

徳島大学 工学部 正 員 岡部 健士
徳島大学 大学院 学生員 ○佐藤 昭二

1. まえがき 混合砂礫床の粒径別移動限界掃流力に対しては、すでに多くの表示式が提案されている。しかし、粒径範囲の広い混合床を用いた流砂実験の結果によると、既往の諸式は、平均粒径より大きい成分（本文ではこれを粗大礫と略記する）の移動限界掃流力を過大評価するようである¹⁾²⁾。これは、一部の砂礫が移動状態にある混合床表面では、いわゆる粗大礫の重心位が細粒成分のそれより相対的に高いことに起因していると思われる。本文では、この問題へのアプローチの第一歩として、粗大礫を円柱にモデル化し、その移動限界条件と露出状態との関係について実験的ならびに理論的に考察した結果を報告する。

2. 実験的考察

2-1 実験方法： 実験に使用した水路は、長さ7m、幅0.4m、深さ0.3m、 f_{flow} 勾配 1/400の矩形断面水路である。まず、実験水路に直径12mmのガラス球と直径 9mmの丸鋼棒を敷きつめて粗度付けを行なった。本実験に先立ちこの人工粗面の粗度特性を調べた結果、理論河床をガラス球の頂点より 2mm下方におくときに、相当砂粒粗度 k_s が 6.5mmになることが明らかにされた。ついで、水路下流端から2mの水路中央部に、直径が38mm、32mm、26mm、22mm、18mmで長さ l が直径に等しい円柱の礫モデルを、それぞれについて数種の露出状態で河床に置き（図-1）、礫モデルが転がり出した時の摩擦速度 u_{*i} を計測した。

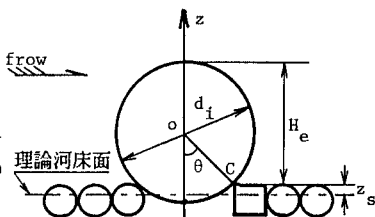


図-1 礫の模式図

また、これとは別に3成分荷重計（定格10kg）を用いて38mm、32mm、26mmの円柱のそれぞれについて、種々の露出高さ H_e で吊り下げて作用する流体力の抗力 D と、揚力 L を実測した。ただし、流体力は荷重計の定格に比べて非常に小さい値なので、計測に際しては力の増幅装置を作成して用いた。

2-2 実験結果： まず、抗力係数 C_D および揚力係数 C_L の実測結果を図-2、

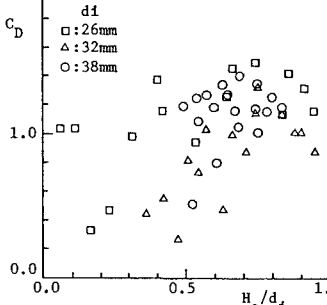


図-2 抗力係数と露出度の関係

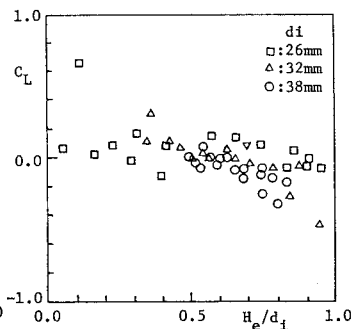


図-3 揚力係数と露出度の関係

3に示す。 D および L の有効は、それぞれ $H_e \cdot l$ および $d_i \cdot l$ とし代表流速は礫モデル中心の高さにおける流速とした。 C_D は H_e/d_i の増加とともに増加する傾向がみられるが、 $H_e/d_i \geq 0.6$ ではほぼ一定の値（ ≈ 1.2 ）になっている。一方、 C_L は H_e/d_i が増加するとわずかに減少する結果となっている。なお、 $C_L < 0$ となるのは、礫モデルを越える流れがその背面においても剝離せず、下向きのせん断力を及ぼしているためと思われる。

つぎに礫モデルの移動限界について述べる。表-1と図-

表-1 実験結果

粒径	$\theta (^{\circ})$	48.5	45.1	40.3	34.8	—
38mm	$u_{*}(\text{cm})$	3.82	3.56	3.24	2.92	—
粒径	$\theta (^{\circ})$	49.5	46.1	39.8	36.3	—
32mm	$u_{*}(\text{cm})$	3.51	3.22	2.77	2.70	—
粒径	$\theta (^{\circ})$	46.2	41.1	36.9	30.5	—
26mm	$u_{*}(\text{cm})$	3.51	3.07	2.82	2.55	—
粒径	$\theta (^{\circ})$	49.8	46.3	41.0	34.2	29.2
22mm	$u_{*}(\text{cm})$	3.70	3.22	2.78	2.41	2.28
粒径	$\theta (^{\circ})$	49.9	45.6	40.9	35.8	31.2
18mm	$u_{*}(\text{cm})$	3.38	2.87	2.55	2.13	2.03

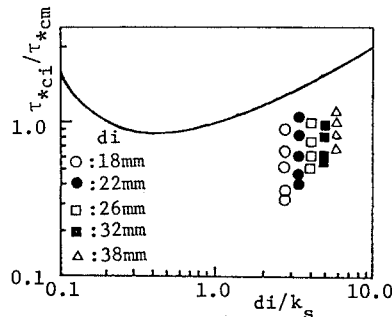


図-4 実験値とEgiazaroff式の比較

4に実験結果をとりまとめて示している。図-4の縦軸は、実測の $u_{\cdot oi}$ と d_i によって決まる礫モデルの無次元限界掃流力 $\tau_{\cdot oi}$ と k_s に対応する無次元限界掃流力 $\tau_{\cdot om}(=0.05)$ の比であり、横軸は粒径比 d_i/k_s である。また、図中には比較のために、Egiazaroff式を描いている。描点群はEgiazaroff曲線よりもかなり下方に分布していることに注目される。

