

農業取水堰下流の河床変動状況と 洪水時護床変形に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY OF RIPRAP DAMAGES IN FLOODS IN DOWNSTREAM RIVERBED LOWERING OF IRRIGATION BARRAGES

常住直人¹・高木強治²・島崎昌彦²・吉永育生²

Naoto TSUNESUMI, Kyoji TAKAKI, Masahiko SHIMAZAKI and Ikuo YOSHINAGA

¹農博 農研機構農村工学研究所 水利工学研究領域 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

²正会員 農博 農研機構農村工学研究所 水利工学研究領域 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

Management actions are required to extend the life-span of irrigation barrages for a long term cost reduction of an irrigation project. One of main problems for the extension is scouring damage of a barrage and its riprap by downstream riverbed excavation to protect downstream city areas from large floods. Therefore, we examined the mechanisms of downstream riprap destruction by progressing downstream riverbed fall to develop efficient repair methods for ripraps through hydraulic model tests on a condition of a typical irrigation barrage. Results show that destruction mechanisms are classified into two types; scouring type and slope type. In the scouring type, destruction progresses rapidly with scouring during a large flood. In the slope type, destruction progresses slowly with piping during small floods.

Key Words : Riprap, Barrage, Headwork, Scouring, Downstream riverbed excavation, Flood

1. はじめに

農業取水堰（以下、堰）の多くは、圃場への送水の便から河川中上流域（扇状地扇端付近）に設置される。一方、堰下流の河川中下流域は、人口密度も高く経済活動も活発で、骨材採取や計画高水疎通のための河床浚渫が成されることが多い。この河床浚渫に伴う河床低下は上流の堰に漸次波及すると見られ、実際、堰では築造当初フラットだった護床工が傾斜化したり、堰下流エプロンと護床工間に段差が発生している事例（図-1）が多く見られる。これらが堰放流に伴う堰直下の局所洗掘に伴うものであれば、堰下流水位は低下しないので、魚道下流口の水位低下、魚道機能の低下等の問題は起きない。しかし、実際には魚道機能の低下を伴う事例も多々見られるので、堰下流域の河床低下が堰側に波及して、護床変形を起こしている可能性が高いと考えられる。このような場合、堰上下流の水位差は大きくなるので、パイピング等構造問題も発生しやすくなる。

堰下流の河床低下は、農業含む経済活動や治水など人命に関わることなのでやむを得ないことである。したがって、河床低下を所与の条件として、かつ近年の財政



図-1 堰直下の段差発生事例

状況も鑑みて、極力低コストで堰の長期供用を図るべく、堰の保全工法を体系化していく必要がある。そこで、本報文では、まず現地調査、既往データの分析から、堰下流の河床低下の状況把握を行い、次にその分析結果に基づく水理実験により、下流河床低下の堰への波及メカニズムを解明した。

