

取水堰の洪水被災を防ぐネット工法

常住直人

農研機構 農村工学研究部門

農業用取水堰は圃場送水の便から河川中上流域に多い。このため、経年的な下流河床低下により堰下流部の護床ブロックの流失が起こりやすく補修費が増大しやすい。また、河床低下によって、洪水時に堰直下流で洗掘域が拡大しやすく洪水時には堰の損壊や決壊に至る事もある。これらを防ぐため、簡易かつ低コストのネット工法を開発した。この工法は想定最大洪水まで護床ブロック流失や堰損壊を防げ、下流洗掘も抑えられて下流の護岸・堤防の安全も図れる。堰下流の落差工や静水池にも適用出来るので、河床低下が進行し続けても、同一の簡易工法で対応できる事になり、取水堰を低コストで保全し続けるのに有効である。

(キーワード：取水堰，河床低下，防災，機能保全，長期供用コスト)

1. はじめに

農業用取水堰の多くは圃場送水の便から河川中上流域にある。その下流側では洪水時の堤防決壊を防ぐための河床掘削やコンクリート用の砂利採取が成されるので、それが堰下流に漸次波及し河床低下，護床の傾斜化・沈下が進行する（図1①～③）（常住ら，2009；常住・高木，2010）。堰下流の河床低下の進行は，中小洪水程度では緩慢で，最初は護床直下流の洗掘と護床の傾斜化が進むが（図1③），大洪水時には洗掘域の大幅な拡大，護床崩落，洗掘域のエプロン直下流への移動が起きる（図1④左）（常住ら，2014）。また，エプロン直下流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流で洗掘域が拡大していくこともある（図1④右）（常住ら，2014）。エプロン直下流の洗掘域が拡大すると，そこにエプロン底面土砂が漏出し，エプロン陥没等の堰損壊や堰の決壊に至ることもある（図2）（農水省，2011）。

堰の損壊，決壊の被害は数十年以上に一回程度の稀な大洪水で起きるため，その対策の必要

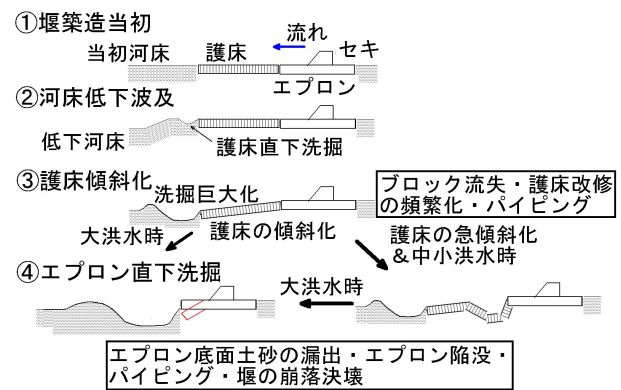


図1 堰下流河床低下被災のメカニズム



図2 下流河床低下での堰被災

(左上：エプロン陥没，右上：決壊前，下：決壊後)

性は堰の管理者からも認識されがたい。しかし、被災での復旧費用は常時の維持管理費用よりも

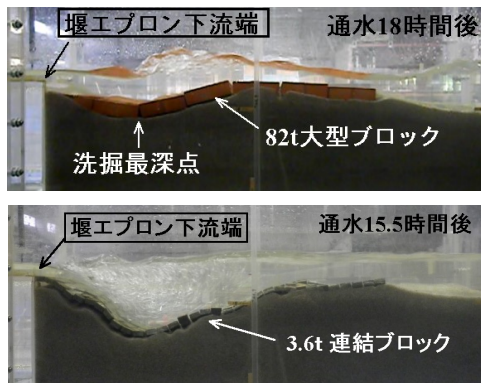


図3 大型ブロック（上），連結ブロック（下）でのエプロン直下流洗掘状況

莫大で、被災時に堰の長期供用コストは大きく跳ね上がる。また、河床低下の進行により護床の急傾斜化、護床ブロック流失、護床補修コストの増大となるうえ、堰直下流の護岸・堤防への洗掘被害も大きくなる。常時の維持コストも嵩み、堰の長期供用コストは更に増大する。

