

鳥取大学 大学院 学生員 ○岩垣 孝一
鳥取大学 工学部 正員 鈴木 幸一
道土 正規

1. まえがき 実河川では粒度分布の異なる混合砂より河床が形成されているにもかかわらず、従来の移動河床の抵抗に關しての研究はほとんど均一砂または均一砂に近い粒度分布の砂のみを対象として行なわれているため、それらの成果をそのまま実河川に適用することには問題が多いと考えられる。本研究は、均一砂河床の流水に対する抵抗と混合砂河床の抵抗特性との間にどのような差異があるかということとを明らかにする目的で、その第一段階として河床波特性が混合砂の場合、均一砂の場合と比べてどの程度変化するかについて実験的に検討しようとするものである。

2. 実験概要 実験に用いた水路は長さ61m、幅30cm、高さ30cmの長方形水路で、水路上流端に設けたエレベーター式給砂装置によって0~0.0413 cm³/sec/cmの間の任意な一定量の給砂が高精度で行なえるようになっている。この水路にある混合比を調整された砂を約5cmの厚さに均一に敷き所定の流量、給砂量で平緩河床を形成した後、河床高を自動測定装置で流下方向に連続測定する。実験条件は表-1に示すとおりである。

表-1

試行番号	混合比 (%)	平均粒径 d_m (mm)	標準偏差 σ (mm)	最大粒径 d_{90} (mm)	最小粒径 d_{10} (mm)	形状係数 ϕ	比重 γ_s	流速 U (cm/s)	水深 h (cm)	河床高 z (cm)	河床傾斜 (%)
1	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
2	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
3	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
4	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
5	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
6	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
7	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
8	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
9	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
10	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
11	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
12	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
13	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
14	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
15	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
16	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
17	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
18	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
19	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
20	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
21	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
22	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
23	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
24	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
25	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
26	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
27	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
28	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
29	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
30	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
31	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
32	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
33	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
34	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
35	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
36	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
37	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
38	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
39	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
40	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
41	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
42	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
43	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
44	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
45	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
46	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
47	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
48	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
49	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00
50	100	0.0813	0.0013	0.10	0.05	0.60	2.65	10.0	10.0	10.0	0.00

3. 抵抗特性 抵抗特性に関する混合砂の影響をより巨視的にみるために、平均流速と摩擦速度の比 $U/u_* (= \sqrt{8f})$ 、 f : 抵抗係数) と無次元掃流力 τ_b との関係を示したものが図-1である。混合砂についての図中の砂粒径は平均粒径 d_m を用いており、図中の実線は、岩・黒木による

$\sqrt{8f} = 2.4 (R/d)^{1/6} \tau_b^{-1/3} (Q \leq 1.4 \times 10^4)$, $\sqrt{8f} = 8.9 (Q > 1.4 \times 10^4)$
という τ_b と $\sqrt{8f}$ の関係式を示している。ただし、 R は経深である。プロットした実験値をみると、均一砂については岩・黒木による直線よりも勾配はやや大きくなっているものの U/u_* と τ_b との関係は比較的良好な形となっているが、混合砂の場合には同一の τ_b に対して U/u_* の値は均一砂の場合に比してかなり大きくなっており明らかに混合砂河床の抵抗が小さくなっていることが認められ、またばらつきも大きい。

このことは、混合砂河床では抵抗特性を示す場合の砂の特性に関する量として平均粒径のみを用いることは不十分であることを示している。河床波の後述においてエネルギーが損失され抵抗が大きくなるので河床波特性と抵抗との関係は調べることは抵抗の内部機構を追求する第一歩であり、芦田・田中²⁾のように河床波の状態を表わす統計的物理量として河床波高の標準偏差 σ と平均流速 $U/u_* = 6.0 + 6.25 \log(R/R_s)$ より求められる相当粗度 R_s との関係求めて両対数紙で示したものが図-2である。本実験による σ の値は、芦田・田中によるものより大きい、混合砂と均一砂との顕著な

