

波と流れによる砂の移動について (II)

中 村 充* 白 石 英 彦* 佐々木 泰 雄*

1. 緒 言

河口における堆砂、掃砂の現象、砂を築堤材料とする海中構築物に対する掃砂現象、海流、海浜流による漂砂などは、流れと同時に波の影響を受ける。このことについて筆者らは先に第15回海岸工学講演会において一部を発表した。それは波が流れをさかのぼる場合の砂の移動に関するものであった。今回は波が流れに沿う場合の砂の移動、および波が流れに重なった場合の波の変形について報告する。

2. 流れの場における波の変形

先に報告した¹⁾ 波が流れに遡上する場合の砂の移動に関する研究の掃砂量は、それぞれの位置における波、流速に対応する平衡掃砂量である。したがって波の遡上、あるいは流下によって波が変形すればその位置での掃砂量も変わる。この章では流れをさかのぼる波の変形について検討する。これに関しては Longuet-Higgins, Stewart, 浜田・加藤・富永その他の研究がある。これらの研究はエネルギーの損失を省略したもの、および波が流れに重なった直後におけるもので、流れをさかのぼる過程での変形にはふれていない。ここでは、実用上の立場から若干の推論を試みる。

(1) 実験装置と実験方法

長さ 50m, 幅 4m の実験水路を二つに仕切り、一方の水路は流れのない状態にし、他の一方の水路には造波装置と反対方向に $\phi 300$ mm の導水管を設け、波の進行方向の反対側から流れを与えるようにした。また造波部側には水位調整ゲートを設け、水路内を通過した水量はこのゲートから末端に流下するようにし、流量は最大 180 l/sec で、流速は通水断面と流量から定まる。実験は条件をまったく同じにして、流れのある水路と流れのない水路で同時に観測することにした。

実験した諸元は、水深 (h) 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm, 80 cm, 波の周期は 1.5~4.5 sec, 波高は 5~15 cm 程度の範囲である。

波の観測は、仕切られたところから約 2.0m ほど奥まったところに最初の観測点を設け、そこから約 3.0m,

7.0 m, 12.0 m, 20.0 m, 27.0 m の 5 か所で観測することにした。

これらの観測点で約 1.0 m の間隔に 2 台の検出部を設け、同時観測をした。これによって、2 つの検出部の間の波速を測定することができ、これと観測された周期から波長を求めることにしてある。

計測には超音波波高計を用い、自動平衡型記録計に記録させた。波高、周期、波速については記録された波形から、連続ほぼ 10 波についてそれぞれを読みとり、これを平均して 1 つの観測値とした。

(2) 実験結果

流れがある場合には、くずれ波状の碎波が見られるものがあり、碎波しない場合でも流れのない場合に比べて波高の高まりが見られる。これが流れを遡上する過程で複雑な変化が見られる。図-1 はくずれ波状の碎波が見られない場合について、流れのある場合とない場合の各点の波高の観測値を示したものである。すなわち、流れに遡上する初期においては、波高は流れのない場合に比べてある程度の高まりが見られ、これが距離とともに減衰している状況が見られ、ある一定の距離を進行すると流れがない場合よりも小さくなる傾向が見られる。これに対し 図-2 はくずれ波状の碎波をしている波高の観測値を、流れのない場合と対比して示してある。く

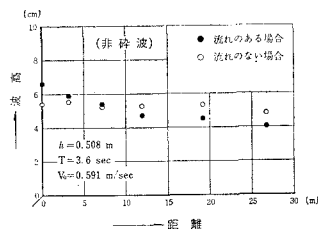


図-1 波高観測例

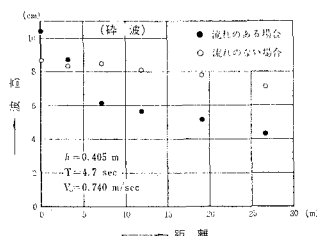


図-2 波高観測例

* 正会員 農林省農業土木試験場 水理部

ずれ波状の砕波はある区間進行してふたたび非砕波の波形を形成し、さらに距離とともに減少する傾向が見られる。図-2に示してある観測点は第2観測点までが砕波の状態であり、第3観測点以降は非砕波の状態である。図-3は砕波している場合の周期の変化を示したものであるが、砕波後においていくぶん周期が長くなる傾向が全体的に見られ、砕波していない場合にはこのような変化はまったく見られない。図-4は流れをさかのぼる波の波高変化を示している。この図は波の進行にしたがって波高が指数関数的に減少していることを示している。これは従来の諸理論が波の進行に対してその減少にふれていないが、実用上はこれを扱う必要のあることを示している。

