建物倒壊・災害がれきを考慮した新しい津波被害想定モデルの提案 IMPROVED TSUNAMI DAMAGE ESTIMATION MODEL CONSIDERING COLLAPSED BUILDINGS AND DISASTER DEBRIS

櫻庭 雅明*・小園 裕司*・野島 和也* Masaaki SAKURABA, Yuji KOZONO and Kazuya NOJIMA

For tsunami disaster mitigation, it is important to take measures to deal with building damage and disaster debris in addition to inundation. In this study, an improved tsunami numerical model considering building collapse and disaster debris was applied for Owase City which is assumed will suffer great damage by a Nankai Trough tsunami. Also studied was the effect of tsunami damage evaluation which focused on the difference in the type of buildings structure in the coastal area. Using results of tsunami inundation, the study of human impact estimation was carried out. The proposed model was able to estimate the damage of buildings and disaster debris, and made it possible to estimate the damage by various tsunami scenarios quantitatively and concretely. The proposed model seems to be useful for the tsunami disaster prevention plan such as the damage estimation and mitigation.

Keywords : tsunami simulation, building collapse, disaster debris, damage estimation, evacuation

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方沿岸で甚 大な津波被害が発生した。被害は津波浸水に加え、建物の 倒壊被害やそれに伴うがれきの発生、車両・船舶の漂流被害 が発生し、集積した災害がれきからの出火も生じた。さらに海 域からは大量の土砂が流入し、市街地に堆積した。このような 被害を踏まえ、今後の津波対策のための被害想定では浸水 被害だけでなく、建物、災害がれきの集積、土砂堆積や火災 等の各種被害を総合的に想定および危機管理を行っておくこ とが重要である。

本研究では、南海トラフ巨大地震津波を対象に、著者ら¹⁾ がこれまで開発してきた新たな津波被害想定モデルを三重県 尾鷲市に適用し、津波被害の検討を行った。また沿岸域にお ける建物構造種別の違いに着目した被害軽減効果および津波 における人的被害の違いについてもケーススタディを行い、新 たな津波被害想定モデルの有用性について示した。

2. 新たな津波被害想定手法

(1) 建物倒壊・がれきを考慮した津波浸水想定

従来の津波浸水想定は、「津波浸水想定設定の手引き」²⁾ に基づき、津波シミュレーションを実施、浸水想定区域図の作 成を行っている。この手引きに記載された方法は、津波の流 体としての運動と浸水エリアでの建物の影響を底面摩擦(粗 度係数)として与えて近似的に求めている。実際の津波の諸 現象は、流体運動だけでなく、建物の倒壊およびそれに伴う がれきの発生、浸水エリアにおける漂流物の影響が含まれて おり、本来であればそれらの影響を考慮することが被害想定を 行うにあたっては必要である。

本研究では、これまで筆者らが開発してきた建物倒壊・が れきの影響を考慮したモデルを採用した。このモデルの採用 により、従来底面摩擦として扱われた建物の影響の考慮およ び津波の流体力の影響により、より実際の状況に近い津波浸 水を再現できる。

(2) 建物倒壊・建物種別を考慮した被害想定

内閣府の地震・津波被害想定³⁾では、建物被害、屋外転 倒、落下物の発生および人的被害、ライフライン、交通施設 被害等の様々な影響を考慮した検討成果が提示されている。 この中で津波による建物の被害の算定にあたっては、「東日本 大震災による被災状況調査結果について(第1次報告)」の 被災割合から算定され、浸水深が2m以上で全壊として仮定 している。この方法は、実際の被害状況から割り当てられたも のであるが、実際は同じ浸水深でも流速の違いにより被災レベ ルは異なる。

著者らは、これらの影響を建物被害想定の影響として考慮 する必要があると考え、建物倒壊を考慮した津波シミュレーショ ンにより直接的に建物被害想定を算定する方法を提案してい る。この結果によると浸水深と流速を用いて波力の評価を行っ