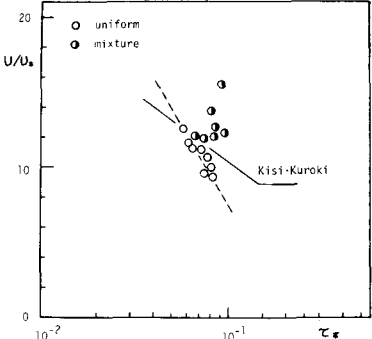


図-1

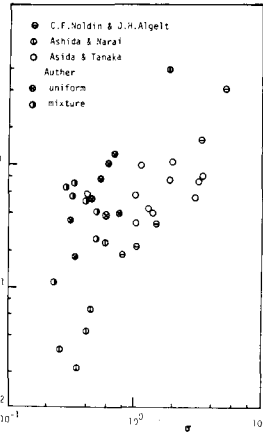


図-2

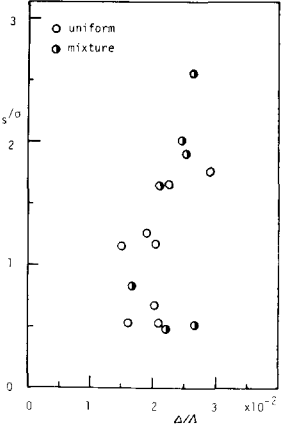


図-3

差異は認められない。全体的には σ が増すと k_s/σ が大きくなる傾向は認められるものの個々のデータとかなりばらつきがある。 σ が等しい河床であっても波長が大きく波形勾配の小さい河床波と波長が小さく波形勾配が大きい場合とでは k_s/σ が異なるものと考えられるが、このことを考慮して k_s/σ と河床波の平均的な波形勾配 Δ/λ (Δ : 平均波高, λ : 平均波長) との関係を示したものが図3である。 Δ/λ が増加すると k_s/σ が増加する傾向は認められるが、資料数が少ないため今後の検討が必要である。ただ、均一砂と混合砂とを比較した場合、両者の差異はない。このことは混合砂であっても河床波特性を何らかの形で求めることができれば、均一砂の場合と同じ基準で抵抗特性を表わすことができる可能性を示唆している。

4. 混合砂の河床波特性 図4は流量および流砂量を一定にして、直径が 0.60 mm (d_1 砂) の砂と 1.84 mm (d_2 砂) の砂との混合比を変化させた場合 u/u_{*c} , 水深 h , 河床勾配および平均波高 Δ (サマックスは M) と均一砂 (d_1 砂) の場合 σ と k_s の値 (サマックスは L) と σ の比を示したものである。横軸は d_2 砂の河床に占める割合である。この例では細砂 (d_1 砂) に粗砂 (d_2 砂) をわずかに 5% 程度加えたとき 40% の波高の逆減があり混合砂の河床波高に及ぼす影響が著しいが、 d_2 砂の割合をそれ以上に大きくしても波高がそれ以上著しく小さくなるようなことはない。河床勾配も波高と同じような特性を示すが、水深はほとんど変化しない。また、抵抗については d_2 砂が 5% 程度まではかなり減少するが以後はほとんど変化しないことが認められる。

図5および図6は均一砂河床の場合と均一砂河床に粒径の大きい砂をわずかに加えた場合とで河床波の波数スペクトル特性がどのように変化するかと比較したものである。すなわち、図5は混合する粗砂の割合を一定 (5%) とし粒径のみを変化させた場合であり、図6は混合する粗砂の粒径を変えずに混合比を変化させた場合のスペクトル図であって横軸は波数である。これらの図から概して認められることは、スペクトルのピークに対する波数は平均波長のほぼ逆数に等しく、粗砂投入後の混合砂においても同じ値と変化するといないが、スペクトルピーク値は混合する粗砂の粒径が大きくなるほどあるいは混合比が増加するほど減少することである。このことは、卓越した波数に対する波高が小さくなることを意味しており、上に述べた混合砂では平均波高が減少し抵抗が小さくなるという結果と一致している。しかし、この傾向から若干はずれるものもあり、今後の検討が必要である。また、高波数域では均一砂と混合砂とではスペクトル特性に顕著な差異は認められず、波数 $k = 2.33 \times 10^{-2} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ 以上の高波数域のスペクトルの値を最小乗法によって求めた値はほぼ -2 から -3 の間であり、日野が求めた砂の安息角 φ と波数 k のスペクトル $S(k)$ が支配される平衡領域での関係式 $S(k) = \alpha(\rho)k^{-3}$ で示された波数スペクトルの -3 乗則よりやや小さいけれども近い値を示している。

5. あとがき 以上、混合砂河床の抵抗特性を解明する第一歩として、主観的な現象を述べ、河床波特性との関係を若干考察したが、今後定量的な考察が必要である。

<参考文献> 1) 奥・黒木: 北工工学部研究報告 (1972) 2) Hino: J. of Fluid Mech. (1968) 3) 芦田・田中: 京大防災研年報 (1967)

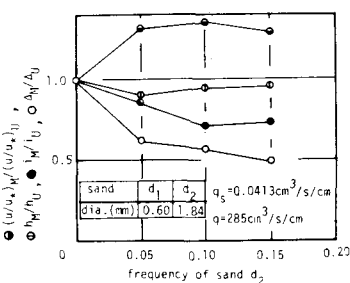


図-4

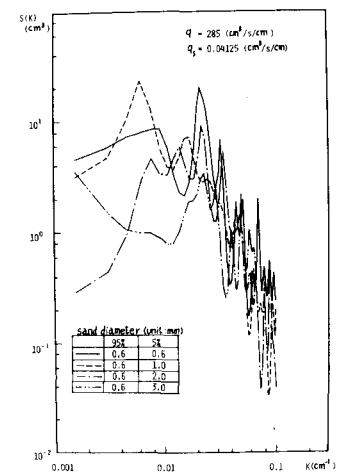


図-5

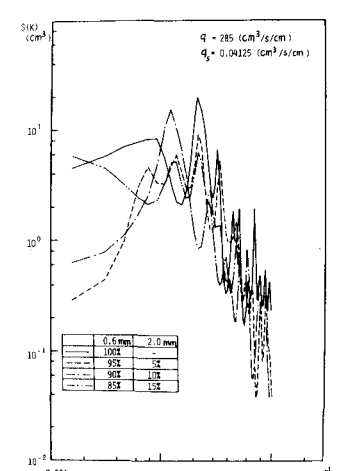


図-6