

1.はじめに 近年の河川整備では「治水」,「利水」だけでなく「環境保全」にも重点を置いた整備がなされている。それらでは河川利用の場を提供する目的や,水生生物の保全・生息環境の保護を目的とし,人工的に 河岸凹部をつくる取り組みがなされている。しかし,河岸凹部にはどのような流量に対しても凹部内で流速が小さく,土砂堆積が発生しやすいという問題点がある。特に出水時には,土砂堆積によって河岸凹部の機能が失われるのは避けられない。このような河岸凹部内の土砂堆積を抑制する手法として,凹部上流端付近への導流工設置により,凹部内の土砂堆積をより直接的に除去する手法が検討されている¹⁾。また,導流工越流時においても,同様の観点から実験的検討がなされてきた²⁾。本研究では,導流工越流時と非越流時における流れ構造や土砂堆積の違いを把握し,導流工が河岸凹部に与える影響を PIV 計測,土砂堆積実験によって検討を行う。

2.実験方法 実験水路は,長さ 7.5m,全幅 0.3m の可変勾配開水路を用いた。側面はガラス張りで,レーザーによる光の反射を防ぐために,全水路底及び設置構造物に黒く塗装した塩化ビニル板を使用している。実験は図-1 に示すように台形の河岸凹部を設け,導流工を図のように設置した。導流工高さを越流時は $H=3\text{cm}$ とした。実験条件は表-1~表-3 に示す。また,導流工は表-4 に示すように導流工長さ $l(\text{cm})$ が 2cm, 3cm, 導流工(と河岸凹部上流端までの)距離 $a(\text{cm})$ が 3cm, 4cm, 5cm, 導流工(と流下方向のなす)角度 θ が $45^\circ, 90^\circ$ と変化させた計 13 パターンで実験を行った。PIV 計測の流れの可視化には,直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い,厚さ約 3mm のシート状にしたグリーンレーザー光を開水路水平断面および鉛直断面に照射した。レーザーシートの照射位置は,水平断面に 5mm 間隔で非越流時は 6 断面($z=0.5\sim 3\text{cm}$),越流時は 7 断面($z=0.5\sim 3.5\text{cm}$) 設定した。鉛直断面は 10mm 間隔で 10 断面($y=20\sim 29\text{cm}$) を計測した。この可視化画像は高速度カメラ(Ditect HAS-U1) を用いて $1024\times 1024(\text{pixel})$ の画像を $1/200\text{s}$ で撮影した。FlowExpert(カトウ光研)PIV 解析ソフトを用いて相互相関法により画像を水平断面では検査領域 $24\times 24(\text{pixel})$,鉛直断面では $32\times 32(\text{pixel})$ で解析し,3200 データ 16 秒間平均値を流速ベクトルデータとした。

土砂堆積実験では,浮遊砂・掃流砂混在となる 0.13mm (8 号砂),掃流砂主体となる 0.3mm (6 号砂)の珪砂を用い,貯留水槽に 250l の水と 6kg の各々の砂を入れ攪拌した状態でポンプにより 2 時間循環させ

表-1 PIV 実験条件(非越流時)

Discharge $Q(\text{m}^3/\text{s})$	Water height $h(\text{m})$	Mean velocity $U_m(\text{m}/\text{s})$	Froude No. Fr	Slope I
0.0023	0.035	0.31	0.56	1/1000

表-2 PIV 実験条件(越流時)

Discharge $Q(\text{m}^3/\text{s})$	Water height $h(\text{m})$	Mean velocity $U_m(\text{m}/\text{s})$	Froude No. Fr	Slope I
0.0035	0.045	0.39	0.59	1/1000

表-3 土砂堆積実験条件

Discharge $Q(\text{m}^3/\text{s})$	Water height $h(\text{m})$	Mean velocity $U_m(\text{m}/\text{s})$	Froude No. Fr	Slope I
0.00305	0.043	0.36	0.55	1/1000

表-4 実験ケース

case	導流工長さ $l(\text{cm})$	導流工距離 $a(\text{cm})$	導流工角度 θ
non			
l2a3	2	3	45.90
l2a4		4	45.90
l2a5		5	45.90
l3a3	3	3	45.90
l3a4		4	45.90
l3a5		5	45.90

