

波を伴う掃砂現象について

農林省農業土木試験場 ○ 中 村 充, 白石 英彦

〃 佐々木 泰雄, 伊藤 三甲雄

1 まえがき

河口における滞砂現象、砂を築堤材料とする堤防の施工過程の掃砂現象、海流、海浜流の場合での漂砂現象など、波と流れの共存する場合での砂の移動を知ることは重要な問題である。しかし、移動床に関する現象は単なる流れ、あるいは波のみの場合についても多くの研究成果はあるが、必ずしも決定的なものはない。流れの場に波が共存する場合の研究はさらに未開発である。

流れにさかのぼる波に関する波の諸特性、および合成流に関しては、浜田一加藤、Benjamin, Lonquet-Higgins ほかの解があり、非定常流下での砂の移動に関しては岩垣らの研究がある。これらの現象を完全に理論的展開を行なつて、波と流れの共存下での掃砂を求めることは困難であるので、第一段階として実験的検討結果を報告する。

2 実験装置とその方法

実験装置を Fig.1 に示す。Fig.1 は波が流れにさかのぼる場合で、上流端に給水管があり $0 \sim 200 \text{ l/sec}$ の給水能力をもっている。実験水路部は幅 0.6 m 、深さ 1.2 m 、長さ 50 m のうち 40 m の区間に実験砂を撒出した。実験水路部の末端は $3.9 \text{ m} \times 8.0 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ の沈砂部に接続し、ここには 4 個の荷重計に支えられた砂受けがある。この荷重計は磁歪式でペンレコーダに記録され 1 kg の精度をもつ。沈砂部と造波機の間には越流式の水位調節ゲートがある。流速観測は流れについては給水流量と通水断面から流速を求め、波と重なった流速についてはトランジスタ式流速計を使用し、底面上 1.5 cm , 2 cm , 6 cm , 10 cm , その上は 5 m 間隔で流速分布を測定した。観測はほぼ波の 10 周期間の絶対値平均流速として求めた。波高は超音波高計を用い、波長は目視観測によつた。移動砂量は末端の砂受けで捕獲し、荷重計で計ると同時に砂の侵食高さを測定して掃砂容積をもとめた。流速および波の観測位置は末端から 5 cm 間隔に 8 箇所とし、掃砂量の観測は 50 cm 間隔にピアノ線を張り、これを基準にして約 60 分間隔で底面の砂の移動を観測した。

実験方法は流量 $Q = 180 \text{ l/sec}$, 155 l/sec を幅 60 cm 、水深約 $30, 40, 50, 60, 70, 80 \text{ cm}$ で流し、これに周期 $T = 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 \text{ sec}$ の波で各種波高のものを流れに遡上させ、波高、波長、周期、流速分布を各位置で測定した。これとともに侵食高さを測定し、また侵食高さの測定後造波機を止めて荷重計による全掃砂量の記録をとつた。

波が流れに沿う場合には造波機を上流端におき、また水路の長さを補うために上流端より砂を補給した。他は Fig. 1 の場合とほぼ同様である。

3 現象の理論的考察

底質の移動は、主として底面付近の流れの状態、底質の粒径、およびその組成、比重などによつて底質の移動は、主として底面付近の流れの状態は非定常な波動運

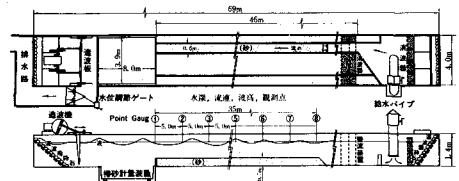


Fig. 1 波と流れによる掃砂実験模型水路
(流れに波が遡上する場合)

