

街路閉塞を考慮した津波浸水時の避難シミュレーション手法の適用

田村 保* ・西畑 剛**・森屋陽一***
瀧本浩一****・三浦房紀*****

津波災害における人的被害軽減のためには、適切な津波防護施設の整備を進めるとともに、迅速かつ的確な避難行動が重要な役割を担う。適切な避難行動を行うためには、住民の避難行動特性に応じた避難計画の策定が重要であるが、そのためには避難シミュレーション手法の活用が効果的である。本研究では地震時の建物倒壊により街路閉塞が発生することを確率的に考慮した津波浸水時の避難行動シミュレーション手法を示し、津波来襲時の人的被害の発生に及ぼす街路閉塞の影響について基本的な検討を行った。また、この結果に基づき避難路および避難所の整備について、その検討のあり方を提示した。

1. はじめに

臨海部に多くの人口と資産が集中しているわが国は津波・高潮による被害を受けやすい地形条件にあり、これまでも多くの人的被害を伴う災害が発生している。政府の中央防災会議でも東海地震や今世紀前半の発生が危惧されている東南海・南海地震による被害想定を行い、これらの地震に伴って発生する津波により多くの人的被害が発生することが指摘されている。このような、津波による人的被害軽減のためには、防波堤や防潮堤、水門等の津波防護施設の整備などのハード面の対策を進めることが必要であるが、対策が必要となる海岸線の延長は膨大であり、その整備には多大な時間とコストがかかる。そのため、人的被害の軽減には、これらのハード施設整備を進めるとともに、津波による地域の危険度を表示したハザードマップを整備して、住民に津波危険地域を周知するとともにそれに基づいた避難計画を策定するなどのいわゆるソフト面の対策を進めることが必要不可欠である。

津波災害時にその効果が期待できる避難計画を策定するためには、津波災害時における住民の避難行動特性を的確に反映した避難計画とする必要がある。そのための一つの有力な手法として、津波来襲時の住民の避難行動を再現できる避難シミュレーションの活用が提案されている（例えば、今村ら（2001））。この避難シミュレーション技術は主に、地下街や建物内の火災等の災害時の群集避難行動を予測する手法として開発されてきたものであるが、陸上部の津波浸水予測結果と同時刻における住民の避難状況の予測結果を重ね合わせて避難の可否を判断することで人的被害の量的予測を行うものである。しかしながら、浸水条件下での住民の避難速度や避難の可

否限界条件の設定方法や、地震時の建物および津波防護施設の被災を考慮する必要性など、津波浸水時の住民の避難行動予測手法として適用するためには、いくつかの重要な検討課題が残されている。

そこで、本研究では地震時の建物倒壊により街路閉塞が発生することを考慮した津波浸水時の避難行動シミュレーション手法を示し、人的被害の発生に及ぼす街路閉塞の影響について検討を行った。街路閉塞の発生については、瓦礫の分布幅を確率モデルとして表現できる赤倉ら（2000）のモデルを用いて、確率的に街路閉塞を表現した。実際の避難シミュレーションでは確率的に街路閉塞箇所を設定するため、対象領域が広い本検討では、すべての街路閉塞パターンを再現する避難シミュレーションの実施は現実的ではない。そこで、モンテカルロシミュレーションにより街路閉塞パターンを作成して、各試行条件での避難シミュレーションを実施して人的被害発生量を求めた。街路閉塞を考慮しないモデルから得られる指標値との比較から、街路閉塞が避難可否に及ぼす影響の評価を行った。本検討で得られる検討結果から、避難路および避難所の整備の在り方などの津波避難計画の立案にあたっての検討のあり方を提示した。

2. 街路閉塞の予測モデル

高橋ら（1998）は兵庫県南部地震による街路閉塞の発生状況を再現する街路閉塞予測モデルを構築している。交差点から交差点までを1つの街路リンクと捉えて、車両が一部でも通行可能である確率を街路通行可能率として、その閉塞状況を予測するモデルである。このモデルによれば（旧）震度階と街路幅員から通行可能率を予測できる。現実の津波被災時の街路閉塞要因となるものは、建物やブロック塀、自販機などの倒壊瓦礫、駐車車両など種々の要因が存在するが、これらの中では建物の倒壊による街路閉塞が主要な要因と考えられる。建物の倒壊はその建築年度、構造種別によってその倒壊確率は異なることは周知の事実であるが、高橋らのモデルではそれらの要因は考慮されていない。また、街路長が長い場合

