

波と流れによる砂の移動について

中村 充*・白石 英彦*・佐々木泰雄*・伊藤三甲雄*

1. まえがき

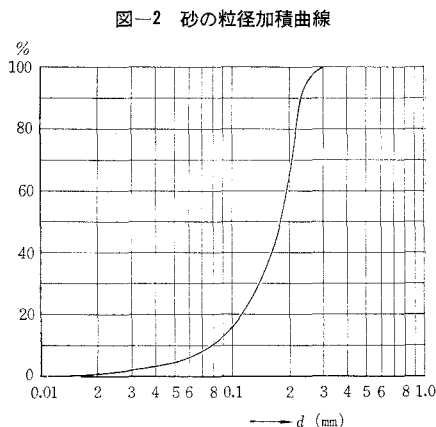
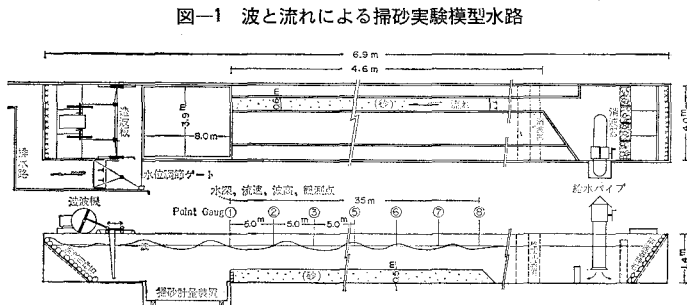
河口における堆砂現象，砂を築堤材料とする堤防の施工過程の掃砂現象，海流，海浜流の場での漂砂現象など波と流れの共存する場での砂の移動を知ることが重要な問題である。しかし移動床に関する現象は単なる流れ，あるいは波のみの場合についても多くの研究成果はあるが，必ずしも決定的なものはない。流れの場に波が共存する場合の研究はさらに

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—加藤^{(1), (2), (3)}, Benjamin, Longuet-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って、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。

この報告書は河口堆砂の掃流、干拓地潮受堤防の築堤過程における砂マウンドの潮汐流による掃流を対象に行なったもので、今回の報告では波が流れにさかのぼる場合についての掃砂に関するものである。

2. 実験装置とその方法

実験装置を図-1に示す。上流端に給水管があり0~200 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3.9×8.0 m×1 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ーに記録され、1 kgの精度をもつ。沈砂部の後にピストン型の造波機があり、沈砂部と造波機の間で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 cm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。この平均流速についての意味は次項3.で検討する。波高は超音波波高計を用い、波長は目視観測



によった。移動砂量は末端の砂受けて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 m 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った。実験に使用した砂の粒径組成は図-2に示すようであり真比重 σ は 2.64 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

* 正會員 農林省農業土木試驗場

粒径およびその組成, 比重などによって定まる。底面付近の流れの状態は非定常な波動運動が重なって, 安定した境界層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, ある周期をもっ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って論じられる。

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。

いま一様流 $u_1(z)$ の上に波が邇上したときの水粒子の水平流速を u とし

$$u = u_1 + u_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

とすれば

$$u_1 = u_1(z) \quad \dots\dots\dots (2)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに } \eta \text{ は波形で } \eta = f(m, k, H, x, z, t) \\ m = 2\pi/L, k = 2\pi/T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

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。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, 図-3 に示す u_b の時間平均値の関数として示されるものとする。すなわち式(2)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って掃流力 τ_b を規定する。図-4 に u_b の変化を模式的に示す。

すなわち

$$\tau_b = K_1 \rho u_b^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$|\bar{u}_b| = K_1 \rho \bar{u}_b^2 \Rightarrow K_2 \rho |\bar{u}_b|^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

