

堰下流河床低下時の護床工法の比較実験

—マット工法の効果—

常住直人* 高木強治* 島崎昌彦* 吉永育生**

* 水利工学研究領域基幹施設水理担当

** 農林水産省農林水産技術会議事務局研究統括官室

要 旨

堰下流の河床低下が上流の堰側に及び護床を破壊する等、堰本体に被害をもたらすことがある。これを抑制すべく対策工法を考案し移動床水理模型実験により比較検討を行った。検討した工法は、護床ブロックの追加、底板敷設、ブロック連結、大型ブロック化、吸い出し防止マット敷設等の組み合わせである。本研究から、ブロックの連結や大型化のみでは堰被害を防ぎ難いこと、連結護床ブロックと吸い出し防止マットによる工法がエプロン直下の洗掘抑制に長期間有効なことが分かった。また、実験結果よりマット工法の設計・施工についての提案を行った。

キーワード：取水堰、護床工、河床低下、局所洗掘、移動床水理模型実験

I 緒 言

農業取水堰の多くは、圃場への送水の便から河川中上流域に設置される（常住・高木，2010）。一方、堰下流の河川中下流域では、骨材採取や治水のため、河床浚渫が成されることが多い。このため、その上流側の堰の直下でも漸次、河床が低下していき、実際、多数の堰で築造当初フラットだった護床の傾斜化や、エプロン直下での段差発生が見られる（常住ら，2009）。これらの傾斜や段差が、下流河床の低下に起因するのは、魚道下流口の水位低下を伴うことから分かる（篠邊，1989；常住ら，2009）。なぜなら、堰直下付近の局所洗掘によって生じた傾斜や段差では、魚道下流口の水位低下は起きないからである（常住・高木，2010）。

河床低下に伴い傾斜や段差が生じている場合、堰上下流の水位差が大きくなるので、パイピングや堰直下の洗掘（根入れ露出など）など構造上の問題が起きやすい。また、河床低下が経済活動や治水など、人為的要因に起因しているのであれば、その変化は比較的大きく、かつ現状で止まるとは限らない。したがって、今後も進行しうる河床低下に対応できるように、かつ近年の財政状況も鑑み極力低コストで堰の長期供用を図れるように堰の保全工法を体系化していく必要がある。

河床低下の問題については、従前、蛇行水路等での移動床実験により階段式、斜路式、1段式などの復旧工法の洗掘軽減効果を調べた研究がある（三輪・高井，2011）。この研究は、堰被災後の各復旧工法の洗掘軽減

効果や砂礫堆の進行に伴う洗掘深さの変動について、有用な情報を与えている。

一方、下流河床低下が堰直下に及ぶ際の被災メカニズムは、護床ブロックも再現した直線水路の移動床模型実験で調べられている（常住ら，2014）。この研究では、被災は護床直下の洗掘、護床の傾斜化に始まり、エプロン直下の洗掘域拡大へと進行していきことが分かっている。また、護床ブロックの流出有無により、被災の進行速度やパイピング、根入れ露出など被災規模が異なることも分かっている。したがって、護床直下の洗掘や護床の傾斜化など、初期の護床被害時の改修において、エプロン直下の洗掘を抑える工法とすれば、事後、堰本体が被災するまでの期間を延ばせ、被災規模を軽減でき、復旧コストを抑制出来ると考えられる。これは堰の長期供用化や、長期供用時のライフサイクルコスト低減に資する。

そこで、本報文では、その端緒として、護床ブロックも再現した移動床模型実験を行い、各種護床工法によるエプロン直下の洗掘抑制効果、根入れ保護効果を比較検討した。以下、本報文では、各工法の現地での効果を分かりやすくするため、特に断らない限り現地換算での表記とする。

II 実験方法

2.1 相似則と模型および実験諸元

河川中上流域の河床変動は、掃流砂が主体であり、重

力が卓越する現象なので、流れをフルード相似、砂・ブロックをシールズ相似とした縮尺1/50の移動床模型で実験を行った。このため、模型には天然珪砂を用い、模型ブロックの比重は実物と同程度に調整し、水温は15～25度に設定した。実際、実験中にリップルの発生は見られず、粘性の影響は無視出来るものであった。

実験は給砂無しとし直線矩形水路 (Fig. 1) で行った。この水路の模型寸法は既報文 (常住ら, 2014) と同様で、内幅0.23 m, アンダーフロー流入ゲートまでの上流端整流区間長が0.38 m, エプロン区間長が0.2 m, その下流の移動床区間長が4.65 mという構成であり、移動床区間では、堰の土砂吐側 (ミオ側) の護床から護床工下流の低下河床までを再現した。

