

混合砂の分級と河床波の形成過程の相互作用に関する実験的研究

Experimental Study on Interaction between the Sorting of
Sand Mixtures and the Development of Sand Waves

三輪 浩*・大同淳之**

by Hiroshi MIWA and Atsuyuki DAIDO

The interaction between the sorting process of sand mixtures and the development process of sand waves is discussed by using the sorting model at the crest of sand waves. In this study, the first, we discuss the developmental property of sand waves with sorting of sand mixtures. The second, propose the sorting model considering the movement of sand particles around the crest which defines the wave height. Finally, consider the physical model for the interaction between the particles and the sand waves, and the intrinsic particle size.

Keywords: sand mixtures, alternate sorting, sorting, interaction, sand waves

1. 緒 言

混合砂河床の流砂機構に関する従来の研究は、主に河床形態の存在しない平坦床を対象として行われてきた。しかし、河床波が存在するなど河床高さが場所的・時間的に変化する場に対しては現象の複雑さもあってほとんど行われていない。実河川が平坦であることは稀であり、また少なからず混合粒径の砂礫で構成されているため、このような場での流砂機構を明らかにすることは土砂水理学の分野だけでなく河川工学上も重要である。著者らはこの問題に対しては混合砂の分級過程と河床形態の変形過程の2つの現象の相互作用を明らかにする必要があると考える。すなわち、河床高さの場所的な変動が及ぼす粒子の分級効果と時間的な変動が及ぼす分級の伝播特性を考える必要がある。本研究では河床形態としてlower regimeで形成される河床波(砂堆)を対象とする。そして、まず河床波の形状および移動特性と河床の粒度分布特性について考察し、粒子の分級過程が河床波の形成に及ぼす影響について検討する。ついで河床波の波高を規定する前縁部に着目し、粒子の分級機構とその支配パラメーターに関する検討を行う。最後に河床波の発達過程と粒子の分級過程の相互作用とその支配粒径について考察する。

* 正会員 工修 舞鶴工業高等専門学校助手 土木工学科
(〒625 京都府舞鶴市白屋234)

** 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
(〒603 京都市北区等寺院北町56-1)

2. 実験概要

実験に使用した水路は、長さ6.5m、幅20cm、高さ30cmのアクリル樹脂製循環式可変勾配水路である。河床材料は図-1に示すような粒度分布を有する3種類の砂である。このうち、 M_a 、 M_b は混合砂であり、いずれもほぼ均一な2種類の砂を混合している。なお、 M_a は粒子の分級効果を識別し易くするために細粒子として粗粒子とほぼ同じ比重を有する白色の砂を用いた。

まず、河床波が発生・発達する過程および河床形状を調べるために以下の手順で実験を行った。河床材料を厚さ7cmに数均した後通水を開始して河床波を形成させ、水位を停水直前に、河床位と河床形状を停水後に測定することとし、これを通水初期から河床が平衡状態に達したと見なされるまで数回繰り返した。通水中には河床波の移動速度を適時測定するとともに、水路下流端において1波長分の流砂量も適時採取した。また、混合砂の場合には河床粒子の分級効果を調べるために、停水ごとに河床表面の砂を最大粒径程度平面的に採取するとともに、鉛直方向にも採取した。なお、全ての実験は全粒子が活発に移動するように設定されており、粒径、フルード数および砂粒レイノルズ数から判断して、本実験で形成される河床波は砂堆であることを確認した。

つぎに、移動床実験の結果からクレストでの粒子の挙動が河床波の発達に影響を及ぼすことが判明したので、ここでの粒子の分級機構を明らかにするため、波長が40cm、波高が1cmおよび3cmで前面が45°の傾きを有する三角形の河床波模型を水路に敷き詰めて固定床とし、トレーサー実験を行った。なお、河床波模型の表面にはサンドペーパーを張り付けて粗面としてある。実験は3種類のトレーサー粒子(T_1 : $d_m=0.21$ mm、 T_2 : 0.42 mm、 T_3 : 0.57 mm)を用い、それを模型の背面に薄く敷いて設定流量ごとの河床波前面での粒子の堆積量を測定することによって剥離域での粒子の堆積率 P_d (堆積量/河床波頂部の通過量)を算出した。

