

博士論文概要

論文題目

津波の陸上氾濫解析と避難行動予測の
高度化に関する研究

A Study for Improvement of Tsunami Inundation
Simulation and Evacuation Simulation

申請者

高畠	知行
Tomoyuki	TAKABATAKE

建設工学専攻 海岸工学研究

2017年5月

我が国は、津波による被害を過去に幾度も受けてきた。特に、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波（以降、2011年東北津波とよぶ）は東北地方沿岸部を中心に甚大な被害をもたらした。今後起こりうる津波に対し、先の震災での悲劇を繰り返さないためには、あらゆる観点から津波対策を検討する必要がある。

津波対策を講じる上では、津波の陸上氾濫による浸水範囲や浸水深さに関する情報を得ることがまず重要である。こうした情報を得るためには、平面2次元の浅水長波モデルを用いて津波の海域伝播・陸上氾濫の過程を解析することが一般的である。一方、津波の陸上氾濫は護岸からの遡上だけでなく、地下管路を介しても生じる可能性がある。臨海部の市街地や産業施設には、雨水排水路や取放水路など海と連通した地下管路が存在する。そのため、防潮壁等により津波の陸上遡上を防止しても地下管路を介して海水が流入し、地表開口部から溢水、陸上氾濫が生じる可能性がある（以降、同事象を「津波による溢水氾濫」とよぶ）。津波による溢水氾濫が生じると、住宅や工場内への浸水被害や避難経路の喪失を引き起こす恐れがある。そのため、津波による溢水氾濫は将来の津波に備える上で重要な対策事象の一つであるが、危険性を評価する手法が確立されておらず、引き起こされる被害の規模もよくわかっていないのが現状である。

津波による被害を軽減するためには、津波の陸上氾濫のプロセスを把握することに加えて、人々の津波避難に関する理解を深めることも重要である。そのため、津波避難を対象とした研究が近年活発に行われており、特に避難行動予測（避難シミュレーション）に関する研究事例の数が増えている。一方、こうした研究は地域住民を対象としたものがほとんどで、海水浴客など来訪者の存在を考慮した津波避難については十分に検討されていない。来訪者は一般に、地域住民に比べてその地域に対する土地勘を持ち合わせていない。そのため、来訪者の存在・行動は渋滞箇所や施設の収容人数、人的被害の算定などに大きく影響すると推察されるが、来訪者の行動を考慮した津波避難シミュレーションはほとんど提案されておらず、来訪者の行動が津波避難に及ぼす影響は明らかになっていない。

以上の背景を踏まえて本研究では、津波の陸上氾濫と避難行動予測に関する解析技術を高度化し、「津波による溢水氾濫」と「来訪者の避難行動」を数値解析により評価する手法を構築することを目的とした。

本論文は6つの章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、津波による溢水氾濫と来訪者の津波避難に関する既往研究について述べた。津波による溢水氾濫については、まず津波の伝播・陸上氾濫に関する解析手法を概観し、護岸からの越流による陸上氾濫と比較して津波による溢水氾濫の研究事例が少ないことを示した。次に、水路内の水位変動を解析する手法と管路を介した溢水氾濫に関する研究事例について整理した。最後に、津波による

溢水氾濫を対象とした研究事例を整理し、数値解析手法として非定常1次元管路流れモデルを改良した解析モデル、スロットモデルと平面2次元モデルを連成させた解析モデル、3次元解析モデルを用いる手法が提案されていることを示した。一方、これら既往の解析手法はいずれも課題を抱えており、津波による溢水氾濫現象を十分な精度で、かつ実務に供するだけの解析負荷で評価できる手法は未だ構築されていないことがわかった。来訪者の津波避難の既往研究を整理する上では、まず過去の津波災害で見られた津波避難の実態をまとめた。それにより、いずれの事例においても避難しない人が一定数存在していたこと、避難する場合でも全員が地震発生からすぐ避難開始するわけではないこと、避難の遅れが津波による被災の可能性を高めることなど、津波避難に関わる重要な事項や課題を確認した。次に、避難シミュレーションに関する研究事例を概観し、最後に来訪者の避難行動に関する既往研究について整理した。その結果、来訪者の津波避難に関する既往研究はアンケート調査に基づくものが多く、来訪者の行動が避難完了時間や人的被害の算定に及ぼす影響について避難シミュレーションを用いて検討した例はほとんど見当たらないことがわかった。