* フェロー 工修 五洋建設(株)土木設計部 部長
** 正 会 員 工修 五洋建設(株)技術研究所 主任
*** 正 会 員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所 係長
**** 正 会 員 博(工) 山口大学助教授 地域共同研究開発センター 次長
***** 正 会 員 工博 山口大学教授 工学部知的情報システム工学科

には閉塞要因となる構築物が増えるために、街路閉塞率が高くなることも予想されるが、高橋らのモデルではその影響は考慮していない。図-1は高橋らの街路閉塞予測モデルに、兵庫県南部地震での街路閉塞事例と(旧)震度情報と合わせて示したものである。

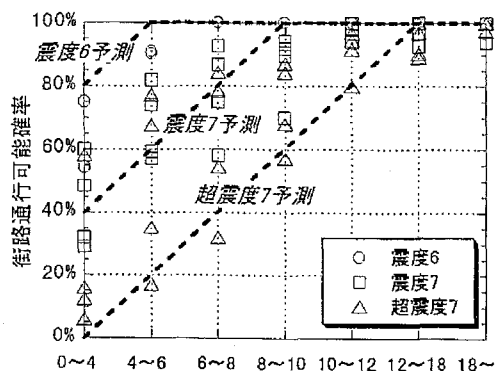


図-1 高橋ら(1998)の街路閉塞予測モデル

高橋らの街路閉塞予測モデルは車両の通行可能率を表すものであり、徒歩を原則とする津波浸水時の住民避難行動予測に直接的には使用できない。徒歩による避難に対応した街路閉塞予測モデルを作成するためには、瓦礫分布幅が予測可能ならば都合がよい。赤倉ら(2000)は高橋ら(1998)の街路閉塞予測モデルを元にして街路リンクにおける瓦礫幅の最大値の確率分布モデルを表-1のように導出している。

表-1 街路リンクの瓦礫幅確率分布

震 度	平均値 μ_I	分散 σ_I
5	0 m	0 m
6	-0.82 m	1.57 m
7	1.27 m	3.14 m

この瓦礫幅確率分布モデルは街路リンクの街路閉塞率は高橋らの提案モデルに等しくなるように設定されている。なお、瓦礫幅に負の値を考慮しているが、その場合は便宜上瓦礫幅をゼロとしている。赤倉らはさらに、街路沿道の個々の建物の瓦礫幅の確率分布モデルを提案している。同モデルは、まず街路リンクを構成する建築物の数を n として、仮想街路幅員 w' を式(1)のように求める。

$$w' = \Phi^{-1} \left[\left\{ \Phi \left(\frac{w - 3.0 - \mu_I}{\sigma_I} \right) \right\}^{1/n} \right] \sigma_I + \mu_I + 3.0 \quad (1)$$

個々の建物の瓦礫幅確率分布は、表-1に示される瓦礫幅の確率分布形状の平均値を $(w - w')$ だけ平行移動させた分布形状としている。個々の建物の通行可能率

が得られる結果、個々の建物による通行可能率を R 、街路リンクにおける通行可能率を R_s とすると、街路リンクを構成する建物数 n を用いて、式(2)が成立する。

$$R_s = R^n \quad (2)$$

本来、街路リンクの通行可能率は兵庫県南部地震の街路閉塞を最も適切に再現できるモデルとして求められたものであり、街路延長や建物数についてはモデルのパラメータとして考慮されていない。

