

河道特性が護岸被災の被災形態に与える影響と そのメカニズム

ANALYSIS OF THE MECHANISM HOW RIVER CHANNEL CHARACTERISTICS
DETERMINE THE DISASTER PATTERN OF REVETMENTS

川口淳郎¹・原田大輔²・知花武佳³
Atsuo KAWAGUCHI, Daisuke HARADA, Takeyoshi CHIBANA

¹非会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

²学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

³正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Various studies on revetments have been carried out. Most of them, however, focused on the relationship between strength of revetment and hydraulic force. In this study, the influence of river channel characteristics on the disaster pattern of revetments was investigated through observations, analysis of disaster data in the Tama River and the mechanism was clarified through numerical analysis and hydraulic model test.

Through this study, following three points were clarified. Damaged part of revetments depends on the distance from the weir that affects the riverbed degradation. Damaged revetments are often found at the area of about 1~3km downstream from the changing point of riverbed slope. The sinuosity and the proportion of low-water channel to the river width determines which bank side is damaged, but alignment of the channel in wider area is also important.

Key Words : *Revetment, Weir, Changing point of riverbed slope, Sinuosity, Hydraulic model test*

1. 背景と目的

古来より護岸は河岸保護の役割において、人々の生活の安定に対して大きく寄与してきた。その役割は堤防への浸水防止や浸食防止は当然のこと、近年の多自然川づくりにおける自然環境の保全・再生という観点からも、護岸の素材や工法などにも工夫が凝らされるようになり、景観、親水性をも有するようになってきた。

このように非常に多様で重要な機能を果たす護岸であるがかつては、主として経験の積み重ねと現場における工夫によって設計・施工がなされていて、体系的な設計論も十分に確立されていなかった。これはひとつに川にはそれぞれ多様な個性があり、似たような川であっても単純に体系化して適用できなかつたという背景もある。その後、河川工学の進歩により、護岸の力学的な安定性を確保する形態や、護岸自身の強度といったことに関する検討がなされてきた。現在では、設計流速に対応する応力の算出方法や適切な粗度の与え方のマニュアルも確

立され、それに基づいて護岸づくりがなされている¹⁾。

ところが、こうした護岸そのものの耐力に注目した研究が多くなされてきた一方で、より大きな視点でみた河道特性に着目し、横断、縦断、平面的な河道の形状と護岸の脆弱性との関係についての理解は十分ではないように見受けられる。実際、外力や耐力の設計法に基づき造られた護岸が被災しているというケースはよく見られるが、このことは、これまでの設計論において湾曲部外岸や洗掘・渦などによる流速増加を考慮に入れた補正係数だけでは不十分であるということを示唆している。その一方で、被災している場所にはある一定の特徴があるようにも見て取れる。

そこで本研究では、現地観測、被災箇所資料分析、平面形状と渦発生位置の関係検討、実河道の線形を模擬した水路実験を通して、護岸被災の形態や発生場所と河道の横断、縦断、平面的な形状との関係を考察することで、より大きなスケールでの河道特性が護岸被災形態に及ぼす影響とそのメカニズムの解明について研究した。

