

指導教官 富永晃宏 教授

篠田藍子

1. はじめに

近年、豪雨による河川の氾濫災害が多発する中、河川環境を長期的に維持する目的で、高水敷の一部掘削による河積の拡大が行われている。掘削により、複断面河道の高水敷と低水路の間に冠水頻度が高い中水敷と呼ばれる空間を発生させ、この中水敷にわんどの機能を持たせている例がある。木曽川水系の一级河川である揖斐川では、高水敷の掘削により大正時代設置されたケレップ水制が出現し、これを残した形でわんど環境が復元されたが、現在浮遊砂堆積が問題になっている。

本研究では、このような高水敷掘削が行われている揖斐川を対象河川として高水敷・中水敷をモデル化し、わんど域内およびその周辺部における浮遊砂濃度の変化を明らかにすることを目的として、掘削深さや掘削形状が流れ構造、浮遊砂濃度及び土砂堆積に及ぼす影響について実験的に検証した。

2. 対象河川の土砂堆積状況

揖斐川では平成12年度～15年度に、河口より32km～40kmの範囲で掘削工事が行われた。本研究では平成13～14年度の河道掘削によりケレップ水制が現れた揖斐川35km地点右岸を対象とする。図-1に掘削箇所と水制の位置を示す。図の破線が掘削箇所を示す。また、土砂堆積の様子を検討するため、上流より3基目(揖斐川35km右岸)の調査を行った。写真-1に2004年4月、10月、11月、2005年11月、2006年11月の土砂堆積状況の比較を示す水制下流側の土砂の堆積状況は、2004年から2005年にかけて次第に水制背後の土砂堆積が進行している。2004年に台風による数度の大出水があったことが理由にあげられる。2006年には水制背後の土砂が掘削されたと考えられ、次第に土砂が堆積し始めていることがわかる。



2004年4月24日



2004年11月2日



2004年10月13日



2005年11月9日



2006年5月16日

写真-1 土砂堆積状況

3. 実験条件および実験方法

実験水路は、長さ4m、幅50cm、勾配1/800の塩ビ製長方形断面水路を用い、水路右岸に塩ビ板を設置し幅20cm、高さ5.4cmの高水敷および幅10cm、高さ4cmの中水敷を作り、中水敷一部区間を低くしたわんどを設けた。水路全体図を図-2に、実験条件を表-1に示す。また、H45V2においてわんど域内の中流部、下流部における浮遊砂量を測定するため、わんど域内に水制を設置した。水制には厚さ1cm、高さ2cm、長さ10cmの塩ビ板を用いた。浮遊砂には平均粒径0.025mmの珪砂を用い、貯水槽に350lの水と1kgの砂を入れ攪拌した状態でポンプにより循環させた。これにより低水路、中水敷および高水敷上に河床波を伴う掃流砂と浮遊砂が発生している。実験ケースを図-3に示す。

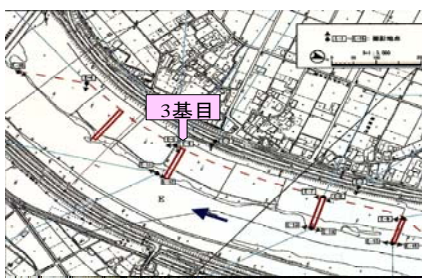


図-1 揖斐川35km地点の掘削箇所平面図

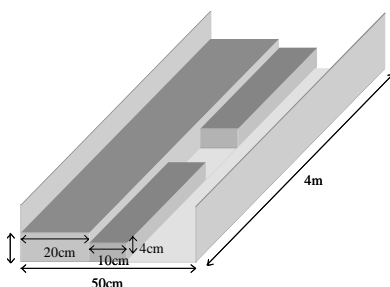


図-2 水路全体図

流量 Q (l/s)	7.4
低水路水深 H_1 (cm)	7.4
中水敷水深 H_m	3.4
高水敷水深 H_h	2
断面平均流速 U_m (cm/s)	35
水路床勾配 I	1/800

