

東三河地域防災協議会 委託研究

東三河地域の防災力向上に向けた
リアルタイム耐震診断システムの活用に関する研究

2023年 3月

豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系

教授 齊藤 大樹

目次

| | |
|---|----|
| 図リスト | 3 |
| 表リスト | 5 |
| 1章 はじめに | |
| 1.1 研究背景 | 6 |
| 1.2 研究目的と本論の構成 | 8 |
| 2章 都市計画基礎調査データについて | |
| 2.1 本論で使用するデータについて | 10 |
| 2.2 各市の建物分布について | 11 |
| 2.3 豊橋市の統計データと都市計画基礎調査データの棟数差 | 12 |
| 3章 被害率関数を用いた被害推定の精度向上の検討 | |
| 3.1 建築年代別建物割合の算定 | 13 |
| 3.1.1 ケース1：住宅・土地統計調査を用いる場合 | 13 |
| 3.1.2 ケース2：都市計画基礎調査を用いる場合 | 14 |
| 3.1.3 建物割合の差 | 16 |
| 3.2 南海トラフ地震の想定地震動分布による被害推定結果の比較 | 18 |
| 3.2.1 想定する地震動強さ分布 | 18 |
| 3.2.2 被害率関数による被害率推定手順 | 19 |
| 3.2.3 全壊率の推定結果及び比較 | 20 |
| 3.2.4 一部損壊以上率の推定結果及び比較 | 24 |
| 3.3 3章のまとめ | 28 |
| 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 | 29 |
| 4.2 木造住宅の解析モデル | 30 |
| 4.3 入力地震波 | 31 |
| 4.4 IDA 曲線の算定 | 33 |
| 4.5 損傷確率曲線の算定 | 34 |
| 4.5.1 1/30rad（安全限界）時の損傷確率曲線 | 35 |
| 4.5.2 1/120rad（損傷限界）時の損傷確率曲線 | 38 |
| 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 | 40 |
| 4.6.1 1/30rad 時の損傷確率分布 | 41 |
| 4.6.2 1/120rad 時の損傷確率分布 | 42 |
| 4.7 4章のまとめ | 43 |

目次

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..... | 44 |
| 5.1.1 | STEP1 地震判定, 各観測点の最大地動速度取得..... | 44 |
| 5.1.2 | STEP2 最大地動速度分布の空間補間..... | 45 |
| 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..... | 47 |
| 5.1.4 | STEP5 メール送信..... | 49 |
| 5.2 | 建物被害分布推定の手法による比較..... | 50 |
| 5.3 | 推定結果例..... | 53 |
| 5.3.1 | 入力する地震..... | 53 |
| 5.3.2 | 最大地動速度分布推定..... | 54 |
| 5.3.3 | 建物被害分布推定..... | 54 |
| 5.4 | 5章のまとめ..... | 57 |

6章 結論

| | | |
|-----|-------------|----|
| 6.1 | 本論のまとめ..... | 58 |
| 6.2 | 今後の課題..... | 58 |

| | |
|---------|----|
| 謝辞..... | 59 |
|---------|----|

| | |
|-----------|----|
| 参考文献..... | 60 |
|-----------|----|

図リスト

1章 はじめに

| | | |
|-------|-----------------------------|---|
| 図 1.1 | RT 耐震診断システムの概要 | 6 |
| 図 1.2 | リアルタイム地震被害推定の推定手順概要 | 7 |
| 図 1.3 | 地域メッシュ単位の被害推定の精度向上の概要 | 8 |
| 図 1.4 | 木造建築物単位の損傷確率推定の概要 | 9 |

2章 都市計画基礎調査データについて

| | | |
|-------|----------------|----|
| 図 2.1 | 豊橋市の建物分布 | 10 |
| 図 2.2 | 蒲郡市の建物分布 | 10 |
| 図 2.3 | 田原市の建物分布 | 10 |

