

II-14 シルト・細砂混入河岸の浸食に関する実験的研究

北海道大学工学部 学生員 高橋 博行
 同 上 学生員 望月 明彦
 同 上 正 員 長谷川和義

1. はじめに

昨年、著者らはシルト混り砂の浸食実験を行った¹⁾。これによると、浸食及び堆積は掃流形式で進みいったん浮遊したシルトはウオッシュロードとして流下するのみで、浸食・堆積にはほとんど影響をおよぼさない。またシルトは河岸にあるときは、粘着力としての働きを示し、見かけの限界掃流力を約3倍にまで引き上げることがわかった。しかし、実際の自然河川の中下流部にはシルト・粘土の他にも多くの細砂が含まれ、それゆえに浮遊現象が卓越している。そこで本研究は、実際の河川の粒度分布を例にして、シルト・細砂を多く含む混合材料を作り昨年の実験結果と比較しつつ、浸食機構の観察、浸食流路形状・平衡流路形状の性質、および浸食砂量の差異の考察に立眼をおくことにした。

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度分布を示したものである。この図から明らかなように、河岸は粘土・シルトばかりでなく、細砂も多量に含んでいる。図中の一点鎖線は昨年度用いられた材料の粒度分布で粘土・シルト混合率は0.2である。これは平均粒径が約0.08mmの砂と、市販シルド用粘土（SCP-B）を混合したものであり、粗砂も多少含まれている。前述のように、この材料ではシルトの浮遊現象は見られるが、浮遊物そのものは浸食・堆積にほとんど影響をおよぼさない。そこで本研究では昨年よりさらに浮遊砂が多くなるように、平均粒径0.01mmと0.048mmの2種類の細砂と、市販シルド用粘土（SCP-B）を混合し、現実の河岸材料に近いものを作製した。結果の粒度分布は図中の実線に示すとおりである。粘土・シルト混合率は0.3である。また混合時の含水比 W は昨年と同様 $W=30\%$ とした。

図-1：粒度加積曲線

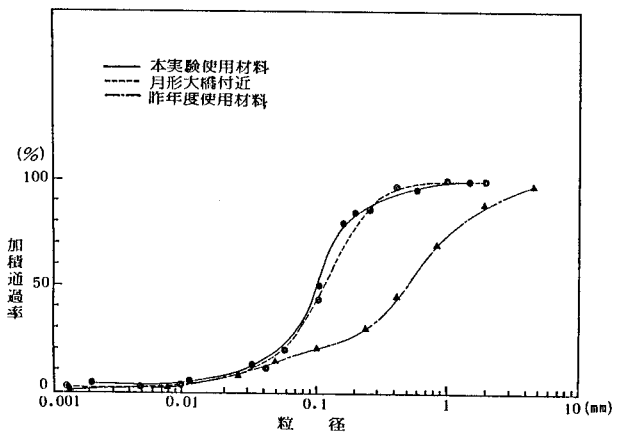
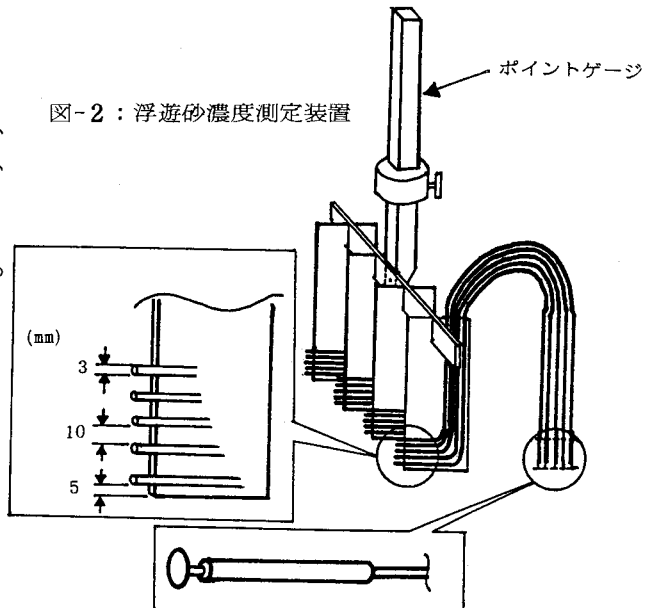