実験模型および実験諸元は、農業取水堰の標準的諸元から設定し、標準的諸元は国土交通省河川局 (2009), 山本 (1988), 農業土木学会 (1990), 川合 (1975), 常住ら (2014) を参考に次の値とした - 河床勾配1/450, 河床の60%粒径4.3 cm, 90%粒径10 cm (粒径は河床勾配より設定), 河道支配流量～計画高水流量 (単位幅当たり) 6.0～18.3 m³/s/m, 堰高3 m, 下流河床落差5 m。

以上より河道支配流量～計画高水流量での流入フルード数は3.9～2.7, 下流水深は2.20～5.98 m (模型4.4～12.0 cm) となる。また、模型砂の50%粒径は0.83 mm (60%粒径0.87 mm) とした。なお、模型砂の粒度は、0.25 mm未満が1%, 0.25～0.425 mmが5%, 0.425～0.850 mmが51%, 0.85～1.180 mmが43%で、(84%粒径) / (16%粒径) は1.72で概ね均等である。

実験の初期砂面形は、護床区間を含むエプロン下流端から下流113.4 m地点まではエプロンと同一標高とし、そこから攪乱時水中安息角31.5度 (河村, 1982) で下流河床落差にすり付く形状とした。

なお、本実験はフルード模型のため、パイピングなど粘性の影響が無視しえない事象では現地との差異が大きくなりうる。このため、現地では今回の実験結果よりもパイピングは激しくなると考えられる。

2.2 洪水波形

堰側の河床低下は、小流量時には護床下流端からの護



Fig. 1 実験装置全景

Photograph of the experimental apparatus

床の傾斜化が緩慢に上流に及ぶことで進み (「傾斜進行型」), 一方、大流量時には (護床直下水位の低下に伴い) 護床直下に局所洗掘域が発達し、その洗掘域に護床ブロックが転倒、流出して護床が破壊されつつ、洗掘域が急速に上流に進行して進むことが分かっている (「局所洗掘進行型」) (常住ら, 2014)。いずれも、傾斜や洗掘がエプロン直下に達したところで、エプロン直下洗掘域が発達し、根入れ露出など堰構造の不安定化を来すが、低頻度な大洪水ほどそれが急激かつ大規模に進む。そこで今回の実験では、局所洗掘進行型となる低頻度の大洪水波形で各工法の効果を比較することとし、自然の洪水波形を外挿すべく、計画高水流量2日通水 (以下、「ピーク時」), 河道支配流量2時間通水 (以下、「減水時」), 停水 (以下、「停水時」) とした (以下、「代表波形」)。

2.3 検討した護床工法

今回検討した主要な護床工法は次の6種である。

- 護床追加：計画高水流量を設計流量とした設計基準 (農業土木学会, 1982) に即した標準的な護床工 (護床区間長56.7 m, 計画高水時の粗度係数0.037, ブロック配置は千鳥) の下流端に、護床ブロックを追加投入したものである。護床ブロックは質量3.1 t, 密度2400 kg/m³のイボ粗度型 (幅0.9×長1.8×厚0.75 mの直方体中央に幅0.5×長0.75×高さ0.3 mのイボを付けた形状) である。ブロック追加は概ね現場準拠で護床下流端から護床延長の17.5%区間に設計ブロックを二層化することで行った。
- 底板&護床 (Fig. 2)：大洪水時の急激な河床低下でのパイピング被害と根入れ露出被害を防ぐべく、護床工の上流部底面に遮水底板 (長さ25 m) と遮水根入れを設けたものである。また、当初の減勢機能を維持すべく、護床上流部 (護床のうち、堰放流の減勢により跳水に至る部分) のブロック流出を抑止する隔壁を底板下流端に設けている。
- 底板&連結護床：「底板&護床」とほぼ同様だが、護床下流部 (護床のうち、跳水に対し砂面を保護する部分) のブロック流出も抑止すべく、護床下流部のブロック同士と隔壁・ブロック間を連結したものであ

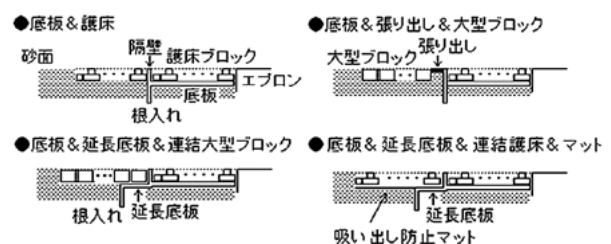


Fig. 2 検討した護床工法

Figures of tested riprap types

る。連結長さ（連結ブロックの屈撓性確保のための余裕長さ）は0.5 mである。実験ではテグスをブロック天端中央に接着して、上下流方向・左右方向の隣接ブロックと連結した。

