

土砂・シルトを含む津波波力に関する実験的研究

Experimental Study on The Influence of Suspended Silt And Sand on Tsunami Force

19N3100013J 木瀬 晃周 (海岸・港湾研究室)
Koshu KISE/ Coastal Engineering Lab.

Key Words : tsunami, wave force, wave pressure, experiment, silt, sand

1. はじめに

これまでの津波荷重に関する研究では、多くは真水を用いた実験や数値計算による結果を用いて評価されてきているものが多い。実際の津波は土砂を含んでいることが指摘されているが、土砂による密度の上昇及び波力の上昇を検討している例は松富ら⁹⁾など数少ない。氾濫水密度について、アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁FEMAによる2019年の津波避難ビルのガイドライン²⁾では津波の密度は海水の密度の1.1倍で $\rho_s = 1128 \text{ kg/cm}^3$ とされている。また松富ら⁹⁾では最大 1.2 g/cm^3 に達するとの結果が出ており、どちらの結果にしても津波波力が密度分だけ、場合によってはそれ以上の増加が考えられる。しかし、日本における津波避難ビルなどの設計基準⁹⁾では朝倉ら⁵⁾の検討をもとに波力の基準を定めており、密度の上昇による波力の上昇は考慮されていない。

本実験を行う前に東日本大震災時の土砂混じりの水(以後、サンプルとする)を計測した結果、シルトに分類されるような粒径の細かい土砂が多く含まれていたことが判明しているが、これまでシルトを用いて波力を検討した研究はない。本検討ではシルトを含むことによる津波の波力に着目し、実験を行う。また、砂を用いての実験も行い、砂を含んだ波力についても検討、比較を行う。

2. 実験方法

(1) 実験設備

表-1 無次元波圧係数に関する既往研究 (有川⁸⁾より引用)

Fr はフルード数 ($Fr = v/\sqrt{gh}$) , ζ は損失係数.

無次元波圧係数 (水深係数)	参照論文
3.0	朝倉ら ⁵⁾
$1.0+1.2Fr$	Asakura et. al. ⁹⁾
$1.0+1.3Fr$	池谷ら ¹⁰⁾
$1.0+1.4Fr$	榊山 ¹¹⁾
$1.0+0.5Fr^2$	加藤ら ¹²⁾ , 池谷ら ¹⁰⁾
$1.0+0.5(1.0+\zeta)Fr^2$	松富ら ¹³⁾
注) 建物に対して, $\zeta=0\sim 0.8$	大村ら ¹⁴⁾
$1.0+0.5(1.0+\zeta)Fr^2$, $\zeta=1.7$	有川 ¹⁵⁾
$1.0+0.5(1.0+\zeta)Fr^2$, $\zeta=3.0$	

実験は長さ10m, 幅2.2m, 深さ2.0mの断面水槽で行った。断面水槽の中に水路幅50cmの断面水槽の模型を設置した。模型全長は約6mである。模型上部に底面が60cm×120cmのタンクを設置し、タンクの底のゲートを開放することで段波を発生させる。図-1に実験水槽の断面図を示す。また図-2に実験で用いた鉛直壁について示す。波力の評価については、無次元波圧係数を用いて表す。