図-2：浮遊砂濃度測定装置



2・2 実験方法

水路は昨年と同じものを使用し、実験の方法もほぼ昨年と同様な手順で行った。ただし初期断面形は、掃流力を上げるため、図-5(1)のような半断面形を与え、アクリルガラスからなる水路側端に流路の中央がくるようにした。また、濃度測定は測定ポイントを増すため、図-2のような内径3mmのサイフォンからなる採水装置を作り、横断方向10cm間隔に4箇所、水深方向1cm間隔に5箇所の計20箇所て採水し、浮遊分のろ過乾燥重量を測定することにより求めた。測定は2度目の通水直後に行い、上流部・下流部それぞれで約5分間、量は1箇所につき30～40ccを採水した。

2・3 実験条件

実施した実験の条件及び主な水理諸量は、表-1に示すとおりである。

$$\rho_s = 2.66 \quad P_f = 0.30 \quad d_{s0} = 0.01 \quad (\text{cm})$$

	流量 Q (l/s)	空隙率 λ	水面勾配 I	半断面積 a (cm ²)	流路半幅 b (cm)	潤 辺 s (cm)	平均流速 V (cm/s)	通水時間 t (s)	無次元せん断力 τ	粒子レイノルズ数 Re
RUN F 1-1	6.0	0.433	1/210	49.2	13.0	14.76	61.0	373	0.956	3.944
RUN F 1-2			1/250	48.8	17.3	18.10	61.5	1746	0.650	3.252
RUN F 2-1	10.8	0.416	1/370	196.40	37.5	39.03	54.99	780	0.819	3.650
RUN F 2-2			1/480	224.98	45.0	46.33	48.00	1560	0.609	3.148
RUN F 3-1	10.8	0.480	1/336	158.28	30.0	31.73	68.23	480	0.894	3.814
RUN F 3-2			1/400	168.62	37.5	38.70	64.05	1140	0.656	3.267
RUN F 3-3			1/440	190.91	45.5	46.73	56.57	2520	0.559	3.016
RUN F 4-1	13.0	0.480	1/256	181.84	42.5	43.55	71.49	480	0.949	3.929
RUN F 4-2			1/283	200.43	47.5	48.46	64.86	1260	0.880	3.784
RUN F 4-3			1/296	209.37	48.0	49.05	62.09	2340	0.869	3.760
RUN F 5-1	8.8	0.464	1/426	172.70	30.0	31.79	50.96	1800	0.768	3.535
RUN F 5-2			1/588	243.79	41.0	43.96	36.10	4440	0.568	3.040
RUN F 5-3			1/727	294.32	53.5	54.66	29.90	10440	0.446	2.694
RUN F 6-1	17.0	0.515	1/141	196.42	43.0	45.38	86.55	240	1.849	5.484
RUN F 6-2			1/156	179.27	60.5	60.84	94.83	1140	1.138	4.303
RUN F 6-3			1/179	211.28	67.0	67.61	80.46	2040	1.052	4.137

表-1：実験条件及び水理諸量

3. 実験結果

3・1 通水後の観察

通水後はまず多量のシルト・粘土が溶け出し、流れがかつ色に染まる。このため水際近傍の流砂現象以外は直接観察できない。しかし、水面幅に関しては始めの数分間は初期幅のままである。やがて水際から1～2cm外側の側岸天端に亀裂が生じてブロック状の崩壊が起こる。崩落砂は一気に掃流され急激に幅が拡がり出す。以後、この形式で側岸の浸食が進む。拡幅は一様でなく、局所的に浸食の難易によるおうとつがでたり、昨年と同様いくぶん下流が大となる傾向を示す。停水後の観察によれば、流路床部分は側岸及び上流からの掃流砂が分級作用を受けて堆積し、比較的径の大きい細砂が大部分を占めている。また、河床形態はフルード数が1を越えたRunF4とRunF6の場合に平坦河床に近い状態が生じたが、それ以外の実験では砂礫が発生した。これらは昨年に比べてかなり大規模である。さらに、RunF4、RunF6以外の実験においては交互砂州が見られたが、これも昨年に比べて波高が大きく、流れへの影響も多少あり、RunF5のようにゆるやかな蛇行性が現われたケースもある。表-1中に示すとおり粒子レイノルズ数は各実験とも2～6の間にあり、平坦床ではなめらかな河床に区分される。