3. 理論的考察 図-1の粗大礫モデルの安定性を考える。本図において、C点:回転離脱の回転中心、Z:理論河床面から水深方向にとった座標、 Z_s :理論河床面からガラス球頂面までの高さ、 θ :Z軸とOCのなす角(礫の抜け出し角)を示す。

$$D = (1/2)\rho C_D (H_e/1) u_r^2 \quad (1)$$

$$L = (1/2)\rho C_L (d_i/1) u_r^2 \quad (2)$$

$$W = (\sigma - \rho)g(\pi/4)d_i^2 l \quad (3)$$

$$D(1/2)d_i \cos \theta + L(1/2)d_i \sin \theta = W(1/2)d_i \sin \theta \quad (4)$$

$$u_r = u_r + k_t u_r' \quad (5)$$

$$u_r'/u_* = U_r' = 2.3 \exp[-z/h] \quad (6)$$

粒子に作用する流体力は、(1)・(2)式で示される抗力 D と揚力 L であり、いずれも円柱の

$$\phi = u_r/u_* = (1/\kappa) \ln \{ (H_e + z_s - d_i/2)/k_s \} + 8.5 + k_t U_r' \quad (7)$$

中心Oに作用すると仮定する。また W を水中重量とすると、 W の作用線はZ軸から河床勾配 θ_b だけずれるが、 $\theta_b \approx 0$ とすると、そのZ方向成分は(3)式のようにになる。ここに、 σ :礫の比重である。以上のような作用力についてC点まわりのモーメントの釣り合い式をたてると、(4)式のようにになる。つぎに、 u_r について考える。 u_r としては球の中心高さの流速を採用することにするが、乱れがあることを考慮して、それをまず(5)式のように表示する。ここに、 u_r および u_r' はそれぞれ粒子の中心の高さにおける時間平均流速および乱れ強度、 k_t :乱れの作用時間と離脱に要する時間の関係などから定めるべき係数である。さらに、 u_r' に対してはたとえば称津³⁾式による(6)式などが、また、 u_r に対しては完全粗面の対数型分布則が適用できるものとする、乱れを考慮した代表流速の無次元表示 $\phi \equiv u_r/u_*$ は(7)式のように書かれる。そして、以上の(1)~(3)式および(5)~(7)を(4)式に代入して整理すると次式が得られる。

$$\tau_{\cdot oi} = \frac{u_{\cdot o}^2}{sgd_i} = \frac{\pi \sin \theta}{\phi^2 \{ C_D (\cos \theta + 1) \cos \theta + 2 C_L \sin \theta \}} \quad (8)$$

ここに、 s :水中比重である。

実験結果と(8)式で示される移動限界曲線を図-5に示すように $\theta \sim u_{\cdot o}$ 関係図上で比較検討してみた。ここで、(8)式の $u_{\cdot o}$ を求めるにあたっては、(5)式の k_t の決め方が問題となる。 k_t の値は乱れの大きさがたかだかその標準偏差 u_r' の3倍程度であることより、 $k_t = 0 \sim 3$ の範囲であると考えられるが、現時点において筆者らはそれを確定する手段を得ていない。そこで、各 d_i ごとに3種~4種の k_t の値を用いた曲線を描いている。なお、理論曲線が途中から始まっているのは、それより小さい θ のときは計算上移動限界時の水深が露出高さよりも小さくなってしまい、(1)~(3)式の表示と矛盾が生じるためである。さて、図-5より、 k_t を適切に与えれば(8)式がかなり良好に現象を説明し得ることがわかる。また、礫モデルが小さくなるほど適切な k_t の値が大きくなる傾向がみられる。これは、小さいモデルほど流速の乱れに追従しやすいためと考えられる。

5. 結論 以上、粗大礫の移動限界に関する実験の結果に基づき著者の式を検討した結果、その妥当性が検証できた。今後は更に礫の初動状況の観測実験を行い、礫の離脱に要する時間と乱れの作用時間との対比がいかなるものであるかを明らかにして、 k_t の値をより信頼性の高いものにしたい。

《参考文献》 1)土木研究所:土木研究所資料,第1390号,1978 2)岡部・佐藤:中四年講,1987 3)称津:京大学位論文,1977

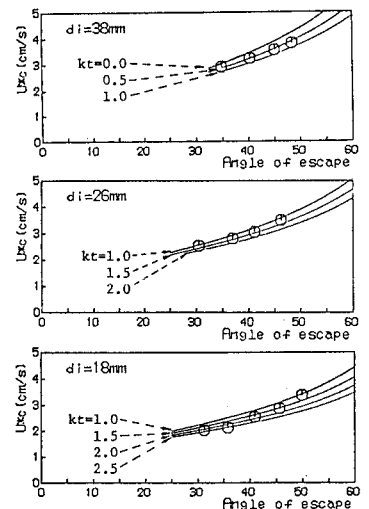


図-5 著者の式と実験値の比較