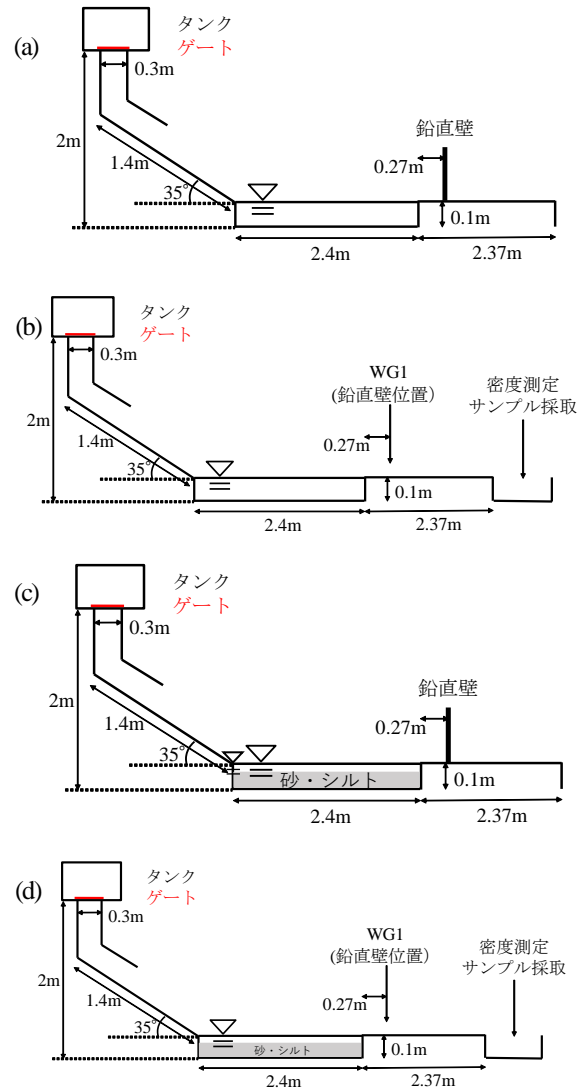


図-1 実験水槽断面図

(a)水鉛直壁あり, (b)水通過波 (鉛直壁なし),
(c)砂・シルトの鉛直壁あり, (d)砂・シルトの通過波

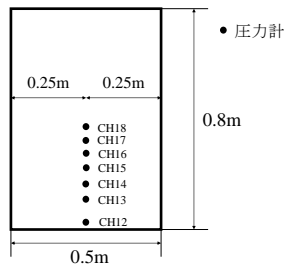


図-2 鉛直壁概要と圧力計設置高さ

表-2 実験ケース表

ケース	実験	タンク水位	鉛直壁	回数
W08	水	8 cm	あり	3回ずつ
W08T			なし	
W10		10 cm	あり	
W10T			なし	
W12		12 cm	あり	
W12T			なし	
Sa08	砂	8 cm	あり	3回ずつ
Sa08T			なし	
Sa10		10 cm	あり	
Sa10T			なし	
Sa12		12 cm	あり	
Sa12T			なし	
Si08	シルト	8 cm	あり	3回ずつ
Si08T			なし	
Si10		10 cm	あり	
Si10T			なし	
Si12		12 cm	あり	
Si12T			なし	

有川⁹⁾が無次元波圧係数に関する既往研究をまとめているため、表-1として示す。

(2) 実験条件

実験ケースについて表-2に示す。タンク内の水深（タンク水位）を3パターン、底部に固定板、砂、シルトを用意する3パターン、鉛直壁での波圧測定、鉛直壁を外し通過波検定（鉛直壁なし）で波高、流速、密度測定を行う2パターンの計18ケースである。ばらつきを考慮し、各ケース3回ずつ実験を行った。なおタンク水位はタンクの下面からの水位とする。底面の土砂の層厚は8.5 cmとし、その上に1.5 cmの水深を持たせ土砂は飽和した状態としている。

鉛直壁を用いた波圧計測のケースにおいては、鉛直壁と圧力計(図-2)を用いて波圧を測定する。圧力計はSSK社製、定格容量0.2 kgf/cm²を用いた。サンプリング時間間隔は1/1000 秒である。WG1では1/1000秒間隔でのハイスピードカメラでの撮影を行い、各ケースで水先端



図-3 サンプルの写真 左が攪拌前、右が攪拌後

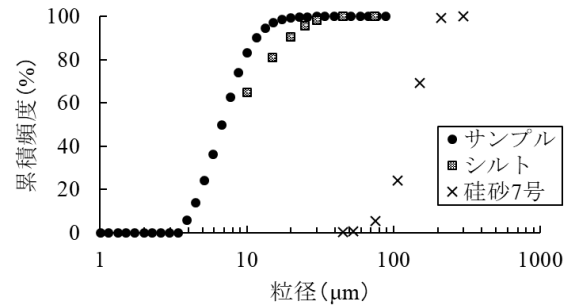


図-4 サンプルと実験で用いたシルト、砂の粒度分布比較

表-3 密度測定結果

ケース	実験	タンク水深 (cm)	密度(g/cm ³)	Fr数
W08T	水	8	1.000	1.49
W10T		10	1.000	1.58
W12T		12	1.000	1.53
Sa08T	砂	8	1.039	4.11
Sa10T		10	1.049	3.25
Sa12T		12	1.066	3.04
Si08T	シルト	8	1.026	2.19
Si10T		10	1.057	2.32
Si12T		12	1.072	2.29

部の流速と波高を画像解析により測定した。

通過波検定ではさらに密度計測を行った。水路後方で容器に水を溜め、目盛り付きの容器で一部を回収し、その重さと体積から密度を計測した。

(3) 砂・シルトについて

サンプルは宮城県気仙沼市の漁港付近で津波が引いた後、コンテナに残っていた水を攪拌し採取された。図-3にサンプルの写真を示す。計測の結果、図-4のサンプルに示される粒度の土砂が検出された。含まれていた土砂の中央粒径は6.74 μmであり、多くがシルト（粒径74-5 μm）に分類される。また、液体の密度は1.1 g/cm³で、乾燥後の固形物量は0.113 g/cm³と通常の海水よりも約10%大きいことが分かった。今回はこのサンプルを実際の津波の一例とし、これを基に土砂を選定した。