3・2 拡幅速度

図-3は、No.2付近の流路幅の時間変化を示したものである。前述したとおり河岸はブロック状態で崩れ落ちるように浸食されるため、時間的に一様に拡幅されるわけではない。一度の崩壊で1~2cmずつ拡がって図のような階段状の拡がりをする。したがって浸食の停止も突然生じる（崩壊が生じなくなる）ように見える。浸食の進行・停止は微妙であり、設定河床勾配1/600のRunF5は、通水しても最初は流路幅がほとんど変化せず、40分ほどたってからようやく拡幅しはじめた。一方、設定河床勾配1/250、1/150のRunF4、RunF6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。また、流路は場所的に一様化するわけでない。前述のように河床にできた交互砂州によって流れが蛇行し、流路幅の狭い所と広い所が交互に現われるケースや、材料の不均一によって局所的に不等幅となるケースがみられる。

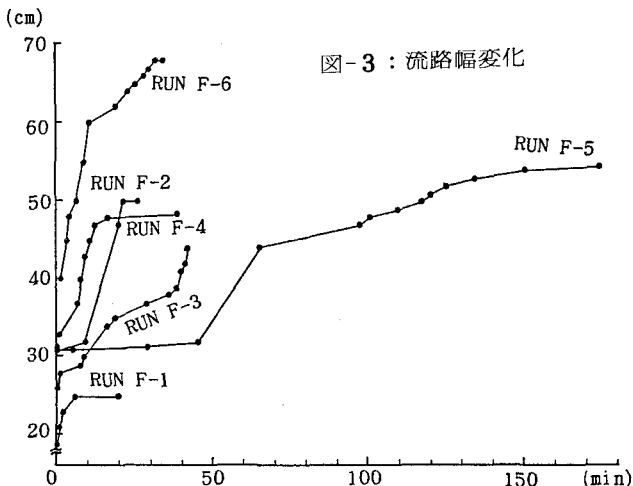


図-3：流路幅変化

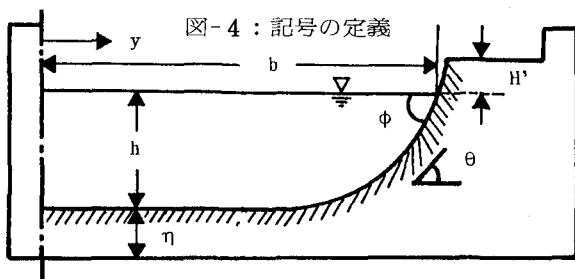


図-4：記号の定義

3・3 横断面形状の性質

昨年、著者らは福岡・山坂の方法により横断方向流砂量を算定するため、次のような連続関数で横断面形状を求め、実測断面形状と比較した。記号は図-4に定義するとおりである。

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

同様な方法を本年度の実験断面にあてはめたものが図-5の一連の図である。実線が(1)式の形状を、破線が実測断面形状を表わす。河床部分はほとんど一致しているのに対し、側岸斜面が(1)式の線より急になっているのがわかる。この傾向は昨年もあったが本実験ではさらに顕著になっている。しかし、差はわずかなので(1)式で関数表示できるものとする。(1)式の中でD、Hは定数であるが、Dの値は昨年の実験では-2~-4であったが、今回では、-5~-20である。この値は一般に断面積が大きくなると絶対値も大きくなる傾向を示す。また同一面積では、河岸の勾配が急なほど、つまり横断面形が矩形に近くなるほど、その絶対値は小さくなる。