堰を低コストで運用し続けるには、護床の傾斜化とエプロン直下流の洗掘を抑える低コストの保全工法が必要になる。

2. 従来の工法

従来は護床ブロックの流失に対し、ブロックの補填やブロックの重量化（大型化）・連結化で対処していた。しかし、これらの工法では大洪水時や護床が急傾斜化した場合、エプロン直下流洗掘を防げないことが模型実験により明示された（図3）（常住ら，2016）。

洗掘後、堰被災後はエプロン延長工法（段状もしくは傾斜エプロン）で復旧されることが多い（図4）（農水省，2008）。近年では大型枠工（内部に砂利、石、土のうを充填したコンクリート製方形枠）を積んでエプロン直下流の河床標高を維持することもある（中村ら，2012）。前者の工法は鉄筋コンクリート製エプロンの延長と地中止水壁（鋼矢板）の打設を伴い高コストなうえ、工事中の河川締め切りも必要で、工期が長く利水への影響が大きい。後者の工法も

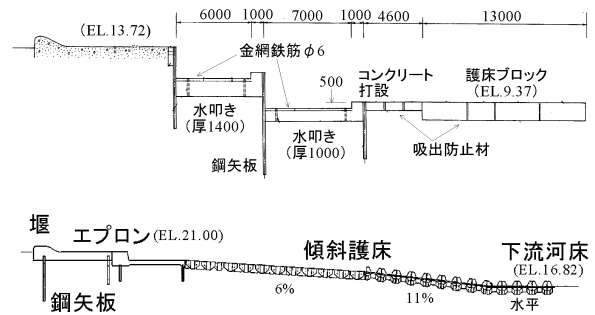


図4 段状（上），傾斜（下）のエプロン延長

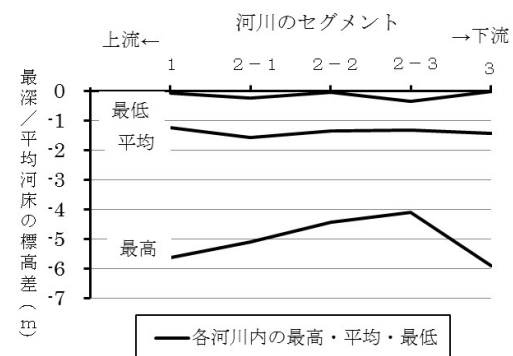
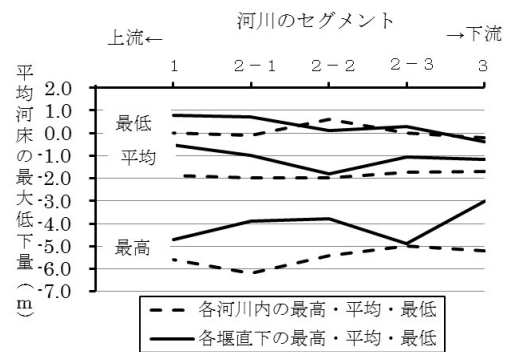
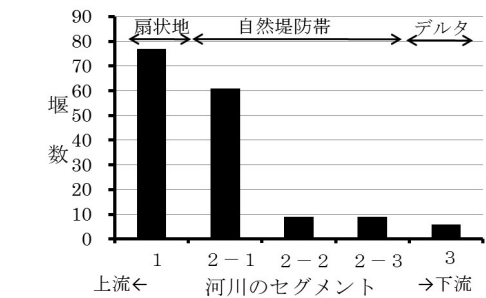


図5 調査堰の河川分布と河床低下量

工費が嵩む。

いずれも河床低下の進行により下流から崩落して行く二次被災は防げず、ゆえに大洪水時の堰本体被災も防ぎきれない。

3. ネット工法の特徴

新工法の開発に際してはまず全国の堰の調査から始めた（図5，図6）（常住ら，2009；常住・高木，2010）。この結果を基に実験条件を設定し，模型実験により被災メカニズムや従来工法の問題点を明らかにしたのが1，2章に記した内容である。従来工法の問題点を解消すべく模型実験での試行錯誤を重ね，最終的にネット工法の開発に至った。

