

二粒径で構成された混合砂河床上の抵抗特性と流砂量に関する実験的研究

名城大学 正会員 ○溝口 敦子

1. はじめに

流砂研究は古くから行われ、1970年代ごろまでに現在の流砂量算定にかかわる知見が数多く提案された。現在、多様な粒径の砂で構成された河床（以下、混合砂河床）上の流砂量の算定には、一般的に、粒径別限界掃流力および掃流力を見積もり、それらを用いてたとえば芦田道上式¹⁾により粒径別流砂量を計算する。また、河床変動を計算する際には、平野の交換層理論²⁾が援用される。しかし、上記枠組みには様々な課題が残っており、最近では、計算技術の向上を受け直接個々の砂の動きを算出し流砂量を算定しようとする研究³⁾も行われている。本稿では、まず、一様粒径で構成した河床（以下一様砂河床とする）で使用する材料の基本情報を収集した後で、二粒径で構成した混合砂河床上で流砂量および抵抗則を調べる実験を実施し、流砂挙動と表層構造の重要性について検討する。

2. 一様砂河床における粗度・流砂量特性把握実験

実験では河床材料として図-1に粒度を示す三河硅砂3号（平均粒径2.1mm程度、以下粗砂と表現）と5号（平均粒径0.55mm程度、以下細砂と表現）を使用する。ここでは、各材料をそれぞれ平坦に敷均し長さ9mの移動床区間を設け、勾配1/200に設定した幅20cmの水路を用いて様々な流量で通水することで、水深、流量、流砂量の計測を行った。この実験の結果について抵抗則への適合性を調べた結果、図-2のようになり、粗砂は等価砂粗度 k_s を平均粒径の3倍程度、細砂は10倍程度とした対数則から導かれる平均流速公式（Keulegan式）によく合うことが分かった。また、流砂量も計測し、芦田道上の流砂量式への適合性を確認したところ、図-3のようになった。ここでは、通常用いられる係数17を粗砂は12.5、細砂は9.0に修正するとよく合うことが確認された。なお、限界掃流力は芦田らにより提案されているように0.05がよく適合し、粒径別無次元限界掃流力に修正する必要がないことが確認された。

3. 混合粒径河床における流砂量、粗度特性に関する検討

次に、混合粒径における粗度および流砂量特性を調べるために、2章と同じ水路を用いて実験を行った。河床には2章で特性を調べた粗砂と細砂を2:8, 5:5, 8:2で混ぜ合わせた材料を敷均し、それぞれCaseA, B, Cとした。それぞれの河床で流砂が生じない流量から5~10mm程度ずつ水深を変化させ通水し、表-1で示す条件で、水位、流砂量などの計測を行った。実験結果を粒径別無次元掃流力、無次元流砂量で整理したものが図-4となる。ここでは、芦田道上による粒径別流砂量式の係数17を2章で得られた係数にそれぞれ修正し、粒径別無次元掃流力には岩垣公式より算出したものにEgiazaroffの修正を加え算出した表-2に示す値を用いた。図-4によると、ある一定の範囲で流砂量式に沿った関係が見出されるものの、対象とする材料粒径 d_i と平均粒径 d_m の比 d_i/d_m が2より大きい場合に粒径別無次元掃流力が小さくても流砂量が多くなる。このとき、通常の算定理論では流砂量が0とされる流量でも値が確認された。一方で、 d_i/d_m が1程度以下の場合は実際の

