

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

(概要版)

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

1章	はじめに	3
1.1	研究背景.....	3
1.2	研究目的.....	4
2章	都市計画基礎調査データについて	5
2.1	本研究で使用するデータについて.....	5
3章	被害率関数を用いた被害推定の精度向上の検討	6
3.1	建築年代別建物割合の算定.....	6
3.1.1	ケース1：住宅・土地統計調査を用いる場合.....	6
3.1.2	ケース2：都市計画基礎調査を用いる場合.....	6
3.1.3	建物割合の差.....	7
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.....	8
3.2.1	想定する地震動強さ分布.....	8
3.2.2	被害率関数による被害率推定手順.....	9
3.2.3	全壊率の推定結果及び比較.....	10
3.3	3章のまとめ.....	12
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	13
4.1	IDA 曲線の算定方法.....	13
4.2	木造住宅の解析モデル.....	13
4.3	入力地震波.....	15
4.4	IDA 曲線の算定.....	16
4.5	損傷確率曲線の算定.....	17
4.5.1	1/30rad（安全限界）時の損傷確率曲線.....	18
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.....	19
4.6.1	1/30rad 時の損傷確率分布.....	19
4.6.2	1/120rad 時の損傷確率分布.....	20
4.7	4章のまとめ.....	21
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	22
5.1	システムの概要.....	22
5.1.1	STEP1 地震判定, 各観測点の最大地動速度取得.....	22
5.1.2	STEP2 最大地動速度分布の空間補間.....	23
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.....	24
5.1.4	STEP5 メールを送信.....	26
5.2	建物被害分布推定の手法による比較.....	27
5.3	5章のまとめ.....	28
6章	結論	29

目次

6.1	本研究のまとめ.....	29
6.2	今後の課題.....	29
	謝辞	30

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、防災対策推進の基本的な方針を示している。また、発災時の具体的な応急活動に関する活動計画で、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。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。

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⁹⁾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。

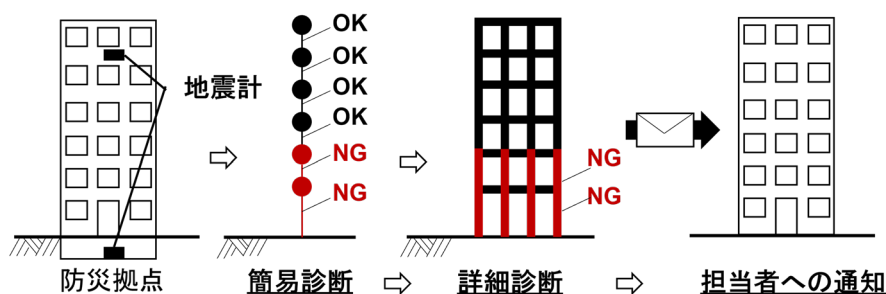


図 1.1 RT 耐震診断システムの概要

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 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。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、詳細な調査項目やデータを参照できる可能性がある。

1.2 研究目的

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
- 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

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。

2章 都市計画基礎調査データについて

2.1 本研究で使用するデータについて

本研究では、愛知県豊橋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。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。

