

## 第1章 はじめに

### 1.1 目的

地震リスクは、火災等に比べ発生頻度が低く、かつ発生時期が不規則であり、また、ひとたび大地震が発生すると巨大な損害をもたらす特性がある。そのため、地震保険制度発足以来の保険実績データでは、保険料率を算出するには十分と言えず、被害予測シミュレーションにより将来の支払保険金を予測し、保険料率を算出している。

この被害予測シミュレーションにおいては、地震動による建物の損壊被害の予測について損壊被害関数を用いており、その開発には保険実績データの不足を補う目的で、主として建物モデル等を用いた地震応答解析による工学的手法を採用してきた。この過程において、保険実績データは工学的な考え方の補足、あるいは調整の要素として利用している。

本研究では、地震応答解析をベースとした損壊被害関数の構築方法については現状を引き継ぎながら、工学的知見から根拠を付けられる範囲で地震応答解析に係る各種のパラメータを再検討する。

本報告書は上記目的で実施した研究について、公表可能な資料・データに基づく検討を行った建物モデルに関する部分を中心に取りまとめたものである。

### 1.2 検討の進め方

本検討では、2021～2022年度に合計4回の地震災害予測研究会（体制下記。以下、震災研と記す。）を開催して議論を進めた。また、第1回から第3回の各震災研の開催に先立ち、個別の課題を設定した分科会を数回開催し、その課題と関係が深い一部の震災研委員と集中的に議論を深めた。

#### 地震災害予測研究会（2021～2022年度）

顧問	和泉 正哲	東北大学	名誉教授
	北川 良和	慶應義塾大学	元教授
委員長	林 康裕	京都大学	教授
委員	腰原 幹雄	東京大学	教授
	境 有紀	京都大学	教授
	山田 哲	東京大学	教授

（五十音順、所属は2023年3月時点）

委託先	株式会社小堀鐸二研究所
事務局	損害保険料率算出機構 リスク業務部

### 1.3 損壊被害関数の構築にかかる過去の震災研の議論と検討

#### (1) 過去の震災研の議論

現行の損壊被害関数の構築方法は2005年度に検討されたものにさかのぼる。その構築方法は、住宅を質点系でモデル化して、1995年兵庫県南部地震で記録された地動記録を入力地震動とした時刻歴応答解析を行い、別途設定した半壊や全壊に至る最大層間変形角の分布をあわせて被害率を計算し、その被害率と地表最大速度（以下、PGV）の関係を回帰するというものである。詳細は改めて第2章に述べる。また、住宅の区分や耐力、変形能力などのパラメータは、1995年兵庫県南部地震における罹災証明のデータに基づいて構築された既往の被害率曲線と、全損と全壊、全半損と全半壊は概ね対応すると判断し、被災度としては同一のものであるとの認識のもとで検討した。

損壊被害関数を構築したのち、被害地震が発生し、地震保険の実績データが蓄積するなかで、2010年から地震保険実績データの内容を見直し、改めて損壊被害関数を見直すための議論を震災研で開始した。このときの検討<sup>2)</sup>では、2005年の結果を参照しつつも、建物区分や復元力特性、耐力、最大変形角を改めて評価し直している。その際、分析に用いる実績データを用いるにあたり、K-NETなど強震観測点から一定範囲内に存在するものに限定する、強震観測点の設置状況を確認するなど、出来るだけ地震動のばらつきを小さくする配慮がなされた。また、議論のさなか2011年に東北地方太平洋沖地震が発生し、新たに多くの地震保険実績データが得られたことを踏まえ、強震観測点回りの悉皆調査を行い、目視調査と地震保険実績による被害率の比較もなされた。この検討は2013年度まで継続し、PGV以外の地震動指標を用いることも検討され、構造種別、被害別に周期帯域を定めて加速度応答スペクトルの平均値を地震動指標とした損壊被害関数が策定された。ただし、この指標を評価するのに必要な平均値を計算する周期帯域を工学的に定めると、PGVを指標とした損壊被害関数よりも実績データとの関係が乖離する傾向がみられた。また、地震動指標予測が複雑になると実務上の課題もでることから、損壊被害関数の説明変数は、現在もすべてPGVが用いられている。

