

4章 木造住宅の損傷確率評価に基づく被害分布推定の検討

4.1 IDA 曲線の算定方法

以下では木造住宅を対象に建物ごとの損傷評価を行う手法を検討する。本研究では FEMA P-695¹⁶⁾に記されている方法を参考に、漸増動的解析(IDA)を用いた損傷確率曲線の算定により建物ごとの損傷確率評価を行う。IDA は地震波を地震動強さで基準化し、その倍率を漸増させながら同一建物モデルに対して順次地震応答解析を行い、地震動強さと応答の関係を得る手法である。FEMA P-695 では、地震動強さに建物の 1 次固有周期に対する加速度応答スペクトルを用いているが、本研究では、リアルタイム地震被害推定に手法を適用することを目指しているため、最大地動速度 (PGV) を使用する。この理由は、J-SHIS で公開されている PGV に関する全国の 250m 地域メッシュの PGV 増幅率分布)を利用することで、地震動強さ分布を迅速に推定可能なためである。図 4.1 に地震動強さを PGV とした場合の、IDA 曲線算定のフローを示す。また、複数の地震波に対する IDA の結果から損傷確率曲線を算定できる。損傷確率曲線の算定は 4.5 節で後述する。

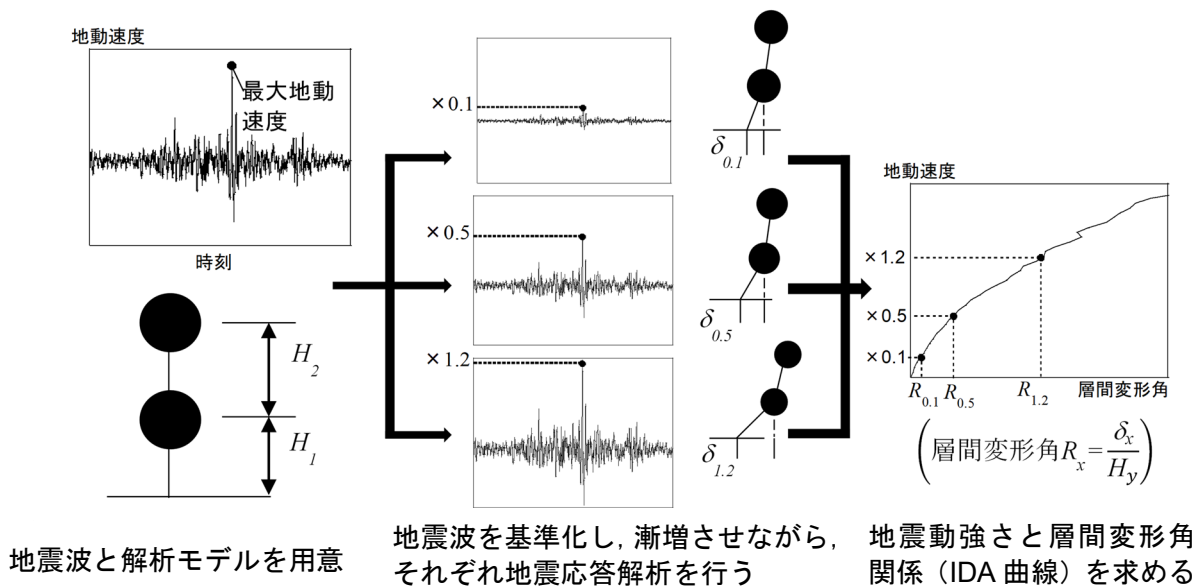


図 4.1 IDA の計算手順概要

4.2 木造住宅の解析モデル

本研究で想定する建物は、1 および 2 階建ての木造住宅である。各階の高さは 2.8m としている。ここで、1 階の床面積は 100 m² とし、2 階建て住宅の 2 階床面積は、1 階床面積に対する 2 階床面積の割合 α を設け、パラメータ α によって変化させるものとする。建物の解析モデルは、非線形の荷重変形関係を有する多質点せん断系モデルとする。

建物の耐震性能は建築年に従い、建築当時の耐震基準に応じて 1959 年基準、1981 年基準、2000 年基準の 3 区分とする。質量の設定は、床面積あたりの重量から算定した。また、重量の設定は耐震基準年ごとに屋根、外壁、内壁の材料種別を変化させており、1959 年基準の建物は非常に重い建

4章 木造住宅の損傷確率評価に基づく被害分布推定の検討

物, 1981年基準の建物は重い建物, 2000年基準の建物は軽い建物を仮定している. 表 4.1 に床面積あたりの重量表を示す. ここで, 2階建て住宅の1階部分を A_{1F} , 2階部分を A_{2F} とし, 1階部分の層重量を W_{1F} , 2階部分の層重量を W_{2F} とし, 重量を式(2), (3)により求めた. なお, 1階建ての建物は, 式(3)を用いて計算している.

$$W_{1F} = (w_f + w_o + w_i + w_l) \times A_{2F} + \{w_r + (w_o + w_i)/2\} \times (A_{1F} - A_{2F}) \quad (2)$$

$$W_{2F} = \{w_r + (w_o + w_i)/2\} \times A_{2F} \quad (3)$$

表 4.1 床面積 1m²あたりの重量

耐震基準	屋根重量	外壁重量	内壁重量	床重量	積載荷重
	w_r	w_o	w_i	w_f	w_l
1959年基準 非常に重い建物	2.40	1.20	0.45		
1981年基準 重い建物	1.30	1.20	0.20	0.60	0.60
2000年基準 軽い建物	0.95	0.75	0.20		

荷重変形関係は, 建築年当時の耐震基準を最低限満たすような木造住宅の層せん断力係数-層間変形角関係を基準とし, 以下のような変更を加えている.

- ① 木造住宅の実大実験の結果や, 木造住宅の広域被害推定に関する知見より, 実建物の耐力は設計基準の約3倍の耐力を有していると仮定し, 層せん断力係数を基準の3倍する.
- ② 1996年度に建てられた愛知県内の軸組木造住宅334棟を対象とした調査から, 建築基準法施行令46条(建築年当時)に基づく最低壁量に対する壁量充足率の各階の平均値を参照し, 2階の壁量充足率が1階の壁量充足率の1.24倍として仮定する. したがって, すべての年代の建物について, 2階の層せん断力係数を1.24倍する.

以上の変更を考慮した層せん断力係数-層間変形角関係を図 4.2 に示す. 図 4.2 を見ると, 耐震基準年が新しいほど耐力が大きいことがわかる. また, 履歴特性は図 4.3 に示すバイリニア要素とスリップ要素を並列に結合したバイリニア+スリップモデルを設定する.

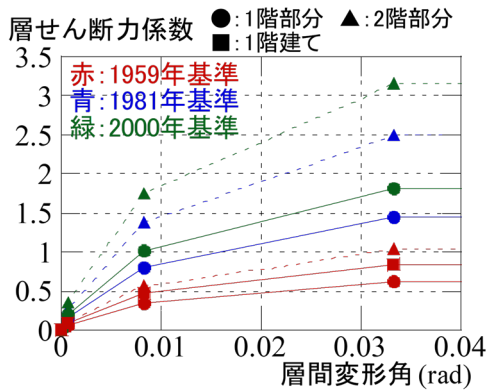


図 4.2 層せん断力係数－層間変形角関係

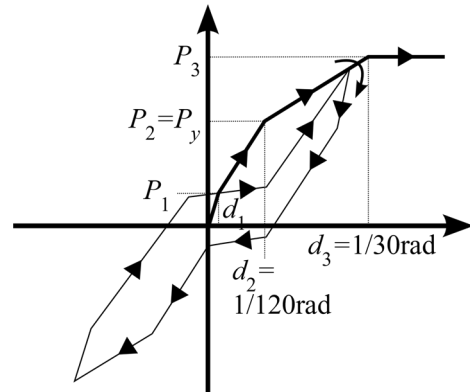


図 4.3 バイリニア+スリップモデル

4.3 入力地震波

入力地震波は、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET, KiK-net で、1997.01～2022.03 の間に得られた地震波のうち、最大地動加速度が 500 cm/s^2 を超える水平 (NS, EW) 波を用いた。また、地震波ごとに震源種類と観測点の地盤種類で分類分けをしている。震源種類は、地震調査研究推進本部の評価を参考にして内陸直下型 (以降、直下型と呼ぶ)、プレート境界型 (以降、境界型と呼ぶ) の 2 種類に分類した。地盤種類は、NEHRP のサイト分類によって、深度 30m までの平均 S 波速度 (V_{s30}) ごとに硬質地盤 ($360 \text{ cm/s} < V_{s30}$, class C)、普通地盤 ($180 \text{ cm/s} < V_{s30} \leq 360 \text{ cm/s}$, class D)、軟弱地盤 ($V_{s30} \leq 180 \text{ cm/s}$, class E) の 3 種類に分類した。深度 30m までの S 波速度が一部不明な地点については、翠川ららの回帰式を用いて、 V_{s30} を求めた。表 4.2 に分類ごとの地震波数を示す。なお、軟弱地盤の観測点では、最大地動加速度が 500 cm/s^2 を超える地震波は非常に少なかったため、地震波数の確保のため閾値を下げ最大地動加速度が 300 cm/s^2 を超える地震波を対象とした。

