

## 可動堰敷上堆砂のゲートフラッシュに関する水理実験\*

岩手大学農学部 濱上 邦彦, 岩手大学農学部 三輪 弘

### 1. はじめに

取水堰の敷高は、洪水の疎通を妨げないように、現況河床より低い計画河床高に合わせて設置されている場合が多い。堰の建設にさいして上下流部のある区間について、計画河床高まで掘削されるが、その範囲が狭いために、出水時に堰上下流の掘削部に運ばれた土砂が溜まり、可動堰のゲート直下に堆砂する<sup>1)</sup>。そのため、洪水減水時のゲート閉鎖の際に、ゲートフラッシュによる排砂が試みられるが、ゲートが閉鎖できずに、重機等を用いて人為的に土砂を除去する場合も多い。

著者らは、堆砂によりゲート閉鎖が困難となっている事例を調査分析し、ゲート閉鎖の可否を決める要因として、フラッシュ時の流量、土砂の粒径、ゲート上下流での水位差等が大きく寄与することを見出した<sup>2), 3)</sup>。本論文では、現地調査における特徴的なパターンを実験水路において再現することで、フラッシュの進行に伴う砂床形状の変形過程とその相違、さらにフラッシュ可能な範囲が非常に狭くなる理由について考察した。

### 2. 実験の概要

#### 2-1. 実験装置

実験装置には、水路長 17m、幅 50cm、高さ 50cm、水平勾配の水路を用い、流下距離 11m 地点にゲートを設置した。ゲートの寸法は高さ 50cm、幅 50cm、厚さ 1.6cm であるが、水路側壁に支柱を取り付けたために径間長は 45cm である。ゲートの上流 60cm、下流 70cm を堆砂領域とし、粒径 0.2~0.5cm、比重 2.5 の砂礫を堆砂厚 10cm で敷き詰めた(図 1 参照)。水路末端の堰高を調節することで下流水位を変化させることができる。

#### 2-2. 実験の水理条件

実験条件を表 1 に示す。現地調査において堆砂フラッシュの可否に関する要因として挙げられた項目について以下のように設定を行った。まず、流量に関しては、通常ゲートフラッシュは洪水減水時など比較的流量の大きいときに行われるが、しばしば流量が足りずに流出流の速度が小さい場合がある。本実験ではゲートフラッシュに十分な流量から不十分な流量まで 7 種類(2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 L/s) の流量とした。

また、下流河床高が高い場合のゲートフラッシュにおける排砂過程への影響を検討するために、ゲート下流側における水路末端の堰高を 2 パターン(14.6, 24.6 cm) 設定することで下流水位の調整を行った。なお、堰高 14.6cm は堆砂部分の水位がほぼ一定になる水位であり、堰高 24.6cm はそれより 10 cm 高くした水位である。

さらに、現地調査において堆砂分布の偏りがゲートフラッシュの可否に影響を及ぼすことが示唆されたため、この堆砂分布による影響を検討するために、堆砂形状として、2 パターン(全面堆砂、片側堆砂)を設定した。

#### 2-3. 実験の手順

上に述べた水理条件によって通水を行い、水位が安定したのちにゲート操作を行った。ゲート操作はゲート開度を 6 段階(10, 8, 6, 4, 2, 0 cm) で下げていき、砂につかえてゲートが下りなくなった段階で通水を終了した。ゲート降下の時間間隔は実験ごとに異なっており、流量の大きい場合にはすばやく排砂がなされるために間隔は短いが、流量の小さい場合には排砂に時間がかかり、間隔は長くなった。また、いったんゲート下

\* Hydraulic Experiments about Flushing of Sand Deposition on Gates of Diversion Dams by Kunihiko Hamagami and Hajime Miwa

面が砂礫につかえても、そのままおいているとフラッシュできる場合があり、その場合はフラッシュ可として続行した。

#### 2-4. 測定項目

測定項目として、Exe.1～36では、上下流の水位差とゲートフラッシュの可否の関係を調べるために、上下流の水位をデジタルカメラによって右岸側より10秒毎に測定した。