2. 現地における河床低下の状況

堰下流の河床低下の状況を調べるため、現地調査・文献調査（東海地区）、既存公表データ（国土交通省河川局、河川整備基本方針¹⁾）により分析を行った。前者は

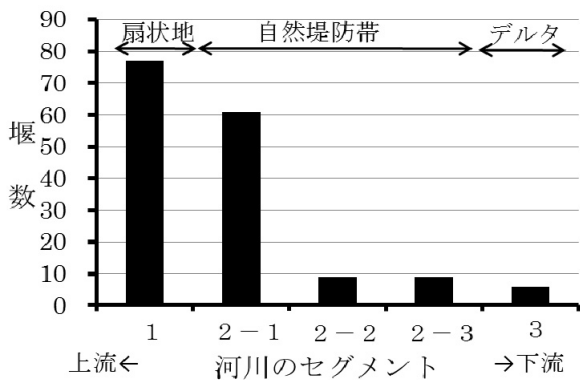


図-2 調査堰の河川内分布

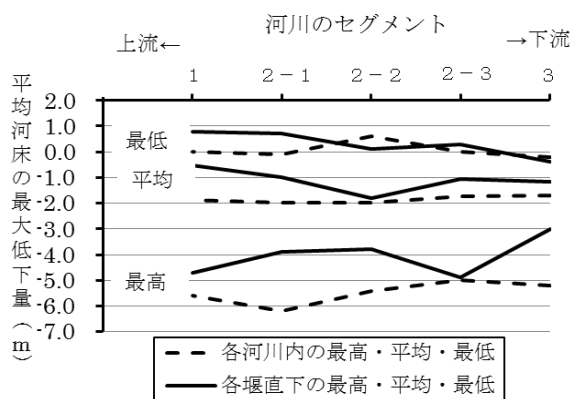


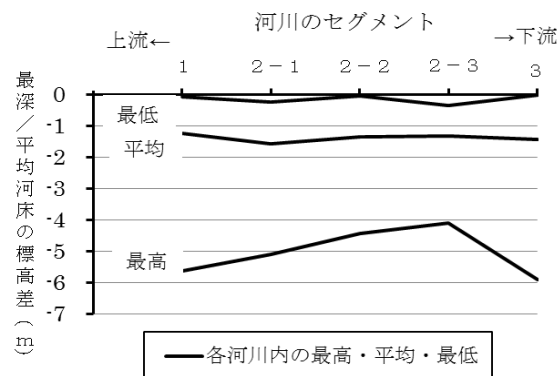
図-3 累積河床低下量とセグメント

東海地区の11河川21堰であり、後者は全国67河川161堰、平均調査年数33年（平均1970～2003年）である。後者では大都市近郊圏の河川の累積河床低下状況はあまり分からないので、前者の調査により補足した。

調査堰の河川内分布は図-2に示すとおりである。その多くは扇状地（セグメント1）～自然堤防帯上流部（セグメント2-1）の河川中上流域にある。

これらのデータより河川内各セグメントと堰直下800m区間の低水路平均河床標高（横断平均）の累積低下量最大値をとり、その全河川の平均・最大・最小値を示すと図-3のようになる。セグメントと河床低下量に明確な傾向は見られず、概ね調査範囲の全てのセグメントで河床低下が見られる。また、堰直下のほうが低下度合いは小さく、下流河床の低下が上流堰側に波及しつつあることが伺える。図-3より堰直下の低水路平均河床低下量は最大約6mだが、低水路平均河床と最深河床（ミオ）の最大標高差も東海地区データ（国土交通省中部地方整備局，S.28～H.17）より約6mなので（図-4），堰直下最大落差は部分的に12mになりうる事が分かる。

一方、護床変形の状況は図-5（東海地区）のとおりである。護床区間の平均勾配（エプロン下流端起点）は築造当初のフラットから最大1/8へと変化している。これは、ブライ式等によるパイピング生起勾配（最小約



※国土交通省、中部地方整備局の東海地区7河川データより作成

図-4 最深河床と平均河床の標高差

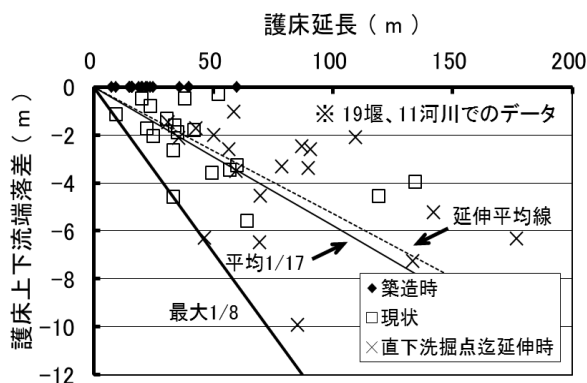


図-5 護床区間平均勾配の変化

1/12) より大きい。

3. 実験方法

以上より現地における河床低下の概略が把握出来たので、これに基づき、移動床水理実験（フルード相似，縮尺1/50）により，堰への下流河床低下の波及メカニズムを調べた。

