

砂防ダムの侵食防止機能に関する実験的研究

芦田 和男・江頭 進治・何 智武
山野 邦明・村岡 猛

EXPERIMENTAL STUDY ON EROSION CONTROL FUNCTION OF SABO DAM

By *Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, Chihwu HO,*
Kuniaki YAMANO and Takeshi MURAOKA

Synopsis

In mountain region where sediment yield is very active, various kinds of sabo works have been constructed to control or prevent sediment erosion, transportation and deposition. Debris dam, one of the typical sabo works, has functions inherently such as suppression of channel erosion and sediment detention liable to flow out. But, no general method to evaluate these functions have been established. The present study will discuss the functions of debris dam with flume data, concentrating into the problems of erosion control.

The eroding capacity of flow water depends on the shear stress distribution in stream wise. The shear stress, as well, is related to discharge, slope, stream geomorphology and so on. Flume experiments are carried out to evaluate the hydraulic quantities and channel variations in both cases with and without debris dams. Eroding phenomena of channels are discussed in the both cases, from a view point of sediment hydraulics. Then, the experimental data are given to test the formulas for sediment transportation and side bank erosion. A possibility to evaluate the functions of debris dams, also, is emphasized in the present study, with a mathematical model.

1. 結 言

河川計画、河川管理において、土砂生産源からの流出土砂量の調節は重要な問題であり、斜面崩壊、土石流等のカストロフィックな生産土砂の貯留、山地河川からの不安定な土砂の流出の抑制、溪岸の侵食の防止、洪水時の流出土砂の調節等の目的で砂防ダムを設けている¹⁾。結局、期待される砂防ダムの機能としては、1)貯留機能、2)流路侵食防止機能、3)土砂流出調節機能、が挙げられるわけであるが、1)を除けば、その評価法は十分に確立されておらず、これらの機能の評価法を早急に確立することが望まれている。流路の侵食はいわゆる、縦侵食と横侵食とに分けられ、それぞれ、河床位・河床形の変化、および、流路幅、流路形の変化として現われるが、一般にはこの両者は独立ではなく互いに関連を持っている。そしてそれは、土砂水理学的には受食性側岸をもつ水路の流路変動、河床変動として表現され、流れの持つ掃流力の2次元的分布とその時間的変化、および、そのような掃流力が作用したときの流路各点における砂の pick up rate と step length を知ることが重要な問題となる。さらに、対象としている山地河川では、一般に、Bed material は広い粒度分布を持ち、粘着性材料を含むこともあり、現象をいっそう複雑なものにしている。このような複雑な条件のもとでの流路変動・河床変動を明らかにすることは非常に重要な問題であり、詳細で

基礎的な研究を必要とするが、その一方で、砂防ダムの機能の実用的な評価法という観点にたつと、むしろ簡潔な現象の記述が望まれる。1次元解析は簡潔な記述という点では実用的な機能評価法としてふさわしいが、断面内の重要な情報が必ずしも反映されないため、その適用の際には、それらの要素を考慮しなければならない。換言すれば、従来の1次元的な流砂現象、河床変動に関する知識が有効な範囲を知る必要がある。

そこで、本研究では、2において述べるような最も単純な条件のもとでの実験を行ない、砂防ダムの有無による流路の侵食横構の相違、その1次元解析の可能性を考察することによって、砂防ダムの侵食防止機能とその評価法についての見通しを得ることを目的とする。

2. 実験および結果の概要

実験は、Fig. 1 に示す長さ 18m、巾 70cm、深さ 55cm のコンクリート製水路を用いて行なった。水路には、Fig. 2 に示す横断面形状で、Fig. 3 の粒度分布を持つ平均粒径 0.515mm のほぼ一様な砂を、1/100 (Series A)、1/50 (Series B) の勾配で 10m の長さに敷いてある。砂防ダムは、下流端の砂止めで代用させ、その高さを変えてダムの規模を変化させた。給水は、上流端から 0.714l/sec で行ない、給砂はしていない。実験条件を整理して Table 1 に示す。

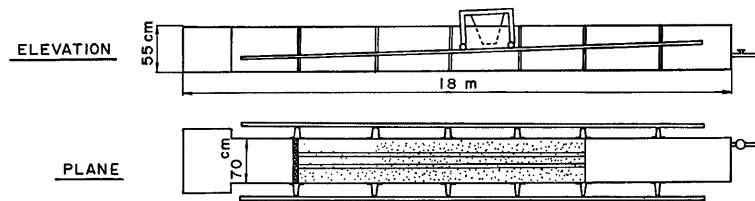


Fig. 1 Experimental flume

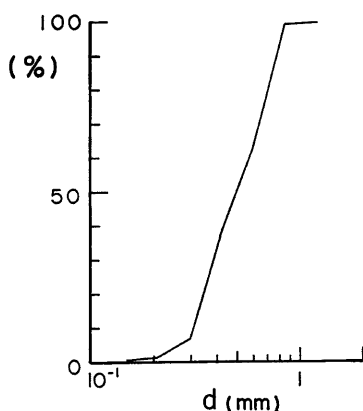


Fig. 2 Grain-size distribution of the used sands

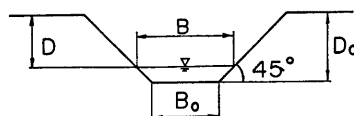


Fig. 3 Initial cross section

Table 1 Condition of experiments

	A-SERIES			B-SERIES		
CASE	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
i	1/100			1/50		
Q (l/s)	0.714			0.714		
B_0 (cm)	7			7		
D_0 (cm)	7			7		10
H_d (cm)	0	1.5	3.0	0	3.0	6.0

河床形は、原則として通水後 5 分、10 分、20 分、40 分、90 分に給水を止め、砂面計を用いて測定した。また、止水直前にサーボ式水位計を用いて、測定した河床位に対応する水位を測定した。さらに下流端における 1 分間流砂量を 5～10 分間隔で測定するとともに、総流出土砂量を測定した。

次に実験結果の概要を示す。時間軸は通水開始時を $t=0$ とし、空間軸は **Fig. 4** に示すように、 x 軸の原点を砂止めのある下流端にとり、 y 軸については $t=0$ における流路中央を原点とし右岸へ向かって正とする。また、 z 軸は下流端の砂止めの上端を原点とし、ダム高さを $(x, y)=0$ の砂面から座標原点までの距離で定義する。

