

気乾シルト床下の氾濫流抵抗則に関する実験*

中央大学研究開発機構 松富 英夫
中央大学理工学部 有川 太郎

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波時に話題となった「黒い津波」¹⁾以降、日本でも移動床下の土砂を含む津波の研究が開始された²⁾。

松富・有川³⁾は気乾シルト床下の氾濫流抵抗則を限られた実験データに基づいて提示した。本研究は、新たに中央粒径 d_{50} を変えたシルト床下の氾濫流実験を行い、氾濫水密度 ρ などに関する実験データを蓄積し、提示した氾濫流抵抗則の妥当性確認を目的とする。

2. 気乾シルト床下の氾濫流実験

(1) 実験水路

実験水路は幅0.3mのすべり台状の直線開水路で、すべり台斜面の下端にはシルトを敷くために透明アクリル板製の水平部(底面は合板)、その下流端には氾濫流先端部の氾濫水(土砂水)量を調節して採水するために短く緩い上り斜面部(合板製)を設けた。実験水路の概略、測定器具などの配置と諸記号の定義などを図-1に示す。図中、 h_D は水平部底面からすべり台上端に水平に設置した貯水槽(高さ0.5 m、幅0.3 m、長さ1.8 m)底面までの高さ、 h_U は貯水深、 L_U は貯水長、 S_1 はすべり台斜面の勾配、 L_S は水平部の初期土砂層域長、 h_T は初期土砂層厚、 h_S と S_2 は短く緩い上り斜面部の水平部底面からの上端高さと同勾配である。津波氾濫流はゲート急開流れで模擬した。

(2) 水理量の測定と評価

初期土砂層域の上・下流端における入射氾濫水深を測定するため、上・下流端に容量式水位計を設置した。水位計間の距離は3.79 mまたは3.84 m、各水位計位置の初期水路底面位は同じで、水位(水深)のサンプリング時間間隔は0.01 sである。

水平部における氾濫流先端移動速度(≒入射氾濫流速 u_i と仮定)は上・下流端に設置した水位計間の距離と氾濫流先端が水位計間通過に要する時間から評価した。

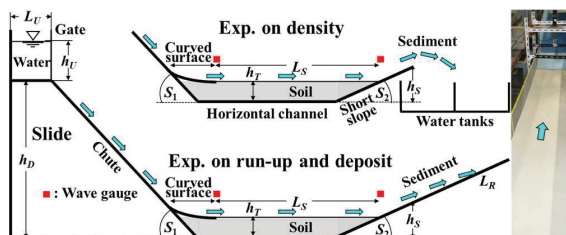


図-1 実験水路の概略(水路側壁は省略)、水路写真(右端)、測定器具などの配置と諸記号の定義。すべり台斜面下端の曲面で水平流を確保

* Experiments on a frictional resistance law of inundation flow over a dry silt bed by Hideo MATSUTOMI and Taro ARIKAWA

表-1 実験条件

実験ケース	h_D (m)	L_U (m)	h_U (m)	S_1 (°)	L_S (m)	h_T (m)	h_S (m)	S_2 (°)	M_{SD} (kg)	使用土砂
Case 1	0.20	1.8	0.20	6.3	3.84	0.06	0.13	7.4	42.0	Silt 1
Case 2			0.20		3.79				42.6	Silt 2
Case 3			0.25		3.84				48.3	Silt 2
Case 4			0.20		3.84				45.7	Silt 2
Case 5			0.18		3.84				41.9	Silt 2
Case 6	0.16	1.8	0.20	5.1	3.79	0.10	7.0	50.9	Silt 3	
Case 7			0.20					50.5	Silt 3	
Case 8			0.20					51.2	Silt 3	
Case 9			0.25					51.7	Silt 3	
Case 10			0.20					51.2	Silt 3	
Case 11			0.20					51.6	Silt 1	

表-2 実験結果 (実験条件を含む。- は未評価)

実験ケース	d_{50} (mm)	均等係数	曲率係数	h_i (cm)	F_{ri} (-)	ρ (g/cm ³)
Case 1	0.008	-	-	4.4	2.24	1.096
Case 2	0.018	2.39	0.74	4.4	2.25	1.095
Case 3	0.018	2.39	0.74	5.1	2.36	1.088
Case 4	0.018	2.39	0.74	5.4	2.00	1.091
Case 5	0.018	2.39	0.74	4.5	2.09	1.088
Case 6	0.024	2.89	1.30	5.8	2.03	1.098
Case 7	0.024	2.89	1.30	5.5	2.03	1.082
Case 8	0.024	1.96	1.03	5.9	1.96	1.105
Case 9	0.024	1.96	1.03	7.0	2.10	1.096
Case 10	0.024	1.96	1.03	6.5	1.97	1.089
Case 11	0.008	-	-	4.5	1.98	1.098

