

大阪大学工学部 正員 出口 一郎
大阪大学工学部 正員 榎本 亨

① はじめに : 漂砂の移動形態には大別して掃流状態の移動と浮遊状態の移動があることはよく知られている。両者の見掛上の相異点は、その移動速度及び濃度が大きく異なる点にある。従来種々の方法で漂砂移動量の定量化が計られていたが、現在のところこのような差異を明確にとりこんだ表現は行なわれていない。

さらに浮遊漂砂は掃流状態の漂砂移動が境界条件となって生ずるものであるという立場に立つて考えれば、浮遊砂濃度の決定にも重要な問題となる。この境界条件の与え方にはフラックスで与える方法あるいは濃度で与える方法等が提案されているが、いずれにしても掃流漂砂の挙動を十分に解析しておく必要がある。

従来、掃流漂砂の運動に対しては、海底砂に作用する種々の流体力を考慮した Lagrange 的な解析が行なわれていたが、これによると海底表層の粒子の運動しか解析できない。そこで著者らはこのような欠点を是正するため掃流漂砂に対する見方を変えて、底層砂層が仮想的な粘性係数をもつ Newton 流体と考へ、Euler 座標で境界層方程式を解くことによって掃流砂移動速度及び移動層厚の解析を行なった。ついで得られた結果と Madsen-Grant の掃流砂公式²⁾から掃流砂濃度を計算し、実験結果と比較することによってその妥当性の検討を行なった。

② 掃流砂運動の解析 : 掃流漂砂の運動を解析するにあたり次の仮定を設けた。i) 海底砂層は μ_s という仮想的な有効粘性係数をもつ Newton 流体とする、ii) 砂層はその上部の流体運動による境界せん断力及び圧力勾配によって運動する、iii) 砂層上の流体運動は簡単のため層流状態を考へ、主流の運動に対して微小振幅理論を適用する。この時、砂層表面を $z=0$ とし、鉛直上方に z 軸をとった座標系において主流 ($z \rightarrow \infty$)、境界層内 ($z > 0$) 及び砂層 ($z \leq 0$) に対する運動方程式はそれぞれ

$$\frac{\partial u_{s0}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1), \quad \frac{\partial u_s}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u_s}{\partial z^2} \quad (2), \quad \frac{\partial u_{sb}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p_s}{\partial x} + \nu_s \frac{\partial^2 u_{sb}}{\partial z^2} \quad (3)$$

と表わされる。ここに ρ , $\rho_s' = (1 - \bar{c}_b) + 2.56 \bar{c}_b$ は水及び砂層の単位体積質量、 $\bar{c}_b$ は時間平均された砂層濃度、 ν , $\nu_s = (\mu_s / \rho_s')$ は水及び砂層の動粘性係数、 u_{s0} は境界層外縁流速、 u_s 及び u_{sb} は流体及び砂層の速度である。また砂層中の圧力 p_s の振幅 $\hat{p}_s$ に対しては Sleath²⁾ によって提案されている

$$\hat{p}_s = (\rho g H / 2) (\cosh(R(Kx/K_z)(z + \delta_b)) / \cosh R / \cosh(R(Kx/K_z)\delta_b)) \quad (4)$$

を用いた。ここに δ_b は砂層厚、 H は水深 R における波高、 $R = 2\pi/L$ (L : 波長) で、 x 及び z 方向の透水係数の比 Kx/K_z については 1.2 (一定) とした。

