

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

J-RISQ や従来の被害推定で用いられている被害率関数による推定では、メッシュ内のどの建物がどの損傷状態であるかまでは判断できない。具体的な災害対応を考えるにあたり、倒壊した建物への優先的な救助活動や、建物倒壊により緊急道路等が閉塞する可能性の把握といった、よりミクロな視点での被害状況の把握も重要である。文献¹⁵⁾では、地震による都市の建物ごとの損傷推定及び道路閉塞による住民の避難行動に関する精緻なシミュレーションを行っており、建物損傷による道路閉塞が、住民の避難行動に影響がある可能性を示している。したがって、建物ごとの損傷状態を発災後迅速に把握することは、道路閉塞位置の把握や人命救助の観点から有益と考えられる。

そこで、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。本論では FEMA P-695¹⁶⁾に記されている方法を参考に、漸増動的解析(IDA)¹⁶⁾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。

4.1 IDA 曲線の算定方法

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、本論では、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¹²⁾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。

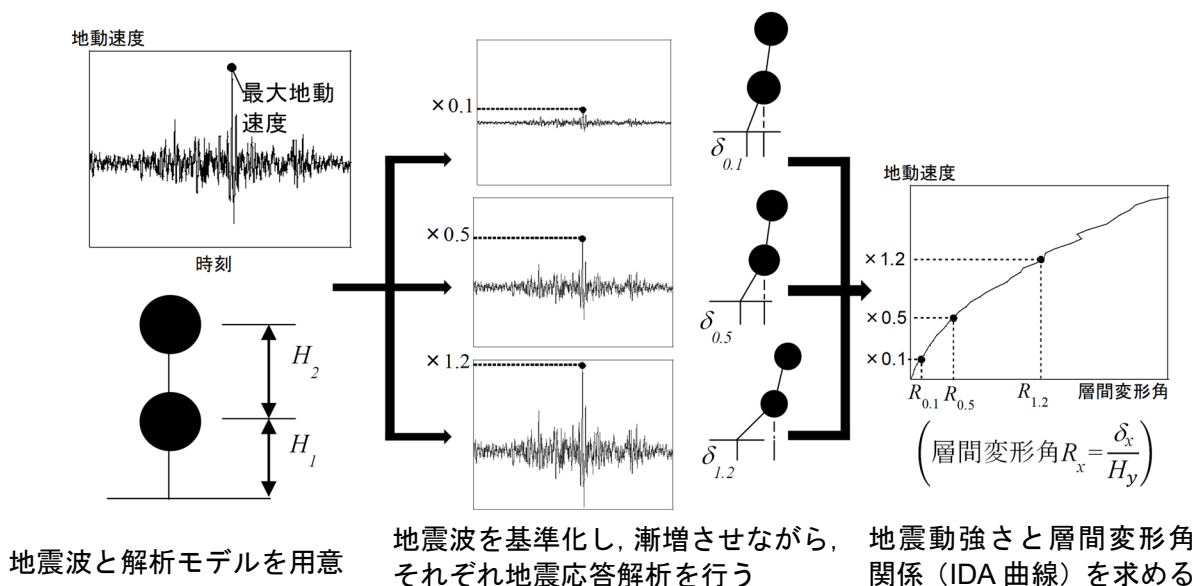


図 4.1 IDA の計算手順概要

4.2 木造住宅の解析モデル

本論で想定する建物は、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、文献¹⁷⁾に記載されている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¹⁷⁾

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、文献¹⁸⁾に記載されている、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¹⁹⁾や、木造住宅の広域被害推定に関する知見²⁰⁾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²¹⁾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。なお、本論では、安全限界(1/30rad)までの結果を参照するため、1/30rad以降の剛性低下は考慮していない。また、1階建ての場合、1981年基準、2000年基準は2階建ての1階部分と同じになるため、図4.2中には1

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

階建ての1959年基準の場合のみ、■印で示している。図4.2を見ると、耐震基準年が新しいほど耐力が大きいたことがわかる。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²²⁾を設定する。文献¹⁸⁾では折れ点が2つであるが、文献²²⁾では骨格曲線の折れ点が3つあるため、バイリニア+スリップモデルを描くように、文献²²⁾を参考に文献¹⁸⁾の層せん断力係数—層間変形角関係の層間変形角が 7.0×10^{-4} radの位置(図4.2中の第1折れ点)に折れ点を追加している。さらに表4.2に、設定した建物モデルの1次固有周期を示す。表4.2で、 α は1階床面積に対する2階床面積の割合を示し、 $\alpha=1.0$ は1階と2階の床面積が同じ総2階の建物を想定しており、 $\alpha=0.2$ は2階の床面積が1階の床面積の20%であるような2階の床面積が極端に小さい建物を想定している。このパラメータを設けた理由は、都市計画基礎調査では建築面積と延床面積の情報が含まれており、2階建て住宅においては建築面積を1階床面積、延床面積と建築面積の差を2階床面積の値として、近似的に利用するためである。表4.2を見ると、耐震基準が新しいほど固有周期が短く、またいずれの耐震基準においても、 $\alpha=0.2$ と1.0では0.2の方が固有周期が短いこと、1階建ての固有周期はそれよりも短いことが確認できる。

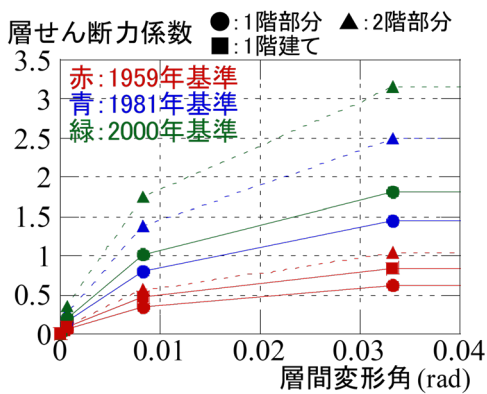


図 4.2 層せん断力係数—層間変形角関係

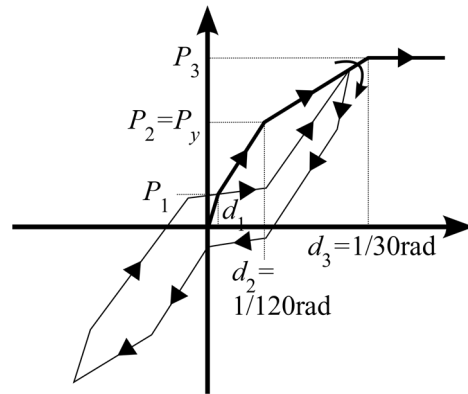


図 4.3 バイリニア+スリップモデル

表 4.2 解析モデルの一次固有周期(s)

