

## 観測情報に基づく建物倒壊確率を考慮した津波避難シミュレーション

### Tsunami Evacuation Simulation Considering the Building Collapse Probability Based on the Observed Data

伊藤恵理・川瀬博・畑山満則・長嶋史明

Eri ITO, Hiroshi KAWASE, Michinori HATAYAMA and Fumiaki NAGASHIMA

#### Synopsis

Tsunami evacuation simulation is important to take measures for reducing human loss effectively from earthquakes and subsequent tsunamis. However, so far there has been no simulation case studies in which the building damage is estimated using the up-to-date knowledge of earthquake engineering. We first identified the underground structures and the vibration characteristics of wooden houses in the target area, a fishing village in Wakayama Prefecture, based on the microtremor observations on the ground as well as inside the houses. Then we predicted the building damage by using the nonlinear response analysis for specifically tuned structural models, together with the strong ground motions estimated in detail by using the obtained underground structure models. After that we simulated the situation of tsunami evacuation considering road blockade due to collapsed buildings. Based on the results we found that we need a well-designed plan for smooth evacuation considering the detailed situation of the target area.

**キーワード:** 強震動予測, 耐震化, 建物被害, 津波避難シミュレーション, エージェントベースシミュレーション, 避難計画

**Keywords:** strong motion estimation, earthquake-resistant building, building damage, tsunami evacuation, agent-based simulation, evacuation planning

#### 1. 研究の背景と目的

南海トラフ沿いのプレート境界を震源とする地震の発生が危惧されていることから、その対策を講じることが急務となっているが、各自治体でその対策は思うようには進んでいない。具体的な対策を立案する上では現実的な建物被害予測と避難シミュレーションを行うことが重要であるが、国や県レベルでの広域の建物被害予測や津波被害予測は行われているが、市町村レベル、あるいは地区レベルのきめ細かな地域特性を反映した建物被害予測・津波被害予測まで行政の手が回っているとは言い難い。特に津

波避難シミュレーションに際しては、建物の倒壊が避難経路を分断し、事前に想定していた避難経路が利用できなくなる可能性がある。それに対して中居ら(2013)は、住民への住宅の建築年数や耐震補強の有無に関するアンケートを実施することにより住宅の耐震性を考慮してシミュレーションを実施しているが、倒壊危険性の評価においては恣意的に設定されたルールに従って倒壊建物を設定しており、地震工学・耐震工学的知見を反映したシミュレーションとはなっていなかった。こうした現状を踏まえ我々は、和歌山県田辺市において、高い精度で建物の被害率（全建物数に対する大破以上の建物の割合）を算出

できる手法を用いることにより、建物の被害予測を行った上で津波避難シミュレーションを行い、現段階での避難場所の配置・収容人数と、家屋耐震化の効果を評価してきた(伊藤・ほか, 2015)。しかしながら、既往の方法では、倒壊戸数は推定できるものの、個々の建物の倒壊危険度が判断できないため、道路閉塞箇所については、ランダムに割り振るしかなかった。またこの既往研究では平地の都市域を対象としたため、地震動は対象地域で一様と仮定したが、対象地域が傾斜地や扇状地等の場合には場所による地震動の差異を建物の被害予測に反映させる必要がある。

そこで本研究では、事前復興計画をワークショップ(WS)形式で行っている和歌山県の海に面した緩やかな傾斜地に立地した由良町衣奈地区において、地区の詳細な地盤特性と建物の振動特性を考慮した上で、より高精度な津波避難シミュレーションを試みる。それを通して地区の地震・津波に対する脆弱性を把握し、今後の避難・復興計画策定に活かすことが最終目的である。

## 2. 研究対象地域の概要

本研究の対象地域は和歌山県日高郡由良町衣奈地区である。衣奈地区は海と丘陵地に挟まれた漁村集落であり、住宅地の道幅は概ね1~2mと非常に狭い。建物に関しては木造が7割を超える。平成25年度の和歌山県による南海トラフを震源とする地震の際の被害想定では、M8.7, M9での津波の到達時刻は、それぞれ地震発生後35分、24分となっている。Fig.1に研究対象地区の位置を示す。