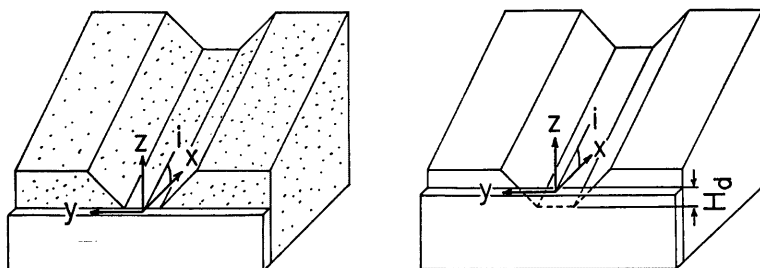


Fig. 4 Coordinate system

Fig. 5 に得られた横断面形の経時点変化の一例をそれぞれの実験条件の $x=2\text{m}$, $x=5\text{m}$, $x=8\text{m}$ 地点について示す。図からいづれの条件に対しても拡幅がほぼ一様に進んでおり、その程度は、一般に下流ほど大きいこと、また河道は、全区間を通してほぼ堆積傾向にあることがわかる。また上流端近傍では、河床の変動は小さく、通水後 5 分をこすとほとんどない。**Fig. 6** は、河床位、水位、エネルギー線の時間的変化を各実験条件ごとにまとめたものである。ダム高 H_d が 0 のときは、Series A, Series B とともに、中流域で堆積が著しく、初期河床にほぼ平行に堆積している。また、下流端近傍では初期河床勾配より大きく、上流端では小さくなっており、その区間が時間とともにそれぞれ上下流へと拡大してゆき、ついには両区間が接合するのがわかる。水面形、エネルギー線とともにほぼ河床と同様の変化を示している。一方、 $H_d > 0$ のときは、はじめ、背水区間の上流端から初期勾配より小さな勾配をもって下流へ向かって堆砂が進むが、その間ダム堆砂の後端は、上流へと遡上してゆく。水面形は、堆砂前面までの背水区間ではほぼ水平であることを除けば、ほぼ河床と同様の変化をしている。エネルギー線は、背水区間では、その勾配がほぼ 0 で、堆砂前面で急転のため大きなエネルギー勾配を持っている。時間がたつと、堆砂前面が下流端に達し、ダム上流の低勾配の堆積区間でさらに堆積が進み、下流端近傍から勾配が急になってゆく。水面形・エネルギー線ともに、河床と同様、満砂後下流端近傍で勾配が急になり、その区間が上流へと広がってゆく。

Fig. 7 は、流路幅と掃流力の時間変化を示したものである。拡幅に注目すると Series A, B 共に、ほぼ対象に進んでおり、0～5 分における拡幅量が大きいのがわかる。Series A について見ると、ダム高 H_d によって拡幅の状態が異なっている。A-1 では、通水後 20 分で下流端近傍で一様拡幅から下流へ行くに従って広がるような拡幅の状態になるが、A-2 ではほぼ 40 分で、A-3 では 90 分でダム高が高くなるに従って遷移する時刻がおそくなる。また、上流端近くでは拡幅の大きさは小さく、下流へ向かって広がっており、その非一様な拡幅区間が時間と共に長くなってゆくように見える。このことは、Series B においては、よりはっきりと現われる。すなわち、上流端での流路幅はほとんど変わらず、下流へ向かって水路幅が増加する区間が時間とともに長くなるとともに、流路形状が安定してくる。中、下流部では、Series A と

