

# 頭首工エプロンの上流端形状と局所洗掘の関係

誌名	農業工学研究所技報
ISSN	09153314
著者名	常住,直人 桐,博英 関谷,剛
発行元	農林水産省農業工学研究所
巻/号	189号
掲載ページ	p. 27-44
発行年月	1994年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 頭首工エプロンの上流端形状と局所洗掘の関係

常住直人\*・桐 博英\*・関谷 剛\*

### Study on Local Scour with the Shape of Upstream Apron of Headworks

by Naoto TSUNESUMI・Hirohide KIRI・Takeshi SEKIYA

#### 目 次

I 緒 言	27	3 エプロン上流側の平均河床高・平均水深の変化	34
II 実験方法	28	4 エプロン上流側の砂面形の変化	35
III 検討結果	30	5 その他	35
1 エプロン直上流の砂面変動の状況	30	IV 結 言	35
2 洗掘深の変化	32	Summary	38

#### I 緒 言

頭首工のセキ本体には構造的な安定、パイピングに対する安全性が求められる。したがって、頭首工上流側は局所的な洗掘に対して安全な構造とする必要がある。このことから従来、頭首工の設計基準では、エプロンの上流端を1:3の逆勾配にして根入れさせる（以下「1:3形状」）ことが推奨されている<sup>1)2)</sup> (Fig. 1)。

しかし、その根拠は、具体的な実験資料が極めて乏しく、明確でない。現況の基準は、幾つかの現地の水理模型実験での試行錯誤を通じ、経験的に定められていったとみられる。具体的には、犬山頭首工を始めとする各種水理模型実験結果<sup>3)4)5)</sup>、取水口への土砂流入防止対策に関する水理模型実験の結果<sup>6)7)</sup>をもとにし、頭首工敷高の揚床<sup>8)9)</sup>も考慮（1:3形状では揚床設計の際、流入損失

$h_r = 0$ とみなせる）して定められたと思われる。

一般に河川構造物周辺の局所洗掘の問題として、よく取り上げられるものには、橋脚回りの局所洗掘やセキ下流の洗掘など<sup>10)11)</sup>がある。しかるに、エプロン上流端の洗掘については、特に検討されていないのが実情である。

実施工の点から言えば、エプロン上流端でそのまま直（1:0）に根入れさせる<sup>12)</sup>（以下「直形状」）ほうが、1:3の逆勾配で突き延ばして根入れさせるよりも経済的である（Fig. 1）。また、現在、頭首工については洗掘よりむしろ敷上堆砂が問題となっている事例が多い。これは治水上の制約から、頭首工敷高を、現況河床よりかなり掘り下げた計画河床標高に設定<sup>13)14)</sup>しているからである。

ただし、河川管理施設等構造令<sup>14)</sup>（以下「構造令」）でいうところの、“山間狭窄部”に造られる頭首工に関しては治水上の制約が緩い。このようなところでは計画河床標高が定められていないこともままある。このケースで頭首工敷高を現況河床標高と同程度とした場合には、エプロン上流端の局所洗掘を考慮した設計が必要だろう。

以上のことから、ここではエプロン上流端を直形状、

\* 水工部水路工水理研究室

平成5年9月30日受理

キーワード：スクリーン、損失水頭、損失係数、設計手法、障害物による損失

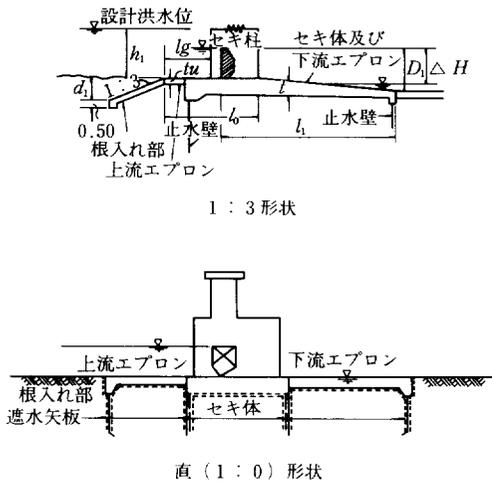


Fig. 1 エプロン形状事例

1 : 3 形状とした場合について、局所洗掘の有無、程度を水理実験により検討した。なお、比較のため、双方の中間的な形状として 1 : 1 のケースも行った。

実験模型の製作にあたっては当所業務管理課の方々に御尽力いただいている。ここに記して謝意を表します。注記、今回の実験では、中小規模の河床形態が共存する状態だった。したがって、本報告では“砂堆”と“砂州”を特に区別せず“砂堆”という語で表現した。

II 実験方法

ここでは、頭首工構成各部 (Fig. 2) の中で、勾配がきつく局所洗掘が最も起こりやすいと考えられる土砂吐部を対象に実験を行った。実験水路内には単純化した土砂吐形状を再現した (Fig. 3)。実験条件は次のとおり。(実験条件)

エプロン上流端形状一直, 1 : 3, 1 : 1 形状 (3 ケース)

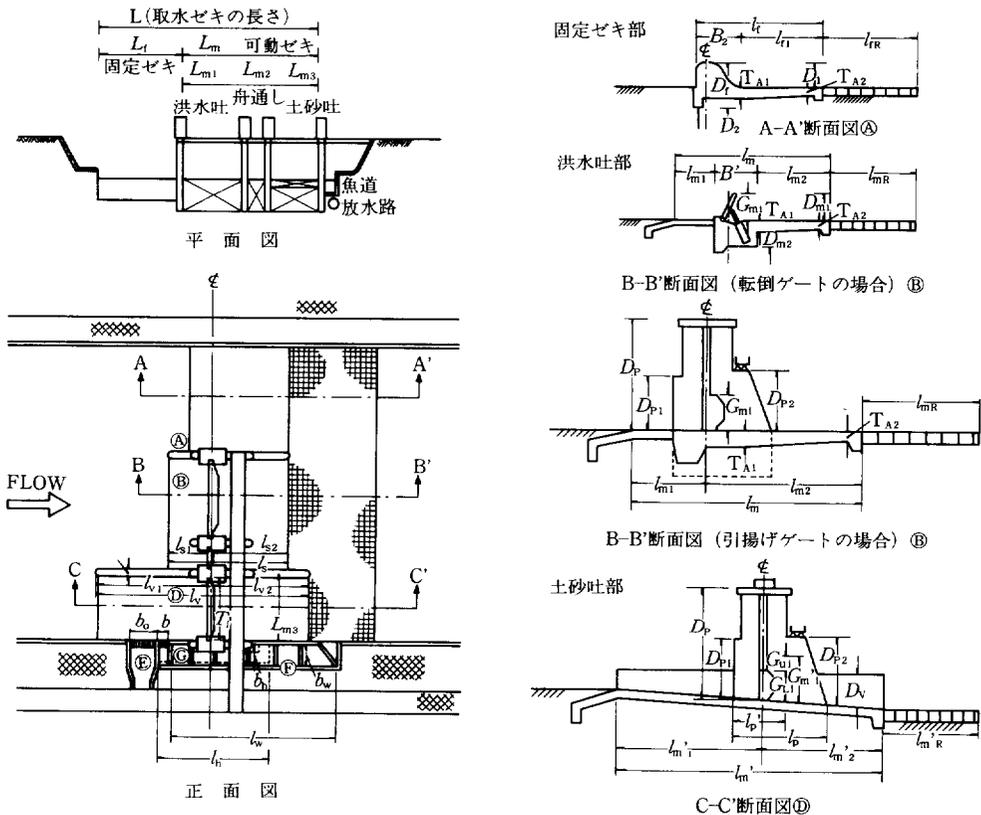


Fig. 2 頭首工標準図

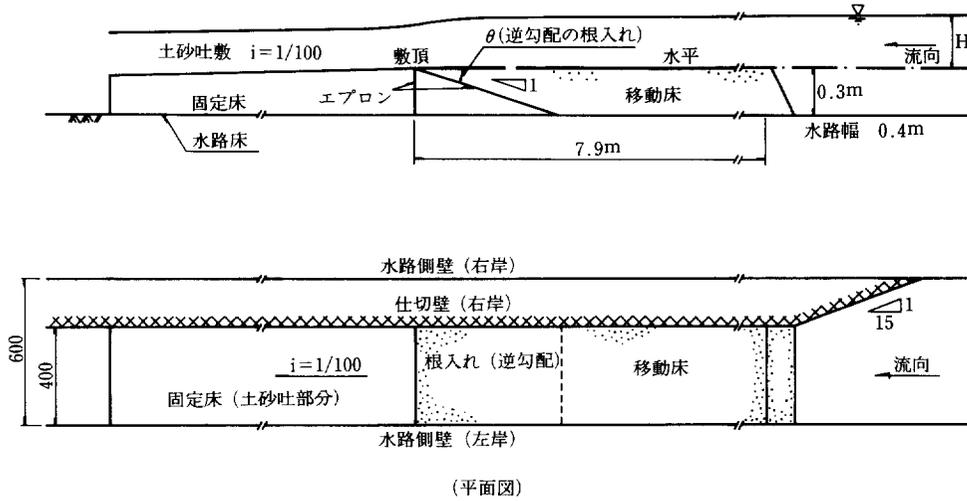


Fig. 3 模型の配置

初期砂面—エプロンの上流にエプロン敷頂と同じ高  
 さいで砂を水平に敷いた。

実験砂中央粒径—約0.4mm

(粒度分布は Fig. 4 のとおり)