表 4.2 分類ごとの地震波の数

	硬質	普通	軟弱	合計
内陸直下型	108	42	11	161
プレート境界型	103	65	16	184

4章 木造住宅の損傷確率評価に基づく被害分布推定の検討

4.4 IDA 曲線の算定

4.2 節で設定した木造住宅を想定した質点系の解析モデルに、4.3 節の地震波をそれぞれ入力し、IDA 曲線を求める。解析パラメータは以下のとおりである。

- ① 震源種類：内陸直下型，プレート境界型
- ② 地盤種類：硬質，普通，軟弱
- ③ 耐震基準，1959年基準，1981年基準，2000年基準
- ④ 階数：1，2
- ⑤ 1階床面積に対する2階床面積の割合 α ：0.2，1.0（階数が2の場合のみ）

図 4.4 に、境界型地震で2階建て建物($\alpha=1.0$)の1階部分に関する IDA 曲線を示す。グラフの横軸は最大層間変形角，縦軸は最大地動速度を示している。上段は硬質地盤，下段は軟弱地盤の結果で、それぞれ左から1959年基準，1981年基準，2000年基準の順に並んでいる。また、図中の灰色の線は各地震波から求めた IDA 曲線群であり、太線は層間変形角が小さい側から数えたパーセンタイル曲線を示す。赤色が16パーセンタイル曲線，青色が50パーセンタイル曲線，緑色が84パーセンタイル曲線を表している。図 4.4 の50パーセンタイル曲線に注目すると、耐震基準が新しいほど同一PGV時の最大層間変形角が小さくなっており、耐震性能が反映されていることがわかる。

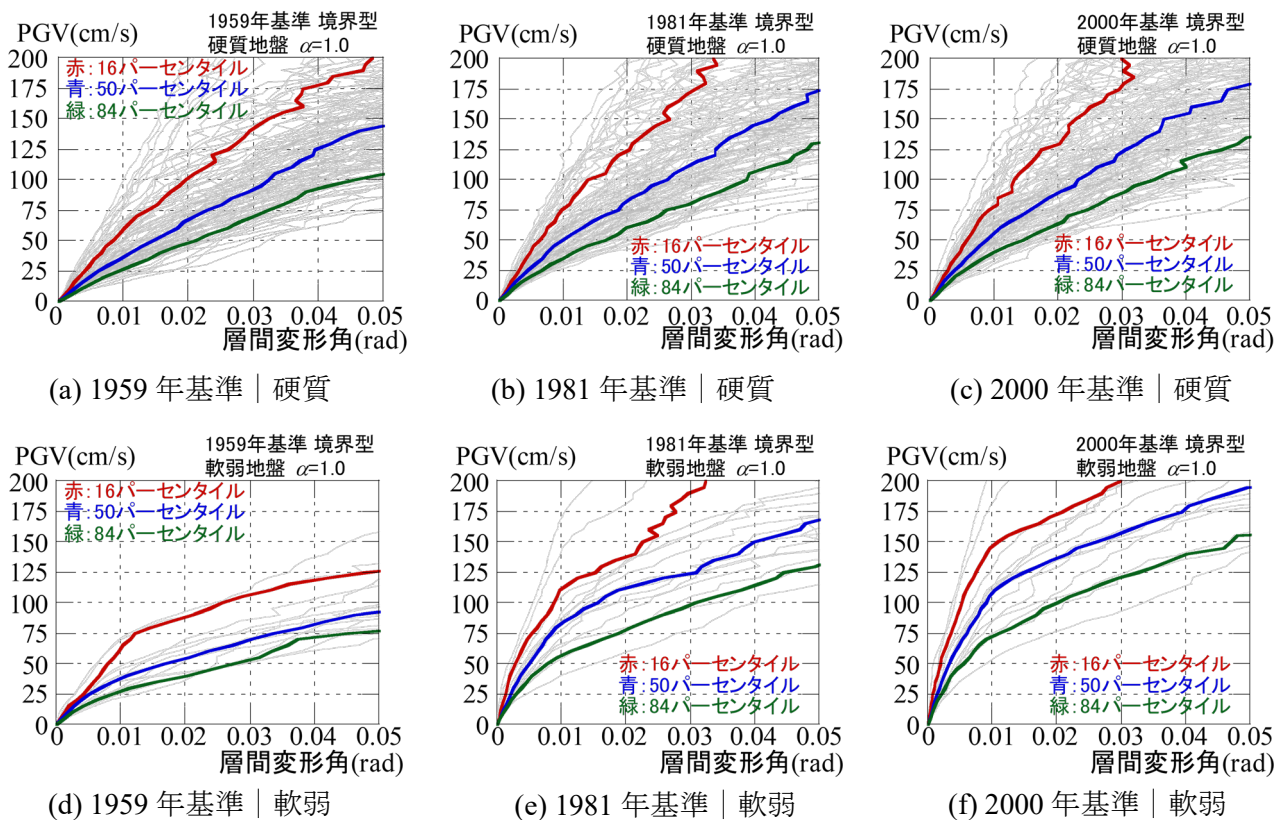


図 4.4 算定した IDA 曲線

4.5 損傷確率曲線の算定

損傷確率曲線は、建物にある地震動強さが入力された時、設定した変形に達する確率を求めるものである。本研究では、算定した IDA 曲線から各パラメータにおける損傷確率曲線を算定する。損傷確率曲線は、設定した層間変形角に達する PGV の分布が式(4)の対数正規分布の分布関数に従うと仮定する。

$$p = \Phi \left\{ \frac{\ln(PGV) - \lambda}{\delta} \right\} \tag{4}$$

ここで、 Φ は標準正規分布関数、 λ は対数平均、 δ は対数標準偏差である。なお、本研究では、 λ は設定した層間変形角時の、PGV の 50 パーセンタイル値の自然対数とし、 δ は等価標準偏差 δ_{eq} とし下記の式(5.1)~(5.3)のいずれかを適用するものとする。

$$\delta_{eq1} = \ln (PGV_{84\%}/PGV_{16\%})/2 \tag{5.1}$$

$$\delta_{eq2} = -\ln (PGV_{50\%}/PGV_{84\%}) \tag{5.2}$$

$$\delta_{eq3} = \ln (PGV_{50\%}/PGV_{16\%}) \tag{5.3}$$

ここで $PGV_{x\%}$ は、設定変形時の PGV の x パーセンタイル値である。上記の手法は IDA 曲線の外れ値を考慮せず曲線のパラメータを求めることができるため、実データとよくフィッティングする手法として用いられる。 δ_{eq2} を使った曲線は損傷確率が 50%以上の範囲で対応がよく、 δ_{eq3} を使った曲線は損傷確率 50%以下の範囲で対応が良く、 δ_{eq1} は平均的に合うようにしたパラメータである。ここで、設定層間変形角を 1/30rad (安全限界)とした場合の算定概要例を図 4.5 に示す。右図中の●印は、入力地震波をその PGV に基準化し入力した時の、全地震波数に対する設定変形に至った地震波数の割合をプロットしたものである。本研究の被害推定では、建物に入力された PGV が適用する損傷確率曲線の平均値 (損傷確率が 50%となるときの PGV の値) より大きい場合は δ_{eq2} の曲線、小さい場合は δ_{eq3} の曲線を適用した。ほとんどの場合 δ_{eq1} を使った曲線でも解析データとの対応が良いが、一部のパラメータでは δ_{eq1} を使った曲線だけではプロットとの対応が悪い場合がある。したがって、曲線と解析データの一致具合が低いことによる損傷評価の誤差を抑えるため、すべてのパラメータで上記の方法を使った被害推定を適用する。