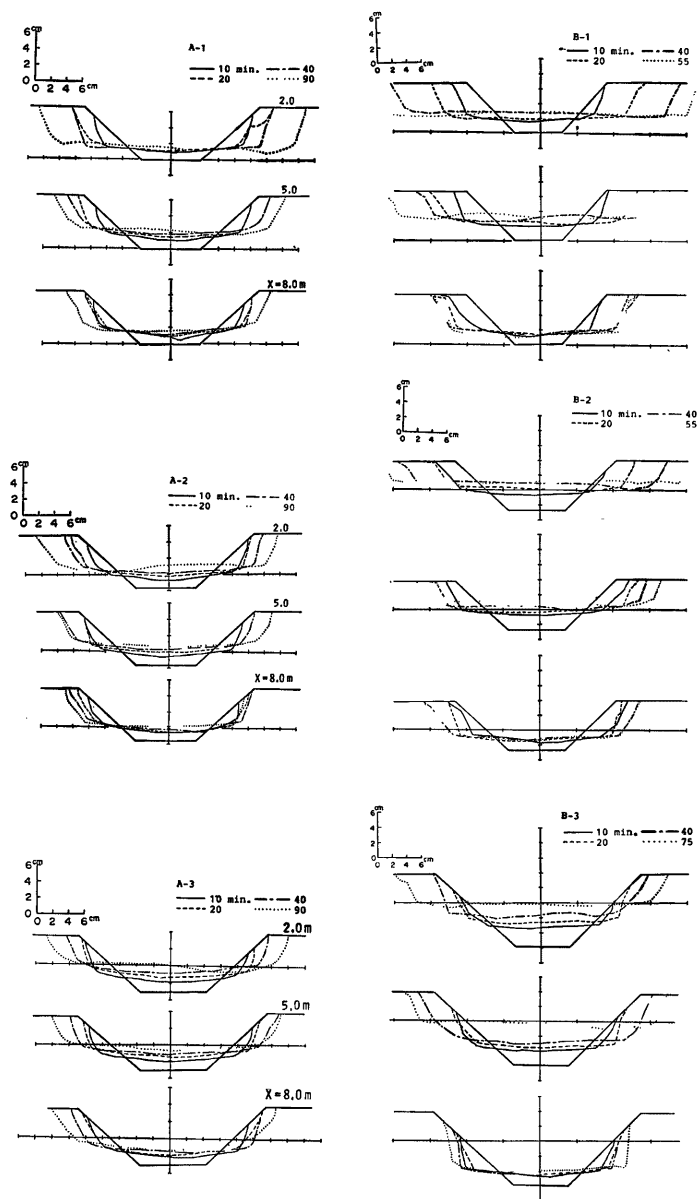


Fig. 5 Variations of cross sections in time

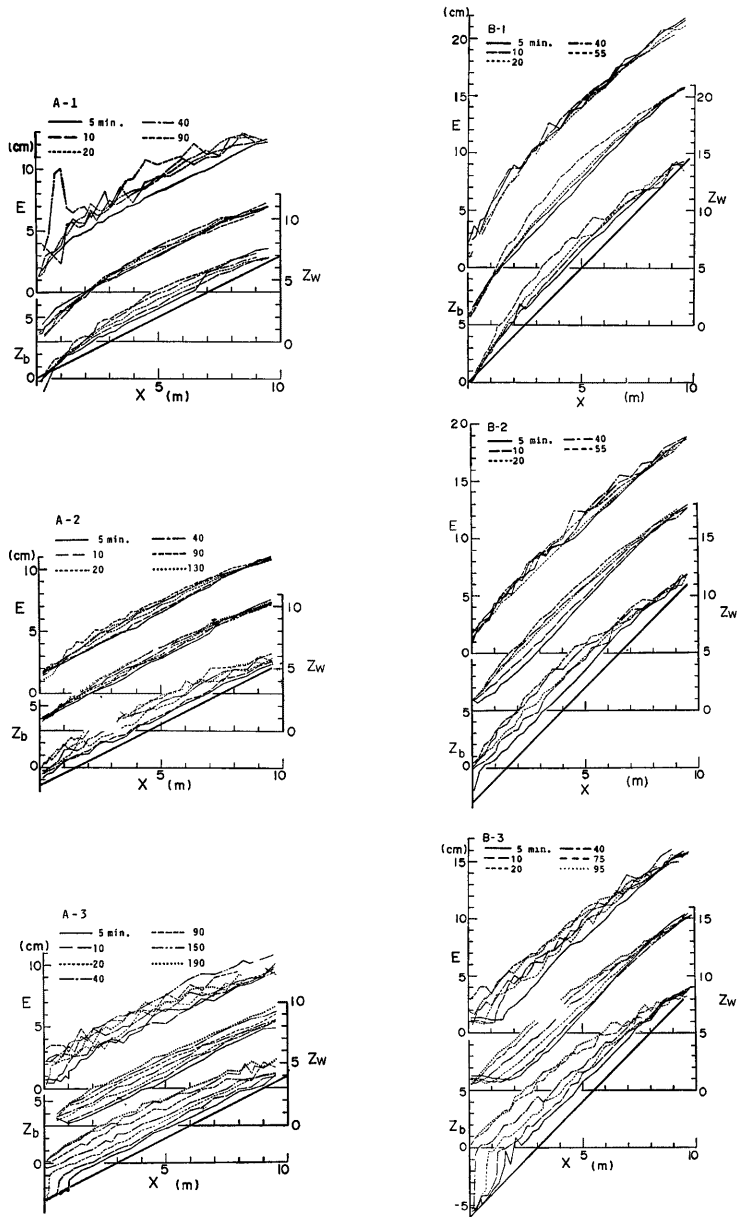


Fig. 6 Experimental results of elevations for bed surface, water surface, and total energy