次の震災研による検討（2014～2017年度）<sup>3)</sup>では、木造、軽量S造、RC造それぞれについて、建築基準や種々の仕様、構成要素など、住宅の耐震性能に影響を及ぼす要因をできる限り網羅的に調査し、それらの時代による変遷、復元力特性や降伏ベースシア係数に与える影響の程度を評価した。木造住宅については、建築基準法を最低限満足する状況を想定した在来軸組工法の戸建住宅を対象として、3次元フレームモデルで作成して骨格曲線を評価した。その結果、耐力に及ぼす影響が大きいのは、建築年代、階数、重量であり、変形に及ぼす影響が大きいのは、偏心、水平構面の剛性であることがわかった。鉄筋コンクリート造住宅では、実在の共同住宅の平面図から得られる壁量、柱量に基づき弱軸方向の実耐力として降伏ベースシア係数を評価して、建築年代や規模が耐力に及ぼす影響を検討した。軽量S造住宅では、分析を行うに十分な定量的データは入手困難であることを確認した。

## (2) 実績データの分析と損壊被害関数への反映

震災研の議論とは別に、地震保険実績をはじめとした各種のデータが蓄積されるに伴い、これらのデータを分析し、損壊被害関数を地震保険実績データに整合させる検討は継続的に実施している。

2013年から2015年の検討では、2000年の建築基準法の改正を踏まえて、それまで1981年以後をひとつに扱っていた木造住宅の区分に2001年以降の区分を設定している。あわせて、日本木造住宅耐震補強事業者協同組合（以下、木耐協）の耐震診断データのうち上部構造評点を用いて、在来木造住宅の2000年までの各年代区分の耐力を再設定した。また、木造の2001年以後の耐力および軽量S造、RC造の各年代については、耐力を変更して計算しなおした損壊被害関数が、出来るだけ地震保険実績データに整合するように、耐力の平均値を評価し直している。このほか、建物被害の地震による差異について文献調査がなされた。とくに地域性については、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2011東北地方太平洋沖地震の調査報告から各種構造別に被害状況の記述を抽出し、入力地震動と被害状況の関係を整理した。しかし、建物被害の地域性を確認するには、同じ地震動特性（地盤特性も含む）の地域での比較が必要であり、それ以前の地震を含めてもデータが不十分という結論に終わっている。

2017年から2019年には、先に再設定した耐力分布と、1995年兵庫県南部地震から2018年北海道胆振東部地震までの地震保険実績データを用いて、2005年に構築した枠組みのもと主として変形クライテリアを設定し直して、損壊被害関数を作成した。しかし、このときに実績データの被害率に整合するように算出された変形クライテリアは、例えば、在来木造の場合、全損に至る最大層間変形角の中央値は0.143（ $\approx 1/7$ ）、同じく半損で0.063（ $\approx 1/16$ ）、同様に軽量S造で0.250（ $=1/4$ ）、0.080（ $=1/12.5$ ）、RC造で0.100（ $=1/10$ ）、0.050（ $=1/20$ ）となり、既往の構造実験等から得られる知見に比べてかなり大きい結果となった。

## (3) 2019年から2020年の震災研の議論

以上、(1)(2)に述べた震災研の議論、実績データの分析等を受けて、損壊被害関数の構築方法を再点検したのが2019年から2020年の震災研の検討である。このときの議論では以下の結論を得た（詳細は次章に詳述する）。

1. 現行の損壊被害関数の基本的な構築方法は引き継ぎつつ、工学的知見から考えられる適切な範囲で設定されるパラメータで損壊被害関数を構築する。
2. モデルのパラメータは実績データに合うように定めるのではなく、最新の耐震工学の知見に基づき設定し、計算された被害率と実績データの差異があれば、これを埋めるための検討を行う。
3. 説明が困難な差異が残る場合は、将来の検討課題として整理する。

また、このときには、地震保険実績の被害率に見られるばらつきの原因を特定して損壊

被害関数に反映することを狙い、人口などの社会統計や地盤特性など、現行の損壊被害関数では考慮していない各種の要因と被害率の違いの関係を統計的に分析したが、揺れの強さと被害率の関係が地震により大きく分かれる理由を明らかにすることはできなかった。

以上の結論を得て 1.1 節に記した目的で本検討を実施することになった。

#### 1.4 本報告書の構成

本報告書は、4回の震災研と、それに伴う分科会の議論をまとめたものであるが、記載順序は、必ずしも議論の時系列のとおりではなく、損壊被害関数を構築する観点から整理し直している。

第2章では、損壊被害関数のあらましを振り返るとともに、1.3節で概説した過去の検討のうち、本検討に直接関係する論点の詳細を整理する。第3章では、入力地震動の考え方や構造種別の振動特性、耐力分布や変形クライテリアを設定し、その根拠をまとめる。第4章では、第3章に設定したパラメータを用いて損壊被害関数を作成する。第5章では、損壊被害関数と実績被害率が乖離する要因を整理する。最終章では検討内容を総括する。

