

# 河床被覆材敷設護床による 堰直下の河床低下・洗掘抑制効果

PREVENTION EFFECTS OF SCOURING IN THE DOWNSTREAM OF A WEIR  
BY A RIPRAP WITH A NET OR SHEETS UNDER CONNECTED BLOCKS

常住直人<sup>1</sup>  
Naoto TSUNESUMI

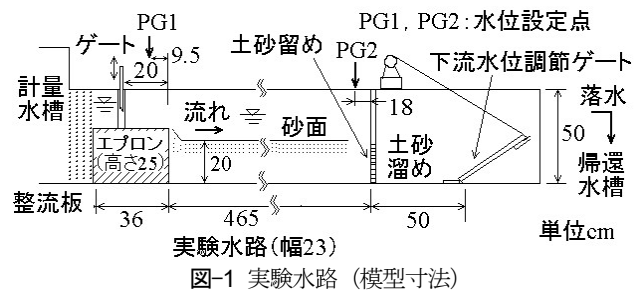
<sup>1</sup>正会員 農博 農研機構 農村工学研究部門 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目1-6)

河川中上流域の堰, 床止め等では, 経年的な下流河床低下により護床の傾斜化や護床ブロックの流失が起りやすい, 最終的に堰, 床止め直下で洗掘域が拡大しエプロン陥没や決壊に至ることもある. これを防ぐ為, 連結護床ブロック底面に河床被覆材 (不織布マット, ネット, グラベルマット) を敷設した場合の洗掘抑制効果を水理実験により検討した. その結果, 護床直下洗掘深に対し被覆材敷設護床が十分長ければ, いずれの被覆材でも護床縦断形状は安定しエプロン直下洗掘を生じないこと, 洗掘は護床直下に集中し洗掘地形は洪水量の増減で周期的に変化するものの安定すること, 護床直下洗掘深は傾斜護床化 (勾配1/12以下) により抑制されることが明らかとなった. 又, 同様の構造を護床直下静水池に敷設した場合の護床直下洗掘抑止効果, エプロン直下落差工に敷設した場合のエプロン直下洗掘抑止効果も認められた.

**Key Words:** scouring, riverbed declination, weir, riprap, hydraulic model experiment

## 1. はじめに

河川中上流域に設置される堰, 床止め, 橋脚では経年的な下流河床低下により築造当初概ね水平だった護床の傾斜化や沈下が見られることがある<sup>1) 2)</sup>. 堰や床止め, 橋脚への河床低下波及は, 中小洪水では緩慢で, 最初は護床直下の洗掘と護床の傾斜化として進行するが, 大洪水時にエプロン直下に洗掘域が移動すると, エプロン直下を下流の低下河床以上に深掘れさせる<sup>3)</sup>. また, エプロン直下で落下流となる程に護床が急傾斜化すると, 中小洪水でもエプロン直下洗掘が発達する<sup>3)</sup>. 落下流での洗掘深は, 中上流域の堰に比較的多く見られる条件であれば (下流河床低下3.5m以上 (ミオ部), 平均粒径6.1cm以下, 河床勾配1/750以上) <sup>4)</sup>, 洪水量が10 m<sup>3</sup>/s/m程度でも数時間で10mに達することもあり<sup>5)</sup>, 洗掘域へのエプロン底面土砂の漏出からエプロン陥没・損壊, 堰の決壊を来す場合もある<sup>6)</sup>. これは下流堤防の安全上問題である. また, 被災後は, 遮水矢板打設, エプロン延長, 床止め増設等, 復旧工事を要すが, 事後, 更なる河床低下波及で被災, 復旧を繰り返すこともままある. このように河床低下が生じると, 堤防が繰り返し危険に曝される上, 復旧費用や中小洪水での護床補修頻度も増



して堰, 床止め, 橋脚の長期供用費を増大させる. 本報文中ではこのような被災, 具体的にはエプロン直下洗掘を防ぐべく, マット, ネット等の吸い出し防止被覆材 (以下「被覆材」) を敷設した護床工法の洗掘抑制効果を水理模型実験 (フルード相似) により検討した. 以下, 特に断らない限り現地換算値で表記する.

## 2. 実験方法

### (1) 相似則と実験水路

縮尺1/70.5, フルード相似の給砂無し移動床水理実験 (図-1) により各護床工法の洗掘抑制効果を検討した.