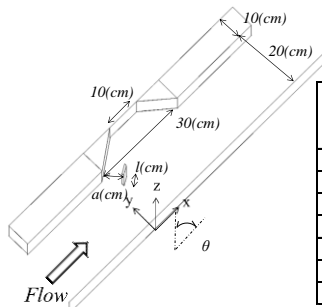


図-1 模型配置図

た。また,堆積過程把握のために,60 秒毎のインターバル撮影による写真撮影を行い,通水後の河岸凹部内の堆積形状をレーザー変位計により計測した。

3. PIV 計測実験結果(xy 断面) 図-2 に水平断面を水深平均した case non, case l2a345, case l2a390 の導流工非越流時における時間平均流速ベクトル図を示す。導流工配置が無い case non では,凹部内に反時計回りの循環渦が形成されている。case l2a345 では,導流工により縮流状態になり加速された水流が凹部内に 3cm ほど流れ込んでいる。この流れを起因とし,凹部内では導流工配置がない場合と同様の反時計回りの渦が形成されている。これに対し,case l2a390 では導流工により縮流状態になった高速な水流が凹部奥まで流れ込み凹部下流から流出している様子が見取れる。水流の一部は主流部と凹部の境界付近を逆流し,時計回りの渦を形成している。その結果,凹部本来の渦構造が消滅するパターンとなった。

また,図-3 に導流工越流時における時間平均流速ベクトル図を示す。形成される水流はどのケースでも近似していたが,導流工を越流する場合,非越流の場合と比較して,水流が凹部奥に到達しないケースが増加した。さらに,水流の流れ構造は,いずれの導流工配置においても,上記に示したような,凹部と主流域の境界付近を流れる挙動を示すか,凹部奥まで縮流状態になった水流が流れ込む挙動といったような,2 パターンの挙動を確認でき,導流工長さが 3cm かつ導流工角度が 90° の時に後者の挙動を示す傾向があり,

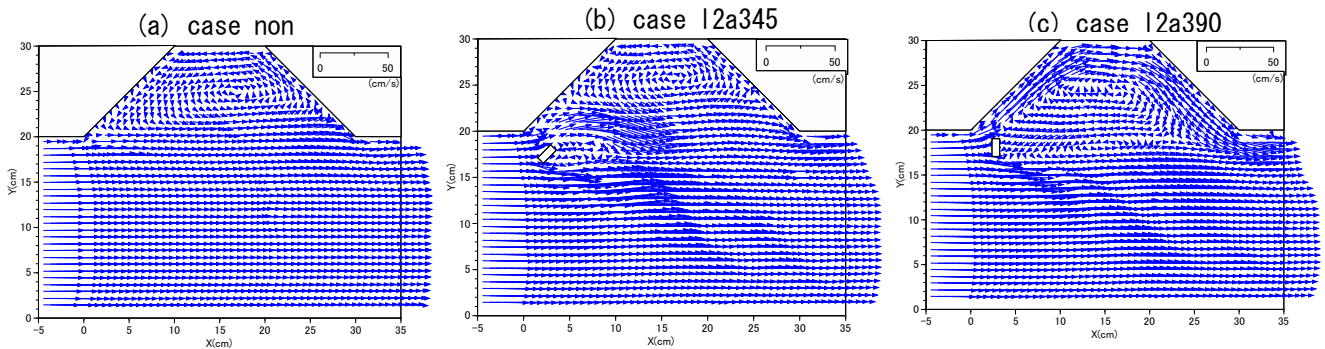


図-2 横断面における時間平均流速ベクトル図(非越流時-水深平均)