実験流量—21 l/s

送水時間—20~35時間

上流からの給砂—なし

以上の実験条件では、どのケースでもエプロン上流端  
 に限界水深が発生した。

計測項目、計測方法については後述Ⅲ、5「その他」  
 の項を参照のこと。

注記. 1) 施設の関係上、実験中の流量は±0.5 l/s程  
 度、変動した。また、1:1のケースについ  
 ては、設定がうまくいかず、他の2ケースと  
 比べ流量が若干大きめ(約21.5 l/s)となっ  
 た。

2) 中央粒径は通過質量百分率の50%径( $d_{50}$ )。平  
 均粒径と異なるが、ここでは代用した。

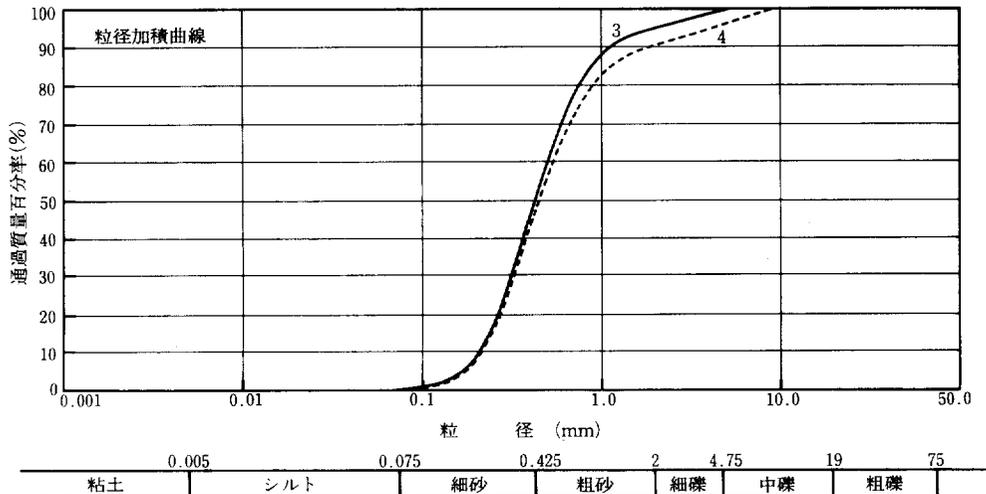


Fig. 4 粒度分布

### III 検討結果

#### 1 エプロン直上流の砂面変動の状況

##### a 河川の掃流力が強い状況下でのエプロン直上流の砂面変動

Fig. 5 にエプロン直上流の流況、洗掘状況を示す。直形状では、送水後、河床変動の激しい間は Fig. 5 に示すように若干の洗掘が見られた。これに対し、1 : 3 形状ではほとんど局所洗掘は見られず、河床になじみの良い状態だった。

直形状……直形状の洗掘状況を模式的に示すと Fig. 6 のようになる。

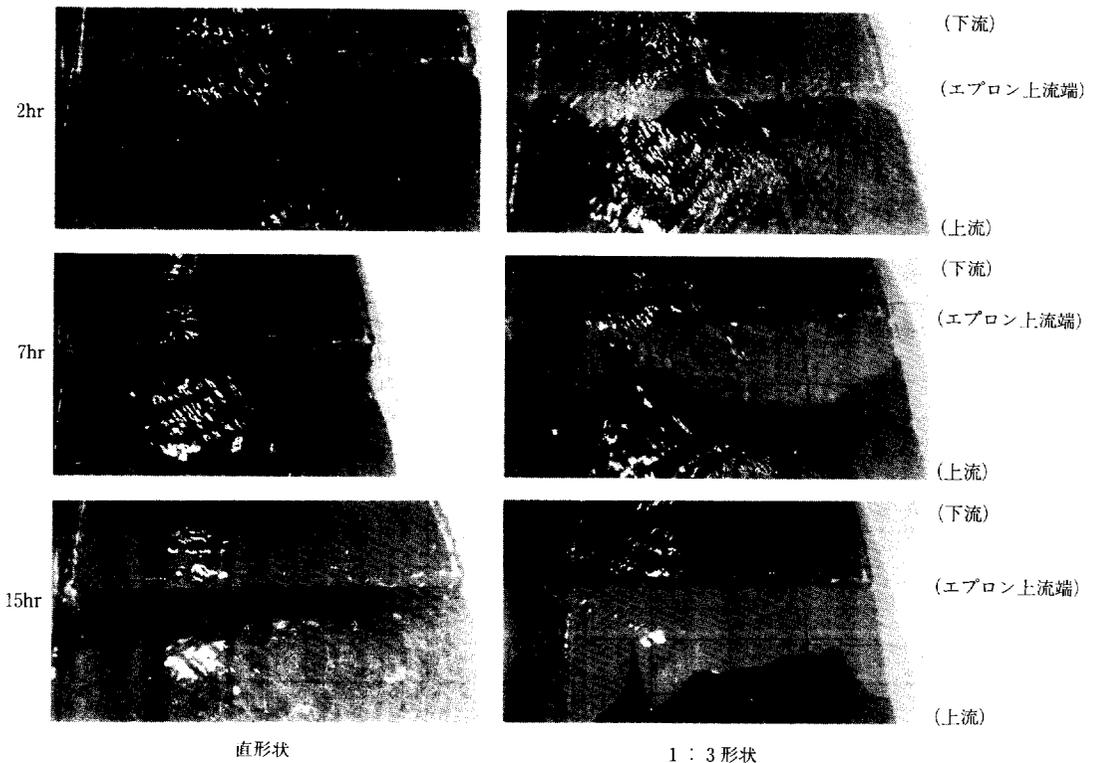
直形状の局所洗掘は、砂堆の谷がエプロン上流面に進行してきた時に、その谷部と、露出したエプロン上流面の間に発生する縦渦により生じたものである。局所洗掘の深さは進行してくる砂堆の谷底より深いものであるが恒常的でない。ある程度、掘れるとそこが死水域となって、渦も弱まり徐々に埋め戻される。次に砂堆の山がき

た時には完全に埋め戻されてしまう。つまり、直形状のエプロン直上流砂面高は、砂堆の谷→山→谷→……の進行に伴って、洗掘（砂堆の谷より深い）→埋め戻し（砂堆の山と同高の砂面高）→洗掘→……という経過を辿る。

実験条件は上流からの給砂なしという厳しいものである。このことと実験結果（局所洗掘は起きるが間欠的なものにすぎない）を併せみると、直形状の局所洗掘が現地でどの程度問題となるかは疑問である。

なお、渦の発生頻度、強さは、縦断方向の砂面変化だけでなく横断方向の河床形状にも影響される事が観測された。すなわち、砂堆が交互もしくは複列となると、水路横断方向に凹凸ができる。その際、両側を凸部、下流を露出したエプロン上流面で挟まれた凹部で特に渦の勢いが激しかった。