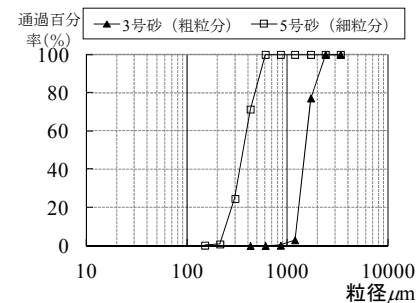


図-1 実験で使用了材料の粒度分布特性

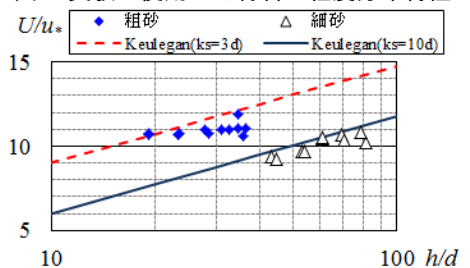


図-2 粗度特性

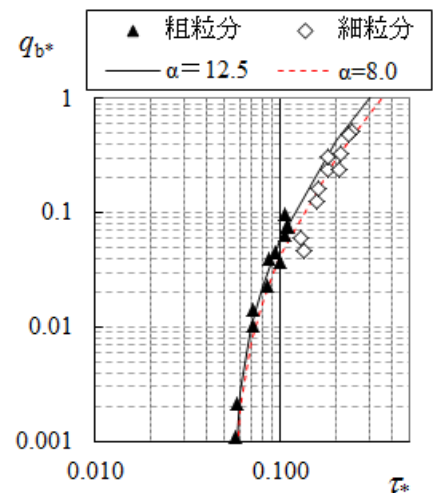


図-3 流砂量式への適合検証

キーワード 混合粒径河床、無次元流砂量式、粒径別流砂量、粗度抵抗

連絡先 〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501 名城大学理工学部 TEL 052-832-1151

表-1 実験での通水流量と計測値

河床材料における粗砂と細砂の割合		流量($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	平均水深(m)	流砂量(3号砂) ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/0.2\text{m}$)	流砂量(5号砂) ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/0.2\text{m}$)
2.8	CaseA1	0.473	0.008	0.000	0.000
	CaseA2	0.877	0.013	0.023	0.066
	CaseA3	1.215	0.017	0.069	0.194
	CaseA4	1.992	0.024	0.279	0.593
5.5	CaseB1	0.642	0.010	0.000	0.000
	CaseB2	1.125	0.017	0.001	0.009
	CaseB3	1.667	0.022	0.040	0.052
	CaseB4	2.333	0.027	0.257	0.187
8.2	CaseC1	0.987	0.017	0.000	0.000
	CaseC2	2.315	0.028	0.004	0.001
	CaseC3	3.178	0.033	0.044	0.019
	CaseC4	4.027	0.039	0.600	0.138

表-2 平均粒径および各粒径で算定される
限界無次元掃流力

	τ_{*cm}	τ_{*cb} (粗砂)	τ_{*cs} (細砂)
CaseA	0.0340	0.0489	0.0302
CaseB	0.0357	0.0423	0.0301
CaseC	0.0404	0.0426	0.0343

流砂量が流砂量式より算定される値より少ない傾向であった。芦田ら¹⁾は論文で d_i/d_m が 1 以上で理論曲線に実験値が合わないことを示唆していたが、本実験では、 d_i/d_m が 2 以下の場合と 1 以下の場合にそれぞれずれが生じていた。

次に、混合砂河床における粗度特性を図-5 に示す。この図から、CaseC 以外は単純に等価粗度を表すのが難しいことがわかる。CaseC は比較的表層にある粗砂により抵抗が決定されるため、平均粒径または粗粒分の粒径で等価粗度を評価できた。それ以外は、流砂状態によりそれぞれの表層存在状態が変わりうるため、単純に河床材料の平均などでの評価が難しい可能性が示唆された。