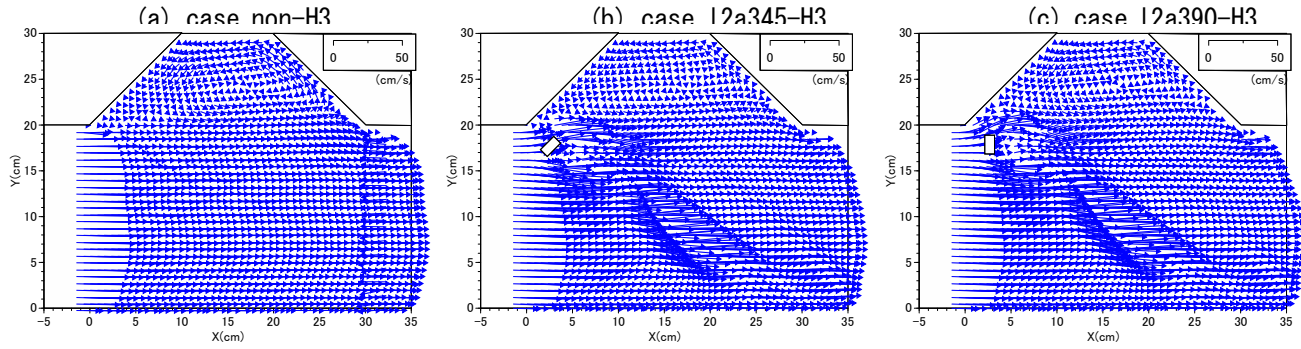


図-3 横断面における時間平均流速ベクトル図(越流時-水深平均)

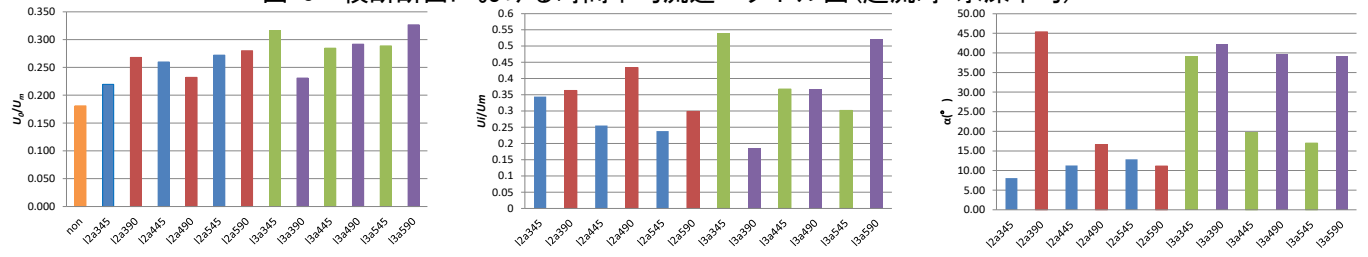


図-4 導流による凹部内平均流速(左), 流入速度(中央), 流入角度(右)(非越流時)

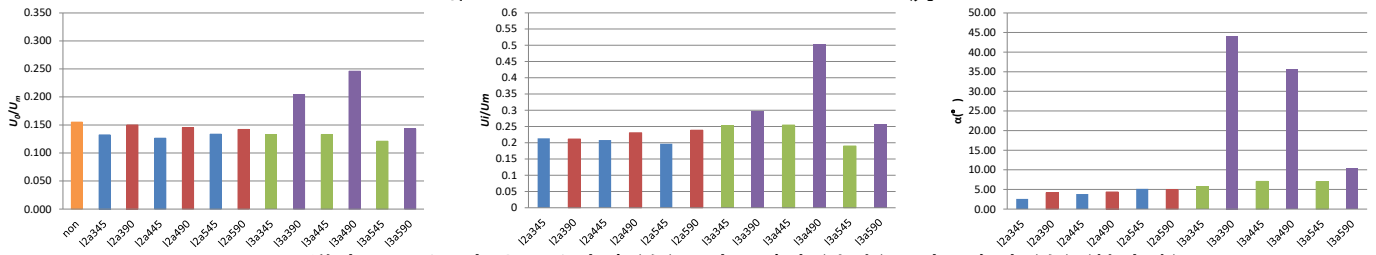


図-5 導流による凹部内平均流速(左), 流入速度(中央), 流入角度(右)(越流時)

その他では前者の挙動を示すことが多かった。

上述したように導流工による流れ構造は水流が凹部奥に及ぶか否かに大別することができるが、それぞれのケースにおける流れ特性を分類するために、導流された流れによる凹部内平均流速、流入速度、流入角度をパラメータとして取り入れた。凹部内平均流速 U_0/U_m は、河岸凹部内(0cm<x<30cm, 20cm<y<30cm)における平均流速 U_0 を断面平均流速 U_m で無次元化したものであり、流入速度 U_i/U_m は河岸凹部内(4cm<x<6cm, 20cm<y<25cm)における平均流速 U_i を断面平均流速 U_m で無次元化したものを、流入角度 α は河岸凹部内(4cm<x<6cm, 20cm<y<25cm)における角度 α を平均したものとした。