渦の発生が盛んに見られたのは、砂堆の発達し始めた送水開始後30min～5 hr 位までであった。河床が全体に低下し、水深が増して水路内流速がダウンしてくると、



注)エプロン上流面上の横線は深さ2.5cm スパン  
Fig. 5 エプロン上流での砂面変化

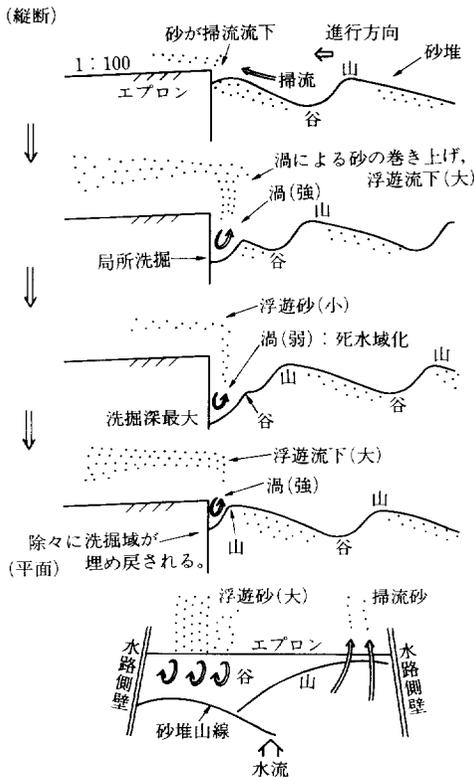


Fig. 6 直(1:0)形状でのエプロン上流の砂面の変化

横断方向に凹凸があっても渦はほとんど見られなくなった。

1:3形状……1:3形状のエプロン直上流の砂面変動の状況を Fig. 7 の模式図に示す。

1:3形状では、直形状と異なり、砂堆の谷が進行してきても局所洗掘は生じなかった。エプロン直上流の砂面高は、砂堆の谷の進行に伴ってそれと同高に低下するだけであった。直形状のように渦が巻くこともなく、エプロン上流面では常に掃流状態が維持されていた。

進行してきた砂堆の山は、この掃流で流されて、エプロン斜面上を這い上がる。これによりエプロン上流面の砂面形状は、その上流の河床地形に対しなじみのよいものとなっていた。1:3形状のエプロン直上流砂面高は、砂堆の谷→山→谷→……の進行に伴って、砂堆の谷と同標高→砂堆の山より高い砂面高(砂堆の山の這い上がりにより)→砂堆の谷と同標高→……という経過を辿る。

1:1形状……1:1形状では直形状と1:3形状の両方の特性が見られた。すなわち、局所洗掘と砂堆の這い上がりもともに生じた。

### b 河川の掃流力が弱い状況下でのエプロン直上流の砂面変動

いずれのケースでも、さらに時間がたち、水路内全体で河床が低下(水深が増加)して、流砂が静止状態に近づくと、エプロン直上流の砂面高は河床波高と一致するようになった。すなわち局所洗掘も砂堆の這い上がりもおこらず、エプロン直上流の砂面高は進行してくる砂堆の山、谷の高さに追従した。

### c エプロン直上流の砂面変動への上流側河床条件の影響

直形状と1:3形状のエプロン直上流砂面(洗掘)形状の違いには、エプロン直上流の局所的な流況の他に、上流部からエプロン直上流への流入砂量も当然影響する。この流入砂量も結局は“エプロン上流端形状”→“上流流況”→“上流からの流入砂量”と、エプロン直上流局所流況と同様、エプロン上流端形状に起因するものである。

本実験で見える限り、初期の局所洗掘の激しい間は、直形状のほうが1:3形状の場合より上流河床の低下が大

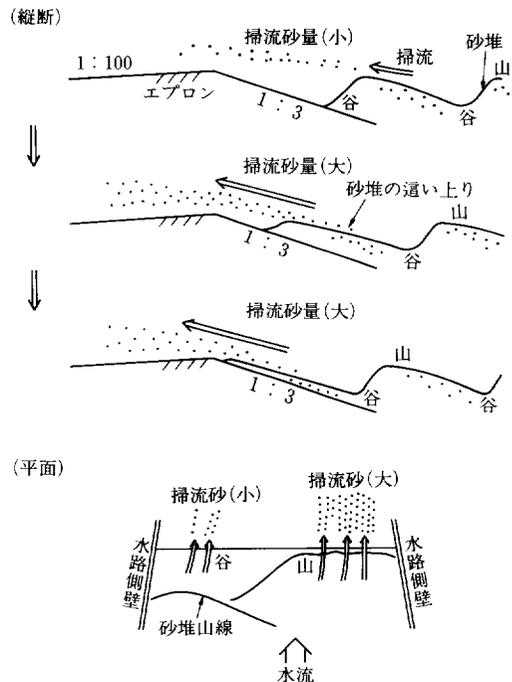


Fig. 7 1:3形状でのエプロン上流の砂面の変化

きい(局所洗掘が生じない状態では、後述するように 1 : 3 のほうが上流河床の低下が大きい)。すなわち上流部からエプロン直上流洗掘部への流入砂量が大きい。よって、直, 1 : 3 形状間のエプロン直上流砂面(洗掘)形状の違いの主因は、エプロン直上流の局所流況とみられる。本実験に関する限り“上流部からエプロン直上流への流入砂量の差”は効いていないと思われる。

2 洗掘深の変化

a 相対洗掘深の変化

直形状と 1 : 3 形状についてエプロン直上流洗掘深の変化を Fig. 8 に示す。

図中、縦軸は60分毎に“エプロン上流面での砂堆の谷の最深値 ( $b_*$ ) (エプロン直上流洗掘深)”を“エプロン上流傍(上流25cm 地点)を通過する砂堆の谷の最深値 ( $b$ )”で割ったものである。ここでは、“相対洗掘深”と称している。したがってこの値が 1 より大きいとエプロン上流面で洗掘を生じていることになる。

以下は全てエプロン上流面が露出した状態での状況である。

直形状では、河床が低下(エプロン上流面が露出)し始め砂堆が発達するにつれ、相対洗掘深が大きくなっていく。送水後60~120分では相対洗掘深が2.3近くとなっている。その後、全体河床の低下に伴い、掃流力が低減するにつれ、相対洗掘深も漸減している。送水初期(60分以前)の、掃流力が大きい時に相対洗掘深が比較的小さかったのは、エプロン上流面露出高が小さくかつ砂堆

の発達が不十分だったためと思われる。

一方、1 : 3 形状では、送水初期の、掃流力の強い段階から常に相対洗掘深がほぼ1.0であり、洗掘が生じていない事が明かである。むしろ、掃流力の強い条件下で、砂堆の山がエプロン上を這い上がりエプロン上流面を保護する状況となっていた。

以上をまとめると

- 1) 直形状では、エプロン上流面(根入れ部)露出、砂堆発達、掃流力が強い条件下で間欠的な局所洗掘を生じる。
- 2) 1 : 3 形状は、掃流力の強い条件(1)と同条件も含む)下でも、洗掘は生じない。むしろ、砂堆が這い上がり河床になじみよい形状となる。
- 3) 掃流力が弱いと形状による差異はない。エプロン直上流砂面高は進行してくる砂堆に追従するだけである。

したがって、直形状は、条件によっては洗掘の危険性がある。1 : 3 形状は洗掘に対し安全性が高いといえる。

b エプロン直上流洗掘深と河床最深値の比較

“直上流洗掘深 ( $b_*$ )”を“河床最深値 ( $b_{0s}$ ,  $b_a$ : 各々、エプロン上流端~上流 5 m 区間及び全区間での河床最深値)”と比較すると Table 1 のようになる。

“河床最深値”は、当然のことながら時間が経つにつれ深くなる。また、今回の実験は、上流からの給砂がない条件で行ったので、流砂がエプロンで堰止められるような状態となって、エプロン付近の砂面高が上流側と比

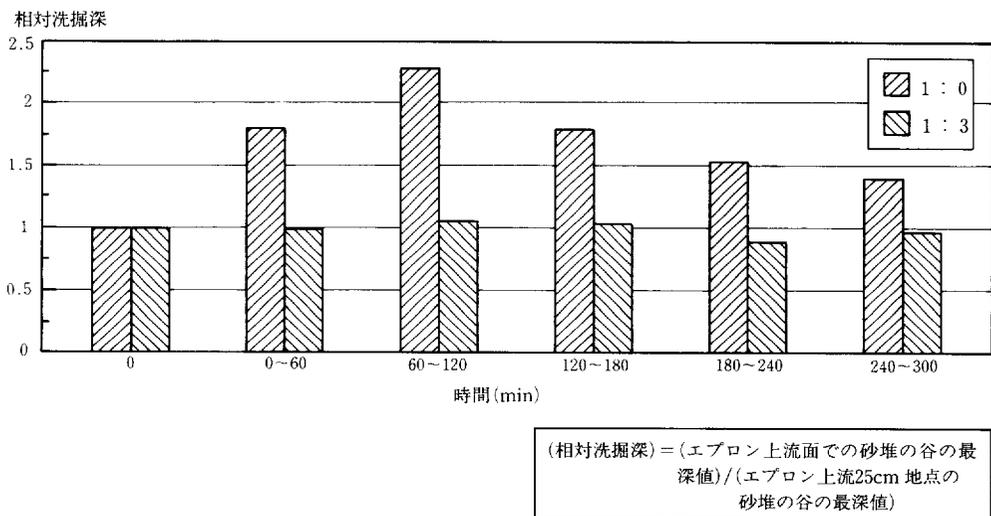


Fig. 8 洗掘深の変化

べ高くなっていた (Fig. 9~10)。にもかかわらず、直形状では、初期の段階で“直上流洗掘深 ( $b^*$ )”がそれ以降の“河床最深値 ( $b_{05}$ ,  $b_a$ )”を上回っていた。