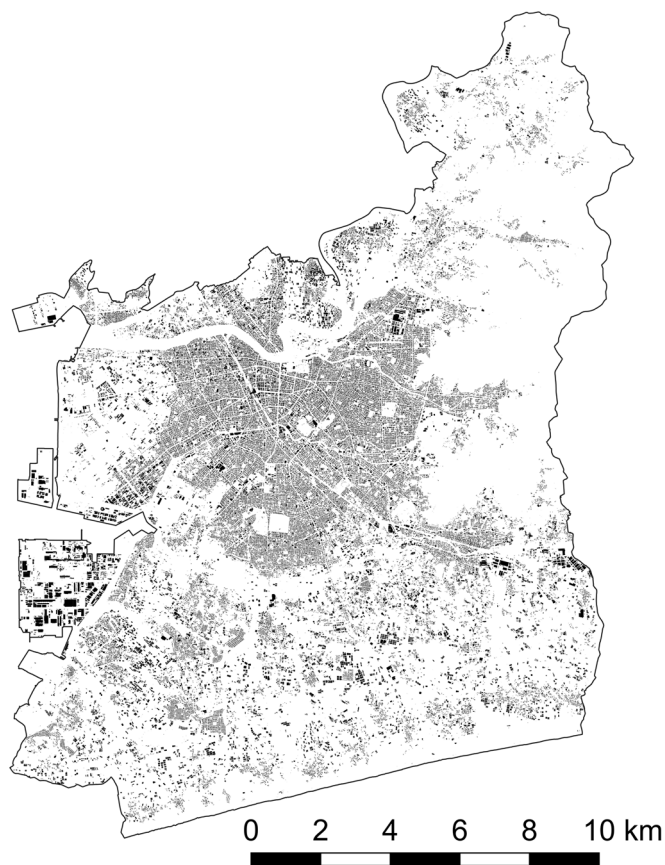


図 2.1 豊橋市の建物分布

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

3.1.1 ケース1：住宅・土地統計調査を用いる場合

各市の建築年代別平均建物割合を推定するためのデータとして、都市計画基礎調査の調査年代に最も近い2018（平成30）年の住宅・土地統計調査データを使用した。以下に、各市の建築年代別の平均戸建て木造住宅割合を算出する手順を示す。

- ① 住宅・土地統計調査「第10-1表 住宅の所有の関係（2区分）、構造（5区分）、建築の時期（7区分）、建て方（4区分）、階数（4区分）別住宅数—全国、都道府県、市区」から、各市の建築年代別の戸建て木造住宅戸数を抽出する。
- ② 総住宅戸数で建築年代別木造住宅戸数をそれぞれ除した値を、各市の建築年代別木造戸建て住宅の平均建物割合とする。

また、共同住宅の建築年代別平均建物割合は、住宅・土地統計調査上で「長屋建て」と「共同住宅」に分類される建物を合わせて対象とする。以下に算定手順を示す。

- ① 「長屋建て」と「共同住宅」では1住戸あたりの棟数が異なるため、住宅・土地統計調査「第39-3表 建物の建て方（4区分）、構造（2区分）、階数（4区分）別むね数—全国、都道府県、市区町村」の用途別木造住宅棟数と前述の「第10-1表」の建築年代別木造住宅戸数から、建築年代別木造住宅棟数をそれぞれの分類で求める。
- ② 「長屋建て」と「共同住宅」の建築年代別木造住宅棟数を年代別で合計する。
- ③ 総共同住宅棟数で各建築年代の共同住宅棟数をそれぞれ除した値を、各市の建築年代別木造共同住宅の平均建物割合とする。

なお、この時の総住宅戸数・棟数は、建築年代が不明な住宅戸数・棟数を除いた数である。

3.1.2 ケース2：都市計画基礎調査を用いる場合

都市計画基礎調査データから、都市に存在する実建物の分布状況を個別に反映した地域メッシュごとの建築年代別建物割合を求めた。地域メッシュごとの総建物棟数はそのメッシュ内に重心がある建物の棟数としている。地域メッシュ内の各建築年代の建物棟数をそのメッシュの総建物棟数で除した値を、そのメッシュの建築年代別建物割合としている。なおこの時、建築年が不明な建物については、1970年以前の建物に加えて計算している。図3.1に基礎調査データから算定した豊橋市の建築年代別建物割合分布を示す。メッシュの色が暖色に寄るほどその建築年代の建物が占める割合が大きいことを示している。また、凡例中の数字は該当するメッシュ数を示しており、無色のメッシュは建物が存在しない地域メッシュである。図3.1(c)を見ると、1981年以降の建物の割合が大きい地域メッシュが多数あることがわかる。一方、図3.1(a)を見ると、1970年以前の建物の割合が半数を占めるメッシュも多数存在することが確認できる。