耐震基準	1階建て	2階($\alpha=0.2$)	2階($\alpha=1.0$)
1959年基準	0.291	0.366	0.399
1981年基準	0.222	0.239	0.256
2000年基準	0.198	0.212	0.226

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-net²³⁾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²⁴⁾を参考にし内陸直下型(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²⁵⁾によって、深度30mまでの平均

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

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²⁶⁾らの回帰式を用いて, V_{s30} を求めた. 表 4.3 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.

各地震波の最大地動加速度を 500 cm/s^2 に基準化した時の 5%加速度応答スペクトルを図 4.4 に示す. なお, 縦軸の単位 gal は cm/s^2 と同義である. 太い黒線は各固有周期での全地震の加速度応答スペクトルの平均値を結んだものである. また, 2階建て建物で $\alpha=0.2$ と 1.0 の時の, 建物の1次固有周期の位置を赤・青・緑の実線及び破線で示している. 図 4.4 (a), (d)の硬質地盤の各固有周期での加速度応答スペクトルの平均値(黒太線)を見ると, 内陸直下型とプレート境界型の双方が概ね等しいことがわかる. また, (b), (e)の普通地盤では, 固有周期 0.2~0.4 秒の範囲では境界型の方が加速度応答スペクトルの平均値が大きくなっているため, この範囲に1次固有周期を持つ1981年基準と2000年基準の建物は, 境界型の地震波に対して変形が大きくなることが予想される. さらに,

