

鉛直緊急避難の導入による 津波避難困難地域の解消に関する事例検討

FEASIBILITY STUDY TO RESOLVE DIFFICULT EVACUATION AREA ON TSUNAMI BY INTRODUCING VERTICAL EMERGENCY EVACUATION

西畑 剛¹・森屋陽一²・和田匡央³・高橋重雄⁴
Takeshi NISHIHATA, Yoichi MORIYA, Masao WADA, Shigeo TAKAHASHI

¹正会員 修(工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 博(工) 財団法人 沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

³財団法人 沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁴フェロー 工博 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

A primary objective for tsunami disaster mitigation is to save lives of people. For safe evacuation from tsunami, it is essential for local governments to prepare for proper hazard maps, from which the people should understand the inundation areas, evacuation routes and refuge places well. However, there still exist a lot of “difficult evacuation area” where evacuation time is very limited and the risk to encounter the tsunami is high on the way to the shelters. The emergency vertical evacuation is very important to reduce such difficult evacuation areas.

In this paper, procedures to determine adequate emergency vertical evacuation shelters are discussed. The effect of the vertical evacuation is quantitatively demonstrated based on case studies using tsunami inundation and human evacuation simulations. The simulations can clearly identify the difficult evacuation areas which can be significantly reduced by having the emergency shelters. The shelters should be prepared not only to minimize the difficult evacuation areas but also to reduce the necessary time to reach the shelters, especially for elderly people and children.

Key Words : *Tsunami, vertical emergency evacuation, tsunami inundation simulation, tsunami evacuation simulation*

1. はじめに

我が国では、来るべき巨大地震津波災害に備え、津波浸水ハザードマップが自治体毎に整備されつつある。こうした前提知識や津波警報などの行政からの情報を基に、浸水範囲にいる住民は、非浸水区域へ避難することによって津波から逃れることが可能である。しかしながら、避難途上で津波に飲み込まれ被災するケースは多く、公的避難所までの距離が遠い、あるいは津波警報発令から津波来襲までに時間的余裕がない避難困難地域を有する地域において課題を残している。また想定よりも大きな津波が襲来した場合や津波到達時間が早い場合、避難者が遡上した津波に遭遇するリスクは増大する。津波浸水域内を避難することは非常に危険であるので、こうしたケースにおいては鉛直方向への一時的かつ緊急的な避難、すなわち鉛直緊急避難の必要性が指摘されており、自治体によっては既に導入している所もある¹⁾。但し、鉛直緊急避難場所は主として浸水域に設置されることが想定されるので、活用すべき施

設については、位置的要件のみならず構造的要件に関しても留意がいる。

本研究では、鉛直緊急避難の導入効果を数値解析によって検証するとともに、鉛直緊急避難場所の設定方法に関しても言及するものである。

2. 検討位置と避難所配置

和歌山県田辺市文里地区を対象としたケーススタディを実施する。当地区は東南海・南海地震の防災対策強化推進地域に指定されており、高い所で6m程度の津波の来襲が想定されている²⁾。

最初に現地調査を実施し、公的避難所の配置や地理的条件、鉛直緊急避難場所となり得る施設などを確認した。検討位置および避難所配置を図-1に示す。図中には本研究で鉛直緊急避難場所として用いた施設位置や写真も示す。ここでの鉛直緊急避難場所を含めた避難場所の定義を表-1にまとめる。鉛直緊急避難場所の設定方法は後で述べるが、身近に避難所および一次避難所がない場合に利用する暫定



図-1 検討位置および避難所配置

表-1 避難場所の定義

種類	定義 (例)
避難所 (収容施設, 二次避難所)	避難生活にも対応できる想定最大津波の浸水範囲外の建物 (学校, 公民館など)
一次避難所	想定最大津波の浸水範囲外の場所や建物または「津波避難ビル等に係るガイドライン」の構造的要件を満たす建物 (高台, RC 造の公共施設など)
鉛直緊急避難場所	避難所または一次避難所へ避難するための時間的余裕が限られる緊急的な場合に利用する建物や場所 (集合住宅, 事務所, 歩道橋など)