## 第2章 検討経緯

### 2.1 統計的手法と解析的手法による被害関数の構築

地震動強さの指標を説明変数として建築群の被害率を示す、いわゆる被害関数を作成する方法は、一般に統計的手法と解析的手法に大別される。

統計的手法により被害関数を作成するには、過去の震災における地震動や建物被害の記録を収集して地震動強さと被害率の関係を整理し、対数正規分布や正規分布などの関数形を仮定して、回帰分析によりパラメータを定める。例えば、村尾・山崎（2000）<sup>4)</sup>は、1995年兵庫県南部地震における神戸市灘区の被害を対象に、町丁目単位で推定されたPGVと、神戸市が実施した建築物被災度調査に基づく、建物属性（建築構造種別、建築年代など）別の全半壊率、全壊率との関係を対数正規分布でモデル化している。統計的手法は、実際の被害を回帰したものであるため、当然のことながら過去の震災被害をよく説明できる。しかし、このことは、過去に震災の経験がない、もしくは少ない地域、建物属性や地震動強さが得られていない区分に対しては、それまでのデータから作成した被害関数を外挿して、被害率を推測せざるを得ないことを意味している。

一方、解析的手法は、例えば宮腰（2005）<sup>1)</sup>が検討したように、建物属性別に振動モデルを作成して地震応答解析を行い、被害発生を模擬して作成したデータから被害関数を作成するものである。必ずしも震災の記録でなくても構造実験などで蓄積された既往の知見を活用して、振動モデルや被害に至る条件を記述できれば、これまでに経験のない、もしくは少ない被害率も推定できることが利点である。ただし、作成した被害関数の説明性は、採用したモデルの説明性に依存するので、実験室と実際の被害との違いを踏まえるなど、知見を適用するには十分な配慮が必要である。また、少なくとも過去の震災の被害率をある程度は説明できることが望ましい。

### 2.2 損壊被害関数の構築方法

地震保険では、南海トラフ地震をはじめとした、これまで地震保険が類似の地震を含めて経験がない、将来の発生が予測されるあらゆる地震に対して、被害を予測する必要がある。そこで、震災研では、地震の揺れにより生ずる被害を推測するための被害関数（以下、損壊被害関数）を作成するにあたり、第1章にも述べたように2005年に解析的手法に基づく損壊被害関数の構築方法<sup>1)</sup>を議論してきた。一方で、地震保険支払実績データ（以後、実績データ）などの知見の蓄積を反映してモデルパラメータの見直しを検討してきた。

モデルパラメータの見直し時に用いられてきた損壊被害関数の構築方法は、2005年の構築方法<sup>1)</sup>に基づいている。構築方法の概要を下記①～⑤に、フロー図を図2.2.1に示す。事前に設定すべきパラメータは、構造ごとに適切な復元力特性を与えた多質点せん断ばね系の「建物モデル」、建物モデルの時刻歴応答解析に用いる「入力地震動」、建物モデルの応答変形を説明変数として各被害の発生率を示す「変形クライテリア」、建物属性に応じたべ

ースシア係数の分布を示す「耐力分布」の4つである。

- ① 建物モデルとして多質点等価せん断ばね系によりモデル化する。復元力特性は構造種別に設定する。
- ② 建物耐力（ベースシア係数）をパラメータとした複数の建物モデルに対して、PGV をパラメータとした入力地震動による時刻歴応答解析を実施し、建物耐力、PGV に応じた建物モデルの最大層間変形角を得る（図 2.2.1 の(a)）。
- ③ 「変形クライテリア」（図 2.2.1 の(d)）を用いて、①で得た最大層間変形角を各被害の発生率に変換する（図 2.2.1 の(b)）。
- ④ 構造種別、建築年代に応じて設定した「耐力分布」（図 2.2.1 の(e)）を用いて、ベースシア係数、PGV ごとに③で求めた被害率を加重平均し、PGV を説明変数とした被害率を算定する（図 2.2.1 の(c)）。
- ⑤ ④で得られた被害率を、対数正規分布で回帰したものとして損壊被害関数を得る。