3章 被害率関数を用いた被害推定の精度向上の検討

| | | |
|--------|---|----|
| 図 3.1 | 豊橋市の建物割合（都市計画基礎調査） | 15 |
| 図 3.2 | 蒲郡市の建物割合（都市計画基礎調査） | 15 |
| 図 3.3 | 田原市の建物割合（都市計画基礎調査） | 16 |
| 図 3.4 | 豊橋市の平均建物割合（ケース 1）に対する実在建物割合（ケース 2）差の分布..... | 17 |
| 図 3.5 | 蒲郡市の平均建物割合（ケース 1）に対する実在建物割合（ケース 2）差の分布..... | 17 |
| 図 3.6 | 田原市の平均建物割合（ケース 1）に対する実在建物割合（ケース 2）差の分布..... | 18 |
| 図 3.7 | 豊橋市の想定地動速度分布 | 19 |
| 図 3.8 | 蒲郡市の想定地動速度分布 | 19 |
| 図 3.9 | 田原市の想定地動速度分布 | 19 |
| 図 3.10 | 被害率関数 ⁸⁾ | 20 |
| 図 3.11 | 想定地動速度分布に対する豊橋市の全壊率分布と全壊率差分布..... | 20 |
| 図 3.12 | 想定地動速度分布に対する蒲郡市の全壊率分布と全壊率差分布..... | 21 |
| 図 3.13 | 想定地動速度分布に対する田原市の全壊率分布と全壊率差分布..... | 21 |
| 図 3.14 | 豊橋市の建物割合差と全壊率差の関係 | 22 |
| 図 3.15 | 蒲郡市の建物割合差と全壊率差の関係 | 23 |
| 図 3.16 | 田原市の建物割合差と全壊率差の関係 | 23 |
| 図 3.17 | 想定地動速度分布に対する豊橋市の一部損壊以上率分布と一部損壊以上率差分布. | 24 |
| 図 3.18 | 想定地動速度分布に対する蒲郡市の一部損壊以上率分布と一部損壊以上率差分布. | 25 |
| 図 3.19 | 想定地動速度分布に対する田原市の一部損壊以上率分布と一部損壊以上率差分布. | 25 |
| 図 3.20 | 豊橋市の建物割合差と一部損壊以上率差の関係 | 26 |
| 図 3.21 | 蒲郡市の建物割合差と一部損壊以上率差の関係 | 27 |
| 図 3.22 | 田原市の建物割合差と一部損壊以上率差の関係 | 27 |

図リスト

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 4.1 | IDA の計算手順概要 | 29 |
| 図 4.2 | 層せん断力係数－層間変形角関係 | 31 |
| 図 4.3 | バイリニア＋スリップモデル | 31 |
| 図 4.4 | 5%加速度応答スペクトル | 32 |
| 図 4.5 | 算定した IDA 曲線 | 33 |
| 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 | 35 |
| 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 | 36 |
| 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 | 37 |
| 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 | 38 |
| 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 | 40 |
| 図 4.11 | 木造住宅の 1/30rad に関する損傷確率分布 | 41 |
| 図 4.12 | 木造住宅の 1/120rad に関する損傷確率分布 | 42 |

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 5.1 | 推定全体の手順 | 44 |
| 図 5.2 | 既存耐震診断システムを運用している拠点 | 45 |
| 図 5.3 | 地震判定の手順 | 45 |
| 図 5.4 | PGV 分布推定の概要 | 45 |
| 図 5.5 | 豊橋市の表層地盤増幅度 | 46 |
| 図 5.6 | 各損傷状態に関する損傷確率曲線 | 48 |
| 図 5.7 | ①の被害棟数集計の概念図 | 48 |
| 図 5.8 | ②で用いる IDA 曲線例 | 48 |
| 図 5.9 | ③で用いる損傷確率の算定 | 48 |
| 図 5.10 | 損傷確率から損傷棟数を求める方法の解説 | 49 |
| 図 5.11 | 被害率関数による被害棟数分布 | 50 |
| 図 5.12 | ①の手法から求めた被害棟数分布 | 50 |
| 図 5.13 | ①の手法から求めた大破棟数分布 | 51 |
| 図 5.14 | 被害率関数による一部損壊棟数 | 52 |
| 図 5.15 | ②の手法を用いた小破棟数分布 | 52 |
| 図 5.16 | ③の手法から算定した被害棟数分布 | 53 |
| 図 5.17 | 推定したバリオグラム | 55 |
| 図 5.18 | 推定地動速度分布 | 55 |
| 図 5.19 | 推定した建物被害分布 | 55 |
| 図 5.20 | 開発したシステムから出力される建物被害分布 | 56 |