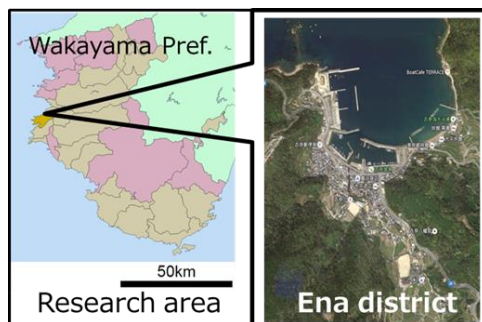


Fig.1 The location of the research area with the satellite photo on the right from the Google map ©.

## 3. 衣奈地区における木造建物群モデルの構築

地域の建物の特性を把握することを目的として、建物内の微動観測を行った。各建物の微動観測により得られた結果に基づき、建物群モデルを構築し、そのモデルに対して地震応答解析を行うことで被害

を予測する。

建物群モデル構築手法は以下の通りである。まず、対象地区内の木造建物計32戸の微動観測を行った。

Fig.2に観測建物の年代区分別の割合を示す。

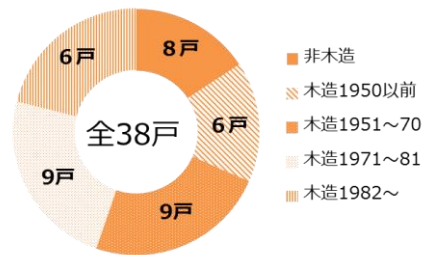


Fig.2 The number of wooden houses categorized by the construction ages.

微動観測の解析手法としては、微動計測により得られた時刻歴波形を50%オーバーラップさせて、40.96秒の小区間(セグメント)に切り出した。そして、フーリエスペクトルおよび1階に対する2階のフーリエスペクトルの比(以後、2F/1Fスペクトル比とする)をセグメントごとに求め、全セグメントの平均値を求めた。その上で、建物の長手方向、短手方向それぞれの2F/1Fスペクトル比の1次ピークを、共振振動数として読み取った。例としてFig.3に、観測建物のうちの1戸である1975年に建てられた建物の1階に対する2階の微動の長手、短手2方向の加速度フーリエスペクトル比を、Fig.4にスペクトル比から読み取った固有周期と建築年代の関係を示す。

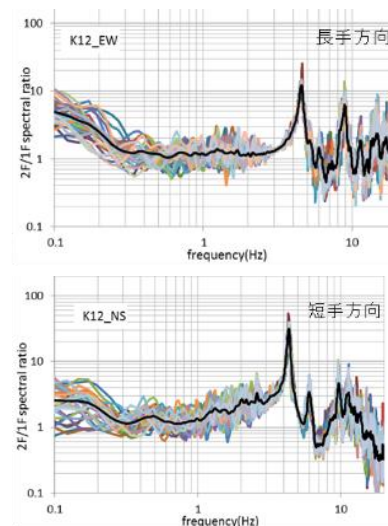


Fig.3 Fourier spectral ratio of 2<sup>nd</sup> floor divided by that of 1<sup>st</sup> floor of a house constructed in 1975. The upper panel corresponds to the ratio of the longer direction of the house, while the lower one is the one of the shorter direction.

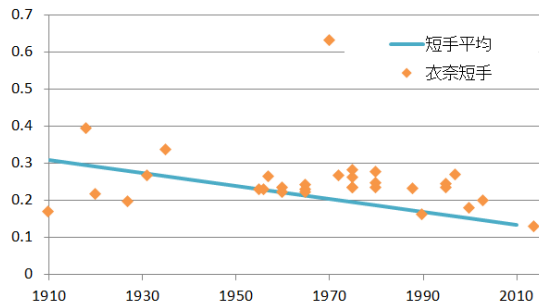
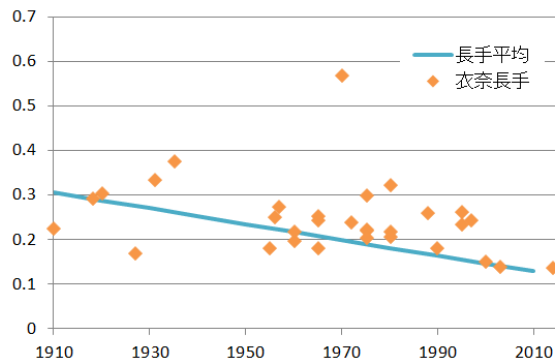