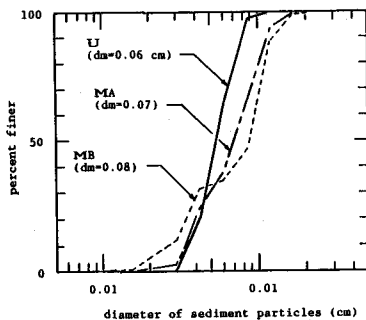


図-1 使用砂の粒度分布

3. 河床粒子の分級を伴う河床波の発達特性

3.1 混合砂による河床波の発生・発達過程と形状特性および移動特性

混合砂河床に形成される河床波に関する研究は少なく、得られている成果も乏しい。最も基本的である混合砂の効果が河床波の形成に及ぼす影響ですら明確に分かっていないのが現状であって、現段階ではまずその影響と主要因子を見つけ出すことが必要であると考え。鈴木ら¹⁾および Snishchenkoら²⁾はこの点に関して若干の実験的な検討を行っている。鈴木らは均一砂からなる定常な河床波が形成された河床の供給砂に、均一砂の平均粒径の3倍の平均粒径をもつ粗粒子を流量および給砂量を一定にしたまま5%加えた(d_m は9%増加)だけで波高が約40%低下することを確認した。一方、Snishchenkoら²⁾は同一の平均粒径をもつ均一砂と混合砂に対して同一の流量、勾配で通水して河床波を形成させた結果、混合砂の場合の波高が均一砂のそれに比べて小さいことを示した。波高に対するこのような傾向は流水抵抗や流砂量に影響を及ぼすものであり、Guyら³⁾や Kuhnleら⁴⁾も別の目的の実験から間接的にこの現象を確認し、指摘してはいるもののその機構については

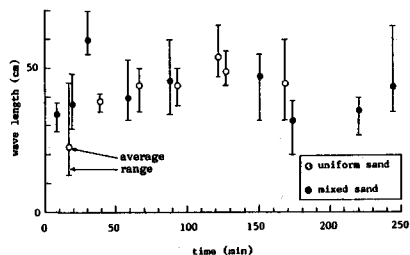


図-2 波長の経時変化

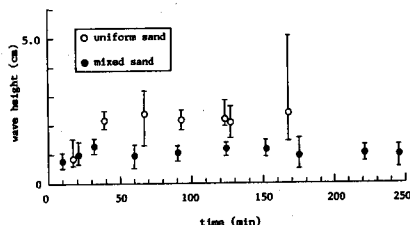


図-3 波高の経時変化

何ら検討されていない。

このような現象を明らかにするためには、まず波長をも含めた河床波の形成過程から検討することが必要であると考え、上記の研究からはこれに関する有力な情報は得られない。そこで、図-1に示した均一砂(U)と混合砂(M_a)を用い、流量8.0ℓ/sec、河床勾配1/400の条件で通水したときの河床波の波長と波高の経時変化について検討する。鈴木ら¹⁾が行った実験が混合砂が及ぼす河床波の変形現象を扱っているのに対して、本実験は形成過程を扱っていることになる。図-2は波長の経時変化を示している。混合砂の場合の波長は通水の初期においては均一砂の場合よりも大きい、その後の成長は顕著ではないことがわかる。実験の観察においても混合砂の場合は、均一砂のように小さな河床波が水路全体に発生し、これが成長するという過程をとらず、通水のごく初期を除いて比較的早い時期から波長の大きな河床波が形成された。しかし、安定状態の波長はどちらも水深の4~6倍程度であり、両者の差はほとんどなくなる。一方、図-3は波高の経時変化を示している。鈴木ら¹⁾の実験結果と同様、混合砂の場合の波高は低くなっている。また安定状態に達する時間も短い。

以上のことから、同一通水条件下であっても、混合粒径の効果が河床波の発達過程や形状に影響を及ぼすことがわかる。すなわち、河床波の形状が τ_* や h/d と密接に関係していることを考えると、波高の低下はこれらのパラメーターの減少と結びついていると考えられるから、上記の現象を支配する要因は粗粒子であること推測される。Snishchenkoら²⁾の実験は同一平均粒径で行われており、このことを端的に示唆している。

