

高波浪による家屋倒壊危険範囲の推定 ～早期の立退き避難の支援に向けて～

竹下哲也・加藤史訓

1. はじめに

海岸では、津波以外でも高波浪（ここでは、概ね計画規模もしくはそれ以上の波浪を「高波浪」と記載）による災害の危険性があり、高知県菜生海岸（室戸市、2004年台風23号）¹⁾、富山県下新川海岸（入善町、2008年冬季風浪）²⁾、北海道胆振海岸（白老町、2016年台風10号）³⁾では実際に高波浪による家屋被害が発生している。

災害対策基本法では、災害が発生した、または災害の発生が予期される場合、市町村長は住民に対し屋内待避や立退き避難の指示が可能である。

屋内待避を指示する場合には災害に対する家屋の安全性が確保されることが重要であり、例えば津波では「津波防災地域づくりに関する法律」に基づく津波波圧の基準が津波避難施設の設計に活用されている。これに対して、家屋の安全性が確保できない場合は立退き避難の指示が必要である。例えば、洪水では氾濫流により家屋滑動・倒壊の危険性のある区域を周知し、当該区域では屋内待避ではなく立退き避難を促す取組みを始めている。

高波浪においても同様に、屋内待避と立退き避難のどちらが適切かを判断するための家屋倒壊危険範囲の推定が必要である。

高波浪の場合、大小様々な波が不規則に襲来することや、堤防決壊が無くとも越波によって家屋倒壊の危険があることなど、津波や洪水とは異なる特徴を持つ。このため、海岸研究室では、数値波動水路（CADMAS-SURF/2D：流体の基礎方程式であるNavier-Stokes方程式を数值的に解く

ものであり、VOF(Volume of Fluid)法と呼ばれる自由表面の処理法に基づく計算手法)を用いた数値計算⁴⁾によって高波浪による家屋倒壊危険範囲の推定手法の研究を行ったのでその成果を報告する。

2. 越波により家屋に作用する波圧の計算

2.1 数値波動水路の設定

2015年度に海岸研究室が実施した水理模型実験⁵⁾の波浪測定値を数値波動水路の入力条件や計算の妥当性確認に活用するため、図-1のとおり縮尺1/60の数値波動水路の計算条件の設定を行った。海岸堤防の高さは現地換算で6mとなる。海岸堤防及びモデル家屋の配置を図-2に示す。本研究では図-2の断面図の設定で断面2次元の流体解析を行った。断面2次元の場合、モデル家屋の周囲を

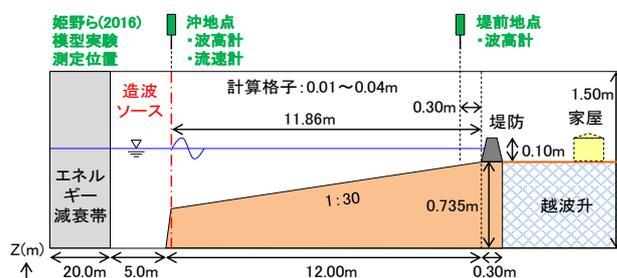


図-1 数値波動水路断面図

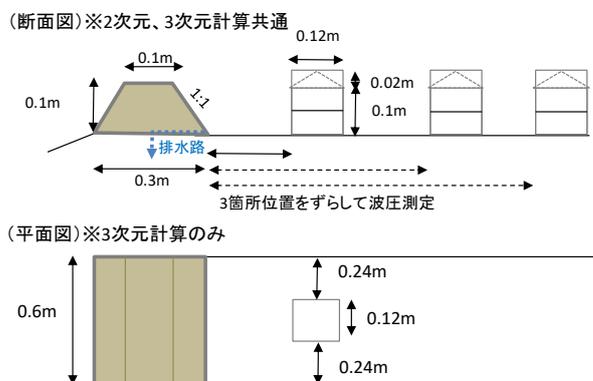


図-2 海岸堤防及びモデル家屋の配置

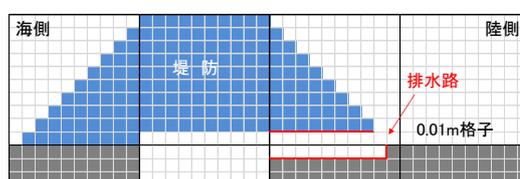


図-3 排水路の諸元



写真-1 越波による家屋の被害
(左：菜生海岸¹⁾，右：胆振海岸³⁾)