ネット工法は連結護床ブロックにネットを組み合わせたものである（図7）（常住・関谷，2022）。ネットは護床ブロック周囲に予め巻き付けてあり（図7右），隣接ブロックのネットとはファスナー等で簡易に隙間無く連結させる。これにより護床底面土砂の吸い出しが抑えられる。ブロックはひさし・受け構造なので流下砂レキはネットに当たらずネット亀裂は防がれる。ブロックは連結鋼材もしくはブロック噛み合わせ等で連結され，ブロックの流失も防がれる。ネットはこの連結ブロック間に垂らした状態で連結されるので引張力がかからない。河床土砂が吹き上がってきてもネットはブロックひさしで抑えられるためやはり引張力がかからない。これらの点からもネット亀裂は防がれる。

パイピング（堰上下流水位差による地中水流の増大と穴空き）が顕著にならない護床が緩傾斜なうちに，護床をネット工法で下流河床まで

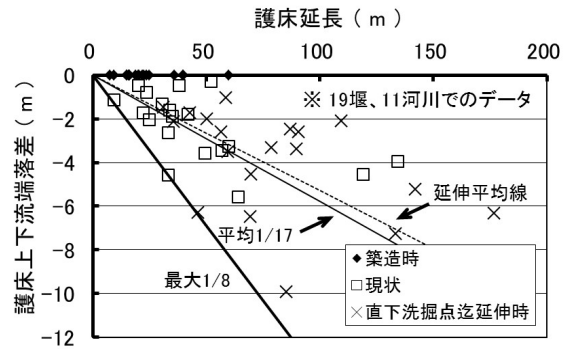


図6 護床勾配の測量調査地点（上）と護床勾配の変化状況（下）

置き換え（「傾斜部」），下流河床でも一定長さで被覆すると（「水平部」），護床直下流が河床低下や洪水に伴い洗掘しても，護床下流端の「水平部」が洗掘に応じ急傾斜化するだけで，この「急傾斜部」がフタとなり護床底面土砂の護床直下流洗掘域への漏出が抑止される。「傾斜部」でのネットによる土砂吸い出し防止と併せ，護床は当初の緩傾斜のまま維持されパイピ

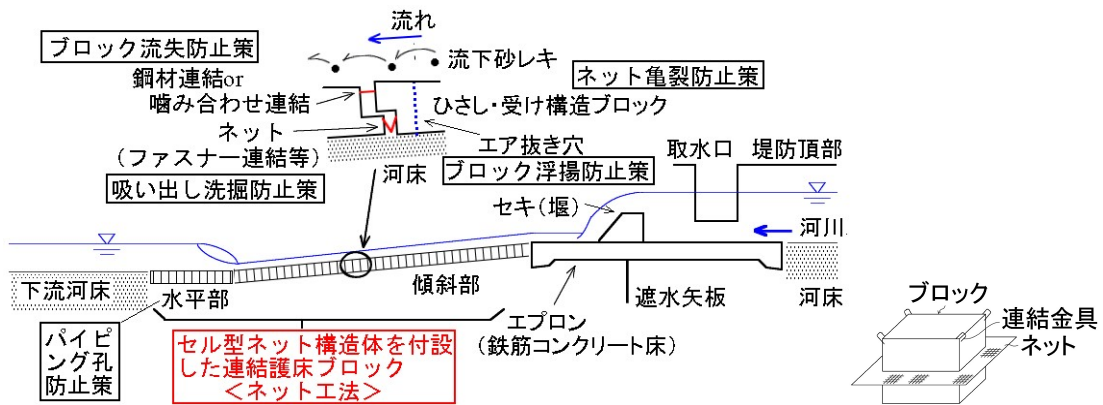


図7 ネット工法（ウェブブロック工法）の模式図

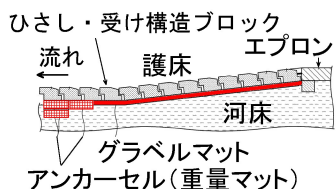


図8 ネット工法（グラベルマット工法）の模式図

ングは防がれ、エプロン直下流洗掘も起きない。

万一、ネットに亀裂が生じて「急傾斜部」がフタになるため、亀裂箇所から護床直下流洗掘域にパイピング孔が空かない。亀裂箇所での局所洗掘に留まり、そこで護床面が僅かに凹むので亀裂箇所の発見は容易である。補修はネット付きブロックの交換（パッチ施工）で済む。

