

大阪大学工学部 正員 出口一郎
大阪大学工学部 正員 榎木 亨
和歌山県 正員 前田 強

1. まえがき：実際の海底においては、底質の移動限界水深以浅では底質は常に掃流あるいは浮遊状態で移動していることから開水路流れにおいて指適されているように、こうした状態における抵抗則は当然固定床のそれとは異なる。しかしながら移動床における底部せん断力を直接計測することは現在のところ困難であるため、固定床における抵抗則と何らかの方法で結びつけてその大きさを推定する必要がある。ここではその一つの方法として、二次元実験で生ずる波高減衰量から固定床と移動床の抵抗則の差異に及ぼす掃流砂あるいは浮遊砂の効果について明らかにし、上述の底質の移動状態時の抵抗則を明らかにしようとしたものである。

2. 波高減衰に関する実験：実験は近畿大学理工学部土木工学教室にある長さ20m、高さ1m、幅1mの片面ガラス張り鋼製水槽を用い、移動床としては $d_{50}=0.2\text{mm}$ 、比重2.6の豊浦標準砂を使用した。一方、固定ではflat bed及び移動床の砂れんに対応する表-1に示す6種類の固定粗度に対して実験を行なった。波高減衰は水槽ほぼ中央の4.5m離れた2点に設置した波高計によって測定された波高記録より一つの波がこの2点を通過するときの波高を読みとって求めた。また移動床においては砂れんが生ずる前と数時間造波して砂れんの形状が安定した後の2回に波高減衰量と濁度計（計測技研PM-101）による浮遊砂濃度の鉛直分布を測定している。実験対象波は水深 $h=25\text{cm}$ 及び 30cm に対して周期 $T=1.0\sim 1.7\text{sec}$ 、波高 $H=4.0\text{cm}\sim 12.9\text{cm}$ の間の40種類の波で微小振幅波理論から求ま

$\eta\text{ cm}$	$\lambda\text{ cm}$	$\xi\text{ cm}$	
0.6	3.8	1.0	
0.9	5.6	1.2	
1.2	7.5	1.2	
0.9	3.8		
1.5	5.6		
2.0	7.5		

表-1

る底部最大水粒子速度 U_{bm} を用いたレイノルズ数 $Ret=U_{bm}^2 T/\nu$ の範囲は、 $1.8\times 10^4\sim 9.8\times 10^4$ である。

3. 波高減衰量から求まる摩擦係数 f について：以上の実験で得られた波高減衰量から内部粘性及び側壁の効果を除き $f=\eta U_{bm}$ で定義される摩擦係数を求めた結果のうち粗面乱流に相当する場合を図-1に示す。なお図-1の横軸はJonssenのパラメータ q_s/k_s （ q_s ：底部水粒子運動の振幅、 k_s ：Nikuradseの相当粗度）をとってあるが、今回の実験結果に対しては梶浦に従い $k_s=47$ とした。また図-1には梶浦の渦動粘性係数の仮定から求まる f 、砂粒粗度に対するRiedelらの実験結果及び三角形粗度に対するJonssenの実験結果も示してある。図-1より明らかなように、同じ

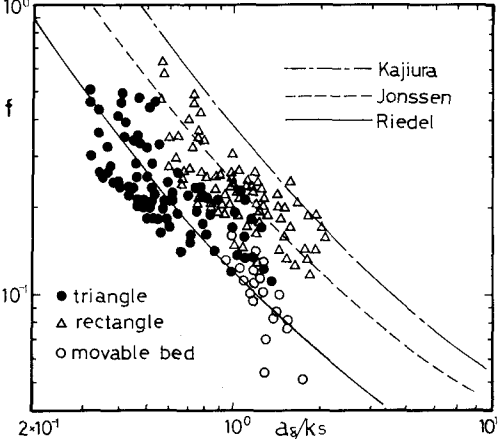


図-1

固定床においても粗度の形状によって明らかな差が生じており、矩型粗度の場合はJonssenの結果に、三角形粗度に対してはRiedelらの結果に比較的良好に一致している。一方、移動床実験においては（この場合砂れんは形成された場合である）Riedelらの結果より若干小さい f の値を示している。このような固定床における粗度形状による f の差異は粗度の形状に問わず $k_s=47$ とおいたため、粗度によって生ずる底部の乱れの強さを q_s/k_s のみでは十分に表わし得ないためと考えられる。一方、砂れんとはほぼ同じ形状を示す三角形粗度に対する f は $1 < q_s/k_s < 2$ の範囲で砂れんが生じた移動床における f の2倍程度（単位長さ当たりの波高減衰率にして2倍の減衰率）の大きい値を示している。この差異の原因としては1)底部境界が移動することによる底部せん断力の減少