また摩擦速度 u^* に対して

図-3 流速分布例

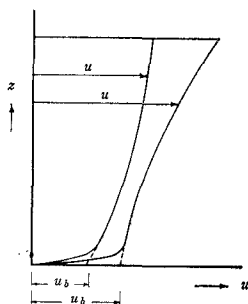
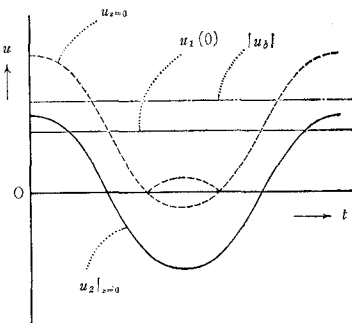


図-4 底面流速の変化と平均値



$$u_b = \alpha u^* \quad \dots\dots\dots (6)$$

であり, 掃砂量 q_b は流れに対し普通式(7)で示される。

$$\frac{q_b}{u^* d} = f\left(\frac{u^*}{v_w}, \frac{v_w \cdot d}{\nu}\right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに, d は砂粒子径, v_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。これに波の重なった場合の掃砂量は, 粒子沈降のレイノルズ数 $v_w d / \nu$ を略して

$$\frac{q_b}{U_b d} = g\left(\frac{U_b}{v_w}, \frac{U_b}{V_0}, \frac{h}{L}, \frac{H}{L}, \frac{H}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに,

$$U_b = |\bar{u}_b|, V_0 = \frac{1}{h} \int_0^h u_1 dz \quad \dots\dots\dots (9)$$

で示される。

つぎに, $U_b = |\bar{u}_b|$ について検討する。

流れをさかのぼる波における流速は浜田・加藤^{1), 2), 3)}によって理論的近似解が得られている。

いま, 一様流速分布の流れに波が邇上する場合について U_b に関する因子の元構成を調べておく。

式(2)で $u_1(z) = U$ なる一様流速分布の流れに式(3)の $\eta = H e^{i m(x - ct)/2}$ なる波がさかのぼるとき,

$$u_{2b} = u_2|_{z=0} = \frac{H m(c-U)}{2 \sinh m h} \cos m(x - ct) \quad \dots\dots\dots (10)$$

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

$$U_b = |\bar{u}_b| = \frac{1}{T} \int_0^T |u_b| dt \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{H m(c-U)}{2 \sinh m h} > U \text{ のとき}$$

$$\begin{aligned} U_b = U \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{2 U \sinh m h}{H m(c-U)} \right\} \\ + \frac{H m(c-U)}{2 \pi \sinh m h} \left\{ 1 + \frac{2 U \sinh m h}{H m(c-U)} \right\} \\ \therefore \frac{U_b}{U} = \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{\sinh 2 \pi h/L}{\pi \left(\frac{H}{TU} - \frac{H}{L} \right)} \right\} \\ + \left(\frac{H}{TU} - \frac{H}{L} \right) \left\{ 1 + \frac{\sinh 2 \pi h/L}{\pi \left(\frac{H}{TU} - \frac{H}{L} \right)} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{H m(c-U)}{2 \sinh m h} \leq U \text{ のとき}$$

$$\begin{aligned} U_b = U + \frac{H m(c-U)}{2 \pi \sinh m h} \\ \frac{U_b}{U} = 1 + \frac{\left(\frac{H}{TU} - \frac{H}{L} \right)}{\sinh 2 \pi h/L} \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

