沿岸市街地模型を用いた津波浸水実験

安田 誠宏¹・宮上 大輝²・Adi PRASETYO³・加茂 正人⁴・
森 信人⁵・平石 哲也⁶・間瀬 肇⁷・島田 広昭⁸

¹正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail: yasuda-t@kansai-u.ac.jp

²西日本旅客鉄道株式会社 福知山支社豊岡保線区 (〒668-0031 兵庫県豊岡市大手町3-2)

³京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

⁴京都大学技術職員 防災研究所 (〒612-8236 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁵正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁶正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8236 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁷正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁸正会員 特定非営利活動法人 大規模災害対策研究機構 理事 (〒531-0074 大阪府北区本庄東2-3-20)

津波浸水想定の際、数値シミュレーションは有効な手段となり得るが、陸上における土地利用や市街地の複雑さは粗度として扱われ、局所的な浸水深や浸水範囲の精度と再現性に関して検証が行われていない。本研究では、津波再現水槽と沿岸市街地模型を用いて浸水実験を実施し、浸水深や浸水範囲、波圧を計測し、シミュレーション結果との比較を通して、市街地の複雑な地形が遡上に及ぼす影響について考察した。実験に当たっては、津波再現水槽で対象とする任意の複雑な津波波形を再現し造波する方法を確立した。津波計算を行う際に建物の密集度を考慮することの重要性や、津波の遡上過程において、平均地盤高からの比高が高く幅が広い線の構造物は、粗度ではなく地形として取り扱う必要があること、および、津波波圧算定式は、多方向から浸水する場所では過小評価になる可能性があることを示した。

Key Words : tsunami inundation, experiment, coastal city model, complex tsunami train, roughness

1. はじめに

国土交通省の「津波浸水想定の設定の手引き」¹⁾によると、津波シミュレーションは有効な事前対策手段となり得るが、現在においても、断層モデルの妥当性、津波先端部の波形や挙動、越流時の挙動、河川遡上の問題等、計算精度に関係して評価が不明確の部分もある。また、津波シミュレーションでは、メッシュごとに粗度係数を与えることで土地利用や建物の影響を考慮している。現在では、解像度5mの地形データが沿岸部、河川流域、都市部等を中心に作成されており、そのデータを用いることでさらに高解像度の計算も可能であるが、計算コストが増加する上に、計算精度の評価が確立していないことには変わらない。

津波が市街地に浸水する際、道路を津波が早く遡上すること等の複雑な流況が発生するが、粗度ベースで行われるシミュレーション結果について、局所的な浸水深や浸水速度、浸水範囲の再現性に関する検証が十分に行われているとは言い難い。津波浸水シミュレーションの精度をより精緻に検討するには、ベンチマーク実験結果と

比較することが望ましいが、複雑な市街地を再現した模型実験はほとんどなされていない。Park et al.²⁾は、アメリカオレゴン州のSeaside cityの市街地を対象に、再現期間500年のCascadia断層地震津波を想定した1/50模型実験を行い、街路における浸水深および流速、浸水範囲を測定している。宮下ら³⁾は、その実験結果をベンチマークとし、準3次元海洋モデルと平面2次元モデルを用いて再現計算を行い、遡上後の津波伝播特性について評価を行っている。ただし、Park et al.の実験で用いられた津波は孤立波である。

Madsen et al.⁴⁾は、津波模型実験や解析に、孤立波やN-wave、正弦波を津波として用いるパラダイムに対して疑問を呈し、津波の時空間スケールの再現において、地球物理学的重要性が欠如していることを示した。2011年の東北地方太平洋沖地震津波の際に観測された津波波形(河合ら⁵⁾)では、緩やかに水位が上昇した後に、急な上昇が続く、2段階の立ち上がりが確認された。平石ら⁶⁾は、こうした複雑な津波波形を再現することを目指した造波システムを開発し、陸上における先端の切り立った段波とそれに続く流れを再現できる大型水槽を製作した。

本研究では、この津波再現水槽内に、和歌山県海南市海南地区をモデル化した市街地模型を設置し、浸水実験を実施する。遡上津波の水位や流速、浸水範囲を計測し、市街地の複雑な地形が遡上に及ぼす影響について、溝端ら⁷⁾による平面2次元津波浸水シミュレーション結果との比較を通して考察することを目的とする。

