津波避難シミュレーションを用いた 津波避難タワーの効果の検討

小柳 雄揮¹・有川 太郎²

¹中央大学大学院 理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)

E-mail:koyanagi@civil.chuo-u.ac.jp

²正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: arikawa@civil.chuo-u.ac.jp

本研究では、津波避難タワーを整備した地区を対象に、津波シミュレータと連成させた避難シミュレータを用いて、津波の挙動と避難行動を同時に計算し、津波避難タワーの有無による人的被害の違いや避難行動への影響を検証した。その結果、本条件下においては、沿岸部に近い場所に避難タワーを設置した場合、避難開始時間によっては、津波に遭遇する可能性が高くなることがわかった。一方で、避難開始時間が津波到達時間よりも早ければ、津波避難タワーによって、死亡率をかなり減少させることが確認できた。また、新たな津波避難タワーの設置した場合の効果についても検証し、平均的な避難距離を短くすることで、死亡者数が減少することがわかった。

Key Words : evacuation simulation, evacuation tower, evacuation start time, tsunami, STOC

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災以降、想定される最大クラスの津波の高さが増大し、従来のハード面の対策だけでなく、ソフト面の強化がより重要となった。そのため、津波に強いまちづくりのための方策¹⁾が示され、津波による浸水被害が生じる恐れがある地域を中心に、人命を守るための円滑な避難行動を支える基盤を再検証している。しかし、地震発生から津波到達までの時間的な余裕が少なく、避難のための十分な時間を確保できない地域も少なくない。そのため、対策の1つとして、津波避難ビルや津波避難タワー等があげられ、津波避難ビル等の指定、利用・運営手法等についてのガイドラインが内閣府²⁾により作られている。

避難ビル等の有用性については、伊藤ら³⁾が避難可能距離、収容可能距離指標と、予想される津波浸水範囲を重ねることで、どの場所が危険地帯になっているのか検証を行っている。一方で、一度に多くの避難者の避難行動、例えば海の方へ避難するなどの行動や、避難場所、避難開始場所、避難開始時間などによる影響を検討するには、避難シミュレータ等を活用する必要がある⁴⁾。そこで本研究では、有川ら⁵⁾の開発した、非線形長波方程式に基づく津波シミュレータと、マルチエージェントを用いた避難シミュレータを連成させた津波避難シミュレーションを用いて、津波挙動と避難行動を同時に計算し、津波避難タワーの有無による被害予測や避難行動への影響を検証した。また、新たな津波避難タワーの設置場所の選定及びそれに伴う避難行動への影響を検証した。

シミュレーションを行った対象地域は、今後津波による甚大な被害が予想されている高知県のある地域である。この地域は、主要な産業が観光業と漁業であるため、沿岸に近いエリアに住宅が集中しており、高台にある避難所まで避難するのに時間を要する。また同地域は、幅の狭い道が多く、車での避難は難しいため、避難行動を支える対策として、2014年に1つ目の津波避難タワーを設置し、続けて2015年に2つ目の津波避難タワーを整備した。整備された1つ目の津波避難タワーを写真-1に示す。

写真-1 対象地区の津波避難タワー

2. 津波避難シミュレータの概要

(1) 津波避難シミュレータの概要

本研究では有川ら³⁾の開発した高潮津波シミュレータSTOCと連成させた津波避難シミュレータを用いる。STOCと避難モデルを連成し、津波の挙動と避難行動を同時に計算することで、津波規模と避難条件に応じた死亡率の定量的な評価を可能としている。高潮津波シミュレーションSTOCは、準3次元モデル（多層モデル）を用いた静水圧近似のシミュレータであるSTOC-MLを用いた。避難シミュレータは、ポテンシャルモデルを使用し、避難者は地形や障害物を考慮した避難所までの最短距離経路を選択する。また避難速度は、ハイキング関数により経路の勾配を考慮し、また浸水深による避難速度の補正を行っている。浸水深は、STOCにより計算される値を読み込むことにより設定する。避難シミュレーションのフローを図-1に示す。agentの死亡判定は、死亡判定水深を設定し、その水深を超える浸水深を持つセルに含まれる避難者を死亡判定としている。本研究では死亡判定水深を1.0mと設定した。