通過する流水が表現できず、堤防とモデル家屋の間に一度水が入ると排水されずに湛まる一方となり、モデル家屋に作用する波圧が精度よく算定されない。このため、堤防に図-3のような排水路を設けて堤防とモデル家屋間の水を排出するようにした。排水路の大きさについては、図-2の平面図を想定した3次元の数値波動水路（CADMAS-SURF/3D）によって堤防とモデル家屋間の排水時間を算出し、この排水時間を断面2次元計算でも概ね再現できるよう調整した。

2.2 波浪条件とモデル家屋の位置の設定方法

2015年度に海岸研究室が実施した模型実験の不規則波10ケース（表-1）を波浪条件として設定した。モデル家屋の位置は、波浪条件の各ケースについて、モデル家屋が無い状態で越波計算（図-4参照）を行い、最大流速の大きい場所及び平均的な住宅敷地幅（2013年住宅・土地統計調査の平均敷地面積279m²から17m前後、1/60縮尺では0.3m前後）を参考に図-4のように3列設定した。

2.3 モデル家屋に作用する波圧の計算

図-5のようにモデル家屋の位置を堤防近くの1列目に設定し越波計算を行い、モデル家屋に作用する波圧を算出した。その後、2列目、3列目と移動し、それぞれ同様に波圧の計算を行った(3×10ケース)。1ケース当たり約60～130波（現地換算26分間）の波圧の計算結果を統計処理した。不規則波の統計処理の値としては、最大値や上位1/10平均値、上位1/3平均値などが用いられるが、最大値はバラツキが大きいため、模型実験結果に近い上位1/10平均値を計算結果の対象とした。

3. 計算結果と考察

3.1 計算結果

津波の場合、朝倉ら⁶⁾の研究をもとに、図-6のように家屋が無い場合の浸水深の3倍に相当する静水圧が津波波圧として津波避難施設の設計に用いられている。本研究の計算結果でも図-6のような三角形の波圧分布が見られたことから、モデル家屋前面に作用する波圧を、家屋が無い場合の浸水深のα倍（この倍率を「水深係数」という。以下同じ。）に相当する静水圧に換算して図-7、表-2のとおり、計算結果を整理した。

3.2 高波浪時の水深係数についての考察

各ケースともに堤防近傍（家屋1列目）が最も

表-1 波浪条件（10ケース）

ケース	堤前水深 (m)	実験値(沖地点)		
		有義波高 H _{1/3} (m)	有義波周期 T _{1/3} (s)	波形勾配
1	0.10	0.07	1.53	0.019
2	0.05	0.09	1.42	0.027
3	0.10	0.17	2.04	0.027
4	0.05	0.20	2.15	0.027
5	0.00	0.19	2.10	0.028
6	0.10	0.11	2.06	0.017
7	0.05	0.10	1.98	0.016
8	0.10	0.21	2.95	0.016
9	0.05	0.23	3.00	0.017
10	0.00	0.24	3.21	0.015