注記  $b^*$ は、計測の都合上、水路側壁沿いのものを用いている。したがって側壁の効果により、水路中央

部と比べ、洗掘深がやや大きくなっている可能性はある。しかし、観測結果から、相対洗掘深の変化の傾向は水路中央部でも変わらないと考えられる。

Table 1 河床最深部の深さ

\*深さはエプロン上流端標高 (右側線上) を基準としている。

T\*,  $b^*$ : 所定時間 (TIME) 内にエプロン上流面に達する砂堆の山・谷の最高値, 最深値 (cm)

T, b: 所定時間 (TIME) 内にエプロン上流端より 3 測線 (約 25cm) 上流を通過する砂堆の山・谷の最高値, 最深値 (cm)

bR:  $b^*/b$

b05: エプロン上流端~上流 5 m 区間内の河床最深値 (cm)

ba: 河床最深値 (cm)

ケース 1

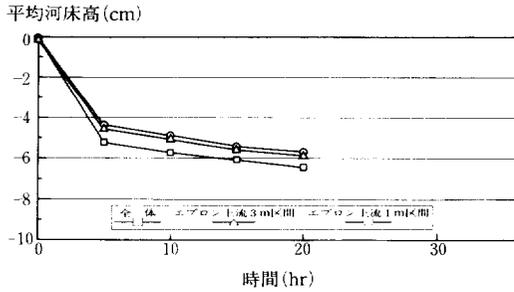
直 (1 : 0) 形状

TIME (min)	T*	T	$b^*$	b	bR	b05	ba
0	0	0	0	0	1	-0.4	-0.4
0~60	0	2.11	-5.32	-2.94	1.81		
60~120	0	1.74	-8.62	-3.76	2.29		
120~180	0	0	-10.74	-5.94	1.81		
180~240	-0.56	0.11	-10.9	-7.08	1.54		
240~300	0	-0.45	-7.98	-5.71	1.4		
300						-7.76	-9.14
600						-7.98	-9.56
900						-7.9	-9.67
1200						-8.25	-8.98
1500							
2100							

ケース 2

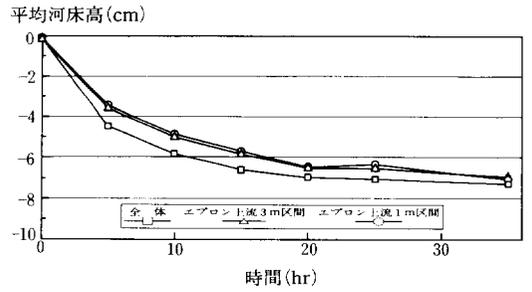
1 : 3 形状

TIME (min)	T*	T	$b^*$	b	bR	b05	ba
0	0	0	0	0	1	-0.4	-0.4
0~60	0	0.32	-1.91	-1.91	1		
60~120	0	0.85	-3.3	-3.09	1.07		
120~180	-0.11	-0.21	-4.47	-4.26	1.05		
180~240	0	0.64	-3.62	-4.04	0.9		
240~300	0	0.32	-6.17	-6.38	0.97		
300						-7.76	-9.96
600						-8.6	-10.13
900						-9.22	-10.34
1200						-8.67	-10.12
1500						-8.51	-9.71
2100						-8.54	-10



\* 河床高はエプロン上流端地点を除く全測線の平均 (但し、0hr については中央測線のみデータ)  
\* エプロン上流端標高を0cmとしている。

Fig. 9 平均河床高の推移 (直形状)



\* 河床高はエプロン上流端地点を除く全測線の平均 (但し、0hr については中央測線のみデータ)  
\* エプロン上流端標高を0cmとしている。

Fig. 10 平均河床高の推移 (1:3形状)

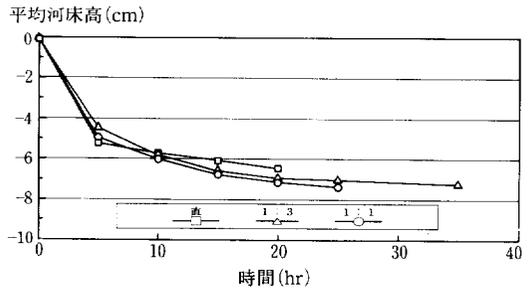
3 エプロン上流側の平均河床高・平均水深の変化

送水後、始めの5時間で急速に砂面が低下した。この間、30分から1時間のあいだに砂堆が形成された。砂堆の形成は初期河床低下の早いケース (直形状に近いケース) ほど早かった。

エプロン上流の平均河床高・平均水深の変化を示すと Table 2 のようになる。

全体の河床低下・水深変化は、ほぼ同程度である。エプロン形状による差異は余りない。強いて言えば、初期の段階では、直形状の河床低下がやや大きく、それ以降ではスロープの付いた形状が若干大きい (Fig. 11)。

これは、直形状では、エプロンを越えていく流砂量のほとんどが、渦により巻き上げられた浮遊砂に依るためと考えられる。したがって、渦の勢いの強い初期の段階では、直形状の河床低下が大きくなる。しかし、送水後しばらく経過し砂面が低下して渦の勢いが弱まると、スロープの付いた形状のほうがエプロン上で損失が小さい



\* 河床高はエプロン上流端地点を除く全測線の平均 (但し、0hr については中央測線のみデータ)  
\* エプロン上流端標高を0cmとしている。

Fig. 11 平均河床高の推移 (全体)

分、全体に掃流力がやや大きくなって河床低下が著しくなる。

Table 2 河床高・平均水深の推移\*1

時間 (hr)	河 床 高**3(cm)				平均水深**4 (cm)
	中央	右岸	左岸	平均	
0	-0.11 / -0.11	- / -	- / -	-0.11 / -0.11	9.69 / 9.59
5	-5.27 / -4.46	-5.12 / -4.51	-5.30 / -4.45	-5.23 / -4.47	15.38 / 14.29
10	-5.76 / -5.83	-5.80 / -5.89	-5.61 / -5.72	-5.72 / -5.81	(16.04) / 15.94
15	-5.98 / -6.59	-6.09 / -6.45	-6.16 / -6.70	-6.08 / -6.58	16.37 / 16.75
20	-6.39 / -6.79	-6.59 / -6.92	-6.31 / -7.09	-6.43 / -6.93	16.81 / 17.12

\*1 数字は左側が直勾配、右側が1:3のもの

\*2 河床高は全てエプロン上流端標高(右側線上)を基準としている。

\*3 河床高はエプロン上流全体の平均(エプロン直上流地点(エプロン上流面と河床の接点)は除く)

\*4 平均水深は(上流1m水位)と(上流5m水位)の平均より平均河床高を差し引いたもの

(水位データは送水中断直前のもの。但し、( )内のデータは送水再開後の水位データより算出)

#### 4 エプロン上流側の砂面形の変化

Fig. 12~14 に各形状の全体砂面形の変化を示す。

全体砂面形では、ケース毎に著しい差異は認められない。どのケースでも時間がたち、水深が大きくなる（掃流力が低下する）につれ、一様に砂堆が小さくなり河床形状が平滑化している。

#### 5 その他

その他のデータは次のとおり（本文末尾に添付）。

Table 3—計測データ一覧

Table 4—データシート

Table 5—水深・流量データ

Table 6—無次元掃流力、砂粒レイノルズ数(上流1~5 m 区間) の変化

- ・  $\sigma/\rho = 2.65$  ( $\sigma$ : 砂粒密度,  $\rho$ : 流体密度), 中央粒径  $d_{50}$  から岩垣式<sup>15)</sup>より算出。

Fig. 15—小規模河床形態の区分<sup>16)</sup>

- ・ 今回の実験は砂粒レイノルズ数が若干小さく Ripple の発生がみられた (Table 6 参照)。現地 の条件からは若干ずれる<sup>17)</sup>。

Fig. 16—平均水深の変化

- ・ 初期には直形状のほうが抵抗が大きいため平均水深がやや高い。

Fig. 17—水面形の変化 (直形状)

Fig. 18—水面形の変化 (1:3 形状)

Fig. 19—砂面形 各形状 5 時間後 (中央測線)