^{*} 技術本部 中央研究所 総合技術開発第1部

ており、より実際の被害に近い状況として提示することが可能と なった。また、構造物種別(木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート 造)の違いも考慮でき、浸水エリア内に対して鉄筋コンクリート 造を多く配置したケースなどの影響算定も可能となっている。

(3) 建物人口を考慮した人的被害想定

従来の内閣府による人的被害想定は、津波による被害とし て、津波が到達する時間(浸水深 30cm 以上)までに避難 が完了しなかった者を被害者として判定する方法を採用してい る。この方法は、メッシュ内に含まれる人口を仮定して、避難 元メッシュから避難先メッシュへの所要時間、避難完了人口を 算出するものである。対象とするエリアにおいて建物の位置や 居住人数が把握できれば、より正確な人的被害が検討できる。

本研究では、年齢の構成、建物に居住する人口分布、津 波避難施設の有無を考慮して被害状況の違いを考察できるよ うにしている。

本論文では上記(1)~(3)の提案モデルに基づき、南 海トラフ地震により被害が想定される地域について適用を行っ た。以下に検討条件および結果を示す。

3. 検討対象地域と条件設定

(1) 検討対象とする尾鷲市の概要

本研究では、近い将来発生が想定されている南海トラフ地 震が発生することで被害が生じる可能性がある三重県尾鷲市 を検討対象とした。尾鷲市街地はこれまで多くの歴史津波、 例えば1707年宝永津波、1854年安政津波、1944年東南 海津波によって度々被害が生じている。尾鷲市街地は、熊野 灘に面しており南海トラフ沿いに位置することやリアス式海岸と なっているため、津波到達が早く津波高が高くなる地理的条件 となっている。

図-1は尾鷲市の土地利用方針⁴⁾と、国土地理院基盤地 図情報⁵⁾から整理した建物形状と建物位置の分布を示したも のである。中心市街地の周辺に周辺市街地が、海側(沿岸) に工業・漁業地域が位置しており、建物のほとんどが中心・ 周辺市街地に集中していることがわかる。本研究で対象とした 建物数は6,479棟であり、そのうち中心市街地では4,235棟 となっている。なお、図中に合わせて示している構造種別等の 設定方法については計算条件の項で後述する。



図-1 三重県尾鷲市の土地利用・建物構造種別の分布

(2) 建物倒壊および災害がれきを考慮した津波被害予測モデ ルの概要

本研究で用いた津波被害予測モデル¹⁾は、津波浸水およ び建物倒壊を考慮した津波浸水予測モデルと、災害がれきの 移動・集積予測モデルの2つのモデルにより構成されている。 モデルの詳細は文献に示すとおりであるが、概略について以 下に示すとおりである。

建物倒壊を考慮した津波浸水予測モデルは、基礎方程式 を非線形長波方程式とし、数値解法に leap-frog 法とスタッ ガード格子法を用いた平面 2 次元モデルに、建物倒壊を考慮 したモデルとなっている。従来の手法であれば建物の影響を 粗度係数で評価するが、本モデルでは建物の形状や高さを地 物として建物の影響を評価している。さらに建物に設定した倒 壊しきい値と建物に作用する津波波力と比較を行うことで建物 の倒壊を取り扱っている。なお、建物倒壊条件は木造や RC 造等の構造種別ごとに設定可能となっており個々の建物被害 の予測が可能である。

災害がれきの移動・集積予測モデルは、災害がれきを粒子 として扱い、運動方程式はモリソン式に基づいた式に、浮力、 底面摩擦力、重力等を考慮したモデルとなっている。更に粒 子間には、ばねモデルによって災害がれき同士の衝突(斥力) を考慮している。斥力については、がれきの辺の長さとがれき 間の重心間の距離の差分にバネ定数を乗じた力を斥力とし、 すべてのがれきの斥力の和を算定している。また、災害がれ きの漂流、滑動、転動といった様々な移動形態を包括的・連 続的に扱えるモデルとなっている。なお対象とする災害がれき は、市街地や沿岸域の車両・船舶や建物倒壊によって発生 した災害がれき等のように任意に設定可能となっている。