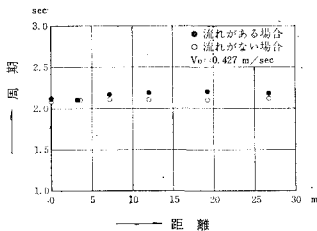


図-3 砕波による周期の変化

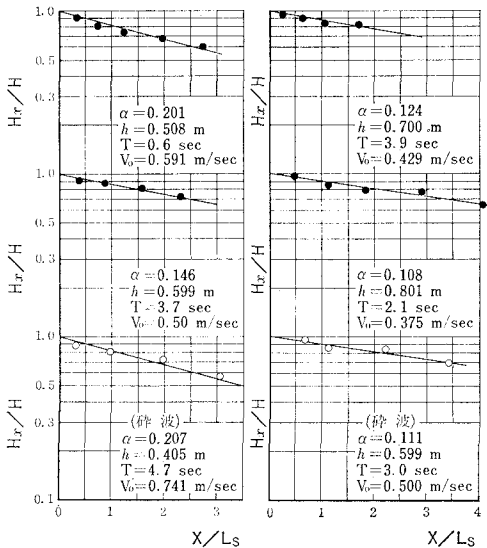


図-4 波高の位置的变化

(3) 砕波限界

波が流れの場に侵入し、さかのぼるとき、一般に波高を増大し、場合によっては砕波する。微小振幅波理論による深水波の砕波限界は $2\pi V_0/(gT) \geq 1/4$ であるが、水深 h における砕波限界は筆者らの実験によれば図-5のごとく $2\pi V_0/(gT) \geq 1/8$ で砕波が生じている。これは波速 C と流速 V_0 の関係で議論されるものであるが、砕波がエネルギーの過飽和による放出機構と考えるならば、侵入波高 H_i も関連することになり、この観点から

次元解析して砕波限界をまとめたものが図-6である。ここに T は波の周期、 h は水深である。

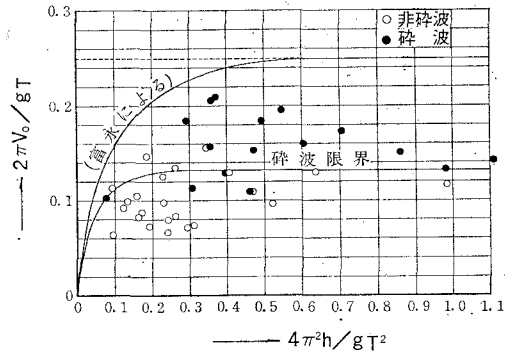


図-5 流れに波が遡上するときの砕波限界

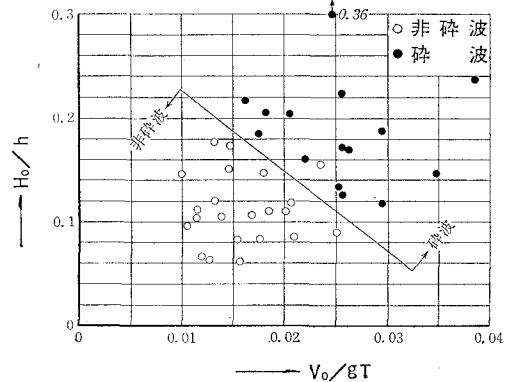


図-6 流れた波が遡上するときの砕波限界

(4) 流れによる侵入波長の変化

波が一樣流に重なった場合の波長 L と一樣流速 V_0 との関係は

$$(C \pm V_0)^2 = \frac{g}{m} \tanh mh \dots\dots\dots (1)$$

ここに復号の上段は、波が流れに遡上するとき、下段は流れに沿う場合である。

微小振幅波の量には添字 S を付けることにする。式(1)を

$$C_S^2 = \frac{g}{m_S} \tanh m_S h$$

で割り

$$\left(\frac{C}{C_S} \pm \frac{V_0}{C_S} \right)^2 = \frac{m_S}{m} \frac{\tanh mh}{\tanh m_S h}$$

$$\therefore \left(\frac{L}{L_S} \pm \frac{V_0}{C_S} \right)^2 = \frac{L}{L_S} \frac{\tanh \left(\frac{2\pi h}{L_S} \cdot \frac{L}{L} \right)}{\tanh \frac{2\pi h}{L_S}} \dots\dots (2)$$

