

II-30 粘土質シルト混入河岸の

浸食に関する実験的研究

北海道大学・工学部 正 員 長谷川和義
 同 上 学生員 高橋 博行
 同 上 学生員 藤井 誠

1. はじめに

現在非粘着性材料でできた河岸の浸食及び流路拡幅に関する研究は数多く発表されている。しかし、非粘着性材料と粘着性材料とではその受食作用に重要な違いがみられ、中流域における粘土・シルト混入河岸に対して、現在の非粘着性河岸に関する理論や実験知識をそのまま用いることは不可能である。粘着性材料そのものの受食性に関する研究は、外国とくに米国において多く手がけられ、1968年には、ASCEのTask Committeeの報告が発表されている。その後も比較的多数の文献が見い出される。国内においてはむしろ、粘土土混入砂の浸食問題に重点が置かれており、芦田・沢井²⁾、沢井・芦田³⁾、芦田・江頭・加本⁴⁾らによって進展がもたらされている。現実問題、とくに河岸の浸食問題にとつては後者の研究の重要性が高いが、残されている課題は極めて多い。それは、粘着性材料の性質が材料ごとに異なっていること、含水比の違いによって著しく力学特性が変化すること、混合率や混合材料、をいかようにも変え得ること、等々によるものである。本研究は後述するように、実際の河岸に多く含まれている粘土質シルトを混入した砂成側岸の浸食を扱おうとするものであり、浸食機構の観察、浸食流路形状の性質および浸食砂量の差異の考察に立眼がおかれる。

2. 実験装置と方法

2・1 使用流路構成材料

図-1は、石狩川月形大橋地点における側岸の粒土分布を示したものである。同地点は、昭和56年洪水に際して大幅な浸食を受け拡幅している。同図から明らかのように、月形から下流域の河岸には多量のシルト・粘土が含まれている。これらの側岸に近い性質をつくり出すために、図-1中に並示する砂と、市販シールド用粘土(SCP-B)の混合材料を試作することにした。結果の粒土分布は図-1中に描かれるとおりである。

一方、芦田・沢井²⁾の指摘のように、粘土混合率が、砂の間隙を埋める以上に高い場合には、砂の咬み合いが阻害され浸食機構も異なってくる。混合物より粘土分を取り除いても見かけの体積が変化せず、砂粘土が静的に安定し得る条件が芦田・江頭⁴⁾によって導かれているので、これを満たすように混合率を0.20に選ぶ。

また、SCP-B中に含まれる純粋な粘土分(10%)が、同一素材から製造されるSCP-A(粘土分61%)の塑性限界(21.0%)以下にならないようにRCP-Bに対する含水比 W を選ぶことにし、 $W=30\%$ とする。

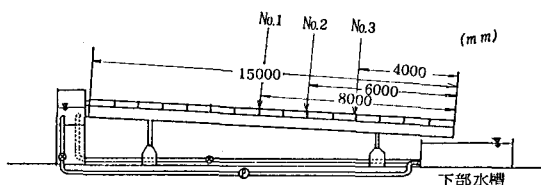
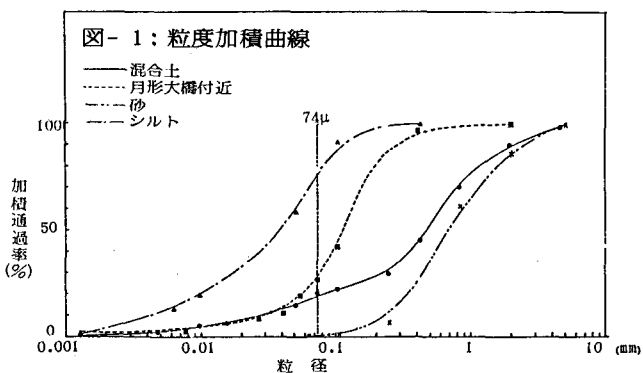