図-4は混合砂と均一砂について河床波の移動速度と掃流力との関係を示したものである。各移動速度とせん断応力は1つの実験の下で測定された結果の平均を示しているため、実験中の水理量の微妙な変化を追跡することはできないが、事実上大きな変化はなく、細かく区分して示しても平均値の周りに分布する。そのことよりも注目すべきことは、混合砂と均一砂の移動速度の違いである。各実験間のはらつきが大きく、一つの傾向を見いだすことは困難であるが、同一の掃流力下では混合砂の河床波の移動速度の方が均一砂の場合よりも大きいことがわかる。

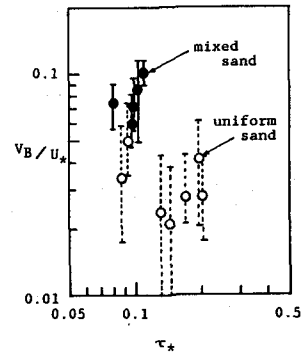


図-4 移動速度と掃流力の関係

3・2 河床波形成河床における粒子の分級特性

上述のような河床材料の粒度の違いによる河床形態の相違の機構を明らかにするためには、粒子の分級過程に着目し、これと河床波の形成過程の相互作用について検討する必要がある。

図-5は流量8.0ℓ/sec、河床勾配1/400で通水を開始し、222分経過した後の河床表層砂の粒度分布を示している。1つの河床波に対して、図-6に示す4つのパートから表層砂を採取した。ただし、背面とトラフ部は採取が困難で、その精度は高くない。なお、この時点では給砂量と流出砂量が等しく、またその粒度分布もほぼ等しくなっており、河床は平衡状態にあると判断できる。図より、河床波前面で粗粒化し、クレスト部で細粒化していることがわかる。また、河床波の背面およびトラフ部では給砂材料に近い粒度となっている。このように、平衡状態にある河床では河床波の形成に伴って縦断方向に交互分級が発生しており、河床波の移動に伴って下流に伝播する。これは河床高さが交互に変動し、これに伴って掃流力も

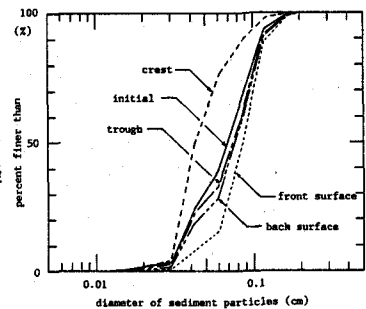


図-5 河床の粒度分布の場所的変化

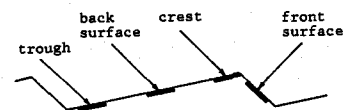


図-6 表層砂の採取位置

変化するためであると考えられる。すなわち、平均的には全粒子が活発に運動する条件であっても掃流力の小さい再付着点付近では粗粒子よりも細粒子の運動が活発で粒子はクレストに向けて掃流されてゆくが、一旦動き出した粗粒子は流れの早い流速域にさらされる（露出効果）ため、細粒子よりも早く移動（減摩効果）し、河床波の前面に落下する。すなわち、河床波の背面で運動する粒子は、たえず細粒子よりも粗粒子の方が移動速度は早いために河床波の前面は粗粒化し、クレスト部は細粒化することになる。そしてこのような状態が河床波の移動に伴って下流に伝播する。それゆえ、河床波の移動速度は交互分級の伝播速度をも表している。

河床高の変動を伴わない交互分級に関しては、池田・伊勢屋⁵⁾や Kuhnle・Southard⁴⁾が実験的に示し、辻本⁶⁾が線形不安定解析によって理論的に検討しているが、河床高変動を伴う本研究の場合には別途議論が必要である。