表リスト

2章 都市計画基礎調査データについて

| | |
|---------------------|----|
| 表 2.1 建物の属性情報 | 11 |
| 表 2.2 棟数の比較 | 12 |

3章 被害率関数を用いた被害推定の精度向上の検討

| | |
|---------------------------------|----|
| 表 3.1 各市の戸建住宅戸数，共同住宅棟数 | 14 |
| 表 3.2 豊橋市の平均住宅割合 | 14 |
| 表 3.3 蒲郡市の平均住宅割合 | 14 |
| 表 3.4 田原市の平均住宅割合 | 14 |
| 表 3.5 図 3.14 中の近似直線の相関係数 | 22 |
| 表 3.6 図 3.15 中の近似直線の相関係数 | 23 |
| 表 3.7 図 3.16 中の近似直線の相関係数 | 23 |
| 表 3.8 図 3.20 中の近似直線の相関係数 | 26 |
| 表 3.9 図 3.21 中の近似直線の相関係数 | 27 |
| 表 3.10 図 3.22 中の近似直線の相関係数 | 27 |

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

| | |
|---|----|
| 表 4.1 床面積 1m^2 あたりの重量 ¹⁶⁾ | 30 |
| 表 4.2 解析モデルの一次固有周期(s) | 31 |
| 表 4.3 分類ごとの地震波の数 | 32 |

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 | 54 |
| 表 5.2 各観測拠点に倍率を掛けた最大地動速度 | 54 |

1章 はじめに

1.1 研究背景

近年、南海トラフ地震の発生による大規模な地震・津波被害が懸念されており、防災・減災対策は重要な課題となっている。特に、想定地震動に対する事前の被害推定やそれに基づく防災計画の策定等は、国、地方自治体に問わず喫緊の課題と位置付けられている。内閣府では、全国を対象とした南海トラフ地震の建物被害・人的被害想定を明らかにし¹⁾、防災対策推進の基本的な方針を示している²⁾。また、発災時の具体的な応急活動に関する活動計画³⁾で、物資輸送や人命救助に関する計画を示す他、南海トラフの前震や本震と思われる地震が発生した場合は、南海トラフ地震臨時情報を発表し、継続して南海トラフ地震の本震や余震が発生する危険性が高い状態であることを国民に周知する対策を設けている⁴⁾。一方、地方自治体規模の例として、南海トラフ地震による被害が想定されている愛知県豊橋市では、建物被害数や死者数等の推定値を明示し、建物耐震化による被害低減効果を数値的に示すなどの取り組みが図られている⁵⁾。

このような事前の計画や推定の他に、リアルタイムでの地震被害推定も有効な防災・減災対策の一つとして挙げられる。リアルタイム（以降、RT）地震被害推定は、地震波観測後即座に建物等の被害推定を行うものであり、被害状況の把握や、災害時の意思決定を補助するための重要な情報を提供する。林・齊藤⁶⁾は、愛知県東三河地区の防災拠点建物（市役所庁舎）を対象に地震計を設置し、リアルタイム耐震診断システムを構築・運用している。地震計で地震波を観測した場合、観測した波を入力波として建物の簡易診断、詳細診断を行い、その結果を市や消防の防災担当者にメールで通知するものである。システムの概要を図 1.1 に示す。通知された情報は、防災拠点の管理者が建物の継続使用可否の判断を迅速に行うための重要な情報となる。