- 底板&張り出し&大型ブロック (Fig. 2)：「底板&護床」と類似だが、護床下流部のブロック流出を抑止するため、この部分のブロックを大規模化・重量化したものである。また、底板直下の洗掘を抑えるべく、ブロックの面積、厚さを増し、砂面被覆率（単位面積当たりのブロック被覆面積の%）を高めた。この大型ブロック（幅2.15×長4.8×厚1.5 m、イボ無し、29.4t、1900 kg/m³）は、杵工に現場砂礫を詰めてフタをする簡易・低廉な構造を想定している。さらに、本工法では、減水時のナップ垂れに対し、底板直下の根入れを保護すべく、底板下流端の隔壁天端に張り出し（長さ1.5m）を設けた。
- 底板&延長底板&連結大型ブロック (Fig. 2)：「底板&張り出し&大型ブロック」と類似だが、大型ブロック同士を連結してある。この場合の連結長さは、厚手の大型ブロックの屈撓性が不足しない程度で、かつブロック隙間が極力広がらないように1.15 mに抑えた。また、本工法では、張り出しを設けず、代わりに底板を護床下流部側に10 mだけ延長した。これは、延長底板上のブロックを底板直下の洗掘域にずり落ちさせることで、直下洗掘域発達時も底板直下の砂面や根入れの被覆保護を図るものである。なお、護床下流部はこの底板延長分だけ延伸してある。
- 底板&延長底板&連結護床&マット (Fig. 2)：「底板&延長底板&連結大型ブロック」と類似だが、大型ブロックを護床ブロックに変え、その護床区間の底面に護岸などに用いられている吸い出し防止マットを敷いたものである。マットにはポシブルAK65N（旭化成ジオテック社製、ポリエステルSB長繊維不織布、厚さ3 cm、透水係数0.71 cm/s）を用いた。

2.4 計測方法

流量計測は直角三角堰、水位・砂面計測はポイントゲージと側面からのビデオ画像解析により行った。水路横断方向の砂面標高には大きな差異が無く、固定した偏りも無く、とりわけ洗掘域では差異が無かったので、砂面計測は概ねビデオ画像解析に依った。

Ⅲ 実験結果と考察

ここでは洗掘抑制効果をエプロン、底板、延長底板などの根入れ直下の洗掘容積の増大速度により、また、根入れ保護効果を根入れ直下の段差の小ささにより代表させる。直下洗掘容積は、直下洗掘域のうち、洗掘域下流端の鞍部（凸部）標高以下の部分の容積であり、鞍部が消失した後は、洗掘域直下の低下河床標高以下の部分の

容積とした。また、直下段差、洗掘深はエプロン面標高を基準とした。各護床工法の実験結果は次のようになった。

3.1 護床追加

「護床追加」でも護床直下洗掘域へのブロックのずり落ち、流出と護床の破壊は防げず、洗掘域は護床を破壊しつつ急速に上流に進行した。下流に堆積する流出ブロックがブロック追加で高密度になる分、それによるセキ上げと相まって土砂流出が抑止されるが、標準的な護床よりも直下洗掘の発達が若干遅くなった程度で抑制効果はあまり見られなかった (Fig. 3)。

3.2 底板&護床

底板下流端に隔壁を設けたため、護床上流部のブロック（底板上）は流出しなかった。これにより当初設計の減勢が維持され若干洗掘が抑制された (Fig. 3)。しかし、護床下流部のブロック流出や護床の破壊は防げず、「護床追加」の場合と大差がなかった。

3.3 底板&連結護床

護床ブロックの流出や護床の破壊は連結護床化で抑えられ、護床直下洗掘域は上流に進行しないが、護床下流端から護床の傾斜化が生じ、それが底板直下に達するとナップの落下地点を中心に底板直下にも洗掘域が発達した。急激な護床の破壊は起きないので、前形式までと比べ直下洗掘域の発達はかなり抑えられた (Fig. 4)。しかし、ナップが垂れる減水時には直下段差が増大し、根入れが大きく露出して、根入れ保護効果は十分でなかった (Fig. 5, Fig. 6)。これは、i) 底板直下の洗掘域が広がるにつれ、護床ブロック間の隙間が広がり砂面被覆率が下がること、ii) 減水時にはナップが垂れつつ下流水位も低下するので、衝突水脈の鉛直方向流速での吸い出し洗掘を抑止し難くなること、に依ると考えられる。

