

II-25 河岸浸食における斜面効果の影響に関する実験・解析

北海道大学 正員 長谷川 和義
同 上 学生員 望月 明彦
同 上 学生員 水端 聡

1. はじめに

昨年行われたシルト・細砂混入河岸の浸食に関する実験においては、実測浸食量が掃流形式を仮定した理論浸食量を上まわる傾向を示し、これを動摩擦係数 μ_k の変化による砂粒の動きやすさによって説明付けた。このことは、言い換えれば、シルトによる粘着力の働きで、側岸部が急斜面化し、砂粒に対して重力の斜面方向成分(斜面効果)が働いていると言うことになる。一方、細砂河岸の浸食は、掃流形式だけでなく、浮遊形式によっても進行し、平衡形状移行過程に大きな影響を及ぼしていると考えられる。そこで、本研究では、実験例を増やすとともに、斜面効果を考慮した理論式と実測値を比較し、また、浮遊砂濃度測定をより正確にし、得られた実測値と浮遊砂まき上げ量式を比較することによって、シルト・細砂河岸の浸食機構を調べることに主眼を置くことにした。

2. 実験の概要と主要結果

2-1) 実験の概要

河岸構成材料は、中央粒径 0.1mm と 0.48mm の二種類の珪砂とシールド用粘土SCP-Bをそれぞれ60%、15%、25%の比率で混合したもので、図-1に示すような粒度分布を持ち、石狩川月形大橋付近における構成に近いものとなっている。混合材料の中央粒径は、 0.1mm で、粘土・シルト混合率は、30%であるが、これらによって砂粒子のかみ合いが阻害されることはない。

実験水路は、可傾斜循環式水路であり、可能な限り上下部水槽に流砂の堆積が生じないようにした。また、濃度測定用の採水装置(サイフォン)は、より正確な実測値を得るために次のような改良を加えた。①吸引速度と流水速度を同一にするため、パイプの内径を 3mm と太くし、水頭差を約 150cm とした。②流路幅の変化に対応できるように、横断方向の測定地点を 5cm ごとに自由に換えられるようにした。③採水量を $500\text{cc}\sim 800\text{cc}$ とした。

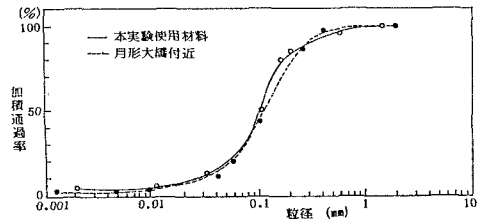


図-1 本実験使用材料の粒度分布

	流量 $Q(\text{l/s})$	空隙率 λ	水面勾配 I	半断面積 $a(\text{cm}^2)$	流路半幅 $b(\text{cm})$	潤辺 $s(\text{cm})$	平均流速 $V(\text{cm/s})$	通水時間 $t(\text{s})$	無次元せん断力 τ^*
Run F 7-1	10.8	0.453	1/299	211.2	42.0	43.7	51.1	3180	0.975
2			1/471	293.5	59.5	60.7	36.8	4440	0.619
Run F 8-1	13.0	0.451	1/196	206.9	38.8	41.9	62.8	1080	1.518
2			1/193	193.8	48.5	50.3	67.1	2340	1.204
3			1/261	203.2	50.8	52.4	63.0	5400	0.395
4			1/303	220.7	67.0	67.6	58.9	8100	0.649
Run F 9-1	12.5	0.450	1/298	207.9	41.3	43.4	60.1	1620	0.968
2			1/367	225.5	48.5	51.7	55.4	3180	0.716
3			1/381	283.1	60.7	62.4	44.2	4440	0.717
4			1/252	226.1	68.3	68.9	55.3	9900	0.784
Run F10-0	11.0	0.452	1/287	184.4	68.5	69.1	59.7	0	0.560
1			1/267	349.7	72.0	73.5	31.5	5400	1.073
Run F11-0	6.8	0.442	1/263	142.5	65.0	65.1	47.7	0	0.501
1			1/178	249.4	71.5	72.3	27.3	7200	1.167
Run F12-0	6.8	0.435	1/150	110.7	58.6	58.8	61.4	0	0.756
1			1/165	119.9	61.0	61.3	56.7	3600	0.715
Run F13-1	12.5	0.539	1/444	267.4	65.5	66.1	46.7	7500	0.549
Run F14-1	12.5	0.559	1/296	284.8	73.5	74.2	43.9	16200	0.781