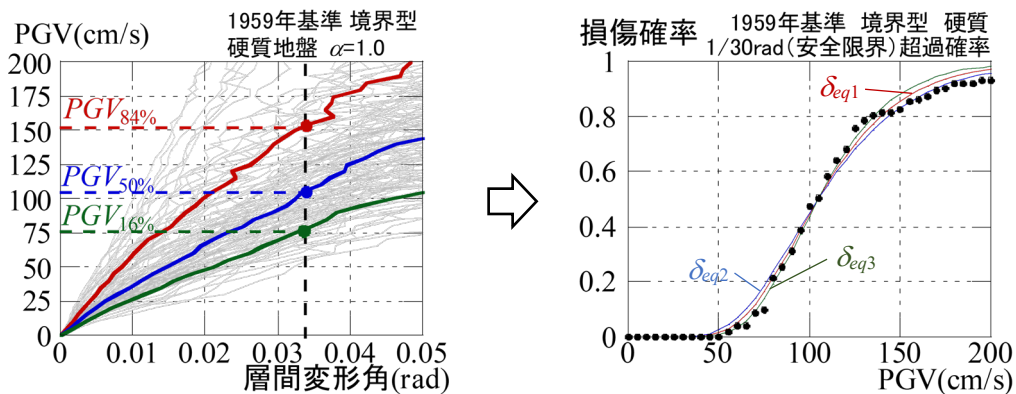


図 4.5 設定層間変形角 1/30rad の場合の損傷確率曲線の算定例

4章 木造住宅の損傷確率評価に基づく被害分布推定の検討

4.5.1 1/30rad（安全限界）時の損傷確率曲線

図 4.6 に 1/30 rad（木造建物の安全限界に相当）に関する境界型の損傷確率曲線について、階数、及び床面積比 α をパラメータとした結果を示す。横軸が PGV、縦軸が損傷確率を示しており、 δ_{eq3} を用いた曲線を示している。また上段は硬質地盤、下段は軟弱地盤の場合であり、左から 1959 年基準、1981 年基準、2000 年基準の場合の結果を示している。図中で赤が 2 階建て住宅で $\alpha=1.0$ 、青が 2 階建て住宅で $\alpha=0.2$ 、緑が 1 階建て住宅の結果を示しており、各色のプロットは解析から得られた全地震波に対する変形が設定した層間変形角に達した地震波の割合である。なお、本研究の解析モデルの範囲では、2 階建て建物の 2 階部分のみが 1/30 rad に達する場合が見られなかったため、建物の 1 階部分の層間変形角が設定変形に達した時を対象として、損傷確率曲線を求めている。まず、面積比 α による違いを見る。図 4.6 を見ると、 $\alpha=1.0$ と $\alpha=0.2$ では、 $\alpha=0.2$ の方が損傷確率が大きい傾向にあり、その差は最大で 19.9%である。これは、 $\alpha=1.0$ と $\alpha=0.2$ では、質量と剛性の違いによって固有周期が変化することが要因と考えられる。固有周期 0.2 s 以降を見ると、今回分類した範囲では固有周期が大きくなるほど応答スペクトルの平均値は減少傾向にあるため、固有周期の短い方が応答が大きくなると考えられる。したがって、 $\alpha=1.0$ と $\alpha=0.2$ では $\alpha=0.2$ の方が初期固有周期が短いため、 $\alpha=1.0$ と比べて応答が大きくなり、損傷確率も高くなったと考えられる。一方、図 4.6 (e), (f)では、初期固有周期に対する加速度応答スペクトルの平均値は $\alpha=1.0$ の方が大きい、損傷確率は $\alpha=0.2$ の方が高い。

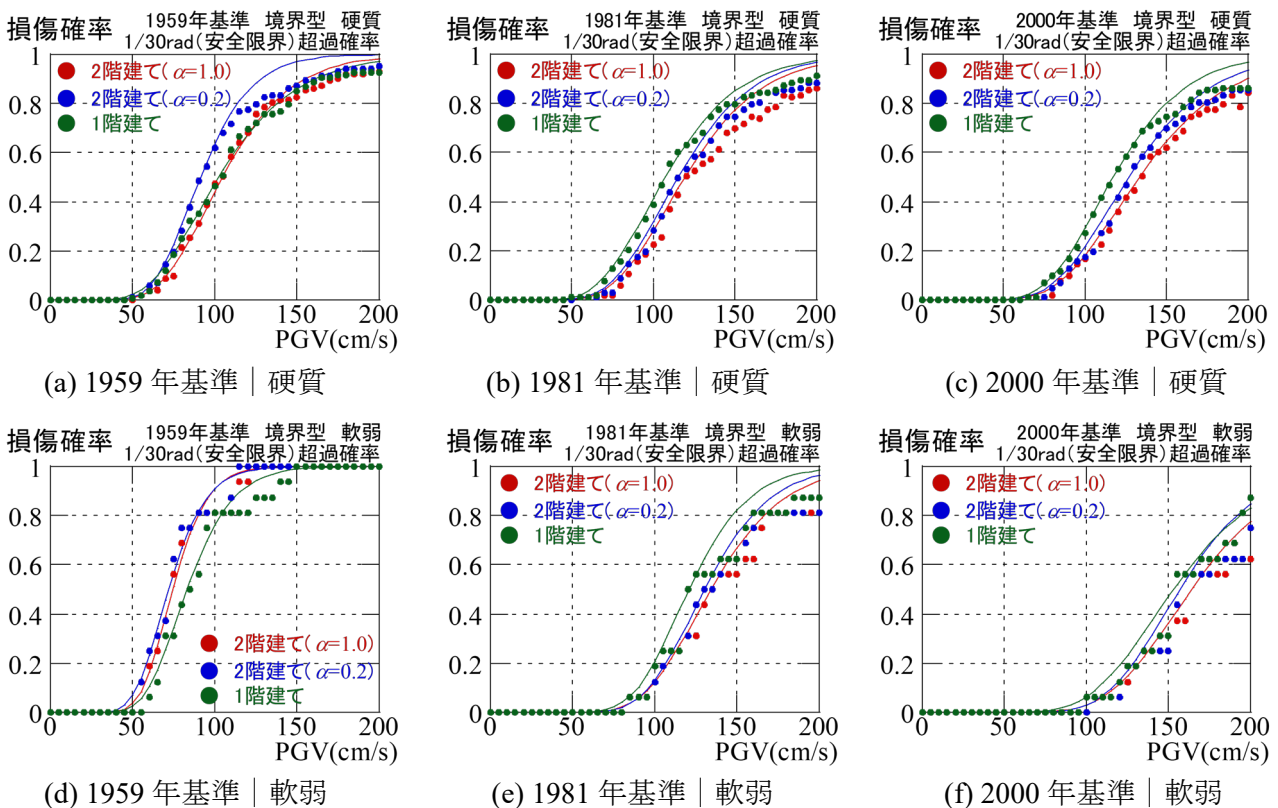


図 4.6 1/30rad 時の損傷確率曲線 | 階数, 床面積比 α による違い

4.6 損傷確率曲線と都市計画基礎調査データを用いた木造住宅の損傷評価

4.5 節で算定した損傷確率曲線を使って、豊橋市の木造住宅の損傷評価を行う。想定する地震動は 3.2.1 項で示した豊橋市の想定南海トラフ地震の最大クラスの地震動である。また、対象とする建物は、都市計画基礎調査上で 1, 2 階建ての木造専用住宅となっている建物すべてとする。

推定を行う前に、基礎調査データに含まれる建物の属性に応じて、あらかじめ算定した損傷確率曲線のパラメータを割り当てておく。当該建物の建築年、階数、1 階の床面積に対する 2 階の床面積の割合 α 、及び当該建物が建っている地盤の平均 S 波速度 V_{s30} に応じて、内陸直下型、プレート境界型のパラメータをそれぞれ割り当てる。なお、1 階の床面積に対する 2 階の床面積 α については下記のような条件に従い、パラメータを割り当てている。