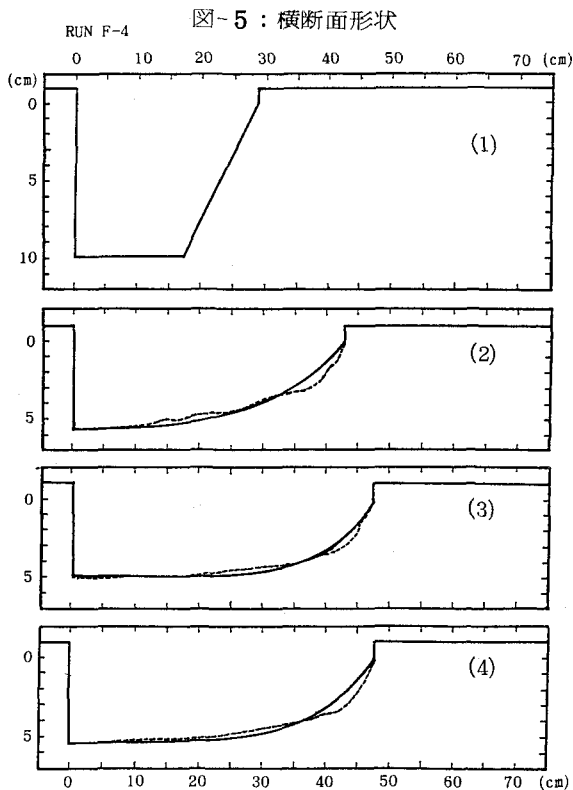


図-5：横断面形状

3・4 粘土・シルトの浮遊濃度

図-6は粘土・シルトの浮遊濃度の測定結果を示すものである。横方向のスケールによって観測位置に水平線を引き、大きさを表わしている。また、破線は等濃度線であり、河床に沿って摩擦速度の分布と平均粒径の沈降速度を示した。等濃度線は、濃度が上流部と下流部でほとんど差がみられないため、これらを平均して求めた。河床上のほとんどの場所で摩擦速度が沈降速度を上まわっていることから、水中では全体にわたって浮遊現象が起りうる条件にある。等濃度線を見ると側岸部から中央に向って河床に平行するようになだらかに下っていることがわかる。したがって、浮遊砂の拡散フラックスは側岸斜面に垂直な方向に向うものと考えられ、このことより横断方向にも側岸から中央に向ってわずかながら拡散が起っていることが予想される。また流路中央付近では等濃度線はほぼ水平になり、横断方向の濃度が一様化していることがわかる。以上より、横断方向の拡散現象はわずかながらみられるもののその量は小さく、河床や河岸への直接的な影響は僅少であるものと判断できる。図-7は、西村ら³⁾の平衡横断面形実験による浮遊砂濃度分布図である。この実験は、浮遊砂が支配的な流路の堆積による平衡形状形成過程を調べたものであるが、極めて興味深いことに等濃度線が側岸斜面に対してほぼ垂直になっており、我々の濃度分布と直交する形になっている。

3・5 シルト混合率

図-8はシルト混合率をみる目的で、実験直後側岸上部から河床中央までの5点で、表面約20mmの層を採取し、昨年と同じ方法でシルト混合率を求めたものである。図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。この結果は昨年とはほぼ同様で、浸食が継続してきた側岸のシルト混合率は一定であり、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。したがって、表面砂分の見かけの限界掃流力は場所によって異なっていることになる。

