

# 地震による家屋の倒壊を考慮した 津波来襲時における避難に関する一考察

佐藤 広章\* ・村上 仁士\*\* ・島田 富美男\*\*\*  
上月 康則\*\*\*\* ・倉田 健悟\*\*\*\*\* ・大谷 寛\*\*\*\*\*

2050 年までに 80% の確率で発生するとされる M 8.4 級の次の南海地震・津波に対する住民の避難問題を検討した。まず、津波防波堤建設計画のある T 県 A 地区で、建設段階に応じて集落への津波氾濫状況が変化することを津波の数値シミュレーション結果に基づいて示し、既存の津波避難所への避難経路も変わりうることを指摘した。ついで、地震時の家屋倒壊率を導入して新しく集落の家屋倒壊状況を考慮した場合、既存の避難路が使用できなくなり、あらためて代替の避難経路が必要となることを強調した。その場合、避難速度の低下や避難距離の延長による人的被害の増加に対する対策も必要となることを明らかにした。

## 1. 緒 言

南海地震の特徴は、地震の後に必ず津波が来襲することである。とりわけ震源に近い四国・紀伊半島の太平洋沿岸域では、地震発生から数分後に大きな津波に襲われる。したがって、こうした地域では、迅速な避難が重要になる。

近年、津波避難に関する研究も行われるようになり、避難行動の円滑化が人的被害軽減に効果的であることが証明されている。例えば、島田ら (1999) は、避難速度と津波遡上の時間変化を考慮した津波被害を検討し、井上ら (1999) は、避難経路のネットワーク化による避難方法の有用性を指摘している。実際、沿岸域の家屋の密集した小集落を調査すると、地震時に家屋の倒壊や、屋根瓦の落下、塀の倒壊など、避難路に遮断の恐れがあるところが多く、津波避難の問題を考える際にこの影響を検討しておく必要がある。

各沿岸市町村が取り組んでいる津波防災においても、同様のことがいえる。例えば、本研究の対象地区として取り上げた T 県 A 地区 (図-1) は、太平洋に面した天然の V 字型湾の湾奥に位置し、その地形的特性から過去に幾度も南海地震・津波による甚大な被害を受けてきた。その教訓を生かし、現在、地区内には 15 箇所の津波避難所が設置され、湾口には、津波防波堤が建設されつつある (図-1 中の点線部分)。しかしながら、これらの避難所の中には、過去の歴史津波によって浸水していた場所が含まれている。また、海岸付近の狭い平野部 (図-1

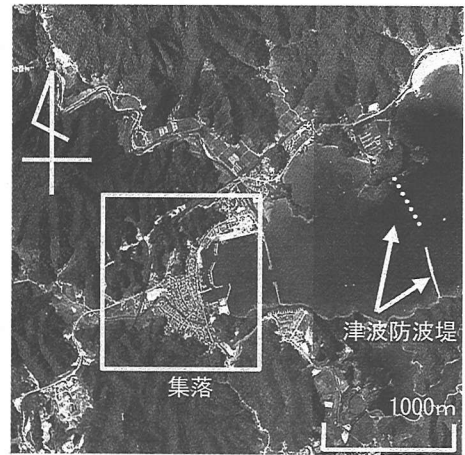


図-1 T 県 A 地区

中の白枠部分) に家屋が密集しているため、地震時には家屋被害 (家屋の全半壊、瓦の落下、火災の発生など) により避難速度の低下や避難路の迂回を余儀なくされることが予想される。さらに現在、南側のみ完成している津波防波堤については、建設途中の津波の来襲を想定しておらず、その際の防波堤の津波減衰効果については検討されていない。

本研究では、上述した T 県 A 地区をモデルとして取り上げ、地震による家屋被害が津波避難に及ぼす影響について考察した。また、建設途中の津波防波堤の津波減衰効果と集落中心部に氾濫する津波の挙動の変化についてもあわせて検討した。

## 2. 津波伝播計算

政府の地震調査委員会 (2001) により公表された次の南海地震と同規模の 1854 年安政南海地震 (M 8.4) 津波を想定して津波数値計算を行った。基礎方程式には、非線形長波理論式を用いた。以下にその基礎方程式を示す。

$$\frac{\partial(\eta-\xi)}{\partial t} = -\frac{\partial M}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial y} \dots\dots\dots (1)$$