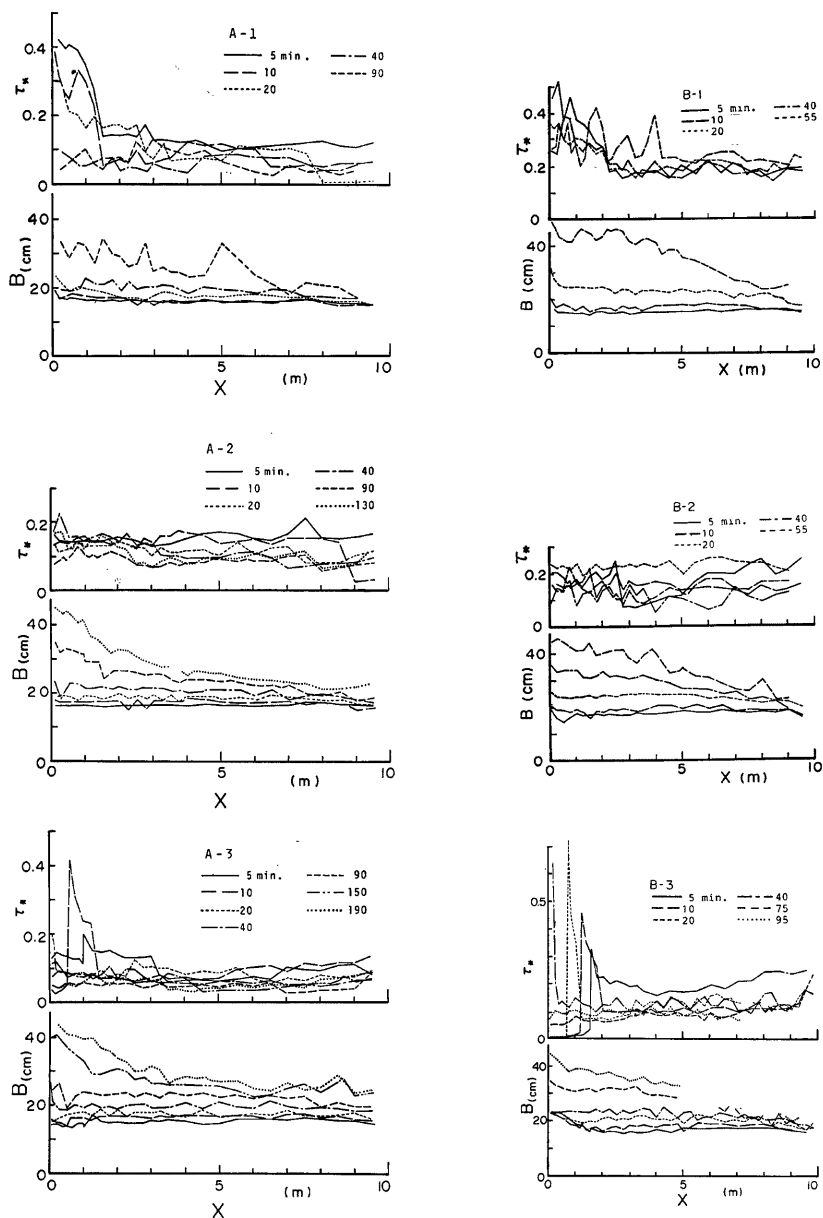


Fig. 7 Streamwise distributions of channel width and tractive force

ほぼ同様の現象が観られ、B-1 では10分まで、B-2 では20分、B-3 では40分まではほぼ一様 拡幅の状態にある。なを B-3 で通水後40分まで下流端での拡幅が著しく見えるが、これは、ダムによるせき上げで水位が上昇し、水面幅が広がったことによるもので、側岸侵食によるものではない。掃流力の縦断分布は、ダム高 H_d が0のとき、下流端近傍で、通水時間が短い間は掃流力が大きくなっているが、時間とともにその程度が小さくなり20～40分後には、上流での掃流力とほぼ同じ値をとるようになる。また、下流部でのことような減少を除けば、掃流力は、時間によってあまり変化していない。一方、 $H_d=0$ のときは、ダム高によって程度は異なるが、時間とともに掃流力は減少している。ただし、掃流力のある区間のエネルギー勾配を用いて求めているため、ダム堆砂前面での急拡によるエネルギー損失が考慮されておらず、掃流力の計算値は大きな値をとっている。ダム高が高くないとき、(本実験では A-2 と B-2) 満砂後、下流端近傍で掃流力が大きくなることもある。

このように掃流力、縦断形状、流路形状がそれぞれ変化するとき河床形態はどのように変化してゆくかについて、特に中規模河床形態に注目して整理すると Fig. 8 を得る。これは、中規模河床形態に関する藤田・村本²⁾の領域区分図と実験結果と比較したもので、ほぼ20～40分で明瞭な交互砂州が認められたことを説明できる。このような中規模河床形態の変遷にともなう流路の侵食形態の変化について注目すると次のようなことが認められる。中規模の河床形態が現われる前は、侵食は水際線全体にわたって生じている。交互砂州が現われると、流心が側岸に当たるところで侵食が生じる。そして、生産された土砂が砂州前縁で止まることにより砂州が前進し、侵食を受ける場所が下流へと進んでゆき、全体として、ほぼ対称の流路形状を保っている。

以上が実験結果の概要である。実験を通じてフルード数は、ダムによる背水区間を除き、2.0 前後、レイノルズ数は 2000～4000 であった。

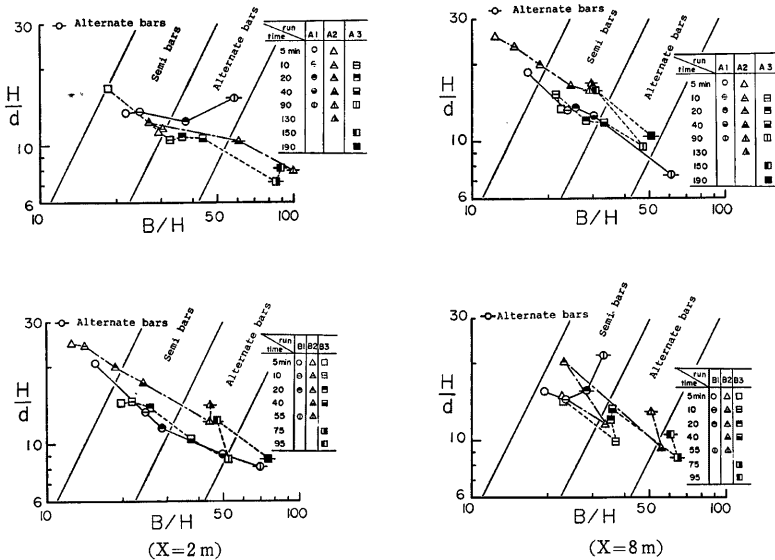


Fig. 8 Changes of bed forms in time

3. 流路侵食防止機能とその評価法

緒言で述べたように流路の侵食は、現象論的に縦侵食—河床低下—と横侵食—河道の拡幅—とに分けられる。今回の実験では河床は堆積傾向にあり、砂防ダムの縦侵食の防止機能を直接的に評価することはできないが、各実験毎の河床位の測定から求められる河床での堆積土砂量に着目して、これを評価してみよう。**Fig. 9** から明らかなように、ダムの有無、高低により堆砂量が異なり、ダム高が高いほど堆積量が多いことからダムによる土砂の貯留機能、縦侵食防止機能、およびこれらの機能にもとづく土砂流出調節機能が認められる。

次に、横侵食防止機能について考察してみる。**Fig. 10** はダムが無い ($H_d=0$) 場合の側岸侵食土砂量に対するダムが有る場合 ($H_d \neq 0$) の侵食土砂量の比をとって整理したものである。あまり明瞭ではないが、下流端近傍でダムが有る場合の側岸侵食量が抑制されているようである。しかしながら側岸侵食量は側岸の