また、堰の老朽化等で地中止水壁（遮水矢板）が破損しパイピングを生じて、パイピング孔の発生と拡大はネットにより防がれる。老朽化災害を抑えられ復旧も容易になる。

ネット工法はネット付きブロックを並べ、隣接ブロックのネットをファスナー連結後、ブロックを寄せてブロック連結する工程で施工する。ファスナー連結工程が加わるものの、護床ブロック補填工事とほぼ同じで、河川締め切り、河床のドライ化は基本不要である。短工期（非灌漑期等）で済み、堰での取水、営農に支障を来しにくい。既製の部材を用いるので導入が容易で工費も節減出来る。河床低下が進行してもそれに応じて低コストのネット工法を延伸するだけなので、堰の長期供用コストを縮減、平準化できる。

ネット工法の別タイプとしては連結護床ブロック底面にセル型グラベルマット（砂利を充填したネット袋）を付設した「グラベルマット工法」も開発している（図8）（常住・関谷，2022）。ネットと充填砂利で河床を抑えるので、ネット単体の場合よりも安全性が高い。グラベルマットの自重を重くでき「水平部」の急傾斜化が速やかに進む利点もある。グラベルマット



図9 堰直下流での段差発生事例

同士はファスナー連結されるのでパッチ施工も容易である。

この他、連結護床ブロック底面に既製の不織布ロールマットを互い違いに二層に敷設する「ロールマット工法」も開発している（常住・関谷，2022）。パッチ施工が出来ず施工性、補修性は劣るが、河床土砂が細粒な場合にも適用出来る。ごく少数ではあるが、河床低下が問題となっている中下流の取水堰に対応した工法である。既製ロールマットをそのまま用いないのであれば、ネット工法のネットを不織布マットに換えても細粒河床への対応は可能である。

なお、以上の工法は、護床直下流洗掘（堰下流護岸・堤防の洗掘被害）を防ぐ静水池・水褥池（すいじょくち）や堰エプロン直下流に段差が生じた場合（図9）の落差工の「底面構造」にも適用出来る（常住，2022）。河床低下に対して用いられるすべての工種（護床，静水池，落差工）を同一の簡易，低コストなネット工法等で構築出来るので、この点からも堰の長期供用コストの縮減，平準化が図れる。

4. ネット工法の効果検証

ネット工法周囲の流れ、土砂移動は主として重力起因なので、フルード相似則に依る水理模型実験で現場の現象を精度良く再現出来る。これはダム放流施設（洪水吐）や取水堰の最終設計形状（現地施工形状）の確定にも用いられてきた手法である。

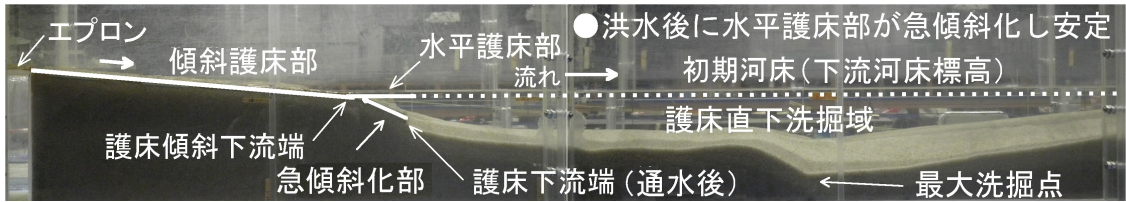


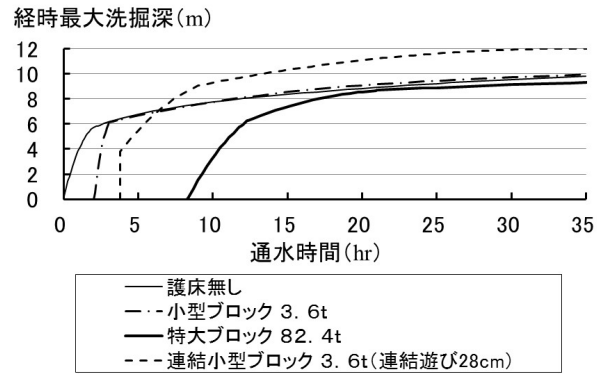
図10 洪水通水後のエプロン直下流洗掘抑止と護床傾斜安定の状況 (ウェブブロック工法)