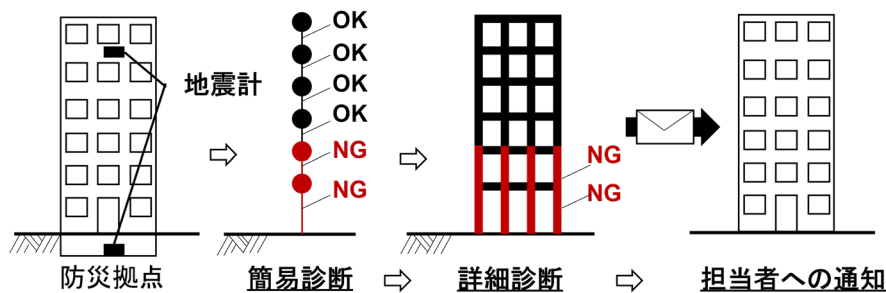


図 1.1 RT 耐震診断システムの概要

また、南海トラフ地震のような広域被害が予想される災害に対しては、全国、都道府県、あるいは市町村全域を対象としたリアルタイムな建物被害分布の推定も有用である。広域での地震被害分布推定システムの実装例として、防災科学技術研究所の J-RISQ⁷⁾が挙げられる。J-RISQ では、人的被害推定も行っているが、特に建物被害の推定に限ると、以下のような手順で被害推定を行っている。図 1.2 に推定手順の概要を示す。

- ① 全国に設置している強震観測網で観測された地震波から、各観測点の地表面の地震動強さ（最

大地動加速度 PGA, 最大地動速度 PGV など) を求める。

- ② 各観測点の地表面の地震動強さを表層地盤増幅度で除し、基盤面の地震動強さを求める。
- ③ 求めた基盤面の地震動強さから、空間補間法により 250 m 地域メッシュごとの基盤面の地震動強さ分布を推定する。
- ④ 各地域メッシュの基盤面の地震動強さに表層地盤増幅度を掛け、地表面の地震動強さを求める。
- ⑤ 過去の地震による被害状況から算定された既往の被害率関数⁹⁾などを各地域メッシュに適用し、そのメッシュの被害率を求める。
- ⑥ 各メッシュの構造別建築年別建物棟数に被害率を掛けて、被害棟数を求める。