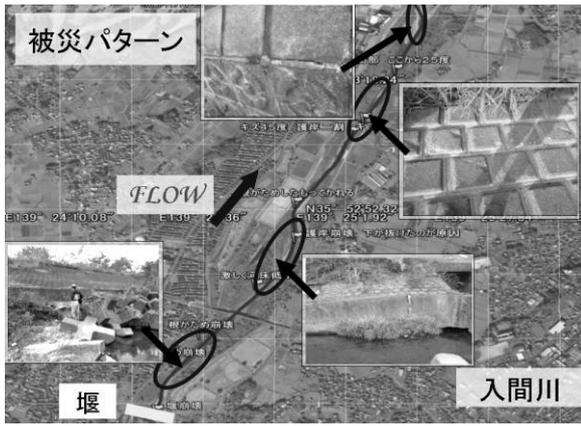


図-1 入間川被災状況

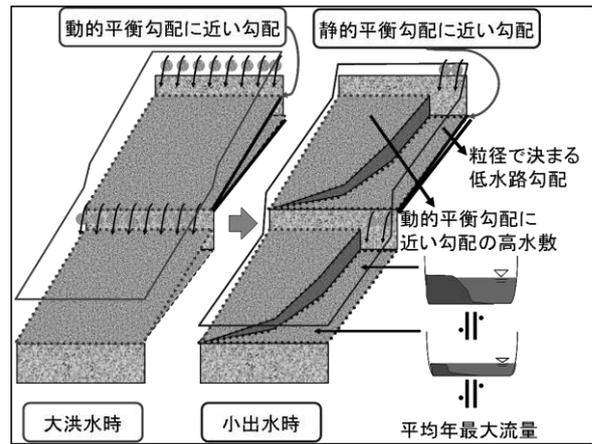


図-2 堰-堰間に形成される地形

2. 堰-堰間の横断面形と護岸の被災形態

(1) 観測結果

荒川水系入間川奥富堰から下流の護岸被災を縦断的に調査した結果、以下のような特徴が分かった。

まず堰直下では川幅が狭く河床洗掘が進行しているため、根固めが平水時の水面より上に露出し、流出しているものもしばしば見られた。その後下流へ行くにつれ川幅が広がると共に、河床が少しずつ上昇し、堰下流1km辺りでは根固めあたりまで水面が達していた。この辺りでは河床が洗掘されつつたびたび浸水することにより護岸の裏込め材が護岸底部から吸い出され、基礎工が自重に耐え切れなくなったため途中で折れていた。堰下流2km辺りでは河床は正常な高さとなり、護岸被災は法面へと移る。これは護岸にとって致命傷となりうるほどのものではないが、摩耗やかなり深い傷が頻繁に見られた。さらに下流への堰から2.5km辺りまで近づくと、摩耗やヒビ・破損が天端にまで達していることから、増水時の流れが天端に乗り上げていることがわかる(図-1参照)。

このように、堰と堰との間では徐々に横断面形が変化し、それと共に根固め→基礎工→法面→天端というように護岸の被災箇所が徐々に上部に移行していた。なお、相模川水系中津川においても同様のパターンを確認した。

(2) 堰-堰間の護岸被災のメカニズム

このように、堰との位置関係で被災の形態が決まっていたが、ここで重要なのは、低水路の川幅及び河床高との関係である。横断構造物に挟まれた区間について、知花ら²⁾は図-2のように堰直下では幅が狭く深い低水路が形成され、下流にいくにつれて幅の広い浅い低水路となる、としている。この横断構造物に挟まれる区間に形成される地形の特徴により、上記のような、堰との位置関係に応じた護岸被災形態が生じると考えられる。つまり堰直下では幅が狭く深い低水路であるため、流れが低水路に集中して高速流が生じやすく、河床低下の進行

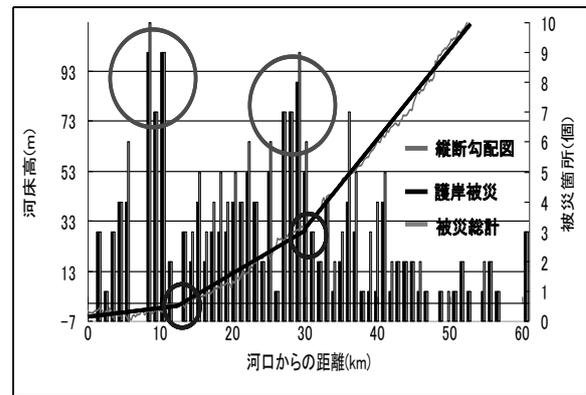


図-3 河口からの距離と1km区間ごとの護岸被災回数の関係及び縦断河床勾配

に伴い、河床高が根固めを下回り、比較的容易に根固めが流出してしまう。一方、下流へいくにつれて幅が広く水深が浅くなるため、増水時の水面が法面、さらには天端まで達するため、法面や天端に摩耗や損傷・傷が見られるようになる。

3. 広域の縦断面形と護岸の被災形態

(1) 縦断的護岸被災の特徴

より大きなスケールでの河道特性と護岸の被災形態との関係について考えるため、1974年～2007年の洪水による多摩川の護岸被災箇所³⁾に着目した。

まず、1kmごとに河道を縦断的に区分し、その区間内の護岸被災箇所数の期間内累積値を調べた。これを棒グラフで表したものが図-3である。ただし、黒色は護岸被災のみ、灰色は護岸被災に加えて天然河岸侵食などを含めた総数である。すると、護岸被災及び被災総数が集中しているところとして、河口から8km～11km地点、27km～30km地点の二箇所が目立つことがわかる。地形工学的に見て、27km～30km地点辺りは扇状地から蛇行原へ移り変わる境界辺りであり、8km～11km地点は蛇行原から三角州へと移り変わる境界辺りである。そこで、多摩川の縦