動が重なつて、安定した境界面の存在は考えられない。しかし一定の平均流の上に一定の波動を重ねるならば境界層の変化は、ある周期をもつた非定常現象のくり返しとして定まるであろう。このような非定常な流れの変化における掃砂量は、砂面に与える掃流力、砂粒子の流れに対する相対的性質（沈降速度などで与える）、浮揚跳躍砂粒子の輸送に関する流速などによつて論じられる。水粒子の波動運動は一次的には非粘性として記述され、その軌道運動は粘性流における渦とは区別されるべき性質のものであるが、砂粒子の浮揚跳躍現象に対してはきわめて大きな役割をもつと考えられる。

いま、一樣流 $u_1(z)$ の上に波が遡上したときの水粒子の水平流速を u とし

$$u = u_1 + u_2 \quad \text{-----} \quad (1)$$

とすれば

$$u_1 = u_1(z) \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$u_2 = u_2(\eta, u_1)$$

ここに η は波形で

$$\left. \begin{aligned} \eta &= f(m, k, H, x, z, t) \\ m &= 2\pi/L, \quad k = 2\pi/T \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (3)$$

である。

前述のように底面における境界層は非定常な消長をくり返しているので、底層境界層内における摩擦応力 τ_b の時間平均的な値を規定するものとして、底面の境界層外縁の流速 u_b の時間平均値の関数として示されるものとする。すなわち例で与えられた等流流速分布に波動による流速を重ね、 $z = -h$ （底面）において得られる流速に関する平均値をもつて掃流力 τ_b を規定する。

すなわち

$$\tau_b = K_1 \rho u_b^2 \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$\overline{|\tau_b|} = K_1 \rho \overline{u_b^2} = K_2 \rho \overline{|u_b|}^2 \quad \text{-----} \quad (5)$$

また摩擦速度 u^* に対して

$$u_b = \alpha u^* \quad \text{-----} \quad (6)$$

であり、掃砂量 q_B は流れに対して普通、式(7)で示される。

$$\frac{q_B}{u^* d} = f\left(\frac{u^*}{U_w}, \frac{U_w \cdot d}{\nu}\right) \quad \text{-----} \quad (7)$$

ここに、 d は砂粒子径、 U_w は砂粒子の沈降速度で、砂粒子の流れに対する流体抵抗を規定する量である。これに波の重なつた場合の掃砂量は、粒子沈降のレイノルズ数 $U_w d/\nu$ を略して

$$\frac{q_B}{U_b d} = g\left(\frac{U_b}{U_w}, \frac{U_b}{V_0}, \frac{h}{L}, \frac{H}{L}, \frac{H}{h}\right) \quad \text{-----} \quad (8)$$

ここに

$$U_b = \overline{|u_b|}, \quad V_0 = \frac{1}{h} \int_0^h u_1 dz \quad \text{-----} \quad (9)$$

で示される。

つきに、 $U_b = \overline{|u_b|}$ について検討する。

式(2)で

$$u_1(z) = U \dots \dots \dots (10)$$

なる一様流に、式(3)の

$$\eta = \frac{H}{2} \exp \{ i m (x - ct) \} \dots \dots \dots (11)$$

なる波形の浅水波が存在する場合には（波速 c は流水にさかのぼる場合を正とする）

$$u_2 = \frac{Hm(c-U)}{2 \sinh mh} \cosh m(z+h) \cos m(x-ct) \dots \dots \dots (12)$$

$$v_2 = \frac{Hm(c-U)}{2 \sinh mh} \sinh m(z+h) \sin m(x-ct) \dots \dots \dots (13)$$

底面流速 u_{2b} は(12)式で $z = -h$ において

$$u_{2b} = \frac{Hm(c-U)}{2 \sinh mh} \cos m(x-ct) \dots \dots \dots (14)$$

(11)式から

$$u_b = U + u_{2b}$$

$$U_b = \overline{|u_b|} = \frac{1}{T} \int_0^T |u_b| dt \dots \dots \dots (15)$$

$$\frac{U_b}{U} = \frac{1}{T} \int_0^T \left| 1 + \frac{Hm(\frac{c}{U} - 1)}{2 \sinh mh} \cos m(x-ct) \right| dt \dots \dots (16)$$