<u> </u>					
ケース	建物の扱い	粗度係数	構造種別		
1	粗度係数	$0.025 \sim 0.04$	_		
2	地物	0.025	現状建物構造 種別に基づく		
3			沿岸域の工 業・漁業地域の 建物を RC 化		

表-1 検討ケース

表-2 定義した建物高さ・構造種別

id	基盤	地図情報建物外縁のメタデー タ(名称、定義)	本研究での扱 い(建物高さ)
1	普通 建物	3 階未満の建物及び 3 階 以上の木造等で建築され た建物	木造、倉庫等 (7m)
2	堅牢 建物	RC 等で建築された 3 階 以上、または 3 階相当以 上の高さの建物	RC 造(12m)
3	普通 無壁	側壁のない建物、温室及び 工場内の建物類似の構築 物で、3 階未満のもの	その他の建物 (7m)
4	堅牢 無壁	RC 等で建築された側壁の ない建物、3 階以上、また は 3 階相当以上の高さの 建物	RC 造(12m) ※ただし尾鷲 に対象物なし

4. 適用例

(1) 検討ケース

本研究では、従来の津波浸水想定とのモデル比較および 建物の種別の影響比較を行うものとした。検討ケースは建物の 取り扱いと条件により表-1に示す3ケースを実施した。ケー ス1は建物の影響を従来手法と同様に粗度とした場合、ケー ス2は建物の影響を地物かつ倒壊を考慮した場合とした。ケー ス3は沿岸域の建物の構造種別の違いがどの程度被害軽減 を及ぼすのかを把握するため、ケース2の条件から図-1に 示す漁業、工業地域(図中青枠)の建物をRC化した場合と なる。

(2) 建物倒壊および浸水予測モデルの計算条件

計算領域および格子幅(2,430m~10m)は内閣府中央 防災会議、南海トラフ巨大地震モデル検討会のデータ⁶⁾(以 下、内閣府データ)に基づき設定した。これに加え、尾鷲市 街地での街路に沿った遡上を考慮できるよう2m格子幅の領 域を設定した。水深・標高データは内閣府のデータに基づき 設定し、基盤地図情報のDEMデータを用いて市街地におけ る陸上データの高精度化を図った。粗度係数は建物の取り扱 い方法に応じてケースごとに異なり、ケース1では建物が密集 する市街地で0.04とし、直接建物の形状や高さを地物で評 価したケース2、3は街路や建物倒壊後の更地を想定し0.025 を設定した。ケース2、3における地物として扱う建物の高さ、 位置、形状、構造種別等の情報は、一般的に公開されてい



図-2 計算領域(2m)および建物地物データの一例

るデータで整理・適用を試みた。建物の形状・高さは基盤地 図情報の建物外縁データ⁵⁾を用い、構造種別と建物高さは同 建物外縁データのメタ情報から表ー2に示す通り整理・設定 した。同メタ情報では、建物の構造種別を4つに分類してお り、木造住宅やその他プレハブ等3階未満の普通建物、RC 造で建築された3階相当の堅牢建物が設定されている。これ に加えて、普通建物、堅牢建物それぞれに側壁がない無壁 建物(例えば漁港の荷捌き施設の建物)の計4種が設定さ れている。本検討では普通建物を木造(木造住宅と仮定)と し堅牢建物を RC 構造物、普通無壁および堅牢無壁をその他 の建物と再分類し、それぞれ代表的な建物高さを設定した。 なお、本研究では堅牢建物として RC 化した場合の特性を見 るため、鉄骨造の設定は仮定しないものとした。整理した建物 ごとの構造種別の分布を図-1に、作成した地形データの一 例(ケース2、3)を図-2に示す。津波条件は、内閣府南 海トラフ巨大地震津波モデル検討会 6) で公表されている津波 初期波源11ケースのうち、尾鷲市で最も高い津波高となるモ デルケース7を採用した。津波来襲時の初期潮位は、尾鷲市 における朔望平均満潮位 T.P.+0.80m とし、計算時間は、浸 水、建物、災害がれき等の被害が十分捕捉できるよう予備計 算の結果から地震発生後3.0時間とした。本検討で設定した 主要な計算条件を表-3に示す。

