

扇状地複断面河道における低水路河岸と高水敷の侵食

Bank Erosion of A Main Channel and Scouring of A Side Channel in A River in An Alluvial Fan Reach

三輪 弼*

by Hajime MIWA

The cross section of a river channel in an alluvial fan reach is originally simple, but in many rivers it has been changed into a compound-section by dredging a main channel because of its larger capacity to handle floods and the multipurpose utilization of a side channel.

However, many troubles such as bank erosion in a main channel and scouring of a side channel occur during floods. The mechanisms of the problems in some Japanese rivers are analyzed by field studies using aerophotos and survey data and by experiments conducted in the laboratory.

Keywords : alluvial fan river, compound section, bank erosion, channel bar

1. まえがき

扇状地は、山間狭窄部の河道が平野部に出たところに位置し、洪水時の流れが浅く広がって上流からの流送土砂礫が徐々に堆積して形成された地形である。したがって堤防や護岸によって河道の固定化が図られていくさい、元来の浅く広く広がった流路は維持されて、洪水中には河道内の全河床が水没し砂礫も掃流される「単断面河道」になっている場合が多い。しかし、単断面河道の場合には、砂礫洲の形成に伴う河床深掘れ部が堤防に隣接して現れることから、河道の中央部に低水路を掘削して洪水時の主流部を堤防から遠ざけたいという治水上の願望と、都市に隣接する河川での河川敷利用が推進されるようになってきたことなどのために、扇状地河道においても、複断面河道に改修され、あるいは改修計画をもっている場合が多くなってきている。

中下流部の河道区間における最適複断面流路については、洪水流の航空写真の解析と水路実験による研究によって、堤防法線と低水路法線との最適な配置が明らかにされ、原理的にはすでに解明された¹⁾が、河道内の砂礫洲の形成が強く関係する扇状地河道での複断面流路の問題については、これまでのところ研究は全然進んでいないといってもよい。

とくに扇状地河道は、河川の自然的性質から単断面河道になりやすいため、すでに複断面化が進められた河川において、洪水による低水路河岸の侵食や低水路護岸の崩壊、高水敷の侵食や洗掘などの不都合を生じ

* 正会員 農博 岩手大学助教授 農学部農業生産環境工学科

(〒020 岩手県盛岡市上田3-18-8)