直下段差は最終的に直下洗掘の最大深さ程度（エプロン標高から当初設定した下流の低下河床標高までの落差

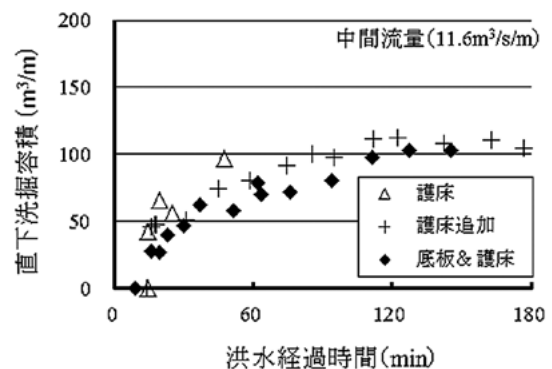


Fig. 3 各工法での直下洗掘の発達状況 (その1)
Differences of scouring volumes in time series by riprap types (1)

(下流河床落差)の約2倍)に増大した。また、直下段差拡大に伴う流下土砂は連結護床下流部の上に堆積するため、根入れ直下の護床はその上下流端が拘束されて吊り橋化しつつ、その底面が空洞化していった (Fig. 6)。

なお、隔壁と連結護床を連結しない場合は、吊り橋化、空洞化は起きないものの、底板直下洗掘の発達に伴い連結護床・隔壁間に隙間が生じ、減水時に連結護床の上流部が捲れ上がって、やはり同程度の根入れ露出が生

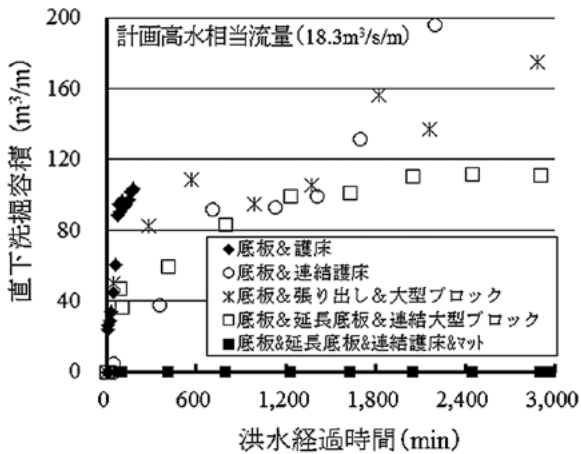


Fig. 4 各工法での直下洗掘の発達状況 (その2)

Differences of scouring volumes in time series by riprap types (2)

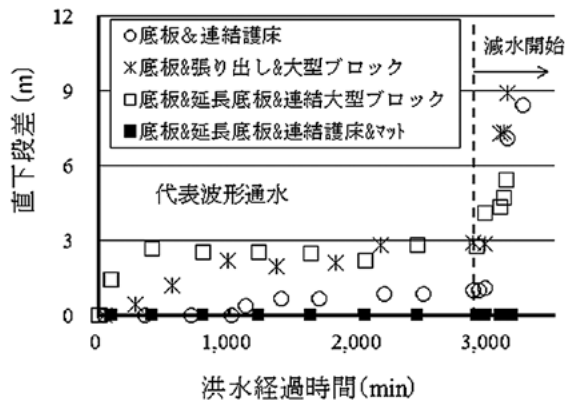


Fig. 5 各工法での直下段差の発達状況

Differences of scouring drop in time series by riprap types

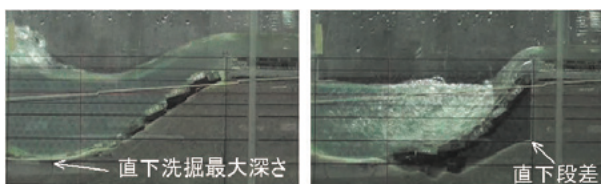


Fig. 6 減水による連結護床の吊り橋化 (左: 減水前, 右: 減水後2時間。「底板&連結護床」)

Suspended chained riprap by scouring while discharge decreasing

じた。

3.4 底板&張り出し&大型ブロック

大型ブロック護床でも護床直下洗掘域の上流移動は防げなかった。この場合は、ブロックが大型なのでブロックの流出、散逸はほとんどなく、護床直下の洗掘域への下流端ブロックのずり落ち、その上流側のブロック隙間の増大、隙間での縦渦洗掘発達、縦渦洗掘域への上流側ブロックのずり落ち、ブロック間隙間の増大、という順序で洗掘域が漸次、上流に移動した (Fig. 7)。その間、縦渦洗掘等によりブロック上流面の露出が大きくなったブロックは、上流面が流れに押され、幾つかが下流に流された (Fig. 7)。