実験は，堰のうち，河床勾配 1/140～1/1000 に設置されたものの標準的諸元（現地堰高 3m²，河床勾配 1/450²，現地底質平均粒径 4.3cm³，現地底質最大粒径（90%径）10cm³，護床工設計流量は計画高水流量⁴）に対し，洪水規模，洪水通水時間を変えて行った。勾配 1/140 以上を除外したのは，岩着基礎となる堰や，溪流取水工など非セキ上げ取水の堰が多く，下流河床低下波及の問題が少ないからである。また，勾配 1/1000 未満の堰も数が少ない上，下流背水が比較的大きく河床低下被害を受けにくいと見られるので除外した。

実験は図-6 のアクリル製擬似二次元水路に，堰の土砂吐部（ミオ側）を想定した堰下流エプロンと護床ブロック模型を設けて行った。実験流量は，上記の堰における標準的な河道支配流量³（数年確率流量，低水路満

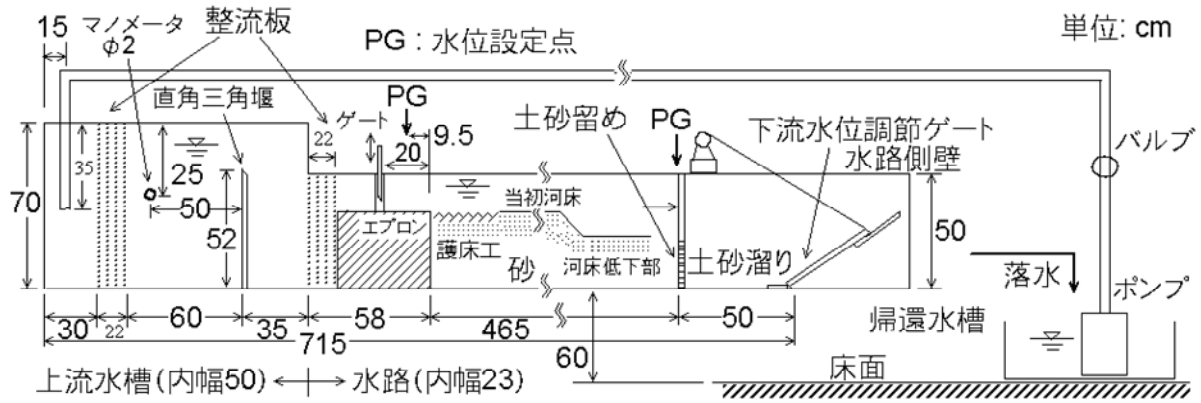


図-6 実験水路模型

表-1 実験諸元 (上: 現地換算値, 下: 実験値, 縮尺 1/50)

単位幅流量 q (現地 $m^3/s/m$, 実験 $l/s/cm$)	流入水深 $h1$ (現地 m , 実験 cm)	流入フルード数 $Fr1$	底質砂礫平均粒径 d (60%径, 現地 cm , 実験 mm)	河床勾配 θ ($1/n$)	河床低下落差 Z (現地 m , 実験 cm)	落差区間勾配 ϕ (度)	下流水深 $h2$ (現地 m , 実験 cm)
6.0 (河道支配流量)、11.6、16.1、18.3 (計画高水近傍流量)	0.63、1.12、1.49、1.66	3.9、3.1、2.8、2.7	4.3	450	5	31.5	2.20、3.52、4.38、5.98
0.17、0.33、0.46、0.52	1.25、2.24、2.97、3.32	同上	0.87	同上	10	同上	4.40、7.05、8.75、11.95
護床上流部区間長 $L1$ (現地 m , 実験 cm)	護床下流部区間長 $L2$ (現地 m , 実験 cm)	護床上流部の Manning 粗度係数 $n1$	護床下流部の Manning 粗度係数 $n2$	当初河床残存区間長 F (現地 m , 実験 cm)	通水時間 t (現地 hr , 実験 min)	単位幅流砂量 qs (現地 $m^3/s/m$, 実験 $l/s/cm$)	
25.2	31.5	0.037 (計画高水時)	0.033 (最大粒径移動限界時)	113.4	40、10、3.3、1	0	
50.4	63	0.019	0.017	226.8	339、85、28、8.5	0	