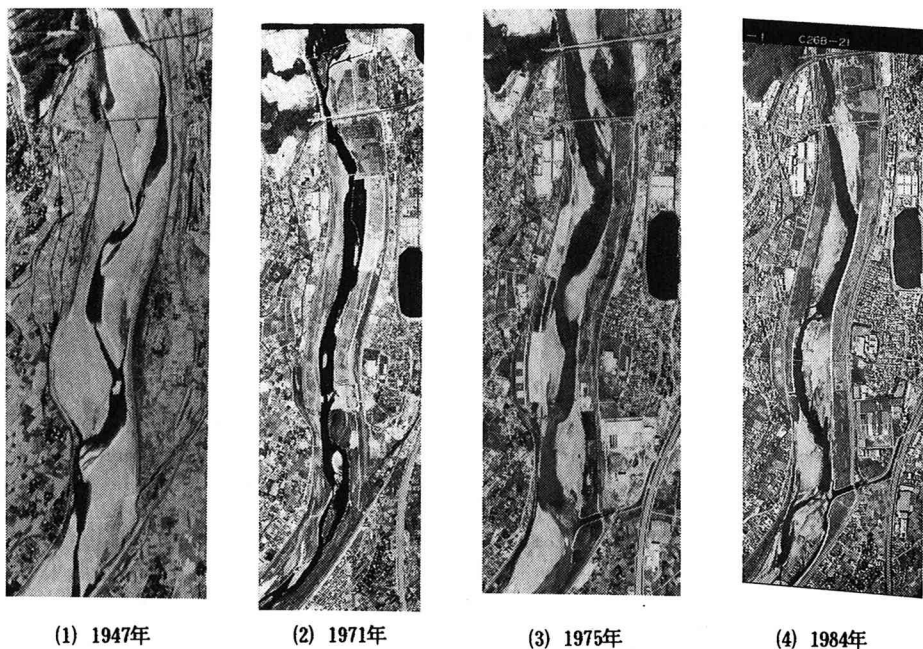


写真-1 多摩川（東京都）における複断面化過程

(1) は米軍撮影、(2)、(3)、(4) は地理院撮影

ている場合も多い。それらの先駆的な事例を、多数年次の航空写真の比較判読と現地測量データから分析する一方、実験水路における再現実験の結果との比較検討によって、低水路河岸と高水敷の侵食のメカニズムを明らかにした。

2. 扇状地単断面河道の治水上の問題点

両岸の堤防によって河道が固定されているものの、低水路掘削などによる複断面化は全然進められていない扇状地単断面河道の1例を、1947年撮影の航空写真（写真-1 (1)）によって東京都府中市地先の多摩川にみることができる。この写真の上下流区間の多摩川は、河道幅約 400m、河床勾配約 1/300の、直径数cm程度の石も混じる礫床河川であり、明瞭な扇状地地形は形成していないものの、典型的な扇状地性の河道区間である。平水時のミオ筋は、写真の上流区間は2列、下流区間は単列の蛇行をしており、高水敷に相当する部分はほとんど存在しない単断面流路である。

日本の他の扇状地河川において、さらに河道幅が広い場合には、3列以上の多数列の水流が並列して流れる網状流路になるが、そのさいも河道幅全体に広がって流れる単断面の河道である。

このような低水時のミオ筋は大局的なパターンは、洪水流によって河床に形成される「洲」（この場合は砂礫洲）の形状と配置パターンによって決められる。単列あるいは複列の砂礫洲は、堤防幅全体に広がる形状になるので、堤防前面のあちこちで河床の深掘れ部である淵がみられ、洪水流の主流部も堤防にぶつかり沿って流れる水衝部も発生するため、堤防護岸の被災を受けやすい箇所が生じてしまう。そして、砂利採取や上流ダムの建設によって河床低下が進行すると、堤防護岸の根の部分が侵食され護岸の倒壊被害が発生しやすくなる。

扇状地単断面河道は、このような治水上の問題を抱えているため、「複断面河道」によって、堤防の近傍を高水敷として、河道の中央部に掘削された低水路が洪水時の主流路になってくれば、洪水による災害防止の観点も非常に望ましい河道である。

3. 扇状地河川の複断面河道化過程 — 多摩川（東京都）の場合 —

都市に隣接する河川では、元来は単断面流路であった扇状地河道区間においても、すでに複断面河道になっている場合も多い。小河川の場合は河道中央部の低水路の掘削と同時に低水路の護岸まで施行されることもあるが、一般には、低水路の掘削が先行し、その後順次改修工事や災害復旧工事によって低水路護岸が施行されていく場合が多い。

同じく府中市地先の多摩川について、複断面河道化の経過を写真－1 (2) ～ (4) にみることができる。

① 写真－1 (2) : 河道の中央部に河道幅の1/3程度の幅の低水路が掘削され、堤防前面の深掘れ部は埋められて高水敷が造成される。低水路は掘削されるだけで河岸は護岸されていない。また、掘削された低水路の河床は平らに均されているため、砂礫洲の形成は全然みられない。

② 写真－1 (3) : 1974年の洪水後には、低水路内に単列の交互砂礫洲がきれいに形成されており、そのために左右岸交互に発生する水衝部において、低水路河岸および高水敷は大きく洗掘されて、低水路幅が河道幅の1/2程度にまで拡大して箇所もある。また、写真区間の下流部の右岸側では、堤防の前面まで高水敷が洗掘されてしまった。

