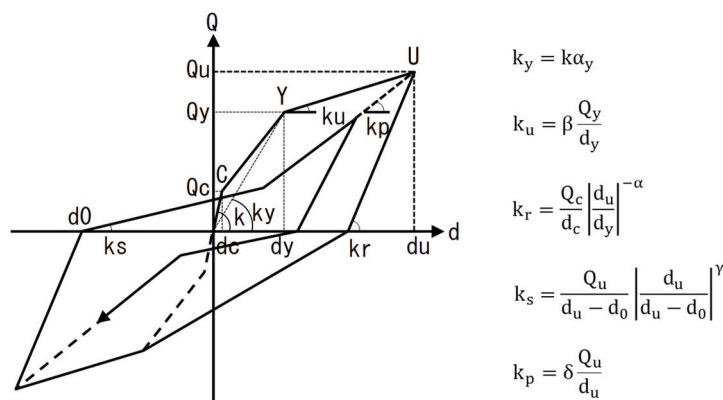


図 27 修正 Takeda-Slip モデル²³⁾

表 18 修正 Takeda-Slip モデルのパラメータ

| α_y | Q_c/Q_y | α | β | γ | δ |
|------------|-----------|----------|---------|----------|----------|
| 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.15 | 3.0 | 1.0 |

4.2.3 解析結果と実被害の対応

表 2 の強震記録と観測点周辺の建物について、建物の方向性を考慮して求めた解析被害率と実被害率との対応を図 28 に示す。図中の ERR は、誤差の絶対値の平均（以下、誤差平均）を示している。誤差が大きい点は能登半島地震の K-NET 穴水であり、第 3 章図 17 に関連して述べたように、1 階に大きな開口を有する建物が他の観測点よりも多く存在する²⁰⁾ ことから、解析で用いた耐力分布と比べて耐力の低い建物の割合が多かったために実被害率が大きい可能性が考えられるが、本解析の目的は、平均方向を用いた解析が建物の方向を考慮した解析と比べ、どの程度の精度を有するのかを確認することにあるため、ここでは図 28 の結果を正解と位置づけて検討を進める。

4.3 平均方向を用いた地震被害推定

建物の方向性を考慮して解析を行うことで実際の被害を概ね再現できたが、住宅地図と建物の外観写真を組み合わせて建物の方向を調べる調査には多大な労力がかかる。そこで、平均的な建物群モデルに平均方向の波形を入力する解析が、建物の方向に地震動を入力した解析をどの程度再現できるか確認する。平均的な建物群モデルに平均方向を入力した場合の解析被害率と実被害率の対応を示す図 29 を見ると、図 28 と同様の傾向を示しており、誤差平均も図 28 と等しい。図 30 に示す解析被害率同士の比較を見ると、平均方向による解析の結果は、建物の方向に地震動を入力した解析と概ね対応していることがわかる。したがって、建物の方向を調べるために多大な労力をかけずとも、平均方向を用いることで地震動と建物の方向性を考慮できていると考えられる。

4.3.1 平均方向の被害関数の構築

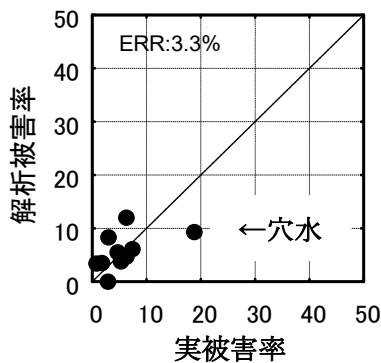


図 28 解析被害率と実被害率との対応
(建物の方向を 1 棟ずつ決めた場合)

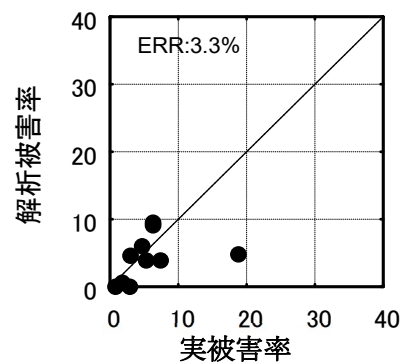


図 29 解析被害率と実被害率との対応
(平均方向を入力した場合)

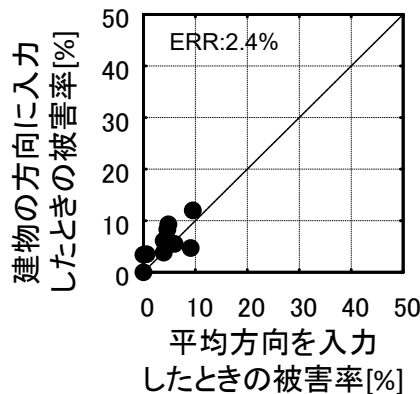


図 30 波形の入力方法別の解析被害率の比較

平均方向を用いることで地震動と建物の方向性を考慮した被害推定が可能であることがわかったが、地震発生直後に迅速な被害推定を行うことを考えると、建物群モデルを用いた地震応答解析は計算負荷が高い。そこで、平均方向の地震動強さによる被害関数を作成すること

で、地震動の方向性を考慮しつつ、より迅速に被害推定を行うことを考えた。既往の検討により、木造建物や中低層非木造建物が塑性化したときの等価周期に当たり建物被害との相関が高い、周期 1-1.5 秒の応答²¹⁾ (減衰定数 20%の弾性加速度応答、以下、1-1.5 秒応答) による被害関数²²⁾ が提案されている。この被害関数では、弾性加速度応答が最大となる方向のみの計算で求まり高速な最大方向を用いているが、これは様々な方向を向いた弱軸方向への入力を最大方向で近似していることになるため、本来は平均方向を用いるべきである。しかし、平均方向は 5 度ずつ 36 方向に合成した波形の 0-3 秒応答の値が平均となる方向を用いるため、

