

東三河地域防災協議会 委託研究

南海トラフ地震による東三河地域の
リアルタイム被害想定システムの構築

(最終報告書)

2025年 2月

豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系
助教 仲田章太郎

目次

1章 はじめに

1.1. 研究背景.....	1
1.2. 本論の目的.....	1

2章 都市計画基礎調査に基づいた建物のモデル化

2.1. 都市計画基礎調査を用いた建物の解析モデル.....	2
2.2. 建物のパラメータと復元力特性.....	3

3章 被害推定モデルの漸増動的解析による建物の応答評価..... 5

4章 クリギング法による最大地動速度分布

4.1. 実地震動に基づいた PGV 分布の推定と被害推定.....	6
4.1.1. 入力地震動について.....	6
4.1.2. クリギング法による未観測地点の PGV 推定.....	7
4.1.3. 倍率を加えた PGV 分布の検討.....	8
4.2. 建物の被害棟数分布.....	9

5章 南海トラフ相当地震を想定した被災者数と物資量

5.1. 南海トラフ相当地震を想定した被災者数の検討.....	10
5.1.1. 検討対象とする校区及び避難所の収容人数.....	10
5.1.2. 被災者の推定手法.....	13
5.2. 被災時の被災者数推移及び被災時物資量の検討.....	14
5.3. 被災者のあふれを回避するための建物被害.....	16

6章 被災者のあふれに関する防災対策

6.1. 建物の耐震性能に着目したあふれ回避変形角.....	18
6.2. あふれ回避変形角の評価.....	23

7章 J-RISQ に基づいた建物被害分布

7.1. 被害関数による建物被害推定.....	25
7.2. J-RISQ に基づいた建物被害関数.....	25
7.3. 被害関数における建物被害分布.....	30

8章 避難行動の最適化

8.1. 避難行動の最適化について	37
8.1.1. ボロノイ図について	38
8.1.2. ボロノイ図における被災者数の検討	38
8.2. ボロノイ図に基づいた被災者のあふれに関する防災対策	42

9章 まとめ	45
--------------	----

付録

付録1 建物モデルの設定	46
付録2.地盤条件の設定	46
付録3.地盤条件を考慮した IDA 曲線の算定	47
付録4.入力する PGV 分布	65
付録5.建物の被害分布	66

謝辞

参考文献

1 はじめに

1.1. 研究背景

2016 年熊本地震の死者数は 270 名であり、そのうち約 80% の 215 名は災害関連死である¹⁾。災害関連死は、災害に伴う間接的な要因により死亡した事例であり、車中避難によるエコノミークラス症候群が例として挙げられる²⁾。災害関連死の一因として、被災者数が避難所の収容人数を上回ること（以下、被災者のあふれ）が原因である³⁾。災害関連死を避けるためには、災害“後”に、被災者数を即時に推定するとともに、避難所へ行く建物被害の目安を示す必要がある。また、災害“前”に、被災者があふれやすい地域を特定し、その地域に適した防災対策を提案することも重要である。

災害時における被災者数の推定に関する研究として、防災科学研究所の J-RISQ⁴⁾などが挙げられる。J-RISQ では、全国に設置されている強震観測網で得られた地震動から約 250m 四方の地域メッシュ単位で地震動強さ分布を推定している。さらに、それらの地域メッシュに fragility カーブを適用させることで、建物および人的被害状況の分布を災害後即時に推定する手法を構築している。また、被災者のあふれに関する研究として、森らは、避難リスク（避難所からあふれ出る人数とその可能性）の観点から、建物の耐震性能と被災者のあふれの関係について整理し、学校建物と木造住宅の耐震化戦略について検討している⁵⁾。さらに、大佛らは、災害時における建物被害だけでなく、火災、断水、停電被害も対象とした物的被害により発生する避難行動をモデル化し、避難所における混雑状況を推定している⁶⁾。他にも災害時における被災者数を推定する研究は活発に行われているが、いずれの研究も過去に起きた地震被害に基づいて確率・統計により評価している。

1.2. 研究目的

これらの研究に対し、都市計画基礎調査に基づいて作成された多質点系せん断ばねモデルによる、建物の被害分布を災害“後”即時に推定する手法 (Timely Damage Mapping System, 以下、TM システム) について検討した⁷⁾。TM システムの説明として、評価フローを図 1.1 に示す。TM システムは動的漸増解析により建物の被害を評価する。つまりは建物の被害を物理量に基づいた評価を行う点が特徴である。これにより、建物の被害を、確率・統計に基づいて評価する従来の研究と比較して、地震の位相特性や周期特性の違いによる影響を小さくすることができる。

本報告書では、まず、第二章で都市計画基礎調査に基づいた建物のモデル化と応答評価、第三章で最大地動速度分布と建物の被害分布の算出方法を説明する。次いで、第四章では、愛知県豊橋市を対象として、南海トラフ相当地震を想定した避難所の混雑状況を災害“後”即時に推定する手法を構築する。また、五章ではその結果から物資量、避難所へ行く建物被害の目安についても検討する。さらに、第六章では、災害“前”に被災者があふれやすい地

域を評価し、その防災対策を提案する。七章以降では被害関数の適応例による TM システムの比較や避難所の混雑度を緩和するための最適化についての提案を行う。

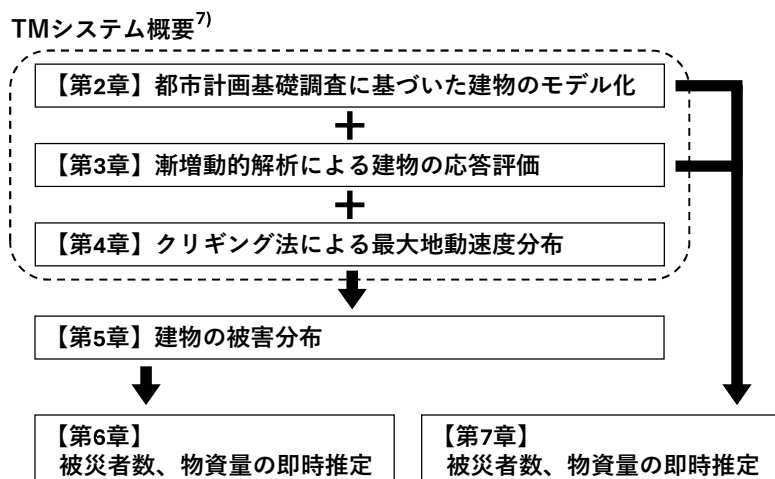


図 1 TM システムの評価概要及び本報告書の研究構成

2. 都市計画基礎調査に基づいた建物のモデル化

2.1. 都市計画基礎調査を用いた建物の解析モデル

まず、本論で使用する都市計画基礎調査の概要について図 2 示す。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」と国土交通省により定義され、個々の建物に建物利用現況に関する情報が記されている。本報告書では、都市計画基礎調査内の「構造形式」、「年代」、「階数」、「建築面積」、「延べ床面積」、「居住人数」の値を用いて、建物被害を推定する。また、都市計画基礎調査は、5 年ごとに更新される。つまり、TM システムの都市計画基礎調査を更新すれば、被害推定に関する最新結果が得られるため、TM システムは防災対策に有用であると言える。

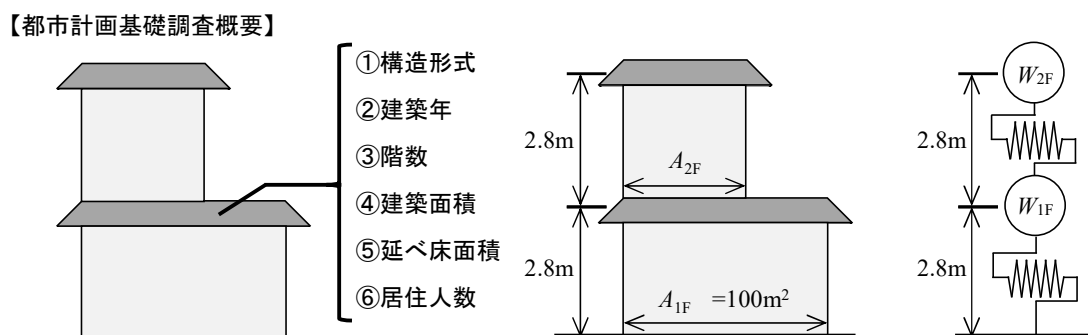


図 2 都市計画基礎調査の概要

図 3 建物のパラメータと解析モデルの概要

2.2. 建物のパラメータと復元力特性

次に、建物のパラメータと復元力特性の概要について図 3 に示す。まず、建物のパラメータについて説明する。解析対象の建物は 2 階以下の木造住宅を対象とし、非木造住宅は今後の課題とする。建物のパラメータは、3 種類の建築年代と 6 種類の建物形状を組み合わせた、全 18 種類から構成される。具体的に、建築年代は、当時の耐震設計基準に基づいて、1981 年以前、1981 年から 1999 年の期間、2000 年以降の 3 つに大別する⁸⁾。以後、これらを「1959 年基準」、「1981 年基準」、「2000 年基準」と呼ぶ。一方、建物形状は、建築面積に対する 2 階の床面積の比率（以下、形状係数）が 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 となるように設定した。ここで、2 階の床面積は、都市計画基礎調査の延床面積から建築面積を引いた値とする。また、建物高さ h は、文献 9) と同様に、2.8m と仮定した。次いで、解析モデルを説明する。解析モデルは、多質点系せん断ばねモデル（図 1）である。各階の重量 W_{1F} , W_{2F} は、次式で表す⁹⁾。

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

ここで、 w_r , w_o , w_i , w_f , w_l は、屋根、外壁、内壁、床、積載荷重の単位面積あたりの重量¹⁰⁾であり、表 1 にまとめる。また、 A_{1F} は 100m², A_{2F} は A_{1F} に形状係数 α を乗じた値である。

表 1 床面積 1m²あたりの重量¹⁰⁾[kN/m²]

耐震基準	屋根 w_r	外壁 w_o	内壁 w_i	床 w_f	積載 w_l
1959年基準	2.40	1.20	0.45	0.60	0.60
1981年基準	1.30	1.20	0.20		
2000年基準	0.95	0.75	0.20		

解析モデルの復元力特性について説明する。本解析における復元力特性はバイリニア要素とスリップ要素の並列ばねである。図の縦軸は層せん断力 Q であり、横軸は 1 階の水平変位 $1F$ を 1 階の高さ h で除した層間変形角 r である。過去の木造住宅の被害では 2 階よりも 1 階の被害が大きかったため、本報告書では 1 階の層間変形角を検討対象とする。ここで、降伏耐力 P_y は次式で表す。

$$P_y = C_i \times W_i \times \beta \quad \cdots (2)$$

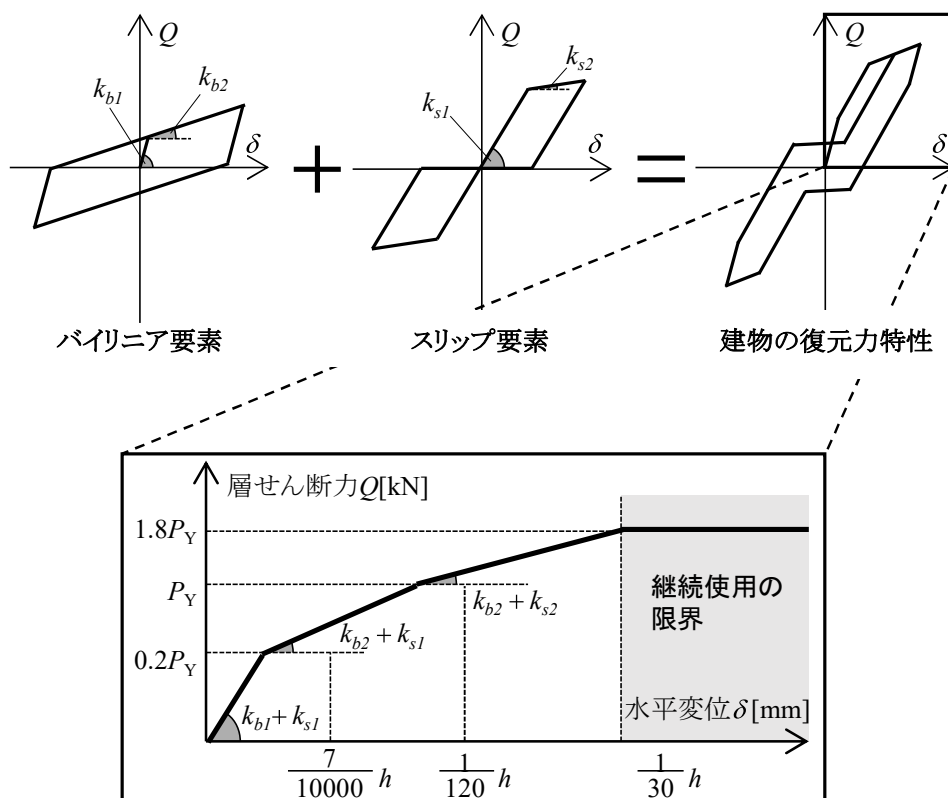


図 4 復元力特性の概要

上式における層せん断力係数 C_i は、建物年代、階数および屋根の重さで異なる値であり、本報告書では安全側に評価するために文献 8) 中の“重い屋根”を対象とした。ここで、実被害を再現するために下記条件より再現係数 β を設定する。

- ①木造住宅の実験結果¹¹⁾
- ②広域被害推定⁹⁾に関する知見
- ③木造住宅の実態調査¹²⁾

層せん断力係数 C_i と再現係数を表 2 にまとめる。

表 2 層せん断力係数と再現係数^{9),11),12)}

耐震基準		層せん断力係数 C_i		再現係数 β
		平屋	二階建て	
1959年基準	1F	0.155	0.115	3.00
	2F	—	0.155	3.72
1981年基準	1F	0.267		3.00
	2F	0.373		3.72
2000年基準	1F	0.337		3.00
	2F	0.471		3.72

建物の復元力特性は、建物の降伏耐力 P_y を用いて、次式で表現される¹³⁾。

[第一折れ点]

$$\begin{aligned} K_1 &= 285.8 P_y / h \\ P_1 &= 0.2 P_y \quad \cdot \cdot \cdot \quad (3) \\ d_1 &= 7 / 10000 h \end{aligned}$$

[第二折れ点]

$$\begin{aligned} K_2 &= 104.8 P_y / h \\ P_2 &= P_y \quad \cdot \cdot \cdot \quad (4) \\ d_2 &= 1 / 120 h \end{aligned}$$

[第三折れ点]

$$\begin{aligned} K_3 &= 32 P_y / h \\ P_3 &= 1.8 P_y \quad \cdot \cdot \cdot \quad (5) \\ d_3 &= 1 / 30 h \end{aligned}$$

本報告書では、建物の安全限界を 3.3% と定義し¹³⁾、それ以降の剛性低下は考慮しない。

3. 被害推定モデルの漸増動的解析による建物の応答評価

ここでは、漸増動的解析による建物の応答評価について説明する。漸増動的解析¹⁴⁾は、同一建物モデルに対して入力波の加速度倍率を漸増させた非線形時刻歴応答解析を行い、地震動強さと建物の応答の関係（以下、IDA 曲線）を得る手法である。本報告書では、地震動強さに地動最大速度（以下、PGV）、建物の応答に値として最大となる層間変形角 $|\pm r_{\max}|$ （以下、最大層間変形角 R ）を採用した。また、本解析では、全 345 種類の地震動を対象に Newmark 法の平均加速度法を用いて非線形時刻歴応答解析を行い、IDA 曲線を作成した。さらに、345 種類の IDA 曲線群より算出された 50 パーセンタイル値（以下、50 パーセンタイル曲線）を用いて、全 18 種類のパラメータに対して応答評価を行った。本解析で得られた IDA 曲線を、建物年代と建物形状に着目して図 5 に示す。

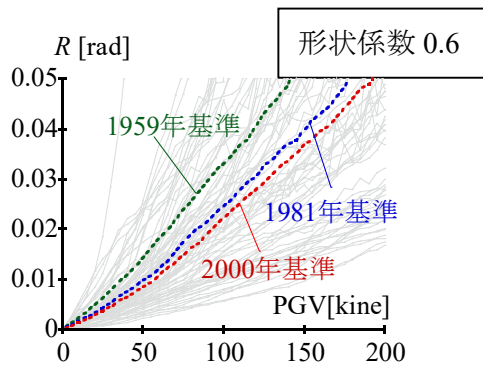


図 5(a) 年代ごとの IDA 曲線

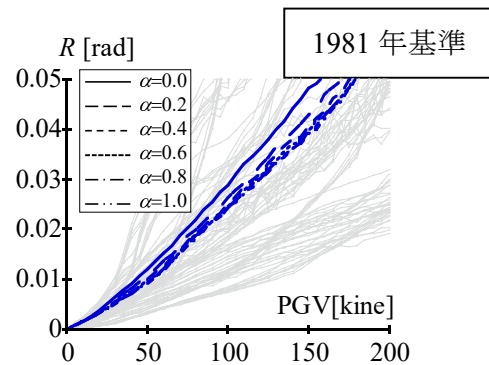


図 5(b) 形状ごとの IDA 曲線

図の縦軸は最大層間変形角 R , 横軸は PGV である。図中の灰色の線は IDA 曲線群であり、色付きの線は 50 パーセンタイル曲線である。図中、線の色により建物年代、線の種類により建物形状を区別している。また、図 5(a) は形状係数が 0.6, 図 5(b) は 1981 年基準を例として示している。

いずれの IDA 曲線も建物年代と建物形状に関わらず、PGV の増加に伴い、最大層間変形角 R は概ね単調に増加している。また、建物年代に着目した IDA 曲線（図 5(a)）を見ると、1981 年基準と 2000 年基準の IDA 曲線の傾きは同程度である。これに対し、1959 年基準の IDA 曲線の傾きは比較して大きいことがわかる。たとえば、PGV が 100kine の最大層間変形角を見ると、旧耐震基準である 1959 基準の最大層間変形角は 3.2% となり、新耐震基準である 1981 基準と 2000 年基準の最大層間変形角と比較して、1.5 倍程度になった。一方、建物形状に着目した IDA 曲線（図 5(a)）を見ると、建物形状が建物の応答に及ぼす影響は、建物年代と比較して小さい。

4. クリギング法による最大地動速度分布

4.1. 実地震動に基づいた PGV 分布の推定と被害推定

ここでは、図 6 中の灰色の塗り潰しで示した豊橋市を対象として、最大地動速度の分布（以下、PGV 分布）と建物の被害分布について検討する。

4.1.1. 入力地震動について

本解析では、235m x 285m の面積を 1 グリッド単位として解析を行った。検討対象となる地震動は、2020 年 9 月 27 日静岡県西部が震源となる M5.1 の地震（最大震度 4）¹⁵⁾ である。また、当該地震動の観測点は豊橋市役所、豊橋中消防署、AIC015(K-NET)、AICH09(KiK-net)、AICH22(KiK-net) であり、その PGV はそれぞれ 2.1, 2.7, 3.1, 1.2, 4.7kine だった。

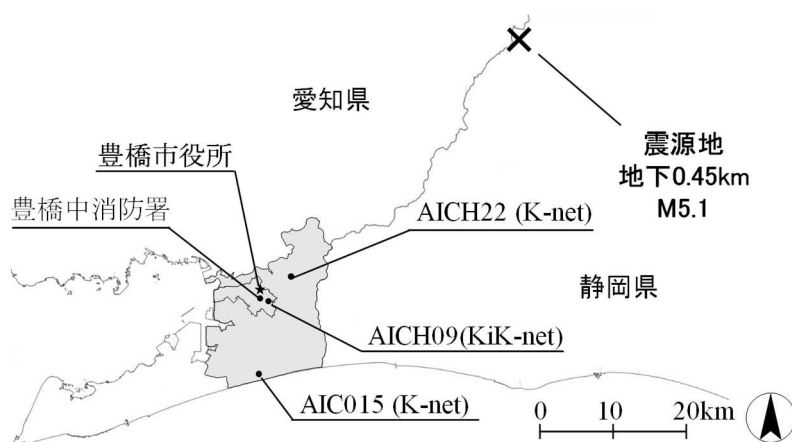


図 6 検討対象となる地震動とその観測点（地理院地図(電子国土 web)に追記して記載）

4.1.2. クリギング法による未観測地点の PGV 推定

次いで、PGV 分布の推定方法を図 7 に示す。まず、地盤の影響を考慮するために、観測した PGV（図 7 中、赤色のマーカー）を、グリッドごとの地盤増幅度で除す（図 7 中、①の矢印）。本研究で用いた地盤増幅度は防災科学技術研究所の地震ハザードステーション¹⁶⁾（以下、J-SHIS）より引用し、その分布を図 8 に示す。

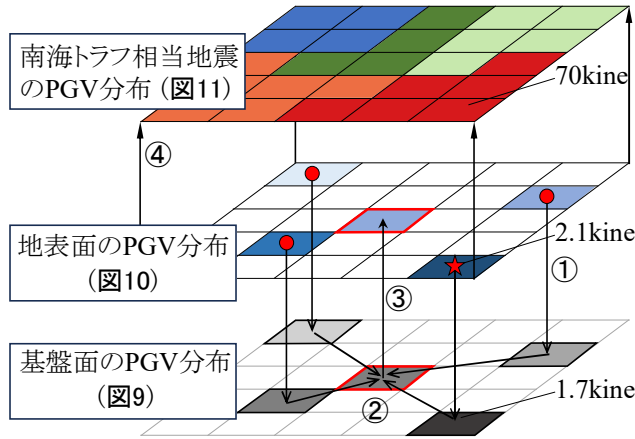


図 7 PGV 分布の推定方法

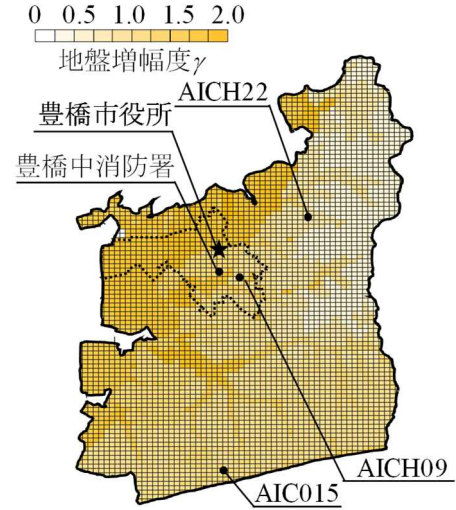


図 8 地盤増幅度分布¹⁶⁾

次に、基盤面における未観測点の PGV を得る（図 7 中、②の矢印）。本報告書では、未観測点の PGV をクリギング法¹⁷⁾により算出した。クリギング法は、既知数の分布から未観測点の値を推定する空間補間法である。具体的には、基盤面における未観測点の $PGV(i)$ は、推定領域における n 個の観測点の $PGV(k)$ に、クリギング係数 k で重みづけした線形和として、次式で表現される。

$$PGV(i) = \sum_{k=1}^n \omega_k \cdot PGV(k) \quad \dots \quad (6)$$

クリギング係数 k は、各観測点の距離 $h_{j,k}$ および観測点と推定点間距離 $h_{0,k}$ に対する理論バリオグラム $\gamma(h)$ とラグランジュの未定乗数 μ を係数とする $n+1$ 元連立一次方程式として、次式で表す。

$$\begin{pmatrix} \gamma(h_{1,1}) & L & \gamma(h_{n,1}) & 1 \\ M & O & M & M \\ \gamma(h_{1,n}) & L & \gamma(h_{n,n}) & 1 \\ 1 & L & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(h_{0,1}) \\ M \\ \gamma(h_{0,n}) \\ 1 \end{pmatrix} \quad \dots \quad (7)$$

また、本報告書では、理論バリオグラムにガウスモデルを採用し、次式で定義する。

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

a , b , c は、理論バリオグラムのパラメータであり、観測結果から各観測点間の距離と非類似度の関係を整理した経験バリオグラムから求まる。この動作を解析領域内の全グリッドに適用し、図 9 に示す基盤面の PGV 分布を得る。その後、基盤面の PGV 分布に、各グリッドの地盤増幅度を乗じて、図 10 に示す地表面の PGV 分布を得る（図 7 中、③の矢印）。

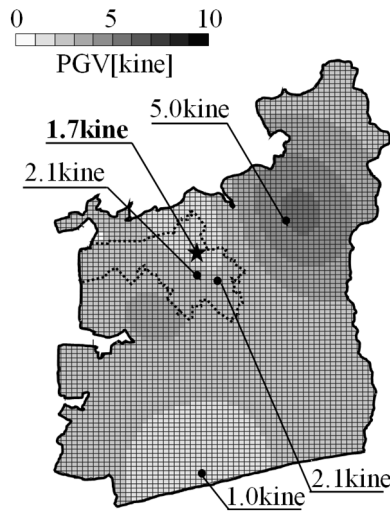


図 9 基盤面の PGV 分布

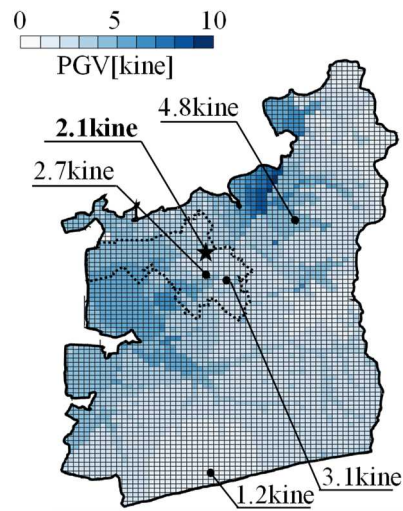


図 10 地表面の PGV 分布

まず、基盤面の PGV 分布（図 9）に着目する。基盤面の PGV 分布は、観測点を中心に放射状を描くような PGV 分布となる。また、豊橋市北部の観測点における PGV 分布が比較的大きい結果となり、震源地に近い観測点ほど PGV 分布が正確に表現されていることがわかる。次に地表面の PGV 分布（図 10）に着目する。地表面の PGV 分布は、基盤面の PGV 分布と比較して地盤増幅度の分布と類似しており、地盤増幅度の分布に依存することがわかる。また、観測点ごとの PGV は最大で 4.8kine となっており、比較的小さい。

4.1.3. 倍率を加えた PGV 分布の検討

ここで、南海トラフ地震で想定される PGV 分布（以下、J-SHIS の PGV 分布）を図 11 に示す。図は、J-SHIS より得た南海トラフ地震で想定される計測震度分布¹⁶⁾を次式¹⁸⁾により、PGV 分布として変換した結果である。

$$\log_{10} \text{PGV} = 6.11033 - \sqrt{\frac{9.95459 - I}{0.213}} \quad \dots \quad (9)$$

I : 計測震度

J-SHIS の PGV 分布を見ると、豊橋市役所の PGV は、約 70kine だった。これに対し、本解析により得られた地表面の PGV 分布（図 10）を見ると、豊橋市役所の PGV は、2.1kine となり、比較的小さかった。したがって、豊橋市役所の PGV を基準として、本解析により得られた地表面の PGV 分布に対して $70/2.1$ の倍率を乗じることにより、図 12 に示す南海トラフ相当地震の PGV 分布を得る（図 7 中、④の矢印）。以後、これを 70kine 地震と呼ぶ。これに加え、次章では、地表面の PGV 分布に $100/2.1$ 、 $35/2.1$ の倍率を乗じた地震（以下、100kine 地震、35kine 地震）の PGV 分布も算出し、PGV の大きさが被災者に及ぼす影響についても検討する。

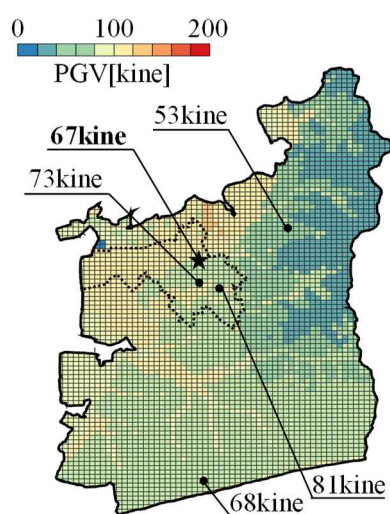


図 11 J-SHIS の PGV 分布

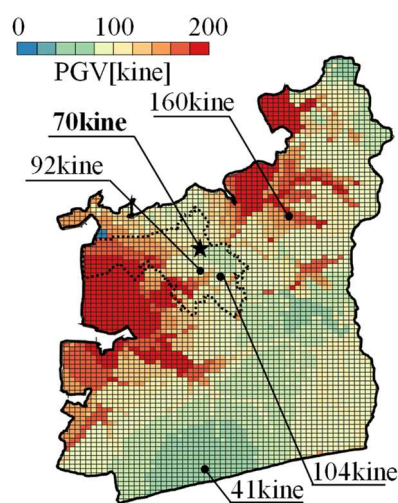


図 12 南海トラフ相当地震の PGV 分布

4.2. 建物の被害棟数分布

まず、建物の被害分布について説明する。本研究における被害分布は、建物の床から床までの相対的な変形量である層間変形角に着目して被害分布の推定を行う。

南海トラフ相当地震における建物の被害分布を図 13 に示す。ここで、図 13 における被害分布は、最大層間変形角が 3.3% を閾値とし、各グリッドの PGV を用いて、IDA 曲線（PGV と最大層間変形角の関係）により算出した。図中、コンター図の濃淡が濃くなるほど、最大層間変形角が 3.3% を超える建物が多いことを表している。なお、図中の破線は、後述する対象校区を示している。