Exe.37～50では、各堰上げ高および流量における砂礫の初動流速を比較するために、ゲートを0.5cm間隔で下げていき、砂が数個動いた時点において、水路中央部のゲート前後の砂礫面上約0.5cm地点にて流速を測定した。

Exe.51～55では、下流水位の差異による砂礫面形状の変化を調べるために、各ゲート開度における河床形状の変化をレーザー変位計により測定した。

Exe.56～57では、フラッシュ時のゲート上流部の流速分布を調べるために、粒径0.1mmの粒子(比重約1.0)をトレーサーとする可視化実験を行い、PIV(粒子画像流速測定法)により解析を行った。

Exe.58～62では、片側堆砂における空隙部の流速分布を調べるために、電磁流速計により流速の横断分布を測定した。

### 3. 実験結果

#### 3-1. 堆砂フラッシュの進行過程

##### 3-1-1. 全面堆砂

(a) フラッシュがなされた場合

図2(a)は、Exe.52(流量8L/s、堰上げ高14.6cm)における各ゲート開度での河床形状の変化を示している。

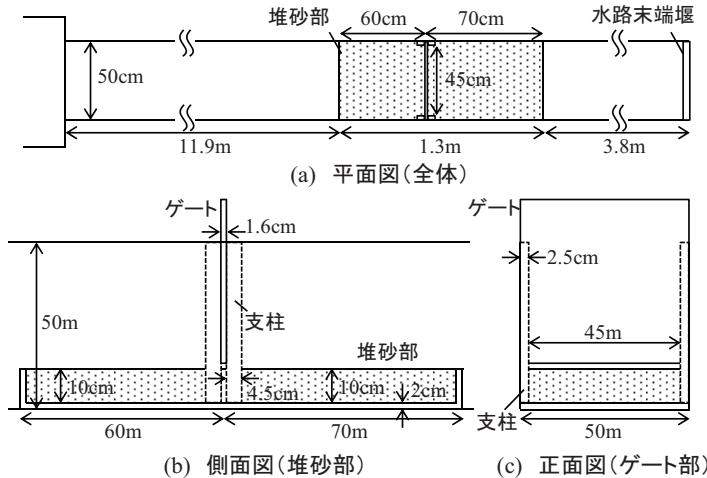


図1 実験装置図

表1 実験条件

実験目的	Exe.	流量(L/s)	下流堰上げ高さ(cm)	堆砂条件	実験目的	Exe.	流量(L/s)	下流堰上げ高さ(cm)	堆砂条件			
ゲートフルッシュの可否	1	5	14.6	全面	初動流速測定	37	2	24.6	全面			
	2	5				38	3					
	3	10				39	4					
	4	8				40	5					
	5	6				41	6					
	6	4				42	8					
	7	3				43	10					
	8	2				44	2					
	9	8				45	3					
	10	6				46	4					
ゲートフルッシュの可否	11	10	24.6	全面	河床形状測量	47	5	14.6	全面			
	12	8				48	6					
	13	6				49	8					
	14	5				50	10					
	15	4				51	5					
	16	3				52	8		14.6			
	17	2				53	5					
	18	5	14.6	片側		54	8	24.6	全面			
	19	8				55	5					
	20	10				56	8					
	21	6				57	8	24.6				
	22	5				58	4					
	23	4				59	5					
	24	10				60	6	14.6	片側			
	25	8				61	8					
	26	6				62	10					
ゲートフルッシュの可否	27	5				※ 全面堆砂: 水路の横断方向に砂礫をすべて敷き詰めた場合						
	28	10	14.6	全面		※ 片側堆砂: 水路の片側に壁を立てて敷き詰めた後に壁を外して自然な勾配をつけた場合						
	29	8				※ 初動流速測定および河床形状測定は全面堆砂の場合のみで行っている。						
	30	6										
	31	5										
	32	4										
	33	3										
	34	2										
	35	10										
	36	8										