図-6：シルト浮遊濃度

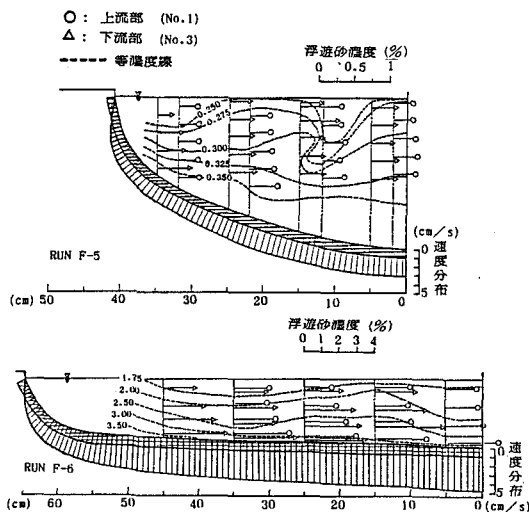


図-7：西村らの実験における濃度分布

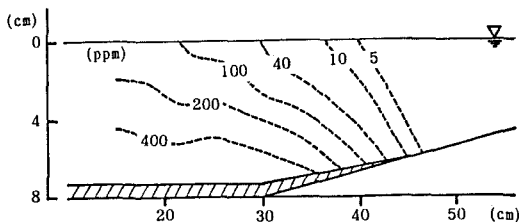
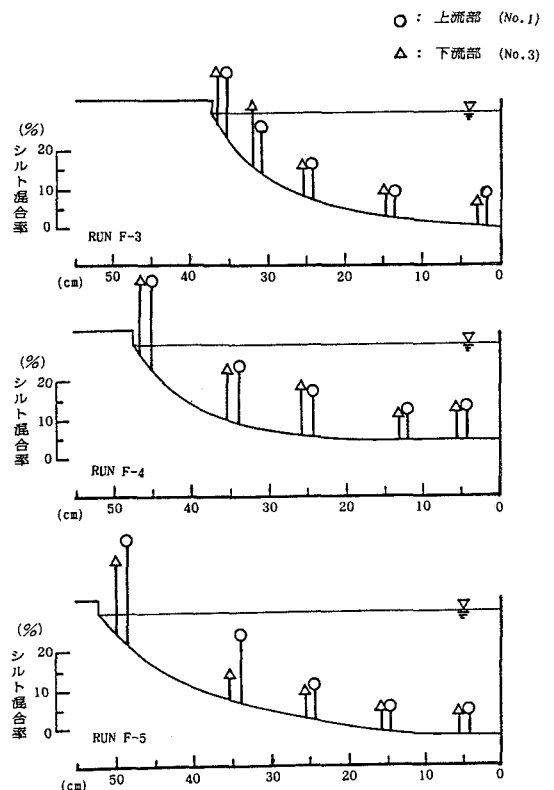


図-8：シルト混合率



3・6 浸食流砂量

横断面形状が(1)式に従うことが確認できたので、横断方向流砂量の算定に、福岡・山坂の方法を使用することにする。流下方向に出入りの差のない、完全な等流状態を想定し、 $dH/dt=0$ 、 $da/dt=0$ の条件下で流砂量の連続式を適用することにより、 q_{by} を求める。図-9は $q_{by*}/\tan\theta = q_{by}/\sqrt{(\rho_s/\rho-1)gd^3}/(dh/dy)$ を縦軸に、 τ_*/τ_{*c} を横軸にとってプロットしたものである。ただし $q_{by}=y$ 点における横断方向流砂量、 $(\rho_s/\rho-1)$ =砂の水中比重、 d =平均粒径、 τ_{*c} =平均粒径の砂の限界掃流力であり、プロット点は、 q_{by} を流路中央($y=0$)から側岸($y=b$)まで算定し、ピーク点を求め、その点とそこから側岸へ4cmと8cm離れた箇所の値を使用している。(1)は昨年の実験結果をプロットしたものであり、実線は長谷川⁴⁾の横断方向流砂量式(2)を表わしている。

$$\frac{q_{by*}}{\tan\theta} = \frac{\phi_d}{\mu_s \sqrt{\mu_s \mu_k}} \sqrt{\tau_{*c}} \left\{ \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \right)^{1/3} - \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \right)^{-1/3} \right\} (\tau_* - \tau_{*c}) \quad (2)$$