図-2: 水路及び実験装置

2・2 実験方法

実験は、全長15m、幅80cm、深さ20cmの勾配可変循環式水路を用いて行った。(図-2) 水路上に混合材料を12~13cm厚に敷き、図-5の(1)に示すような上底30cm、下底7.2cm、高さ8cm、側岸傾斜角35度のアクリル製スクレーパーによって、水路中央に直線溝を切り、通水した。測定は、下流端より8m、6m、4mにNo. 1、No. 2、No. 3の測定位置を設け次の項目に関して行われた

(1) 水面高(水面勾配)、(2) 流路幅変化、(3) 横断面形状、(4) 浮遊砂濃度、(5) 交換層におけるシルト・粘土混合率

水面勾配は、ポイントゲージによってNo. 1、No. 3の水面をおさえるとともに、レベルによって絶対高を測り、求めた。横断面形状は、流路幅が4~5cm拡幅する時間ごとに停水し、ポイントゲージにて測定した。浮遊砂濃度は、No. 1、No. 3の2断面において水深方向に3点とることとし、それぞれの位置で5ccピペットにより採水し、浮遊分の過乾燥後重量を測定することにより求めた。砂分の補給は行わなかったが、シルトについては、その濃度の変化が浸食に及ぼす影響を見る目的でRun2、3、4、5について上流端で沈殿の生じない程度に補給した。実施した実験の条件及び、主な水理諸量は、表-1に示す通りである。

$p = 2.66$ $P_f = 0.20$ $d_{50} = 0.04 \text{ (cm)}$								
	流量 $Q \text{ (l/sec)}$	空疎率 λ	水面勾配 I	半断面面積 $a \text{ (cm}^2\text{)}$	流路半幅 $b \text{ (cm)}$	平均流速 $V \text{ (cm/sec)}$	通水時間 $t \text{ (sec)}$	無次元せん断力 τ_*
Run-1.1 Run-1.2 Run-1.3	6.0	0.33 (0.46)	1/151	58.58	18.75	102.4	1680	0.298
			1/152	60.16	20.50	99.7	2760	0.280
			1/158	61.53	22.50	97.5	6300	0.253
Run-2.1 Run-2.2 Run-2.3	6.0	0.33 (0.46)	1/171	58.06	23.00	103.3	1500	0.217
			1/176	60.95	24.25	98.4	2580	0.209
			1/188	67.83	27.75	88.5	6180	0.198
Run-3.1 Run-3.2 Run-3.3	5.5	0.34 (0.47)	1/166	45.44	19.25	121.0	1200	0.210
			1/171	61.64	24.25	89.2	2160	0.221
			1/181	58.79	27.75	93.6	4980	0.175
Run-4.1 Run-4.2 Run-4.3	5.5	0.33 (0.46)	1/296	58.85	16.25	93.5	1740	0.174
			1/286	58.73	19.25	93.6	4020	0.155
			1/364	65.55	20.25	83.9	18840	0.127
Run-5.1 Run-5.2 Run-5.3	7.8	0.33 (0.46)	1/114	60.79	18.25	128.3	360	0.415
			1/121	58.34	25.75	133.7	960	0.279
			1/160	61.12	28.25	127.6	1320	0.202

表-1: 実験条件及び水理諸量

3. 実験結果

3・1 浸食機構の観察

掃流力が0.2程度の流れにおける一般的状況は次のとおりである。初期断面が速やかに拡がるとともに、多量のシルト・粘土が溶け出し流れがかっ色に染まる。このため水際近傍の流砂現象以外は直接観察できない。水際にはシルト粘土の盛んな溶けだしが進むとともに、砂粒子が流れに洗われるようになり、やがて掃流される。これらの機構は、沢田・芦田、芦田・江頭などが見出した浸食機構と基本的に同一なものと思われる。ただしシルトが主体の本実験の場合には、河岸材料の飽和のされ方が速く、また砂粒子をとりまく粘性土自身の含水比も容易に変化するようであり、初期含水比はあまり意味をもたない。水中の浸食速度が大きい場合には、水上部分がオーバーハングし、重力によって固まり状に落下するようになる。後述のように、拡幅は必ずしも一様ではなく、いくぶん下流が大となる傾向を示すが、この他に、局所的な浸食の難易による幅のおうとつが存在する。これは砂成流路では見られない現象である。停水後の観察によれば、流路床部分はアーマリングが進み、粗砂が目立つ。今回の実験では、全てのケースにおいて砂漣が発生していたが、波高が数ミリと極めて低いものばかりであった。これが粘性土の影響によるものなのか否かは不明である。また、大部分の実験において交互砂州が見出された。同様に波高が小さいために、流れへの影響は顕著ではないが、ゆるやかな蛇行性が現われたケースもある。