表-1 検討した護床ブロックと被覆材

|                            |  |
|----------------------------|--|
| ブロック規模 (3) <sup>*1</sup>   | ①小型3.6t <sup>*2</sup> (方形W1.5×L1.5×H0.7m, 2350kg/m <sup>3</sup> ), ②大型8.7t <sup>*3</sup> (イボ粗度W1.3×L2.5×H1.1m, (イボ粗度部)W0.71×L1.1×H0.42m, 2350kg/m <sup>3</sup> ), ③特大82.4t <sup>*4</sup> (方形W3.0×L6.8×H2.1m, 1900kg/m <sup>3</sup> ) |
| ブロック連結有無 (2) <sup>*5</sup> | 連結無し, 有り   |
| 連結遊び (5)                   | 0, 14, 28 <sup>*6</sup> , 71cm (以上, 小型ブロック), 42cm <sup>*6</sup> (大型ブロック)   |
| 被覆材種別 (3) <sup>*5</sup>    | ①ロールマット (幅2mポリエステルSB長繊維不織布, 厚さ3cm, 透水係数0.71cm/s), ②ネット (ポリエチレン製, ネット目幅1.8cm), ③グラベルマット (左記ネットを厚さ25cmの袋状とし袋内に径4~6cmの砂利を充填 <sup>*7</sup> )   |
| 被覆材設置位置 (2)                | ブロック底面 (全ての被覆材で), 上面 (ネットのみ)   |

\*1 ブロックは全て格子状配置. \*2 右岸端ブロックだけW1.0. 流下方向は隙間無くブロックを敷設. 横断方向のブロック隙間は平均3.5cm. \*3 流下方向は隙間無くブロックを敷設. 横断方向のブロック隙間は平均7.6cm. イボ粗度は床版中央に設置. \*4 流下方向は隙間無くブロックを敷設. 横断方向のブロック隙間は平均17.6cm. \*5 護床ブロックは上下流側, 左右側で連結. 護床, 被覆材の上流端はエプロン下流端に連結. \*6 水中安息角<sup>7)</sup>の地形傾斜に対する護床の屈撓性より設定. \*7 下流部での屈撓性を高めるため, 下流端0~2/2~4m区間では厚さ0.5/1m, 内部粒径5~15cmと重量化.

## (2) 検討形状

検討形状を表-1に示す. エプロン直下洗掘が起きやすいように護床延長は設計洪水流量 (20m<sup>3</sup>/s/m) 等に比し極力短くし護床ブロックも粗度無しの方角を基本とした.

### a) 既存工法実験 (被覆材無し)

被覆材敷設護床との比較の為, 被覆材無しで護床ブロックを大型化もしくは連結化させる既存の護床改修工法<sup>8)</sup>や護床無しでの洗掘抑制効果も検討した (表-1). 表中, 特大ブロック (模型はレンガ製, 他のブロック模型は砂鉄混入セメント製) は現地砂礫充填枠工<sup>9)</sup>を想定している. 何れも初期形状は水平護床 (図-2) とした.

### b) 被覆材実験

各種被覆材 (表-1) を護床ブロックに敷設して洗掘抑制効果を検討した. ブロック規模は, ブロック間隙率が大きく洗掘危険度が高くなるように小型ブロックで統一し, 被覆材保護の為, ブロックが散逸しないように連結し, 連結遊びは河床砂の水中安息角 (現地値) に対する小型ブロック屈撓性からの最小値相当 (28cm) とした.

ロールマット模型は可動堰直下の露出射流洗掘抑止に使用される既製の不織布ロールマットを用い, 規格幅2mロールを流下方向に伸ばし, 上下二層に半幅分ずらし重ねて, (施工性を考慮して) マット同士を接着させ