(3) 災害がれき移動・集積予測モデルの計算条件

災害がれき移動予測計算で対象としたがれきは、車両、船 舶および建物倒壊によって発生した建物がれきとした。建物倒 壊後の災害がれきの位置は、基盤地図情報の建物外縁デー タにもとづき設定した。船舶の位置は国土地理院の航空写真 判読によって設定した。さらに車両については、航空写真判 読によって中心市街地の1区画からの車両数を集計し、一区 画と市街地全体の面積比に応じて、市街地全体における車両 総数を推定した上で、建物外縁内と重複しないように市街地 全体にランダムに配置した。本検討で作成した災害がれきの 初期配置を図-3に示す。なお、建物倒壊がれきは、津波

項目	条件		
	領域 1: 2430m	(720×540)	
	領域 2: 810m	(1496×986)	
計算領域:	領域 3: 270m	(686×866)	
計算格子間隔	領域 4: 90m	(485×512)	
(分割数)	領域 5: 30m	(605×683)	
	領域 6: 10m	(830×791)	
	領域 7: 2m	(1427×1562)	
基礎方程式	非線形長波方程式		
計算手法	リープフロッグ法 スタッガード格子		
陸域境界条件	領域 1~5 は反射、領域 6、7は遡上境 界		
粗度係数	表-1 参照		
対象津波	南海トラフ巨大地震モデルケース7		
潮位条件	T.P.+ 0.8m (朔望平均満潮位)		
計算時間	地震発生から3時間		

表-3 計算条件



浸水予測計算における建物倒壊判定を行った後、倒壊した建 物を順次がれき移動計算の対象とした。また、各災害がれき の諸元(体積、密度等)は、メーカー諸元や既往災害の実 績値を採用している¹⁾。

5. 津波被害予測結果および被害軽減効果の検討

(1) 建物被害予測および軽減効果

図-4に本解析より得られた各ケースの津波最大浸水域・ 浸水深を示す。建物の影響を粗度係数(従来の手法)で取 り扱ったケース1と建物を地物かつ倒壊を考慮したケース2を 比較した結果、最大浸水域はほぼ同様の結果となっているが、 ケース2の最大浸水深は建物前面における津波のせり上がり (例えば尾鷲港の岸壁前面部)が生じていること、反射の影響 により中心市街地の沿岸側で大きくなり背後地では小さくなるこ とが確認された。次に、沿岸域の建物を RC 化した場合 (ケー ス3)では、ケース2と比較して最大浸水域はほとんど変わら ないものの、沿岸背後地である中心市街地で9m 以上の浸水 深が6-7mまで低減することが確認された。これは、沿岸の RC 構造物が透過型の防波堤あるいは防潮堤のような役割を 果たし、中心・周辺市街地への津波の流入量を減少させたこ とによる効果であると考えられる。

図-5、表-4にケース2、3の建物の倒壊・残存分布と 棟数を示す。図中の青色、赤色の建物はどちらのケースでも 残存あるいは倒壊した建物である。また緑色の建物は、沿岸 域の建物をRC 化したことによって残存した建物となる。 図中 にはケース2、3の最大浸水域も合わせて示している。また、 表中には建物の被害軽減棟数も合わせて示す。図中の最大 浸水域の比較ではややケース3の遡上範囲が小さくなってい ることが確認できる。中心市街地における浸水範囲や浸水した 建物棟数にほとんど違いが見られないものの、建物の倒壊数 は約3.1千棟から約2.4千棟に低減されることが確認された。 これは、沿岸構造物を RC 化することで最大浸水深や流速が 低減され、背後地における波力が低減していることが考えられ る。倒壊が低減されているエリアは、RC 化されている沿岸部 を除けば、特に最大遡上先端部(浸水と非浸水の境界付近) において顕著に軽減されていることが確認された。これらの結 果は、避難ビルの設置や避難計画の策定等に有益な情報とな り得ると考えられる。

