

# 落差工下流の河床洗掘孔を考慮し 設置された粗朶沈床の効果検討

THE EFFECTIVENESS OF SCOUR PROTECTION MEASURE OF FASCINE  
MATTRESS INSTALLED ON SCOUR HOLE DOWNSTREAM OF A GROUNDSILL

内田龍彦<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・木下真理子<sup>3</sup>

Tatsuhiko UCHIDA, Shoji FUKUOKA, Mariko KINOSHITA

<sup>1</sup> 正会員 博(工) 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup> フェロー会員 工博 Ph.D. 中央大学教授 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-3-27)

<sup>3</sup> 正会員 水資源機構 (〒330-6008 埼玉県さいたま市中央区新都心 11 番地 2)

The local scour downstream of a ground sill undermines the foundation of the structure and exposes the structure to danger. To prevent it, bed protection works are installed in the downstream of the structure. However, bed scour also take place just downstream from the bed protection works. Therefore, the design method that makes allowance for a certain degree of the local scour is proposed. For the purpose, bed protection works which fits a scour hole flexibly is required. The Fascine mattress has bed protection effect and well flexibility. In this paper, the scour mechanism downstream of a ground sill is presented. Then we considered the effectiveness of fascine mattress for protecting scour bed. And the vertical two-dimensional numerical model describing the flow just downstream of ground sill was developed.

**Key Words :** *ground sill, local scour hole, counter-measure, flexible fascine mattress, vertical two-dimensional numerical model*

## 1. 序論

河川構造物の設計の際には、変動する外力に対して必要な機能を長期的に維持でき、それ自身と周囲の構造物の安定性と機能等に支障を及ぼさないことが求められるだけでなく、河川環境に与える悪影響を最小限にする配慮が必要である<sup>1)</sup>。特に、落差工などの河道横断構造物は河道に与えるインパクトが大きくなり、局所洗掘等により自身と周囲の構造物の安定性を低下させ、被災を招く危険性が高いことから、設計の際には、検討すべき課題が多い<sup>1)4)</sup>。

落差工下流では洗掘対策として、構造物本体に付随する水たたき工とその下流に護床工が設置される<sup>2)</sup>。しかし、護床工下流では一般に河床洗掘が生じる<sup>3)</sup>ことから、平坦河床を直接防護する工法では完全に洗掘を防ぐことは困難である。このため、規模が比較的小さい落差工下流部における洗掘は、完全に防止するよりも、ある程度洗掘を許容し、洗掘孔内で流れのエネルギーを減勢させる工法が考えられる<sup>4)</sup>。この工法は、通常ダム設計において用いられる副ダムを用いたウォータークッション効果<sup>5)</sup>の原理を応用するものである。ウォータークッション効果に関する研究は古くから多くの研究がある<sup>6)</sup>が、規模の小さい落差工下流において洗掘孔を許容して水脈落下点の水深を確保しようとする場合、洗掘孔をどのように防護するかが課題である<sup>4)</sup>。

洗掘形状に柔軟に対応できる屈撓性を持つ工法として粗朶沈床工法に着目する。粗朶沈床工は明治初期にオランダ人技師により伝えられたとされる伝統的河川工法のひとつである。粗朶沈床は、優れた洗掘防護効果と屈撓性を持つほかにも、空隙をもつ自然材料で構成されることから、水生生物等の生息環境の創出等の環境面の利点を多く持ち、近年でも様々な箇所での洗掘対策に用いられている<sup>1)7)8)</sup>。粗朶沈床工では、施工が非常に大掛かりで技術を有することから、粗朶沈床工の様々な利点と機能を保持したまま、粗朶沈床工を改良する試みが行われている<sup>9)</sup>。しかし、粗朶沈床工の水理機能には不明な点が多く、水理的な考察に基づく施工法の確立が求められている。

本研究では、規模の小さい落差工下流の洗掘対策として、想定した洗掘孔形状を粗朶沈床工を設置して防護する工法を提案し、水理実験により設計に必要な基礎資料を得ることを目的としている。まず、洗掘対策の検討に先立ち、異なる水理条件での落差工下流の河床洗掘の発達機構を検討する。次に、ある規模の流れで生じた洗掘孔の上に粗朶沈床工を設置し、これより大きい規模の流れを流下させた場合の洗掘孔内の流れと粗朶沈床の変形について調べ、許容すべき洗掘孔の大きさ、粗朶沈床の設置範囲、必要な沈石の大きさ、および洗掘孔内の流れの解析法を検討する。また、捨石工法と比較し、粗朶沈床工法の有効性を考察する。