対象校区に着目する。70kine 地震の PGV 分布 (図 12) を見ると、地盤増幅度の影響により、対象校区の中部は、西部と比較して PGV が小さい。一方、南海トラフ相当地震における被害分布 (図 13) を見ると、層間変形角が 3.3%を超える建物は、対象校区の中部で多いことがわかる。この要因として、対象校区の西部では建物が少ないのに対し、中部では建物が密集しているためである。

以上より、二章から四章までの一連の手法を掛け合わせることで被害分布の導出が可能となる。

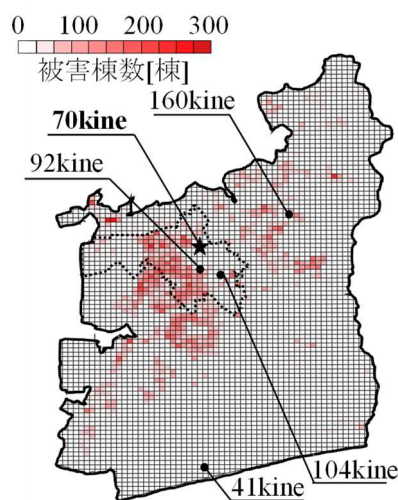


図 13 南海トラフ相当地震の被害分布

5. 南海トラフ相当地震を想定した被災者数と物資量

5.1. 南海トラフ相当地震を想定した被災者数の検討

本章では、南海トラフ相当地震である 70kine 地震の PGV 分布 (図 12) を用いて、被災者数を推定する。図 14 に検討対象とする校区を示す。対象校区は、吉田方、松葉、下地、花田、羽根井、松山、新川、八町、旭、向山、つつじが丘および福岡校区の 12 校区とする。

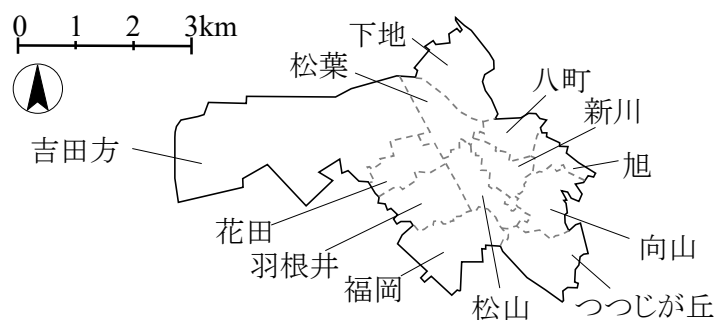


図 14 検討対象の校区

5.1.1. 検討対象とする校区及び避難所の収容人数

次に使用する避難所として愛知県では以下に示す避難所が定義され、運用されている¹⁹⁾。

① 第一指定避難所

災害被害より居住できなくなったとき、又は被害のおそれのある場合に避難する施設 (主に市民館が対象)

- ② 第二指定避難所
第一指定避難所が収容能力を超えた場合などに使用する施設（主に小学校、中学校、高校、大学が対象）
- ③ 福祉避難所
指定避難所での避難生活が困難な被災者がいる場合に使用する施設（主に福祉センターが対象）
- ④ 津波防災センター
津波防災センターは、津波が発生した場合に使用する施設（三郷地区、天津地区、梅薮地区に立地）
- ⑤ 帰宅困難者等支援施設
帰宅困難者等支援施設は、大地震の発生直後や東海地震の警戒宣言が発令されたときに、公共交通機関の運行停止によって駅周辺に滞留した人の帰宅を支援するための施設（こども未来館、穂の国とよはし芸術劇場が対象）
- ⑥ 津波避難ビル
高台までの避難に相当の時間を要する平野部において、津波の襲来の覚知が遅れた人や、迅速に避難できない要援護者が、一時的に津波から避難する施設として指定し、被害の軽減を図るための施設（一部小学校、民間施設、公共施設が対象）
- ⑦ その他
- ・広域避難場所：大火災時における大規模な避難に適する場所
 - ・拠点避難場所：地域の防災活動の拠点となる場所
 - ・一時避難場所：1000m²以上の公園であり、指定避難所へ避難する前に自主的に避難して様子を見る場所

なお本報告書では収容人数に第一指定避難所（公民館）と第二指定避難所（小学校、中学校）の合計値を用いる。以下の表 3(a)に検討対象とする第一指定避難所の建物情報、表 3(b)に第二指定避難所の建物情報を示す。

表 3(a) 検討対象とする第一指定避難所の建物情報 ¹⁹⁾

検討対象の第一指定避難所					
吉田方	松葉	下地	花田	羽根井	松山
吉田方校区市民館	松葉校区市民館	下地校区市民館	花田校区市民館	羽根井地区市民館	松山校区市民館
新川	八町	旭	向山	つつじが丘	福岡
新川校区市民館	八町校区市民館	旭校区市民館	向山校区市民館	つつじが丘校区市民館	福岡校区市民館

表 3(b) 検討対象とする第二指定避難所の建物情報¹⁹⁾

検討対象の第二指定避難所					
吉田方	松葉	下地	花田	羽根井	松山
吉田方小学校	松葉小学校	下地小学校	花田小学校	羽根井小学校	松山小学校
吉田方中学校		北部中学校	羽田中学校		前田南地区体育館
新川	八町	旭	向山	つつじが丘	福岡
新川小学校	八町小学校	旭小学校	向山小学校	つつじが丘小学校	福岡小学校
中部中学校	豊城中学校	藤ノ花女子高等学校	豊橋東高等学校		豊橋中央高等学校
	豊橋市公会堂		豊橋商業高等学校		

ここで、校区の人口と検討対象の避難所の収容人数を表 4 に示す。本報告書では、解析対象が木造住宅のみであることから、木造住宅 P_w (表 4) の値のみを用い、避難所の収容人数は合計 C (表 4) 被災者の検討を行う。

表 4 対象となる校区の人口と収容人数¹⁹⁾

校区	人口 [人]		避難所の収容人数 [人]		
	非木造住宅 $P_{S, RC}$	木造住宅 P_w	第一指定 避難所	第二指定 避難所	合計 C
吉田方校区	7485	10038	93	3165	3258
松葉校区	3466	3193	94	1081	1175
下地校区	2403	3824	105	2014	2119
花田校区	3148	3719	99	2929	3028
羽根井校区	5173	3971	70	1070	1140
松山校区	4978	1642	85	1434	1519
新川校区	3474	1847	85	2290	2375
八町校区	1659	1822	79	2451	2530
旭校区	1486	2647	88	2760	2848
向山校区	3061	4150	114	2894	3008
つつじが丘校区	4883	4765	79	1355	1434
福岡校区	7036	6460	105	3261	3366

5.1.2. 被災者の推定手法

まず、吉田方校区における 1 グリッド内の個々の建物に着目した被害状況を図 15(a)に示す。図の横軸は建物を年代順に表示した建物の識別番号、縦軸はその識別番号に応じた建物の最大層間変形角である。図中、水平の一点鎖線は、避難所に行く建物被害の目安として避難時変形角 R_a と定義し、ここでは 3.3%を避難の閾値とする。

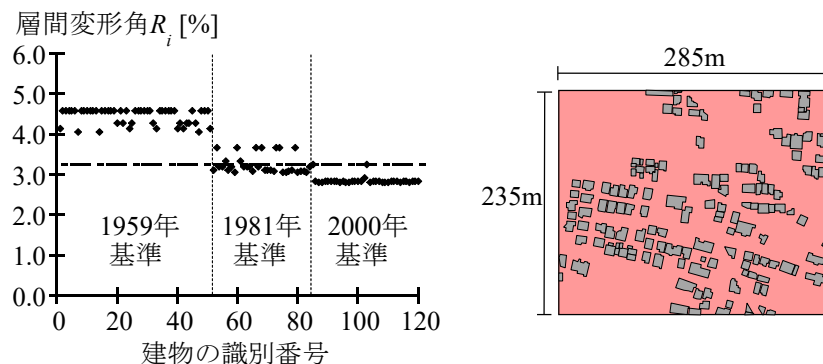


図 15(a) グリッド内の建物被害

図 15(a)より、約半分の建物は、最大層間変形角が 3.3%以上となった。特に、1959 年基準の建物を見ると、全ての建物は層間変形角が 3.3%を超えている。一方、2000 年基準の建物を見ると、ほとんどの建物は層間変形角が 3.3%以下となっていることがわかる。よって、南海トラフ相当地震では、避難時変形角 R_a を 3.3%とした場合、一部の 1981 年基準の木造住宅及び 1959 年基準の木造住宅が避難の対象となることがわかる。

次いで、吉田方校区のグリッドに着目した被災者数を図 15(b)に示す。図の横軸は建物の緯度、経度情報を用いて西から東の順番に表示したグリッドの識別番号、縦軸はその識別番号に応じたグリッド内の被災者数である。グリッド内の被災者数は、層間変形角が 3.3%以上となった建物（図 15(a) 中、一点鎖線より上）の居住者のすべてのグリッドにおける合計値である。また、凡例として吉田方校区の被害分布も併せて示す。

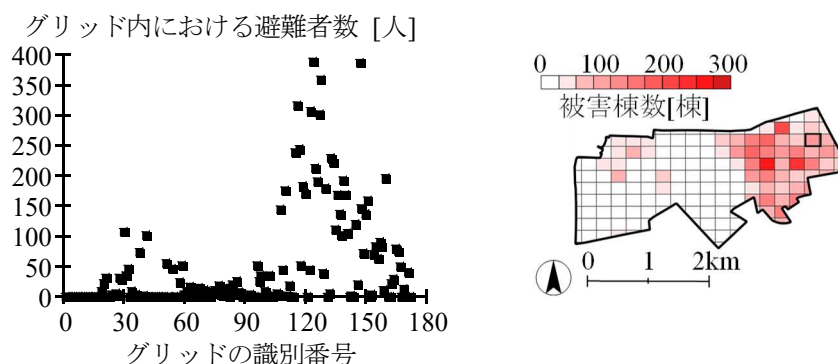


図 15(b) 吉田方校区の被災者(避難時変形角 $R_a \geq 3.3\%$ を避難の閾値)

図 15(b)より、吉田方校区では、全 171 グリッド中 13 グリッドで 200 人以上の被災者が推定される。特に、吉田方校区の東部を見ると、建物の被害棟数に応じて、被災者数は増加する。また、吉田方校区の被災者数 N は、グリッド内の被災者数の合計値であり、8,145 人だった。よって、前章での被害分布結果と比例して豊橋市の中部と同位置となる吉田方校区の東部で被災者が多くみられることがわかる。

最後に、対象校区ごとの避難所からあふれた被災者数を図 15(c)にまとめる。図の横軸は、校区の種類である。一方、縦軸は、各校区の被災者数 N から避難所の収容人数 $C^{19)}$ を引いた値、つまり、 $N-C$ が正となれば、一定閾値での被災者が校区ごとに設定されている収容人数を上回っていると言えるため、避難所から被災者があふれることを表現している。

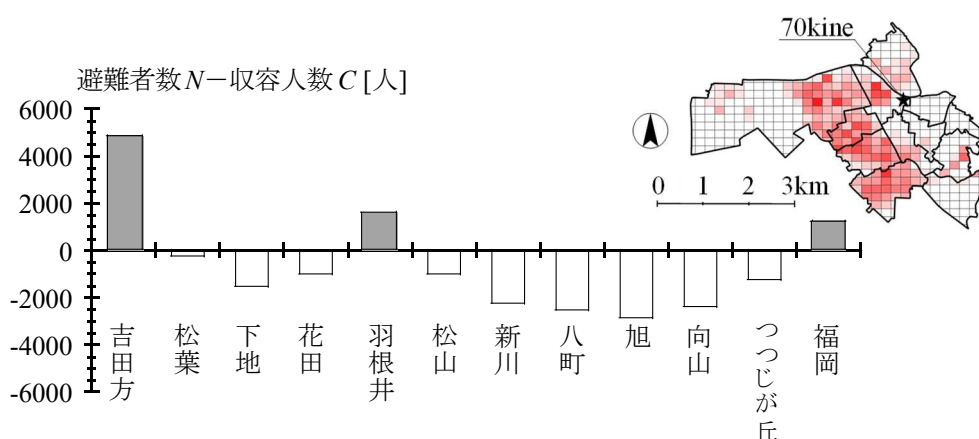


図 15(c) 対象校区ごとの混雑状況(避難時変形角 $R_s \geq 3.3\%$ を避難の閾値)

図 15(c)より、吉田方、羽根井、福岡校区を見ると、棒グラフの色が灰色となり、 $N-C$ が正となる。よって、避難所から被災者があふれることが予想される。また、その $N-C$ の値として、吉田方校区で 4,887 人、吉田方校区で 1,584 人、福岡校区で 1,233 人であり、その合計は 7,704 人だった。一方、吉田方、羽根井、福岡校区以外の 9 校区を見ると、 $N-C$ が負となり、避難所はあふれず、余裕のある状況と言える。また、その 9 校区における $N-C$ の合計は、14,892 人だった。したがって、吉田方、羽根井、福岡校区の被災者を他の校区の避難所に分散するための計画を講じれば、被災者のあふれを回避できる。

5.2. 被災時の被災者数推移及び被災時物資量の検討

ここでは、被災時の被災者数推移及び被災時物資量について検討する。発災からの経過日数 T と被災者数 N は、次式²⁰⁾で表す。

$$N(T) = \alpha_1 e^{\beta_1 T} + \alpha_2 e^{\beta_2 T} \quad \cdots (10)$$

ここで、 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 は、発災からの経過日数に応じた被災者数の減少程度を表すパラメータである。本来、豊橋市における減少程度のパラメータを使用し、地域特性に応じた減少程度を検討すべきである。しかしながら、検討対象の地域では、過去に被害がみられるほ

どの地震が発生していない。そのため、実際に減少程度を示すパラメータを算出することができない。そこで、2016年熊本地震の被害より算出したパラメータ²⁰⁾を採用し、 $\alpha_1=131702$, $\alpha_2=17106$, $\beta_1=0.223$, $\beta_2=0.024$ として、想定される最大被災者数を用いた比より、校区ごとの被災者数推移を算出した。吉田方校区を例として、発災から7日間の被災者数の推移を図16に示す。なお、グラフ上記に示すグラデーションの図は、一例としている吉田方校区のPGV分布である。図中、実線は100kine地震、一点鎖線は70kine地震、破線は35kine地震である。また、水平の点線は、吉田方校区における避難所の収容人数を示している。言い換えると水平の点線は収容人数の限界線であり、点線以上は被災者があふれている状況を表している。一方で、被災者が収容人数下回る場合、全ての混雑回避の状況を表してい

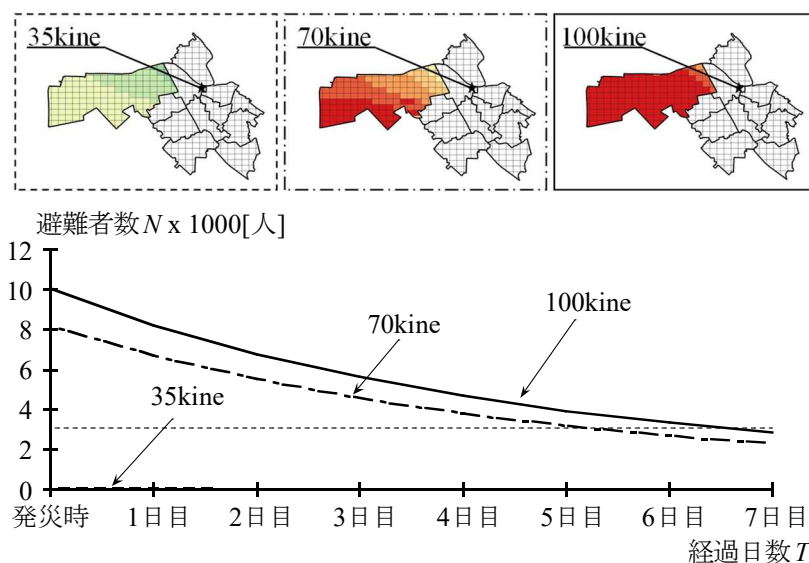


図 16 発災から7日間の被災者数の推移(吉田方校区)

35kine地震を見ると、発災時の被災者数は43人であった。そのため、発災時の時点から混雑回避の状況である。一方、70kine地震、100kine地震を見ると、発災7日後には3割程度まで被災者が減少し、被災者数が収容人数を下回り、混雑回避を見込むことができる。

次に、被災者数推移の結果より、発災時から7日間までに必要とする物資量の検討を行う。なお、本検討では物資量として水量に着目する。物資量は、発災7日間における被災者数の累積値と人が1日で必要とされている物資 w の積として、次式より算出する。

$$W = \sum_{i=1}^7 N(T) \cdot w \quad \cdots (11)$$

本報告書では、物資の対象を飲料水とし、 w を $1.5L^{21)}$ とした。対象校区ごとの物資量を図17にまとめる。図中、マーカーの種類により、100kine, 70kine, 35kine地震を区別している。

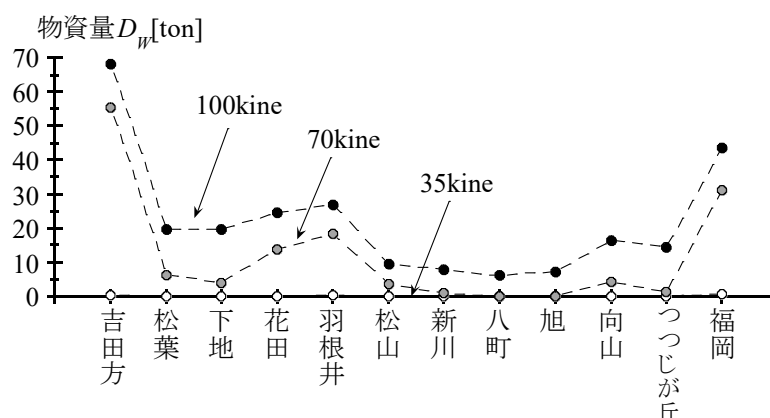


図 17 対象校区ごとの物資量

ここで、福岡校区を見ると、70kine 地震が発生した場合、7 日間で約 43ton の飲料水が必要となることがわかった。また、本手法を用いれば、飲料水以外の物資量を推定することができる。たとえば、災害時のトイレについて、ライフラインの有無、設置場所、処理方法を仮定すれば、(11)式を用いて必要な仮設トイレの数量を計算することができ、これについては今後の課題とする。

5.3. 被災者のあふれを回避するための建物被害

本節では、避難時変形角 R_a に着目した 0.1% 刻みの漸増解析を行い、被災者のあふれを回避するための建物被害を検討する。吉田方校区を対象とした避難時変形角 R_a の漸増解析結果を図 18 に示す。図の縦軸は収容人数に対する被災者数の比 N/C であり、横軸は避難時変形角 R_a である。図中、線種の表現は、図 16 と同様である。また、水平の点線は N/C が 1.0、つまりは被災者があふれる閾値である。

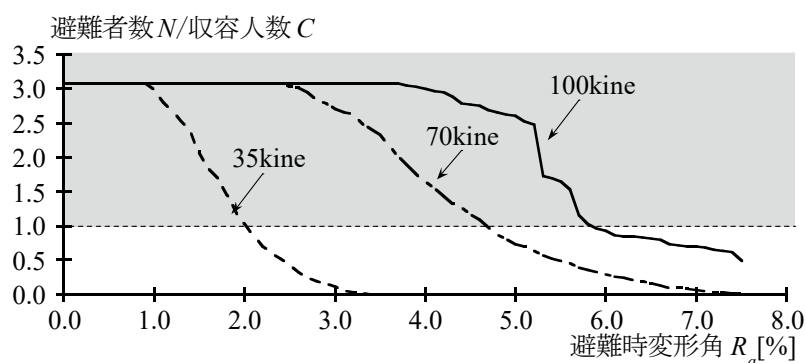


図 18 避難時変形角の漸増解析

ここで、35kine 地震に着目すると、避難時変形角 R_a が 1.0%まで横ばいとなり、これを境に減少する。また、避難時変形角 R_a が 2.0%以降で、 N/C は 1.0 以下となった。したがって、35kine 地震が発生した場合、建物の最大層間変形角が 2.0%以上となった居住者のみを避難所避難の対象とすることで、避難所の混雑を回避することができると言える。ここで、 N/C が 1.0 となる避難時変形角を、被災者のあふれを避けるために在宅避難が推奨される最大層間変形角の最小値と定義し、あふれ回避変形角 R_b と呼ぶ。

この手法を同様に行い、対象校区ごとのあふれ回避変形角 R_b の結果を図 19 にまとめる。

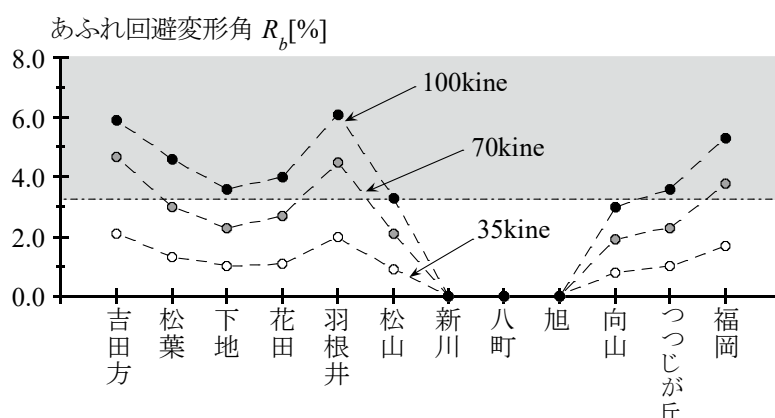


図 19 対象校区ごとの混雑回避変形角

ここで、図 19 より、新川、八町、旭校区を見ると、避難所の収容人数が木造住宅の居住者人数を上回っているため、あふれ回避変形角 R_b はゼロとなった。一方、羽根井校区のあふれ回避変形角 R_b は、12 校区で最大だった。これは、羽根井校区は、地震による被害を受けやすい建物が多いことや、避難所の収容人数が少ないことが原因であり、次章で考察する。

次いで、地震の大きさに着目する。地震の PGV が大きくなるほど、あふれ回避変形角 R_b は、概ね比例して増加している。たとえば、松山校区を見ると、35kine 地震で $R_b=0.9\%$ 、70kine 地震で $R_b=2.1\%$ 、100kine 地震で $R_b=3.3\%$ となった。また、70kine 地震に着目すると、吉田方、羽根井、福岡校区のあふれ回避変形角 R_b は、建物の安全限界 3.3%を上回った。言い換えれば、南海トラフ相当地震が起きた場合、吉田方、羽根井、福岡校区では、被災者のあふれが回避できないことが予想され、建物被害も多くみられる校区であるといえる。

以上より、本章で提案した手法を TM システムに導入すれば、被災者数、7 日間で必要な物資量、あふれ回避変形角を発災後即時に算出することができ、災害後の避難対応や、事前の解析により災害前の注意喚起を促すなど、多方面からの災害対策に活用できる。

なお、本章で得られた、35kine 地震、70kine 地震、100kine 地震ごとの被災者数、7 日間で必要な物資量、あふれ回避変形角を表 5 にまとめる。

表 5 対象校区の被災者数、物資量、混雑回避変形角

校区	避難者数 N [人]			物資量 D_w [ton]			混雑回避変形角 R_b [%]		
	35kine	70kine	100kine	35kine	70kine	100kine	35kine	70kine	100kine
吉田方校区	43	8145	10038	0.3	55.4	68.2	2.1	4.7	5.9
松葉校区	0	931	2933	0.0	6.3	19.9	1.3	3.0	4.6
下地校区	0	610	2917	0.0	4.2	19.8	1.0	2.3	3.6
花田校区	0	2046	3636	0.0	13.9	24.7	1.1	2.7	4.0
羽根井校区	37	2724	3968	0.3	18.5	27.0	2.0	4.5	6.1
松山校区	0	526	1422	0.0	3.6	9.7	0.9	2.1	3.3
新川校区	0	138	1160	0.0	0.9	7.9	0.0	0.0	0.0
八町校区	0	29	937	0.0	0.2	6.4	0.0	0.0	0.0
旭校区	0	0	1081	0.0	0.0	7.3	0.0	0.0	0.0
向山校区	0	638	2427	0.0	4.3	16.5	0.8	1.9	3.0
つつじが丘校区	0	226	2140	0.0	1.5	14.5	1.0	2.3	3.6
福岡校区	115	4599	6247	0.8	31.3	43.7	1.7	3.8	5.3

6. 被災者のあふれに関する防災対策

6.1. 建物の耐震性能に着目したあふれ回避変形角

前章までは、発災“後”を対象として、実地震を用いた TM システムによる、被災者数、7 日間で必要な物資量、あふれ回避変形角の即時推定について検討した。しかしながら、前章までで算出された被災者数は、PGV の大きさおよびその分布に依存する。したがって、本章では、発災“前”を対象として、被災者のあふれに関する防災対策を提案する。具体的には、対象地域の全グリッドに同一の PGV を分布させ、四章（4.章 クリギング法による最大地動速度分布）と同じ手法で被災者数を算出する。これにより、PGV の大きさと分布の影響を無視することができ、全ての建物に同一の PGV を与えることができる。それにより、建物の耐震性能に着目して、あふれ回避変形角を検討することができる。解析手法として PGV は 10kine 刻みで PGV を漸増させ解析を行う。まず、吉田方校区を例として、建物の耐震性能に着目した避難時変形角の漸増解析結果を図 20 に示す。図の表現は図 18 と同様であり、線の種類により PGV の大きさを区別している。

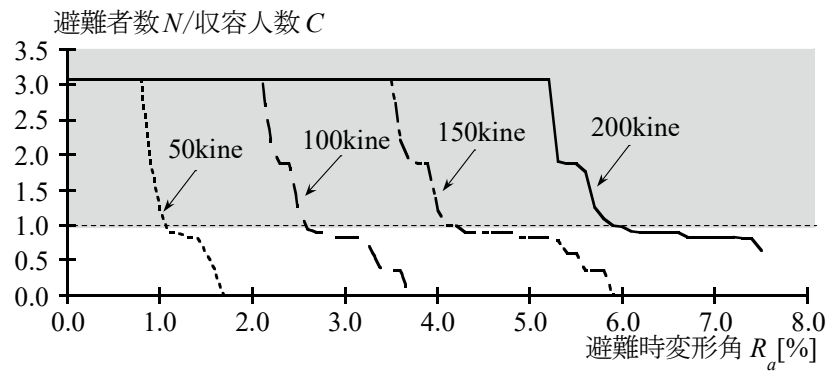


図 20 PGV 分布の影響を無視した避難時変形角の漸増解析

図 20 より、あふれ回避変形角は、PGV の大きさが 50kine で 1.0%，100kine で 2.5%，100kine で 4.0% になり，PGV が大きくなるほど，あふれ回避変形角は概ね比例して増加する。これを踏まえ，それぞれの PGV に応じたあふれ回避変形角を一点とし，10kine から 200kine までの点を計 20 点プロットする。まず，吉田方校区におけるあふれ回避変形角の漸増解析結果を図 21 にまとめる。図の横軸は，PGV であり，縦軸はあふれ回避変形角である。

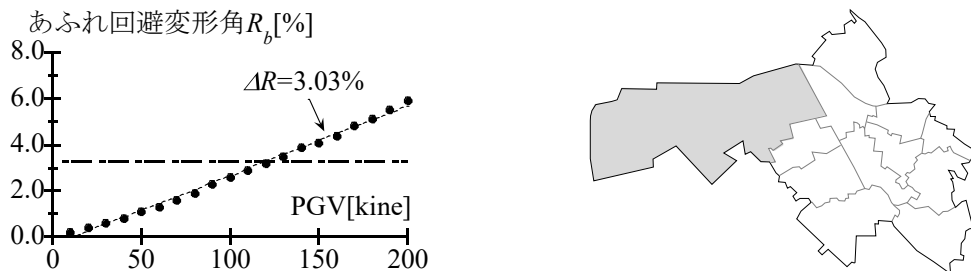


図 21 吉田方校区におけるあふれ回避変形角の漸増解析結果

図 21 より，吉田方校区における傾きは 3.30% であり，PGV が約 120kine 相当であふれ回避変形角が木造住宅の安全限界に達することがわかる。続いて図 22 に他の 11 校区における，あふれ回避変形角の漸増解析結果を示す。

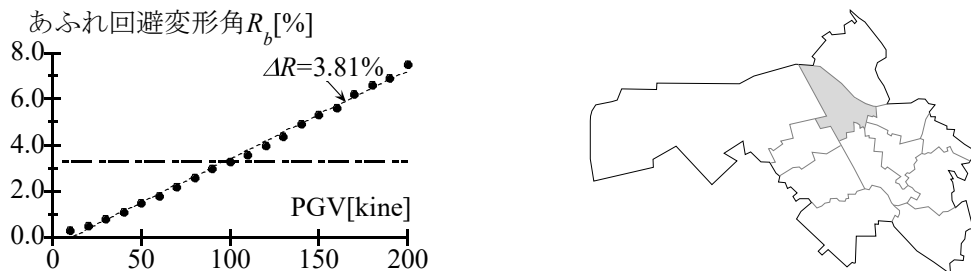


図 22(a) あふれ回避変形角の漸増解析結果(松葉校区)