- ① 周期 1-1.5 秒以外の余分な周期帯の方向性の影響が含まれる
- ② 36 方向の 0-3 秒の応答から平均方向を決定し、平均方向に合成した波形から改めて 1-1.5 秒応答を計算するため計算時間がかかる

といった課題がある。そこで、新たな平均方向の決定方法として、以下のように修正を行った。

- ① 周期ごとに平均値となる方向を求める
- ② NS, EW の 2 方向で応答を求め、得られた結果を 5 度ずつ 36 方向に合成して平均値を求める

この修正により、1-1.5 秒以外の余分な周期帯の方向性の影響を除外することができ、応答解析が 36 回から 2 回に減ることで計算時間も大きく短縮できる。参考までに、表 19 に示す 24 の強震記録の 1-1.5 秒応答を求めるのに要した時間を図 31 に示す。使用した計算機の CPU は Intel Core i5-6500 でクロック周波数は最大 3.6GHz、物理メモリは 8GB、計算ディレク

表 19 強震観測点周辺の木造全壊率

| 地震名 | 観測点名 | 全壊率 (木造) | $A_{1-1.5}[\text{cm/s}^2]$ 最大方向 | $A_{1-1.5}[\text{cm/s}^2]$ 平均方向 |
|---------------|-------------|-------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1994年三陸はるか沖 | 八戸市庁舎 | 1.9% | 386.3 | 303.1 |
| 1995年兵庫県南部 | JR鷹取 | 59.4% | 1225.8 | 909.8 |
| | 葺合 | 20.2% | 1095.6 | 746.3 |
| | NTT神戸 | 16.1% | 557.0 | 373.0 |
| | JR宝塚 | 7.2% | 626.2 | 485.3 |
| | 本山第一小 | 6.5% | 475.2 | 343.5 |
| | 神戸JMA | 3.2% | 738.5 | 533.0 |
| | 尼崎高架橋 | 2.4% | 393.5 | 372.1 |
| | 尼崎竹谷小 | 1.7% | 336.6 | 328.2 |
| | 関電総合技研 | 0.8% | 360.3 | 310.6 |
| 2000年鳥取県西部 | 境港測候所 | 1.1% | 415.9 | 288.9 |
| 2003年十勝沖 | K-NET標津 | 1.3% | 505.9 | 349.6 |
| 2004年新潟県中越 | 川口町震度計 | 19.8% | 1096.6 | 750.2 |
| | JMA小千谷 | 1.8% | 616.0 | 481.4 |
| 2007年能登半島 | K-NET穴水 | 18.8% | 904.9 | 612.3 |
| | JMA輪島 | 4.7% | 698.2 | 595.8 |
| | K-NET輪島 | 2.9% | 360.6 | 244.9 |
| 2007年新潟県中越沖 | K-NET柏崎 | 5.3% | 759.1 | 521.3 |
| | 柏崎市中央町震度計 | 7.4% | 726.9 | 509.9 |
| 2011年東北地方太平洋沖 | K-NET小川 | 0.8% | 624.0 | 456.8 |
| | JMA大崎市古川三日町 | 3.0% | 810.6 | 613.0 |
| | 高根沢町石末震度計 | 0.7% | 435.9 | 267.9 |
| | 須賀川市八幡町震度計 | 2.1% | 318.4 | 275.8 |
| | 名取市増田震度計 | 0.6% | 589.8 | 415.4 |

トリは回転数 7200rpm のハードディスク上である。新しい平均方向でも最大方向の 3.5 倍程度の時間を要するものの、従来の平均方向の 1/6 程度の計算時間で 1-1.5 秒応答を計算することができていることがわかる。また、1-1.5 秒応答と実被害率との対応を、新旧の計算方法別に図 32 に示す。相関係数 COR は新しい平均方向の方が高く、計算時間は大幅に短縮され、実被害率との対応も向上することがわかる。

新しい計算方法により平均方向を高速に計算できるようになったので、平均方向による被害関数の構築を行った。表 3 に示す様々な強震記録における観測点周辺（半径 200 m 以内）の木造建物全壊率と、最大方向および平均方向の 1-1.5 秒応答より、全壊率と 1-1.5 秒応答の関係は式(1)で表される。

$$D = \Phi(\alpha_1 \log A_{1-1.5} + \beta_1) \quad (1)$$

ここで、 Φ は標準正規分布の累積確率を示す。これと、岡田・高井²²⁾の震度の被害関数 D4 を震度 6.5 で全壊率 30%となるよう修正した式(2)より、1-1.5 秒応答を用いた、建物被害と相関の高い震度指標（以下、1-1.5 秒震度）は式(3)で表される。