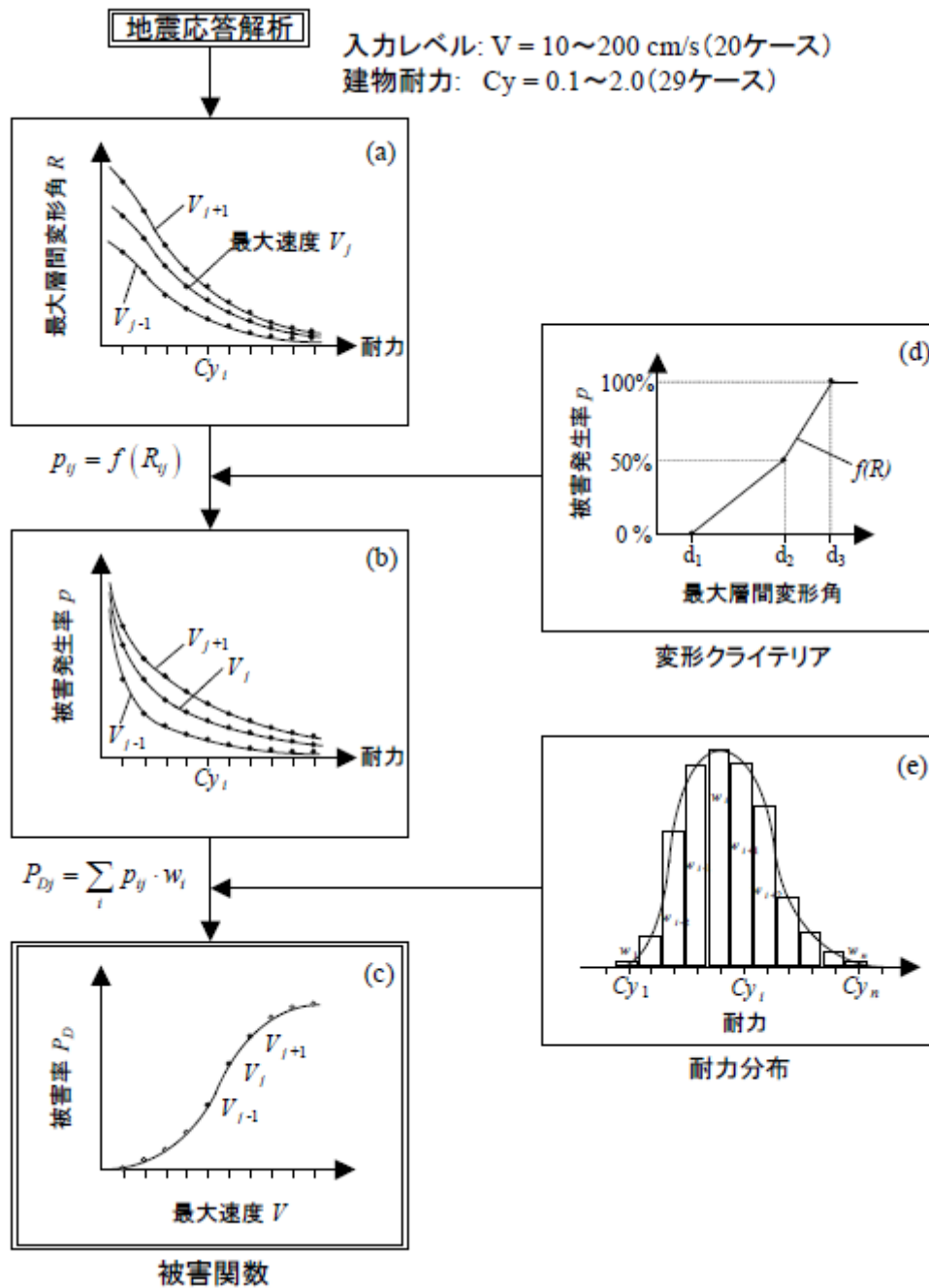


図 2.2.1 建物の損壊被害関数の構築方法の概要

## 2.3 損壊被害関数に関する震災研での議論

### 2.3.1 入力地震動指標

損壊被害関数の説明変数に用いるべき地震動指標について、既往検討<sup>2)</sup>では震度、地表最大加速度 (PGA)、地表最大速度 (PGV)、加速度応答スペクトルの平均 (以下、RSI) を対象に地震保険実績被害率との相関を分析している。RSI は図 2.3.1 に示すように中心周期  $T_c$  と帯域幅  $b$  をパラメータとした加速度応答スペクトルの平均として定義している。図 2.3.2 は強震観測点周りでの被害率と各地震動指標を整理したものであり、横軸は RSI のパラメータである中心周期である。震度や PGA、PGV は中心周期に依存しないため、一定の相関係数を示す。検討の結果から、適切に中心周期を設定した場合 (図 2.3.2 の相関係数のピーク) に RSI は地震保険被害率と比較的対応が良い傾向にあり、PGV はそれに続く形であった。ただし、この分析においても地震保険実績データが必ずしも十分な量があるとは言えず、RSI を用いる場合は、地震動予測の評価精度のほか、中心周期と建物モデルとの整合性 (相関係数のピークをとる中心周期の物理的な解釈) には課題がある。中心周期を物理的に解釈しやすい各被害程度における限界変形角における等価周期に設定した検討では、PGV を指標とした損壊被害関数よりも実績データとの関係が乖離する傾向がみられた。