的な施設という位置づけであり、既存の施設を利用するため、その安全性には注意が必要である。

3. 浸水シミュレーション

(1) 浸水シミュレーションの概要

想定地震は東海、東南海・南海地震同時発生型とし、中央防災会議(2003 年)によるアスペリティを考慮した水位分布を初期水位として与え、地形データも同会議によるものを流用した。なお検討潮位は文里湾における $HWL=TP+0.8m$ で統一した。地形は、大領域を 1350m とし、検討域に近づくにつれて格子サイズを小さくしていき、検討範囲はレーザー航空測量に基づく最小格子サイズ 16.7m で再現した。

浸水シミュレーションは、広領域で線形長波方程式を狭領域では非線形長波方程式を用い、土地利用に応じたマニング粗度³⁾を摩擦項として与えた。ここで検討域を含む非線形解析領域では小谷らの手法³⁾によって津波の遡上解析を行っている。解析は水位と線流量をスタッガード格子として空間的に配置し、リープフロッグ法によって時間発展させた。領域境界では水位と流量を補間するよう接続させている。なお浸水シミュレーションは想定津波の他、想

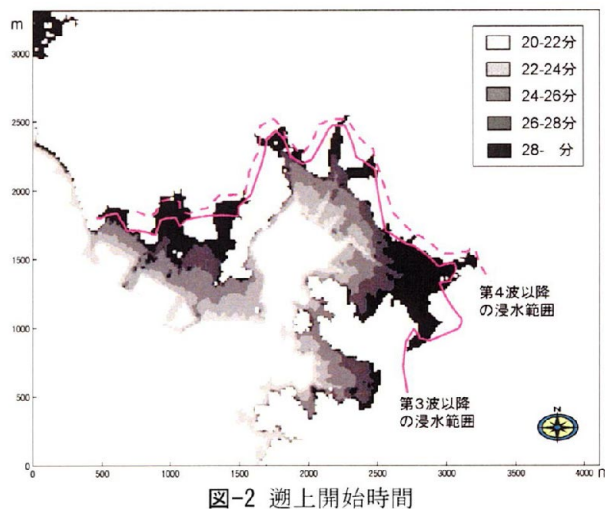


図-2 遡上開始時間

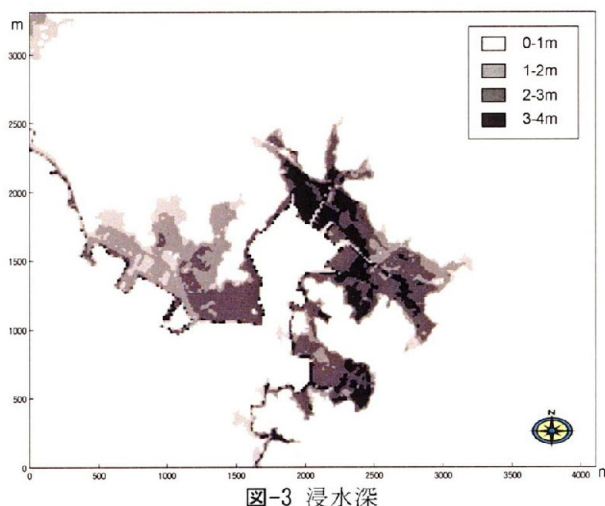


図-3 浸水深

定外のケースとして、想定最大以上の規模の津波を解析した。ここで想定最大以上の津波は、想定津波の初期水位を 1.5 倍して与えている。

(2) 浸水シミュレーション結果

図-2 および図-3 に例として想定津波の遡上開始時間と浸水深を示す。地震発生後 30 分で第 1 波によって検討範囲の大部分は浸水し、第 2 波以降は少しずつ浸水範囲を拡大し、120 分過ぎの第 4 波で浸水面積は最大となった。浸水深は深い所で概ね 4m 程度となった。一方、想定最大以上の津波では、遡上時間はほぼ同じで最大浸水深は 6m 程度となった。

