

津波を伴う震災状況下での人的被害に関するシミュレーション分析*

Simulation Analysis of Human Damage Due to Tsunami Considering Damage of Earthquake*

桑沢敬行**・片田敏孝***

By Noriyuki KUWASAWA**・Toshitaka KATADA***

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、効果的な津波防災対策の実施が急務となっている。

ここで、現在発生が予測されている日本近海を震源とした地震による津波災害を対象に考えると、沿岸地域の多くは、地震発生から津波が襲来するまでに若干の時間的な余裕がある場合が多い。したがって、この間に避難行動などの対応行動を行うことができれば、津波による人的被害を最小限に抑えることが可能である。しかし、この時に適切な対応行動を行えるかどうかは、そのきっかけとなる地震被害の状況に大きく依存していることは明らかである。したがって、津波防災として被害推計や避難対策を検討する上では、津波襲来時の社会の対応状況だけでなく、その前段階である地震による被害状況についても考慮することが必要であるといえる。

本研究では、このような問題意識から、対象地域の道路網や家屋などの情報から、想定した地震による家屋倒壊や道路閉塞の発生状況を表現するシミュレーションモデルを構築している。また本モデルは、表現された震災状況下における津波災害を対象とした住民避難や被害の発生状況など、地震発生から津波襲来までの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閉塞対策や拡幅、避難誘導や避難場所の整備など、地震と津波を対象に実施される種々の対策が、住民避難や人的被害の発生規模に対してどのような効果をもたらすのかを具体的に評価することが可能である。

本稿では、本モデルの概要を示すとともに、本モデルによる三重県尾鷲市を対象としたシミュレーション分析を実施することによって、家屋の耐震化対策が人的被害に与える影響について把握した事例を示す。

2. 震災状況を考慮した津波対策の重要性

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、地震後の津波が襲来する段階までを考慮に入れると、家屋倒壊は、道路を閉塞させることで避難を妨げ、犠牲者を増加させてしまうという間接的な被害をももたらす。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による住民意識の改善など、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目的に戻ると、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、その根底に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。

これまでも地震による家屋倒壊や道路閉塞を対象として、阪神・淡路大震災の実態調査から道路閉塞の発生モデルを構築しているものや発生モデルを利用して道路閉塞のシミュレーション分析を行っているものなど数多くの研究が存在している。また、津波災害時の住民避難を対象としたものにも住民意識や避難誘導などを考慮し、住民の避難行動をより現実的に表現しようとしている多くの研究がある。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得る家屋倒壊や道路閉塞については、多くの研究において、扱われていないか、前提条件として設定されている程度となっている。したがって、家屋倒壊や道路閉塞など震災被害が、津波避難や津波による人的被害の発生に与える影響にまで及んで検討を行っているものは見当たらない。

本研究では、地震による家屋倒壊や道路閉塞の発生に加えて、その後の津波災害を対象とした災害情報伝達や住民避難までを総合的に表現するシミュレーションモデルを構築することによって、地震による家屋倒壊の直接的な犠牲者に加えて、道路閉塞に起因する避難困難者や避難遅延者、そして、これらの状況を考慮した津波犠牲者までに及んだシミュレーション分析を実施している。

*キーワード：家屋倒壊，道路閉塞，津波避難，被害想定

**正員、工(博)、NPO法人 社会技術研究所

(群馬県高崎市片岡町1-12-16 フロンティアビル2F、
kuwasawa@ce.gunma-u.ac.jp)

***正員、工博、群馬大学大学院 社会環境デザイン工学専攻
(群馬県桐生市天神町1-5-1、t-katada@ce.gunma-u.ac.jp)

3. シミュレーションモデルの構築

本モデルでは、災害現象として、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示する。また、被災時の社会の対応状況に関しては、地震発生時刻を考慮した住民の空間分布に加えて、地域住民に対する災害情報の伝達状況、住民の避難行動を表示する。そして、これらの状況を時間的、空間的に分析することによって、地震発生からの経過時間毎の人的被害の発生状況を推計する。