初期土砂層域中心部における入射氾濫水深 h_i と入射フルード数 F_{ri} はそれぞれ上・下流端の水位計から得られる最大入射氾濫水深 (h_{iu} , h_{id}) を平均した水深 h_{im}^4 、 h_{im} と上述の氾濫流速 u_i 、重力加速度 g を用いて $u_i/\sqrt{gh_m}$ から評価した。

水平部における流況観察並びに氾濫流先端移動速度と初期土砂層域中心部における氾濫水深を予備的に評価するため、水平部の透明アクリル側壁の片面にはスケールを配置して、上方と側方からビデオ撮影も行った。

(3) 氾濫水密度の評価方法

水路水平部でシルトを巻込んだ氾濫水は下流端の短く緩い上り斜面を駆け上がり、空中に飛出す。飛出した氾濫水はほぼ全量はその落下域に設置した立方体の透明水槽群 (辺長 30 cm, 板厚 0.3 cm, 秤量 $29.4 \times 29.4 \times 29.7 \approx 2.57 \times 10^4$ cm³の水槽を流れ方向に2個, 水路横断方向に2個の計4個。図-1参照) へ飛込む。あらかじめ各水槽の重量を量り、氾濫水が飛込んだ後の各水槽の重量を量れば、氾濫水体積は水槽四隅の湛水深を測ることで評価できるので、氾濫水密度 ρ の評価ができる。

(4) 実験の条件と結果

表-1に新実験の条件を示す。 M_{SD} は各実験で使用したシルトの全質量である。使用したシルトは市販⁵⁾のもので、紙袋に入った気乾状態で水路水平部へ投入された後、その表面は水平に均された。その後、時間を置くことなく、実験を行った。実験は各ケース1回である。

表-2に実験前シルトの粒度特性例 (d_{50} は中央粒径)⁵⁾、入射氾濫水深 h_i 、入射フルード数

F_{ri} , 水槽へ飛込んだ氾濫水の全量から評価した氾濫水密度 ρ に関する実験結果を示す。

3. 気乾シルト床下の氾濫流抵抗則

松富⁶⁾は移動床下の氾濫流では氾濫水密度 ρ と摩擦損失係数 K の連動が重要と指摘し、両者の連動式として次式を提示した。

$$\rho = \rho_w / (1 - KF_{ri}^2) \quad (1)$$

式(1)を用い、松富・有川⁴⁾の津波氾濫流理論に適用可能な気乾の砂質土床下の氾濫流抵抗則として次式を提示した。

$$K = 0.00255F_{ri}^{-1}(h_i/d_{50})^{0.5} \quad (2)$$

式(2)については妥当性の照査が行われている⁷⁾。

気乾のシルト床下に関しては、限られた実験データに基づいて、氾濫水比重 ρ/ρ_w が常に砂質土床下のものを含むこれまでの全実験データの上限值あたりで、 F_{ri} と相対入射氾濫水深 h_i/d_{50} にあまり依存しないことを確認後、次式を提示した³⁾。

$$K = (1 - \rho_w/\rho)F_{ri}^{-2} = \mu F_{ri}^{-2} \quad (3)$$

ここで、式(3)提示時の実験係数 μ は0.1008である³⁾。後述の図-4中の実線は式(3)である。

式(2)と(3)は移動床下の氾濫流先端部平均の氾濫水密度 ρ の実験値を用いて導出されており、先端部空間平均の移動床下の氾濫流抵抗則と言える。今後、実験データの蓄積により

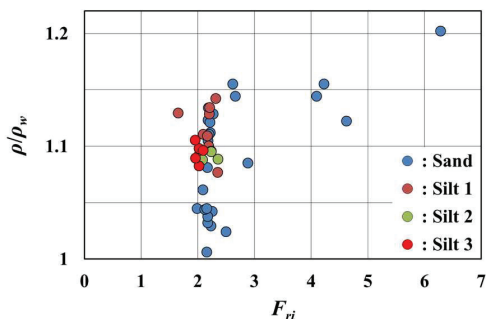


図-2 入射フルード数 F_{ri} と氾濫水比重 ρ/ρ_w の関係

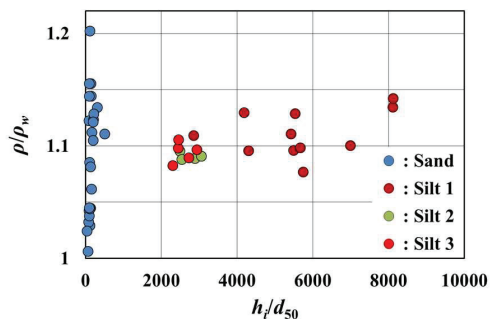


図-3 相対入射氾濫水深 h_i/d_{50} と氾濫水比重 ρ/ρ_w の関係

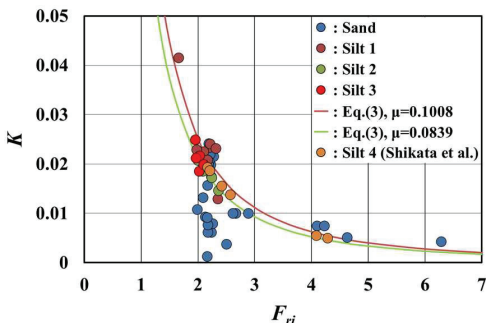


図-4 入射フルード数 F_{ri} と摩擦損失係数 K の関係 (志方ら⁸⁾の実験値を含む)