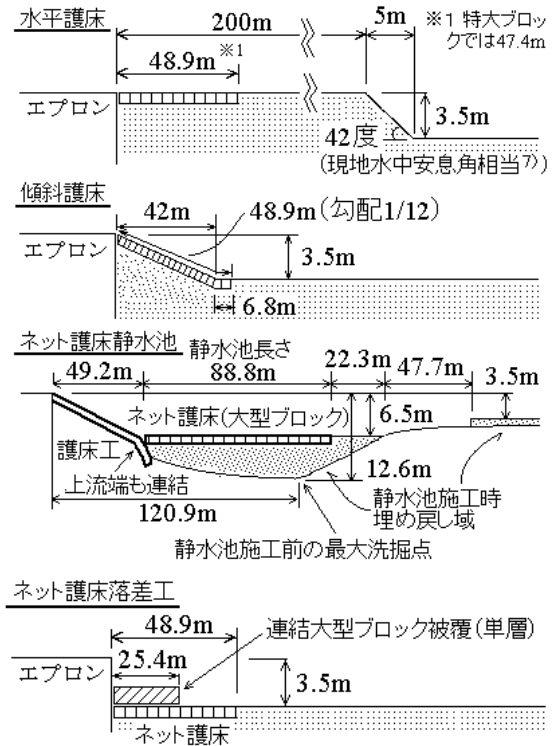


図-2 実験初期の護床縦断形状

ずに護床底面に敷設した. 現地・模型で同材質としたのは, いずれでも不織布からの浸透水程度では底面土砂は動かず, 流況相似の為に比重調整を優先したからである. 一方, ネット模型 (ポリエチレン製防虫ネット) は河床粒径の通過を十分防げる目幅で, グラベルマットはこのネットを袋状にし, 内部に河床平均粒径以下の砂利を詰めたものである.

初期形状は水平もしくは傾斜護床で (図-2), 傾斜護床勾配は現地観測された護床勾配の最大相当である<sup>2)・3)</sup>.  
c) 静水池実験, 落差工実験

護床直下洗掘を抑える静水池の底面にネット敷設護床を用いた実験も行った (図-2, ネット護床静水池. ブロックは連結). 静水池は, 傾斜ネット護床の実験終了時の護床直下洗掘域を実験砂で一部埋め戻して整形した. 又, エプロン直下の落差工にネット敷設護床を用いた実験も行った (図-2, ネット護床落差工. 連結遊び28cmの連結小型ブロック上を連結大型ブロックで被覆保護).

## (3) 実験諸元

各検討形状での洗掘に関わる諸元は, 単位幅当たり流量 (q), 各qでの通水時間・流入Fr (堰放流Fr)・下流Fr, 及び下流落差, 粒径である.

各検討形状のq, 通水時間を表-2上段に示す. 各検討形状での総通水時間は洗掘地形が概ね安定するまでとした. 各検討形状のqはピークから減らしていき最後に通水を止めて停水させた. 最初にピークとしたのは, ピークでの洗掘最深点が, ナップが垂れる減水時にエプロン

表-2 実験諸元

| 単位幅当たり流量 $q$<br>( $m^3/s/m$ ) | 通水時間(hr)          |   |  |                    |
|-------------------------------|-------------------|---|--|--------------------|
|                               | 既存工法実験            | 被覆材実験                                   | 静水池実験                                      | 落差工実験              |
| 28.7                          | —                 | 12×2回                                   | 24   | 6                  |
| 19.3                          | 72                | 12×3回                                   | —  | 6                  |
| 9.9                           | 2                 | 12×3回                                   | 12   | 2                  |
| 6.7                           | —                 | 12×3回                                   | 12   | —                  |
| 3.3                           | —                 | 12×3回                                   | —  | —                  |
| 単位幅当たり流量 $q$<br>( $m^3/s/m$ ) | 流入 $F_r$ *1       |   |  |                    |
|                               | ①堰高3m相当           | ②セキ上げ10m相当                              | ③実験流入ゲート全開                                 | (参考)シル高0.5m可動堰自由越流 |
| 28.7                          | 2.42              | —                                       | 1.77                                       | 1.48               |
| 19.3                          | 2.69              | —                                       | 1.78                                       | 1.56               |
| 9.9                           | 3.27              | 4.76                                    | 1.62                                       | 1.73               |
| 6.7                           | —                 | 6.48                                    | 1.59                                       | 1.85               |
| 3.3                           | —                 | 8.52                                    | 0.59(水平護床)~1.23(傾斜護床)                      | 2.14               |
| 単位幅当たり流量 $q$<br>( $m^3/s/m$ ) | 河床勾配及び下流 $F_r$ *2 |   |  |                    |
|                               | 既存工法実験            | 被覆材実験                                   | 静水池実験                                      | 落差工実験              |
|                               | 勾配1/450相当         | 勾配1/150相当 (0.90)                        |  |                    |
| 28.7                          | —                 | 0.88 (0.82~0.90)                        | 0.84 (0.78~0.89)<br>1/181<br>(1/210~1/153) | 0.88<br>1/160      |
| 19.3                          | 0.56              | 1/160 (1/188~1/150)                     | —  | —                  |
| 9.9                           | 1/450             |   |  |                    |
| 6.7                           | —                 | 0.75 (0.71~0.78)<br>1/230 (1/261~1/210) | 0.80<br>1/198                              | —                  |
| 3.3                           | —                 | —                                       | —  | —                  |