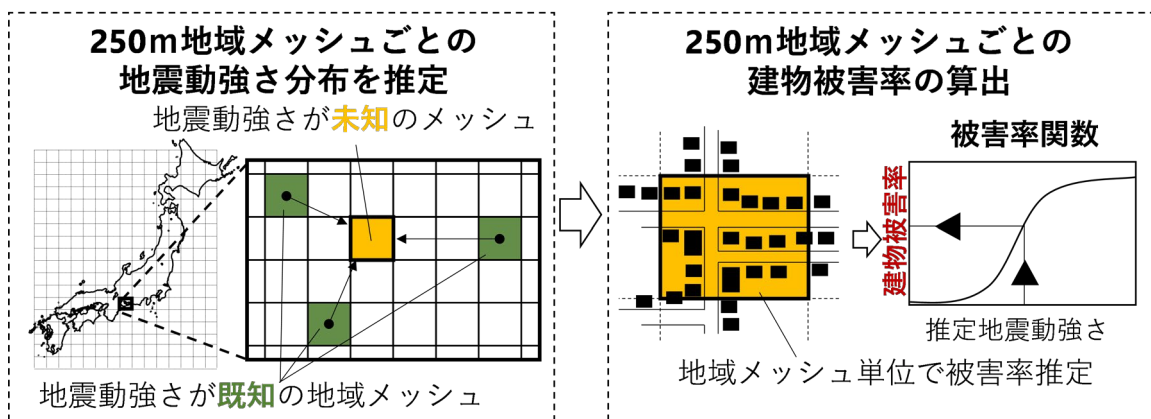


図 1.2 リアルタイム地震被害推定の推定手順概要

J-RISQ による被害推定は全国を対象とした、地域メッシュ単位のマクロな被害推定であり、広い範囲で被害が発生する場合の、被害概況の把握に有用である。

一方、都道府県、市町村のような地方自治体レベルでの被害推定については、検討例はあるものの、実装に至った例は見当たらない。広域での RT 地震被害推定を行うための最低限の基盤として、地震動分布を推定するための強震観測網と、被害分布を推定するための建物データが必要である。しかし、これらの基盤を整備するための検討は十分ではなく、地方自治体ごとの基盤整備は現状では容易ではない。地方自治体レベルの RT 被害推定システムの構築に当たっては、範囲を自治体に限定することで、全国規模の被害推定と比較して、詳細な調査項目やデータを参照できる可能性がある。

例えば J-RISQ では、建物データの基礎部分にゼンリンの全国住宅地図データ⁸⁾を用いている。このデータには、建物の被害に関係がある構造形式や建築年は含まれていないため、用途や床面積といった既知の情報から未知の情報を判定している。一方、地方自治体ごとで調査が行われている都市計画基礎調査データでは、建物ごとに構造形式と建築年の情報が含まれており、被害に関係があるパラメータを断定的に扱うことができる。そのため、実在建物の状況を個別に反映した被害推定を行うことが可能であり、全国規模の推定と比較して推定精度の向上が期待できる他、建物一つ一つのデータを使ったミクロな視点の被害推定により、行政の意思決定を支援する新たな推定情報を提供できる可能性もある。

また、地震動分布推定にあたっては、地震計を推定範囲全域に密に設置することが最も望ましい

1章 はじめに

が、経済的・施工的な面から考えると設置数が限られてくる。そのため、地方自治体の範囲内で、推定精度を落とさないような、効率的な地震計の設置位置や設置間隔、設置数を明らかにすることで、自治体レベルでの地震観測基盤の構築に資する情報の提供が可能と考えられる。

以上より、地域の防災力強化への貢献のため、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検討を行う必要がある。

1.2 研究目的と本論の構成

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た、建物被害の推定について、以下の検討を行う。

- ① 都市計画基礎調査データを用いた、被害率関数による地域メッシュ単位の木造建築物の被害推定の精度向上 (図 1.3)
- ② 都市計画基礎調査データを用いた、個々の木造住宅を対象とした損傷確率曲線による損傷評価手法の検討 (図 1.4)

また、検討した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する。なお本論では、ある範囲内の、被害を受ける建物の割合を求める関数を被害率関数と呼ぶこととし、建物がある損傷を受ける確率を求める関数を損傷確率曲線と呼ぶこととする。被害率関数は地域メッシュ単位の被害推定、損傷確率曲線は建物単位の被害推定を行うために用いる。

本論は 6 章構成としている。1 章では、本論の研究背景と目的について説明する。2 章では、本論の基盤データとなる豊橋市などの都市計画基礎調査の形式や特徴について説明する。3 章では研究目的①について、都市計画基礎調査データを用いることで、J-RISQ に近い手法で推定した建築年代別建物棟数データを使用した場合と比較して、地域メッシュ単位の精度の高い被害推定を行うことができる可能性があることを示す。4 章では研究目的②について、都市計画基礎調査データに含まれている各木造建築物の情報を利用して、損傷確率曲線を用いた建物ごとの地震時の損傷確率推定を行う手法を検討する。5 章では、豊橋市を対象とした RT 地震被害推定システムの構築につい