表-1 実験水理諸量

実験方法は、ほぼ昨年と同様な手順で行っているが、実験は、浸食が停止（平衡状態）するか、水路幅(80cm)まで拡幅した時点で終えている。なお、実施した実験条件及び水理諸量は、表-1の通りである。

2-2) 実験結果

図-2は、実施実験の水理量の時間変化を表したものである。図-2(a)の断面積の変化を見ると、全体的にやや増加する傾向にある。特にこの傾向は、砂漣が一面に発生したRun F-7,10,11に顕著に現れていることから、砂漣による河床抵抗の増加が原因であると判断される。また、Run F-9のように断面積が急激に増減しているケースは、砂漣の発生・消滅による結果である。また、図-2(b)に見られるように、拡幅過程は時間的に一様でなく、図のような階段的な広がりを示す。浸食は、まず河床と側岸の接合部で盛んに起こり始める。その間、流路幅はほとんど変化しない。やがて、上端部は、接合部での深掘れによって不安定な状態となり、1~2cmの幅でブロック状態の土塊が崩落する。崩落砂は流れに洗われ、運び出されて行く。以後この停滞と崩壊が繰り返されて浸食が進行していく。流路は場所的に一様浸食される訳ではない。砂漣や砂州の発生に伴う水流の乱れによって局所的な浸食が起こり、広幅の部分が形成され、それが徐々に下流側に伝わっていく実験が大部分を占めた。なお、シルトは、粘着力として働く以外は、ウォッシュロードとして流下するのみで浸食・堆積には、直接影響しないものと考えられる。

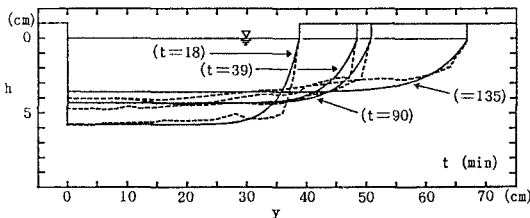
次に、Run F-8,9における断面変化過程を示したものを図-4(a),(b)に示す。破線は実測断面を示すが、これは、水路下端から、4m(No.3),6m(No.2),8m(No.1)の三つの測定断面の平均断面である。通水初期には、側岸は、粘着力によってほぼ垂直に切り立っている。シルトの溶け出しによって水が、褐色に濁るため、流砂の動きは観察できないが、急斜面上で、ひとたび砂粒子が動き出すと、斜面との接地機会が少ないまま水中を運ばれて行くと考えられ、まして、沈降速度の小さい細砂においては、浮遊形式または、それに近い状態で浸食されている可能性が高い。

図-4中の実線は、福岡・山坂(1984)の実験曲線(式(1))を示し、実験値に合せてパラメータを与えている。ただし、記号の定義は、図-3に示す通りである。

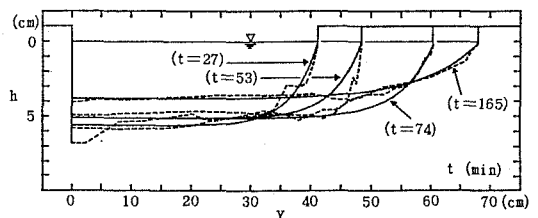
$$h=H \cdot [1 - \{\exp(-(b-y)/D) + \exp(-(b+y)/D) - \exp(2b/D)\}] \quad (1)$$

上式は側岸部での切り立った形状の表現については十分とは言えないが、おおよその一致が見られる。したがって、以後この関数形を用いて検討していく事にする。

図-5は、浮遊砂の濃度分布を示したものである。採取した浮遊砂には浸食・堆積に関与しないシルト分が含まれているため、シルト分を含んでいる場合と、74 μ のふるいでふるい分けし、シルト分を除いた場合の両方について図示した。等濃度線は後者についてかかれたものである。これを見ると、側岸部付近では、等濃度線が平行または、なだらかに側岸側に傾斜して、フラックスはわずかながら側岸を向く傾向を示している。砂漣・砂州の発生によって局所的な乱れを起こしているケースもある。