4. 避難シミュレーション

(1) 避難シミュレーションの概要

避難シミュレーションの概要を図-4 に示す。シミュレーションは避難経路を GIS データから読みとり、ノード (交差点) とリンク (街路) に簡略化した上でドット状に示された避難者の避難行動を模擬するものである。なお、図中の避難タワーについては後述する。ここで避難者は先行研究⁴⁾に準拠した

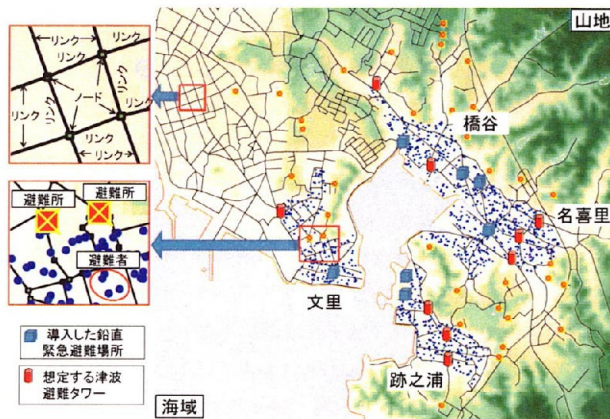


図-4 避難シミュレーションの概要

表-2 検討ケース

No	津波規模	避難所	歩行速度	避難開始時間	避難者数
1	想定	収容+一次	0.5m/s	3分	文里
2	最大		1.0m/s	5分	200人
3		収容+一次+	0.5m/s	7分	橋谷
4		鉛直緊急	1.0m/s	10分	150人
5	想定	収容+一次	0.5m/s	以降5分	名喜里
6	最大		1.0m/s	毎, 120	450人
7	以上	収容+一次+	0.5m/s	分まで	跡之浦
8		鉛直緊急	1.0m/s		200人

ポテンシャルモデルに従った避難行動を行うものとする。すなわちノードには各避難所からの距離に応じたポテンシャル値が設定され、避難者はノードに到達した時点で次に進むべきリンクをポテンシャル値が小さいノード方向へ向かうよう選択することで、最終的に避難所へ到達する。本研究では、「津波避難ビル等に係わるガイドライン」⁶⁾（以下「避難ビルガイドライン」）に基づき海岸方向へ進路を取らないように、海岸線へ近づくに従って大きなポテンシャル値が設定されるように改良を加えた。

(2) 避難シミュレーションの設定

避難シミュレーションは先に述べた津波規模と避難所、避難者歩行速度を変えたケース1から8を設定した。避難者歩行速度は、健康者および老人等の災害弱者を想定した歩行速度として1.0m/sと0.5m/sの2通りを考える。表-2に検討ケースを示す。避難可否は、地震から避難開始までの経過時間に左右されるため、各ケースともさらに避難開始時間を変えた検討を実施している。なお避難者は想定津波発生時における浸水範囲内へ地区別に表-2の人数を割り振っており、浸水範囲に入った段階で避難不能とみなした。

(3) 避難シミュレーション結果

現況の避難所配置に対して避難シミュレーションを実施した結果出力例としてケース1（避難開始時間地震発生後10分）における避難失敗者の初期位置を図-5に示す。図中の破線内のドットは避難失敗