③ 写真－1 (4) : 低水路内の交互砂礫洲は、出水のたびに波長を伸ばしながら下流へ移動していくため、低水路河岸の侵食箇所も、前回洪水での侵食箇所の直下流河岸になる。このように全河岸が侵食されていくことになり、高水敷部が減少して低水路河岸が堤防に近付いてくる。高水敷を公園やグラウンドとして利用するためにも、低水路河岸の侵食の進行は不都合である。そのため、この写真から読み取れるように、低水路河岸の護岸施行が進捗し本格的な複断面流路に変わってきている。

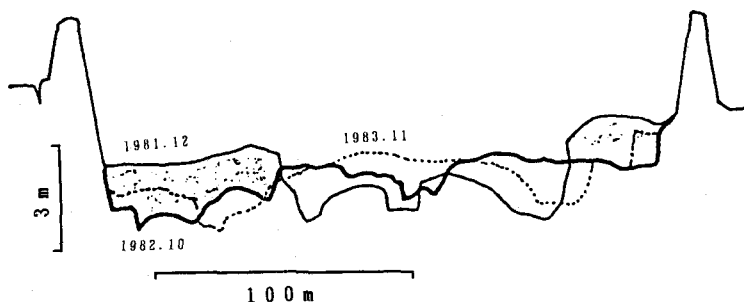
4. 扇状地複断面河道での低水路河岸と高水敷の侵食災害例

他の河川でも似たような経過をたどりながら複断面化されていくのが一般的であるが、整備・改修のいろんな段階で、大小いろいろな規模の洪水に見舞われる場合があるから、低水路河岸や高水敷の侵食の形態もさまざまである。

4.1 洪水による高水敷の大幅な侵食 — 三峰川（長野県）の場合 —

三峰川の扇状地区間は、河道幅約250m 河床勾配約1/100のほぼ直線的な河道になっており、従来は河道幅一杯に広がる単列砂礫洲が形成された単断面河道であった。1975年頃から河道中央部に河道幅の1/3程度の幅の低水路が掘削され、堤防前面の深掘れ部にはその掘削土砂を埋め立てて高水敷を造成する工事が実施されて、図－1の横断面の1例にみられるように、きれいに複断面流路に整正された。そして小さな洪水によって低水路内に低水路の幅に対応した波長の単列の河道洲が形成され始めていた。

低水路の護岸は施行されていなかったが、高水敷の表面は植性に覆われ、一見安定した複断面流路になっていた。しかし、1982、1983年の2年間に3度の大きな洪水（特に1982年8月の洪水のピーク流量はほぼ計画洪水流量に相当）に見舞われ、様相が一変



図－1 洪水による高水敷の大幅な侵食例
(三峰川 1.6K 地点の横断面、建設省天竜川上流工事事務所)

した。図-1のとおり、高水敷は大きく侵食され、またある部分では堆積する箇所もあり、複断面流路の形跡をとどめず、すっかり従来の単断面河道に復元してしまった。

4.2 洪水による低水路河岸の侵食 — 葛根田川（岩手県）の場合²⁾ —

葛根田川は、1947、1948年当時の航空写真によれば、ほぼ自然状態に近い扇状地河川であったが、その後に河川改修工事が進展し、1960年代には全川にわたって兩岸の堤防が完成した。河道幅 120m 程度の直線的な河道にされた後、河道中央部に幅 50m程度の低水路が掘削され、複断面河道に変化していった。その後の出水で低水路内に砂礫洲が形成され、それに伴う水衝部河岸において洪水の度に河岸侵食が進行し、高水敷部が減少していくため、災害復旧工事で侵食箇所に低水護岸が施行されていった。