Fig.4 The relation between the construction age and the natural period derived from the peak of the ratios shown in Figure 3. The upper figure is the longer direction and the lower one is the shorter direction.

これらの現地観測結果に基づき、長戸・川瀬の建物モデル構築手法(2002)に従い、吉田(研)ら(2005)の木造建物群モデルの各耐力を有する建物の存在比率と建築年代別の耐力の比を検討、修正を加えることで、この地区の建物モデルとした。

各耐力を有する建物の存在比率の検討手法については、観測建物の微動記録から得られた共振振動数の2乗の値は、建物の質量が同じなら剛性に比例するので、降伏点変位が一定との仮定のもとでそれは建物の耐力に比例するとした。そのうえで、吉田(研)ら(2005)の耐力分布の推定手法にならい、対数正規分布の確率密度関数を求め、これを8個の代表値に対して離散化した値とした。建築年代別の耐力比の検討手法としては、建築年代別に共振振動数の2乗の値を平均し、その平均値を1982年以降に建てられた建物の共振振動数の2乗の平均値で割り込んだ。

Fig.5 に長手方向の各耐力を有する建物の存在比率(最頻値を1に基準化)、Fig.6 に建築年代別の耐力比を吉田(研)ら(2005)の建物モデルの各数値と比較する形で示す。

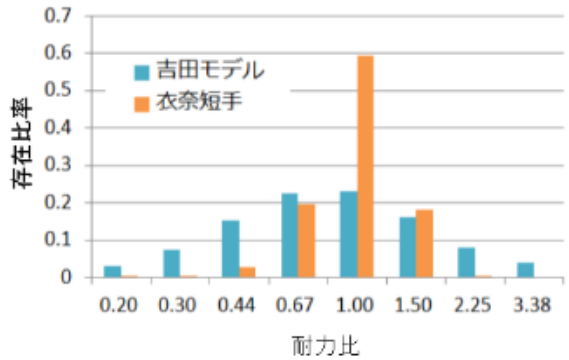
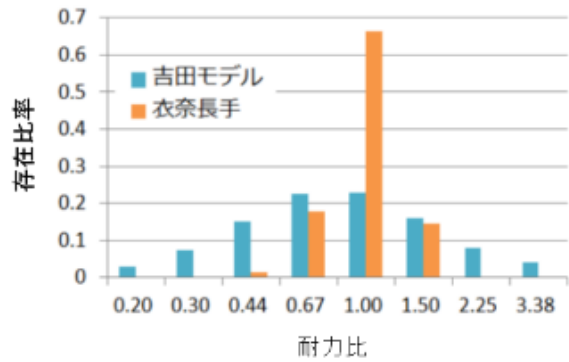


Fig.5 The existence ratio of the building for a different strength. The upper figure is the longer direction and the lower figure is the shorter direction.

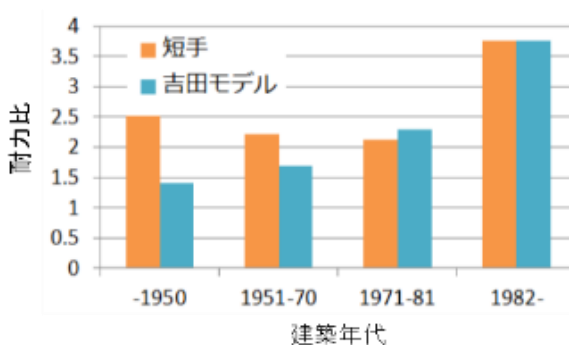
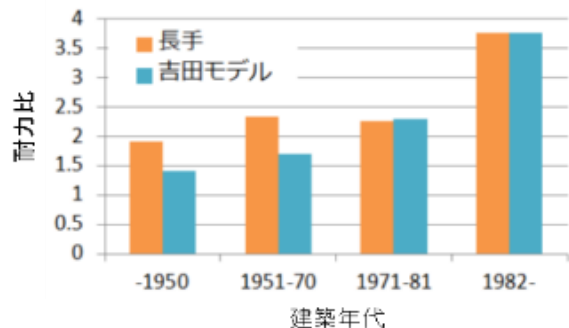