ここで ϕ_d =流速係数で8.5、 μ_s =静止摩擦係数で1、 μ_k =動摩擦係数で0.8とする。この式について流下方向流砂量を表わす部分の限界掃流力を $3\tau_{*c}$ にし、方向角を表わす部分のそれを τ_{*c} のままにするという修正を行った式を表わしたものが破線である。プロットした点は、この線上にのっており見かけの限界掃流力は3倍になることがわかった。そこで今回の実験についても同様な修正を行うことにする。(2)の破線)しかし、実験値はこの線より上方に位置している。これは側岸細砂が一部浮遊を起しながら掃流され、接地の機会を少なくして運ばれる結果、見かけの μ_k が小さくなっているためと思われる。そこで、実験値の中央を通るような線((2)の一点鎖線)を引き、これから μ_k を逆算すると $\mu_k'=0.137$ となった。

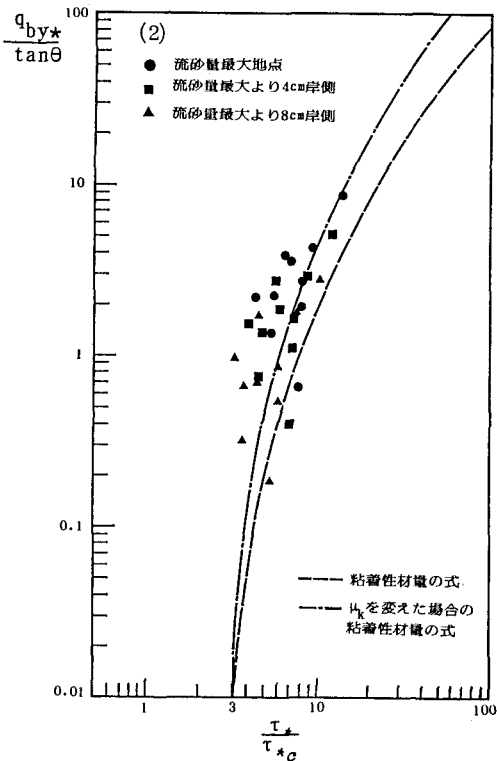
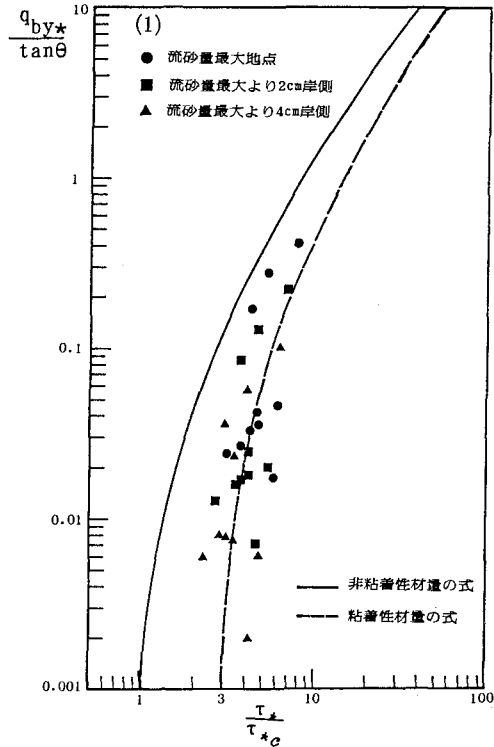


図-9：横断方向流砂量式

4. 考 察

4・1 浸食型水路の平衡条件の特徴

Parker⁶⁾は、河道の平衡状態について次のように論じている。すなわち、河床では拡散により浮遊砂がまき上がり、横断方向の濃度勾配によって側岸部へ運ばれる。そして斜面上を掃流形式でもどる結果、平衡状態に達するとしている。これは静的な平衡と動的な平衡が並存していると見るわけである。前述した西村らの実験も、このケースである。本実験では、浮遊現象はみられるものの濃度は横断方向にほぼ一様で、横断方向への拡散移動はわずかであり浮遊を主体とする堆積はほとんどおこっていない。つまり、側岸の粘土・シルト分は浸食されたあとウオッシュロードとして流れさり、残った細砂は一部浮遊状態を保持しつつ掃流形式で側岸斜面を移動する。すなわち浸食側からの平衡形状への接近過程においては、動的平衡が生ずることなく、限界掃流力状態にいたって初めて浸食及び堆積が止まることになる。つまり、河道は静的にしか平衡となりえない。自然の河道は大洪水時に拡幅を起して静的な平衡状態にまで至り、その後の小流量において堆積側から動的平衡断面を形成するのではないかと考えられる。

