

# 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

常住直人

農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門, 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

## 要 旨

利水の便から河川中上流域に多い農業取水堰では、経年的な下流河床低下により堰直下に落差を生じやすい。このため堰直下が洗掘されやすく、護床工の傾斜化、流失、機能不全を来しやすく、洗掘域の拡大によりエプロン陥没など堰本体被災を起こすこともある。堰本体被災に至るような大規模洗掘は低頻度の大洪水時に生じるが、その対策に資するべく、本研究では下流河床低下が問題となる農業取水堰の現地諸元を想定して、大洪水時の堰直下洗掘メカニズム、洗掘規模をフルード相似に基づく水理実験により検討した。その結果、洗掘は、堰落下流が波状流、潜り噴流の流況を交互に繰り返し、互いの流況での洗掘域を埋め戻し合いつつ、最大洗掘深を上下動させながら漸次進行していくことが明らかとなった。この経時最大洗掘深は実験式により $\pm 10\%$ 以内の精度で推定出来た。

キーワード：洗掘，落下流，河床低下，堰，護床工

## 1. はじめに

農業取水堰の多くは、圃場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、治水上の計画河床へのすり付け等のため、河床浚渫が成されることが多く、この河床低下の上流波及により多数の堰で築造当初フラットだった護床の傾斜化や、堰下流エプロン・護床間の段差発生が見られる（常住ら，2009）。

このような場合、堰上下流の水位差が大きくなるので堰直下の洗掘（根入れ露出など）が発達しやすく、そこからパイピングやエプロン損壊など構造上の問題も起きやすい（常住，2016）。下流河床低下の堰側波及は常時や中小洪水では緩慢で、エプロン直下の洗掘もひどくならず、これらの問題は低頻度の大洪水時に一気に表出することが最近の研究で分かっているが（常住ら，2014）、それはごく稀に起きる事象なので、現状では特段の対策が取られていない。低頻度ゆえ堰本体が損壊を受けた事例は少なく、護床工が大被害を受ける度に段状もしくは傾斜形状のエプロン延長改修で対応してきたのが実状で（常住，2016；三輪・高井，2011）、堰本体被害を未然に防いだり、フェイルセーフ化を図る等の方策は取られていない。

大規模災害を防いだり、フェイルセーフ化するには、低透水性のマット等を護床ブロック底面に敷設したり（常住ら，2016）、エプロン下流端の根入れを深くする等の方策が考えられるが、いずれの工法を採るにせよ、その設計には低頻度大洪水時のエプロン直下洗掘を知る必要がある。このような設計に必要な落下流での洗掘深さは、床固工や砂防堰堤などで従前、明らかにされているものの（阿部ら，

1987；諸橋・高橋，1958；林，1974）、下流河床低下が問題となっている農業取水堰の現地条件では十分解明されていない。そこで本研究では下流河床低下が問題となる農業取水堰の現地条件を想定して、落下流での経時洗掘深さを実験的に解明することとした。以下、本論文では、特に断らない限り、現地換算で表記する。

## 2. 実験方法

### 2.1 相似則と実験水路

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縮尺 1/70.5 の二次元移動床模型（フルード相似）で実験を行った。実験砂にはほぼ均一粒径の天然珪砂を用い、実験時の水温は 15～25℃に設定した。これらの実験中にはリップルの発生は見られなかった。実験水路は Fig. 1 に示すとおりである。

### 2.2 実験条件

下流河床が低下した堰直下の洗掘深に影響する因子は、堰高、単位幅当たり流量、下流河床落差、河床粒径、河床勾配、通水時間である。これらの実験条件は、下流河床低下が問題となる農業取水堰の現地諸元に基づいて次のように設定した（常住・高木，2010；国土交通省河川局，2009；山本，1988；農業土木学会，1990）。このうち、単位幅当たり流量、通水時間は、洗掘深が大きくなる低頻度大洪水時の洪水波形（大流量かつ長時間持続）を想定して、堰の計画高水流量を概ね網羅するように設定し、かつ極力長時間通水することとした。