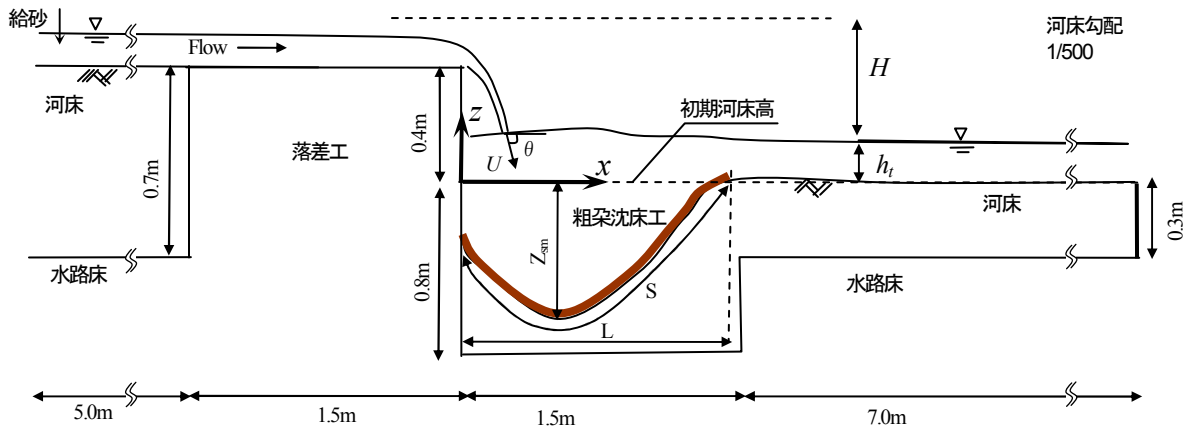


図-1 実験水路諸元と諸変数の定義

表-1 実験条件

Case	流量 (m <sup>2</sup> /s)	給砂量 (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /h)	洗掘対策範囲 L(m)	沈石、礫の粒径 (mm)	備考
Case N1	0.030	50	-	-	-
Case N2	0.047	50			
Case F1	0.030	0	1.5	20	粗朶沈床工法
Case F2	0.047	0			
Case F3	0.072	0			
Case Fg	0.030~0.072	0			
Case R1	0.030	0	1.5	60, 20, 4 (総厚 132 mm)	逆フィルター捨石工法
Case R2	0.047	0			
Case R3	0.072	0			

## 2. 実験方法

### (1) 実験水路及び実験条件

構造物の変形などは縮尺スケールの影響を受けるため、なるべく実験水路の縮尺を大きくすることが望ましい。そのため、大きな洗掘エネルギーが生じるように、大きな落差で実験を行う。図-1に示す全長15m、幅1mの大型直線水路中央部に高さ0.7mの落差工を設置している。落差工の上流に0.7m、下流に0.3mの厚さで、粒径 $d=0.8\text{mm}$ の一樣砂が敷かれており、落差は0.4mとなっている。河床勾配は1/500とした。落差工直下流部では大きな洗掘が生じても対応できるように落差工から1.5mの範囲では水路床が0.5m掘り下げられている。実験条件を表-1に示す。実験流量は $q=0.030, 0.047, 0.072$  (m<sup>2</sup>/s)の三通りでを行い、それぞれCaseの1~3の数字に対応する。Case N1, N2は洗掘対策無の場合であり、上流端から給砂を行っている。

### (2) 粗朶沈床工と捨石工

粗朶沈床工は、マット状の敷粗朶で底面土砂の吸出しを防止し、柵により沈石の移動を防ぐ。実験では、敷粗朶の代わりに藁で編まれたムシロを用い、その上に柵を模して藁製の縄で格子を作成し、その中に沈石を投入した。粗朶沈床工の格子の大きさは0.2m×0.2m、柵の高さは0.03mである。実験に用いた粗朶沈床工の柵の効果を確認するため砂の水中安息角の斜面上に粗朶沈床工を設置し、沈石は移動せず、十分な屈撓性をもつことを確認している。粗朶沈床の設置においては、洗掘孔に沿って設置す

るため、実際の粗朶沈床工の施工<sup>5)</sup>と同様に粗朶沈床工をクレーンで吊り上げ、沈石を投入しながらゆっくりと沈め、河床上に設置する。

Case F1~F3では、 $q=0.030$ (m<sup>2</sup>/s)で生じた洗掘孔に粗朶沈床工を設置し、流量を増加させた場合の粗朶沈床工の洗掘防護効果を検討する。粗朶沈床は敷設範囲を洗掘孔範囲としている。Case Fgでは、沈石の大きさを検討するため、横断方向に粒径の異なる沈石を設置し、異なる流量条件で沈石の移動状況を観察する。各Caseの粗朶沈床工の条件は表-1に示す通りである。