①都市計画基礎調査データを用いた、被害率関数による地域メッシュ単位の木造建築物の被害推定の精度向上

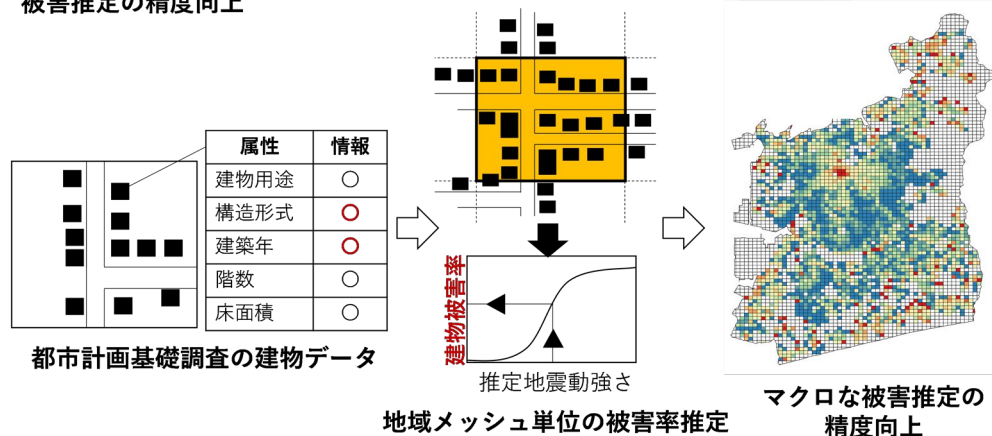


図 1.3 地域メッシュ単位の被害推定の精度向上の概要

②個別の木造住宅を対象とした損傷確率曲線による損傷評価手法の提案

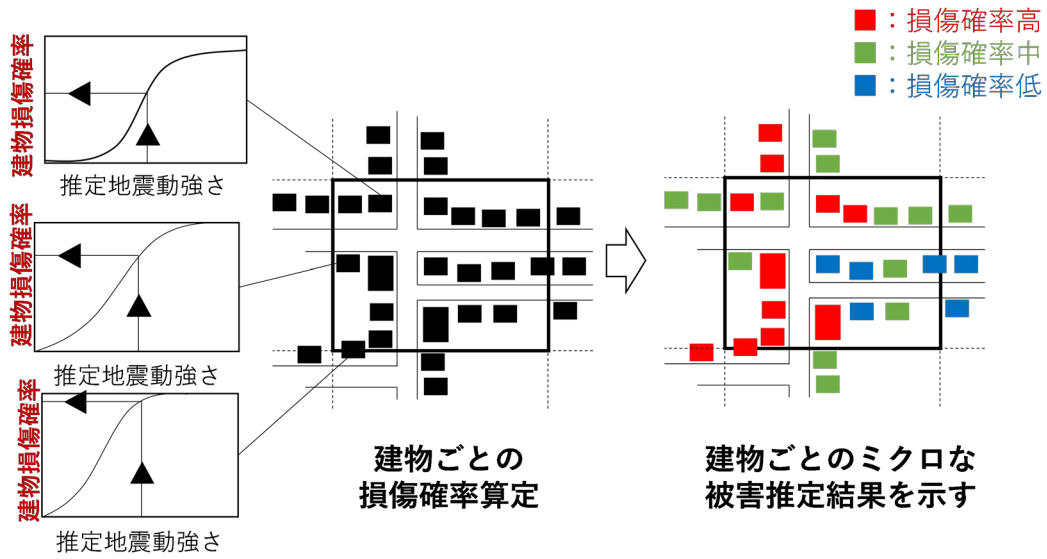


図 1.4 木造建築物単位の損傷確率推定の概要

て説明するとともに、実際に観測された地震波を入力として、本論で開発したシステムにより、地震動分布推定、及び建物被害分布推定を行い、その結果を示す。6章では、本論の結論と今後の課題を示す。

2章 都市計画基礎調査データについて

都市計画基礎調査は、「都市計画法第6条に基づき、都市における人口、産業、土地利用、交通などの現況及び将来の見通しを定期的に把握し、客観的・定量的なデータに基づいた都市計画の運用を行うための基礎となるもの」¹⁰⁾である。調査主体は都道府県で、概ね5年ごとに更新が行われており、自治体によって調査データの表示フォーマットが異なる¹¹⁾が、国交省の実施要領に従っているため、どの県のデータも概ね同様に扱うことが可能である。なお、これらはGISデータとして公表されており、汎用地図ソフト等を活用することで、建物分布や被害評価結果の可視化が容易である。

