

津波による人的被害最小化因子の影響度評価について

志方建仁*・村上仁士**・上月康則***
大谷 寛****・宮本大輔*****

本研究は、地域スケールでの具体的な津波防災対策の効果を評価しうる手法を示したものである。高知県土佐市宇佐町を対象として、当該地域における地形特性から、人的被害に影響を及ぼす因子を選定し、津波の数値計算ならびに人的被害予測シミュレーションを実施した。その結果、津波規模や、沿岸構造物の地震被害の程度、水門・陸閘の開閉状況、住民の避難開始時間が津波による人的被害に及ぼす影響度を定量的に示すことができた。また、これらの影響度を総合的に評価し、対象地域における人的被害最小化対策を具体的に提案できることを示した。

1. はじめに

2005年1月、次の南海地震は30年以内に約50%、50年以内に約80%の確率で発生することが公表された。また、2004年12月にスマトラ沖地震津波が発生し、インド洋沿岸諸国に甚大な被害をもたらした。これらを契機として、国民の間では、自分達の住む地域は津波に対して安全かといった危機意識が以前にもまして強く抱かれている。1995年1月の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では被災直後に他地域からの救助・救援があったが、次の南海地震では最大で南関東から九州までの広範囲な地域に被害が及び、他地域からの救助・救援はほとんど期待できない。このため、津波による人的被害が予想される地域では、被害を最小限に抑えるため、集落レベルでの有効な防災対策が急務とされている。

津波による人的被害最小化に影響を及ぼす因子（ここでは人的被害最小化因子と略称）としては、津波到達時間や津波高、防災施設（防波堤、防潮堤、水門・門扉）の整備状況、氾濫流の浸水深と流速、住民の避難行動などがあげられる。中央防災会議（内閣府）は、広域に及ぶ津波による人的被害を巨視的に評価するために、過去の津波による津波高と死者率との関係から統計的手法を用いて被害を算定しているが、集落レベルでの被害予測には必ずしも適当とは言えない。島田ら（1999）は、避難開始時間や避難速度といった住民の避難行動を取り入れた人的被害予測手法を提案しているが、これだけでは十分とは言えない。集落レベルでの効果的な被害最小化対策を打ち出すためには、地形条件などの地域特性を十

分に把握し、当該地域における人的被害最小化因子を選定し、これらの影響度を評価する必要がある。

そこで本研究では、高知県の一沿岸集落を対象として、津波の数値計算ならびに人的被害予測シミュレーションを実施し、津波による人的被害最小化因子の影響度を総合的に評価しうる手法について考察を行った。

2. 対象地域における人的被害最小化因子の選定

本研究で対象地域として取り上げた高知県土佐市宇佐町（以下、宇佐町と略称）は、宝永（1707, M8.4）・安政（1854, M8.4）・昭和（1946, M8.0）の各南海地震により、それぞれ400余人、70余人、1人の死者を出した。主な死因は津波による溺死であり、津波の規模により人的被害者数が大きく異なっている。

図-1は、宇佐町における現況地形および現況港湾施設の設置状況である。沿岸部では、道路を兼ねた防潮堤が町全体を取り囲み、その背後には民家が立ち並んでいる。また、同町には萩谷川の河口部があり、これは市街地付近で排水性の悪い水路に枝分かれをしている。そして、萩谷川を含むこれら水路の河口部には、それぞれ水門が設置されている。図中に示してはいないが、海岸や河川沿いには多くの陸閘も設置されている。津波来襲時には、これらの施設による防災効果が期待されるが、地震動や液状化などの被害により、施設が機能せず、人的被害が拡大することも考えられる。

また、河田（1997）は、人的被害の推定には住民の避難行動を取り入れるべきことを指摘しており、本研究では、避難行動のなかでも、避難開始時間が人的被害に大きく影響を及ぼす因子であると考えた。

これらのことを踏まえ、本研究では、宇佐町における人的被害最小化因子として、①津波の規模、②沿岸構造物の地震・液状化による被害程度、③水門・陸閘の開閉状況、④住民の避難開始時間を選定した。