表-1 実験条件

流速計測実験では、I型電磁流速計を用いて主流方向流速 u 、横断方向流速 v をサンプリング周波数 100Hz で約 20 秒間計測したデータについて解析した。浮遊砂濃度実験では、濁度計を用いて濃度検定を行って浮遊砂濃度を計測した。また土砂堆積実験では、1 時間水を流し堆積が平衡状態になった後ポンプを止め、30 分経過した後ポイントゲージを用いわんど内の土砂堆積形状を測定した。さらに、わんど内に堆積した土砂を採取し、乾燥させた後土砂堆積重量を計測した。

4. 流速実験の結果と考察

複々断面構造のわんどが流れ全体に及ぼす影響を見るために、電磁流速計による H15V0, H15V2, H30V0, H30V2, H45V0, H45V2 の $z=30\text{mm}$ の時間平均流速ベクトルを図-4 に示す。H15V0 では、わんど内上流側において壁面に沿う形で時計回りの流れが発生しているが、わんど内下流側においては下流方向に向かう流れが形成されている。H15V2 ではわんど開口部で内側に入り込む流れとなっている。そして、わんど内上流側では H15V0 同様時計回りの流れが確認できるが、わんど内下流側では下流方向に向かう流れとなっており、さらに下流部壁面で内側に入り込む流れが発生していることがわかる。H30V0 および H30V2 では、H30V2 の方がわんど内流速は早い。しかしともに局所的な渦は確認できるものの流れは全体的に下流方向に向かっている。H45V0 および H45V2 では、ともに類似した流れが確認でき開口部全体にわんど方向の流れが形成されている。

図-5 に H30V0, H30V2 のわんど内の $x=30\text{mm}$, $x=150\text{mm}$, $x=270\text{mm}$ における主流方向流速分布を示す。高水敷・中水敷・低水路において上層部の流速はその水深の差にも関わらず大きな違いがみられない。複々断面構造においては低水路から中水敷・高水敷への運動量輸送によって高水敷および中水敷の流速が大きくなったと推測される。また、中水敷およびわんど内では低層の方が上層よりも流速が遅い値を示しているのに対して、低水路域では全体的に $z=30\text{mm}$ が最も大きな流速となっている。これは、逆に低水路の上層に中水敷からの低速流の輸送による減速の影響によるものである。わんど内の流速に着目すると H30V0 では $z=10\text{mm}$ においてマイナスの値を示していることから逆流が発生していることがわかる。H30V0 に比べて、H30V2 は $x=150\text{mm}$, 270mm における $z=30\text{mm}$ のわんど内流速が大きい。図-6 に $z=30\text{mm}$ におけるわんど開口部に沿う横断方向流速流下方向分布の比較を示す。横軸はわんど開口部長さ L で無次元化している。H30V2 及び H45V2 の 2 ケースにおける流速分布が同様の分布を示しており、わんど上流域で流入、中流部から下流域にかけて流出している。一方、他の 4 ケー