図-4 に導流工非越流時における各種パラメータを、図-5 に導流工越流時における各種パラメータを示す。非越流時では、どのケースにおいても導流工を配置す

ることにより、導流工配置なしのパターンより凹部内平均流速が大きくなった。それに対し、越流時は凹部内平均流速が小さくなる傾向があった。流入速度は、非越流時は導流工長さ 3cm、角度 90°のケース以外は導流工距離に比例して流入速度が減少傾向となった。また、越流時は導流工長さ 3cm、角度 90°のケース以外は導流工長さ、導流工距離、導流工角度の影響は小さいことが見受けられた。流入角度は、非越流の場合、導流工距離が大きくなるにつれて減少傾向にあった。さらに、越流時は、導流が凹部奥に達するケース(case l3a390-H3, case l3a490-H3)では流入角度が他のケースと比較して非常に大きくなった。越流時に、導流工長さ 3cm、導流工角度 90°のケースにおいて導流工距離が 4cm から 5cm でパラメータの急激な変化が見受けられることから、この領域で河岸凹部に対する導流工の影響が小さくなることが伺える。

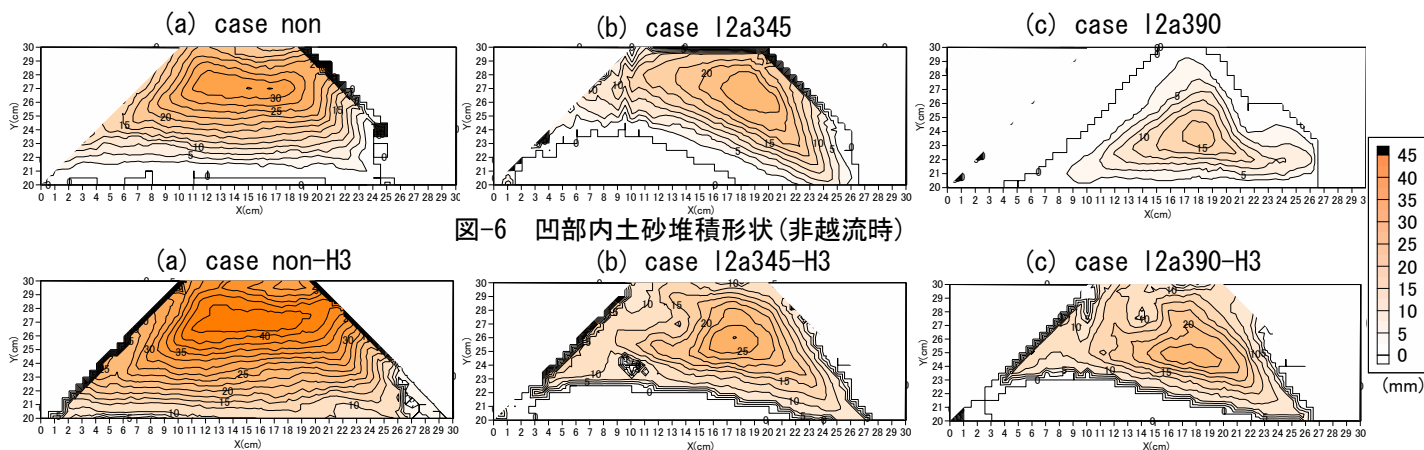


図-6 凹部内土砂堆積形状(非越流時)

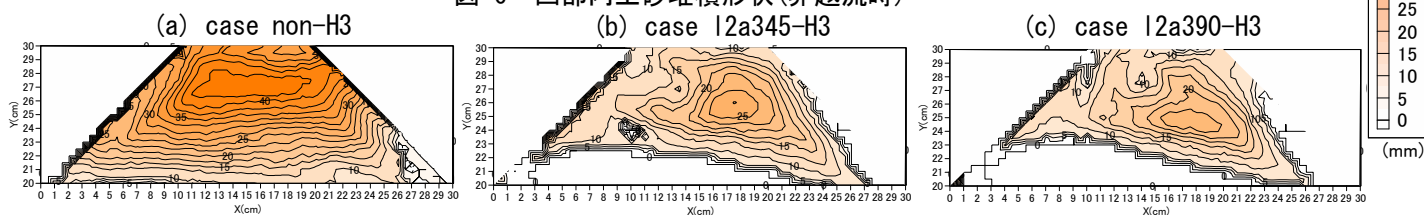


図-7 凹部内土砂堆積形状(越流時)