さて、河床波が形成される初期の段階では、粗粒子による前縁部の形成が見られる。そして、これをきっかけに上流から掃流されてきた粒子のうち前縁部に堆積する粒子によって波高が成長し、河床波が形成されていく。混合砂河床では河床表層での粒子の交換現象が分級効果を考える上で問題となるが、河床波の形成をとまなう場合には、さらに、1つの河床波を対象とした波高レベルの粒子交換を考える必要がある。

図-7は通水開始後152分後に形成された河床波に対して、その前縁部の鉛直方向の粒度分布を調べたものである。各層の区分は眼視によって粒度分布が同じであると判断される層を1つの粒径集団として採取し、図-8のように表層からlayer I、layer II、・・・と呼ぶことにする。layer Iはクレスト部であり細粒化しているが、layer IIは河床波前面での粗粒子の堆積によって粗粒化しており、それより下のlayer IIIでは初期河床とほぼ同じ粒度分布を示している。このような前縁部の粗-粗-元河床といった互層はどのような過程によって形成されるのであろうか。このことを確かめるために、通水開始からの前縁部の粒度構成を図-9に示した。縦軸の z/Δ' は各停水時刻における河床波の波高 Δ' に対する前縁部下端からの高さ z を示しており、1.0がクレストを表す。図からわかるように、通水開始のごく初期を除いて上記3つの層はいずれの河床波形成段階においても波高に対してほぼ同一の位置関係にある。とくに、元河床の粒度分布が現れるlayer IIIの位置はほぼ前縁部下端($z/\Delta' = 0$)から下に存在しており、分級の効果が及んでいない。これは、河床波の発達・移動にとまなう粒子の交換現象が河床波の波高レベルで行われていることを示している。

さて、河床波の背面を掃流されてきた粒子のうち、その前面に堆積する粒子によって河床波の発達・移動が行われる。それゆえ、上述のような波高レベルの粒子交換現象はクレストでの粒子の分級の影響を受け、さらにこの影響は河床波の発達を通して副次的に波高の成長にも及んでいると考えられる。とくに、layer IIは河床波の発達・移動によってその前面に堆積した粒子であるから、この層はクレストでの