この場合も洗掘域が底板直下に達すると、そこでの落下流により洗掘域が拡大していくが、流下ブロックが遠方に散逸しないため、それが洗掘域直下で副ダムの作用するようになると、洗掘域での跳水が比較的安定した。そうなるまでは未連結のブロックで不安定なため、洗掘抑制効果も不安定で、平均的には「底板&連結護床」とあまり変わらない抑制効果であった (Fig. 4)。

抑制効果が改善しないのは、洗掘域へのブロックのずり落ち、流出はブロックの大型化、重量化でも防げないためであり、そうなるのは、洗掘域とその直上流の水位差によって、砂面被覆率が高い大型ブロックでも、ブロック底面にパイピング的な吸い出し洗掘が起きるためである (Fig. 7)。なお、エプロンと接合していない底板でも、水位低下時には、大型ブロック同様のずり落ちが起きた。

底板直下の洗掘域が拡大すると、ブロックと張り出し間に隙間を生じるようになり、張り出し下面で縦渦洗掘が発生して、根入れが露出した。本型式は、張り出しがあり大型ブロックの砂面被覆率も高いものの、ブロック間や張り出し・ブロック上流端間の隙間発生により、減水時の根入れ露出は、「底板&連結護床」の型式と同程

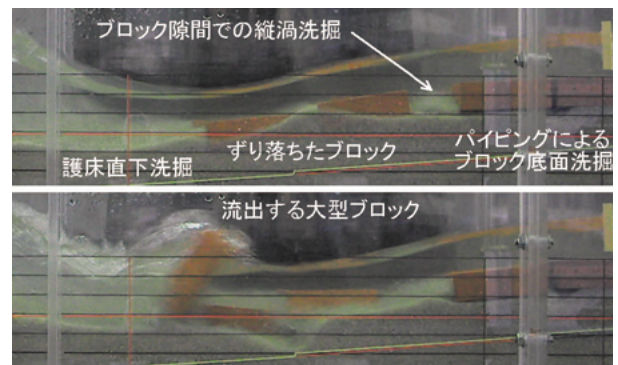


Fig. 7 護床直下洗掘と護床破壊 (計画高水通水後30分。「底板&張り出し&大型ブロック」)

Riprap destruction by its downstream scouring

度生じた (Fig. 5)。

3.5 底板 & 延長底板 & 連結大型ブロック

「底板 & 張り出し & 大型ブロック」と同様のメカニズムで洗掘域が上流に移動するが、連結によりブロック隙間の増大やブロック流出が抑えられるため、洗掘抑制効果はより高く、かつ洗掘容積も安定した (Fig. 4)。

一方、根入れ保護効果については、延長底板上のブロック下面で縦渦が起き、当初から「底板 & 張り出し & 大型ブロック」と同程度の根入れ露出が生じた (Fig. 5)。これは延長底板上のブロックが、根入れ直下の洗掘域拡大に伴い洗掘域側に引っ張られ、延長底板下流端からはみ出すためである。

減水時には、ブロック隙間は連結無しの場合よりも開かないものの、ナップ垂れと下流水位低下により隙間から吸い出し洗掘が進み、直下段差が増大し、延長底板上のブロックがずり落ちていき、最後は上流端ブロックが浮き上がって、底板直下に全て崩落した (Fig. 8)。崩落したブロックが抑えとなり、根入れ露出の増大はある程度抑制されたものの (Fig. 5)、安定して根入れが保護される状態ではなかった。

3.6 底板 & 延長底板 & 連結護床 & マット

マットにより護床底面からの土砂吸い出しは見られなかった。ブロック底面でのパイピングが起きないので、護床直下の洗掘域が深くなるにつれ、マット底面の土砂が洗掘域に漸次ずり落ち、護床が下流端から緩慢に傾斜化していった。護床直下の洗掘深増大につれ、マット底面土砂のずり落ちが増え、護床傾斜の下流端付近が急勾配化するが、更に洗掘深が深くなると、その急勾配部のマット底面の土砂もずり落ち、護床傾斜は全体的にある程度緩勾配になって、これを繰り返して傾斜面が上流に伸びていった (Fig. 9)。

