

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。

5.1 システムの概要

推定システムは、python²⁹⁾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⁶⁾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。本論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時間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論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。

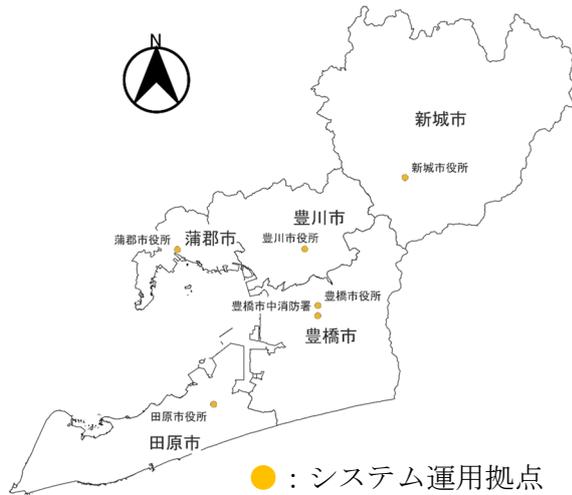


図 5.2 既存耐震診断システムを運用している拠点

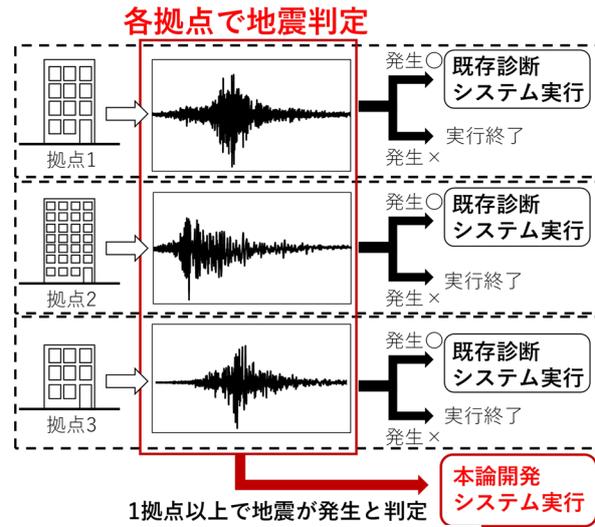


図 5.3 地震判定の手順

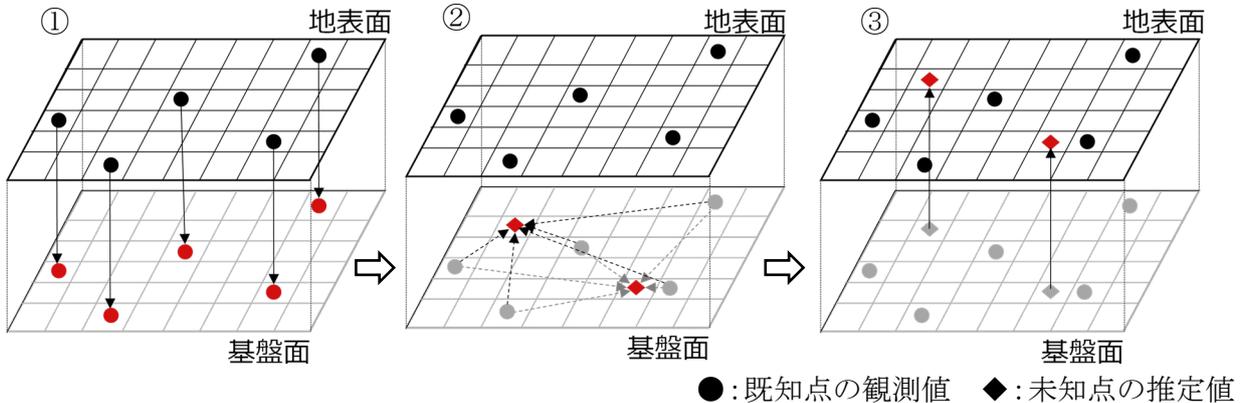


図 5.4 PGV 分布推定の概要

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-SHIS¹⁴⁾で公開されている、文献^{30), 31)}に基づく 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、図 3.7 で示した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。

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

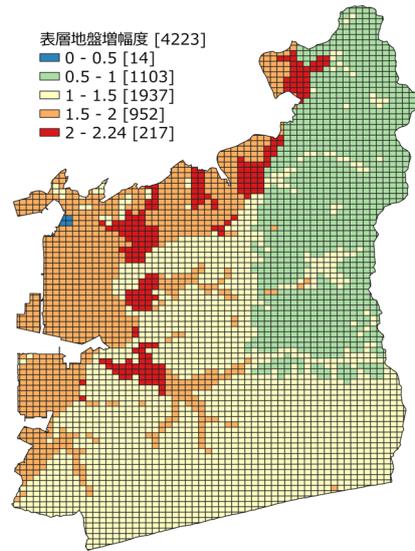


図 5.5 豊橋市の表層地盤増幅度

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³²⁾。本論では通常クリギング法により、空間補間を行う。通常クリギング法による未知点の PGV の推定値 v^* は、観測された地震波から得られた各観測点の最大地動速度 v_k ($k=1, 2, \dots, n$) の重みづけ線形和であり、式(6)のような形で表すことができる。なお、 v^* は推定誤差のばらつきが最小で、かつ不偏性を有する、最良線形不偏推定量である。

$$v^* = \sum_{k=1}^n w_k v_k \quad (6)$$

ここで、 n は地震観測点数、 w は重み係数である。通常クリギング法では、未知点の周囲で得られる観測値によるバリオグラムから、重み w を求める。バリオグラムは、2 観測点間の距離ベクトル \mathbf{h} に対する観測値の差を非類似度とし、式(7)のように定義する。

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \text{Var}[V(\mathbf{u} + \mathbf{h}) - V(\mathbf{u})] = \frac{1}{2} E[\{V(\mathbf{u} + \mathbf{h}) - V(\mathbf{u})\}^2] \quad (7)$$

ここで、 $V(\mathbf{u})$ は最大地動速度の確率変数、 \mathbf{u} は位置ベクトルである。バリオグラムは、横軸に距離 h 、縦軸に $\gamma(h)$ をプロットした点群に、理論式の曲線をフィッティングすることでモデル化する。本論では、理論バリオグラムのモデルとして、式(8)のガウスモデルを用いる。

$$\gamma(h) = b + (c - b) \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right\} \right] \quad (8)$$