※ 底質は標準偏差(84%径÷16%径のルート)1.3で均等粒径に近い。

※ 模型の水路幅÷水深は、計画高水近傍流量時には、下流で2以下となり、水路幅の影響が強い状態である。

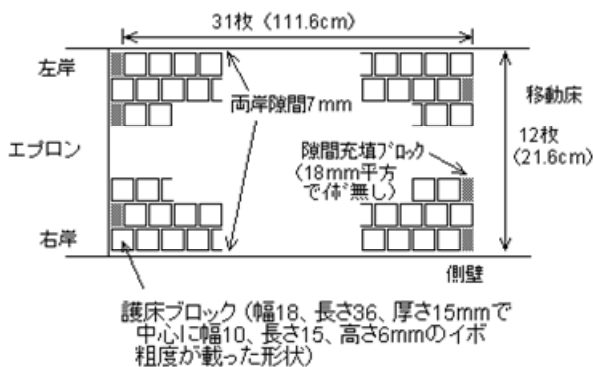


図-7 護床工模型

杯流量) ~ 計画高水流量²⁾ (平均的に 100 年確率流量相当³⁾) とし、給砂無しとした。通水時間は、堰供用期間 50 年に対し、その間の各洪水の確率的平均被災回数から設定した。例えば、20 年確率洪水ならば 2.5 回被災

で、1 被災の洪水ピーク継続時間を 2 時間^{5) 6)}として、5 時間となる。

一方、エプロン標高と等高となる当初河床残存区間長(護床区間含む)は、護床区間長の 2 倍とし、下流の河床低下落差は、前節調査結果から推定される落差の標準値(現地規模で 5m)とした。落差区間勾配は、常時の河川流れの浸食で、安息角よりもかなり緩勾配化するが、どの程度になるかは不明なので、洗掘上、危険側の攪乱時水中安息角⁷⁾とした。また、下流水深は、河床勾配より現地データ^{2) 3)}(河道支配流量、計画高水流量相当のケース)もしくは現地式⁸⁾(その他の流量ケース)から設定し、流入水深、下流水深の基準点は図-6 の PG 点水路中央とした。

以上より、具体的な実験諸元、護床形状・配置(模型値)は表-1、図-6、図-7のようになる。なお、実験水温は 17~25.3 度であり、実験中、リップルの発生は見られ