このような洗掘域の拡大、洗掘深の増大、護床下流端からの傾斜化は、護床直下の跳水が波状跳水、潜り噴流と交互に変化していきつつ進行していった (Fig. 10)。

3.6.1 ピーク時の流況

波状跳水時は、洗掘域のナップ落下地点から下流側では底面土砂が下流に移動し、上流側ではナップ下側の縦

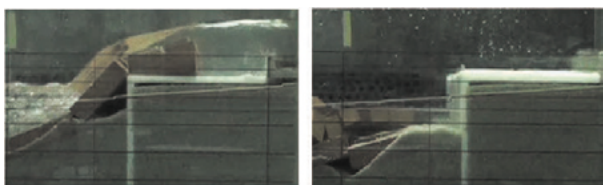


Fig. 8 延長底板上ブロックの浮き上がり (減水後34分) と崩落 (「底板 & 延長底板 & 連結大型ブロック」)

Destruction of riprap with large blocks on an extended apron

渦によって底面土砂が上流に移動する。洗掘最深点は洗掘域中央付近になる。上流に移動する底面土砂が洗掘域上流側の傾斜面にある程度堆積するとナップ下側の縦渦は縮小し、ナップはナップ上側の縦渦に押されて下方に垂れ、波状跳水は潜り噴流へと変化する。

潜り噴流時には、波状跳水時に傾斜面に堆積した土砂が下方に垂れたナップによって下流に押し戻される。マット直下が掘れ、洗掘最深点は上流側に移動する。しかし、傾斜面の堆積土砂が流出するにつれ、ナップ下側の縦渦は再び拡大し、ナップは上下に揺らぐようになり、ついには波状跳水に戻る。

波状跳水に戻ると、潜り噴流時に洗掘域中央に押し出された堆積土砂の山は削れて上下流に分かれ、再び洗掘域上流側では上流向きの底面土砂移動が復活する。これによりマット直下の洗掘は埋め戻され、洗掘最深点は再度、洗掘域中央付近に戻る。

以上の過程で、マット下流端付近の傾斜面は、潜り噴流時にやや急勾配化するものの潜り噴流時の露出、波状跳水時の埋め戻しを繰り返す。潜り噴流は洗掘深増大につれ生じにくくなり、潜り噴流時のマット直下洗掘も小さくなり、マット下流端付近の傾斜面形状は概ね安定していく。

3.6.2 減水時の流況

減水時にはナップの垂れと下流水位低下により、潜り噴流時と類似の流況になる (Fig. 10)。マット下流端直下が深く洗掘され、それに伴いマット底面の土砂がずり落ち、マット下流端付近から急勾配になっていく (Fig. 9)。しかし、洗掘された土砂は直下に堆積し、洗掘深の増大は止まり、護床傾斜面の形状は安定していく。傾斜面は急勾配化するが傾斜上流端の位置は変わらず (Fig. 9)、最後まで底板直下には洗掘も段差も生じなかった (Fig. 4, Fig. 5)。

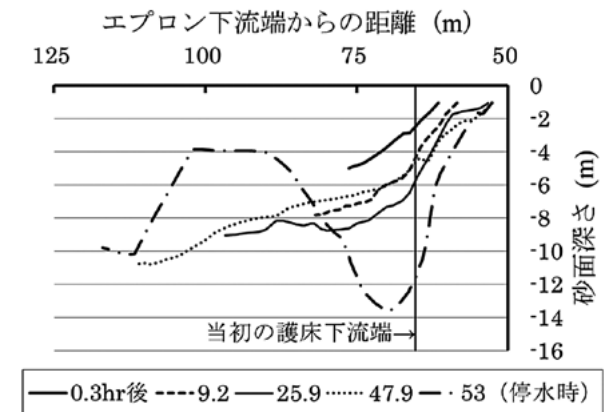


Fig. 9 代表波形通水での護床直下洗掘上流斜面の変化 (「底板 & 延長底板 & 連結護床 & マット」)

Upstream slope profiles of scour in the downstream of riprap on geotextile layer in a representative flood

事後は、護床傾斜面の下流端付近の急勾配部が埋め戻し（洪水ピーク時）、露出（減水時）を繰り返すだけで、河道支配流量に応じた傾斜面形状を中心に安定すると思われる。また、給砂有りで砂堆が発達する条件下では、砂堆の谷通過時には本実験のように護床直下が掘れるものの、それ以外では砂堆の山通過による埋め戻しがあり（三輪・高井, 2011）、減水時に砂堆の谷が通過する状況でなければ今回の実験ほどには掘れないと考えられる。このような傾斜面の安定が崩れ、傾斜面が上流に伸びていくには、マットの破損・亀裂での土砂吸い出し、もしくは計画高水を超えるような異常洪水での護床直下洗掘深の更なる増大が必要だろう。