ここで、 a はレンジ、 b はナゲット、 c はシルと呼ばれ、バリオグラムを決定づけるパラメータである。式(8)を点群にフィッティングすることでパラメータを決定し、式(9)のクリギング方程式を満たすような w を求める。

$$\begin{pmatrix} \gamma(\mathbf{h}_{1,1}) & \cdots & \gamma(\mathbf{h}_{n,1}) & 1 \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{1,n}) & \ddots & \gamma(\mathbf{h}_{n,n}) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(\mathbf{h}_{0,1}) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{0,n}) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{h}_{ij} は i ($i=1, 2, \dots, n$) 番目の観測点と j ($j=1, 2, \dots, n$) 番目の観測点間の距離ベクトル、 μ はラグランジュの未定乗数である。左辺の係数行列の逆行列を両辺に掛けることで、重み係数 w_k とラグランジュの未定乗数 μ を求めることができる。

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、1/120rad, 1/60rad, 1/30rad の3種類の損傷確率曲線を割り当てた。なお、本論では、最大層間変形角が1/120rad未満の損傷状態を無被害、1/120rad以上の変形を受けた損傷状態を小破、1/60rad以上の変形を受けた損傷状態を中破、1/30rad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、本論では、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。本論では、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一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。
- 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。

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

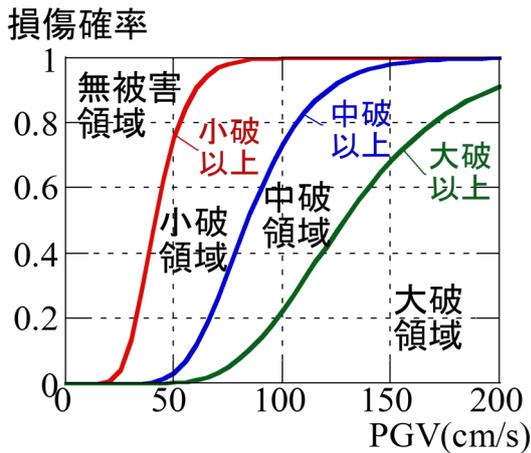


図 5.6 各損傷状態に関する損傷確率曲線

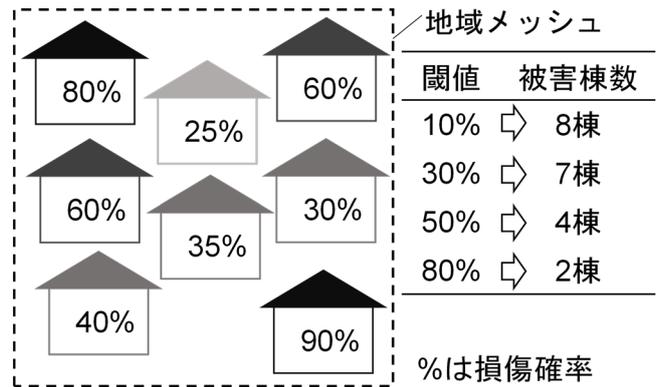


図 5.7 ①の被害棟数集計の概念図

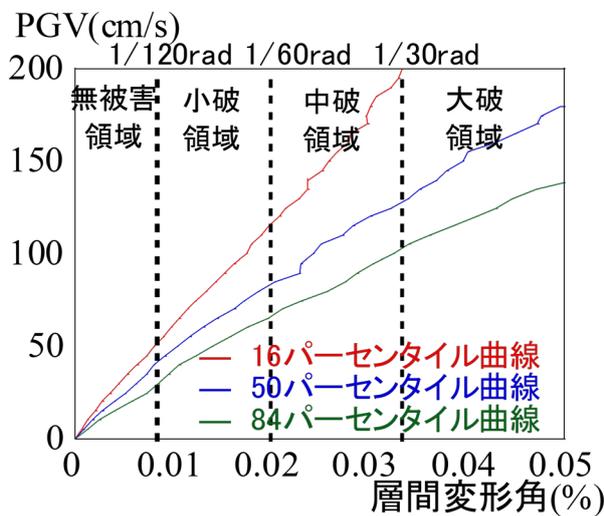


図 5.8 ②で用いる IDA 曲線例

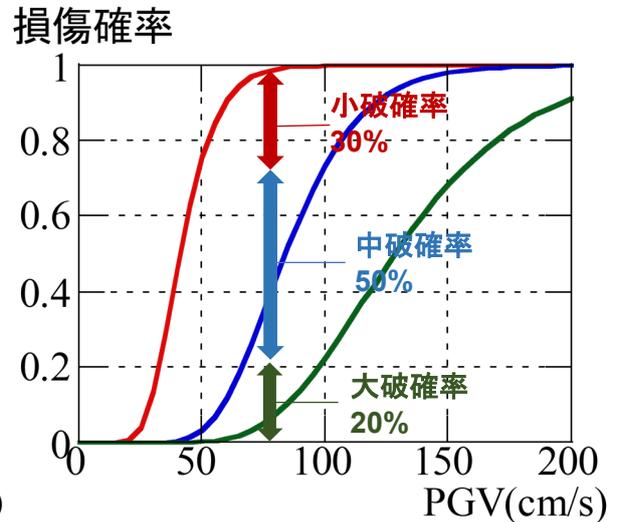


図 5.9 ③で用いる損傷確率の算定

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一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 パーセンタイル曲線と各損傷状態の領域を示す。図中の縦破線は、左から 1/120rad, 1/60rad, 1/30rad の位置を示している。図中のパーセンタイル曲線では、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 パーセンタイル曲線では、PGV=100cm/s が入力された場合、中破になると推定できる。

③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 PGV=100cm/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%