- ① 基礎調査データ上では、 $\alpha > 1.0$ (延床面積と建築面積の差が建築面積を上回る) の建物が存在する。このような建物は、1階部分が車庫やピロティ空間になっている建物と考えられるが、基礎調査データの属性のみではどのような形式か把握できない。したがって本研究では、 $\alpha > 1.0$ の建物は $\alpha = 1.0$ の建物として、損傷確率曲線のパラメータを割り当てた。
- ② $\alpha = 0.2$ よりも小さい場合のパラメータは算定していないため、 $\alpha < 0.2$ のような建物は $\alpha = 0.2$ として損傷確率曲線のパラメータを割り当てた。
- ③ 本研究では、 $\alpha = 0.2, 1.0$ の他に、 $\alpha = 0.4, 0.6, 0.8$ の計 5 ケースについて算定している。基礎調査データ上の建物の α の値 α' が、算定したパラメータと一致しない場合は、 α' に近いパラメータ 2 つ (例えば $\alpha' = 0.54$ では $\alpha = 0.4, 0.6$ のパラメータ) の線形近似により損傷確率を求める。なお、各木造住宅に入力される PGV は、その建物の重心がある地域メッシュの PGV とする。

4.6.1 1/30rad 時の損傷確率分布

図 4.7 に、豊橋市内の木造住宅の、境界型地震に対する 1/30rad (安全限界) 以上に達する損傷確率分布の一部を示す。各建物の損傷確率により色分けを行っており、暖色によるほど損傷確率が大きくなる。右上に凡例 (カラースケール) を示している。なお、白い建物は、本研究で対象外の建物 (木造専用住宅 3 階以上、専用住宅以外の木造建物、非木造建物) である。また、薄い黒線は 250m 地域メッシュの境界を示しており、黒い太線で示した箇所は図 4.7 (a) では $PGV \approx 110\text{cm/s}$ 、(b) では

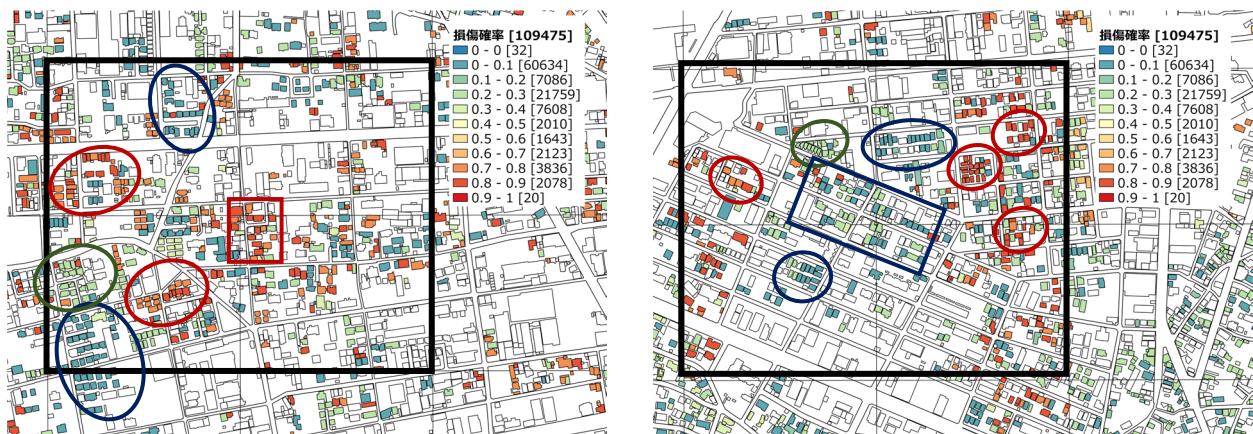


図 4.7 木造住宅の 1/30rad に関する損傷確率分布

4章 木造住宅の損傷確率評価に基づく被害分布推定の検討

PGV≒109cm/s でほぼ同じ地動速度の 250m 地域メッシュである。図 4.7 を見ると、同一の 250m 地域メッシュ内でも損傷確率が建物ごとに違うことがわかる。ここで、図 4.7 (a), (b)のメッシュで、損傷確率が 70%以上の建物が集中している赤丸部分は、耐震基準が 1959 年基準の建物が集中している箇所であり、同一メッシュの中でも建物被害の危険性が高いことがわかる。一方、緑丸部分の 1981 年基準の建物が集中している箇所、青丸部分の 2000 年基準の建物が集中している箇所については、損傷確率が 40%以下と低く、危険性が低い箇所であることがわかる。また、図 4.7 (a)中央の赤枠や(b)中央の青枠のように、地域メッシュの境界を越えて損傷確率の高い、もしくは低い建物が集中している箇所を明確に示すことができる。これらは、被害率関数による地域メッシュ単位のマクロな被害推定では示すことができない推定情報であり、建物単位のミクロな被害推定を行うことの利点と言える。本手法を用いることで、同一メッシュの中での被害の濃淡が迅速に示せるため、人命救助等の優先度を定めるための情報を提供可能と考えられる。

4.6.2 1/120rad 時の損傷確率分布

図 4.8 に、木造住宅の境界型地震に対する 1/120rad (損傷限界) 以上に関する損傷確率分布の一部を示す。示している建物の範囲は図 4.7 と同じ範囲であり、暖色によるほど損傷確率が高い。図 4.8 を見ると、示した範囲ではいずれの建物も損傷確率が 60%以上となっており、1/120rad 程度

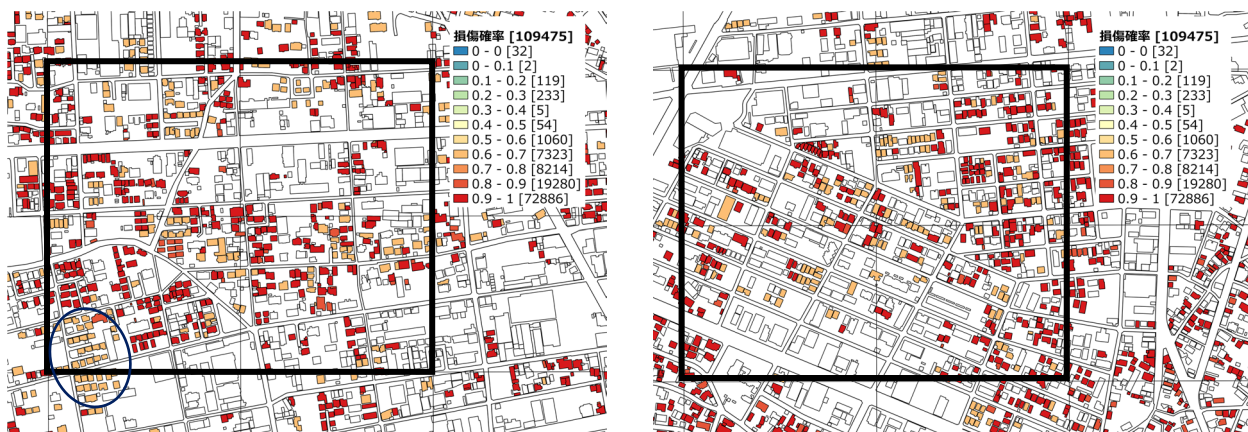


図 4.8 木造住宅の 1/120rad に関する損傷確率分布

の変形が発生する確率が極めて高いことがわかる。図 4.8 (a)を見ると、青丸で示した箇所では他の部分よりも比較的損傷確率が低いことを示せており、先に述べたミクロな被害推定の利点が表れている。しかしながら、今回使用した想定地震動のような非常に強い地震動では、1/120rad のような小さな被害を示すと、損傷確率の濃淡はほぼ現れない（どこも危険度が高い）ため、ミクロな被害推定の利点を活かせていないと思われる。一方、本研究で想定している地震動よりも小さい地震動の場合では、1/120rad のような小さい被害の方が、損傷確率の濃淡が表れる可能性がある。そのため、都市レベルでのミクロな RT 地震被害推定を行うにあたっては、地震動の強さに応じて、結果を示す被害レベルを変更することで、ミクロな被害推定の利点を活かし、迅速な被害対応につながる情報の提供ができる可能性がある。

4.7 4章のまとめ

4章では FEMA P-695 に記されている方法を参考に、漸増動的解析(IDA)を用いた木造住宅の損傷確率曲線を算定した。また、算定した損傷確率曲線と都市計画基礎調査を用いて、南海トラフの想定地震動に対する豊橋市の木造住宅の損傷確率評価を行った。以下に得られた結果を示す。