2.1 本論で使用するデータについて

本論では、愛知県豊橋市、蒲郡市、田原市の都市計画基礎調査データを使用する。都市計画基礎調査データ（以降、基礎調査データと呼ぶ）の調査分類は、「人口規模」や「土地利用」、「建物」など多岐にわたる¹⁰⁾。本研究ではそのデータの中で、「建物」分類の「建物利用現況」項目のみを使用する。図2.1に豊橋市の基礎調査データの建物分布を示す。また、図2.2に蒲郡市、図2.3に田原市の建物分布を同様に示す。これを見ると、図2.1の豊橋市では、市内全域で建物が分布しているのに対し、図2.2の蒲郡市と図2.3の田原市では、建物が見られない範囲が豊橋市に比べ多い。こ

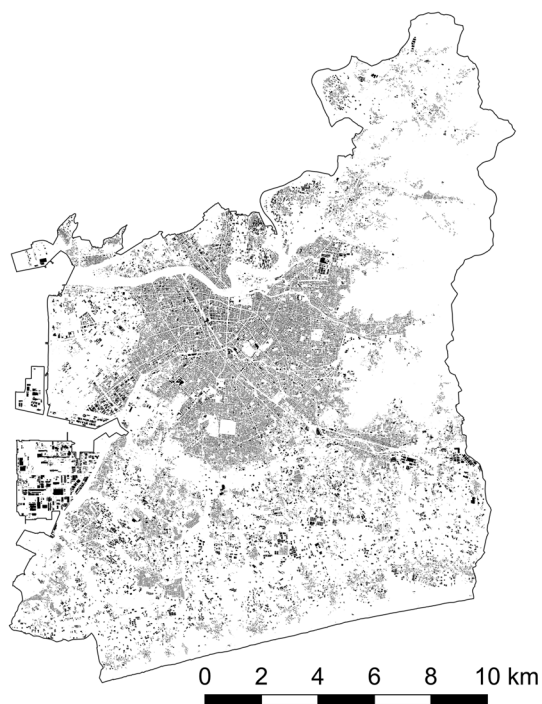


図 2.1 豊橋市の建物分布

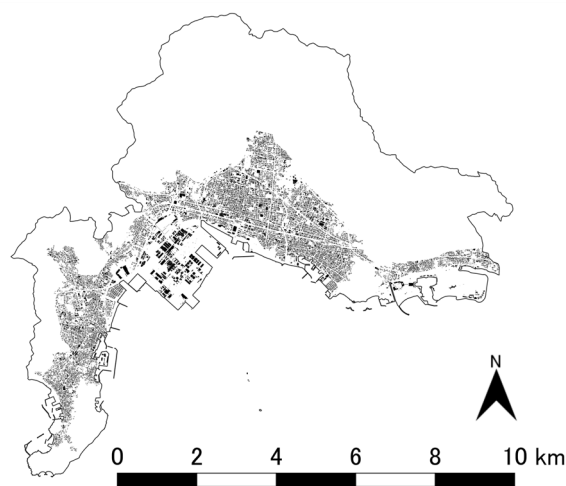


図 2.2 蒲郡市の建物分布



図 2.3 田原市の建物分布

これは、豊橋市では行政区域全体の建物データが含まれている一方、蒲郡市と田原市では都市計画区域に限定されたデータのみが含まれているためである。都市計画基礎調査では、建物の調査範囲は都市計画区域としており、その区域外のデータは求められていない。そのため、市によって調査範囲に差があり、都市計画基礎調査のみでは市町村全域を対象とした被害推定ができない場合がある点は留意する必要がある。しかし、都市計画区域内に限定すれば、本論で示す結果は、いずれの市町村でも共通すると考えられる。