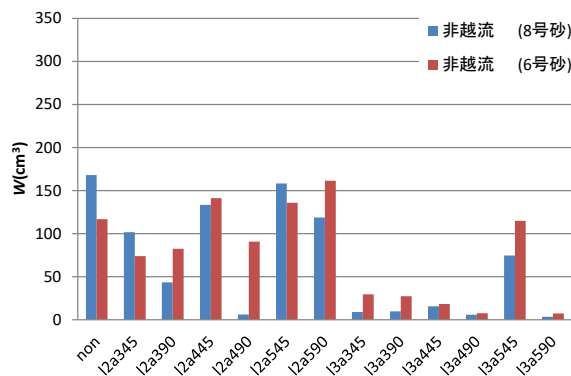


図-8 土砂堆積量 $W(\text{cm}^3)$ (非越流時)

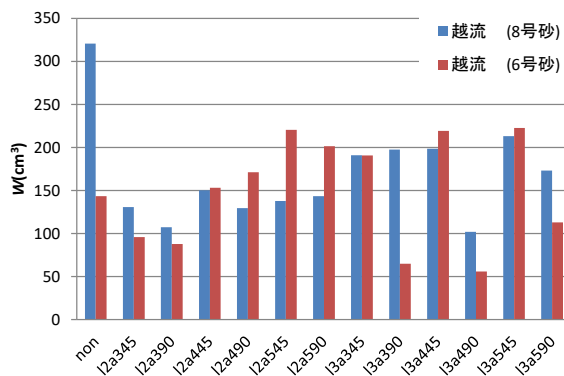


図-9 土砂堆積量 $W(\text{cm}^3)$ (越流時)

4. 土砂堆積実験結果 先行研究において、導流工非越流時における土砂堆積実験¹⁾が実施されてきた。図-6に8号砂の凹部内土砂堆積形状を示す。また、導流工越流時における8号砂の凹部内土砂堆積形状を図-7に示す。非越流時に水流が凹部奥まで及ばなかったケース(case l2a345-H3)では、8号砂、6号砂ともに堆積形状の差異は見受けられなかったが堆積量は増加していた。また、水流が凹部奥まで流れていたケース(case l2a390-H3)では、非越流ではほとんど堆積がなかったが、越流の場合は広範囲で堆積が発生した。次に、図-8に非越流時の土砂堆積量を示し、図-9に越流時の土砂堆積量を示す。非越流時の8号砂では、すべてのケースで土砂堆積抑制効果が見受けられた。また、導流工長さ $l=2\text{cm}$ と比較し、 $l=3\text{cm}$ の方で堆積量が大幅に減少した。導流工越流時、8号砂では、設置角度が 45° でも 90° でも60%以下に減少している。6号砂では導流工距離が小さいか、水流が凹部奥に及ぶ場合に堆積量が減少する傾向があった。土砂堆積量を比較すると、どのケースにおいても非越流時に比べ、越流時の土砂堆積量が大幅に増加していた。

5. 各種パラメータと土砂堆積量の関係 前述したパラメータ(凹部内平均流速、流入速度、流入角度)と土砂堆積量 $W(\text{cm}^3)$ の関係を8号砂、6号砂それぞれ図-10から図-11に示す。非越流時において、凹部内平均流速は土砂堆積への影響が小さいことが伺える。越流時は、凹部内平均流速が増加するに従い、わずかに土砂