河岸侵食を受けた状態で低水路護岸を施すため、現在の低水路幅は約 80mに広がっている。低水路内平均河床面と高水敷面との差は 3 m 程度と比較的大きいため、1990年に約 800m³/sの洪水に見舞われたさいにも、ほぼ低水路満杯の水位にまで上昇しただけで、高水敷には乗らなかった。その洪水時には、早坂地先の低水路内では 2 列の河道洲が形成されているため、左右兩岸に水衝部が発生し、まだ護岸が施行されていなかった右岸側の低水路河岸が大きく侵食された。その侵食状況は図-2 にみられるとおり、2 列の河道洲に対応した水衝部で前縁に並行するような形態で河岸侵食が発生した。左岸側はすでに護岸が施行されていたので、河岸侵食は発生しなかったが、護岸前面の河床が大きく洗掘されたため、根固め部に敷き並べられていたブロックの広範囲におけるはげしい沈下・折損の被害がみられた。

4.3 低水路護岸された高水敷表面の広範な洗掘 — 松川（福島県）の場合 —

松川においても三峰川と同様に、従来は、直線的な河道内で単列交互砂礫洲が形成された単断面河道であったが、河道中央部に低水路が掘削され、洪水による低水路河岸の侵食に対する災害復旧工事によって、徐々に低水路護岸が整備されている河川である。

1989 年 8 月の洪水によって、低水路に護岸が施された区間の高水敷部の表面が、写真-2 にみられるように広範囲に洗掘された。低水路部のミオ筋が低水路護岸を乗り越えて高水敷表面の洗掘部分につながっていること、および高水敷洗掘後の堆砂部が高水敷に続いて低水路にも進出して低水路を埋めていることを読

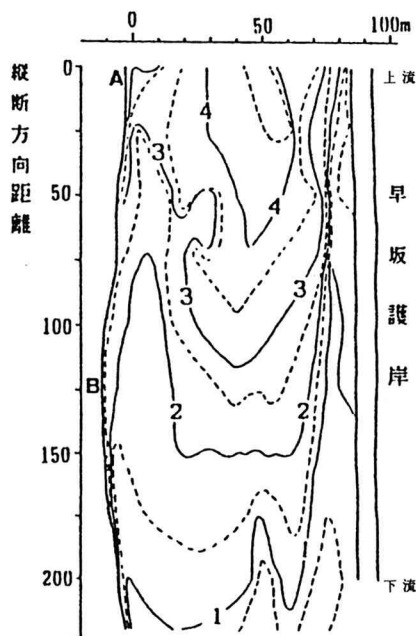


図-2 洪水による低水路河岸の侵食例

葛根田川 1990 年洪水後の河床平面図²⁾
測量範囲の最深箇所を 0 ■ にしている
A : 侵食されなかった低水路河岸
B : もっとも侵食された箇所



写真-2 低水路護岸された高水敷の侵食例

松川 1989 年洪水後の状況、写真手前が下流

み取ることができる。低水路河床面と高水敷表面との標高差があまり高くなかったために、低水路内での主流部がそのまま高水敷にも乗り上げる形になり、高水敷表面を洗掘する結果となったものと推察される。そして洗掘された砂礫は少し下流の高水敷面に堆積するとともに、低水路部にも張り出して堆積し低水路の一部を埋めてしまった。

5. 低水路河岸と高水敷の侵食の再現実験

以上のような扇状地複断面河道における低水路河岸の侵食や高水敷部の侵食の発生および発達状況を詳細に調べるため水路実験を行なった。扇状地河道は直線的な河道になっている場合が多いので、今回は一定の水路幅 40.5cm をもつ固定直線水路を使用した。実験は、当初の 40.5cm 幅の単断面水路の場合には、平坦河床から通水して2列の砂洲が発達し、しかも、水路の中央部に、水路幅の 1/2あるいは1/3 の幅の低水路（低水路、高水敷とも平坦に均す）を設けて通水した場合には、低水路内に単列交互砂洲が発達するような水理諸量を中心に以下のように設定した。また、比較のため、低水路の側岸を薄いベニヤ板製にして侵食させない場合と、側岸と高水敷の両方をベニヤ板製にして固定した場合の実験も実施した。

* 水路全長：8.2 m , * 水路床勾配：1/80～ 1/120

* 流量：200 cm³/s～ 1200 cm³/s

* 水路床粒子：比重 1.93 , 粒径 0.06cm ～0.10cm (コンクリート用軽量骨材)