図-6はケース2、3の津波到達時(地震発生後16分)、 津波遡上時(地震発生後20分)、最大津波到達時(地震発 生後24分)における災害がれき(車両、船、建物倒壊がれ き)の挙動と津波水位を示したものである。これらの結果から、 沿岸域の建物をRC化したケース3では、ケース2よりも背後 地への津波の浸水深自体が小さくなることから、災害がれきの 挙動がケース2に比べて分散されやすく局所的に滞留しない 傾向となり、建物倒壊によるがれき発生量が少なくなることが確 認された。また、集積箇所は、ケース3では背後地奥に集積 しにくい傾向が得られた。

以上のことから、本モデルが、尾鷲市における津波による詳 細な浸水予測や建物個々の被害の算定を行いつつ、土地利 用形態や建物構造種別の違いにより、具体的な津波被害想定 を行うにあたり有用なモデルであることを示した。

(2) 人的被害予測および被害軽減効果

次に津波来襲時における人的被害の算出を行った。被災判 定の方法は内閣府の方法と同様として、避難先における津波 の到達時間よりも避難完了時間が遅い場合に被災ありとした。 避難時間は避難距離を避難速度で除したものとしている。ここ では概略の検討として、避難距離は拠点となる建物から避難 先(津波避難施設または津波浸水範囲外)の直線距離の1.5



図-4 各ケースの最大浸水域・浸水深の比較(左:ケース1、中央:ケース2、右:ケース3)



図-5 ケース2、3の建物倒壊被害の比較

表-4 中心市街地地域における浸水および建物被害数の 比較

項目	<mark>浸水範囲</mark> (km ²)	浸水被害 (棟)	倒壊建物 (棟)
①Case 2	1.38	3,205	3,146
②Case 3	1.28	3,014	2,430
被害軽減 (①-②)	0.10	191	716

※中心市街地の建物総数:4,235棟

倍とし、避難速度は65歳未満を0.74m/s、65歳以上を0.58 m/sとし、避難開始時間は本研究のモデル検証のため、発 災の15分後としている。上記はすべて内閣府の検討⁶⁾に準 じている。本研究では、図-7に示すように、尾鷲市が実際 に指定している津波避難施設に向けて避難する場合と浸水エ リア外に避難する場合の両方について検討している。人口分 布は政府統計⁷⁾(e-Stat)を用いて行っているが、ここでは、 e-Stat で得られている地区ごとの人口の集計を単純に建物地 物の個数で除して均一に分配した。人口分布図を図-8に示 す。なお、本来であれば建物別に人口は異なると考えられるが、 現時点で入手できるデータでは詳細が不明であるため、具体 的な人口分布の設定については今後の課題である。避難施 設および RC 化の影響の比較を示したものが、図-10であり、 そのうち代表的なケースとして図-9にケース2(建物 RC 化 なし・浸水エリア外へ避難)およびケース3(建物 RC化・ 津波避難施設を考慮)の被災率の比較を示す。ここで被災率 は津波により被害を受けた人口を建物の居住人口で除した値 である。この結果より、建物を RC 化することにより浸水エリア の背後地への到達時間が遅くなり、全体的に被災率が減少す る。図-10より RC 化により人的被害が軽減できることがわか るが津波避難施設の影響は比較的少ない。これは、仮定して いる避難開始時間が15分であるのに対し、津波到達時間が 10~20分であり、この場合はあまり津波避難施設の効果が 見られていない。また、避難所を考慮したケースにおいては、 最短距離で算出することによって海側に避難する場合もあり、 被災率が場所により悪くなるケースも生じる。この点について は、今後避難ルートの詳細を検討する必要がある。