\* 正 会 員 工修 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻  
\*\* フェロー 工博 徳島大学教授 大学院工学研究科エコシステム工学専攻  
\*\*\* 正 会 員 工博 阿南工業高等専門学校教授 建設システム工学科  
\*\*\*\* 正 会 員 工博 徳島大学助教授 大学院工学研究科エコシステム工学専攻  
\*\*\*\*\* 正 会 員 理博 徳島大学助手 大学院工学研究科エコシステム工学専攻  
\*\*\*\*\* 学生会員 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{M^2}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{MN}{D} \right] \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \gamma_b^2 \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{MN}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{N^2}{D} \right] \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \gamma_b^2 \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 $x, y$  : 水平の直交する2方向の座標,  $M, N$  :  $x, y$  方向の線流量,  $h$  : 静水深,  $\eta$  : 静水面からの水位上昇量,  $g$  : 重力加速度,  $D$  : 全水深 ( $=h + \eta - \xi$ ),  $\gamma_b^2$  : 海底摩擦係数, である。

計算領域を図-2に、各種断層パラメータ(図-2中の一点破線の部分)を表-1に示す。用いた計算格子間隔は、陸上氾濫域で最小の12.5mとし、計算時間間隔は、計算の安定性を考慮して0.5secとした。なお、津波計算の妥当性を検証するため、安政南海地震発生時の地形を再現し、当時の浸水範囲と最大水位と比較することにより検証している。

### 3. 津波防波堤の効果

図-1に示したとおり、A湾では、湾内岸壁から約1.5km沖に津波防波堤を建設中であり、南堤(延長400m)のみ完成している。通常、浸水予測図などを作成する際には、完成時の津波防波堤の減衰効果のみが考慮され、それに見合った避難所の検討が行われている。しかしながら、同地区のように建設途中に仮に津波来襲を受けた場合、はたしてどの程度の効果が得られるのかは定かではない。以下では、まず、完成形状と現形状に対して、その津波減衰効果を比較する。

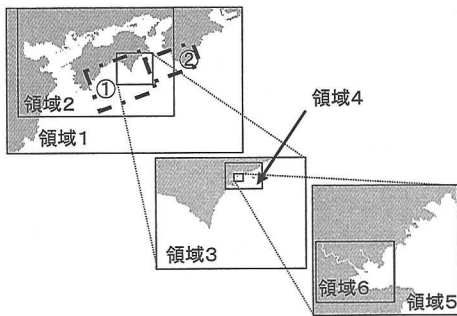


図-2 数値計算の計算領域

表-1 断層パラメータ

断層 No	N(N)	E(E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(km)
①	32.7	134.7	1	250	20	117	150	120	630
②	33.41	136.2	10	250	10	127	150	70	470

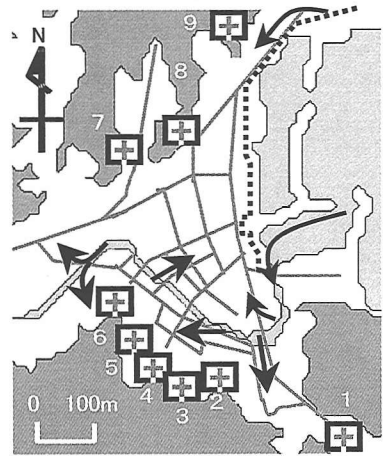


図-3 A地区集落への氾濫状況(防波堤完成時)

#### 3.1 完成形状

図-3は、集落において、計算結果を基に、津波防波堤完成後の津波の陸上氾濫状況を簡単に示したものである。津波の第一波は、地震発生後20分で集落到達する。その後、河川から遡上した津波が集落到達するもの、集落前面の護岸(図中の点線部分)から越流することはなく、護岸の整備されていない箇所からのみ浸水する。また、浸水範囲が最大となるのは、第一波到達から8分後の地震発生後28分である。(図中の十字マークは津波避難所。番号は後出の表-2に対応)。

#### 3.2 現状(北堤建設中)

図-4は、現況における陸上への津波の氾濫状況を示したものである。この場合、津波の第一波到達は完成時に比べて若干早く、地震発生後18分となった。津波は集落前面の護岸(図中の点線)を越波し、海側から直接浸

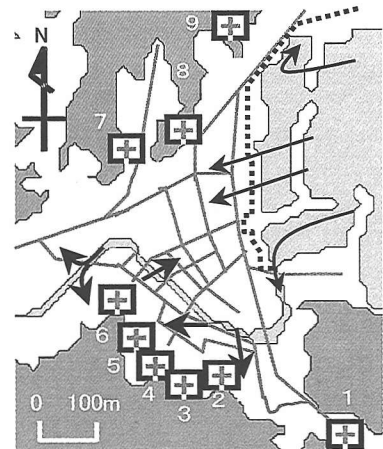


図-4 A地区集落の氾濫状況(防波堤建設中)