以下では、家屋倒壊と道路閉塞の表現についての概要を示す。なお、他の部分については、筆者らが開発した災害総合シナリオ・シミュレータ¹⁾を利用している。

(1) 家屋倒壊・道路閉塞の表現

本モデルでは、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を変化させることによって、道路閉塞による住民避難への影響を表現する。図-1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-1の中の①)。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(②)。そして、道路を構成するリンク毎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(④)、各リンクの通行可否を判定している(⑤)。なお、以上の処理のみを行った場合、リンクの一部が閉塞するだけでリンク全体が通行不能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考慮する場合、道路閉塞による避難行動への制限を過大に表現してしまうという問題を発生させる。そこで、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(③)。この処理を導入することによって、道路の通行に関する影響は必要最小限の箇所のみ表現することができる。

a) 家屋や塀の倒壊判定

家屋倒壊の判定は、1995年兵庫県南部地震における西宮市、2000年鳥取県西部地震における鳥取市、2001年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)、築年数(旧築年：S36以前、中築年：S37～S56、新築年：S57以降)別の全壊率テーブル²⁾を利用

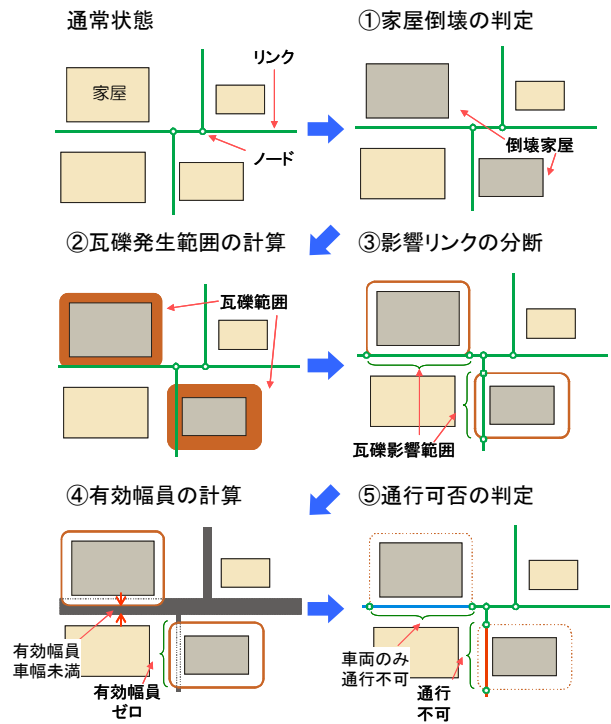


図-1 家屋倒壊・道路閉塞モデルの流れ

することとした。また、塀の倒壊については、倒壊確率をパラメータとして持たせ判定することとした。

b) 倒壊により発生する瓦礫の表現

家屋倒壊より発生する瓦礫の範囲は、建物の高さに依存すると考えられるため、下式により求めることとした。

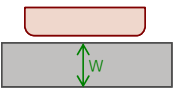
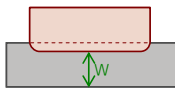
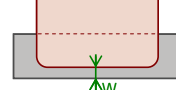

$$W = \alpha \cdot H$$

ただし、 W ：瓦礫幅、 H ：建物高さ、 α ：瓦礫幅の算出係数である。なお、安全側の結果を得るため α の値として1.0を用いるとともに、家屋の周囲に幅 W の瓦礫が等しく広がる状況を表示する。また、ブロック塀等の倒壊による瓦礫の発生範囲についても、家屋と同様な方法を用いることとするが、その範囲は塀が面している前後の方向に限定することとした。

c) 倒壊による人的被害の表現

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²⁾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、倒壊家屋内において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と想定されるため、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、塀の倒壊については、宮城県沖地震では複数の死者が確認されているが、絶対数が少なく判定式の構築が困難なことから、瓦礫範囲内の住民を全て負傷者として扱うこととした。

表-1 道路閉塞タイプ

タイプ	1	2	3	4
閉塞状況				
有効幅員 W^{*1}	$W = W_0$	$W_c < W < W_0$	$0 < W < W_c$	$W = 0$
通行可否 (歩行者 / 車両)	可 / 可	可 / 可 ^{※2}	可 / 不可	不可 / 不可

※1 W_0 : 対象リンク本来の幅員、 W_c : 車両が通行するために必要な最低幅員

※2 ただし、自動車の交通容量を減少させるなどの対応を行う必要がある

d) 道路閉塞の判定

道路と瓦礫の発生範囲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4の閉塞が発生した場合のみ通行不可とした。