3・2 横断面形状の性質

福岡・山坂⁵⁾ は、非粘着性直線流路の横断面形状が相似な性質を有し、次のような連続な関数形で置き換えられることを示した。

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

ただし記号は図-3に定義するとおりであり、 H 、 D は定数である。これらの定数は実測された半流路幅 b と次に示す2式より決まる。

$$a = \int_0^b h \, dy \quad (2) \quad \left. \frac{dh}{dy} \right|_{y=b} = \pm \tan \phi \quad (3)$$

すなわち、 a は流路半断面積であり、 $\tan \phi$ は水際の傾斜角で、通常水中安息角に等しいものと考えられる。図-5はRun3において実測された a と b を与えて (1) 式より断面形状を求め、実測断面形状を比較したものである。実線が (1) の形状を破線が実測形状を表わす。いずれの時間についても両者はほぼ一致している。この性質は、実施した全ての実験において確認されており、粘着性流路が形成流路と同様、相似性を有し、関数表示しうることが知られた。ただし、粘着性流路の断面形は、砂のそれに比べて矩形に近く、側岸斜面が急な一方で河床が平坦に近い。この性質は D が負になることに表われている。

次に、図-4は、No. 2付近の流路幅の時間変化を示したものである。Run1、4は、実験開始直後急激に拡幅するが、その後、増加幅が徐々に減り、安定化する傾向を示す。この段階では、側岸砂は静止しているが、河床には掃流砂が存在しており、静的安定と動的安定が並存する。設定河床勾配1/100のRun5は、非常に大きな浸食速度で拡幅し、掃流力のわずかな増加が、現象を急激に変化させることを示した。実験中、流路は一樣に変化するわけではなく、上流・下流部でそれぞれ特徴のある変化を示した。すなわち、上流部では、上流部からの給砂がないために、河床部が浸食深堀し側岸の浸食が起りにくくなって、深く切り立った形状を呈する。一方、下流部は、上部からの流砂が堆積し、河床の上昇が生じて流路幅が広がり、ついには沓を起す。この傾向は、測定地点No. 1、No. 3においても現われており、No. 3の流路幅がNo. 1より1~5cm程度広く、水面高が0.5mm程度高い。また、次節で述べる浮遊砂濃度の分布においても、No. 1に比べNo. 3での濃度が高くなる傾向が見られる。