表-2 A地区の津波避難所の浸水状況(計算値 T.P.基準)

浸水している：×(浸水深) 浸水していない：○				
避難場所			避難所の浸水状況と浸水深(m)	
番号	名称	地盤高さ(m)	建設途中	完成後
1	スベリ坂	2.789	×(0.24)	○
2	江音寺	2.591	×(1.05)	○
3	愛宕山	計算領域外	○	○
4	千光寺	3.592	×(0.52)	○
5	東泉寺	1.392	×(0.06)	○
6	弁天神社	1.592	×(2.0)	×(0.02)
7	浅川駅	計算領域外	○	○
8	観音庵	計算領域外	○	○
9	取池	3.687	×(0.52)	○

水する。また、河川からも浸水し、浸水範囲こそ完成時とたいして変化しないものの、浸水深は平均的に1~2m程度深くなった。また、浸水範囲が最大となるのも完成時よりも約6分早く、地震発生後22分となった。このように、完成時と現状を比較すると、現況において北堤が無いことによる陸上への浸水過程や浸水域に及ぼす影響は大きく、現況では津波制御効果も十分期待できないことがわかる。

### 3.3 建設途上による津波来襲の問題点

完成形状と現況では、集落の浸水深、浸水時間が異なる。その結果、津波防波堤が完成すれば避難できる場所であっても、現状では津波の来襲を受けて浸水する。また、住民の避難という視点でいえば、最大水深に達するのに6分という差は非常に大きい。

すでに、図-3に津波避難所の位置を示しているが、表-2は、避難所周辺での浸水深を比較したものである。まず、津波防波堤の建設段階にかかわらず浸水する避難所があることがわかる。また、建設途上の現状では計算領域内にある避難所はすべて浸水し、その浸水深は0.24~2.0mとなる。一方、完成後では、浸水した避難所の浸水深は0.02mとなり、ほとんど浸水しない結果となった。

しかし、安政南海地震津波の状況を記したA地区にある千光寺の板額には、「三ヶ寺(千光寺、東泉寺、江音寺。いずれも津波避難所に指定)とも座上4尺(1.2m)余浸水」と書かれている。今回、2cm浸水という結果となったが、避難所が浸水すること自体、避難所として妥当であるかどうか再検討の余地があろう。

## 4. 家屋倒壊を考慮した人的被害の評価

### 4.1 津波避難訓練アンケート調査

A地区の住民が、津波来襲時にとる避難行動を把握す

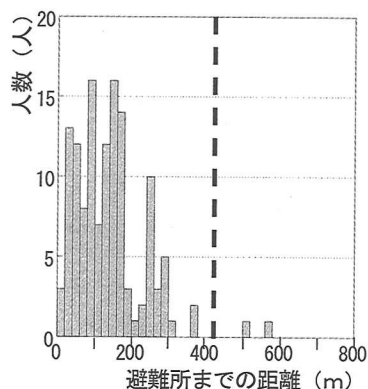


図-5 回答者の避難所までの距離(避難訓練時)

るため、2001年12月23日に行われた津波避難訓練の際に現地アンケート調査を行い、参加者の避難所までの移動距離と移動時間を調査した。

移動距離については、参加者各人の家屋から避難所までの避難経路を考慮した。移動距離と移動に要した時間から、住民の平均的な避難速度を算出すると、0.39m/sとなった。津波数値計算の結果より、地震発生から津波第一波が到達するまでの時間は、津波防波堤が現況の場合、最短の18分であり、津波の第一波到達までに住民が避難できる平均的な距離は、421.2mとなる。図-5は、これと避難訓練参加者の避難所までの距離との関係をまとめたものである。図中の点線が421.2mであり、参加者の全員が津波来襲までに避難所に到着できることを示している。なお、避難所までの距離が421.2m以上の2名については、最寄りの避難所に避難しなかった特殊な例であるため、今回は無視する。以下では、これに地震による家屋被害を考慮した場合、それが住民の避難行動に及ぼす影響について検討してみる。