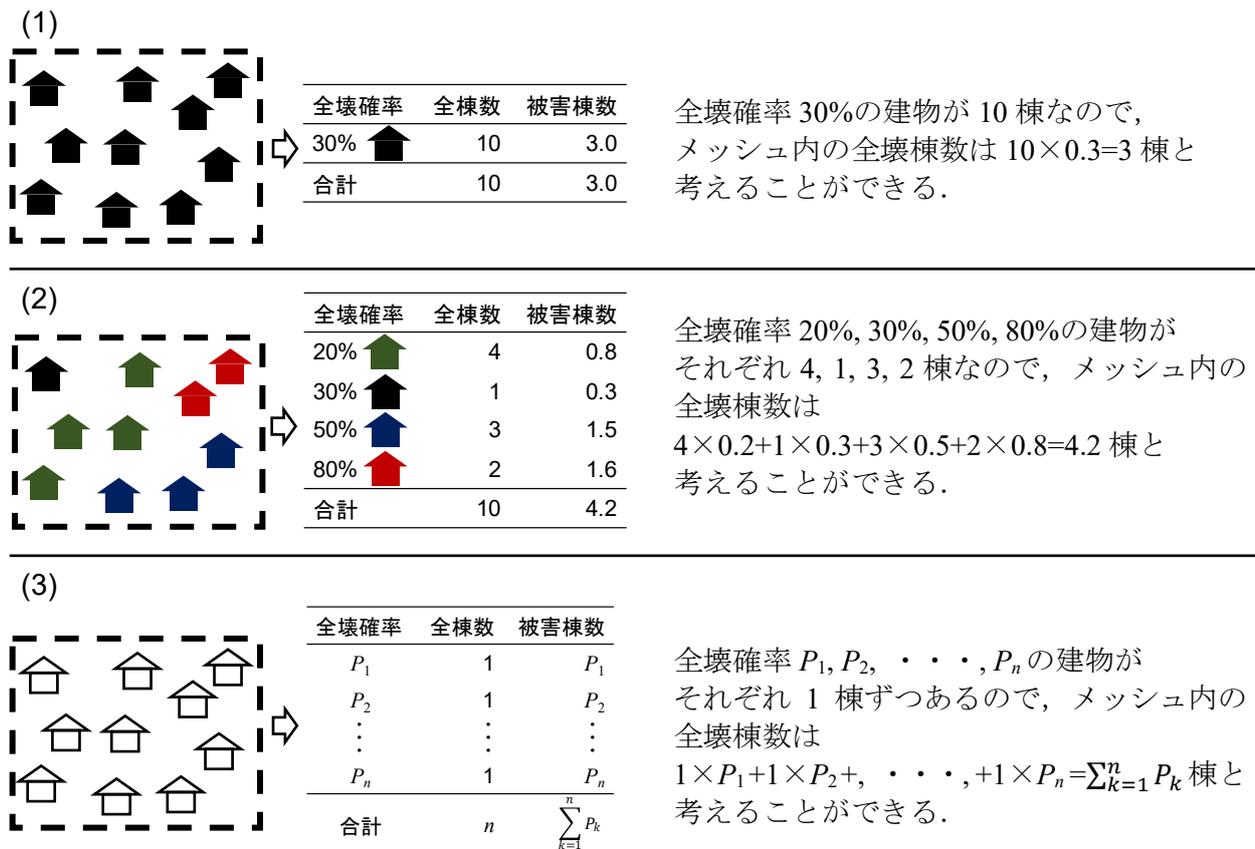


図 5.10 損傷確率から損傷棟数を求める方法の解説

(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 3.0 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。本論では、**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。Python の geopandas というライブラリを使用することで、汎用 GIS ソフトのようにデータを処理できるため、都市計画基礎調査や、国土地理院が公開している基盤地図情報などを利用することで、容易に推定結果を図示することが可能である。本論では、行政の意思決定に有効な結果の表示方法について十分な検討ができていないため、今後検討する予定である。

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、**図 3.7** に示した南海トラフの想定地震動分布を用いた。**図 5.11** に、**図 3.10** に示した被害率関数を、豊橋市内の1, 2階建ての木造専用住宅に適用した場合の被害分布を示す。(a)に全壊棟数、(b)に一部損壊以上棟数を示している。また、**図 5.12** 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** と**図 5.12** 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。なお、**図 5.11**