\*1 流入  $F_r$  は Fig.1 中 PG1 での値。

\*2 下流  $F_r$  は Fig.1 中 PG2 での値。この値は、約  $30m^3/s/m$  での長時間通水後には、河床勾配からの推計値<sup>10)</sup>よりも低くなっていった(特に低流量時)。これは、長時間通水で実験水路全体の河床が低下すると、水路下流端の土砂留め矢板上流面が常時大きく露出してしまい、完全越流化して、下流水位調節ゲートを下げても PG2 での水位を下げられなくなる為である。

近くに移動し、エプロン破壊(底面土砂漏出)となるからである<sup>8)</sup>。但し、落水地点の洗掘抑止のみが目的の落差工実験では  $q$  を漸次増大させ、被覆材実験では複数洪水での洗掘地形の安定性も検証する必要が生じた為、停水後に再増水、再減水を行った。

各  $q$  では表-2 中段のように流入  $F_r$  を変化させた。各  $q$  での流入  $F_r$  は洪水時・常時に想定される範囲を概ね網羅させ、ナップが垂れていく方向で変化させた。例えば、被覆材実験では各  $q$  で①→③の順に変化させ、各流入  $F_r$  数の通水時間は均等割りとした(9.9  $m^3/s/m$  では①、②で各 3hr, ③で 6hr)。但し、既存工法実験、落差工実験では洪水時最大相当の①のみとし、静水池実験では最大  $q$  で洪水時最大相当の①のみ、他の  $q$  では常時の最大、最小

経時最大洗掘深(m)

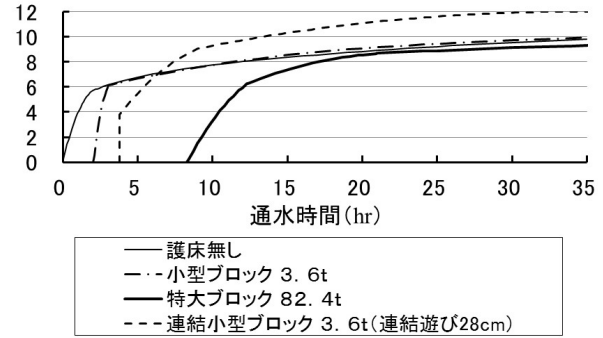


図-3 既存工法でのエプロン直下洗掘深の変化

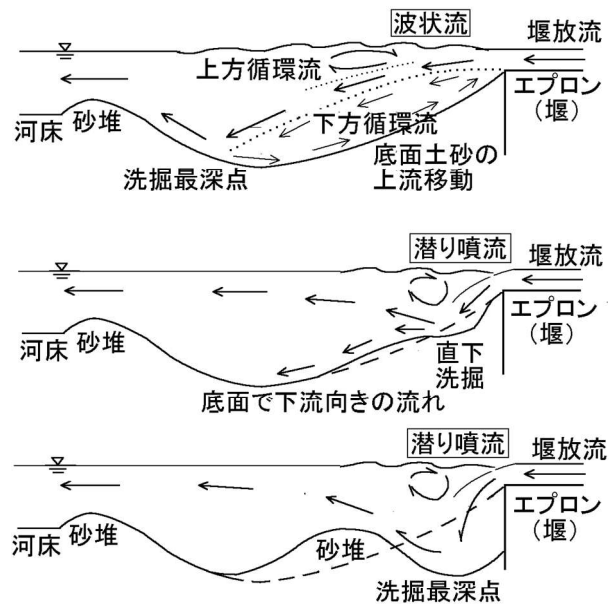


図-4 洗掘域の流況変化<sup>5)</sup>

を網羅すべく②、③の順に均等時間通水とした。

各形状、各  $q$  での下流  $F_r$  (表-2 下段) は取水堰での最大河床勾配 (1/150) を基本とし下式<sup>10)、11)</sup>より設定した。

$$F_r = 9.82 \cdot (i^{0.5})^{0.933} - 300 \cdot (i^{0.5})^{3.5} \quad (1)$$

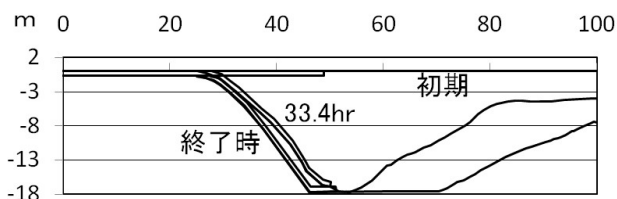
上式で、 $F_r$ : 河川のフルード数、 $i$ : 河床勾配

以上は、中上流域の取水堰の現地諸元でもエプロン直下洗掘が比較的起きやすい条件だが、下流落差 (3.5m)、河床粒径 (天然珪砂, 6.1cm) については標準的な値とした<sup>3)、4)、12)、13)</sup>。