$$D = \Phi(1.77I_{1-1.5} - 12.03) \quad (2)$$

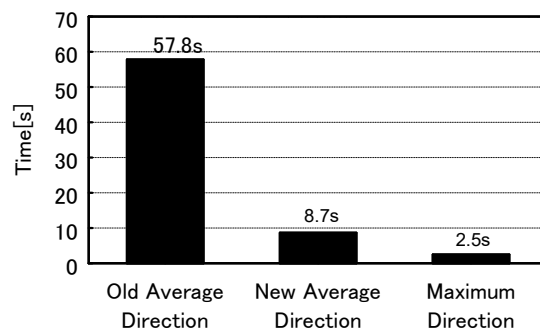


図 31 表 19 に示す 24 地震動の 1-1.5 秒応答の計算に要した時間

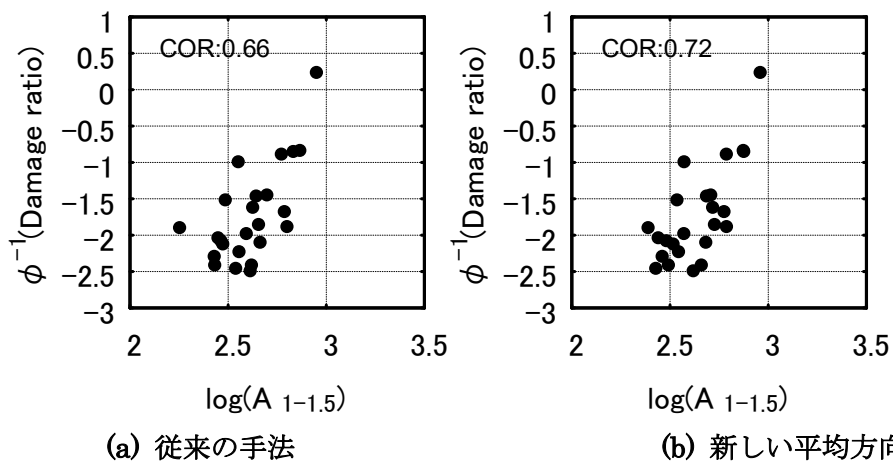


図 32 平均方向の 1-1.5 秒応答と実被害との対応

$$I_{1-1.5} = \alpha_2 \log A_{1-1.5} + \beta_2 \quad (3)$$

表 20 に、最大方向、平均方向それぞれを用いた場合の係数 α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 の値を示す。また、図 33 に被害関数と実際の被害率の対応、図 34 に推定被害率と実被害率の対応を示す。図中の ERR は誤差平均（誤差の絶対値の平均）を示しており、最大方向と平均方向で ERR がほぼ等しく、被害関数の精度に変化は無いことがわかった。

表 20 被害関数と 1-1.5 秒震度のパラメータ

| | α_1 | β_1 | α_2 | β_2 |
|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Maximum direction | 2.80 | -9.46 | 1.58 | 1.45 |
| Average direction | 3.03 | -9.72 | 1.71 | 1.31 |

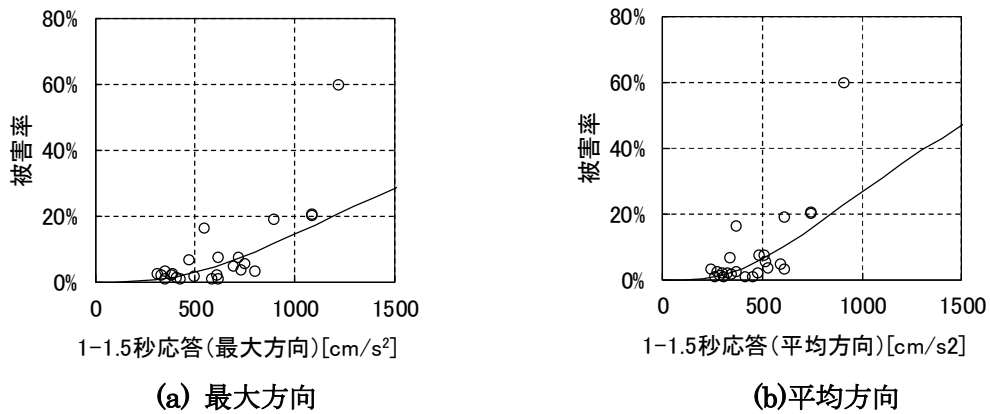


図 33 1-1.5 秒応答の被害関数と実被害との対応

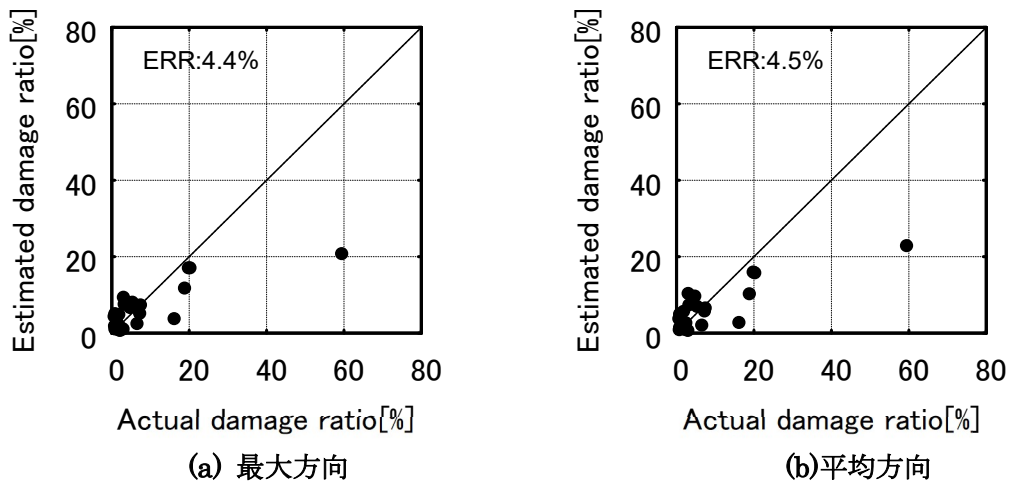


図 34 1 推定被害率と実被害率との対応

4.3.2 最大方向と平均方向の関係性

最大方向と平均方向で被害関数の精度が変わらない要因を調べるため、両者の 1-1.5 秒応答がどのような関係になっているのか比較したところ、図 35(a)に示すように強い線形関係に