この値は

$$Hm \left(\frac{c}{U} - 1 \right) / (2 \sinh mh) \leq 1 \quad \text{のとき}$$

$$U_b/U = 1 \dots \dots \dots (17)$$

$$Hm \left(\frac{c}{U} - 1 \right) / (2 \sinh mh) > 1 \quad \text{のとき}$$

$$\begin{aligned} \frac{U_b}{U} &= 1 + \frac{7}{\pi} \left[\left\{ \left(\frac{Hm(\frac{c}{U} - 1)}{2 \sinh mh} \right)^2 - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} - \cos^{-1} \frac{2 \sinh mh}{Hm(\frac{c}{U} - 1)} \right] \\ &= 1 + \frac{7}{\pi} \left[\left\{ \left(\frac{\pi(\frac{H}{TU} - \frac{H}{L})}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} - 1 \right) \right\}^{\frac{1}{2}} - \cos^{-1} \frac{\sinh \frac{2\pi h}{L}}{\pi(\frac{H}{TU} - \frac{H}{L})} \right] \dots \dots (18) \end{aligned}$$

式(17), (18)から一様流速分布の流れを波が重なる場合の底面の絶対値平均流速が求まる。

実際の流れでは底面流速 U は平均流速を V_0 として

$$\left. \begin{aligned} U &= \alpha V_0 \\ 1 &> \alpha > 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

である。

このとき、(17), (18)式はそれぞれ

$$\frac{U_b}{V_0} = \alpha$$

$$\frac{U_b}{V_0} = \alpha + \frac{2\alpha}{\pi} \left\{ \left(\frac{\pi \left(\frac{H}{\alpha V_0 T} - \frac{H}{L} \right)^2}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} - \cos^{-1} \frac{\sinh \frac{2\pi h}{L}}{\pi \left(\frac{H}{\alpha V_0 T} - \frac{H}{L} \right)} \dots \dots (20)$$

この関係因子の無次元方程式として(20)から

$$\frac{U_b}{V_0} = f\left(\frac{H}{V_0 T}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}\right) \dots \dots \dots (21)$$

として与えられる。

つぎに、浮揚跳躍砂粒子の移動に対し大きな役割をもつと考えられる。水粒子の波動軌跡の形について考えてみる。

底面付近の流れの鉛直成分 $v_z(\Delta Z)$ は式(19)から

$$v_z(\Delta Z) = \frac{Hm(c-U)}{2\sinh mh} m \cdot \Delta Z \sin m(x-ct) \dots \dots \dots (22)$$

よつて1周期間の軌跡長の比は

$$X = \int_0^T U_b dt = UT$$

$$Y = \int_0^{T/2} U_b dt = \frac{Hm(c-U)}{\sinh mh} \cdot \frac{\Delta Z}{c}$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{2\pi\Delta Z}{L} \cdot \frac{\left(\frac{H}{UT} - \frac{H}{L}\right)}{\sinh 2\pi h/L} \dots \dots \dots (23)$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{2\pi\Delta Z}{L} \cdot \frac{\left(\frac{H}{\alpha V_0 T} - \frac{H}{L}\right)}{\sinh 2\pi h/L} \dots \dots \dots (24)$$

は浮揚高さに関係する量であり、この式から見ても掃砂量は式(8)および(24)の条件で扱われることがわかる。

4. 実験結果とその考察

上述の考察にもとづいて実験値を整理する。

掃砂量 q_B に関する因子はきわめて多いので式(24)によつてまず U_b/V_0 を求め、その後式(8)にしたがつて $q_B/(U_b d)$ を求めることにする。Fig. 2, Fig. 5 は $H/(V_0 T)$, H/L と U_b/V_0 の関係を h/L 毎にまとめたもので Fig. 2 は波が流れに遇上する場合、Fig. 5 は波が流れに沿う場合である。これらの図を用いて平均流速 V_0 (流下流量を通水断面積で割つて求めた流速) なる流れに波 (H, L ,