(2) 津波シミュレーションの計算条件

高潮津波シミュレーションSTOCの計算領域は、最小の格子サイズを10.0 mとした。波源は、中央防災会議に

よる南海トラフ巨大地震のモデルケース⁴⁾のうち、最大津波高、津波到着時間などから、最も被害が大きくなると考えたケース4（四国沖に大すべり+超大すべり域）を使用した。この波源による対象地域の湾奥での水位変化のグラフを図-2に示す。以上の計算条件での、津波到着時間と最大浸水深の計算結果を図-3、4に示す

3. 避難開始時間による津波避難タワーの効果

(1) 避難シミュレーションの計算条件

設定した避難経路及び避難所の図を図-5に示す。また、避難シミュレーションは、設定条件として避難者数2700人、初期の避難速度1.0 m/sとし、避難経路上にランダムに配置した。津波避難タワー整備後を想定した津波避難タワー2基(図-5の2番、5番)を含む9カ所を避難所に設定したシミュレーションと、整備前を想定した津波避難タワーを含まない避難所7カ所を設定したシミュレーションを行った。このとき、避難者の避難開始時間は、0s, 300 sと、600~1800 sの間の100 s毎で設定を行った。避難シミュレーションの詳細な条件を表-1に示す。

図-1 避難シミュレータのフロー図

図-2 津波シミュレータによる水位変化

図-3 シミュレーションによる津波到達時間

図-4 シミュレーションによる最大浸水深

(2) 津波避難タワーの効果

津波避難タワーの整備前後の避難を開始する場所から避難所までの最短経路の距離を、図-6 に津波避難タワーがない場合の、図-7 に津波避難タワー有りの場合の図を示す。津波避難タワーの整備によって、特に沿岸部から避難する際の避難経路距離が大きく改善されていることがわかる。

また津波避難シミュレーションの結果から、死亡率と避難開始時間の関係のグラフを図-8、その差を図-9 に示す。避難開始時間が 0~600 s では、津波避難タワーの整備前後に関わらず死亡率は 0 % となり、避難開始時間を 10 分以内にできたら、津波避難タワーの有無に関わらず死亡者が出ないことがわかった。避難開始時間が 700 s を超えると、津波避難タワーが無い場合に被害に遭う人が出てくるが、津波避難タワーが有ると避難開始時間が 800 s までは死亡率は 0 % であった。避難開始時間が 900 s から 1500 s までは、津波避難タワーの有無に関わらず、次第に死亡率は高くなっていくが、津波避難タワーによって死亡率が抑えられていることが確認できる。しかし、避難開始時間が 1600 s を超えると共に死亡率は 100 % となった。

表-1 避難シミュレーションの詳細な条件

項目	詳細
避難経路	図-5 参照
避難所	避難タワー無し 7カ所 (図-5 内の2番と5番を設定しない) 避難タワー有り 9カ所 (図-5 内の2番と5番も設定する)
格子間隔	10.0m
格子数	x:162, y:162, z:1
タイムステップ間隔	0.1 s
計算時間	7200s
避難開始時間	0 s, 300 s, 600~1800s間の100 s 毎
避難速度	初期速度 1.0m/s で設定
避難経路選択	最短距離経路
agent 数	2700 人
agent 配置場所	経路上にランダム
死亡判定水深	1.0m