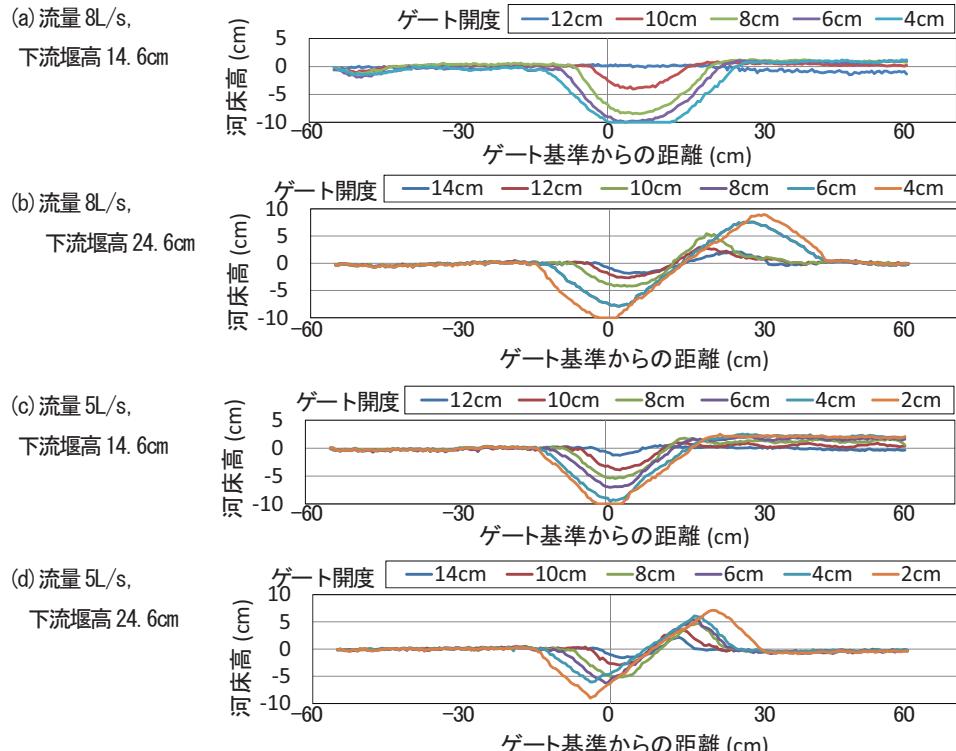


図2 砂礫面形状の変化（全面堆砂）

ゲート下端からの流出流によって砂礫面が順次洗掘され、洗掘範囲も広がっていき、水路床が露出する。ゲートを降下させていくとともに、ゲート上流面の砂は深く掘れるが、その洗掘範囲はあまり上流側へと延びずに急勾配の砂礫形状が形成される。ゲート下流面においては洗掘範囲が下流側へと延びていき、巻き上げられた砂が下流側へ運ばれていくことがわかる。

図2(b) Exe.54 (流量8L/s, 堤上げ高24.6cm)においては、Exe.52と同流量であるが、下流水位が高いために、ゲートフラッシュはなされるものの、砂が下流の砂面上に小山のように堆積することがわかる。また、通水中には大量の砂礫が上層へと巻き上げられ、降下した砂礫が斜面を下りてゲート直下付近まで落ち、再び巻き上げられる循環流のような動きが観測された。

#### (b) フラッシュがなされなかつた場合

図2(c)はExe.53 (流量5L/s, 堤上げ高14.6cm) の結果を示しており、流量が小さく、ゲート直下の流速が上がらないため、フラッシュを行うのに時間がかかった。とくに流量ゲート直下の砂礫のほとんどは排砂できても戸溝に残った砂礫がつかえてゲートが下りないことが多く見られた。これは実際の現場においてもしばしば見られることで、戸溝に詰まつたままの砂礫を人力にて取り除くなどの対応がなされている。

