

ベーンエの付設によるスリット付き砂防ダムの改善に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVEMENT OF SEDIMENT RETENTION DAM WITH SLIT-OPENING BY USE OF VANE-TYPE STRUCTURES

岡部健士¹・榎本真二²・穴瀬康雄³

Takeshi OKABE, Shinji ENOMOTO and Yasuo ANASE

¹正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

²学生会員 徳島大学大学院 工学研究科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

³正会員 工博 エコー建設コンサルタント (〒770 徳島市南末広町4-53)

The purpose of this study is to improve the efficiency of sediment retention dams with vertical slit-openings. First, characteristics of an isolated vortex, giving negative effects to the behavior of water and sediment spilling through slit-openings, are clarified experimentally. Referring to this result, addition of one or two couples of vane-type structures to the slit-opening is recommended. The efficiency of this measure is tested by changing the number and geometric dimensions of the structures. It is proved that those structures significantly promote the development of gully streams in medium and minor flood events and thus increase the retention capacity for heavy sediment run-off by big floods. Finally, based on measurements of three dimensional flow velocity, the influence of the vane-structures to flow and sediment is discussed in order to understand the results of the above test from hydraulic points of view.

Key Words : Sediment retention dam, slit-opening, isolated vortex, vane-type structure, development of gully stream, experimental test, three-dimensional flow

1. まえがき

通常の不透過型砂防ダムについては、満砂後、ピーク流砂量カットをはじめとする土砂調節機能の低下が指摘されている。また、生態系保全の立場からは、水生生物の自由で円滑な移動を著しく阻害しているとの非難がある¹⁾。スリット付き砂防ダムは、上述のような問題点の解消に有効な手段の一つと考えられ、近年、その施工例が増加しつつある²⁾。

図-1は、砂防ダム上流の河床縦断形状の模式図である。通常の砂防ダムの場合、満砂後の河床は、図中の曲線A-BおよびA-Cの間を推移し、両者に挟まれた空間が調節容量となる。これに対して、スリットがあれば、中・小の出水によっても、スリットに接続する水みちが堆砂層を曲線D-E-Bのレベルにまで浸食し、スリットがない場合より大きい調節容量が再生されるものと期待されている。また、このように砂防ダム上下流の河床位の差を減じるとともに、流路を維持することは、生物環境の改善にもつながるものと思われる。さて、最近水山ら³⁾が数値計算によって検討した例によれば、スリットの形状は、幅をある程度まで小さくし、切り込みを深くしたも

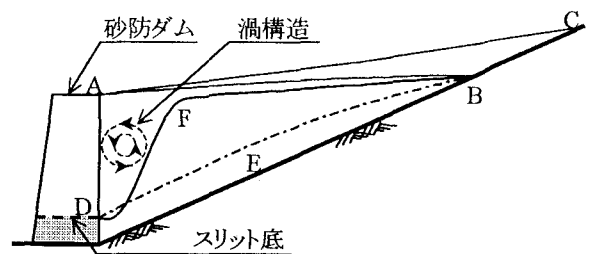


図-1 砂防ダム上流の河床縦断形状

のが効果的なようである。ただし、既存の実験例⁴⁾を見ると、そのようなスリットを有する砂防ダム上流の河床形状は、必ずしも図-1の曲線D-E-Bのようではなく、むしろ曲線D-F-Bの形態(D-F部分の傾斜は、ほぼ砂礫の水中安息角)となり、小流量による水みち浸食が期待するほどには進行しない。筆者らは、この原因が、ダム直上流に生じた軸がほぼ水平の強い渦構造による接近流の堰上げと、砂礫の上流への再搬送にあると考えた。そして、適当な構造物の付加により、その渦構造を破壊する、あるいはその影響を可能な限り軽減する方策を種々検討した。その結果、スリット開口部の上流側に1~2対の短い