Fig. 20—砂面形 各形状 10 時間後 (中央測線)

Fig. 21—砂面形 各形状 15 時間後 (中央測線)

Fig. 22—砂面形 各形状 20 時間後 (中央測線)

### IV 結 言

今回の結果を要約すると、

- 1) 直形状と 1:3 形状では、掃流力が大きく、エプロン上流面 (根入れ部) が露出し始めると、エプロン直上流の砂面形状に差異が生じた。
- 2) 直形状ではこの状態で局所洗掘が発生した。洗掘の最大深は、“上流河床の砂堆の谷の深さ”の約 2.3 倍であった。ただし、この洗掘は砂堆の谷がエプロン上流面に近づく時のみ発生し、砂堆の山の進行時には埋め戻される間欠的なものであった。
- 3) 1:3 形状では、洗掘は見られなかった。むしろ、常に上流側河床になじみの良い砂面形状が維持されていた。限られた実験条件ではあるが 1:3 形状が局所洗掘の防止に有効なことが確認され

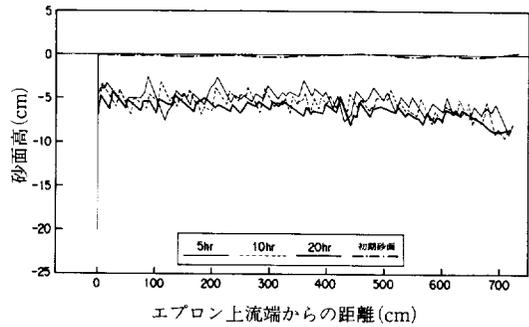


Fig. 12 直形状 0~20時間 (中央測線)

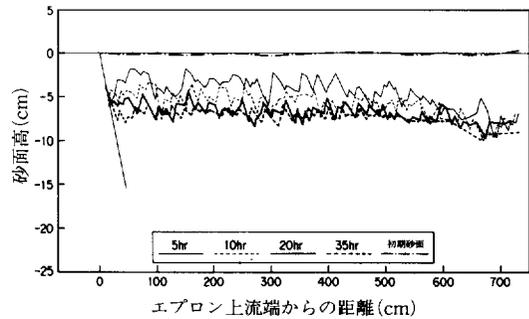


Fig. 13 1:3形状 0~35時間 (中央測線)

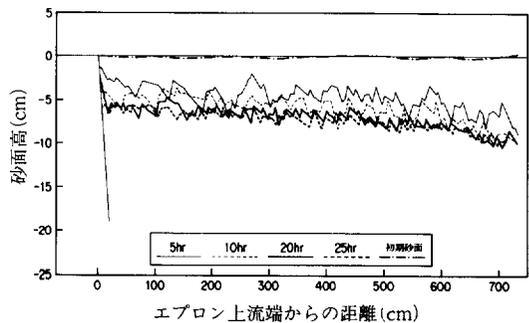


Fig. 14 1:1形状 0~25時間 (中央測線)

た。

- 4) 1:1 形状では直形状, 1:3 形状の両方の特性がみられた。
- 5) 掃流力が小さい条件下では形状による差はみられなかった。エプロン直上流の砂面高は、進行してくる砂堆の山、谷と同高で上下するだけであった。

以上の結果より直形状, 1:1 形状では, 上流河床の平均標高がエプロン上流端標高以下, 上流河床で砂堆発達, かつ掃流力が強い現地条件下で, 局所洗掘の危険があることがわかる。

エプロン上流端の局所洗掘に関しては, 直接的には洪水時(ゲート全開時)の洗掘に起因する破損, 間接的には, 洪水時の洗掘から平時(ゲート全閉で頭首工上下流の水位差が大きい)にパイピングを引き起こしての破損, などの被害が考えられる。洪水時の洗掘が洪水減衰時に埋め戻されれば, 平時のパイピングは起こらない。しかし, 犬山頭首工などの模型実験<sup>3)4)</sup>でも明らかのように必ずしも埋め戻されるわけではない。埋め戻し起きるか否かは河道の線形, 河道内地形, 洪水減衰波形のほか, 洪水減衰時のゲート操作にもよる。

これに対し, 実施工では, 頭首工本体はケーソン, ウェル, ピア等で支持層以下まで基礎処理がなされる<sup>18)</sup>。かつ浸透路長確保のため, セキ体上流端にはセキ上げ水深の1~1.5倍の止水壁が打ち込まれる<sup>19)</sup>。また, 設計では浸透路長に上流側エプロン部を見込まない<sup>19)</sup>……などの安全策が施される。

以上のことを考慮すると, エプロン上流端で, 根入れ部以深のかなりの深掘れを起こさぬ限り, 局所洗掘は実際上問題にならないと思われる。

直形状でのエプロン上流端局所洗掘は, 本実験で明らかかなように, エプロン上流面が露出し, かつ掃流力が強い条件下(砂堆発達, 掃流力  $\tau \gg \tau_c$ )で間欠的に生じる程度である。したがって, 洗掘の危険が特に高い所でなければ, 経済性を勘案しエプロン上流端を直形状で施工することも考えられる(ただし, 洗掘危険度がある程度高い現地条件では, 直形状とすると, 根入れ深さが過大となりかえって1:3形状より不経済となる。この境界が1:3形状, 直形状の施工区分の目安となる)。

その際, 直形状での根入れ深さをどの位にとるかが問題である。

従来, 治水関係では, 遮水矢板により直形状で施工した事例もある<sup>20)</sup>。これは上流エプロン, 堰本体エプロン間を水密施工として, 上流エプロン部も浸透路長に見込んだものである(農水の現行基準では上流エプロン部を浸透路長に見込んでいない)。よって, 比較的浅い洗掘でも問題となる。そのため, これらの事例では根入れ深さを2~10mとかなり深くとっている(農水の現行基準の1:3形状では根入れ深2m)。この際の根入れ深は, 主に浸透路長確保の点から設定されているとみられる。局所洗掘に関しては, その危険性を認めながらも, それがどの程度になるかは不明なため, 根入れ深を過大にとること

で対応しているようである。

局所洗掘に関する主要な因子として, 既往の“橋脚回りの局所洗掘”の研究では,

$$N_s/N_{sc}, h_0/D, d/D, S$$

( $N_s$ : sediment 数,

$$N_s = U_0 / \{(\sigma/\rho - 1)gd\}^{1/2} \\ = C \cdot (\tau^*/g)^{1/2}$$

$U_0$ : 非撓乱流の平均流速  $\sigma$ : 砂粒密度

$\rho$ : 流体密度  $g$ : 重力加速度  $d$ : 粒径

$C$ : シェジ係数  $\tau^*$ : 無次元掃流力

$N_{sc}$ : 限界掃流力  $\tau_{*c}$ に対応する sediment 数

$h_0$ : 平均水深  $D$ : 橋脚幅

$S$ : 橋脚形状に関する係数)

が挙げられている<sup>10)11)</sup>。

このうち, エプロン上流端局所洗掘では,  $D, S$ の代わりに  $h_p/h_0$  ( $h_p$ : エプロン上流面の露出深), エプロン幅や河床形態の因子(流下方向の砂堆の波高, 波長, 周期及び河川横断方向の砂堆の波高, 波長, 位相差)などが影響すると見られる。本実験で見た限りでは, とりわけ河床形態(特に中規模河床形態<sup>21)22)</sup>との関連が推測される。

今後は河床形態との関連性についても検討し, エプロン上流端を直形状とした場合の根入れ深さをどの程度にすべきか明らかにしていきたい。また, 給砂がある場合の状況も見していきたい。

## 参 考 文 献

- 1) 農水省構造改善局(1979): 土地改良事業計画設計基準 設計 頭首工, 77, 80, 103, 農業土木学会発行
- 2) 川合亨(1971): 頭首工の水理設計に関する研究 (I) —シキ高と土砂吐の水理設計—, 54, 58, 農業土木試験場報告第9号
- 3) 農林省農地局設計課(1959): 濃尾用水農業水利事業 頭首工実験, 水理模型実験報告 Vol. 8 MAF-HM-15
- 4) 農林省農地局建設部実験研修室(1960): 濃尾用水農業水利事業頭首工実験 其の二, 水理模型実験報告書 Vol. 10 MAF-HM-15-2
- 5) 川合亨・石野捷治・中山駿男・皆川勝美(1966): 緩流河川における頭首工の敷高決定に関する実験的研究, 37~41, 農業土木試験場技報B(水理)第7号
- 6) 出口利祐・川合亨・石野捷治・中山駿男(1965): 自然取水方式における防砂工法に関する研究, 38~52, 農業土木試験場技報B(水理)第3号
- 7) 川合亨・岩崎和己・皆川勝美(1967): 頭首工取入れ

