

津波氾濫水密度の簡易評価モデル

秋田大学 ○正員 松富英夫

1.はじめに 松富らは津波荷重や歴史・想定津波規模評価の高度化を目指して、津波氾濫水密度 ρ の入射フルード数 F_{ri} や土砂粒径(中央粒径 d_{50})への依存性を小規模移動床実験に基づいて検討している¹⁾⁴⁾。しかし、 ρ の F_{ri} に対する上限式を暫定的に提示、 d_{50} への定性的依存性を言及するに止まっており、いまだに ρ の知見が限られている。

本研究は ρ の簡易評価モデルを構築し、その評価モデルを既報実験結果に適用して ρ の知見の充実を目的とする。

2.簡易評価モデル ρ の評価モデル構築の第一段階(簡易評価モデル)として、実験的検証の容易性から土砂の断面平均濃度 C_m を対象とし、掃流土砂と浮遊土砂に分割⁵⁾せず、全流送土砂で論じる。土砂の密度を ρ_s 、清水または海水の密度を ρ_w 、単位幅・単位時間あたりの体積全流送土砂量を q_T 、入射津波の氾濫水深を h_i 、断面平均氾濫流速を u_i 、底面せん断応力を τ_b 、重力加速度を g とする。

単位幅、単位時間あたりの全流送土砂重量は、

$$(\rho_s - \rho_w)gq_T \tag{1}$$

摩擦速度を u_* とすれば、入射氾濫流が底面の単位面積あたりにする仕事率は、

$$\tau_b u_* \propto \tau_b u_i \tag{2}$$

この仕事率により全流送土砂重量の輸送が維持されるので、 c_1 を補正係数として、次式が得られる。

$$(\rho_s - \rho_w)gq_T = c_1 \tau_b u_i \tag{3}$$

一般的に定常流における流速係数 u_i/u_* は固定床下や移動床下に限らず1より大きく、氾濫流による底面への仕事率の全てが全流送土砂重量の輸送維持に費やされるわけではないので、 c_1 は1より小さいと推定される。ただし、氾濫流(非定常流)における τ_b の評価法(採用抵抗則)次第では、 $c_1 < 1$ とならないことも考えられる(後述)。

C_m (≪1)を導入すれば、単位幅・単位時間あたりの体積全流送土砂量 q_T は次式のように表現される。

$$q_T = C_m h_i u_i \tag{4}$$

したがって、式(3)と(4)から次式が得られる。

$$(\rho_s - \rho_w)gC_m h_i = c_1 \tau_b \tag{5}$$

移動床下の氾濫流の抵抗則は不明である。まだ研究の余地が多く残されているが、移動床下の定常流のマンニングの粗度係数 n (m, s単位)または摩擦損失係数 f を導入すれば、 τ_b は次式のように表現される。

$$\tau_b = \frac{\rho_w g n^2}{h_i^{1/3}} u_i^2 = \frac{1}{8} \rho_w f u_i^2 \tag{6}$$

ここで、径深 $R \cong h_i$ としている。本来ならば式(6)では ρ_w の代わりに ρ が採用されるべきである。本研究はその影響を c_1 に担わせることにする。式(5)と(6)から次式が得られる。

$$C_m = c_1 \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \frac{g n^2}{h_i^{1/3}} F_{ri}^2 = c_1 \frac{f}{8} \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} F_{ri}^2 \tag{7}$$