式(12), (13)から一様流速分布の流れを波がさかのぼる場合の底面の絶対値平均流速が求まる。

われわれの実験では後述の図-5に示すように, 流れは一様でなく放物線型分布とも様子を異にする。しかし

図-5 流速分布例

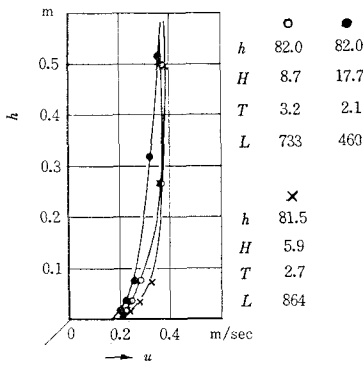


図-6 流速分布例

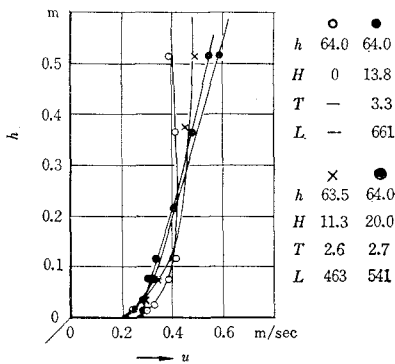


図-7 流速分布例

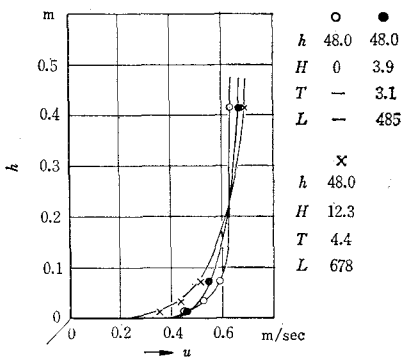
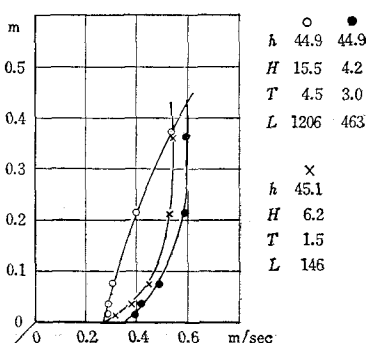


図-8 流速分布例



このような形で定義した U_b はむしろ一様流に近く、その関係因子の無次元方程式として式 (12), (13) から

$$\frac{U_b}{V_0} = f\left(\frac{H}{V_0 T}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}\right) \dots\dots\dots (14)$$

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_{2dz} は式 (10) に対応して

$$v_{2dz} = \frac{Hm(c-U)}{2 \sinh mh} m \cdot \Delta z \sin m(x-ct) \dots\dots (15)$$

よって 1 周期間の軌跡長の比は

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

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

$$\frac{Y}{X} = \frac{2\pi \Delta z}{L} \cdot \left(\frac{H}{UT} - \frac{H}{L}\right) \dots\dots\dots (16)$$

Δz 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 (14) 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。

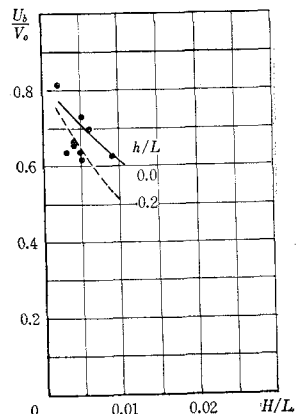
掃砂量 q_B に関する因子はきわめて多いので式 (14) によってまず U_b/V_0 を求め、その後式 (8) にしたがって $q_B/(U_b d)$ を求めることにする。図-5~8 は流速観測値の 2, 3 の例を示した。流速 U は既述のように

$$U = |\bar{u}|$$

である。 U_b は図中の観測点を平滑化して底面における値として求める。

図-9~14 は各 $H/(V_0 T)$ ごとに主として U_b/V_0 と H/L との関係を示している。図中には h/L の限界線が記入してある。横軸変数 図-9 波、流れと $U_b(H/V_0 T < 0.01)$

と媒変数とを取り代えてまとめることにより各無次元因子間の平滑化が行なわれ、これをまとめたものが 図-15~18 および 図-19~22 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って求めた流速) なる流れに波 (H, L, T) が遡上する場合の U_b/V_0 および U_0 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。

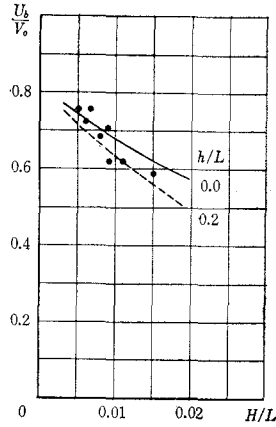
式(8)において砂の沈降速度 v_w は

$$v_w = c\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd}$$

であるから、これと U_b の比を横軸にとり媒変数に H/h をとってまとめたものが図-23~27である。図中の線は H/h を変数にとって得たものを記入してある。