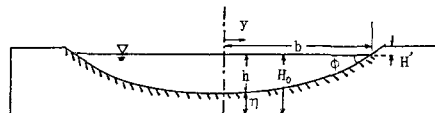


図-3: 記号の定義

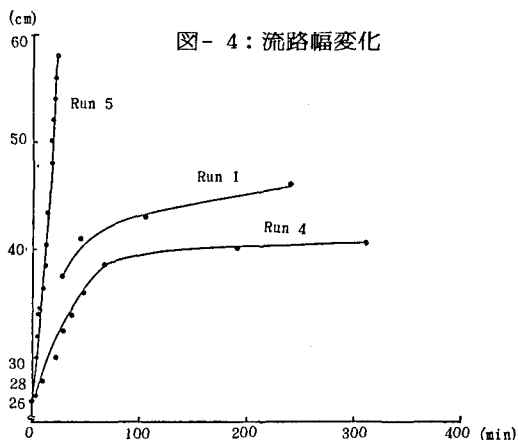


図-4: 流路幅変化

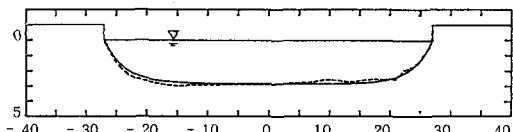
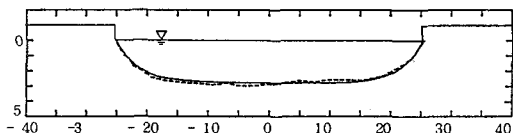
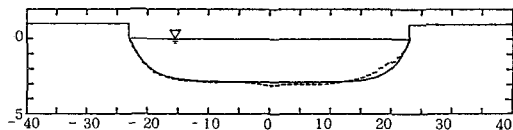
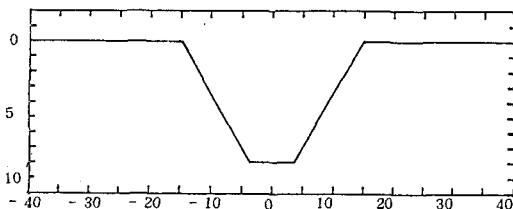
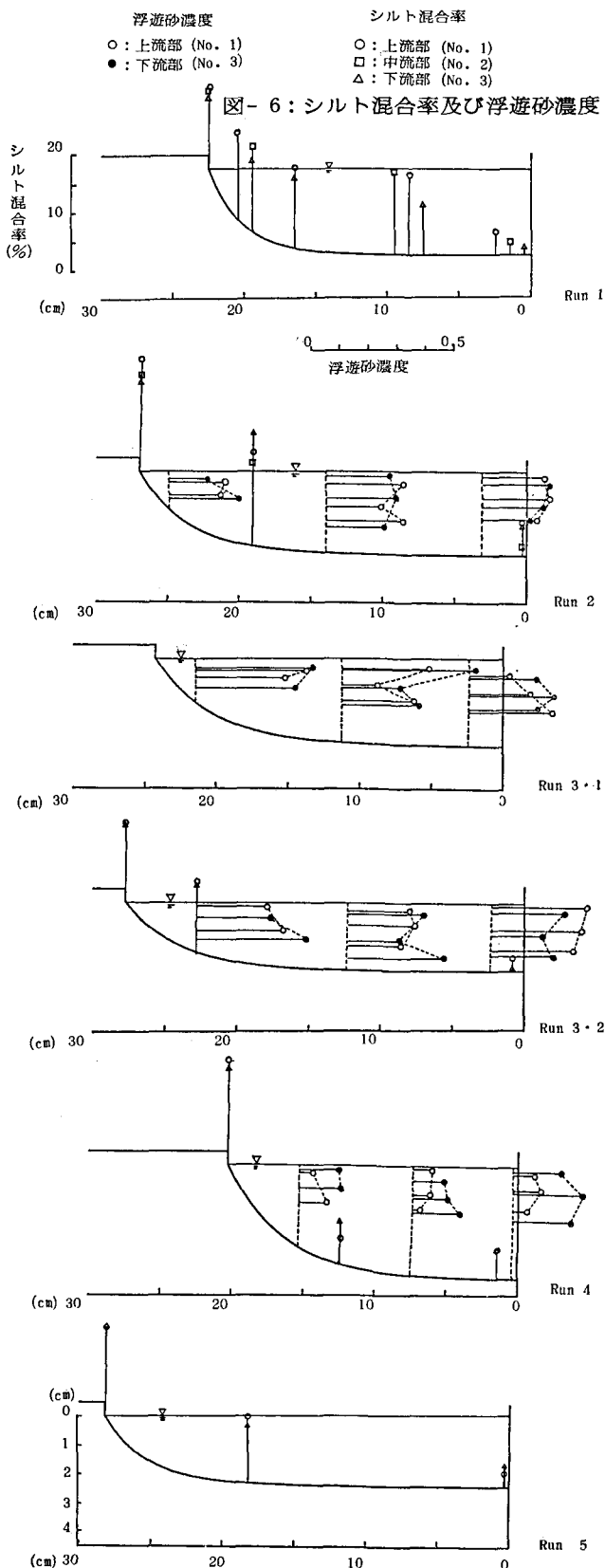