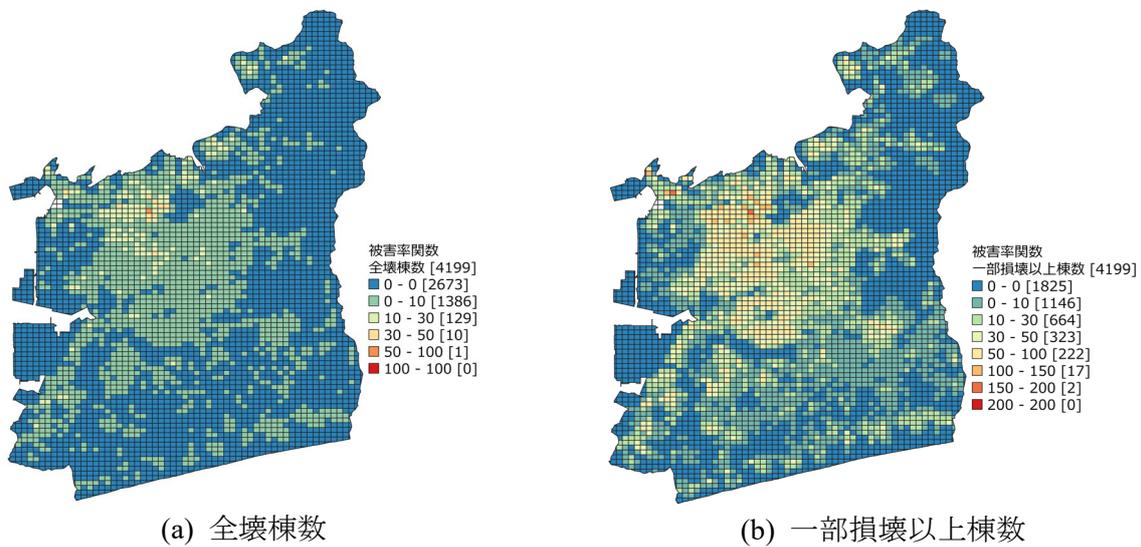


図 5.11 被害率関数による被害棟数分布

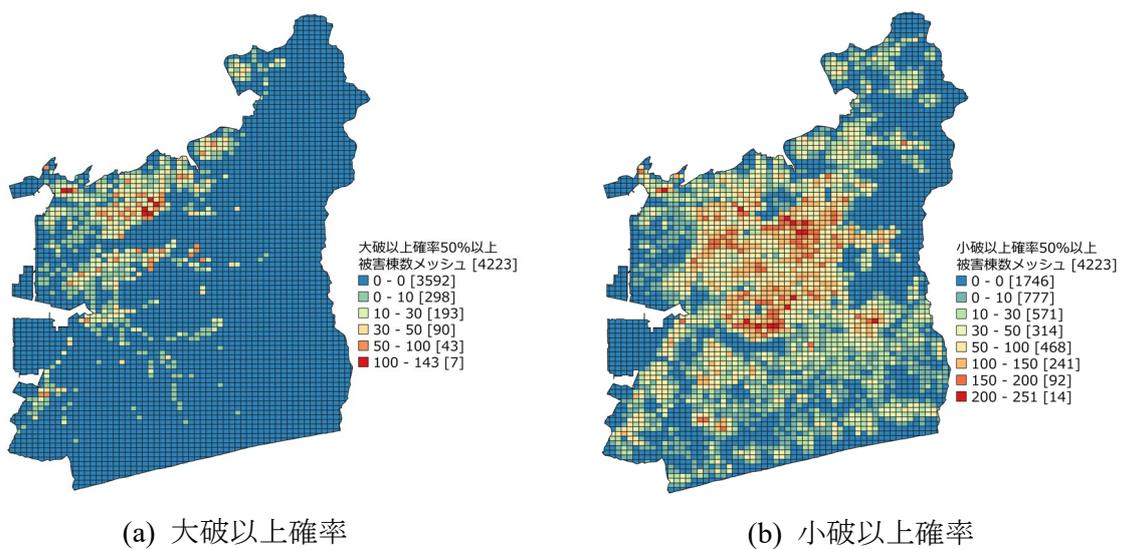


図 5.12 ①の手法から求めた被害棟数分布

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

では損傷状態を全壊、一部損壊としており、**図 5.12** では損傷状態を大破、小破としているため、被害状態が完全に一致しない状態で比較を行っていることを予め記しておく。**図 5.11 (a)**の全壊棟数と**図 5.12 (a)**の大破棟数を比較すると、**図 5.11 (a)**では全体的に被害が小さい傾向にあり、被害が市内全体に広がっている一方、**図 5.12 (a)**ではメッシュあたりの被害棟数が大きく、被害が集中している。同程度の損傷状態と考えると被害の傾向が違っている。**図 5.12 (a)**では、大破以上確率が50%以上の建物を大破以上の建物としているため、例えば大破以上確率が49%の建物は、大破以上の建物ではないという判定となっている。このため、大破以上確率が小さい建物が集まっているメッシュでは、大破以上となる建物が0になってしまう場合があり、被害が集中して表示される結果になったと考えられる。ここで、**図 5.13(a)**に、閾値を20%以上に下げた場合の大破以上建物棟数、**図 5.13(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 5.13(a)**を見ると、**図 5.12 (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 (a)**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 5.13 (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。しかし、示した箇所以外の危険性が低いわけではないため、それを示すことができない点は不十分である。このように、閾値を設ける方法では、閾値の設定によって、図に対して様々な解釈ができる反面、複数の図を見比べる必要があり、解釈も難しいため、迅速な災害対応のための情報として利用するのは難しいと考えられる。

続いて、**図 5.11 (b)**と**図 5.12 (b)**を比較すると、被害の範囲はおおよそ同じであるが、全体的な被害は**図 5.12 (b)**の損傷確率による被害推定の方が大きくなっている。本論で算定した損傷確率曲線は、建築年当時の耐震基準を最低限満たす解析モデルを基にしているため、実建物の被害状況から算定した被害率関数による推定被害状況よりも、全体的に被害が大きい傾向にあったと考えられる。