これらをまとめたものが図-28である。これら図中の測点について U_b/V_o はあまりパラメーターとして十分でなく、結局図-15~22によって波と流れを与えた場合の U_b/V_o を求め、これ

図-10 波, 流れと U_b ($0.01 \leq H/V_o T < 0.01$)



から U_b を求めて図-28に適用し掃砂量 q_B を求めてよい。

波なしの場合について摩擦速度 U_*^* を求め U_b と比較すると

$$\tau = \rho U_*^* = \rho K U_b^2$$

図-14 波, 流れと U_b ($0.2 \leq H/V_o T$)

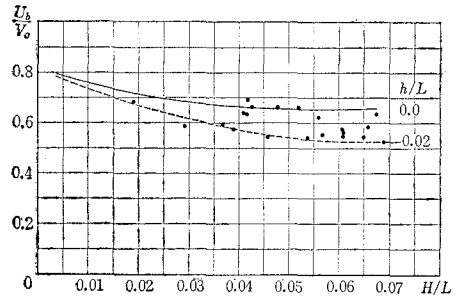


図-11 波, 流れと U_b ($0.02 \leq H/V_o T < 0.06$)

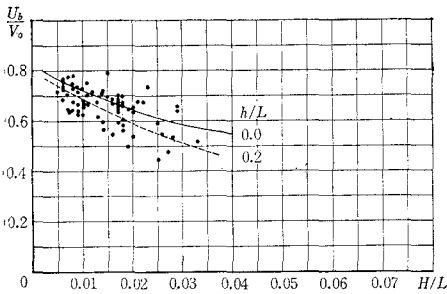


図-12 波, 流れと U_b ($0.06 \leq H/V_o T < 0.1$)

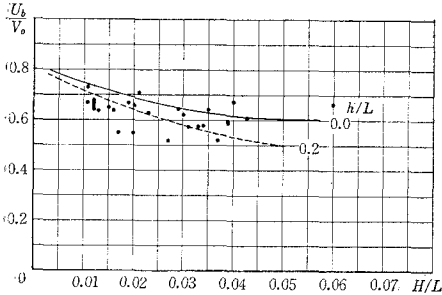


図-13 波, 流れと U_b ($0.1 \leq H/V_o T < 0.2$)