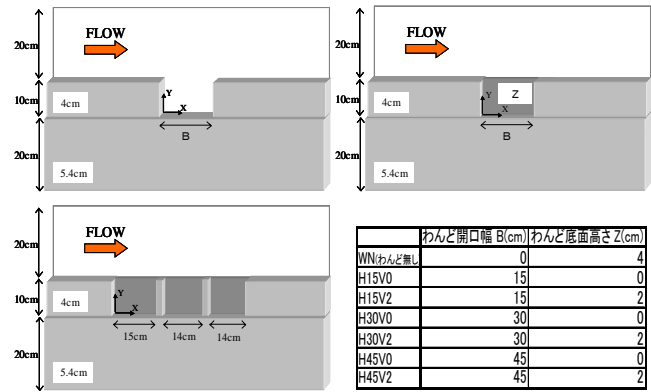


図-3 実験ケース

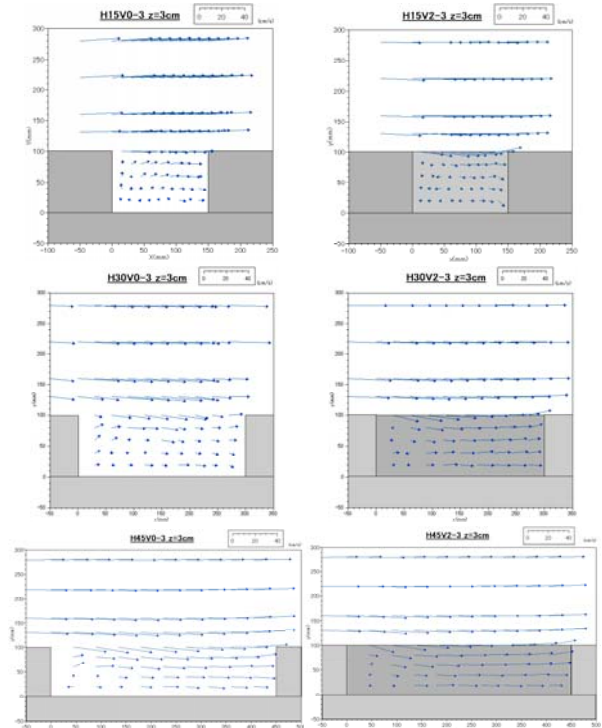


図-4 時間平均流速ベクトル

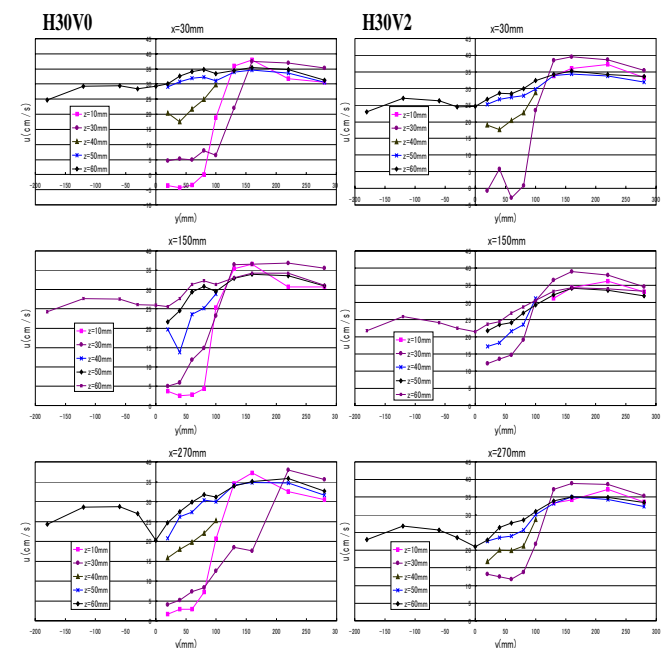


図-5 主流方向流速分布

スでは広い範囲で流入し下流の狭い範囲から流出するという結果になっている。結果、わんど高さが2cmで、開口部が大きな形状においてわんど内への流入が大きい、わんど内の水交換が活発に行われていると推測できる。

5. 浮遊砂濃度実験の結果と考察

図-7 に濁度計により計測した H30V0, H30V2 の $x=0\text{mm}$, $x=150\text{mm}$, $x=300\text{mm}$ における横断方向の浮遊砂濃度分布を示す。いずれの断面も低層に変化が見られ、上層にいくほど濃度の差がなくなり同程度の値をとるようになる。低層の差においては、低水路における中水敷側の濃度が低く中水敷から遠ざかるにつれ濃度が高くなる傾向にある。上層に濃度の差が見られない理由として、複々断面構造の特徴である運動量輸送によって中水敷および高水敷の流速が大きくなり、その結果水深 h に比べて高い浮遊砂輸送量が維持され、この高い浮遊砂濃度が低水路側へ流れ込み全体的に上層の濃度が高くなり一様化していると考えられる。また、わんど内の浮遊砂濃度に大きな変化は見られない。H30V0 の $x=150\text{mm}$ において $y=50\text{mm}$, $y=100\text{mm}$ では他の鉛直分布とは異なり、わんど内で濃度が下がっている。理由として、わんど上流側で土砂堆積が進んだ結果、わんど中流部で濃度が下がったと考えられる。H30V2 の $x=300\text{mm}$ において $y=50\text{mm}$, $y=100\text{mm}$ の濃度が $x=0\text{mm}$, $x=150\text{mm}$ と比較して高くなった。 $x=300\text{mm}$ はわんど下流部にあたり浮遊砂が多く流出していることが考えられる。