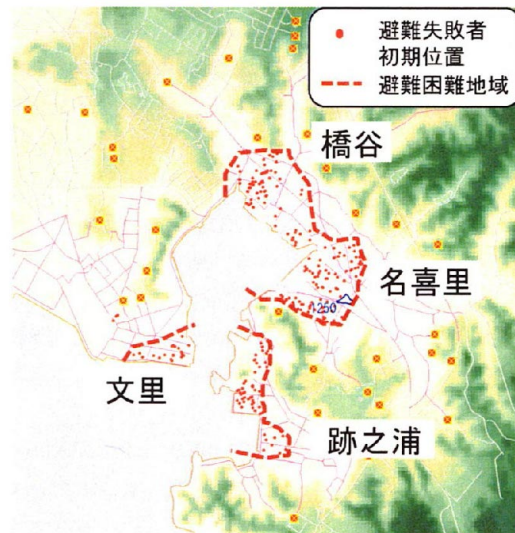


図-5 失敗者初期位置（ケース1，避難開始時間=15分）

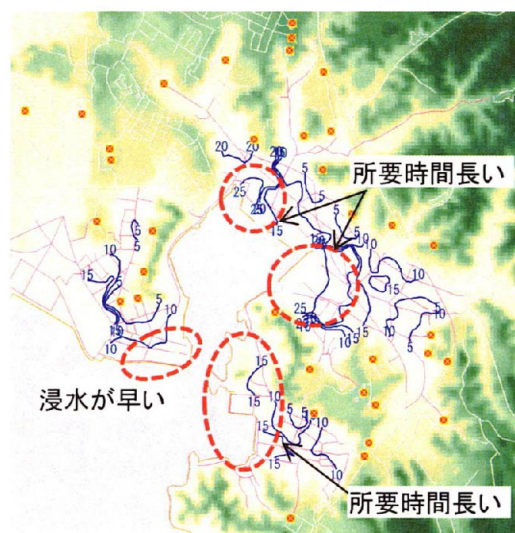


図-6 避難所用時間（単位：分）

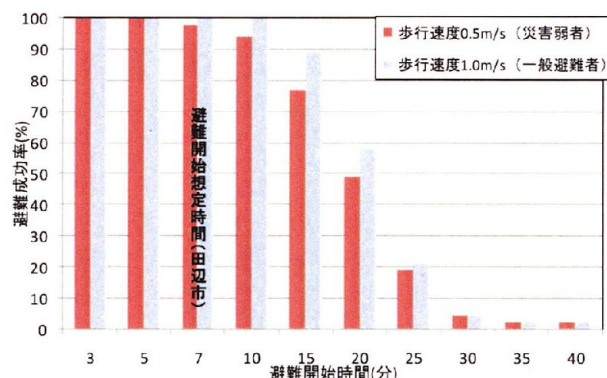


図-7 避難開始時間と避難成功率（ケース1,2）

者が地震発生時に居た位置である。次に避難所要時間コンターを図-6に示す。避難失敗者は避難所要時間が15分以上要する領域（橋谷、名喜里、跡之浦）か浸水が早い領域（文里）に見られ、これらの領域は避難困難地域と考えられる。避難開始時間と避難成功率の関係を図-7に示す。いずれの規模の津波に対しても避難開始時間が遅れると避難成功率は低下するため、地震発生後は早期の避難が望まれ

る。また歩行速度の遅い災害弱者ほどその低下の度合いは大きい、こうした人々ほど逃げ遅れるケースは多いと考えられるので、鉛直緊急避難のような対策が必要となる。

5. 鉛直緊急避難場所の設定

前章の解析より避難困難地域が把握できた。鉛直緊急避難場所を設定するに当たっては、このように災害発生シナリオとして地震や津波の到達時間・規模等を想定し、想定シナリオに対する避難困難地域を把握する必要がある。鉛直緊急避難場所の設定フローを図-8に示す。ここでは2章図-1に示した鉛直緊急避難施設の設定手順を示す。

(1) 位置の選定方法

鉛直緊急避難場所の位置は、避難時に避難路が十分に確保される場所にあることが肝要である。

また避難困難地域内でも津波波力を直接受ける可能性が高い場所ではできるかぎり回避する必要がある。こうした場所では津波先端部の碎波に伴う衝撃的な波力がかかる可能性があり、より大きい構造物耐力を必要とする。津波波力を直接受ける可能性が高いと考えられる場所を以下に列記する。

- ・海岸に面した場所
- ・標高が低く海を見渡せる場所
- ・河川や排水路の近く
- ・海岸堤防や防潮堤防の背後

本研究で選定した鉛直緊急避難場所の位置・構造などを表-3に示す。直接波力を受ける可能性が高い場所としては、港湾合同庁舎、アミューズメントビル、マンションが該当する。