Fig.6 The ratio of strength of buildings categorized by the construction age compared with those calculated by Yoshida et al. (2005). The upper figure is the longer direction and the lower figure is the shorter direction.

#### 4. 地盤構造の同定

この地区における各建物に入力されると想定すべき地震動をできるだけ高精度に作成することを念頭に、この地域の地盤の特性を把握するため、地盤の微動観測を行った。微動の水平・上下スペクトル比(以下、H/Vスペクトル比とする)のピーク周波数に対して、適切なレファレンス・モデルを用いることで観測地点ごとの一次元地盤構造を推定する。初めに、ボーリングデータが得られた小学校において、ボーリングデータのN値、深度、土質区分と式(1)に示す太田・後藤(1978)の推定式より、S波速度を算出する。算出したS波速度より、式(2)、(3)に示すLudwig et al.(1970)の関係式に基づき、P波速度と密度を算出する。

$$V_s = 62.48N^{0.218} H^{0.228} F \quad (1)$$

ここで、 $V_s$ はS波速度(m/s)、 $N$ はN値、 $H$ は深度(m)、 $F$ は土質係数で、粘土で1.000、砂で1.073、礫で1.199の値をとる。

$$V_p(\text{km/sec}) = 0.9409 + 2.0947V_s - 0.8206V_s^2 + 0.2683V_s^3 - 0.0251V_s^4 \quad (2)$$

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 1.6612V_p - 0.4721V_p^2 + 0.0671V_p^3 - 0.0043V_p^4 + 0.000106V_p^5 \quad (3)$$

こうして得られたS波速度やボーリングデータの土質区分を参照し、この地点における地盤構造モデルを、基盤1層、基盤直上4層からなる5層モデルとした。その上で、Sánchez-Sesma et al. (2008)により提案された拡散波動場理論に基づく理論の微動H/Vスペクトル比のピーク周波数と観測された微動H/Vスペクトル比のピーク周波数を、以下の式(4)に基づきS波速度のみを変化させて一致させることで、小学校における地盤構造モデルを構築した。これを初期モデルとする。Fig.7に小学校での観測H/Vスペクトル比と理論H/Vスペクトル比の比較結果を示す。

$$V_{s\text{-after}} = f_{\text{target}}/f_{\text{before}} * V_{s\text{-before}} \quad (4)$$

ここで、 $V_{s\text{-before}}$ は修正前のS波速度、 $V_{s\text{-after}}$ は修正後のS波速度、 $f_{\text{before}}$ は小学校におけるピーク周波数、 $f_{\text{target}}$ は対象観測地点のピーク周波数である。

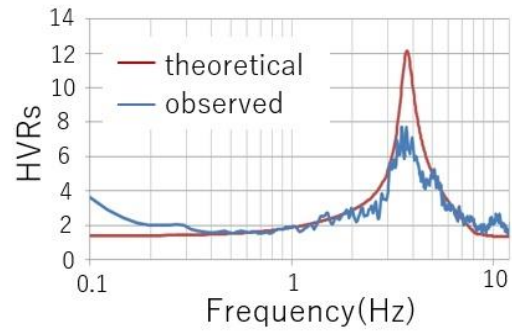


Fig.7 Comparison of the observed HVR (Horizontal-to-Vertical ratio) with the theoretical HVR at the elementary school.