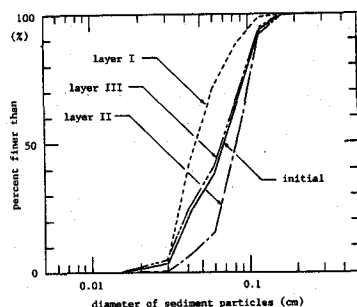


図-7 クレスト内部の粒度分布

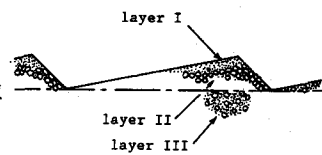


図-8 採砂層の名称

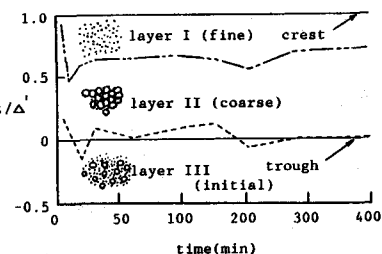


図-9 前縁部鉛直方向の構成粒子の経時変化

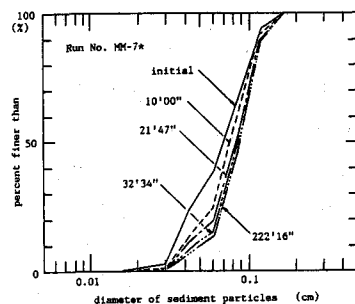


図-10 前縁部内部粗粒化層の粒度分布の経時変化

分級の影響を受けた粒子によって構成されている。それゆえ、この層の粒度分布の変化を時系列的に追跡し、波高の成長過程と比較することによって、クレストでの粒子の分級が波高の成長に及ぼす影響を調べることができる。そこで、図-10に通水開始からのlayer IIの粒度分布の経時変化を示した。通水開始後の比較的早い段階、この場合は30分程度で粒子の粗粒化はほぼ完了し、それ以後の粒度分布の変化はほとんどない。一方、図-3に示した波高の経時変化でもやはり30分程度で成長が停止しており、これら2つの現象がほぼ同時に収束していることがわかる。このことから、クレストでの活発な分級の進行は河床波前面の粗粒化を進行させているが、この分級効果を支配しているのはクレストにおける水理量であり、これが波高の成長にも影響を及ぼしていると考えられる。3. 1で述べたように、混合砂からなる河床波の成長に粗粒子の効果が主要な要因を占めているとすれば、波高が成長している間の分級効果は主に粗粒子の堆積率を増加させる方向に働いているといえる。すなわち、粗粒子は露出効果や減摩効果のために細粒子よりも移動速度が速く、粗粒子がクレストから落下・堆積し、細粒子がそれに追従する形で河床波の発達・移動が行われるので、粗粒子の堆積を主体としたクレストでの分級効果が進行している間は波高は成長しているが、分級効果が定常になった時点で波高の成長も停止すると考えられる。

4. 河床波頂部での非平衡分級とその支配パラメーター

波高の成長過程に粒子の分級現象が影響を及ぼしていると考え、特にクレスト部での粒子の挙動を明らかにすることが必要であることがわかる。クレスト部での粒子の挙動は、粒子自体の特性と剥離渦を形成する河床条件およびクレスト部の局所的な掃流力によって規定されると考えられる。本研究では粒子の特性として沈降速度、局所的な掃流力として河床波背面の底面せん断応力分布から得られるクレストの摩擦速度を用いることにする。

河床波の背面では、クレストから剥離した流れが再付着した点から河床に沿って新たに境界層が発達し、底面せん断応力はこれに規定される。そこで、次の境界層方程式をもとに底面せん断応力分布を算定する⁷⁾。

$$\frac{\partial (U \delta^*)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U^2 \theta) + U \delta^* \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\delta}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\tau_0}{\rho} \quad (1)$$

ここに、 U は境界層外縁流速、 δ^* は排除厚、 θ は運動量厚、 δ は境界層厚、 p は圧力である。

流れを定常と仮定し、水面波を無視して河床形状による水深変化を考慮すると式(1)は

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\partial}{\partial x} (U^2 \theta) + U \delta^* \frac{\partial U}{\partial x} + g \delta \lambda \quad (2)$$

となる。ここに、 λ は波形勾配である。

境界層内の流速分布としてベキ(1/6)乗則を、境界層外縁流速として中川・辻本⁷⁾による式(3)を適用すると、底面せん断応力分布は式(4)のように表される。

$$\frac{U}{u_*} = B \left(\frac{x}{h_n} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\frac{\tau_0}{\rho u_*^2} = \left(\frac{B}{A} \right)^2 C^{-2/(n+2)} \left(\frac{k_s}{h_n} \right) \left(\frac{x}{k_s} \right)^{n/(n+2)} \quad (4)$$

ここに、 $C = (m+1) \cdot (m+2) / A^2 / \{ (5m^2 + 8m + 4) / (2(m+2)) + (m+1) \cdot (m+2) \cdot Fr^{-2} \cdot B^{-2} \cdot \lambda \}$ 、 $m=6$ であり、中川・辻本によると、 $A=8.94$ 、 $B = \{ L/h_0 \cdot (1-5.1 \cdot \lambda) \}^{-1/2}$ である。

図-11は河床波背面の底面摩擦速度の分布形状について、本手法と中川・村上⁸⁾によるK-εモデルを用いた結果との比較を示している。本手法では再付着点付近で摩擦速度の増加が大きく見られているが、全体としては同じ傾向を示している。式(4)の妥当性を検討するためには掃流力分布を実測して計算結果と比較

すべきであるが、これは困難なので掃流力分布を一波長分積分して得られる摩擦抵抗によって検討することにする。河床の摩擦抵抗は次式で求められる。

$$\tau_0' = \rho u_{*'}^2 = \rho/L \int_0^{L-L_s} u_x(x)^2 dx \quad (5)$$

図-12に式(5)によって算定される摩擦抵抗とEngelund⁹⁾の抵抗分割法によって計算された結果との比較を示した。摩擦抵抗としての評価に限れば両者はほぼ同様の結果を与えることがわかる。