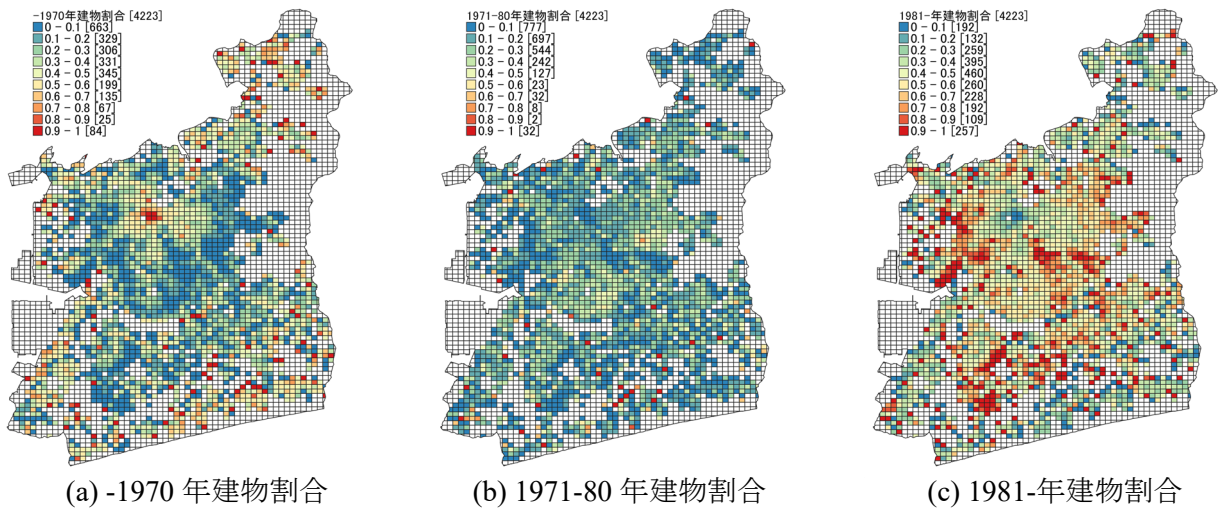


図 3.1 豊橋市の建物割合（都市計画基礎調査）

3.1.3 建物割合の差

3.1.2 項で求めた基礎調査データに基づく各市の建築年代別建物割合（以降、ケース 2 の建物割合と呼ぶ）から、3.1.1 項で求めた住宅・土地統計調査データから算定した各市の戸建て住宅の建築年代別平均建物割合（以降、ケース 1 の建物割合と呼ぶ）を引いた、建物割合差を求める。図 3.2 に豊橋市の、総建物棟数が 50 棟より多い地域メッシュの各建築年代の建物割合差の分布を示す。図 3.2 (a)を見ると、ケース 2 の方が建物割合が大きく、都市計画基礎調査では市の平均よりも古い建物が集中しているメッシュが広く分布していることがわかる。反対に図 3.2 (c)を見ると、ケース 1 の方が建物割合が大きく、都市計画基礎調査では市の平均よりも新しい建物が少ない箇所が多数点在していることがわかる。