また、図-8 に理論式と無次元化した浮遊砂濃度の比較を示す。理論式は次の Rouse の理論式である。ここで、 C : 浮遊砂濃度, C_a : 底面 (0.3cm) から a の高さ濃度 (基準点濃度), ω_0 : 砂粒の沈降速度, κ : Karman 定数 ($=0.4$), u_* : 摩擦速度である。

$$\frac{C}{C_a} = \left[\frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^{\kappa Z} \quad Z = w_0 / (\kappa u_*^2)$$

(1)

これより、上で述べた上層において濃度が下がらないことがわかる。

6. 土砂堆積実験の結果と考察

図-9 に H15V0, H15V2, H30V0, H30V2, H45V0, H45V2, H45V2(水制あり)の土砂堆積形状を示す。全ケースのわんど内上流域についてみると、わんど高さ 0cm ではわんど内に広く土砂が堆積したが、わんど高さ 2cm ではわんど内上流部に中水敷高さまで土砂が高く堆積した。また、わんど内下流域では、幅 15cm の

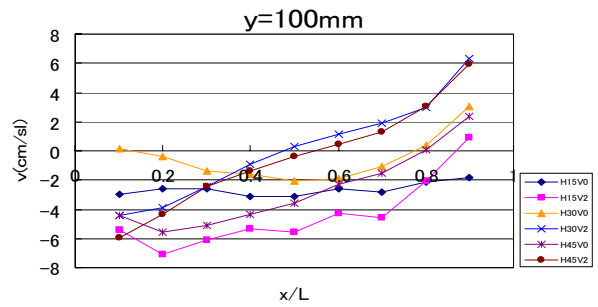


図-6 開口部におけるケース比較

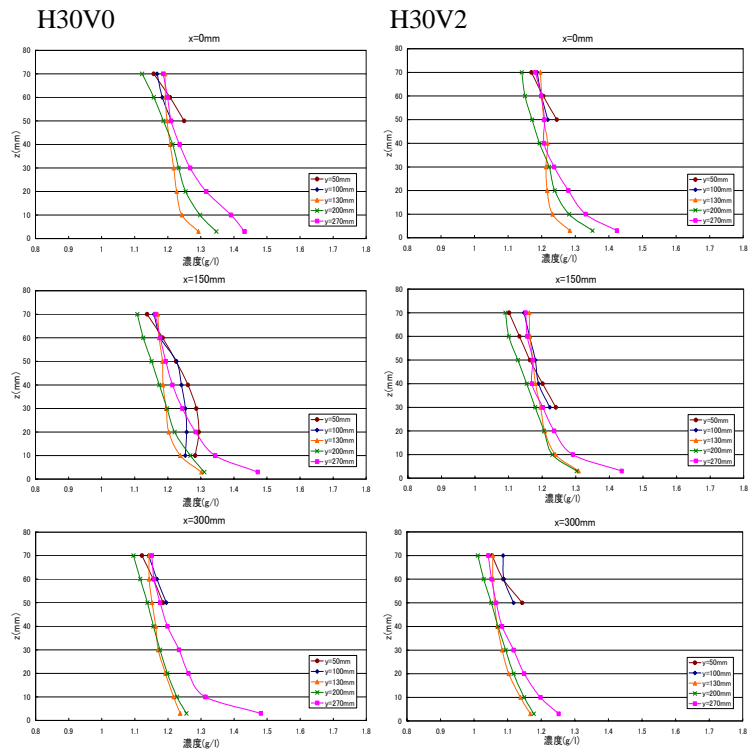


図-7 浮遊砂濃度分布 (流下方向)