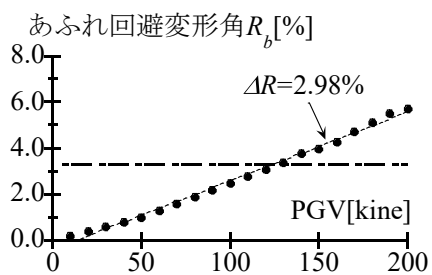


図 22(b) あふれ回避変形角の漸増解析結果(下地校区)

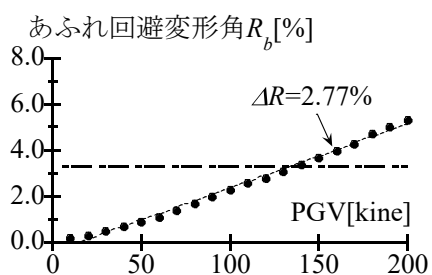
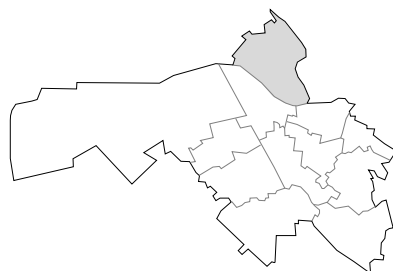


図 22(c) あふれ回避変形角の漸増解析結果(花田校区)

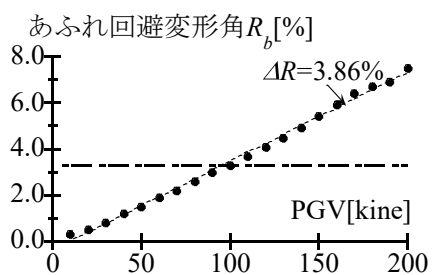
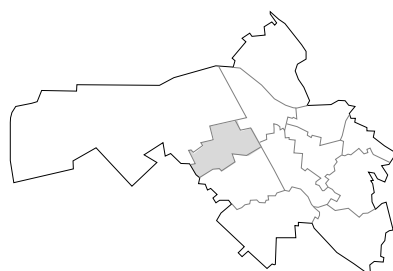


図 22(d) あふれ回避変形角の漸増解析結果(羽根井校区)

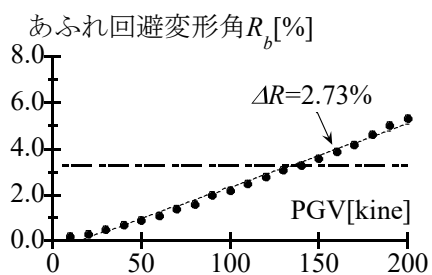
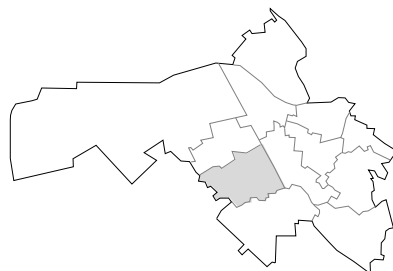
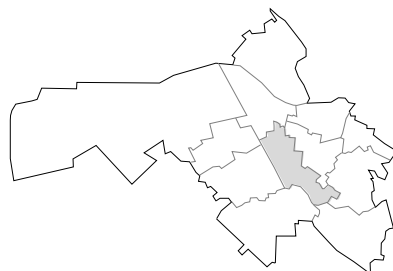


図 22(e) あふれ回避変形角の漸増解析結果(松山校区)



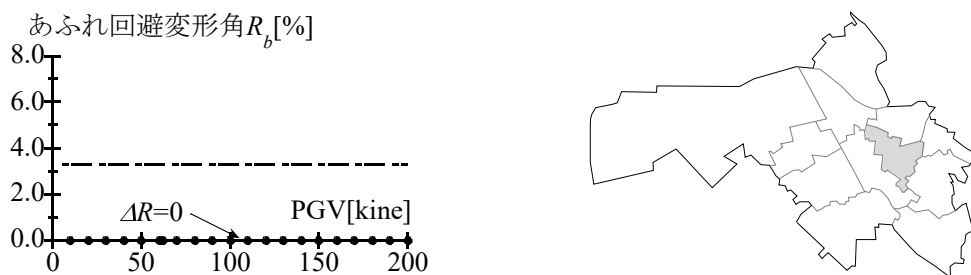


図 22(f) あふれ回避変形角の漸増解析結果(新川校区)

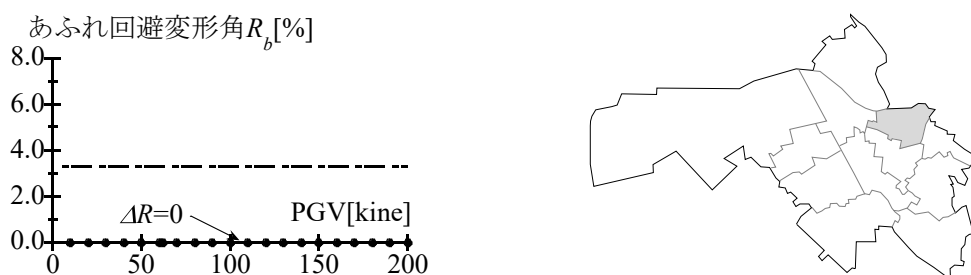


図 22(g) あふれ回避変形角の漸増解析結果(八町校区)

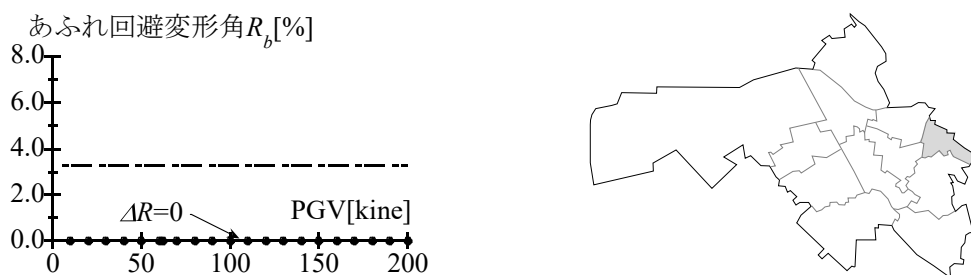


図 22(h) あふれ回避変形角の漸増解析結果(旭校区)

ここで、図 22(f,g,h)における新川、八町、旭校区以外の校区を見ると、PGV が大きくなるほど、あふれ回避変形角は、直線的に増加しており、傾きは 0 となる。この要因として、検討対象としている木造住宅の全居住人数に対し、避難所の収容人数が下回っており、あふれが発生しない状況を表している。

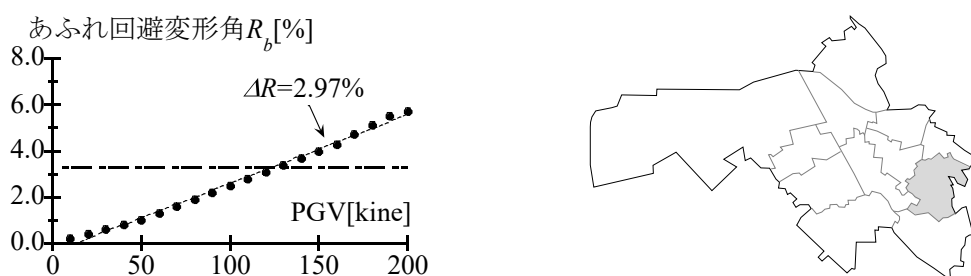


図 22(i) あふれ回避変形角の漸増解析結果(向山校区)

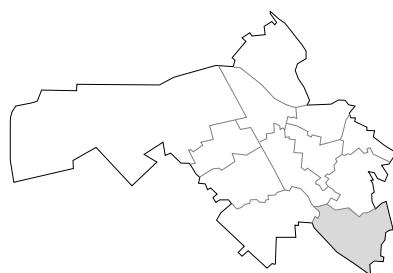
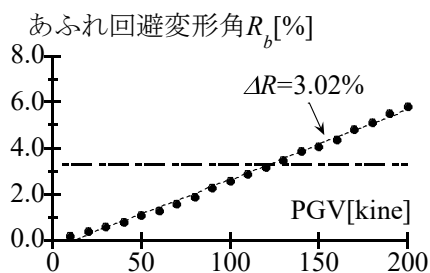


図 22(j) あふれ回避変形角の漸増解析結果(つつじが丘校区)

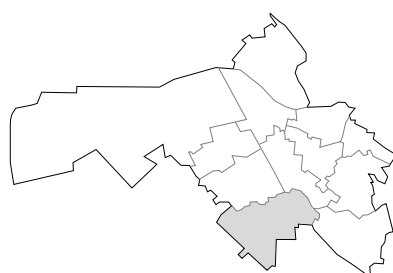
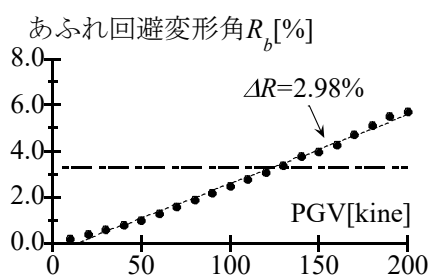


図 22(k) あふれ回避変形角の漸増解析結果(福岡校区)

一例として羽根井校区を見る。PGV の大きさが 50kine の地震が発生した場合、建物の最大層間変形角が 1.5%以上となった居住者のみを避難の対象とすることで、被災者のあふれを回避できる。一方で、PGV の大きさが 100kine 以上の地震が発生した場合、あふれ回避変形角は木造建物の安全限界 3.3%を超えるため、建物が居住不可能となり、被災者のあふれが回避できないことが予想される。

6.2. あふれ回避変形角の評価

ここでは、あふれ回避変形角により、被災者があふれやすい地域を評価する。あふれ回避変形角は、前節の解析結果に対し最小二乗法を用いて算出した ΔR (図 21,22, 破線) で評価を行う。つまり、 ΔR が大きいほど、PGV に対するあふれ回避変形角が大きくなり、被災者があふれやすい地域であることを意味する。ここで、 ΔR を校区の種類ごとに比較して、図 23 に示す。

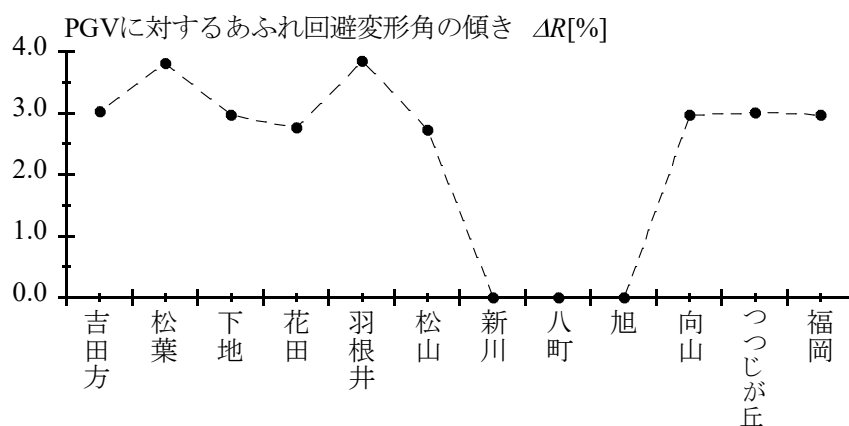


図 23 12 校区のあふれ回避変形角の評価

図 23 より、あふれ回避変形角の傾き ΔR は松葉校区と羽根井校区の 2 校区が大きくなりほかの校区では約 3%程度となった。また、新川、八町、旭校区に関しては前節と同様に、木造住宅の全居住人数に対し、避難所の収容人数が下回っているため傾きは 0%となる。次に、収容人数に対する木造住宅の居住者人数を図 24 に示す。

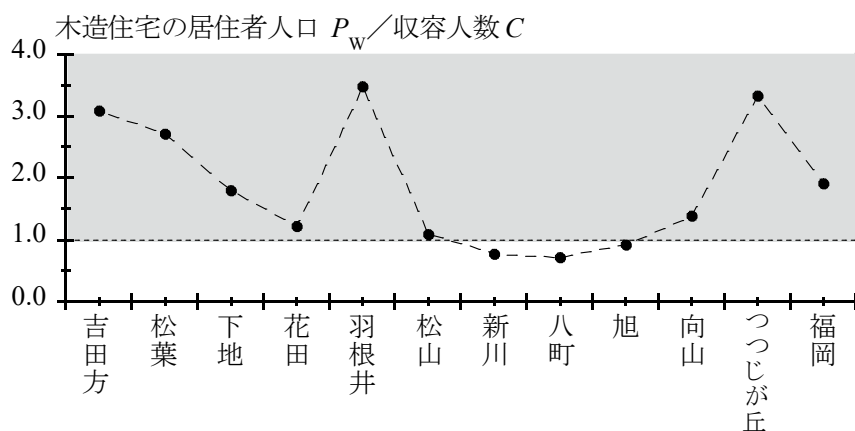


図 24 校区の収容人数に対する人口の割合

ΔR は、避難所の収容人数に影響していることがわかる。たとえば、新川、八町、旭校区を見ると、 ΔR はゼロとなった。これは、避難所の収容人数に対する木造住宅の居住者人数（図 24）を見ると、 P_W/C が 1.0 以下となり、木造住宅の居住者人口が避難所の収容人数を下回ったためである。また、羽根井校区を見ると、 ΔR と P_W/C は最大だった。しかしながら、吉田方校区と松葉校区を比較すると、 ΔR は松葉校区が大きいのにに対し、 P_W/C は吉田方校区が大きい。さらに、向山校区とつつじが丘を比較すると、両者の R には差がほとんど見られなかったものの、 P_W/C には比較的に差がある。

この要因として、建物年代別の割合を図 25 に示す。

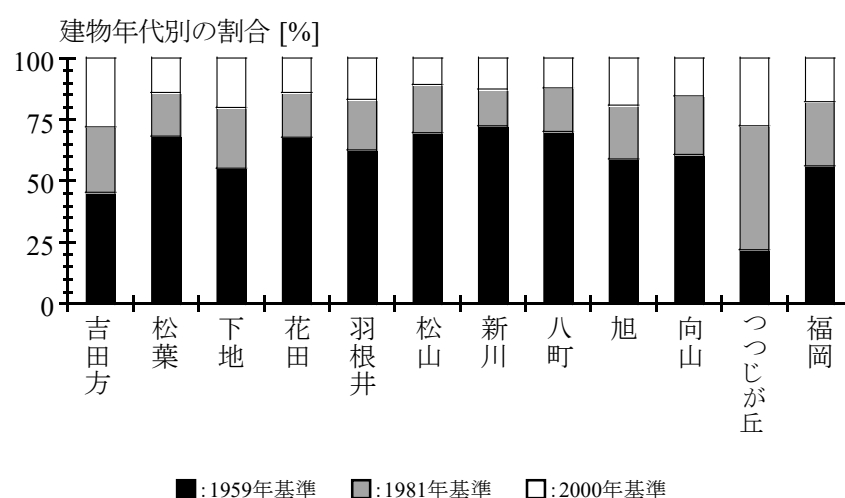


図 25 建物年代別の割合

図 25 より、松葉校区、向山校区は、吉田方校区、つつじが丘校区よりも地震による被害を受けやすい（図 25、建築年代が古い）建物が多いためである。つまり、 ΔR （図 23）は、地震による被害を受けやすい建物が多い地域、および避難所の収容人数が少ない地域を定性的に評価できていると言える。

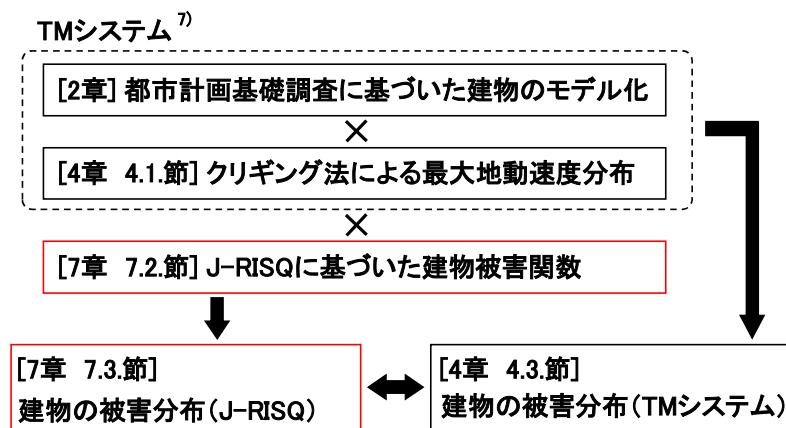
したがって、 ΔR （図 23）を見ると、松葉、羽根井校区は、他の校区と比べて被災者があふれやすい地域であり、被災者のあふれに関する防災対策を優先的に行う必要があると言える。また、図 23、図 24、図 25 を用いれば、被災者のあふれに関する防災対策を対象校区ごとに提案することができる。たとえば、つつじが丘校区は、 N/C の値が大きいため、避難所の収容人数を増加させる必要がある。一方、花田校区は、避難所の収容人数を増加させるよりも、木造住宅の耐震化を普及させた方が、被災者のあふれを回避できる。

7. J-RISQ に基づいた建物被害分布

7.1. 被害関数による建物被害推定

前章までは、TM システムに基づいて漸増動的解析である IDA 曲線を使用した地震応答解析を行った。その結果より、耐震化の推進地域や、避難所の収容人数を増加させることによる被災者のあふれ回避の手法の検討を定量的に評価することができる。しかしながら、IDA 曲線は、建物モデルに過去の地震波を入力した推定結果であるため、それぞれの地震における建物の実被害を考慮していない。

そこで、本章では実被害より算出される建物被害関数を用いて、被害推定を行い、IDA 曲線における被害推定結果との比較を行い精度の確認を行う。まず、建物被害関数における解析手法の評価フローを図 26 に示す。



赤枠(7章): J-RISQ に基づいた建物被害推定

図 26 TM システムと建物被害関数における評価フロー

図 26 より、建物モデル及びクリギング法における最大地動速度分布は TM システムより算出された解析結果を用いる。なお、本章で検討する箇所を赤枠に示す。

7.2. J-RISQ に基づいた建物被害関数

本節では、解析で用いる建物被害関数について説明を行う。TM システムとの比較を行うために使用する被害関数は J-RISQ⁴⁾で使用されるものと同様のパラメータを使用する。PGV 分布における建物被害関数は次式⁴⁾で表現される。

$$P_R(\text{PGV}) = \Phi\left(\frac{\ln(\text{PGV}) - \lambda}{\xi}\right) \quad \dots (12)$$

また、J-RISQ では計測震度における建物被害率を表現する場合がある。よって PGV を推定

震度へ変換するための式及び計測震度における建物被害関数は次式⁴⁾で表現される。

$$I = 2.002 + 2.603 \log_{10} \text{PGV} - 0.213 (\log_{10} \text{PGV})^2 \quad \dots (13)$$

$$P_R(\text{PGV}) = \Phi\left(\frac{I - \lambda}{\xi}\right) \quad \dots (14)$$

I : 計測震度

また, J-RISQ における建物被害推定手法は M1 から M9 までの 9 区分で区分されている。各区分における手法を表 7, 各区分における入力する強震動指標を表 8 にまとめる。

表 7 各区分における手法⁴⁾

手法	構造	参考文献
M1	木造	中央防災会議(2012)
M2		堀江(2004)
M3		堀江(2004)
M4		村尾・山崎(2002)
M5		中央防災会議(2004)
M6		佐伯ほか(2016)
M7		翠川ほか(2011)
M8		清水ほか(2016)
M9		全壊 : 門馬ほか(2018) 全半壊: 翠川ほか(2011)

表 8 各区分における入力する強震動指標⁴⁾

手法	入力強震動指標
M1	計測震度
M2	最大速度
M3	最大速度
M4	最大速度
M5	計測震度
M6	全壊 : 計測震度 全半壊: 最大速度
M7	計測震度
M8	応答スペクトル
M9	計測震度

表 8 より，主に計測震度及び最大速度によって建物被害関数を算出する。しかしながら，M8 に関しては応答スペクトルをもとに被害関数を算出する必要があるため，本検討では対象外とする。次に，各区分の手法より算出された被害関数パラメータ λ, ζ を表 9 にまとめる。

表 9 被害関数パラメータ一覧⁴⁾

手法	構造	耐震基準・年代	被害関数パラメータ			
			全壊		全半壊	
			λ	ζ	λ	ζ
M1	木造	旧	6.25	0.27	5.9	0.32
		中①	6.32	0.294	5.94	0.302
		中②	6.48	0.335	6.06	0.336
		新①	6.95	0.44	6.57	0.44
		新②	7.15	0.44	6.82	0.44
		新③	7.35	0.44	6.97	0.44
M2	木造	旧	4.98	0.41	4.71	0.35
		新	6.23	0.90	5.23	0.54
M3	木造	旧	4.85	0.41	4.35	0.28
		新	5.96	0.88	4.63	0.37
M4	木造	旧	5.15	0.504	4.9	0.449
		新	5.45	0.534	5.18	0.521
M5	木造	旧	6.40	0.32	6.01	0.327
		新	6.95	0.44	6.57	0.439
M6	木造	旧	6.718	0.407	4.71	0.35
		中①	6.748	0.414		
		中②	6.815	0.429		
		新①	7.303	0.546	5.23	0.54
		新②	7.912	0.678		
		新③	9.034	0.921		
M7	木造	旧	6.469	0.137	6.351	0.224
		新	6.671	0.195	6.442	0.205
M8						
M9	木造	旧	6.60	0.25	6.351	0.224
		新①, 新②	6.79	0.28	6.442	0.205
		新③	7.27	0.35	6.442	0.205

被害関数パラメータは区分ごとに耐震基準・年代の分類が設定されており、それぞれの区分で耐震基準年が異なる。そこで本研究では、表 10 より手法ごとに以下の耐震基準・年代を設定し、被害関数を適用する。

表 10 本研究における被害関数パラメータ⁴⁾

手法	構造	耐震基準・年代	年代	被害関数パラメータ			
				全壊		全半壊	
				λ	ζ	λ	ζ
M1	木造	旧	1962年以前	6.25	0.27	5.9	0.32
		中①	1963~1971年	6.32	0.294	5.94	0.302
		中②	1972~1980年	6.48	0.335	6.06	0.336
		新①	1981~1989年	6.95	0.44	6.57	0.44
		新②	1990~2001年	7.15	0.44	6.82	0.44
		新③	2002年以降	7.35	0.44	6.97	0.44
M2	木造	旧	1962年以前~1980年	4.98	0.41	4.71	0.35
		新	1981~2002年以降	6.23	0.90	5.23	0.54
M3	木造	旧	1962年以前~1980年	4.85	0.41	4.35	0.28
		新	1981~2002年以降	5.96	0.88	4.63	0.37
M4	木造	旧	1962年以前~1980年	5.15	0.504	4.9	0.449
		新	1981~2002年以降	5.45	0.534	5.18	0.521
M5	木造	旧	1962年以前~1980年	6.40	0.32	6.01	0.327
		新	1981~2002年以降	6.95	0.44	6.57	0.439
M6	木造	旧	1962年以前	6.718	0.407	4.71	0.35
		中①	1963~1971年	6.748	0.414		
		中②	1972~1980年	6.815	0.429		
		新①	1981~1989年	7.303	0.546	5.23	0.54
		新②	1990~2001年	7.912	0.678		
		新③	2002年以降	9.034	0.921		
M7	木造	旧	1962年以前~1980年	6.469	0.137	6.351	0.224
		新	1981~2002年以降	6.671	0.195	6.442	0.205
M8							
M9	木造	旧	1962年以前~1980年	6.60	0.25	6.351	0.224
		新①, 新②	1981~2001年	6.79	0.28	6.442	0.205
		新③	2002年以降	7.27	0.35	6.442	0.205

区分ごとの耐震基準・年代は表 11 における年代を基準として年代を設定している。

表 11 耐震基準・年代⁴⁾

構造	耐震基準・年代	年代
木造	旧	1962年以前
	中①	1963~1971年
	中②	1972~1980年
	新①	1981~1989年
	新②	1990~2001年
	新③	2002年以降

次節では本節で説明した被害関数を使用し，建物被害分布を算出する。

7.3. 被害関数における建物被害分布

本節では，建物被害関数に基づいた被害分布について説明を行う。

まず，J-RISQ における被害推定は，前節で説明した耐震基準年ごとの被害率 P_R をメッシュにおける建物棟数 M に掛けることで年代ごとの被害棟数 M_k を推定している。推定式を次式で表現する。

$$M_k = P_R \times M \quad \dots (15)$$

なお，本検討では被害関数パラメータの全壊を，木造住宅の安全限界である層間変形角 3.3% に換算して被害推定を行う。豊橋市におけるメッシュごとの被害分布を図 27 に示す。

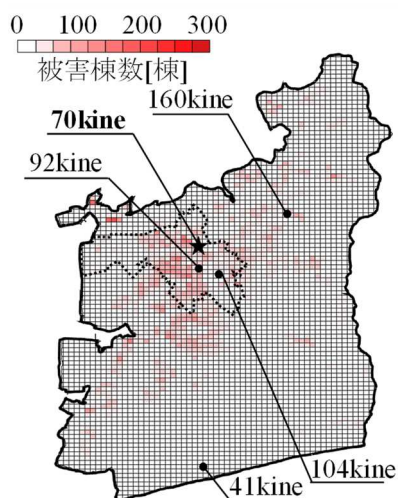


図 27(a) 豊橋市における被害分布 (M1)

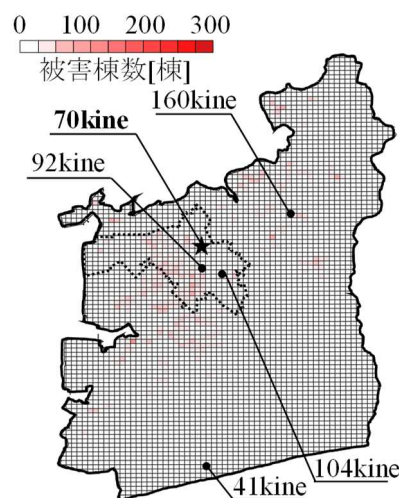


図 27(b) 豊橋市における被害分布 (M2)

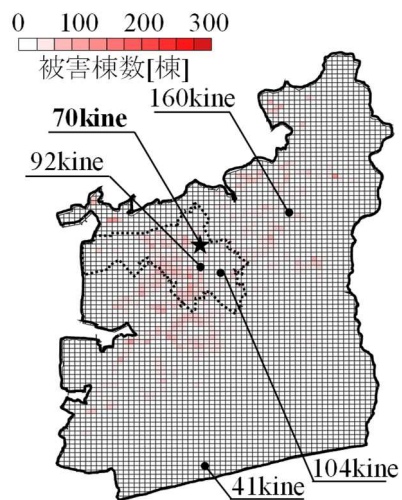


図 27(c) 豊橋市における被害分布 (M3)

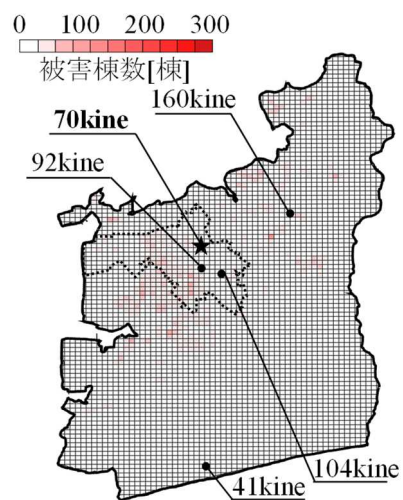


図 27(d) 豊橋市における被害分布 (M4)

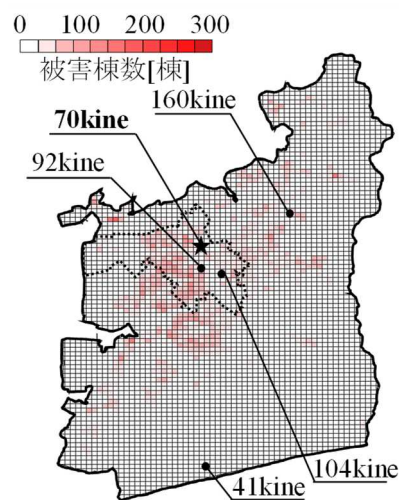


図 27(e) 豊橋市における被害分布 (M5)

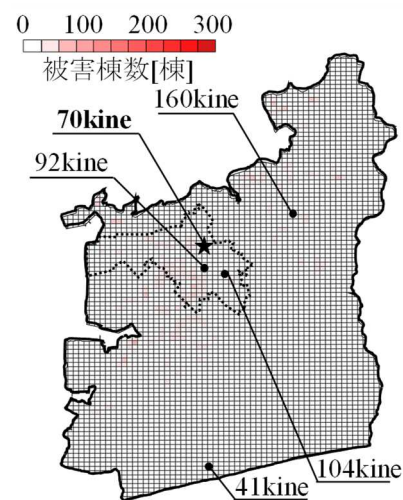


図 27(f) 豊橋市における被害分布 (M6)

