

確率論的津波人的被害リスクに基づく避難タワーの最適配置法の提案 およびその南海トラフ地震影響地域への適用

早稲田大学 学生会員 ○鈴木 乃亜, 布施 柚起, 青木 康貴
早稲田大学 正会員 秋山 充良
東北大学 正会員 越村 俊一

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震による津波被害を受け、津波発生時の緊急避難先として避難タワーの導入が進められている。一般に、津波避難タワーの設置場所・数を検討する際には、考えられる最大規模の津波が想定される。地震被害金額の算定、あるいは構造物の耐震補強や対津波対策を進める際には、想定する地震や津波の規模が大きいほど安全側の設定となる一方で、津波避難タワーの設置場所を決める際には、その設定が安全側の解を与えるとは限らない。現状の技術レベルでは、地震断層がどのように動くのかの評価には、極めて大きな不確定性が介在することは避けられず、想定する津波の大きさにより、配置すべき津波避難タワーの場所は異なる。この状況では、起こり得る全ての地震断層の動きに対して、確率論的に人的被害リスクを算定し、その最小化と防災予算のトレードオフの関係の中で、津波避難タワーの配置場所を決定する必要がある。

本稿では、確率論的アプローチにより算定した津波人的被害リスクに基づいた避難タワーの最適配置法を提案する。ケーススタディでは、南海トラフ地震の影響を受ける三重県尾鷲市を対象に提案手法を適用する。

2. 津波人的被害リスクに基づく避難タワーの最適配置フロー

提案フローを図-1 に示す。特徴は、確率論的津波到達時間、および津波避難シミュレーションにより算出した避難所要時間の比較を基に、人々の避難失敗確率を評価し、その結果と人口分布の空間的な統合により人的被害のリスクを面的に評価した上で、費用便益比や純便益の最大化に基づく最適な津波避難タワーの配置位置を決定できることにある。確率論的な計算を行う際には、断層運動、人々の避難行動、および人口分布に関する一連の不確定性をモンテカルロ法（以下、MCS）により考慮している。

確率論的津波ハザード評価では、断層パラメータから初期水位を計算し、非線形長波理論を用いた平面二次元津波解析モデル²⁾に基づく津波伝播解析の結果をデータベースとして、津波到達時間を高速で推定可能

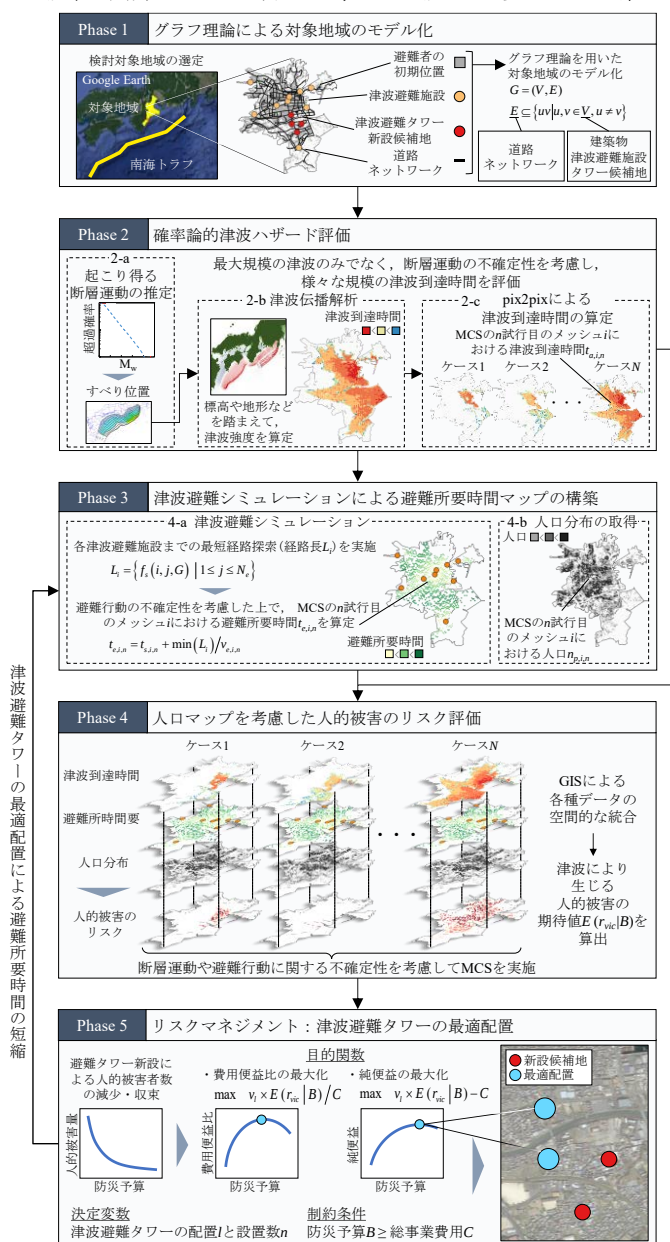


図-1 津波避難タワーの最適配置フロー

キーワード リスク, 津波, 人的被害, 津波避難タワー, 南海トラフ地震, 避難行動

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 TEL: 03-5286-2694

な機械学習³⁾モデルを構築した。東北地方太平洋沖地震の再現解析に基づき、機械学習モデルにより推定された津波到達時間の解析値を補正し、津波伝播解析のモデル誤差を考慮した。また、人々の避難行動時の歩行速度や避難開始時間のばらつき⁴⁾を考慮した MCS に基づいて、津波避難シミュレーションを行い、地震発生時における避難者の各位置から複数の津波避難施設までの最短経路検索⁵⁾を行うことで避難所要時間を算定している。