5.1 掘削低水路の側岸侵食

水路中央部に低水路が掘削されただけの複断面河道は、流量の大小や掘削低水路幅の大小、低水路掘削深の大小によって、低水路河岸および高水敷の侵食状況が大いに異なる。

水路実験において、低水路満杯の状態で流れて高水敷上は流下しない場合の1例を写真-3に掲げる。水路床勾配は 1/120、全体の水路幅 40.5cm に対し、低水路幅はその 1/2の 20.25cm、掘削深は 0.7cm、流量は 400 cm³/sの一定流量である。通水初期の砂床は平らで水も直流しているが、低水路内には徐々に単列交

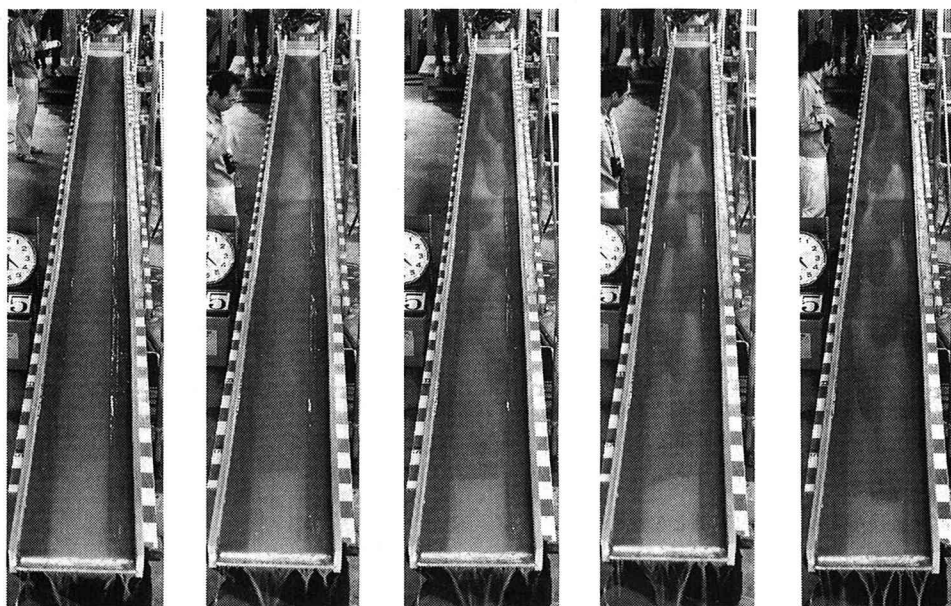


写真-3 掘削低水路の側岸侵食が進行していく様子

水路幅 40.5cm, 掘削低水路幅 20.25cm, 深さ 0.7cm, 流量 400cm³/s
(左端写真が通水3分後、右に順に3分おき撮影)

交互砂洲が形成されはじめ、水流は直線的な低水路内で左右に蛇行し始める。交互砂洲の形成以前は低水路河岸に沿う流れは弱いので、河岸侵食はほとんど進行しないが、水流が蛇行してくると河岸沿いに主流部がよってくる箇所では低水路河岸が侵食されてくる。河道洲が下流へ移動していくので、侵食箇所も下流へ少しずつずれていくことになり、河岸侵食は下流斜め横方向に拡大する。交互砂洲の形状にしたがって水流は単列蛇行を呈し、左右岸交互に河岸侵食を発生させるので、低水路そのものも単列蛇行の形態を示すようになる。

他の水理諸量を同じにしたまま、低水路の掘削深を 0.5cm に浅くした場合、また掘削深は 0.7cm のままで低水路幅を全体幅の $1/3$ の 13.5cm に狭くした場合には、いずれも低水路部の流積が減少するため、高水敷上も流下することになる。しかし、高水敷上の水深が小さいために砂の移動はほとんどなく、低水路のみ掃流される状態に変化がないので、写真-3の場合とほとんど同じ発達過程になる。