ここでは以下のような仮定のもとで、街路延長を考慮するためのモデル化を行う。赤倉らのモデルで考慮した兵庫県南部地震における事例は平均的な街路長を代表するモデルと考えられる。ここでは、平均的な街路条件として $n = 4$ と想定し、赤倉らのモデルから得られる個々の建物の瓦礫幅の確率分布を、任意長さの街路に対する閉塞率の算定に使用する個々の建物による瓦礫幅確率分布とする。すなわち、街路延長が異なる街路の閉塞率 B_s は式(3)で求めることに対応する。

$$B_s = 1 - (1 - R_{n=4})^n \quad (3)$$

ここに、 $R_{n=4}$ は n を4とした際の個々の建物の瓦礫確率分布から求まる個々の建物による通行可能率である。

津波避難では、歩行者の通行に支障となる街路閉塞確率を算定することが必要であるが、歩行者による街路幅員の歩行可能性を判定する指標として適切なものは見当たらない。そこで、本検討では便宜的に、瓦礫の無い道路幅と歩行速度の関係を表-2のように設定した。すなわち、道路幅が1.5 m以上確保されている場合には避難行動に支障が無いものと仮定し、0.5 mより狭い場合には避難者は通行を回避するものとした。また、瓦礫の無い道路幅が0.5 m~1.5 mの場合に歩行速度が減少するものとした。

表-2 街路幅員と歩行速度の関係

街路幅員	歩行可能性	歩行速度低減率
1.5 m 以上	可能	1.0倍
0.5 m~1.5 m	可能	0.5倍
0.5 m 未満	不能	0.0倍

この条件で、震度6と震度7の条件に対して式(3)で $n=2, 4, 6, 9$ とした場合の街路閉塞率を求めたのが表-3である。歩行速度が低減する確率も同様に求めた。 $n=4$ に対応するケースは表-1から同様の避難可否条件を設定した場合に求まる街路閉塞率に等しくなる。

3. 街路閉塞考慮した避難シミュレーション手法

本検討では、西畑ら(2005)が気仙沼地点で実施した津波避難シミュレーションで採用した手法を用いた。西畑らの避難シミュレーションモデルは瀧本ら(1996)の手法を基本としており、避難空間をノードとリンクからな

表-3 街路沿道の建物数 n を考慮したリンク閉塞率

震度	道路幅(m)	n			
		2	4	6	9
6	1.25	0.028	0.056	0.082	0.121
	2.25	0.009	0.017	0.026	0.039
	4.25	0.000	0.001	0.001	0.002
	7	0.000	0.000	0.000	0.000
	13	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.25	0.233	0.411	0.548	0.696
	2.25	0.166	0.304	0.420	0.558
	4.25	0.072	0.139	0.201	0.286
	7	0.015	0.031	0.045	0.067
	13	0.000	0.000	0.000	0.000

るネットワークモデルとし、横山ら (1993) によるポテンシャルモデルを用いた避難行動モデルを基本とするものである。ただし、住民の避難速度および避難可否条件を、津波浸水を模擬した水路内での水中歩行実験結果 (Nishihata ら, 2005) から設定した点に特徴を有する手法である。本検討では、身長170 cm、体重70 kg の30歳男性を避難者として想定して、式 (4) で求められる歩行速度で避難するものとしている。また、避難が不能となる条件は式 (5) で与えるものとしている。

$$v(u, h) = \min \left(\sqrt{\frac{0.9330 - 2.176A^{3/2}}{aA}} - u, 1.5 \right) \quad (4)$$

$$v(u, h) \leq 0.4 \quad \text{or} \quad h \geq 1.5 \quad \cdots \cdots (5)$$

ここに、 u : 流速 (m/s), h : 水深 (m), a : 安全率 (= 3) である。 A は人体が抗力を受ける面積であり、水深の関数として式 (6) としている

$$A(h) = -0.1756h^3 + 0.5173h^2 - 0.0375h \quad \cdots (6)$$

街路閉塞は前節の表-3 で示した街路延長を考慮したリンク (街路) 閉塞率を用いて確率的に表現する。そのため、住民が避難路とする個々のリンク (街路) の情報として、道路幅と交差点間の距離に対応するリンク長を与える。避難シミュレーションではこれらの個々のリンクの情報に基づき、同リンクの通行不能条件や歩行速度が遅くなる条件を確率的に与える。津波時の避難では対象となる領域が一般的に広大なため、確率的に表現される街路閉塞箇所のネットワーク上でのすべての発生パターンを再現して避難シミュレーションを実施するのは現実的ではない。そこで、試行回数を減らすためにモンテカルロシミュレーションを採用することとした。