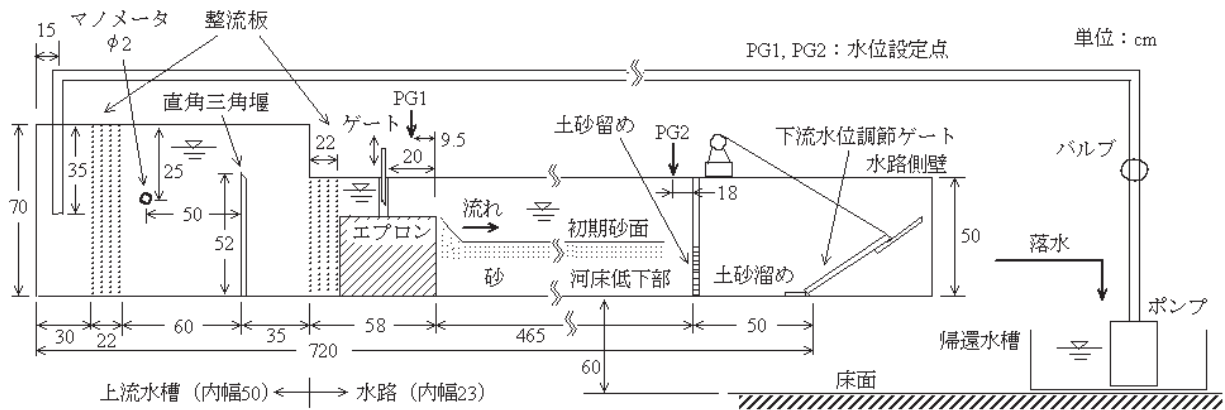


Fig. 1 実験水路 (模型寸法)  
A channel for experiments (model scale)

堰高  $W$ : 3 m

河床勾配  $i$ : 1/150, 1/450, 1/750

河床平均粒径 (60%粒径)  $d$ : 1.86, 6.11 cm (模型寸法で各々, 0.26, 0.87 mm.  $D_{84}/D_{16}$  は各々, 1.20, 1.72)

単位幅当たり流量  $q$ : 10.0, 19.5, 30.6  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  (Fig. 1 中, PG1 での流入  $F_r$  数は各々, 3.27, 2.69, 2.39)

下流河床落差  $z$ : 2, 3.5, 5, 7.5 cm

通水時間  $t$ : 48 h

給砂: 無し

また, 低下河床側の水深 (Fig. 1 中, PG2 での水深) は次の河川  $F_r$  数に関する (1) 式 (川合, 1975; 農林水産省構造改善局, 1979) から設定した. これより下流端水深は 2.33 ~ 7.85 m (模型寸法で 3.30 ~ 11.13 cm) となる.

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

実験では, 堰下流エプロン直下まで下流側河床低下が波及した状態 (上記条件の下流河床落差が付いた状態) を初期砂面形とし, エプロン下流端から下流河床までは現地水中安息角相当の  $42^\circ$  (河村, 1982) の砂面傾斜を付けた.

### 2.3 計測方法

流量計測は直角三角堰, 水位計測は 1/10 mm 読みポイントゲージ, 砂面計測は水路側面 (左岸) からのビデオ画像解析により行った. 右岸側の最大洗掘深が左岸側より深くなる場合は, 左右岸の最大洗掘深さをスケール計測し, 両者の平均値を最大洗掘深さとした.

実験ではまず流量, 流入水深を設定し, 次いで下流水深が所定値に合った時点を以て実験開始時刻とした.

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 エプロン直下洗掘の状況

エプロンからの落下流は潜り噴流, 波状流の流況を交互に繰り返した. 前者ではエプロン近傍に, 後者ではより下流側に最大洗掘点が生じ, 流況遷移により互いの洗掘域を埋め戻し合いながら, 洗掘が漸次進行していった (Fig. 2). 波状流ではナップ下方と上方に逆方向の循環流があり, 下方循環流で土砂が巻き上げられエプロン直下砂面が緩傾斜化していくが, それに伴い下方循環流の領域が縮小し上