Exe.53と同流量条件の図2(d) Exe.55 (流量5L/s, 堤上げ高24.6cm)においても排砂が完了しなかつた。

#### 3-1-2. 片側堆砂

##### (a) フラッシュがなされた場合

片側堆砂においては、流量の大きい場合では全面堆砂の場合と変わらず、フラッシュがなされた。この際、

ゲート下流側の流れにおいて、堆砂部から堆砂のなかった領域へとむかう流れが起こり、写真1に示すように、フラッシュ前は完全に片側に分布していた砂礫(写真1(a))は、フラッシュ後は全面堆砂の場合と同じように下流側の全体へと分布した(写真1(b))。

#### (b) フラッシュがなされなかつた場合

片側堆砂においては、流量が小さい場合、ほとんどの流量が堆砂のない断面を通過してしまい、堆砂部の流速が上がらず、フラッシュがなされなかつた。このときには上下流に水位差がほとんどつかず、砂礫の移動はほとんど起きないため、堆砂部にゲートがつかえてフラッシュが不能であった。図3は、Exe.59(流量5L/s)においてフラッシュ不能となったときの堆砂状況を示しており、左岸支柱周辺においてゲートがつかえている。このときの横断面を5つの領域に分割し流量を測定した結果を表2に示している。同表より、空隙部となる領域a~cにおいてほとんどの流量が通過し、フラッシュがなされる必要のある領域d~eの流量は小さく、フラッシュに必要な流速が得られないことがわかる。以上の結果より、堆砂の横断形状がフラッシュの可否に大きく影響することがわかる。

#### 3-2. 堆砂フラッシュの可否とゲート上下流の水位差の関係

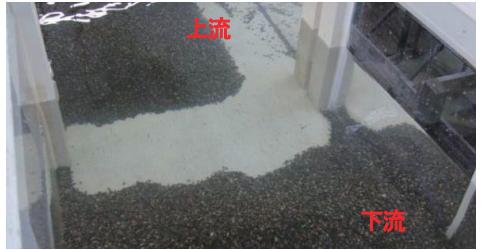
ゲート上下流の水位差とフラッシュの可否の関係を検討するために、図4に各ゲート開度におけるゲート上下流の水位差の変化を示している。なお水位差 $\Delta h$ は砂礫粒径 $d$ で除してある。また最終的なフラッシュの可否を○(フラッシュ可)、△(戸溝にのみ砂礫が残る)、×(フラッシュ不可)で示している。

全面堆砂の結果を見ると、流量が小さい場合に途中でフラッシュ不可となった場合では、全体的な堆砂は進むものの、とくに戸溝の堆砂がなかなか行われず、ゲートがつかえる様子が観察された。このことから、戸溝周りの堆砂がフラッシュの不可において重要であることがわかる。

図4(a)堰上げ高14.6cmと図4(b)堰上げ高24.6cmの比較より、同流量条件においても下流水位が高い場合にはより大きな水位差を必要とすることがわかる。なお、いったんゲート下面が砂礫につかえた後に、流下断面の減少によってゲート上流側の水位が上昇することで、しばらくフラッシュ可能になる場合も見られた。この場合においても戸溝での堆砂が行われるかが重要で、流量が小さい場合ではやはりここでゲートがつかえる場合が多かった。



(a) フラッシュ前



(b) フラッシュ後  
写真1 片側堆砂におけるフラッシュ後の  
堆砂状況 (Exe. 20)

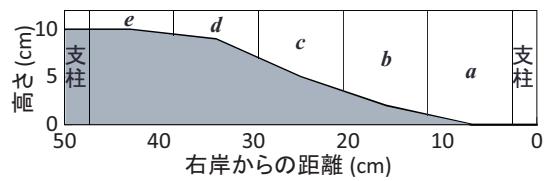


図3 片側堆砂状況 (Exe. 59)

表2 片側堆砂における各断面の流量  
(Exe. 59)

	流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	割合(%)
a	1.59	34.92
b	1.62	35.68
c	1.15	25.41
d	0.18	4.00
e	0.00	0.00
	4.54	100