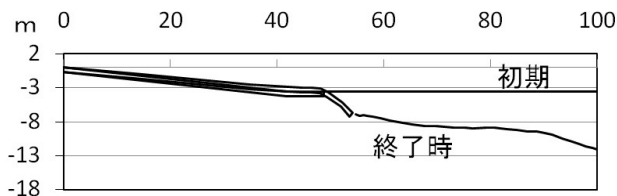
#### (4) 計測方法

計測には直角三角堰(流量)、1/10 mm 読みポイントゲージ(水位・水深)、1mm 読みスケール(最大洗掘深)、ビデオ・カメラ撮影による画像解析(左右岸砂面形)を用いた。実験ではまず流量、流入水深(流入  $F_r$ )を設定し、次いで下流水深(下流  $F_r$ )を低下させ、所定値に合った時点を以て実験開始時刻とした。

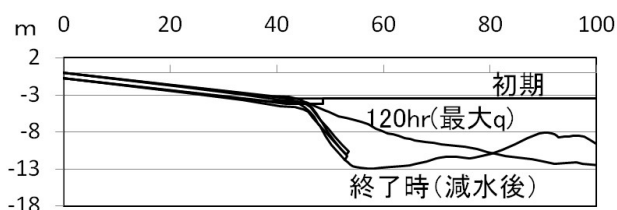
●水平ロールマット護床



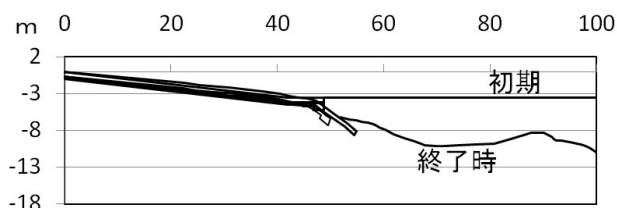
●傾斜ロールマット護床



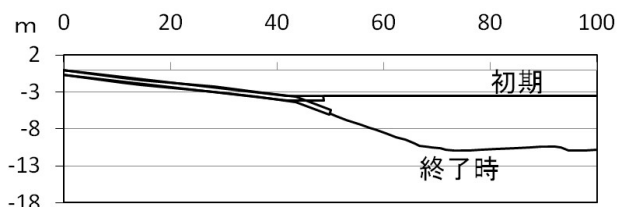
●傾斜ネット護床



●傾斜グラベルマット護床



●傾斜上面ネット護床



※上図は左岸の縦断面図

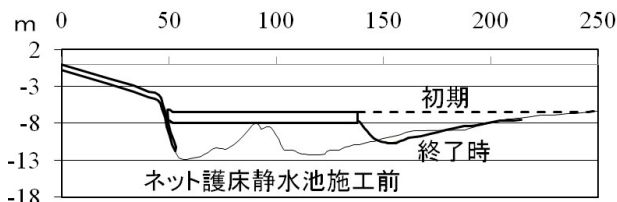
図-5 被覆材敷設護床の縦断面形状の変化

### 3. 実験結果

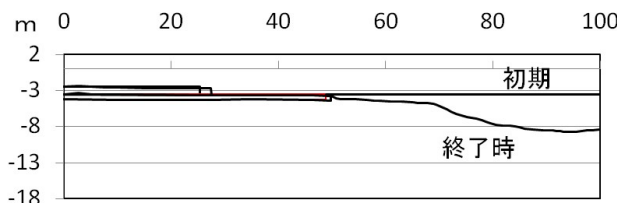
#### (1) 既存工法 (図-3)

ブロックの大型化ではエプロン直下洗掘の遅延効果はあるが抑制効果は無かった。連結化でも連結遊びを抑えると遅延するものの、洗掘深は連結無しや護床無しの場合よりも寧ろ増大した。これは洗掘域直下の砂堆(図-4下)が削れにくくなり、ナップが下流側に逸れ難くなって潜り噴流が持続する為である。