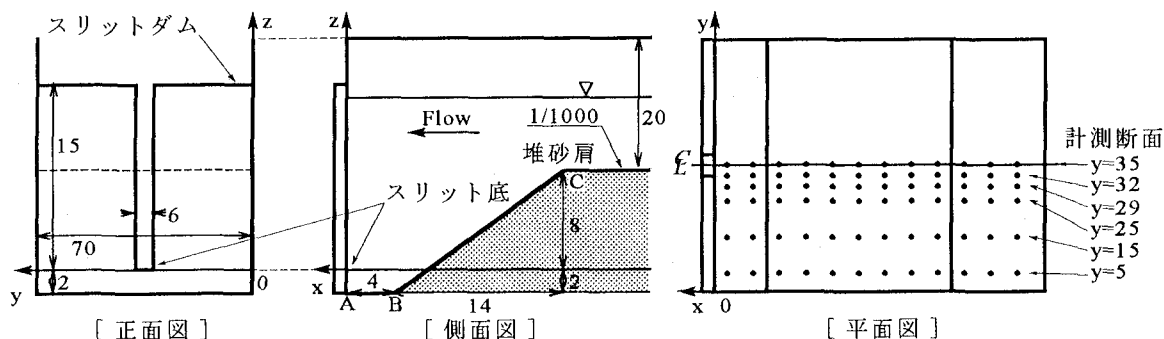


図-2 固定床実験水路の概要 (図中の寸法数字の単位はcm)

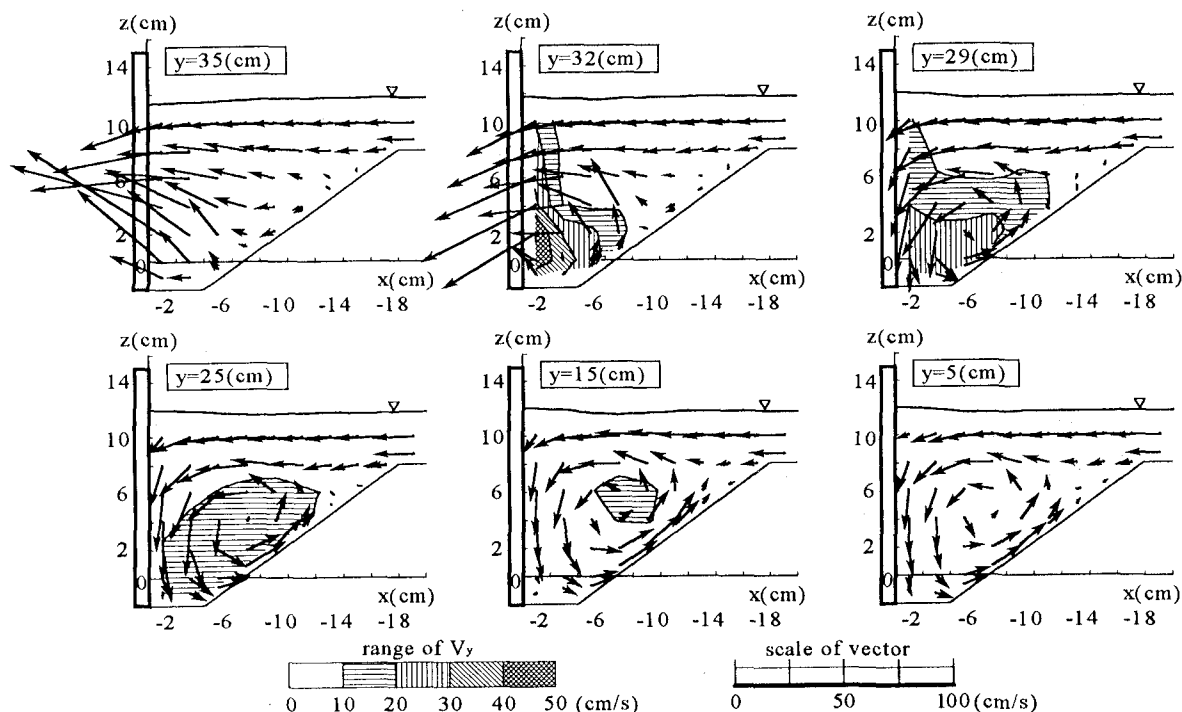


図-3 3次元流速分布と水位の縦断分布

導流板 (以下、ベーンと呼ぶ) を鉛直に立て込む方法が効果的であるとの感触を得た⁵⁾。

以下、第2章においては、まず、上述の渦構造の特性を調べた固定床実験の結果を紹介する。ついで、第3章では、ベーンの対数や幾何諸元を種々に変化させて実施した移動床実験により、ベーンの効果を検証する。さらに、第4章では、再度固定床実験を行い、ベーンの水利機能を調べた結果を述べる。