式(4)および式(5)から、クレストの摩擦速度と河床の摩擦抵抗との関係は本文で扱う範囲では次式で求められる。

$$\hat{u}_* = 1.5 u_*' \quad (6)$$

さて、本研究ではクレストでの粒子の分級を規定するパラメーターを、粒子を流下方向へ流そうとする力とクレスト前面に堆積しようとする力の比で評価する。前者にはクレストにおける摩擦速度 $\hat{u}_*$ を、後者には粒子の沈降速度 w_{0i} を用いて無次元パラメーター $\hat{u}_*/w_{0i}$ を導入する。図-13はトレーサー実験から得られたクレスト前面での粒子の粒径別堆積率と無次元パラメーターとの関係を示したものである。同図より、粒子の堆積率は同一の摩擦速度に対しても粒径によって異なっていることがわかる。また、このように整理すると河床波形状の影響は陰に $\hat{u}_*$ に含まれるため、堆積率は見かけ上この無次元パラメーターのみの関数として表すことができる。図-13より、両者の関係は次の指数関数で表される。

$$p_{di} = \exp \left\{ A \left(\frac{\hat{u}_*}{w_{0i}} - k \right) \right\} \quad (7)$$

ここに、 k は全粒子がクレストの前面に堆積する限界の条件に相当する値で、図より0.6とする。 $\hat{u}_*/w_{0i}$ がこれ以下の値を取る場合には全粒子がクレスト前面に堆積する($P_d = \sum p_{di} = 1.0$)ことになる。なお、 A の値は図-13より-1.2である。また、図中の"no motion"は粒子が移動しない条件の下限で、本実験の粒径範囲では $\hat{u}_*/w_{0i} = 0.24$ である。一方、"no sand waves"は上野¹⁰⁾が示した河床波の発生限界に相当し、 $\hat{u}_*/w_{0i} = 0.32$ である。

5. 河床粒子の分級過程と河床波の形成過程の相互作用とその支配粒径

3. で述べたように、混合砂河床における河床波は粒子の分級をともなって形成される。そして、与えられた条件下で平衡状態に達する。ただし、ここでいう平衡状態とはただ単に河床形状が不変であるということではなく、河床波の変形・合体・分裂といった不規則な波形の統計的性質および流れに対する抵抗特性、さらに個々の河床波の粒度構成が定常な状態を指す。

河床波の形成過程や変形過程における粒子の分級機構を詳細に議論するためには粒径別の流砂の非平衡性を考慮する必要があるが現時点では困難である。しかし、粒子の分級と波高の発達過程との関係について定性的には次のように考えられる。すなわち、実験の観察によると、通水開始直後から粗砂の停止による前縁線が形成される。これをきっかけに河床波が形成されるが、河床波の背面を掃流されて来た粒子のうちクレストでの分級効果によって河床波の前面に堆積する粒子によって波高が成長する。これまでの議論からこ