粗朶沈床工の有効性を検討するため、捨石工を洗掘孔に設置した実験Case R1~R3を行った。捨石工では逆フィルター工法<sup>10,11)</sup>が採用されている。逆フィルター工法では、河床砂や小礫が抜け出されないように表面から下層ほど順に粒径が小さくなるように設置される。粒径構成は鈴木らの方法<sup>10,11)</sup>を参考に求めた。粒径は表面から順に60, 20, 4mm、礫の総厚は132mmとしている。

## 3. 実験結果及び考察

### (1) 落差工下流の洗掘孔の発達機構

図-2はCase N1, N2における初期と平衡状態の洗掘孔形状の比較である。Case N1, N2のどちらの場合も、洗掘が進行するにつれて洗掘孔下流の堆積部が小さくなり、平衡状態では消滅している。洗掘孔の下流斜面の角度はおよそ30度であり、砂の水中安息角となっている。図-5に示すCase F1, Case F2の洗掘孔内の流速分布を見ると、落差の小さい床止め工下流の潜り噴流時の洗掘機構<sup>4)</sup>と

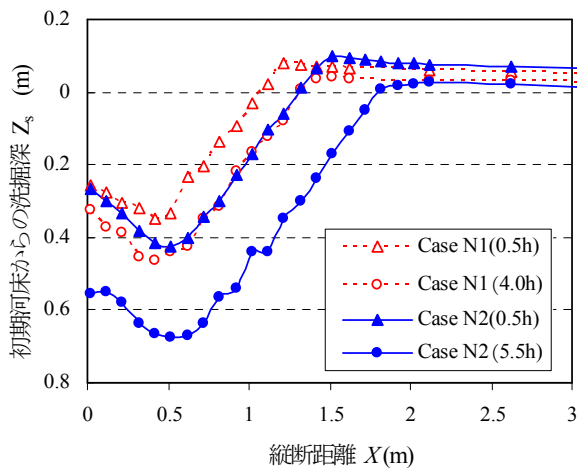


図-2 落差工下流の洗掘孔の発達過程

表-2 本実験結果の最大洗掘深と従来の算定式<sup>13)</sup>の比較

	実験値	Hoffmans (1998) <sup>11)</sup>
Case N1	0.49m	0.58m
Case N2	0.72m	0.72m

Hoffmans(1998) :  $Z_{sm} + h_t = c_{2v} \sqrt{qU \sin \theta / g}$   
 $(d_{90} < 0.0125 \text{ m}) : c_{2v} = 20 / D_{90}^{*1/3}, (d_{90} > 0.0125 \text{ m}) : c_{2v} = 2.9$   
 ここに、 $D_{90} = d_{90}(sg/v)^{1/3}$ ,  $d_{90}$  : 河床材料の 90% 粒径,  $s$  : 砂の水  
 中比重,  $v$  : 水の動粘性係数

異なり、主流は洗掘孔に沿った形ではなく、水叩き部下流で剥離している。洗掘孔は水叩き部の砂が巻き上げられ、下流に輸送されることによって発達する。洗掘孔下流の逆流域の流速は非常に小さく、水叩き部が洗掘されることによって洗掘孔下流の斜面の砂が滑落し、安息角の斜面が形成される。

図-3 は図-2 を最大洗掘深で無次元化したものである。初期洗掘形状と平衡状態の洗掘孔形状は異なるが、流量の異なる Case N1, N2 の違いはほとんど見られない。これは、落差工からの噴流の突入角度と、図-2 に示したように洗掘孔下流斜面の角度がほとんど変わらないためである。一般に落差工下流の洗掘孔形状は特徴的な流れの形態によって生じる現象であるため、相似形状をなすことが知られている。表-2 は Hoffmans により提案されている自由噴流下流の最大洗掘深の算定式<sup>13)</sup>と本実験結果の比較である。算定式に用いる諸変数は図-1 に示すとおりである。算定式<sup>13)</sup>は洗掘孔内で流れの運動量原理を用いて噴流の運動量と最大洗掘深の関係を導き、静的洗掘の実験結果を対象に係数を経験的に求めたものであるが、本実験結果とそれほど大きな違いはない。これは本実験条件では、落差工下流の掃流力が非常に大きく、給砂の影響をほとんど受けないため、静的洗掘の算定式である程度洗掘深を見積もることができると考えられる。しかし、算定式の係数は粒径が大きくなると係数のばらつきが大きく<sup>13)</sup>、適用範囲には十分検討する必要がある。