図-5: 横断面形状

3・3 粘土・シルトの浮遊濃度と混合率

図-6はシルト・粘土の浮遊濃度の測定結果を示すものであり、横方向のスケールによって観測位置に線を引き、大きさを表わしている。上節で述べた通り上流部に比べて下流部の濃度が高くなっている。これに対して、各断面の横断方向3地点での濃度はほぼ一定しており、濃度分布の違いによる横方向への浮遊分の移動は見られない。これらの事柄は、浮遊しているシルト・粘土がウオッシュロードとしての性格を有するのみで、河床や河岸へは直接的な影響を及ぼさないことを示している。通常、浮遊限界に至るほどの濃度には達しないので、河岸の浸食とともに下流濃度が増大することになる。浮遊分が浸食現象に直接影響しないということは、シルト無補給のRun1が、他と比較して大きな違いを見せなかったことから裏づけられる。

シルト粘土混合率を見る目的で、実験直後側岸上部、下部、河床中央の3点で表面から10mmの層を採取した。乾燥後74 μ のふるいによるふるい分けを行ない、重量比率を求めた。図-6の横軸は流路中央からの距離であり、河床から立てた縦棒は混合率を表わしている。これを見る限り、浸食が継続してきた側岸のシルト混合比率は一定であり、これに対して河床中央では側岸及び上流から運ばれてきた流砂が表面を覆って、シルト混合率がずっと低くなっている。図中、Run4 側岸下部のシルト混合率が、他のものに比べてかなり低くなっているのに気づく。これは、この実験が1/200と勾配が緩く掃流力が小さいために側岸の浸食域が狭く、砂粒子が側岸下部に堆積したためと考えられる。そしてすべてのシルト混合率は、最初のシルト混合率20%を下まわっており、シルト分が堆積を引き起さないという前述の観察と一致する結果となっている。



4. 浸食流砂量に関する考察

4.1 測定法

横断形状が式 (1) に従うことが確認できたので、横断方向流砂量の算定についても、福岡・山坂の方法を使用することにする。流砂量の連続式

$$\frac{\partial(H_0-h)}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_{By}}{\partial y} = 0 \quad \dots (4)$$

より q_{By} を求めると、

$$q_{By} = -(1-\lambda) \int_y^b \frac{\partial(H_0-h)}{\partial t} dy \quad \dots (5)$$

(5) 式と $dH_0/dt = 0$ 、 $da/dt = 0$ 、 $q_{By}(b) = 0$ の条件の下で積分すれば、 q_{By} が求まるわけである。しかし、実際は 水面高上昇及び断面積変化があるので、正しくは断面補正をする必要がある。しかし、流下方向の出入りの差のない、完全な等流状態を想定する限り、補正の結果は＋－ゼロとなり、上述の条件が肯定される。したがって b に対する時間差分を与えれば、2つの測定時間の中央における q_{By} が算定できる。

4.2 結果

図-7は、上記の方法により求めた結果である。縦軸に q_{By} 、横軸に流路中央 ($y=0$) から側岸 ($y=b$) までの距離をとっている。図中の時間 t (min) は、2つの測定時間の中間を示す。

これらの図を見ると、横断方向流砂量は、側岸水際点より5～8cmの地点でピークをむかえている。水際よりこの地点まで $dq_{By}/dy > 0$ すなわち $\partial(H_0-h)/\partial t < 0$ であり、この範囲で浸食がおこっている。逆にピーク地点から河床側では $\partial(H_0-h)/\partial t > 0$ となり、堆積が生じている。時間がたつにしたがって、流砂量は減少しており流路が時間経過とともに、安定化しつつあることがわかる。