で示される。

図-7は実験値 ($h/L_S = 0.05 \sim 0.15$ の範囲) と式(2)による理論値(点線)の対比を示す。

この図によれば、式(2)による値は実験値に対し過小

な値である。この理由は式(2)が正弦波形の微小振幅波として求めているためであろう。いま実用上実験係数を用いて修正し、式(3)としたものが図-7の中の実線である。

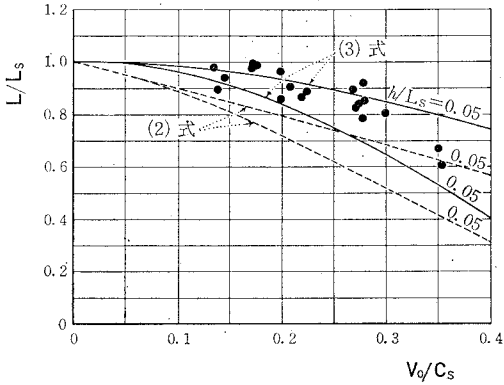


図-7 流れによる波長の変化

$$\left(x \pm \frac{V_0}{C_s}\right)^2 = x \frac{\tanh \frac{2\pi h}{L_s x}}{\tanh \frac{2\pi h}{L_s}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{L}{L_s} = \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{V_0}{C_s} \right)^{0.15} \right\} \pm 1 \quad x$$

式(3)から、水深 h 、流速 V_0 なる流れに、周期 T なる波が迎上する場合の波長 L が計算される。

波速 C は流速 $V_0=0$ なる場合の波長 L_s 、波速 C_s を用いて式(3)および

$$\frac{C}{C_s} = \frac{L}{L_s} \quad \dots\dots\dots (4)$$

を用いて計算される。

(5) 流れによる侵入波高の変化

流れのない場から流れのある場に波が進行すると、波高を増大する。進入直後はエネルギー損失を省略して、波の伝達エネルギー $\bar{E}$ について、

$$\bar{E} = n_s C_s E_s = (nC \mp V_0) E$$

$$E_s = \frac{1}{8} \rho g H_s^2, \quad E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

$$n_s = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h / L_s}{\sinh 4\pi h / L_s} \right)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{L_s} \cdot \frac{L_s}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L_s} \cdot \frac{L_s}{L}} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに H, L は流れに重なった直後の波高、波長である。式(5)から

$$\frac{E}{E_s} = \frac{n_s C_s}{nC \mp V_0}$$

$$\frac{H}{H_s} = \left\{ \frac{1}{\frac{n}{n_s} \cdot \frac{L}{L_s} \pm \frac{1}{n_s} \frac{V_0}{C_s}} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式中の L/L_s は式(3)を解いて与えられるから式

(6)から、波高 H が求められる。図-8は実験値($h/L_s = 0.05 \sim 0.15$)と式(6)による理論値との対比を示したものである。

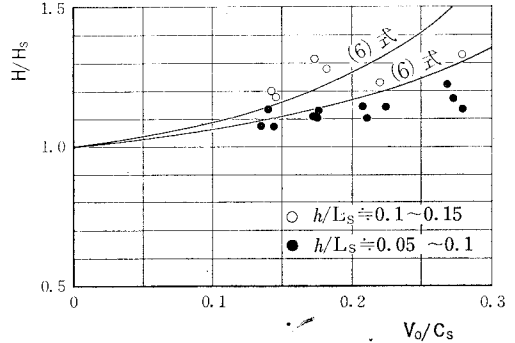


図-8 流れによる波高変化

式(3)、(6)を計算して図-9、図-10に示しておく。波が流れに侵入したとき砕波の起こる場合には、砕波によるエネルギーの損失を考慮しなければならない。実験結果を示せば図-11に示すようになる。