## (2) 洗掘孔を想定し設置された粗朶沈床工の効果

図-4 は Case F1-3 における粗朶沈床工設置後の河床形状の変化である。いずれの Case においても粗朶沈床工下

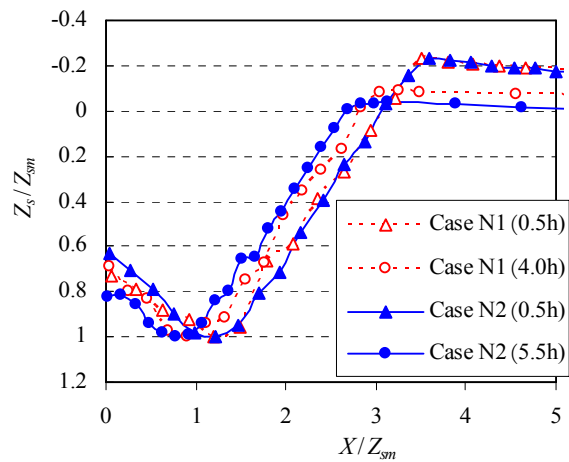


図-3 落差工下流の無次元洗掘孔形状の比較

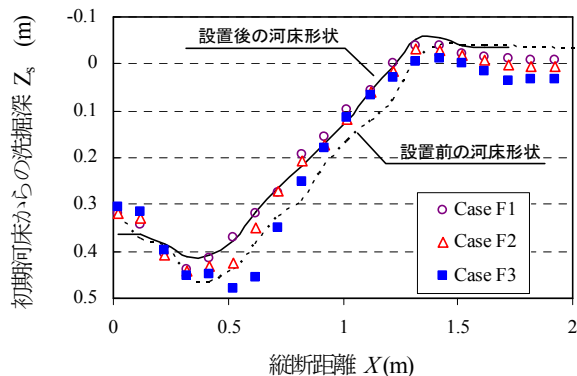


図-4 粗朶沈床工設置後の河床形状の変化

流で顕著な洗掘は生じておらず、流量規模が大きくなっても洗掘孔内で落差による流れのエネルギーが十分に減衰している。図-5 は Case F1, F2 の洗掘孔内の流速分布である。流れは水叩き部下流で大きく曲げられ、洗掘孔形状に沿うことなく、洗掘孔の下流では主流は水面付近となる。一般に自由落水脈の流れのエネルギーは、噴流落下点の上下流に形成される渦により減衰することが知られている。洗掘孔を許容しこれを防護する場合、水叩き部の河床形状がディフレクターと同様の役割を成し、主流を上向きに曲げることによって、水脈落下地点直下流の渦②が発達し、水叩き部下流にも渦が形成される。この結果、噴流のエネルギーは短い距離で減衰する。このように、構造物下流に形成される洗掘孔が自然に落水脈のエネルギーを効率的に減衰する形状となっていることは、本論文で提案する洗掘孔を許容しこれを防護する工法の妥当性を示すものである。流量規模が大きくなると、洗掘孔内でより多くの流れのエネルギーを消費するため、水脈落下地点直下流の渦②がより発達し、水叩き部下流の底面付近に逆流域③が下流に移動する。図-4 より、Case F3 では粗朶沈床工を設置したにもかかわらず、水叩き部で粗朶沈床工を設置する前の河床形状(Case N1)よりも河床が低下している。これは、水叩き部の沈石が噴流によって流送され、河床に大きな噴流の衝撃力が粗朶沈床工を介して作用し、河床が変形するためであ

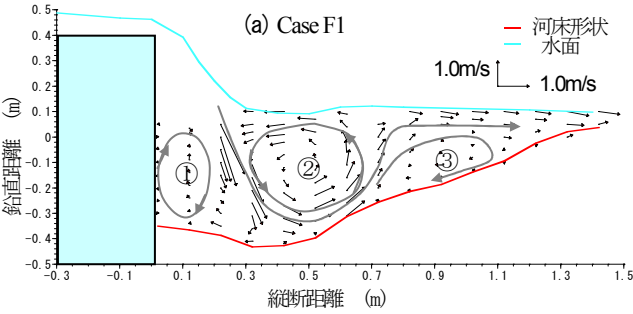
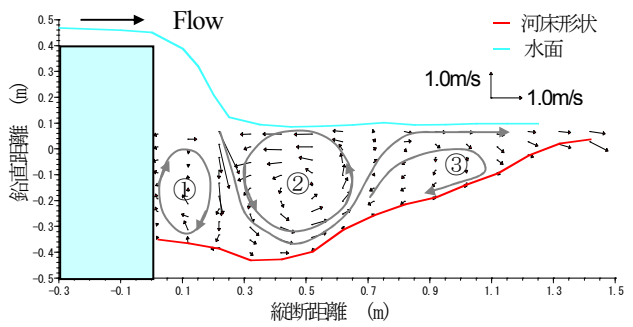