3. 流砂量、抵抗則における流砂挙動・表層構造の重要性

上記結果と実験時の流砂挙動を踏まえ、流砂量・抵抗則について考察する。動的粗粒化などが指摘されているように、流砂現象が起こる際には表層の粒度状態は河床の粒度から変化する。例えば、細砂が多く存在する場合には粗砂は細砂の流れの上を流れる。流砂量式や抵抗則にはこうした流砂挙動を何らかの形で取り込む必要があり、例えば、流砂挙動によって変化する表層粒度構造により停止限界が決まると考えられる。中川ら⁴⁾の検討を参考に単純な表層構造を仮定し粒径別限界掃流力の修正を行うと粗砂が細砂の上に載っている場合は 0.45 倍、粗砂の上に細砂が載っている場合は 1.6 倍となる。一方で実験結果について掃流砂量式を合わせるべく限界掃流力を修正すると CaseA では粗砂、細砂をそれぞれ 0.8 倍、1.1 倍、CaseB でそれぞれ 0.9 倍、1.2 倍、CaseC では細砂を 1.5 倍する必要があるが出てくる。これは極端な構造を考え求めた値の範囲にあり、混合砂河床においては、流送時の表層構造を考え停止限界を考えることが重要とわかる。

ただし、同じ構成材料でも流量によって流砂挙動が変化し表層構造が決まることも考えられ、それゆえに河床の凹凸が変化し、図-5 のように抵抗則の一般的な検討ができない可能性もある。少なくとも混合砂河床では各粒径の挙動と表層構造が鍵を握っていると考えられ、今後その決定方法について検討をしていく必要がある。

参考文献

- 1) 芦田・道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 206 号，pp.59-69，1972.
- 2) 平野：Armoring を伴う河床変動について，土木学会論文集，No.195，pp.55-65，1971.
- 3) 福田・福岡・内田：移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.69，No.4，pp.I_10151-I_1056，2013.
- 4) 中川・辻本・中野：混合砂れき床の粗度と粒径別移動限界，第 25 回水理講演会論文集，pp. 67-72，1981.

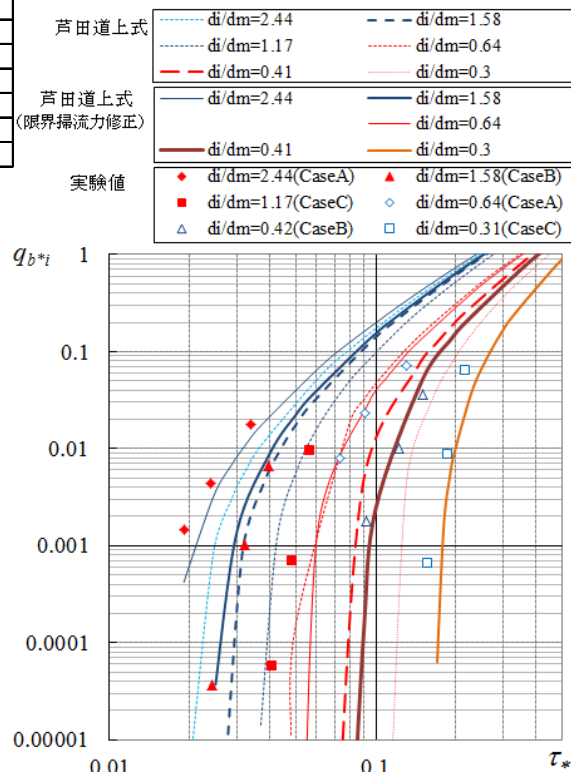


図-4 粒径別掃流砂量式と実験値の関係

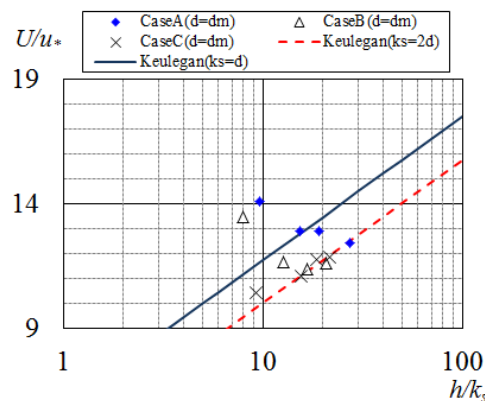


図-5 抵抗則の検討