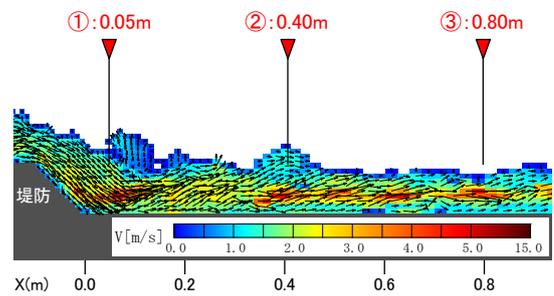


図-4 最大流速分布図とモデル家屋位置（ケース6）

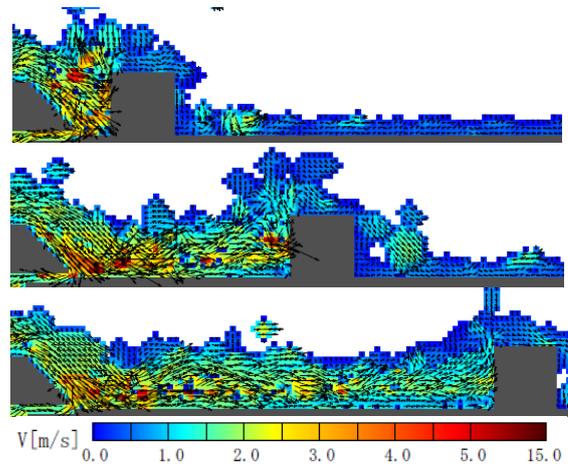


図-5 越波計算例（ケース6の最大流速分布図）

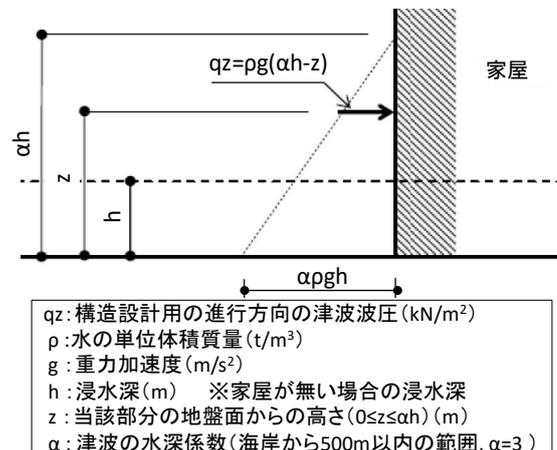


図-6 水深係数の概念図（津波の場合）

水深係数が大きく、堤防から離れるにしたがって水深係数が小さくなる傾向がみられた。堤防に近いほど越波の打ち込みによって大きな流速の水塊がモデル家屋に衝突していることが原因と考えられる。また、波形勾配（有義波高/波長）の小さいケース6~10の方が、全体的に水深係数は大きい傾向であった。波長の長い波浪が襲来する外洋に面した海岸の方が高波浪による家屋倒壊の危険性が高いものと考えられる。

3.3 家屋倒壊危険範囲の推定方法についての考察

2008年2月24日の冬季風浪では、下新川海岸の芦崎地先で0.1~0.3m³/s/mの越波が発生し、海岸堤防と民間敷地の境界から約30~50m離れた家屋11件が全半壊²⁾した。この例と越波量が同程度のケース5、7（現地換算の越波量0.09、0.47m³/s/m）を見ると、3列目の家屋（堤防裏法尻から現地換算54~57mの位置）付近では、水深係数がそれぞれ1.59、2.50であった。また、浸水深は上位1/10平均値で両ケースともに現地換算約2mであった。

洪水で用いられる木造家屋の倒壊・滑動限界⁷⁾は津波避難施設の知見を参考に設定されており、横軸が浸水深、縦軸が流速の図で示されている。また、榊山⁸⁾の研究では3次元構造物に作用する津波波圧の水深係数 α は式(1)にほぼ一致するとされている。

$$\alpha = 1.0 + 0.5Fr^2 = 1.0 + 0.5(u^2/gh) \quad \text{式(1)}$$

(Fr: フルード数, u: 流速, g: 重力加速度, h: 水深)

式(1)を適用し、縦軸を水深係数に変換した木造家屋の倒壊・滑動限界の図を作成した(図-8)。同図では、ケース5、7の家屋3列目の水深係数は浸水深2mの倒壊・滑動限界の値を上回っており、下新川海岸の被災事例とも概ね整合していた。