### 4.2 地震による家屋被害率

家屋被害率(全半壊率)の算出式には、地震動強さ(地

表-3 建物被害関数の回帰係数

		家屋全半壊		
		$\lambda$	$\xi$	標準偏差
木造	~1951	3.66	0.674	0.88
	1952~61	3.97	0.49	0.952
	1962~71	4.02	0.456	0.966
	1972~81	4.25	0.395	0.76
	1982~	4.61	0.474	0.969
非木造	~1971	4.72	0.691	0.929
	1972~81	4.85	0.612	0.844
	1982~	5.33	0.789	0.917

表最大速度=PGV) と被害率の関係を標準正規分布の累積確率分布関数  $\Phi(x)$  を用い、対数正規分布で表現する方法を用いた。以下にその算出式を示す。

$$P_R(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \zeta) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $P_R(x)$  : ある時震動  $x$  の時に被災ランク  $R$  以上の被害が発生する確率、 $\lambda$  :  $\ln x$  の平均値、 $\zeta$  :  $\ln x$  の標準偏差、である。

こうした手法については、数多くの研究がされているが、本研究では、村尾 (1999) の被害評価関数を用いた。これは、基礎データに兵庫県南部地震の際に被害を受けた3万棟を超える灘区の詳細な建物被害データと町丁目単位の推定地震動分布を用いることで、より精度の高い被害評価関数を提案しているためである。建物被害データより得られた建物被害関数の回帰係数を表-3に示す。

表-4には、(3)式を基に、A地区の木造・非木造(RC造)の建築年代別家屋被害率を算出した結果を示す。なお、A地区の地表最大速度 PGV の算出には、内閣府防災部門から公表されている「地震被害想定支援マニュアル」を準用した。安政南海地震でのA地区のPGVは、37.34 m/sとなり、A地区における家屋被害率は最大で48%となる。

表-4 A地区における家屋全半壊率

木造全半壊率 (%)					非木造全半壊率 (%)		
~1951	1952~61	1962~71	1972~81	1982~	~1971	1972~81	1982~94
47.6	23.8	19.0	5.5	1.8	18.8	5.7	2.96

4.3 A地区における避難所に及ぼす家屋被害の影響

図-6は、A地区における各家屋の構造と築年数を調査し、表-4の結果に基づき、地震時に発生する家屋被害

率の空間分布図を作成したものである。図では、被害率が50%を越えるような家屋が密集しているエリアを楕円で囲んでいる。このエリアは、避難所へ向かう多くの住民の避難路となっている。避難訓練の際にも、このエリアを通して避難した人が130人中63人であった。これらの人々については、避難訓練では円滑に避難行動がとれていても、実際に地震・津波に襲われたときには、以下のような家屋被害による影響を強く受けることが懸念される。ア) 家屋が全半壊し、避難路が遮断されるか狭められる。イ) 瓦が破損し、避難路に落下・堆積する。ウ) 家屋の全半壊により、負傷者が生じる。エ) 火災が生じる等、などである。

ただし、どの程度の家屋被害率になれば避難に支障をきたすようになるかの判断は難しく、ここでは、以下の

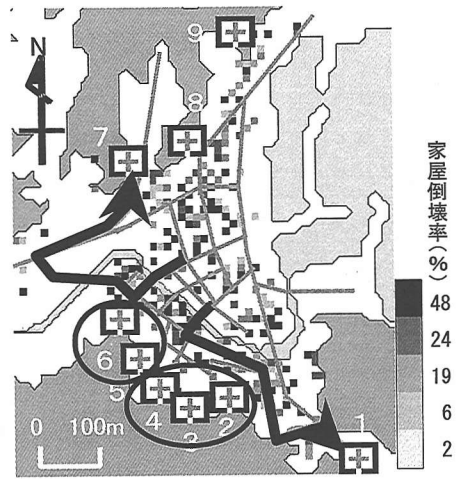


図-7 想定した避難路

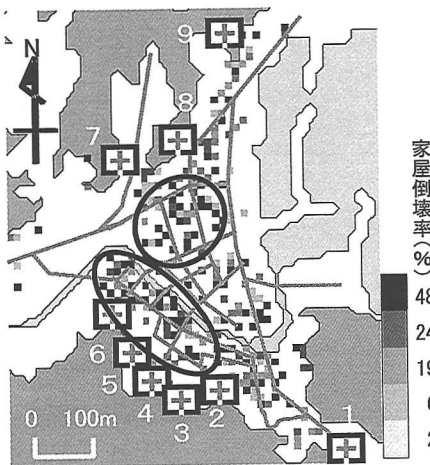


図-6 A地区の家全半壊率の分布

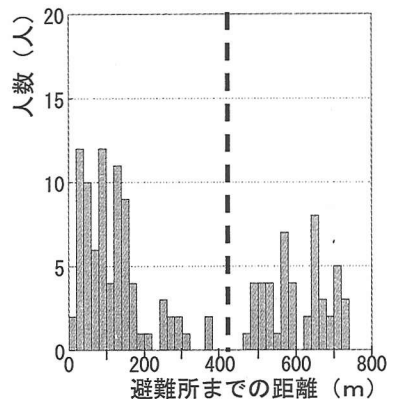


図-8 回答者の避難所までの距離 (迂回想定時)