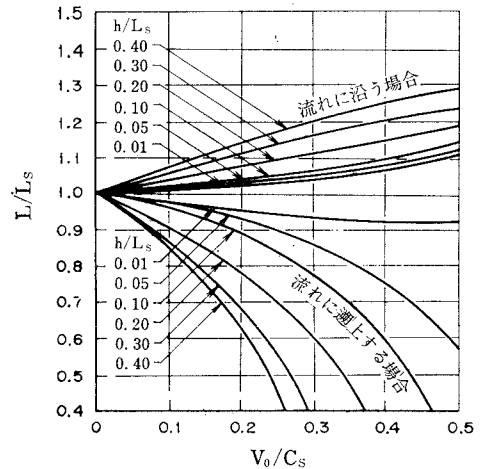


図-9 流れによる波長変化

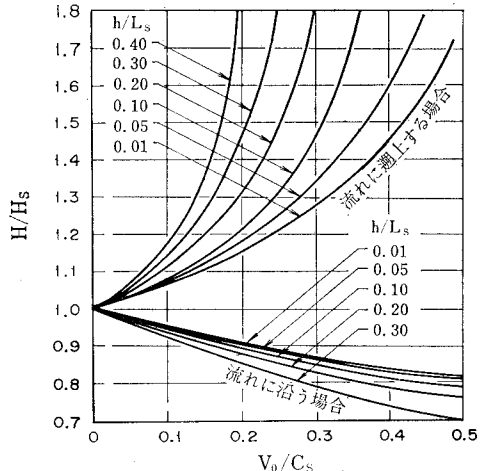
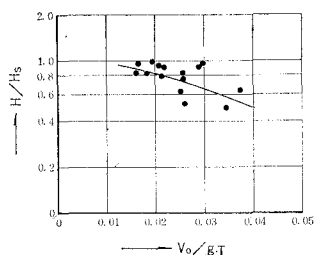


図-10 流れによる波高変化



図—11 流れによる碎波後の波高変化

(6) 波の進行に伴う波高の変化

エネルギー損失を伴わない波の遡上は式 (3), (6) で計算される。しかし実際には図—4 に示すように、波が遡上するにしたがって著しい波高減少を生ずる。よって、波が流れに重なった直後の波高は式 (6) および図—10 で求められるが、この波は進行距離 x に関して減少していく。このエネルギー損失は、本来運動方程式の粘性項を扱うことによって議論されるべきであるが、図—4 に示される実験的事実を参考に考察する。水理学における各種損失エネルギーをはじめ、多くの物理量の逸散過程にならって、遡上に伴うエネルギーの逸散は、その点に含まれるエネルギーに比例するとする。そうすると

$$\frac{dE_x}{dx} = -KE_x \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで

$$E_x = C_e E_x = (nC \mp V_0) E_x$$

であるから

$$\frac{dE_x}{E_x} = -\frac{K}{C_e} dx \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $x=0$ で $E_x = E = 1/8 \rho g H^2$ になるように積分する。

ここに、 H は式 (6) または図—10 で求められる、流れに侵入した直後の波高である。

$$E_x = E \exp\left(-\frac{K}{nC \mp V_0} x\right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\bar{E}_x = \left\{ (nC \mp V_0) \exp\left(-\frac{Kx}{nC \mp V_0}\right) \right\} \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

または

$$\frac{H_x}{H} = \exp\left\{-\frac{Kx}{2(nC \mp V_0)}\right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

常用対数で示せば

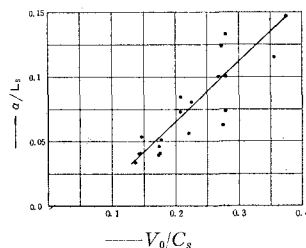
$$\left. \begin{aligned} \frac{H_x}{H} &= 10^{-\alpha x / L_s} \\ \alpha &= \frac{0.434 K L_s}{2(nC \mp V_0)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

よって、 α が求められれば、波の進行に伴う波高 H_x の変化を求めることができる。

α はまた

$$\frac{\alpha}{L_s} = \frac{0.434 \frac{K}{C_s}}{2\left(n \frac{L}{L_s} \mp \frac{V_0}{C_s}\right)}$$

