

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

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

This study discusses immediate estimation and seismic prevention focuses on overflow of evacuees. The findings from the study are summarized as follows overflowed evacuees were calculated in the Nankai Trough Earthquake. The building damage that would recommend home evacuation was indicated to avoid overflow of evacuees. Finally, the areas where are likely to overflow of evacuees were evaluated. In addition, seismic preventions suitable for those areas were proposed.

1. はじめに

2016年に発生した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。災害関連死が発生する一因として、地震被害による被災者が避難所の収容人数を上回ること（以下、被災者のあふれ）による車中泊が起因となるエコノミー症候群が挙げられる。

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-RISQがある。J-RISQでは、まず、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建物の被害を推定している。さらに、それらの地域メッシュにフラジリティカーブを適用することで、建物及び人的被害状況の分布を地域メッシュ単位で災害後即時に推定する手法を構築している。その他、災害時における被災者を推定する研究は活発に行われているが、いずれも過去に起きた地震被害に基づいて確率・統計により被災者数を評価している¹⁾。

これらの研究に対し本報告書では、木造住宅を対象として、都市計画基礎調査に基づき作成した解析モデルと漸増動的解析により、「個々」の建物に対して被害を評価する。また、その結果より被災者のあふれと防災対策を考察する。なお、本報告書では、地震による建物被害で避難する木造住宅（以下、建物）の居住者を“被災者”と呼ぶ。

2. 都市計画基礎調査を用いた解析モデル

都市計画基礎調査は、建物ごとの現況情報を保持したデータである。本報告書では、「構造形式」、「年代」、「階数」、「建築面積」、「延べ床面積」、「居住人数」を用いる。

次に、建物のパラメータと解析モデルについて説明する。解析対象の建物は、2階建て以下の木造住宅である。また、そのパラメータは、3種類の建築年代と6種類の建物形状を組み合わせた計18種類から構成される。具体的には、建築年代は、当時の耐震基準に基づき、「1959年基準」、「1981年基準」、「2000年基準」の3区分に大別する²⁾。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 α ）が0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0となるよう設定した。ここで、2階の床面積は、都市計画基礎調査の延べ床面積から建築面積を引いた値とする。

次いで解析モデルについて説明する。解析モデルは、多質点系せん断モデル（図1）である。また、各階における重量 W_{1F} , W_{2F} は、次式で示す³⁾。

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

ここで、(1)式における 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重量⁴⁾であり、表1にまとめる。1階の床面積 A_{1F} は $100m^2$, A_{2F} は A_{1F} に形状係数 α を乗じた値である。また、過去の地震による木造住宅の建物被害より、1階の建物被害が大きくなるため、本報告書では、1階の建物被害を検討対象とする。なお、建物高さ h は、文献3)と同様に2.8mと仮定した。

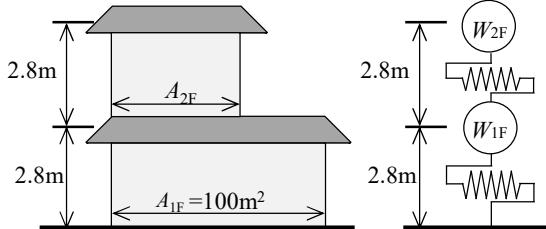


図1 解析モデルの概要

表1 床面積1m²あたりの重量⁴⁾ [kN/m²]

耐震基準	屋根 w_r	外壁 w_o	内壁 w_i	床 w_f	積載荷重 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		

表2 層せん断力係数と再現係数^{3), 5), 6)}

耐震基準	層せん断力係数 Ci		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	0.267	3.00
	2F 0.373	0.373	3.72
2000年基準	1F 0.337	0.337	3.00
	2F 0.471	0.471	3.72

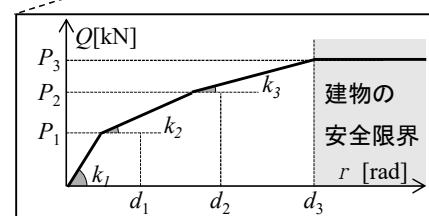
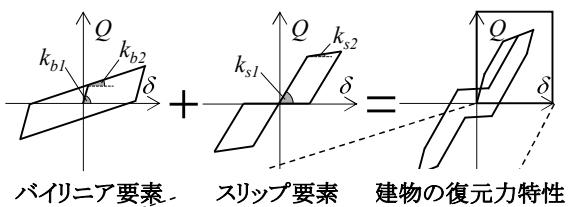