モンテカルロシミュレーションでは、1 試行ごとに発生確率に応じて閉塞するリンクおよび速度低下が発生するリンクを確率的に発生させる。このようにして構成されるノード・リンクモデルに対して避難シミュレーションを実施し、避難不能となる避難者数を求めることとした。試行回数を増やすことで避難不能となる避難者数の頻度分布が得られる。街路閉塞の発生を考慮しない場合

の避難シミュレーション結果から得られる避難不能となる避難者数とこれらの結果を比較することで、街路閉塞することによる避難に及ぼす影響が示される。

4. シミュレーションの諸条件

本検討で対象とするのは宮城県気仙沼市大川北部地区とした。想定する津波は、宮城県防災会議地震対策等専門部会の第3次被害想定 (2004) で検討対象とされている宮城県沖地震 (連動型) とした。あらかじめ検討地域に対する津波浸水計算を行い、避難シミュレーションを行う各地点の浸水深と流速の時系列の値を取り出し、前項で示した避難シミュレーションでの歩行速度および避難可否条件の判定に使用した。

津波浸水シミュレーションは、深海域では線形長波による伝播計算を、浸水対象域に近い浅海域では非線形長波理論及び小谷ら (1998) に従った粗度設定と遡上アルゴリズムにより伝搬および浸水計算を行った。差分はスタガードリーブフロッグ法とした。また計算は検討地点に近づくにつれて格子サイズを1/3ずつ小さくしてゆき、最終的には12.5 m メッシュで地形を再現した。図-2 に計算領域を示す。地震断層は宮城県防災会議地震対策等専門部会の資料 (2004) に示された断層パラメータを用い、Mansinha・Smylie (1971) に従って初期海面変位を与えた。津波は地震発生後40分で対象地域で浸水遡上を開始し、最大浸水深2 m を超える浸水が海側の埋立地を中心に発生する。図-3 は対象地域の浸水域と最大浸水深を示したものである。

避難シミュレーションにあたっては、避難経路上の街路閉塞の影響を検討することを主眼とするため、避難場所の数や配置は検討パラメータとせず、対象地区で実際に指定されている位置に設定した。同じく、避難時間による影響も検討対象としていないので、全員が地震発生後40分後に避難を開始するとの条件で検討した。避難者