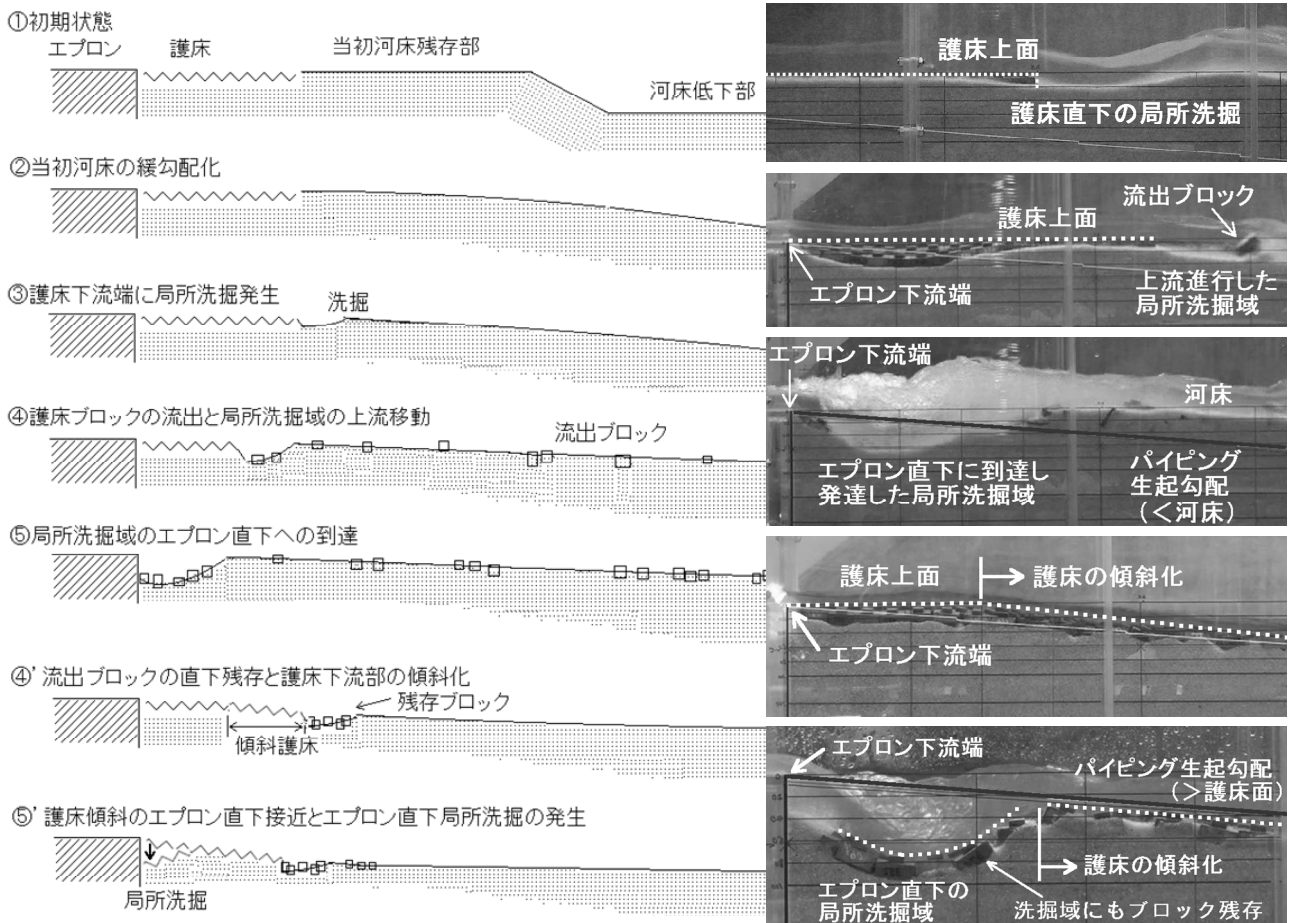


図-8 護床変形パターン模式図 (①～⑤: 局所洗掘進行型、①～③④' ⑤'、傾斜進行型) と各型の被害状況 (⑤: 局所洗掘進行型、⑤': 傾斜進行型)

なかった。以下の記述では、特に断らない限り、実験結果を現地寸法換算値で表記してある。

なお、実験での流量計測は直下三角堰、水位計測・地形計測はポイントゲージと実験水路側面からのビデオの画像解析により行った。水路横断方向に特徴的な地形差異は生じなかったため、概ねビデオ画像解析に依った。

4. 実験結果と考察

(1) 河床低下の波及状況

いずれの流量でも、下流河床低下の堰側への波及により、護床工直下水位の低下、護床工の減勢機能の低下が起き、護床直下に局所洗掘が生じて、護床下流端からブロックが剥落する状況が見られた。

下流河床低下の堰への波及パターンは、二つに分けられる。一つは、図-8、①→⑤のように護床工直下に発生した局所洗掘域が上流堰側に動く場合である（以下「局所洗掘進行型」）。もう一つは、図-8、①→③を経て④'、⑤'となるように、護床工直下の局所洗掘域が動かず、局所洗掘域を起点に護床工の傾斜化が上流堰側に進

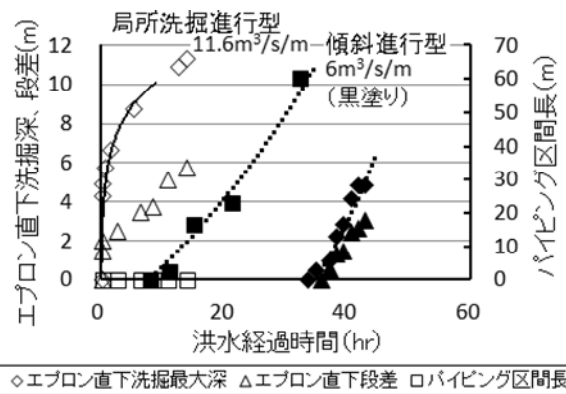


図-9 洗掘、段差、パイピング区間長の変化

行する場合である（以下「傾斜進行型」）。両者は、護床工直下に発生した局所洗掘域への剥落護床ブロックが更に遠方に流されるか、局所洗掘域内に残存、滞留するかで分かれる。すなわち、特定の堰に関しては洪水規模（洪水の単位幅当たり流量）が両者を分かつ要因になる。