小学校以外の観測地点の地盤構造同定にはこのレファレンス・モデルを基準とする。理論の微動H/Vスペクトルのピークが観測のH/Vスペクトルのピークに合うよう、今度は層厚のみを修正することで、各地点における地盤構造を得た。その算出式を(5)に示す。

$$H_{\text{target}} = f_{\text{target}}/f_{\text{before}} * H_{\text{before}} \quad (5)$$

ここで、 $H_{\text{before}}$ は修正前つまり小学校における各層の層厚、 $H_{\text{target}}$ は対象観測地点における層厚、 $f_{\text{before}}$ は小学校におけるピーク周波数、 $f_{\text{target}}$ は対象観測地点のピーク周波数である。Fig.8に各微動観測地点でのH/Vスペクトル比の卓越振動数の分布を示す。Fig.9には地盤構造を同定したそれらの地点を地図に表記し、上記の手順で得られた小学校を含む測線ほか2側線での地盤構造を例として示す。

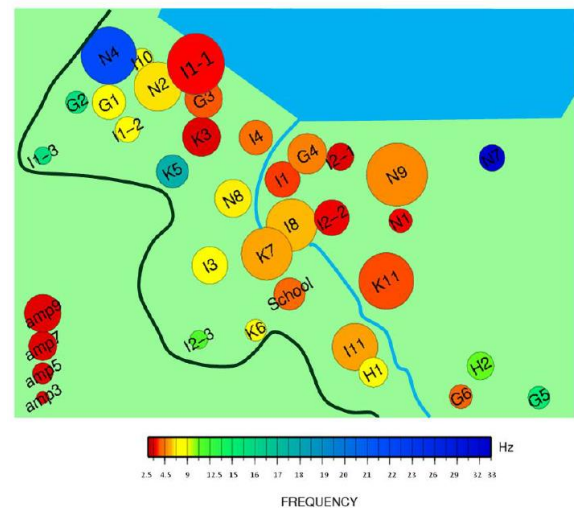


Fig.8 The distribution of the peak frequencies of HVRs in the area.



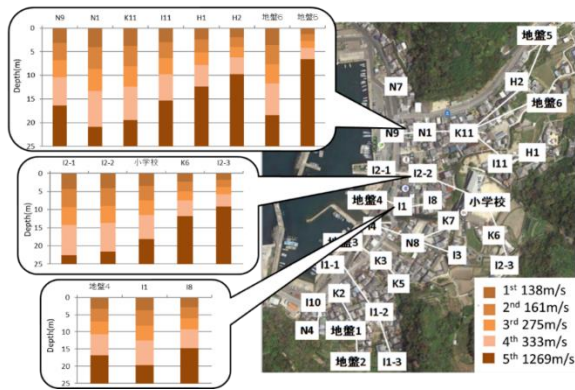


Fig.9 The microtremor measurement lines and the identified velocity structures for three representative lines out of all the lines measured.

### 5. 入力地震波の作成

衣奈地区に最も近い防災科学技術研究所の基盤強震観測点(Aoi et al.(2004))の1つであるKiK-net広川観測地点(WKYH01)において、宝音図(2014)が算定した3連動地震の予測波を2倍した波形を用いて、工学的基盤までの表層地盤の影響をはぎ取り、工学的基盤における地震動を推定した。ここで2倍した理由は、宝音図(2014)の計算はM8.4相当の昭和の南海・東南海地震を再現したもので、現在内閣府や地震調査研究推進本部で行われている想定震源による予測波に比べると2倍あるいはそれ以上過小評価されていると推察されるからである。同定した衣奈地区の各観測地点における表層の地盤構造を用いて、推定した基盤地震動を入力波とする地震応答解析を行った。この地震応答解析には、非線形応答解析が可能なDyneq(吉田・末富, 1996)を用いた。例として、小学校において得られた加速度波形をFig.10に、減衰5%擬似速度応答スペクトルをFig.11に示す。また、各観測地点で予測される地震波の最大加速度(PGA)をFig.12に、最大速度(PGV)をFig.13に示す。これらの図から、表層厚が薄いため、専ら丘陵部で短周期域が増幅され、最大加速度が大きくなっているが、建物被害により相関が強い最大速度で見ると地区内での変動幅は小さいことがわかる。