図2 解析モデルの復元力特性

解析モデルの復元力特性を図2に示す。図の横軸は1階の水平変位 δ_{IF} を1階の高さ h で除した層間変形角 r であり、縦軸は層せん断力 Q である。建物の復元力特性は、バイリニア要素とスリップ要素の並列ばねとしてモデル化した。また、降伏耐力 P_y は、次式で示す。

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

ここで、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る。本報告書では、安全側に評価するために C_i を“重い屋根”²⁾とした。一方、 β は、木造住宅の実験結果⁵⁾や広域被害推定に関する知見および木造住宅の実態調査⁶⁾に基づいた実被害を再現するための係数であり、本報告書では再現係数と呼ぶ。層せん断力係数 C_i と再現係数 β を表2にまとめる。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⁷⁾。

[第一折れ点]

$$\begin{aligned} k_1 &= 285.8 P_y / h \\ P_1 &= 0.2 P_y \\ d_1 &= 7 / 10000 h \end{aligned} \quad \dots \quad (3)$$

[第二折れ点]

$$\begin{aligned} k_2 &= 104.8 P_y / h \\ P_2 &= P_y \\ d_2 &= 1 / 120 h \end{aligned} \quad \dots \quad (4)$$

[第三折れ点]

$$\begin{aligned} k_3 &= 32 P_y / h \\ P_3 &= 1.8 P_y \\ d_3 &= 1 / 30 h \end{aligned} \quad \dots \quad (5)$$

なお、本報告書では建物の安全限界を $r = 3.3\%$ ⁷⁾とし、それ以降の剛性低下は考慮しない。

3. 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。漸増動的解析は、解析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、地震動強さに最大地動速度（以下、PGV）、建物応答に最大の層間変形角 $| \pm r_{max} |$ （以下、最大層間変形角 R ）を用いる。また、本解析では、全345種類の地震動を対象にNewmark β 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。なお、本解析では、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）を採用し、建物形状および建物年代の計18種類のパラメータに対して応答を評価した。IDA曲線を建物年代と建物形状に着目して図3に示す。図の縦軸は層間変形角 R 、横軸はPGVである。図中、灰色の線群はIDA曲線であり、色付きの線は50パーセンタイル曲線である。また、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。さらに、図3(a)は形状係数が0.6、図3(b)は建物1981年基準の例である。

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、最大層間変形角は概ね単調に増加し

ている。建物年代に着目したIDA曲線を見ると、1981年基準と2000年基準のIDA曲線の傾きは同程度だった。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。つまり、同一の建物形状において、IDA曲線は建物年代が古くなるほど最大層間変形角は大きくなり、建物年代が最大層間変形角に及ぼす影響が大きい。

4. 被災者数の推定

4.1. グリッド内における建物被害

本章では、都市計画基礎調査を用いた解析モデル（2章）およびIDA曲線（3章）を用いて被災者数の推定を行う。本報告書では、図4に示す愛知県豊橋市の12校区を対象とする。その人口と避難所の収容人数⁸⁾を表3に示す。なお、本報告書では、人口に木造住宅の居住人数、収容人数に小学校に併設される第一指定避難所（公民館）、と第二