局所洗掘進行型では、護床工直下の局所洗掘域は、護床を破壊しブロックを下流遠方に流出させながら急速に上流に進行し、エプロン直下に達して大規模化する（図

-8, ④, ⑤). エプロン直下の洗掘域では跳水が発生し、それが上下流に不安定に動くので、それに伴い、洗掘深さやエプロン直下の段差は上下するが、上下しつつ洗掘深さ・段差とも急速に拡大していく(図-9)。エプロン直下の局所洗掘域の発達が急激で、洗掘域から大量の砂が下流側に巻き上がるため、洗掘域が発達している間はエプロン直下洗掘域下流の河床低下はひどくならずパイピング生起勾配以上である。エプロン直下洗掘域の発達が止まって暫くすれば下流河床も大きく低下し、パイピング生起勾配以下になると考えられるが、50年相当の洪水被災回数(例えば、25年確率洪水で被災回数2回とし計4時間通水)ではそこまでの状況は再現出来なかった(図-9)。

一方、傾斜進行型では、護床直下に発生した局所洗掘域の上流進行は、洗掘域に滞留するブロックにより抑制される。このため、局所洗掘域からの土砂巻き上げは乏しく、護床工下流の河床は漸次低下していく。それに伴い護床面も護床下流端付近から緩慢に低下し、護床工の傾斜化が下流から上流にゆっくり進行する(図-8, ④')。傾斜進行型でも、傾斜域がエプロン直下に達すると落下流が起き、エプロン直下の局所洗掘が進行する(図-8, ⑤')。しかし、その局所洗掘域にも護床工は概ね残存するうえ、流量も小さいので、洗掘規模(深さ・長さ)は局所洗掘進行型ほど大きくならず、洗掘速さも局所洗掘進行型ほど急速ではない(図-9)。ただし、エプロン直下洗掘が発生した時点では、パイピング生起勾配の河床標高を下回る区間長(以下「パイピング区間長」)も長大化する(図-9)。

(2) 堰への影響

本実験の二次元的な河床変動に影響するのは、単位幅当たり流量、堰高、河床勾配(河床粒径)、下流河床低下落差の4因子である。ここでの実験結果は農業取水堰で標準的と見られる堰高、河床粒径、下流河床低下落差でのものだが、前述の局所洗掘進行型、傾斜進行型という「下流河床低下の波及形態」は、護床ブロックの流出有無という単純な事象で分かれるため、これら3因子が標準から外れても同様に分類出来る。すなわち、上記3因子が変わっても、単位幅当たり流量によって両形態に分かれることは変わらない。標準諸元からずれば、両形態が生じる単位幅当たり流量や河床低下の波及速度、エプロン直下洗掘深さ・護床傾斜など被害規模も変わるが、両形態が生じることは変わらないと考えられる。

これら局所洗掘進行型、傾斜進行型各々での、下流河床低下の上流堰への影響は、今回実験結果より次のように推察される。

a) 局所洗掘進行型

局所洗掘進行型は、発生確率が低い大洪水時にしか起きないものの、エプロン直下洗掘域は一回の洪水で大規模になりうる(図-8, ⑤)。本実験では約 $11\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以上

の洪水規模で、一回の洪水時間相当でエプロン直下洗掘域の最大深さが 6m 以上、直下段差 2m 以上になった。これにより堰の構造安定に問題を来す可能性がある。発生確率は低いものの、一回の大洪水被災で堰本体の改修が必要になる可能性がある。反面、エプロン直下洗掘域が発達している間は、そこからの土砂巻き上げにより、下流河床がパイピング生起勾配の標高より高く保たれる(図-8, ⑤)。パイピングの危険は低く、改修範囲は堰近傍に留まりやすい。

b) 傾斜進行型

傾斜進行型は、発生確率が高い中小洪水時に緩慢に進行する。緩慢に進行するものの、エプロン直下洗掘に先行して護床面の急傾斜化が進むので、エプロン直下洗掘で堰被害に気がついた時には、下流の広範で護床面がパイピング生起勾配以下になっている可能性がある(図-8, ⑤')。すなわち、緩慢進行だが、エプロン直下洗掘、パイピング双方への改修が必要になって改修範囲が広がるリスクがある。