こうした場所をある程度定量的に判断するためには建物位置における浸水時のフルード数が一つの目安になると考えられる⁶⁾。しかしながら現状の津波遡上解析の多くは非線形長波方程式に基づいており、防災実務レベルの浸水深や遡上高の再現性は良好なもの、モデル上、射流状態の流れは再現されない。流れも含めた高精度な解析手法に関しては、一部3次元解析を用いる手法⁷⁾が挙げられるものの計算負荷が大きく、実務上の課題と言える。本研究では浸水シミュレーション結果から求まる沿岸津波高および浸水深から松富・飯塚の手法⁸⁾を用いてフルード数を算出し、衝撃的な波力の目安と成り得るか検討する。本手法であれば、厳密な遡上解析を経ずともハザードマップレベルの情報から検討が可能となることが期待できる。松富・飯塚は津波遡上時における沿岸津波高と浸水深から以下の関係を導いている。

$$Fr \approx \sqrt{2(H_0 - z - h_r) / h_r (1 + 2gn^2\delta / h_r^{4/3} - h_r^2 / H_0^2)} \quad (1)$$

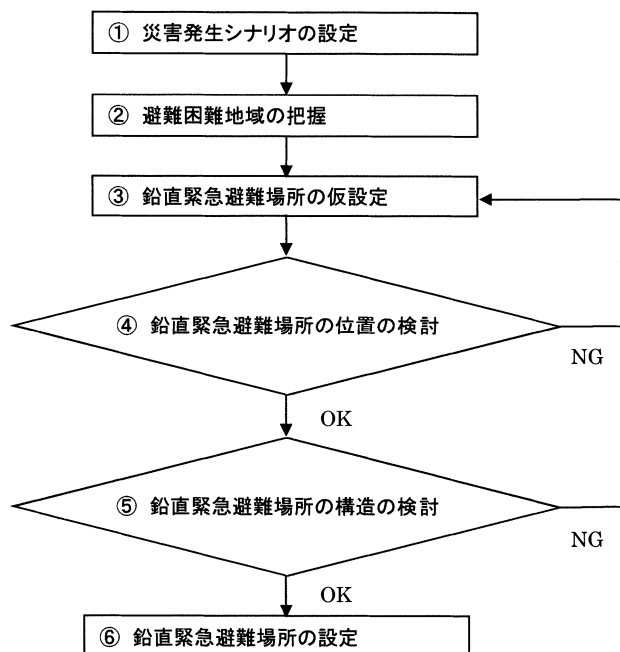


図-8 鉛直緊急避難場所の設定フロー

表-3 鉛直避難施設 (*の階数は建物の一部)

No. 施設	位置	構造・階数	最大浸水深
24. 港湾合同庁舎	海岸際	RC造5階*	3m程度
25. アミューズメントビル	海岸よりやや陸側	RC造3階*	3m程度
26. 歩道橋1	市街	鋼製	3m程度
27. 歩道橋2	市街	鋼製	2m程度
28. 自動車学校	市街	RC造3階*	3m程度
29. マンション	海岸より陸側	RC造4階	0.5m程度

表-4 Fr数の算定結果

No. 施設	H_0	h_m	n	δ	Fr
24. 港湾合同庁舎	10.0	2.5	0.025	17	1.42
25. アミューズメントビル	10.2	3.2	0.025	100	1.04
26. 歩道橋1	10.1	2.9	0.04	200	0.79
27. 歩道橋2	10.1	2.1	0.04	319	0.78
28. 自動車学校	10.1	2.7	0.04	241	0.78
29. マンション	9.8	0.6	0.04	48	1.88

ここで、 H_0 は沿岸津波高（全水深）、 z は陸上地盤高と沿岸地盤高の差、 g は重力加速度、 n はマニングの粗度係数、 δ は汀線からの距離、 h_r は建物背面の浸水深、 Fr はフルード数である。なお先に述べた浸水シミュレーション上の最大浸水深さを h_r とし、陸上地盤高はゼロとして安全側の設定とした。