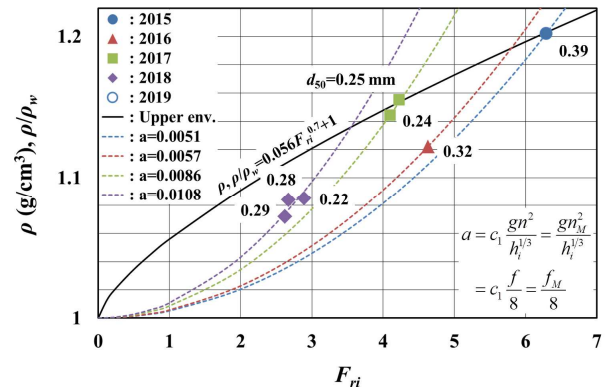


図-1 既報の実験結果¹⁾⁴⁾によく適合する式(8)の簡易評価モデル曲線(破線)とその場合の a 値

式(7)を ρ の定義式に代入すれば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_w \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) C_m \right\} \\ &= \rho_w \left(1 + c_1 \frac{g n^2}{h_i^{1/3}} F_{ri}^2 \right) = \rho_w \left(1 + c_1 \frac{f}{8} F_{ri}^2 \right) = \rho_w (1 + a F_{ri}^2) \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、 a は次式である。

$$a = c_1 \frac{g n^2}{h_i^{1/3}} = \frac{g n_M^2}{h_i^{1/3}} = c_1 \frac{f}{8} = \frac{f_M}{8} \tag{9}$$

式(8)から、 ρ は F_{ri} に強く依存することが判る。式(9)の $f_M (=c_1 f)$ は「移動床下の氾濫流の摩擦損失係数」と呼ぶべきもので(n_M も同様)、 c_1 は移動床下の氾濫流と定常流の流水摩擦の違いを示すものとも言える。

3.簡易評価モデルの検証と諸係数の評価例 ρ に関する既報¹⁾⁴⁾の実験結果を用いて前章提示の簡易評価モデルの検証を行い、 a や n_M 、 f_M 、 c_1 の値を例示する。

3.1 簡易評価モデルの検証 図-1に ρ に関する既報¹⁾⁴⁾の実験装置毎(装置を毎年改良しており、実験実施年毎とも言える)の実験結果によく適合する式(8)の曲線(破線)とその場合の a 値を示す。実験は年順に F_{ri} が小さくなるように行われている。図中の実線は実験値の上限を包絡する暫定的な実験曲線である。図から、本簡易評価モデルは、実験ケース毎の土砂粒径差が小さい条件下において、年順に破線が上側に位置しており、実験結果を矛盾なく説明していることが判る。

図-2に式(8)が既報の実験結果によく適合する場合の f_M の値及び F_{ri} (左図)、 d_{50} (中央)、相対水深 h_i/d_{50} (右図)への依存性を示す。図-2の左図中の実線は暫定的な回帰曲線で、後述する。図から、 f_M は F_{ri} と d_{50} に依存し、 F_{ri} や d_{50} が大きくなれば、小さくなることが判る。式(8)と(9)から理解されるように、 n_M や f_M が小さくなれば、 ρ も小さくなり、この傾向は実験結果と整合する。既報の実験範囲内では、 f_M は h_i/d_{50} にほとんど依存していないことが判る。

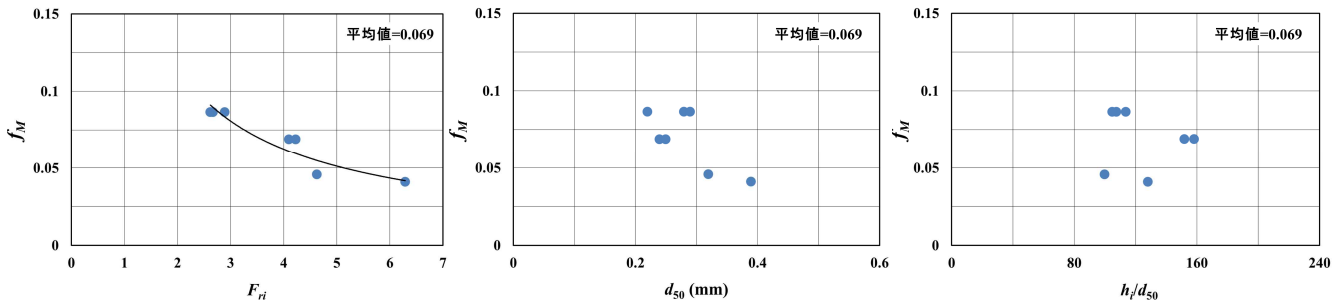


図-2 移動床下の氾濫流に対する摩擦損失係数 f_M の入射フルード数 F_{ri} (左図), 中央粒径 d_{50} (中央), 相対水深 h/d_{50} (右図)への依存性

