

震災状況下における津波被害の発生構造に関するシミュレーション分析

桑沢 敬行¹・片田 敏孝²

¹正会員 (株)I. D. A 社会技術研究所 (〒370-0862 群馬県高崎市片岡町3-1-6)

E-mail:kuwasawa@ce.gunma-u.ac.jp

²正会員 群馬大学大学院教授 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

E-mail:t-katada@ce.gunma-u.ac.jp

津波災害や地震災害を対象とした被害想定に関する研究は、数多く存在する。しかし、そのほとんどは各災害を単独で取り扱ったものであり、連動して発生する両災害の相互作用を考慮した人的被害構造が検討された事例は少ない。本研究では、このような問題認識から、地震発生から津波襲来までの地域状況を総合的に表現するシナリオ・シミュレータを構築した。具体的には、想定地震に対する家屋倒壊やそれに基づく道路閉塞を表現することで、地震による直接的な被害や避難路制約に基づく避難の遅延などを考慮した津波災害時のより現実的な人的被害の推計を可能としている。また、本研究では、本シミュレータにより、津波避難における家屋倒壊や道路閉塞の影響や家屋の耐震化による人的被害の低減効果について分析した。

Key Words: tsunami, earthquake, house collapse, road blockage, human casualty

1. はじめに

津波常襲国であるわが国においては、東海・東南海・南海地震を始めとした津波を伴う巨大地震が、近い将来において非常に高い確率で発生すると予測されており、効果的な津波対策の実施が急務となっている。

ここで、日本近海を震源とした地震による津波の到達時間に関する推定結果¹⁾をみると、非常に短時間で津波が襲来してしまう地域がある一方で、若干の時間的な余裕がある地域も少なくない。したがって、この間において如何に避難など適切な対応行動を実施するか検討することは、人的被害規模を大きく左右する重要な問題である。また、この間に適切な対応行動を行えるか否かは、先行して発生した地震による地域の被災状況に大きく依存することが明白であることから、津波を対象とした防災計画の策定に向けて被害推計や避難対策を検討するためには、津波襲来時の社会状況のみならず、その初期状態を規定する震災状況についても考慮する必要があるといえる。しかし、これまでの検討の多くは、平時の地域状況に基づき津波襲来時の住民避難を検討するなど、津波災害を単独の現象として取り扱っているものがほとんどであり²⁾⁻⁶⁾、連動して発生する可能性が高い両災害の相互作用を考慮した検討が行われている事例は少ない⁷⁾。

本研究では、このような問題認識から、震災状況下に

おける津波対策の検討支援を目的として、地震発生から津波襲来まで地域状況を総合的に表現するシナリオ・シミュレータを構築した。このシミュレータは、想定震度や家屋属性から、家屋倒壊の発生状況を予測することに加えて、避難路となる地域の道路網に関する情報を利用することによって、家屋倒壊やブロック塀の倒壊に基づく道路の閉塞状況を表現する。さらに、地震後の津波の襲来や道路閉塞を考慮した住民の避難行動を表現することで、地震による直接的な犠牲者に加えて、道路閉塞による避難の遅延やそれによる津波犠牲者の増大など、震災やその状況下における津波による人的被害の発生状況を総合的に表現することができる。したがって、家屋の耐震化や避難路の拡幅、避難誘導や避難場所の整備といった、地震や津波を対象とした種々の防災対策がもたらす効果を人的被害規模を尺度として具体的に評価する防災計画の戦略策定ツールとして活用することができる。

本論文では、シミュレータの構成や要素技術についての詳細を示す。また、実際の津波常襲地域を対象に本シミュレータを用いたシナリオ分析を実施することによって、家屋倒壊や道路閉塞の発生規模やそれらの状況による人的被害への影響について把握した結果を示す。さらに、家屋の耐震状況を変化させたシナリオ分析から、耐震化の促進による効果を地震による被害のみならず、津波による被害に与える影響について検討した結果を示す。

2. 震災状況を考慮した津波対策の重要性

(1) 津波防災における震災対策の重要性

地震により発生する家屋倒壊は、倒壊した家屋や家財による圧死という直接的な人的被害をもたらすことに加えて、家屋に隣接する道路に瓦礫を発生させることにより道路閉塞を誘発するという特徴を持つ。したがって、地震発生後の津波が襲来する段階までを視野に入れると、家屋倒壊は、道路を閉塞させることで避難を妨げ、津波犠牲者を増加させてしまうという間接的な被害をもたらす。現在、津波対策として、早期警戒体制の構築や避難施設の整備、またハザードマップの配布などによる住民の防災意識の改善など、ソフト対策と呼ばれる様々な対策が実施されている。ここで、これらのソフト対策の多くが、津波災害時における迅速な住民避難を実現するための対策であるという点を考慮すると、迅速性の如何によらず避難を不能にしてしまう危険性を持つ道路閉塞や家屋倒壊に関する対策は、地震防災のみならず津波防災の根底にも位置づけられる非常に優先度の高い課題であるといえる。

(2) 地震と津波を対象としたシミュレーション研究

地震による家屋倒壊や道路閉塞を対象とした研究には、1995年の兵庫県南部地震による被害実態を分析し、道路閉塞の予測モデルを構築している研究^{8)~12)}、またその結果を応用し、実地域の道路閉塞の危険度を評価している研究^{13),14)}など多くの研究がある。一方、津波災害時の住民避難を対象とした研究には、津波氾濫から災害情報伝達、住民避難までを総合的に表現した片田・桑沢²⁾の研究や住民の災害意識を考慮した鈴木・今村³⁾の研究、マルチエージェントシミュレーションを利用した藤岡ら⁴⁾の研究、また、須崎市を対象に避難対策を検討している竹内ら^{5),6)}による一連の研究などがある。しかし、前述のような考察から津波避難に関する根本的な問題となりえる家屋倒壊や道路閉塞については、扱われていないか、前提条件として通行不能な道路を設定する程度に留まっているものが多い。