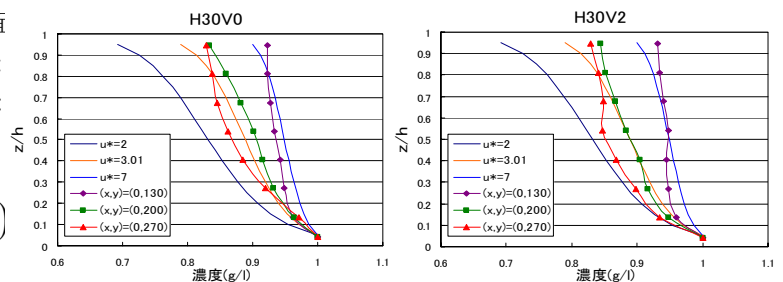


図-8 理論値と実験値の比較

わんどでは堆積が見られなかったが、幅 30cm , 45cm のわんどでは堆積が見られた。これより、わんど高さ 0cm ではわんど内全体に広がっているのに対し、わんど高さ 2cm ではわんど底面付近が比較的高速となり下流から流出していく流れに沿って低水路へ流れ出しているためと考えられる。H45V2 (水制あり) のわんど

上流域では H15V2 に似た土砂堆積形状を示す。また、H45V2（水制あり）の水制背後の土砂堆積は浮遊砂のみによると考えられることから、浮遊砂の堆積量はわずかであることがわかる。すなわち、中水敷の底面を流れる砂がわんど内へ流れ落ちる量がわんど内の土砂堆積量の大部分を占めており、わんど内に堆積する土砂

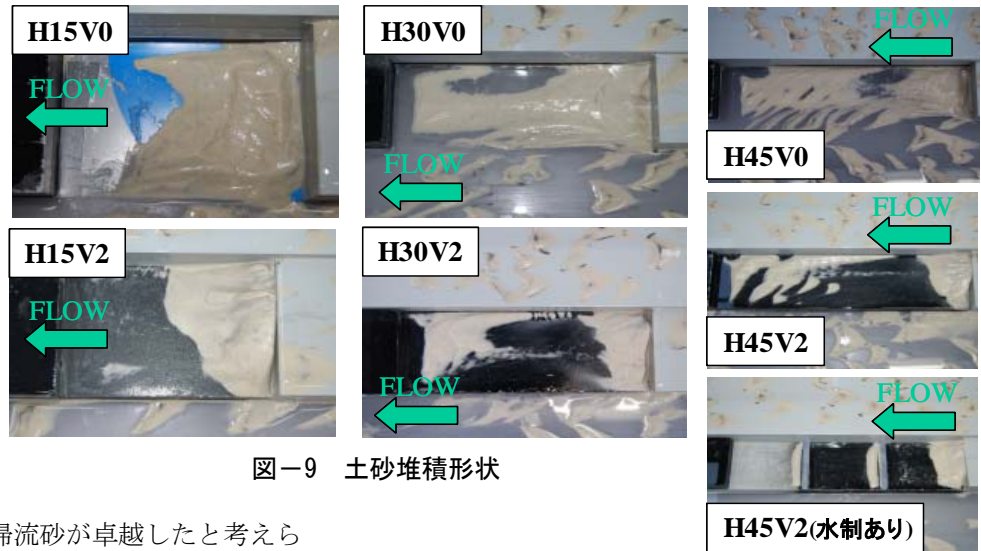


図-9 土砂堆積形状

量は浮遊砂よりも中水敷の掃流砂が卓越したと考えられる。このように複々断面構造では、中水敷の存在が低水路からの高い運動量の輸送が高い浮遊砂輸送能力を与え、結果的に低層の流砂量を増大させ、わんどの土砂堆積を促進させた可能性が考えられる。