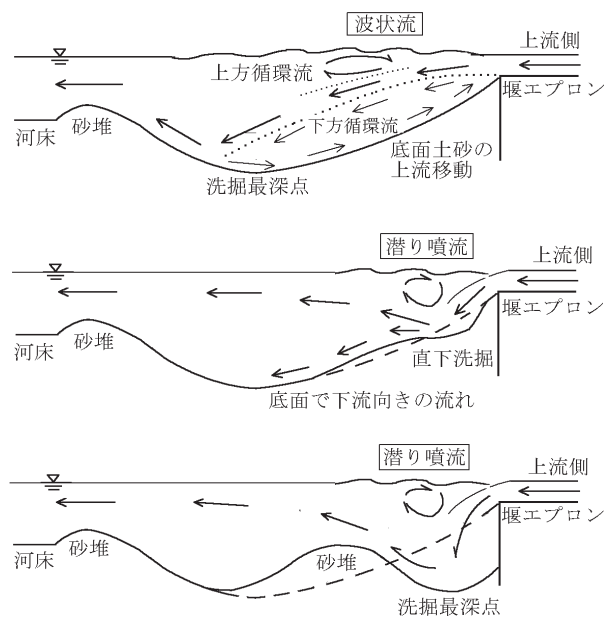


Fig. 2 洗掘域の流況変化  
Flow regime transition in scouring area

方循環流とのバランスが崩れると, ナップが下向きに押しされ, 潜り噴流に変化していく. 潜り噴流ではナップは不安定に上下に動くが, 潜り噴流によりエプロン直下の土砂が下流側に押し出されると, 下方循環流が再度拡大して, ナップの向きは上方に動き再び波状流に戻っていく. しかし小流量な場合等では, 潜り噴流で押し出された土砂は下流遠方に流されず, ナップ直下に厚く堆積するので, これによりナップの上方移動が阻害されて潜り噴流の流況が長期化しやすい.

このように両流況の発生割合やいずれの洗掘深が深くなるかは実験条件により異なるが, 概して通水後の経過時間が長くなり, 洗掘域, 洗掘深が大きくなるほど, 下方循環流の縮小は起きにくくなって潜り噴流は生じにくくなる. また, 両流況は互いの洗掘域を埋め戻し合いながら遷移を繰り返すので, 最大洗掘深は一方向的に深くなっていくわけではなく, 増減を繰り返しつつ漸次深くなっていく.