本研究と同様な問題意識を持つ研究としては、田村ら⁷⁾による道路閉塞を考慮した避難シミュレーションの研究が挙げられる。この研究では、地震による道路閉塞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、想定地震や津波による人的被害の発生状況について分析するなど、震災状況下における津波避難について検討している。ただし、この研究では、道路閉塞による避難行動への影響把握に主眼が置かれており、家屋倒壊や避難情報の伝達については表現されていない。また、住民や家屋の分布については仮想的な想定を利用するに留まっている。これに対し本研究は、地震による道路閉塞の検討も含む総合的な津波防災対策を対象とした実用

的な検討手法の構築を目的としており、平時における住民分布、地震や津波といったハザード現象やそれに基づく家屋倒壊や道路閉塞など物的被害の発生、被災状況下における災害情報の伝達や住民避難といった社会対応、そしてこれらを考慮した人的被害の発生を扱っている。また、道路閉塞に関して言えば、既往研究においてリンク単位で表現されていた道路閉塞を個々の家屋の倒壊状況に基づき箇所単位で表現することで、道路閉塞による避難行動への影響をより具体的に表現する手法の開発を目的としている点が特徴である。このようなシミュレーション技術は、地震や津波災害時に起こりうる種々の現象や社会的な対応に基づき、地震による直接的な犠牲者や、道路閉塞に起因する避難遅延者や避難困難者、そして津波による犠牲者を含む人的被害の発生構造の分析を可能とすることから、震災や津波を想定した総合的な地域防災計画の策定を支援する手法として非常に有用であると考えている。

3. 震災状況下における津波避難シミュレータの開発

本論文では、まず本章において地震・津波災害時における家屋倒壊や道路閉塞を含む種々の地域状況を表現するシナリオ・シミュレータ(以下、本シミュレータと呼ぶ)の詳細について説明する。そして、次章において本シミュレータを用いた実地域を対象としたシミュレーション分析の結果から、家屋倒壊や道路閉塞を考慮した津波による被害推定や家屋の耐震化の効果について把握した事例を示す。

(1) シナリオ・シミュレータの基本構造

図-1は、本シミュレータで表現する事象とそれらの影響構造を示している。まず、災害現象については、地震により発生する家屋や塀の倒壊、倒壊による瓦礫の発生、瓦礫の発生による道路の閉塞状況、そして、津波の襲来状況を表現する。次に、行政や住民による社会の対応行動に関しては、地震発生時刻における住民の空間分布を表現するため、時刻を考慮した平常時における住民の活動状況を表現することに加えて、行政から住民に対して避難勧告などの災害情報が伝達される様子、そして、住民の避難行動を表現する^{2),15)}。最後に人的被害としては、地震による直接的な犠牲者として、家屋やブロック塀の倒壊による者、家具の転倒や落下物による者が表現される。また、家屋倒壊や道路閉塞の発生状況の下に表現される住民の避難状況と津波の襲来状況との時間的、空間的な関係から、津波による犠牲者の発生が表現される。なお、現時点では地震に基づく火災の表現は対象としていない。

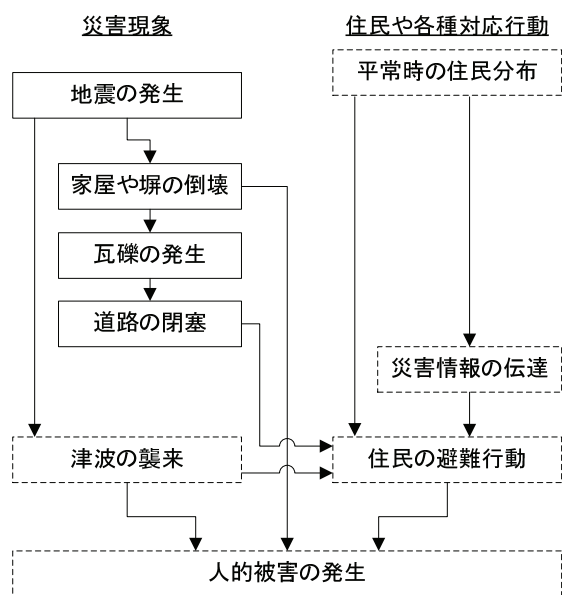


図-1 分析対象事象とその影響構造

図-1の点線で囲んだ項目については、筆者らが開発した災害総合シナリオ・シミュレータ^{2), 15)}を利用する。災害総合シナリオ・シミュレータは、災害現象に加えて、行政から住民への災害情報の伝達状況や住民の避難行動など、災害時における一連の地域状況を総合的に表現することが可能なシミュレーションシステムである。本研究では、このシステムに家屋倒壊や道路閉塞を表現するモデルを組み込み、震災状況を考慮した津波災害時の避難状況や被害の発生状況を表現させることによって、震災状況下における津波被害の発生構造を分析することを可能としている。

(2) 家屋倒壊・道路閉塞の表現

a) 家屋倒壊・道路閉塞の表現の流れ

本シミュレータでは、住民の避難行動を対象地域の道路網を表現するネットワークを対象とした経路探索問題として表現している。本研究では、道路閉塞の発生状況に応じてこのネットワークの状況を変化させることによって、道路閉塞による避難行動への影響を表現する。

図-2は、平常の状態から地震による家屋倒壊と道路閉塞の発生、そして、閉塞状況を考慮した道路の通行に関する制約を表現するまでの処理の流れを示したものである。まず、後述する方法により想定震度による個々の家屋の倒壊を判定する(図-2のA)。次に、倒壊した家屋の高さを考慮し瓦礫が広がる範囲を求め、瓦礫の発生範囲を計算する(B)。そして、道路を構成するリンクごとに幅員を考慮した道路の範囲と瓦礫の発生範囲との空間的な位置関係をみることによって、地震発生後における各リンクの有効幅員(瓦礫の発生範囲に含まれていない通行可能な部分の幅員)を求め(D)、各リンクの通行可否を判定している(E)。なお、以上の処理のみを行った場合、