- 口の水利について, 71~72, 農業土木試験場技報B (水利) 第12号
- 8) 農水省構造改善局(1979): 土地改良事業計画設計基準 設計 頭首工, 74, 農業土木学会発行
  - 9) 川合亨(1971): 頭首工の水利設計に関する研究 (I) —シキ高と土砂吐の水利設計—, 53~54, 61~70, 農業土木試験場報告第9号
  - 10) 土木学会編(1985): 構造物周辺の局所洗掘, 水理公式集, 272~279, 技報堂
  - 11) 中川博次・辻本哲郎(1986): 河川構造物周辺の局所洗掘, 新体系土木工学23 移動床流れの水利, 263~289, 技報堂
  - 12) 山内(1990): 堰の設計, 270, 山海堂
  - 13) 農水省構造改善局(1979): 土地改良事業計画設計基準 設計 頭首工, 26~27, 38~40, 農業土木学会発行
  - 14) 日本河川協会(1978): 解説・河川管理施設等構造令, 171~179, 山海堂
  - 15) 岩垣雄一(1956): 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第41号, 1~21
  - 16) Yalin, M.S. (1977): Sand waves, Mechanics of Sediment Transport, 2nd ed., Chapter 7, 209~267
  - 17) 須賀堯三(1990): 河床面の相似条件, 水理模型実験, 19~23, 山海堂
  - 18) 農水省構造改善局(1979): 基礎工, 土地改良事業計画設計基準 設計頭首工, 115~144, 農業土木学会発行
  - 19) 農水省構造改善局(1979): 土地改良事業計画設計基準 設計 頭首工, 51~53, 145~146, 農業土木学会発行
  - 20) 山内(1990): 堰の設計, 113, 153, 239~240, 山海堂
  - 21) 土木学会編(1985): 河床形態, 水理公式集, 251~257, 技報堂
  - 22) 中川博次・辻本哲郎(1986): 河床変動に関する基礎的事項, 新体系土木工学23 移動床流れの水利, 131~133, 技報堂

# Study on Local Scour with the Shape of Upstream Apron of Headworks

by Naoto TSUNESUMI, Hirohide KIRI and Takeshi SEKIYA

## Summary

Headworks must be a stable structure and secure from piping.

Therefore, scour must not occur excessively at the upstream end of it.

For the purpose of it, Design Criteria for Land Improvement Project recommend to make the upstream end of apron with 1 : 3 slope.

But that standard comes from experiences through hydraulic model tests on specific sites of headworks. There is no definit materials just for the standard. And generally speaking, 1 : 3 slope costs higher than 1 : 0 slope on construction.

In this study, we examine the possibility and degree of scour about 1 : 0, 1 : 3, 1 : 1 slope.

The results are following

1) 1 : 0 slope -

In condition of high tractive force and exposing the end slope part, scour rose. Depth of scour reached up to 2.3 times as that of bar bottom at its maximum.

But the scour is intermittent. It occured only when advancing bar bottoms came to the upper apron end.

2) 1 : 3 slope -

In the same condition, 1 : 3 slope had not scour. 1 : 3 slope is effective to protect the upper apron end.

3) 1 : 1 slope -

Scour also rose on 1 : 1 slope. But its degree was not so much as 1 : 0 slope.

4) In condition of low tractive force, scour didn't occur on any slope.

Table 3 計測データ一覧

計測項目	計測機器	記録媒体	計測位置	計測時間	備考
砂面影	連続式砂面計	ディスク	左・右・中央3測線上の砂堆の山、谷の位置でエプロン上流端より約7m上流まで。 (左右測線は左右側壁より10cm離れた所)	0hrから5時間毎に送水を一時停止して計測	
	カメラ	フィルム	エプロン部側方・上方 上流河床側方・上方 エプロン上	0hrから5時間毎に送水停止前と送水再開後で。	一部欠損あり
エプロン直上流洗掘探	ポイントゲージ	ノート	エプロン上流部と砂面が接する地点	0hrから5時間毎に送水を一時停止して計測	1:1, 1:3では連続式砂面計で計測
粒度分布			エプロン直上流及びそこから上流に1.5mスパンで4点(中央側線上, 計5地点)	全ケース終了後	下流2点は深くサンプリングしたため特異データとなっている
流況	カメラ	フィルム	エプロン部側方・上方 上流河床側方・上方 エプロン上	0, 2, 4, 5; 7, 9, 10; 12, 14, 15; 17, 19, 20; ...hr (5, 10, 15, 20hr, ...では送水停止前と送水再開後で)	
	ビデオ	8mm	エプロン部上方	直 0~20hr 1:3-0~35hr 1:1-0~25hr	2hr毎にテープ交換
		VHS	エプロン部側方	直 0~20hr 1:3-0~35hr 1:1-0~25hr	2hr毎にテープ交換
	スケッチ	ノート	エプロン部 上流河床	0, 2, 4, 5; 7, 9, 10; 12, 14, 15; 17, 19, 20; ...hr (5, 10, 15, 20hr, ...では送水停止前と送水再開後で)	
水深	ポイントゲージ	同上	エプロン上流端より15, 5, 1m上流地点 エプロン上流端地点 エプロン上流端より1m下流地点 (計5地点)	0hrから5時間毎に送水停止前と送水再開後で。	エプロン上流端標高を基準とした水深
水位	サーボ式水位計	ディスク	エプロン上流端より15m上流地点	直 0~20hr 1:3-0~35hr 1:1-0~25hr	実験中の水位変化を追跡するために計測
流量	電磁式流量計	ディスク	上流送水管路内	直 0~20hr 1:3-0~35hr 1:1-0~25hr	実験中の流量は、この計測値をもとにフィードバック制御
貯水位	ポイントゲージ	ノート	上流側計量水槽	0hrから5時間毎に送水停止前と送水再開後で。	上流側計量水槽付設の四角セキからの越流水深。電磁式流量計の検定に使用。
水温	水温計	同上	同上	同上	実験水の粘性係数 $\mu$ 、密度 $\sigma$ の算出の為に計測

Table 4 データシート (実験流量 21 l/S\*)

ケース	測定時間 (hr 後) <sup>**2</sup>	水 位 (cm) <sup>**3</sup>					貯水位 (cm) <sup>**4</sup>	水温 (°C)	流 況
		下流1m	セキ始点	上流1m	上流5m	上流15m			
直 形状	0	4.53	7.91	8.89	10.27	10.99	8.25	7.5	<-エプロン直上流に渦が発生。渦による砂の巻き上げで洗掘。 <-前進してきた砂堆は、エプロン直上流に達すると渦により形状がカットされる。渦は5hr後には全体の砂面低下(直上流-7~8 cm, 河床-5 cm)に伴いかなり小さくなる。
	5	4.37	9.23	9.79	10.52	10.76	8.22	8.5	
	5	4.30	8.84	9.77	10.42	10.65	8.27	9.0	
	10	-	-	10.15	-	10.50	8.28	10.5	
	10	4.26	9.13	10.04	10.49	10.42	8.22	10.3	
	15	4.27	9.17	10.11	10.48	10.42	8.28	11.2	
	15	4.30	9.21	10.25	10.57	10.46	8.29	10.7	
20	4.24	9.24	10.13	10.62	10.44	8.26	11.6		
1:3 形状	0	4.36	7.96	9.04	9.93	11.03	8.28	13.1	<-前進してきた砂堆はエプロン上流面上に這い上がってつぶれる。エプロン直上流の河床形状は上流側の地形に連続してなじみよい形。 <-エプロン頂を越える掃流砂量は直形状より多いように見える。 <-エプロン頂付近の越流水面形は直形状に比べてなだらか。 <-直上流は緩やかに掃流。エプロン上流面上の砂面高は-5 cm 位。
	5	4.34	8.66	9.42	10.23	10.45	8.27	13.6	
	5	4.43	8.63	9.59	10.38	10.53	8.27	10.1	
	10	4.44	8.72	9.82	10.44	10.44	8.29	10.7	
	10	4.39	8.68	9.78	10.26	10.24	8.23	8.3	
	15	4.43	8.71	9.94	10.40	10.26	8.34	9.1	
	15	4.47	8.81	9.94	10.40	10.26	8.37	7.5	
	20	4.46	8.77	10.00	10.38	10.26	8.35	7.8	
	20	4.40	8.67	9.93	10.23	10.03	8.23	16.5	
	25	4.36	8.71	9.91	10.25	9.96	8.18	18.0	
	25	4.30	8.59	9.82	10.15	9.85	8.19	19.0	
35	4.30	8.59	9.80	10.10	9.73	8.18	20.5		
1:1 形状	0	4.47	8.31	8.51	8.87	10.93	8.25	18.5	<-掃流と渦が混在。砂堆の山が近づくと渦が発生。 <-掃流、渦がかなり小さい。砂面前端はエプロン頂より-2.5cm~7.5cmで上下 <-砂面前端からの掃流が若干あり。
	5	4.36	8.63	9.43	10.12	10.33	8.17	20.0	
	5	4.36	8.53	9.64	10.13	10.31	8.23	18.0	
	10	4.32	8.80	9.70	10.16	10.17	8.22	20.0	
	10	4.45	8.74	9.65	10.17	10.18	8.28	20.5	
	15	4.37	8.82	9.82	10.23	10.09	8.27	22.0	
	15	4.46	8.76	9.86	10.18	10.03	8.31	22.0	
	20	4.37	8.81	9.90	10.19	10.01	8.29	23.5	
	20	4.35	8.82	9.85	10.26	9.94	8.32	22.5	
	25	4.37	8.91	9.92	10.20	9.96	8.26	23.5	