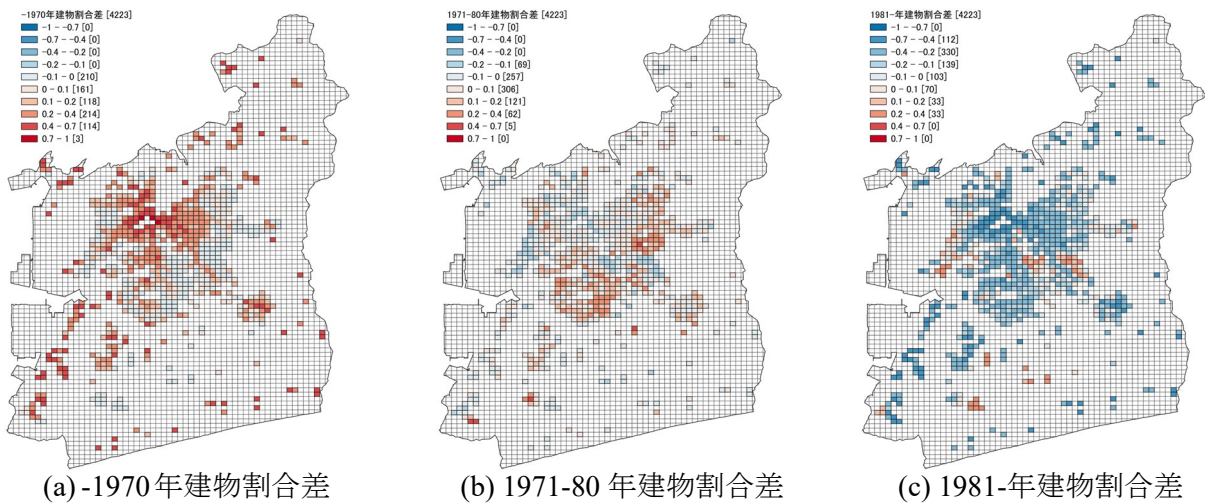


図 3.2 豊橋市の平均建物割合（ケース 1）に対する実在建物割合（ケース 2）差の分布

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

3.2.1 想定する地震動強さ分布

前節で算定した建築年代別建物割合をそれぞれ適用し、南海トラフの想定地震動分布による各市の被害推定を行い、その結果を比較する。想定する地震動強さ分布は、J-SHIS で公開されている2020年地震動活動モデルー平均ケースーの南海トラフ地震沿いで発生する大地震の最大クラス (Mw. 9.1) の計測震度分布を用いた。次項以降で示す被害率関数や損傷確率曲線は、最大地動速度 (以降、PGV) を入力とするため、式(1)によって計測震度分布を PGV 分布に変換した。

$$\log_{10} PGV = 6.11033 - \sqrt{\frac{9.95459 - I}{0.213}} \quad (\text{cm/s}) \quad (I = \text{計測震度}) \quad (1)$$

図 3.3 に豊橋市の変換した PGV 分布を示す。豊橋市では PGV が 100cm/s を超えるメッシュが北西部から西部にかけて多数見られ、最大で 121.8cm/s の地動速度が想定されるメッシュが存在している。また、山間部の北東側では PGV が小さくなっていることがわかる。

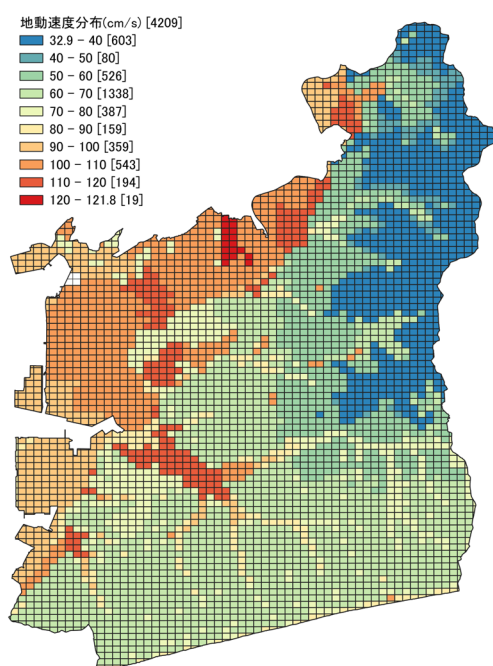


図 3.3 豊橋市の想定地動速度分布

3.2.2 被害率関数による被害率推定手順

被害推定には、被害率関数のうち、木造の、1951-1970年、1971-1981年、1982-1994年の全壊率、一部損壊以上率を用いた。図3.4に被害関数の曲線を示す。なお、建物データと被害率関数の間で年代区分に差があるため、本研究では、1970年以前の建物には1951-1970年の被害関数、1971-1980年の建物には1971-1981年の被害関数、1981年以降の建物には1982-1994年に被害関数を適用している。