堆積量が減少することを確認した。これに対し、流入速度に関しては非越流時において、流入速度の増加に伴い土砂堆積量が減少した。また、越流時においては流入速度が土砂堆積に及ぼす影響が小さいことが伺えた。これは非越流時では導流工により誘導された水流が凹部開口部付近で発達し流入速度を増加させるが、越流時では導流工を乗り越えた流れが形成され、水流が分散するためではないかと考えられる。次に、流入角度に関しては非越流時において、水流が凹部奥に及ばない場合は流入角度が増加すると土砂堆積量が減少した。水流が凹部奥に及ぶ場合、流入角度が増加するにつれて土砂堆積量は増加した。また、越流時においては水流が凹部奥に及ぶか否かに関わらず、流入角度が増加するにつれて土砂堆積量は増加した。これは、水流が凹部奥に及ぶ場合においても、流入速度が小さければ、土砂堆積を誘発することが考えられる。先行研究²⁾より、流入角度は堆積量との相関が高いことが明らかにされており、本研究における結果からも堆積量を評価する重要なパラメータであるといえる。ただし、評価する際は流入角度だけでなく、他の要因も含めた総合的な検討が求められる。

6. PIV計測実験結果(xz断面) 図-12に導流工越流時における鉛直断面を水深平均した case l3a390-H3, case l3a490-H3, case l3a590-H3 の時間平均流速ベクトル図およびレイノルズ応力図を示す。越流時において導流工角度 90° では $y=21\text{cm} \sim y=23\text{cm}$ で導流工による

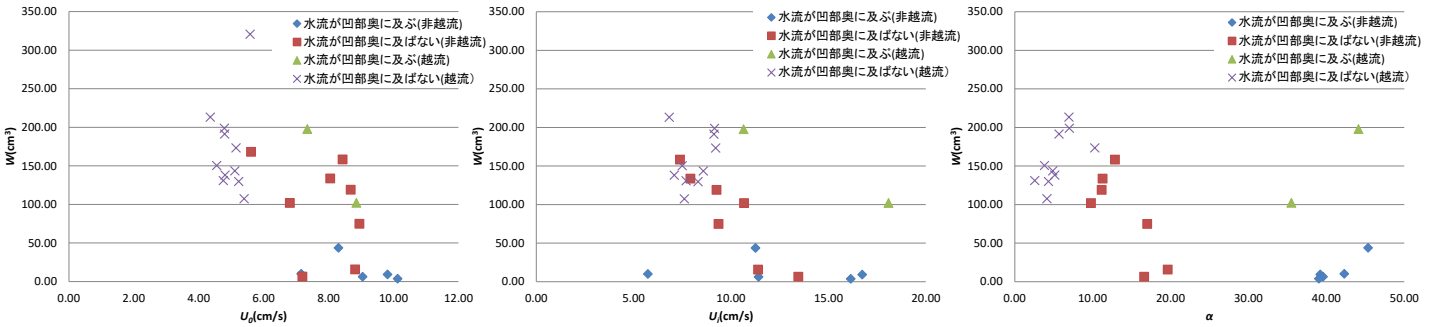


図-10 各種パラメータと土砂堆積量の関係(凹部内平均流速(左), 流入速度(中央), 流入角度(右), 8号砂)

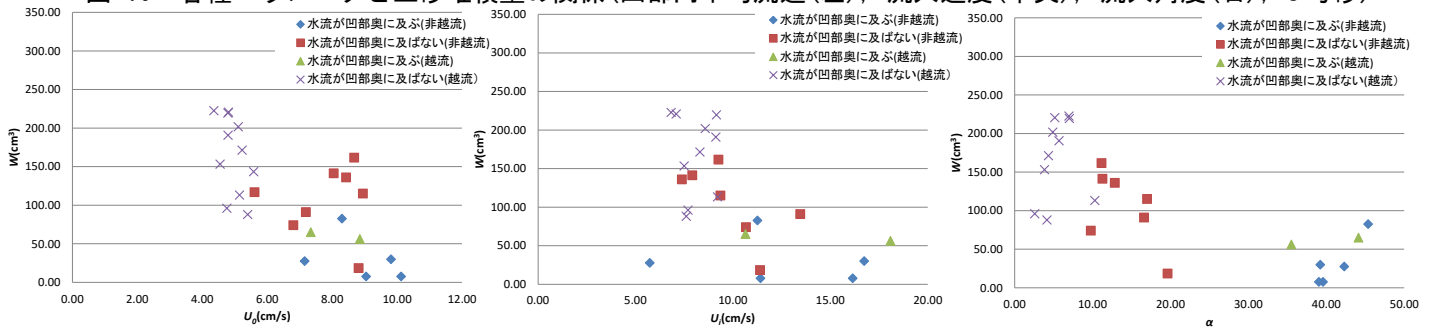


図-11 各種パラメータと土砂堆積量の関係(凹部内平均流速(左), 流入速度(中央), 流入角度(右), 6号砂)