図-5 避難経路と避難所の設定

図-6 避難タワー無しの場合の避難経路距離

図-7 避難タワー有りの場合の避難経路距離

図-8 避難開始時間と死亡率の関係

図-9 津波避難タワーの有無による死亡率の差

避難開始時間によっては、津波避難タワーが整備されたとしても、人的被害が発生しており、早期避難が重要であることがわかる。また対象地域においては津波避難タワー1号の地点では、津波浸水時間は約1410sであり、津波の浸水が開始する前に避難を開始しても津波に遭遇する可能性がある。また浸水が開始してから避難した場合では、死亡率が80%以上になることがわかった。さらに、避難開始時間による津波避難タワーの効果を検討するため、津波避難タワーの有無による死亡率の差をグラフにしたものを図-9に示す。避難開始時間が800s～1300sでは、津波避難タワーの整備によって死亡率が約10%以上改善でき、特に1000～1200sでは、死亡率を20%以上抑えることができる。このことから、避難開始が700sを超えて1600sまでに避難する場合において、津波避難タワーの有効性を確認することができたと考える。

4. 避難所までの距離別の津波避難タワーの効果

(1) 避難シミュレーションの計算条件

前章では避難開始時間毎の死亡率を算出した。次に、避難開始場所から避難所までの距離毎の死亡率を算出し、津波避難タワーの効果を検討する。

そこで避難開始場所から避難所までの距離を50m毎に分類し、分類した場所毎にシミュレーションを行った。例えば、避難所までの距離が500～550mの場所を算出し、その場所を赤色で示した図を、図-10には津波避難タワーが無い場合、図-11には津波避難タワーが有る場合の図を示す。津波避難タワーの有無のそれぞれの場合において、分類した場所に200名のagentをランダムに配置した。また、避難開始時間は100s毎に設定した。agent数、agent配置位置、避難開始時間以外の計算条件は表-1と同じである。

(2) 避難シミュレーションの計算結果

避難経路距離毎の避難シミュレーションを行い、避難所までの距離毎に死亡率が0%でなくなる避難開始時間を算出した。これにより、分類した距離毎に避難できる最大の避難開始時間を算出した。この時間を避難開始限界時間とし、避難経路距離との関係を図-12に示す。避難経路距離が500～550mまででは、津波避難タワーがあることで限界避難可能時間が短くなっているが、これは沿岸に近い場所に津波避難タワーがあることで、agentの配置位置も沿岸に近くなり、津波に遭遇する時間が早くなるからであると考えられる。一方で、避難経路距離が600～650mより長くなると、津波避難タワーの設置により避難を可能にする時間を100sから200s稼ぐことができることがわかった。

5. 避難経路距離の変化による避難行動への影響

(1) 避難シミュレーションの計算条件

津波避難タワー有無によって、避難所までの距離が変わることは図-6, 7からわかる。そこで避難開始場所から避難所までの距離が変化した場所、つまり津波避難タワーを整備したことによって避難経路距離が短くなった場所を100m毎に分類して、避難シミュレーションを行った。100m毎に分類した場所に色付けをし、図-13に示す。agentは分類した場所毎に200人をランダムで配置した。また、避難開始時間は1200sに一斉に開始するように設定した。agent数、agent配置位置、避難開始時間以外の計算条件は表-1と同じである。

図-10 避難所までの距離(500～550m)
(津波避難タワー無しの場合)

図-11 避難所までの距離(500～550m)
(津波避難タワー有りの場合)

図-12 避難経路距離毎の限界避難可能時間

(2) 避難シミュレーションの計算結果

避難所までの距離が変化した場所と死亡者数の結果を図-14に示す。また、津波避難タワーの有無による死亡者数の差を算出したものを図-15に示す。これらの結果より、避難経路距離が300 m以上変化した場所からの避難では、津波避難タワーによって死亡者数を減少させることができることができ、津波避難タワーの有効性を確認することができた。しかし、避難経路距離が100～300 mまでしか変化する場所からの避難では、津波避難タワーの有効性はあまりないことがわかった。

また、避難経路距離が0～100 mしか変化する場所から避難する場合では、津波避難タワーへ避難することで死亡者数が多くなってしまうことがわかった。これは図-3からわかるように津波浸水到達時間が早い沿岸部に津波避難タワーがあることで、津波が来襲する方向へ逃げるようになったためだと考える。ただし、本研究では、避難開始時間を1200 sに設定していることを考慮する必要があると考える。