2.2 各市の建物分布について

豊橋市では、行政区域全体の建物データを収集しており、計 233,078 棟のデータが含まれている。木造建物は 124,979 棟で約 54%、非木造建物は 108,099 棟で約 46%を占める。

図 2.1～図 2.3 の建物ごとに含まれている情報の項目（以降、属性と呼ぶ）のうち、本研究で参照する属性を表 2.1 に示す。本論では、建物用途が「住宅」もしくは「共同住宅」、構造形式が「木造」の建物、すなわち木造専用住宅のみを被害推定の対象とする。2章及び3章では、これ以降、木造建物は用途関係なくすべての木造建物を指すものとし、木造専用住宅は用途が居住のみの木造建物を指すものとして区別する。豊橋市の都市計画基礎調査データにおいて、木造専用住宅は総数 110,358 棟で、豊橋市内の建物全体の約 47%、木造建物全体の約 88%に当たる。また、木造専用住宅のうち、戸建て住宅が 107,911 棟、共同住宅が 2,447 棟であり、戸建て住宅の割合は木造専用住宅全体の 97.8%とほとんどを占めている。さらに、木造専用住宅のうち、3階以上の住宅は 883 棟と非常に少ない。

表 2.1 建物の属性情報

| 属性 | 内容 |
|-------|--------------|
| ID | ユニーク ID |
| 建物コード | 使用用途（住宅など） |
| 構造コード | 構造形式（木造、非木造） |
| 階数 | 建物の階数 |
| 建築面積 | 建物の建築面積 |
| 延床面積 | 建物の延床面積 |
| 年次 | 建てられた年月日 |

なお、本研究で使用するデータは、2017（平成 29）年 3 月までのデータであり、集計以降に新しく建てられた建物や、取り壊された建物の情報を反映できていない点は留意する必要がある。また、すべての建物の建築年が与えられているわけではなく、本研究で対象としている豊橋市の木造専用住宅であれば、木造専用住宅総数の約 11.7%は建築年が不明な建物となっている点も注意が必要である。

蒲郡市では、都市計画区域の建物データを収集しており、計 51,976 棟のデータが含まれている。このうち、木造専用住宅は 26,603 棟であり、蒲郡市の都市計画基礎調査の建物データの約 51%を

2章 都市計画基礎調査データについて

占めている。

また、田原市でも、都市計画区域の建物データを収集しており、計 18,331 棟のデータが含まれている。このうち、木造専用住宅は 7,811 棟であり、田原市の都市計画基礎調査の建物データの約 43% を占めている。

2.3 豊橋市の統計データと都市計画基礎調査データの棟数差

表 2.2 に基礎調査データの建物棟数と 2017（平成 29）年の豊橋市の統計データ¹²⁾の建物棟数、統計データに対する基礎調査データの棟数差を示す。この結果から、基礎調査データの建物棟数は統計データの建物棟数に比べ、木造建物では 16,622 棟(+15.3%)、非木造建物では 55,207 棟(+104%) 多いことがわかる。これは、基礎調査データには建物だけでなく、その付帯物（駐車場屋根、倉庫など）が含まれているためと考えられる。この傾向は、他の市でも同様に表れると考えられる。したがって多少誤差はあるが、木造建物については基礎調査データそのものを使った推定により、概ね正しい被害推定が可能と考えられる。なお、本論の対象範囲ではないが、非木造建物数は統計データと比較して 2 倍以上の差があるため、基礎調査データをそのまま被害評価に用いると、結果が過大評価になる可能性がある。

表 2.2 棟数の比較

| | 木造建物棟数 | 非木造建物棟数 |
|----------|------------------|-----------------|
| 都市計画基礎調査 | 124,979 | 108,099 |
| 豊橋市統計書 | 108,357 | 52,892 |
| 棟数差 | +16,622 (+15.3%) | +55,207 (+104%) |