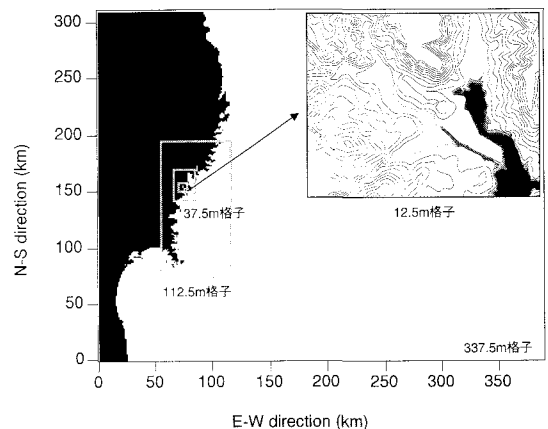


図-2 計算領域

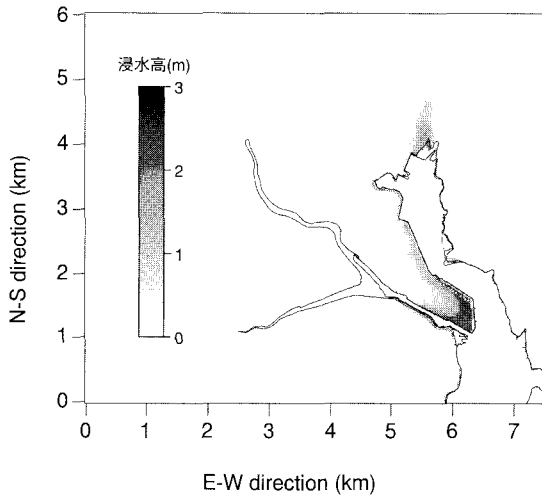


図-3 浸水域と最大浸水深

は対象地区である大川北部地区内に、前項で示した30歳男性の平均的な身体特性を有する1000人をランダムに配置した。

ノード・リンクモデルの作成は2万5千分の1の数値地図情報から行い、街路幅員についても同数値地図から得られる道路幅員を用いた。なお、2万5千分の1の数値地図から得られる街路幅員は1.5m未満、1.5m以上3.0m未満、3.0m以上5.5m未満、5.5m以上13.0m未満、13.0m以上の分類となっている。そこで、それぞれの幅員分類を代表する幅員としてそれぞれ、1.25m、2.25m、4.25m、7m、13mを与えるものとした。リンク延長に対応する建物数 n については、リンク延長との関係で表-4のように与えるものとし、それぞれの建物数 n と街路幅員に対して街路閉塞および通行支障となる確率を与えるものとした。図-4は避難シミュレーションで用いたノード・リンクモデルと避難所および避難者の初期配置を示す。

表-4 リンク長（街路延長）と建物数 n

リンク長	30 m 未満	30 m～50 m	50 m～70 m	70 m 以上
n	2	4	6	9

街路閉塞の検討では、2節で示したように当該地震による対象地域の震度と、リンクを表す街路の幅員とその延長が必要となる。宮城県防災会議地震対策等専門部会の資料(2004)によると、宮城県沖地震(連動型)では対象地区の予想震度は震度5強から震度6弱と推定されている。今回の検討では街路閉塞の影響を定性的に評価することを主眼としていることから、津波の浸水計算で想定した対象地震での予想震度にこだわらず、対象地域全域で(旧)震度6と7の間間的の震度条件をとるものと仮定した。具体的には、表-4で示される震度6と7の震度



図-4 避難シミュレーションで用いたノード・リンクモデルと避難者の初期配置

情報から得られる閉塞率の平均値を全てのリンクでとるもの仮定し、同様に歩行速度が低下するリンクを同様に仮定して避難シミュレーションを実施するものとした。

5. 検討結果

図-5は街路閉塞を考慮した場合について、モンテカルロシミュレーションの試行回数を500回とした場合の避難成功率の出現頻度分布を確率密度関数として示したものである。同図にはモンテカルロシミュレーションの試行回数による収束条件を確認するために、300回および200回の試行回数とした場合に得られる避難成功率の頻度分布を確率密度関数として示したものと合わせて示している。500回の試行で安定した頻度分布が得られていることがわかる。同図中には街路閉塞を考慮せず、地震発生後40分後に避難を開始するケースでの避難成功率74%を太矢印で示している。この結果によれば、旧震度6.5程度の条件で街路閉塞を発生させた場合には、避難成功率が上昇するケースと逆に避難成功率が下がるケースの2通りが存在することがわかる。

避難失敗者の多くは埋立地の海側から避難を開始する住民が北東側の海沿いの道を避難するケースで発生している。図-6は街路閉塞を考慮することで逆に避難成功率が向上する場合について、避難不能者の初期位置と避難所要時間のコンターを示した図中に閉塞した街路を太

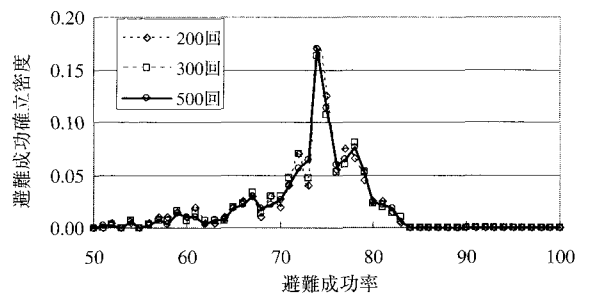


図-5 避難成功率の出現確率密度分布

線で示したものである。この場合、埋立地の海側から避難を開始する住民が、街路閉塞の発生パターンによって対象地区中央の道を避難路として選択せざるを得ない状況になり、結果的に被災を免れる住民が増えること(図中の右下の川沿いに近い地区の住民の避難経路が限定され被災を免れている)によっている。このことは、避難路の選択にあたって、浸水箇所の発生状況を適切に考慮する必要性を示すものと考えられる。