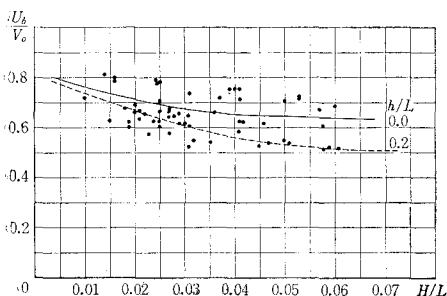


図-15 波, 流れと U_b

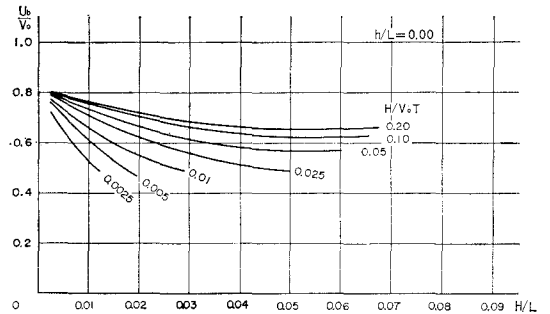


図-16 波, 流れと U_b

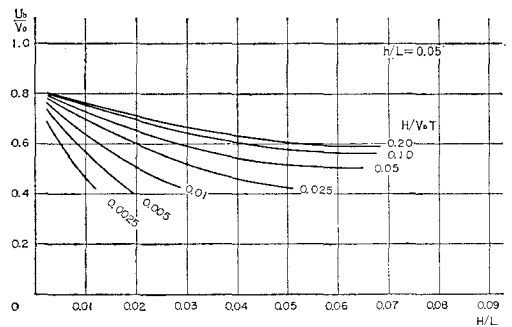


図-17 波, 流れと U_b

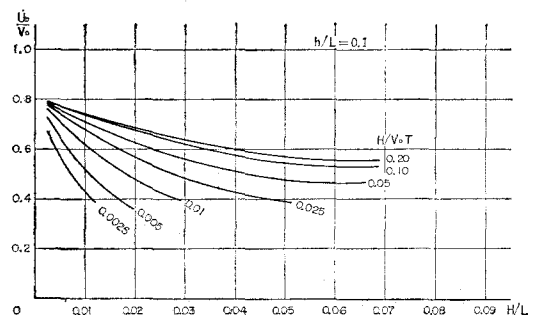


図-18 波, 流れと U_b

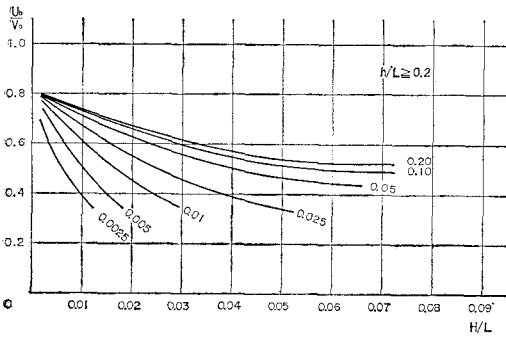


図-19 波, 流れと U_b ($h/L=0.00$)

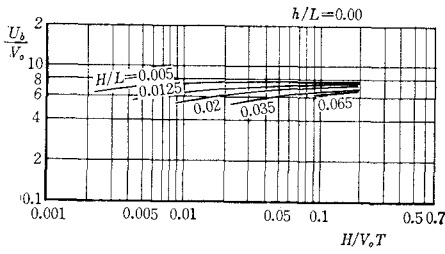


図-20 波, 流れと U_b ($h/L=0.05$)

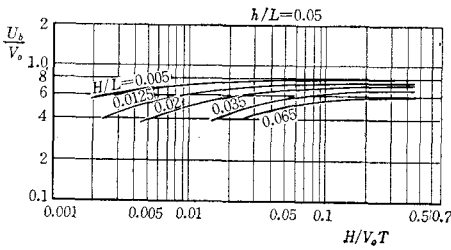


図-21 波, 流れと U_b ($h/L=0.10$)

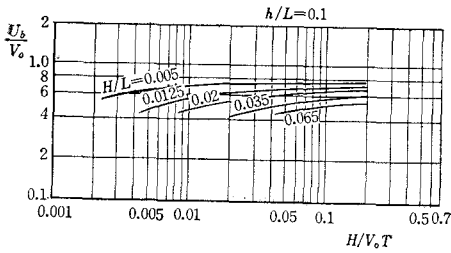


図-22 波, 流れと U_b ($h/L=0.20$)