あることがわかった。これが表 19 の 24 地震動だけでなく、全ての地震動で成り立つのであれば、より高速な最大方向を用いても十分な精度で被害推定が可能である。そこで、対象とする地震動を、1993 年 1 月～2019 年 2 月までに防災科学技術研究所強震観測網 (K-NET, KiK-net) 観測点、気象庁震度観測点、地方公共団体震度計で震度 5 弱以上を観測し、波形が公開された全ての地震動として、最大方向と平均方向の 1-1.5 秒応答を比較した。図 35(b)より、両者の相関係数は 0.99 と非常に高く、表 19 の 24 地震動で偶然線形関係になったわけではないと考えられる。

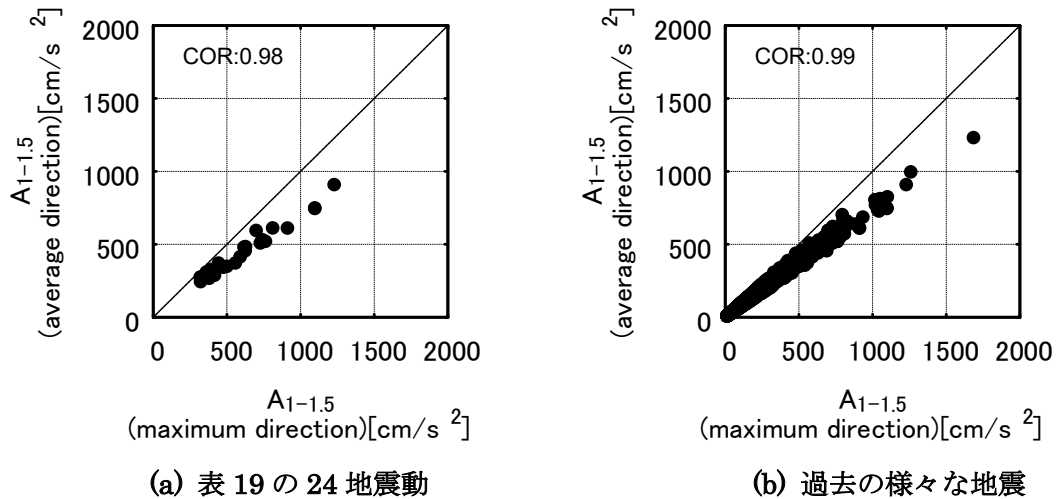


図 35 平均方向と最大方向の関係

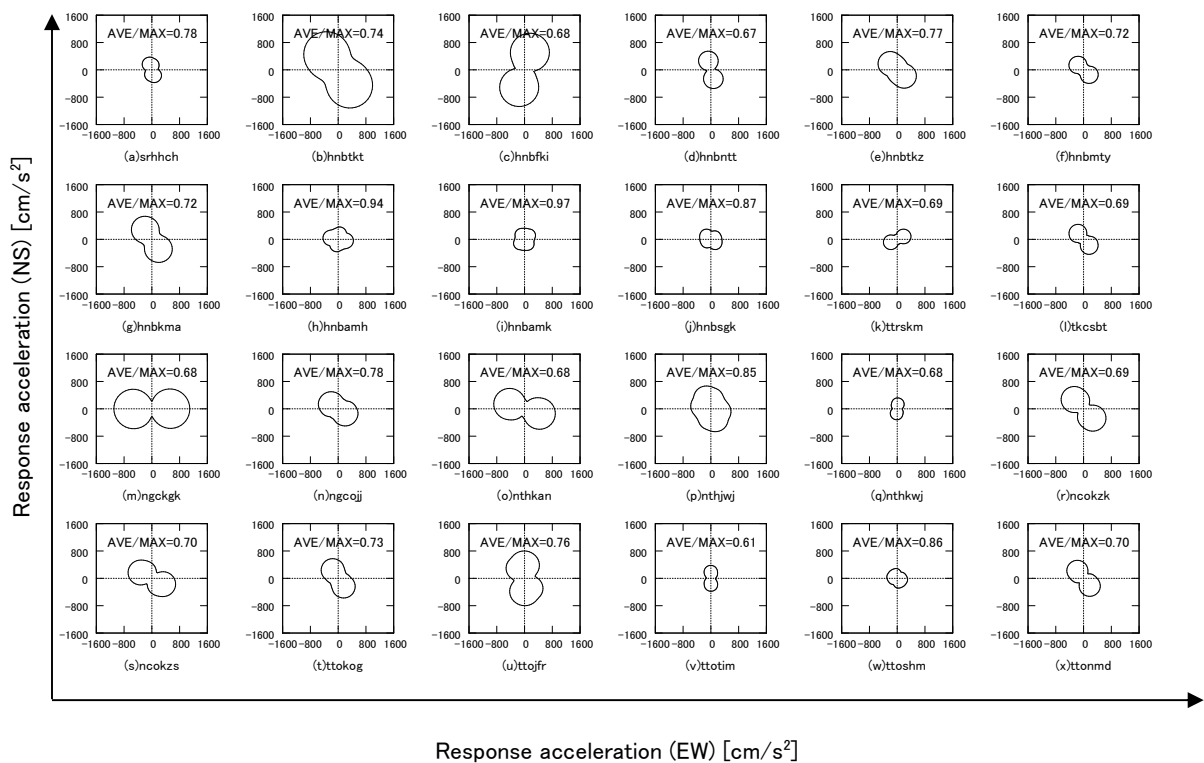


図 36 水平面内の様々な方向の周期 1-1.5 秒応答

最大方向と平均方向が強い線形関係にある原因を調べるため、図 35(a)で使用した 24 地震動について、水平面内の各方向の 1-1.5 秒応答を図 36 に示す。図中の AVE/MAX は、平均方向の値を最大方向の値で除したときの比を示している。図 3&より、表 19 に示す 24 地震動は、(b)兵庫県南部地震 NTT 神戸のように異方性が大きいものから、(i)兵庫県南部地震尼崎竹谷小のように異方性が小さいものまで、様々な方向性を有する地震動を含んでいる。そのため、平均方向と最大方向の比も一定ではなく、必ず線形関係になるとは限らないはずである。しかし、平均方向と最大方向の比がどの程度の範囲に分布しているかを図 35(b)の作成に用いた地震動について調べると、図 37 に示すように、両者の比はおおよそ 0.65 以上の範囲に集中している。したがって、両者の比が必ずしも一定になるわけではないものの、限られた範囲に集中するために強い線形関係を示していることがわかる。