図-6 災害がれき移動状況(上段:ケース2、下段:ケース3)



図一7 津波避難施設

6. 新たな津波被害想定手法の評価

(1) 津波浸水想定

本研究にて提案した津波浸水想定モデルは、建物地物の 影響を考慮した津波浸水シミュレーションを採用することにより、 建物のせり上がりの影響を考慮できる。更に流体力による建物 倒壊、がれき・漂流物の影響を踏まえた算定を可能としてお り、従来の津波浸水想定よりも更に具体的な浸水深・浸水エ リアおよびがれきの移動・集積状況まで算定が可能となってい る。



図-8 人口分布

(2) 建物被害想定

従来の内閣府の建物被害想定の方法は実際の津波被害を 浸水深と被害の関係として結びつけている。本研究では力学 的な挙動による建物被害に着目している。木造、鉄骨造およ び鉄筋コンクリートの倒壊限界を予め設定したものとなってお り、具体的かつ様々なケーススタディに対応可能である。

(3) 人的被害想定

従来の津波による人的被害想定は、全体の被害状況について算出しており、建物個別の被災率まで算出されていない。



図-9 人的被害の被災率の比較(左図:浸水エリア外へ避難・非 RC 化、右図:避難所を考慮・RC 化)



本研究では、建物に人間を割り当てて避難時間を算出する方 法を採用しており、被災率分布を出すことが可能となった。

7. おわりに

本検討では、南海トラフ巨大地震津波を対象に、建物倒壊 および災害がれき移動・集積予測モデルを尾鷲市に適用した。 また、土地利用方針と建物構造種別に着目し、背後地におけ る被害軽減効果について検討した。結果を用いて政府統計に よる人口分布から人的被害想定を行った。その結果、以下の 知見が得られた。

- 建物を地物かつ倒壊を考慮した場合、尾鷲中心市街地 沿岸側で従来の手法(ケース1)では再現できなかった せり上がりを考慮した浸水深を評価可能である。
- 本モデルを用いて、沿岸域の建物をRC化した場合における被害軽減効果の検証を行った結果、背後地の浸水深が低減されること、最大遡上先端部で建物倒壊被害が軽減される等、防災上における有益な知見を得た。
- 本モデルは直接建物の被害やがれき被害を評価可能となり、津波の各種シナリオに対する具体的な被害想定を定量的にできるようにした。
- 人的被害想定の結果よりRC化および津波避難施設の 影響について説明を可能とした。

今後は、建物倒壊モデルやがれき移動予測モデルの高度 化を図るとともに、火災被害や土砂堆積被害についても避難 シミュレーションと合わせて検討を行い、総合的な津波被害予 測モデルの構築を行っていく予定である。

参考文献

- 小園裕司、高橋智幸、桜庭雅明、野島和也:複数の移動形態 を考慮した災害がれきの発生・移動予測モデルの開発、土木学 会論文集 B2(海岸工学)、Vol. 72、No 2、pp.I_439-I_444、 2016
- 国土交通省水管理・国土保全局海岸室・国土交通省国土技術 政策総合研究所河川研究部海岸研究室:津波浸水想定設定の 手引 ver 2.00、86p、2012
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独)建築研究所:平成 23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報)、平 成23年5月公表
- 4) 尾鷲市:尾鷲市土地利用方針、http://www.city.owase.lg.jp/ cmsfiles/contents/0000003/3802/1-1-2.pdf、参照2017-03-01
- 国土地理院:基盤地図情報、http://fgd.gsi.go.jp/download/、
 参照 2017-03-01
- 6) 内閣府中央防災会議:南海トラフの巨大地震モデル検討会、http:// www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/、参照 2017-08-01
- 7) 総務省政府統計の総合窓口 (e-Stat)、https://www.e-stat.go.jp/ SG1/estat/eStatTopPortal.do、参照 2017-08-01