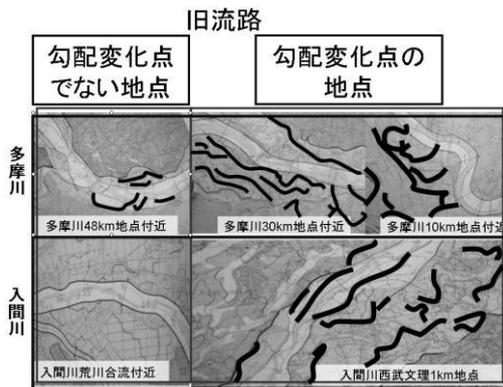


図-4 多摩川, 入間川における治水地形分類図
(太い実線が旧河道)

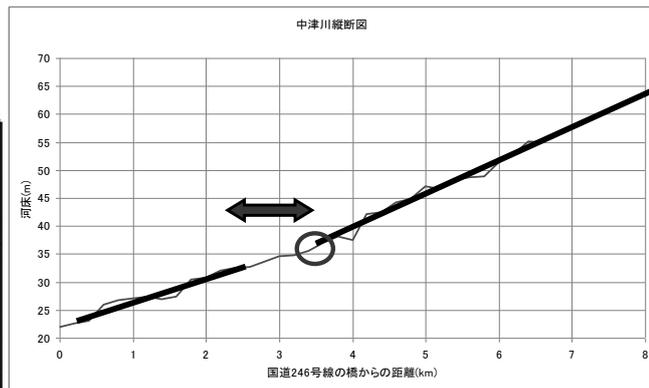


図-5 中津川の縦断河床勾配変化点



多摩川河口から8km~11km地点



多摩川河口から27km~30km地点

図-6 航空写真上にプロットした護岸被災

断河床勾配を表すグラフを重ね合わせると、どちらの二地点でも河床勾配が変化する点の1~3km下流において護岸被災が集中していることが分かる。さらに、入間川、中津川においても河床勾配変化点の1~2km下流において護岸の損傷箇所が多い様子が確認された。

(2) 河床勾配変化点下流での護岸被災メカニズム

河床勾配変化点の上流側と下流側では河床勾配が異なると共に、河床を形成する礫径にも差が生じる。一般的に勾配が急なほど比較的大きい礫径のものが存在し、緩いほど小さい礫径が中心となる。このように勾配も礫径も急変する河床勾配変化点の上下流では、安定的な砂州の形状が異なるため、その形成箇所も不安定となりがちで、流路が左右にぶれやすく様々なところで水衝部が生じやすいのではないかと考えられる。

そこで、多摩川と入間川の河床勾配変化点あたりの治水地形分類⁴⁾を確認したところ、図-4に示す通り黒い太線で示した旧流路の数が河床勾配変化点のところでは他と比べて圧倒的に多く、旧流路が左右に大きく振れていることがわかる。実際、河床勾配変化点より1kmほど下流辺りでは入間川では護岸法面に大礫によりついたとみられる深い傷が多数見られ、中津川においては、そのような傷に加えて、天端上に大礫が乗り上げている様子がしばしば見られた。

(3) 河床勾配変化点と被災集中区間のずれ

以上のことから、河床勾配変化点よりやや下流においては流路が左右にぶれやすく、護岸被災が集中・激化しやすいということが分かる。では何故それが河床勾配変化点ではなく、そのやや下流で生じているのかということについて考える。

まずこれまで河床勾配変化点という言葉を用いてきたが、河床勾配は当然、突然ある点を境に変わるのではなく徐々に変わっていくものであり、点というよりはむしろ区間ということが出来る。図-5の中津川の例を見れば分かる通り、ここではその徐々に変わっていく部分の上端を河床勾配変化点としたが、その移行帯に当たる区間はおよそ1kmとなっているため、被災集中部分が河床勾配変化点より1kmほど下流までとなっていると考えられる。またその移行帯にあたる区間は川によっても異なり、多摩川、入間川でもそれぞれ1~3km、1~2kmという河床勾配変化の移行帯の区間内に護岸被災が集中・激化しているということが確認できる。