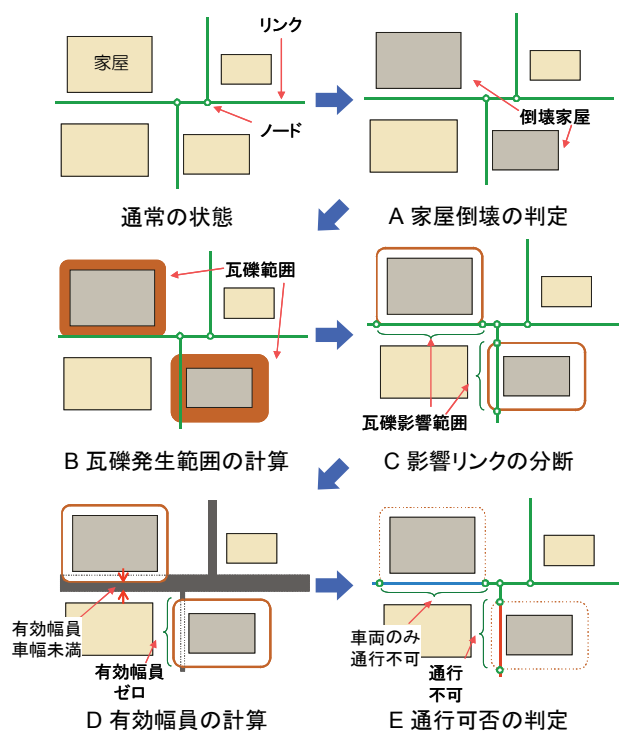


図-2 家屋倒壊・道路閉塞モデルの流れ

リンクの一部分が閉塞するだけで、リンク全体が通行不可と判定されてしまう。このような方法は、閉塞後の住民避難までを表現する場合、道路閉塞による避難行動への影響を過大に評価してしまうという問題を発生させる。そこで、本シミュレータでは、瓦礫の発生範囲を計算した段階で、瓦礫と重なる可能性のある部分でリンクを分断してから、それぞれのリンクについて道路閉塞の判定を行うこととした(C)。この処理を導入することによって、道路の閉塞による制約は必要最小限の箇所についてのみ表現することができ、より現実の状況を忠実に表現することが可能となる。

b) 家屋や塀の倒壊判定

家屋倒壊の判定については、兵庫県南部地震における西宮市のデータ、2000年の鳥取県西部地震における鳥取市のデータ、2001年の芸予地震における呉市のデータから作成された家屋形式(木造、非木造)と家屋の耐震に関わる法律の施行年に基づいた築年数区分(旧築年：S36以前、中築年：S37～S56、新築年：S57以降)別の全壊率曲線¹⁶⁾を利用することとした(図-3参照)。

また、ブロック塀の倒壊については、望月ら¹⁷⁾による1978年の宮城県沖地震における調査結果などを利用して、震度の想定加速度からブロック塀の被害率を求めている事例がある。そこで、本シミュレータではブロック塀については、倒壊確率をパラメータとして持たせ任意に設定できるようにした。

c) 倒壊により発生する瓦礫の表現

家屋倒壊により発生する瓦礫の範囲は、建物の高さや構造、建蔽率、隣接建物、そして地震による地表面の加

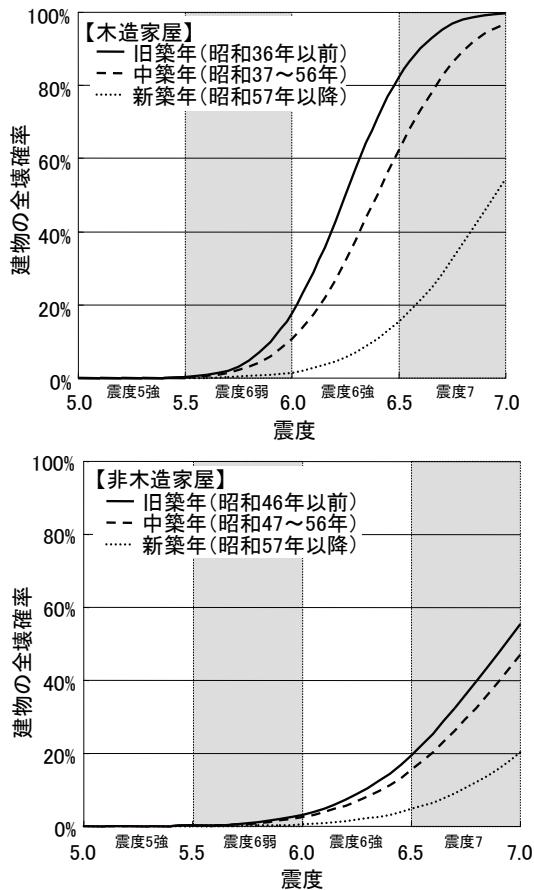


図-3 震度別の家屋の全壊率

速度ベクトルなど、様々な要因によって規定されると考えられる。しかし、対象地域の全ての建物についてこれらの情報を整理することは困難であり、建物毎にこれらの情報から瓦礫範囲を推計する方法は、実用的ではない。そこで本研究では、建物の高さから瓦礫の幅を推計し、その幅を持つ瓦礫が建物の周囲に均しく広がる状況を想定することとした。実際には、瓦礫が発生する方向は限定的であることから、この想定は現実的ではないが、過去の実績を参考に瓦礫幅を設定することで、リンク単位の閉塞状況については、再現性を確保できると考えた。