IV 下流河床低下時の護床工法に関する考察

今回の検討で、護床ブロックの追加やブロックの大型化・重量化・大面積化では、護床直下洗掘域へのブロック流出や護床破壊は防ぎ難いことが分かった。ブロックの流出を防ぎ、洗掘抑制効果を高めるには、ブロックを連結するほうが有効であった。連結していなければ、ブロックの大型化で砂面被覆率を高めても、ブロック間の縦渦洗掘によるブロックの散乱は防げず、ブロック下部の土砂吸い出しはさほど抑止されなかった。

一方、減水時（下流水位低下かつナップ垂れ時）の根

入れ露出は、ブロックの連結、ブロックの大型化（砂面被覆率増大）、張り出し構造の付設のいずれでも防ぎ難く、根入れ露出の防止には吸い出し防止マットの敷設が効果的だった。吸い出し防止マットでは洗掘抑制効果も大幅に改善した。

しかし、マットでは砂礫による摩耗・亀裂がありうるので、マットの保護と押さえのためにブロック被覆等と組み合わせる必要がある。この場合、ブロック被覆を安定化させるためには、ブロック流失を防ぐブロックの連結化が必要であり、かつマットの摩耗を極力抑えるべく、ブロック・マット間、ブロック間の隙間を低減する必要がある。ブロック・マット間の隙間低減のためには連結ブロックの屈撓性向上が求められ、ブロック隙間低減のためにはブロック間隔（連結長さ）の縮小が求められるので、両者を考慮すればブロックの面積・厚さは過度には出来ず、隙間増大につながるブロックの過剰な大型化はむしろ逆効果になる。

以上よりマットと過度に大型でない連結護床ブロックの組み合わせが洗掘抑制効果、根入れ保護効果の向上に有効と考えられる。この型式ではマットを厚く、連結材径を太くすればその分、長期供用化につながる。しかし、マット亀裂による吸い出し洗掘を見逃し、マット補修等が適宜行われなければ長期的にはエプロン直下で洗掘発達となる可能性は皆無でない。したがって、長期的に考えれば、遮水底板や遮水根入れで堰本体を保護するとともに、それらにより下流河床低下分の追加浸透路長を予め確保するのが望ましい。この際、根入れ深さを下流の低下河床高より深く出来れば、将来的に底板直下の洗掘が発達した際の堰改修（段状改修等）も容易になる。遮水底板や遮水根入れを設けない場合は、計画高水での洗掘形状に対し、マット被覆により浸透路長を確保すべく十分なマット長さが必要になる。

以上からエプロン直下河床の低下速度の緩慢化、根入れ保護、長期経過時や想定外洪水時の安全性、次期改修の容易さを考慮すると Fig. 11 のような形式が有効と考えられる。

この型式でのマット長さは、マット傾斜の角度が（マット被覆により）攪乱時水中安息角よりも急勾配になることから Fig. 11 中の式のように代表波形減水前の最大洗掘深と攪乱時水中安息角で決まる傾斜長以上とす

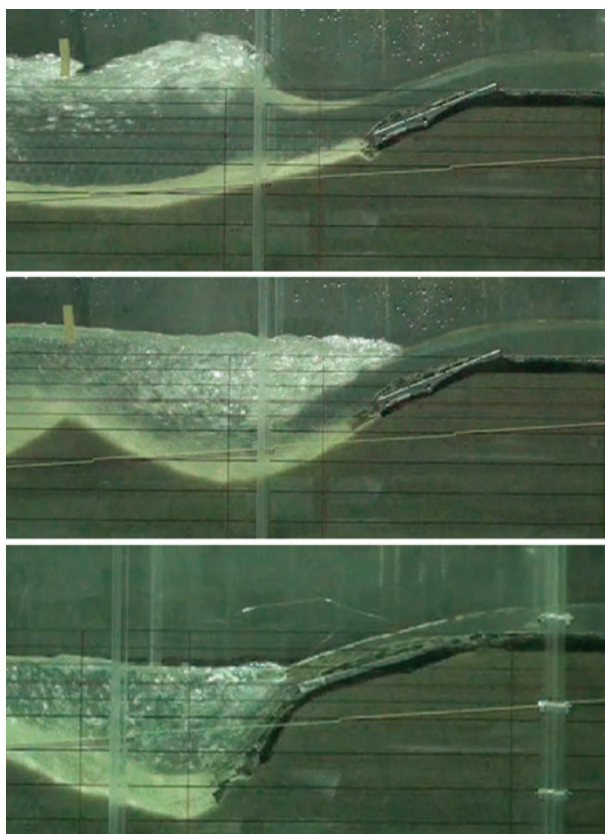


Fig. 10 マット直下の洗掘状況(上:波状跳水時, 中:潜り噴流時, 下:減水時、「底板&延長底板&連結護床&マット」)
Patterns of scour in the downstream of riprap on geotextile layer