- 建物の耐震基準、震源種類、地盤種類、階数、1階床面積に対する2階床面積の割合 α をパラメータとして、木造専用住宅を対象とした損傷確率曲線を算定した。層間変形角 $1/30\text{rad}$ （木造建物の安全限界に相当）を設定変形とした場合、床面積比 $\alpha=1.0$ と 0.2 では、損傷確率が最大で 19.4% の差があり、1階建てと2階建て($\alpha=1.0$)の場合では、最大で 19.9% の差があった。床面積比については、 $\alpha=1.0$ のような整形な建物が多いと考ええると、都市レベルでの被害推定へ与える影響は小さいと考えられる。しかし、 α を考慮した推定結果は安全側となり、その影響は1981年より前に建てられた古い木造住宅で顕著になる点は留意する必要がある。
- 愛知県豊橋市を対象として、南海トラフ地震の想定地震動強さを入力とした木造住宅の損傷確率による被害推定を行った。建物ごとに $1/30\text{rad}$ に関する損傷確率を求めることで、メッシュ内で具体的にどの建物が損傷の危険性が高いかを地図上で表現することが可能であり、発災時により有益な情報として用いることができる可能性が高い。一方、 $1/120\text{rad}$ に関する損傷確率を用いる場合、本研究で使用した地震動のような強い地震では、被害の濃淡が表れにくい。したがって、RT地震被害推定にあたり、地震動の強さに応じて結果を示す被害レベルを変えることで、迅速な被害対応につながる情報が提供できる可能性がある。

5章 豊橋市を対象としたリアルタイム地震被害推定システムの構築

5.1 システムの概要

5章では、豊橋市を対象としたリアルタイム地震被害推定システムの概要について説明する。また、現在構築しているシステムを用いて、過去に地震計設置拠点で観測された実際の地震動を入力として、最大地動速度分布推定、建物被害分布推定を行い、その結果を南海トラフの想定地震動分布を入力した場合の結果と比較する。

推定システムは、python により構築する。図 5.1 に、推定全体の流れのフローチャートを示す。



図 5.1 推定全体の手順

5.1.1 STEP1 | 地震判定、各観測点の最大地動速度取得

地震発生 の 判定 は、現在運用している既存の耐震診断システムで行う。既存の耐震診断システムは、図 5.2 に示す東三河地域の 6 拠点で運用しており、拠点ごとに独立してプログラムが実行されている。既存の耐震診断システムでは、5 分おきに、建物に設置している地震計で得られた加速度波形の地震判定を行い、加速度が 1gal を超えた場合、地震が発生したと判定する。本研究で開発するシステムは、既存の耐震診断システムで地震発生と判定された場合に、被害推定プログラムが開始されるつくりとする。既存の耐震診断システムと異なり、開発する被害推定システムは複数の観測拠点で同時帯に観測されたすべての地震波を入力データとしてプログラムを実行する。図 5.3 に、既存の診断システムと本研究での開発システムを含めた地震判定手順を示す。

地震が発生したと判定された場合、各観測点の 1 階、もしくは地下階に設置された地震計で観測された加速度波形を、クラウドストレージを経由して取得し、得られた加速度波形を直接積分することで、速度波形に変換する。そして、得られた速度波形から、各観測点の最大地動速度 (PGV) を取得する。ここで得られた各観測拠点の PGV を、その観測拠点が位置する 250m 地域メッシュの PGV とする。

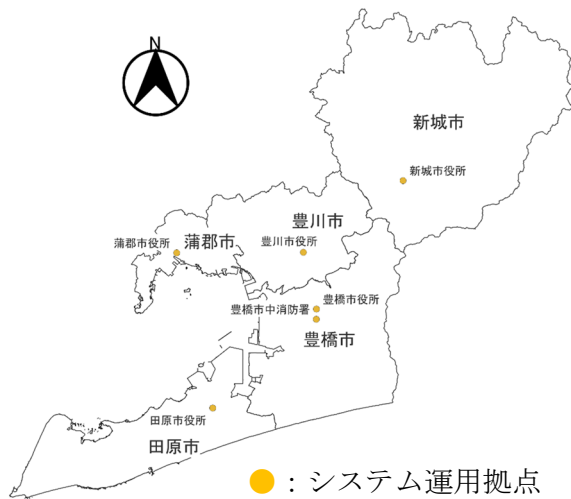


図 5.2 既存耐震診断システムを運用している拠点

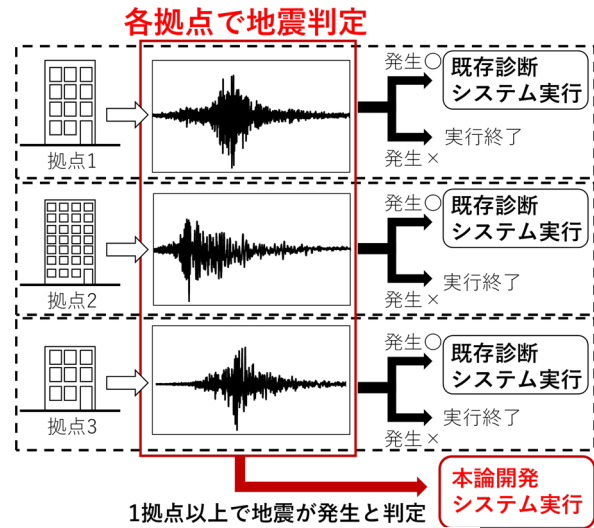


図 5.3 地震判定の手順

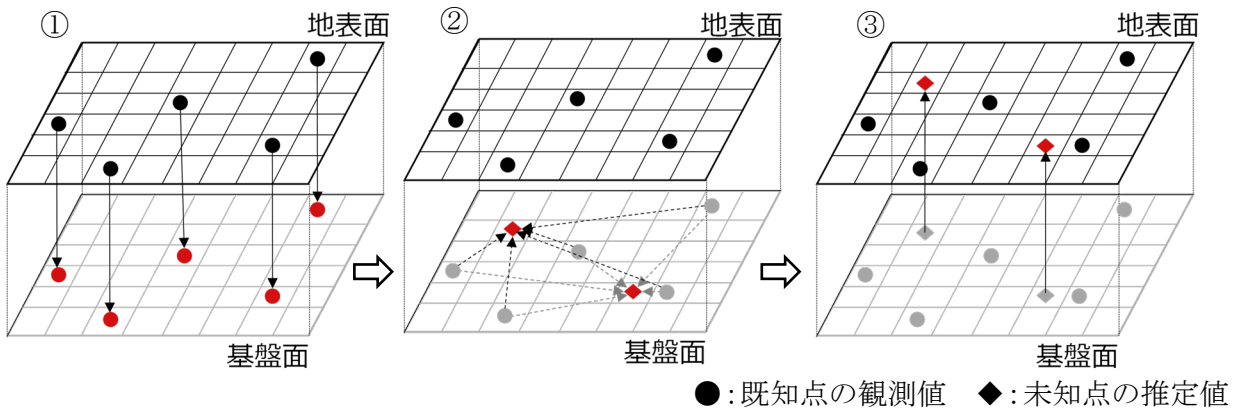


図 5.4 PGV 分布推定の概要

5.1.2 STEP2 | 最大地動速度分布の空間補間

図 5.4 に最大地動速度 (PGV) 分布推定の概要を示す。各手順の操作を以下に示す。

- ① 観測点の地表面での最大地動速度 (PGV_{surf}) を表層地盤増幅度で除し、観測点の基盤面での最大地動速度 (PGV_{base}) を求める。
- ② 空間補間法で、既知点の PGV_{base} 分布から未知点の PGV_{base} を推定し、その分布を求める。
- ③ 未知点の推定 PGV_{base} に表層地盤増幅度を掛け、未知点の推定 PGV_{surf} 分布を求める。

ここで、表層地盤増幅度は、J-SHIS で公開されている 250m 地域メッシュ単位のデータを用いる。この表層地盤増幅度は、PGV にのみ適用可能な増幅度である。図 5.5 に豊橋市の表層地盤増幅度を示す。図 5.5 を見ると、北西部から西部にかけて増幅度が大きくなっており、東部では増幅度が小さくなっている。これは、南海トラフの想定地震動分布と対応しており、地盤増幅度が地動速度分布に与える影響が大きいことが確認できる。各地域メッシュの表層地盤増幅度を考慮することで、その地点の地盤状態を考慮した地動速度分布の推定が可能である。