流量を少し大きくして $600\text{cm}^3/\text{s}$ で通水した場合、掘削の幅 20.25cm 、深さ 0.7cm の場合でも高水敷上の砂が動くようになるが、掃流量は非常に小さいので $400\text{cm}^3/\text{s}$ の場合とそれほど大きな差異を生じない。しかし、掘削深を浅くした場合と掘削幅を狭くした場合には、いずれも高水敷部の水深を大きくする効果があるため、掃流砂量がさらに多くなり、後掲の写真-4に見られるような水路全体での河床形態に変化してくる。

なお、小流量の $300\text{cm}^3/\text{s}$ の場合でも低水路床の砂が掃流されるので、低水路内に河道洲が形成され、それに伴って生じる蛇行水流の主流部に沿う河岸で侵食が起きてくるが、掃流力が小さいために側方侵食の進み方は遅く、低水路幅はなかなか拡大しなかった。

5.2 高水敷表面の洗掘と低水路内への堆砂による単断面化

同じように水路の中央部に低水路を掘削して通水した場合に、高水敷部にも水が乗り表面の砂も盛んに掃流されるようになる。高水敷上でもしだいに洗掘域と堆積域が交互に現れてくる。高水敷部での洗掘と堆積は、低水路内での河道洲の形状に密接に関係しているので、低水路と高水敷との河床形態が連続した形態になってきて、高水敷と低水路の区別がはっきりしなくなり、兩岸の水路側壁までの水路全体の幅での砂洲の形状に変化してくる。

$1000\text{cm}^3/\text{s}$ の流量で 10 分間通水して、水路一杯を使う単列の交互砂洲が形成されてきた 1 例を写真-4 に示す。初期の掘削低水路の影響をほとんどとどめることなく、単断面流路に変化してしまった状況がよくわかる。

5.3 高水敷洗掘と低水路内砂洲との関係

掘削低水路の側岸を固定した実験においては、流量が小さくて高水敷に乗らない場合、および高水敷に乗っても水深が小さくて高水敷上の砂の移動がない場合には、低水路内でのみ単断面流路と同じであり、低水路内に単列の交互砂洲が発生・発達し、形状を保ちながら下流へ移動することになる。



写真-4 大流量の場合の単断面化 流量 $1000\text{cm}^3/\text{s}$ 以外は、写真-3と同じ

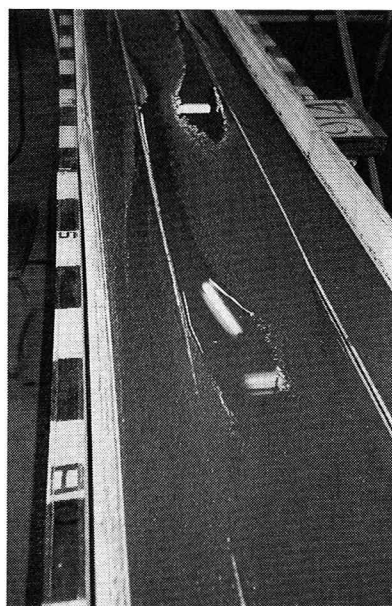


写真-5 低水路護岸された高水敷の洗掘状況

低水路幅 20.25cm 、深さ 0.7cm 、 $400\text{cm}^3/\text{s}$ を通水して低水路内に交互砂洲を形成させた後、 $800\text{cm}^3/\text{s}$ を通水して高水敷の洗掘状況を調べた

流量が大きくなって高水敷部の砂も盛んに移動する場合には、低水路護岸の存在にかかわらず、高水敷部と低水路内とが一体となった単列あるいは2列の砂洲が形成されるようになる。