計算結果を表-4に示す。ここで粗度係数は周辺の建物密集度に応じて決定した。 Fr 数が1を越える合同庁舎やアミューズメント施設、マンションは、耐津波性の詳細な照査が必要と考えられる。

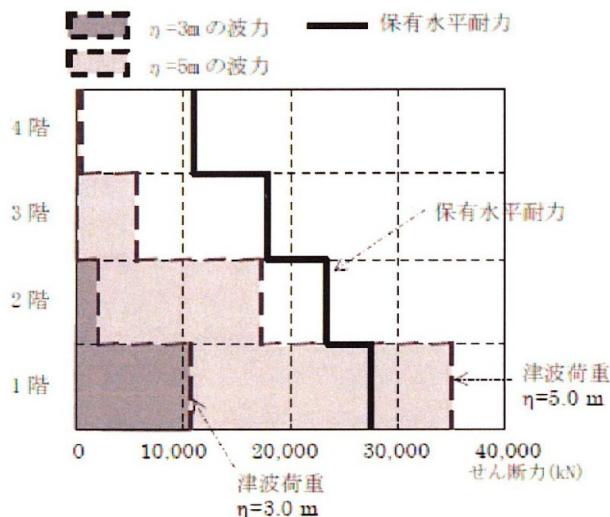


図-9 津波荷重と建物保有耐力の関係（菅野ら¹¹⁾）

(2) 構造の選定方法

a) 避難フロアーの高さ

津波波力を直接受けない場所では安全を見て、最大浸水深の 1.5 倍以上とする。自動車教習所は 4.5m 以上の高さのフロアーすなわち 3 階以上に避難すればよい。同様にマンションは 0.8m 以上となるので、2 階以上となる。また歩道橋の場合は建築限界が 4.5m 以上であり、上部工へ津波が作用しない浸水深さ 3m 以下であれば鉛直緊急避難場所に成り得るので、歩道橋 1, 2 は避難場所として適する。津波波力を直接受ける場所では、後に述べる津波波力式(2)を勘案し最大浸水深の 3 倍以上を目安とする。よって浸水深さ 3m 程度の場合は 9m 以上のフロアーへ避難が必要となり、港湾合同施設では 4 階以上、アミューズメントビルは 3 階屋上へ待避する必要があることになる。

b) 耐震性

「避難ビルガイドライン」と同様に RC 造ないし SRC 造を基本とし、耐震性が確保された建物とする。

c) 耐津波性

本研究では建物の詳細な構造データの入手にまでは至らなかったため、鉛直緊急避難場所の耐津波性に関しては検討の流れのみ示す。

過去の津波被害の分析から、RC 構造物は 4m 程度の浸水深さまでは持ちこたえることが報告されている⁹⁾。そこで津波波力を直接受けず浸水深 4m 以下の場所にある RC 造、SRC 造の建物は、耐津波性を有すると考える。

津波波力を直接受ける場所では、簡易的に朝倉らの手法⁶⁾等により津波波力を計算する。

$$p(z) = \rho g (3\eta - z) \quad (2)$$

ここで p は海水密度、 g は重力加速度、 η は浸水深、 z は地盤面からの高さである。この手法に基づいた耐津波性の解析研究事例はいくつか存在するが¹⁰⁾、菅野ら¹¹⁾は RC、SRC 造の設計浸水深・階数に対し、

構造要件の検討が必要となる目安をまとめており参考になる。さらに学校校舎について詳細な検討を実施しているが、これは本研究の港湾合同庁舎とほぼ同じ寸法（横 63m、奥行 12m、4 階建）である。菅野らの解析結果を図-9 に示す。港湾合同庁舎での津波による浸水深さはほぼ 3m であるため、施設構造が同等であれば各階において十分な建物保有耐力を有することがわかる。直接津波波力を受けると考えられるアミューズメントビルおよびマンションも同様の流れで検討可能である。

6. 鉛直緊急避難場所の導入効果

前章で設定した鉛直緊急避難場所の導入効果を避難シミュレーション結果から考察する。避難所要時間のヒストグラムを図-10 に比較する。鉛直緊急避難場所の導入によって、避難所要時間が短縮されて