2. 渦構造の水利特性

(1) 実験の設備と方法

実験には、幅70cm、長さ400cmの長方形断面水路を用いた (図-2参照)。水路下流端にはアクリル製のスリット付き砂防ダム模型を取り付け、その上流側に図-1のD-F-B面を単純化した堆砂層モデルを敷設した。なお、以下においては、図-2の点Cを「堆砂肩」、A-B-C面を「堆砂前面」と呼ぶ。実験では、流水がスリット部分のみから排出されるとともに、

堆砂肩が支配断面にならない範囲の定常流量を通水しつつ、図-2の平面図において“・”が示す位置に立てた鉛直測線上で、ポイントゲージによる水位計測ならびにI-型およびL-型プルーブの電磁流速計による3次元流速計測を行った。

(2) 実験結果および考察

図-3に流量5.3ℓ/sのケースの結果を、y値の異なる縦断面ごとに描いている (y=32cmがスリットの縁にあたる)。なお、3次元流速については、そのx-z成分をベクトル、y成分をコンターの形式で示している。さて、流速ベクトルの分布状況より、堆砂前面上に、その高さとはほぼ等しい径の強い渦構造が存在していることが確認されよう。渦軸はスリットから離れた (y=5~25cm) 場所ではほぼ水平だが、スリット近傍では、これに接近するとともに急低下し、ダムを通過する際には、スリット底の直上を通過している。そして、これとともに、渦の径も急激に小さくなる。また、渦外縁の流速は、渦軸が水平な領

域でも、接近流からのエネルギー供給によって、水路中心に向かって増加しているが、スリット近傍では、渦径の減少の効果も相俟って、接近流の流速を越える大きさになっている。さらに、このような外縁流速は、堆砂前面の直上でもさほど減速することがなく、結果として、堆砂面上には大きい上流向きの剪断力が誘起されているものと推察される。一方、 y 方向流速は、当然のことながら水路中心に向かって増加するが、その傾向は、底面付近で顕著であり、水路中心から遠い領域からの接近流水の大部分が底面沿いに輸送されていることが分かる。また、このような横断方向の流れは、スリット開口部の直上流で逆の側から来たものと衝突・混合しつつ下流向きに急転向して排出されているようである。このような、一種の“よどみ”領域の存在は、スリットの実質的な通水断面積を削減し、排砂効率の低下すなわち接近流の堰上げの原因になることは明らかである。

以上、スリット付き砂防ダムの上流に形成される渦構造の特性を概観したが、ここで、堆砂肩を越えて来た土砂の挙動を推察するために、堆砂前面上の掃流力分布にほぼ対応する底面直上流速の平面分布を示せば図-4のようである。とくに水路中心線に沿った堆砂肩直下の領域に、土砂の停滞域が存在することが窺える。そして、これが堆砂肩の浸食・低下を抑制しているものと思われる。また、上述した渦構造の堰上げ効果は、接近流の土砂輸送能を低下させることを通して、やはり、排砂の妨げとなっていると言えよう。次章においてその効果を検討するベーンは、まず、その整流効果によって接近流の堰上げを軽減するとともに、スリット近傍の底面流速ベクトルを下流側に転向・増速させて、上述した土砂の停滞を解消しようとするものである。

