

京都大学大学院 学生員 中野 晋
 京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学工学部 正員 辻本 哲郎

1. まえがき 混合砂の粒径別限界掃流力についてはEgiazaroff式¹⁾あるいはその茅田道正による修正式²⁾が頻用され、実験値と比較的良く適合しているが、相等砂粗度の合理的な決定、粒径別流砂量が単に $S_i \equiv d_i/d_m$ (d_m : 平均粒径) だけで決まり粒度分布の(かたさ)の効果がはいっていないことなど、明らかにされなければならない問題がいくつに残されている。著者は混合砂れきの流送問題に関しては混合砂の粒度分布とそれによって決定されるはずである混合砂れき床面の物理的特性についての詳細な議論³⁾なしには充分満足のゆく解決が得られないとの判断から、ここでは主として粒度構成に着目して混合砂の粒径別限界掃流力の問題を検討した。

2. 移動限界 限界掃流力付近での初期移動形式としては、粒径の余程小さいものを除いては概ね転動と仮定し得た⁴⁾う。このとき、粒径 d_i の砂の移動限界流速 $U_{bc i}$ は、ぬけ出し角を β_i 、抗力係数を C_D 、揚力抗力比を R_1 とすると、 $U_{bc i}^2 / \{ (0.1 - 1) g d_i \} = (2 A_2 / C_D A_2) \cdot \{ \sin \beta_i / (R_1 \sin \beta_i + \cos \beta_i) \}$ (1) となり、流速分布に相等砂粗度 R_s の粗面流れに対する対数則を用い、粒径 d_i の砂に対する代表流速をその粒子の中心位置での流速とし、この高さを adi とすると、粒径 d_i の砂の移動限界での無次元掃流力は、 $\tau_{*ci} = (2 A_2 / C_D A_2) \cdot \{ \sin \beta_i / (R_1 \sin \beta_i + \cos \beta_i) \} / \{ f_* \ln(30.1 adi / R_s) \}^2$ (2) で与えられる。均一砂の場合の無次元掃流力を同様と考え、この比をとると次式が得られる(添字0は均一砂に対する値)。 $\tau_{*ci} / \tau_{*c0} = f_E(\beta_i) \cdot [\ln 30.1 a_i / \ln 30.1 a_0 (\eta_m / \eta_e) S_i]^2$ (3) ただし、均一砂の場合の R_s は粒径に等しいとしてあり、また $f_E(\beta_i) \equiv \{ (R_1 \sin \beta_i + \cos \beta_i) / \sin \beta_i \} \cdot \{ \sin \beta_i / (R_1 \sin \beta_i + \cos \beta_i) \}$ (4)、 $S_i \equiv d_i / d_m$ 、 $\eta_m = d_m / d_{50}$ 、 $\eta_e = R_s / d_{50}$ である。なお $\beta_i = \beta_0$ とするとEgiazaroff式と、 $\beta_i = R_s / d_m$ として用いられることが多い。式(3)を見てもわかるように混合砂れきの限界掃流力の評価には粒径別ぬけ出し角とその効果($f_E(\beta_i)$)、粒径別存在高さ(adi)及び混合砂床の相等砂粗度の検討が必要である。

3. 粒度分布と混合砂床面状態 (adi 及び $f_E(\beta_i)$ の検討) 異種の粒径の粒状体 (granular material) で構成される床面の状況を正確に把握し記述するのは容易でない。そこでここでは一次元的に面列されたモデルを考え、シミュレーションによって床面状態の特性記述を試みた。まず「粒度分布(重量基準) $p(d)$ を表面露出面数分布 $\hat{p}(d)$ に変換⁵⁾」、この分布関数の逆関数を解く方法で「様乱数を $\hat{p}(d)$ に従う乱数に変換し、これを直径とする半球を一列に並べた仮想の基本路床を作成した。そしてこの上に各粒径粒子が与えられた確率で載った状況を実際の混合砂床と考える。これによって各粒径ごとにその存在状況(基本路床構成粒子の中心を結んだ線上からの上載粒子の中心高さ h_i)、およびぬけ出し角 β_i を上載可能な限りにおいて調べた。ここでは $p(d)$ として図-1(a)に示すような対数正規型のもと、図-1(b)に示すような累積確率が片対数紙上で直線となるもの(OPQR型と呼ぶ)の2種類の分布形を対象とし、 $\sigma_g \equiv \sqrt{d_{90}/d_{10}}$ を分布のひろがりを示すパラメータとした。まず、図-2に粒径別の存在高さの平均値 $\bar{y}_i$ についての結果が示されている(図-2はすべて表面面数分布中央粒径 $\hat{d}_{50}$ で規格化してある)。対数正規型、OPQR型を問はず「また σ_g の値にかかわらず」いずれの結果も図の破線 ($\hat{d}_{50}$ の均一砂床の上に各粒径粒子を上載した場合の理論曲線、 $\bar{y}_i / \hat{d}_{50} = \sqrt{\{ (d_i / \hat{d}_{50})^2 + 1 \} - 1} / 2$ (5)) と概ね良く合致している。ところで式(2)で用いられる存在高さ adi は対数則の基準面からの高さであり、いま基準面の位置は合理的に推定し得ないが、図-2の結果から概ね $a = 0.5$ (6) が期待できる。一方シミュレーションで得られるぬけ出し角の粒径別平均値 β_i の正弦値と $S_i \equiv d_i / \hat{d}_{50}$