表 4.3 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

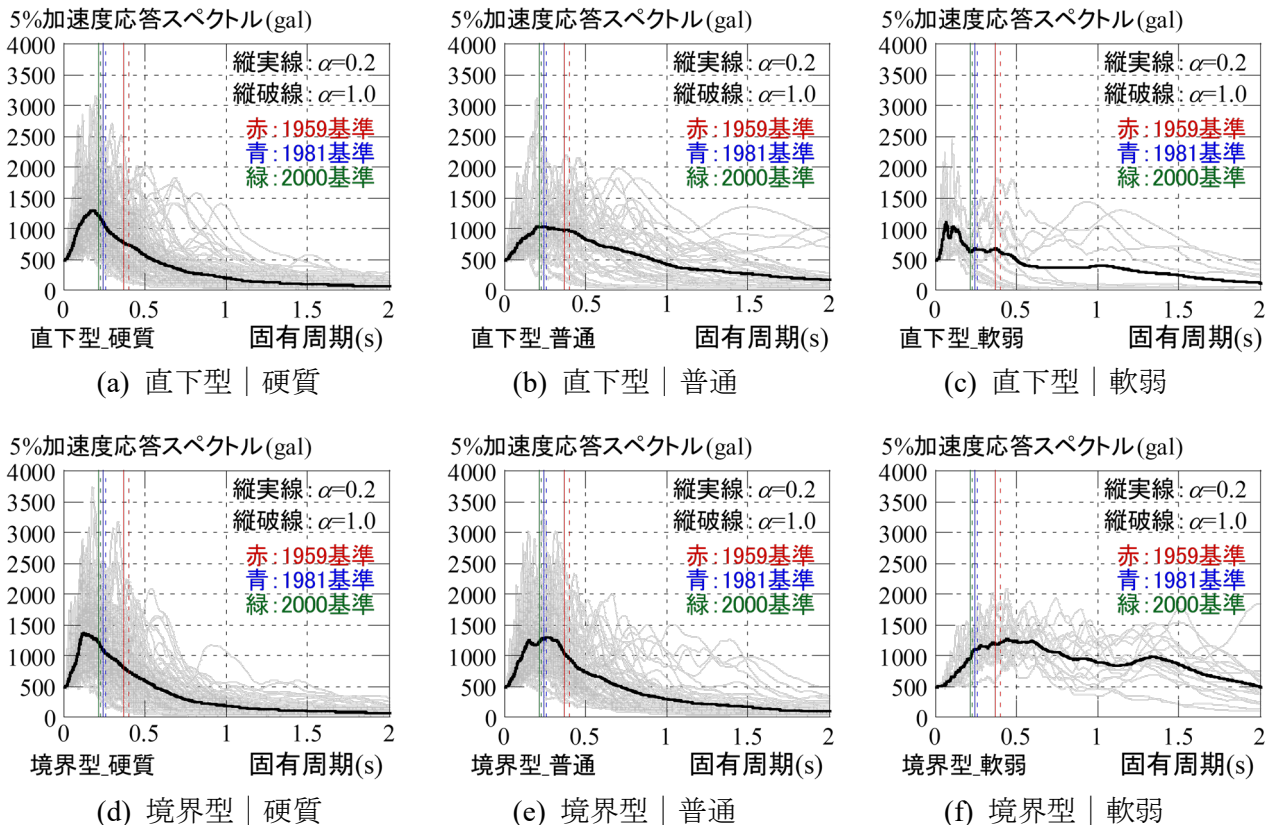


図 4.4 5%加速度応答スペクトル

(c),(f)のでは、固有周期 0.5~2.0s の範囲で境界型の地震波の応答スペクトルが大きいことがわかる。

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）

IDA 曲線算定時の地震応答解析における数値積分法は Newmark β 法の平均加速度法($\beta = 1/4$)を用いる。

図 4.5 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示す。

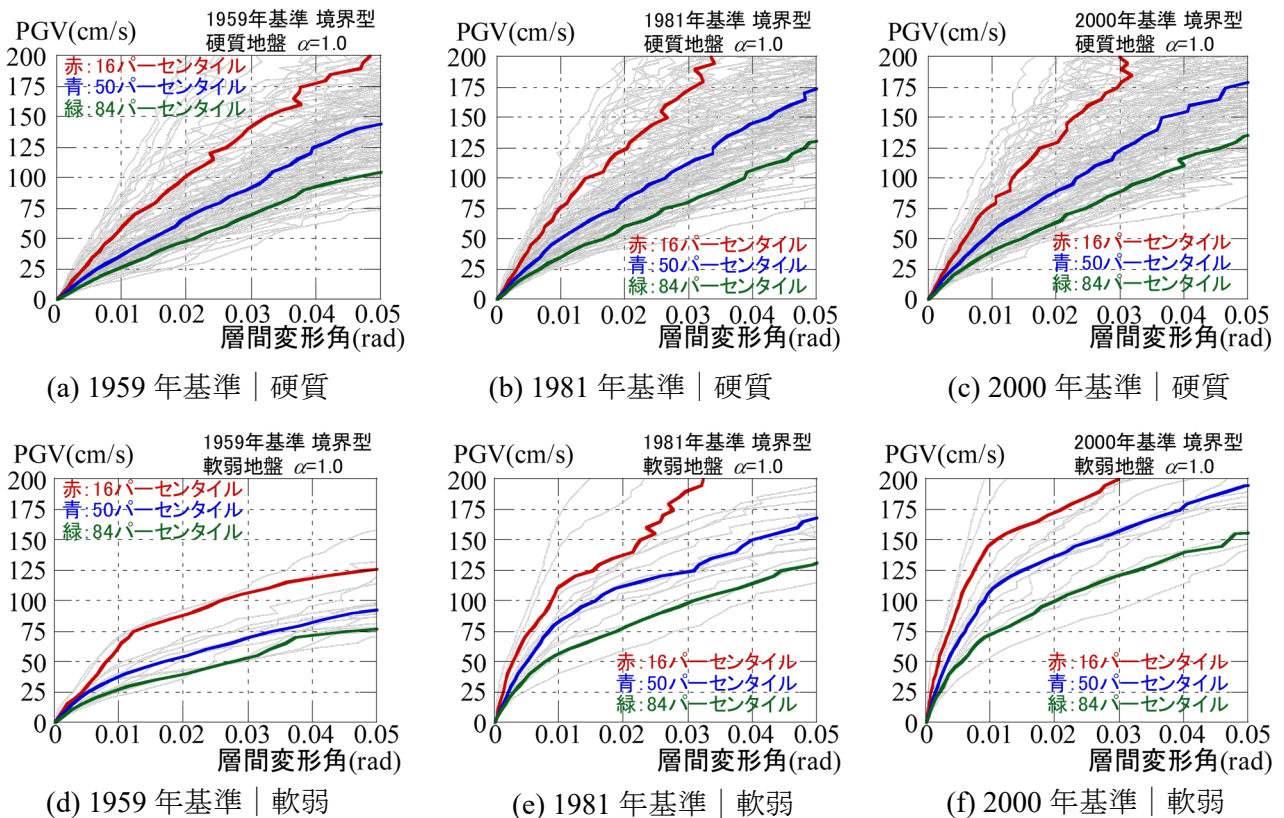


図 4.5 算定した IDA 曲線

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

センタイル曲線を表している。図 4.5 (a)~(c)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 4.5 (d)~(f)も同様の結果がみられる。また、図 4.5 (a)と(d)の 50 パーセンタイル曲線を比較すると、軟弱地盤の方が同一 PGV に対する変形が大きい傾向にあるのに対し、(b)と(e)、(c)と(f)を比較すると、硬質地盤の方が同一 PGV に対する変形が大きい傾向にある。

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。本論では、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。

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

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、本論では文献²⁷⁾に習い、 λ は設定した層間変形角時の、PGV の 50 パーセンタイル値（設定変形に対する PGV の中央値）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。

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

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

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

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^{27), 28)}。 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 4.6 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。本論の被害推定では、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%となる時の 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。

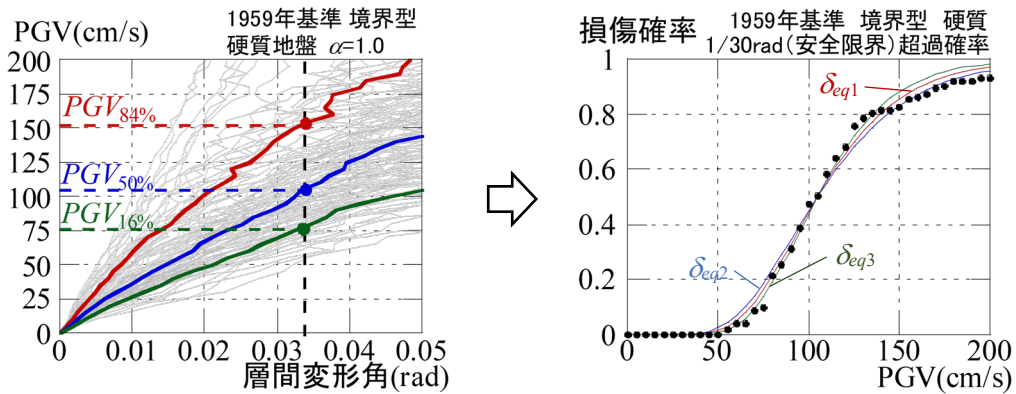


図 4.6 設定層間変形角 1/30rad の場合の損傷確率曲線の算定例

4.5.1 1/30rad (安全限界) 時の損傷確率曲線

図 4.7 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、本論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 4.7 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% (境界型 | 硬質地盤 | 1959 年基準、図 4.7 (a)) 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。図 4.4(a)~(d)の固有周期 0.2s 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 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 4.7 (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。これは、後述の図 4.9(e), (f)を見ると、損傷限界時(1/120 rad)では、 $\alpha = 1.0$ と 0.2 で概ね曲線が一致していることから、降伏等により建物の固有周期が伸びたことで、安全限界時では $\alpha = 0.2$ に対する応答スペクトルの方が大きくなったためと考えられる。したがって、面積比 α を考慮することでより詳しい推定が可能と考えられる。しかし、図 4.7 (b)~(f)を見ると、 $\alpha = 1.0$ と 0.2 の間で(a)と同じほどの大きな差は見られない。実在建物では、1, 2 階の床面積が近い ($\alpha = 1.0$ に近い) 整形な建物の割合が多いと考えると、都市レベルでの被害推定で面積比を考慮することによる影響はあまり大きくないと考えられる。しかし、面積比を考慮する ($\alpha = 1.0$ と固定しない) ことで安全側の評価となるため、その点は留意する必要がある。