2) rippled surface 上での底質の浮遊。の2つが考えられることから以下でこの2つについて検討する。

4. 底質が移動することによる底部せん断力の減少について：通常波動による境界層方程式は海底で $u = 0$ という境界条件で解かれる。しかし波動にともない底質が移動する場合は海底でも水粒子速度は0とはならない。今、簡単のため flat bed で底質砂は ν_s という仮想的な動粘性係数をもつ Newton 流体とし、境界層内の水粒子は底質砂と同じ速度で移動すると考え、海底から鉛直上方に z 軸をとった座標系で層流境界層方程式を解くと

$$\left. \begin{aligned} z \geq 0 \text{ に対して, } u &= a \left\{ 1 - \sqrt{P} / (1 + \sqrt{P}) \cdot e^{-\beta(1+\sqrt{P})z} \right\} e^{i\omega t} \\ z \leq 0 \text{ に対して, } u &= a / (1 + \sqrt{P}) \cdot e^{-\beta(1+\sqrt{P})z} \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに $a = \pi H / T \sinh kh$, $\beta = (\pi / \nu T)^{1/2}$, $P = \nu_s / \nu$ が得られる。これらの流速を用いて底部が移動境界の場合の底部せん断力によるエネルギー逓散量 E_{tm} は次式で表わされる。

$$E_{tm} = (\mu \beta a^2 / 2) \cdot (P + \sqrt{P}) / (P + 2\sqrt{P} + 1) \quad (2)$$

一方、底部が全く固定されている場合の底部せん断力によるエネルギー逓散量 E_H は ν_s が ∞ と考えられるので $\mu \beta a^2 / 2$ となることから、flat bed における移動床と固定床における波高減衰から求まる f の比 f_{mt} / f_H は次式で与えられる。(f_{mt} : 移動床, f_H : 固定床)

$$f_{mt} / f_H = E_{tm} / E_H = (P + \sqrt{P}) / (P + 2\sqrt{P} + 1) = \sqrt{P} / (\sqrt{P} + 1) \quad (3)$$

また上記 P の値は底質の物理的な特性によって決定されることから同一の底質に対してはそれが移動しているかぎりは一一定と考えられ、したがって (3) 式より f_{mt} / f_H はほぼ一定の値をとるものと考えられる。そこで今回行なった実験において、底部に砂れんの形成をみた 18 ケースについて砂れんが発生する以前の底部がまだ flat な状態において測定された波高減衰から求められた f_{mt} の f_{mt} / f_H

とそれに対応する波浪条件の固定床 flat bed における f_H の比を、横軸に Re_τ をとって示したのが図-2である。図-2より実験値は少なく、かつばらついてはいるがほぼ $f_{mt} / f_H = 0.8$ となつた。すなわち (3) 式において $P = \nu_s / \nu \approx 15$ とおいた場合で表わされ、掃流砂が存在することによって固定床における波高減衰率は約 20% 程度減少することがわかる。

5. 波高減衰に及ぼす浮遊砂の効果について：つぎに移動床の rippled surface 上を波が進行することによって底質が浮遊した場合の波高減衰量から求まる摩擦係数 f_{mb} と砂れんとはほぼ

同じ規模の三角形粗度に対する摩擦係数 f_{fb} の差異について考えてみる。浮遊砂濃度の増大にともなう底部せん断力が減少することは移動床開水路の解析において古くから知られている事実であり、すでに種々の理論的とりあつかいが行なわれている。波動によって底質が浮遊する場合も上述のような関係が成立するかどうかをみたのが図-3である。図-3の縦軸は f_{mb} / f_{fb} 、横軸は浮遊砂濃度分布(谷上における)の変曲点を基準としてとった基準点濃度 Ca をとってあるが、明確な変曲点が表われない場合は細井らの実験結果を参照して Ca を求めた。浮遊砂濃度が小さい場合は f_{mb} / f_{fb} に対しては掃流砂の影響が卓越し、4. で述べたようにほぼ 0.8 程度の値をとっているが浮遊砂濃度の増大につれて f_{mb} / f_{fb} は減少し、固定粗度上よりも移動床の砂れん上の方が底部せん断力がはるかに小さくなりしたがって波高減衰率も小さくなっていく様子がうかがえるが、その力学的な機構については今後さらに検討を加えていくつもりである。

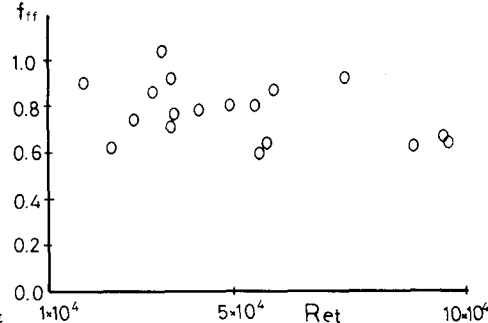


図-2

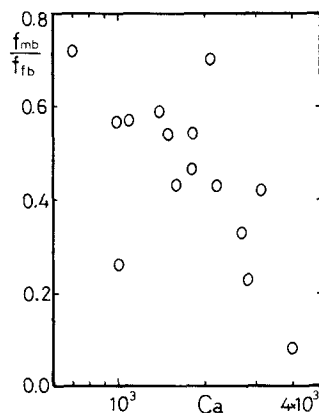


図-3