具体的に本シミュレータでは、倒壊した建物を対象に式(1)によって瓦礫幅を求め、算出された幅の瓦礫が建物の周囲に広がる状況を表現している。なお、建物の高さについては、レーザープロファイラなどを利用することで、広範囲の情報を効率的に収集することが可能である。

$$W = \alpha \cdot H \quad (1)$$

ここで、 W : 瓦礫幅 H : 建物高さ α : 瓦礫幅の算出係数である。なお、 α は、道路閉塞の発生状況の多寡を規定するパラメータとなるが、本研究では、道路閉塞に関する既往研究の成果と本シミュレータの結果が整合するような値をキャリブレーションにより求めた。ここで参考にしたのは、赤倉ら¹⁰⁾による街路閉塞発生予測

モデル(以下、参考モデルと呼ぶ)である。参考モデルは、家田ら¹¹⁾や小谷ら¹²⁾による兵庫県南部地震時の街路閉塞の発生状況に関する調査結果を取りまとめたものであり、その成果として道路幅員階級、震度別に震災後の車両通行可能率が示されている。本研究では、本シミュレータによる計算結果が参考モデルの結果と整合するような α を求めるため、後述する地域を対象に α の値を0から1まで変化させながら式(1)による道路の閉塞状況を表現し、参考モデルの基準(有効幅員 ≥ 3.0 m)に準拠して道路幅員階級、震度別の車両通行可能率を計算した。その結果、 α を0.58とした場合が最も参考モデルに近い結果が得られることがわかった。なお、このときの計算結果と参考モデルによる車両通行可能率の相関係数は、0.923であった。

なお、ここで用いた方法は、参考にした事例のリンク単位でみた場合の閉塞状況を再現するものであり、倒壊した家屋単位でみた場合の瓦礫幅までは、再現できていないことに留意する必要がある。また、この方法では、ブロック塀の倒壊の判定には震度を反映できていないため、前述の α の算定にはブロック塀の倒壊は考慮していない。建物のみの計算結果では、幅員が狭い道路において参考モデルよりも車両通行可能確率が若干高くなっていることから、ブロック塀を考慮することでさらに再現性は高まると思われる。今回の計算では、危険側の結果を得るためブロック塀については $\alpha = 1.0$ とし、瓦礫は塀の前後にのみ広がる状況を表現することとした。

d) 倒壊などによる人的被害の推計

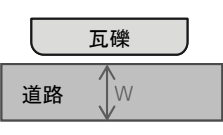
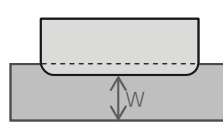
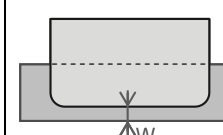
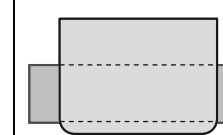
家屋倒壊による死者については、300人以上の死者が発生した最近の地震被害の事例から作成された全壊家屋と死者数との関係式¹⁶⁾で用いられている全壊家屋における死者の発生確率(木造 : 0.0676, 非木造 : 0.0240)を利用し、倒壊家屋における死者の発生を判定する。なお、全壊家屋に居たにも関わらず死者と判定されなかった住民についても、何らかの被害を受けていることが想定されることから、負傷者として判定することとした。負傷者となった住民は、その時点から避難行動などの対応を一切行うことができないよう行動を制限している。また、家屋が倒壊しなかった場合においても、地震による家具の転倒や落下物による人的被害が想定されるため、兵庫県南部地震の実態調査から得られた家財による被害確率¹⁶⁾を用いて家具の転倒や落下物による人的被害を表現することとした。

また、塀の倒壊については、望月ら¹⁸⁾によって実施された地震の被害調査によると宮城県沖地震などにおいて複数の死者の発生が確認されているが、絶対数が少なく、判定式を構築することが困難なことから、瓦礫範囲内の住民については、全て負傷者として扱うこととした。

e) 道路閉塞の判定

家屋倒壊による道路閉塞は、幅員を考慮した道路と瓦

表-1 道路閉塞による道路の通行可否の判定

タイプ	i	ii	iii	iv
閉塞状態	 瓦礫は道路に重なっていない	 若干の瓦礫が道路に重なっている	 道路の殆どが瓦礫によって塞がっている	 瓦礫で道路が完全に塞がっている
有効幅員 W^{*1}	$W = W_0$	$W_c < W < W_0$	$0 < W < W_c$	$W = 0$
判定	歩行者	通行可	通行可	通行不可
	車両	通行可	通行可 ^{※2}	通行不可

※1 W_0 : 対象リンクにおける通常時の幅員 W_c : 車両の通行のために必要な幅員 (=3.0m^{10),11)}

※2 ただし、交通容量を下げるなどの対応が必要

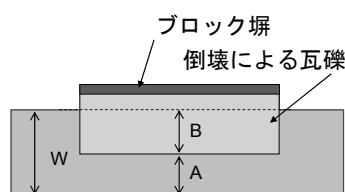


図-4 ブロック塀の倒壊の表現

礫の発生範囲との重なり関係から道路閉塞の状況を表-1に示す4つのタイプに分類し、歩行者や車両の通行可否を判定することとした。歩行者は、家屋倒壊による瓦礫を乗り越えないものとし、タイプivの閉塞が発生した場合は通行不可とした。また、車両の場合は、タイプiiiまたはタイプivの閉塞が発生していない限り対象のリンクを通過することが可能である。なお、本研究では扱っていないが、自動車による避難を表現するなど、実際に車両の通行を検討する場合は、タイプiiの閉塞状態において交通容量などを減少させることで走行速度を低下させるなどの対応が必要になると考えている。

次に、ブロック塀の倒壊の影響について考えると、歩行者の場合、若干の速度低減を考慮すればブロック塀の瓦礫の上を通過することも可能であると考えられる。そこで、ブロック塀が倒壊した場合は、仮にタイプivに示す閉塞が発生したとしても歩行者に関しては通行可とし、既往事例¹⁹⁾に基づき下式によってその際の移動速度を設定することとした(図-4参照)。

$$R = (A + \beta \cdot B) / W \quad (2)$$

$$D = R \times S \quad (3)$$

ここで、 R : 歩行速度の低減率、 A : 道路上の瓦礫が存在しない部分の幅員、 B : 道路上の瓦礫幅、 W : 道路の全幅員 ($A + B$)、 β : ブロック塀の倒壊瓦礫による歩行速度への影響係数(0.7)、 D : 対象リンク上での歩行速度、 S : 通常の状態における歩行速度