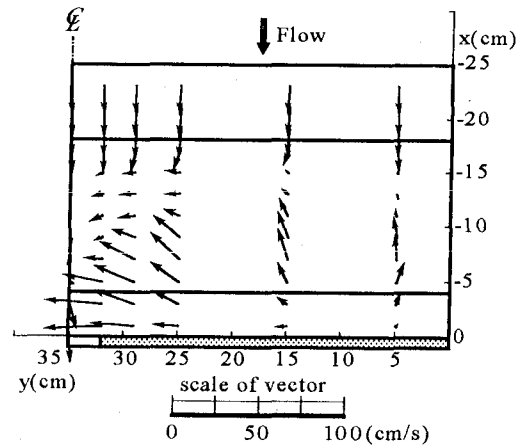


図-4 底面流速ベクトル分布

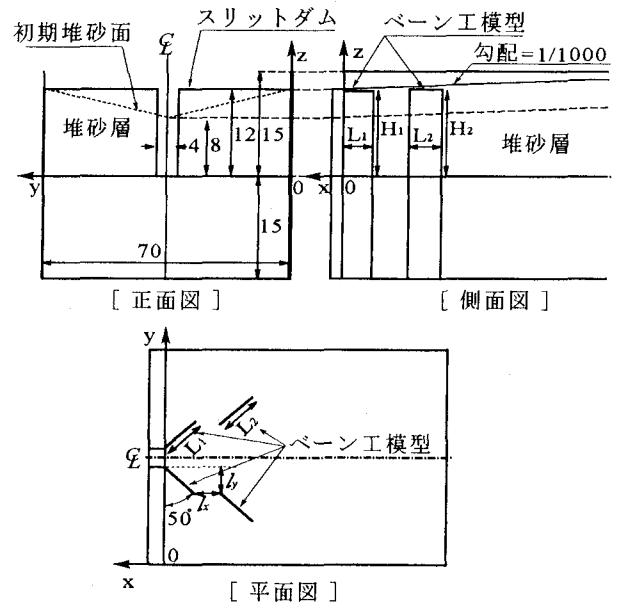


図-5 実験水路概要 (図中の寸法数字の単位はcm)

3. 移動床実験

(1) 実験設備および方法

実験には、第2章で述べた固定床堆砂層モデルを設置した水路をそのまま用いた。水路下流端には、図-5に示すような合板製スリット付き砂防ダム模型と、1対あるいは2対のベーン工模型を付設した。ただし、スリットは、排砂実験中に固定床堆砂層モデルが露出しないように幅を縮小すると共にスリット底部の位置を引き上げた。また、ベーンとダム上流面との角度として50°を選んだことについては、明確な根拠はなく、その適正值については今後の課題としている。実験ケースは、スリットのみの場合 (Case-Nと呼ぶ) および表-1に示すように対数や長さ、高さ、配置間隔を変えた11種類のベーン工模型 (1対のものをSシリーズ、2対のものをDシリーズと呼ぶ) を設置する場合の合計12ケースである。実験では、各ケースについて、図-5に示すような、粒径3mmの一樣砂を敷き詰めた初期堆砂層に、定常流量3.3ℓ/sを3時間通水した。そして、その間の排出土砂量の時間変化と通水終了直前の水位と河床位を測

表-1 ベーン工の幾何諸元 (図-5参照)

Case	L_1 (cm)	H_1 (cm)	I_x (cm)	I_y (cm)	L_2 (cm)	H_2 (cm)
S シ リ ー ズ	S-1	2.5	12	—	—	—
	S-2	5	12	—	—	—
	S-3	10	12	—	—	—
	S-4	52	12	—	—	—
	S-5	5	7	—	—	—
	S-6	5	4	—	—	—
D シ リ ー ズ	D-1	5	12	2	3.2	5
	D-2	5	12	3	3.2	5
	D-3	5	12	4	3.2	5
	D-4	5	7	3	3.2	5
	D-5	5	12	3	0	5

定した。なお、初期堆砂層の縦断勾配と通水流量は、ベーンなしの場合に接近流の掃流力が実験砂の限界掃流力以下となるように決定された。また、堆砂面の横断形状をV字状に成形しているのは、流路の蛇行を抑制するためである。