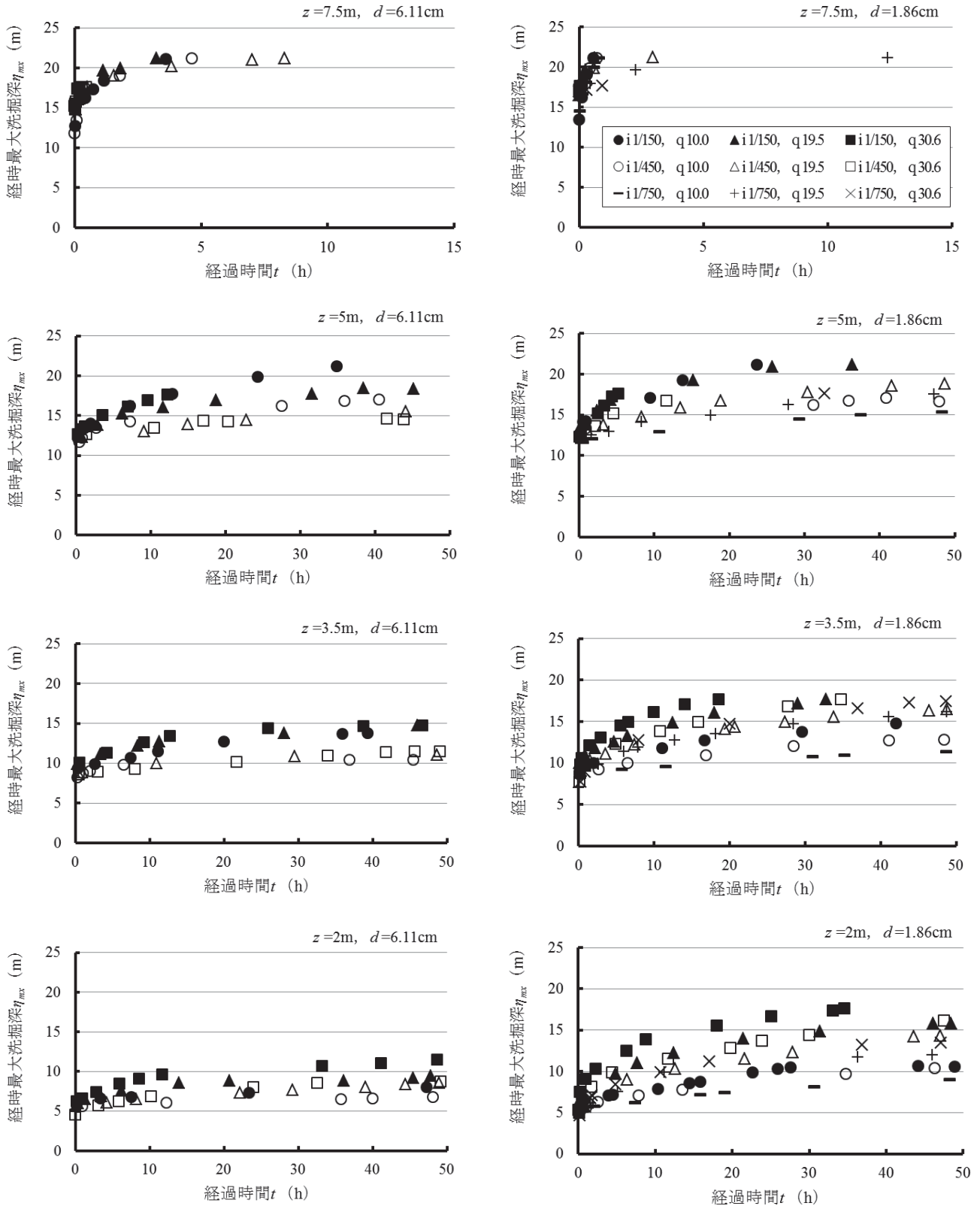


Fig. 3 経過時間と最大洗掘深  
Maximum scouring depth right downstream of an apron for discharging (prototype scale)

### 3.2 経時最大洗掘深

経時最大洗掘深は Fig. 3 のようになる。波状流では最大洗掘点が下流側に動き、エプロン直下には堆積が生じるが、

減水時にナップが垂れていくとエプロン直下の堆積域は掘れ、最大洗掘点のエプロン直下に移動し、その深さも波状流での最大洗掘深程度になる。減水時の洗掘域の埋め戻し

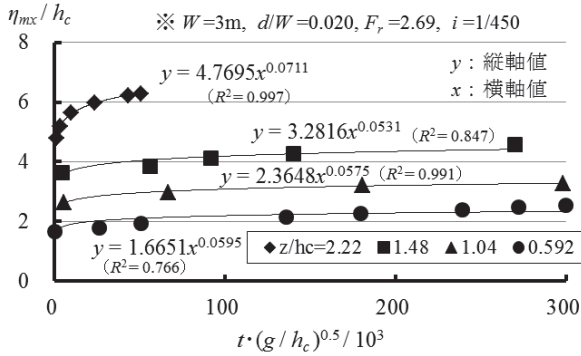


Fig. 4  $\eta_{mx}/h_c$  と  $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3$  の関係 (一例)  
Relation between  $\eta_{mx}/h_c$  and  $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3$

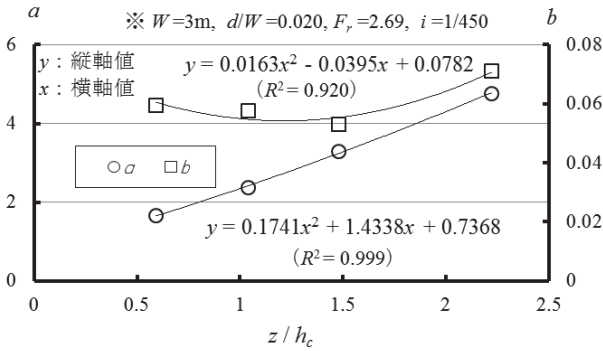


Fig. 5  $z/h_c$  と  $a, b$  の関係 (一例)  
Relation between  $z/h_c$  and  $a, b$

度合い, 最大洗掘深の低減度合いはピーク洪水量と洪水継続時間に左右されると思われる, この間の平均的な単位幅当たり流量が大きければ, 減水時のエプロン近傍の洗掘深も大きくなると推測される. したがって, 波状流での最大洗掘深もエプロン直下の根入れ深さ等を設計する場合には重要と考えられる.