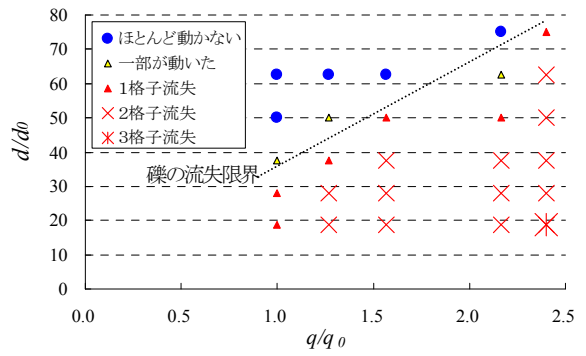
図-5 流量規模の違いによる洗掘孔内の流速分布の比較 (Case F1, F2)



図-6 通水後の沈石の散乱状況(Case F3)

る。図-6は、Case F3における通水後の様子である。水叩き部と下流斜面の沈石が流送され、下流に散乱している。特に水衝部では、沈石が流送されると、粗朶沈床工に大きな力加わり、被災を受ける危険性が高いため、沈石は流送されない十分な重量をもつ必要がある。また、図-4から分かるようにCase F3では水衝部が許容した洗掘孔の下流斜面に移動していることから、本実験条件では流量規模が2倍以上となると洗掘孔形状が適切でないと考えられる。

図-7は、Case Fgにおける粒径ごとの沈石の移動状況の観察結果である。洗掘孔形状を形成した流量と同規模の流量を通水した場合でも、粗朶沈床工の厚さ分(約0.05m)洗掘孔が浅くなるため、河床材料より大きい礫が流送される。図-4, 7より、最大洗掘深を約1割小さくすると、河床材料粒径の30倍の礫が移動しており、洗掘孔を保持する重要性が分かる。流量規模が大きくなるに連れて、水叩き部に必要な沈石重量は大きくなる。本実験条件では流量規模が2倍となると、必要な沈石の粒径は約2倍(河床材料の60~70倍)である。水叩き部には特に



$d_0$ : 河床材料粒径(0.8mm),  $q_0$ : 許容する洗掘孔の流量(0.030m<sup>2</sup>/s)

図-7 Case Fgにおける粒径ごとの沈石の移動状況

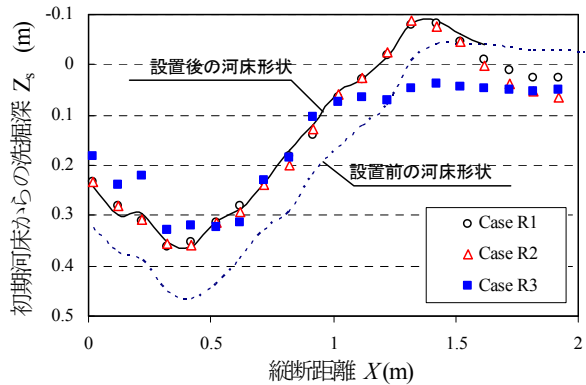


図-8 捨石工設置後の河床形状の変化



図-9 通水後の捨石の散乱状況(Case R3)

大きな力が作用するため、護床ブロックなどと組み合わせ河床を防護する<sup>1)</sup>ことが有効と考えられるが、この場合、洗掘孔形状を大きく変化させないように留意する必要がある。

### (3) 粗朶沈床工の有効性の検討

粗朶沈床工と逆フィルターを用いた捨石工法を比較し、粗朶沈床工の有効性を検討する。図-8は捨石工を設置したCase R1~R3の河床形状である。Case R1,R2では洗掘孔形状が設置時とほとんど変わっておらず、逆フィルターによって捨石下部の砂の吸出しが防止されていることが分かる。しかし、洗掘孔下流の河床は、粗朶沈床工の場合(図-4)と比べて洗掘されている。これは、表層礫が大きいために下流端で河床粗度が急変することに加え、捨石工では底面土砂の吸出しを防ぐために必要な