3. 津波の数値計算と人的被害予測

ここでは、津波の数値計算および人的被害予測で用い

* 正 会 員 修(工) (株)ニュージェック河川グループ海岸・海洋チーム
** 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 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
**** 学生会員 修(工) 徳島大学大学院工研究科エコシステム工学専攻
***** 学生会員 学(工) 徳島大学大学院工研究科エコシステム工学専攻

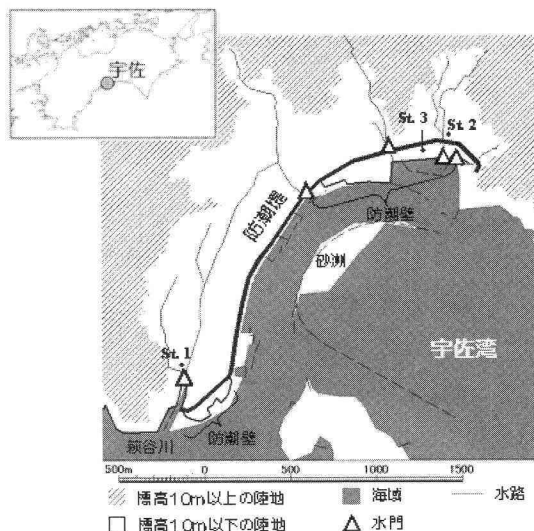


図-1 対象領域の現況地形

た手法および基本的な計算条件を示す。

(1) 津波の数値計算

津波の数値計算は、すでに著者らが行っている手法(村上ら, 1996, 1997)に準じた。表-1に、津波の計算手法および計算条件を示す。

表-1 計算手法および計算条件

	設定項目	設定値
計算手法	基礎式	非線形長波理論式および連続式
	差分スキーム	【空間差分】スタッガード格子法 【時間差分】リーブ・フロッグ法
	計算格子間隔	1250 m → 312.5 m → 78.125 m → 19.5 m
計算条件	計算潮位	朔望平均満潮位 (H.W.L.)
	計算時間間隔	$\Delta t = 1.0$ s
	計算時間	20 時間
	沖側境界条件	透過境界
	陸域境界条件	対象地域のみ遡上境界

津波の数値計算に用いる支配方程式として、水深の深い領域では移流項と摩擦項を無視した線形長波方程式、沿岸域を含む領域では非線形長波方程式を用いた。計算領域は、外洋で空間格子を粗く、沿岸部に近づくにつれて格子間隔を細かくする従来と同じ方法を用い、宇佐町周辺の地形をなるべく正確に表現した。最小格子間隔よりも狭小な水路については、井上(1986)による排水路モデルを用いて表現した。ただし、遡上計算領域内に存在する全ての水路は、一定幅 10 m、河床勾配 1/200~1/100とし、実際の河道幅が狭小になっている部分までをモデル化した。

通常の差分法では、水門や陸間の開口幅が計算格子間隔よりも小さい場合に、開口幅が的確な大きさを表現されない。格子間隔分だけ門扉を開放状態にすると、そこを通過する流量は過大に計算される。そこで、水門・陸間の開口幅を数値計算で表現するために、水門・陸間の門扉の開口幅と高さに合わせて通過流量を制御する方法(杉本ら, 2002)を用いた。

(2) 人的被害予測手法

人的被害の算出には、島田ら(1999)による住民の避難行動を考慮した手法を用いた。本手法では、被害予測の対象地域を格子状に区切り、この区域内に住む住民を1つのグループとして扱い、住民はグループ単位で避難行動をとるものと仮定する。また、住民は避難場所を目指して、避難経路が残された方向(道路が浸水していない方向)に移動するものとする。浸水範囲に含まれる建物は鉄筋コンクリート造りの構造物なども含め避難場所から除外し、標高10 m以上の場所(図-1参照)を避難場所とした。人的被害の算定は、津波の数値計算で得られた計算結果を参照し、一定時間ごとに住民が被害を受けるか否かの判定を行い、区域内の住民が避難完了、あるいは住民の全員が被害に遭うまで繰り返した。なお、地震による家屋倒壊などで発生する人的被害は考慮せず、津波による被害のみを推定した。また、被害によるパニックや負傷者の救出などの不確定要素をはじめ、地震被害による避難経路の寸断など避難の障害については考慮しない。

