

京都大学防災研究所 正員 河田 恵・昭
ワシントン大学 L.H. Larsen

1. 緒言 著者は、すでに海岸侵食制御工法である浸透砂制御工法が前設の侵食防止にある程度効果があることを実験的に見出した。そこで、本研究では、漂砂の移動限界に及ぼす吸水の効果と定量的に評価して、この機構を明らかにしようとするものである。

2. 浸透床における水粒子速度の算定 吸水を付加した場合の微小振幅波理論の展開にあたり、(i) 浸透層厚は無限度であり、(ii) 浸透床上の波動境界層の特性は吸水によって変化しないと仮定すれば、Reid・棍滯に任せて、座標系を図-1のようにとり、浸透床上の水平・鉛直水粒子速度 u_s および v_s は次式で表わされる。

$$u_s = m u_{su} = \frac{mgAk}{\omega \cosh kh} \sin \theta, \quad v_s = \frac{mgAk}{\omega \cosh kh} \cos \theta + v_a \quad (1)$$

ここに、 $m = K\omega/\nu$ 、 K : 透水係数、 A : 振幅、 g : 重力の加速度、 k : 波数、 ω : 角振動数、 ν : 動粘性係数、 v_a : 吸水速度、添字 s および u : それぞれ浸透床面直下および直上を表す。ただし、 v_a はつぎのようにして与えた。すなわち、微小振幅重複波を考えると、浸透床上でその腹の部分では鉛直方向の流速が発生するので、これを用いることにすれば、 $v_a = (gk/\nu) A_1 k_1$ と近似的に与えられる。ここに、添字 1 は重複波を表す。

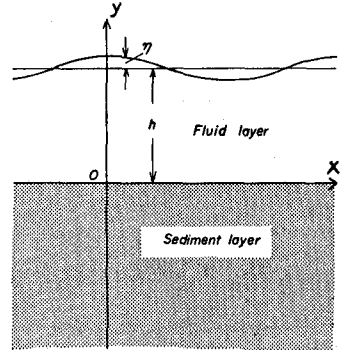


図-1 座標系

3. 摩擦速度の表示 境界層近似を適用すれば、非定常境界層方程式は、つぎのようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad 0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial v^2}{\partial y}, \quad v = v_a - \int_0^y \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dy \quad (2)$$

さらに、一般に $\partial p_s / \partial x \gg \rho g \partial \delta / \partial x$ であるから、 $\frac{\partial u_b}{\partial t} + u_b \frac{\partial u_b}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_s}{\partial x}$ が成立する。式(2)および(3)から、層流境界層を考え、セッ動法を適用すれば、境界層内の流速分布と摩擦速度 u^* は次式で表わされる。

$$u_1 = u_0 \left\{ \sin \theta - (1-m) \exp(N_1 \eta) \sin(\theta - N_2 \eta) \right\} \quad (4)$$

$$u^* = u_0 (1-m) \sqrt{N_1^2 + N_2^2} (\nu/\omega) \sin(\theta + \alpha) = u_{*0}^2 \sin(\theta + \alpha) \quad (5)$$

ここに、 $u_0 = gAk/(\omega \cosh kh)$ 、 $N_1 = (1/2)(R - 1/N_2)$ 、 $N_2 = -\sqrt{2}/\sqrt{R^2 + \sqrt{R^4 + 16}}$ 、 $R = v_a \delta / \nu$ 、 $\alpha = \tan^{-1}(N_2/N_1)$ 、 $\delta = (\nu/\omega)^{1/2}$ 、 $\eta = y/\delta$ および d : 粒径である。式(6)および(7)に示すように、摩擦速度の表示は浸透層の無次元透水係数 m と無次元吸水速度 R (吸水時は符号はマイナス) をあらわに含んでいる。もちろん両者をゼロとすれば、従来の表示とまったく一致する。

4. 吸水時の漂砂の移動限界の訪導 ここでは、漂砂の移動限界に及ぼす砂面の浸透性の影響と吸水の効果を見出すことを主眼とするので、1個の球状粒子のつり合い条件式を用いることにすれば、図-2を参照して次式が成立する。 $(W - R_L) \tan \phi = R_T$ ----- (6)

さらに、それぞれの力のはつぎのように表わされる。 $W = (\pi/6)(\sigma - \rho)gd^3$ 、

$$R_L = (\pi/8)\rho C_D d^2 |v| |v| + (\pi/6)\rho C_M d^3 (\partial v / \partial t),$$

$$R_T = (\pi/8)\rho C_D d^2 |u| |u| + (\pi/6)\rho C_M d^3 (\partial u / \partial t)$$

ここに、 ϕ : 砂粒の静止摩擦角、 σ : 砂粒の密度、 C_D および C_M :