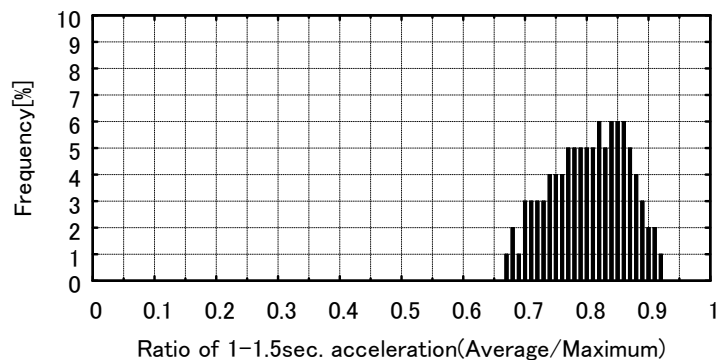


図 37 平均方向と最大方向の比の分布

両者の比のばらつきが一定の範囲に収まる理由を調べるために、サイン波を用いた数値実験を行った。ここでは、NS 成分として振幅 1000 cm/s²、周期 1.0 秒のサイン波を与え、EW 成分を与えないことで、極めて強い異方性を持つ模擬地震動を作成した。この模擬地震動による最大方向と平均方向の 1-1.5 秒応答の比が 0.64 となることから、両者の比がこれよりも小さくなることはあり得ない。この 0.64 という値は図 37 に示した分布の下限が約 0.65 であることに対応しており、両者の比は将来発生する地震動でも必ずこの範囲に収まる。したがって、最大方向と平均方向の 1-1.5 秒応答が強い線形関係にあることと、両者の被害関数が同程度の精度を示したことは偶然ではなく、最大方向の 1-1.5 秒応答を計算することで平均方向の 1-1.5 秒応答を推定することが可能である。具体的には、図 35(b)の最大方向(X 軸)と平均方向(Y 軸)の関係を最小二乗法で直線近似すると $Y=0.73X$ となることから、最大方向の 1-1.5 秒応答の値を 0.73 倍して平均方向の 1-1.5 秒応答を求め、これを平均方向の被害関数に代入すれば良い。図 38 に、最大方向の値から推定した平均方向の値を入力した場合と、実際の平均方向の値を入力した場合の推定被害率の対応を示す。誤差の絶対値の平均は 0.9%、相関係数は 0.98 とよく対応しており、最大方向の応答を計算することで平均方向の応答を精度良く推定できていることがわかる。

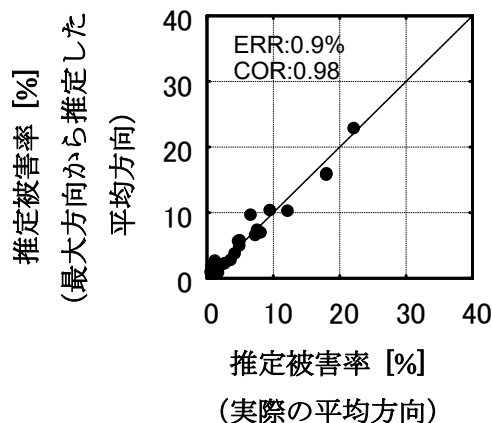


図 38 実際の平均方向による推定被害率と最大方向を 0.73 倍して求めた平均方向による推定被害率の対応

4.4 まとめ

1 方向の波形の入力で地震動と建物の方向性を考慮した被害推定を行うためには、地震動の水平成分のどの方向を用いればよいか検討を行った。まず、一自由度の非線形建物群を用いて、建物 1 棟ずつの方向に波形を入力した場合と、様々な方向の中で平均的な加速度応答となる「平均方向」の波形を入力した場合について実被害との対応を比較し、平均方向を用いることで地震動と建物の方向性を考慮した解析が可能であることを確認した。

そこで、平均方向の加速度応答を用いることで地震動と建物の方向性を考慮して被害を推定できる被害関数を作成した。この被害関数による被害推定の精度を、様々な方向の中で応答が最大となる「最大方向」を用いる従来の被害関数と比較したところ、両者の精度はほぼ等しくなった。その原因を調べると、平均方向と最大方向の加速度応答が強い線形関係を有することが原因であることがわかった。この線形関係は、平均方向と最大方向の比が必ず一定の範囲に集中することから常に成り立つため、より高速に計算可能な最大方向の応答を用いて精度良く平均方向の応答を推定出来ることがわかった。したがって、地震動と建物の方向性を考慮するためには本来平均方向を用いる必要があるものの、被害関数について最大方向を用いて検討を行った第 2 章、第 3 章の検討は、平均方向を用いた場合でも同様の結論が得られると考えられる。

参考文献

- 1) 中川 貴文, 佐藤 弘美, 多幾山 法子, 腰原 幹雄, 林 康裕 : 2007 年能登半島地震における木造住宅の被害の再現, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 688 号, pp.1113-1122, 2013.6
- 2) 西村 康志郎 : 1 質点系の 2 次元弾塑性地震応答予測のための基礎的な解析研究, 日本建