2. 模型実験方法および浸水シミュレーション

(1) 津波再現水槽

実験で用いた津波再現水槽⁹⁾の最大の特徴は、3つの造波方法を連動させることによって、より実際の津波に近い、複雑な波・流れを再現できることである。具体的には、1) 造波装置（反射吸収式ピストン型）、2) 津波発生用ポンプ（スラスター型）、3) 落下式津波発生装置（ゲート急開による水塊落下型）の3つの方法である。これらの造波方法を、単独で、あるいは組み合わせて波を発生させることで、従来の造波水槽では困難だった、実際の津波に近い、複雑な波・流れの再現が可能になる。

(2) 市街地模型と計測項目

本研究の対象領域は、図-1に示す、和歌山県海南市海南地区の行政機関や津波避難ビルが密集している中心部（南北1km、東西2km）である。津波再現水槽内に設置された市街地模型の俯瞰図を図-2に示す。模型縮尺は1/250、模型の大きさは幅4.0m、長さ8.0mである。

実験に用いた計測器は、波高計と波圧計および流速計である。容量式波高計を11地点（うち避難ビル6地点）、波圧計を6地点（避難ビル2地点）、プロペラ式流速計を3地点に設置した。交差点の波圧を計測する場合は、その付近の建物に設置した。計測器の位置を図-3にCADデータと重ねて示す。また、蛍光塗料とブラックライトを使い、浸水状況を真上からビデオ撮影し、画像解析で浸水範囲を追跡した。

(3) 浸水シミュレーション

溝端ら⁷⁾は、南海トラフ巨大地震モデル⁸⁾の全11ケースを用いて津波シミュレーションを行い、海南地区においては、津波高、浸水高、浸水面積等のすべての項目について、ケース4（「四国沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定）が最大となることを示した。さらに、ケース4をベースシナリオに設定し、漸増津波氾濫解析として津波時系列の水位を、0.1~4.0倍まで0.1刻みで段階的に変化させて、対象領域の浸水シミュレーションを行っている。本研究では、1.0倍（ベースシナリオ）、1.2倍および1.4倍の結果を実験対象条件とする。

津波計算結果から、対象領域内の津波避難ビル、海および交差点の全11地点での浸水深の時系列を抽出した。

図-1 実験対象範囲（和歌山県海南市海南地区中心部、南北1km×東西2km）

図-2 津波再現水槽内に設置した市街地模型（模型縮尺1/250、幅4m×長さ8m）

図-3 市街地模型のCADデータと計測器設置位置（アルファベットは波高計と流速計（一部）、●は波圧計）

表-1および図-4に、シミュレーションにおける津波避難ビル等の座標(x,y)、および標高(m)を示す。

(4) 実験方法と造波入力信号作成

図-3左下の西側境界の海(A)における津波シミュレーション結果の水位時系列を、実験で発生させる目標入力波形とする。対象領域に浸入する津波波形を同じにした上で、陸上の浸水深、浸水範囲等について比較する。

津波再現水槽による造波には、波長の長い波を連続的に、かつ任意の周期で発生させることができる津波発生用ポンプを用いた。試行実験において、ポンプの正転/反転のタイミングを変えることで、押し波/引き波が周期的に繰り返される津波を発生できることを確認した。津波造波プログラムに、造波時間、周期、振幅、位相、ポンプ作動開始時間を半周期毎に入力し、造波信号を作

表-1 比較対象地点の名称と座標および標高

対象地点名	x座標	y座標	標高(m)
A. 海	548	231	-9.7
B. マンション	621	280	2.4
C. 保健福祉センター	637	296	1.7
D. 医療センター	641	278	2.2
E. 駅	675	284	3.2
F. 中学校	722	264	5.0
G. 公民館	646	239	1.9
H. 小学校	672	232	6.1
I. 国道交差点(港)	596	271	3.0
J. 国道交差点(築地)	636	273	2.3
K. 国道交差点(高架)	676	264	3.3

図-4 津波シミュレーションの標高データと計測地点の座標

成することで、振幅と周期の異なる連続波形を造波する。実験時間は、最大津波高が到達するまでの時間を考慮し、実験縮尺で600秒とした。基準津波水位を、1.0倍 (Case 1.0), 1.2倍 (Case 1.2), 1.4倍 (Case 1.4) に変化させた3ケース行い、津波の越流量の増加によって、どのような違いが生じるのかを検討する。