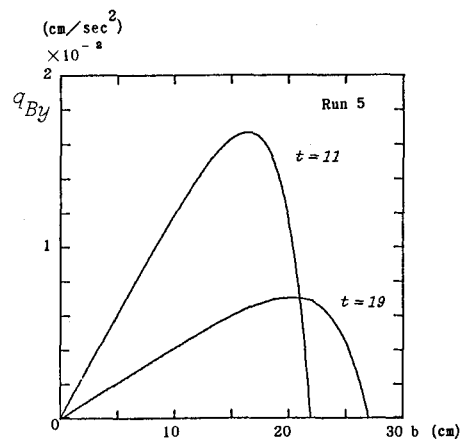
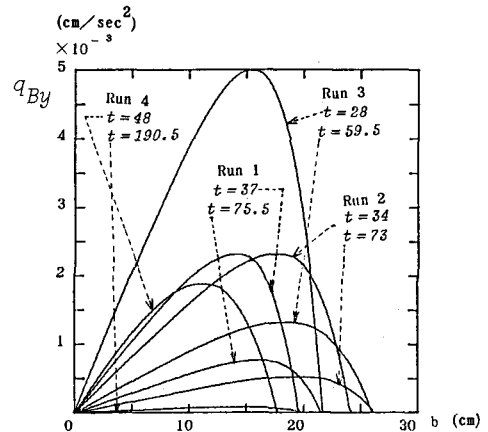
非粘着性側岸における横断方向流砂量と比較する目的で、 $q_{By}^* / \tan \phi = q_{By} / (\sqrt{(\rho_s/\rho-1)gd^3} \cdot dh/dy)$ を縦軸に、 τ_* / τ_{*c} を横軸にとってプロットしたものが、図-8である。ただし、 $(\rho_s/\rho-1)$ = 砂の水中比重、 d = 代表粒径、 τ_{*c} = 代表粒径の砂の限界掃流力でありプロット点は、各 q_{By} のピーク値と、その点から上下に4cm離れた箇所の値を使用している。
また $\tau_* = hI / (\rho_s/\rho-1)d \cdot \{1 + (dh/dy)^2 + h \cdot d^2 h / dy^2\}$ である。

非粘着性側岸に関する横断方向流砂量式は、各種提案されるに至っているが、表現の簡単な池田⁶式を例にとると、

$$\frac{q_{By}^*}{\tan \phi} = 0.85 \cdot \left\{ \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right) \right\}^{1/2} \quad \dots (6)$$

式(6)と今回の実験点を比較すると、後者は前者を横方向にほぼ2だけ平行移動したものになっている。すなわち、見かけの限界掃流力比が $\tau_{*cc}/\tau_{*c} \approx 3$ となっている。砂の平均粒径が0.042cmなので $\tau_{*c} = 0.042$ であり、 $\tau_{*cc} = 0.126$ が粘性土混り砂の見かけの限界掃流力となる。Run4の最終時

図-7 横断方向流砂量



間における τ_* の値が0.127であり、5時間以上の通水において、まったく変化が生じなくなった事実と一致する。

しかし、芦田・江頭らの $P_f = 0.23$ のパールクレイを用いた実験でも τ_{*cc} の最大値は0.09どまりになっており、この大きめの値が何によっているのか現在のところ不明である。