4. 河道の平面形状と護岸の被災形態 (幾何学的な検討)

(1) 平面的な護岸被災箇所の特徴

護岸被災の特徴を平面的視点から把握するため、先程の多摩川の経年的護岸被災データ³⁾を航空写真上にプロットした。図-6は被災が多かった河口から8km~11km

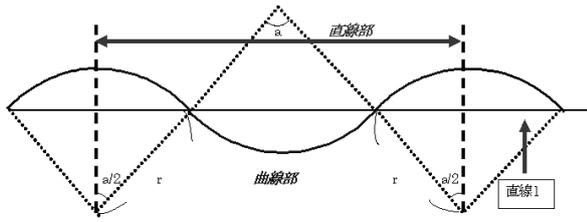


図-7 簡略化した蛇行度の計算モデル

地点、27km～30km地点でのものであるが、8km～11km地点では内岸に、27km～30km地点ではやや外岸に被災が集中していることが分かる。このように全体的に、蛇行度の大きな湾曲部辺りでは内岸に、蛇行度の小さな湾曲部辺りでは外岸に被災が集中するという傾向が見られた。そこで、平面的な護岸被災と蛇行度の関係について考察した。

(2) 二次座標上での被災メカニズム解析

護岸被災が生じているメカニズムは様々考えられるが、そのほとんどの原因が洗掘によるものであった³⁾ことから、高水敷から低水路に高速流が流入する際に生じる強い渦⁵⁾が原因であると考えた。この高速流の発生に関しては、蛇行度と相対水深の関係によってその位置が決定される⁵⁾ことが分かっている。しかし、護岸が被災した洪水のうち堤防一杯まで水位が上昇したものはほとんどないため、ここでは相対水深は小さい場合を考える。そのとき、最大流速は蛇行度が大きいと外岸に、ある程度小さいと内岸に生じる。以上のことを考慮して、以下のように単純化した幾何図形上で考えることにより平面的護岸被災と蛇行度の関係を定量的に計算した。なお、簡単のため主流線を直線で仮定する。

まずは蛇行度について、湾曲部を図-7のように円弧の一部と単純化して考えることにより曲率半径 r 、中心角 a として

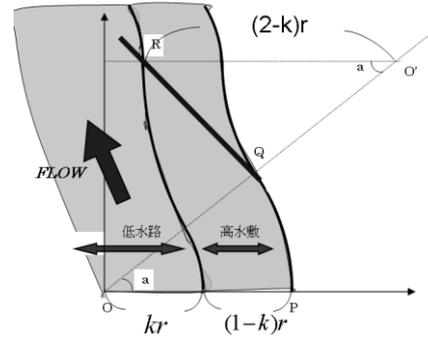
$$S = \frac{\text{二点間の曲線距離}}{\text{二点間の直線距離}} \quad (1)$$

$$= \frac{a/2}{\sin a/2} \quad (0 < a < \pi)$$

と表せる。

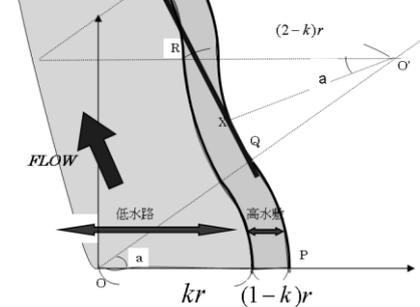
次に平面座標上においてのように最大流速が外岸に生じ、それが剥離した後に直進して下流の低水路の内岸・外岸の境界で流れ落ちる場合図-8 a)と、最大流速が内岸に生じてそのまま直進し、下流の低水路の内岸・外岸の境界で流入する場合図-8 b)を考える。ここで注意すべき点は、複断面河道で最大流速が生じるのは低水路内であるが、河道に対する低水路の割合 k が大きい時は高水敷が狭いため、最寄りの高水敷上でも高速流が堤防法線に沿って流れると仮定している。つまりこのモデルは低水路割合 k が比較的大きい場合を対象としている。