4・2 平衡横断面形状

上述のように、浸食断面の平衡は静的にしか達成されないものでそれらにもとづく断面形の検討を行なう。Lane⁸⁾は、非粘着性水路に対する安定断面形状を与える以下のような式を導いた。

$$h = h_0 \cos\left(\frac{\tan\phi}{h_0} y\right)$$

この式では水路幅が中央水深の約4.5倍程度にしかかならず、粘着性流路に適用できない。そこで以下のような変形を試みた。ただし h_0 = 流路中央水深、 τ_{cc} = 粘着性材料の限界掃流力、 τ_0 = 掃流力の分布形

1) $\tau_{cc} = 3\tau_0$ にする

2) $\tau_{cc} = (2y/y_0 + 1)\tau_0$ にする (τ_{cc} が水際から流路中央まで線形に変化するものとする)

a) $\tau_0 = \tau_0 = \rho g h \cos\theta$ にする b) $\tau_0 = \tau_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{1}{2} h \frac{d^2 h}{dy^2} + \left(\frac{dh}{dy}\right)^2\right)\right)$ にする

1)、2)とa)、b)のそれぞれの組み合わせを変えていかなる形状が生じうるかを検討した。1) - a)の組み合わせの場合、求めた水路幅が負の値になり、断面形を求めることはできない。次に2) - a)の組み合わせは、微分方程式が複雑になるため数値計算により求めた。結果は図-10のとおりであり、水路幅は実際のものよりかなり小さく、幅の問題は解決されない。これは τ_0 の分布が τ_0 のそれとは違うためと考えられる。また、この線を側岸部へ平行移動したものが一点鎖線である。両方の図とも実測断面の傾斜角が急であり、 $\tan\phi$ の値がかなり大きいことを示しているが、これを合わせれば近い形状にはなる。問題は幅の見積りであり、Parkerのgravel riverに対する推定式の適用を試みたが、滑面に近い本実験では、値が求まらなかった。今後 τ_0 を修正した1) - b)、2) - b)の組み合わせによる式について検討を加え、幅議論を進めるつもりである。

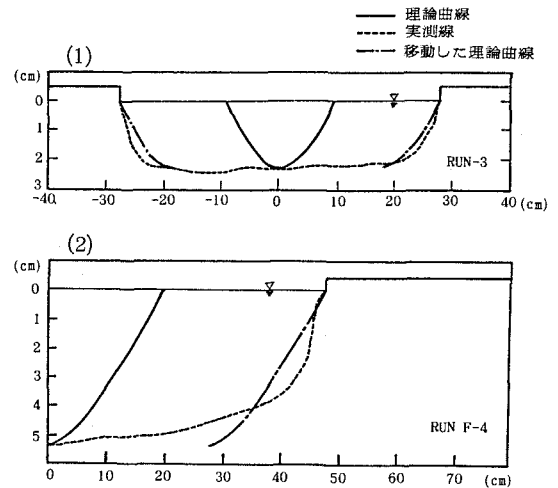


図-10：平衡横断面形状

参考文献

- 1) 長谷川和義・高橋博行・藤井誠：粘土質シルト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41号，1985，2
- 2) 福岡達二・山坂昌成：なめらかな境界形状をもつ直線流路のせん断力分布と拡幅過程の解析，土木学会論文集，第351号／Ⅱ-2，1984
- 3) 西村達也・池田毅介・浅枝隆：直線河道における横断方向の土砂輸送及び浮遊砂を考慮した河床形状，土木学会第39回年講義要集，1984，10
- 4) 長谷川和義：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，第316号，1981
- 5) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed Part I. The sand-silt river, J. Fluid Mech. (1978), vol. 89, part 1, 1978
- 6) Lane, E.W.: Progress report on studies on the design of stable channels by the Bureau of Reclamation, Proc. A.S.C.E. Sep. No. 280 (September 1953)