(a) Run F-8



(b) Run F-9

図-4 浸食横断面形状の時間変化

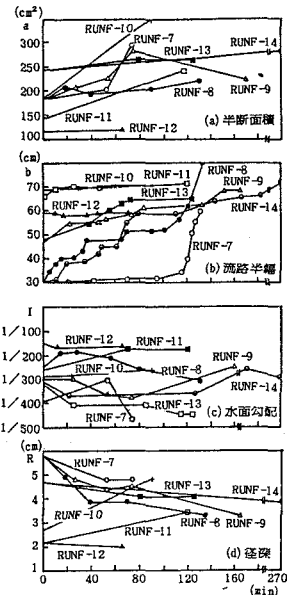


図-2 諸水理量の時間変化

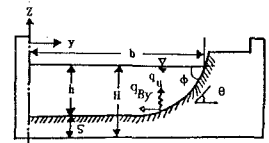


図-3 記号の定義

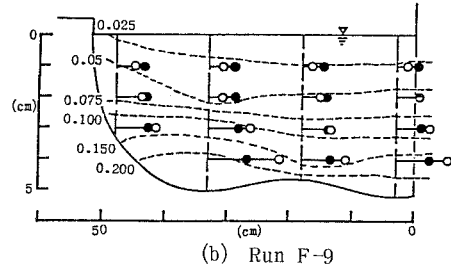
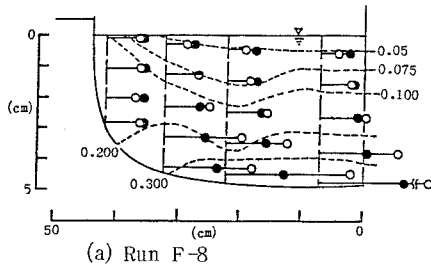


図-5 浮遊砂濃度の測定結果

3. 浸食量に及ぼす斜面効果

3-1) 斜面効果を考慮した掃流浸食量式

横断方向流砂量の算定は、福岡・山坂の方法を使用し、掃流砂のみの流砂連続式(2)から浸食流砂量を計算する。

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda_1} \cdot \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \quad (2)$$

ただし、 λ_1 は、砂以外の部分を空隙と見なしたときの河岸の空隙率である。

次に、上で求めた実測浸食量と理論浸食量を比較するため、理論式の誘導を行う。

全掃流力(τ_0)は、砂粒の限界掃流力(τ_{ccs})、砂粒の衝突によるせん断力(τ_{0G})と、慣性抵抗力(τ_{0u})に配分されると考える。すなわち、

$$\tau_0 = \tau_{0G} + \tau_{0u} + \tau_{ccs} \quad (3)$$

ここで、 τ_{ccs} として、芦田・江頭・加本(1983)の粘着力の影響を考慮した斜面上の限界掃流力式(4)を用いることにする。

$$\tau_{ccs} = \tau_{*c} \cdot \chi'$$

$$\chi' = \left\{ \cos \theta + \Delta \tau_{*c} / \tau_{*c} \right\} \sqrt{1 - \left\{ \tan \theta / \mu_s \right\}^2 \cdot \left[1 / \left\{ 1 + \Delta \tau_{*c} / (\tau_{*c} \cdot \cos \theta) \right\} \right]^2} \quad (4)$$

今、斜面上の各点からある一点に集まる砂粒子の量を考える。すなわち、各点からその一点に向かう浸食フラックスを各点ごとに積分してゆくと、一点に集まるべき砂の量が求められる。それに摩擦抵抗力を加える形で τ_{0G} を評価すると結果的に次式となる。ただし、 c =浸食フラックスである。

$$\tau_{0G} = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \cos \theta \cdot \mu_k \cdot \int \frac{c \cdot dP}{\psi_d \cdot u_* \cdot \left\{ 1 - 1 / \sqrt{(\mu_s / \mu_k) \cdot [\tau_* / (\tau_{*c} \cdot \cos \theta)]} \right\} \cdot \tan \gamma} \quad (5)$$

一方、(3)式において、掃流砂のみを仮定し、非平衡性を無視するならば、 $\tau_{0u} = 0$ となる。したがって、 $\tau_{0G} = \tau_0 - \tau_{ccs} = (\rho_s - \rho) g d (\tau_{*0} - \tau_{*ccs})$