T) が重なる場合の U_b を求めることができる。

つぎに、底面流速 U_b と掃砂量との関係をまとめる。

式(8)において砂の沈降速度 U_{wr} は

$$U_{wr} = C \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd}$$

であるから、これと U_b の比を横軸にとり媒変数に H/h をとつてまとめた一例が Fig. 3, および Fig. 6 であり、全体をまとめたものが Fig. 4, および Fig. 7 である。結局 Fig. 2, Fig. 5 によつて波と流れを与えた場合の U_b/V_0 を求め、これから U_b を求めて Fig. 4, Fig. 7 に適用し掃砂量 q_B を求めることができる。

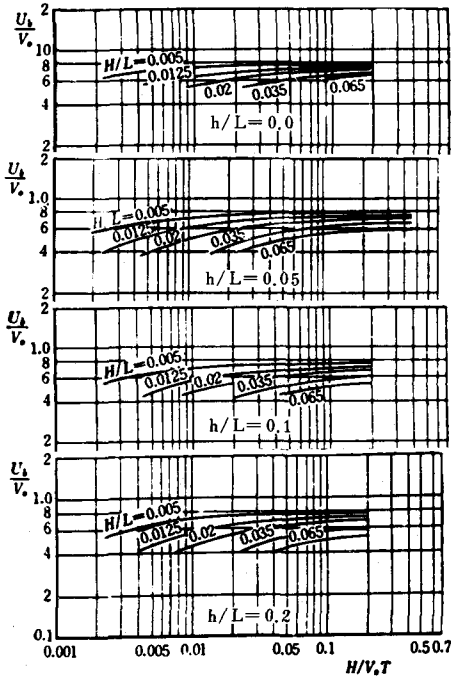


Fig. 2 波、流れと平均底面流速 (U_b)

(波が流れに遡上する場合)

5. 流れの中の波の変形

前項 4 において得られた結果は、流れに波が重なる場合について、その位置の波、流れにおける平衡掃砂量である。したがつて波の進行に伴つて波が変形すれば、掃砂量も変る。

ここでは、波長、波高について一様流中の微小振幅波の理論値を実験結果を用いて修正した式を導いて用いた。この値は Fig. 8, Fig. 9 に示される。図中 L , H は流れの中の波長、波高。 L_s , H_s は流れのない場合の微小振幅波

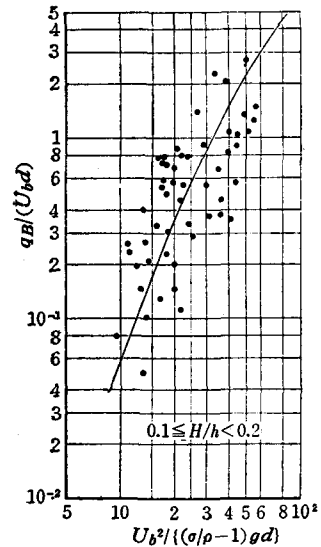


Fig. 3 波、流れと掃砂量

(波が流れに遡上する場合)

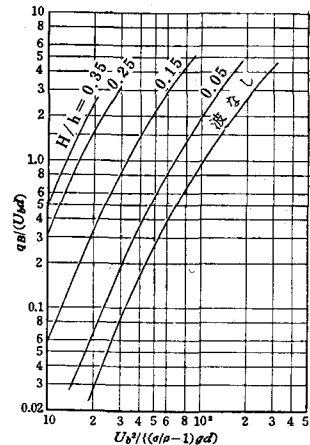


Fig. 4 波、流れと掃砂量

(波が流れに遡上する場合)

