

津波による人的被害予測に関する一考察

島田富美男* ・村上仁士** ・上月康則***
杉本卓司**** ・西川幸治*****

1. 緒 言

津波の陸上遡上により、浸水域に存在する建物は流失、全壊、床上・床下浸水等の被害を受ける。こういった物的被害は、津波の最大浸水範囲および最大浸水高から予測できる。しかし人的被害については、住民の避難行動に依存するため予測することは難しい。

河田 (1997) は、過去の津波災害における津波高と死亡率の関係を統計的にまとめ、津波が遡上する最低津波高が 2 m を越えると、人的被害が発生することを示した。また同じ津波高でも地震後の行動により、安全側にとるか危険側にとるかによって死亡率が 10 倍以上も異なることを示している。小谷ら (1998) は、GIS による土地利用・地形・地理情報を利用し、津波による人的被害の予測を行っているが、その値は浸水域に含まれる人口を最大被害者数としている。すなわち人的被害の予測に、住民の避難行動は考慮されていない。しかし実際、住民は避難勧告などをうけ津波が氾濫する前に安全な場所へ避難できれば家屋は被災しても人的被害をまぬがれることができる。

そこで本研究では、住民の避難行動を新たに考慮した津波による被害予測手法を提案し、かつて津波被害を受けた地域にそれを適用し、人的被害予測を行った。その予測手法には GIS を利用している。

2. 人的被害予測手法

図-1 に、人的被害予測の流れ図を示す。まず最初に津波の遡上を考慮した津波の数値計算を行う。次に、国土数値情報をもとに地図データを GIS 上になるべく詳細に作成する。また作成した地図データに、数値計算から得た津波の結果をデータベースとして GIS に取り込む。

ついで避難開始時間 t_0 を設定する。避難の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。そこで、アンケート調査や日常の津波防災意識から

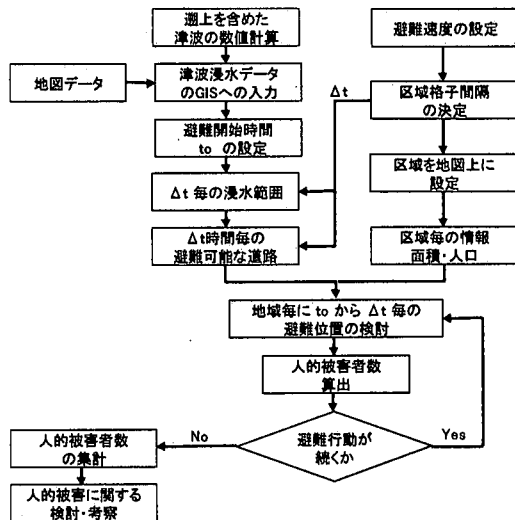


図-1 人的被害予測の流れ図

避難開始時間を代表値で設定する。一方、避難速度 V を設定する。

住民の避難速度が決まると、次に人的被害予測対象地域を格子状に区切り、その 1 格子を 1 区域として GIS 上の地図に設定する。この区域内に住む住民を 1 つのグループとして扱い、グループ単位で避難行動をとるものと仮定する。またここで設定する区域格子間隔 Δx は、後に一定時間 Δt 毎の住民の避難を考慮する際に Δt 時間でちょうど 1 格子ずつ移動する格子間隔とするため $\Delta x = \Delta t \times V$ で与える。ここで格子間隔 Δx および時間間隔 Δt は小さくすれば、空間的にも時間的にも詳細な避難行動を考慮することになるが、後に行う人的被害の算出の際に多大な労力が必要となる。逆に $\Delta x, \Delta t$ を大きくしすぎると、避難を考慮したとはいえなくなる。したがって Δt は、被害予測地域の大きさと避難距離から、数分~10 分程度に設定する必要がある。

設定した各区域について GIS を用い、各区域における陸上部の面積、人口を調べておく。また先に取り込んだ津波のデータベースを用いて、避難開始時間 t_0 から Δt 毎の浸水範囲をエリアデータとして作成する。

ここでは、津波の浸水範囲を浸水高 50 cm 未満の範囲

* 正会員 工修 阿南高等専門学校助教授 建設システム工学科
 ** フェロー 工博 徳島大学大学院教授 工学研究科
 *** 正会員 工博 徳島大学大学院助教授 工学研究科
 **** 正会員 工修 ニタコンサルタンツ(株)
 ***** 学生会員 徳島大学大学院 工学研究科