- 築学会構造系論文集，第 76 卷，第 663 号，pp.909-916，2011.5
- 3) 大垣 聡，高田 毅士：地震動の方向性を考慮することによる水平面内二方向連成モデルの塑性歪エネルギー推定法，日本建築学会構造系論文集，第 78 卷，第 693 号，pp.1869-1877，2013.11
 - 4) 境有紀，熊本匠：地震動の方向性の定量的な検討と地震被害推定のための平均方向の提案，日本地震工学会論文集，第 10 卷，第 5 号，pp.1-20，2010.11
 - 5) 中澤駿佑，境有紀，汐満将史，三木彩加，新井蒼太：2018 年北海道胆振東部地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性，日本地震工学会論文集，第 19 卷，第 7 号，67-104，2019.11
 - 6) 境有紀，飯塚裕暁：非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした平均的な木造建物群モデルの構築，日本地震工学会論文集，第 9 卷，第 1 号，pp.32-45，2009.3.
 - 7) 鈴木祥之，東樋口護，岩井哲，北原昭男，橋本清勇，仲治弘行：木造軸組構法建物の実大引張載荷実験，日本建築学会近畿支部研究報告書，第 36 合・構造系，pp197-200，1996.7
 - 8) 岩井哲，鈴木祥之，北原昭男，仲治弘行：在来構法木造建物の振動計測と水平力載荷実験 その 1 静的載荷実験の概要と結果．日本建築学会大会学術講演梗概集，pp115-116，1996.9.
 - 9) 仲治弘行，鈴木祥之，岩井哲，北原昭男：在来構法木造建物の振動計測と水平力載荷実験 その 2 振動計測の結果及び荷重～変位関係に関する考察．日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.117-118，1996.9.
 - 10) 岩井哲，仲治弘行，鈴木祥之，北原昭男：在来構法既存木造住宅の静的水平力載荷実験による耐震性能評価，京都大学防災研究所年報第 39 号，B-2，pp.51-70，1996.4.
 - 11) 鈴木祥之，仲治弘行，平山貴之，秋山真一：常時微動計測による木造住宅の振動特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造 III，pp221-222，1998.9.
 - 12) 鈴木祥之，東樋口護，仲治弘行，標智仁，北山宏貴：芦屋市における木造建物の微動計測による振動特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp9-10，1995.8.
 - 13) 尾内俊夫，太田外氣晴，竹原崇夫：兵庫県南部地震における住宅被害と壁配置および常時微動特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.11-12，1995.8(in Japanese)
 - 14) 矢沢一樹，毛呂眞：青森県の在来木造住宅の固有周期，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp423-424，2002.8.
 - 15) 鏡味洋史，北川諭：積雪寒冷地の木造建築物の被害想定手法の検討-微動による木造住宅の固有周期の測定-日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，構造 II，pp.23-24，1998.9.
 - 16) 田中宏明，川瀬博：実測データに基づく木造住宅の三次元非線形動的挙動解析モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第 70 卷，第 592 号，pp.121-128，2005.6.
 - 17) 岩井正晴，岩井哲：耐震診断による上部構造評点を用いた木造在来軸組工法住宅の地震時性能評価，広島工業大学紀要研究編，第 42 卷，pp191-197，2008.2.
 - 18) 飯塚裕暁，境有紀：木造建物における一自由度系地震応答解析のための復元力特性モデルの提案，日本地震工学会論文集，第 9 卷，第 1 号，113-127，2009.2.
 - 19) 損害保険料率算定会：木造住宅の損壊被害率に関する研究 その 2，地震保険調査研究

- 22, 1988.
- 20) Nakazawa, S. and Sakai, Y: Improvement of Fragility Curves by Classifying Building Category, The 17th World Conference on Earthquake Engineering, 6a-0014, 2020.9
 - 21) 境有紀：建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討－2007年能登半島地震,新潟県中越沖地震のデータを加えて－,日本建築学会構造系論文集,第74巻,第642号,pp.1531-1536,2009.8
 - 22) 中澤駿佑,境有紀：深部地盤構造が建物被害に与える影響,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造II,1161-1162,2016.9.
 - 23) 岡田成幸,高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン,日本建築学会構造系論文集,第64巻,第524号,pp.65-72,1999

結論

本研究では建物の等価周期という概念に基づいて、建物の地震被害推定を正確かつ迅速に行うための被害関数について検討を行った。その結果、建物の性能によって異なる等価周期に対応させた周期帯の弾性加速度応答を説明変数とすることで、既存の被害関数よりも精度が向上することがわかった。

等価周期の応答に基づく被害関数として、第2章で建築年代別被害関数、第3章で地震発生時の耐力別被害関数を提案したが、これらの被害関数を用いた被害推定で必要となる建物の情報のうち、建築年代は家屋課税台帳で収集済みである。課税台帳は一般に公開されている情報ではないが、一般に公開されている地域メッシュ統計から建物の建築年代分布を推定する手法も提案されており¹⁾、いずれかの方法で全国の建築年代分布のデータベース化が可能である。したがって、本研究の成果を実用化する場合、全国の建物の建築年代分布を用いて建築年代別被害関数による被害推定を行うのが最も実現の可能性が高いと考えられる。図39に被害関数を用いて建物被害を推定する手順を示す。建築年代別に分けて被害推定を行う場合と違いが生じる過程を赤枠で示しており、図39(b)に示す建築年代別の被害推定では、被害関数から得られた年代別推定被害率に建築年代分布で重み付けを行う過程が増える。この点は既存の建築年代別被害関数でも同様であるが、その地点の年代分布を参照して重み付けを行う負荷は弾性応答解析の負荷に比べて小さく、被害推定の速度を大きく落とすことなく被害推定の精度を向上できると考えられる。