いずれにしても、粘性土の影響を τ_{*c} の中に入れることによって、従来の掃流砂関数を応用し得るという見通しを得たことは重要であろう。

4.3 断面変化の考察

側岸が浸食されることにより、側岸構成砂の崩落とそれに伴う水面上昇により断面積が変化し、次の式を得る。

$$dH_0/dt = 1/B \cdot dA/dt + H' / B \cdot dB/dt$$

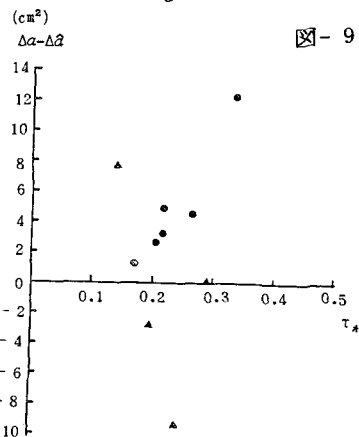
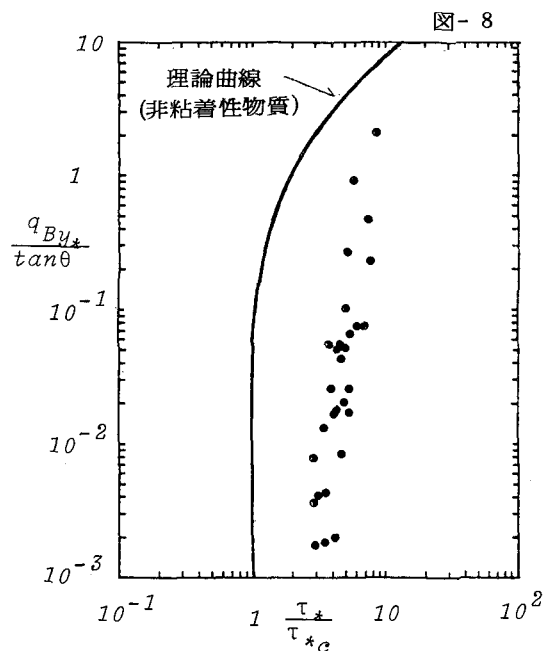
すると半断面の断面変化 $\Delta\hat{a}$ は半流路幅 b を用いて $\Delta\hat{a} = b\Delta H_0 - H' \Delta b$ となる。実測の断面変化を Δa とすると $\Delta a - \Delta\hat{a}$ は、理論的にはゼロとなるはずであるが、実際は、増加傾向になる例が多い。

その理由として、

- 1) 側岸の砂粒子が、河床に堆積する際、側岸の空隙率に比べ小さな空隙率で堆積し、密な状態となり断面積が増大する。
- 2) 実験中のシルト粘土は、仮定に反し体積変化に影響を及ぼし、水中への抜け出しにより、断面積が増大する。

以上の2つ考えられる。

図-9は、横軸に掃流力 τ_* を、縦軸には $\Delta a - \Delta\hat{a}$ を取り、各実験で2つづつプロットしたものである。このうち黒丸印で示したものは、 τ_* と $\Delta a - \Delta\hat{a}$ の間に正の相関があり、流砂量が多くなると、断面積変化も大きくなり1)を裏づけるものである。



謝辞： 本研究は、文部省科学研究費・特定研究「比較河川学の研究」(代表 岸 力)の分担・協力の一環として行われ補助を受けた。記して謝意にかえる次第である。

参考文献

- 1) EROSION OF COHESIVE SEDIMENTS Report of the Task Committee on Erosion of Cohesive Materials Committee on Sedimentation Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No. HY4, July, 1968
- 2) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂れき床の浸食と流砂機構に関する研究，京大防災研究所年報第17号B, 1974, 4
- 3) 沢井健二・芦田和男：粘着性流路の浸食と横断形状に関する研究，土木学会論文報告集No. 266, 1977, 10
- 4) 福岡捷二・山坂昌成：なめらかな横断面形状をもつ直線流路のせん断分布と拡散過程の解析，土木学会論文集Ⅱ, No. 351/Ⅱ-2, 1984, 11
- 5) 芦田和男・江頭進治・加本実：山地流域における浸食と流路変動に関する研究 (1) 一粘着性材料を含む砂れきの移動限界と流砂量一，京大防災研究所年報第25号B-2, 1982, 4
- 6) Ikeda, S. : Lateral Bed Load Transport on Side Slopes, Proc. of ASCE, Vol. 108, No. HV11, Nov. 1982
- 7) 山地河道の変動と流砂機構に関する研究，文部省科学研究費補助金 一般研究B，研究報告書，研究代表者 芦田和男，1983, 3