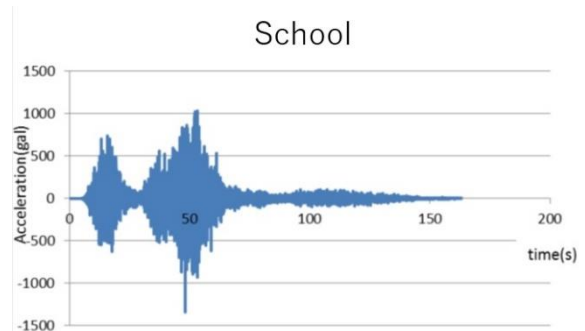


Fig.10 The estimated acceleration wave at the school.

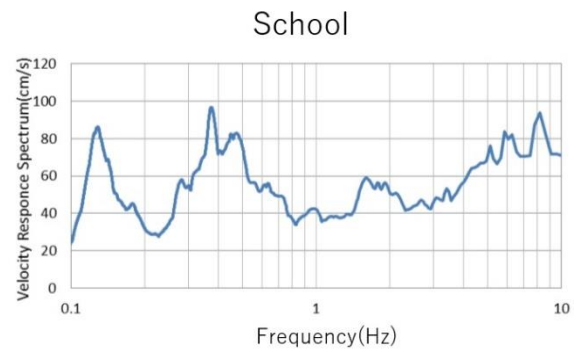


Fig.11 5%-damped pseudo velocity response spectra at the school.

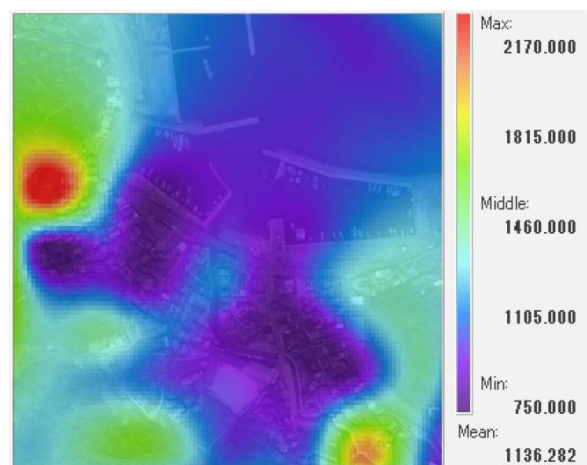


Fig.12 The distribution of PGAs(cm/s/s) in the area.

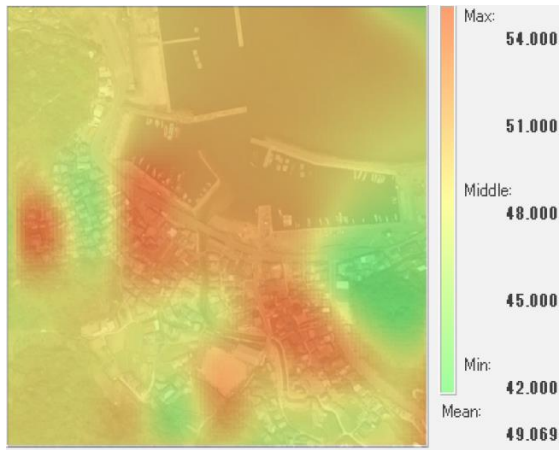


Fig. 13 The distribution of PGVs (cm/s) in the area.