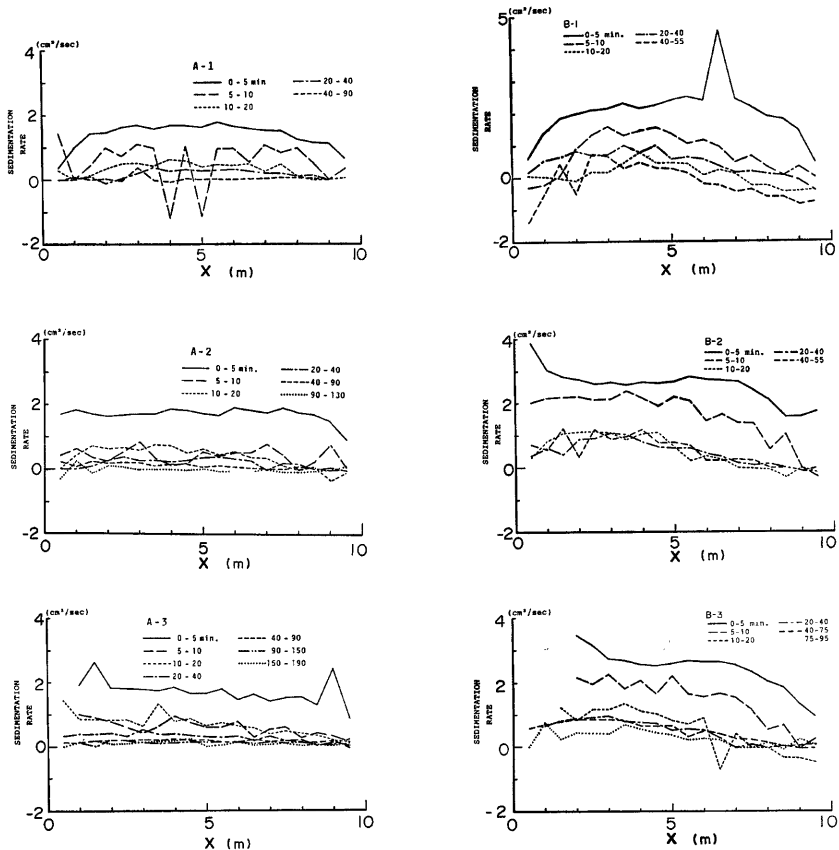


Fig. 9 Time and spatial distribution of bed variation by volume

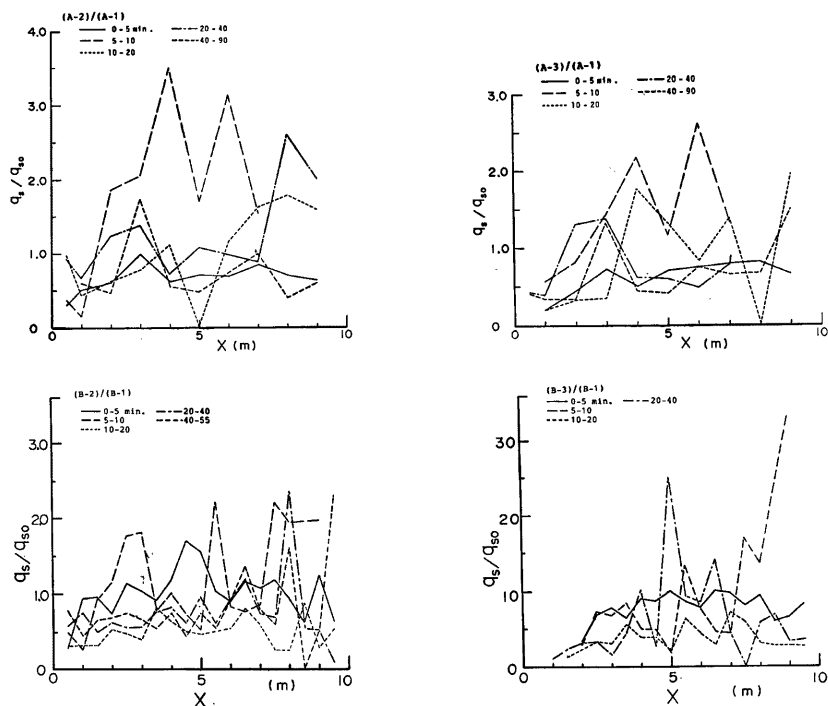


Fig. 10 Ratio of side bank erosions in channels with or without Sabo dam

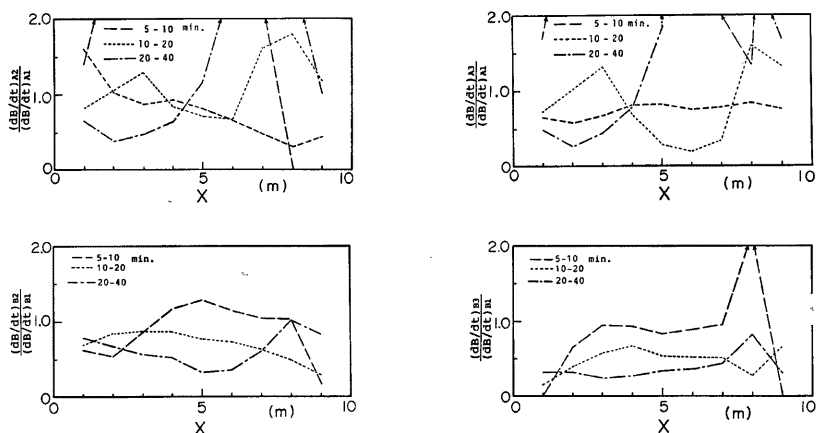


Fig. 11 Ratio of widening velocities in channels with or without Sabo dam

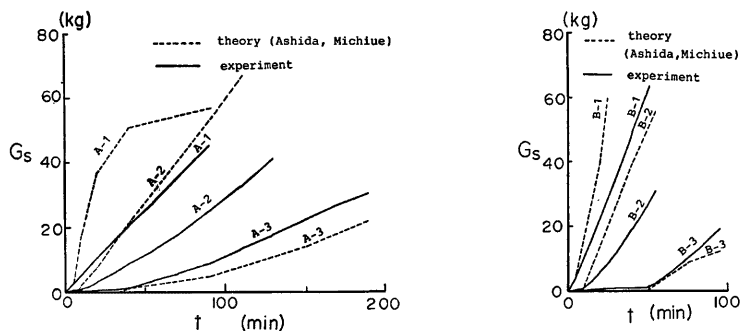


Fig. 12 Accumulated run out volume of sediment downstream end

高さ（比高）に大きく左右されるので、より直接的な侵食速度の比をとって整理すると **Fig. 11** を得る。ばらつきが大きいはっきりとしないが、通水後しばらくの間は、ダムの有無による相違はさほどなく、同程度の侵食速度を持っているが、20分をすぎると、ダムが有る場合 ($H_d \neq 0$) が無い場合 ($H_d = 0$) にくらべて侵食速度が小さくなっているのがわかる。こうしてある時間が経過すると横侵食防止機能が認められ、この機能もまた、流出土砂調節機能の一部を構成している。このような流路侵食防止機能をもつ流出土砂調節機能について、下流端における総流出土砂量の時間変化を用いて調べてみる。**Fig. 12** は、これを示したものである。この結果は上述の考察によく対応している。すなわち、満砂後においても流出土砂量を調節しており、側岸侵食防止機能と河道内堆砂が有効に機能しているのがわかる。