避難開始は住民個人の意志によるため、1つの値で表現することは難しい。ここでは、避難開始時間を地震発生から一律25分と仮定した。また、住民の避難は歩行のみとし、自動車などの移動手段は用いないと仮定した。消防科学総合センター(1987)には、ベビーカーを押している人や子連れの人、老人の単独・グループ歩行時の避難速度が示されており、住民の避難速度はこれらのうち最も速度が遅くなる老人のグループ時の歩行速度である0.751 m/sを代表値として用いた。

洪水中に避難が困難となってくる浸水深は、人の膝の高さ程度である(消防科学総合センター, 1985)。また、津波氾濫時には、水とともに多数の漂流物が流されるために、水位が膝高を上回ると歩行動作(膝の上下運動)は困難となることが考えられる。ここでは、50 cmの浸水深がほぼ成人の膝の高さに一致することから、50 cm以上の浸水深では避難行動が困難となり、人的被害を受けるものとした。

4. 人的被害最小化因子の影響度評価

(1) 津波の規模

津波の規模が比較的小さかった昭和南海地震津波と、

最大規模であった安政南海地震津波の2ケースを想定し、人的被害予測を行った。ただし、津波の数値計算は、沿岸構造物の地震・液状化による被害は考えず、水門・陸閘は全閉しているという条件で実施した。

図-2に、昭和および安政南海地震規模の津波を想定した場合の最大浸水深分布を示す。宇佐町では、昭和南海地震規模の津波であれば、防潮堤堤内側への浸水は見られない。これに対して、安政南海地震規模の津波であれば、津波は防潮堤を越波し、堤内にまで遡上することがわかる。表-2に、人的被害予測結果を示す。昭和南海地震規模の津波では人的被害は発生しないが、安政南海地震規模の津波が来襲する場合には被害が発生し、その被害率は5.8%となった。なお、被害率の母数は、対象領域内の総人口4339人である。

(2) 沿岸構造物の地震・液状化被害程度

兵庫県南部地震の被害記録(土木学会編, 1997)から、震度6弱以上の強震地域における沿岸構造物の被害状況を整理した。その際、津波遡上に影響を及ぼす地震被害項目として、構造物天端高の変位に着目した。また、神戸・大阪を液状化の可能性が高い地域(以下、大液状化地域とよぶ)、淡路島を「液状化の可能性が低い地域(以下、小液状化地域とよぶ)」とし、これら2つの地域に分けて沿岸構造物の被害を整理した。表-3に、沿岸構造物の地震・液状化被害を取りまとめたものを示す。ここでは、沿岸構造物の被害として、概ね表-3の最大被害を参照し、地震・液状化被害を考慮した津波の数値計算、および人的被害予測を行った。なお、想定津波は安政南海地震津波とし、水門・陸閘は全閉条件とした。図-3は、宇佐町を小液状化地域、大液状化地域と想定した場合の、地震発生後30分における浸水状況である。図には、地震・液状化被害の有無による違いを見るために、地震被害なしの場合の計算結果も示した。地震被害を考慮しない場合は、防潮堤により市街地への遡上が妨げられている。一方、地震・液状化被害を受けた場合は、