片側堆砂においては、流量が大きい場合においてはフラッシュは可能となっているが、全面堆砂よりも水位差は小さいまま推移している。流量が小さい場合には、流水はそのほとんどが堆砂の無い領域を流れるため、水位差は大きくならずフラッシュ不可となっている。

### 3-3. 堆砂フラッシュ形状とゲート流出流速分布との関係

図5は、Exe.57（流量 8L/s、堰上げ高 24.6cm、全面堆砂）における開度 4cm でのゲート近傍の流速分布を示している。ゲート手前から集中して潜り込んだ流れは、そのままゲートの下面に並行して砂面に沿ってそのまま流れしていく。流速はゲート近傍において急激に大きくなり、ゲートの直下で最大となっている。これは、流速の最も大きいゲート直下で砂礫面が大きく洗掘されていることに対応している。流速が最大となる範囲はゲート上下流のごく近傍のみであり、このことが、下流水位が高く潜り流出となるような場合においては、ゲート直下のみが洗掘され、下流側に砂礫が山のように積みあがる原因であると考えられる。

#### 4. 実験結果と諸事例との比較

本実験は、径間長の相対的に短いゲートを用いた実験ではあったが、取水堰での堆砂フラッシュ現象とフラッシュ実行時のトラブルを定性的には再現することができた。ここに、現地で観察した現象<sup>2)</sup>との比較を記す。

##### (1) 堆砂フラッシュ形状

下流水位が高くない場合には、フラッシュの進行に伴って洗掘の範囲が下流へと広がっていく結果となった。これは北空知頭首工（石狩川、北海道深川市）における事例に対応している。北空知頭首工の特徴として、ゲート高が高くて上流水位を高くすることができるが、堆砂高が高く堆砂範囲が広い。フラッシュを行った後の砂礫の分布形状は図2(a)と類似しており、フラッシュ後の洗掘範囲は下流側へと広がっていた。