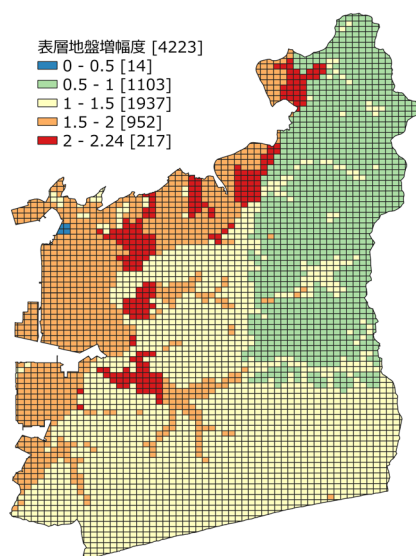


図 5.5 豊橋市の表層地盤増幅度

また，基盤面上での空間補間には，クリギング法を用いる．クリギング法は，データの空間相関性（位置が近いほど互いに値が近い値となる性質）を考慮した空間補間法で，推定値の不確実性を認める，確率論的な空間内挿推定法である．本研究では通常クリギング法により，空間補間を行う．

5.1.3 STEP3, 4 | 建物の損傷確率の算定，地域メッシュ単位の被害率推定

建物ごとの損傷確率は，4章で求めた損傷確率曲線により求める．建物ごとの損傷確率曲線の割り当ては，4.6節で説明した方法に準ずる．また，同一の建物モデルに対して， $1/120\text{rad}$ ， $1/60\text{rad}$ ， $1/30\text{rad}$ の3種類の損傷確率曲線を割り当てた．なお，本研究では，最大層間変形角が $1/120\text{rad}$ 未満の損傷状態を無被害， $1/120\text{rad}$ 以上の変形を受けた損傷状態を小破， $1/60\text{rad}$ 以上の変形を受けた損傷状態を中破， $1/30\text{rad}$ 以上の変形を受けた損傷状態を大破とする．図 5.6 に例として，3つの損傷確率曲線と各損傷状態領域を示す．曲線は，赤色が小破以上，青色が中破以上，緑色が大破以上に関する損傷確率曲線を示している．

また，本研究では，地域メッシュ単位の被害率算定について，建物ごとの損傷確率や損傷状態から地域メッシュ単位の被害棟数を求める手法を検討する．建物ごとの損傷状態がわかれば，そのメッシュ内でその損傷状態の建物の棟数を数えることで，地域メッシュ内の被害棟数を示すことができる．しかし，建物ごとの損傷確率を数えて合計することはできないため，建物ごとの損傷確率から地域メッシュ単位の被害棟数を算出する方法について検討を行う必要がある．本研究では，以下の3つの手法から被害棟数を求めた．

- ① 建物がある損傷状態以上の損傷状態になる確率を算出し，その確率が設定した閾値を超えた建物を被害を受けた建物と判定し，その棟数を地域メッシュごとに集計する．
- ② 算定した IDA 曲線を統計的に整理することで求めることができる 16, 50, 84 パーセンタイル曲線を，建物の最大地動速度－層間変形角関係としてそのまま適用し，その損傷状態に応じて被害棟数を集計する．

5章 豊橋市を対象としたリアルタイム地震被害推定システムの構築

- ③ 建物の各損傷状態になる確率を、建物の被害棟数と考え、各建物のある損傷状態になる確率を合計して、その損傷状態になる棟数とする。

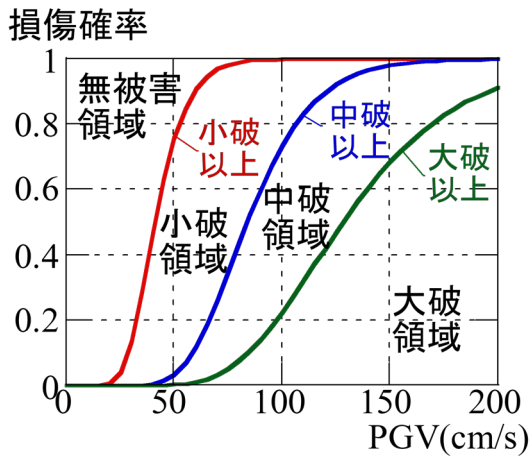


図 5.7 各損傷状態に関する損傷確率曲線

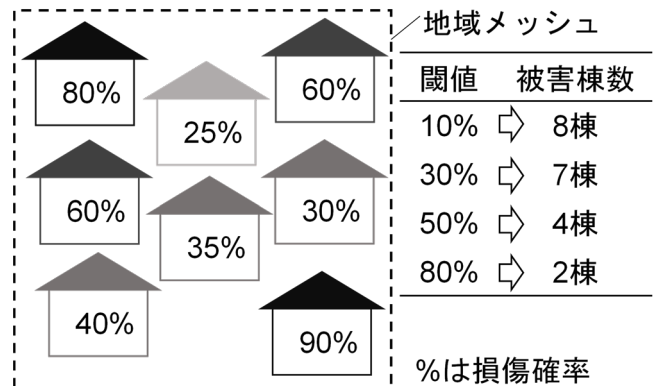


図 5.8 ①の被害棟数集計の概念図

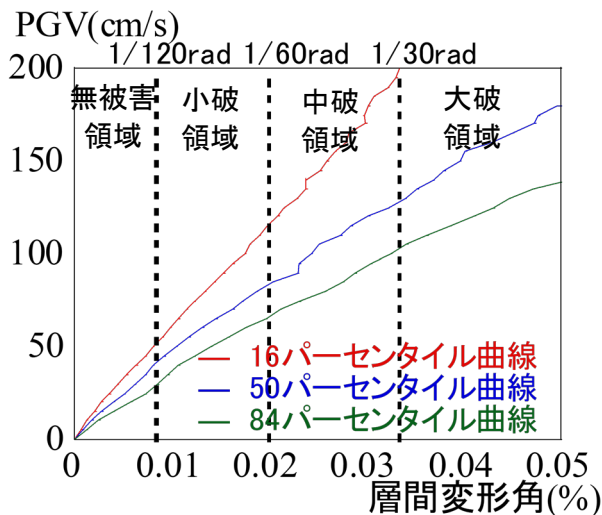


図 5.9 ②で用いる IDA 曲線例

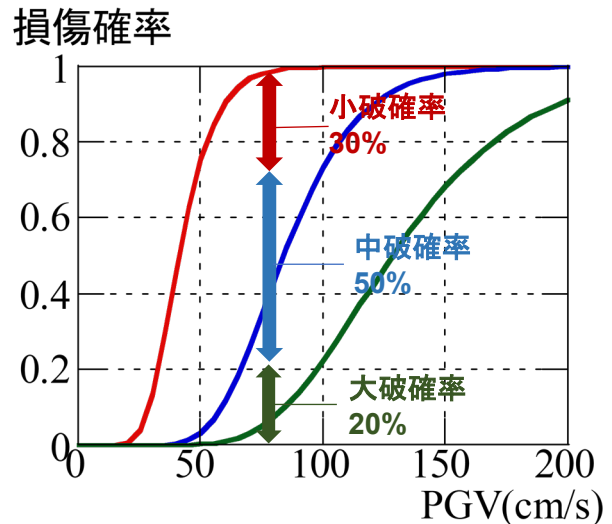


図 5.6 ③で用いる損傷確率の算定

①では、閾値を設け、その閾値以上の損傷確率の建物を、被害を受けた建物として、地域メッシュあたりの被害棟数を算出する。図 5.7 に、①の被害棟数集計の概念図を示す。図 5.7 では、地域メッシュ内に 8 棟の建物があり、各建物の損傷確率が異なっている。この地域メッシュの被害棟数を算出するに辺り、被害を受けたとする損傷確率の閾値を 10%以上とすると、同メッシュ内の被害棟数は 8 棟となる。一方、被害を受けたとする損傷確率の閾値を 50%以上とすると、同メッシュ内で損傷確率が 50%以上の建物は 4 棟であるため、被害棟数は 4 棟となる。なお、①では、複数の損傷状態を含んだ損傷確率を用いて被害棟数を推定するため、例えば、図 5.6 の青線で示す中破以上の損傷確率には、建物が「中破になる」確率と「小破になる」確率が含まれている。