と、表すことができる。上記二式を等値して、斜面上に沿って y 軸方向に運ばれる流砂量 q_{By} を求めると、 $q_{By} = \int c dP$ より次式となる。なお、式(5)中の μ_s / μ_k が $\tau_* / (\tau_{*cc} \cdot \cos \theta)$ の $1/3$ 乗に等しいとしている。

$$\frac{q_{By}}{\tan \theta} = \frac{3^{-\frac{1}{3}} \psi_d \cdot \tau_{*c}^{1.5}}{\mu_s \sqrt{\mu_s \cdot \mu_k}} \cdot (\cos \theta)^{-\frac{5}{6}} \left\{ \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \right)^{\frac{1}{3}} - (3 \cos \theta)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \right)^{-\frac{1}{3}} \right\} \cdot \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - \chi' \right) \quad (7)$$

ただし、 θ =斜面角、 τ_* =無次元掃流力、 τ_{*c} =粘着力の影響のない水平床上の限界掃流力、 $\Delta \tau_{*c}$ =粘着力による限界掃流力の増分、 $\mu_s = 1$ 、 $\mu_k = 0.8$ 、 $\psi_d = 8.5$ である。

3-2) 実験値との比較

図-6は、横軸に全掃流力の限界掃流力に対する比をとり、縦軸に無次元流砂量をとって実測値をプロットし、式(7)と比較したものである。式(7)の理論線については、 $\cos \theta = 1, 0.8, 0.5$ の場合、および粘着性効果をゼロとした場合をかいている。これらにより、斜面の効果と、粘着性の効果のあらわれを見ることができる。流砂の方向角

に及ばず影響を除外して考えると、斜面効果はそれほど大きなものでなく、 $\cos \theta = 0.5 (\theta = 60^\circ)$ においても、 $\cos \theta = 1$ の場合の2倍程度にとどまる。一方、粘着性の効果は、限界掃流力を3倍に引き上げており、掃流砂量に端的な違いを引き起こしているようである。これらを勘案すると、実測値は理論式のまわりに散らばっているが、おおまかな傾向は、説明できるように思われる。すなわち、水際に近いデータほど表層のシルト分が多い位置にあって理論線を下回る傾向を見せ、流砂量最大のあらわれる河床近傍のデータは、理論線の上側にきている。図中には、Run F-13, 14 の、シルトを除いた材料で河岸を構成した実験の結果も同時にのせてある。プロット点は、粘着力の影響を除いた式にちょうど一致しており、粘着力の評価の重要性を示している。一方、斜面効果については、データの多くが $\cos \theta = 1$ であり、きわだった違いは現れないようである。しかし、全体的に、データの立ち上がりが急であり、掃流砂の理論のみでは説明しがたい傾向を見せている。つまり、河岸の浸食は、掃流形式だけでなく浮遊形式によっても行われていると考えることができる。

3-3) 浮遊砂まき上げ量式

浸食がすべて浮遊形式で生じていると仮定した場合には、流砂連続式は次のようになる。

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \{q_u - w_o \cdot c(\zeta)\} \quad (8)$$

ここに、 q_u = まき上げ量、 w_o = 代表粒径の沈降速度、 $c(\zeta)$ = 河床近傍（基準点）における浮遊砂濃度、 λ = シルトを含む実際の空隙率である。 $c(\zeta)$ は実測のシルトを含む浮遊砂濃度分布に吉川・福岡(1968)の濃度分布式を当てはめ、外挿により5%水深の濃度を求めた。また、横断方向には、直線近似によって各点の値を求めている。 w_o としては、河岸材料の中央粒径に対する値を Rubey の式により求め、ここでは、0.844 cm/s を用いている。

式(8)によって q_u の値を求めることができる。

一方、理論値に対しては、砂粒子が一度、掃流形式で動き出し、慣性抵抗と摩擦抵抗を発揮するが、すぐさま水中にまき上げられ抵抗要因を失うようなモデルを考える。すなわち、

$$\tau_{ou} = (\text{摩擦抵抗}) + (\text{慣性抵抗}) \text{ と評価すると、} \quad \tau_{ou} = (\rho_s + \rho/2) \cdot \psi_d \cdot k_* \cdot u_{*cc} \sqrt{\frac{\mu_k \cdot \cos \theta}{\mu_s}} \cdot q_u \quad (9)$$