と50 cm以上の範囲に分けて示す。50 cmの浸水高はほぼ成人の膝の高さと一致し、それ未満の浸水高ではまだ避難行動が可能と判別し、50 cm以上の浸水高では、避難行動が困難となり、人的被害を受けるものとする。

また、浸水範囲と同時に Δt 毎の避難に利用できる道路を地図上に示す。ここでは浸水していない道路のみを避難経路とする。これは、浸水している道路を進むには危険を伴い、最短経路であっても避難経路として選択することはほとんどないためである。このほか夜間で道路自体が見えない、地震による避難経路上の障害物の問題などがあるが、避難時の障害は津波の浸水のみを考慮することとした。

次に区域毎に Δt 毎の避難位置を検討する。住民の移動は、避難場所を目指し避難経路が残された方向にグループ単位で最適な経路を移動するものとする。

人的被害は、ある時点 t において、住民が移動している区域内の陸上部面積 S_0 に占める50 cm以上浸水面積 S_1 の区域の割合 S_r から算出する。その時点 t でその区域にいる住民数に S_r を掛けて得た値を被害者数として判定し、次の時点 $t+\Delta t$ で次の区域に移動するのは被害者数を差し引いた住民数とする。この追跡計算を1つの区域の住民について、避難完了もしくは住民の全員が人的被害に遭うまで繰り返し続ける。

最後に算出した被害者数を集計し被害者数とした。

3. U町における人的被害予測

3.1 津波の数値計算

ここで対象とする津波は、1854年の安政南海道地震(M8.4)を想定した相田の断層モデル(1981)を用いる。

a) 基本方程式

津波の数値計算に用いる基本方程式としては、水深の深い領域では移流項と摩擦項を省略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る(村上ら, 1996)。

津波の遡上は非線形計算の場合のみ考慮し、線形計算では考えない。また計算領域内に防潮堤や防波堤が存在し、水位がその天端高を越える場合には本間公式を用いて線流量を求める。

b) 領域の接続

ここでは外洋で空間格子を粗く、沿岸部あるいは湾口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(村上ら, 1996)を用いた。

3.2 安政南海道地震津波の再現計算

a) 計算領域

対象地域は、南海道地震による津波の被害を繰り返し受けてきた高知県U町とした。計算領域(表-2参照)には、最も大きい領域に断層を含む領域を取り、U町へ

と徐々に計算格子を小さくしていき、U町周辺海域の地形をなるべく正確に表現する。ここでは海図などの各種地形図を用い、陸上および海域の地形データを作成する。

b) 粗度

水域および陸域に関する摩擦係数をManningの粗度係数を用いて表-1のように表現する。

表-1 Manningの粗度係数の分類

対象地形	粗度係数	対象地形	粗度係数
陸域で標高10 m以上	0.16	住宅密集地	0.16
陸域で標高10 m以下	0.04	市街地	0.12
水域で水深5 m以下	0.04	堆砂領域	0.04
水域で水深5 m以上	0.025		

c) 解析条件

表-2に各計算領域の解析条件を示す(村上ら, 1997)。計算時間間隔は全領域で1秒、再現時間は2時間とし、初期条件は静水面で与える。

表-2 各計算領域の解析条件

項目	設定値			
領域	領域	領域2	領域3	領域4
基礎方程式	線形長波	非線形長波		
境界条件	沖	隣接する境界との接続		
	陸	完全反射		遡上
格子間隔	1250 m	312.5 m	78.125 m	19.5 m
格子数	100×134	86×86	118×86	146×178
領域の大きさ	125.0 km×167.5 km	26.9 km×26.9 km	9.2 km×6.7 km	2.9 km×3.5 km

3.3 避難開始時間および避難速度

この地域を含む高知県一帯は、宝永・安政南海道地震時に震度6、昭和南海道地震時に震度5であり、地震被害も最大級であった。こうした地域では地震および津波による被害を受け、地震被害を受けたところに津波が来襲するため、津波だけの場合以上に大きな被害を受ける。とくにこうした複合的な災害については人的被害の原因を地震と津波に区別することが困難である。