ところで、このような流路の侵食防止機能を一次元的に見てゆこうとすると、結局、掃流力の縦断分布とその時間的な変化を知ることが最も重要な事項となり、側岸侵食量又は侵食速度も、河床の侵食・堆積も、それによって説明されなければならない。すなわち、側岸侵食量、流砂量とも、掃流力のみ関数で表わされることから、砂の連続式を介して流路の変動が説明されなければならない。そこで、このような視点に立って現象の定性的な説明を試みてみよう。

$H_d = 0$ の初期断面の流路に通水した直後を考える。流れが下流端まで達しているとすれば、掃流力は全断面で等しい。この条件のもとでは、一様な側岸侵食が起こり、その結果一様拡幅となる。上流端では土砂の供給がないから、掃流力にみあう土砂が側岸侵食によって供給されなければ静的勾配に近い状態を保って

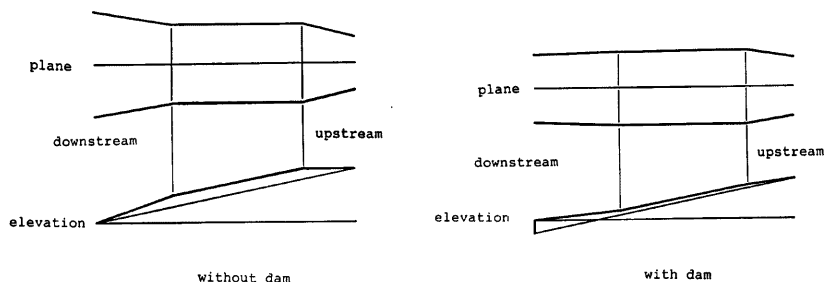


Fig. 13 schematics of stream variation

河床低下が起こるが、いつれにしても、下流へ行くに従い流砂量は増加し、掃流力にみあう流砂量をもつようになる。上流端からこの点までの距離は、上流端から静的勾配をもつ区間と同様、時間とともに長くなることが考えられる。初期勾配に対応する縦断方向に一樣な流砂量分布を持つ区間では、側岸から供給された土砂は結果として下流へは輸送されず、河床に堆積し、河床は元河床に平行に上昇する。下流端では河床位がせき高に規定されているため、中流域で河床上昇が起こると必然的に下流部の河床勾配は大きくなり、それに伴って掃流力が増加する。したがって、側岸侵食や流砂量も大きくなっている。この下流端の影響によって掃流力の大きくなる区間は、流砂の不均衡から上流側へと拡大してゆき、それによってその区間で側岸侵食量が増加するため、下流部でより拡幅が進むことになる。 $H_d \neq 0$ のときは、ダムの背水曲線によってダム近傍での掃流力が小さくなり、さらに満砂後もダムの堆砂勾配が元河床の勾配より緩いため、ダム近傍では $H_d = 0$ の場合に比べ側岸侵食がおさえられることが予想される。また、ダムの背水曲線が与えないところでは $H_d = 0$ の場合と同じ現象が生じているはずである。以上の考察を模式的に描くと Fig. 13 を得る。

Fig. 13 と Fig. 6, Fig. 7 を比較してみる。河床位と掃流力については、実験結果は上の考察を支持しているが、流路幅と掃流力については必ずしも同一の傾向にない。 $H_d = 0$ のとき、掃流力の縦断分布はたしかに下流端付近で大きくなっているが、特にその傾向の強い 0～20分において流路幅は下流端から 50cm ほどの区間を除くと中上流部の一様拡幅部とほとんど変わるところはない。さらに時間がたつと、掃流力は、縦断方向に均一化されてくるが、水路幅は上流よりも広くなり、その区間も下流端近傍の掃流力の大きな区間より長く、ついには、ほぼ水路全体にわたって下流へ向かうに従って拡がるような流路が形成される。また $H_d \neq 0$ の場合も程度の差こそあれ、同様のことが観察される。ただ、 H_d が大きくなると、 $|dB/dx|$ は

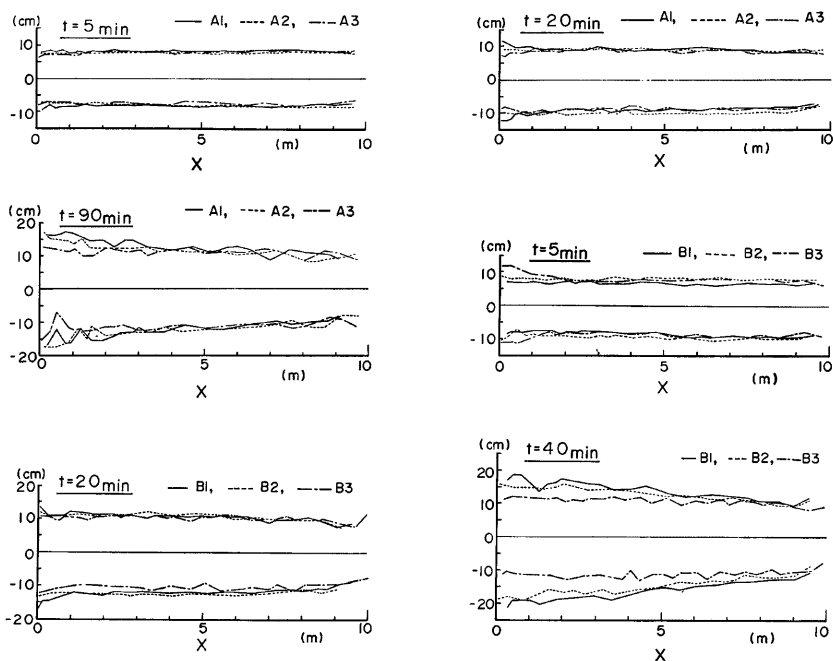


Fig. 14 Change of plane form of channel in time

小さくなっている。拡幅に関する以上の考察から、掃流力の側岸侵食にはたす役割は、たとえば0～5分での拡幅の大きさ、ダムの有無による絶対的な拡幅量のちがいを見ても、重要であることがわかるが、それのみでは十分には説明されないことがわかる。掃流力の縦断分布と拡幅量の対応性の悪さは、おそらく掃流力の縦断分布には考慮されない中規模河床形態の影響であろう。特に、20分を過ぎると、明瞭な砂州が形成されはじめ、この砂州による流れの偏倚が、側岸に働く掃流力の分布を平均的な掃流力の縦断分布と異なったものになっているからであろう。20分を過ぎると、下流部の拡幅が大きくなるのはそのような関係を示しているものと思われる。**Fig. 14** は、この関係を見るため、5分、20分、40分または90分における流路形を各 Series 毎にまとめたものであるが、20分までは、 H_d によらずほぼ一様な拡幅を示しており、その大きさもダムの有無にはよらないが、40分になると、一様拡幅でなくなり、その大きさも H_d が大きい程小さくなっているのがわかる。