そこで, Fig. 3 では波状流, 潜り噴流を区別せずに各条件でのエプロン直下洗掘域での最大洗掘深の経時変化を整理した. エプロン直下の最大洗掘深は, 前述 3.1 のように増減しつつ漸次深くなっていくが, Fig. 3 の最大洗掘深はこの増減の最大値をトレースしたものである.

Fig. 3 より経時最大洗掘深  $\eta_{mx}$  は, 落差  $z$ , 河床勾配  $i$  が大きいほど, 粒径  $d$  が小さいほど大きくなる傾向が見られるが, 単位幅当たり流量  $q$  では一定の傾向が見られない. これは,  $q$  によりナップ角度, 下流水位が変化するためと思われる ( $q$  低下でナップが垂れ, 下流水位も低下).

また, 今回検討した農業取水堰の現地条件の範囲では, この経時最大洗掘深に比較的影響が大きいのは, まず落差  $z$  であり, 粒径  $d$ , 単位幅当たり流量  $q$  による経時洗掘深の差異は高落差ほど小さくなっていることが分かる. これは, 高落差なほど,  $z$  に比し  $d, q$  の影響が相対的に小さくなるためと考えられる. 逆に河床勾配  $i$  の影響は低落差ほど小さくなっているが, これは, 低落差ほど河床勾配 (下流水深) に依らずエプロン直下で落下水脈が潜没しやすいためであろう. 低落差では下流水深に影響しない  $d$  の影響が  $i$ ,

Table 1  $a, b$  の式と適用範囲 ( $d/W=0.006$ )

Formulas of $a, b$ and these suitable range in $d/W=0.006$	
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 ( $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 3.3 \sim 374$ ) $a = 0.1014 \cdot (z/h_c)^2 + 1.7326 \cdot (z/h_c) + 0.5561$ $b = 0.0185 \cdot (z/h_c)^2 - 0.0688 \cdot (z/h_c) + 0.1727$
河床勾配 1/450 ( $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 1.4 \sim 355$ )	$a = -0.0776 \cdot (z/h_c)^2 + 2.7672 \cdot (z/h_c) - 0.4486$ $b = 0.039 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1814 \cdot (z/h_c) + 0.2637$
河床勾配 1/750 ( $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.8 \sim 373$ )	$a = 0.1625 \cdot (z/h_c)^2 + 1.5182 \cdot (z/h_c) + 0.6005$ $b = 0.0323 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1374 \cdot (z/h_c) + 0.1994$
流入 $F_r=2.69$ ( $z/h_c=0.592 \sim 2.22, \eta_{mx}/h_c \leq 6.27$ )	河床勾配 1/150 ( $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 1.6 \sim 297$ ) $a = 0.1252 \cdot (z/h_c)^2 + 2.1455 \cdot (z/h_c) + 0.2691$ $b = 0.0522 \cdot (z/h_c)^2 - 0.2125 \cdot (z/h_c) + 0.293$
河床勾配 1/450 ( $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 2.3 \sim 299$ )	$a = 0.8239 \cdot (z/h_c)^2 + 0.059 \cdot (z/h_c) + 1.298$ $b = 0.0083 \cdot (z/h_c)^2 - 0.0925 \cdot (z/h_c) + 0.2141$
河床勾配 1/750 ( $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 1.5 \sim 299$ )	$a = 0.6045 \cdot (z/h_c)^2 + 0.6231 \cdot (z/h_c) + 0.7529$ $b = 0.0176 \cdot (z/h_c)^2 - 0.1309 \cdot (z/h_c) + 0.2488$
流入 $F_r=2.39$ ( $z/h_c=0.437 \sim 1.64, \eta_{mx}/h_c \leq 3.86$ )	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 ( $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3 = 0.55 \sim 257$ )	$a = 0.8843 \cdot (z/h_c)^2 + 0.501 \cdot (z/h_c) + 0.5802$ $b = -0.0534 \cdot (z/h_c)^2 - 0.056 \cdot (z/h_c) + 0.2396$

$q$  より高まる傾向が見られる.

### 3.3 経時最大洗掘深の推定式

今回の実験結果を無次元値  $\eta_{mx}/h_c$  ( $\eta_{mx}$ : 経時最大洗掘深,  $h_c$ : 限界水深),  $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3$  ( $t$ : 経過時間,  $g$ : 重力加速度) で整理すると Fig. 4 のようになる.