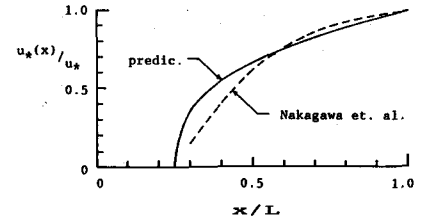


図-11 せん断応力分布算定法の検討

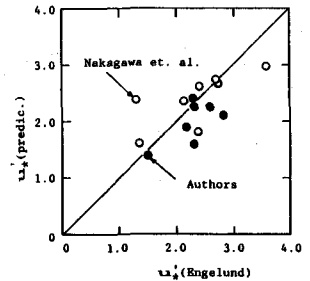


図-12 摩擦抵抗算定法の検討

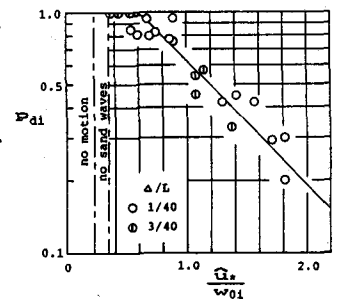


図-13 粒子の堆積率と無次元パラメーターの関係

の分級効果は主として粗粒子の堆積率の進行に寄与していると考えられるが、波高が成長している段階($\partial \Delta / \partial t > 0$)では形状抵抗の増加のため、 u_{*c} は減少($\partial u_{*c} / \partial t < 0$)傾向にあり、図-13からクレスト前面での粒子の堆積率は増加($\partial p_{di} / \partial t > 0$)することがわかる。しかし、クレストでの分級効果が平衡に達し、各粒径粒子の堆積率に変化がなくなる($\partial p_{di} / \partial t = 0$)と、もはや河床波の前面に堆積する粒子の粒度分布は変化しなくなり($\partial f_i / \partial t$)、このときに波高も一定($\partial \Delta / \partial t = 0$)となると考えられる。

このように、河床波の発達・移動にともなって波高レベルの粒子交換が行われ、これによる分級の効果がクレストでの水理量の変化を通して副次的に波高の成長に影響を及ぼしているといえる。このとき、河床波の成長に主要な影響を及ぼす粗粒子の評価のしかたが重要となる。それは、Snishchenko²⁾が示したように、同一平均粒径かつ同一通水条件下であっても、混合砂と均一砂では河床波の形状特性や移動特性に違いが生じる。それゆえ、平均粒径のみに着目した評価では分級機構を検討するような粒子レベルの議論に対しては有効な情報を得ることは困難であると考えられる。そこで、安定状態に達した河床波に対して、その波高の存在条件を満たすような摩擦抵抗を発揮する砂粒粗度に相当する砂の粒径を見つけ出すことにする。均一砂の場合には、平均粒径で扱って問題ないと思われるが、混合砂の場合には粗粒子が波高を規定する一要因になっていると考えられ、ここで見つけ出された粒径砂がこの粗粒子に相当する。

石川¹⁾は、河床波が成長を停止する限界状態では、クレスト部がそれ以上高くなることを抑制する効果が働いており、この条件はクレストの局所的な底面摩擦力によって表されると考え、Garde・Raju¹²⁾の研究成果を砂堆河床に適用し、次式を示した。

$$\tau_{*c} = 0.0147 \left(\frac{h_m - \Delta/2}{d_m} \right)^{0.532} \quad (8)$$

ここに、 τ_{*c} は波高の成長が停止する限界状態のクレストの無次元底面摩擦力、 h_m は平均水深、 d_m は平均粒径である。Garde・Raju¹²⁾は実河川のデータも扱っているので、式(8)は混合粒径に対しても適用できる。一方、クレスト部の底面せん断応力は式(4)で与えられる。実験から得られた平衡波高が、与えられた条件下での最大の波高に達していると仮定すると、式(8)から得られるクレストの底面摩擦力と式(4)から得られるそれとは一致するはずである。しかし、実際には式(8)から得られる底面摩擦力の方が大きい値を示すことになる。これは、式(8)が混合砂をも含めた広範囲なデータをもとに決められた実験式であるので、混合粒径の効果は式内に含まれているのに対して、式(4)は河床表層の砂粒粗度を平均粒径のみで表しているために粗粒子の挙動が問題となるクレストでの底面摩擦力の評価の際には粗度を小さく見積ってしまうからであると考えられる。波高の形成に影響を及ぼす粒子が粗粒子であるという考えに立てば、式(8)から得られる、波高の限界状態を示すクレストでの底面摩擦力と、式(4)から得られるそれが一致するような砂粒粗度が、ここで求めようとしている粗粒子粒径の最大値に相当することになる。

図-14は上記の方法で求められた粗粒子の粒径 d_c と流れ全体の無次元掃流力の関係を描点したものである。ただし、平均粒径で基準化されている。 $\tau_* < 1$ では均一砂と混合砂の区別は明確ではないが、 $\tau_* > 1$ では均一砂が1程度の比を示しているのに対して、混合砂では2程度となっている。このことから、波高の成長に支配的な粒径は平均粒径の2倍程度の粒径であるといえる。