次に、階数による違いを見る。図 4.7 (b), (c), (e), (f)をそれぞれ比較すると、1 階建て (緑線) の

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

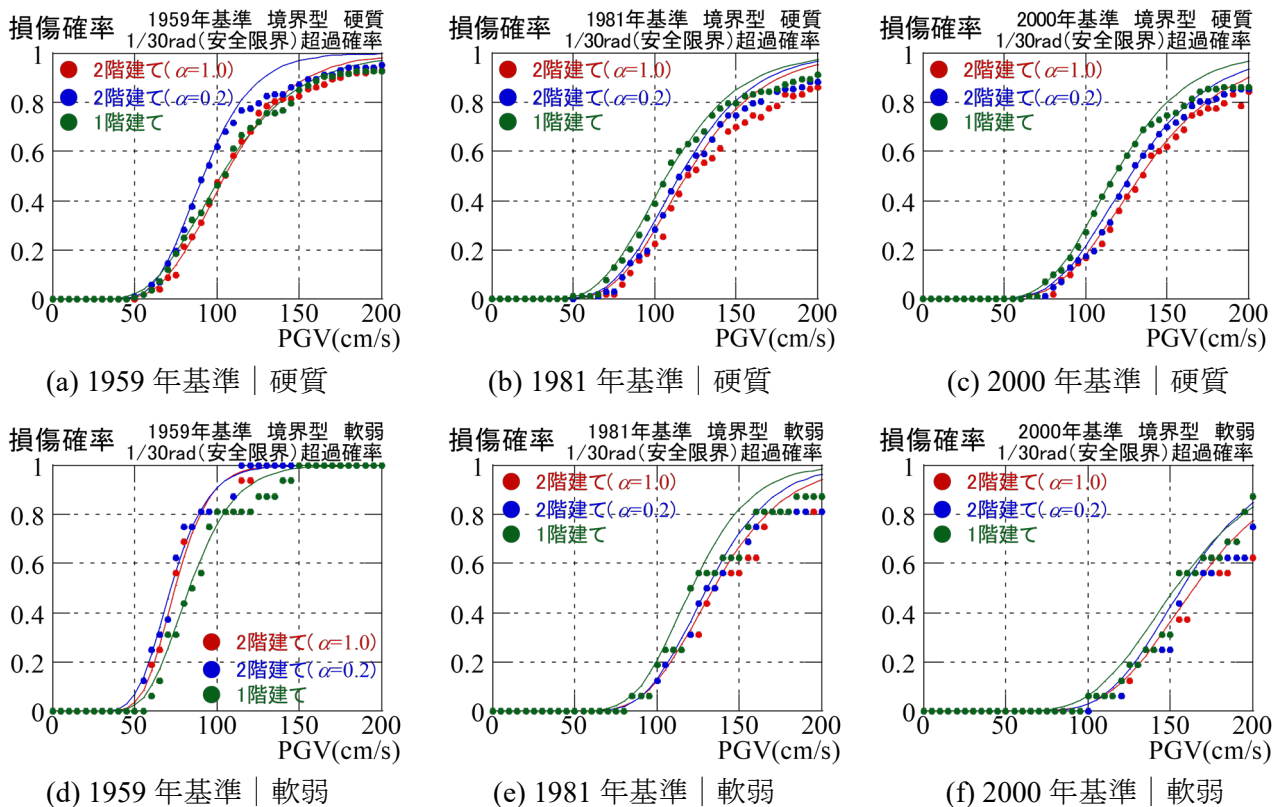


図 4.7 1/30rad 時の損傷確率曲線 | 階数, 床面積比 α による違い

損傷確率は2階建て(赤, 青線)よりも大きい傾向にあり, $\alpha=1.0$ の損傷確率と比較すると最大で約19.4%(境界型 | 普通地盤 | 2000年基準, 後述図4.8(c), (f)参照)の差があった. これらも解析モデルの設定条件による固有周期の変化が影響していると考えられる. 表4.2より, いずれの耐震基準の建物も1階建てが最も固有周期が短く, 1階建ての固有周期に対する応答スペクトルが2階建てに比べて大きい傾向にあるため, 1階建ての方が損傷確率が大きい傾向にあると考えられる. また検討のため, 1981, 2000年基準について, 2階建ての2階部分の耐力・剛性を2倍して損傷確率曲線を算定したところ, $\alpha=1.0, 0.2$ いずれも固有周期は1階建てに近づき, 損傷確率曲線も1階建ての曲線に近づくように変化した. このことから, 固有周期の違いが損傷確率曲線に影響を与えていることがわかる. また, 1階の耐力・剛性に対する2階の耐力・剛性の設定も考慮して解析を行う必要があると考えられる. 一方, 図4.7(a), (d)を見ると, 1階建ての損傷確率は, 2階建てと比べて低いか, 同程度の傾向にある. 1959年基準の建物は, 1階建ての建物と2階建ての1階部分では, 1階建ての方が耐力が大きくなるよう設定しており(図4.2参照), 1981, 2000年基準と異なる傾向が見られたと考えられる. 以上より, 階数を考慮することで, より詳しい損傷評価が可能であると考えられる. また, 本論は検討対象を木造住宅に限定しているが, 非木造建物群では建物ごとの階数の違いがより顕著になるため, 特に市街地など非木造の中高層建物が多数存在している地域では, 建物ごとの階数を考慮することは被害推定に大きな影響を与える可能性が高いと考えられる.