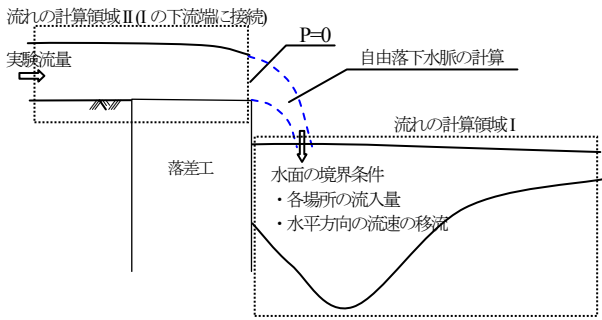


図-10 落差工下流の流れの解析法

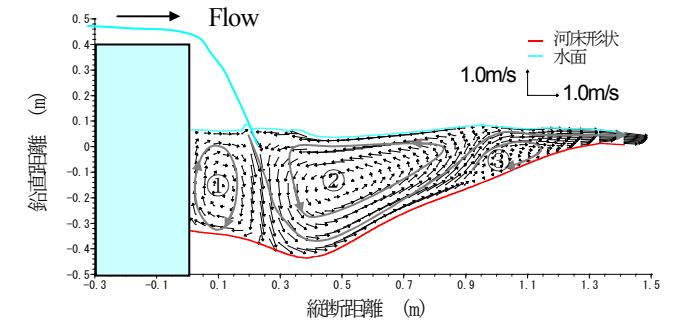
層厚が大きくなり、洗掘孔が小さくなったためと考えられる。Case R3 では洗掘孔下流形状が大きく変形し、図-9 からも分かるように斜面上の表層の粒径の大きい礫が水衝部に転がり落ちている。これは、主流が斜面に衝突し、強い逆流域が斜面上に形成されたためであり、この結果、洗掘孔はさらに小さくなる。また、逆フィルター工法では表層礫が移動すると、より小さい礫が流れに晒されるため、図-8 の Case R3 における洗掘孔下流部のように、被災が広がりやすい。

以上のことから、粗朶沈床工法には以下の利点があると言える。粗朶沈床工は敷粗朶によって砂の吸出しを防ぎ、柵によって礫の移動を防ぐため、洗掘孔形状に沿って設置することが可能である。このため、流れのエネルギーが効率的に減衰し、下流の河床が洗掘されにくい。また、沈石が一部流送されても、全体として河床を保護する構造であるため、被災は広がりにくい。

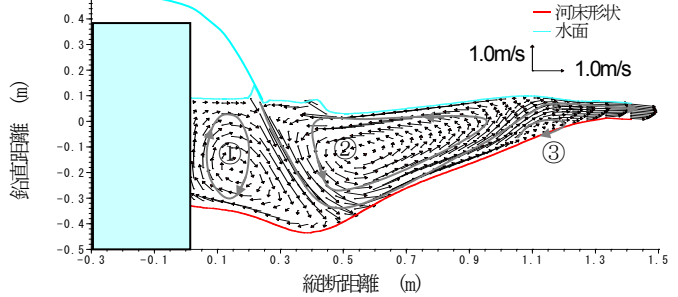
#### 4. 洗掘孔内の流れの数値解析と粗朶沈床工の設計法の考察

粗朶沈床工の設計を合理的に行うためには、想定する洗掘孔の形状と水理条件による渦の形成領域の違いや洗掘孔内で流れのエネルギーが十分減衰するかどうかを明らかにする必要がある。ここでは、まず洗掘孔内の流れの解析法を検討し、それをを用いた粗朶沈床工の設置方法を考察する。

落差工下流は自由噴流であるため、噴流水脈は直接解かず、図-10 に示すように落下水脈と洗掘孔内の流れを分離する。落下水脈の計算方法を示す。段落ち断面では圧力がゼロとならないので、厳密に言えば圧力をゼロとして計算される水位と若干異なり、段落ち下流のナップ形状は自由落下の場合と異なる<sup>14)</sup>。しかし、本実験条件では落下高さが大きいため、段落ち部の流れの精度が水脈落下点の流れの計算に与える影響は小さい。そこで、本解析では段落ち断面で圧力をゼロとして水深を解き、段落ち断面から断面平均流速の平行流れによる自由落下水脈を計算する。以下に示すように、洗掘孔内の流れの解析において水面の境界条件として各メッシュの噴流による流入量  $\delta q_m$  を与える。段落ち断面は洗掘孔から十分下流に離れた下流断面で計算する。洗掘孔内の流れの解