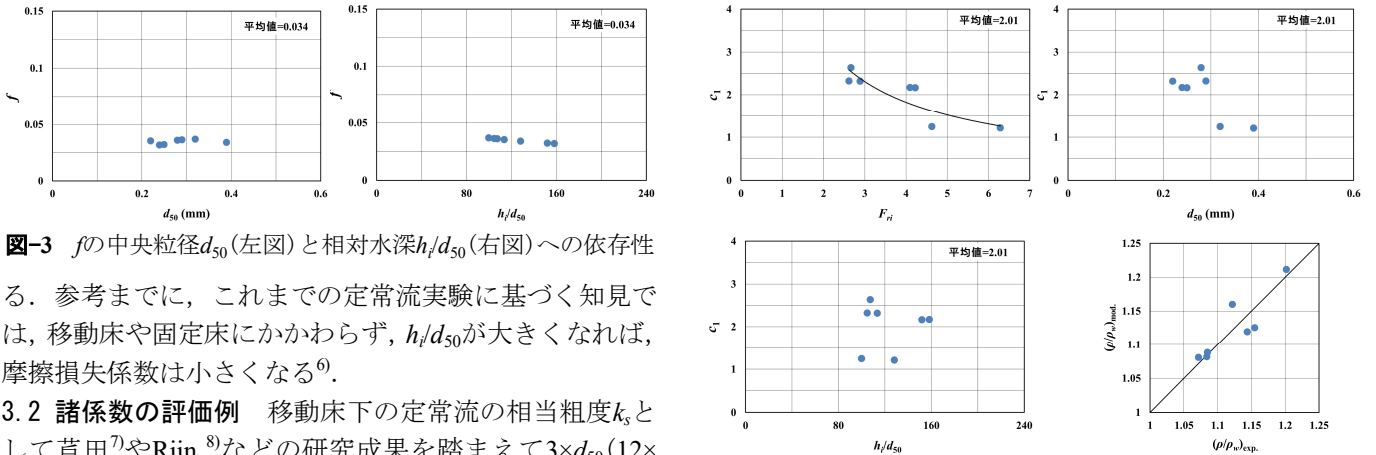


図-3 f の中央粒径 d_{50} (左図)と相対水深 h/d_{50} (右図)への依存性

る。参考までに、これまでの定常流実験に基づく知見では、移動床や固定床にかかわらず、 h/d_{50} が大きくなれば、摩擦損失係数は小さくなる⁶⁾。

3.2 諸係数の評価例 移動床下の定常流の相当粗度 k_s として芦田⁷⁾やRijn⁸⁾などの研究成果を踏まえて $3 \times d_{50}$ ($12 \times d_{50}$ 程度になり得る⁸⁾), 抵抗則として広矩形開水路定常流の粗面則を採用すれば、 f は次式から評価される。

$$\frac{8}{f} = \left(6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^2 \quad (10)$$

式(8)と(10)から、補正係数 c_1 として次式を得る。

$$c_1 = \left(\frac{\rho}{\rho_w} - 1 \right) \frac{8}{f F_{ri}^2} = \left(\frac{\rho}{\rho_w} - 1 \right) \left(6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^2 \frac{1}{F_{ri}^2} \quad (11)$$

図-3に既報の実験結果に対して移動床下の定常流の抵抗則を仮定した場合の f の値及び d_{50} (左図)と h/d_{50} (右図)への依存性を示す。左図から、 f は d_{50} にほとんど依存していないことが判る。これは図-2の中央図に示したものと値もさることながら変化傾向も異なり、移動床下の定常流に対する抵抗則の採用が不適切であることを示している。図-2と3の両右図の比較から、移動床下の氾濫流における f_M は移動床下の定常流扱いにおける f より平均的に2倍程度大きいことが判る(後述の図-4参照)。