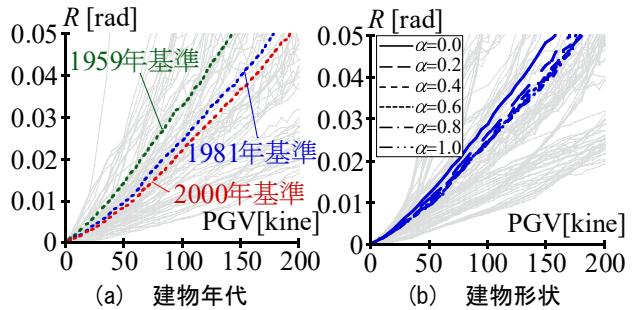


図3 建物の年代と形状に着目したIDA曲線

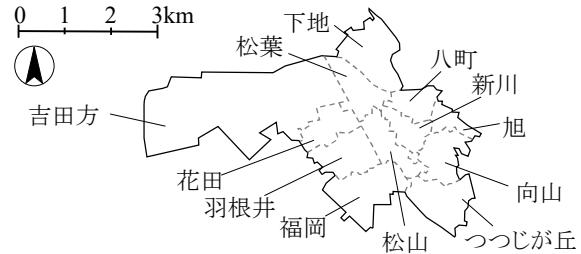


図4 検討対象の校区

表3 対象となる校区の人口と収容人数⁸⁾

校区	人口 [人]	避難所の収容人数 [人]		
		木造住宅	第一指定 避難所	第二指定 避難所
吉田方校区	10038	93	3165	3258
松葉校区	3193	94	1081	1175
下地校区	3824	105	2014	2119
花田校区	3719	99	2929	3028
羽根井校区	3971	70	1070	1140
松山校区	1642	85	1434	1519
新川校区	1847	85	2290	2375
八町校区	1822	79	2451	2530
旭校区	2647	88	2760	2848
向山校区	4150	114	2894	3008
つつじが丘 校区	4765	79	1355	1434
福岡校区	6460	105	3261	3366

指定避難所（小学校、中学校）の合計値を用いる。また、入力地震動については、全ての校区に“同一”的 PGV を用いる。つまり、PGV 分布の影響を考慮しないことで、建物の耐震性能に着目した被災者数の推定を行う。

まず、PGV が 100kine の地震を一例として、吉田方校区におけるグリッド内の個々の建物に着目した被害状況を図 5(a)に示す。図の横軸は建物を年代別に整理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 R 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 $R_a=2.0\%$ の一例を示す。

当該グリッドでは、全ての建物は層間変形角が 2.0% を超えている。建物の年代が古い 1959 年基準の建物をみると、他の年代の建物と比較して層間変形角が大きい。一方、2000 年基準では、層間変形角が小さい。つまり、建物の層間変形角は、建物の年代が影響していると言える。(図 3(a))

4.2. 校区ごとの混雑状況

次いで、校区ごとに被災者のあふれを図 5(b)にまとめる。図の横軸は校区の種類、縦軸は人数である。図中、白色の棒グラフで被災者数 N 、黒色の棒グラフで避難所の収容人数 C を表す。つまり、白色の棒グラフが黒色の棒グラフを上回れば、避難所から被災者があふれ、混雑する。ここで、被災者数は、避難時変形角を上回った建物（図 5(a)中、一点鎖線より上）の居住者の合計値である。

新川、八町、旭校区を除く 9 校区で白色の棒グラフが黒色の棒グラフを上回り、被災者のあふれが予想される。そ

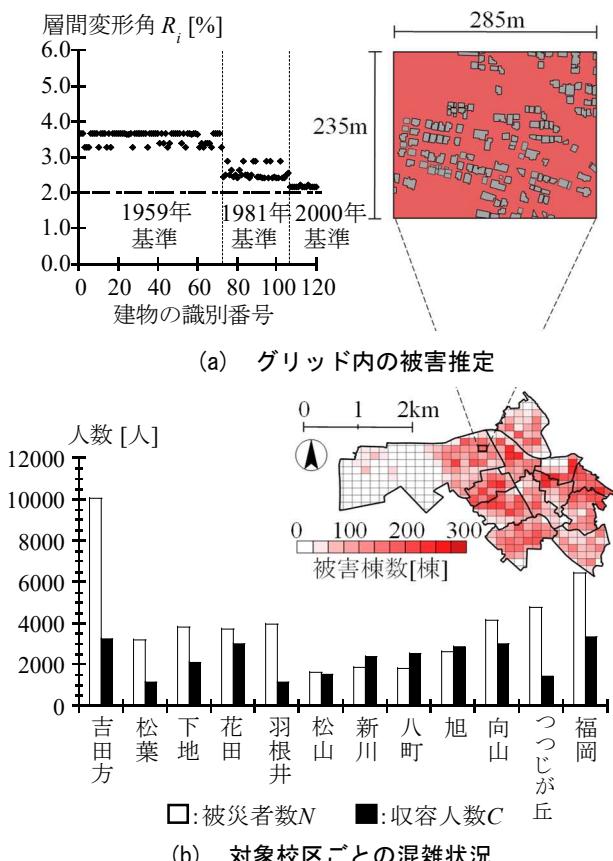


図 5 PGV が 100kine の地震における避難所の混雑状況

の差は、最大で吉田方校区が +6780 人、次いでつつじが丘校区で +3310 人であり、その合計は、+21715 人となる。一方、新川、八町、旭校区をみると、黒色の棒グラフが白色の棒グラフを上回り、避難所に余裕がある状況であり、その合計は -1437 人となる。したがって、あふれが予想される避難所の被災者を、余裕がみられる避難所に分散避難させても被災者のあふれを回避できない。