以上のことから、一次元解析を念頭において砂防ダムの侵食防止機能を定性的に説明しようとする、次のような結果を得る。縦侵食については、ダム堆砂により河床勾配が低下し、掃流力が小さくなり、河道内堆積が進む。一方、横侵食については、掃流力が大きいと侵食速度が大きくなるという傾向はあるものの、中規模の河床形態が及ぼす作用が大きく、特に交互砂州による流れの偏倚に注意しなければならない。

さて、以上、砂防ダムの侵食防止機能について実験的に考察してきたが、この機能を適確に評価するためには砂防ダムの機能がおよぶ範囲を明らかにし、実験的にも他の要因との分離がどの程度なされているかを確認する必要がある。ところで、ダム領域—砂防ダムの機能がおよぶ範囲をこう呼ぶことにする—は、どのようにして決定されるであろうか。ダムの持つ機能は、無限に長い初期勾配を持った流路に対して考えるのが最も考えやすいから、ダムから上流へ遡ってダムの有無に関係しない等流部へ出るまさにその点までをダム領域と考えるのが良いであろう。そして、その等流部とは、たとえば、実験に即していえば、河床が元河床に平行に上昇し、側岸が一樣に拡幅されるような領域ということができる。さて、このような観点にたって **Fig. 6**, **Fig. 7** を見ると、いずれの Series も、砂防ダムのみの流路侵食防止機能を分離してその絶対値を評価することは困難である。

しかし、いずれにしても、砂防ダムの流路侵食防止機能を一次元解析を用いて定量的に評価しようすると、与えられた掃流力に対する側岸侵食量、流砂量がわからなければならない。そこで、これらの諸量を、側岸侵食量については芦田・江頭³⁾の式

$$\frac{q_s}{u_* d} = \frac{4}{3} \varepsilon^2 F_0 \tau_*^{1/2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^3 \frac{h}{d} \frac{1}{\sin \theta_1} \left(1 + \frac{D}{h}\right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、

$$\tau_{*c} = \tau_{*c} \cos \theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta_1}{\mu}\right)^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\varepsilon^2 = 0.5, F_0 = 0.03, (\theta_1, D \text{ は Fig. 15})$$

を用いて、流砂量については、芦田・道上⁴⁾の式

$$\frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

を用いて評価してみよう。ただし、有効掃流力 τ_{*c} は、全掃流力を用いる。

Fig. 16 は、側岸侵食量について、式(1)と比較したものであるが粒子レイノルズ数が10前後であるため、限界掃流力を 0.03, 0.05 と2通り変化させて理論線を記入している。またパラメーター θ_1 については、芦田・江頭⁴⁾による $\theta_1 = 30^\circ$ および、藤田・村本²⁾による $\theta_1 = 15^\circ$ の2通りを用いている。**Fig. 16** による

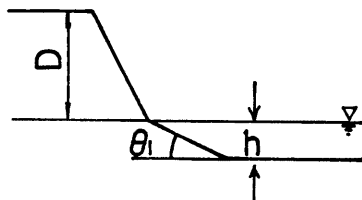


Fig. 15 Definition sketch for bank erosion formula

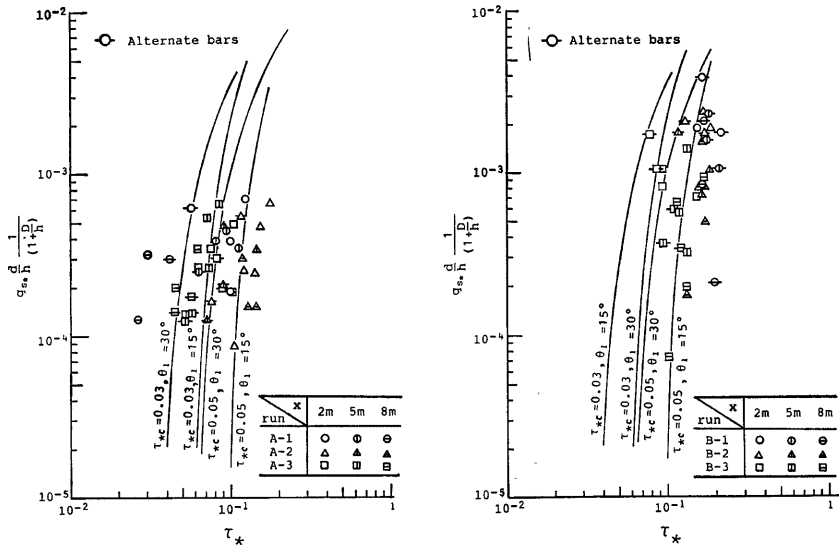


Fig. 16 The relation of bank erosion formula to present data

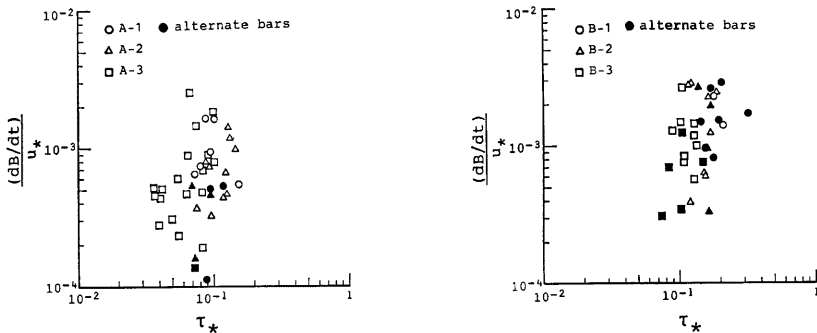


Fig. 17 Eroding velocity vs. tractive force

と、ダムの有無による側岸侵食量の相違は、直接的に掃流力の減少という形をとって表われており、交互砂州による影響は、同じ掃流力に対する侵食量の増加として現われている。交互砂州による影響が侵食量式の上でこの程度の差異でしか現われないのであれば、パラメーターを適当に変化させることで十分対応ができと思われるが、より一般的の議論をするためには、より多くの実験・観察によるデータの蓄積が必要であろう。Fig. 16 と同じ意味を持つが、拡幅速度で表現すると Fig. 17 を得る。Fig. 17 は Fig. 16 と同様の傾向を示している。