3章に示した調査等から下流河床低下が問題となる取水堰の現地条件は概ね次の範囲になると明らかにされている (常住ら, 2014; 常住, 2022) - ①河川単位幅当たりの洪水流量 $30\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以下, ②堰高3m以下 (ゲート無しの場合), ③堰上げ水深10m以下 (ゲート付きの可動堰の場合), ④護床勾配1/12以下 (パイピング被害抑制の為の所要条件), ⑤河床勾配1/150以下, ⑥標準的な河床平均粒径6cm, ⑦標準的な下流河床落差3.5m。

この条件下でネット工法に作用する洪水量を繰り返し増減させ、長期的に1) エプロン直下流洗掘を防げるか, 2) 護床傾斜が緩傾斜で保たれるか, 3) 護床直下流洗掘を抑えられるか, を検証した。

実験結果の一例を図10, 図11に示す (常住ら, 2014; 常住, 2022)。堰エプロン直下流に洗掘は発生せず、護床「傾斜部」は当初の緩傾斜で安定している (護床下流端の「水平部」は「急傾斜部」となって安定)。また、護床直下流の流況は「波状流」状態で安定するので、護床直下流の洗掘深も深くならず、下流の護岸・堤防の安全上も好ましい結果となっている。以上の状況はネットに75cm角の穴を開けた場合もほぼ同様で、亀裂箇所の護床面に数十cm程度の局所的な凹みが生じるだけで済む。

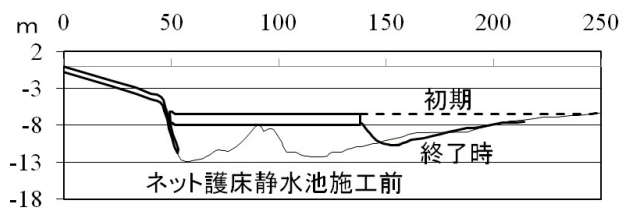
同様の条件で、ネット工法の構造を静水池 (水褥池) や落差工に用いた場合の実験結果を図12に示す (常住, 2022)。護床直下流や堰エプロン直下流では洗掘が全く起きていない。



大型ブロック、連結ブロックはエプロン直下流洗掘を遅延させる効果はあるが、洗掘自体の抑止は困難。ロールマット/ネット工法では既存工法より流量が増した条件でもエプロン直下流洗掘深はゼロ

図11 既存工法とのエプロン直下流洗掘深の比較

●傾斜護床直下流の静水池底面に敷設した場合



●エプロン直下流の段差底面に敷設した場合

(落差工)

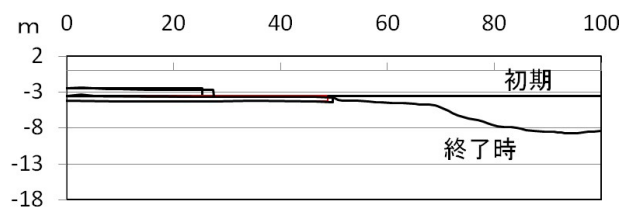


図12 静水池, 落差工へ適用した場合の護床直下流洗掘, エプロン直下流洗掘の抑止状況

表1 定数 a , b の式 ($d/W=0.006$ (左) / 0.02 (右))