なお、ケース5、7で家屋無しの浸水深を計算しているのは堤防裏法尻から現地換算72mの位置までであり、本位置の浸水深は両ケースともに現地換算で約2m（上位1/10平均値）であった。この位置で図-7と図-8を比較すると、ケース5は水深係数が1.04と推定され、倒壊・滑動限界の両方を下回り家屋倒壊の危険性が低いと考えられる。また、ケース7は水深係数が1.35と推定され、旧耐震基準の倒壊限界は超えているものの、新耐震基準の倒壊限界や滑動限界は下回っており、新耐

震基準を満たした木造家屋であれば倒壊・滑動の危険性が低いと考えられる。下新川海岸の被災事

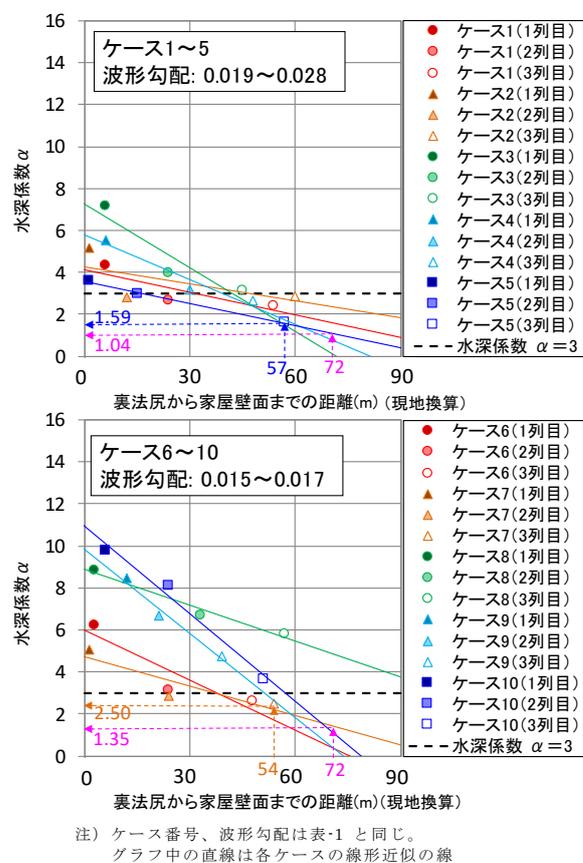
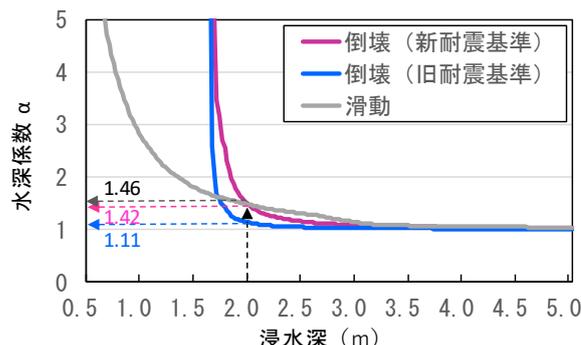


図-7 水深係数

表-2 越波量、堤前水深、水深係数の比較 (並び順: 越波量順)

ケース	越波量 計算値 (現地換算) (m ³ /s/m)	堤前水深 (現地換算) (m)	水深係数 α		
			1列目	2列目	3列目
3	2.88	6	7.14	3.94	3.13
1	2.13	6	4.30	2.63	2.40
4	1.03	3	5.54	3.17	2.63
2	0.40	3	5.14	2.81	2.85
5	0.09	0	3.60	2.94	1.59
8	4.92	6	8.84	6.70	5.80
6	2.50	6	6.23	3.10	2.60
9	1.87	3	8.45	6.65	4.74
10	0.90	0	9.79	8.09	3.65
7	0.47	3	5.07	2.88	2.50



注) 浸水深は現地スケール

図-8 木造家屋の倒壊・滑動限界

例では、全半壊家屋に一部損壊家屋を含めても堤防と民間敷地の境界から約70mの範囲内に分布し、本研究での推定結果と概ね整合していた。このように、本研究における家屋倒壊危険範囲の推定手法（以下「本研究の手法」という。）が、高波浪による家屋倒壊危険範囲の推定に有効であることが分かった。