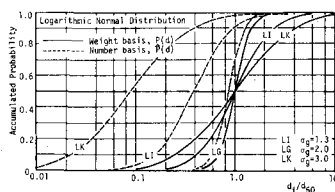


図-1(a) 対数正規分布

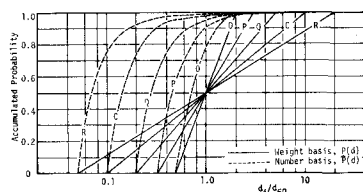


図-1(b) OPQR型分布

との関係は図-3に示され

(対数正規型に対する結果を曲

線群で表示), 今でもここに

した $f_E(\beta_i) \sim \xi_i$ を図-4に

示した (Chepilの実験結果を参考

に $\beta_1 = 0.85$ とした)。ところで

式(3)は一般に ξ_i の関数で

表わされ, ξ_i は $\xi_i = \xi_i / \xi_m$

と変換される。 ξ_m は対数

正規型, OPQR型に対し,

$\xi_m = \exp(-\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_g^2) \dots (7)$

$\xi_m = \{(\sigma_g^{1.47} - \sigma_g^{-1.47}) / 2.94 \ln \sigma_g^2\} \sqrt{(\sigma_g^{2.94} + \sigma_g^{-2.94}) / 2} \dots (8)$ で与えられる。 さて,

$f_E(\beta_i)$ は初期移動型式を滑動(表面滑動)とすると静止摩擦係数 μ_s の比と

なる。 $d_i = d_m$ に対する値 $f_E(\beta_m)$ を計算すると 図-5に示すように土屋⁵⁾

が実験した混合砂の平均的な静止摩擦係数の均一砂のそれとの比についての

実験値とよく合致し, 流体力の効果は別として, 混合砂の方が移動しやすい

状況であると判断される。

4. 混合砂れき床の相等砂相度の評価

対象とする混合砂れき床と

流速分布及び単位面積当りに露出している粒子に働く抗力の総和が共通

の仮定の下で砂床を考慮, その粒径を混合砂床の相等

砂相度 k_s とする。均一砂の場合, その粒径と k_s とが等

しいと考えると 次の等式が成立することになる。

$$\sum C_{pi} u_{bi}^2 A_{di} k_s^2 \times \frac{1}{A_s k_s^2} = \sum \frac{E_i C_{pi} u_{bi}^2 A_{di} z_{pi}}{A_s d_i^2} \dots (9)$$

ただし, 右辺は $d_i > (k_s / 30.1a)$ についての総和とする。

式(9)で遮蔽係数 E_i , 抗力係数 C_{pi} を各粒子について

共通の均一砂の場合と同値と仮定し, 粗面上流れに

対する対数型を適用すると, $\eta_e \equiv k_s / d_{50}$ について次の方

程式が得られる。 $A(\eta_e) \ln^2 \eta_e - 2B(\eta_e) \ln \eta_e + C(\eta_e) = 0 \dots (10)$ ただし,

$A(\eta_e) = 1 - P(30.1a / \eta_e)$, $B(\eta_e) = A(\eta_e) \ln 30.1a + E'[\ln \eta]$, $C(\eta_e) = 2(\ln 30.1a) E'[\ln \eta]$

$+ E'[\ln^2 \eta] - P(30.1a / \eta_e) \ln^2 30.1a$, $P(x) = \int_0^x p(\eta) d\eta$, $E'[x] = E[x] - \int_0^{\eta_e / 30.1a} x p(\eta) d\eta$