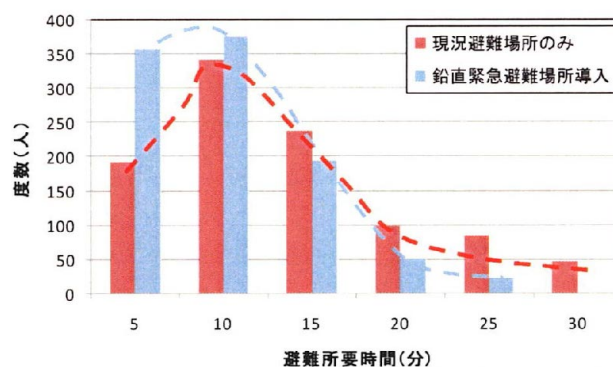


図-10 鉛直緊急避難場所導入による避難所用時間の短縮

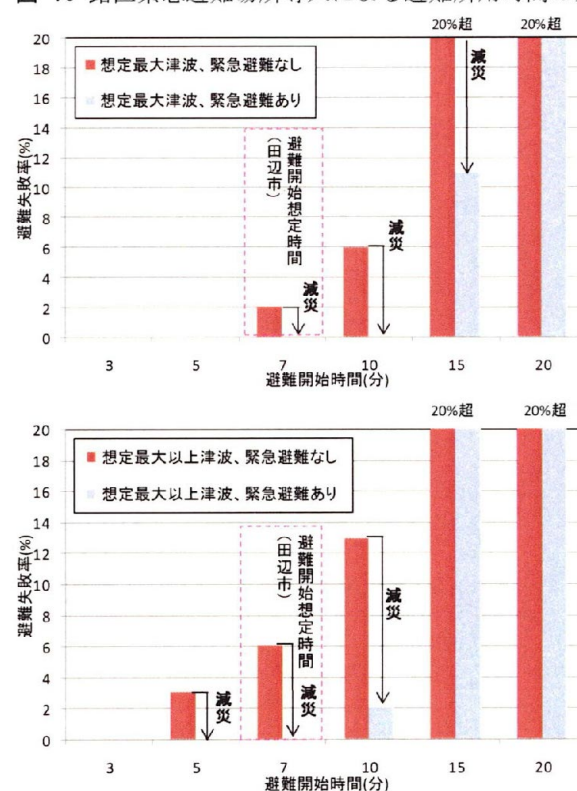


図-11 鉛直緊急避難場所導入による避難失敗率の差（上：想定最大津波、下：想定最大以上津波）

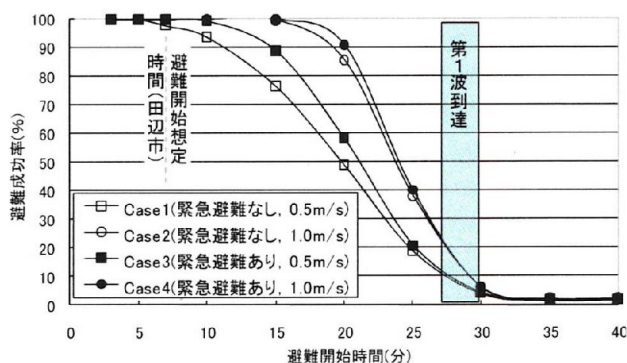


図-12 歩行速度別鉛直緊急避難場所の導入効果

いることがわかる。なお鉛直緊急避難場所導入後も依然として避難所要時間が 20 分以上かかる避難者が存在する。図-6 に示した避難時間コンターを同様に出力することによってこうした避難者の発生箇所の把握は可能ではあるが、本検討では鉛直緊急避難場所としてふさわしい施設が見あたらなかった。こうした領域へは避難タワーの建設等によって対処することが望まれ、仮想的に図-4 に示した津波避難タワー等を導入したシミュレーションを実施したところ、避難所要時間を 15 分以内に抑えることが可能であった。次に鉛直緊急避難場所の導入による避難失敗率の差を図-11 に示す。想定津波および想定最大以上津波のどちらに対しても鉛直緊急避難場所の導入によって避難失敗率は低下し、田辺市の避難開始想定時間内に避難することで避難失敗はゼロとなっている。鉛直緊急避難という概念・施設を導入することで、想定外に大きな津波が来襲した場合でも対応が可能となることが期待できる。最後に歩行速度別に避難開始時間と避難成功率の関係を図-12 に比較する。いずれも鉛直緊急避難場所の導入によって避難成功率は上がるが、歩行速度の遅い災害弱者に対してより大きな効果があることがわかる。特に地震発生後、7 分から 15 分といった災害弱者であれば十分逃げ遅れとして想定される時間帯においてその効果は顕著であり、これらの点からも鉛直緊急避難場所の有意性が検証された。

7. まとめ

鉛直緊急避難場所の導入効果とその設定方法について、和歌山県田辺市文里地区を対象としたケーススタディを実施した。以下に結論をまとめる。

- (1) 鉛直緊急避難場所を導入により、避難困難地域が解消される効果が認められる。田辺市の想定避難開始時間内に避難開始した場合では避難成功率は 100% となった。
- (2) 想定よりも大きい津波が来た場合や逃げ遅れた場合にも、減災効果が認められる。
- (3) 避難所用時間の短縮効果もあり、特に歩行速度の遅い災害弱者に対して防災上効果的と考えられる。

- (4) 鉛直緊急避難場所は、直接津波波力を受ける位置を避けるのが望ましい。直接波力を受ける位置の目安は本文中で述べたが、行政のハザードマップより読みとれる汀線付近の津波高と浸水深からフルード数を算出し、定量的に判断することも可能である。
- (5) 直接津波波力を受ける位置に設定する場合は、耐津波性の構造照査が必要であり、検討概略を本文で示した。