そこで、まず本研究では地震による家屋の倒壊などの被害は考慮せず、津波による被害のみを推定する。したがって、地震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。

a) 避難開始時間

人的被害の予測は、避難開始時間の設定により被害者数が大きく変動すると考えられる。ここでは、山本ら(1998)のU町でのアンケート調査の結果を踏まえ、避難開始時間 t_0 を地震発生後15分に設定する。また避難開始時間を早めたときの人的被害の軽減効果を検討するた

めに、避難開始時間を Δt ずつ早めた場合についても検討する。

b) 避難速度

避難は歩行のみにより行うものとし、ほかの移動手段は考慮しない。消防科学センター（1987）によると、ベビーカーを押している人の平均歩行速度が 1.07 m/s 、子連れの人が 1.02 m/s 、老人の単独歩行時が 0.948 m/s 、老人のグループ歩行時が 0.751 m/s である。ここでは、これらのうち最も歩行速度が遅い老人のグループ時の歩行速度から、住民の避難速度を 0.751 m/s に取る。

3.4 人的被害予測に用いる U 町のデータ

a) 地図データ

U 町の地図データの作成には縮尺 $1/5,000$ の平面図を用い、GIS 上に海岸線、道路、河川・水路、建物を地図データとして作成する。また津波の数値計算結果から Δt 時間毎の浸水範囲も地図データとして作成する。

b) 人口に関するデータ

U 町における人口は 6079 人（H7 年国勢調査）、家屋数は 2888 戸（H10 年 12 月市役所調べ）という値を用いる。この値から 1 戸あたりの人数を 2.10 人/戸と求め地図上の家屋に対応した人口分布とする。

c) 時間間隔と格子間隔

ここでは、避難を考慮する時間間隔 Δt を 5 分に設定する。このことから区域の格子間隔を $\Delta x = \Delta t \times V = 225 \text{ m}$ とし、住民が Δt 時間でちょうど 1 格子分移動すると考える。図-2 に避難を考慮する際に設定した区域メッシュを示す。

d) 避難場所

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として一応除外し、標高 10 m 以上の場所（図-2 中、影の領域）を避難場所に設定した。

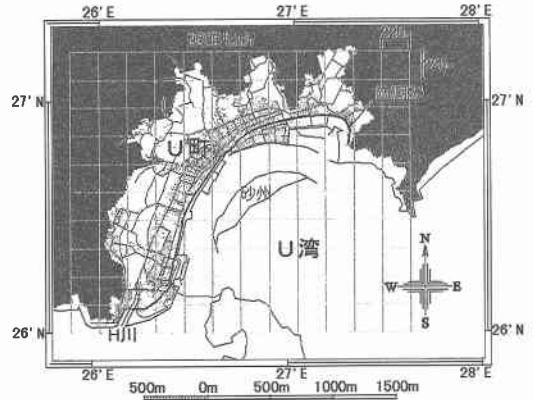


図-2 避難場所に設定した標高 10 m 以上の場所

4. 人的被害予測の結果

4.1 浸水状況

遡上を考慮した津波の数値計算結果から、図-3 に浸水状況を避難開始時間 $t_0 = 15$ 分から 10 分毎に示し、同時にそのときの避難可能な道路を示す。一連の図から、時間の経過に伴って南の地域から浸水範囲が北へと広がる様子が確認できる。また地震発生 25 分後には、北の地域でも浸水が始まっている。U 町の浸水はほとんどが 50 cm 以上の浸水高で占められており、ここで対象としていない物的被害も甚大になることが推測される。

4.2 人的被害の算定

3. で述べた方法により U 町における人的被害予測を行った結果、被害者数は 288 人と求められた。これは被害予測対象地域住民の 6.6% にあたる。

次にこの被害者数と、これまで行われてきた最大浸水範囲から予測される被害者数との比較を行う。

図-4 は津波の数値計算を 2 時間分行った結果より得た最大浸水範囲である。この図から 2 時間で避難場所とした標高 10 m 以上の地域のすぐ近くまで浸水すること