(a) Case F1



(b) Case F2

図-11 流量規模の違いによる洗掘孔内の流速分布の計算結果

(Case F1, F2)

析の基本的な部分は既報論文<sup>4)</sup>と同様であるため、ここでは概要を示すに留める。落差工下流部における変動を伴う河床および水面の境界条件を取り込むために、基礎方程式に  $\sigma$  座標系を用いる。基礎方程式はスタガード格子を用いて、差分法により計算される。 $\xi$  方向移流項は三次精度の風上差分法、他の項は二次精度の中央差分で計算する。乱流モデルにはスマゴリンスキー定数モデルを用いている。圧力は静水圧分布を仮定せず、圧力を静水圧成分とその偏差成分  $dp$  に分解し、 $dp$  を HSMAC 法による繰り返し計算で求める。水位は HSMAC 法の繰り返し計算過程において、水深積分した連続式により随時計算する。水面下グリッドでは圧力偏差  $dp=0$  を与える。噴流の水平方向流速は水面を介した  $\sigma$  方向の移流項で考慮するが、落下水脈の計算で求まる落下地点の鉛直方向流速は、噴流計算結果を直接用いるのではなく、水面の運動学的境界条件に噴流による流入量  $\delta q_m$  を考慮した式(1)で与える。

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \int_0^h \tilde{U} dz + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \delta q_m \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{U}$  :  $\xi$  方向流速の物理成分、 $h$  : 水深、 $\zeta$  : 水位、 $\partial/\partial \xi = 1/d\xi \cdot \partial/\partial \xi$  である。計算格子の大きさは水深を 30 分割、噴流を境界条件として適切に与えるため、縦断方向を 0.01m とした。また、粗朶沈床工は、粗朶沈床工上面を河床として与えている。

洗掘孔内の流れの解析結果を図-11 に示す。本解析では噴流内部で水面が計算されることになるが、これは噴流内部の圧力ゼロの等圧面である。したがって、噴流落下点の水面はやや上昇し、落下地点付近の噴流は流れの計算で解かれていることになる。Case F1 の計算結果は、

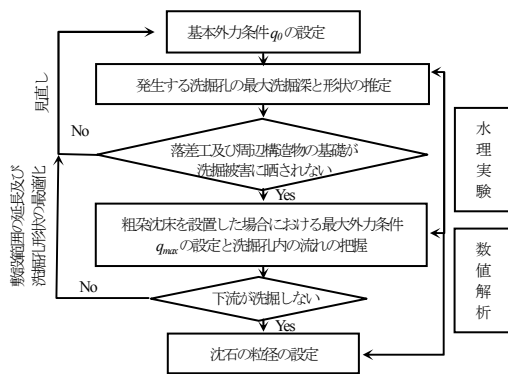


図-12 落差工下流の河床洗掘孔を考慮して設置する粗朶沈床工法の設計の考え方

最大洗掘箇所付近に噴流が衝突し流れが大きく曲げられ、洗掘孔下流斜面では河床に沿った流れとならず、主流は水面付近を通る。この結果、特徴的な三つの渦を形成し流れのエネルギーが減衰する実験結果の特徴を説明できている。また、Case F1 と F2 を比較すると、実験結果と同様に、大きなエネルギー損失を生じさせるために、噴流落下点下流の渦②が発達し、洗掘孔下流斜面の逆流域③が下流に移動している。解析結果は実験結果と比較すると、渦領域②が大きくなっており、洗掘孔下流斜面の逆流域③がやや下流側に形成されている。この原因は主として、本解析モデルは空気の流れによる上昇流を考慮しないためと考えられる。落下水脈が空気を連行することによって流れのエネルギー減衰率が大きくなることは古くから知られており<sup>6)</sup>、空気混入を考慮しない本解析モデルでは流れのエネルギー減衰を少なめに見積もることになる。本解析モデルで河床を保護する必要がある水叩き範囲を見積もると、図-5 の Case F1, F2 の実験結果  $X=0.6, 0.7$  に対して、計算結果では  $X=0.9, 1.1\text{m}$  となり、設計の際には 1.5 倍程度安全側に評価される。