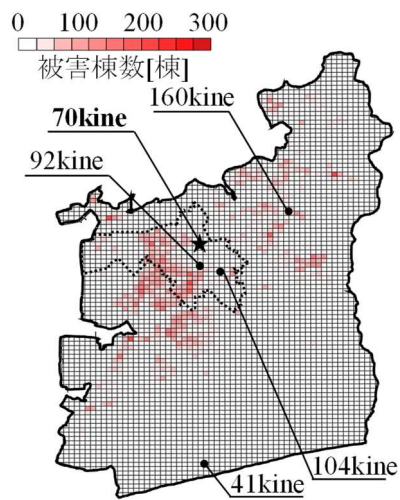


図 27(g) 豊橋市における被害分布 (M7)

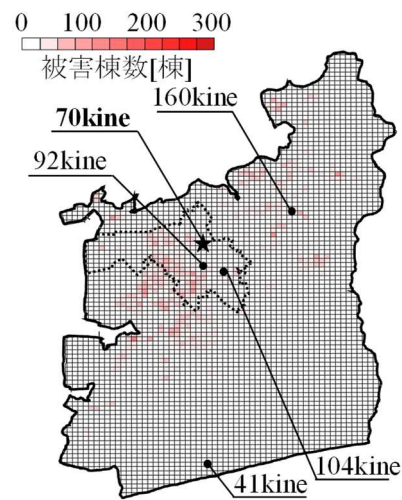


図 27(h) 豊橋市における被害分布 (M9)

図 27 より、被害関数に基づいた豊橋市の被害分布は IDA 曲線における被害分布と類似していることがわかる。しかしながら、被害関数に基づいた被害分布は IDA 曲線に基づいた被害分布よりも被害の度合いが小さく、過小評価している。次に、対象校区における区分ごとの被害分布を図 28 に示す。

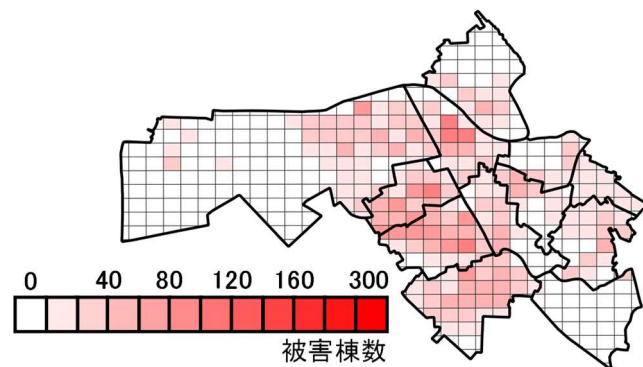


図 28(a) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M1)

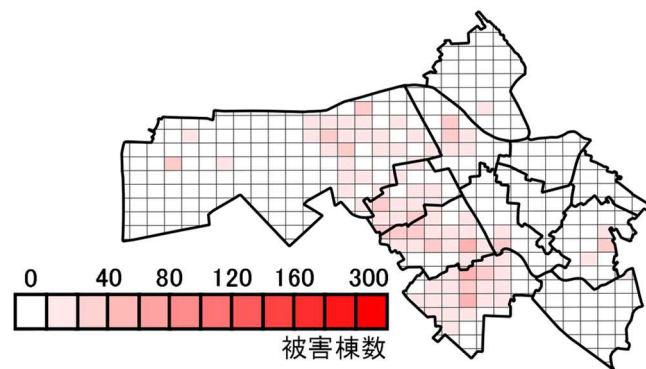


図 28(b) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M2)

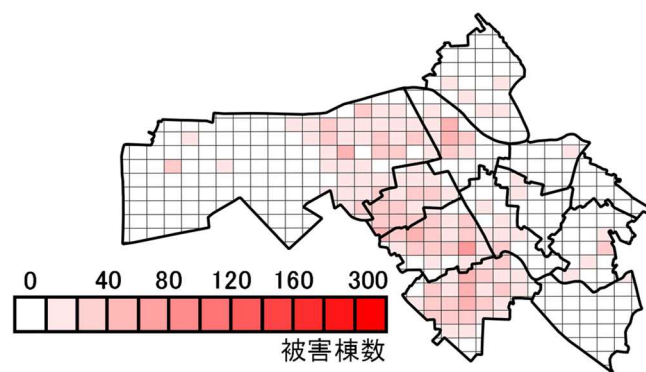


図 28(c) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M3)

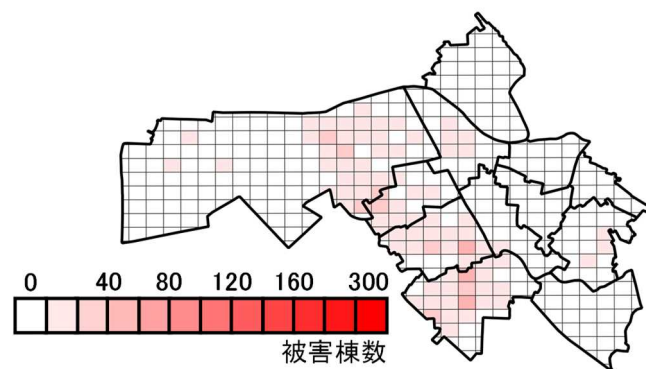


図 28(d) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M4)

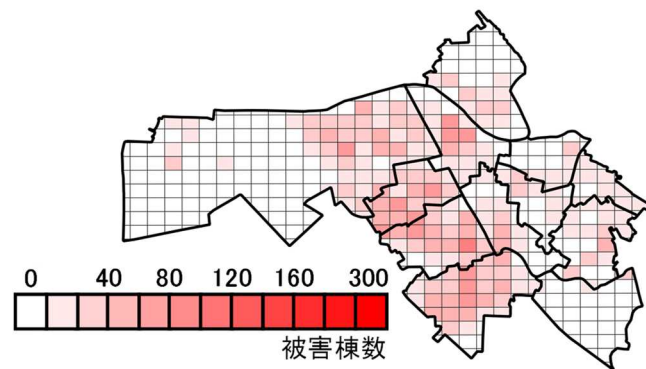


図 28(e) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M5)

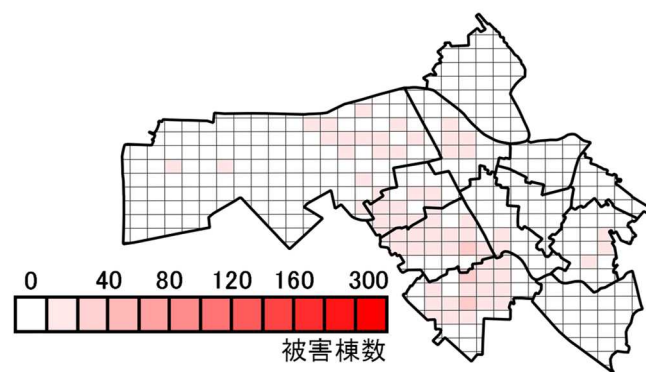


図 28(f) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M6)

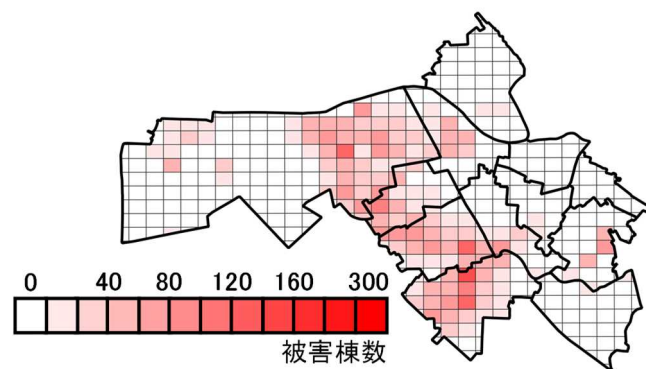


図 28(g) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M7)

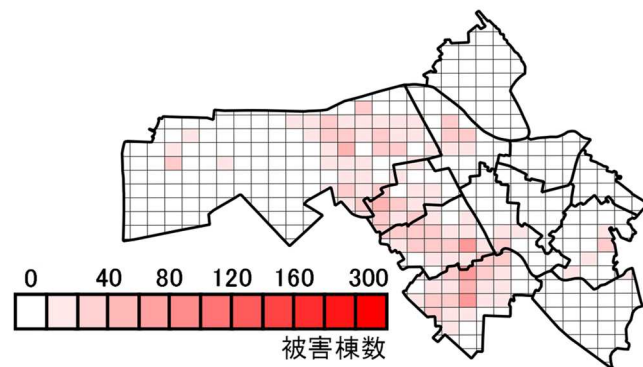


図 28(h) 対象校区におけるメッシュごとの被害分布 (M9)

図 28 より区分ごとの被害分布をみると、区分ごとに被害の度合いが異なり、M1, M5, M7 における被害分布は他区分と比べ濃淡が表現されている。また、J-RISQ では被害推定結果を M5 における結果を公開データとしている。被害推定結果の確認として、対象校区の建物分布を以下の図 29 に示す。

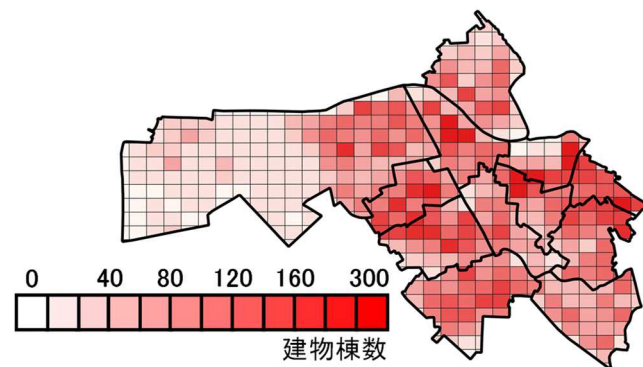


図 29 対象校区におけるメッシュごとの建物分布

図 29 より、コンター図が白色から赤色に変化するにつれて、メッシュにおける建物棟数が多く分布していることを表している。被害分布と比較しても建物の集中箇所と被害箇所がほぼ一致していることがわかる。

以上より、前節で算出した IDA 曲線における被害推定結果と被害関数における被害推定結果では、IDA 曲線における被害推定結果のほうが被害関数と比較して過大評価している。しかしながら、IDA 曲線における被害推定結果と、J-RISQ における被害推定結果の分布が類似していることから、IDA 曲線における被害推定結果を被害の上限値とし、J-RISQ にお

ける被害推定結果を下限值とすることで、より被害に幅を持たせて推定することが可能になる。なお参考として、区分ごとの被害関数と入力強震動指標関係のグラフを図 30 に示す。図 30(a,f)に関しては、赤色の線が旧築年、青色が中築年①、緑色が中築年②、水色が新築年①、オレンジ色が新築年②、ピンク色が新築年③を示している。

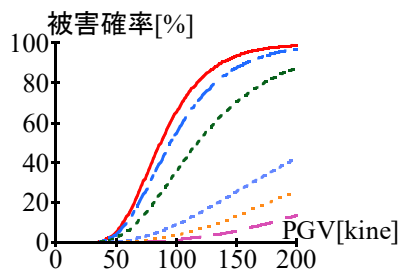


図 30(a) M1 における被害発生確率

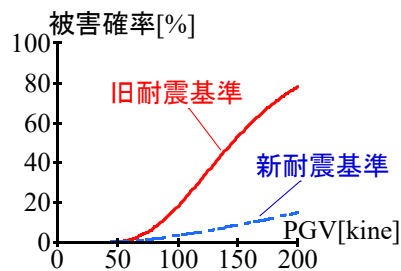


図 30(b) M2 における被害発生確率

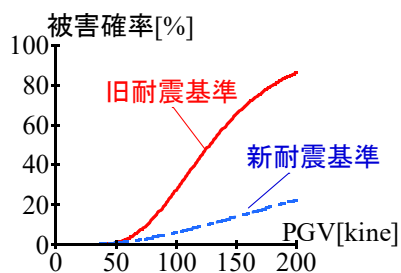


図 30(c) M3 における被害発生確率

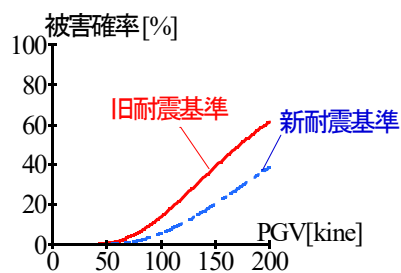


図 30(d) M4 における被害発生確率

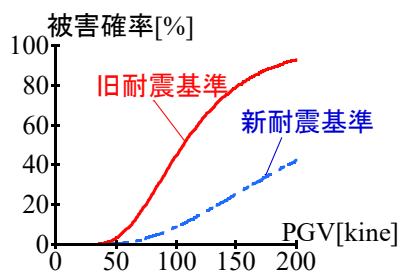


図 30(e) M5 における被害発生確率

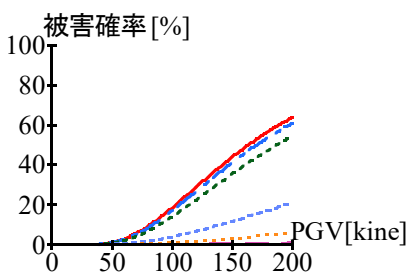


図 30(f) M6 における被害発生確率

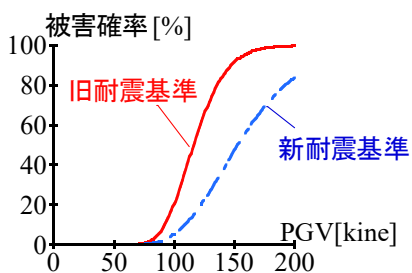


図 30(g) M7 における被害発生確率

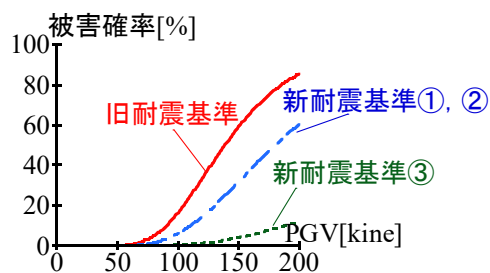


図 30(h) M9 における被害発生確率

8. 避難行動の最適化

8.1. 避難行動の最適化について

前章までは豊橋市の人口集中地域である 12 校区に着目し、被災者の検討を行った。しかしながら、校区における避難計画の場合、建物の立地環境を考慮せず、解析を行っているため、以下の図 31 に示すような校区線近郊に立地する建物の距離関係であっても住宅に住む居住者は校区 A の避難所を活用しなければならない条件で検討を行った。

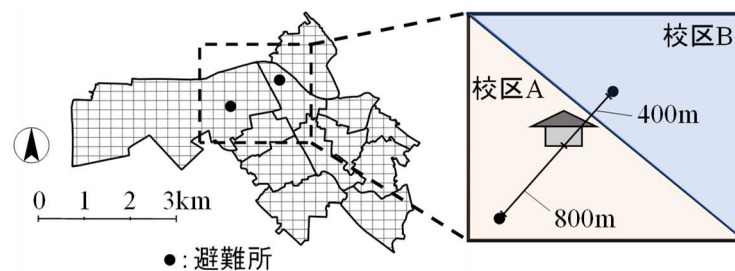


図 31 避難所と校区線近郊に立地する建物の距離関係

実際に災害が発生した際に図 31 に示す住宅の居住者は、できるだけ自宅から近い距離の避難所に避難をすると考えられる。これらの避難行動の最適化にあたって、本章ではボロノイ図に着目し、より詳細な避難モデルの構築を目的とする。

8.1.1. ボロノイ図について

本節では避難行動の最適化に用いるボロノイ図について説明する。概要を図 32 に示す。ボロノイ図とは、ある距離空間上の任意の位置に配置された複数の点に対して、空間をどの点に最も近いかにによって領域分けした図のことである。このとき、空間上に配置された点のことを母点と定義する。なお、ボロノイ図の境界線はボロノイ境界と呼ばれ、必ず、いずれか二つの母点の垂直二等分線となる²³⁾

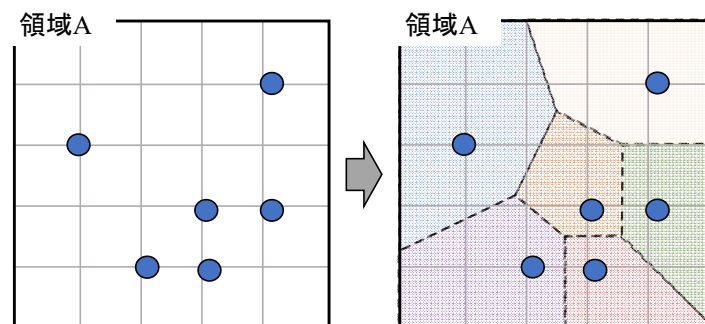


図 32 ボロノイ図概要

ボロノイ図概要より、図 32 に、12 校区の避難所を母点としたボロノイ図を示す。

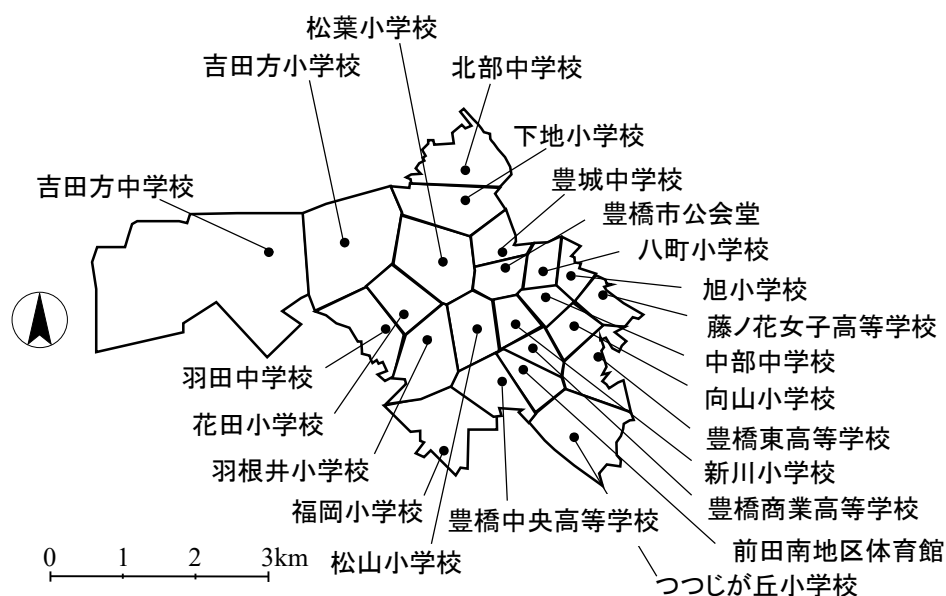


図 32 12 校区の避難所を母点としたボロノイ図²³⁾

上記の図より、12 校区の避難所の分布と比較して領域一つ当たり避難所が配置され、住宅の居住者が最短距離の避難所へ避難することが実現可能となる。

次にボロノイ図における領域ごとの収容人数¹⁹⁾を表 11 に示す（次ページ）。なお、本検討における避難所は前検討と同様に公民館を指す第一指定避難所及び小学校、中学校、高等学校を指す第二指定避難所を対象とする。また、第一指定避難所に関しては小学校の敷地内に位置する公民館を指すため、第二指定避難所における小学校の収容人数の和とし、表 11 の合計〔人〕Cにおける収容人数を検討に使用する。

8.1.2. ボロノイ図における被災者の検討

本章では前節で算出したボロノイ図による領域ごとの被災者を算出する。なお、入力する地震動は、これまでと同様の地震動を入力する。

まず 70kine 地震（4.1.3.節 倍率を加えた PGV 分布の検討を参照）における被災者を算出する。図 33 に領域ごとの混雑度を示す。縦軸は被災者と領域ごとの収容人数の差を示しており、横軸は領域名を示している。また、被災者は建物の層間変形角が 3.3%以上を避難の閾値とする。

なお、領域ごとの混雑度では、縦軸における差の値が正になる場合（図 33 中の黒塗り）、被災者が収容人数を上回っている状況を表現しており、差が負になる場合は、収容人数が被災者を上回っている状況を示している。言い換えると、差の値が正である領域では避難所が混雑している状況が想定される。また、校区における混雑度の比較を図 34 に示す。

表 11 ホロノイ図における領域ごとの収容人数¹⁹⁾

校区	第一指定避難所避難所	避難所の収容人数[人]	第二指定避難所避難所	避難所の収容人数[人]	合計[人] C
吉田方校区	吉田方校区市民館	93	吉田方小学校	1663	1756
松葉校区	松葉校区市民館	94	吉田方中学校	1502	1502
下地校区	下地校区市民館	105	松葉小学校	1081	1175
花田校区	花田校区市民館	99	下地小学校	860	965
羽根井校区	羽根井地区市民館	70	北部中学校	1154	1154
松山校区	松山校区市民館	85	花田小学校	1097	1196
新川校区	新川校区市民館	85	羽田中学校	1832	1832
八町校区	八町校区市民館	79	羽根井小学校	1070	1140
旭校区	旭校区市民館	88	松山小学校	924	1009
向山校区	向山校区市民館	114	前田南地区体育館	510	510
つつじが丘校区	つつじが丘校区市民館	79	新川小学校	771	856
福岡校区	福岡校区市民館	105	中部中学校	1519	1519
			八町小学校	669	748
			豊城中学校	1263	1263
			豊橋市公会堂	489	489
			旭小学校	729	817
			藤ノ花女子高等学校	2031	2031
			向山小学校	1114	1228
			豊橋東高等学校	913	913
			豊橋商業高等学校	867	867
			つつじが丘小学校	1355	1434
			福岡小学校	1650	1755
			豊橋中央高等学校	1611	1611

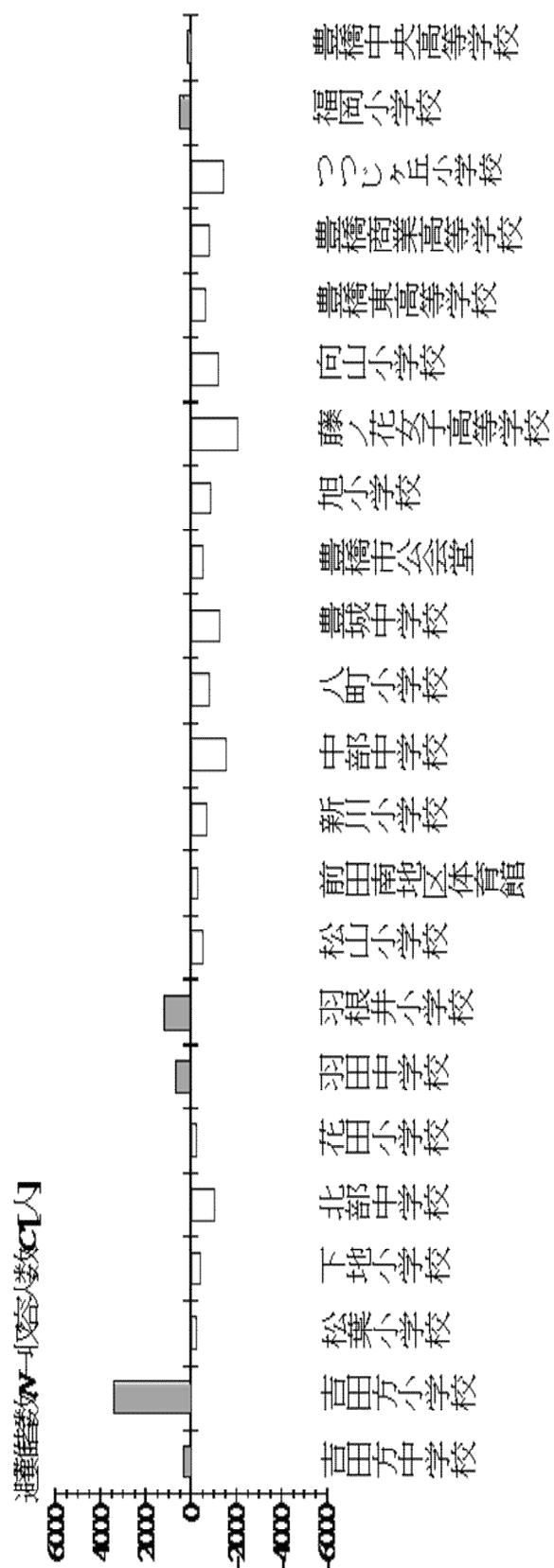


図 33 70kine 地震における領域ごとの混雑度（層間変形角 3.3%を閾値）

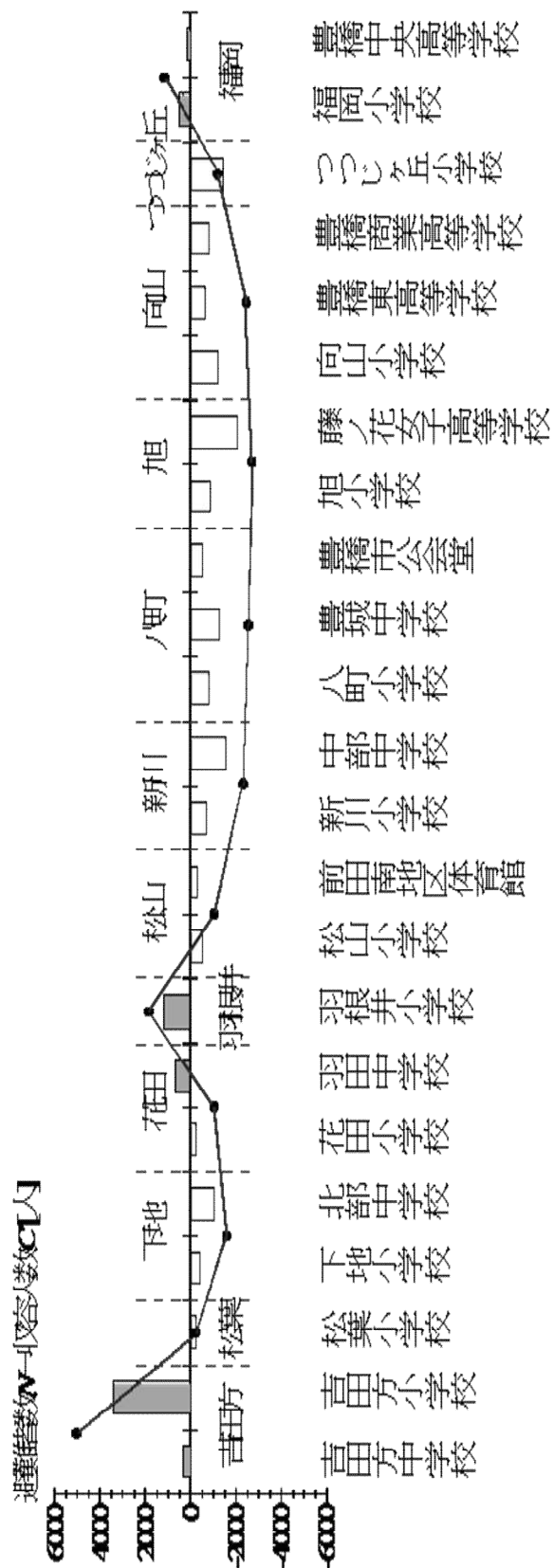


図 34 ポロノイ図と校区における混雑度比較(層間変形角 3.3%を閾値)

図 34 では破線で校区を表現しており、折れ線グラフは棒グラフと解析条件を同条件とした校区における混雑度を示している。ここで、避難所を母点としたボロノイ図による混雑度推定では、同条件の校区における混雑度推定結果と比較して、被災者のあふれの最大値が減少していることがわかる。よって、校区における避難計画と比較してボロノイ図では最短距離の避難計画を再現しつつ、混雑の最大値の減少を図ることを可能としている

しかしながら、ボロノイ図による被災者数の低減には限界があり、一例として吉田方校区に位置する吉田方中学校及び吉田方小学校においては合計で約 4000 人が避難所からあふれている。なお、解析条件として、層間変形角が安全限界である 3.3%以上の木造住宅を避難の対象としているため、実際の大地震時には、ヒトの心理条件も加わり、さらに低い層間変形角から避難行動がみられると考えられる。そこで次項ではボロノイ図による解析結果より被災者のあふれを回避するために、避難所ごとの混雑度（ここでは被災者数/収容人数）をもとに追加で配置する避難所の位置を提案し、再度ボロノイ図を作成し検討を行う。

8.2. 混雑度に基づいた避難所の追加配置

ここでは、避難所の混雑回避手法について、避難所ごとの混雑度（ここでは被災者数/収容人数）をもとに追加で配置する避難所の位置の提案を行う。避難所の追加配置に関しては前述したように避難所ごとの混雑度を参照する。前項における条件では以下の図 35 の灰色に示す地域の避難所で混雑がみられた。