ただし、 $k_* = 6.6$ 、 u_{*cc} = 粘着性を考慮した無次元摩擦速度である。

一方、式(3)において、 $\tau_{oG} = 0$ とすると、

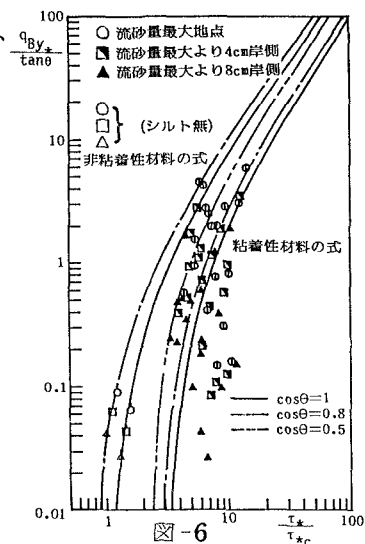
$$\tau_{ou} = \tau_o - \tau_{ccs} = (\rho - \rho_s) \cdot g \cdot d \cdot (\tau_{*o} - \tau_{*ccs})$$

以上の二式に各定数を代入し、 τ_{*ccs} には式(4)を使用して、 q_u/w_o を求めると次式になる。ただし、 χ'_o は、 $\theta = 0$ のときの χ' の値。

$$\frac{q_u}{w_o} = \frac{w_o \sqrt{\mu_s / (\mu_k \cdot \cos \theta)}}{6.6 (\rho_s / \rho + 0.5) \cdot \psi_d \sqrt{\chi'_o} \cdot u_{*c}} \cdot \left\{ \left(\frac{u_*}{w_o} \right)^2 - \left(\frac{u_{*c}}{w_o} \right)^2 \cdot \chi' \right\} \quad (10)$$

3-4) まき上げ量の実測値との比較

図-7は、掃流砂量の場合と同様に、式(8)から求めた実測値と $\chi'_o = 3$ としたときの式(10)を比較したものである。両者はかなり一致していると言える。また、同図中の破線は、板倉(1980)による基準点濃度式である。これは、シルトの効果は考慮されていないが、極端な違いは見られない。したがって、今回の実験が上記のようなモデルで説明でき、浮遊形式による浸食が起こっていると考えられる。また、図によれば斜面効果は、浮遊形式のまき上げ量に対してもあまり大きな影響を与えないよ



横断方向掃流砂量式による検討

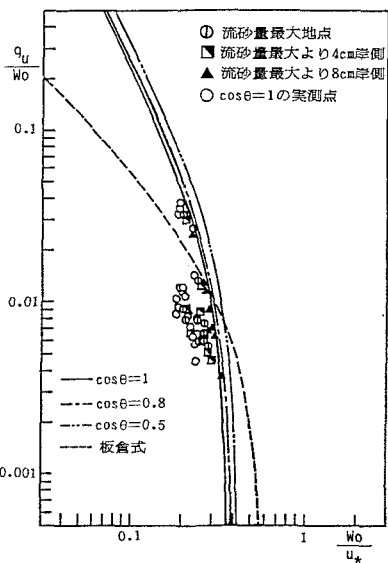


図-7 浮遊砂まき上げ量式による検討

うである。側岸では全体として掃流・浮遊の両形式による浸食がシルトの粘着力による影響を受けて生じていることになろう。

しかし、このことは、側岸浸食が掃流形式で進み、浮遊砂が流路中央から側岸へ向かう拡散フラックスによって運ばれるというParker(1978)の仮説に矛盾している。この点についてさらに考察を加える。

4. 浮遊砂の濃度分布と基準点濃度

図-8は、縦軸に水深、横軸に基準点濃度に対する相対濃度をプロットし最小二乗法によって直線近似したものである。この図を見ると、濃度分布 $c(z)$ は、ほぼ指数分布形になることがわかる。したがって、近似的に、

$$c(z) = c(\zeta) \cdot \exp\left\{-\int_{\zeta}^z \frac{w_0}{\varepsilon z} dz\right\} \quad (11)$$

とおける。ただし、 εz は水深方向の拡散係数、 $c(\zeta)$ は、河床近傍濃度である。 $c(\zeta)$ は、非平衡時の、しかも、水平拡散の存在する場における値であって、本来拡散式と流砂連続式の連立関係によって定まるべきものである。ここでは、式(11)の外挿によって $c(\zeta)$ を求め、図-9のようにプロットすると、データ群は、-4乗の傾きをもち、

$$c(\zeta) = \left(\frac{w_0}{u_*}\right)^{-4} = \alpha \left(\frac{g \cdot I}{w_0^2}\right)^2 \cdot h^2 \quad (12)$$