5. 被災者のあふれに関する防災対策

5.1. 耐震性能に着目したあふれ回避変形角

ここでは、被災者のあふれを回避するための防災対策について検討する。まず、吉田方校区を例として、避難時変形角の漸増解析結果を図 6 に示す。図の横軸は避難時変形角 R_a であり、縦軸は被災者数に対する収容人数の比 N/C である。図中、線種により、PGV の大きさを区別している。また、水平の破線は、 $N/C = 1.0$ 、つまり、被災者があふれる閾値である。

PGV が 50kine の地震に着目すると、避難時変形角が 0.7%まで横ばいとなり、これを境に減少する。また、避難時変形角が 1.0%以降で、 N/C は、1.0 以下となった。したがって、PGV が 50kine の地震では、層間変形角が約 1.0% 以上となる居住者のみを避難所の避難対象とすれば、被災者のあふれを回避することができる。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回避するための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。また、地震の PGV が大きくなるほど、あふれ回避変形角は、概ね比例して増加している。たとえば、PGV が 50kine の地震で約 1.0%，100kine の地震で約 2.5%，150kine の地震で約 4.0%，200kine の地震で約 6.0% となる。

これを踏まえ、あふれ回避変形角の漸増解析結果を吉田方および新川校区を例として図 7 に示す。図の横軸は PGV であり、縦軸は PGV に応じたあふれ回避変形角 R_b である。図中、水平の点一点鎖線は、木造住宅における安全

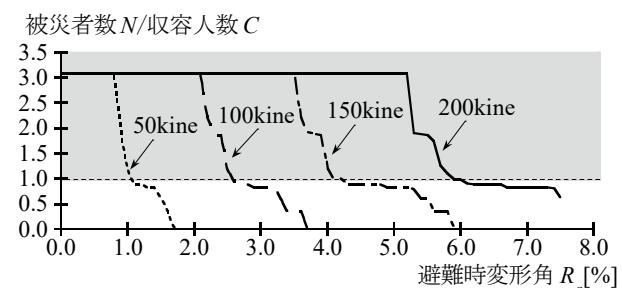


図 6 避難時変形角の漸増解析

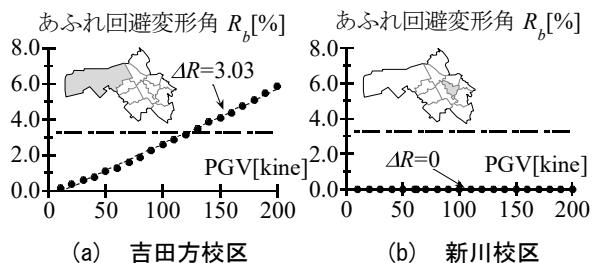


図 7 あふれ回避変形角の漸増解析結果

限界の $R=3.3\%$ を示しており、破線は、解析結果に最小二乗法を用いて算出した傾き ΔR である。

吉田方校区をみると、PGV が大きくなるほど、あふれ回避変形角は、直線的に増加する。一方、新川校区をみると、あふれ回避変形角は常にゼロとなった。

次いで、本解析結果の使用例を説明する。たとえば、吉田方校区をみると、PGV が 50kine の地震が発生した場合、建物の最大層間変形角が 1.1%以上となった居住者のみを避難の対象として被災者のあふれを回避することができる。一方、PGV の大きさが 130kine 以上の地震が発生した場合、あふれ回避変形角は、木造住宅における安全限界の $R=3.3\%$ を超えるため、被災者のあふれが回避できないことが予想される。

5.2. あふれ回避変形角の評価

あふれ回避変形角 ΔR は、大きいほど被災者があふれやすい地域であることを意味する。これを踏まえ、 ΔR により、被災者があふれやすい地域を評価する。 ΔR を校区の種類ごとに図 8 に示す。また、収容人数に対する木造住宅の居住人口を図 9 に、建物の年代別割合を図 10 に示す。