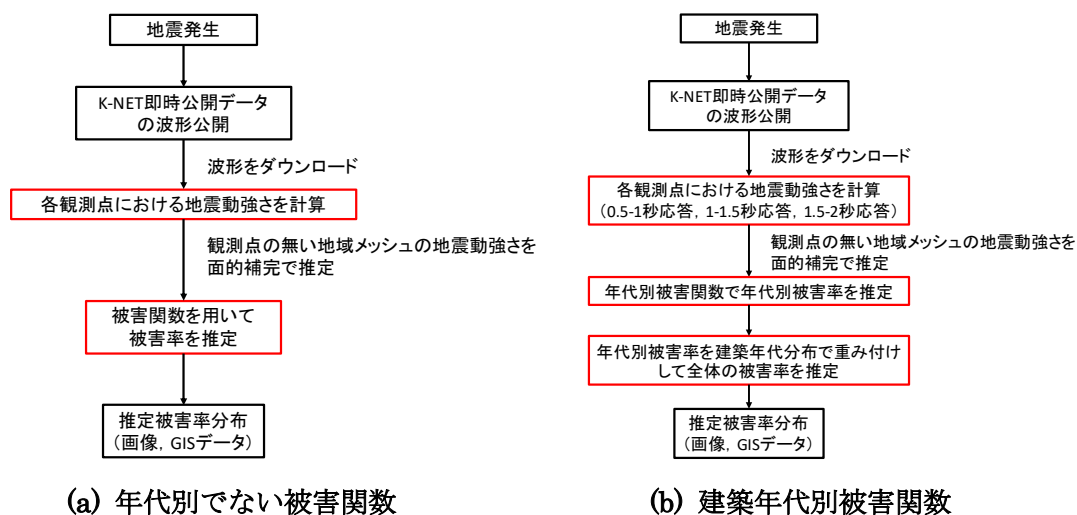


図 39 被害関数による被害推定の手順

また、各章で得られた知見を以下に示す

第2章 建築年代による等価周期の違いを考慮した年代別被害関数

本章では、建築年代によって異なる等価周期に対応する説明変数を用いて年代別被害関数

を作成することで、被害推定精度を向上させるための検討を行った。

まず、建物被害と相関の高い周期帯を建築年代別に調べ、相関の高い周期帯が建築年代によって異なることを示した。そして、建築年代によって異なる周期帯の加速度応答を用いて年代別被害関数を作成することで、1-1.5秒応答を用いる従来の被害関数よりも実被害との対応が向上することを示した。

第3章 経年劣化による建物性能の低下を考慮した被害関数

本章では、建物の経年劣化とカテゴリを考慮することで、地震発生時の建物性能が同程度になるように建物を分類する被害関数の検討を行った。

まず、降伏ベースシア係数に影響を与えると考えられるパラメータによって建物を8カテゴリに分類し、経年劣化を考慮した地震発生時のカテゴリ別降伏耐力分布を作成した。作成した耐力分布を用いて非線形建物群による解析を行い、カテゴリ分けを行うことで実被害との対応が向上することを示した。

そこで、カテゴリ別降伏ベースシア係数が同程度になるようにグループ分けを行い、それぞれのグループで被害関数を作成した。その結果、第3章で作成した年代別被害関数と比べてやや精度が落ちる結果となった。これは、カテゴリ分けを行うことで建物棟数が不十分なデータを用いて被害関数を決定せざるを得なかったことが原因の一つと考えられ、建物棟数が十分なデータだけを対象にすると年代別被害関数よりも精度が向上することから、被害データの蓄積が進むことで、同様の手法でより良い精度が得られる可能性があると思われる。

一方で、第2章にも言えることであるが、建物を細分化するにつれて要求する情報量が多くなる。全国の木造建物について、建築年代・屋根葺材・階数・開口の情報をデータベース化することは現実的ではない。本章の位置づけとしては、建物をカテゴリ分けすることで被害推定の精度が向上する可能性を示すとともに、将来建物の詳細な情報がデータベース化された際に活用できる手法を予め提案するものであり、現時点で実用化の可能性が高いのは建築年代のデータベース化で運用可能となる第2章の建築年代別被害関数であろう。

第4章 地震動と建物の方向性を考慮した被害推定手法の検討

本章では、最大方向を用いて行われた第2章、第3章の検討に対し、地震動と建物の方向性を考慮して再検討を行う必要があるか検討を行った。まず、1方向の入力で地震動の方向性を考慮する手法として提案されている平均方向の妥当性を確認することを目的とし、非線形建物群モデルを対象に、建物の方向を1棟ずつ調べ、その方向に波形を入力する解析を行い、その結果がほとんどの観測点で平均方向による解析と概ね対応することを示し、平均方向の妥当性を示した。そして、精度を落とさずに計算負荷を低減した新しい平均方向を考案し、平均方向を用いた被害関数を作成した。

作成した被害関数を、水平面内で応答が最大となる「最大方向」を用いる従来の被害関数と比較したところ、両者の実被害率との対応はほぼ等しくなった。これは、最大方向と平均方向が強い線形関係にあることが原因であり、この線形関係は、平均方向と最大方向の比が必ず一定の範囲に集中することから常に成り立つ。したがって、最大方向を用いて行った第2章、第3章の検討は平均方向を用いた場合でも同様の結論が得られると考えられる。

参考文献

- 1) 長谷川浩一，翠川三郎：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測：その 1 建築年代別の木造建築物棟数の推定，日本建築学会構造系論文集，第 62 巻，第 497 号，pp.75-80，1997.