## 6. 建物被害予測手法

3. で説明した各地点の予測地震動を、構築した木造建物モデルと、既存の長戸・川瀬による鉄骨・3階建て建物群モデルに入力し、地震応答解析を行うことで、各地震波による、属性（構造種別・年代別）ごとの建物の大破以上率を求めた。それに大破以上の建物中の倒壊建物の比3/7（兵庫県南部地震の統計値）を掛けることで倒壊率を求めた。また、地区における各地震波の支配領域を、微動観測地点を中心として定めた。その上で、各地震波の支配領域下にある建物戸数と大破以上率、倒壊率を掛け合わせることで、各支配領域下での大破以上建物数、倒壊建物数を求めた。

その結果、この地域における建物の大破以上被災数の推定値は7戸、倒壊数の推定値は3戸に留まった。

## 7. 津波避難シミュレーション

今回の津波避難シミュレーションに使用するシステムは、エージェントベースのシミュレータである Artisoc（兼田(2010)）と時空間地理情報システム DiMSIS（畑山(1999)）が、データベースを共有するカタチで構成されている。

シミュレーションにおける想定条件としては、地震発生時刻は夜間とし、初期位置は各個人の自宅、避難方法は徒歩のみ、歩行速度に関しては、東日本大震災時の調査に基づき、10歳以上70歳未満は2.65 km/h、70歳以上は1.88 km/h、10歳未満の子どもや70歳以上の高齢者を含む家族は全員1.96 km/hとした。また、各人の避難場所については、地区の現在の避難計画で定められている9ヶ所とし、各人の家から最も近い避難場所を避難先に指定した。Fig.14に避難場所を示す。

シミュレーションのパターンとしては、以下の

21パターンを用意した。

(i)道路閉塞を考慮しないパターン：1パターン

このパターンについては、住民全員に対し避難開始時間を地震発生後5分とした。

(ii)道路閉塞を考慮するパターン：20パターン

道路閉塞のパターンを10パターン、大破以上の建物の住民の避難開始時間を(i)から変更し、地震発生後10分、15分と2パターン設定し、この道路閉塞パターンと避難開始時間のパターンを掛け合わせることで、20パターンを作成した。

以上の21パターンのシミュレーションを試行し、地震発生後15分、20分時点における、避難完了人数を集計した。



Fig.14 The designated evacuation places in the area.

建物被害を考慮しないパターンについては、地震発生後15分時点で、地区の住民の95%以上が避難完了する結果となった。一方、建物被害を考慮するパターンについては、平均して3%ほど15分時点での避難完了住民の数が減少した。注目に値するのは、道路閉塞箇所が多い上位3パターンにおいて、建物被害を受けた住民の避難開始時刻が地震発生後10分とした場合よりも15分としたパターンで、地震発生後20分時点での避難完了人数が多くなったことである。この結果の考察としては、一部の住人の避難がより遅れたことにより、研究対象地域に多い道幅の狭い道において渋滞が緩和されたことが挙げられる。実際に道の渋滞が時間経過により緩和されている様子をFig.15に示す。

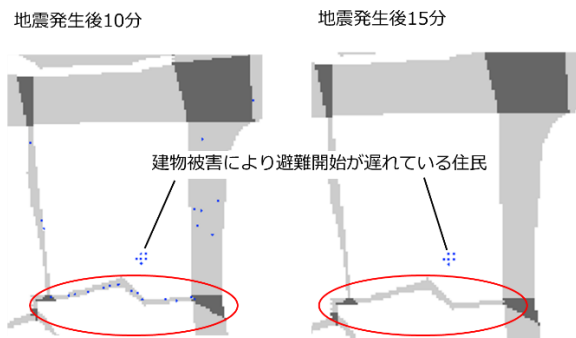


Fig.15 Comparison of the situation assuming that the evacuation will be started after 10 minutes of earthquake (left, where the congestion happens) and the situation with the evacuation after 15 minutes (right, where the congestion was relieved).

以上のことから、道幅が狭く、人による渋滞が生じやすい今回の研究対象地区においては、地区内のさらに小さな区画ごとに、あらかじめ避難開始時間をずらして決めておくことも避難行動を円滑にする一つの手段であると言える。また、大きな避難場所の近くに道路閉塞が生じると、地区全体での倒壊建物数が少ない割に、避難が遅れが生じることから、避難場所近くの家屋に対しては優先的に耐震化を進めるべきであることも明らかとなった。