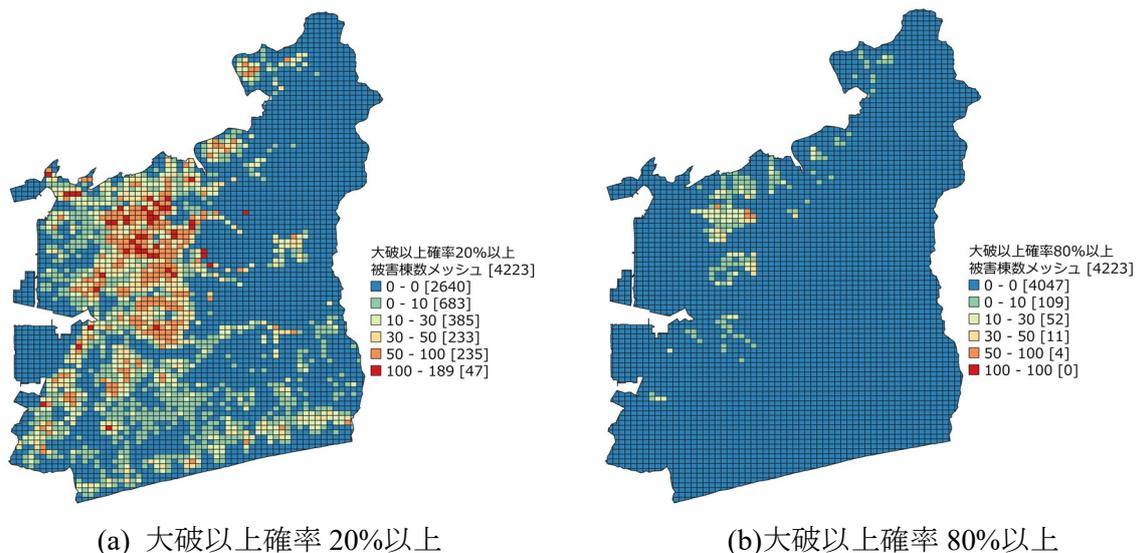


図 5.13 ①の手法から求めた大破棟数分布

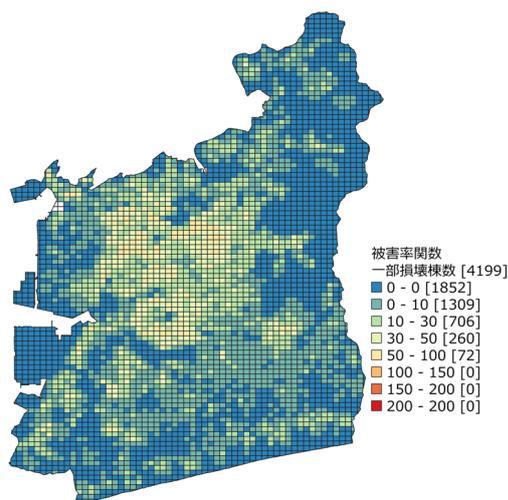


図 5.14 被害率関数による一部損壊棟数

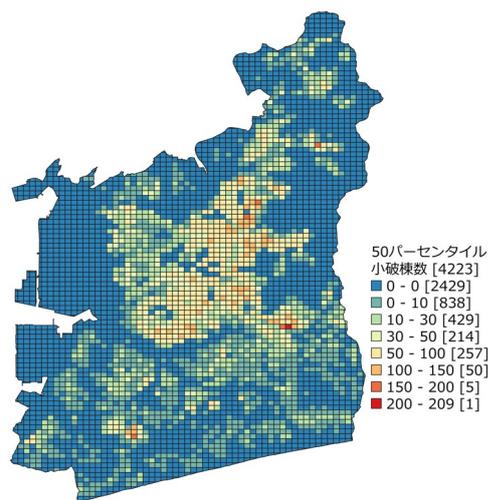


図 5.15 ②の手法を用いた小破棟数分布

次に、②の算定した IDA 曲線を統計的に整理することで求めることができる 50 パーセンタイル曲線を、建物の最大地動速度一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方法について見てみる。図 5.14 に被害率関数から算定した一部損壊棟数を、図 5.15 に境界型の 50 パーセンタイル値から求めた小破棟数を示す。図 5.14 と図 5.15 では、一部損壊及び小破となる建物のみを対象としているため、それ以上の損傷状態の棟数は含まれていない。図 5.15 は、図 5.14 と比べると、西部や、中央北の特に最大地動速度が大きい部分で小破が発生していないことがわかる。これは、特に最大地動速度が大きい地域ではすべての建物が中破以上の判定となっているため、小破の建物が発生しないという結果になっていることが原因と考えられる。実際の被害では、建物の耐力のバラツキがあるため、建物が数十棟存在している場合、ある損傷状態の建物が 250m 地域メッシュ内に全くないという状況は考えにくく、被害率関数による推定の方が、実状をよく表せている可能性がある。本論では、この建物のバラツキを考慮していないため、これを考慮することで、より実際に近い被害の推定が可能になると考えられる。

次に、③の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場合の推定結果を示す。図 5.16 に、③の方法で算定した被害分布推定結果を示す。(a)に大破棟数、(b)に小破棟数を示している。ここで、図 5.11 (a)の被害率関数による推定全壊棟数と、図 5.14 の被害率関数による推定一部損壊棟数を再掲する。図 5.16 (a)と図 5.11 (a)を比較すると、図 5.16 (a)の方が全体的な被害が大きく、被害範囲も広がっている。また、図 5.16 (b)と図 5.14 を比較すると、被害範囲はおおよそ同じだが、被害は図 5.16 (b)の方が大きい傾向がある。これらは、損傷確率曲線の解析モデルが設計基準を最低限満たすモデルとしているためと考えられる。また、③の方法では、①、②の方法と異なり、豊橋市全域で被害が発生する結果となっており、3つの手法の中で最も被害率関数による推定結果に近い被害範囲となっている。したがって、一つの地震動、一種類の被害率関数の検討にとどまっているが、③の方法を使うことで、損傷確率曲線を使った建物ごとの損傷確率から、被害率関数を使った推定と同様な、地域メッシュ単位の被害推定を行うことができる可能性がある。