α と V_0/C_s の関係を実験的に求めたのが図—12 である。

図—12 α/L_s と V_0/C_s の関係

3. 波と流れによる砂の移動

波が流れに遡上する場合の砂の移動についてはすでに報告した。ここでは波が流れに沿う場合の砂の移動について報告する。

(1) 実験装置と実験方法

実験装置は次のようである。造波水路は $1.4 \times 4 \times 46\text{m}$ で、この水路を幅 0.6m に仕切り 46m 区間に砂を散布して実験区間とする。上流端に造波機および給水装置 (流量 180 l/sec) がある。下流端には砂受けとその計量装置 (磁ひずみ式、精度 1 kg) がある。またこの実験では砂の散布区間の長さを補うために、上流側に砂の補給装置をおき一様に給砂した。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ー式流速計を使用し、底面上 1.5 cm, 2 cm, 6 cm, 10 cm, そのうえは 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。波高は超音波波高計用い、波長は目視観測によった。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各断面で砂の侵食高さを測定し、砂移動の連続条件から砂の移動量を求めた。流速、および波の観測位置は末端から 5m 間隔に 8 か所とし、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 分間隔で底面の砂移動を観測した。流量は $Q=180 \text{ l/sec}$, 155 l/sec を幅 60 cm, 水深約 30, 40, 50, 60, 70, 80 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沿って起こし、波高、波長、周期、流速分布を各位置で測定した。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った。実験に使用した砂は平均粒径 0.18 mm, 真比重 2.64 のほぼ一様な砂である。

(2) 実験結果

平均流速 V_0 の流れに波高 H , 周期 T の波が重なったときの砂の移動は、前報同様にとりまとめる。すなわ

ち、砂の移動に直接関係する底層における摩擦応力 τ_b の時間平均値を規定するものとして、底面における境界層外縁の平均流速 u_b を用いる。この値は流速の鉛直分布の実測値から底面流速の平均値として求めた。もし一様流速分布の流れ V_0 に周期 T の波が重なって

$$\eta = \frac{H}{2} \exp \left\{ i \frac{2\pi}{L} (x - Ct) \right\}$$

なる波形を作るとき、底面の水平流速 u_b は

$$u_b = \frac{2\pi H(C - V_0)/L}{2 \sinh 2\pi h/L} \cos 2\pi(x - Ct)/L + V_0$$

で与えられる。この式から u_b の時間平均値 U_b に関する元構成を考えて

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

前回において、上式にしたがって実験値を求めたものを報告した。今回も同様にまとめ、その結果を図-13～図-17に示す。図中点線は前回報告したものの一部を同時に書いてある。