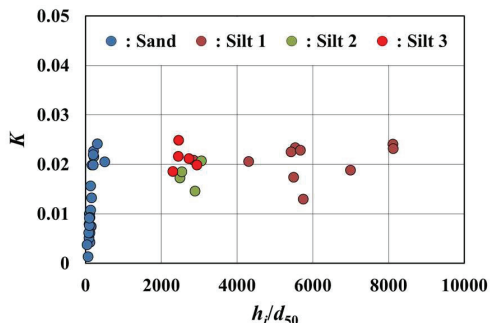


図-5 相対入射氾濫水深 h_i/d_{50} と摩擦損失係数 K の関係

実験係数が更新されるかもしれないが、式形は不変と考えている。この状況は氾濫水比重 ρ/ρ_w の評価式⁴⁾も同じである。

図-2～5に既報 (Sand, Silt 1) と本研究の新実験 (Silt 2, Silt 3) で得た全実験データを用いた場合の氾濫水比重 ρ/ρ_w および摩擦損失係数 K の入射フルード数 F_{ri} と相対入射氾濫水深 h_i/d_{50} への依存性を示す。図-4には参考として志方⁸⁾のシルトにおける実験値も示している。 K の導出過程と実験における評価法はそれぞれ参考文献6)と4)を参照されたい。また、気乾シルト床下の実験データは F_{ri} が2強以下に限られていることに注意を要する。これらの図から、1) ρ/ρ_w は気乾砂質土床下では F_{ri} と h_i/d_{50} の両方へ依存し、気乾シルト床下では砂質土床下を含めた ρ/ρ_w の全実験データの上限值あたりで、大きく散らばっているが、 h_i/d_{50} へ依存していない (図-2と3)、2) K は F_{ri} に対して気乾の砂質土床下とシルト床下で同様な依存傾向を示し (図-4)、 F_{ri} が同じ (例えば2強) であれば、気乾シルト床下では気乾砂質土床下の K の上限值あたりで (図-4)、 h_i/d_{50} へ依存していない (図-5)、3) 気乾シルト床下の ρ/ρ_w と K の h_i/d_{50} への依存性 (ほぼ一定) はこれまでと同じ傾向であるが (図-3と5)、実験係数 μ は d_{50} に少し依存する傾向にある (図-4) ことが判る。

式(3)は、気乾シルト床下の氾濫流において取り得る最小や最大などの氾濫水比重 ρ/ρ_w が決まれば、 μ や K が決まることを示している。これまでの気乾シルト床下の全実験データから推して、最小と最大の ρ/ρ_w は1.08程度と1.15程度で、 μ は0.074～0.130と考えればよからう。 μ は津波の遡上高や波力の評価といった検討課題項目毎に危険側を想定して決めればよからう。

4. おわりに

移動床土砂として市販のシルトを用いた氾濫水密度 ρ に関する水理実験を新たに行い、松富・有川の津波氾濫流理論に適用可能な気乾シルト床下の氾濫流抵抗則 (摩擦損失係数 K の評価式(3)) の妥当性確認を行った。その結果、実験係数 μ は中央粒径 d_{50} に少し依存する傾向にあるが、式(3)の式形が妥当であることが判った。

謝辞：本研究の遂行にあたり科研費 (基盤研究(C), 24K07988) の補助を受けた。新データの取得実験では中央大学の大学院生と学部生の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、狩野智彦：閉伊川左岸を越流する黒い津波の写真，2011年3月11日15時20分頃。
- 2) 例えば、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.355-360, 2015。
- 3) 松富英夫，有川太郎：移動床斜面を遡上する津波氾濫流理論の汎用化，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.80, No.17, 24-17049, 2024。
- 4) 松富英夫，有川太郎：氾濫水密度の時間変化を考慮した津波遡上，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.78, No.2, pp.247-252, 2022。
- 5) 丸中白土株式会社：白土(シルト)製品，<https://marunakahakudo.co.jp/products/index.html>，2025年11月15日参照。
- 6) 松富英夫：津波氾濫水密度の簡易評価法，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.75, No.2, pp.385-390, 2019。
- 7) 松富英夫：氾濫流抵抗則実験式の照査，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，II-66, 2022 (CD-ROM)。
- 8) 志方建仁，新井田靖郎，木原直人，加藤勝秀：シルト・粘土を含む津波による波力に関する水理模型実験，土木学会論文集，Vol.79, No.17, 23-17112, 2023。