実際の河川では低水路の掘削後、中規模程度の洪水で低水路内に河道洲が形成された後、大きな洪水によって高水敷部での表面の洗掘が進み、低水路護岸の崩壊を招いたりする場合も多い。そこで、低水路のみを流下する流量によって低水路内に交互砂洲を形成させた後、流量を増加させて高水敷上の砂も移動させるようにしてみたところ、写真-5のように、低水路内の砂洲形状にしたがって蛇行する水流の主流部が、低水路河岸に沿って流れる箇所、高水敷にも乗り上げてきて高水敷表面を大きく洗掘した。護岸の裏の地盤が侵食されることになるので、護岸の崩壊につながることは容易に理解することができる。

5.4 高水敷保護の影響

高水敷が公園として利用されたり、表面の植性が進んできたために、大きな洪水によっても高水敷の表面が洗掘されにくくなっている場合がある。そこで高水敷部を固定床にして、高水敷上も流下する流量で通水してみたところ、写真-6のように低水路内に単列の交互砂洲が形成された。

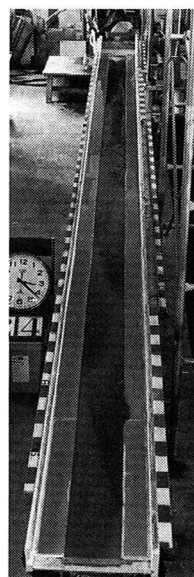


写真-6 固定高水敷の場合の
低水路における交互砂洲の形成

流量 $1000\text{cm}^3/\text{s}$ 、通水開始時
は写真-4と類似の条件

6. 実例と実験例との比較考察

実験は、水路幅 40.5cm の水路で河床勾配 1/100前後に設定して、水深 1cm 程度になるような流量で実施されているので、現地扇状地河川のうち急勾配な河川では、ほぼ幾何学的な相似が満足され、フルード相似則も大体満足できるような実験である。現地の河床勾配が 1/300程度までの河川については、歪み比3程度以下の歪み模型と考えれば、木下が大井川を例に実施した「砂レキ堆相似³⁾」の条件をおよそ満足するような水理諸量となっている。

実験は一定流量を通水する場合がほとんどで、途中で変化させたいくつかの実験でも一定流量を2段階に変化させただけで、洪水流のようなハイドログラフをもつ不定流は流さなかった。河岸侵食や砂洲の移動を含む複雑な現象の再現実験であるので、未解決な時間の相似則の問題を避けるため、単純な一定流量通水とし、多様な流量の実験を行なうことによって、定性的な理解を深め、再現性の検討を行なった。

一定流量の通水であつたにもかかわらず、大小流量のちがいや低水路の幅や深さのちがい、低水路の側壁の有無、高水敷保護の有無などの多数の実験を見比べて、現地河川での種々の河岸侵食や高水敷洗掘を状況を比較検討すると、驚くほど今回の小規模な実験における再現性は高かったといえる。例えば、多摩川や葛根田川の低水路河岸の侵食状況は、5.1 に述べた掘削低水路の河岸侵食の発達過程に再現されていると見なすことができる。また、三峰川での単断面流路への復元は、5.2 の低水路が消失してしまう実験において再現されている。そして、護岸がありながら、高水敷の表面が大きく洗掘された松川の場合は、5.3 の高水敷の洗掘状況に酷似しているといえよう。

下流部の砂床河道においては、洪水の増水期と減水期で全く異なる河床波が形成されていることが観測されている⁴⁾ので、洪水の前後の河床形態の比較だけで、水路実験での再現性の有無を問うことはできない。しかし、扇状地河道において河岸侵食や護岸災害に対してもっとも関係の深い洪水時の主流部の蛇行状態や河床深掘れ箇所の配置などは、河道内に形成される砂礫洲の形状とパターンに支配される。したがって、実験水路において、現地河川と同様の砂礫洲の形状とパターンが再現されていれば、河岸侵食などの現象に関しても、定性的には再現性は高かったと見なすことができる。

7. まとめと今後の課題

以上の実際例の解析と実験水路における再現実験の結果から、直線的な堤防法線をもつ扇状地複断面河道において発生する低水路河岸の侵食や高水敷の侵食・洗掘は、洪水流量や低水路の幅・深さなどによって、次のように整理することができる。