続いて図4.8に1/30 radに関する損傷確率曲線について, 震源種類及び地盤種類をパラメータと

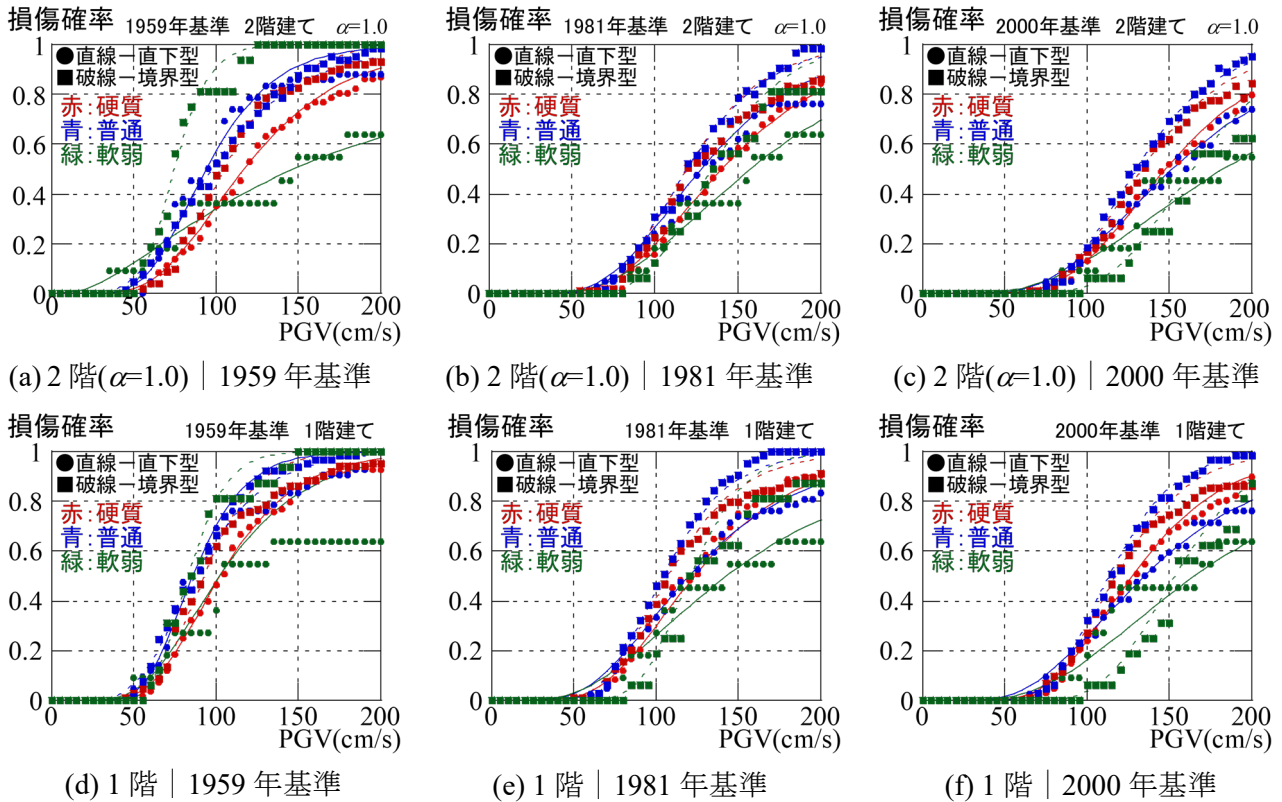


図 4.8 1/30rad 時の損傷確率曲線 | 震源種類, 地盤種類による違い

した結果を示す. 上段が 2 階建ての建物で $\alpha = 1.0$ の場合, 下段が 1 階建ての建物の場合の結果で, 左から 1959 年基準, 1981 年基準, 2000 年基準の結果を示している. 図中の●印は直下型, ■印は境界型に関する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り, 実線及び破線はそれぞれ直下型, 境界型に関する δ_{eq3} を用いた損傷確率曲線である. また, 色分けは地盤種類を示しており, 赤が硬質, 青が普通, 緑が軟弱地盤を示している.

まず, 震源種類による違いを見てみる. 図 4.8 の硬質地盤 (赤線) の結果を見ると, 直下型と境界型の損傷確率曲線の差は最大で 20.3% (2 階建て | 1981 年基準, 図 4.8 (b), 50%以下の範囲) であり, 境界型の損傷確率の方が大きい. 図 4.4 (a), (d)の加速度応答スペクトルの平均値 (黒太線) を見ると, 直下型と境界型の平均応答スペクトル形状が近いのに対し, 損傷確率曲線では一定の差異が見られた. 普通地盤 (青線) について見てみると最大で 20.8% (1 階建て | 2000 年基準, 図 4.8 (f), 50%以下の範囲) の差があり, 境界型の損傷確率の方が大きい. 図 4.4 (b), (e)の加速度応答スペクトルの平均値を見ると, 1981 年基準, 2000 年基準の 1 次固有周期に対応する平均加速度応答スペクトルが, 境界型の方が大きいため, 震源種類による差が大きくなったと考えられる. 軟弱地盤 (緑線) について見ると, 最大で 58.4% (図 4.8 (a), 50%以下の範囲) の差があり, 境界型の損傷確率の方が大きい. また, 軟弱地盤では, 1959 年基準での損傷確率の差が非常に大きくなっている (図 4.8 (a), (d)). 以上より, 本論で集めた地震波を使った場合では, 境界型の方が損傷確率が大きい傾向にあり, 震源種類の違いを考慮することがより詳しい被害推定に有効である可能性を示している. なお, 軟弱地盤については対象とした地震波の最大地動加速度の閾値を下げておいて, サ