図-15 津波避難タワーの有無による死亡者数の差

6. 新たな津波避難タワーの整備場所の検討

(1) 避難シミュレーションの計算条件

以上の結果より、津波避難タワーの有用性が確認できたと同時に、設置場所も極めて重要であることがわかった。そこで、今後新たに津波避難タワーを設置するにあたって、津波避難シミュレーションを用いて、最適なタワーの設置場所を検討する。

(2) 避難シミュレーションの計算結果

図-6, 7の避難経路距離や前章までの結果から、新たな津波避難タワーの設置場所を6カ所選定した。そこに新たな津波避難タワーを設定し、シミュレーションを行った。避難シミュレーションの計算条件は避難開始時間を1200 sに設定した他は、表-1と同じである。新たに設定した6ケースの津波避難タワーの場所と、各ケースの平均避難距離と死亡者数の関係を図-16, 17に示す。

本研究では、ケース3で設定した位置に新たな津波避難タワーを整備すると、津波避難タワーの効果は最大となり、津波避難タワー2基の場合に比べ、平均避難経路距離を約12 %、死亡者数を約45 %減少させることができることがわかった。また、平均避難経路距離がほぼ等しいケース1とケース5の比較から、最短経路で避難する際に津波が来襲する方向から離れるような場所に、新たな津波避難タワーを整備することを提案する。

7. おわりに

本研究では、最短経路で避難する津波避難シミュレーションを用いて、津波避難タワーを整備した地区を対象に、避難開始時間や避難経路距離、限界避難可能時間を算出し、津波避難タワーの有効性を定量的に確認することができた。

しかし、沿岸部の津波避難タワーと内陸部の避難所までの避難経路距離に300 m程度しか差がない場所からの避難では、避難開始時間によっては沿岸部にある津波避難タワーに避難することで、津波に遭遇し被害が大きくなる場合もあることがわかった。また、新たな津波避難タワーの設置位置の検討及び提案した。今後、津波避難シミュレーションを用いて、本研究で抽出した問題点を住民の方々と議論するなどをして、実際の避難行動への活かし方も考えていきたい。

謝辞：公益社団法人 日本地震工学会 津波などの突発大災害からの避難の課題と対策に関する研究委員会には、避難経路並びに避難所等のデータの提供いただいた。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省都市局：津波防災まちづくりの計画策定に係る指針，URL: http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_gairo_tk_000031.html，参照2015-06-11.
- 2) 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン，URL: <http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/guideline.pdf>，参照 2015-07-09.
- 3) 伊藤渚生，一ノ瀬友博：津波避難場所選定指標を用いた現状の避難ビル適地選定分析-鎌倉市における事例研究-，都市計画報告書，No.13，pp.156_159，2015.
- 4) 熊谷兼太郎：2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性，国土技術政策総合研究所資料 No.742，2013.
- 5) 有川太郎，大家隆行：数値波動水槽と連成した避難シミュレーションによる避難行動特性についての検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.71，No.2，pp.L319-L324，2015.
- 6) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会，URL: <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>，参照2016-01-21.

(2016.3.16 受付)

STUDY OF THE EFFECT OF THE TSUNAMI EVACUATION TOWER USING THE TSUNAMI EVACUATION SIMULATION

Yuki KOYANAGI and Taro ARIKAWA

This study attempts to investigate effect of a tsunami evacuation tower by using evacuation simulator is coupled with tsunami simulator. This simulator calculates the behavior of evacuation and tsunami at the same time. Thus, the difference of the human suffering and the impact on the evacuation behavior were validated. As a result, in this study's conditions, when the evacuation tower was established at the location near coastal area, it was confirmed possibility to encounter tsunami rises depending on the evacuation start time. On the other hand, when evacuation starts earlier than tsunami arrival time, it was confirmed that it is possible to significantly reduce the death rate. Finally, the effect of new tsunami evacuation tower was validated. As a result, it was confirmed that the death rate is decreased by shortening the average evacuation distance.