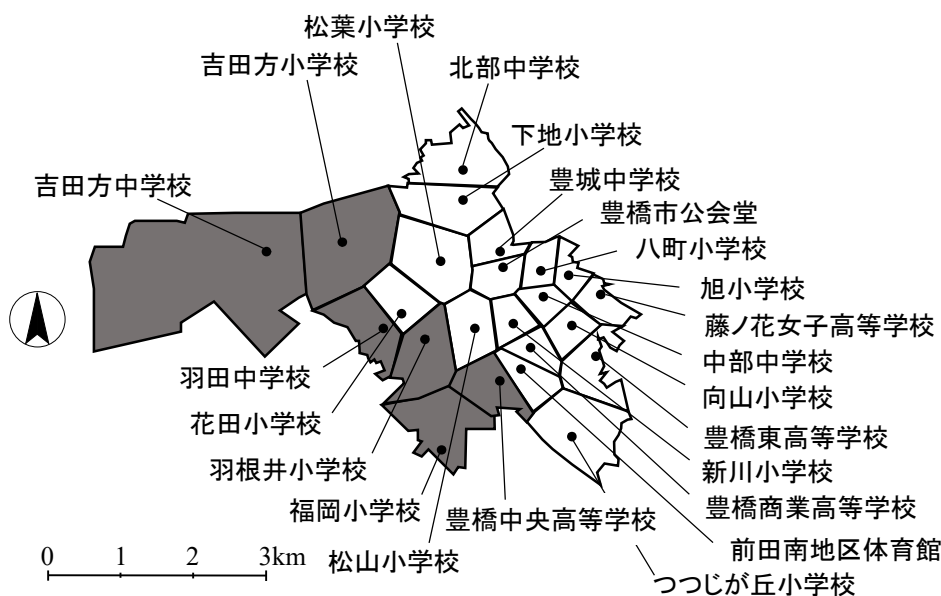


図 35 避難所が混雑する地域(層間変形角 3.3%を閾値)

図 35 より避難所の混雑がみられる地域は 12 校区の地域内では西側に集中しており，災害時に仮設避難所の開設が考えられる．前節より，混雑度が大きい領域では，ボロノイ図による避難計画が適正であるとは言い難い．そこで，本章では，避難所ごとの混雑度の大きさと避難所の緯度・経度情報をもとに，下式の加重平均法を用いて追加の避難所の配置計画を行う．なお，本検討では，混雑度の大きい領域（図 3）に新たな避難所を 2 か所配置の配置計画を行う．

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (16)$$

ここで， W は追加避難所の重みづけ座標， n は検討する避難所数， x_i は避難所の緯度および経度である．また， w は各避難所の重みで，本解析では，被災者数 N / 収容人数 C の混雑度を代入している．一つ目の追加避難所は，吉田方小学校，吉田方中学校，花田小学校の混雑度を参照し，二つ目の避難所は，羽根井小学校，福岡小学校，豊橋中央高等学校の混雑度と位置情報を，上式に代入し，追加避難所の位置を決定した．ここで，灰色の地域の避難所における混雑度と避難所の経度，緯度情報を用いて算定した追加の避難所位置を図 36 に赤い星印で示す．なお避難所の追加後のボロノイ図を図 37 に，その混雑度を以下の図 28 に示す．図中，黒丸は領域に既存の避難所を示し，赤い星印が追加避難所の位置を示す．また，追加の避難所における収容人数は，それぞれ 1000 人を上限値とする．図中，赤文字で示す避難所が追加で検討した避難所である．追加避難所の配置により，被災者のあふれがみられた吉田方小学校，羽根井小学校，福岡小学校等で，領域が小さくなり，既存避難所の混雑度が軽減される．

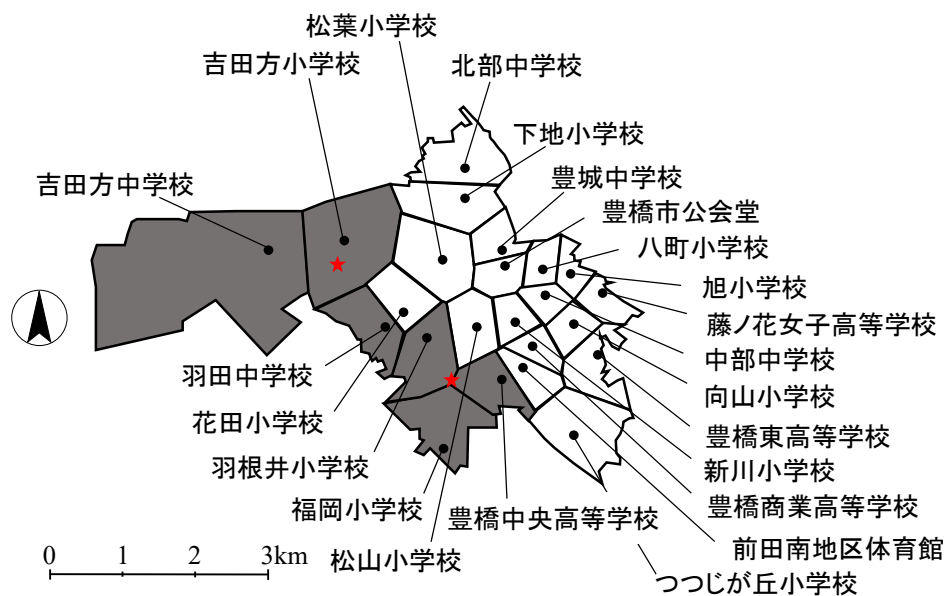


図 36 混雑度と避難所の経度、緯度情報に基づいた追加の避難所位置
(層間変形角 3.3%を閾値)

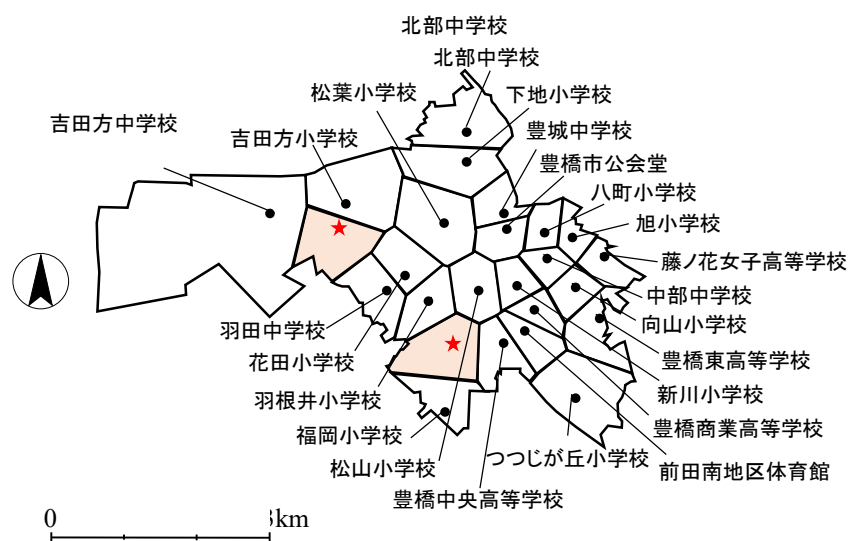


図 37 追加の避難所に基づいたボロノイ図(層間変形角 3.3%を閾値)

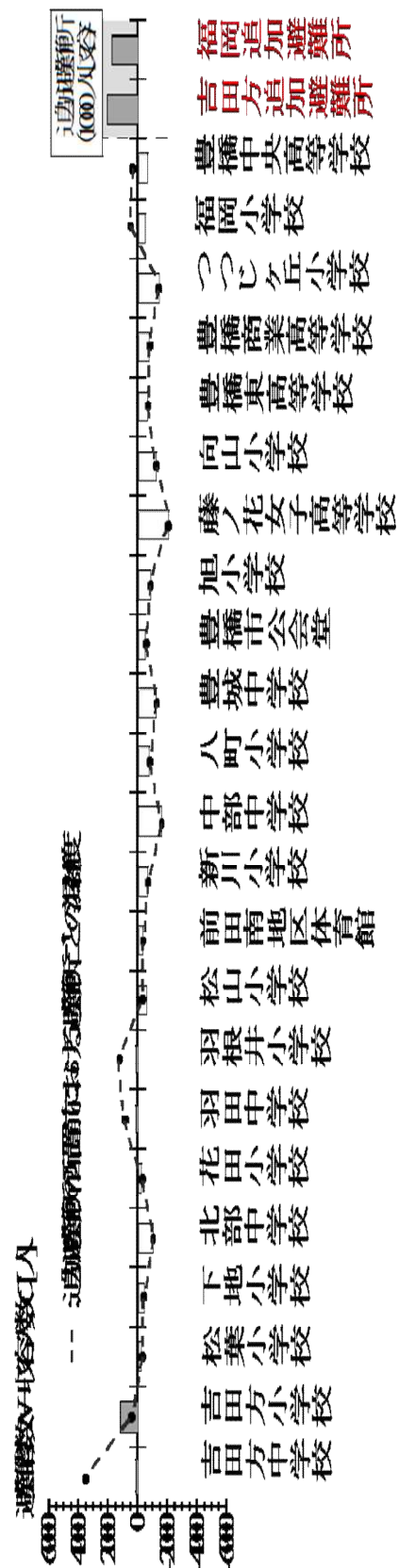


図 38 追加避難所を考慮した避難所ごとの混雑度 (層間変形角 3.3%を閾値)

図 38 より，追加避難所では収容人数を 1000 人として仮定した場合における混雑度推定結果である．追加避難所を配置したことにより，混雑していた避難所において，相対的に避難者数が減少しており，追加避難所がうまく機能している．以上より，追加避難所を領域ごとの混雑度を基準とした推定を行うことで，災害“前”に追加避難所や仮設住宅の設営規模の検討などが可能となり防災対策の一環として参照することができると考える．

9. まとめ

本報告書では，愛知県豊橋市を対象として，地震災害による被災者のあふれに着目し，混雑状況の即時推定とその防災対策について検討した．以下に知見をまとめる．

- [1]. まず，災害“後”に着目した検討として，南海トラフ相当地震が起きた場合の被災者数を対象校区ごとに算出した．吉田方，羽根井，福岡校区では，被災者があふれる可能性がある．一方，あふれた被災者を他の校区の避難所に分散すれば，被災者のあふれを回避することができる．また，発災 7 日間の被災者数の推移を求め，これに基づき，必要な物資量を算出した．
- [2]. 次に，被災者のあふれを避けるために在宅避難が推奨される層間変形角の最小値（あふれ回避変形角）を地震の大きさごとにまとめた．また，南海トラフ相当地震が起きた場合，建物の安全限界を 3.3%とすると，吉田方，羽根井，福岡校区では，被災者のあふれが回避できないことが予想される．ここまでの手法を TM システムに導入することで，被災者数，物資量，あふれ回避変形角を発災後即時に推定し，被災後復旧に活用できる．
- [3]. 災害“前”に着目した検討として，建物の耐震性能に着目したあふれ回避変形角を対象校区ごとに整理した．また，地震による被害を受けやすい建物が多い地域や，避難所の収容人数が少ない地域を定性的に評価した．さらに，被災者のあふれを回避するために，避難所の収容人数の増加や木造住宅の耐震化に関する防災対策を対象校区ごとに提案した．
- [4]. IDA 曲線における被害推定結果と，J-RISQ における被害推定結果の分布が類似していることから，IDA 曲線における被害推定結果を被害の上限値とし，J-RISQ における被害推定結果を下限值とすることで，より高精度な災害“前”の被害を推定することが可能になる．

なお、本検討は、建物モデルを都市計画基礎調査に基づき簡略化している点、木造住宅のみを対象としているため被害分布を過小評価している点、被災者数の推移に2016年熊本地震のパラメータを採用している点について、留意する必要がある。また、今後の課題として、被害分布の精度を向上させるために、建物モデルに非木造住宅も対象として検討する必要がある。さらに、本報告書は、避難所に行く目安として、地震による構造骨組の被害に焦点を当てた研究であり、火災、断水、停電被害も対象とした物的被害、土砂災害および津波被害にも展開して検討する必要があると考える。

付録

本報告書では、空間補間におけるPGV推定(4章：クリギング法による最大地動速度分布を参照)で地盤増幅度を考慮し、建物被害推定を行っている。しかしながら、同地震でも地盤の硬質具合によって建物の変形が異なる。そこで本報告書における付録では、検討対象地域における地盤状態を作成し、地盤条件を考慮した建物被害推定を行う。

付録1. 建物モデルの設定

解析モデルに関しては本文(2章 都市計画基礎調査に基づいた建物のモデル化を参照)のモデルと同様とする。

付録2. 地盤条件の設定

地盤条件の設定には、NEHRPのサイト分類²⁵⁾より、深度30mまでの平均S波速度(以降 V_{s30} と呼ぶ)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。なお、深度30mまでの V_{s30} が不明な地点がある。この条件に該当する地点に関しては、翠川らの回帰式²⁶⁾を用いて、未観測の V_{s30} を算出する。なお、軟弱地盤における観測点では最大地動加速度が 500 cm/s^2 を超える地震波が非常に少なく、地震波の選定ができなかったため、最大地動加速度の閾値を 300 cm/s^2 に引き下げ、入力地震動の対象とした。ここで、表1に本論における地盤種別ごとの入力地震動を示す。

表1 地盤種別ごとの入力地震動

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

付録 3. 地盤条件を考慮した IDA 曲線の算定

本節では、地盤条件を考慮した IDA 曲線について説明する。前節（3.章 被害推定モデル 漸増動的解析による建物の応答評価を参照）で算出した IDA 曲線では、地盤条件を考慮していない。そのため、建物の形状係数及び耐震基準年のみでの分類分けを行っていた。

ここで、地盤種別をパラメータとして加えることにより、地域特性に基づいた高精度な解析を行うことが可能となる。そこで、表 1 を参照して IDA 曲線の作成を行う。同時に地震の種別においても着目し、内陸直下型及びプレート境界型に分類分けする。図 1 に、硬質地盤における平屋の IDA 曲線を示す。なお、青色の線で 50 パーセンタイル値を示している。

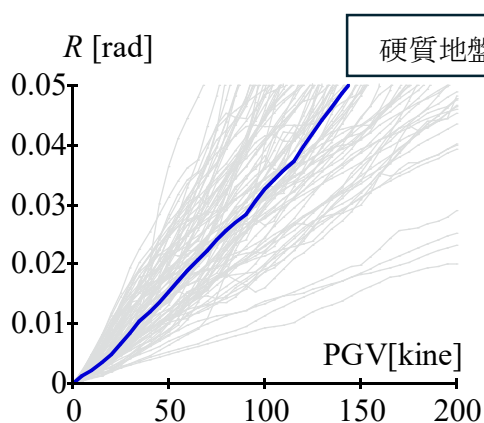


図 1(a) 1959 年基準,平屋,内陸直下型

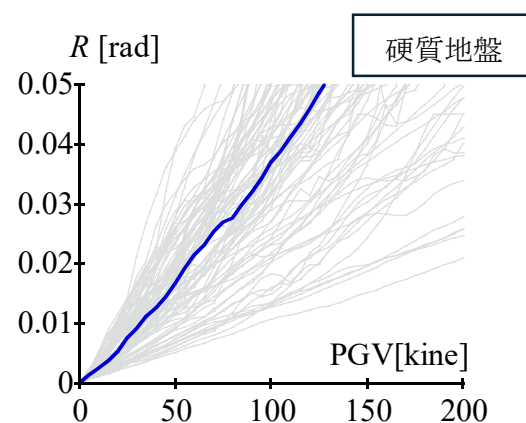


図 1(b) 1959 年基準,平屋,プレート境界型

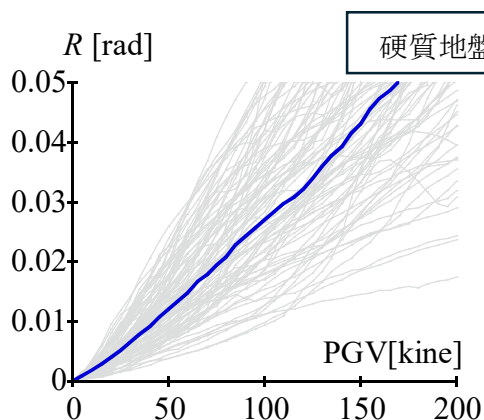


図 1(c) 1981 年基準,平屋,内陸直下型

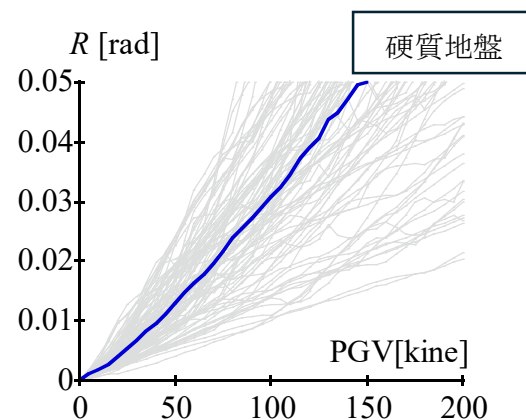


図 1(d) 1981 年基準,平屋,プレート境界型

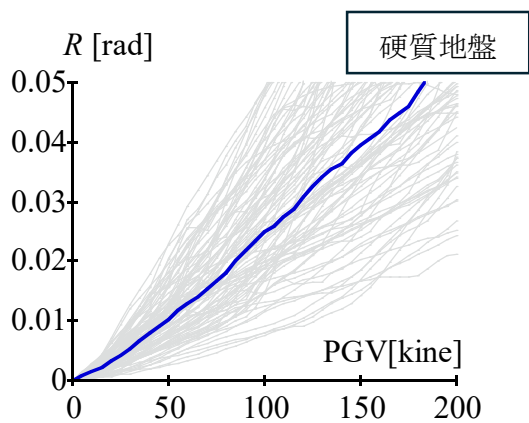


図 1(e) 2000 年基準,平屋,内陸直下型

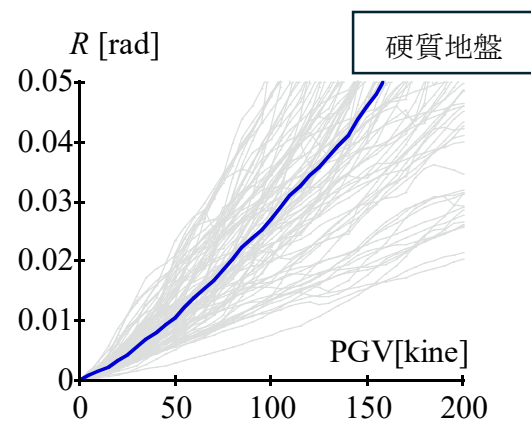


図 1(f) 2000 年基準,平屋,プレート境界型

次に普通地盤における平屋の IDA 曲線を図 2 に示す。

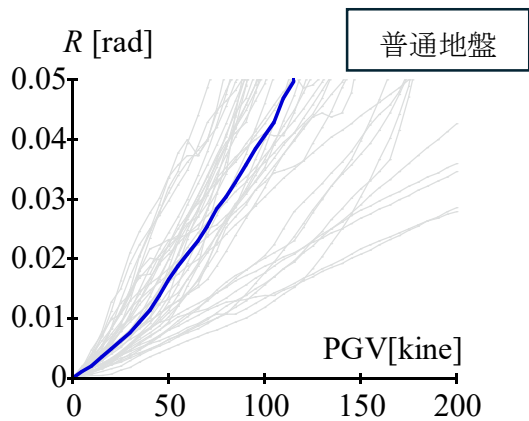


図 2(a) 1959 年基準,平屋,内陸直下型

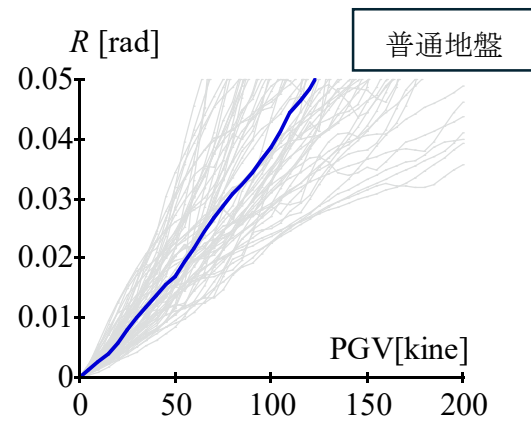


図 2(b) 1959 年基準,平屋,プレート境界型

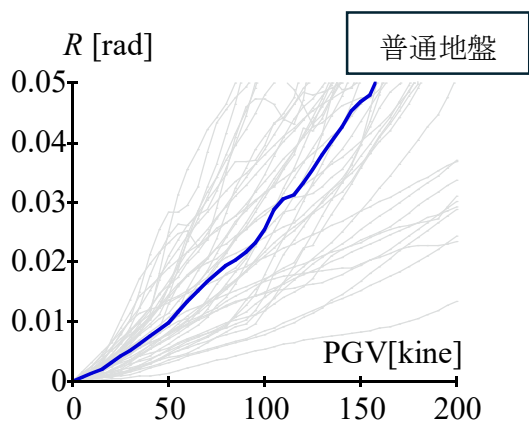


図 2(c) 1981 年基準,平屋,内陸直下型

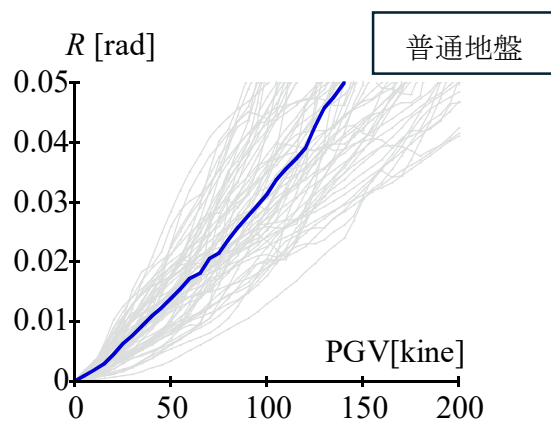


図 2(d) 1981 年基準,平屋,プレート境界型

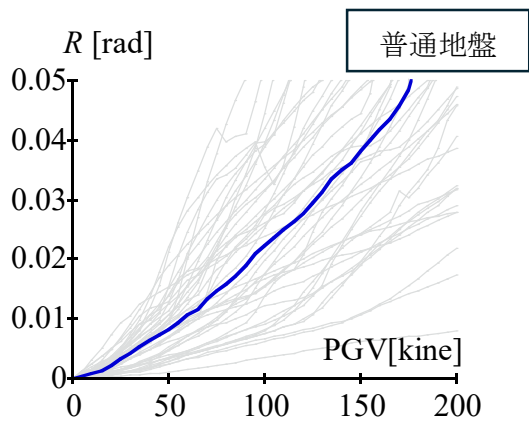


図 2(e) 2000 年基準,平屋,内陸直下型

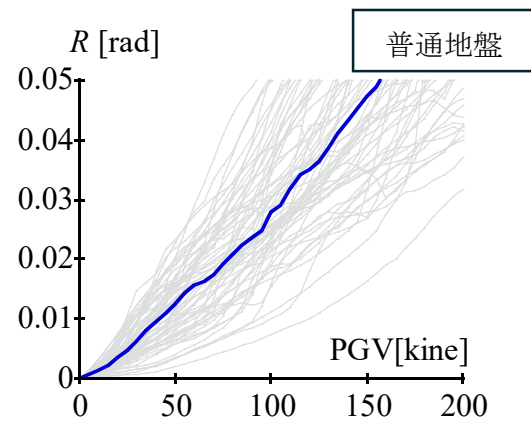


図 2(f) 2000 年基準,平屋,プレート境界型

次に軟弱地盤における平屋の IDA 曲線を図 3 に示す。

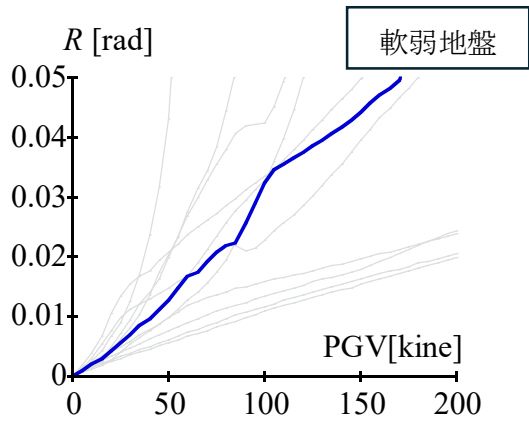


図 3(a) 1959 年基準,平屋,内陸直下型

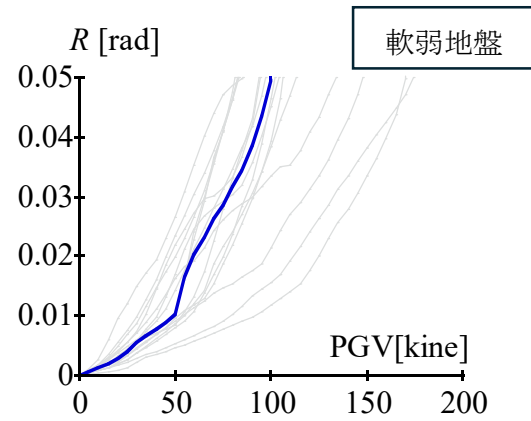


図 3(b) 1959 年基準,平屋,プレート境界型

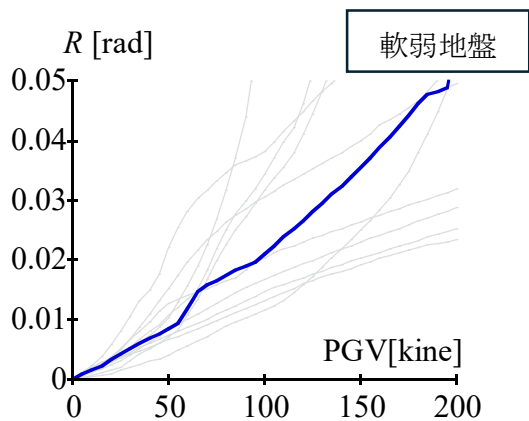


図 3(c) 1981 年基準,平屋,内陸直下型

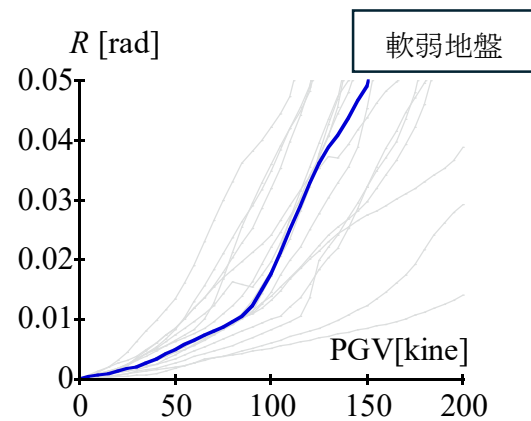


図 3(d) 1981 年基準,平屋,プレート境界型

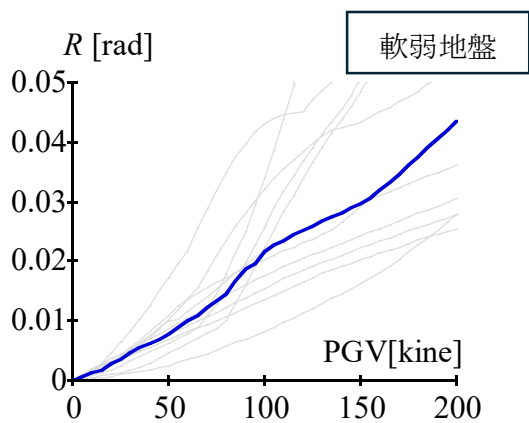


図 3(e) 2000 年基準,平屋,内陸直下型

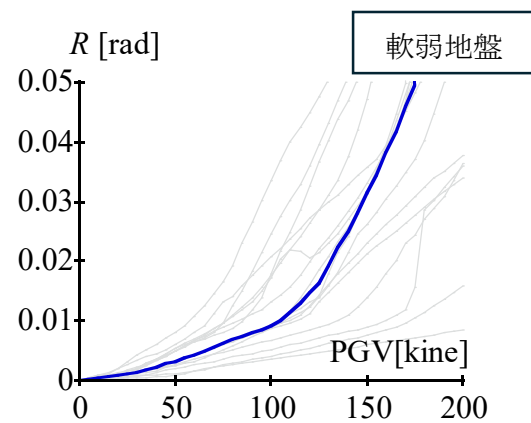


図 3(f) 2000 年基準,平屋,プレート境界型

地盤ごとの解析結果を比較すると軟弱地盤における対象地震波数が少ないため、IDA 曲線の勾配が単調増加せず、急勾配となっている。以降に、残りの IDA 曲線を示す。