## 8. 結論

本研究では、ある漁村地域における事前復興の取り組みの一環として、構造物の振動特性・地盤構造による増幅特性を推定した上で建物被害を予測し、それを踏まえた津波避難シミュレーションにより地区の地震・津波への脆弱性を評価した。その結果、南海・東南海・東海地震(3連動地震)においてこの地区で被害を受ける建物数は数パーセントに留まることが分かった。

津波避難シミュレーションにおいても、地震発生後15分時点で地区の95%以上の人々が避難を完了させることができるという結果となり、地震発生5分後に避難を開始すれば、津波に住民が巻き込まれる危険性は高確率で排除できることが示された。前述したように、3連動地震での当地区の建物被害は甚大ではないと予測されることから、地震発生後5分で避難開始できると想定することは、事前の十分な訓練を前提とすれば、現実的であるといえる。

さらに、大破以上の被害が想定される住民の避難開始時刻が遅い方が、地震発生後20分時点で避難完了人数が多くなる場合が見出された。この原因としては、避難開始時刻にずれが生じたことで、特に細

い道や道路閉塞箇所周辺において渋滞が緩和されたことが考えられる。

今後の研究成果の活用に関する展望としては、建物微動観測による、各建物の耐力の推定結果を中心とした研究成果を住民の方に報告させていただき、住民各人の自らの建物や住む地区の地震・津波に対する認識を深めていただくことがあげられる。また、津波が到達する際の避難計画においては、より迅速な避難の一手法として、計画的に区画ごとの避難開始時間をずらすこと、あるいはあらかじめ避難経路を地区と避難所ごとに集中しないように割り振っておくことなどを住民へ提案していきたい。

## 謝辞

KiK-net広川の予測波形は内蒙古工業大学の宝音図氏から提供いただきました。微動計測に際しては京都大学防災研究所川瀬・松島研究室のメンバー(当時)の協力を得ました。またその際には、和歌山県日高郡由良町役場総務課主任山下俊之氏、衣奈地区区長大井宏氏はじめ地区の方々のご協力が不可欠でした。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 伊藤恵理・川瀬博・松島信一・畑山満則(2015) : 予測強震動を用いた建物倒壊想定に伴う道路閉塞を考慮した津波避難シミュレーション, 日本地震工学会論文集 特集号「津波等の突発大災害からの避難の課題と対策」, 第15巻, 第5号, pp. 17-30.
- 太田裕・後藤典俊(1978) : 横波速度を推定するための実験式とその物理的背景, 物理探鉱, 第31巻, 第1号, pp.8-17.
- 兼田敏之(2010) : artisocで始める歩行者エージェントシミュレーション 原理・方法論から安全・賑わい空間のデザイン・マネジメントまで, 構造計画研究所, 書籍工房早山.
- 中居楓子・畑山満則(2013) : エージェント技法を用いた津波避難評価システムの開発, 土木計画学研究・講演集, Vol.47, CDROM.
- 長戸健一郎・川瀬博(2002) : 観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物群被害予測モデルの構築と観測強震動への適用, 第11回日本地震工学シンポジウム.
- 畑山満則(1999) : 時空間地理情報システムDiMSISの開発, GIS-理論と応用, 7/2, 25-33, 1999.
- 宝音図(2014) : 西南日本における巨大地震による定量的被害予測とその対応策に関する研究, 京都大学大学院工学研究科博士論文.

吉田研史・久田嘉章・川瀬博・伏見実（2005）：地震応答解析に基づいた木造建物群の被害率関数と破壊力指標の検討，日本建築学会学術講演便概集，pp.161-162.

吉田望・末富岩雄（1996）：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業（株）技術研究所報，pp. 61-70.

Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara (2004) : Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 4, 3,

65-74.

Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C. L. Drake(1970) : Seismic refraction, in The Sea, A. E. Maxwell, (Editor) Vol. 4, Wiley-Interscience, New York, pp.53-84.

Sánchez-Sesma F. J., Pérez-Ruiz J. A., Luzón F., Campillo M. and Rodóriguez-Castellanos A. (2008) : Diffuse fields in dynamic elasticity, Wave Motion 45, pp.641-654.

（論文受理日：2019年6月17日）