謝辞：本研究は、港湾空港技術研究所と沿岸技術研究センターの共同研究として行った「津波来襲時の鉛直避難に関する研究会」を通じて多くの方々から貴重な意見をいただいた。沿岸技術研究センターの高山沿岸防災研究所長、岡調査役、山口大学の瀧本准教授、秋田大学の高橋准教授、国土技術政策総合研究所の小田沿岸海洋研究部長、熊谷主任研究官、港湾空港技術研究所の富田上席研究官、有川主任研究官、北海道開発局の遠藤港湾保安保全推進官、五洋建設の関本部長、日本海洋コンサルタントの内山部長らへは深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 酒井洋一, 森屋陽一, 内山一郎, 遠藤仁彦, 有川太郎: 避難途中に津波によって溺れる危険性の検討, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp. 159-164, 2008.
- 2) 内閣府中央防災会議: 東南海, 南海地震等に関する専門調査会, 第 14 回資料, 2003.
- 3) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 356-360, 1998.
- 4) 西畑 剛, 森屋陽一, 田村 保, 瀧本浩一, 三浦房紀: 気仙沼地点における津波避難シミュレーション, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp. 163-168, 2005.
- 5) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会・内閣府政策統括官: 津波避難ビルに係るガイドライン, pp. 68, 2005.
- 6) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 911-915, 2000.
- 7) 富田孝史, 本多和彦: 臨海部における津波解析への 3 次元非静水圧流動モデルの適用, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 231-235, 2008.
- 8) 松富英夫, 飯塚秀則: 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, 1998.
- 9) 首藤伸夫: 津波強度と被害, 津波工学研究報告, 第 9 号, pp. 101-131, 1992.
- 10) 岡田恒男, 菅野忠, 石川忠志, 扇丈朗, 高井茂光, 浜辺千佐子: 津波に対する建築物の構造設計法について-その 2: 設計法(案)-, ビルディングレター, pp. 1-8, 2004.
- 11) 菅野忠, 中埜良昭, 奥蘭敏文, 石川忠志, 館野公一: 建築物の津波に対する構造安全性に関する検討, 海洋工学シンポジウム, 2008.