第3章では、津波による溢水氾濫現象に着目し、立坑からの溢水量やそれに伴う陸上氾濫を計算可能な数値解析手法を構築した。まず、溢水量の解析を行う管路溢水解析モデルを構築した。同モデルは、一般にサージ解析に用いられる非定常1次元管路流れモデルを基礎としているが、立坑接続部に生じる局所的な圧力差を考慮している点に特徴がある。構築した解析モデルの妥当性は単純管路、管路網、取・放水路を対象とした3種の水理実験と比較することで検証した。検証の結果、立坑接続部の局所的な圧力差を考慮しない解析モデルでは立坑からの溢水量を適切に算定できないのに対し、これを考慮した本解析モデルでは良好に溢水量を算定できることを示した。これは、溢水時には立坑接続部に生じる局所的な圧力差が無視できないほど大きくなるためであり、この影響を適切に考慮することが溢水現象の再現に重要であることを明らかにした。次に、構築した管路溢水解析モデルをさらに改良し、溢水量と陸上氾濫を連成して計算可能な解析モデルを構築した。解析モデルの中では、立坑と陸上接続部における流量の受け渡しと、それに伴う管路内の圧力水頭変化をモデル化している。溢水氾濫を対象とした水理実験を実施し、連成解析モデルによる再現解析を試みた結果、実験結果を過大・過小評価する場合があったが、浸水範囲や浸水深時系列は実験結果と概ねよく一致することを確認した。以上のことから、本章で構築した数値解析手法の妥当性が確認され、一般的な津波の陸上氾濫解析では考慮できない管路溢水による浸水の危険性を定量的に評価することが可能となった。

第4章では、津波による溢水氾濫の危険性を評価するため、第3章で構築した管路溢水・陸上氾濫連成解析モデルを実在する臨海施設に適用した。解析においては対象地域に仮想の防潮堤を設置し、仮想の津波を作用させた。防潮堤高・津

波波形を変化させ、合計 10 ケースの解析を行った。解析の結果、まず津波による溢水氾濫は津波高が大きく継続時間が長いほど、浸水範囲や浸水深が大きくなることを確かめた。解析結果によれば津波高が大きく継続時間も長い津波が来襲した場合には、津波による溢水氾濫のみによる浸水でも浸水深が 1 m 以上に到達した。このことは、津波による溢水氾濫は避難行動の妨げになるほか、建物への浸水被害、人的被害を引き起こす危険性があることを示している。また、継続時間が短い津波であっても、それが繰り返して来襲する場合には浸水深が徐々に大きくなることを確認した。さらに、防潮壁を越流する規模の津波を来襲させた解析ケースの結果によれば、防潮壁からの越流よりも数分先に津波による溢水氾濫が生じることがわかった。越流した津波による浸水深と溢水氾濫による浸水深を比較すれば、後者の浸水深は小さいものの、50 cm 程度の浸水深とはなることから避難行動が阻害される可能性は十分に考えられる。以上のことから、津波による溢水氾濫が持つ危険性は小さくなく、避難行動の妨げや建物などの浸水被害に繋がる可能性があることがわかった。

第 5 章では、来訪者の存在・行動が津波避難にどのように影響するかを検討した。まず、これを検討するため、マルチエージェントシステムに基づく津波避難シミュレーションモデルを構築した。構築したモデルの中には、地域住民と来訪者の行動の違いが組み込まれているほか、群衆密度に応じた移動速度の変化や避難者ごとの避難開始時間の違いなど、避難のプロセスを分析・評価する上で重要な要素が考慮されている。次に、構築した避難シミュレーションモデルを国内の代表的な観光地であり、津波来襲の危険性もある神奈川県鎌倉市由比ガ浜地区に適用した。来訪者の行動や数、避難開始時間などを変化させ、合計 17 ケースの解析を実施した。その結果、来訪者を考慮した場合としない場合や来訪者の行動を変化させた場合には、解析結果に明確な違いが生じることがわかった。特に、来訪者の存在・行動は、避難完了率の時間変化や渋滞が発生する箇所（道路位置）、各避難施設への避難者数に大きく影響することを明らかにした。また、人的被害の算出においても来訪者を考慮した場合としない場合で明確な違いが生じることを示した。以上のことから、沿岸部の観光地において津波に対する避難計画を検討する際には、来訪者の存在を考慮することが重要であることがわかった。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた主要な成果を総括した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 高島 知行 印