波長、波高。hは水深、V₀は断面平均流速、C_Bは微小振幅波速である。

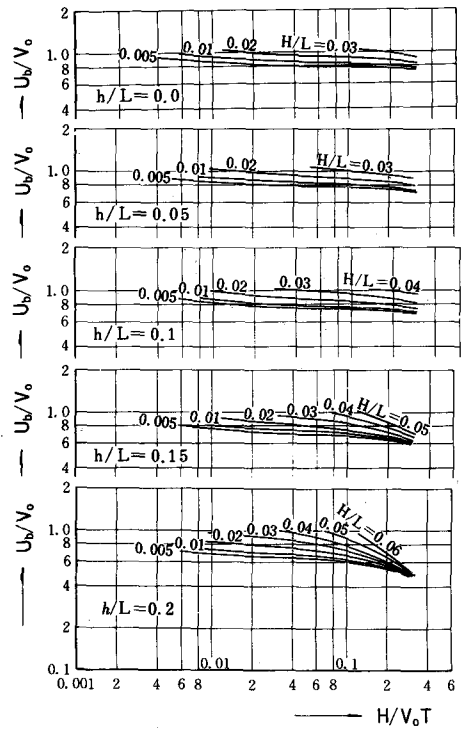


Fig.5 波、流れと平均底面流速
(流れに波が沿う場合)

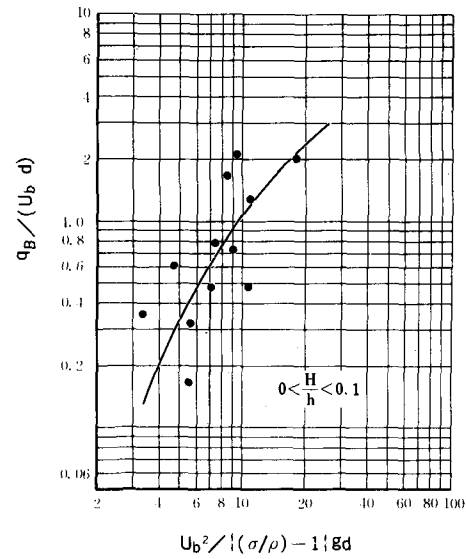


Fig.6 波、流れと掃砂量
(流れに波が沿う場合)

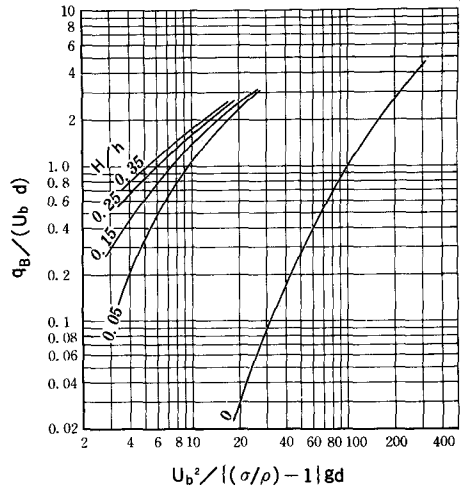


Fig.7 波、流れと掃砂量
(流れに波が沿う場合)

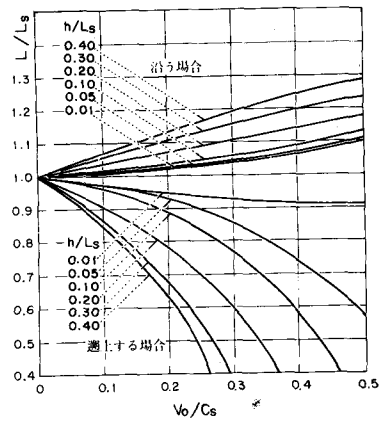


Fig.8 一様流中の波の波長

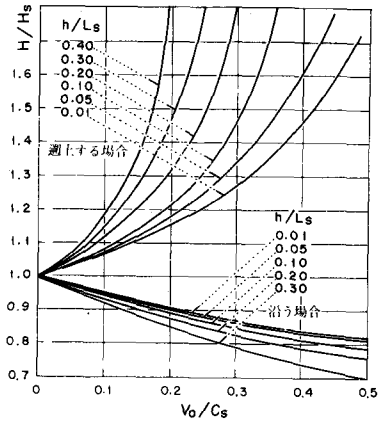


Fig.9 一様流中の波の波高