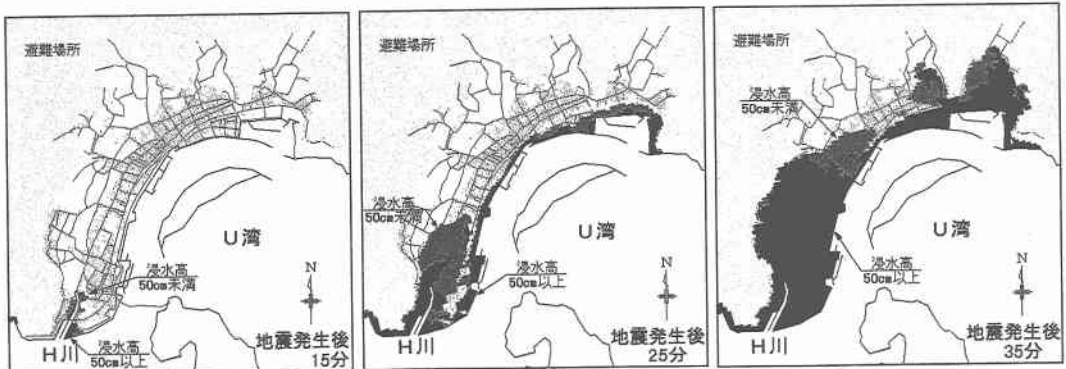


図-3 時間経過に伴う浸水状況

がわかる。浸水高 50 cm 以上の範囲内には 1963 戸の家屋があり、これはこの地域に存在する家屋の 93.9%にあたる。すなわち従来の方法では人的被害率は 93.9%と評価され、被害者数は 4122 人と予測できる。このことから、人的被害を予測する際にこれまでのように住民の避難を考慮しないと被害者数を過大に評価してしまうことがわかる。

一方、本手法による被害者数には、アンケート調査結果なども評価に取り入れてはいるものの先にも述べたように地震被害を全く考慮していないため、実際に生ずる地震・津波時の被害者数として過小に評価されていると解釈すべきである。しかし、本手法も陸上における津波の数値計算の精度をあげること、および住民の避難行動をより詳細に表現することが今後の課題である。

4.3 人的被害率の分布

図-5 に人的被害率の平面分布を示す。U 町の南の地域のみで人的被害率が高く、とくに H 川河口の東側の沿岸地域では 90%以上の被害率となる。これに対し北側の地域では、津波による人的被害を受けないことがわかる。これは氾濫した津波が北の地域に及ぶまでに、住民が避



図-4 U 町における最大浸水範囲

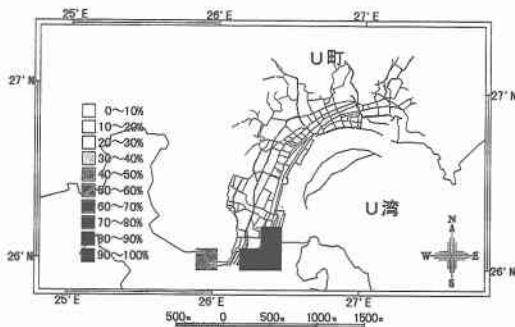


図-5 人的被害率の平面分布

難場所へ移動し終えているためである。

5. 避難行動と人的被害の軽減

5.1 被害者数の変化に関する考察

図-6 に 5 分毎の被害者発生数の変化を示す。地震発生後 15 分の避難開始前に 14 人が被害を受け、25~30 分後には被害者数が 118 人と最大となっている。また地震発生 45 分後まで被害が起き、その後は被害は起きていない。このことから避難途中に人的被害が発生していることがわかる。

5.2 避難開始時間と被害者数との関係

図-7 に地震発生後の避難開始時間と被害者数との関係を示した。15 分後に避難開始した場合、288 人もの被害者がでることになる。しかしこれから 5 分ずつ避難開始を早めると被害者数は、それぞれもとの 1/4 以下、1/50 以下、被害者なしと大きく減少することがわかる。これにより避難開始を早めることによる被害者数の減少効果が大きいことが示された。

5.3 人的被害率の高い地域の被害軽減対策

a) 人的被害の発生要因について

人的被害率の高い南の地域は、宝永および安政南海道地震津波時にもそれぞれ 100 余人および 40 余人の犠牲者を出しており、U 町でも最も早く津波が浸水する地域であることから津波の危険度が高いといえる。しかし、それが直接の原因で人的被害へと結びついたとは考えら