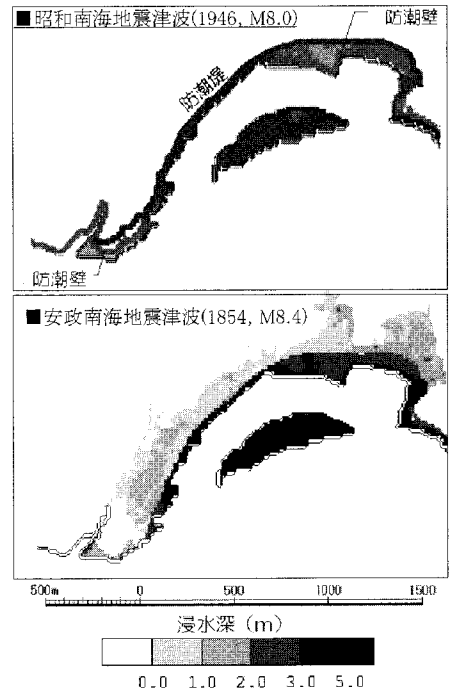


図-2 最大浸水深分布

表-2 津波規模と人的被害率

津波の規模	被害者数	被害率
昭和南海地震津波(M8.0)	0人	0.0%
昭和南海地震津波(M8.4)	255人	5.8%

沿岸構造物の沈下や全壊により、第1波目から津波が市街地へ遡上しており、大液状化地域を想定した場合の方がより大きく広がっている様子が確認できる。

沿岸構造物が地震・液状化被害を受けた場合の人的被害は、表-4に示すとおりである。地震・液状化被害を受けない場合に比べて、小液状化地域に相当する地震・

表-3 1995年兵庫県南部地震における沿岸構造物被害

構造物の種類			小液状化地域		大液状化地域	
			平均的被害	最大被害	平均的被害	最大被害
重力式	防波堤		0.2m沈下	0.5m沈下	1.9m沈下	2.8m沈下
	岸壁	不安定型	0.2m沈下	0.5m沈下	全壊	全壊
		不安定型以外	0.2m沈下	0.5m沈下	1.4m沈下	2.5m沈下
その他	土堰堤		被害データなし		40%沈下	全壊
	鋼矢板式構造物		0.1m沈下	0.1m沈下	0.1m沈下	全壊
	岸壁背後の構造物		被害データなし		全壊	全壊
	掘り込み式河川護岸		防潮機能への影響が小さい被害			
水門・樋門・陸閘	閉鎖状態		防潮機能への影響が小さい被害			
	開放状態		閉門操作に支障			

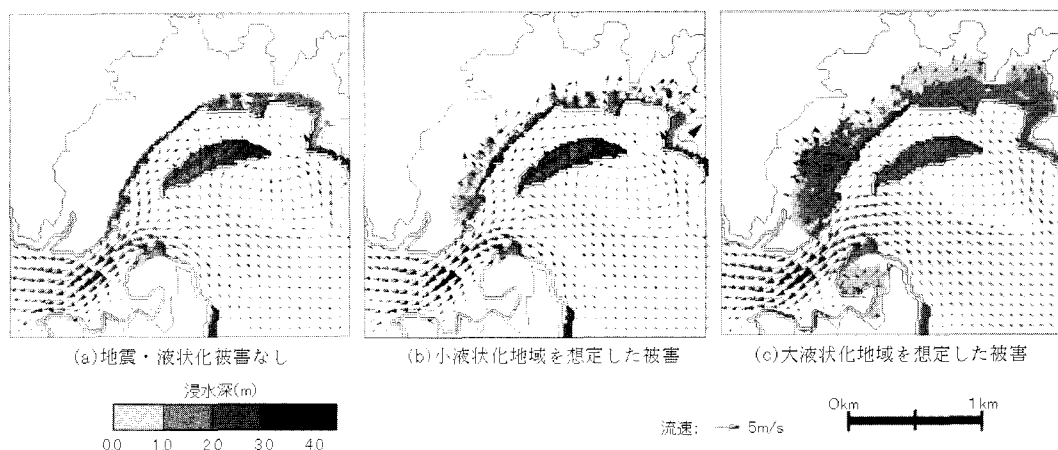


図-3 震後30分における津波浸水状況

表-4 地震・液状化被害と人的被害率

沿岸構造物の地震・液状化被害程度	被害者数	被害率
被害なし	255人	5.8%
小液状化地域を想定した被害	830人	13.7%
大液状化地域を想定した被害	954人	15.7%