●ネット護床静水池



●ネット護床落差工



※上図は左岸の縦断面図

図-6 ネット護床静水池、落差工の縦断面形状の変化

#### (2) ロールマット護床 (図-5上側)

洗掘は護床直下でのみ生じ、護床下流部以外の護床縦断面形状は安定した。

水平護床の場合、護床直下洗掘域は、図-4のエプロン直下洗掘同様、潜り噴流・波状流の流況を交互に繰り返しつつ拡大した。潜り噴流時は護床直下が深くえぐれ、護床下流部の底面土砂が漏出し、護床下流部が沈下、急傾斜化した。

下流水位が下がり、ナップの下流水面への突入角も大きくなる小流量時(約 $10\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以下)にはほぼ潜り噴流だけになって、実験水路底が露出するまで護床直下洗掘が進行し、その洗掘深は、同一水理諸元での「護床無しでのエプロン直下洗掘<sup>5)</sup>」よりも急増した。流量に比し流入 $F_r$ による流況、洗掘地形の差異はさほど見られなかった。最終的に急傾斜部勾配は平均36度となり、実験粒径の水中安息角<sup>7)</sup>を越えた。

一方、傾斜護床では概ね波状流が保たれ、潜り噴流は比較的流量、流入 $F_r$ が大きい際に稀に短時間生じるだけで(数十秒~8分)、護床直下の洗掘地形に殆ど影響しなかった。洗掘最深点は流量の増減に応じ下流、上流と移動し、護床下流端近傍になる小流量時(6.6~ $10\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )に護床下流部の底面土砂が漏出して急傾斜部が形成された。洗掘最深点が下流に離れる $19\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以上では急傾斜部は上流向き掃流砂で埋め戻され、小流量の $3.3\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ では護床直下でも土砂移動は殆ど無かった。洗掘深の増大と共に洗掘深、急傾斜部形状(平均勾配35度)は安定し、以後は流量増減により洗掘最深点が動くだけだった。最大洗掘深は「護床無しでのエプロン直下洗掘深<sup>5)</sup>」に比し25%浅い14.8mであった。

#### (3) 傾斜ネット/グラベルマット護床 (図-5下側)

何れも傾斜ロールマット護床と概ね同様だが、ロー

ルマットより通水性が高い為、急傾斜部の勾配は傾斜ロールマット護床よりも緩やかだった（非攪乱時水中安息角以下の21～33度）。ネットはグラベルマット、上面ネット（護床傾斜部は連結遊び0cm）よりも底面土砂が動きやすい構造の為、底面土砂の漏出範囲が広く急傾斜部が長くなった。

#### (4) ネット護床静水池／落差工（図-6）

ネット護床静水池では跳水が安定し、静水池底面での洗掘は起きず、当初設置形状が保たれた。但し、従前洗掘域をカバーしていない被覆区間下流では、大流量時（約30m<sup>3</sup>/s/m）の従前洗掘地形に復すような洗掘が生じた。ネット護床落差工では、保護ブロック（大型ブロック）無しでは護床屈撓によりナップ落下地点に凹みが生じた。落下地点付近をカバーして保護ブロックを設けた場合は当初設置形状のまま安定した。

## 4. 考察

### (1) 被覆材敷設護床によるエプロン直下洗掘防止要件

水平・傾斜護床いずれでも被覆材（マット、ネット等）の通水性差異に依らず、護床底面土砂の漏出が上流に波及してエプロン直下洗掘に至ることは無かった（図-5）。これは、被覆材敷設護床下流部が護床直下洗掘の増大に応じて急傾斜化し、土砂漏出を抑えたからである。従って洪水継続時間、水理諸元等（単位幅当たり流量、流入 $F_r$ 、落差、粒径、河床勾配）から決まる護床直下洗掘深に対し、被覆材敷設護床延長を十分長くすること、被覆材敷設護床下流部（急傾斜化部位）に護床直下洗掘に追従する屈撓性を持たせることがエプロン直下洗掘を防ぐには重要となる。

### (2) 被覆材敷設護床への改修目安

水平護床では潜り噴流が卓越し、護床無しでの洗掘深よりも寧ろ深くなった（図-5最上図）。これは下流の護岸や堤防の安全上問題がある上、護床の長大化、急傾斜化等、構造上の問題も生じる。又、水平護床の状態では下流河床低下がさほど波及しておらずブロック流失等、護床被害も無いので被覆材敷設護床に改修する必要性も低い。護床が傾斜化した段階で、中小洪水でもエプロン直下洗掘が起きる護床勾配以下の内に、被覆材敷設傾斜護床に改修するのが望ましい。