(2017年6月現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
a. 論文	
a-1	2016年11月22日福島県沖地震における津波避難に関する一考察－宮城県塩釜市の聞き取り調査より－. 自然災害科学, Vol. 36, No. 1, pp. 43-50, 2017年5月. 三上貴仁・荒木優介・田中直樹・妹尾光平・高島知行・柴山知也.
○a-2	Simulated tsunami evacuation behavior of local residents and visitors in Kamakura, Japan. International Journal of Disaster Risk Reduction, 23, pp.1-14, Elsevier, April, 2017. Takabatake, T., Shibayama, T., Esteban, M., Ishii, H., and Hamano, G.
○a-3	津波による管路溢水・陸域氾濫連成解析手法の構築. 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 通常号, Vol. 72, No. 1, pp. 1-13, 2016年5月. 高島知行・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英.
a-4	津波来襲時に取放水路天端に作用する圧力評価手法の研究. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_259-I_264, 2015年11月. 高島知行・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英.
○a-5	水路を介した津波による溢水と陸域氾濫の連成解析. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. I_521-I_526, 2015年6月. 高島知行・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英.
○a-6	管路網を対象とした津波の逆流による溢水解析と溢水特性に関する研究. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_341-I_345, 2014年11月. 高島知行・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英.
a-7	陸上構造物に働く津波波力の時系列評価に関する研究. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_796-I_800, 2014年11月. 織田幸伸・本田隆英・高島知行.
a-8	貧配合セメント混合土を用いた海岸堤防の粘り強さに関する実験的研究. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_981-I_985, 2014年11月. 本田隆英・織田幸伸・伊藤一教・石井裕泰・高島知行.
a-9	柱状構造物に作用する津波漂流物の荷重評価に関する基礎研究. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_961-I_965, 2014年11月. 本田隆英・織田幸伸・伊藤一教・小尾博俊・高島知行.
a-10	津波来襲時に取放水路天端に作用する揚圧力に関する基礎的研究. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I_462-I_467, 2014年6月. 高島知行・伊藤一教・織田幸伸・本田隆英.
a-11	ピロティ構造を対象とした津波波力に関する実験的研究. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I_456-I_461, 2014年6月. 本田隆英・織田幸伸・伊藤一教・渡辺征晃・高島知行.
○a-12	管路網を対象とした津波による内水氾濫解析. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_381-I_385, 2013年11月. 高島知行・本田隆英・織田幸伸・伊藤一教.
a-13	東京湾における高潮被災予測と沿岸防護手法の提案. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_994-I_999, 2013年6月. 星野さや香・柴山知也・Miguel ESTEBAN・高木泰士・三上貴仁・高島知行.
a-14	東京港における高潮・津波の危険予測. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_894-I_899, 2012年6月. 高島知行・柴山知也.
b. 総説	なし