最大流速が外岸



a) 最大流速が外岸に生じている場合のモデル

最大流速が内岸



b) 最大流速が内岸に生じている場合のモデル

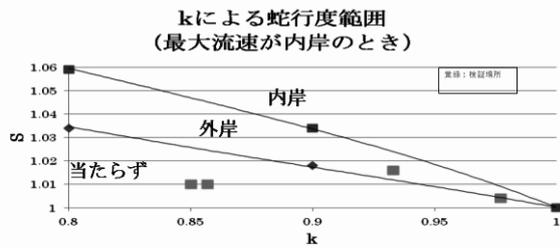
図-8 二次座標上での低水路への流入モデル

このように高速流が低水路の内岸・外岸のいずれで流入するかは蛇行度 S と川幅に対する低水路の割合 k により決定される高速流の発生位置と平面形状で決まることが分かる。これら S 、 k をパラメータとして定量的に解析するが、対称性から図-8 a)では右岸側に注目して説明する。まず、原点 O を中心とする半径 r 、中心角 a の円弧を右岸堤防、半径 kr ($0 < k < 1$)、中心角 a の円弧を右岸の低水路河岸とすると、図中の点 P 、 Q の座標はそれぞれ、 $(r, 0)$ 及び $(r \cos a, r \sin a)$ となる。さらに点 Q に関して、点 O と対称な点を点 O' とすると、この点 O' の座標は $(2r \cos a, 2r \sin a)$ となる。

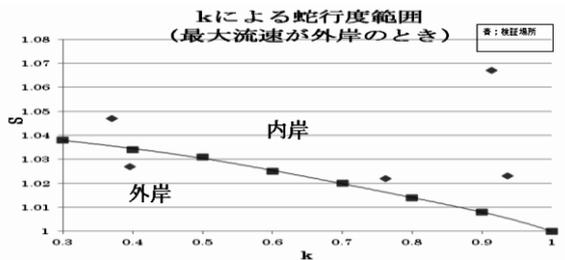
そして点 O' を中心として $O'Q$ から時計回りに半径 $(2-k)r$ 、角度 a の円弧が右岸の低水路河岸とする。ここで右岸の低水路河岸と点 O' から真横に引いた線 ($y = 2r \sin a$)との交点を R とすると、この交点 R の座標は $(2r \cos a - (2-k)r, 2r \sin a)$ となる。この QR が点 O' を中心とする半径 r の円の点 Q における接線だとすれば(点 Q で剥離した流れがちょうど外岸から内岸に変わる点 R に落ちるとすれば)、三角形 $O'QR$ で三平方の定理を用いて、

$$\cos a = \frac{1}{2-k} \quad (2)$$

という関係式が求まる。これにより k の値が決まれば、角度 a が定まるため、式(1)よりそのときの限界蛇行度 S_0 が求まり、 $S_0 < S$ であれば高水敷の外岸に生じた最大流速が次の内岸の低水路へと流れ込み、それ以外では外岸へ流れ込むことになる。



a) 外岸が被災している場所のSとk



b) 内岸が被災している場所のSとk

図-9 不等式で表される領域と実例による検証

同様に図-8 b)を用いて最大流速が内岸に生じる場合を考えると、流れが右岸堤防の内岸からはく離する点をこの曲線のちょうど中央部Xとすると(角度 $XO^{\circ}Q=a/2$ とすると)、点Xでの接線の方程式は

$$\cos \alpha \cdot x + \sin \frac{a}{2} \cdot y + r - 2r \cos \alpha \cos \frac{a}{2} - 2r \sin \alpha \sin \frac{a}{2} = 0 \quad (3)$$

となり、この直線が次の低水路の外岸にあたる条件は「点O'との距離dがrより小さい」かつ「接線が点Rよりも上側を通る」となる。この二つの条件を満たすのは、

$$\frac{1}{2-k} < \cos \frac{a}{2} < \frac{1+k}{2} \quad (4)$$

という条件が成り立つときである。

(3) 計算結果の検証

以上の数式条件を検証するため、多摩川において同じ場所が3度以上被災したことがある9地点において低水路割合k・蛇行度Sと被災箇所との関係を調べ、先ほどの不等式により表される領域上にプロットしたものがである。最大流速が外岸のときはいずれも内岸が被災し(図-9 b))、最大流速が内岸のときはいずれも外岸が被災している(図-9 a)ため、図-9 a)では4地点中2地点、図-9 b)では5地点中3地点が理論式と合致していた。ただし、もともと低水路の割合kが大きい場合のみを対象としていることを考えると、外れている3地点はいずれも高水敷の広いところであり、妥当である。すなわち、本来は二次元計算等で厳密に検討すべきであるが、このようにどこに主流線が生じ、それがどこで剥離するかをおおよそ検討することで、高水敷からの高速流が落ち込む場所をある程度推定でき、第一段階の調査には有用である。