と見なすことができる。

また、図-8のプロット点の傾きから一定と見なしたときの εz を求め、 $u_* h$ に対する関係を見ると、図-10のようになる。流路中央部のA～Cに属するデータは通常知られている $\varepsilon z = u_* h / 13$ の線付近に集まっているが、側岸に近いD点のデータは上まわっている。これは、側岸効果の反映と考えられる。

以上の準備のもとに、浮遊形式の浸食の一般性について考察する。擬似定常状態を想定し、流下方向に平衡が達せられているものとする、濃度方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

簡単のために、 ε_y 、 ε_z を一定と考え、式(13)の左辺第1項における y の1階および2階微分を z について河床から水深まで積分し、式(11)、(12)を代入すれば、横断方向の水深全体にわたる拡散フラックス J_y と、浸食（正のとき）や堆積（負のとき）を表す $(\partial J_y / \partial y)$ が求められる。これらを無次元化すると、

$$J_{y*} = \frac{J_y \cdot w_0^4}{\alpha \cdot \varepsilon_y \cdot (g \cdot I)^2 \cdot h_0^2} = h_* \cdot (h_* - \beta_*) \cdot \frac{dh_*}{dy_*} \quad (14)$$

$$\frac{\partial J_{y*}}{\partial y_*} = \{-(1-\lambda) \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial t}\} \cdot \frac{w_0^4}{\alpha \cdot \varepsilon_y \cdot (g \cdot I)^2 \cdot h_0^2} \quad (15)$$

$$= h_* \cdot (h_* - \beta_*) \cdot \frac{d^2 h_*}{dy_*^2} + (2h_* - \beta_*) \cdot \left(\frac{dh_*}{dy_*} \right)^2$$

$$\beta_* = \frac{2\varepsilon_z}{w_0 \cdot h_0} \doteq \frac{u_{0*}}{6.5w_0} \quad (h_* = h/h_0, \quad h_0 = \text{中央水深}) \quad (16)$$

となる。この結果を用いて、浮遊砂の大まかな動向を示したのが、図-11(a)(b)である。明らかに浮遊形式による浸食が生じることがわかる。すなわち、著者らの別稿(1987)に詳述するように、実験水路の場合には、 $\beta_* < 1$ となるケースが多く、このとき、浮遊形式による側岸浸食が生じ、Parkerの指摘と逆の現象が起こりうることになる。

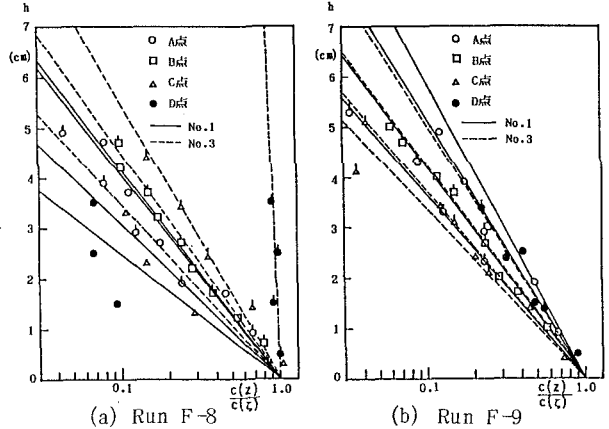


図-8 濃度分布の指数関数表示

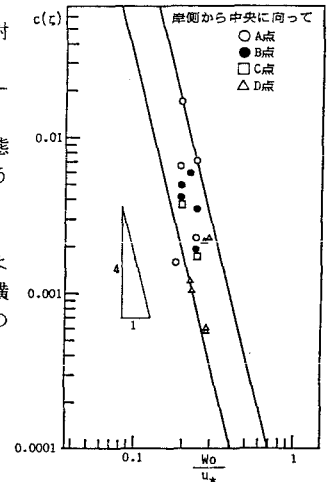


図-9

底面濃度と w_0/u_* の関係

さて、図-11の(a)は浸食中、(b)は平衡状態に近い場合を示した例であるが、これらを比較すると、浸食から平衡に至るまでには、側岸部での浸食量が減り、側岸へ向かう拡散フラックスの領域が増えていることがわかる。この違いは、 $\beta*$ すなわち $u*/w_o$ の違いによっても生ずるが、側岸斜面の傾きにも大きく関係する。斜面傾斜角が大きいと $h* < \beta*$ となる側岸区間が狭くなり、堆積が生じにくくなる。ひとたびこのような条件が生じると、浸食が進んでますます急斜面化する可能性がある。Run F-8, 9の拡幅途中にそのような傾向が見られる。