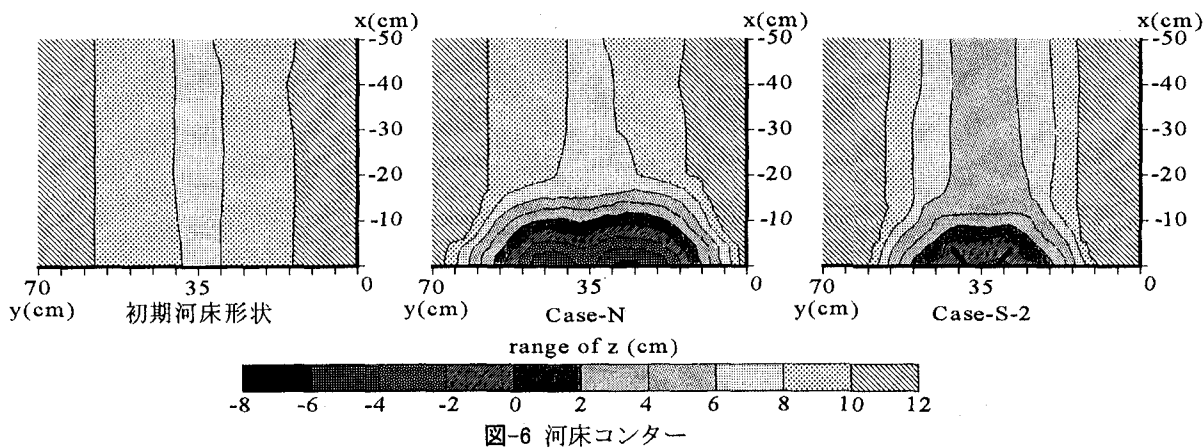


図-6 河床コンター

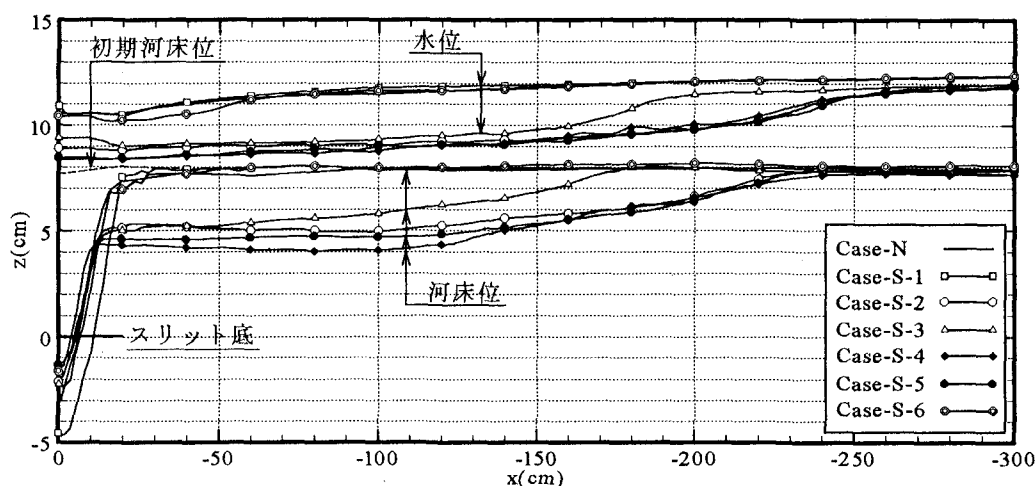


図-7 Case-NおよびCase-Sシリーズの水位・河床位の縦断分布

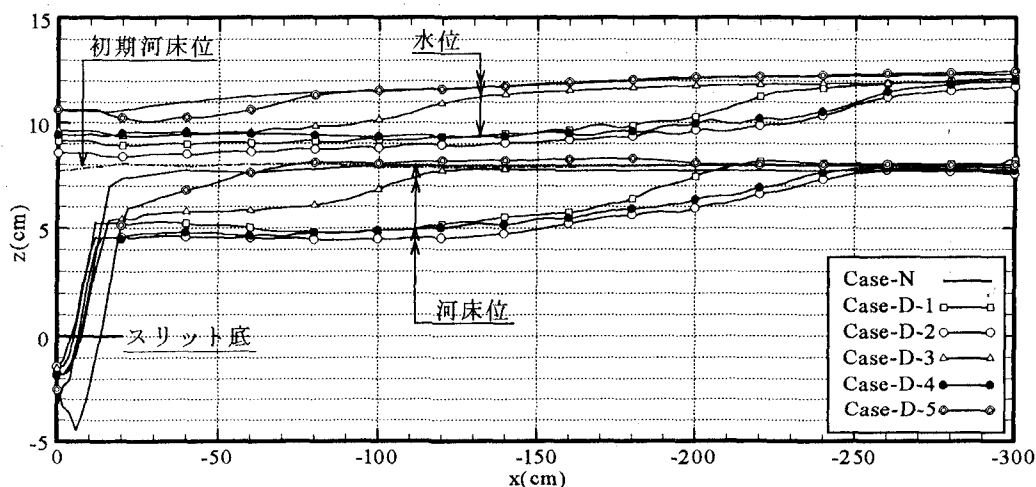


図-8 Case-NおよびCase-Dシリーズの水位・河床位の縦断分布

(2) 実験結果および考察

a) ベーンの効果

ベーンの有無による実験結果の相違の代表例として、図-6では、Case-NとCase-S-2の最終コンターを比較している。まず、Case-Nでは、この実験が接近流の掃流力を実験砂の限界掃流力以下とする条件で行われたため、ダム直上流の砂がスリ鉢状に崩落して排出された以外、堆砂層には何の変化も生じな

かった。スリットの直上流で水路中心線に近い領域に砂面の凸部が形成されているが、これは、図-4との関連で述べた土砂の停滞域に対応している。一方、ベーンを設置した実験では、1, 2ケースを除き、堆砂層の低下と浸食流路の上流への伸展という期待の効果が確認された。ただし、その効果の大小は、ベーンの幾何諸元によって、相違したことは言うまでもない。以下においては、図-7および図-8に描か

れた水路中心線上の河床縦断形状と水位線を参照しつつ、ベーンの幾何諸元とその効果の関係を整理しておく。なお、本実験では、流量を一定としたため、浸食流路幅は全ケースでほぼ一定であったし、流路の蛇行も制御しているため、河床低下の大小が、排砂効率のそれにほぼ対応しているものと考えてよい。

b) Case-Sシリーズについて

Case-S-1～Case-S-4では、ベーンを抜水状態とし、長さのみ2.5～52cmの範囲で変化させた(52cmの場合には、ベーンの上流端が側壁に達し、むしろ水路縮幅の一形態と見るべきかも知れない)。これらの内で最も深い縦浸食が生じたのはCase-S-4で、スリット底を基準にした堆砂肩の高さがCase-Nの場合のものの半分近くまで減少している。ただし、このケースのように長いベーンは、これ自体、非現実的である。