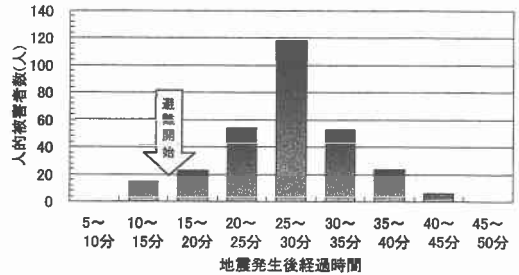


図-6 被害者発生数の時間変化

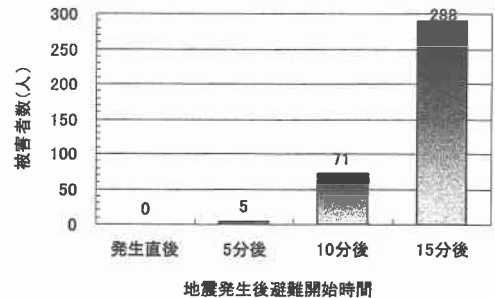


図-7 避難開始時間と被害者数との関係



図-8 U町の南の地域における浸水状況

れない。図-6でも示したように多くの住民が避難途中で被害にあっている。一方南の地域のうち図-5に示したH川河口東側の沿岸の3つの区域では人的被害率が100%、100%、98.7%ととくに高くなっている。

図-8に示すようにこれらの地域は、地震発生後15分後の避難開始とほぼ同時にH川沿いで浸水が始まり、20分後には川向かいの避難場所への経路が浸水してしまい、避難経路として使用できなくなる。そのため北に向かう避難経路しかなく住民は北へ避難することになるが、避難速度より早く広がる浸水により、地震発生後25分後には浸水域に取り囲まれた住民は孤立し、後に浸水し被害を受ける。このことが、U町の南の地域の住民の多くが避難途中で浸水被害にあい、多くの被害者を出した原因となっている。

b) 人的被害軽減対策について

この南の地域における被害軽減対策について検討する。

地震発生後15分後からH川沿いに浸水し始めることから、それ以前にH川を渡り、避難場所に移動することにより人的被害を軽減することができる。しかしこれを実際の災害時に実行するには住民の高い防災意識が必要であり、もし浸水より避難が遅れた場合を考えると危険が伴う。したがって、住民を津波から守るためには、人的被害率の高い地域が集中している地域内に住民が速やかに避難でき、浸水に耐える避難所を設置することが最も適切な対策と考えられる。そのために避難所の建物構造を強化したり、地盤高を高くするなどの津波浸水対策が避難所に必要である。

5. 結 言

本研究では、住民の避難行動を考慮した津波による人的被害予測をU町を例として行った。得られた結果を要約して以下に示す。

1) これまで人的被害予測に用いられてきた最大浸水範

囲から求める手法では、被害者数が過大評価されるため、避難行動を考慮する必要があることを指摘した。

- 2) 過去に多大の津波被害を受けてきたU町の人的被害発生機構について考察し、被害発生機構を明らかにした。
- 3) とくにU町では津波による被害者の発生は、住民の避難途中で多く発生することを明らかにした。
- 4) また避難開始時間を早めることによる人的被害の軽減効果が大きいことを具体的に示した。
- 5) U町の南の地域では住民がすぐ避難でき津波の浸水に耐える避難施設の設置が必要であることを明らかにした。

以上の結果を得たが、人的被害予測については、陸上に氾濫した津波の挙動を精度よく表現すること、地震被害による避難への影響など、予測精度をあげるための今後の課題も多い。

最後に、本研究は平成10年度文部省科学研究費基盤研究(C)(代表者：村上仁士)による研究費の補助を受けたことを記し、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 相田 勇(1981): 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所集報, Vol. 56, pp. 713-730.
- 河田恵昭 (1997): 大規模地震災害による人的被害の予測, 自然災害科学, Vol. 16, No. 1, pp. 3-13.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998): GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 356-360.
- 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.
- 村上仁士・伊藤禎彦・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.
- 山本尚明・村上仁士・上月康則・後藤田忠久 (1998): 四国における津波被災地住民の意識構造分析に基づく津波防災のあり方について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 381-385.