流入 $F_r=3.27$ ($z/h_c=0.920\sim 3.45, \eta_{mx}/h_c \leq 9.74$)	流入 $F_r=3.27$ ($z/h_c=0.920\sim 3.45, \eta_{mx}/h_c \leq 9.74$)
河床勾配 $1/150$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 3.3\sim 374$)	河床勾配 $1/150$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 2.9\sim 361$)
$a = 0.1014 \cdot (z/h_c)^2 + 1.7326 \cdot (z/h_c) + 0.5561$	$a = 0.2252 \cdot (z/h_c)^2 + 0.6382 \cdot (z/h_c) + 1.9404$
$b = 0.0185 \cdot (z/h_c)^2 - 0.0688 \cdot (z/h_c) + 0.1727$	$b = -0.0323 \cdot (z/h_c)^2 + 0.1636 \cdot (z/h_c) - 0.0801$
河床勾配 $1/450$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 1.4\sim 355$)	河床勾配 $1/450$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.7\sim 368$)
$a = -0.0776 \cdot (z/h_c)^2 + 2.7672 \cdot (z/h_c) - 0.4486$	$a = 0.0034 \cdot (z/h_c)^2 + 1.8303 \cdot (z/h_c) + 0.6867$
$b = 0.039 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1814 \cdot (z/h_c) + 0.2637$	$b = -0.006 \cdot (z/h_c)^2 + 0.0419 \cdot (z/h_c) + 0.0062$
河床勾配 $1/750$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.8\sim 373$)	流入 $F_r=2.69$ ($z/h_c=0.592\sim 2.22, \eta_{mx}/h_c \leq 6.27$)
$a = 0.1625 \cdot (z/h_c)^2 + 1.5182 \cdot (z/h_c) + 0.6005$	河床勾配 $1/150$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 1.5\sim 294$)
$b = 0.0323 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1374 \cdot (z/h_c) + 0.1994$	$a = 0.3608 \cdot (z/h_c)^2 + 0.9261 \cdot (z/h_c) + 1.0358$
流入 $F_r=2.69$ ($z/h_c=0.592\sim 2.22, \eta_{mx}/h_c \leq 6.27$)	$b = -0.0271 \cdot (z/h_c)^2 + 0.0759 \cdot (z/h_c) + 0.0478$
河床勾配 $1/150$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 1.6\sim 297$)	河床勾配 $1/450$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.9\sim 300$)
$a = 0.1252 \cdot (z/h_c)^2 + 2.1455 \cdot (z/h_c) + 0.2691$	$a = 0.1741 \cdot (z/h_c)^2 + 1.4338 \cdot (z/h_c) + 0.7368$
$b = 0.0522 \cdot (z/h_c)^2 - 0.2125 \cdot (z/h_c) + 0.293$	$b = 0.0163 \cdot (z/h_c)^2 - 0.0395 \cdot (z/h_c) + 0.0782$
河床勾配 $1/450$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 2.3\sim 299$)	流入 $F_r=2.39$ ($z/h_c=0.437\sim 1.64, \eta_{mx}/h_c \leq 3.86$)
$a = 0.8239 \cdot (z/h_c)^2 + 0.059 \cdot (z/h_c) + 1.298$	河床勾配 $1/150$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.9\sim 257$)
$b = 0.0083 \cdot (z/h_c)^2 - 0.0925 \cdot (z/h_c) + 0.2141$	$a = 0.0054 \cdot (z/h_c)^2 + 2.1415 \cdot (z/h_c) + 0.3405$
河床勾配 $1/750$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 1.5\sim 299$)	$b = 0.0117 \cdot (z/h_c)^2 - 0.0773 \cdot (z/h_c) + 0.1459$
$a = 0.6045 \cdot (z/h_c)^2 + 0.6231 \cdot (z/h_c) + 0.7529$	河床勾配 $1/450$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.3\sim 259$)
$b = 0.0176 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1309 \cdot (z/h_c) + 0.2488$	$a = -0.0796 \cdot (z/h_c)^2 + 2.3869 \cdot (z/h_c) + 0.0341$
流入 $F_r=2.39$ ($z/h_c=0.437\sim 1.64, \eta_{mx}/h_c \leq 3.86$)	$b = 0.07 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1807 \cdot (z/h_c) + 0.1554$
河床勾配 $1/150$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.22\sim 183$)	
$a = 0.076 \cdot (z/h_c)^2 + 1.7975 \cdot (z/h_c) + 0.7339$	
$b = -0.0063 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1258 \cdot (z/h_c) + 0.2276$	
河床勾配 $1/450$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.170\sim 251$)	
$a = 0.3068 \cdot (z/h_c)^2 + 1.6542 \cdot (z/h_c) + 0.3784$	
$b = 0.02 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1963 \cdot (z/h_c) + 0.2754$	
河床勾配 $1/750$ ($t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.55\sim 257$)	
$a = 0.8843 \cdot (z/h_c)^2 + 0.501 \cdot (z/h_c) + 0.5802$	
$b = -0.0534 \cdot (z/h_c)^2 - 0.056 \cdot (z/h_c) + 0.2396$	