一方、ベーンの長さをスリット幅程度とした3ケースの中では、Case-S-2での効果が最大で、Case-S-4におけるものと比較しても大差ない。しかし、他の2ケースでは、堆砂肩の低下量や浸食流路の伸展長が著しく減少している。水位線について比較してみると、河床形状と対応した傾向が認められ、ベーンによるスリット通水能の向上が、浸食流路の発達に直接関与していることを裏付けている。ここで筆者らは、ベーンが水面近くの流れに不必要な抵抗を及ぼし、これによってダム直上流の水位低下が妨げられている可能性があると考え、試みに、Case-S-2のベーン高さを7cm (Case-S-5)あるいは4cm (Case-S-6)のように削減した実験を実施した。その結果として、Case-S-5では、水位ならびに河床位とも、わずかながらも確実に低下しているが、Case-S-6では、ベーンそのものの効果がほとんど発現されなくなっている。

c) Case-Dシリーズについて

上述のSシリーズの実験中に堆砂前面上での砂の挙動を観察したり、着色溶液の注入により流況の可視化観察をした結果、ベーンの整流効果が不十分で、その上流端近傍の砂面上の流速がなおも上流向きになっており、このために堆砂肩の低下が抑制されているものと判断された。そこでDシリーズでは、さらに1対のベーンを上流側に立て込んでみた。

Case-D-1～D-3は、Case-S-2のベーン工に対し、横断方向間隔 l_y を固定した一対のベーンを、既設のものの縦断方向間隔 l_x を2, 3, 4cmと逐次変えながら付加した場合である。図-8より、Case-D-2においては、Case-S-2のものより深く、上流にも延びた浸食流路が形成されたことが分かる。ただし、両者の結果には、目を見張る程の相違はない。一方、 l_x がCase-D-2の場合より小さいCase-D-1では、縦浸食の深さがCase-S-2の場合よりも小さくなっている。これは、上下流のベーンの間を通る流れを拘束し過ぎたためと思われる。また、逆に l_x を増大させたCase-D-3では、浸食流路の発達状況が著しく悪化している。これは、上流側のベーンに衝突する接近流がその上流面に橋脚周辺の馬蹄形渦に類似した強い