なお、車両の通行可否を判定する場合には、家

屋が倒壊した場合と同様に扱うこととした。

(3) 道路閉塞を考慮した避難行動の表現

図-5は、実際の道路や家屋データに対して前節までに説明した方法により家屋倒壊と道路閉塞を表現した場合の計算結果を示している。各図は、上から(A)倒壊建物と瓦礫範囲の分布、(B)瓦礫の発生範囲を除外した道路の通行可能領域、(C)通行可能領域の幅員から求めた各リンクの通行可否の判定結果を示している。このような状況の中を住民が避難する場合、避難途中に度々閉塞箇所遭遇し、何度も経路を再考しながら避難することになると考えられる。そこで、本シミュレータでは、避難者の行動を表現する場合、まず閉塞の発生を全く知らない状態、つまり平時の道路ネットワークを利用して避難開始場所から目的とする避難場所までの経路を探索し、求めた経路に沿って避難する行動を表現している。そして、避難経路が閉塞していた場合は、閉塞箇所まで移動した段階において、先に利用したネットワークからこれまでに遭遇した閉塞リンクを除外したもの、つまり避難者が知っている範囲で利用可能な道路から目的地までの経路を探索させることとした。以上の処理を閉塞箇所遭遇するたびに繰り返すことによって、道路閉塞が発生している状況での避難行動を表現している。

また、このような閉塞箇所に関わる情報は、避難者同士で情報交換されると考えられるため、閉塞箇所遭遇し避難路を変更した避難者については、通過中のリンクを逆方向に進んでいる避難者に対して、自分の知っている閉塞箇所の情報を伝達する行動を表現することとした。さらに、この情報を受けた避難者は、自分が知っている閉塞箇所を伝達者に対して伝えるとともに、その時点で新たに知った閉塞箇所を考慮して避難路を再考することとなる。このような処理を導入することによって、閉塞箇所を迂回している住民の隣をその閉塞箇所に向う避難者が通過するという非現実的な状況の発生を回避している(図-6参照)。

表-2 設定シナリオ

分類	項目	設定値
住民	人口, 世帯数	20,309人, 7,804世帯
	避難タイミング	避難の意思決定後5分
	歩行速度	年齢に応じて設定 ²⁰⁾
	避難率, 避難手段	意思決定モデルから算出 ²¹⁾ , 徒歩
	津波被害判定	水深身長比と流速から判定 ²²⁾
避難場所	配置	指定避難所または, 高台(図-7)
屋外 拡声器	配置	現状再現(図-7)
	伝達タイミング, 音声範囲, 聴取率	地震後3分, 250m, 30%
広報車	移動経路	過去の巡回経路を再現(図-7)
	出発タイミング, 音声 範囲, 聴取率, 速度	地震後3分, 100m, 40%, 20km/h
マスメディア	視聴率, タイミング	60%, 地震後5分
地震	発生時刻, 想定地震, 震度, 塀の倒壊率	正午, 想定東南海・南海地震, 震度6強, 50%
津波	モデル, ハード施設	非線形長波モデル, 機能しない
	メッシュサイズ, 計算時間	12.5m, 地震後1時間(10秒間隔)

定震度は震度6強である。また、同地震を初期条件とした津波解析によると、地震後約20分で最大約6mの津波が対象地域に襲来する中央防災会議の想定¹⁾と同規模の結果が得られた。なお、ブロック塀の倒壊については、東京都が前述した望月らの調査結果¹⁷⁾から作成した被害想定式²³⁾を参考に5割が倒壊する状況を設定した。

次に、社会対応シナリオとして、行政から地震発生後3分で津波に対する避難指示が対象地域の全住民に発令されることに加えて、その2分後にマスメディアからも津波警報が放送され、防災行政無線や広報車、テレビ、ラジオといった情報伝達媒体によって地域住民に災害情報が伝達される状況を想定した。そして、地域住民はこれらの地震や取得した災害情報から避難を判断し、避難を決意した住民については、避難準備などにより避難の意思決定から5分経過した後に徒歩によって最寄りの避難所または高台に向けて避難を開始するというシナリオを設定した。なお、今回の計算では、移動中に避難を決意した場合は、その直後に避難することとしたが、本シミュレータでは、外出者が一旦帰宅してから家族と共に避難する行動を表現することも可能である。また、対象地域の地理に不案内な外部からの流入者については、地域内の居住者と異なった避難行動を行うことが考えられるが、前章で述べたような避難者間の情報伝達を表現していることから、特別に扱う必要はないと判断した。より現実的な行動を表現するためには、群集行動や避難場所を示す案内板などを考慮する必要がある。

対象地域における住民の年齢や性別、そして、地震発生時刻を考慮した住民の分布については、国勢調査やパーソン・トリップ調査などを基に住民の構成や時刻に応じた活動状況を表現するモデル¹⁹⁾によって設定した。また、各住民の避難の意思決定については、同地域にお