5. ネット工法の設計

ネット工法の護床「傾斜部」安定は、前述のように「急傾斜部」のフタ化に依るので、それが機能するようにネット目幅を河床平均粒径に応じた目幅に小さくし、「急傾斜部」（当初「水平部」）の長さを下流河床落差等に応じた長さにすれば、河床平均粒径、下流河床落差が変わっても同様の効果が保てる事になる（常住，2022）。

すなわち、「水平部」の長さを下流河床落差等の条件から定まる護床直下流最大洗掘深に応

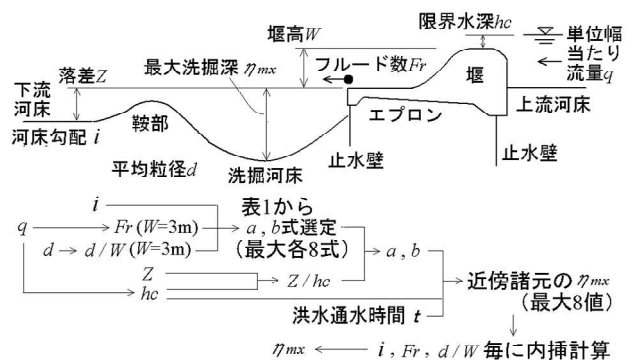


図13 最大洗掘深の推計手順

(詳細は常住ら(2022)参照)

じて長くする必要がある。このための最大洗掘深 η_{mx} の推計式は実験より次のように導出された（常住，2018）。

$$\eta_{mx}/hc = a \cdot (t \cdot (g/hc)^{0.5}/10^3)^b \quad \dots (A)$$

$$hc = (q^2/g)^{1/3} \quad \dots (B)$$

上式中で、 a 、 b ：定数（表1）， t ：洪水通水時間， g ：重力加速度， q ：洪水ピーク流量での河川単位幅当たり流量。他の記号，推計手順は図13を参照。

この推計式の精度は±10%以内に収まる（図14）。この推計式に基づくネット工法の水理設計方法は常住・関谷ら（2022）にまとめられている。ロールマット工法の機能メカニズムもネット工法と同じなので推計式，水理設計方法もネット工法と同様である。

6. おわりに

ネット工法は従来の連結護床に吸い出し防止材としてネットを組み合わせたもので、既存の部材で構築でき導入が容易である。万一問題があっても、従来の連結護床工法より悪くなることはない。設計・施工を違えずに現場適用し、適切な分析を行い、更なる改良を進めていただきたい。

参考文献

- 常住直人ら（2009）応用生態工学，12（2）：131-140.
- 常住直人・高木強治（2010）2010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.
- 常住直人ら（2014）河川技術論文集，20：301-306.
- 常住直人ら（2016）農村工学研究所技報，218：99-106.
- 常住直人（2018）農業農村工学会論文集，307：II 63-II 68.
- 常住直人（2022）河川技術論文集，28：415-420.

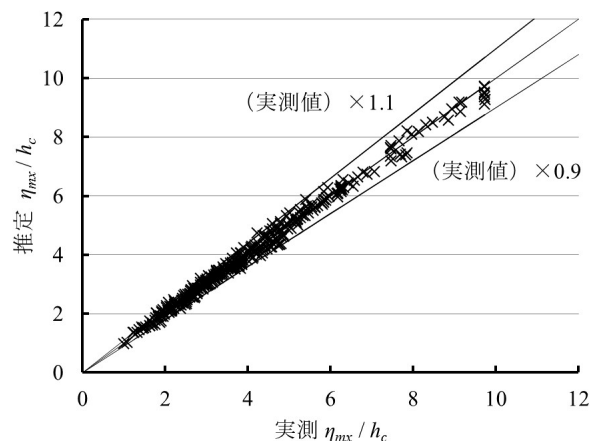


図14 最大洗掘深の実測と推計値の比較

- 常住直人・関谷勇太（2022）2022年度農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨集：21-24.
- 中村優ら（2012）水土の知（農業農村工学会誌），80（10）：40-41.
- 農林水産省農村振興局（2008）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.
- 農林水産省農村振興局（2011）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.

（2023. * . * * 受付）

〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6

Naoto Tsunesumi : Ripraps with cobweb blocks, gravel mats of weirs for protection against flood disasters