### (3) 水平・傾斜護床の比較と護床直下洗掘抑制要件

上記の水平、傾斜護床間の流況、護床直下洗掘の差異は、下流水面へのナップ突入角の違いに起因すると見られる。水平護床ではナップ射出点が下流水位より上になるので、重力成分で突入角が大きくなり、特に低流速の小流量でそうなりやすく、かつ小流量では洗

掘域直下の砂堆（図-4下）がフラッシュされにくく波状流に復帰し難い。故に小流量時（ナップ垂れ時）を中心に潜り噴流卓越での洗掘深増大が起きたと考えられる。一方、傾斜護床では、ナップが常時小さい突入角で下流水面へ射出されるので、重力成分は水中拡散で増大しにくく、流量に依らず水中流向は突入角に近くなる。故に潜り噴流は生じ難く、洗掘域直下の砂堆（図-4下）はフラッシュされ易く波状流に復帰し易い。結果、どの流量でも波状流卓越となったのだろう。流量、流入 $F_r$ が大きい場合に稀に短時間、潜り噴流が起きたのは、底面土砂の上流移動量（図-4上）が大きく、ナップ下方循環流域が消失しやすい為と考えられる。

以上より波状流流況を安定させ護床直下洗掘を抑えるには、下流水面へのナップ突入角を常時小さく保つ必要がある。即ち、護床勾配を波状流卓越となる勾配以下とし、その勾配で安定させるべく被覆材で吸い出し洗掘を抑え、この傾斜護床を下流河床標高（想定しうる最低下流水面）まで延伸すること、かつ傾斜護床下流端からの土砂漏出を抑えるべく下流端から十分な長さ、屈撓性の水平護床部（洗掘後に急傾斜部となる部位）を伸ばすことが必要になる。

### (4) 被覆材敷設傾斜護床の諸元

#### a) 傾斜護床部の勾配と延長

上記及び実験結果より、今回検討の水理諸元の範囲では、勾配1/12以下で下流河床まで被覆材敷設護床を延伸させれば、波状流の安定性は更に増し、護床直下洗掘は更に抑制されることになる。この勾配は、中上流域の堰の現地諸元でのパイピング抑止勾配、順傾斜跳水型静水池の流入勾配（1/4以下<sup>14</sup>）とも合致してる。

#### b) 水平護床部の長さ屈撓性

水平護床部は、上述のように、護床直下洗掘に対して傾斜護床勾配を安定さすべく十分長くする必要がある。この長さは、水平護床部の急傾斜化勾配が非攪乱時水中安息角からかけ離れず、（土砂漏出で急傾斜化する為かつ護床直下の洗掘深は減水時に生じる為、）この急傾斜部下流端は最大流量での洗掘深よりは浅く、かつ最大流量での洗掘深は「護床無しでのエプロン直下洗掘深<sup>5)</sup>」よりも小さくなる等の実験結果から、次式の長さ程度あれば十分と思われる。

$$L=j/\sin(\varphi) \quad (2)$$

上式で、 $L$ ：水平護床区間長、 $j$ ：同一諸元（単位幅当たり流量、流入 $F_r$ 、河床粒径、河床勾配、下流河床落差）、同一洪水継続時間に対する「護床無しでのエプロン直下最大洗掘深（下流河床標高基準<sup>5)</sup>」、 $\varphi$ ：下流河床粒径での非攪乱時水中安息角<sup>7)</sup>

今回の実験は標準的な落差、粒径だったが、より高落差、小粒径の場合は上式の $j$ 値<sup>5)</sup>が大きくなる。

一方、水平護床部の屈撓性にはブロックの連結構造（水中安息角に応じた連結遊びと柔軟性）と重量が重

要で、重量は被覆材保護（ブロック浮き上がり防止）の点からも傾斜護床部を含め十分重くする必要がある。

### c) 被覆材の選定と保護

施工性はネット、グラベルマット、ロールマットがマット（接着一体化）より優れるが、粒径が微少であれば吸い出し防止が確実な後者を用いる他ないだろう。又、被覆材保護の為には水平護床部以外のブロック連結遊びをゼロにするのが望ましい。