\*1 施設の関係上、実験中の流量は上下 1 l/s 程度変動。なお、1:1形状では21.5 l/s程度となった。

\*2 測定時間が同一のものは上が送水一時停止前、下が送水再開後のデータ。送水再開後の計測は流量安定後(おおよそ5分以上)に行った。

\*3 エプロン上流端(右測線上)を0cmとした水位で中央測線上のデータ。

\*4 上流貯水槽に取り付けられた四角セキ上の越流水深

#### 注記

砂面形計測 直 5hr: 砂面が縮まっていない状態で計測(砂面高はやや低めになっていると見られる)

1:3 30hr: 流量が、一時、19.3 l/s までダウン(35hr 時点の砂面高計測値は若干高めとなっている可能性有り)

流況計測 1:1 5hr 以降は VHS カメラ据え付け位置が少しずれている。(他の形状や1:1でも5hr 以前は全てカメラ位置は固定)

全体 1:3 20hr 以降のデータは後で別途、計測したもの。

Table 5 水深・流量データ

\* h0 : エプロン上流端での水深  
 hs : エプロン上流0~1m区間の平均水深 (= エプロン上流1m地点水位 H1) - (上流0~1m区間平均河床高 Zs)  
 hs' : エプロン上流0~1m区間の平均水深 (= エプロン上流0~1m区間平均水位: H1とh0の平均) - (上流0~1m区間平均河床高 Zs)  
 hss : エプロン上流0~3m区間の平均水深 (= エプロン上流1m地点水位 H1) - (上流0~3m区間平均河床高 Zss)  
 h : エプロン上流全体の平均水深 (= エプロン上流1~5m区間平均水位: H1とH5の平均) - (上流全体の平均河床高 Z)  
 hu : 実験水路の水深 (エプロン上流端より15m上流)

\* 水位および h0, hu は右側線上的エプロン上流端高を0cmとしている。

\* (min)の項は水位の正確な計測時間。

注意・・・直形状10hrのhs', hは送水再開時のh0, H5より算出

CASE	TIME(hr)	(min)	Q(l/s)	水				水深(cm)		水位(cm)		平均河床高(cm)			
				h0	hs	hs'	hss	h	hu	上流1m H1	上流5m H5	全体 Z	0-3m Zss	0-1m Zs	
直形状	0	45	20.9~21.2	7.912	8.989	8.502	9.062	9.686	10.992	8.887	10.272	-0.106	-0.175	-0.102	
	5	285		9.232	14.176	13.899	14.393	15.384	10.762	9.787	10.552	-5.229	-4.605	-4.389	
	5	335	21~21.2	8.842					10.652	9.767	10.422				
	10	600			15.049	14.541	15.22	16.034	10.502	10.147		5.723	-5.073	-4.902	
	10	627	21~21.2	9.132					10.422	10.037	10.492				
	15	890		9.172	15.528	15.06	15.68	16.371	10.422	10.107	10.482	-6.077	-5.573	-5.421	
	15	915	21~21.2	9.212					10.462	10.247	10.572				
	20	1187		9.242	15.807	15.364	16.01	16.807	10.442	10.127	10.622	-6.432	-5.883	-5.68	
	1:3	0	17	21~21.25	7.962	9.139	8.602	9.212	9.591	11.032	9.037	9.932	-0.106	-0.175	-0.102
		5	289		8.662	12.864	12.487	13.011	14.294	10.452	9.417	10.232	-4.47	-3.594	-3.447
		5	317	21.1~21.3	8.632					10.532	9.587	10.382			
		10	590		8.722	14.681	14.133	14.824	15.994	10.442	9.817	10.442	-5.815	-5.007	-4.864
10		612	21.1~21.3	8.682					10.242	9.777	10.262				
15		892		8.712	15.609	14.996	15.776	16.751	10.262	9.937	10.402	-6.581	-5.839	-5.672	
15		927	20.9~21.3	8.812					10.262	9.937	10.402				
20		1192		8.772	16.448	15.835	16.505	17.121	10.262	9.997	10.382	-6.931	-6.508	-6.451	
20		1215	18.3~19.4	8.672	16.244	15.646	16.433	17.1	9.962	9.907	10.247714	-7.023	-6.526	-6.337	
25		1500		8.592					10.032	9.927	10.232				
25		1505	20.4~21.8	8.592	16.818	16.216	16.741	17.22	9.732	9.852	10.152	-7.27	-6.944	-7.021	
35		2100								9.797	10.103428				
1:1	0	5	21~21.6	8.312	8.611	8.513	8.684	8.797	10.932	9.509	8.872	-0.106	-0.175	-0.102	
	5	300		8.632	12.54	12.143	13.275	14.733	10.332	9.427	10.122	-4.959	-3.845	-3.113	
	5	320	21.3~21.5	8.532					10.312	9.637	10.132				
	10	605		8.802	14.621	14.174	14.757	15.963	10.172	9.697	10.162	-6.034	-5.06	-4.924	
	10	635	21.4~21.7	8.742					10.182	9.647	10.172				
	15	910		8.822	15.212	14.717	15.522	16.782	10.092	9.817	10.232	-6.757	-5.705	-5.397	
	15	930	21.5~21.7	8.762					10.032	9.857	10.182				
	20	1220		8.812	15.956	15.414	16.175	17.192	10.012	9.897	10.192	-7.147	-6.278	-6.059	
	20	1240	21.5~21.8	8.822					9.942	9.847	10.262				
	25	1530		8.912	15.958	15.455	16.38	17.434	9.962	9.917	10.202	-7.374	-6.463	-6.041	

Table 6 無次元掃流力, 砂粒レイノルズ数 (上流1~5m区間) の変化

Q : 5 時間毎の平均流量  
 v : 動粘性係数 (cm<sup>2</sup>/s)  
 h5 : 上流 5 m 地点の水深  
 Z15 : 上流 1 ~ 5 m 区間の平均河床高 (上流 1 ~ 5 m 区間の左・中央・右岸河床高の平均値)  
 U\* : 摩擦速度  
 注意・・・直形状, 10hr の送水終了時の H5 のデータは欠落しているので 10hr の送水再開時のデータで代用

h1 : 上流 1 m 地点の水深  
 Z5 : 上流 5 m 地点の平均河床高 (上流 4.5 ~ 5.5 m 区間の左・中央・右岸河床高の平均値)  
 U\* : 無次元掃流力  
 Re\* : 砂粒レイノルズ数

Z1 : 上流 1 m 地点の平均河床高 (上流 0.5 ~ 1.5 m 区間の左・中央・右岸河床高の平均値)  
 Z5 : 上流 5 m 地点の平均河床高 (上流 4.5 ~ 5.5 m 区間の左・中央・右岸河床高の平均値)  
 h15 : 上流 1 ~ 5 m 区間の平均水深 (上流 1.5 m 地点平均水位-Z15)  
 I : エネルギー勾配