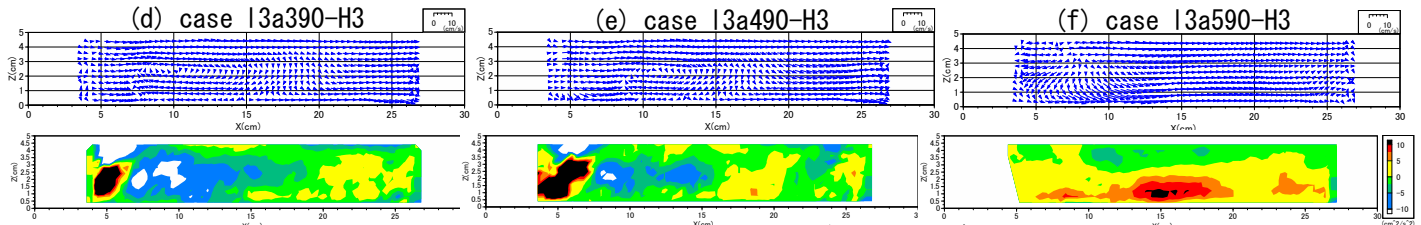


図-12 鉛直断面における時間平均流速ベクトル図およびレイノルズ応力図(越流時-y=23cm)

下降流および、それに起因した循環流が発生していた。また、レイノルズ応力も発達しており、これらが開口部上流端付近の堆積を妨げていることが推察できる。ただし、case13a590-H3では導流工が河岸凹部に与える影響が小さくなることで、流れ構造や土砂堆積形状が導流工角度45°のケースに近似する。導流工角度45°のケースでも同様にy=21cm~y=23cmで導流工による下降流が発生していた。さらに、y=26cm~y=29cmでは逆流域が形成されており、循環流が形成されている地点を中心として土砂堆積が確認できた。このことから、河岸凹部内における土砂堆積量は平均流速やレイノルズ応力と一定の相関があることが示唆される。また、xz断面における流れ構造も上記に示した2パターンの挙動をすることが伺えた。

7. 終わりに 本研究において、導流工越流時と非越流時における流れ構造や土砂堆積の違いを把握し、導流工が河岸凹部に与える影響をPIV計測、土砂堆積実験によって検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 導流工設置時における河岸凹部内の流れ構造(xy断面)は、導流工非越流時、越流時のどちらとも、導流工による流れが凹部奥に及ぶか否かに大別でき、土砂堆積形状との一定の相関が確認できた。
- (2) 導流工を越流する流れの場合、非越流に比べて堆積量が大幅に増加した。これは、導流工を乗り越えた

流れが形成され、流れが分断されることにより、導流工が凹部内に与える影響が小さくなるためだと考えられる。

- (3) 凹部内平均流速および流入速度は、導流工を越流した場合、非越流と比較し大幅に流速が減少した。
- (4) 導流工越流時、case13a390とcase13a490を除いたケースでは、流入速度、流入角度がともに小さくなり、導流工距離の影響も小さくなると考えられる。
- (5) 各種パラメータにおいて、流入角度が土砂堆積量に与える影響は大きく、重要なパラメータとなる事を示した。
- (6) xz断面における流れ構造において、導流工背後付近の下降流や凹部奥に循環流を確認し、土砂堆積との一定の相関を示すことができた。

今後、実験ケースを増やすことにより、流れ構造と土砂堆積における相関の正確性向上が求められる。また、移動床における土砂堆積実験や、3次元での移動床条件下の数値計算などが必要であると考えられる。

- 参考文献
- 1) 富永晃宏・加藤智道・庄建治朗, 導流工を用いた河岸凹部の土砂堆積制御, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_691-I_696, 2017.
 - 2) 富永晃宏・斉藤俊貴・庄建治朗・東芦谷謙, 河岸凹部の土砂堆積抑制に対する導流工の効果, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I_655-I_660, 2018.