また Fig. 4 中,  $\eta_{mx}/h_c$  と  $t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3$  の回帰式 ( $y=a \cdot x^b$ ) における  $a, b$  と  $z/h_c$  の関係を整理すると Fig. 5 のようになる.

Fig. 5 中の  $a, b$  と  $z/h_c$  の回帰式と Fig. 4 中の回帰式より, 経時最大洗掘深は次のようになる.

$$\eta_{mx}/h_c = a \cdot (t \cdot (g/h_c)^{0.5}/10^3)^b \quad (2)$$

$$a = 0.1741 \cdot (z/h_c)^2 + 1.4338 \cdot (z/h_c) + 0.7368 \quad (3)$$

$$b = 0.0163 \cdot (z/h_c)^2 - 0.0395 \cdot (z/h_c) + 0.0782 \quad (4)$$

このような処理を各実験ケースについて行くと, 各諸元に対する経時最大洗掘深推定式は結局, Table 1, Table 2 のようにまとめられる.

この推定式での推定値と今回の実験結果を比較すると Fig. 6 となり, 本式により概ね  $\pm 10\%$  の範囲で経時最大洗掘深を推定しうることが分かる.

**Table 2**  $a, b$  の式と適用範囲 ( $d/W=0.020$ )

Formulas of  $a, b$  and these suitable range in  $d/W=0.020$

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 $1/150$ ( $t\cdot(g/h_c)^{0.5}/10^3=2.9\sim 361$ )
$a=0.2252\cdot(z/h_c)^2+0.6382\cdot(z/h_c)+1.9404$
$b=-0.0323\cdot(z/h_c)^2+0.1636\cdot(z/h_c)-0.0801$
河床勾配 $1/450$ ( $t\cdot(g/h_c)^{0.5}/10^3=0.7\sim 368$ )
$a=0.0034\cdot(z/h_c)^2+1.8303\cdot(z/h_c)+0.6867$
$b=-0.006\cdot(z/h_c)^2+0.0419\cdot(z/h_c)+0.0062$
流入 $F_r=2.69$ ( $z/h_c=0.592\sim 2.22, \eta_{mx}/h_c\leq 6.27$ )
河床勾配 $1/150$ ( $t\cdot(g/h_c)^{0.5}/10^3=1.5\sim 294$ )
$a=0.3608\cdot(z/h_c)^2+0.9261\cdot(z/h_c)+1.0358$
$b=-0.0271\cdot(z/h_c)^2+0.0759\cdot(z/h_c)+0.0478$
河床勾配 $1/450$ ( $t\cdot(g/h_c)^{0.5}/10^3=0.9\sim 300$ )
$a=0.1741\cdot(z/h_c)^2+1.4338\cdot(z/h_c)+0.7368$
$b=0.0163\cdot(z/h_c)^2-0.0395\cdot(z/h_c)+0.0782$
流入 $F_r=2.39$ ( $z/h_c=0.437\sim 1.64, \eta_{mx}/h_c\leq 3.86$ )
河床勾配 $1/150$ ( $t\cdot(g/h_c)^{0.5}/10^3=0.9\sim 257$ )
$a=0.0054\cdot(z/h_c)^2+2.1415\cdot(z/h_c)+0.3405$
$b=0.0117\cdot(z/h_c)^2-0.0773\cdot(z/h_c)+0.1459$
河床勾配 $1/450$ ( $t\cdot(g/h_c)^{0.5}/10^3=0.3\sim 259$ )
$a=-0.0796\cdot(z/h_c)^2+2.3869\cdot(z/h_c)+0.0341$
$b=0.07\cdot(z/h_c)^2-0.1807\cdot(z/h_c)+0.1554$