下流水位が高い場合の実験結果の特徴としては、洗掘の範囲が狭く、大きな山のような砂礫面形状が形成さ

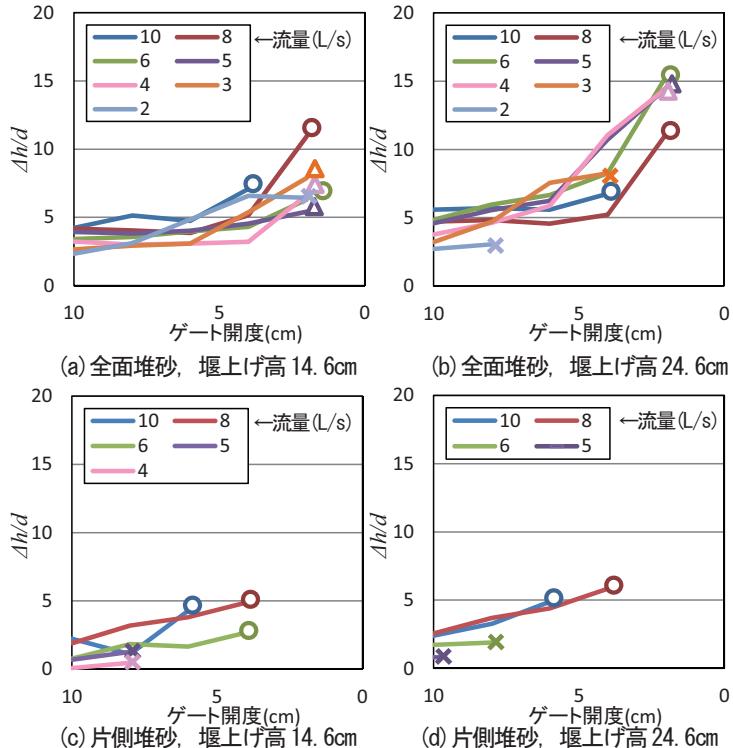


図4 各ゲート高における水位差

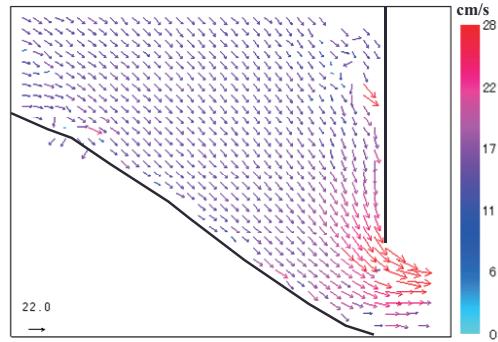


図5 ゲート上流・直下における流速分布

れることであった。これは六堰頭首工（荒川、埼玉県深谷市）における事例に対応している。六堰頭首工は堰下流に「鶯の瀬」と呼ばれる名勝地があり、これを温存したために下流水位が高くなり、頭首工地点の河床勾配が1/200程度であるにもかかわらず、もぐり流出となっていた。これはすなわち本実験における水路下端の堰上げ高を大きくした場合に対応しており、フラッシュを行った後の砂礫の分布形状は図2(d)と類似して、ゲート近傍のみで洗掘が行われ、上下流ともにゲートに接近して高い河床面が残されていた。

#### (2)堆砂の分布形状（片側堆砂）

片側堆砂の場合の実験結果の特徴としては、流量が小さい場合には堆砂のない領域を流水が通過してしまい大きな水位差を確保できないことであった。これは、忠別川第3頭首工（石狩川水系忠別川、北海道東川町）における事例に対応している。忠別川第3頭首工は、堆砂が河道中央に集まっており、堆砂の分布に偏りがあったためフラッシュがなされなかった。実験結果と同様に、通水流量のほとんどが堆砂のない領域を流れたことが原因である。片側堆砂であっても流量が大きい場合にはフラッシュはなされるが、忠別川第3頭首工においてはそれほどの流量に達していなかったと考えられる。

以上のように、本実験は現場における現象の再現性が高く、本実験結果が現場におけるゲート操作など具体的な問題を解決するための材料となることが期待される。

## 5.まとめ

可動堰ゲート直下周辺の堆砂のフラッシュ現象について、水路を用いた実験により、堆砂フラッシュの進行状況とそのメカニズム、さらには、フラッシュ可能の基本的な限界条件が明らかになり、本実験結果は現場での現象を良く再現できていることが示された。堆砂フラッシュの可否を決定付ける要因として、流量、下流水位（堰上げ高）、堆砂分布を変化させた検討により、以下のような結果を得た。

- (1) 流量が大きい場合には、他のどの要因にも関わらず堆砂フラッシュがなされた。
- (2) 下流水位が高い場合には、ゲート下流側に砂礫が山のように堆積し、砂が大きく巻き上げられることでゲート下流において砂が循環し、フラッシュの可否に影響を及ぼすことが示唆された。
- (3) 片側堆砂においては、流量が小さい場合、ほとんどの流量が堆砂のない断面を通過してしまうために、フラッシュがより難しくなることが示された。
- (4) 堆砂フラッシュが可能な範囲はゲート周辺の狭い区間に限定されることが示された。

## 謝辞

今回の実験にあたり、岩手大学農学部・五十公野太郎氏、大滝光樹氏、小岩ちえみ氏、藤原由貴氏にご協力をいただいた。また実験費用の一部については、日本工営（株）からの奨学寄付金に依った。記して心からお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1)三輪 式：現河床より低い敷高の頭首工における堆砂の予防対策、農業土木学会論文集、153、93-100、1991。
- 1)三輪 式：取水堰ゲート直下の堆砂のゲート操作によるフラッシュ過程、水工学論文集、第34巻、247-252、1990。
- 2)高井和彦、三輪 式、濱上邦彦、永吉武志：取水堰ゲート操作による堆砂フラッシュ事例の分析、平成24年度応用水理研究部会講演集、1-16、2012。