②では、損傷確率を求めるために算定した IDA 曲線を、建物の最大地動速度－層間変形角関係として適用し、入力された PGV に対応する層間変形角から、建物の損傷状態を推定する。図 5.8 に、IDA 曲線群から求めた 16, 50, 84 パーセントイル曲線と各損傷状態の領域を示す。図中の縦破線は、

5章 豊橋市を対象としたリアルタイム地震被害推定システムの構築

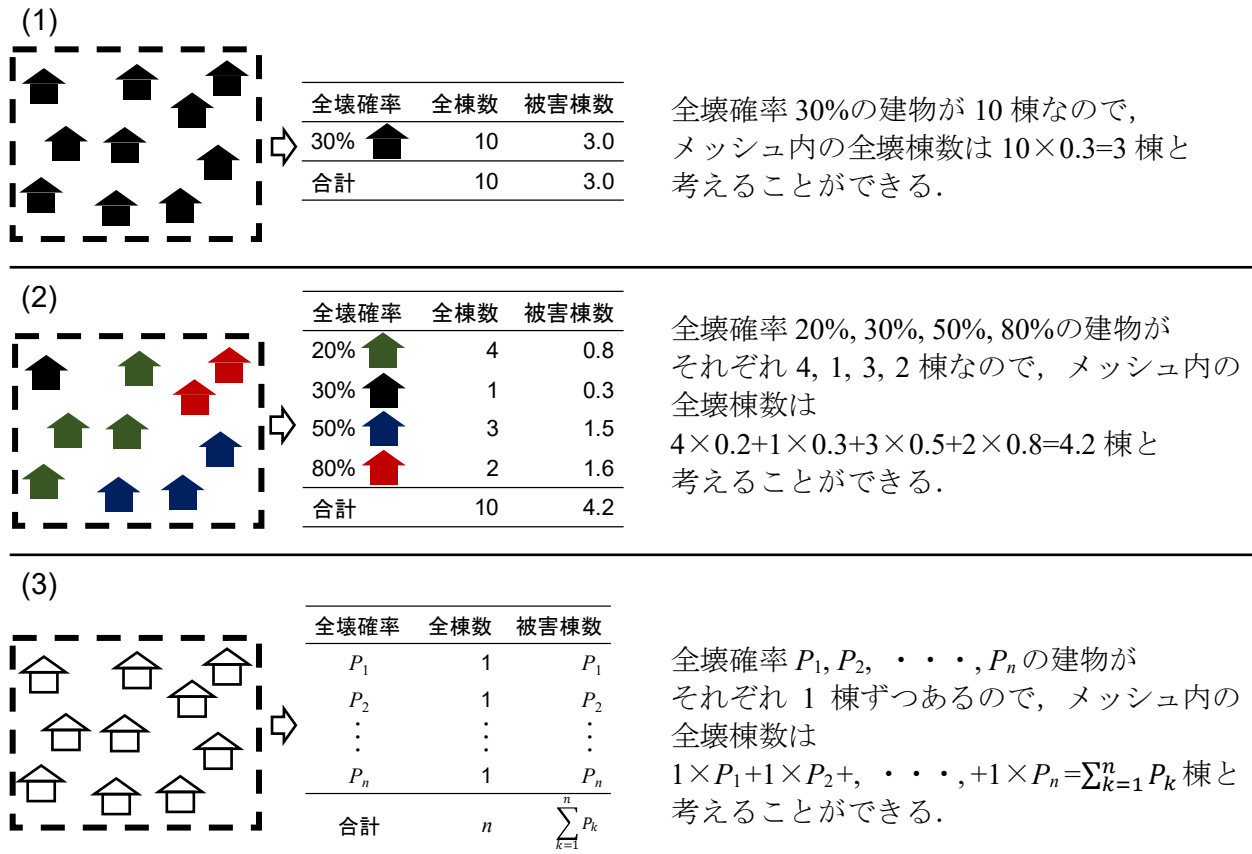


図 5.10 損傷確率から損傷棟数を求める方法の解説

左から $1/120\text{rad}$, $1/60\text{rad}$, $1/30\text{rad}$ の位置を示している。図中のパーセントイル曲線では、PGV と層間変形角は 1:1 で対応するため、その変形量に応じて損傷状態を特定可能である。例えば、図 5.8 の 50 パーセントイル曲線では、 $\text{PGV} = 100\text{cm/s}$ が入力された場合、中破になると推定できる。

④では、各損傷状態の損傷確率を、そのまま損傷棟数と読み替え、その棟数を合計することで被害棟数を求めた。図 5.9 に、各損傷状態になる確率の求め方を示している。図 5.9 では $\text{PGV} = 100\text{cm/s}$ の場合の各損傷状態に関する損傷確率を示しており、大破以上確率 20% (緑線) と中破以上確率 70% (青線) の差をとることで、中破確率 50% となることを求めている。また同様に、中破以上確率 70% (青線)、小破以上確率 100% (赤線) の差をとることで、小破確率 30% を求めている。ここで、図 5.10 に③で損傷確率を損傷棟数と読み替える方法の解説を示す。図 5.10 (1) では、メッシュ内のすべての建物の全壊確率が 30% であり、その建物が 10 棟あるので、メッシュあたりの被害棟数は 3 棟と考えることができる。同様に、図 5.10 (2) では、同じ損傷確率の建物棟数を合計し、それぞれの損傷確率を掛け、被害棟数を求めることができる。本研究では、図 5.10 (3) のように、一つ一つの建物の損傷確率が違うため、図 5.10 (1), (2) と同様の手順で計算を行う場合、その結果は各建物の損傷確率の総和となる。そのため、損傷確率を損傷棟数に読み替え、その値を合計し、被害棟数を求める。

5.1.4 STEP5 | メールの送信

得られた地震動分布や被害推定結果を、地図上で図示し、メールで送信する。

5.2 建物被害分布推定の手法による比較

5.1.3 で示した、被害棟数の集計方法による違いを、既往の被害率関数による被害推定の結果と比較する。入力する地震動は、南海トラフの想定地震動分布を用いた。図 5.11 に、5.1.3 で示した①の、建物がある損傷状態以上の損傷状態になる確率を算出し、その確率が設定した閾値を超えた建物を被害を受けた建物と判定し、その棟数を地域メッシュごとに集計した場合の、閾値を 50%とした場合の被害推定結果を示す。この時の損傷確率曲線は境界型の地震に関するものを使用している。図 5.11 の右下には、凡例（被害棟数ごとのカラースケール）を示している。