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
c. 講演	
c-1	A study on uplift pressures of tsunami acting on ceilings of water channels. The 35th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Antalya, Turkey, November, 2016. <u>Takabatake, T.</u> , Oda, Y., Ito, K., and Honda, T.
c-2	取放水路に作用する津波の衝撃揚圧力低減方法, 第 71 回土木学会年次学術講演会, 東北大学, 2016 年 9 月. 伊藤一教・ <u>高島知行</u> ・小俣哲平.
c-3	Study on estimation of run-up tsunami force acting on a vertical structure. The 7th Civil Engineering Conference in the Asian Region (CECAR7), Hawaii, USA, September, 2016. Oda, Y., Honda, T., Ito, K., and <u>Takabatake, T.</u>
c-4	A study on tenacity of coastal dikes constructed by clay and lean cement mixed soil against tsunami overflow. The Coastal Structures & Solutions to Coastal Disasters Joint Conference, Boston, USA, September, 2015. Honda, T., Oda, Y., Ito, K., Ishii, H., and <u>Takabatake, T.</u>
c-5	津波により取放水路天端に作用する圧力の再現解析, 第 70 回土木学会年次学術講演会, 岡山大学, 2015 年 9 月. <u>高島知行</u> ・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英.
○c-6	Simulation of inundation disasters by tsunami via underground drainage channel network. The 24th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Busan, Korea, June, 2014. <u>Takabatake, T.</u> , Honda, T., Oda, Y., and Ito, K.
c-7	An experimental study on the tsunami pressure acting on piloti-type buildings., The 34th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Seoul, Korea, June, 2014. Honda, T., Oda, Y., Ito, K., Watanabe, M., and <u>Takabatake, T.</u>
c-8	Storm surge simulation in Nagasaki during the passage of 2012 typhoon Sanba., The 34th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Seoul, Korea, June, 2014. Laknath, D.P.C., Ito, K., Honda, T., and <u>Takabatake, T.</u>
c-9	数値流体解析ツール OpenFOAM の津波波力実験への適用性検討, 第 69 回土木学会年次学術講演会, 大阪大学, 2014 年 9 月. <u>高島知行</u> ・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英.
c-10	Present and future tsunami and storm surge protections in Tokyo and Sagami bays. The 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), Bali, Indonesia, September, 2013. Shibayama, T., Ohira, K., and <u>Takabatake, T.</u>
○c-11	津波波形の違いが管路ピットからの溢水量に及ぼす影響について. 第 68 回土木学会年次学術講演会, 日本大学, 2013 年 9 月. <u>高島知行</u> ・本田隆英・織田幸伸・伊藤一教.
○c-12	津波による発電所取放水路からの溢水に対する取放水流量の影響. 第 68 回土木学会年次学術講演会, 日本大学, 2013 年 9 月. 本田隆英・ <u>高島知行</u> ・織田幸伸・伊藤一教.
c-13	Comprehensive numerical simulation of waves caused by typhoon using a meteorology-wave-storm surge-tide coupled model. The 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Santander, Spain, July, 2012. Ohira, K., Shibayama, T., Esteban, M., Mikami, T., <u>Takabatake, T.</u> , and Kokado, M.
c-14	Climate change and coastal defences in Tokyo bay. The 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Santander, Spain, July, 2012. Hoshino, S., Esteban, M., Mikami, T., <u>Takabatake, T.</u> , and Shibayama, T.
c-15	東京湾の津波と減災対策. 平成 24 年度日本沿岸域学会 (第 25 回), 東北大学, 2012 年 7 月. 柴山知也・ <u>高島知行</u> .

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
c-16	Effect of sea level rise and increase in typhoon intensity on coastal structures in Tokyo bay. The 6th International Conference on Coastal Structures, Yokohama, Japan, September, 2011. Hoshino, S., Esteban, M., Mikami, T., <u>Takabatake, T.</u> , and Shibayama, T.
c-17	スリランカにおける高潮危険予測, 第18回地球環境シンポジウム, 東京理科大学, 2010年9月. 柴山知也・ <u>高嶋知行</u> .
d. 著書	
d-1	Evaluating Tsunami Risk and Vulnerability along the Vietnamese Coast. In Nguyen D. T., Takagi, H., and Esteban, M., Coastal Disasters and Climate Change in Vietnam, Elsevier, pp.303-319, 2014. Mikami, T., and <u>Takabatake, T.</u>
e. その他 (技術報告)	
○e-1	臨海施設のBCPを対象とした津波による溢水解析モデルの構築. 大成建設技術センター報, 第47号, pp.34_1-34_7, 2014. <u>高嶋知行</u> ・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英.
e-2	平面水槽における津波水理実験のための造波装置の導入. 大成建設技術センター報, 第47号, pp.33_1-33_5, 2014. 織田幸伸・ <u>高嶋知行</u> .
○e-3	臨海施設の排水路を対象とした津波による内水氾濫解析. 大成建設技術センター報, 第46号, pp.37_1-37_6, 2013. <u>高嶋知行</u> ・本田隆英・織田幸伸・伊藤一教.
e-4	台風1216号による長崎県の高潮を対象とした数値シミュレーション. 大成建設技術センター報, 第46号, pp.40_1-40_8, 2013. ラクナスD.P.C.・伊藤一教・本田隆英・ <u>高嶋知行</u> .
(特許)	
e-5	特願2016-061155, 揚圧力低減構造, 出願中, 2016. <u>高嶋知行</u> .
e-6	特開2015-200068, 水上構造物に対する揚圧力の低減構造, 公開中, 2015. <u>高嶋知行</u> .