図-4に式(8)が既報の実験結果によく適合する場合の補正係数 c_1 の値及び F_{ri} (上図), d_{50} (中央), h/d_{50} (下図)への依存性を示す。図-4の左上図中の実線は d_{50} の影響を無視した暫定的な回帰曲線で、次式である(相関係数 $R=0.85$)。

$$c_1 = 5.7 F_{ri}^{-0.82} \quad (12)$$

図から、 c_1 はどの実験ケースにおいても1より大きいことが判る。これは当初予想と異なる。この主な理由として、本研究対象流れが定常流でなく、氾濫流であることが考えられる。氾濫流と定常流による結果の違いは f , c_1 , ρ に限ったことではない⁹⁾。 c_1 は F_{ri} や d_{50} が大きくなれば小さくなること、 h/d_{50} にほとんど依存していないことも判る。

3.3 ρ の簡易評価法 d_{50} , h_i , u_i と F_{ri} は既知とする。

式(8)と(9)から理解されるように、 f_M が評価できれば、 ρ も評価できる。評価手順は次の通りである。

図-4 c_1 の F_{ri} (左図), d_{50} (右図), h/d_{50} (下図)への依存性

Step 1: 式(10)から移動床下の定常流の f を評価する。

Step 2: 式(12)から c_1 を評価する (d_{50} の影響を無視)。

Step 3: 式(9),(10),(12)から得られる式(13)を用いて f_M を評価する。必要なら f_M と式(9)から n_M を評価する。

$$f_M = c_1 f = 45.6 \left(6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{-2} F_{ri}^{-0.82} \quad (13)$$

Step 4: 式(8),(9),(13)から ρ を評価する。

図-5に ρ に関する実験値とモデル値(式(8)と(13))の比較を示す。図から、当然のことながら両者はよく一致していることが判る。氾濫流の非定常性は千差万別である。式(12)は既報実験の氾濫流のみに適用できるものである。

4. おわりに (1) ρ は F_{ri} と d_{50} に依存し、 d_{50} が大きくなれば、小さくなることを理論的に示した。(2)移動床下の氾濫流の f_M の値を例示した。値は移動床下の定常流の2倍程度であった。(3)移動床下の定常流の相当粗度 k_s として $3 \times d_{50}$, 抵抗則として広矩形開水路定常流の粗面則を採用し、これらから得られる f を c_1 倍して f_M を評価し、式(8)から ρ を評価する方法を提示した。(4)土砂の断面平均濃度 C_m ($\propto \rho$)を測定する実験(推定する現地調査¹⁰⁾)を実施するならば、本研究の方法は種々な氾濫流に適用可能である。

謝辞: 本研究の遂行にあたり科学研究費(基盤研究(C), 17K01320)の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献 1) 松富, 川島: 土木論文集B2, Vol.71, No.2, pp.355-360, 2015. 2) 松富, 今野ら: 土木論文集B2, Vol.72, No.2, pp.397-402, 2016. 3) 松富, 今野ら: 土木論文集B2, Vol.73, No.2, pp.373-378, 2017. 4) 松富, 岡田ら: 土木論文集B2, Vol.74, No.2, pp.265-270, 2018. 5) 高橋, 首藤ら: 海岸論文集, 46, pp.606-610, 1999. 6) 楊, 平野ら: 水工学論文集, 39, pp.483-488, 1995. 7) 芦田: 土木技術資料, Vol.1, No.7, pp.8-11, 1959. 8) Van Rijn L. C.: Jour. of Hydraulic Division, Proc. of ASCE, Vol.108, No.HY10, pp.1215-1218, 1982. 9) 松富, 小泉ら: 土木論文集B1, Vol.74, No.5, pp.1225-1230, 2018. 10) 松富, 鎌滝: 東北地域災害科学研究, 55, 2019. (印刷中)