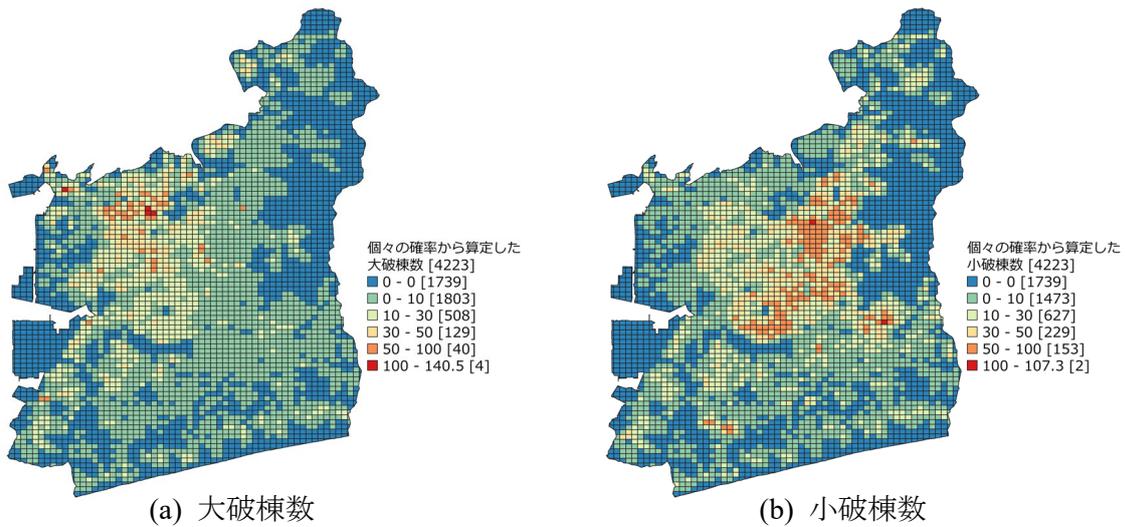


図 5.16 ③の手法から算定した被害棟数分布

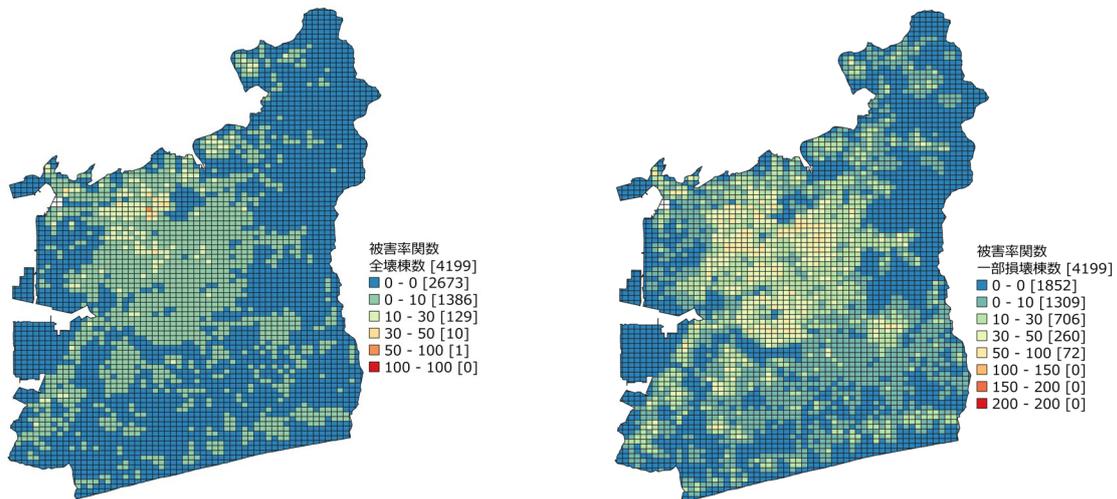


図 5.11(a)再掲 被害率関数による全壊棟数分布

図 5.14 再掲 被害率関数による一部損壊棟数分布

5.3 推定結果例

過去に、地震計を設置している6拠点で実際に観測された地震波データを用いて、開発したシステムによる地震動分布推定、被害推定を行い、その結果を確認する。

5.3.1 入力する地震

入力する地震は、2020年9月27日に静岡県西部を震源として発生したマグニチュード5.1の地震を使用した。表5.1に入力地震時の各観測点の最大地動速度を示す。表5.1を見ると、非常に小さい地震動であり、建物被害は発生しない。本論では、システムを使用することで、建物被害推定結果が正しく表示されるかについて確認を行うため、各観測拠点の最大地動速度を等しく定数倍することで、建物被害が発生するレベルの地震動を仮定する。倍率は、豊橋市役所で観測される最大地動速度が、図3.7で示した南海トラフ地震の最大地動速度分布で、豊橋市役所が位置するメッ

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

表 5.1 各観測拠点の最大地動速度

観測拠点	豊橋 市役所	豊川 市役所	蒲郡 市役所	田原 市役所	新城 市役所	豊橋中 消防署
最大地動速度 (cm/s)	2.08	4.44	2.64	0.67	1.71	2.73

表 5.2 各観測拠点に倍率を掛けた最大地動速度

観測拠点	豊橋 市役所	豊川 市役所	蒲郡 市役所	田原 市役所	新城 市役所	豊橋中 消防署
最大地動速度 (cm/s)	62.03	132.40	78.72	19.98	50.99	81.41

シュの最大地動速度 62.03 cm/s になるように、29.82 倍する。表 5.2 に表 5.1 の最大地動速度に 29.822 を掛けた結果を示す。本節では、この倍率を掛けた地震動を入力地震動とする。

5.3.2 最大地動速度分布推定

まず、バリオグラムを確認する。図 5.17 に、バリオグラム点群と理論バリオグラムを示す。図 5.17 で、横軸は観測点間距離、縦軸はバリオグラムを表している。また、点群は各観測点ペアのデータを式(7)に適用した値、太い黒線は点群からフィッティングで求めた理論バリオグラムである。これを見ると、理論バリオグラムは点群と対応していないことがわかる。バリオグラムのパラメータを見ると、レンジ a は 1.344 となっている。レンジは、空間相関性が失われる距離の目安を表すものであるため、この結果は、推定したい未知点の周囲 1.344km よりも離れた観測点のデータは、推定したい未知点との相関がないということを示している。本来であればレンジは、観測点の設置間隔よりも大きい値であることが望ましい。したがって、一つの地震波のみを入力とした限定的な結果ではあるが、現状地震計を設置している 6 拠点のデータのみを使う場合の地震動分布の推定値は、空間相関性を表すためのデータ数としては不十分であると考えられる。しかしながら、現状ではこれ以上のデータが得られないため、今後の検討はこの結果を用いて進めることとする。

続いて、推定した地表面の最大地動速度分布を図 5.18 に示す。また、図 3.7 の南海トラフの想定地震動分布と、図 5.4 の表層地盤増幅度分布を再掲する。図 5.18 で最も大きな最大地動速度は約 128cm/s であり、図 3.7 の南海トラフの想定地震動分布で最も大きな最大地動速度の約 122cm/s とほぼ同程度の大きさの地震動となっていることがわかる。図 5.18 と図 3.7 の分布を比較すると、PGV<90cm/s の範囲では各階級のメッシュ数がおおよそ同じであることが確認できる。一方、PGV ≥ 90cm/s では、今回推定した地震動分布の方が、90-110cm/s の範囲のメッシュ数は少なく、110cm/s 以上の範囲のメッシュ数は多くなっており、最大地動速度が若干大きいことがわかる。しかし、分布の様子はほぼ同じで、図 5.4 の地盤増幅度が大きく影響していることがわかる。

5.3.3 建物被害分布推定

次に、推定した建物被害分布を GIS ソフトで図示した図 5.19 を示す。(a)が大破棟数、(b)が小破棟数を示している。図 5.16 の南海トラフの想定地震動分布から推定した建物被害分布と比べると、