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

サンプル数も少ないため、更なる検討の余地がある。

次に、地盤種類の違いを見てみる。図 4.8 から地盤種類により損傷確率が変化していることが確認できる。硬質地盤と普通地盤の結果を比較すると、普通地盤の方が損傷確率が高いパラメータが多いことがみられる。しかし、図 4.8 (c), (e), (f) の直下型（実線）を見てみると、一部硬質地盤の方が損傷確率が大きい部分もみられる。また、軟弱地盤では、耐震基準の違いにより損傷確率が大きく変化しており、硬質・普通地盤との関係性も耐震基準により違っている。特に直下型の軟弱地盤は、いずれの場合も損傷が発生し始める PGV が小さく、PGV が大きい場合の損傷確率が他のパラメータの場合よりも小さい傾向がある。これは図 4.4 (c) より、直下型・軟弱地盤の地震に分類した地震の、建物 1 次固有周期時の平均加速度応答スペクトルが他の分類と比較して小さいため、地動速度を大きくしても変形が大きくなり地震波の割合が多いためと考えられる。

4.5.2 1/120rad（損傷限界）時の損傷確率曲線

図 4.9 に 1/120rad（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。

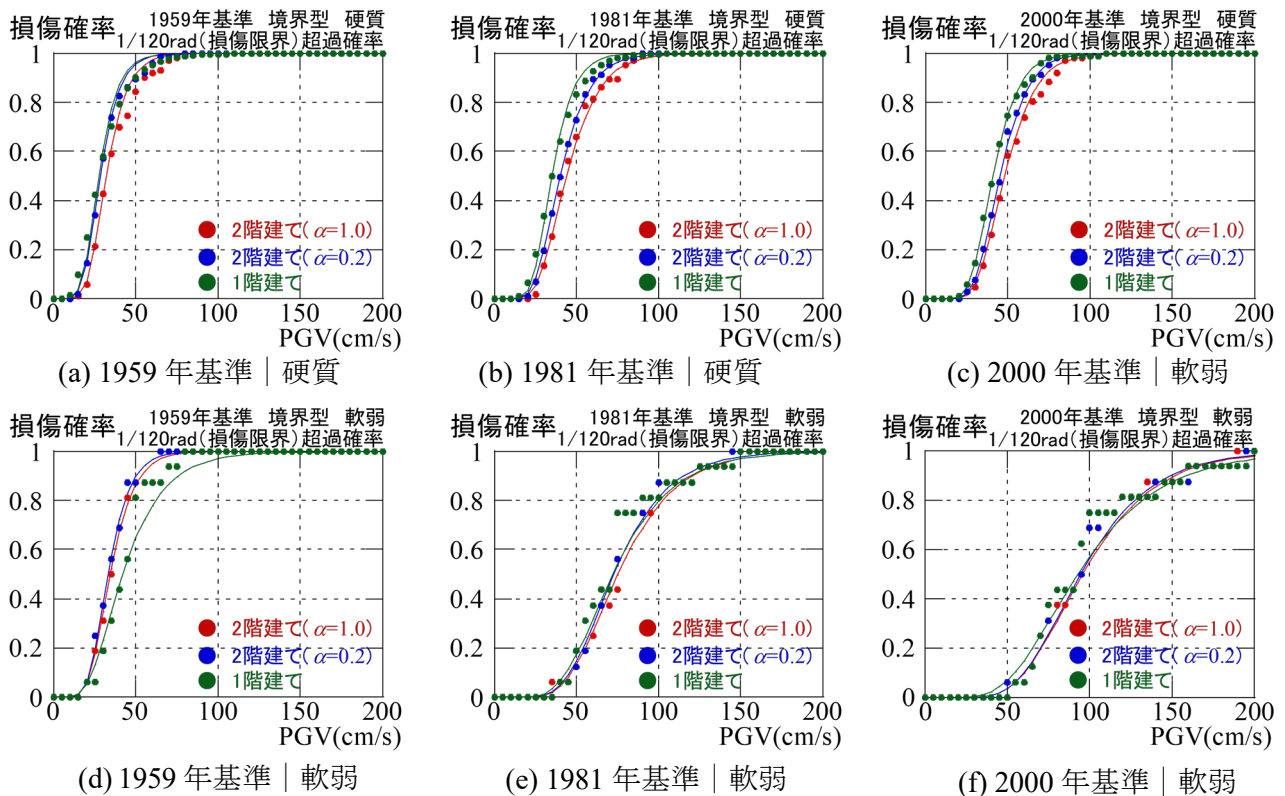


図 4.9 1/120rad 時の損傷確率曲線 | 階数, 床面積比 α による違い

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

まず、面積比 α による違いを見る。図 4.9 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 14.8% (境界型 | 硬質地盤 | 1959 年基準, 図 4.9(a)) である。しかしながら、図 4.9(a)~(f)を見ると、 $\alpha=1.0$ (赤線) と $\alpha=0.2$ (青線) はおおよそ同じ形状であることが確認できるため、1/120rad 時では、面積比 α による損傷確率曲線の違いは 1/30rad 時ほど大きく見られないことがわかる。特に、図 4.9(d)~(f)の、軟弱地盤の地震動を入力した場合には、 $\alpha=1.0$ (赤線) と $\alpha=0.2$ (青線) はほぼ同一の曲線を描いている。これは、図 4.4(f)を見ると、固有周期の違いによる応答スペクトルの差が、他のパラメータと比較して大きくないためと考えられる。このため、都市レベルでの損傷限界レベルの被害推定を行うにあたっては、面積比 α の違いによる影響は小さいと考えられる。

次に階数による違いを見る。図 4.9(b), (c)を見ると、1階建て (緑線) の損傷確率は2階建ての損傷確率よりも大きい傾向にあり、最大で約 27.6% (境界型 | 普通地盤 | 1981 年基準, 図 4.9(b)) の差があった。また、図 4.9(a), (e), (f)を見ると、1階建てと2階建ての損傷確率曲線はほぼ一致しており、差が小さいことがわかる。一方、図 4.9(d)を見ると、1階建て (緑線) の損傷確率は2階建ての損傷確率よりも小さく、最大で 22.7%の差があった。前述の通り、1959 年基準の建物は、1階建ての建物と2階建ての1階部分では、1階建ての方が耐力が大きくなるよう設定しており (図 4.2 参照)、1981、2000 年基準と異なる傾向が見られたと考えられる。以上より、階数を考慮することで損傷確率に差が表れる場合があり、その差は面積比 α よりも影響が大きいことが確認できた。よって、都市レベルでの損傷限界レベルの被害推定を行うにあたっては、階数を考慮することでより詳細な被害推定が可能と考えられる。