渦構造を形成し、これによって接近流の堰上げと砂の逆搬送が生じたためと推察される。

Case-D-4およびD-5は、Case-D-2のベーン工の諸元を部分的に変更したものである。Case-D-4は、2対のベーンともその頂部が水面下に没するように高さを減じてみた場合であるが、実験結果はほとんど変わっていない。一方、Case-D-5では、上流側のベーンの対の横断方向間隔を下流側のものと等しくした。この場合には、水位の堰上げが著しく、このために浸食流路の発達がほとんど見られなかった。

4. ベーンの水利機能に関する固定床実験

(1) 実験概要

移動床実験結果の水理学的機構をより詳細に把握するとともに、今後さらに効果的なベーン工の形態や諸元を模索してゆく際の参考とするために、固定床モデルを用いた流速計測実験を行った。

実験には、第2章で述べたものと同一の水路と堆砂層モデルを用いたが、水路下流端に取り付けるダム模型のスリット幅は6cmとし、水路幅を45cmに縮小した。これは、移動床実験でベーンの効果がある程度認められた場合の堆砂肩高さと上述の堆砂層模型の高さ(ともにスリット底を基準)との比が概ね1.5であることと、移動床実験での浸食流路の水面幅が平均的に見て約30cmであったことに基づいている。すなわち、本固定床実験は、移動床実験の流れを約1.5倍に拡大したものとなっている。実験では定常流量6.3ℓ/sを通水し、図-9に示す縦断面内で、水位と3次元流速の計測を行った。

(2) 実験結果および考察

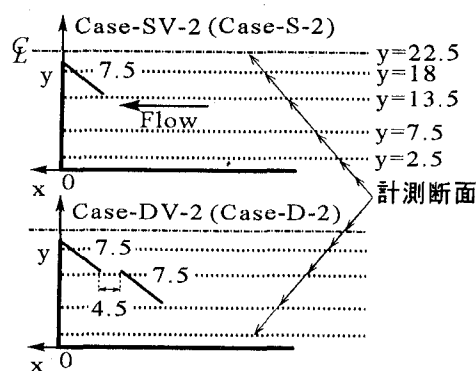


図-9 ベーン工の付設パターン
(図中の寸法数字の単位はcm)

移動床実験のCase-S-2およびCase-D-2におけるベーンの設置条件に対応した実験結果を、それぞれ図-10 (Case-SV-2) および図-11 (Case-DV-2) に示している。作図要領は、図-3と同様であり、図中の破線は、ベーンの計測断面への投影形状を表す。

はじめに、 $y=22.5$ cm (水路中心) の縦断面に注目する。図-3のベーン無しの場合に比して、スリットを通過する流速ベクトルの向きが水平(ダムに直交方向)に近づいているとともに、その一様性も高く