また、ブロック塀等の倒壊の場合は、タイプ4に示す状況が発生したとしても歩行者のみ通行可とする代わりに、下式によって移動速度を低減させることとした³⁾。

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

$$D = R \times S$$

ただし、 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 : 道路の前幅員 ($A + B$)、 β : ブロック塀等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 : 通常の歩行速度

(2) 道路閉塞を考慮した避難行動の表現

道路閉塞により通行不能箇所が点在する中を避難する場合、途中度々閉塞箇所に遭遇し、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。本モデルでは、このような状況を表現するため、避難開始段階においては、まず閉塞状況を全く知らない状態、つまり平時のネットワークを利用して現在位置から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する。そして、閉塞箇所に遭遇した場合は、平常時のネットワークから遭遇した閉塞リンクのみを除外したネットワーク、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ている。

また、このような閉塞箇所の情報は、避難者間で情報交換されると考えられるため、閉塞箇所に遭遇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、既知の閉塞箇所を伝えるという行動を表現することとした。この情報を受けた避難者は、その時点で現在の避難路を再評価し、目的地に到達できないと判断した場合は、避難路を変更する。

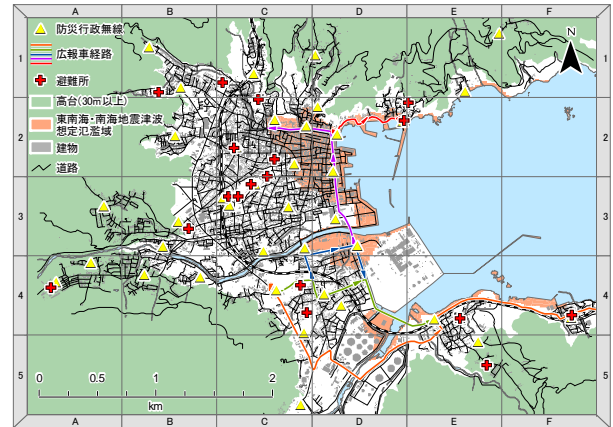


図-2 対象地域

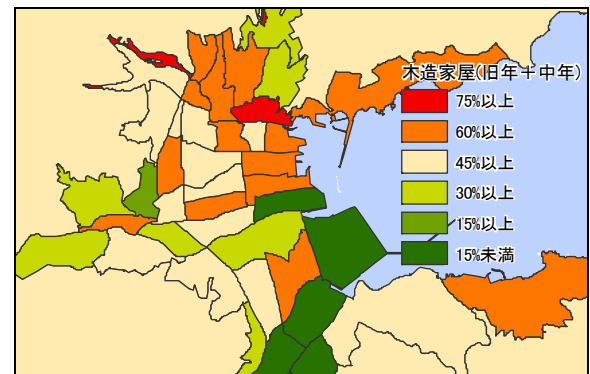


図-3 旧式の木造家屋 (旧年+中年) の割合

4. シミュレーション分析

三重県尾鷲市を対象として本モデルによるシミュレーション分析を行った結果について示す。

(1) データ整備とシナリオ設定

まず、道路や家屋、情報伝達施設配置、避難施設配置に関するデータを整備した。整備したデータを図-2に示す。なお、建物属性については、家屋形式ごとの建築年代の集計値 (図-3参照) を参照し、建物ごとに家屋形式と建築年代を設定した。また、ブロック塀等の配置については、現地調査から把握した。

次に、基本条件として、正午に想定東南海・南海地震が発生し津波が襲来する表-2に示すシナリオを設定した。

表-2 設定シナリオ

分類	項目	設定値
住民	対象人口、世帯数	20,309人、7,804世帯
	避難タイミング	情報取得後5分
	歩行速度	年齢に応じて設定
	避難率、避難手段	過去の実態調査から設定、徒歩
避難場所	配置	指定避難所または、高台(図-2)
	配置	現状再現(図-2)
屋外拡声器	配置	現状再現(図-2)
	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-2)
	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、東南海・南海地震、震度6強、50%
	モデル、ハード施設	非線形長波モデル、機能しない
津波	計算精度、計算時間	12.5m、地震後1時間(10秒間隔)