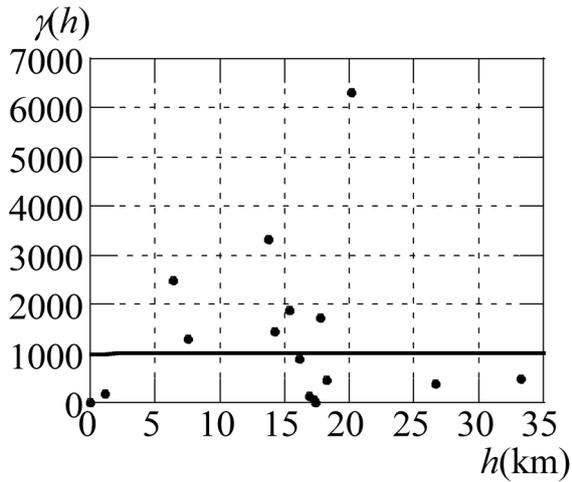


図 5.17 推定したバリオグラム

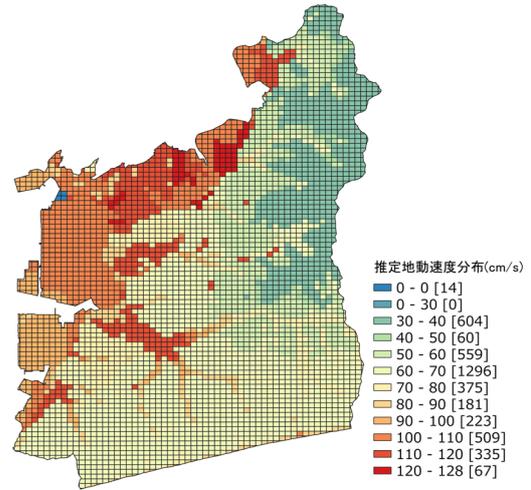


図 5.18 推定地動速度分布

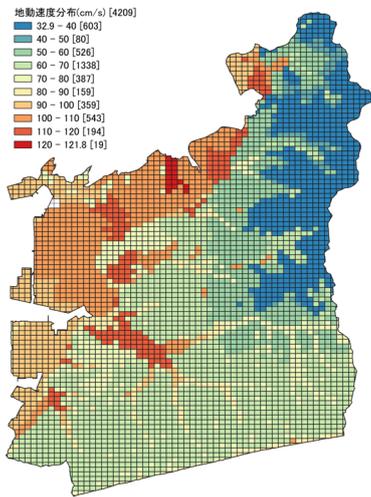


図 3.7 再掲 豊橋市の想定地動速度分布

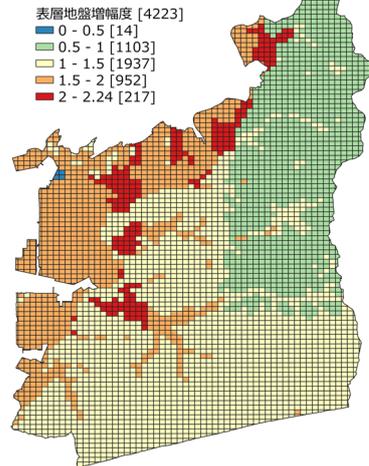
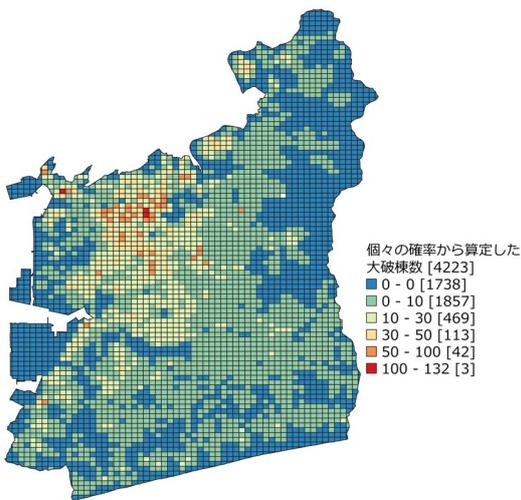
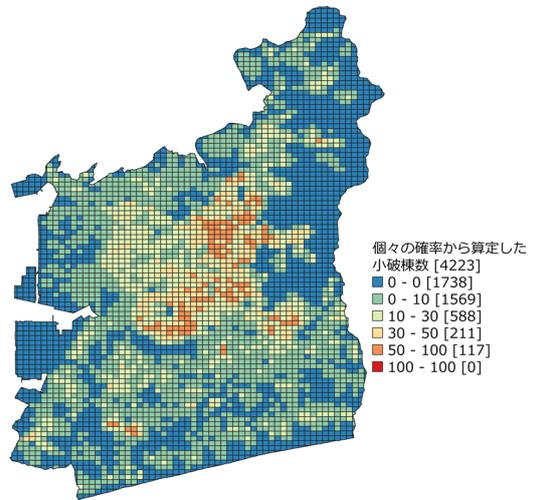