5. まとめ

1) 側岸における掃流形式の浸食量(横断方向流砂量)に与える斜面傾斜角の影響は、流砂の流れ方向に対する方向角への影響を除くと、理論上でも、実験的にも、あまり大きくはないようである。

2) このことは、浮遊形式のまき上げ量に関しても言える。

3) 本実験の場合、掃流浸食量、浮遊砂まき上げ量におよぼす効果としては、むしろ、シルト分による粘着性効果の方が大きい。

4) 浸食中の流路における浮遊砂の水深方向に関する濃度分布は、拡散係数 ε_z を一定と見なした指数式で大略説明できる。

5) その場合の河床近傍濃度は、ほぼ、 $u*/w_o$ の4乗に比例するが、場所により係数が異なる。また、 ε_z は $u*h/13$ にほぼ一致するが、側岸近傍ではその2~3倍の値を示す。

6) 拡散方程式を用いた検討では、浮遊形式による側岸の浸食も生じうる。ただし、 $\beta*$ が1より小さい実験水路で起こりやすい。

7) このとき、斜面角がきついと、堆積が生じにくくなり、一層の急斜面化が進むようである。

謝辞 本研究を進めるに当たり、本学学生、嶋田君らの熱心な協力を得た。ここにその感謝の意を表する次第である。

参考文献

- ① 芦田・江頭・加本(1983): 山地流域における浸食と流路変動に関する研究(2), 京大防災研年報 第26号B-2
- ② 福岡・山坂(1984): なめらかな横断面形状をもつ直線水路のせん断力分布と拡幅過程の解析, 土木学会論文報告集 No.351, II-2
- ③ 長谷川(1981): 非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究, 土木学会論文報告集 No.316
- ④ 長谷川・高橋・望月(1986): シルト・細砂混入河岸の浸食に関する実験的研究, 土木学会北海道支部論文報告集第42号
- ⑤ Itakura, T. and T. Kishi (1980): Open channel flow with suspended sediments, Proc. of ASCE, Vol.106, HY8
- ⑥ Kikkawa, H. and S. Fukuoka (1968): Hydraulic Roles of Wash Load, Trans. JSCE, No.155
- ⑦ 西村・池田・浅枝(1984): 直線河道における横断方向の土砂輸送および浮遊砂を考慮した河床形状, 土木学会39回年講概要集 II-219
- ⑧ Parker, G. (1978): Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 1. The sand-silt river, J. F. M. Vol. 80, part 1
- ⑨ 沢井・芦田(1977): 粘性流路の侵食と横断形状に関する研究, 土木学会論文報告集, No.266
- ⑩ 高橋・藤井・長谷川(1985): シルト混入河岸の浸食に関する実験, 土木学会40回年講概要集, II-195

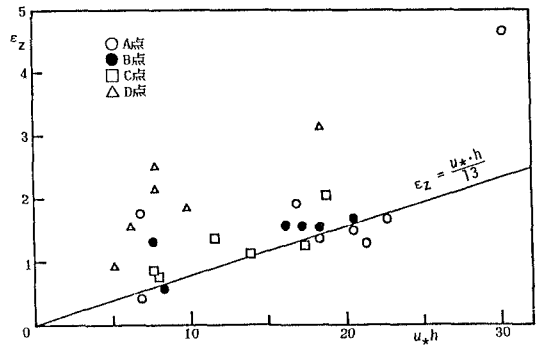
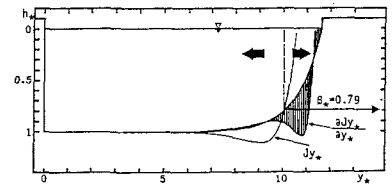
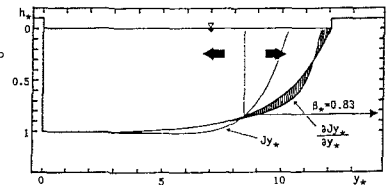


図-10 ε_z と u_*h の関係



(a) Run F-8



(b) Run F-10

図-11 拡散フラックスの方向