境界条件は $z = \infty$ で $u_s = u_{s0}$, $z = 0$ で $u_s = u_{sb}$ 及び $\mu (\partial u_s / \partial z) = \mu_s (\partial u_{sb} / \partial z)$, $z = -\delta_b$ (移動層厚) で $u_{sb} = 0$ という 4 つの条件である。なお (1)~(3) 式を解くにあたり、 μ_s / μ 及び δ_b が未知量として残る。そこで μ_s / μ に対しては高濃度の懸濁物質を含む流体に対しても有効である Elies³⁾ によって提案されている $\mu_s / \mu = (1 + 2.5 \bar{c}_b / (2 - 1.35 \bar{c}_b))^2$ を用いた。(Einstein の式を用いると μ_s / μ は最大 2.3 程度にしかなり得ないが、著者らが以前移動床上の波高減衰率から求めた μ_s / μ ⁴⁾ は $2 \times 10^4 < \hat{u}_{s0} T / \nu < 10^5$ の範囲に対して 5~6 程度の値をとることが確認されている。) 一方、 δ_b は砂層間に発生するせん断力が砂層内のせん断抵抗よりも大きい領域の厚さと考え、

$$\mu_s (\partial u_{sb} / \partial z) \geq d(\rho_s' - \rho) g \bar{c}_b \tan \phi \times N \quad (5)$$

を満す最大の整数 N を移動層数として決定し、(1)~(3) 式の解が (5) 式を満す

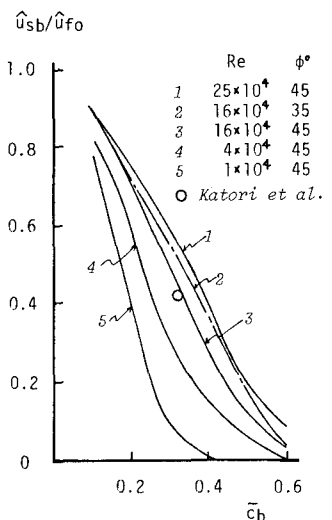


図-1

るまで繰返し計算を行なった。ここに d は底質中央粒径, ϕ は砂の内部摩擦角である。

③ 掃流砂移動速度及び移動層厚について : 図-1 は $\bar{C}_b (M_s)$ を水深方向には一様として先に述べた方法で計算した砂層速度と境界層外縁流速の振幅の比 $\hat{u}_{sb}/\hat{u}_{s0}$ をレイノルズ数 $Re = \hat{u}_{s0} \cdot T/\nu$ 及び ϕ をパラメータに示したものであり、(4)式中の $P/\rho g H$ は 0.4 ($R = 15 \text{ cm}$, $H = 10 \text{ cm}$, $T = 1.28 \text{ sec}$) とした場合の結果である。また図-2 は図-1 と同じ計算条件で $d = 0.01 \text{ cm}$ の場合の各 $\bar{C}_b$ に対する δ_b を示してある。 δ_b は当然位相によって変化するが図に示してある結果は(5)式中の U_{sb} にその振幅を用いて求めたものであり、位相変化する δ_b のほぼ最大値に相当する。まず図-1 より $\hat{u}_{sb}/\hat{u}_{s0}$ は Re の増加あるいは $\bar{C}_b$ の減少にともない単調に増加することがわかる。一方、図-2 より明らかなように δ_b も Re の増加にともなって単調に増加するが、 Re が等しい場合は $\bar{C}_b \geq 0.2$ の領域において $\bar{C}_b$ の増加にともない直線的に減少する。さらに図-1 及び図-2 に示す $Re = 16 \times 10^4$, $\phi = 35^\circ$ 及び 45° の場合の計算結果を比較して明らかなように底質砂層の内部摩擦角 ϕ は δ_b に対してより直線的に影響するのに対し、 $\hat{u}_{sb}/\hat{u}_{s0}$ に対しては砂層内の境界条件 (δ_b) が変化することによって若干変化する程度の影響しか与えていない。また、図-1 には香取ら⁵⁾ がシートフロー状態の掃流移動 ($\bar{C}_b = 0.2 \sim 0.4$, $Re \approx 50 \times 10^4$) に対して測定した振幅比も示してあるが、今回の計算結果は香取らの実験結果と比較して若干 $\hat{u}_{sb}/\hat{u}_{s0}$ を過大評価しているようにみえる。今回行なった計算においては(1)~(3)式を解析的に解くために、 $\bar{C}_b$ を水深にはかかわらず一定としたが、実際には砂層表面から静止砂層の範囲で変化することから、計算の精度を上げるには今後 $\bar{C}_b$ の砂層内での変化を考慮する必要がある。