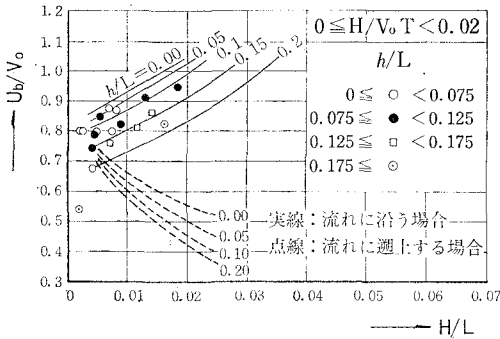


図-13 波と流れによる底面流速

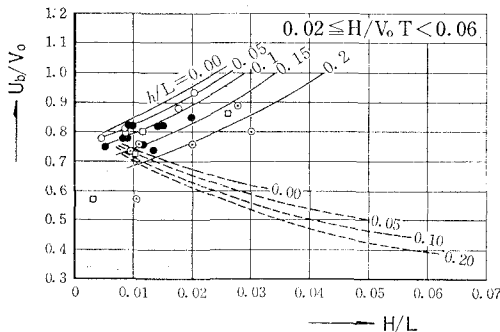


図-14 波と流れによる底面流速

底流速の時間平均値 u_b を底面摩擦速度に代るものとして、

$$\frac{q_B}{U_b d} = \phi\left(\frac{U_b}{v_w}, \frac{H}{h}\right)$$

ここに、

q_B : 単位時間、単位幅当りの掃砂量
 v_w : 静水中の砂の沈降速度
 d : 砂の粒径

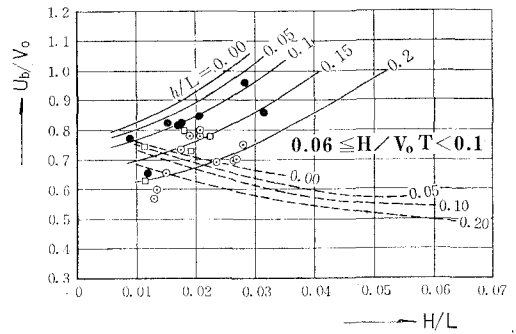


図-15 波と流れによる底面流速

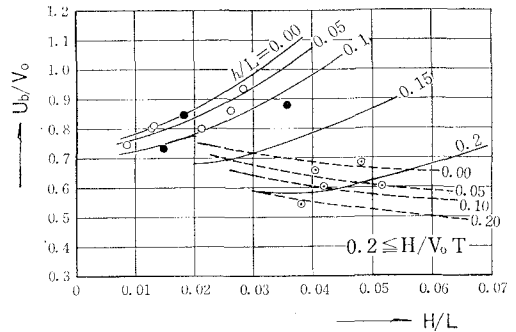


図-16 波と流れによる底面流速

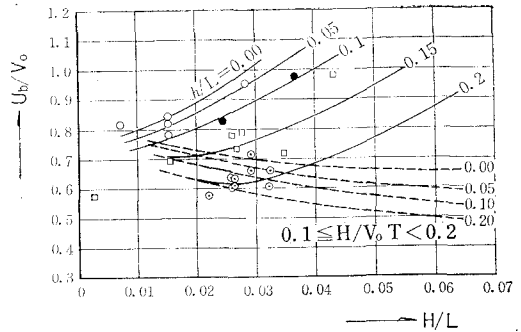
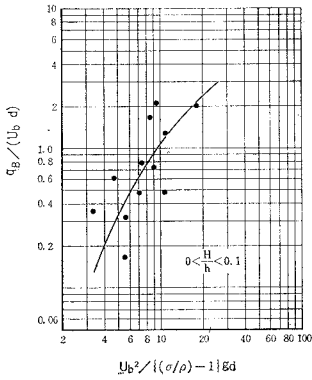


図-17 波と流れによる底面流速

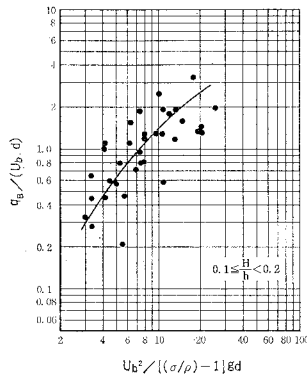
で示される。

この式にしたがって実験値を整理すると図-18～図-21となる。これをまとめたものが図-22である。図中点線は波が流れに遡上するときの値である。

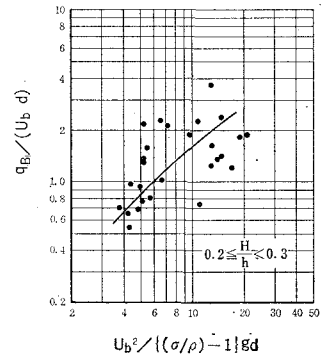
以上、流れに波が重なる場合の掃砂量について研究した結果を報告した。掃砂、漂砂いづれもが十分に開発されていない現在、両現象の共存する場合についての本研究は、主として実験的にまとめたものになった。しかし実験値のばらつきが大きく、これらの補外使用は注意を要する。波と流れの共存下での掃砂に関する資料の乏しい現在、不十分な点はご指摘いただくとともに、実用上の参考となることを期待する。また本論文中で関連する現象として流れの場での波の変形を求めた。これは単に掃



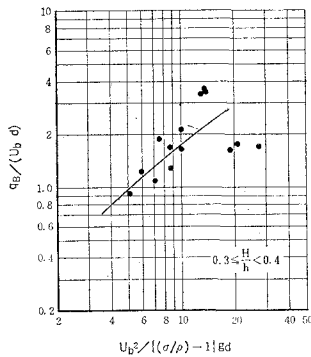
図—18 砂の特性，底面流速と掃砂量
(流れに波が沿う場合)



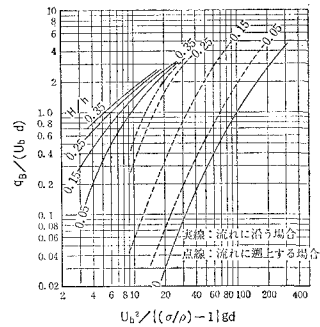
図—19 砂の特性，底面流速と掃砂量
(流れに波が沿う場合)



図—20 砂の特性，底面流速と掃砂量
(流れに波が沿う場合)



図—21 砂の特性，底面流速と掃砂量
(流れに波が沿う場合)



図—22 砂の特性，底面流速と掃砂量

砂のみでなく用いることのできるもので，あわせてご批判を願う。

参 考 文 献

- 1) 中村充・白石英彦・佐々木泰雄・伊藤三甲雄(1968)：波

と流れによる砂の移動について，第15回海岸工学講演会講演集

- 2) 富永政英(1967)：流れと波について——河口に侵入して来る波および流れのある海域に発生する風波について，海岸災害研究ニュース第6号