	TIME(hr)	Q(1/s)	V(cm <sup>2</sup> /s)	Z1(cm)	Z5(cm)	h5(cm)	h1(cm)	I	Z15(cm)	h15(cm)	U* <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	$\tau^*$	Re*
CASE1(1:0)	0	21.05	0.0131	-0.058	-0.208	10.328	9.098	0.0024940	-0.157	9.737	16.01	0.234	12.95
	5	21.05	0.0131	-5.195	-4.597	15.715	14.387	0.0015487	-4.786	14.941	12.98	0.19	11.66
	10	21.1	0.0131	-5.829	-5.079	16.319	15.229	0.0006523	-5.301	15.621	5.61	0.082	7.66
	15	21.1	0.0131	-6.034	-5.651	16.514	15.761	0.0007976	-5.774	16.069	6.97	0.102	8.54
	20	21.1	0.0131	-6.567	-5.831	17.187	15.961	0.0010333	-6.112	16.487	9.15	0.134	9.79
	0	21.125	0.0131	-0.058	-0.208	9.988	9.248	0.0016314	-0.157	9.642	10.4	0.152	10.44
CASE2(1:3)	5	21.125	0.0131	-4.831	-3.597	15.061	13.017	0.0014937	-3.845	13.67	11.89	0.174	11.16
	10	21.22	0.0131	-6.069	-4.948	16.509	14.768	0.0012211	-5.43	15.56	10.47	0.153	10.47
	15	21.2	0.0131	-6.757	-6.004	17.157	15.944	0.0009577	-6.216	16.386	8.45	0.123	9.41
	20	21.23	0.0131	-6.923	-6.635	17.303	16.635	0.0008516	-6.667	16.857	7.63	0.111	8.94
	25	18.9	0.0101	-7.218	-6.431	17.468	16.341	0.0007168	-6.78	16.86	6.43	0.094	10.64
	35	21.11	0.0101	-7.378	-6.891	17.478	16.691	0.0006377	-7.073	17.023	5.75	0.084	10.06
CASE3(1:1)	0	21.3	0.0101	-0.058	-0.208	8.928	8.718	0.0006787	-0.157	8.847	4.08	0.06	8.48
	5	21.3	0.0101	-5.073	-3.622	15.193	13.052	0.0011687	-4.507	14.282	9.54	0.139	12.97
	10	21.4	0.0101	-6.394	-4.668	16.554	14.368	0.0007137	-5.493	15.423	6.09	0.089	10.36
	15	21.525	0.0101	-7.132	-5.655	17.353	15.475	0.0007092	-6.195	16.22	6.23	0.091	10.47
	20	21.58	0.0101	-7.526	-6.037	17.716	15.937	0.0004461	-6.66	16.705	3.98	0.058	8.37

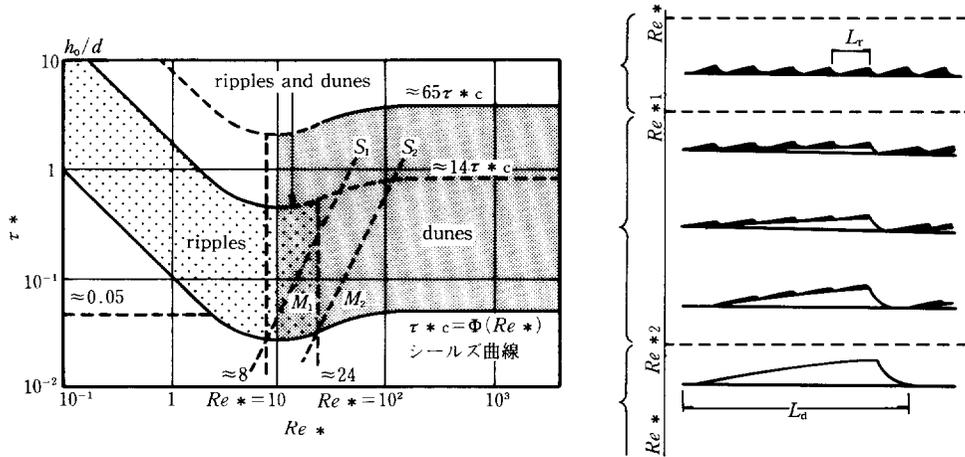
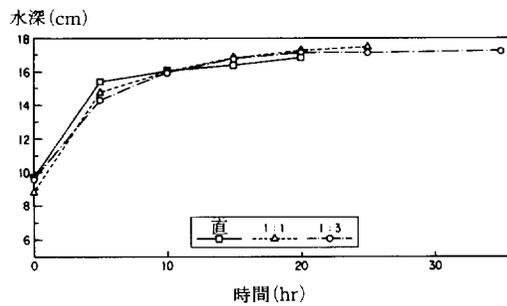
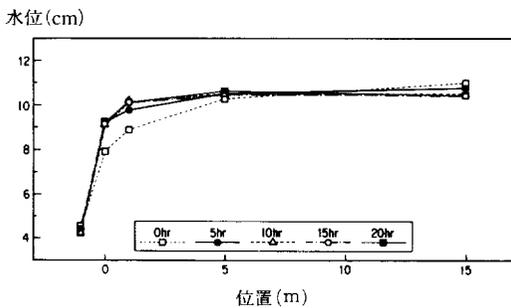


Fig. 15 小規模河床形態の区分



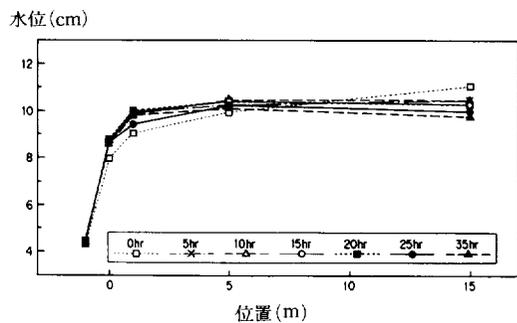
\* (エプロン上流1.5m地点(中央測線)平均水位—  
(エプロン上流左・右・中央測線の平均河床高)  
\* 直形式 10hr のデータは送水再開時のもの

Fig. 16 平均水深の変化



\* 0cm 位置はエプロン上流端  
\* 水位はエプロン上流端標高を0cmとしたもの  
\* 10hr の-1, 0, 5m 位置の水位は送水再開時のデータ

Fig. 17 水面形の変化 (直形状)



\* 0cm 位置はエプロン上流端  
\* 水位はエプロン上流端標高を0cmとしたもの

Fig. 18 水面形の変化 (1:3形状)

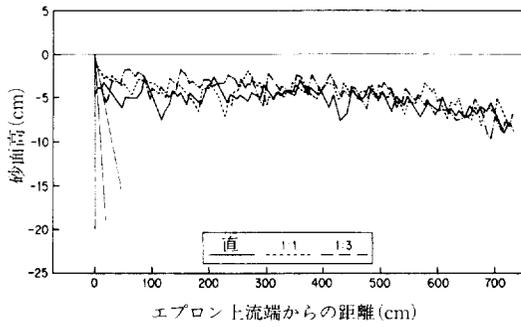


Fig. 19 砂面形 各形状 5 時間後 (中央測線)

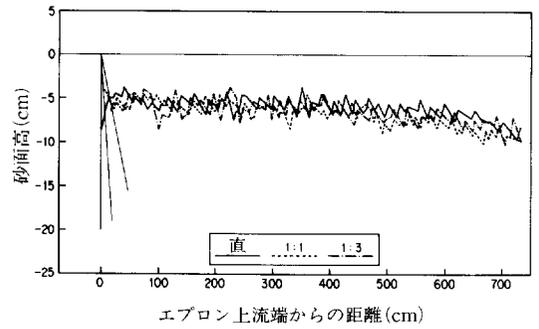


Fig. 21 砂面形 各形状 15 時間後 (中央測線)

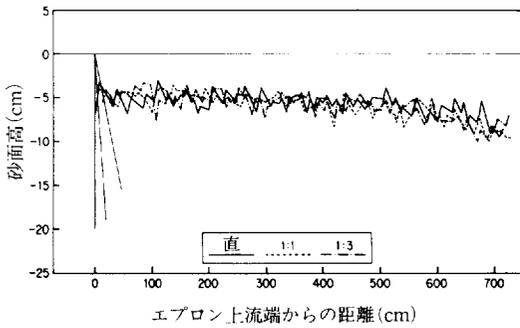


Fig. 20 砂面形 各形状 10 時間後 (中央測線)

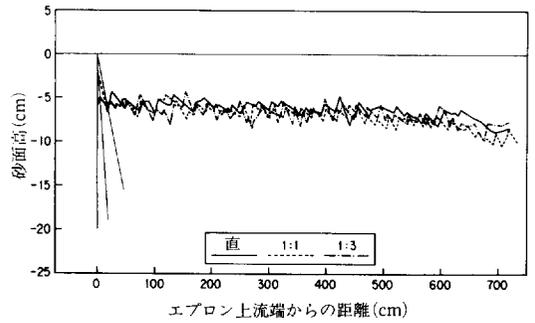


Fig. 22 砂面形 各形状 20 時間後 (中央測線)