5. 河道の平面形状と護岸の被災形態 (水路模型による検討)

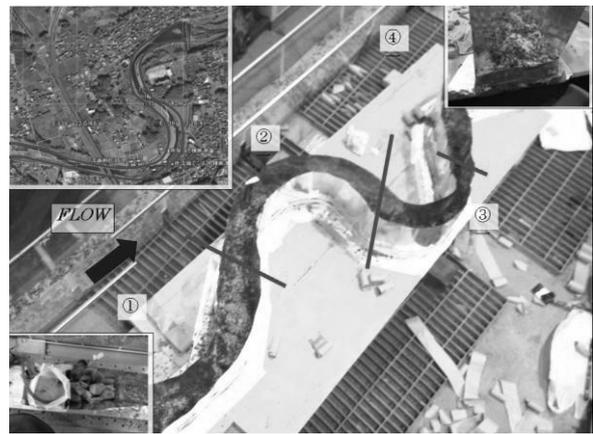


図-10 入間川実河川と実験水路 (番号①～④は説明のための湾曲部番号)

(1) 目的

第4章の幾何学的な平面形状の分析とその検証により蛇行度と川幅に対する低水路の割合をパラメータとして、蛇行度の大きな湾曲部ではその次の湾曲部で内岸が、蛇行度の小さな湾曲部ではその次の湾曲部で外岸での被災傾向にあることを示せた。つまり内・外岸のいずれに強い外力が作用するかは厳密にはその一つ手前の湾曲部の蛇行度に依存した。しかし実河川を見ると、蛇行度がかなり大きい湾曲部では、その一つ手前の湾曲部の蛇行度に関わらずに内岸が被災しているという現象がよく見られた。これは第4章で仮定したような上流の高水敷からの流れではなく、湾曲部周りの局所的な流れによるものだと考えられる。そこで、このメカニズムを解明するため、入間川で蛇行度が大きく、実際に内岸が被災しているポイント(図-10参照)に注目し、その実河道の線形を用いた小規模な蛇行水路を作成して水路実験を行った。

(2) 実験装置 (図-10)

650分の1の縮尺まで拡大した入間川の航空写真を全てつなぎ合わせ、その線形に沿ってベニヤ板上に下書きをし、トタンを貼り付け低水護岸に見立てた水路を作成した。さらに上流側に助走区間のために50cmほどの直線区間をとり、上流端の堰直下に大礫を敷くことで流れが偏らないようにしつつ、水路に水を供給した。また、下流端をトタンで塞ぎ、下流端水位を調整した。なお、0.5mmの砂利と2~4mmの礫を1対1の割合で混ぜ、下流端のトタンの高さまでまんべんなく全体に敷き、実験開始後の給砂は行わなかった。そしてこれら諸物理量は黒木・岸の実験水路⁶⁾に従って行なった。