図-5に、海 (A) におけるCase1.0と1.4の水位時系列を示す。シミュレーション結果とほぼ一致する複雑な波形を造波できたことがわかる。

3. 模型実験およびシミュレーション結果

(1) 津波浸水深の再現性

図-6は、Case 1.0と1.4の場合の各津波避難ビルでの津波浸水深の実験結果とシミュレーション結果を比較したものである。図は省略するが、Case 1.2の結果についても言及する。マンション (B) では、すべてのケースで、1波目および2波目の浸水開始時間は一致したが、浸水深は実験の方が0.5~0.7m大きくなった。保健福祉センター (C) では、すべてのケースで1波目および2波目の浸水開始時間は一致したが、浸水深は実験の方が0.6~0.7m小さくなった。医療センター (D) でも、すべてのケースで浸水開始時間は一致した。Case 1.0では浸水深はほぼ一致したが、他の2ケースでは実験の方が0.3~0.5m小さくなった。駅 (E) では、すべてのケースで浸水開始時間は一致した。浸水深については、ケースによってばらつきが

図-5 海 (A) における津波水位の時系列 (Case 1.0と1.4)

みられた。Case 1.0では実験の方が0.3m大きくなり、Case 1.2では実験の方が0.4m小さくなったが、Case 1.4ではほぼ一致した。中学校 (F) においては、Case 1.0では、実験と計算のいずれの場合も浸水しなかった。Case 1.2では、浸水開始時間は実験の方が遅く、浸水深は計算の約半分になった。Case 1.4では、浸水開始時間について、1波目は実験の方が早くなり、2波目は遅くなった。また、浸水深については、1波目は一致したが、2波目は計算の約半分になった。公民館 (G) では、すべてのケースで、浸水深と浸水開始時間が計算とほぼ一致した。小学校 (H) のCase 1.0, Case 1.2では、実験と計算のいずれの場合も浸水しなかった。Case 1.4では、浸水開始時間は実験の方が少し遅いが、浸水深は一致した。

(2) 流速の再現性

図-7に、海 (A) での流速について、実験とシミュレーションを比較したものを示す。実験値は、津波波形の押し波に対しての流速は正の値、引き波に対しての流速は負の値を示している。計算値は、流速の向きを考慮せず絶対値を示している。図より、Case 1.0の場合、3波目までの流速 (正值) はほぼ一致したが、4波目の流速 (正值) は実験値の方が小さくなった。Case 1.4の場合、シミュレーションに比べて緩やかに津波水位が増加したために、3波目の流速 (正值) は実験の方が小さくなった。1波目、2波目および4波目の流速 (正值) については、ほぼ一致した。

一方で、図は省略するが、陸上の公民館 (G) および国道交差点 (J) においては、実験値の流速が計算に比べて半分以下と、大幅に小さくなった。プロペラ式流速計を津波の流れ方向に正対して設置できていなかったために、流速をうまく計測できなかったと考えられる。津波シミュレーション結果と比較するには、実験結果の信頼性が不十分であるので、次章の考察では流速を除く。

(3) 浸水範囲の再現性

浸水範囲については、市街地模型の左側の海岸線に近いエリアは、実験とシミュレーションのいずれの場合にも全域が浸水するため、右上の遡上端付近のエリアのみ

図-6 津波避難ビルにおける津波水位の時系列 (Case 1.0と1.4) (赤実線：実験，青破線：シミュレーション)

図-7 海(A)における流速の時系列 (Case 1.0と1.4)

について比較する。図-8に、同じ対象エリアにおける最大浸水範囲の実験画像解析結果(上段)とシミュレーション結果(下段)を示す。図中の■は駅(E)、●は中学校(F)の位置を示している。Case 1.0では、実験とシミュレーションの浸水範囲はほぼ一致している。いずれも、避難所に指定されている中学校が浸水することはなかった。Case 1.4では、実験と計算で浸水範囲に違いがみられた。実験では中学校から60m先まで浸水したのに対し、計算では最大230m先まで浸水した。

5. 結果の考察

(1) 浸水深

「津波浸水設定の手引き」⁹⁾によると、土地利用状況や住宅地の密集度に応じて与える粗度係数も変化させるとある。図-9に津波シミュレーションで用いた中央防災会議の粗度係数データを示す。水域では0.025、陸上では一様に0.035、山地では0.055と設定されており、土

地利用状況や建物密集度に応じて変えられていない。小谷ら⁹⁾による土地利用状況に応じた粗度係数では、住宅地は高密度、中密度、低密度の順に、0.08、0.06、0.04で、計算条件の0.035より大きい。粗度係数が大きくなると津波は遡上しにくくなり、浸水深が増加する。つまり、浸水深が実験値を超えている地点では、粗度係数が実際より大きいことになり、その逆もいえる。また、実験スケールは1/250であり、模型では道路や緑地を区別できていないので、粗度の縮尺効果の影響が少なからずある。