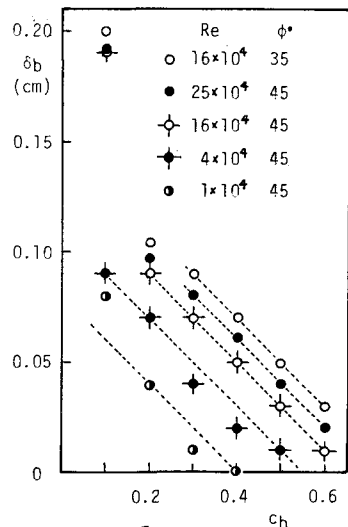


図-2

④ 掃流砂濃度について : 先に述べたように $\hat{u}_{sb}$ 及び δ_b は $\bar{C}_b$ がパラメータとなって計算される。本来 $\bar{C}_b$ に対しては海底砂層上の水粒子運動と関係づけた議論をすべきであるが、ここでは(1)~(3)及び(5)式から計算される $\hat{u}_{sb}$ 及び δ_b から flux とし求める掃流砂量と、既往の掃流砂量公式とを等値することによって $\bar{C}_b$ を決定してみよう。 $\hat{u}_{sb}$ 及び δ_b を用いると半周期平均された掃流砂量 $\bar{q}_b$ は次式で表わされる。

$$\bar{q}_b = \hat{u}_{sb} \cdot C_b \cdot \delta_b / \pi = \hat{u}_{s0} \cdot F(\bar{C}_b, Re, \tan \phi) / \pi \quad (b)$$

一方、既往の掃流砂量公式としてはすでにその妥当性が認められている Madsen-Grant 式、(7)式を用いる。

$$\bar{q}_b = 12.5 \omega d^3 \psi_m^3, \quad \psi_m = \frac{1}{2} \rho f \hat{u}_{s0}^2 / (\rho g - 1) g d \quad (7)$$

ここに ω は波降速度, f は friction factor である。

図-3 は(6)式と(7)式を等値して求める $\bar{C}_b$ と $\phi' = 1.25 \pi \lambda^2 \times \omega d / \hat{u}_{s0}$ の関係を Re をパラメータに示したものである。但しこの場合、 $\phi = 45^\circ$ としてある。図中には、 $2 \times 10^4 < Re < 50 \times 10^4$ の範囲内で測定された $\bar{C}_b$ ⁶⁾ も示してある。図から明らかなように測定結果にみられる Re 及び ϕ' の変化にともなう $\bar{C}_b$ の変化の様子は計算結果においてもよく再現されていることがわかる。

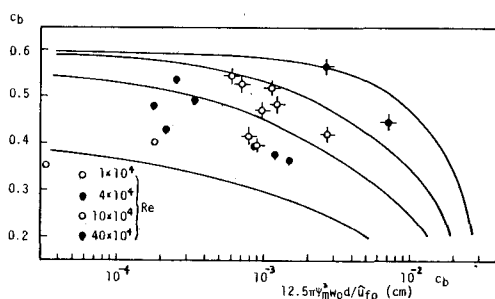


図-3

参考文献 : 1) Madsen et al., Quantitative description of Sediment transport by waves, Proc. 15th ICCE, 1976

2) Sleath, Wave-induced pressures in beds of sand, Proc. A.S.C.E. HY2, Feb. 1970

3) Daily,

粒子を懸濁した水の流れ, 土木学会誌 6 月号, 1964

4) 出口ら, 掃流砂移動に伴う波高の減衰効果, 第32

回年譜概集, 昭和52年

5) 香取ら, シートフロー状態の底質移動に関する研究, 第27回海講, 1980

6) 樫本亨, 不規則波による海波変形の予測手法の開発, 科研(一般B) 研究成果報告書, 昭和58年