### (5) ネット護床静水池／落差工の諸元

ネット護床静水池の長さ、深さは護床直下洗掘域の一部埋め戻し施工となること、鉄筋コンクリート床より強度が劣るブロックを用いることを考慮し、順傾斜跳水型静水池の長さ・深さ（24.3m, 2.0m）より長く、1.5倍深い、小さな埋め戻しで整形している（図-2）。この為、静水池流況は静穏となるが、それでも被覆区間下流では洗掘を生じた（図-6）。現地適用では従前洗掘域を十分カバー出来る長さでネット護床静水池を施工する必要がある。事後、更に河床低下が進行した場合は、このネット護床静水池の下流部が傾斜化していくので、傾斜護床として低下河床まで延伸させ、そこにネット護床静水池やネット護床落差工を接続させる等の方策が考えられる。

一方、ネット護床落差工は、殆どの堰での計画高水以上である約30m<sup>3</sup>/s/mで、エプロン直下からナップ落水地点の1.4倍の保護ブロック区間長で洗掘を生じなかった（図-6）、これが保護区間長の目安となる。

## 5. おわりに

中上流域の取水堰を主対象に、その現地諸元を概ね網羅した水理実験から、下流河床低下時のエプロン直下洗掘に対する被覆材敷設護床（連結ブロック）の洗掘抑制効果を検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

1. 護床ブロックの連結化・大型化だけではエプロン直下洗掘は防げず僅かな遅延効果しかなかった。
2. 被覆材（ネット、グラベルマット等）を敷設した護床ではエプロン直下洗掘を防げた。
3. 被覆材敷設護床の傾斜施工（勾配 1/12）では護床直下洗掘深も抑えられた。
4. 実験結果より被覆材敷設傾斜護床の水理設計法を提案した。
5. 護床直下洗掘を防ぐ静水池底面構造としてもネット敷設護床は有効であった。その深さは順傾斜跳水型静水池の1.5倍が目安となり、長さは静水池無しでの洗掘域を十分カバーする必要がある。
6. エプロン直下の洗掘を防ぐ落差工底面構造としてもネット敷設護床は有効であった。落下水脈、石

レキに対する保護ブロック区間長はエプロン下流端からナップ落水地点までの1.4倍が目安となる。今後は被覆材敷設傾斜護床の現地実証を進めたい。

**謝辞：**実験の一部は官民共同研究資金（ナカダ産業株式会社）により実施した。記して深謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 常住直人, 高木強治: 取水堰下流の河床低下対策に関する一考察, 第61回農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨, pp.10-13, 2010.
- 2) 常住直人, 後藤眞宏, 浪平 篤: 大都市圏の農業取水堰周辺における河床変動とその魚類移動への影響に関する一考察, 応用生態工学, Vol.12, No.2, pp.131-140, 2009.
- 3) 常住直人, 高木強治, 島崎昌彦, 吉永育生: 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, 河川技術論文集, Vol.20, pp.301-306, 2014.
- 4) 山本晃一: 河道特性論, 土木研究所資料, Vol.2662, pp.20-49, 1988.
- 5) 常住直人: 取水堰直下落下流による経時洗掘深に関する実験的研究, 農業農村工学会論文集, Vol.307, No.86-2, pp. II 63- II 68, 2018.
- 6) 農林水産省農村振興局: 頭首工の外観変状写真, 農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」参考資料編(案), pp.32, 2011.
- 7) 河村三郎: 土砂水理学1, 森北出版, pp.10-11, 1982.
- 8) 常住直人, 高木強治, 島崎昌彦, 吉永育生: 堰下流河床低下時の護床工法の比較実験, 農村工学研究所技報, Vol.218, pp.99-106, 2016.
- 9) 中村優, 川崎和則, 山村航也: 万年頭首工護床工の災害復旧, 水土の知(農業農村工学会誌), Vol.80(10), pp.40-41, 2012.
- 10) 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, Vol.35, pp.1-14, 1975.
- 11) 農林水産省農村振興局: 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「頭首工」, 農業農村工学会, pp.403, 2008.
- 12) 農業土木学会: 農業土木工事図譜 第4集 頭首工編, 農業土木学会, pp.13-138, 1990.
- 13) 国土交通省河川局(参照2010.4.5): 河川整備基本方針, (オンライン), 入手先 < [http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/jigyo\\_keikaku/gaiyou/seibi/index.html](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html) >, 2009.
- 14) 農林水産省農村振興局: 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「フィルダム」, 農業農村工学会, pp. II-254, 2003.

(2022. 3. 25受付)