条件：建物形状係数 0.2 (2.2.節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

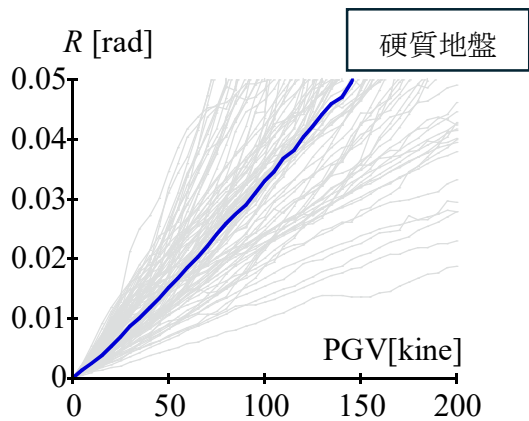


図 4(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.2$,内陸直下型

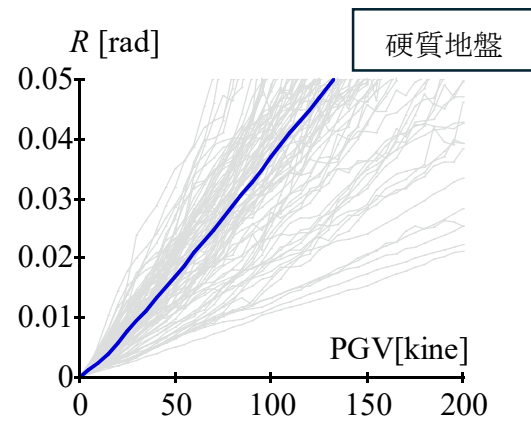


図 4(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.2$,プレート境界型

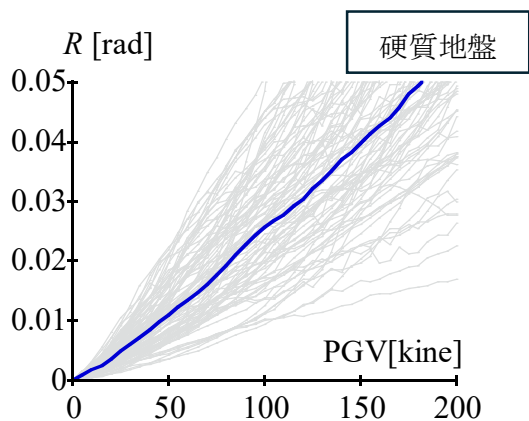


図 4(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.2$,内陸直下型

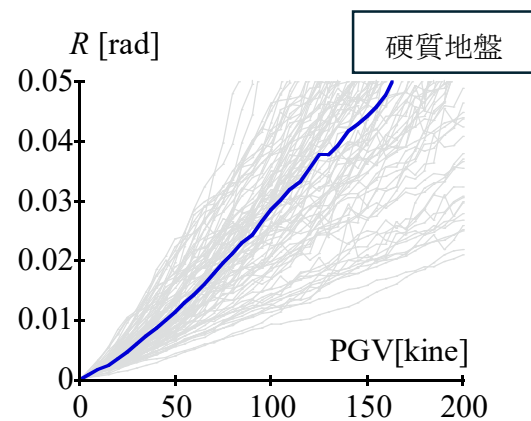


図 4(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.2$,プレート境界型

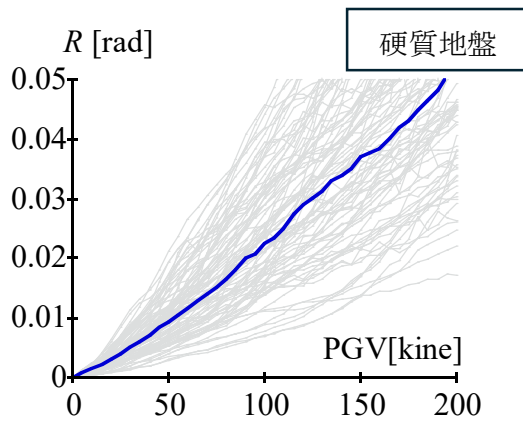


図 4(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.2$, 内陸直下型

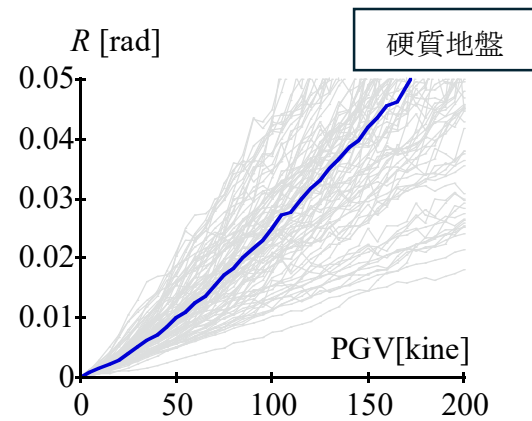


図 4(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.2$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.2 (2.2.節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

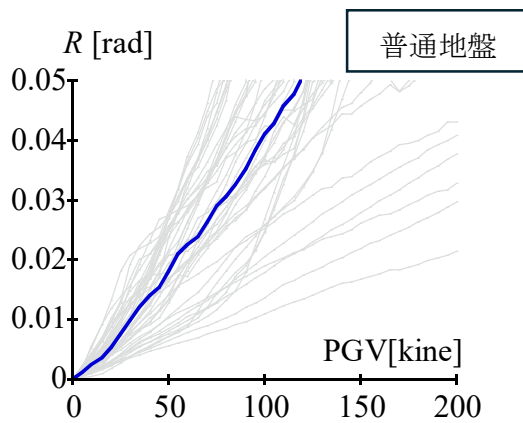


図 5(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.2$, 内陸直下型

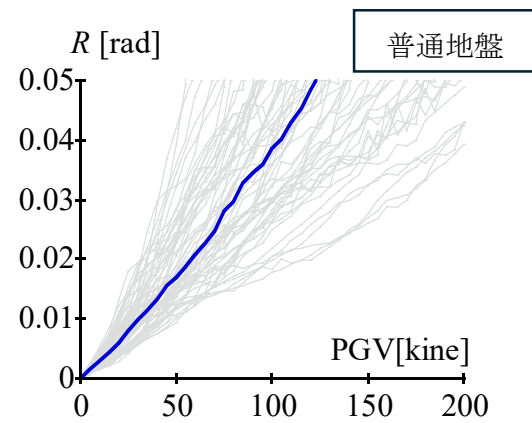


図 5(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.2$, プレート境界型

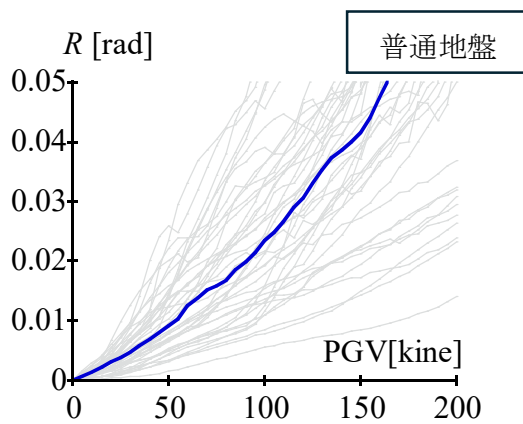


図 5(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.2$, 内陸直下型

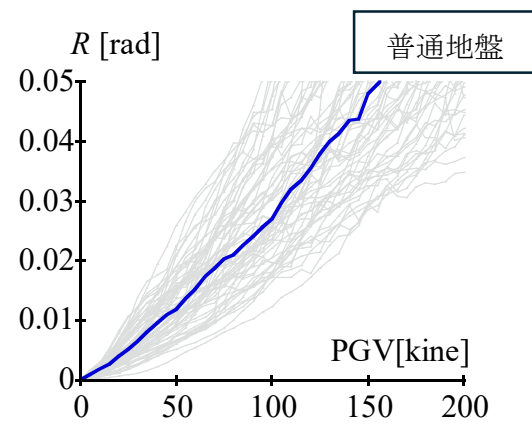


図 5(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.2$, プレート境界型

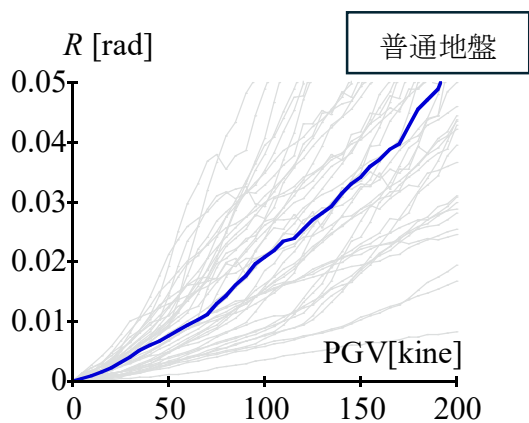


図 5(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.2$, 内陸直下型

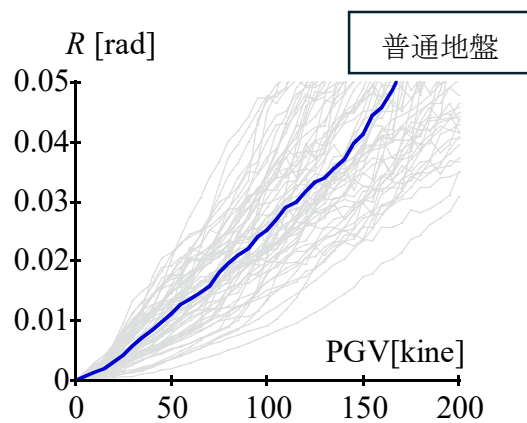


図 5(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.2$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.2 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

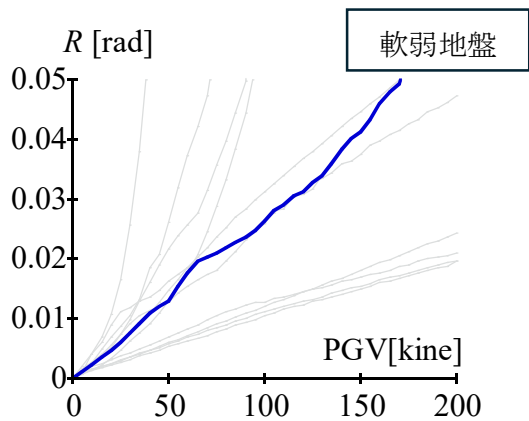


図 6(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.2$, 内陸直下型

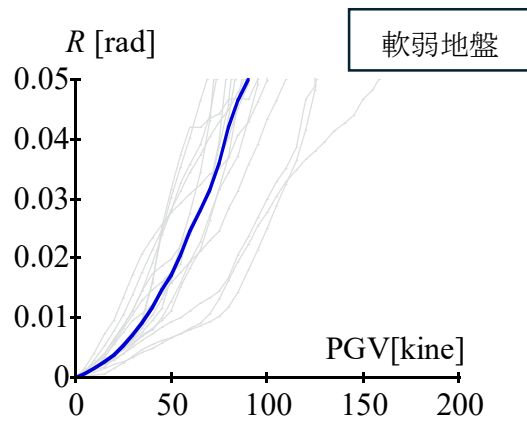


図 6(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.2$, プレート境界型

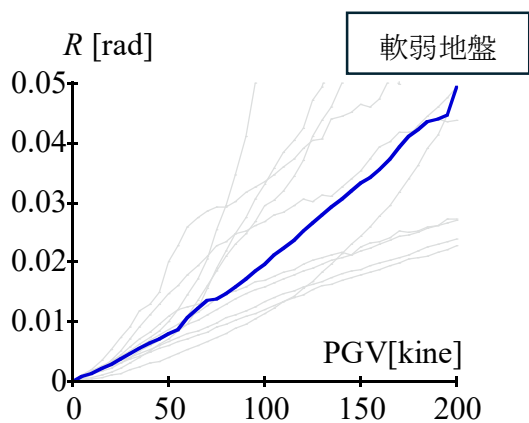


図 6(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.2$, 内陸直下型

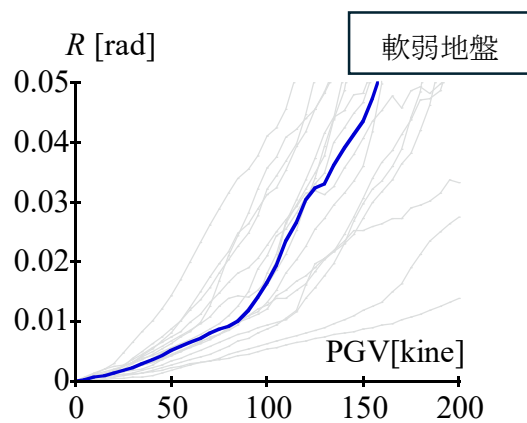


図 6(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.2$, プレート境界型

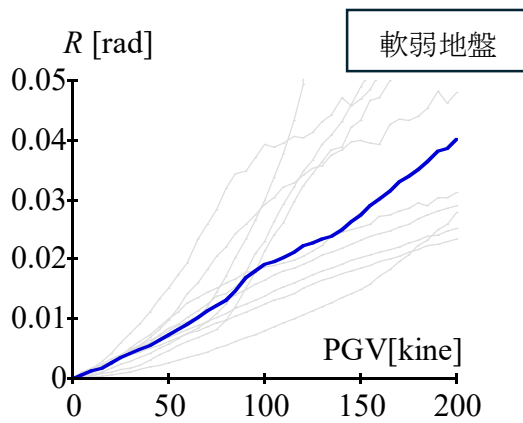


図 6(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.2$, 内陸直下型

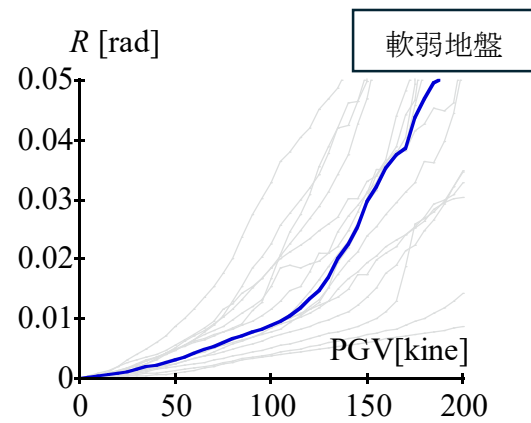


図 6(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.2$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.4 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

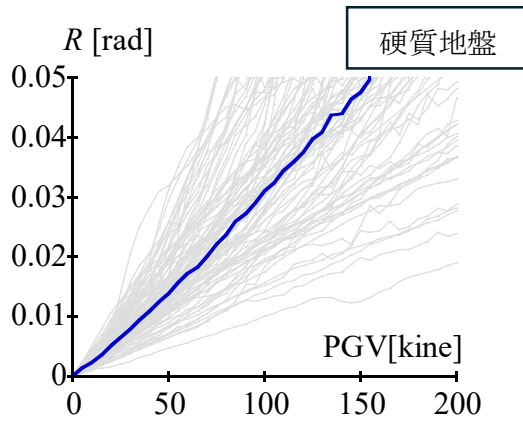


図 7(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

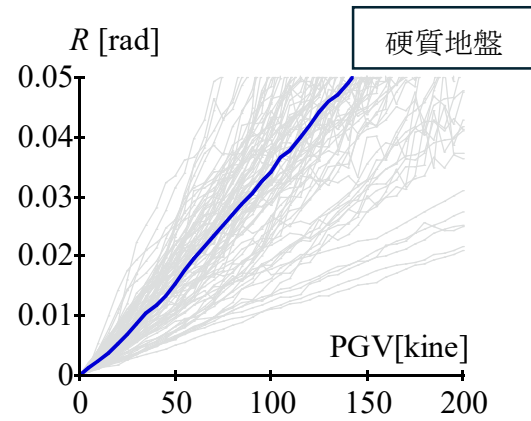


図 7(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

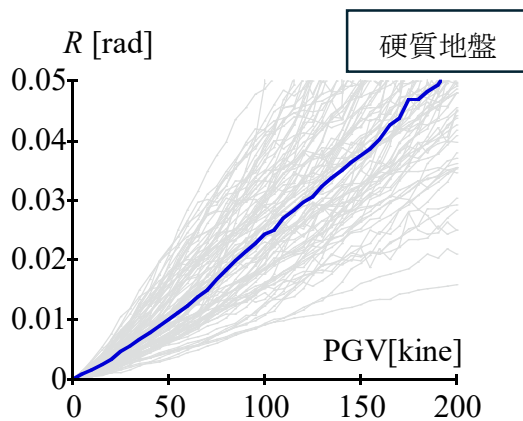


図 7(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

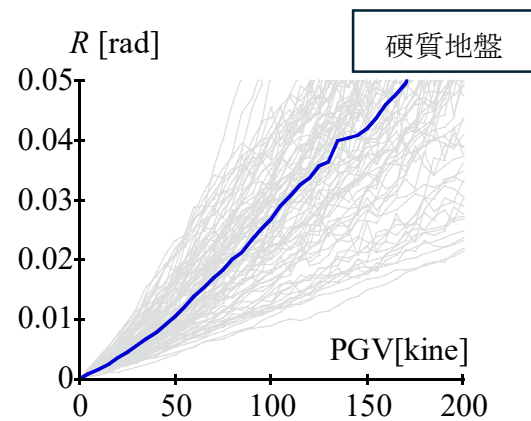


図 7(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

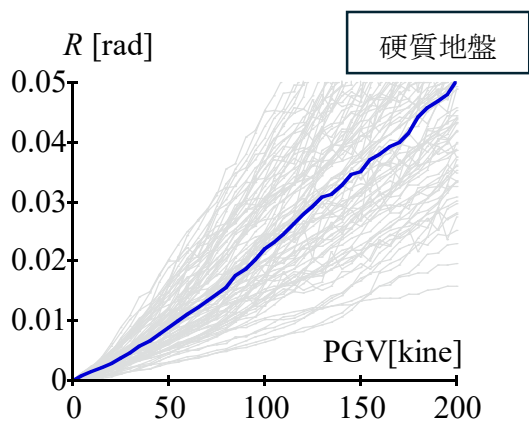


図 7(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

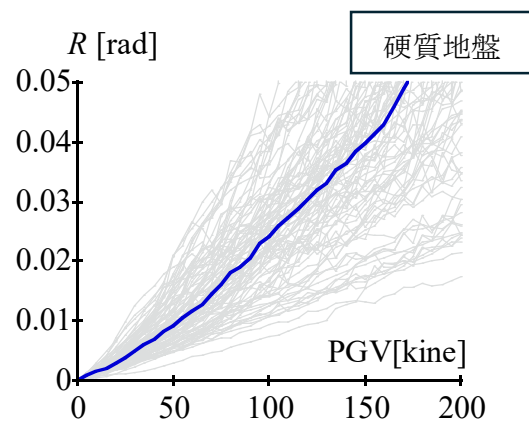


図 7(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.4 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

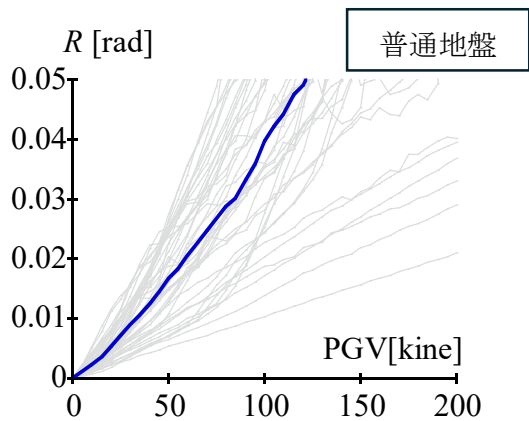


図 8(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

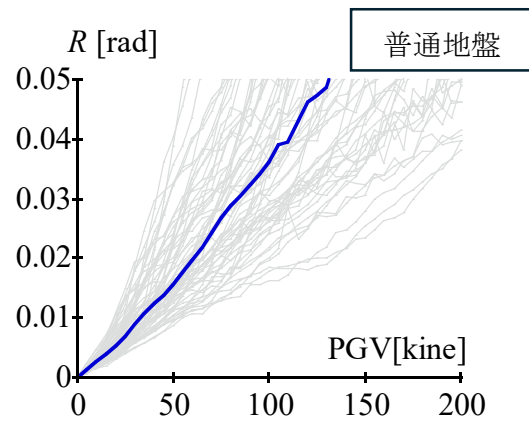


図 8(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

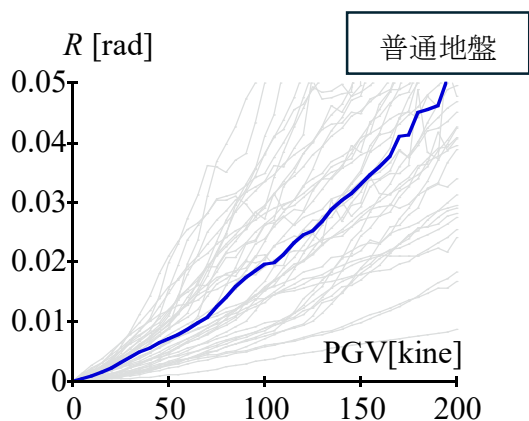


図 8(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

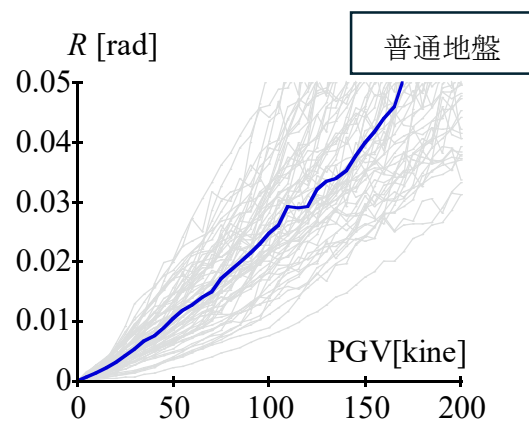


図 8(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

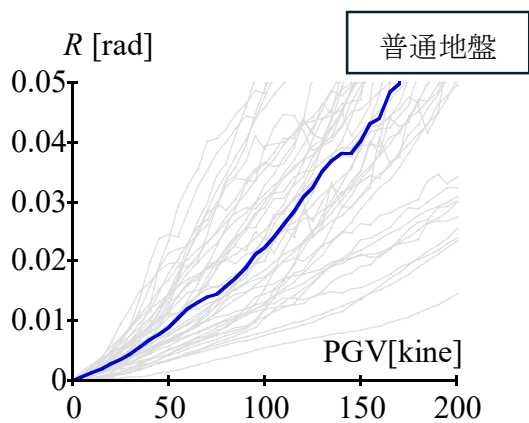


図 8(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

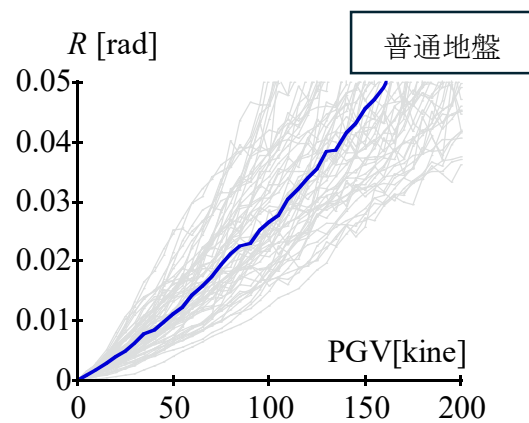


図 8(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.4 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

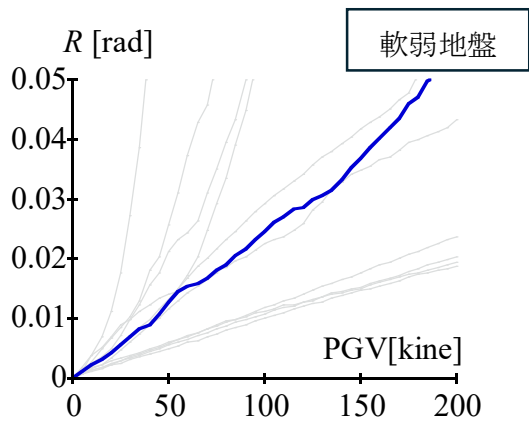


図 9(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

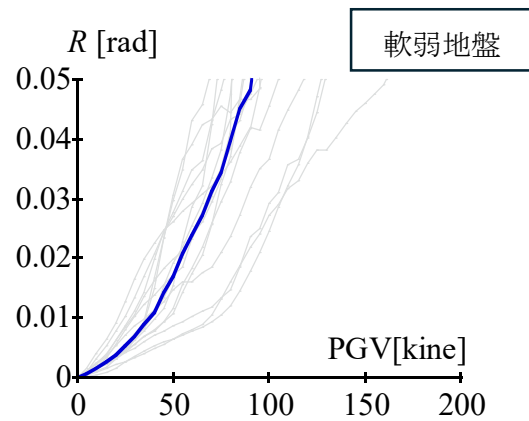


図 9(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

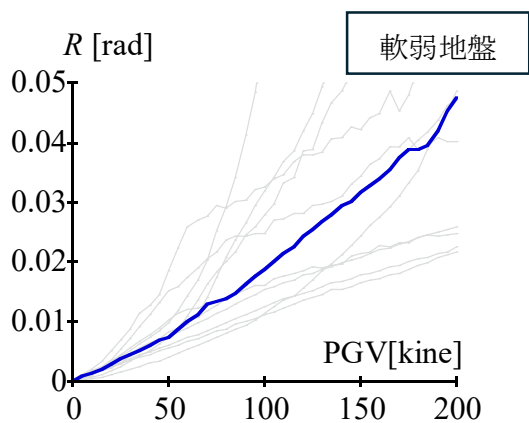


図 9(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

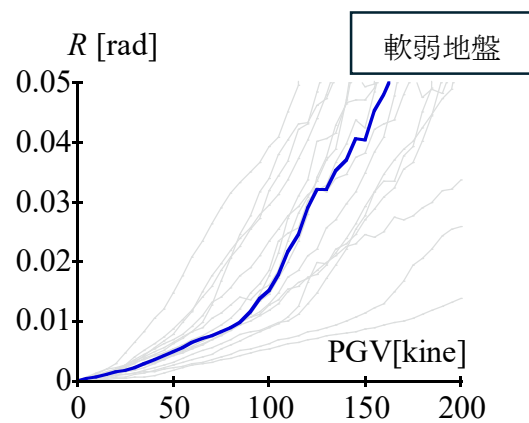


図 9(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

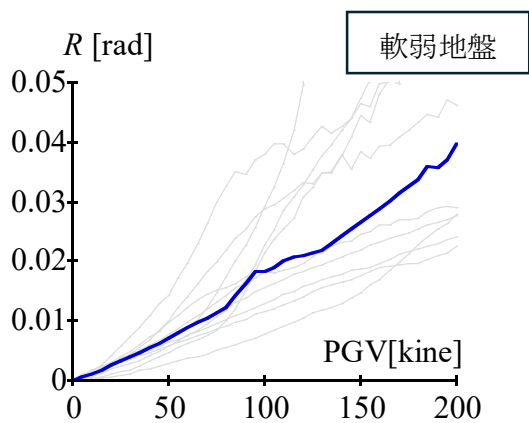


図 9(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.4$, 内陸直下型

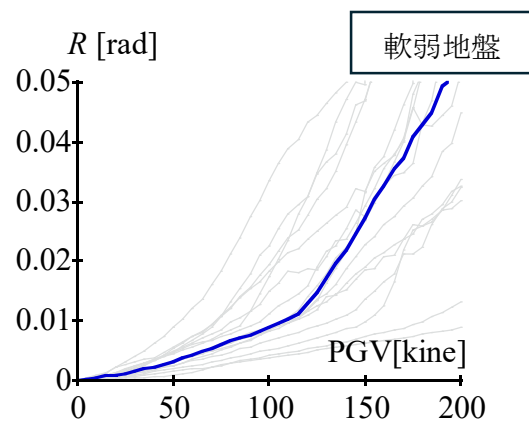


図 9(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.4$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.6（2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照）

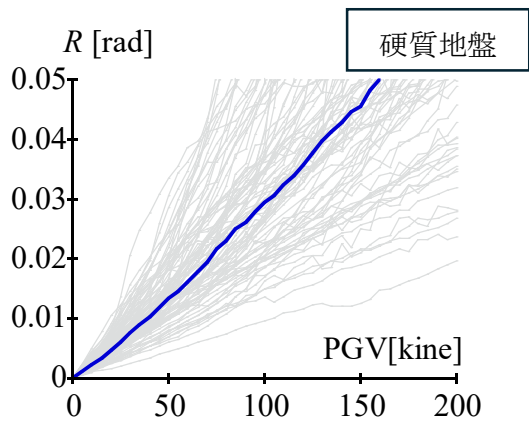


図 10(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

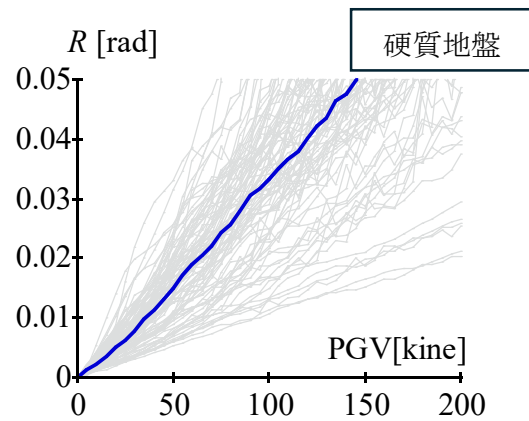


図 10(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

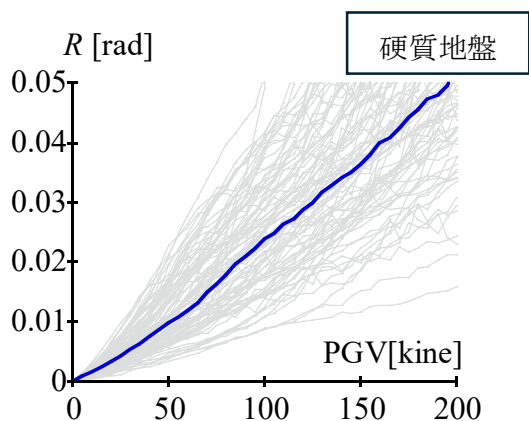


図 10(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

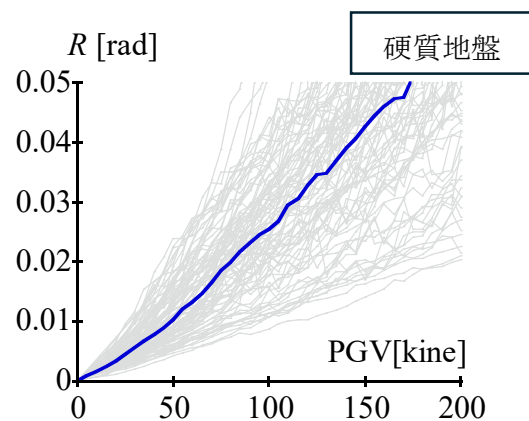


図 10(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

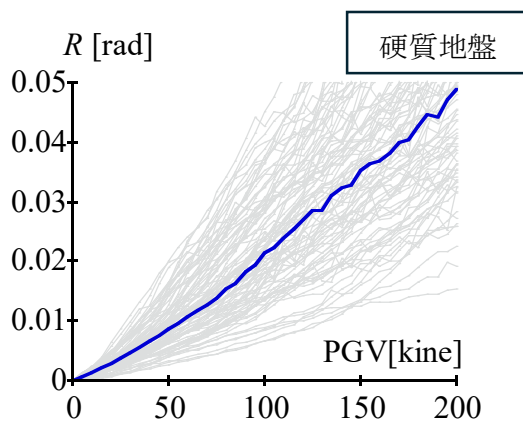


図 10(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

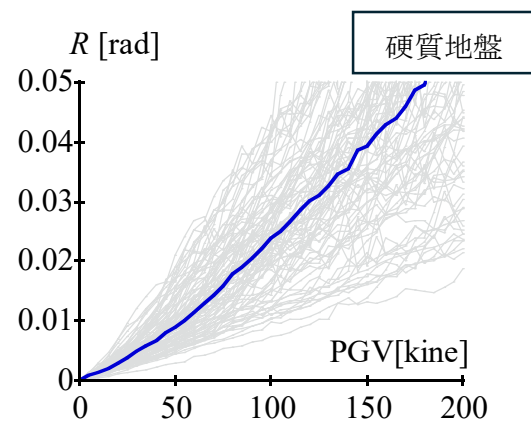


図 10(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.6 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