続いて、図 4.10 に 1/120rad 時に関する損傷確率曲線について、震源種類及び地盤種類をパラメータとした結果を示す。上段が2階建ての建物で $\alpha=1.0$ の場合、下段が1階建ての建物の場合の結果で、左から 1959 年基準、1981 年基準、2000 年基準の結果を示している。図中の●印は直下型、■印は境界型に関する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り、実線及び破線はそれぞれ直下型、境界型に関する δ_{eq3} を用いた損傷確率曲線である。また、色分けは地盤種類を示しており、赤が硬質、青が普通、緑が軟弱地盤を示している。

まず、震源種類による違いを見てみる。図 4.10 中の硬質地盤 (赤線) の結果を見ると、直下型と境界型の損傷確率曲線の差は最大で約 11.5% (2階建て | 1959 年基準, 図 4.10(a), 50%以下の範囲) であり、境界型の損傷確率の方が大きい傾向にあるが、曲線の形状はほぼ一致しているため、震源種類による違いは少ない。普通地盤 (青線) について見てみると最大で 27.7% (1階建て | 2000 年基準, 図 4.10(f), 50%以下の範囲) の差があり、境界型の損傷確率の方が大きい。軟弱地盤 (緑線) について見ると、約 39.8% (1階建て | 2000 年基準, 図 4.10(f), 50%以下の範囲) の差があり、直下型の方が損傷確率が大きい。また、軟弱地盤では 2000 年基準での損傷確率の差が大きくなっている (図 4.10(c), (f))。1/30rad 時では 1959 年基準の建物で直下型と境界型の差が最も大きくなっていた (図 4.8(a), (d)) が、1/120rad 時では 2000 年基準の建物 (図 4.10(c), (f)) で差が最も大きくなっているという違いが見られた。以上の比較から、1/120rad 時については普通地盤や軟弱地盤で差が表れるため、震源種類の違いを考慮することがより詳しい被害推定に有効であると考えられる。

次に、地盤種類の違いを見てみる。硬質地盤と普通地盤の結果を比較すると、最大で約 17.7% (直

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

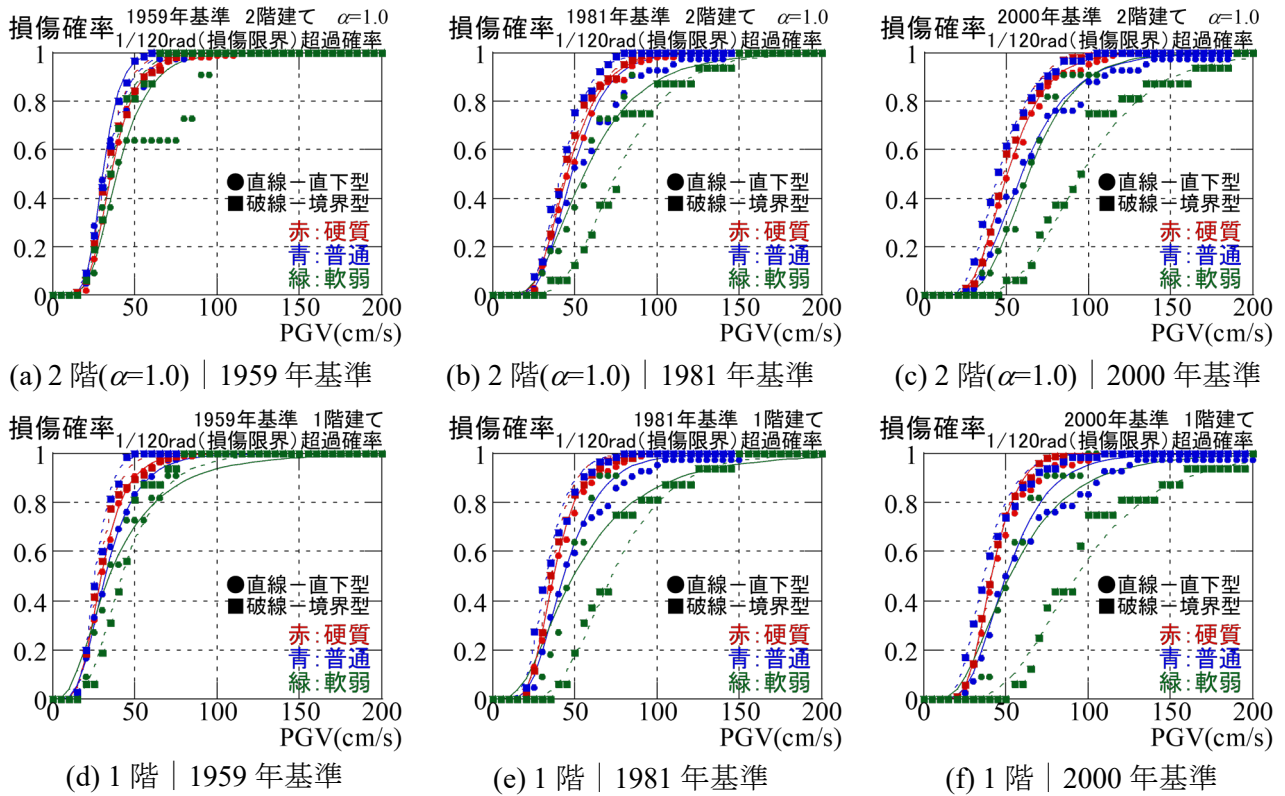


図 4.10 1/120rad 時の損傷確率曲線 | 震源種類, 地盤種類による違い

下型 | 2 階建て | 1959 年基準, 図 4.10 (a), 50%以下の範囲) の差があり, 普通地盤の方が損傷確率が大きい. また, 硬質地盤の方が損傷確率が大きい場合では, 最大で約 16.8% (直下型 | 1 階建て | 2000 年基準, 図 4.10 (f), 50%以下の範囲) の差があり, 普通地盤の方が損傷確率が大きい場合と同程度の差があり, 耐震基準年の違いによる傾向の違いが見られた. また, 軟弱地盤は耐震基準年によって他の地盤よりも大きな差が見られ, 普通地盤と比較すると最大で約 48.6% (境界型 | 2 階建て | 2000 年基準, 図 4.10 (c), 50%以下の範囲) の差が見られた. したがって, 地盤種類の違いを考慮することはより詳しい被害推定につながると考えられる.