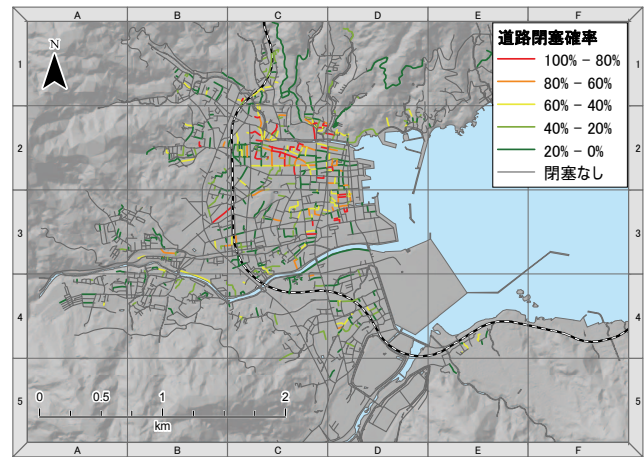


図-9 道路閉塞の発生確率

いて実際に津波勧告が発令された際の避難実態調査を基にして構築した避難の意思決定モデル²¹⁾を用いる。本モデルは、震度や個人の津波に対する意識、そして避難情報などの取得状況から避難行動の有無を決定する。避難行動は、基本的に個人単位で行うこととするが、避難開始時に自宅に居た場合は、その時点で自宅にいる世帯員がまとまって避難することとした。避難速度は、年齢と性別に応じた歩行速度の平均値²⁰⁾を利用することとし、世帯単位で避難する場合は、最も遅い避難者に合わせることにした。最後に、津波による犠牲者の判定については、須賀ら²²⁾による水深身長比と流速を考慮した歩行困難度の判定式を利用し、歩行困難となった時点で犠牲者として判定することとした。なお、以降に示す犠牲者とは、家屋倒壊や津波氾濫による死者を意味しており、負傷者は含まない。また、計算に乱数を用いることによる結果のばらつきを考慮するため、基本的に同条件のシミュレーションを50回実施した場合の平均値を結果として用いることとした。

(2) 家屋倒壊と道路閉塞の発生状況と人的被害への影響

a) 家屋倒壊と道路閉塞の発生状況

まず、想定地震に基づく家屋倒壊と道路閉塞の発生状況について把握する。現状の尾鷲市の建物分布に対して震度6強の地震を想定した場合、3,047棟の建物が全壊し、226箇所において道路閉塞が発生するという結果を得た。

図-9は、道路閉塞の発生箇所を空間的に把握するために、各道路リンクの閉塞確率(50回試行したシミュレーションの内、表-1に示したタイプivの閉塞が発生した割合)を示したものである。この結果によるとC-2中央やD-3左上といった東南海・南海地震津波の想定氾濫域(図-7参照)において特に道路閉塞が発生しやすい地域が存在していることがわかる。整備したデータから建物や道路の状況をみると、これらの地域は建物の密度が高いことに加えて、道路の幅員が小さい地域となっている。また、図-8から把握できるように1981年(昭和56年)に施



写真-1 尾鷲市の狭い道に面する古い建物

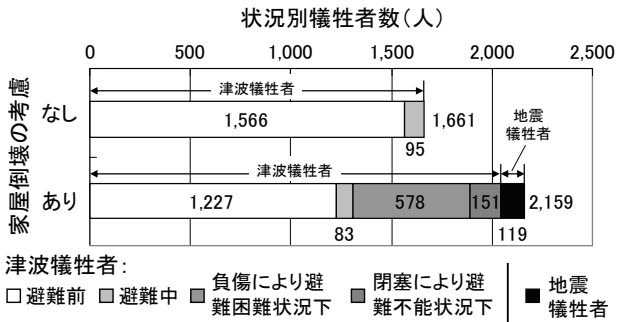


図-10 家屋倒壊の影響

行された新耐震法よりも前に建築された建物の割合が高いことも主要な要因である(写真-1参照)。

b) 家屋倒壊と道路閉塞による人的被害への影響

次に、家屋倒壊や道路閉塞による人的被害への影響について把握するため、前項で示したシナリオに基づき、家屋倒壊を考慮した場合と考慮しなかった場合の2パターンについて、地震後の津波襲来や住民避難までを考慮したシミュレーションを実施した。図-10は、それぞれのパターンを想定した場合の犠牲者数について、その発生要因を家具の転倒も含む地震による直接的な犠牲者と津波による犠牲者に分け、さらに津波犠牲者については、家屋や塀の倒壊により負傷し避難困難な状態で津波に襲われた人、閉塞により避難場所にたどり着けない避難不能の状態で津波に襲われた人、それ以外で避難前と避難中に津波に襲われた人の5種類に分類して集計したものである。この結果によると、家屋倒壊を考慮した場合、地震による直接的な犠牲者が119人発生していることに加えて、負傷による避難困難な状態で犠牲者となった者が578人、また閉塞により避難不能な状態で津波に襲われた人が151人存在している。以上の結果、家屋倒壊や道路閉塞を考慮した場合の総犠牲者数は2,159人であり、家屋倒壊を考慮しなかった場合よりも498人多い約1.3倍の犠牲者が発生するという結果となった。

(3) 家屋の耐震化による効果分析

ここでは、家屋倒壊や道路閉塞への対策シナリオとして、建物の耐震化を促進した場合のシナリオ分析を実施

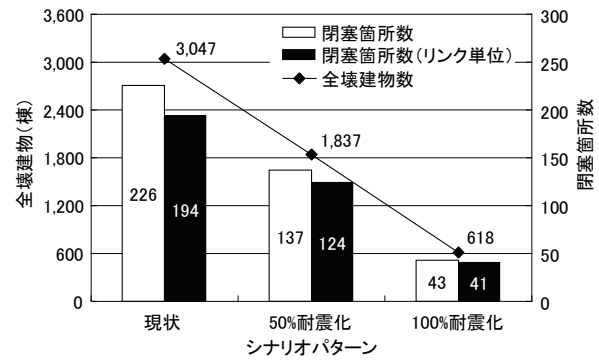


図-11 シナリオ別の全壊建物数と閉塞箇所数の変化

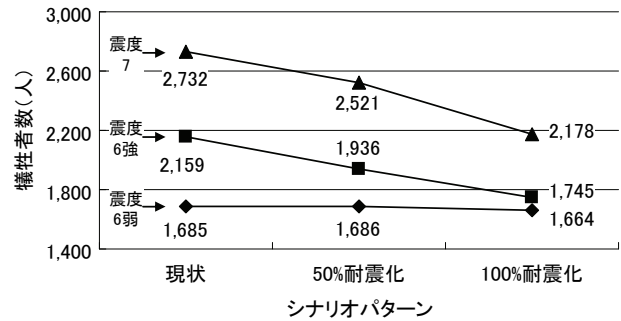


図-12 シナリオ別の犠牲者数の変化

する。具体的には、現状の建築年別の建物の構成を基準として、さらに50%の建物に対して耐震に向けた改善がなされた場合を想定し、現状において旧築年と中築年に分類されている建物の50%を新築年として扱った場合、また、対象地域の全ての建物を新築年とした場合の3パターン(以降、それぞれ現状、50%耐震化、100%耐震化と呼ぶ)のシミュレーションを実施した。