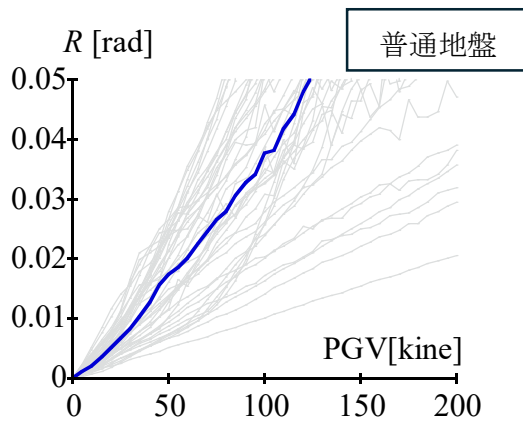


図 11(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

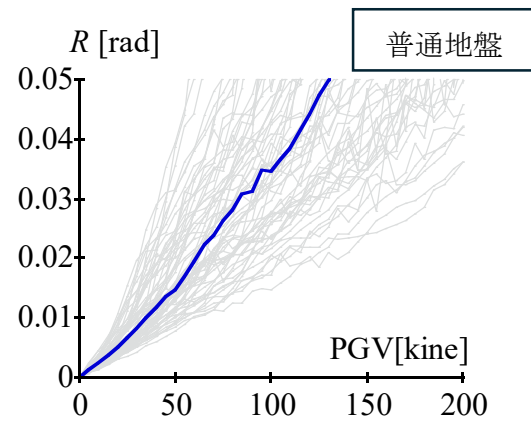


図 11(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

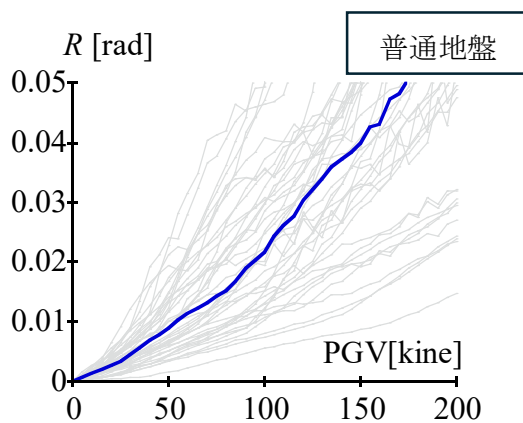


図 11(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

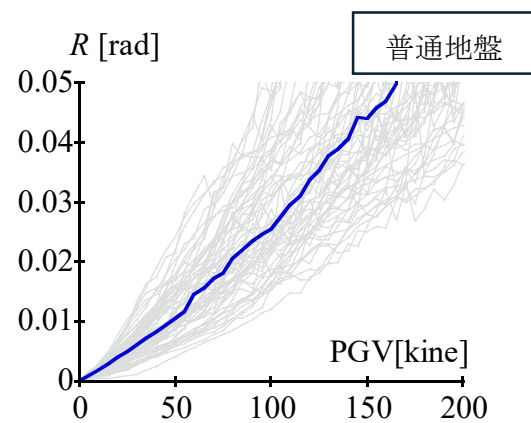


図 11(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

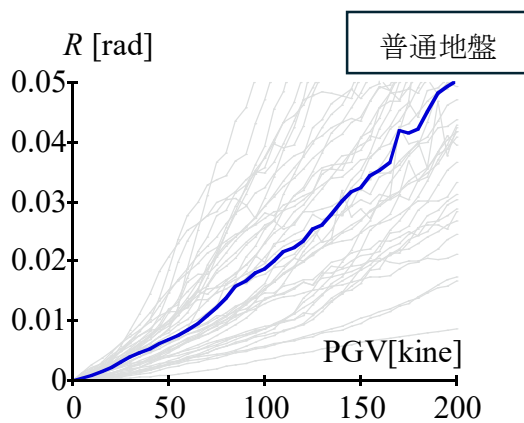


図 11(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

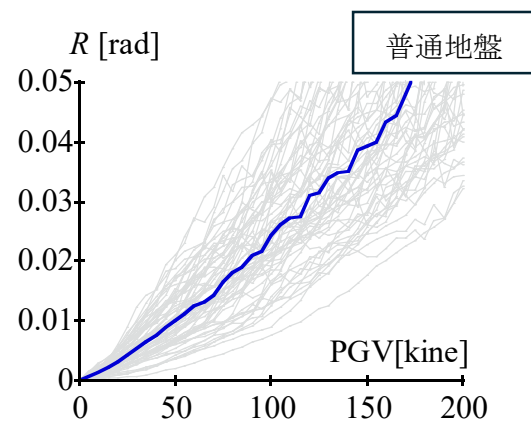


図 11(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.6（2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照）

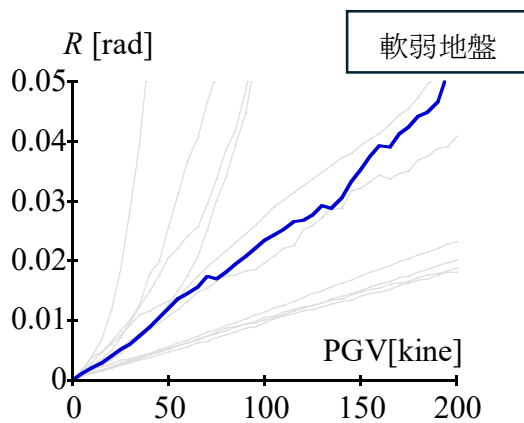


図 12(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

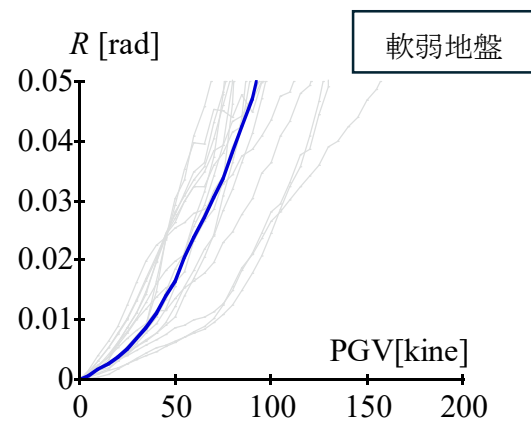


図 12(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

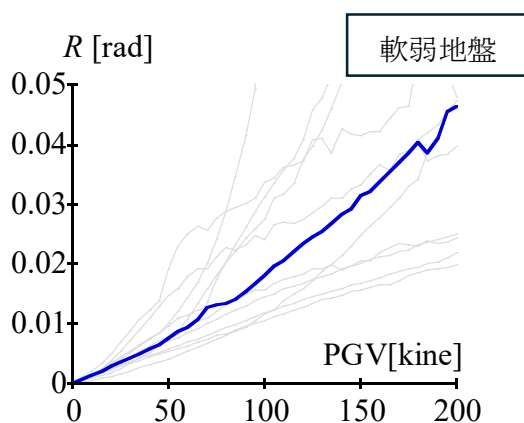


図 12(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

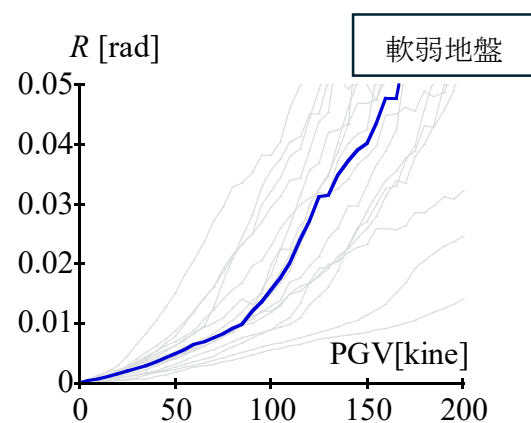


図 12(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

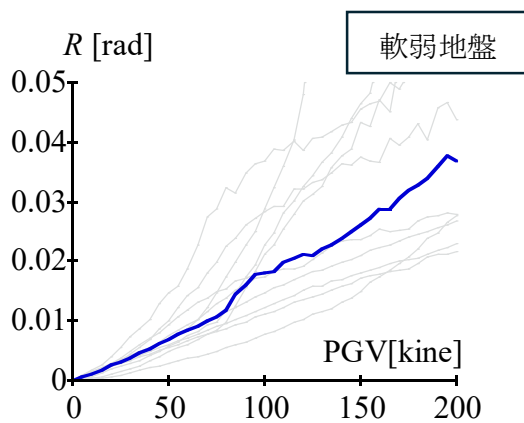


図 12(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.6$, 内陸直下型

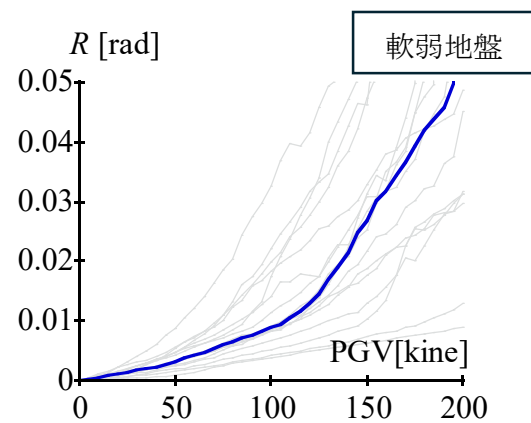


図 12(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.6$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.8（2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照）

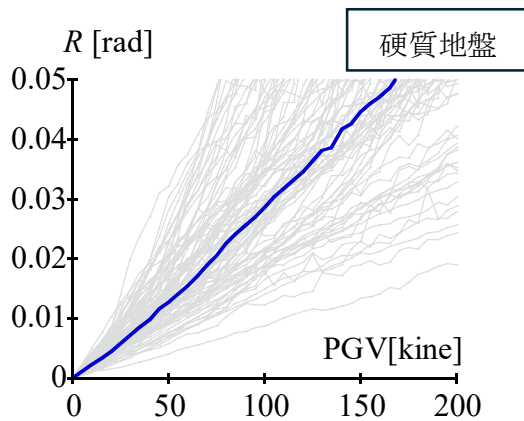


図 13(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

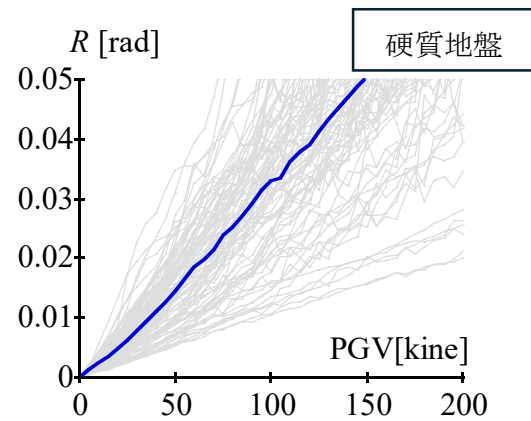


図 13(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

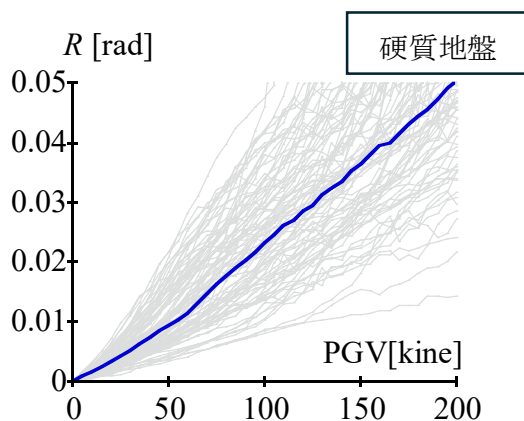


図 13(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

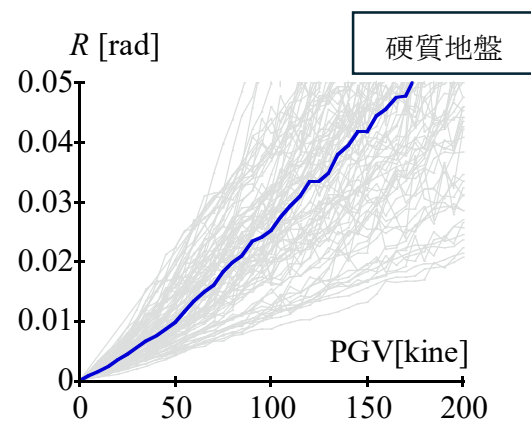


図 13(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

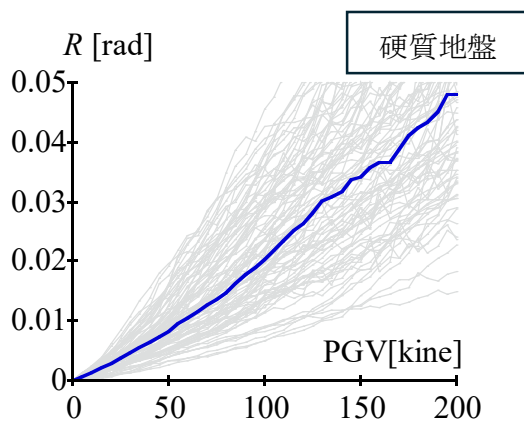


図 13(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

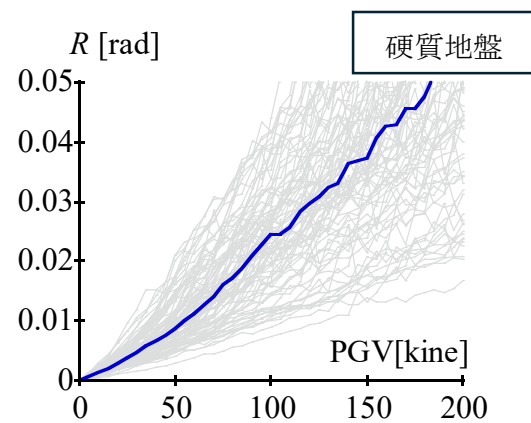


図 13(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.8（2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照）