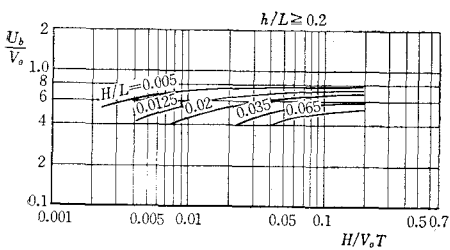


図-23 砂, U_b と掃砂量

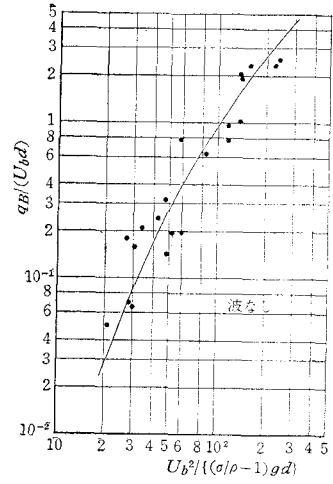


図-24 砂, U_b と掃砂量

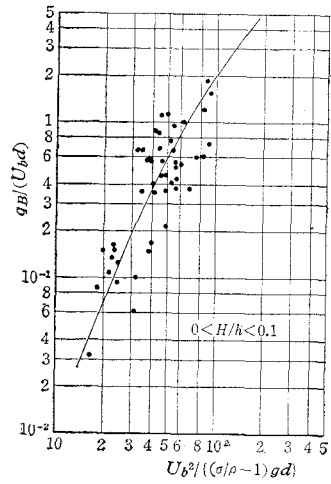


図-25 砂, U_b と掃砂量

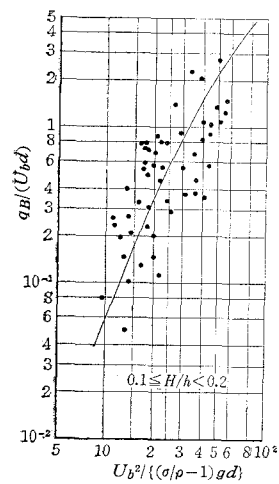


図-26 砂, U_b と掃砂量

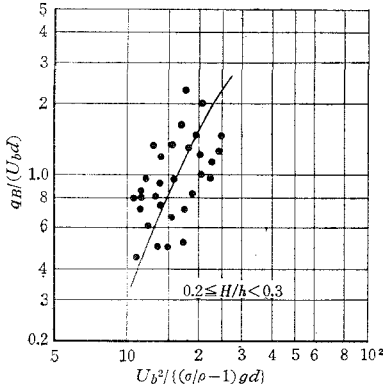


図-27 砂, U_b と掃砂量

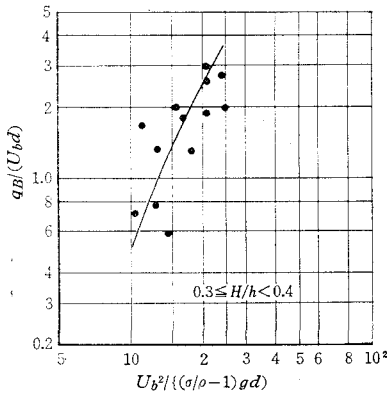
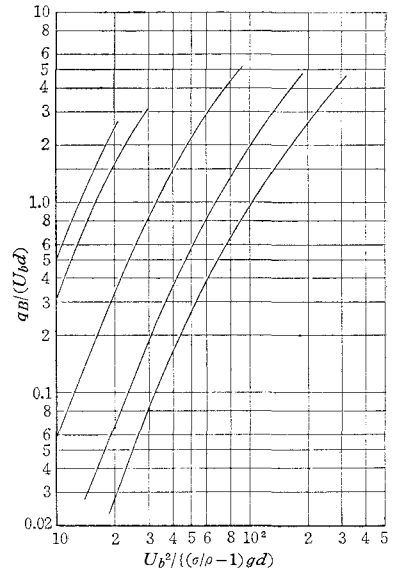


図-28 砂, U_b と掃砂量



象に関しては理論的裏付けが必要となろう。実験領域についても波なしの状態から碎波までの条件で行なったが、流れがごく小さく、波の大きい場合については若干データが不足している。

また流れと波が同方向に進行する場合については、理論的検討と相まって次回に報告する。

波と流れの共存下での掃砂に関する資料の乏しい現在、不十分な点をご指摘いただくとともに実用上の参考となをことを期待する。

参 考 文 献

- 1) 浜田徳一・加藤 始：流れをさかのぼる波についての一計算，第8回海岸工学講演会講演集，1961.
- 2) 浜田徳一・加藤 始：流れの中の有限振幅波の計算，第10回海岸工学講演会講演集，1963.
- 3) 浜田徳一：流れの中の有限振幅波追補：第11回海岸工学講演会講演集，1964.

とにおいて

$$K=0.017$$

に相当する。

4. む す び

流れに波が遡上する場合の底面の掃砂量について、以上主として実験的にまとめた結果を報告した。移動床実験であるため測点にばらつきが多く、したがってこの現