(3) 実験結果

図-11は実験による土砂と水の動きの模式図である。点線で囲まれた塊は礫の塊を、その他の塊は砂州を、河道内の実線が主流線をそれぞれ表している。

はじめに図-10の湾曲部①と②の境界あたりの右岸に

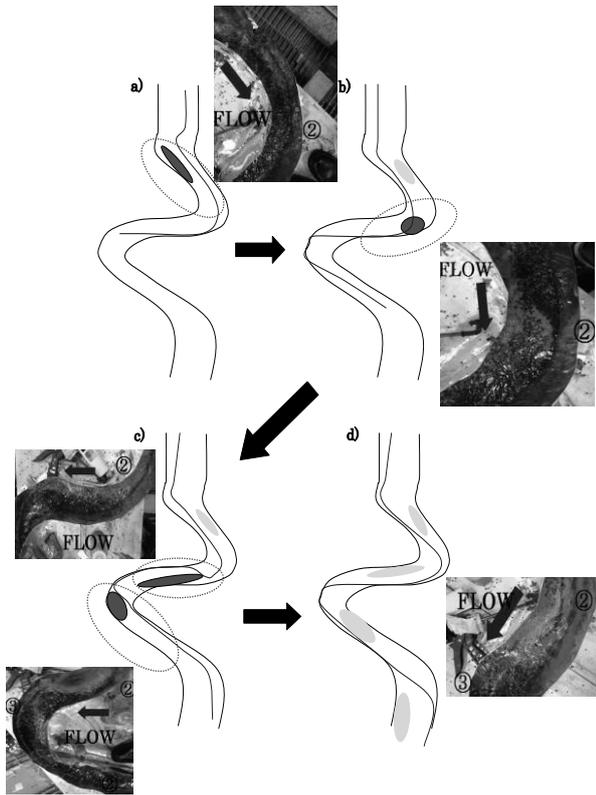


図-11 水路実験結果の様子

礫が少したまり、その影響で滞筋は①と②の境界あたりでは最初左岸に曲げられる(図-11 a)。しかし、すぐに右岸にたまった礫は流されて滞筋も右岸へと移り、流された礫は②の外岸の滞筋上にたまり始める(図-11 b)。さらにこの礫の塊が長さ、高さが増していくと左岸にはりついていた滞筋が礫を越えられなくなり、流路が逸れて②の内岸に張り付く(図-11 c)。この外岸の礫の塊もやがて流速に負けて減少していくが、そうして流れた礫は③の外岸の滞筋にたまっていき(図-11 c)、②の内岸に張り付いていた流れは外岸へとシフトし始めるが、③の外岸の礫は越えられず、③の内岸にあたりそのまま張り付く。しかし、②の外岸に張り付く流れが強くなってくると、②の外岸の礫がすべて③の外岸まで追いやられて、②では外岸のみが掘れていき右岸に砂州が形成される(図-11 d)。すなわち、最初は外岸への流れで大礫が運ばれ堆積し、流れが内岸に集中するが、やがて大礫は流されて次の蛇行の外岸へと移動すれば流れが外岸に寄り、内岸側には安定的な砂州が形成されることになる。

次にさらに大きな8~12mmの巨礫を少量投入して同様の実験を行うと、砂州の形成過程に変化は見られなかったが、巨礫後方で渦が生じ、洗掘が進み、砂利や礫がその渦に巻き込まれて激しく回転していた。

(4) 考察

砂州の形成過程でまず外岸に礫が停滞し始め、その量が一定量を超えると、流れが堆積した礫を超えることができなくなり、流路は内岸へと逸れる。その際に稀に巨礫が内岸にとどまり後方で渦が発生し洗掘すると同時に、砂利や礫が渦に巻き込まれることで内岸に激しく衝突することもある。そうして内岸に摩耗・損傷・傷が生じる。

そして蛇行度が大きいと②後半部分のように、河道の傾斜方向に対して垂直に横切るような流線となることが多い。すると②後半部分の左岸のように、比較的大きな粒径が外岸にたまりやすく、その停滞時間も長い。その間にできる内岸への水あたりの時間も当然長くなる。

このように大きめの粒径のものが上流から流れてくると、まずは外岸にトラップされ、その結果流れが内岸にあたるため、内岸が被災するという状況が生じうるという可能性を示すことができた。

6. まとめ

以上のように、護岸被災の被災箇所は堰との位置関係で決まる横断面形の影響を受け、堰から遠くなるにつれて根固め、基礎工、法面、天端というように被災箇所が変化していくことを確認した。また、さらに大きな視点から縦断的に見ると河床勾配変化点から1km~2km下流で流れが不安定となり、被災箇所が集中していることがわかった。さらに、平面的視点では蛇行度 S と低水路の割合 k をパラメータにとることで、蛇行度の大きい時は次の湾曲部の内岸、小さいときは次の湾曲部の外岸が被災しやすいことを示した。最後に水路実験により、大きな蛇行度の湾曲部では、上流から土砂が流れてくることによりその湾曲部の内岸に流れが集中する状況が生じ、被災しやすいことが確認された。

謝辞: 国土交通省京浜河川事務所より護岸の被災状況に関するデータを提供して頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター：護岸の力学設計法，山海堂，1999
- 2) 知花武佳・山下貴美子・工藤美紀男・柳澤亘：横断構造物が河川地形に及ぼす影響とそこに見られる治水・環境両面の特性，河川技術論文集 第15巻，2009
- 3) 国土交通省関東地方整備局 京浜河川事務所：多摩川被災履歴一覧
- 4) 国土地理院；治水地形分類図，2011
- 5) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005
- 6) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集 第342号，1984

(2012. 4. 5受付)