液状化被害を想定した場合の人的被害は、3倍以上となり、地震・液状化の被害を想定することにより、極端に被害が多くなることが明らかである。

(3) 水門・陸閘の開閉状況

宇佐町の計算対象エリア内には、水門5基と陸閘59基が整備されている。ここでは、これら門扉の開閉状況を変化させた津波計算を実施し、人的被害予測を行った。なお、想定津波は安政南海地震津波とし、沿岸構造物の地震・液状化による被害はなしとした。

図-1に示された出力地点における時間波形を、図-4に示す。出力地点は、萩谷川河口付近、防潮堤背後、防潮堤と防潮壁とに周囲を取り囲まれた地点の3地点とした。全ての水門・陸閘を閉鎖することにより、萩谷川河口付近では津波の流入が完全に妨げられており、また、防潮堤背後の地点においては、津波の浸水開始時間が約50分遅延し、最大水位も1.2m程度低くなっていることがわかる。これに対して、防潮堤と防潮壁に囲まれた地点では、水門・陸閘の閉鎖が浸水開始時間や最大水位に及ぼす影響はほとんど見られないが、全ての水門・陸閘を閉鎖すると海水が排除されないために、水位が一定を保ち低下しない現象が確認された。

表-5に、門扉の開閉状況と人的被害との関係を示す。表から、全ての水門・陸閘を閉鎖することで被害率を4.9%軽減することができ、特に、陸閘の閉鎖に比べて、水門の閉鎖による被害軽減効果が大きいことがわかる。

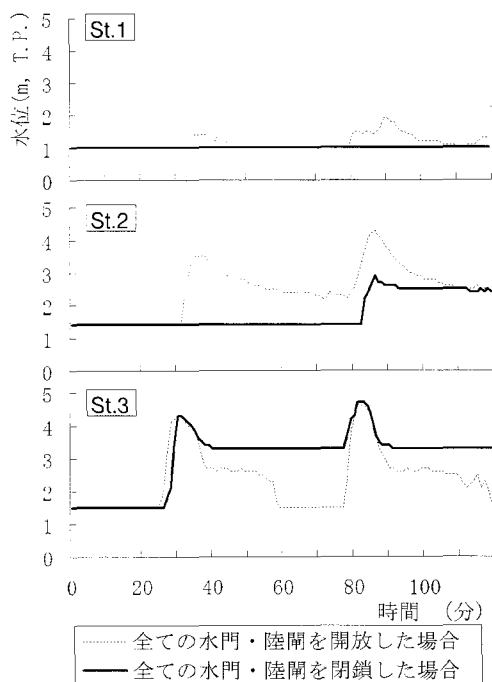


図-4 水位の時間的変化

表-5 水門・陸閘の開閉状況と人的被害率

水門・陸閘の開閉状況	被害者数	被害率
全水門・陸閘を開放	437人	9.9%
陸閘のみを閉鎖	421人	9.6%
水門のみを閉鎖	274人	6.2%
全水門・陸閘を閉鎖	255人	5.8%

(4) 避難開始時間

住民の避難開始時間を地震発生後25分から5分ずつ早め、

人的被害予測を行った。図-5に、住民の避難開始時間と被害率との関係を示す。図中には、例として、①沿岸構造物の被害なしで水門・陸閘を全閉した場合、②大液状化被害を想定した場合、③水門・陸閘を全開した場合の結果を示した。震後25分に避難開始した場合の被害率は5.8～21.7%であるのに対し、震後20分では0.1～0.6%にまで軽減され、さらに震後15分では被害が発生しないことがわかる。これにより、沿岸構造物が地震・液状化被害を受けた場合や水門・陸閘を閉鎖できなかった場合においても、早期避難により被害は確実に軽減できることが示された。