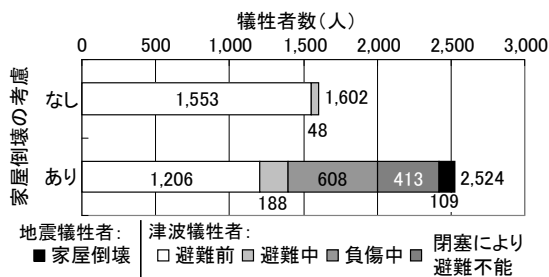


図-4 家屋倒壊の影響

(2) 分析結果

a) 家屋倒壊と道路閉塞の影響

まず、家屋倒壊を考慮した場合と、家屋倒壊を考慮しなかった場合の結果を図-4にまとめる。ここでは、犠牲者の発生要因を地震と津波に分け、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中に津波に襲われた者、閉塞により避難不能の状態に津波に襲われた者、それ以外で避難前または避難中に津波に襲われた者に分類している。この結果によると、家屋倒壊を考慮することにより直接的な犠牲者が109人発生していることに加えて、倒壊による負傷中であった犠牲者が608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413人存在しており、結果として922人と家屋倒壊を考慮しなかった場合よりも約1.6倍多い犠牲者が発生した。また、避難率が変わらない条件で避難中の犠牲者が増加していることから、閉塞により避難場所への到着が遅れることにより犠牲者となった住民も存在していると推察される。

b) 家屋の耐震化による効果

次に、現状の建物の耐震化状況を再現した場合に加えて、その中の旧築年と中築年の建物の50%を新築年とした場合、また100%を新築年とした場合を計算した。図-5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、全壊建物数は、家屋以外も含む建物全てを対象としている。この結果によると、全壊建物数が減少するのと同様な傾きで閉塞箇所が減少しているのがわ

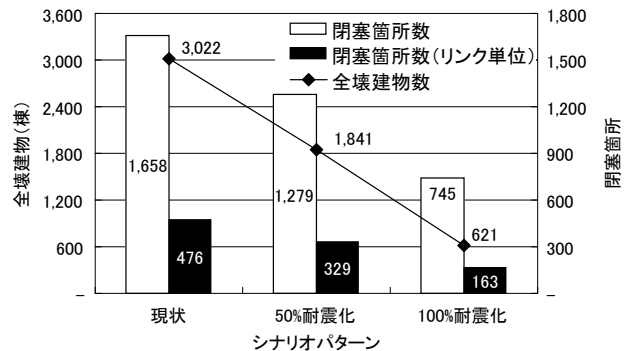


図-5 シナリオ別の全壊建物数と閉塞箇所数の変化

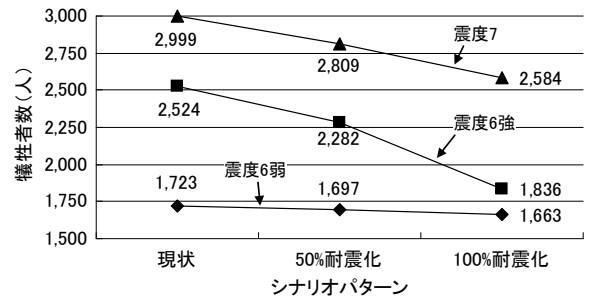


図-6 シナリオ別の犠牲者数の変化

かる。また、震度6強を想定した今回の条件では、100%耐震化が実現されたとしても、600棟強の建物が全壊し、740箇所以上の閉塞箇所が発生する結果となった。

また、図-6はさらに震度を変化させた場合の総犠牲者数について示している。この結果から耐震化の効果についてみると、震度6弱を想定した場合は大きな変化は見られないが、震度6強、震度7を想定した場合は、耐震化が進むことによって犠牲者が減少しているのが分かる。特に、尾鷲市における東南海・南海地震の想定震度である震度6強では、50%耐震化で240人程度の減少、100%耐震化で690人程度の減少と大幅な人的被害の低減効果が現れた結果となった。

5. おわりに

本研究では、震災状況下における津波避難を表現するシミュレーションモデルを構築した。本モデルを利用することによって、家屋倒壊による直接的な犠牲者に加えて、道路閉塞の発生による間接的な犠牲者の発生までを考慮した津波避難対策の検討が可能となった。今後は、負傷者の救出活動や家族間の連携行動を表現するなど、より現実的な検討を行うための改善を行う予定である。

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。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 高知県: 漁村における津波対策基本方針, 2005.