ケース1の建物割合を適用した場合の被害推定は、以下の手順で行う。

- ① 地域メッシュごとの総木造住宅棟数に算定した建築年代別木造住宅割合を掛けることで、地域メッシュごとの建築年代別木造住宅棟数を算定する。
- ② 地域メッシュごとの入力PGVから年代別の被害率を求め、その被害率に各年代の建物棟数を掛け、各年代の被害棟数を算出する。
- ③ すべての年代の被害棟数を足して地域メッシュごとの被害棟数とする。

また、メッシュごとに被害棟数を建物総数で除することで地域メッシュごとの全年代建物での被害率を求めた。なお、この時の建物総数は、基礎調査データの建物棟数を参照している。

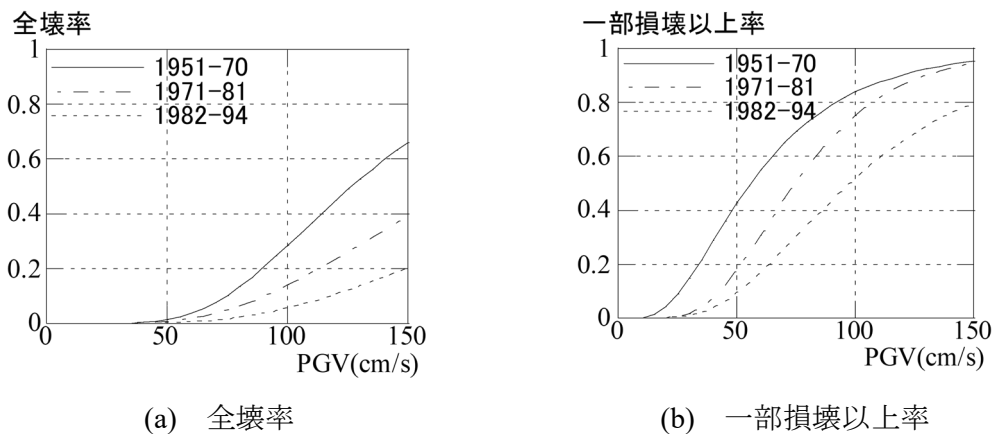


図 3.4 被害率関数

ケース2の建物割合を適用した場合の被害推定は、地域メッシュごとの建築年代別建物棟数を建物ごとの建築年から求め、それ以降はケース1の場合と同様に計算し、地域メッシュごとの被害棟数・被害率を求めた。

さらに、ケース2の建物割合を適用した場合の被害率からケース1の建物割合を適用した場合の被害率を引いた、各地域メッシュの被害率差を求めた。

3章 被害率関数を用いた被害推定の精度向上の検討

3.2.3 全壊率の推定結果及び比較

図 3.5(a)に、豊橋市のケース 1 (住宅土地統計調査) の建物データによる全壊率推定結果、(b)にケース 2 (都市計画基礎調査データ) の建物データによる全壊率推定結果を示す。暖色によるほど、全壊率が高いことを意味する。また、(c)に建物棟数が 50 棟より大きい地域メッシュの全壊率差の分布を示す。暖色によるほど全壊率差が正側に大きく、寒色によるほど全壊率差が負側に大きいことを意味する。それぞれ図の左上に凡例 (カラースケール) を示す。図 3.5(a)と(b)を見ると、どちらのケースも全壊率 0-0.2 の箇所が市内全域に広く分布している。図 3.5(c)を見ると、被害率差が 0 より大きい地域メッシュが多いことから、ケース 2 の建物割合を用いた被害推定の方が被害が大きい傾向があることがわかる。またその差は、北西部の比較的 PGV が大きい箇所で大きい傾向があり、メッシュ内の建物棟数が 50 棟を超えるメッシュの場合では最大で+21.7%の差があった。