今後の検討

以下に，本研究で未検討の事項を示す．

経年劣化を考慮した被害関数

本研究では，経年劣化による耐力の変化を考慮せず年代別に建物を分類した年代別被害関数と，経年劣化に加えてカテゴリ間の耐力比まで考慮した地震発生時耐力別被害関数を作成した．年代別被害関数では経年劣化による耐力低下が考慮されない一方で，地震発生時耐力別被害関数では建物の細分化に伴い，十分な建物棟数を有する実被害データが少なく，経年劣化を考慮しない年代別被害関数の方が実被害との対応が良いという結果が得られた．また，実用化を考えても，ある地域の建築年代分布さえ手に入れば良い年代別被害関数と，建築年代・屋根仕様・階数・開口部の情報が必要となる地震発生時耐力別被害関数では，年代別被害関数の方が運用のハードルは低い．そこで，カテゴリ分けを行わず，経年劣化のみを考慮した被害関数について検討を行うことで，必要な情報量はそのままに，年代別被害関数よりも被害推定の精度を向上できるか検討を行いたい．

実被害データに頼らない被害関数

本研究で作成した被害関数（平均方向の被害関数，建築年代別被害関数，地震発生時耐力別被害関数）は，いずれも建物の等価周期に相当する地震動強さと実被害データを用いて求めたものである．これは，ある属性（建築年代，カテゴリ）の建物が実際に被害を受けるまでは被害関数を作成することが出来ず，建築年代が新しい建物の地震発生直後の被害推定や，将来発生が危惧される大地震を対象とする被害想定への活用に課題が残る．例えば，現時点では 2010 年代建物の被害データが無いために，2021 年に発生した地震で発生直後の被害推定を行う場合や，将来発生する地震における被害想定を行うには，従来の 1-1.5 秒応答の被害関数を用いることになる．

しかし，「ある耐力を有する建物が，ある大きさの入力を受けたときにどの程度の被害を受けるか」ということを論理的に説明することが出来れば，いまだ被害データのない 2010 年代建物の被害想定が可能となる．本研究では，地震発生時耐力別被害関数を作成する際に，地震動強さ指標として等価周期応答を定めた．この指標は，従来の被害関数で用いられてきた指標とは異なり，実被害との相関が高い指標を経験的に選んだものではなく，「地震発生時の耐力と対応する等価周期」という論理的に定めた指標であり，2010 年に建てられた建物の実被害データが無くとも，どの周期帯の応答を用いるべきか定めることが出来る．同様に，ある性能の建物群に対してある入力となされた際の被害率を論理的に導くことが出来れば，新しく建物を建てた時には既にその建物の被害推定までも可能ということになる．

精度の高い非線形建物群モデルがあれば，強震動予測手法を用いて推定した地震動を入力して解析を行うことで被害想定を行うことは可能であるが，計算負荷が高く地震発生直後の被害推定での運用は難しい．そこで，被害関数を構築できるだけの実被害データが得られていない年代の建物についても迅速な被害推定を行える被害関数の構築が必要である．

本研究に関連した既発表論文

■ 査読論文（1編）

- 1) 中澤駿佑, 境有紀, 汐満将史, 三木彩加, 新井蒼太, 2018年北海道胆振東部地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集, Vol.19, No.7, 67-104, 2019.11

■ その他の論文（3編）

- 1) Nakazawa, S. and Sakai, Y: Improvement of Fragility Curves by Classifying Building Category, The 17th World Conference on Earthquake Engineering, 6a-0014, 2020.9.
- 2) 中澤駿佑, 境有紀, 建築年代による等価周期の違いを考慮した年代別被害関数, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 219-220, 2020.9.
- 3) 中澤駿佑, 境有紀, 地震被害推定のための地震応答の方向性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 361-362, 2019.9.

その他の発表論文

■ 査読論文（2編）

- 1) 汐満将史, 境有紀, 中澤駿佑, 三木彩加, 野崎光輝, 2019年山形県沖の地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集（登載決定）
- 2) 汐満将史, 境有紀, 神野達夫, 中尾隆, 白井周, 中澤駿佑, 太田圭祐, 2016年熊本地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性－益城町－, 日本地震工学会論文集, Vol.18, No.5, 108-120, 2018.11

■ その他の論文（3編）

- 1) 中澤駿佑, 境有紀, 大きな建物被害を引き起こす震源と深部地盤構造の組み合わせ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 691-692, 2018.9.
- 2) 中澤駿佑, 境有紀, 建物被害に影響を与える深部地盤構造および震源のパラメータの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 163-164, 2017.8.
- 3) 中澤駿佑, 境有紀, 深部地盤構造が建物被害に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 1161-1162, 2016.9.

謝辞

指導教員であられる境有紀教授には、卒業研究配属以来、公私ともに様々な助言をいただきました。研究者として成長する場を与えていただき、また、研究の楽しみを実感する機会を与えていただいたこと、厚く御礼申し上げます。

筑波大学大学院松島亘志教授、庄司学教授、金久保利之教授には、研究を進める上で度々貴重な助言をいただき、本論文をより良いものにするための貴重なご意見をいただきました。深く感謝いたします。

山形大学大学院理工学研究科汐満将史助教には、解析のパラメータの設定をはじめ、様々な助言をいただきました。

構造動力学研究室の学生諸氏には、被害調査を初めとして様々な協力をいただきました。特に、元大学院生の早川森氏、三木彩加氏には、強震観測点周辺の建物群のカテゴリ分けや方向性の検討において、多大な協力を得ました。

平均方向の計算負荷を低減する手法について、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所野津厚氏より有益な助言をいただきました。

本研究で使用した強震記録は、建築研究所、鉄道総合技術研究所、大阪ガス、NTT ファシリテーズ、関西地震観測研究評議会、関西電力総合技術研究所に、気象庁、地方公共団体、防災科学技術研究所に提供いただきました。