

図-2 密度測定結果

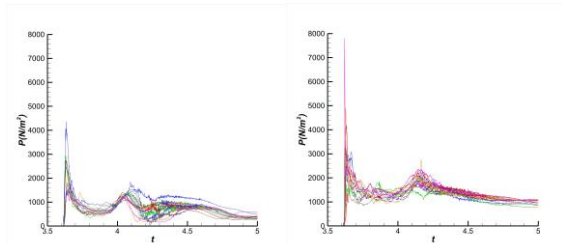


図-3 波圧時系列グラフ(左:water 右:silt)

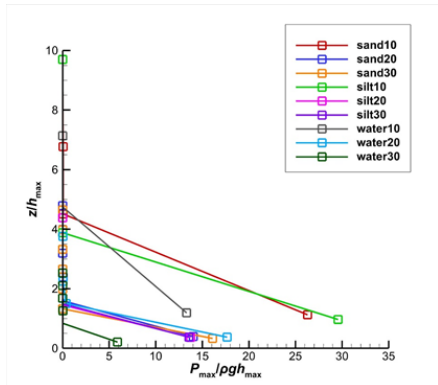


図-4 無次元波圧と作用位置グラフ

4. 考察

(1) 波圧検討

朝倉ら²⁾によって提言された波圧係数 α を用いて津波波力を評価する。これは遡上津波高さの 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。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て、エラー! 参照元が見つかりません。に示す。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。本研究では松富ら³⁾により提案されているフルード数の二乗に比例する式 ($1+aFr^2$ 形) を用いて比較した。 $1+aFr$ 型は池谷ら⁴⁾により $a = 1.3$ 、榊山ら⁵⁾により $a = 1.4$ の式が提案されている。また松富らにより、エネルギー損失を考慮した $1+aFr^2$ 型の式(1)が提案されている。

$$\alpha = \frac{h}{h_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{u_f}{u_i} \right) + \zeta \right\} Fr^2 \quad (1)$$

ここで、 h は津波衝突後の水深、 h_i は波高検定における最大水深、 u_f は津波衝突後の断面平均流速、 u_i は最大水深時の流速、 ζ はエネルギー損失係数、 Fr はフルード数である。エネルギー損失係数 ζ は衝突するピルの窓等、構造物の

凹凸等によって決まる。今回のケースでは凹凸のない壁面を用いているため、 $\zeta = 0$ としたもの、有川⁶⁾による $\zeta = 3.0$ を用いたものを示す。また、構造物への津波衝突時の流速は $u_f = 0$ とする。フルード数 $Fr = v / \sqrt{gh_{max}}$ の波高 h_{max} は通過波検定の最大波高であり、流速 u は波先端部の流速となっている。池谷ら、榊山らの提案式では過大評価となっているが有

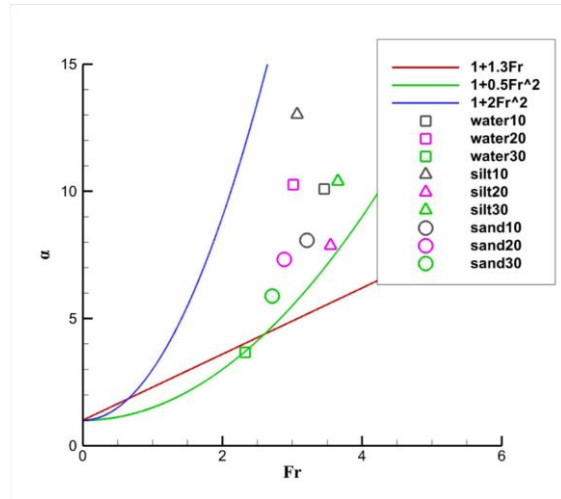


図-5 波圧係数とフルード数の関係



図-6 角度測定方法

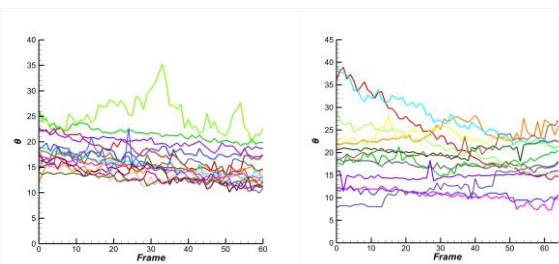


図-7 角度の時系列グラフ(左:water 右:silt)

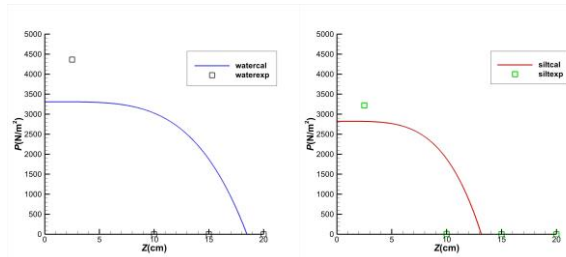


図-8 作用位置と波圧グラフ(左:water 右:silt)