次に流砂量式(3)と下流端流出土砂量との比較を Fig. 18 に示す。流砂量については下流端での掃流力が急変する個所の実験値との比較にもかかわらず、比較的良好な一致を示している。

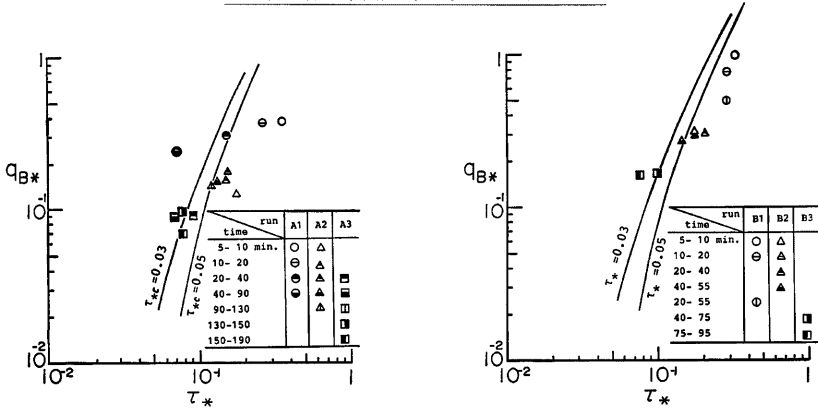


Fig. 18 The relation of bed load formula to present data

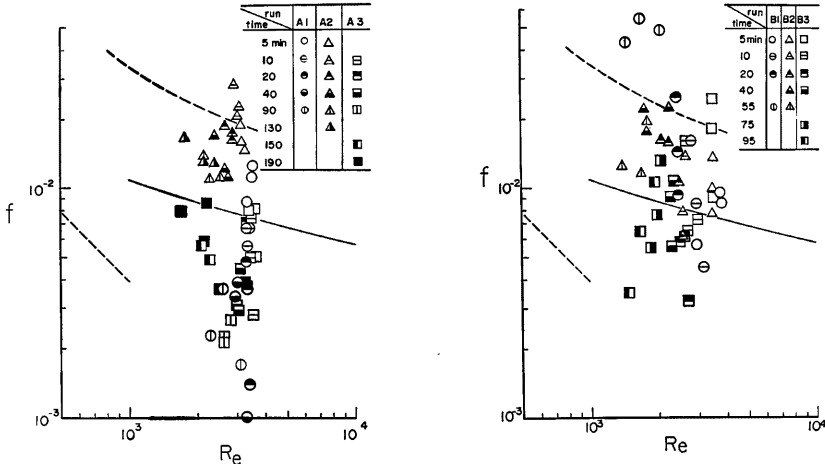


Fig. 19 Friction factors obtained from experiments

こうして、側岸侵食式、流砂量式と現象の一致がほぼ確認され、掃流力が求まれば、現象の記述の見通しがついたわけであるが、掃流力を知るためには、流れの抵抗則を知る必要がある。この点に関しては、今回の実験については、特にレイノルズ数が小さいことから抵抗則の評価が重要である。抵抗則を moody diagram で示すと **Fig. 19** を得る。実験値としては、滑面乱流と粗面乱流の間の抵抗が期待されるわけであるが得られた結果は、特に Series A については広い範囲で変化しており、層流の抵抗状態から粗面乱流の抵抗状態まで含んでいる。従って、今回の実験のシミュレーションを行なうときは、抵抗則に留意する必要がある。

さて、最後に、砂防ダムの侵食防止機能についてシミュレーションを行なう場合の境界条件について考察する。下流端の境界条件として、ダム投置点で河床位が、満砂後は変わらないとし、また、もし流れが常流であれば、この断面で限界水深を与えればよい。上流側の境界条件は、河床勾配を与えられた流量、流砂量

に対応する平衡勾配にとるのが一般的であるが、河道幅をどのように定めるかが問題である。本実験は、上流からの給砂量 0 という条件で行ったが、上流端での河幅は初期のものほとんど変化なく、この河幅に対する静的平衡勾配が生じた。したがって、本実験の場合には初期河道幅に対する静的平衡勾配を上流端の境界条件として与えて差し支えないものと思われるが、一般的にはさらに検討が必要である。

4. 結 語

本研究は、砂防ダムの持つ流路の侵食防止機能および、その評価法について、実験的考察を加え、機能のシミュレーションへの見通しを得ることを目的として行った。実験の結果、砂防ダムの侵食防止機能はダム堆砂による河床勾配の低下、ひいては掃流力の減少による側岸侵食速度の低下によってもたられ、さらに中規模河床形の発生発達への抑制効果も加わることが明らかにされた。又、一次元解析の立場から、機能のシミュレーションを行なう時に必要な側岸侵食量式、流砂量式との比較を行なったところ、理論と実験とは比較的良好な一致を示し、シミュレーションを行なうにあたっての見通しが得られた。

最後に、本研究を行なうにあたり、京都大学防災研究所吉田義則技官に実験及び図面作成に多大なる御迷惑をおかけした。ここに記して感謝するしだいである。

参 考 文 献

- 1) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準（計画編），山海堂。
- 2) 藤田裕一郎：沖積河道の流路変動に関する基礎的研究，京大学位論文，1980。
- 3) 芦田和男・江頭進治・加本実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究(2)，京大防災研究所年報，第26号B-2，1983，pp. 353-361。
- 4) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と流砂量に関する研究，土木学会論文報告集，第206号，1972，pp. 59-69。