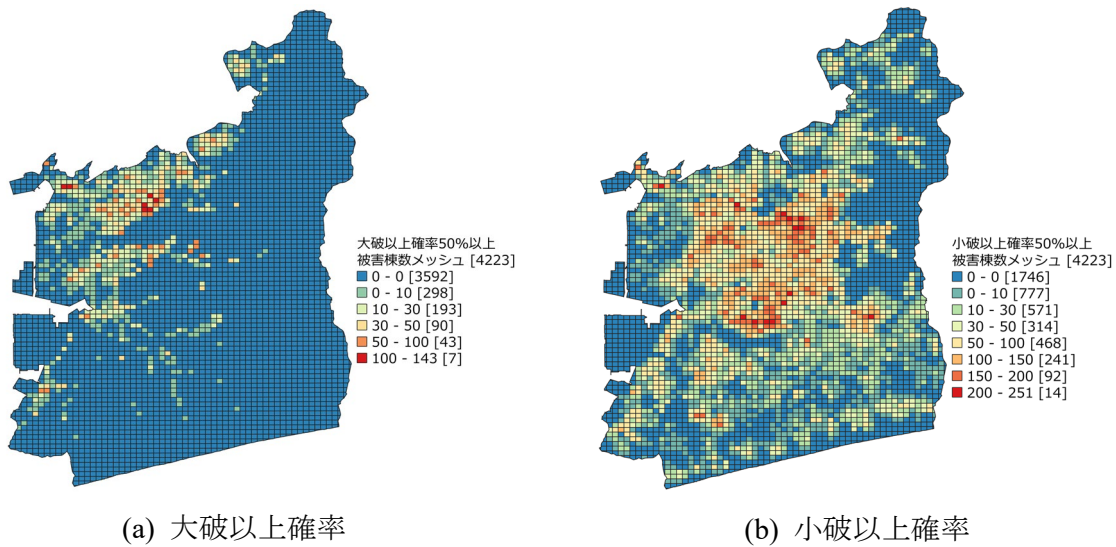


図 5.121 ①の手法から求めた被害棟数分布

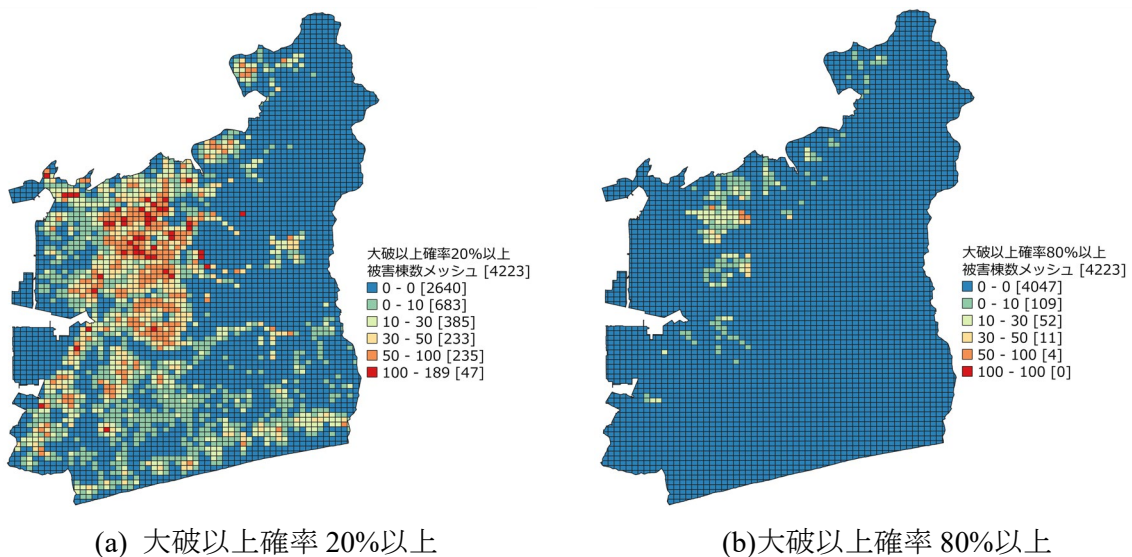


図 5.112 ①の手法から求めた大破棟数分布

5章 豊橋市を対象としたリアルタイム地震被害推定システムの構築

図 5.12(a)に、閾値を 20%以上に下げた場合の大破以上建物棟数、図 5.12 (b)に閾値を 80%以上に挙げた場合の大破以上建物棟数を示す。図 5.12 (a)を見ると、図 5.11 (a)と比べ被害が広がっており、被害棟数も大きくなっているが、図 5.11 (b)に比べると被害範囲は狭い。これは大破以上確率が非常に小さいメッシュは被害棟数が 0 になっているため、被害が甚大になる可能性がある地域メッシュの特定は可能であるが、閾値が 20%と低いため、被害が小さいメッシュも含まれる可能性があり、被災時の推定情報として扱うには解釈が難しいと考えられる。一方、図 5.12(b)を見ると、閾値を上げたことで、特に被害が高くなる危険性が高い箇所を示せており、発災時の推定情報として利用すると特に対応が必要な場所の特定に有用である可能性がある。

5.3 5章のまとめ

5章では、建物ごとの損傷確率から地域メッシュ単位の被害推定を行う手法について検討を行った。また、現在構築しているシステムを用いて、過去に地震計設置拠点で観測された実際の地震動を入力として、最大地動速度分布推定、建物被害分布推定を行い、その結果を南海トラフの想定地震動分布を入力した場合の結果と比較した。得られた結果を以下に示す。

- 建物の各損傷状態になる確率を、建物の被害棟数と考え、各建物のある損傷状態になる確率を合計して、その損傷状態になる棟数とした地域メッシュ単位の被害推定は、被害率関数による被害推定分布に近い分布を示しており、今後の被害推定に用いることができる可能性がある。
- 実際に観測された地震波データを使用した場合、バリオグラムと実測データの対応は悪く、6 拠点で観測されたデータのみでは正しい推定が行えていない可能性が高い。
- 実地震から推定した最大地動速度分布は、表層地盤増幅度の影響が大きい。
- 推定した建物被害分布は、南海トラフの想定地震動に対する建物被害分布にかなり近い結果が得られており、正しく被害推定ができていることが確認できた。

以上の結果から、地動速度の推定から被害分布の推定までの一連の推定を自動で行えることが確認できた。今後は、地動速度の推定精度を上げていくとともに、過去の被害から算定された被害率関数による建物被害の推定結果と比較するなどして、建物被害推定結果の妥当性についても、検討を行っていく予定である。

6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では、地方自治体レベルでの最適な RT 地震被害推定システムの構築に向けて、都市計画基礎調査データを利用した建物被害推定について、大きく 2 つの検討を行った。

一つ目に、住宅・土地統計調査データから求めた豊橋市、蒲郡市、田原市の建築年代別平均建物割合を市内すべての 250m 地域メッシュに適用した場合と、基礎調査データによる都市に存在する実建物の分布状況を個別に反映した建築年代別建物割合を各 250m 地域メッシュに適用した場合それぞれで、被害率関数による南海トラフ地震の想定地震動に対する被害推定を行い、その違いを検討した。実建物の分布状況を個別に反映した都市計画基礎調査データを用いることで、住宅・土地統計調査のようなデータを用いる場合と比較して、古い建物が集中している地域では被害が大きくなり、新しい建物が集中している地域では被害が少ないことを示した。この結果から、都市計画基礎調査を用いることで、精度の高い被害推定を行うことができると考えられる。

二つ目に、漸増動的解析(IDA)を用いた木造住宅の損傷確率曲線を算定した。損傷確率曲線は、建物の耐震基準、震源種類、地盤種類、階数をパラメータとすることで、詳しい損傷確率推定を行うことが可能である。一方、1 階床面積に対する 2 階床面積の割合は損傷確率曲線の変化にあまり影響がなく、都市レベルの被害推定では考慮する必要は少ないと考えられる。また、算定した損傷確率曲線と都市計画基礎調査を用いて、南海トラフの想定地震動に対する豊橋市の木造住宅の損傷確率評価を行った。各建物の損傷確率を示すことで、地域メッシュ内で被害が大きい箇所、少ない箇所の特定をすることが可能である。また、南海トラフ地震のような大きな地震動では 1/30rad、それよりも小さい地震動では 1/120rad に関する損傷確率曲線を用いるなど、地震動の強さに応じて結果を示す被害レベルを変えることで、迅速な被害対応につながる情報が提供できる可能性がある。

そして、それらの結果を基に、豊橋市を対象とした RT 地震被害推定システムの基礎部分を構築した。現状設置している地震計では、精度の高い推定は難しいことが確認できたが、一連の推定は正しく動作していることが確認できた。

6.2 今後の課題

本研究では、木造住宅の被害推定に限定していたが、市街地では非木造建物の割合が多いため、今後は非木造建物の被害推定についても同様に検討を行う予定である。また、各建物の損傷確率を示すことで新たに推定できる可能性がある被害情報（例えば、道路閉塞状態の把握、被災直後の余震に対する建物の安全性）を迅速に推定する手法についても検討を行う予定である。

また、本研究では地震被害推定システムの構築にあたり、特に建物被害について注目したが、今後は地震動分布の推定についても検討を行う必要がある。現状では、耐震診断システムを設置している市庁舎等 6 拠点の地震波データのみでの地震動分布推定を行っているが、今後豊橋市内の小学校に地震計を設置し、観測網の密度を高める予定である。高密度の地震観測網によって、地震被害推定システムでの地震動分布の推定精度を高めるとともに、他の市で同様のシステムを構築する場

参考文献

合の指標として、観測点の適切な設置位置、間隔等を明らかにする予定である。

そして、システムを実際に運用するにあたっては、自治体の防災担当者に推定結果を迅速に、わかりやすい形で伝える必要がある。したがって、推定情報を防災担当者にどのような形で伝えるのが最適であるかなどについても、検討を進める。

謝辞

本研究は、東三河地域防災協議会の委託研究として行われたものです。本研究で使用している豊橋市の都市計画基礎調査データは豊橋市より、蒲郡市と田原市の都市計画基礎調査データは愛知県より、それぞれご提供いただきました。ここに記してお礼申し上げます。また、本研究は豊橋技術科学大学修士2年生の横屋翔君の修士研究として実施されました。協力に感謝します。