a) 家屋倒壊、道路閉塞数の変化

図-11は、パターン別の全壊建物数と閉塞箇所数を示している。なお、閉塞箇所数は、閉塞箇所数をそのまま示した値とリンク単位に集計した値を併記している。この結果によると、全壊建物数が減少するのに比例して閉塞箇所も減少しているのがわかる。しかし、震度6強を想定した今回の条件では、100%耐震化を想定した場合においても、約620棟の建物が全壊し、約40箇所の道路閉塞が発生してしまう結果となった。さらに、全壊建物数と閉塞箇所数の変化を比較すると、耐震化が促進することによる全壊建物数の減少とほぼ同じ傾向で閉塞箇所数も減少していること、全壊建物数の1/14程度の箇所において道路の閉塞が発生していることがわかる。

b) 人的被害への影響

次に、図-12から建物の耐震化による最終的な犠牲者数への影響についてみる。この図では、震度が異なった場合による影響についても把握するため、建物の耐震化パターンを前項と同様な3パターンに設定することに加えて、想定震度を震度6弱、震度6強、震度7の3パターンに変化させた計9パターンの計算結果を示している。

この結果から建物の耐震化による最終的な犠牲者数へ

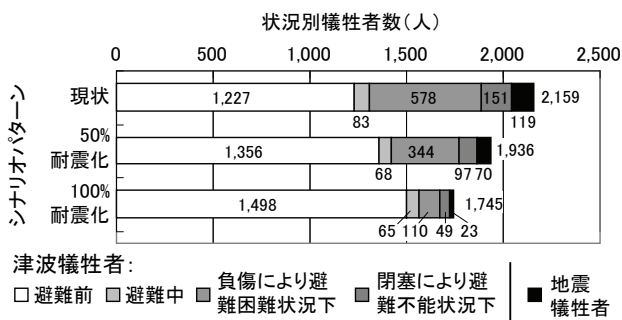


図-13 状況別犠牲者数の変化 (想定震度：震度6強)

の影響についてみると、震度6弱を想定した場合は、耐震化による改善効果はほとんどみられないが、震度6強、震度7を想定した場合は、耐震化が実施されることにより大きな被害の低減効果が得られていることがわかる。中央防災会議による東南海・南海地震の尾鷲市の想定震度である震度6強の場合では、50%耐震化で現状よりも約220人の減少、100%耐震化では、約410人も犠牲者が減少しており、最終的に2割程度の人的被害の低減効果が確認された。なお、震度7を想定した場合もほぼ同様の減少傾向となった。

また、震度6強を想定した場合について、図-10と同様な分類による状況別の犠牲者数の変化を示した結果である図-13をみると、地震犠牲者や負傷により避難困難な状態での津波犠牲者など、家屋倒壊の発生が直接的に起因している犠牲者の減少が目立つが、閉塞により避難不能となった状態で発生する犠牲者も同程度の傾向で減少していることがわかる。この結果、現状の耐震化の状態において全体の約39%を占めていた地震や道路閉塞に基づく犠牲者が、50%耐震化で約26%、100%耐震化では、約10%に減少した。

なお、耐震化が実施されるにつれて避難前に犠牲者となった人が増加しているが、この結果は、耐震化により減少した家屋倒壊に因る犠牲者の一部が避難前の津波犠牲者に移行している状況を表している。この状況は、低い避難率や避難開始の遅延といった住民避難の根本的な問題に因るものであり、家屋が倒壊せず地震による直接的な被害を受けなかったにも関わらず、避難が遅く結局犠牲者となってしまった住民が多数存在していることを示している。このような問題を改善するためには、住民の意識向上を目的とした防災教育などが必要である。

(4) 分析結果のまとめ

本章での分析の結果、今回の想定では、迅速な避難が求められる津波襲来時において、先行する地震の影響を考慮した場合、地震を考慮しなかった場合よりも多くの犠牲者が発生する危険性があること、そして、その発生要因としては、家屋倒壊などの地震による直接的な犠牲者よりも、道路閉塞による避難路の減少やそれに基づく

避難の遅延が占める割合が高いことが把握された。そして、家屋の耐震を促進することは、家屋倒壊や地震犠牲者を減少させるだけではなく、津波犠牲者の減少に対しても大きな効果をもたらすことが明らかとなった。自治体などにおいて、家屋の耐震化に対する支援の必要性や、地域住民を対象に耐震化の重要性を訴える際には、このような家屋倒壊がもたらす間接的な被害の存在や、それに対する耐震化の効果についても十分に考慮する必要があると言える。

5. おわりに

本研究では、震災状況下における津波からの住民避難を総合的に表現するシナリオ・シミュレータを構築した。本シミュレータを用いることによって、津波からの逃げ遅れによる犠牲者に加えて、地震による直接的な犠牲者、道路閉塞の発生により避難不能となることによる犠牲者、そして、道路閉塞により避難が遅延することによる犠牲者などを表現することが可能となり、家屋倒壊や道路閉塞が人的被害に与える影響を具体的に分析することができる。また、実際の津波常襲地域である尾鷲市を対象に本シミュレータによるシナリオ分析を実施した結果、家屋倒壊の考慮の有無により、推計される犠牲者数に大きな変化が生じること、そして増加した犠牲者の構成は、地震による直接的な犠牲者よりも道路閉塞などに基づく間接的な津波犠牲者の占める割合が高いことを確認した。さらに、住民の避難行動シナリオを固定した場合においても、家屋の耐震化を促進することによって、大幅に人的被害を低減することが可能であること、そして尾鷲市の場合、東南海・南海地震の想定震度である震度6強においてもその効果が顕著にみられることを把握した。