実験に用いた砂シルトに関して図-4に粒径加積曲線を示す。砂は硅砂7号(平均粒径: 185 μm)である。

3. 実験結果と考察

(1) 密度測定

密度の計測結果と各ケースでの波高, 先端部流速から求められたフルード数を表-3に示す。それぞれ3回行った結果の平均値を示している。なお, 水に関しては 1.0 g/cm^3 としている。密度と Fr 数には関係性は見られていない。タンク水位が大きくなると流速だけでなく水量も多くなり, 水深が大きくなるためと考えられる。

(2) 波圧と水面角度について

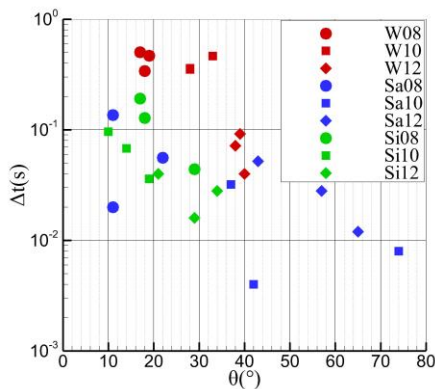
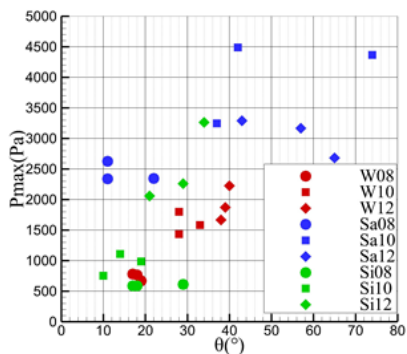


図-6 Δt -水面角度 θ

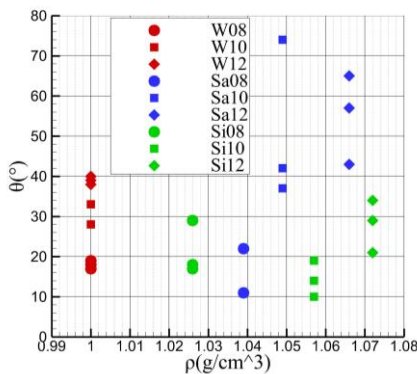


図-7 水面角度 θ -波高検定時の密度 ρ

波力に関しては有川・大家¹⁾を参考に衝撃段波波圧 (1st Peak) と持続波圧 (2nd Peak) に分けて検討を行う。本検討では衝撃段波波圧に焦点を当て検討を行った。

高橋ら⁸⁾によると作用時間 Δt が小さいほど水面角度 θ は大きく, P_{max} も大きくなる傾向があるとされている。図-5と図-6には波圧の実験値と各ケースの水面角度, 作用時間の関係を示している。ばらつきはあるものの, 全体的に水面角度が大きい程波圧も大きくなり, 水面角度が大きい程作用時間も短くなっている傾向が示されている。また図-7には水面角度と各実験ケースの密度の関係を示しており, 密度が大きくなるほど水面角度が大きいケースが見られた。

(3) 波圧係数 α の検討

波力の評価については1章で触れたように波圧係数 α を用いて評価する。波圧係数は遡上津波高さの α 倍の静水圧という形で設計基準となる波力を示している。現在は朝倉ら⁵⁾の検討を元に $\alpha=3.0$ を基本とした津波荷重に対する設計基準が設けられている⁴⁾。各ケースの波圧の最大値 P , 通過波検定の最大波高 h_{max} , 密度の計測値 ρ , 圧力計の高さ Z を用いてデータを無次元最大波圧分布にした。図-8に示す。なお, 朝倉ら⁵⁾の $\alpha=3.0$ も基準として記載している。波圧計の計測結果の最大値を, 通過波検定で測定した各ケースの波高の最大値と密度の測定結果を用いた静水圧で除して無次元化した。今回の検

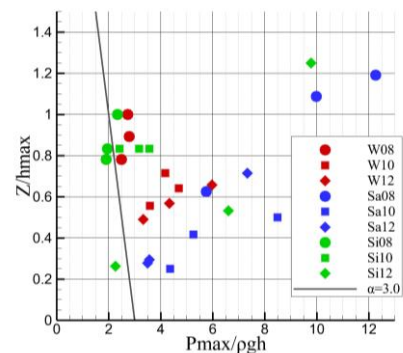


図-8 無次元最大波圧分布 (CHI2のみ)