実験では、(標準的な)河道支配流量で傾斜進行型が見られたので、(下流河床低下が見られる取水堰の多くで)中長期的に傾斜進行型の被害が発生していく可能性が高い。

5. おわりに

本報文では次のことが明らかとなった。

- 既存の公表データ(全国67河川161堰)¹⁾、現地調査データ(東海地区11河川21堰)より堰下流の河床低下落差は最大 12m 、堰下流護床勾配は最大 $1/8$ と見込まれることが分かった。
- 上記の調査結果に基づき標準的な落差(5m)、標準的な堰諸元(堰高 3m 、河床勾配 $1/450$ 、計画高水単位幅流量 $20\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)について移動床水理実験を行い、下流河床低下の上流堰への波及状況が「傾斜進行型」、「局所洗掘進行型」に区分出来ることを明らかにした。
- 「傾斜進行型」、「局所洗掘進行型」は、下流河床低下の上流波及に伴い、堰下流護床工直下に発生する局所洗掘域に剥落する護床ブロックが、そこに滞留するか、更に遠方に流下するかで分かれる。
- 「傾斜進行型」では、護床直下の局所洗掘域は移動せず、河床低下の上流波及に伴い、護床下流から護床の傾斜化が上流に緩慢に進行する。傾斜化が堰エプロン直下に達すると、エプロン直下に局所洗掘域が発生する。
- 「傾斜進行型」では、護床の傾斜化に伴うパイピング発生と、エプロン直下洗掘による堰本体の構造不安定化のリスクがある。河道支配流量など小洪水で緩慢に進行し、長期間経過後に被災が生じるものの、

改修範囲は広範になる可能性がある。

- (f) 「局所洗掘進行型」では、護床直下の局所洗掘域が、護床を破壊しつつ上流に急速に移動する。洗掘域は堰エプロン直下に達すると大規模化する。反面、洗掘域から大量の土砂が巻き上がるので、洗掘域下流の河床は「傾斜進行型」よりも緩勾配になる。
- (g) 「局所洗掘進行型」では、エプロン直下洗掘規模は「傾斜進行型」より大規模化するものの、その時のパイピング発生リスクは小さい。大洪水で急速に進行し、エプロン直下洗掘も大規模化するので、堰本体の被災リスクは高いが、改修範囲は「傾斜進行型」ほど広範になりにくい。

今後は、以上の結果に基づき、下流河床低下の波及に対し、堰の長期供用化を図るための保全工法を検討していきたい。

謝辞：本論文の現地調査に際しては国土交通省中部地方整備局並びに農林水産省東海農政局・管内諸県・土地改良区の関係諸氏よりデータ提供、現地観測へのご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局: 河川整備基本方針, 2009.
- 2) 農業土木学会編: 農業土木工事図譜 第4集 頭首工編, 全国頭首工施設調査及び個別編, pp.13-138, (社)農業土木学会, 1990.
- 3) 山本晃一: 河道特性論, 土木研究所資料, 2662, pp.20-49, 1998.
- 4) 農業土木学会編: 頭首工の設計, 護床工, pp.81-86, (社)農業土木学会, 1982.
- 5) 日野幹雄等: 洪水の数値予報, 荒川試験地への適用, pp.111-116, 森北出版, 1989.
- 6) 日野幹雄等: 水文流出解析, 流出機構と流出時系列の成分分離, pp.91-93, 森北出版, 1985.
- 7) 河村三郎: 土砂水理学, 安息角と静止摩擦角, pp.10-11, 森北出版, 1982.
- 8) 川合亨: 河川の流砂機構に関する考察, 農業土木試験場技報B 水理 第35号, 1975.

(2014. 4. 3受付)