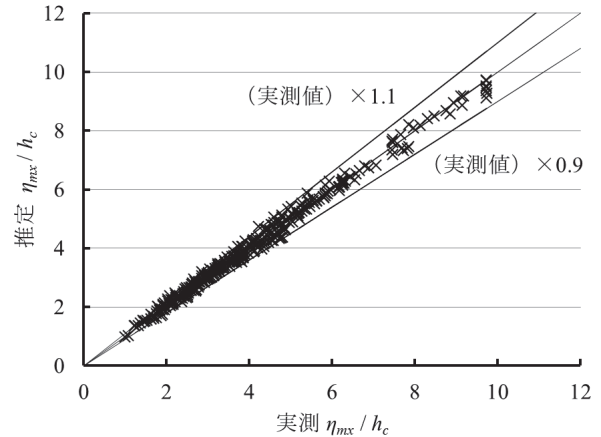
#### 4. おわりに

本研究では、下流河床低下が問題となる農業取水堰（堰高 3m）の現地条件を対象に、そのエプロン直下の経時最大洗掘深を二次元移動床水理実験により検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

- 1) エプロン直下の洗掘域では流況が波状流、潜り噴流と交互に変化し、互いの流況での洗掘域を埋め戻しつつ、かつ最大洗掘深を上下させつつ洗掘域が漸次拡大していく。
- 2) 潜り噴流は、堰からの落下流のナップ上方、下方の循環流のバランスの崩れから起き、ナップ挙動は不安定となる。また、ナップ下方の循環流が縮小するので最大洗掘点はエプロン近傍になる。
- 3) 波状流では上記の逆となり、長時間経過し洗掘域が大きく拡大した後は、波状流卓越となる。しかし、この場合も減水時にはナップの垂れにより最大洗掘点がエプロン近傍に移動する。
- 4) 経時最大洗掘深に大きく影響するのは落差でありその推定式として(2)～(4)式及び **Table 1**, **Table 2** を導出した。本式により概ね $\pm 10\%$ の範囲で経時最大洗掘深を推定しうる。

今回の検討は二次元で成されているので、現地の三次元流況で局所的に単位幅流量が大きくなる箇所では、推計値より洗掘深が深くなりうる。これに対しては個々の現地での三次元流況解析が必要となる。

今後は可動堰など低堰高での経時最大洗掘深の解明や洗掘抑制工法の検討を行っていきたい。



**Fig. 6**  $\eta_{mx}/h_c$  の実測値と推定値の比較

Comparison between experimental and calculated  $\eta_{mx}/h_c$

謝辞：実験実施に当たっては当機構つくば技術支援センターの諸氏より実験施設の製作にご協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

#### 引用文献

- 阿部宗平, 下東久巳, 福本晃久 (1987)：床固工水叩き下流の局所洗掘と護床工の形状, 土木技術資料, **29**(5), 33-38.
- 林 拙郎 (1974)：砂防ダム下流部における洗掘深さについて—均一粒径の場合—, 新砂防, **91**, 10-19.
- 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.
- 国土交通省河川局 (2009) (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/jigyuo\\_keikaku/gaiyou/seibi/index.html](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyuo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html) >
- 河村三郎 (1982)：土砂水理学 1, 森北出版, 10-11.
- 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.
- 諸橋丈夫, 高橋正佑 (1958)：砂防ダム洗掘試験について, 新砂防, **31**, 7-13.
- 農業土木学会 (1990)：農業土木工事図譜 第 4 集 頭首工編, 農業土木学会, 13-138.
- 農林水産省構造改善局 (1979)：土地改良事業計画設計基準 設計頭首工, 農業土木学会, p.83.
- 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魚類移動へ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, 第 61 回農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨, 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.
- 常住直人, 高木強治, 島崎昌彦, 吉永育生 (2016)：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—, 農村工学

## Experimental Study on Scouring Depth by Free Overfall Downstream of Irrigation Weirs

TSUNESUMI Naoto

*Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization, 2-1-6 Kannondai,  
Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8609, JAPAN*

### Abstract

Many weirs for irrigation are distributed in upstream area of river fans. They have risks of piping and structural unstableness by their downstream scouring from downstream riverbed declination that occurred by riverbed excavation. Severe damage of weirs is caused by less frequent large floods. It is required to make maximum scouring depth right downstream of the weir apron through less frequent large floods clear for the protection of weir from damages caused by the large floods. In this paper, the scouring depth and mechanism in site conditions of irrigation weirs was evaluated by two-dimensional hydraulic model experiments. Scouring proceeded with fluctuated scouring depth and flow regimes between wavy flow and submerged jet flow. Temporal changes in maximum scouring depth was calculated within an error of 10% by proposed experimental formulas in this paper.

**Key words** : *Scouring, Free overfall, Riverbed declination, Weir, Riprap*