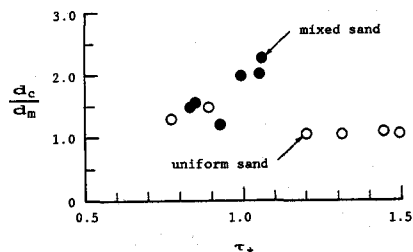


図-14 混合砂における支配粒径

6. 結 語

本研究は、粒子の分級過程と河床波の形成過程の相互作用について実験的に検討したものである。以下に、

本研究によって得られた結果について要約する。

(1)混合砂河床に形成される河床波の形状特性は粗粒子の影響を受けている。それゆえ、同一の平均粒径を有する均一砂と混合砂を対象として、同一の通水条件下で河床波を形成させても、混合砂の方は波高が低く、移動速度は速くなる。

(2)混合砂河床では、河床波の形成につれてクレストで細粒化し、河床波の前面で粗粒化する交互分級が発生する。そして、これは河床波の移動にともなって伝播するがその速度は河床波の移動速度に等しい。

(3)河床波の波高の成長は、その前面に堆積する粒子の粒度分布の変化の影響を強く受ける。これは、クレストでの粒子の分級効果に起因しており、(1)の結果から、粗粒子の堆積を主体としたクレストでの分級効果が進行している間は波高は成長しているが、この効果が定常になると波高の成長は停止する。

(4)クレストでの粒子の分級効果を定式化するため、クレストの摩擦速度と粒子の沈降速度からなる無次元パラメーターを導入し、分級モデルを提案した。これによって粒子の分級効果が粒径別に評価でき、河床波の変形過程の評価にも適用可能となる。

(5)混合砂河床で形成される河床波の波高を規定する粒子は平均粒径の2倍程度の粗粒子である。

最後に、本研究の遂行にあたり、昭和63年度文部省科学研究費奨励研究(A)「砂堆前縁部における混合砂の分級機構に関する研究」(研究代表者:三輪 浩)および平成2年度日本科学財団笹川科学研究奨励助成「河床波を有する沖積河道の流砂機構に関する研究」(研究代表者:三輪 浩)の補助を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木幸一・道上正規: Dunesの波高およびそれに及ぼす混合砂礫の影響について、第23回水理講演会論文集、pp.151-156、1979.
- 2) Snishchenko, B. F., Muhamedov, A. M. and Mazhidov, T. Sh. :Bedload Composition Effect on Dune Shape Parameters and on Flow Characteristics, Proceedings of the XXIII Congress of IAHR, pp. B105-B112, 1989.
- 3) Guy, H. P., Simons, D. B. and Richardson, E. V. :Summary of Alluvial Channel Data From Flume Experiments, 1956-61, Geological Survey Professional Paper, 462-I, 1966.
- 4) Kuhnle, R. A. and Southard, J. B. :Bed Load Transport Fluctuations in a Gravel Bed Laboratory Channel, Water Resources Research, Vol. 24, No. 2, pp. 247-260, 1988.
- 5) 池田 宏・伊勢屋ふじこ: 混合砂礫の流送に伴う縦断的分級、第30回水理講演会論文集、pp. 217-222、1986.
- 6) 辻本哲郎: 河床表層粒度構成の不安定現象としての縦断交互分級の形成機構、土木学会論文集、第411号、II-12、pp. 143-150、1989.
- 7) 中川博次・辻本哲郎・村上正吾・水橋雄太郎: 河床波上の流砂量分布について、第28回水理講演会論文集、pp. 735-741、1984.
- 8) 中川博次・村上正吾・後藤仁志: 河床波上の流れの構造と浮遊粒子の拡散過程について、水工学論文集、第34巻、pp. 523-528、1990.
- 9) Engelund, F. :Hydraulic Resistance of Alluvial Streams, Proc. ASCE, Vol. 92, No. HY2, pp. 315-326, 1966.
- 10) 上野鉄男: 砂れんと砂堆の発生領域について: 第25回水理講演会論文集、pp. 93-98、1981.
- 11) 石川忠晴: 河川の流砂に関する基礎的研究、東京工業大学土木工学科研究報告、No. 25、第5章、1979.
- 12) Garde, R. J. and Raju K. G. R. :Resistance Relationships for Alluvial Channel Flow, Proc. ASCE, Vol. 92, No. HY4, pp. 77-100, 1966.