マンション(B)では、実験の浸水深が計算より大きくなった。周りを建物に囲まれており、越流してきた水が遮られて通過しにくい状況だったのが確認されており、粗度が小さく設定された計算結果より大きくなった。保健福祉センター(C)では、実験の浸水深が計算より小さくなった。南西側に広い公園があるためと考えられる。医療センター(D)も、国道沿いに位置し、周囲に建物が密集していないため、実験の浸水深が計算より少し小さくなった。駅(E)は、ケースによって浸水深の大小にばらつきがあり、浸水開始時間も実験のほうが早かった。浸水状況の画像解析結果から、川を遡上して越流した津波が、陸上部の浸水よりも早く到達したことがわかった。シミュレーションでは、小河川を遡上する津波をしっかりと考慮できていないことが要因と推測できる。遡上限界付近に位置する中学校(F)では、実験の浸水深が計算より小さくなった。この辺りに津波が到達するまでの、建物密集度の粗度評価の違いによる影響と考えられる。公民館(G)では、浸水深と波形が計算とほぼ一致した。護岸のすぐ背後であるため、粗度設定値の影響をほとん

図-8 最大浸水範囲の比較（上段：実験画像解析結果，下段：シミュレーション結果，■：駅，●：中学校）

図-9 津波シミュレーションで用いた粗度データ

ど受けていないと考えられる。小学校 (H) では、浸水開始時間が遅れた。小学校のすぐ西側は、建物かなり密集しており、津波の遡上を妨げる効果があったためと考えられる。

実験の津波浸水深結果から、津波シミュレーションにおいて陸上の建物に対して一様に粗度係数を与えるのでは、浸水深および浸水開始時間を精度よく再現できないことが明らかになった。また、住宅地を粗度係数を用いて表現する際、密集度のみで決めるのではなく、近くに公園などの広い空間や大きな道路がある場合は、注意が必要であることがわかった。さらに、川沿いに位置する地点の浸水開始時間が早くなったことから、シミュレーションでは川を遡上する津波の速さおよび越流時間を考慮しきれていないことが示唆された。粗度係数を用いて津波シミュレーションを実施する際は、得られた浸水深の想定に予測不確実性の幅を持たせて提示すべきといえる。

(2) 浸水範囲

浸水状況を画像解析した結果、実験では駅 (E) が津波の遡上を妨げる要因なのが確認できた。Case 1.4 の場合、計算の方が最大で 230m 先まで浸水するため、駅の取り

扱いの影響は大きいといえる。また、遡上限界付近にある中学校 (F) は津波避難ビルに指定されているが、想定を少し超えると浸水した。遡上限界の推定には不確実性を伴うため、注意を要する。

「津波浸水想定の手引き」¹⁾によると、津波の伝播過程や遡上過程にあつて平均地盤高からの比高が 50cm 以上の線的構造物や建物については、津波の挙動に影響を与えるため、計算格子間隔より幅が広いものは地形データとして、計算格子間隔より幅が狭いものは越流条件を適用する格子境界として整理することを基本とし、地形データとして扱う場合には、粗度係数を「その他（空地、緑地）」としてメッシュに与える、としている。中央防災会議のデータでは、図-4に示すように、駅舎の高さを地形データとして与えずに、駅の地盤高と建物としての粗度係数を与えていた。実験結果から、平均地盤高より比高が高く計算格子間隔より幅が広い建物が、浸水範囲に影響することは明らかで、建物の高さを考慮した地形として取り扱う必要があることが示された。

(3) 津波波圧

内閣府の「津波避難ビル等に係るガイドライン」は、津波荷重の算定式として、朝倉⁹⁾による直立護岸を越流した津波実験による経験式を用いる、としている。表-2に、各点における波圧計の最大値と朝倉式で最大津波波圧を算定した結果を示す。保健福祉センターは朝倉式とほぼ一致したが、それ以外の地点ではすべて朝倉式を上回る結果となった。本実験は、断面実験と違い、全方向から越流する津波によって波圧を受ける。そのため、一方向からの浸水が卓越していた保健福祉センター以外では、朝倉式を超える波圧が計測されたと考えられる。

表-2 波圧の実験最大値と朝倉式による算定値の比較 (kPa)