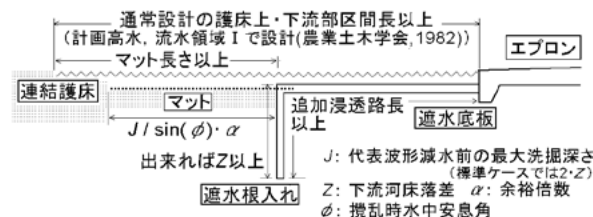


Fig. 11 下流河床低下時に有効な護床工法
Proposed riprap type on condition its downstream riverbed drops

る。そのようにすれば、護床の傾斜はエプロンもしくは底板に達せず、下流河床低下に伴うこれら直下での洗掘や段差を回避出来る。

V 結 言

今回の実験結果から、「底板&連結護床&マット」の工法が下流河床低下時の洗掘抑制効果、根入れ保護効果とも優れていることが分かった。これに対し、護床ブロックの追加、護床ブロックの大型化やブロックの連結化では、エプロン直下の洗掘を抑えられず、根入れも保護出来ず、堰への被害を防ぎ難いことが分かった。今後はマット長さの設計の基になる洗掘最大深についてデータを蓄積し設計図表等を策定していきたい。

謝辞：本論文の実験模型製作には農村工学研究所農村技術支援チーム諸氏にご尽力いただいた。記して深甚なる謝意を表す。

引用文献

川合亨（1975）：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，**35**，1-14。
河村三郎（1982）：土砂水理学，森北出版，10-11。

国土交通省河川局（2009）：河川整備基本方針，http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html（閲覧日：2010年4月5日）。
三輪式・高井和彦（2011）：堰下流護床工による河床洗掘軽減効果に関する実験的研究，農業農村工学会論文集，**271**，17-23。
農業土木学会（1982）：頭首工の設計，（社）農業土木学会，81-86。
農業土木学会（1990）：農業土木工事図譜 第4集 頭首工編，（社）農業土木学会，13-138。
篠造三郎（1989）：頭首工の魚道 上巻，笹軽印刷，24-25。
常住直人・後藤真宏・浪平篤（2009）：大都市圏の農業取水堰周辺における河床変動とその影響に関する一考察，応用生態工学，**12(2)**，131-140。
常住直人・高木強治（2010）：取水堰下流の河床低下対策に関する一考察，平成22年度農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨集，10-13。
常住直人・高木強治・島崎昌彦・吉永育生（2014）：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，**20**，301-306。
山本晃一（1988）：河道特性論，土木研究所資料，**2662**，20-49。

受理年月日：平成27年11月4日

Restraint Effects for Scouring in Downstream Riverbed Drop by Riprap Types

— Effects of Geotextile Layer and Connected Riprap —

TSUNESUMI Naoto*, TAKAKI Kyouji*, SHIMAZAKI Masahiko* and YOSHINAGA Ikuo**

*Hydraulic Structures Design and Management, Hydraulic Engineering Research Division

**Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Secretariat of Agriculture, Forestry and Fisheries
Research Council, Office of Director, Research and Development

Abstract

Many diversion weirs have risks of piping, structural unstableness by their downstream scouring from downstream riverbed drop. The drop occurs by downstream excavations to protect downstream city areas from large floods. Management actions are required to extend the life-span of diversion weirs for the downstream condition. Therefore, we examined restraint effects for scouring by downstream riprap types through hydraulic model experiments with movable bed in a representative condition of diversion weirs.

In these experiments, we examined with extra riprap blocks, extended apron and impervious sheet piles, connected riprap blocks, large riprap blocks, geotextile layer and these combinations. Results show that connected riprap blocks on geotextile layer have the best restraint effect for its downstream scouring and perfectly prevent exposure of sheet piles in the condition of the supposed worst hydrograph. And extended apron and impervious sheet piles for enough creep length is also required for future improvement of a weir.

Key words: Diversion weir, Riprap, Riverbed drop, Scouring, Hydraulic model experiment with movable bed