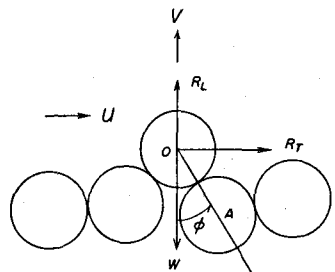


図-2 砂粒のつり合い

それぞれ砂粒の抗力係数および質量係数である。これから、漂砂の無次元移動限界 C_{c*} とし、結局次式が近似的に得られる。 $C_{c*} = u_{c*}^2 / (\sigma/\rho - 1)gd = 1/\phi_{max}$,

$$\phi = \frac{3}{4} C_D \left(\frac{U_0}{U_{*0}} \right)^2 f_1 |f_1| + C_M \frac{U_0 \omega d}{U_{*0}^2} f_2 + \frac{3}{4} C_D \left(\frac{U_0}{U_{*0}} \right) \left(\frac{U_a - kd U_0 f_3}{U_{*0}} \right) \left| \frac{U_a - kd U_0 f_3}{U_{*0}} \right| \quad (7)$$

ここに、 f_1, f_2 および f_3 は θ と m および R の関数である。

5. 漂砂の移動限界に及ぼす吸水の効果

a. 床面の浸透性の影響：図-3は $U_0 \delta/\nu$ を 50, 100とし、無次元透水係数 m をバウメーターとして漂砂の移動限界を求めたものである。これから、砂粒 Reynolds 数 $u_{c*} d/\nu$ が 10 以下になると砂面の浸透性の影響が見出される。さらに、 $U_0 \delta/\nu$ が 50 と 100 の場合と比べると、前者の方が無次元移動限界は若干大きい（ $Re < 160$ ）、砂粒 Reynolds 数による変化はほとんど同じ傾向を示すことがわかる。

従来の漂砂の移動限界に関する実験のみくは、砂粒 Reynolds 数が 1~10 付近で行われており、移動床と固定床、水の波と振動板などの実験方法の相違による実験値の散乱の要因として、浸透性の影響が挙げられよう。

b. 吸水の効果：図-4は無次元吸水速度を変化させた場合の漂砂の移動限界を示す。ただし、吸水速度を大きくした場合、式(7)中の値が0の値のいかにかわらずゼロから負の値になる範囲が存在するので、一た、 $\phi = 0$ となる値まで計算して示してある。これから、砂粒 Reynolds 数が 20 程度以下になれば、漂砂の移動限界に及ぼす吸水の効果は非常に大きくなることわかる。たとえば、 $R = -0.1$ は砂粒の沈降速度の約 1/100 の吸水速度を付加した場合にあおよ対応するが、これによって、砂粒 Reynolds 数が 1 付近では C_{c*} の値が 3 倍程度になり、非常に砂粒が動きにくくなるといえる。

また、吹出し速度の付加によっても同様の傾向が見出される。このような傾向は無次元透水係数 m が 0.04 の場合でもほとんど同じである。以上で示した取扱は、もちろん吸水によって波動境界層の特性が変化するという仮定が成立する範囲で有効であろう。しかし、従来の開水路の乱流制御に関する研究成果によれば、吸水速度が摩擦速度の 1% 程度ではこの特性は実用上変化しないという取扱いが可能であると報告されており、この結果は波動境界層の場合にもかかるの程度適用できると推察される。このように、漂砂の移動限界に及ぼす砂面の浸透性と吸水の効果は、低 Reynolds 数とくに顕著になる事実は注目すべきものといえる。したがって、漂砂砂制御工法における侵食制御機構は、吸水による砂粒の移動限界の増大にかなり依存していると考えられる。

6. 結語 以上で示した結果は、養浜砂の流失防止を主対象とした漂砂砂制御工法の実用化のために有用であると思われる。さらに、移動床を用いた波浪水槽や現地海岸では、水槽端部や構造物による重複波の発生あるいは平均水位の場所的変化によって砂層中に浸透流が容易に発生し、漂砂の移動限界が変化することが十分考えられる。今後、実験結果との比較検討や乱流境界層への拡張を行いたいと考えている。最後に、本研究は鹿児島大学振興財団の援助のもとに行った研究であり、同財団および関係各位に深く感謝する次第である。

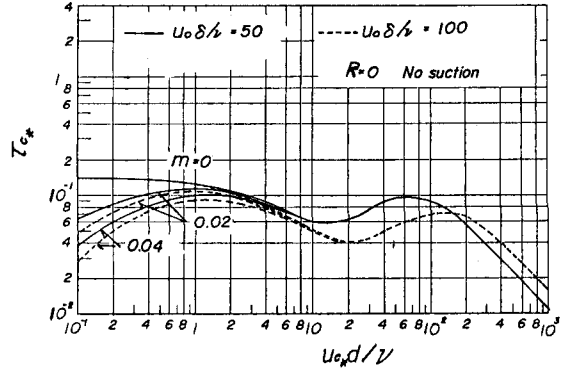


図-3 床面の浸透性の影響

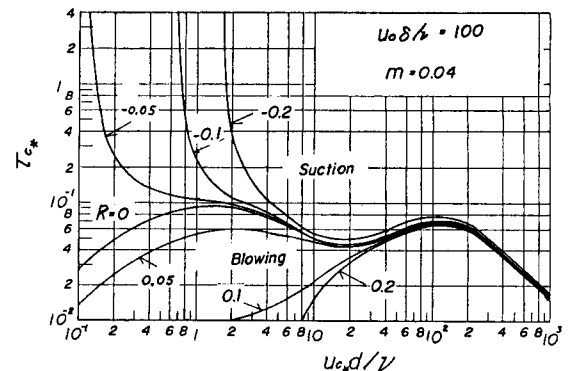


図-4 吸水の効果