本シミュレータを用いることによって、道路の拡幅や道路沿線建物のセットバックといった今回実施した耐震化以外の種々の閉塞対策の評価も可能である。また、さらに家屋の延焼など、地震に伴う二次的な災害現象を表現するとともに、消火活動や負傷者の救出活動、そして家族の連携行動などの社会の対応行動を表現することによって、地震津波災害を対象としたより具体的な防災対策の検討が可能になると考えており、今後の課題として位置づけている。

謝辞：本研究の実施に当たっては、三重県尾鷲市からの全面的な協力を得た。また、本研究は科研費基盤(A)19206055の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 中央防災会議事務局：東南海、南海地震等に関する専門調

- 査会（第16回）：東南海，南海地震の強振動と津波の高さ（案），2003.
- 2) 片田敏孝，桑沢敬行：津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発，土木学会論文集D，Vol. 62，No. 3，pp. 250-261，2006.
 - 3) 鈴木介，今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル，平成12年度東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 524-525，2001.
 - 4) 藤岡正樹，石橋健一，梶秀樹，塚越功：津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価，日本建築学会計画系論文集，No. 562，pp. 231-236，2002.
 - 5) 竹内光生，近藤光男，山口満，濱田洋平：容量を考慮した津波避難場所の評価に関する実証分析—須崎市を対象として—，土木計画学研究・論文集，Vol. 20 no. 2，pp. 345-354，2003.
 - 6) 濱田 洋平，近藤 光男，渡辺 公次郎，竹内 光生，山口満：津波常襲地域住民の防災意識に基づく避難場所の配置計画，—須崎市を対象として—，土木計画学研究・論文集，Vol. 22，No. 2，pp. 315-323頁，2005.
 - 7) 田村保，西畑剛，森屋陽一，瀧本浩一，三浦房紀：街路閉塞を考慮した津波避難時の避難シミュレーション手法の適用，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1286-1290，2005.
 - 8) 家屋倒壊に関して例えば，翠川三郎，藤本一雄：計測震度と住家被害率の関係—罹災調査結果を用いた検討—，日本地震工学会論文集，第2巻，第2号，pp. 15-22，2002.
 - 9) 道路閉塞に関して例えば，塚口博司，戸谷哲男，中辻清恵：阪神・淡路大震災における道路閉塞状況に関する研究，土木計画学研究委員会 阪神・淡路大震災調査研究論文集，pp. 377-387，1997.
 - 10) 赤倉康寛，高橋宏直，中本隆：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. 19-41，2000.
 - 11) 家田仁，上西周子，猪股隆行，鈴木忠徳：阪神・淡路大震災における「街路閉塞現象」に着目した街路網の機能的障害とその影響，土木学会論文集，No. 576/IV-37，pp. 69-82，1997.
 - 12) 小谷通泰，前野達也，伊藤美由紀：震災による地区道路網の閉塞状況に関する分析，交通工学研究発表会論文報告集，pp. 101-105，1996.
 - 13) 例えば，木俣順，オマールオスマン，林良嗣：ISM法とGISをベースとした対震災緊急交通路整備計画策定支援システムの構築，土木情報システム論文集，Vol. 9，pp. 9-16，1997.
 - 14) 例えば，新階寛恭，家田仁，長瀬龍彦，篠恭彦，近藤慶太：都市内地区施設等の震災時における防災効果のマクロな評価方法，土木計画学研究・講演集，No. 23(2)，pp. 299-302，2000.
 - 15) 片田敏孝，桑沢敬行，金井昌信：発災時刻の都市アクティビティを考慮した津波による人的被害量の推定に関する研究，土木学会論文集D，Vol. 63，No. 3，pp. 275-286，2007.
 - 16) 内閣府：首都直下地震に係る被害想定手法について，首都直下地震対策専門調査会資料，2005.
 - 17) 望月利男，宮野道雄，四戸英雄，田代侃：仙台市におけるブロック塀の調査報告—1978年宮城県沖地震によるその被害と地形の関係並びに残存塀との比較—，総合都市研究，第11号，pp. 39-46，1980.
 - 18) 望月利男，宮野道雄，松田磐余：比較的最近の地震による人的被害の実態，総合都市研究，第17号，pp. 77-84，1983.
 - 19) 高知県：漁村における津波対策基本方針，2005.
 - 20) 日本建築学会：建築設計資料集成 [人間]，2003.
 - 21) 桑沢敬行，金井昌信，細井教平，片田敏孝：津波避難の意思決定構造を考慮した防災教育効果の検討，土木計画学研究・論文集，Vol. 23，no2，pp. 345-354，2006.
 - 22) 須賀堯三，上阪恒雄，吉田高樹，浜口憲一郎，陳志軒：水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する研究，水工学論文集，39巻，pp. 879-882，1995.
 - 23) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書，1997.

(2007. 12. 30 受付)

SIMULATION ANALYSIS ON HUMAN CASUALTY CAUSED BY EARTHQUAKE AND FOLLOWING TSUNAMI

Noriyuki KUWASAWA and Toshitaka KATADA

House collapse due to earthquake causes the trouble to evacuation from tsunami by lead to road blockage. Therefore, it is important to consider damage due to earthquake to examine evacuation plan from tsunami. The purpose of this study is to develop the comprehensive scenario simulator that expresses a regional situation from earthquake occurrence to tsunami attack. This simulator can express a practical human casualty that considers influence of house collapse, road blockage and tsunami inundation at the time of evacuation from tsunami. As for test case, we applied the simulator to tsunami prone area. Effectiveness of earthquake-proof promotion was examined by running the simulator with several scenarios.