図 5.5 再掲 豊橋市の表層地盤増幅度



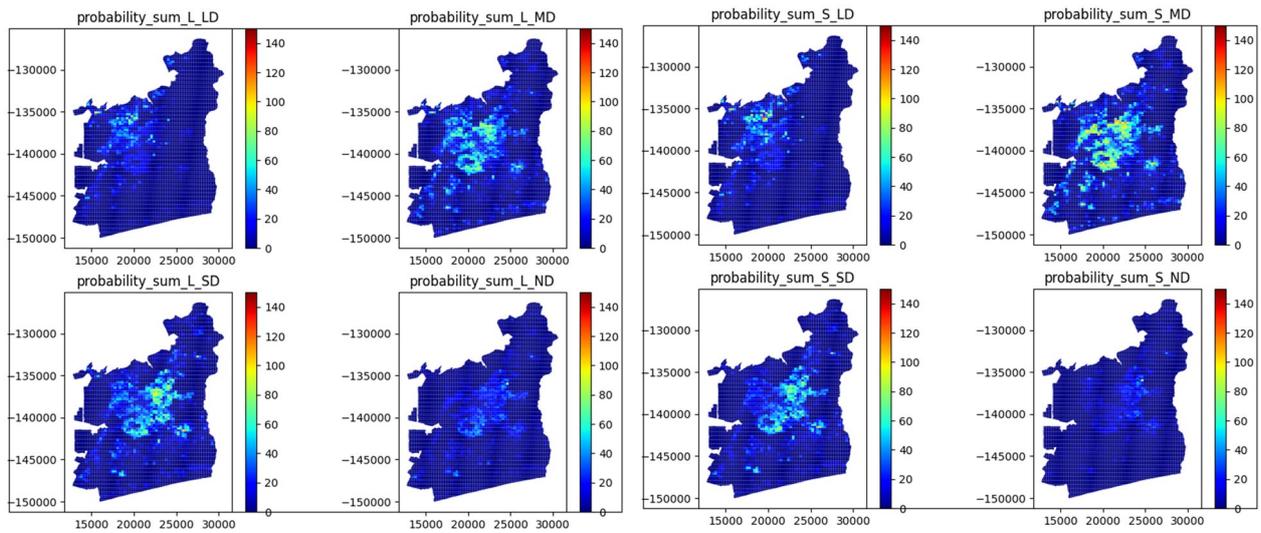
(a) 大破棟数



(b) 小破棟数

図 5.19 推定した建物被害分布

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



(a) 内陸直下型

(b) プレート境界型

図 5.20 開発したシステムから出力される建物被害分布

大破・小破どちらの場合も似たような分布になっていることがわかる。これは、地動速度分布がかなり似ていたためと考えられ、正しく推定ができていることが確認できた。ここで図 5.20 に、開発したシステムから直接出力される実際の建物被害分布を示す。(a)が内陸直下型、(b)がプレート境界型に関する損傷確率曲線を適用した場合で、左上が大破棟数、右上が中破棟数、左下が小破棟数、右下が無被害棟数を表している。これらを見ると、どの辺りでどの損傷状態となる建物が多く分布するかを把握することが可能である。(a)、(b)右下の無被害棟数を比較すると、(a)の方が多く分布していることから、内陸直下型の損傷確率を適用した場合の建物被害は、プレート境界型を適用した場合と比較して被害が小さい傾向にあることがわかる。

5.4 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 本論のまとめ

本論では、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性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

本論では、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、本論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、今後豊橋市内の小中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。

参考文献

参考文献

- 1) 内閣府：南海トラフ巨大地震の被害想定について（建物被害・人的被害），2019.
- 2) 中央防災会議：南海トラフ地震防災対策推進基本計画，2021.
- 3) 中央防災会議幹事会：南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画，2022.
- 4) 内閣府：南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン【第1版】，2021.
- 5) 豊橋市：豊橋市南海トラフ地震被害予測調査～調査結果の概要及び今後の地震防災・減災対策について～，2014.
- 6) 林和宏，齊藤大樹：防災拠点建物を対象としたリアルタイム耐震診断システムの社会実装—市役所庁舎へのシステム導入とその運用状況，日本地震工学会論文集，Vol. 19, No. 5, pp. 378-387, 2019.
- 7) 藤原広行，中村洋光，高橋郁夫，先名重樹，若井淳，内藤昌平，森川信之，前田宜浩，東宏樹，岩城麻子，功刀卓，鈴木亘，青井真，佐伯琢磨，青柳京一，門馬直一，日下彰宏，時実良典，岩波良典：全国を概観するリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発，防災科学技術研究所研究資料，No. 432, 2019.
- 8) ゼンリン：住宅地図データベースZmap-TOWNII，
<https://www.zenrin.co.jp/product/category/gis/basemap/zmaptown/index.html>
- 9) 村尾修，山崎文雄：震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した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，No. 555, pp. 185-192, 2002.
- 10) 国土交通省都市局：都市計画基礎調査実施要領，第4版，2021.
- 11) 国土交通省都市局都市計画課都市計画調査室：利用・提供の観点から踏まえた都市計画基礎調査実施要領及び都市計画基礎調査情報の利用・提供ガイドラインに係る技術資料，第2版，2021.
- 12) 豊橋市：豊橋市統計書 平成29年版，2017.
- 13) 総務省統計局：平成30年住宅・土地統計調査，<https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/index.html>，最終アクセス日：2022.11.15.
- 14) 防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードステーション，<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>，最終アクセス日：2022.11.15.
- 15) 藤田零，吉田秀典，堀宗朗，M. L. L. Wijerathne：地震による建物被害を考慮した避難行動シミュレーション，土木学会論文集A2, Vol. 71, No. 2, pp.643-654. 2015.
- 16) Federal Emergency Management Agency: Quantification of Building Seismic Performance Factors (FEMA P-695), 2009. Dimitrios Vamvatsikos, C. Allin Cornell: Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp. 491-514, 2002.
- 17) 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）』，初版，第7刷，2006.
- 18) 坂田弘安：木造建築物の耐力，東京工芸大学風工学研究拠点特定課題研究 日本版竜巻スケールおよびその評価手法に関する研究 報告書，pp. 48-55, 2014.
- 19) 五十田博，平野茂，三浦辰哉，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，No. 618, pp. 167-173, 2007.

- 20) 飯山かほり, 森川仁, 市村強, 堀宗朗, 山崎義弘, 坂田弘安, 大野晋, 柴山明寛: 都市の地震応答シミュレーションのための木造建物モデル設定に関する一検討, 構造工学論文集, Vol. 64B, pp. 47-53, 2018.
- 21) 山田耕司: 愛知県の在来軸組木造住宅の壁量に関する調査研究, 構造工学論文集, Vol. 46B, pp. 181-188, 2000.
- 22) 五十田博, 河合直人: 木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデルー木造建物の地震時挙動に関する研究ー, 日本建築学会構造系論文集, No. 616, pp. 157-163, 2007.
- 23) 国立研究開発法人防災科学技術研究所: 防災科研K-NET, KiK-net, 2019. DOI: <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 24) 地震調査研究推進本部: 毎月の地震活動, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismicity_monthly/, (参照2022-11-24).
- 25) Federal Emergency Management Agency: NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450) 2003 Edition part1: Provisions, 2004.
- 26) 翠川三郎, 野木淑裕: 深さ30mまでの平均S波速度を深さの浅いデータから推定する方法について, 日本地震工学会論文集, Vol. 15, No. 2, pp. 91-96, 2015.
- 27) 長江拓也, 林静雄, ルイス イバラ, ヘルムット クラウインクラー: メカニズムコントロールが鉄筋コンクリートフレーム構造の損傷過程と崩壊確率に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No. 593, pp.121-128, 2005.
- 28) Eduardo Miranda, Hesameddin Aslani: Probabilistic Response Assessment for Building-Specific Loss Estimation, PEER Report, 2003.
- 29) Python, <https://www.python.org/>
- 30) 松岡昌志, 若松加寿江: 地形・地盤分類250mメッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号H20PRO-936, 2008.
- 31) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震観測記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.
- 32) 阪田義隆: クリギング入門ー空間データ推定の確率論的アプローチー, 初版, コロナ社, 2021.
- 33) 国土交通省国土地理院: 基盤地図情報関連ページ, <https://www.gsi.go.jp/kiban/>, 最終更新日: 2022.3.18, 最終アクセス日: 2023.01.21.