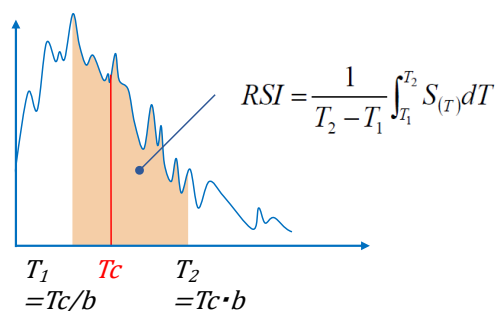


図 2.3.1 RSI の定義の概念図

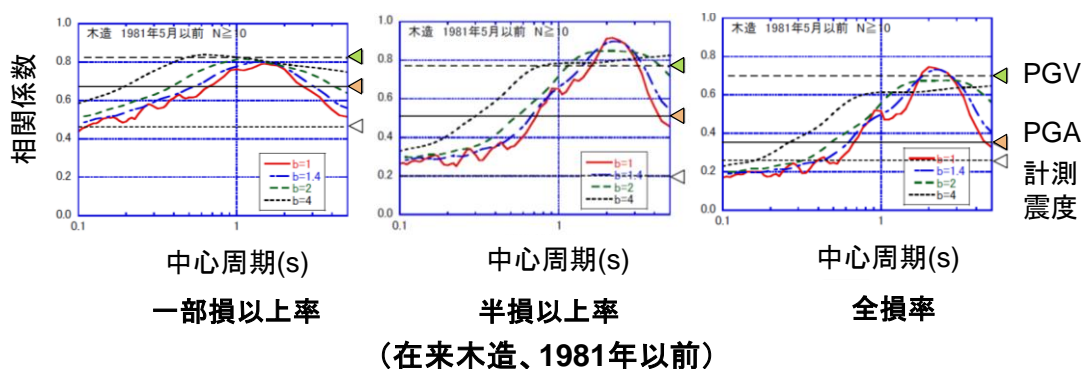


図 2.3.2 地震動指標と地震保険実績被害の相関係数の比較



### 2.3.2 損壊被害関数の見直しの方針

2019年から2020年にかけて開催された地震災害予測研究会（以下、震災研）では、過去の震災研での議論を振り返りつつ、現行の損壊被害関数構築方法の見直し案について意見交換が行われた。その際の課題意識は、以下の3点である。

- ① 現行の方法に時代遅れの点はないか。
- ② 損壊被害関数の耐震工学による説明性を向上することはできるか。
- ③ 地震保険実績の被害率に見られるばらつきの原因を特定し、損壊被害関数に反映することはできるか。

震災研での議論の結果、上記①については現行の構築手法そのものは現在でも妥当であり、時代遅れの点がないことを確認した。②については地震保険実績を考慮して設定したパラメータは既往の工学的知見と整合せず、主に建物モデルの説明性を改善すべきという意見が得られた。③については社会統計量なども含めて従来、分析対象としてこなかった指標との相関分析等を行ったものの、ばらつきについて特定の原因を確認することができなかった。損壊被害関数の説明変数に用いる地震動指標に関しても議論が行われたが、2.3.1に示す既往検討から、地震動予測や建物モデルとの整合性の観点で、現行の指標を踏襲しPGVを用いることとした。

これらの検討結果を勘案し、損壊被害関数を構築するための研究計画案を策定した。まず、損壊被害関数は現行と同様に地表PGVを説明変数とした地震保険実績被害率を予測するモデルとして定義することとした。被害程度としては工学的な説明がしやすい半損以上、全損を取り扱うこととし、原則として現行の枠組みを踏襲し、時刻歴応答解析による最大層間変形角に基づく被害率を回帰して被害関数を作成する方針とした。ただし、モデルのパラメータは実績データに合うように定めるのではなく、最新の耐震工学の知見に基づき設定し、計算された被害率と実績データの差異があれば、これを埋めるための検討を行うこととした。説明が困難な差異が残る場合は、将来の検討課題として整理する方針とした。なお、大半損<sup>注)</sup>の損壊被害関数については、工学的知見の乏しさから本研究では対象としていない。

注) 地震保険の保険金支払について、半損（保険金額の50%の支払）と一部損（保険金額の5%の支払）に大きな差があり、保険金支払の較差縮小を図るため、2017年1月1日以降の契約から半損が大半損（保険金額の60%の支払）、小半損（保険金額の30%の支払）とされた。