確率論的津波到達時間、および避難所要時間の算定結果を基に人々の避難失敗確率を算定し、地理情報システム (GIS) で、その確率と人口分布を空間的に結合することで人的被害のリスクを算定する。なお、人口分布には、昼間および夜間の 2 ケースを想定し、それらが等しい確率で生じ得ると仮定した。

最終的に、上記のリスク評価に基づいて津波避難タワーの最適配置を決定する。ここで、人的被害者数の期待値に基づいた純便益を目的関数とし、その最大化を実現する配置を本研究の最適解とする。

3. ケーススタディ

三重県尾鷲市を対象にケーススタディを行う。図-2 の津波避難タワーの新設候補地の中から最適配置場所を決定する。断層モデルは、南海トラフの巨大地震モデル検討会（以下、検討会）を基に、大すべり域の異なる 15 ケースの津波断層モデルを使用し⁶⁾、平均応力降下量およびすべり角の値にばらつきを与えることで断層運動の不確定性を考慮した。図-2 に、津波避難施設への避難を想定した際の人的被害者数のリスクの期待値を示す。沿岸部にて値が大きい傾向があるが、内陸部でも大規模施設への人々の局所的な集中により高い値を示す地点が見られる。表-1 に、それぞれ確率論的および確定論的津波ハザード評価により算出した人的被害のリスクを基にした純便益、および津波避難タワーの最適配置結果を示す。ここで、平均応力降下量に関して、確率論的手法においては上述の通りばらつかせたのに対し、確定論的手法においては、検討会の想定を参考に 5MPa⁶⁾を用いて最大規模の津波を算定した。太字で示す値が、各津波ケースにおける純便益の最大値であり、これに対応する配置が最適解となる。想定する津波ハザードの評価手法（確率論 vs. 最大）により、避難タワーの最適配置が異なる結果となった。

つまり、人的被害のリスク低減に向けた事前対策案を考える際、従来は確定論的に最大規模の津波（本稿では、応力降下量 5MPa に相当する津波）が想定されていたが、これは必ずしも最善な手法とは言えず、断層運動の不確定性を考慮して確率論的に算定した津波ハザード評価結果に基づき配置位置を決定する必要性が示された。

4. まとめ

本研究では、確率論的アプローチを用いて、津波人的被害リスクに基づく避難タワーの最適配置法を提案し、南海トラフ地震の発生を想定したケーススタディを行った。今後は、津波のみならず地震動までを対象とし、リスク低減に向けた事前対策として、津波避難タワーの配置最適化に加え、堤防の建設、構造物の耐震・対津波補強、住宅移転、および防災教育の実施など、ハード・ソフトの両面から複合的に考えた事前対策案を提案したい。

参考文献 1) 国土交通省 防災・減災対策本部：国土交通省 南海トラフ巨大地震対策計画 [第3版]，2021. 2) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, *IUGG/IOC Time Project*, 1997. 3) Isola, P., Zhu, J., Zhou, T. and Efros, Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks arXiv:1611.07004v3 2018. 4) 牧野嶋文泰，今村文彦，安倍祥：多数シナリオ津波避難シミュレーションによる確率論的避難安全性の評価，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol. 73, No. 2, I_1513-I_1518, 2017. 5) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp.269-271, 1959. 6) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）津波断層モデル編ー津波断層モデルと津波高・浸水域等についてー，2012.

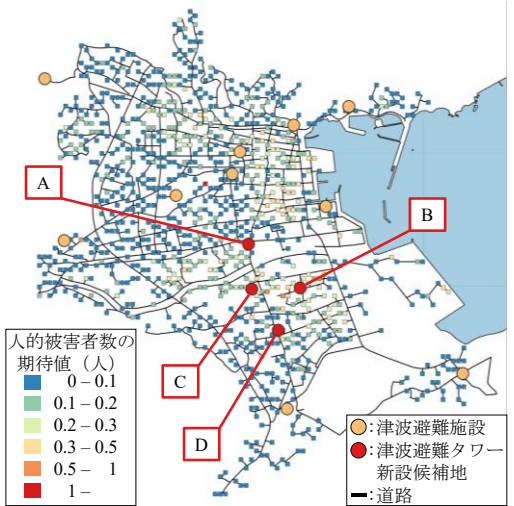


図-2 人的被害者数のリスクの期待値

表-1 避難タワー新設における純便益およびその最適配置

	津波ハザード 評価手法	防災予算 (億円)			
		1.52	3.04	4.56	6.08
純便益 (億円)	確率論	15.65	22.71	27.46	27.17
	最大	490.11	730.45	894.69	928.68
最適配置	確率論	B	A, B	A, B, D	A, B, C, D
	最大	A	A, B	A, B, D	A, B, C, D