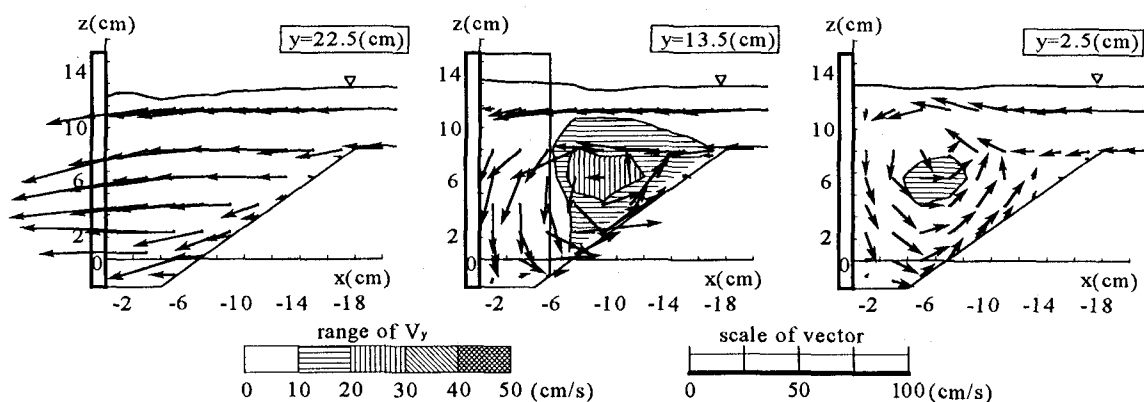


図-10 Case-SV-2の3次元流速分布

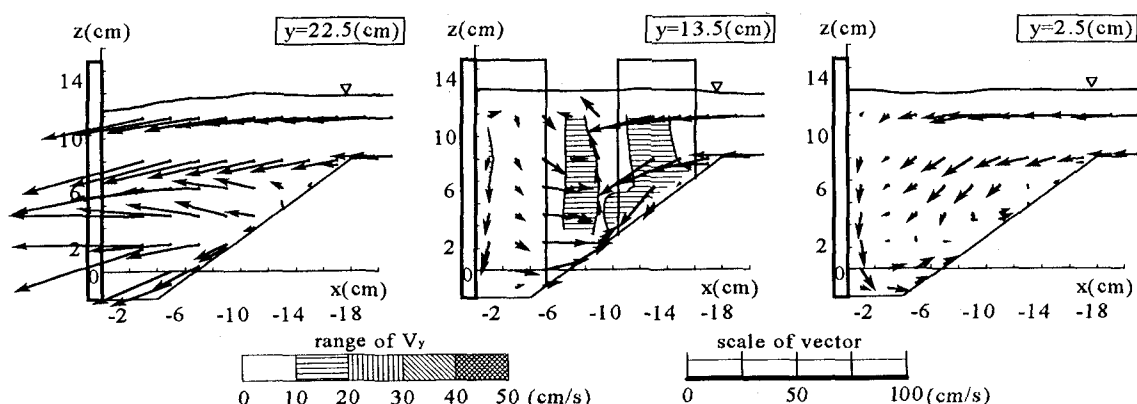


図-11 Case-DV-2の3次元流速分布

なっている。これは、ベーンがスリット部での渦構造の渦度を低減させたためであり、通水能の向上すなわち堰上げ水位の低下につながったものと推察される。また、底面に沿う流速は、ベーン無しの場合には、堆砂前面の全域でほとんどゼロであったが、ベーンがあると、堆砂肩の直下流から流下とともに増加する傾向を示している。これに対応した掃流力の増加も排砂効率の向上に寄与したと思われる。

水路中心から離れた領域における流れの様相は、Case-SV-2とCase-DV-2でかなり相違している。前者では、問題の渦構造が明瞭に残留している。ただし、渦軸は比較的高く、また、横断方向の流れの中心も底面から離れている。一方、後者では、水路壁に近い領域においても渦構造が不明瞭であり、さらに、中心に近い領域では、ベーンの直接的な影響もあって、渦構造そのものが消滅している。しかし、上流側のベーンの表面に別の（前章では馬蹄形渦に類似したと表現した）渦構造の発生を示唆する大きい中心向き流速の分布領域が認められる。そして、これが原因して、追加された上流側のベーンの効果期待したほどには現れなかったものと推察される。

5. あとがき

本研究では、スリットダムからの土砂排除を妨げ

る渦構造の影響を軽減する方策として、ベーンと称する鉛直構造物の付設を検討した。まず、多様な条件のベーンを設置した移動床実験を通して、スリット幅程度のベーンを1対あるいは2対設けることが、排砂効率の向上に有効であることが明らかにされた。ついで、固定床実験を行い、その結果の水理学的機構をある程度把握した。ただし、その最適な設計諸元については今後とも十分に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 太田猛彦：「生態系と調和した砂防」の基本的な考え方，砂防学会誌，Vol. 50，No. 2，pp. 55-60，1997.
- 2) 大久保駿・阿部宗平・水山高久：スリットを有する砂防ダム，床固めの建設実態，新砂防，Vol. 48，No. 5，pp. 16-20，1996.
- 3) 大久保駿・水山高久・蒲正之・井戸清雄：連続するスリット砂防ダムの土砂調節効果，砂防学会誌，Vol. 50，No. 2，pp. 14-19，1997.
- 4) 水山高久・下東久巳・下田義文・井戸清雄：スリットを有する砂防ダムに関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，pp. 723-728，1984.
- 5) 岡部健士・穴瀬康雄：既設スリットダムの改善工法に関する研究，第2回四国支部技術研究発表会，pp. 194-195，1996.

(1997. 9. 30受付)