	C. 保健福祉センター		D. 医療センター		G. 公民館	
Case	実験	朝倉	実験	朝倉	実験	朝倉
1.0	0.26	0.30	0.47	0.28	0.56	0.37
1.2	0.34	0.37	0.49	0.35	0.73	0.45
1.4	0.41	0.46	0.61	0.43	1.02	0.54
	I. 交差点 (港)		J. 交差点 (築地)		K. 交差点 (高架)	
Case	実験	朝倉	実験	朝倉	実験	朝倉
1.0	0.49	0.23	0.35	0.26	0.22	0.15
1.2	0.56	0.32	0.38	0.32	0.36	0.26
1.4	0.81	0.41	0.69	0.40	0.50	0.30

6. おわりに

本研究では、沿岸市街地模型を用いて津波浸水実験を実施し、浸水深、流速、浸水範囲および波圧を計測した。また、溝端ら⁷⁾による浸水シミュレーション結果との比較を通して、市街地の複雑な地形が遡上に及ぼす影響について考察した。主な結果を以下にまとめる。

- 1) 津波再現水槽で、対象とする任意の複雑な津波波形を再現し造波する方法を確立した。
- 2) 浸水深は、建物の密集度によって実験とシミュレーションに差が現れた。津波計算を行う際に、建物の密集度や土地利用状況を考慮した粗度係数を与えることの重要性を再確認した。
- 3) 川沿いに位置する地点の浸水開始時間が早くなったことから、シミュレーションでは川を遡上する津波を再現できていないことが示唆された。
- 4) 浸水範囲の結果から、津波の遡上過程において、駅のように、平均地盤高からの比高が高く、幅が広い線的構造物は、粗度ではなく地形として取り扱う必要があることを確認した。
- 5) 朝倉ら¹⁰⁾の津波波圧算定式は、断面実験による経験式であり、本実験のように多方向から津波が浸水する場合には過小評価になる可能性が示された。

謝辞：本研究は、京都大学防災研究所拠点研究によるものであることをここに記す。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理局・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：津波浸水想定の手引き Ver. 2.00，86p.，2012.
- 2) Park, H., D.T. Cox, P.J. Lynett, D.M. Wiebe, S. Shin: Tsunami inundation modeling in constructed environments, *Coastal Engineering*, Vol. 79, pp.9-21, 2013.
- 3) 宮下卓也，森 信人，Daniel COX，安田誠宏，間瀬肇：準 3 次元海洋モデルを用いた市街地スケールの陸域遡上津波の再現計算，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71, No.2, pp.I_169-I_174, 2015.
- 4) Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., Schäffer, H.A.: On the solitary wave paradigm for tsunamis, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113, C12012, 22p., 2008.
- 5) 河合弘泰，佐藤 真，川口浩二，関 克己：GPS 波浪計で捉えた平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.I_1291-I_1295, 2011.
- 6) 平石哲也，森 信人，安田誠宏，東 良慶，間瀬肇・Adi Prasetyo：複数の造波手法を有する津波再現装置で造波された津波の特性，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71, No.2, pp.I_349-I_354, 2015.
- 7) 溝端祐哉，安田誠宏，奥村与志弘，森 信人，間瀬肇，島田広昭：漸増津波氾濫解析を用いた地域の耐津波ポテンシャル評価，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70, No.2, pp.I_1326-I_1330, 2014.
- 8) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_2nd_report01.pdf (2012 年 8 月 29 日)，2012.
- 9) 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法，海岸工学論文集，第 45 巻，pp.356-360, 1998.
- 10) 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.

(2016.3.16 受付)

TSUNAMI INUNDATION EXPERIMENT USING COASTAL CITY MODEL

Tomohiro YASUDA, Taiki MIYAUE, Adi PRASETYO, Masato KAMO,
Nobuhito MORI, Tetsuya HIRAISHI, Hajime MASE and Hiroaki SHIMADA

Numerical tsunami simulation can be effective tool for inundation estimation. Numerical models usually employ bottom roughnesses to simulate land use and density of buildings. Since few physical tsunami experiments for complex coastal city have been done, local accuracy of inundation depth, area, and force are difficult to discuss. This study conducted inundation experiments using a coastal city model and measured inundation depth, area, velocity, and pressure. Through comparisons of experimental results with simulation ones, effect of complex topography was discussed. New wave generation system by a paddle and a pump enabled to generate arbitrary and complex tsunami train. The results of inundation depth at reference points show importance of considering land use and building density for using bottom roughness. For runup, long and high building (e.g. station) should be treated as topography instead of roughness. Empirical formula of tsunami pressure underestimates for multidirectional tsunami flooding.