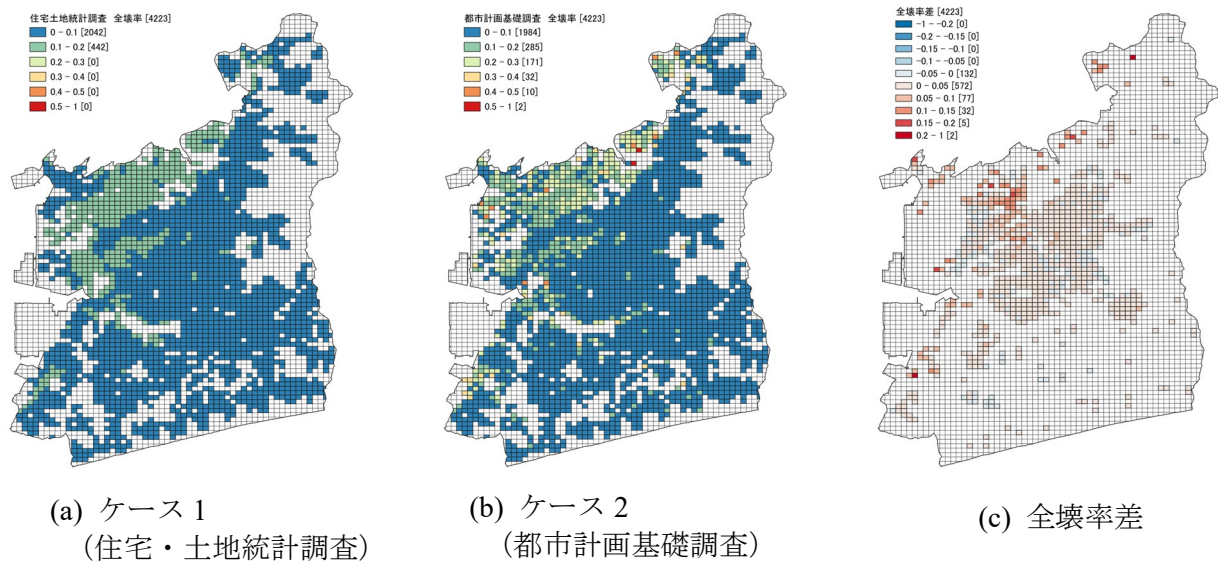


図 3.5 想定地動速度分布に対する豊橋市の全壊率分布と全壊率差分布

図 3.6 に、豊橋市の建築年代別建物割合差と全壊率差の関係をプロットしたグラフを示す。横軸が各建築年代の建物割合差、縦軸が全壊の被害率差を示しており、図中の点は豊橋市内の 250 m 地域メッシュのうち、建物総数が 50 棟を超える地域メッシュの建物割合差と被害率差の関係をプロットしている。また、地域メッシュの PGV に応じて、赤色が 30~50 cm/s、青色が 50~70 cm/s、緑色が 70~90 cm/s、黄色が 90~ cm/s で示しており、図中の直線は区分した PGV ごとに最小二乗法から求めた近似直線である。表 3.1 に近似直線の相関係数をそれぞれ示す。