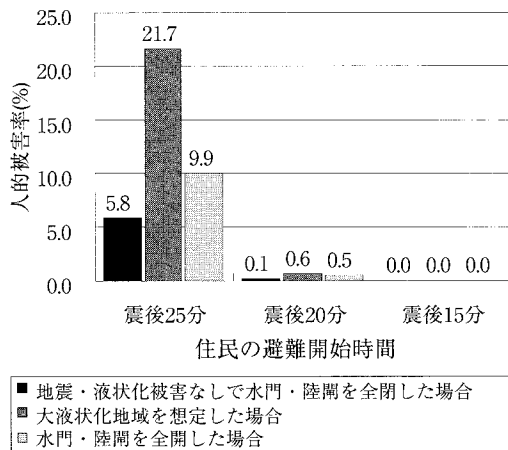


図-5 避難開始時間と被害率

5. 人的被害最小化因子の総合的評価

宇佐町では、安政南海地震規模の津波が来襲すれば、沿岸構造物の地震・液状化被害を受けず、かつ、全ての水門・陸閘が閉鎖できたとしても、住民の避難開始が震後20分以上要する場合には人的被害の発生があり得ると推測された。特に、水門・陸閘が閉鎖できなかった場合には、被害率が約1.7倍の9.9%（震後25分後に避難を開始した場合）となり、さらに、沿岸構造物が地震・液状化による被害を受けた場合には、約4倍の21.7%にまで被害が拡大することが示された。

これらのことから、同町においては、市街地を取り囲むように整備された防潮堤が地震・液状化被害を受けないように調査・対策を講じておく必要がある。また、津波来襲前に水門・陸閘を閉鎖できるような体制を確立しておくことも有効な被害最小化対策と言える。ただし、これら門扉を閉鎖する場合は、海水が排除されない箇所が発生した。これにより、道路の交通機能が麻痺し、搬送活動や消火・救助活動といった迅速性を要する応急作

業に支障を及ぼすことも考えられる。しかしながら、沿岸構造物が地震・液状化被害を受けた場合や水門・陸閘が閉鎖できなかった場合においても、早期避難により被害は確実に軽減できることから、住民の早期避難を促すことが最も有効な人的被害最小化対策であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、高知県土佐市宇佐町を対象として、当該地域における地形特性から、人的被害に影響を及ぼす因子を選定し、津波の数値計算ならびに人的被害予測シミュレーションを実施した。これにより、津波規模や、沿岸構造物の地震・液状化被害程度、水門・陸閘の開閉状況、住民の避難開始時間が津波による人的被害に及ぼす影響度を定量的に示すことができた。また、これらの影響度を総合的に評価することにより、対象地域における人的被害最小化対策を具体的に提案することができた。ただし、陸上における津波の数値計算の精度向上と、住民の避難行動をより詳細にモデル化することが今後の課題として残る。

今後、地方自治体では、都道府県や市町村単位でのより一層具体的な地震・津波に対する検討が求められる。本研究は、地域スケールでの具体的な津波防災対策の効果を評価する手法を示したものであり、今後の地方自治体における津波防災対策の検討の一助となるであろう。

最後に、本研究は科学研究基盤(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(1986)：開水路非定常流の数値計算法とその水工学への応用に関する研究，京都大学博士論文，pp. 204-214.
- 河田志昭(1997)：大規模地震災害による人的被害の予測，自然災害科学，16-1，pp. 3-13.
- 消防科学防災センター(1985)：地域防災データ総覧 風水害・火災編。
- 消防科学防災センター(1987)：地域防災データ総覧 地域避難編，pp. 91-96.
- 杉本卓司・村上仁士・島田富美男・上月康則・倉田健悟・志方建仁(2002)：津波に対する水門・陸閘の有効活用とその効果に関する考察，海岸工学講演会論文集，第49巻，pp. 306-310.
- 土木学会編(1997)：阪神・淡路大震災調査報告書，土木・地盤3，阪神淡路大震災調査報告委員会，pp. 47-487.
- 村上仁士・伊藤慎彦・山本尚明(1996)：各種断層モデルによる四国沿岸域の津波シミュレーションに関する考察，徳島大学工学部研究報告，第41号，pp. 39-53.
- 村上仁士・上月康則・山本尚明・後藤田忠久(1997)：高知県宇佐における津波の数値解析に関する基礎的研究，平成9年度土木学会四国支部技術研究発表会，pp. 166-167.