3.4 本研究の手法の適用対象

本研究の手法の適用対象としては、特に、高波浪の影響を受けやすい外洋に面した海岸が考えられる。理由としては、主に外洋に面した海岸の場合は、潮位よりも波浪の影響が大きく、潮位が低くても越波によって家屋が倒壊する危険性があることから、高潮浸水想定区域図から浸水深を把握するだけでなく、高波浪による家屋倒壊危険範囲を立退き避難の判断材料とする必要があることが挙げられる。

なお、主に内湾に面した海岸の場合は、波浪よりも潮位の影響が大きく、ゼロメートル地帯等の背後地盤高の低い地域が多いことから、本研究の手法による家屋倒壊危険範囲よりも、高潮浸水想定区域図から把握できる深い浸水や長時間浸水が続く範囲の方が立退き避難の主な対象となる。

3.5 本研究の手法の適用手順のまとめ

本研究の手法の適用手順をまとめると、下記のとおりとなる。

- (1) 対象海岸で想定される波浪条件にて、家屋に作用する波圧（水深係数）を数値計算で算出する。その際、海岸堤防からの距離の異なる複数の家屋位置で算出する。
- (2) 海岸堤防からの距離に応じた家屋に作用する波圧（水深係数）の図を作成する（例：図-7）。
- (3) 上記(2)で作成した図と、木造家屋の倒壊・滑動限界の図（図-8）を比較し、家屋倒壊危険範囲を推定する。

4. おわりに

本研究では、高波浪時の立退き避難の判断に資する家屋倒壊危険範囲の推定手法の開発を行ったが、得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 水理模型実験における波浪や波圧の測定結果を概ね再現した数値波動水路を用い、高波浪時の越波によって家屋に作用する波圧（水深係数）を堤防からの距離に応じて推定する方法を

提案した。

- (2) 本研究の手法により推定した家屋に作用する波圧（水深係数）と木造家屋の倒壊・滑動限界を比較したところ、2008年の下新川海岸の被災事例と概ね整合していた。

なお、現在、三大湾等の内湾では、2015年の水防法改正から概ね5年程度を目途に高潮浸水想定区域図の作成等の警戒避難体制の検討が進められている。海岸研究室は、「高潮浸水シミュレーション相談窓口」として、高潮浸水想定区域図を作成する都道府県に対して技術支援を行っているところであるが、今後、外洋に面した海岸でも同様の検討が行われる際には、本研究の成果をもとに、家屋倒壊危険範囲の推定についても助言していく予定である。

参考文献

- 1) 菜生海岸災害調査検討委員会：菜生海岸災害調査検討委員会報告書、pp.2～5、2005
- 2) 高波災害対策検討委員会：第1回 資料2 今回の下新川海岸等の被災状況、pp.7～12、2008
- 3) 北海道開発局：平成28年8月台風第10号による胆振海岸波浪の概要（速報版）、p.5、2016
- 4) 竹下哲也、加藤史訓、森谷拓実、峯村浩治：越波により海岸堤防背後の家屋に作用する波圧の数値計算、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.73、2017
- 5) 姫野一樹、竹下哲也、五十嵐竜行、小泉知義、諏訪義雄：傾斜堤における $hc/H0 = 0 \sim 1$ の範囲での越波水理模型実験、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.72、No.2、pp.I_379～I_384、2016
- 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、Vol.47、pp.911～915、2000
- 7) 国土交通省：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）、参考資料1、xiii、2015
- 8) 榊山 勉：陸上遡上津波の伝搬と構造物に作用する津波波圧に関する研究、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.68、No.2、pp. I_771～I_775、2012

竹下哲也



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 主任研究官
Tetsuya TAKESHITA

加藤史訓



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部
海岸研究室長、博士（工
学）
Dr. Fuminori KATO