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、旭校区をみると ΔR はゼロとなる。これは、 P_w/C (図 9) が 1.0 以下となり、木造住宅の居住人数が収容人数を下回ったためである。また、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対し、 P_w/C は吉田方校区のほうが大きい。この一因として、 ΔR は、建築年代の建物分布に影響しているためである。具体的には、建物の年代別割合 (図 10) をみると、向山校区は、つつじが丘校区よりも建築年代が古い (図 3、地震による被害を受けやすい) 建物が多い。

以上を踏まえ、図 8、図 9、図 10 を用いることで、対象校区ごとに被災者のあふれに関する効率的な防災対策を提案できる。たとえば、松葉校区では、 P_w/C と比較して ΔR が大きいため、建物被害を低減する必要があり、建物の耐震補強を推進する必要がある。一方、吉田方や羽根井校区では、 ΔR 、 P_w/C が共に大きくなっていることから、建物の耐震補強を普及よりも、収容人数の増加が被災者のあふれを効率的に回避できる。

6. まとめ

本報告書では、愛知県豊橋市の 12 校区を対象に、地震による木造住宅の建物被害に着目した避難所の混雑状況と、被災者のあふれに関する防災対策について検討した。本検討により得られた知見を以下にまとめる。

- [1] 都市計画基礎調査に基づいた建物モデルを作成し、層間変形角を閾値としたメッシュごとの建物の被害棟数を推定した。
- [2] 建物の被害棟数及び居住人数より、避難所の混雑度合を推定した。
- [3] 避難所の混雑度における限界点であるあふれ回避変形角の傾きにより、避難所が混雑しやすい地域を評価した。

参考文献

- 1). 森、井戸田：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－名古屋市を対象に－、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 卷、第 646 号、pp.2189-2197、2009.12
- 2). 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
- 3). 飯山他：都市の地震応答シミュレーションのための木造建築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
- 4). 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
- 5). 五十田他：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 卷、第 618 号、pp.167-173、2007.8
- 6). 山田：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
- 7). 五十田、河合：木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル－木造建築物の地震時挙動に関する研究－、日本建築学会構造系論文集、第 72 卷、第 616 号、pp.157-163、2007.6
- 8). 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、2022.2

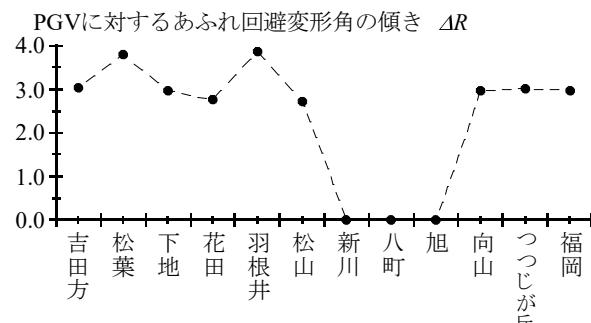


図 8 あふれ回避変形角の評価

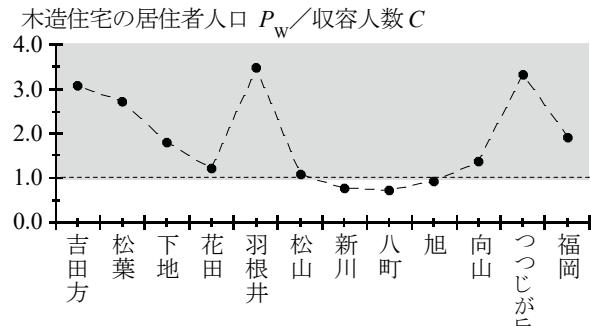


図 9 校区の収容人数に対する木造住宅の居住人数

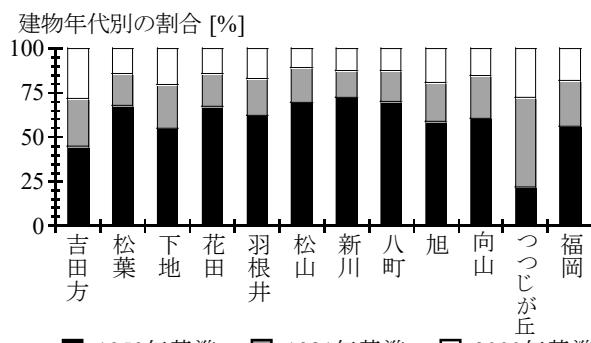


図 10 建物の年代別割合