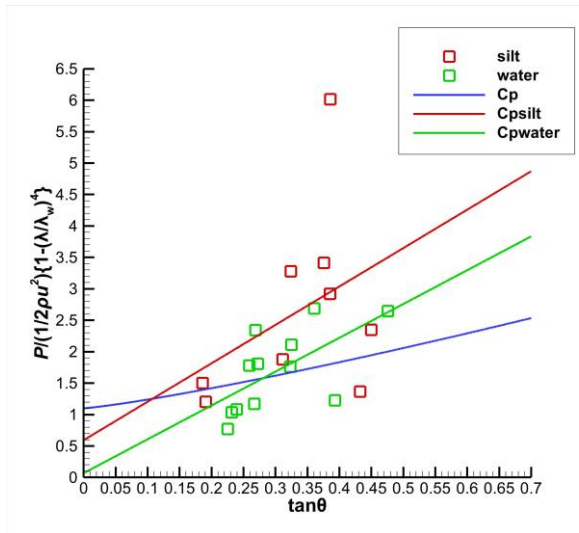


図-9 波圧と角度の関係

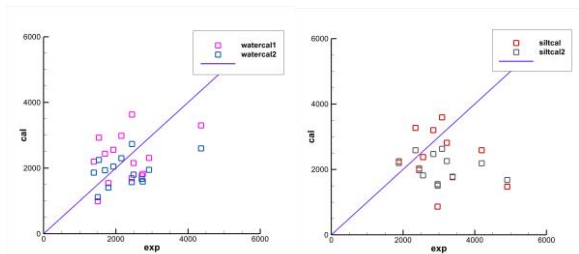


図-10 波圧と角度の関係(左:water 右:silt)

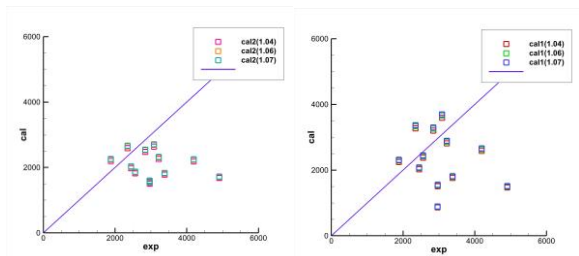


図-11 波圧と角度の関係(左:water 右:silt)

川らの提案式ではすべてのケースにおいて過小評価となっている。また、提案式は持続波圧を評価するもので、衝撃段波波圧の評価への適応性を示した。土砂を含んだケースと水のケースでFr数に有意な違いは見られなかった。先端部の密度や波高には未だ詳細な検討余地が残る。

(2) 角度検討

水槽前面の2点をハイスピードカメラ内の測定機能を用いて座標を記録し、角度を算出した(エラー! 参照元が見つかりません。)。また、誤差を減らすために鉛直壁に衝突する60フレーム前から測定しその平均を取った。その角度の時系列変化をエラー! 参照元が見つかりません。に示す。水とシルトの角度のばらつき方を見るとシルトのケースが水よりも角度のばらつきの幅が大きいことが分かる。

衝撃段波波圧についてはKihara⁷⁾らによって水塊・固体の衝突問題を解くCumberbatch⁸⁾の理論解を用いることで良好に表すことができる。木原ら⁹⁾によってCumberbatchの

理論の近似解を用いることで衝撃段波波圧の鉛直分布は次式から推定される。

$$P(\lambda) = \frac{1}{2} \rho u^2 c_p \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_w} \right)^n \right] \quad \lambda < \lambda_w \quad (2)$$

$$P(\lambda) = 0 \quad \lambda \geq \lambda_w$$

ここで、 ρ は流体の密度、 u は段波先端の進行速度、 c_p は衝撃段波波圧の圧力係数、 λ は無次元高さ、 λ_w は圧力が作用する上限無次元高さ、 n は分布型を決めるべき数である。木原ら⁹⁾によると $n = 4$ が再現性が良いため $n = 4$ を用いる。

Kihara⁷⁾らより重力影響を考慮した無次元高さ λ が提案されている。

$$\lambda = \frac{z}{t(u-0.5gt)} \quad \text{for } t \leq \frac{u}{g} \quad (3)$$

ここで、 t は波圧測定時の最大波圧発生時刻としている。木原ら⁹⁾によってCumberbatchの理論を数値的に解いたことで $5^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ の条件下で c_p と λ_w において θ の関係が以下の近似式で得られた。

$$c_p \approx 1.1 \{ 1 + 2(\tan \theta)^{1.2} \} \quad (4)$$

$$\lambda_w \approx 2.1(\tan \theta)^{0.8} \quad (5)$$

上記の式を用いて実験値と計算値の比較を波圧の作用位置と波圧の関係でエラー! 参照元が見つかりません。に示す。本研究では、波圧計の位置が2.5cmから10cmの間がないため衝撃段波波圧が1地点のみでしか取れていない。しかし、計算値では10cmよりも大きい位置で値が出ているため、実験値と比べ過大評価になっている。