図-6 避難成功率80%となる場合の被災者初期位置
(コンターとその数値は避難成功者の避難完了時間を示す)

一方、街路閉塞を閉塞の発生状況によっては避難成功率の低下するケースの発生も無視し得ない程度に発生している。このような街路閉塞の影響による津波被害者の増加に対応するためには、例えば沿道の建築物の耐震補強を進めることは有効である。ただし対策実現には時間がかかるため、避難完了に大きな遅れが生じない程度の範囲で幅員の広い道路を利用するなど、避難計画での配慮が必要である。街路沿道の建築物の耐震補強の実施による効果を検証するために、街路閉塞を考慮しない場合に避難者が避難路として利用する率が多い10のリンクについて耐震補強対策が実施され街路閉塞が発生しない条件とし、その他の街路については前項と同じ条件とした試行回数を500回としてモンテカルロシミュレーションを実施した。図-7は避難成功率の出現頻度分布を、耐震補強対策を実施しない場合と比較して示したものである。改修対象のリンクは全体リンクの数パーセントに過ぎないが、避難成功率が7割を下回るケースがほぼ無くなった。効果的な耐震補強計画の立案における本手法の適用を示す一例と考えられる。

6. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) 街路閉塞を考慮することで人的被害の発生をより現実に近い条件で予測することが可能となり、より適切な避難所配置および避難路計画の立案が可能となった。

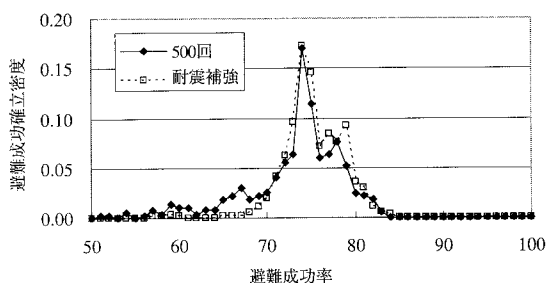


図-7 避難成功率の比較

(2) 人的被害の低減のためには街路閉塞による避難路の閉鎖を避けることが重要であるが、本検討で提案した手法を用いることで、耐震補強対策の優先順位を合理的に設定可能であることが示された。

謝辞：本研究は気仙沼海岸防災研究会における活動の一環として行った。当研究会において東北大学の今村教授を始め多くの方々に有益な助言を頂いたことを付記し、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 赤倉康寛・高橋宏直・中本 隆(2000)：都市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み，港湾技術研究所報告，第39巻，第3号，pp. 19-41.
- 今村文彦・鈴木 介・谷口将彦(2001)：津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用，自然災害科学，Vol.20，No.2，pp. 183-195.
- 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，海岸工学論文集，第45巻，pp. 356-360.
- 河田恵昭・鈴木進吾・越村俊一(2004)：防災対策の不確実性を考慮した津波減殺効果の評価手法，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1311-1315.
- 高橋宏直・赤倉康寛・中本 隆・吉村藤謙(1998)：兵庫県南部地震による被害を踏まえた街路閉塞シミュレーションに関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム，pp. 3131-3136.
- 瀧本浩一・三浦房紀・清野純史(1996)：防災要因と避難者の間の情報伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション，土木学会論文集，No.537，pp. 257-266.
- 西畑剛・森屋陽一・田村 保・瀧本浩一・三浦房紀(2005)：気仙沼地点における津波避難シミュレーション，第22回海洋開発シンポジウム論文集，pp. 210-214.
- 宮城県防災会議地震対策等専門部会(2004)：宮城県地震被害想定調査に関する報告書
- 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄(1993)：人間行動シミュレーションによる地下街の安全評価に関する研究，地域安全学会論文報告集，No.3，pp. 161-164.
- Nishihata, T., Y. Moriya, T. Tamura, K. Takimoto and F. Miura (2005)：Experimental study on people's walking velocities during the evacuation from flood situation like tsunami hazard, Proc. International Symposium on Monitoring, Prediction and Mitigation of Disasters-2005(Kyoto), pp. 447-465.
- Mansinha, L. and Smylie D. E (1971)：The displacement fields of inclined faults, Seismol. Soc. Amer., Vol.61, pp. 1433-1440.