図-10 に各ケースの土砂堆積量の比較を示す。わんど高さ 0cm の 3 ケースにおける土砂堆積量は、H15V0 が少なく H30V0 及び H45V0 ではほぼ同量の土砂堆積量であり、わんど高さ 2cm の 3 ケースでは H30V2 が若干少なく H15V2 及び H45V2 ではほぼ同量という結果となった。また、わんど幅ごとに比較すると、H15V0<H15V2, H30V0>H30V2, H45V0>H15V2 となっており、幅 30cm および幅 45cm における土砂量変化はほぼ同じ値を示している。すなわち、段落ち高さが大きい場合、わんどを越流する流れの剥離域が大きく段落ち下部の砂堆積高さが限定され、最終的に剥離渦が存在した状態で安定する。一方、段落ち高さが小さい場合、剥離域が小さくこの領域全体が砂堆積によって埋められ、最終的には剥離域が消滅する。わんど開口部が大きい場合、低水路からの編流によるわんど内への入り込みが大きくなり、剥離横断渦が奥へ追いやられ、わんど高さが 0cm の場合は低層高濃度の流砂がわんど内へ運ばれ堆積を増大させ、わんど高さ 2cm の場合はより高速な流れが流入するため、低水路境界付近の堆積はなく、わんど下流部に堆積をもたらすが、巻き上げによる流出も大きくなるため堆積量が減少したと考えられる。水制を設置した場合、水制背後の堆積は現地と同様であることがわかる。しかし、この堆積は拡大することなく限定された領域に留まっていることから、逆に水制設置により砂堆積域を制御することが言える。

7. おわりに

今回の実験から、3 次元的流れ構造と浮遊砂濃度の関係を明らかにすることはできなかったが、土砂堆積形状から流れ構造を考えるとわんど幅が奥行きより十分に広いわんど形状がより凸凹した河床を形成すると

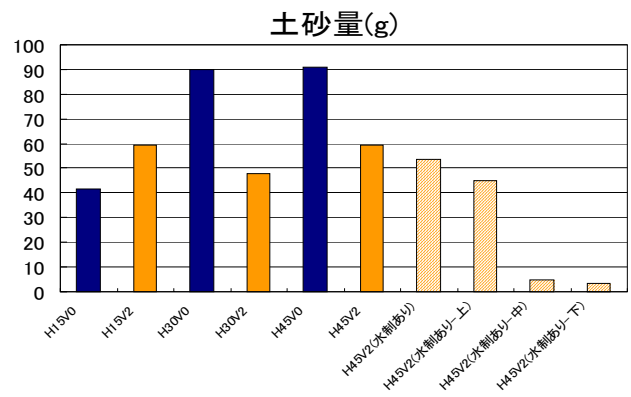


図-10 土砂量

考えられる。つまり、生き物にとって多様な生活環境を提供できると推測できる。また、複々断面構造は中水敷・高水敷と低水路間において活発な運動量輸送を促し、中水敷及び高水敷の流速を大きくする。その結果、水深差があるにも関わらず高い浮遊砂輸送が維持され、低水路における上層の濃度が高くなり一様化していると考えられる。さらに、水制設置よりわんど内に堆積する土砂量は浮遊砂よりも中水敷の掃流砂が卓越したと考えられ、中水敷の存在がわんど内の土砂堆積を促進させる可能性が考えられる。そして、浮遊砂の開口部における流出入からわんどの水理的課題である「わんどに堆積する土砂量を最小限にすること」に対し、わんど高さが低水路に連結していないわんどが理想的と考えられる。

今後の課題として、土砂がわんど内に低水路高さより 2cm 堆積すると仮定して、その後 H30V2・H45V2 と同様な堆積形状が生じるのか。低水路高さのわんどにおける低水路から流入する掃流砂と浮遊砂の区別。粗面における同実験。さらに、本研究では複々断面構造及び土砂による複雑な流れ構造であったが、これらの課題を検討していく上で、実験を単純化する必要があると考えられる。