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, 図 3.7 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 (表 2.1 参照) 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

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

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。したがって本論では、 $\alpha > 1.0$ 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 本論では、 $\alpha = 0.2, 1.0$ 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 4.11 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、本論で対象外の建物 (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 4.11 (a) では $PGV \approx 110\text{cm/s}$, (b) では $PGV \approx 109\text{cm/s}$ でほぼ同じ地動速度の 250m 地域メッシュである。図 4.11 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 4.11 (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 4.11 (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、建物単位のマイクロな被害推定を行うこ

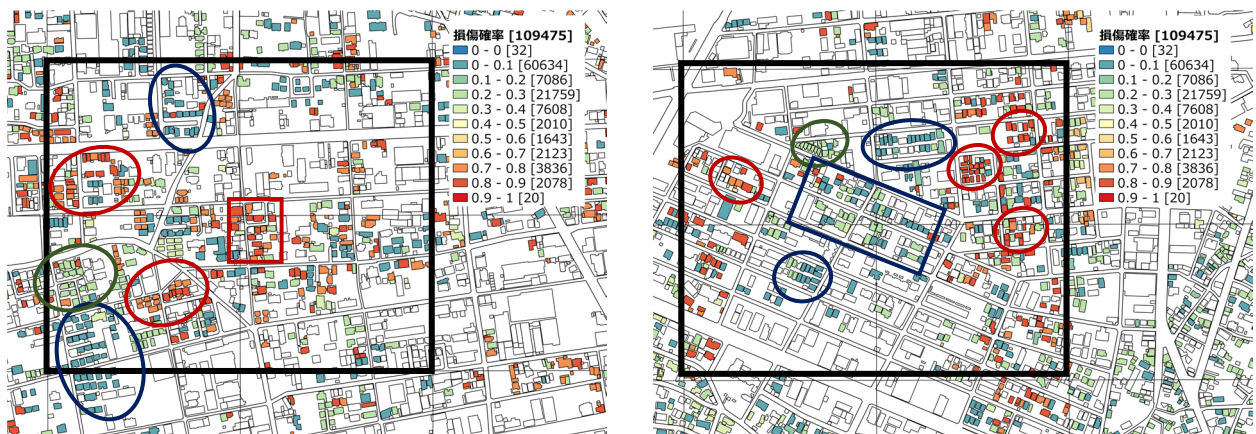


図 4.11 木造住宅の 1/30rad に関する損傷確率分布

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

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 4.12 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 4.11 と同じ範囲であり、暖色によるほど損傷確率が高い。

図 4.12 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 程度の変形が発生する確率が極めて高いことがわかる。図 4.12 (a)を見ても、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、先に述べたマイ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、マイ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、本論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、都市レベルでのマイクロな 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、マイ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。

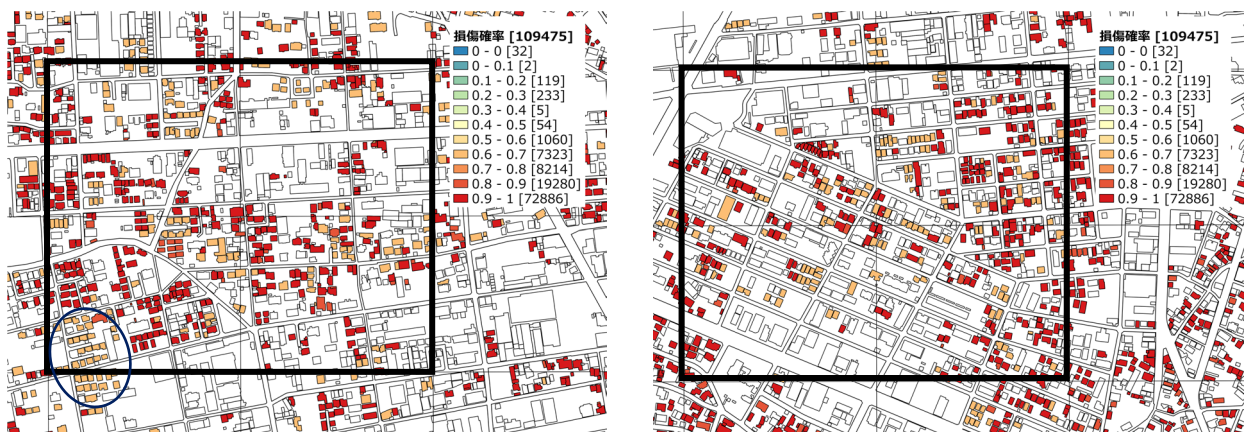


図 4.12 木造住宅の 1/120rad に関する損傷確率分布

4.7 4章のまとめ

4章では FEMAP-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 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。また、直下型と境界型の震源種類の違いでは、本論で集めた地震波の場合では、境界型の方が損傷確率が大きい傾向にある。これは、震源種類の違いも考慮して損傷確率を導出した方が、より詳しい被害推定に有効である可能性を示している。
- 層間変形角1/120 rad（木造建物の損傷限界に相当）を設定変形とした場合、床面積比 α と階数による損傷確率曲線の違いはあまり見られなかった。特に床面積比 α については、パラメータを変更しても、損傷確率曲線がほぼ一致しており、都市レベルの被害推定に与える影響は小さいと考えられる。一方、震源種類と地盤種類による違いは、損傷確率曲線の形状に影響しており、違いを考慮することでより詳しい被害推定が可能と考えられる。
- 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1/30rad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、1/120radに関する損傷確率を用いる場合、本論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。