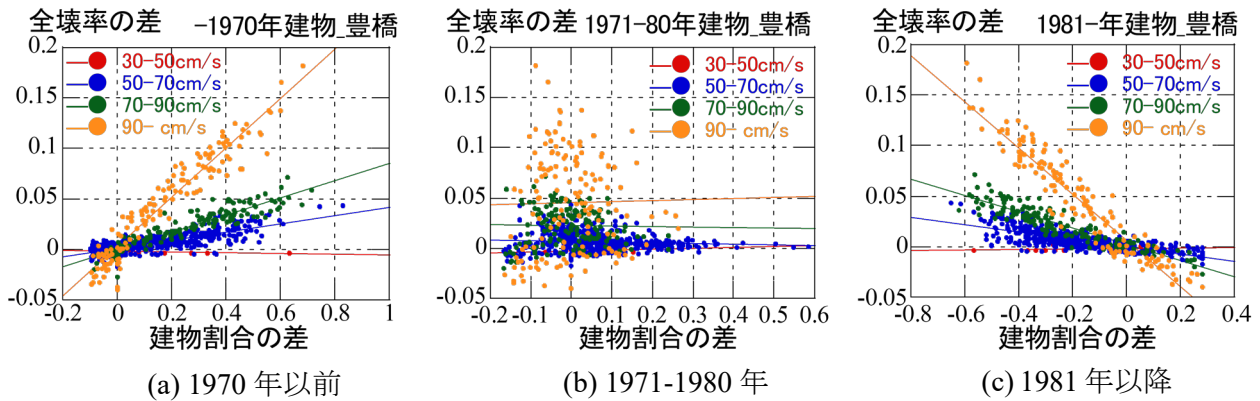


図 3.6 豊橋市の建物割合差と全壊率差の関係

表 3.1 図 3.14 中の近似直線の相関係数

PGV(cm/s)	1970 年以前	1971~80 年	1981 年以降
30~50	-0.434	0.412	0.269
50~70	0.789	-0.092	-0.747
70~90	0.924	-0.019	-0.913
90~	0.960	0.019	-0.951

図 3.6 (a)を見ると、プロットが右肩上がりになっていることから、地域メッシュ内の 1970 年以前の実在建物割合が豊橋市全体の平均建物割合よりも大きい（建物割合差が 0 より大きい）場合、実建物の分布状況を個別に反映したケース 2 の被害推定の方が被害が大きい傾向にあり、かつ建物割合差が大きいほどその被害率差が大きくなる傾向が見られる。反対に、図 3.6 (c)を見てみると、プロットが右肩下がりになっていることから、1981 年（建物データは 1981 年以降のものであるが、被害率関数は 1982 年以降のものを適用している）以降の実在建物割合が豊橋市全体の平均建物割合よりも大きい場合、実建物の分布状況を個別に反映したケース 2 の被害推定の方が被害が小さい傾向にあり、かつ建物割合差が大きいほどその被害率差が大きくなる傾向にある。また、図 3.6 (a), (c)ともに、PGV が大きいほど近似直線の傾きは大きくなっており、建物割合の差による全壊率の差への影響が大きくなっていることが確認できる。表 3.1 の相関係数をみると、1970 年以前の建物と 1982 年以降の建物では、PGV が 50cm/s 以降の範囲で相関係数は 0.7 以上となっており、建物割合差と全壊率差には相関があると考えられる。一方、図 3.6 (b)を見ると、1971~80 年の建物については、図 3.6 (a), (c)に比べてプロットがばらついている。また、表 3.1 を見るとこの年代での相関係数は低く、2つのパラメータの相関は見られなかった。

3.3 3章のまとめ

本章では、住宅・土地統計調査データから求めた豊橋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。以下に得られた結果を示す。

- 都市計画基礎調査を用いて実建物の分布状況を個別に反映したケース2の全壊率・一部損壊以上率の推定結果は、住宅・土地統計調査を用いた全地域メッシュで年代別の木造住宅割合が同じと仮定したケース1の推定結果に比べて、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小さいことを示した。
- 全壊率では、PGVが大きいほど、建物割合差による全壊率の差への影響が大きい傾向が見られた。一方、一部損壊以上率では、建物割合差による一部損壊以上率の差への影響の大きさは、PGVに寄らず、変わらなかった。

これらの結果から、都市計画基礎調査を使うことで、住宅・土地統計調査のような統計データから求めた市の平均年代別建物割合を適用する場合と比較して、精度の高い被害推定を行うことができると考えられる。