(1) 扇状地河道では、河床勾配が比較的急勾配であるため、河道中央部に低水路が掘削されて複断面河道になった場合でも、大きな洪水では、高水敷部表面の砂礫も盛んに掃流される場合がある。このような場合、洪水後には、低水路掘削の形跡もとどめず、もとの単断面河道に戻ってしまう。

低水路の幅が狭く、低水路の掘削深が浅いほど、もとの単断面河道に戻りやすい。

(2) 低水路満杯の流量あるいは高水敷に水が乗っても表面の砂礫が掃流されない程度までの流量の洪水しか出ない場合には、低水路のみの単断面河道と同じであり、低水路幅に規定された砂礫洲が形成される。低水路幅はもとの河道幅の $1/3$ ないしは $1/2$ 程度であることが多いから、もとの河道幅で $2 \sim 3$ 列の複列砂礫洲が形成されていた場合にも、低水路では単列交互砂礫洲が形成される場合が多い。

(3) (2) の場合、交互砂礫洲の形状にしたがって、洪水時の水流は蛇行し左右岸交互に河岸沿いに水衝部が現れる。低水路護岸が設置されていない場合でも、水衝箇所以外の河岸では河岸侵食はほとんど発生せず、左右岸交互の水衝箇所でも河岸侵食が発生し、低水路そのものも蛇行してくる。砂礫洲は洪水のたびに下流へ移動するので、河岸侵食箇所も洪水のたびに少しずつ下流へ移動し、かつ横方向にも侵食が拡大するから、低水路が次第に堤防に接近してくる。ただし、小さな洪水しか出ていない場合には、水衝部での流速もあまり大きくないので、低水路河岸の侵食量も小さく、低水路幅も拡大しない状態が続く。

(4) (2) の場合に、低水路侵食箇所に護岸が施工されても、次の洪水での水衝部は既設護岸の下流にずれてきて、未護岸の河岸が侵食を受けることになる。直線的な低水路では、結局全河岸についての護岸が必要である。

(5) 低水路全河岸に護岸が設置されていても、高水敷表面の砂礫が盛んに掃流されるような大きな洪水に見舞われた場合には、護岸のない場合と同じように兩岸堤防までの河道全体での単断面河道に戻る。

運動場や公園としての利用や植性のため高水敷表面が洗掘されにくくなっている場合でも、大きな洪水の場合は、低水路内での砂礫洲の形成に伴う左右兩岸の水衝箇所で、高水敷に乗り上げてくる強い流れを生じるため、その箇所で高水敷が洗掘され、護岸の崩壊を招く場合もある。

なお、今回の解析は、直線的な堤防法線をもつ扇状地河道において、河道の中央部に直線的な低水路を設置した場合の検討に留まっているので、今後は、屈曲やわん曲をもつ河道また大きく蛇行した河道などについての検討を進める必要がある。さらに低水路を適度に蛇行させて低水路内に形成される交互砂礫洲の移動を停止させた場合との比較検討も必要である。

本研究の遂行にあたって、いつもながら木下良作博士のご研究に教えられることが多かった。岩手大学岡本雅美教授からも多くのご助言を得た。また今回の実験については、岩手大学農学部農業水文学研究室専攻生、市瀬健一、大川原誠、桶田雅美、川島広成の各君の熱心な協力を得た。記して改めてお礼申し上げる。

[引用文献]

- 1) 木下：洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に関する実験的研究、科研費報告書「沖積河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究」、pp.55-68、1988
- 2) 三輪：葛根田川（岩手県紫石町）における平成2年災害の調査報告、東北地域災害科学研究、27、pp.57-62、1991
- 3) 木下：大井川牛尾狭窄部開削の影響に関する「砂レキ堆相似」による模型実験、建設省静岡河川工事事務所、1980
- 4) 木下：砂洲・砂堆など河床波の洪水時形態変動、土木学会「流れと流砂の同時計測」ミニシンボ資料、1991