画像から導出した角度と波圧の関係をエラー! 参照元が見つかりません。に示す。シルトのケースも水のケースも角度が増加するにつれて波圧が増加する傾向が見られた。また、木原ら⁹⁾の示す C_p よりもどちらのケースも傾きが大きく、シルトのケースに関しては多くの波圧が木原ら⁹⁾の示す C_p を上回る結果になった。

衝撃段波波圧は、動圧と静水圧の両者が寄与する波圧分布である。木原ら⁹⁾によると直立壁直前での動圧を引き起こす高流速流れは、直立壁が無い条件での直立壁設置位置における反射波の内部における高流速流れで表されるとされおり、Madsen・Svendsen¹⁰⁾による射流流れ上を伝播する乱流ボアの理論を適用し、直立壁を通過する反射波の内部構造を解き、動圧成分 p_d と静水圧成分 p_s を示した。

$$P_d(z) = \frac{1}{2} \rho u^2 f(z) \quad (6)$$

$$P_s(z) = \rho g(h - z) \quad (7)$$

ここで、 $f(z)$ は動圧の分布関数であり、木原ら⁹⁾の実験から衝撃段波波圧に似た分布型であることが確認されているため、衝撃段波波圧と同様の関数形を用いる。

$$f(z) = 1 - \left(\frac{z}{h} \right)^4 \quad z < h$$

$$f(z) = 0 \quad z > h$$

これを用いて実験値と角度を用いた計算値(cal1)と動圧と静

水圧の和(cal2)の計算値の波圧をエラー! 参照元が見つかりません。で比較した。水のケースでは、動圧と静水圧の和が実験値とよく整合している。波圧の大きい値では角度を用いた計算値の方が実験値とよく整合していた。シルトのケースでは、角度を用いた計算値が実験値に比べて過小評価になってしまったが、波圧の大きい値では実験値とよく整合していた。動圧と静水圧の和では、大きな波圧は表すことができなかったが、波圧の小さい場合は実験値とよく整合していた。シルトのケースでは水に比べて衝撃的に大きな波圧が出ているがどちらの計算値でも大きすぎる波圧は表現することができず、土砂を含む場合は係数を再考察する可能性もある。水の場合はどちらの計算値もよく傾向を示していて、実験値の波圧が大きい場合は角度を用いた計算値が整合していて、角度による波圧の増大性が考えられる。

角度の計算値において本研究で得られた密度の変化を用いた比較をエラー! 参照元が見つかりません。に示す。シルトの密度増加に対して、計算値の波圧が増加し過小評価の値が実験値に近づいた。本研究では密度の変化の幅が小さかったがFEMA¹¹⁾の 1.128 g/cm^3 , 松富ら¹²⁾の 1.2 g/cm^3 の密度を用いても大きな変化はないと考えられる。

5. 結論

本研究では、水理模型実験により衝撃段波波圧の特徴を明らかにした。持続波圧を評価する式で、密度の増加の影響も考慮しながら衝撃段波波圧を評価することができた。衝撃段波波圧は角度によって増大することが確認でき、土砂を含んだ波圧が水の場合よりも波圧の増大傾向が見られた。波圧の測定位置が鉛直壁の中央にあり、角度をガラス表面で測定した関係で角度のばらつきは出たが中央の角度を測ることができればより詳細な傾向を得ることができることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, ppI_265-I_270, 2018.
- 3) 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, ppI_326-I_330, 2013.
- 4) 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, ppI_816-I_820, 2013.

- 5) 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, ppI_771-I_775, 2012.
- 6) 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, ppI_889-I_894, 2015.
- 7) Kihara, N., Niida, Y., Takabatake, D., Kaida, H., Shibayam, A., and Miyagawa, Y.: Large-scale experiments on tsunami-induced pressure on a vertical tide wall, *Coast. Eng.*, Vol. 99, pp. 46-63, 2015.
- 8) Cumberbatch, E.: The impact of a water wedge on a wall, *J.Fluid Mech.*, Vol. 7, pp. 353-374, 1960.
- 9) 木原直人, 甲斐田秀樹: 直立壁に作用する段波波圧の推定方法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, I_973-I_978, 2016.
- 10) Madsen, P. A. and Svendsen, I. A.: Tubulent bores and hydraulic jumps, *J. Fluid Mech.*, Vol. 129, pp. 1-25, 1983.
- 11) FEMA: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis. Third Edition (FEMA P-646), 8-12, 2019.
- 12) 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, ppI_355-I_360, 2015.