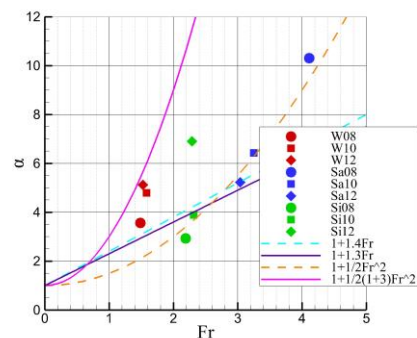


図-9 波圧係数- Fr 数

討では衝撃波圧を対象としており、同時波圧としては、鉛直方向で最下端の圧力計CH12(Z=0.025m)のみしか値が出ていないため各ケースCH12の値のみを示している。

図-8からは、衝撃段波波圧であるため、既存の $\alpha=3.0$ の分布よりも大きくなっていることがわかる。

図-9には縦軸に図-8から求められた1st Peakの波圧係数 α 、横軸にフルード数を取ったグラフを示す。ここでは各ケース3回の実験の平均を取ったデータを示している。表-1に示したが、過去の波力評価の研究では波圧係数をフルード数で表すような式($1+aFr$ 型や $1+aFr^2$ 型)が提案されている。これらの既往の式と今回の実験結果を比較すると、 $1+aFr$ 型の池谷ら、榊山らの提案式ではフルード数が大きいケースにおいて過小評価となっている。フルード数が大きい場合は $1+aFr$ 型では過小評価になる傾向が示された。本実験でフルード数が大きい Sa のケースでは $1+aFr^2$ 型の式で良く示すことができている。波圧係数は無次元波圧から求めているため各ケースの密度で除している。そのため水のみで行われている既存の検討による波力係数の提案式においても表すことができたと考えられる。 Si のケースでは特に $Si12$ においてフルード数に対して α が大きくなっている。このケースは密度が高いケース(表-3)であったため、密度による粘性等の影響が考えられる。

4. おわりに

本研究では、水理模型実験を行い、これまで検討されてこなかったシルトに分類される土砂を含んだ津波の特性を検討した。波圧、水面角度、フルード数、衝撃波圧作用時間等のパラメータを用いて各段波の特性・傾向を示した。その結果、密度が大きくなると衝突時の波面の角度がばらつき、場合によっては壁面と並行に近くなり、大きな波圧を生じさせる可能性があることが示された。

また、既往の波圧係数の提案式を用いて土砂により密度が増加した津波の最大波力を評価した。この波圧係数や無次元最大波圧の比較において、 Fr 数が同じであってもシルトや砂が混じることで相対的に波圧が増大する可能性があることが示された。

実験のばらつきや画像解析による精度、水量、 Fr 数の大きさや、粘性による影響をより詳細に検討する必要がある。また今回は触れていない持続波圧についても検討する必要がある考え、今後の課題とする。

参考文献

1) 松富英夫, 岡田隼人, 久保田友寛, 今野史子: RC 構造物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学),

Vol.74, No.2, pp.I_265-I_270, 2018.

- 2) FEMA: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis. Third Edition (FEMA P-646), 8-12, 2019.
- 3) 松富英夫, 川島峻: 津波氾濫流の密度に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_355-I_360, 2015.
- 4) 国土技術政策総合研究所: 津波避難ビル等の構造上の要件の解説, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0673pdf/ks067305.pdf>, 参照 2019-04-20.
- 5) 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, pp911-915, 2000.
- 6) 有川太郎: 防護施設の粘り強さ, 水工学に関する夏期研修会講義集, 2015.
- 7) 有川太郎, 大家隆行: 防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_806-I_810, 2014.
- 8) 高橋重雄, 谷本勝利, 鈴木諭司: 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察, 港湾技術研究所報告第 22 巻第 4 号, pp.3-31, 1983.
- 9) Asakura, R., K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fuji and M. Ohmori: The tsunami wave force acting on land structure, *Proc. of 28th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE*, pp. I_331-I_335, 2002.
- 10) 池谷毅, 秋山義信, 岩前伸幸: 陸上構造物に作用する津波持続波圧に関する水理学的考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_816-I_820, 2013.
- 11) 榊山勉: 陸上遡上津波の伝播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.
- 12) 加藤史訓, 諏訪義雄, 藤田光一, 岸田弘之, 五十嵐崇博, 岡村次郎, 林雄一郎: 建築物による津波のせき上げの評価方法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_331-I_335, 2012.
- 13) 松富英夫, 決得元基, 齋藤雅大: 開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_326-I_330, 2013.
- 14) 大村智弘, 八木宏, 中山哲厳, 米山正樹, 成田賢仁, 加藤広之, 門安曇, 滑川順: 胸壁に作用する津波波力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_991-I_996, 2015.
- 15) 有川太郎: 水理模型実験による防潮壁に作用する孤立波の波圧特性に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_889-I_894, 2015.