解析モデルの活用法と落差工下流の粗朶沈床工法の設計の考え方を示す。福岡は、河道改修のもたらす影響の調査研究に関するフローチャートを提示し、水理実験、数値解析、現地観測の異なる重要な役割を述べている<sup>1)</sup>。粗朶沈床工法の設計に関する検討においてもこれらの役割は基本的に同じであり、この大枠の中で考えればよい。図-12 は粗朶沈床工法の設計の考え方について本論文で検討した事項をまとめたものである。まず、許容する洗掘孔を生じさせる基本外力  $q_0$  を適切に設定する。本論文の範囲では、外力条件は流量規模のみを取り扱っているが、落差工下流の流れは下流水位の影響を強く受ける<sup>4)</sup>ため、想定する基本外力と最大外力の条件は河道条件を考慮する。河床洗掘孔を考慮して設計する場合、発生する洗掘が自身と周囲の構造物の安定性と機能を低下させないことが第一に重要であり、フローは確保すべき条件の重要度の高いと考えられる項目順で作成されている。許容する洗掘孔を決定した後、想定される最大外力条件  $q_{max}$  において下流端が洗掘されないようにする。洗掘孔内でエネルギーが十分減衰しない場合、敷設範囲の延長及び洗掘孔形状の最適化等を含めて、洗掘対策工法を再検討する必要がある。洗掘孔内でエネルギーが十分減衰することが分かれば、粗朶沈床工の機能が維持されるように、必要な沈石の粒径を定める。これらの検討項目に対して、実現象との対応を検討しなが

ら、水理実験と数値解析を活用する<sup>1)</sup>。施工後は、粗朶沈床工が機能しているかどうか、モニタリングを行う必要がある。

## 5. 結論

本研究では、落差工下流の洗掘対策として、洗掘孔を想定し設置された粗朶沈床工の洗掘防護効果を検討し、洗掘孔を許容した落差工下流の洗掘対策法を検討した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 構造物下流に形成される洗掘孔は自然に落下水脈のエネルギーを効率的に減殺する形状となっているため、なるべく洗掘孔を維持しながら河床を防護することが望ましい。粗朶沈床工は敷粗朶によって砂の吸出しを防ぎ、柵によって礫の移動を防ぐため、洗掘孔形状に沿って設置することが可能である。この結果、構造物下流の流れのエネルギーを効率的に減殺でき、下流の河床が洗掘されにくい。また、沈石が一部流送されても、全体として河床を保護する構造であるため、被災は広がりにくい。
- 2) 構築した解析モデルは、最大洗掘箇所付近に噴流が衝突し流れが大きく曲げられ、洗掘孔下流斜面では河床に沿った流れとならず、特徴的な三つの渦により流れのエネルギーが減殺される実験結果の特徴を説明できる。また、流量規模の増大により流れ場が変化する機構を説明できる。空気混入を考慮しない本解析モデルでは流れのエネルギー減衰を少なめに見積もり、設計の際には安全側の評価となる。また解析モデルの活用法と落差工下流の粗朶沈床工法の設計の考え方を示した。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) (財)国土開発技術研究センター：床止めの構造設計手引き，山海堂，1998。
- 3) 神田佳一，村本嘉雄，藤田裕一郎：護床工下流部における局所洗掘とその軽減法に関する研究，土木学会論文集 No.551, pp.21-36, 1996。
- 4) 内田龍彦，福岡捷二，渡邊明英：床止め工下流部の局所洗掘の数値解析モデルの開発，土木学会論文集，No.768, pp.45-54, 2004。
- 5) 安芸周一：アーチダム中央越流型洪水吐水叩きの水クッション効果に関する研究，電力中央研究所，技術研究所報告，土木 63012, 1963。
- 6) 岩崎敏夫，千秋信一：静水中に落下する水流の実験，土木学会誌，38-8, pp.1-5, 1953。
- 7) 北陸地方建設局：粗朶工法の施工事例集，社団法人北陸建設弘済会，1999。
- 8) 富野章：日本の伝統的河川工法①，信山社サイテック，2002。
- 9) 浮須修栄，五十嵐新治：粗朶沈床のユニット化について，河川，2002-10月号，pp.33-36, 2002。
- 10) 鈴木幸一，若月章浩：礫護床による段落直下流部の洗掘防止，第47回年次学術講演会講演概要集II, pp.138-139, 1992。
- 11) 鈴木幸一，山本浩規，徳安芳典：逆フィルターを利用した捨石洗掘防止工に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.572/II-40, 1-9, 1997。
- 12) Hoffmans, G.J.C.M. : Jet scour in equilibrium phase, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.124, No.4, pp.430-438, 1998。
- 13) 岩崎敏夫：段落水流の水理現象に関する実験的考察，土木学会誌，38-6, pp.31-36, 1953

(2005. 4. 7 受付)