ような仮定のもと、被害想定を実施した。

#### a) 避難速度の低下

4.で求めた平均的な避難速度(0.39 m/s)が、家屋被害によってその半分(0.195 m/s)になると仮定すれば、津波第一波が到達するまでの間に避難できる距離は約210.6 mとなる。したがって、図-5において安全とされた住民のうち、新たに25人が最悪の場合避難所まで到達できないことも起きうる。

#### b) 避難路の迂回

次に、図-6において2箇所選定した家屋被害の著しいエリアのうち、南側の一箇所について、迂回して別の最寄りの避難所に避難することを想定してみる。考慮した迂回路を図-7に示す。

この結果、図中の避難所5、6より避難所7に緊急避難した人は、本来の避難所より423 m遠くなり、避難所2~4から避難所1に緊急避難した人は、472 m遠くなる。これを避難訓練時の参加者に当てはめると、避難所までの距離に対する避難者数は図-8のようになる。すなわち、図-7において安全であると考えられていた住民のうち、新たに48人(図-5の2人を含む)が避難所まで到達できなくなることがある。

これらはいずれも家屋被害が避難行動に及ぼす影響を考察したものであるが、住民が、通常の避難訓練で避難経路を決めていると、上記のようなことが起きる。

家屋倒壊による避難路の遮断を考慮した避難経路の指示など、行政は冗長性(リダンダンシー)をこうした集落の避難計画にも盛り込むべきことが示唆される。

## 5. 結 言

本研究で得られた主要な結果を以下に列挙する。

(1) A地区において、津波防波堤建設途上の現状と完成後の津波の浸水氾濫状況を比較すると、完成後は河川から遡上した津波が集落に浸水するものの、集落前面の護岸を越波することはない。しかしながら、建設途上で津波が来襲すれば、集落前面の護岸を越波し、ほとんどの避難所が浸水する。

(2) 地震による家屋被害を考慮しない条件において、津波が集落に氾濫するまでに可能な避難距離を、アンケート結果を基に推定した結果、回答者のほとんどが避難可能となった。また、避難速度を求めたところ、平均値0.39 m/sを得た。

(3) A地区における地震による家屋被倒壊率は、最大で48%となった。これをA地区の現在の家屋に適用すると、倒壊率の高い家屋が50%以上の割合で密集している所が2箇所あり、こうしたエリアでは、避難速度を低下させたり、迂回を余儀なくされる恐れがある。この結果、(2)において避難可能と判断された住民のうち48人が避難所に到達できない危険性があることがわかった。また、津波防波堤建設途上の現状では完成後に比べて約6分早く津波が市街地に浸水するため、避難不可能となる住民の割合はさらに高くなることが懸念される。

これらのことから、行政は家屋の倒壊など危険箇所を示し、集落の住民各自が複数の避難経路で日頃から避難訓練を行い、地震発生時に安全な経路を選べるような配慮がなされることを提案した。

本研究を行うに当たり、ご協力いただいた徳島県海部郡海南町の川野駿氏(現海部郡消防組合 消防長)、東谷一郎氏に深く感謝の意を表します。また、本研究は、科学研究費基盤研究(C)(代表者:村上仁士)による研究の一部であることを明記し、謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 井上和也・川池健司・山上路生・戸田圭一(1999): 街路ネットワークモデルに基づく高潮氾濫時の避難行動解析, 海岸工学論文集第46巻, pp. 351-355.
- 地震調査委員会(2001): 南海トラフの地震の長期評価, 26 p.
- 島田富美男・村上仁士・上月康則・杉本卓司・西川幸治(1999): 津波による人的被害予測に関する一考察, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 361-365.
- 中央防災会議(2001): 「東南海, 南海地震等に関する専門調査会」第1回説明資料, 35 p.
- 村尾 修(1999): 兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害評価に関する研究, 東京大学博士論文, 1-1-10-53 p.