$E[x] = \int_0^x x p(\eta) d\eta$ である。式(10)の解としての $\eta_e \equiv k_s / d_{50}$ の σ_g に対する変化は図-6に

示される通りで, 従来採用されている d_m / d_{50} , d_{65} / d_{50} よりも σ_g に対する変化は緩やかである。

5. 混合砂れきの粒径別限界掃流力

式(3)において $f_E(\beta_i)$ は図4で, η_e は図6

で, η_m は対数正規型, OPQR型に対しそれぞれ $\eta_m = \exp(-\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_g^2)$, $\eta_m = \{(\sigma_g^{1.47} - \sigma_g^{-1.47}) / 2.94 \ln \sigma_g^2\}$

で与えられる。対数正規型に対する $\tau_{ci} / \tau_{co} \sim S_i$ を図-7に示した。

図-7には $\sigma_g = 2.31$ の砂を用いた平野の粒径別流砂量の実験値⁶⁾ から推定された粒径別

限界掃流力, $\sigma_g = 1.2 \sim 2.0$ の砂で単位時間当りの移動確率を実験した土屋の資料を整理

したものを示し, とくに S_i の大きいところで Egiazaroff 式⁷⁾以上の適合性が認められた。なお $S_i = 1.0$ とすると, 平均粒径の砂に

ついて言えば均一砂で存在するより混合砂として存在する方が移動しやすいことがわかる。今後更にモデルの細部を検討する予定である。

【参考文献】 1) Egiazaroff: Proc. ASCE, 1965, 2) 芦田 道正: 土木学会論文報告集, 1972, 3) 中川 辻本 中野 加賀田: 昭55年度支部年講, 1980,

4) Chepil: Soil Sci. Soc. Proc., 1961, 5) 土屋: 炭大防災研年報, 1953, 6) 平野: 土木学会論文報告集, 1971.

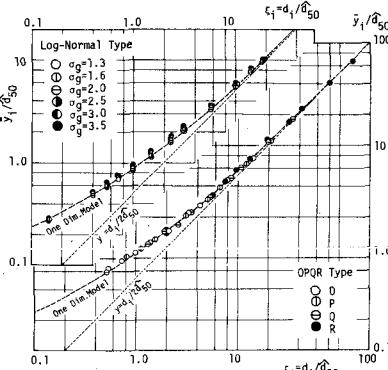


図-2 粒径別平均存在高さ

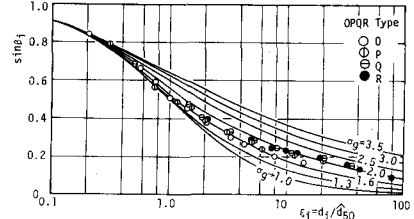


図-3 粒径別平均粒径比の正弦値

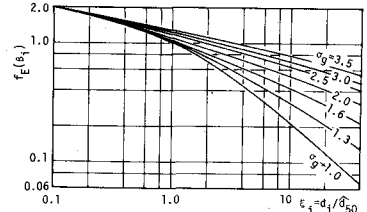


図-4 $f_E(\beta_i) \sim \xi_i$

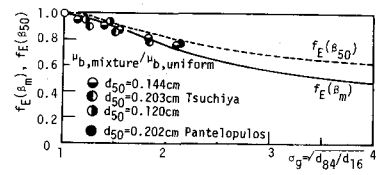


図-5 混合砂床の平均的な移動し易さの程度

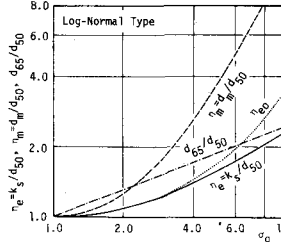


図-6 (a) k_s の評価
(a) 対数正規型の場合

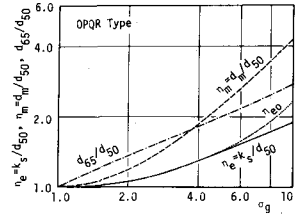


図-6 (b) OPQR 型の場合

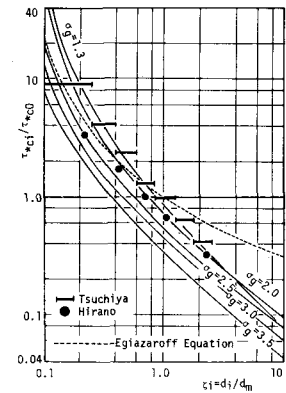


図-7 粒径別無次元限界掃流力