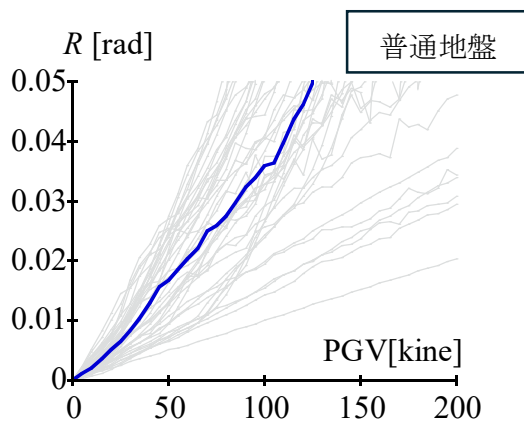


図 14(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

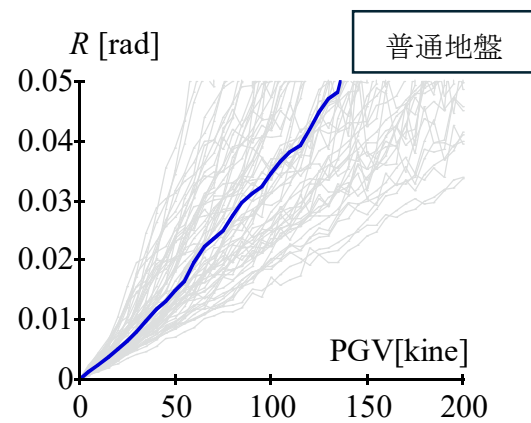


図 14(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

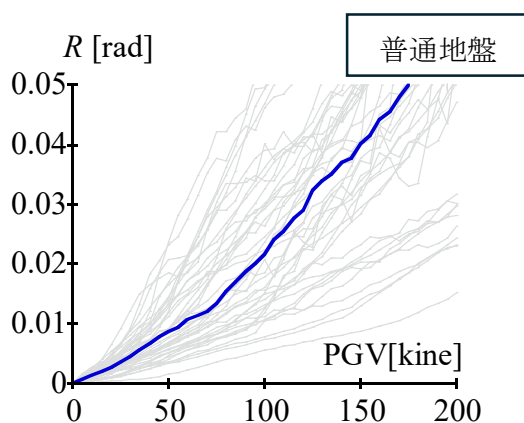


図 14(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

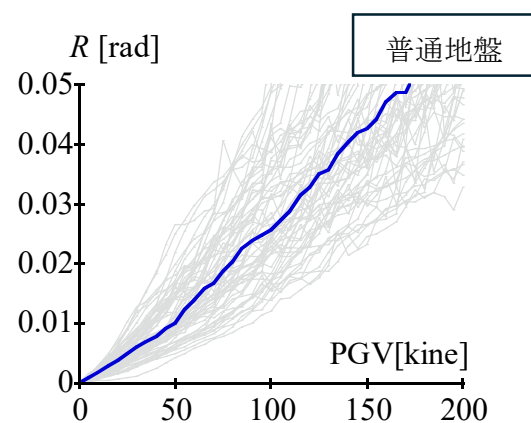


図 14(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

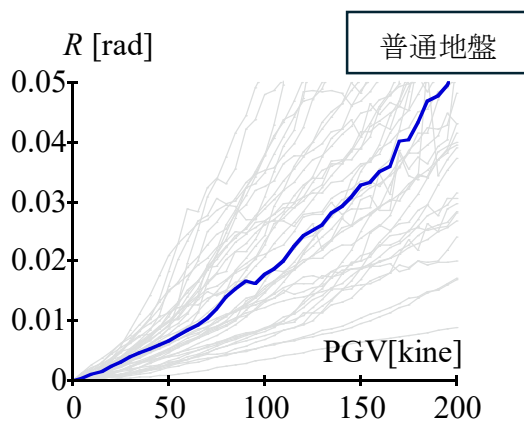


図 14(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

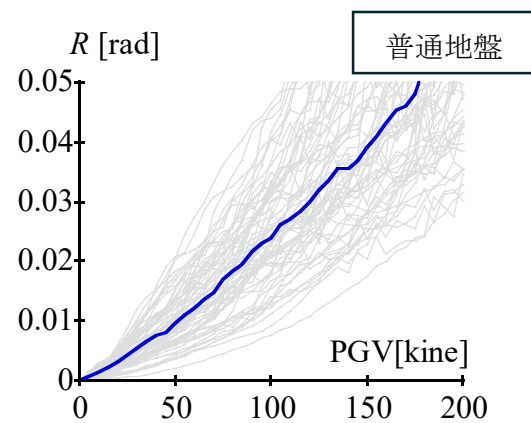


図 14(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

条件：建物形状係数 0.8（2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照）

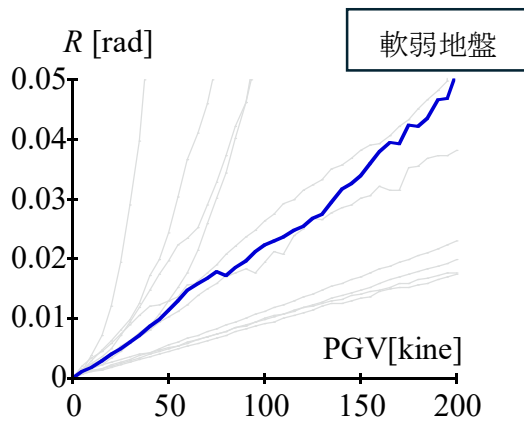


図 15(a) 1959 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

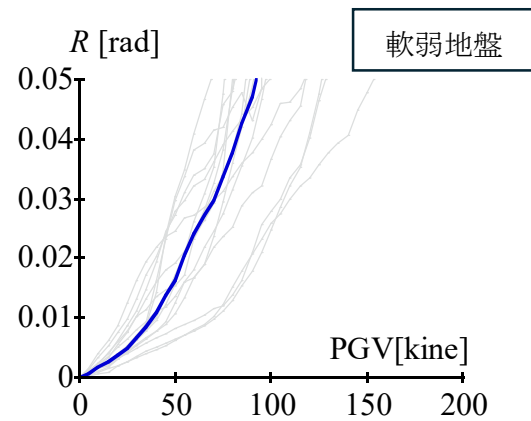


図 15(b) 1959 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

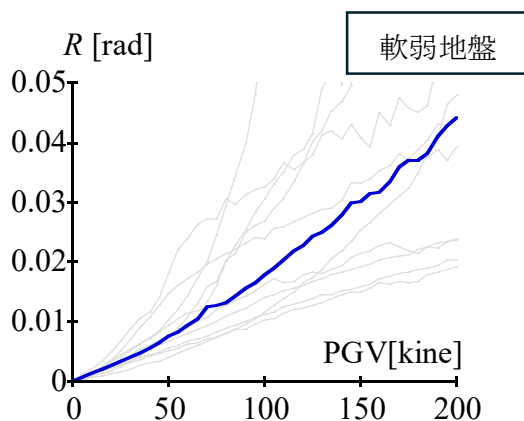


図 15(c) 1981 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

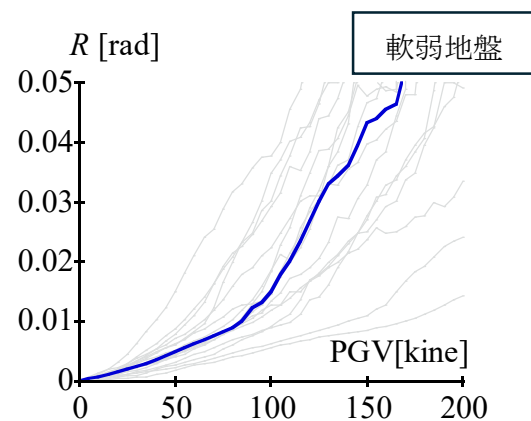


図 15(d) 1981 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

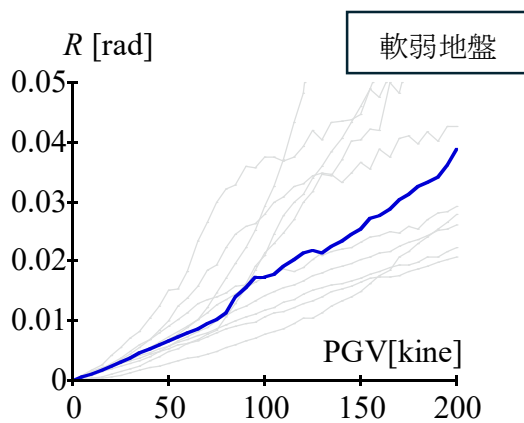


図 15(e) 2000 年基準, $A_{2F}=0.8$, 内陸直下型

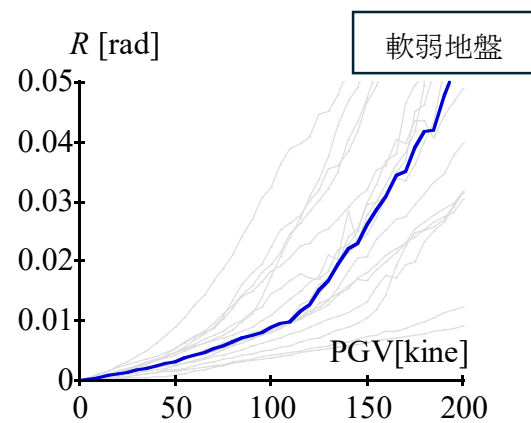


図 15(f) 2000 年基準, $A_{2F}=0.8$, プレート境界型

条件：建物形状係数 1.0 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

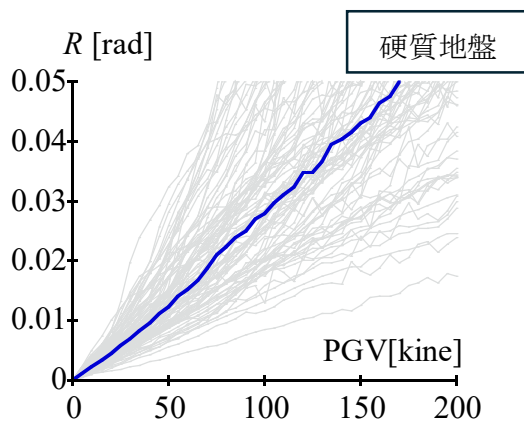


図 16(a) 1959 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

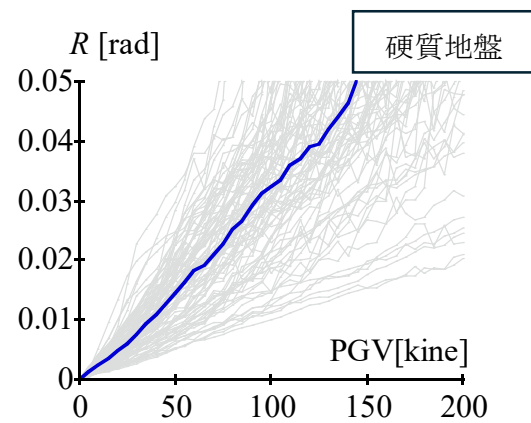


図 16(b) 1959 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

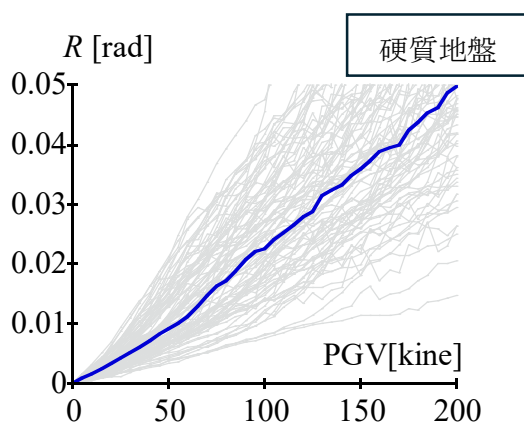


図 16(c) 1981 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

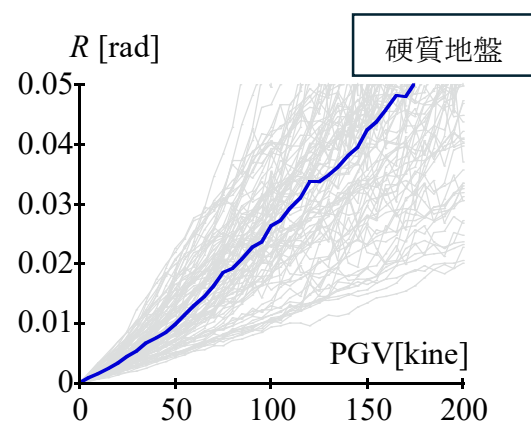


図 16(d) 1981 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

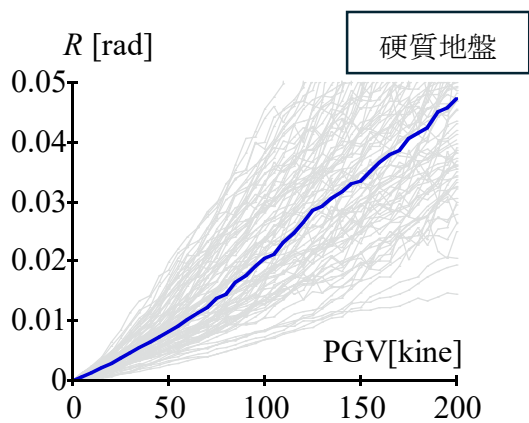


図 16(e) 2000 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

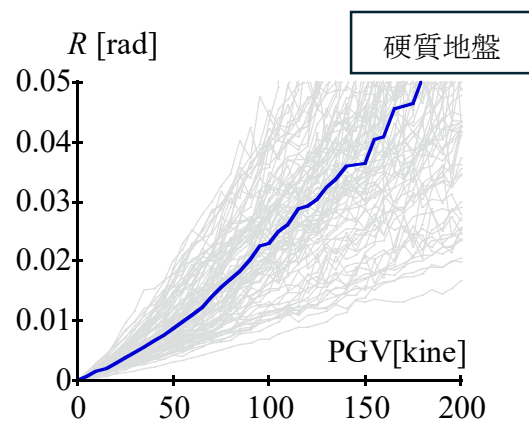


図 16(f) 2000 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

条件：建物形状係数 1.0 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

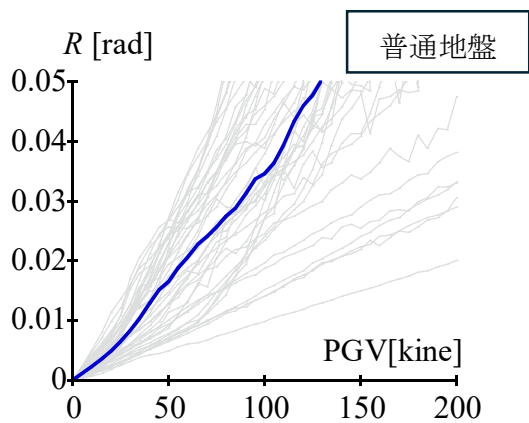


図 17(a) 1959 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

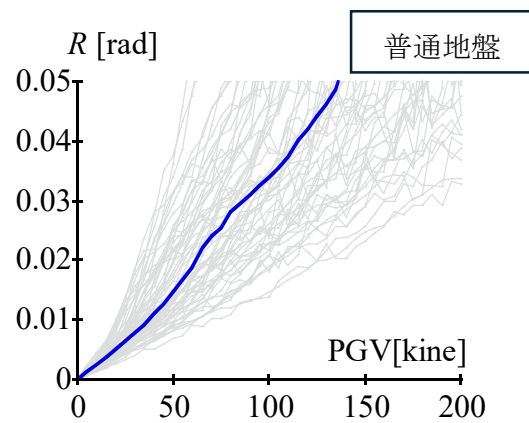


図 17(b) 1959 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

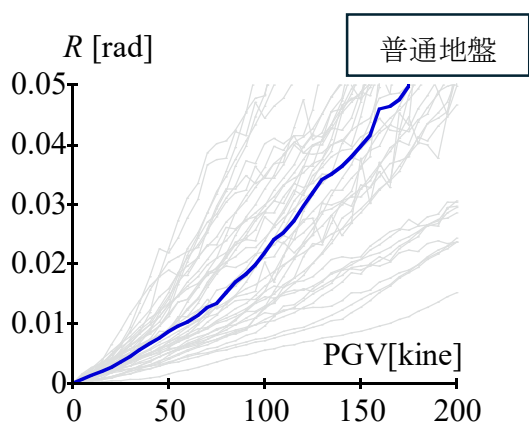


図 17(c) 1981 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

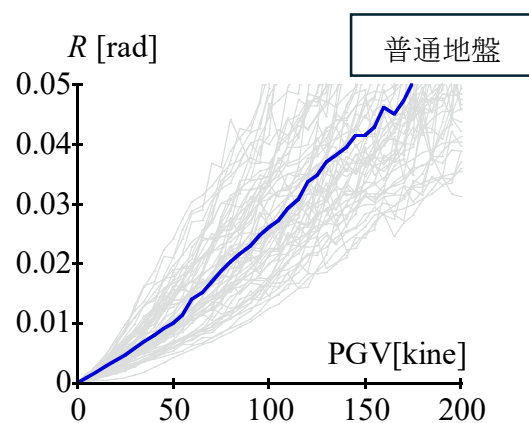


図 17(d) 1981 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

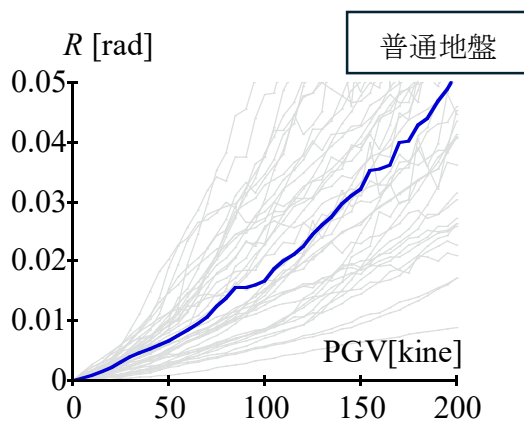


図 17(e) 2000 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

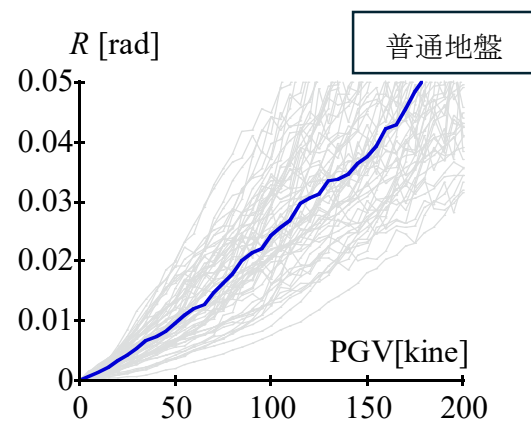


図 17(f) 2000 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

条件：建物形状係数 1.0 (2.2 節 建物のパラメータと復元力特性を参照)

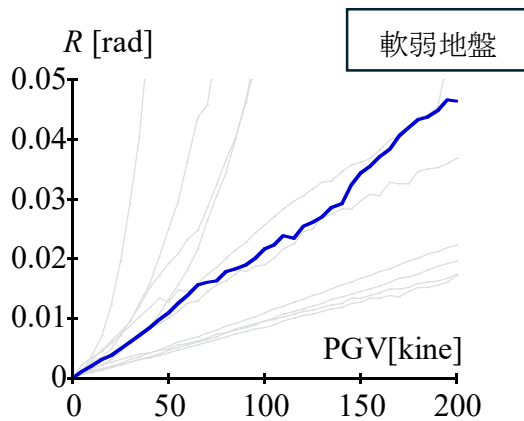


図 18(a) 1959 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

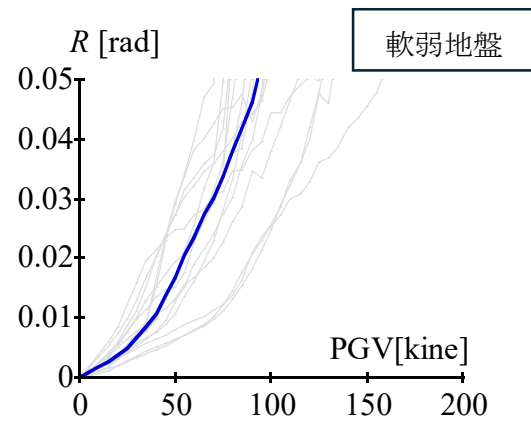


図 18(b) 1959 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

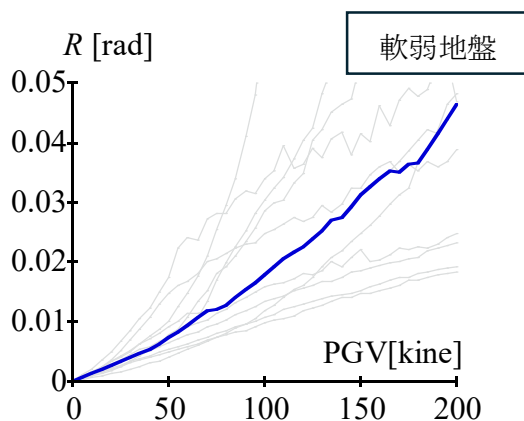


図 18(c) 1981 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

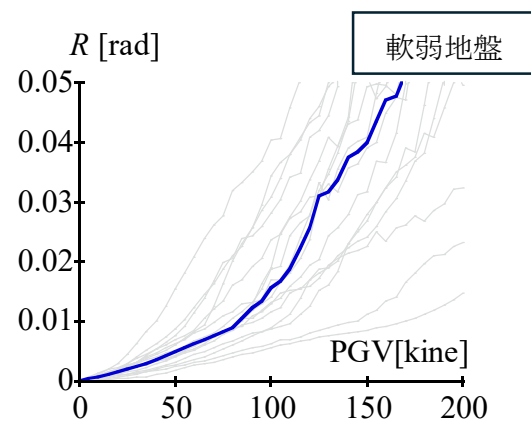


図 18(d) 1981 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

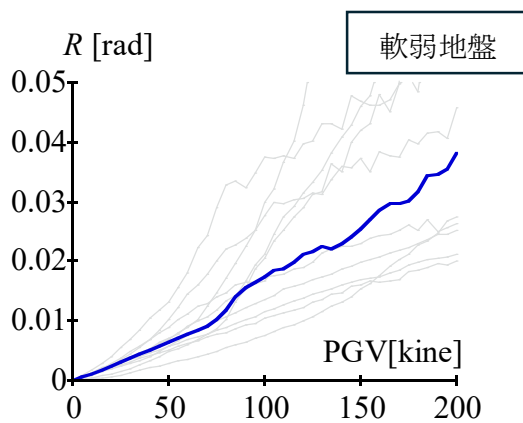


図 18(e) 2000 年基準, $A_{2F}=1.0$, 内陸直下型

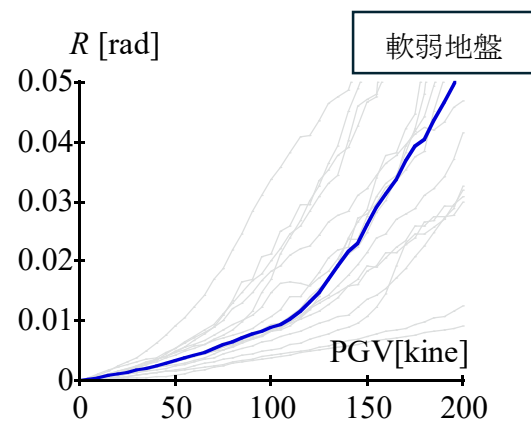


図 18(f) 2000 年基準, $A_{2F}=1.0$, プレート境界型

付録 4. 入力する PGV 分布

入力地震動に関しては本文と同様（4.章 クリギング法による最大地動速度分布を参照）の観測地震及び手法とし、豊橋市役所を基準に PGV を漸増させた 100kine 地震、70kine 地震、35kine 地震による地震被害推定を行う。図 19 に 100kine 地震及び 35kine 地震における PGV 分布を示す。（観測地震及び 70kine 地震に関してはそれぞれ 4.1.1.節，4.2.2.節を参照）

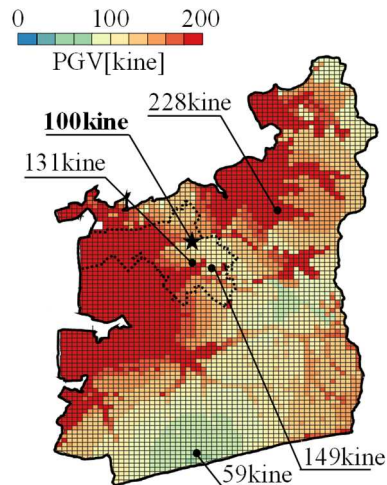


図 19(a) 100kine 地震における PGV 分布

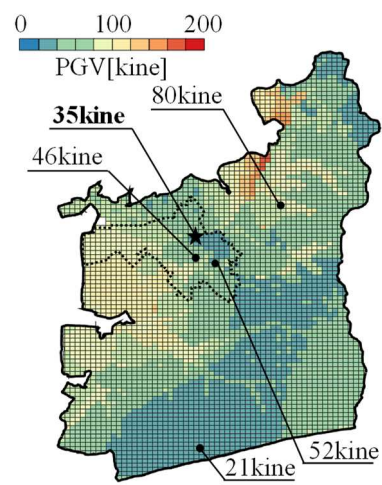


図 19(b) 35kine 地震における PGV 分布

付録 5. 建物の被害分布

建物の被害分布については、本文と同様に（4.2節 建物の被害分布を参照）層間変形角に着目して 100kine 地震における被害分布を図 20 に示す。なお、被害棟数の閾値として最大層間変形角が 3.3%を閾値とし、図 20(a)を豊橋市全域、図 20(b)に 12 校区を示す。

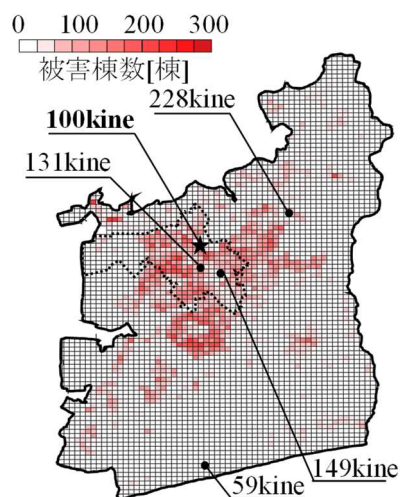


図 20(a) 100kine 地震における被害分布

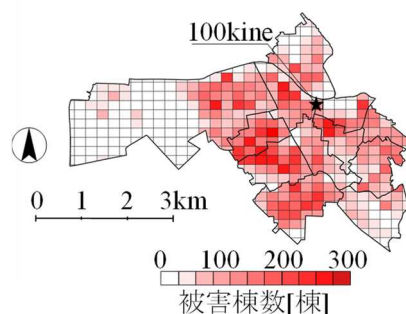


図 20(b) 100kine 地震における被害分布

次に 70kine 地震における被害分布を図 21 に示す。被害棟数の閾値は同様に、最大層間変形角が 3.3%を閾値とし、図 21(a)を豊橋市全域、図 21(b)に 12 校区を示す。

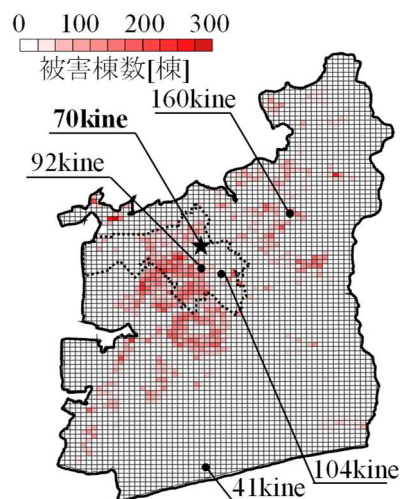


図 21(a) 70kine 地震における被害分布

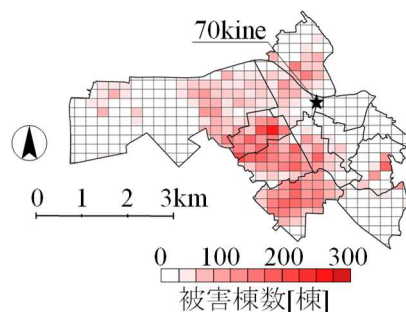


図 21(b) 70kine 地震における被害分布

最後に 35kine 地震における被害分布を図 21 に示す。被害棟数の閾値は同様に、最大層間変形角が 3.3%を閾値とし、図 22(a)を豊橋市全域、図 22(b)に 12 校区を示す。

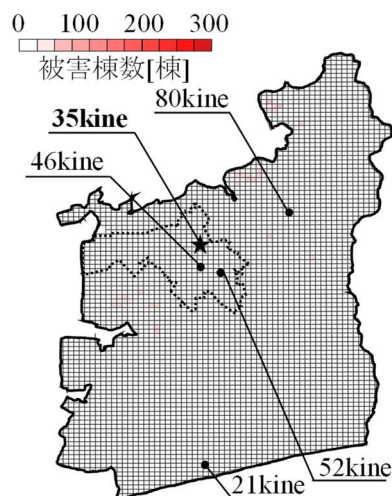


図 22(a) 35kine 地震における被害分布

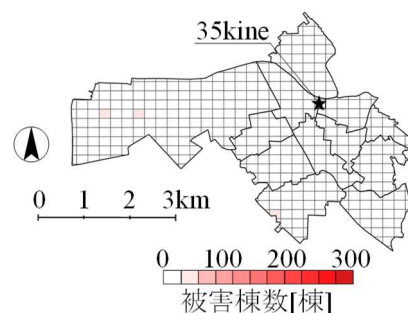


図 22(b) 35kine 地震における被害分布

上記に示す被害分布の結果より 35cm/s 地震では、ほぼ無被害といえる。次に 70cm/s 地震に着目すると、地盤を考慮しない場合における被害分布結果（5.1.2.節 被災者数の推定手法 図 15(c)を参照）と比較して、一部地域における建物被害が過小評価されている。考えられる要因として以下の図 23 に豊橋市における地盤分布を示す。

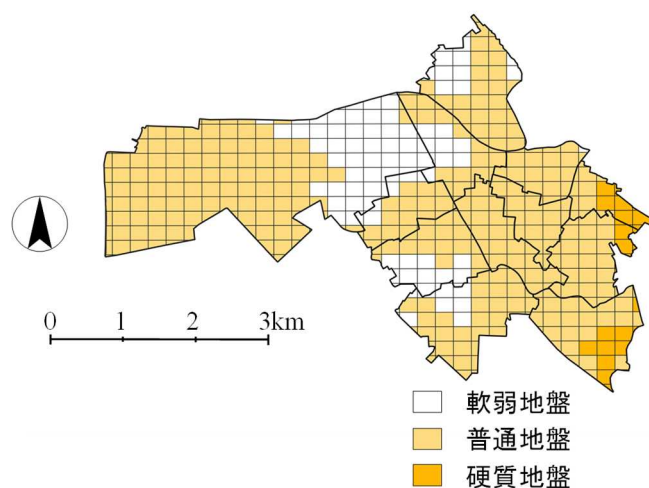


図 23 12 校区における地盤条件

図 23 の地盤条件より、12 校区における地盤条件では、大半が普通地盤に属し、東部の一部では硬質地盤、西部にかけて軟弱地盤となっている。

ここで、建物被害が過小評価されている地域は軟弱地盤に属している校区（5.1.1.節 検討対象とする校区及び避難所の収容人数）である。

要因として、軟弱地盤における IDA 曲線では、他の地盤条件と比較して、設定している地震波数に差があることが

要因と考えられる。そのため、軟弱地盤においても、ほかの地盤条件と同数程度の入力地震を用意する必要がある。なお、本検討における IDA 曲線では入力地震波における各々の解析結果から 50 パーセンタイル値を算出し、解析に採用していることから軟弱地盤以外の地盤においても入力地震波数をより増やすことで解析精度が向上すると考えられる。

謝辞

本研究は、東三河地域防災協議会による助成を受けて行いました。本論で使用した都市計画基礎調査は豊橋市役所、地震動に関する一部のデータは強震観測網（K-NET, KiK-net）より提供していただきました。

指導教員の齊藤大樹教授、仲田章太郎助教には、学部4年次からご助力いただき、多くのご指導を賜りました。ここに、心よりの感謝を申し上げます。

千葉大学の林和宏准教授には、研究を進めるに辺り数多くのご助言、ご指導を頂きました。ここに、心よりの感謝を申し上げます。

また、中澤祥二教授、松井智哉准教授、修士論文の予備審査で、本論をよりよい研究にするための様々なご意見を頂きました。ここに、厚くお礼申し上げます。

そして、地震災害工学研究室の皆様には、研究室での活動で大変お世話になりました。特に同じ研究グループの横屋翔殿、中村瞬殿、には、本研究を進めるに辺り、多くのご助力を頂きました。プロジェクト研究グループの別府幹久殿にも多くのご助力を頂きました。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1). Cabinet Office : SAIGAIKANRENSI NITUIITE,
<https://www.bousai.go.jp/taisaku/kyuujo/pdf/r01kaigi/siryo8.pdf>, 2024.8
内閣府：災害関連死について,
<https://www.bousai.go.jp/taisaku/kyuujo/pdf/r01kaigi/siryo8.pdf>, 2024.8
- 2). Tadashi, I. : Reasons and Hardships of Living out of a Car after the Kumamoto Earthquake, Journal of Sociological Society of West Japan, Vol.16, pp.5-22, 2018
稲月正：熊本地震における車中避難の選択避難と生活上の困難. 西日本社会学会年報, 第16巻, pp.5-22, 2018
(DOI : https://doi.org/10.32197/sswj.16.0_5)
- 3). Cabinet Office : HINANSEIKATUS NO KANKYOUHENKANITAIOUSITASIEEN NO JI SSINIKANSURU KENTOUKAITORIMATOME (HONBUN), pp.32-39,
<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/kentokai/hinanseikatsu/pdf/torimatome.pdf>, 2024.6
内閣府：避難生活の環境変化に対応した支援の実施に関する検討会 とりまとめ（本文）, pp.32-39,
<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/kentokai/hinanseikatsu/pdf/torimatome.pdf>, 2024.6
- 4). Hiroyuki, F., Hiromitsu, N., Ikuo, T., Shigeki, S., Atsushi, W., Shohei, N., Nobuyuki, M., Takahiro, M., Hiroki, A., Asako, I., Takashi, K., Wataru, S., Shin, A., Takuma, S., Kyoichi, A., Naokazu, M., Akihiro, K., Yoshinori, T. and Yoshinori, I. : Development of Real-time System for Earthquake Damage Information in Japan (J-RISQ), Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, No.432, pp.167-242, 2019.3
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,
第 432 号, pp.167-242, 2019.3

(DOI : <https://doi.org/10.24732/nied.00002209>)

- 5). Yasuhiro, M. and Hideki, I. : Upgrading Strategy of Wooden Houses and School Buildings Considering Risk of Overflow of Refugees - Case Study at Nagoya -, A study on decision-making tools for promoting aseismic reinforcement of old wooden houses(part3), Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.74, No.646, pp.2189-2197, 2009.12

森保宏, 井戸田秀樹:避難リスクを考慮した木造住宅と学校建物の耐震化戦略—名古屋を対象に一,
耐震改修促進のための意思決定支援ツールに関する研究(その3), 日本建築学会構造系論文集, 第 74
巻, 第 646 号, pp.2189-2197, 2009.12

(DOI : <https://doi.org/10.3130/aijs.74.2189>)

- 6). Yoshihiro, O., Koji, O., Noriaki, H. and Takuya, O.: Congestion Degree of Evacuation Shelters Under the Assumption of Tokyo Bay Northern Earthquake, Journal of Architecture and Planning, Vol.84, No.760, pp.1521-1530, 2019.6

大佛俊泰, 荻野光司, 廣川典昭, 沖拓弥: 想定東京湾北部地震時における避難所の混雑度について,
日本建築学会計画系論文集, 第 84 巻, 第 760 号, pp.1521-1530, 2019.6

(DOI : <https://doi.org/10.3130/aija.84.1521>)

- 7). Sho, Y., Kazuhiro, H. and Taiki, S.: Study on Earthquake Damage Estimation of Wooden Houses Using Basic Survey of City Planning Data, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.23, No.4, pp.1-23, 2023.6

横屋翔, 林和宏, 齊藤大樹: 都市計画基礎調査データを用いた木造住宅の地震被害推定に関する研究,
日本地震工学会論文集, 第 23 巻, 第 4 号, pp.1-23, 2023.6

(DOI : https://doi.org/10.5610/jaee.23.4_1)

- 8). Hiroyasu, S : MOKUZOUKENTIKUBUTU NO TAIRYOKU, NIHONBAN TATUMAKI SUKERU OYOBI HYOUKASHUHO NIKANSURU KENKYU HOUKOKUSHO, pp.48-55, 2014.1

坂田弘安: 木造建築物の耐力, 日本版竜巻スケールおよび評価手法に関する研究報告書, pp.48-55,
2014.1

- 9). Kahori, I., Hitoshi, M., Tsuyoshi, I., Muneco, H., Yoshihiro, Y., Hiroyasu, S., Susumu, O. and Akihiro, S. : A Study on Wooden House Modeling Applicable to a Large-Scale Seismic Response Analysis, Architectural Institute of Japan, Journal of Structural Engineering, Vol.64B, pp.47-54, 2018.3

飯山かほり, 盛川仁, 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, 日本建築学会, 構造工学論文集, Vol.64B, pp.47-54, 2018.3

- 10). Introduction of the Japan Building Disaster Prevention Association : Seismic Diagnosis and Reinforcement Methods for Wooden Houses (2012 Revised Edition), 1st Edition, pp.129, 2012.6
一般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（2012年改訂版），第1版，pp.129，2012.6
- 11). Hiroshi, I., Shigeru, H., Tatsuya, M., Osamu, F. and Chikahiro, M. : Collapse Mechanism of New Wood House Designed According with Minimum Seismic Provisions of Current Japan Building Standard Law, Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.72, No.618, pp.167-173, 2007.8
五十田博，平野茂，三宅辰哉，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，第72巻，第618号，pp.167-173，2007.8
(DOI : <https://doi.org/10.3130/aijs.72.167>)
- 12). Koji, Y. : A Study on Wall-length Ratio of Conventional Post and Beam Houses in Aichi Prefecture, Architectural Institute of Japan, Journal of Structural Engineering, Vol.46B, pp.181-188, 2000.3
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，日本建築学会，構造工学論文集，Vol.46B，pp.181-188，2000.3
- 13). Hiroshi, I., Naohito, K. : Hysteresis Model of Walls on Japanese Conventional Construction -Study on seismic behavior of wooden construction-, Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.72, No.616, pp.157-163, 2007.6
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，第72巻，第616号，pp.157-163，2007.6
(DOI : https://doi.org/10.3130/aijs.72.157_2)
- 14). Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A. : Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, No.3, pp.491-514, 2002.3
(DOI : <https://doi.org/10.1002/eqe.141>)
- 15). National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience : Strong-motion Seismograph Networks (K-NET, KiK-net), <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, 2024.8
国立研究開発法人防災科学技術研究所：強震観測網
(K-NET, KiK-net), <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, 2024.8
- 16). National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience : Japan Seismic Hazard information Station, <https://www.j-shis.bosai.go.jp>, 2024.8
国立研究開発法人防災科学技術研究所：地震ハザードステーション
<https://www.j-shis.bosai.go.jp>, 2024.8

- 17). Michiyo, S., Yasuhiro, M. and Katsuro, O. : Application of Kriging Method into Practical Estimations of Earthquake Ground Motion Hazards, Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.80, No.707, pp.39-46, 2015.1
菅井径世, 森保宏, 小川克郎 : クリギング法による地震動分布推定の実用化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 707 号, pp.39-46, 2015.1
(DOI : <https://doi.org/10.3130/aijs.80.39>)
- 18). Kazuo, F. and Saburoh, M. : Empirical Method for Estimating J.M.A. Instrumental Seismic Intensity from Ground Motion Parameters Using Strong Motion Records during Recent Major Earthquakes, Institute of Social Safety Science, No.7, pp.241-246, 2005.11
藤本一雄, 翠川三郎 : 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, 第 7 巻, pp.241-246, 2005.11
(DOI : <https://doi.org/10.11314/jisss.7.241>)
- 19). Toyohashi City : Toyohashi City Area Disaster Prevention Plan and Toyohashi City Flood Control Plan the Material Volume, pp.96-100, <https://www.city.toyohashi.lg.jp/7005.htm>, 2022.2
豊橋市 : 豊橋市地域防災計画 豊橋市水防計画資料編, pp.96-100,
<https://www.city.toyohashi.lg.jp/7005.htm>, 2022.2
- 20). Ryuji, K. and Mamoru, Y. : Factors in Promoting a return Home from the Shelter after an Earthquake - Case Study of Kumamoto Earthquake in 2016 -, Journal of the City Planning Institute of Japan, Vol.52, No.3, pp.1052-1059, 2017.10
柿本竜治, 吉田護 : 地震後の避難者の帰宅要因分析ー2016 年熊本地震を対象にしてー, 公益社団法人日本都市計画学会 都市計画論文集, 第 52 巻, 第 3 号, pp.1052-1059, 2017.10
(DOI : <https://doi.org/10.11361/journalcpj.52.1052>)
- 21). Tohoku Branch of the Society of Heating Air Conditioning and Sanitary : SAIGAI J I NIOKERU HINANJO NO INRYOSUI ETOIRE NO GAIDORAIN (KAITEIBAN) NO Q and A, pp.3-4,
<https://tohoku.shasej.org/manual.html>, 2018.5
空気調和・衛生工学会 東北支部 : 災害時における避難所の飲料水・トイレのガイドライン (改訂版) の Q and A, pp.3-4, <https://tohoku.shasej.org/manual.html>, 2018.5
- 22). Shotaro, N., Shuto, Y., Sho, Y., Kazuhiro, H. and Taiki, S. : Evaluation of Crowding in Shelter based on Basic Surveys Concerning City Planning, Urban planning, pp. 891-894, 2024.9
仲田章太郎, 山尾終人, 横屋翔, 林和宏, 齊藤大樹 : 都市計画基礎調査に基づいた被災時の避難所における混雑度推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 都市計画, pp. 891-894, 2024.9
- 23). Nobuhiko, T., Yukihiro, H. : Cluster Validity Measure Based on Voronoi Diagram, Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, Fuzzy System Symposium, Vol.35, pp. 431-436, 2019
津田暢彦, 濱砂幸裕 : ボロノイ図に基づくクラスタ分割の妥当性評価, 日本知能情報ファジィ学会, ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 第 35 巻, pp. 431-436, 2019
(DOI : https://doi.org/10.14864/fss.35.0_431)

- 24). Federal Emergency Management Agency: NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450) 2003 Edition part1: Provisions, 2004.
- 25). Saburoh, M., Yoshihiro, N : Estimation of VS30 from Shallow Velocity Profile, Journal of Japan Association Earthquake Engineering Vol. 15, No. 2, pp. 91-96, 2015
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, 第 15 巻, 第 2 号, pp. 91-96, 2015
(DOI : https://doi.org/10.5610/jaee.15.2_91)

