

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 6 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21760383

研究課題名（和文） 3次元性に着目した透過および不透水制域における流れと土砂輸送機構に関する研究

研究課題名（英文） Study on three-dimensional mechanisms of flow and sediment transport in open channels with permeable and impermeable spur-dikes

研究代表者

赤堀 良介（AKAHORI RYOSUKE）

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所寒地水圏研究グループ寒地河川チーム・研究員

研究者番号：50452503

研究成果の概要（和文）：

本研究では、水制を利用した河川環境整備における知見を得ることを目的として、水制周辺での流れの構造と土砂輸送のメカニズムを明らかにした。研究では、画像解析等によって、水理実験結果における流れ場と土砂輸送機構が有する 3 次元的な構造を解明した。これにより、透過水制の後流や越流水制の天端での流れ等が、浮遊した土砂の保持に影響を与えることが示された。またこれらの知見に基づき、透過水制周辺での浮遊砂濃度分布を再現可能な、浮遊砂輸送数値計算モデルを新規に開発した。

研究成果の概要（英文）：

The mechanisms of flow structures and sediment transport around spur-dikes were studied in order to extend our knowledge of environmental applications of spur-dike installations. By applying image-analysis methods to experimental results, three-dimensional structures of flow and sediment transport were clarified. The results showed that the wake flow behind permeable dikes and the over-flow on submerged spur-dikes play important roles on sediment suspension. A numerical model of suspended sediment transport that can reproduce sediment concentration profile around permeable dikes was then developed based on the experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：水制、浮遊砂、LES、粒子的手法、数値計算、PIV

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

近年の自然環境に対する意識の高まりや平成9年の河川法改正を背景とし、親しみ易い水辺の創出や健全な生態系の維持・回復を目的とした河川整備が全国で行われている。この目的のためには、河川および流れ場に関する多様性の確保が必要とされ、水制工の利用が期待されている。水制は元来、護岸や航路確保等の目的のため利用されてきたが、同時に設置域での土砂の堆積を促す特性を持ち、わんどに代表されるように流域の貴重な生態系の一部を形成している。これら水制が有する環境機能の活用を目指して、その特性を探る研究が近年盛んに進められており、水制設置域での流れや土砂輸送の機構が徐々に明らかとなってきている。水制に関する研究における論点は、主に水制周辺の流れの構造と、物質輸送の機構、および河床変動のメカニズムの把握にある。これまで、掃流形態を中心とした土砂移動による河床変動計算といった側面からの研究は盛んに行われてきているが、水制の効率的利用のためには、3次元性が卓越する水制周辺の局所流に起因する、浮遊形態での土砂の輸送機構の解明が必要となる。例えば、水制近傍では洗掘の要因となる3次元性を帯びた流れが生じるほか、主流域と水制域とのせん断面上に水平渦や上昇流が間歇的に生じることが知られている。また、洪水時の越流状態では、水制天端に複雑な流れ場が生じていることが予測される。これら現象は局所的な物質輸送を担うためその機構の理解が不可欠であるが、これまでは時間的に平均化された流れ場から考察を行うことが多く、瞬間構造の解明は十分に行われていなかった。さらに、捨石や杭を用いた透過水制は、景観面や環境面での利点からその積極的な利用が期待されているものの、これまでは研究例が少なく、流れの構造、土砂輸送に対する合理的判断に基づく検討が難しい状況にあった。

2. 研究の目的

本研究は、透過性の違いや越流・非越流時の流況の変化という水制周辺の流れの側面に関して総合的に検討することで、水制を用いた河川環境の創出の際に必要なとされる、土砂輸送機構に対する知見を得ようとするものである。本研究の成果が、流れ構造や土砂輸送機構の把握、および両者の予測的モデルの開発へと寄与することで、水制を利用した河床変動のコントロール、さらには望ましい河川環境の創出に対し、計画の精度向上をもたらすことが予想され、今後の川作りに大きな進展を与えることが期待される。ここでは

具体的対象を次の3点に絞り、水制を利用した河川環境の創出に関する体系的な知見を得ることを目的とする。第一に、水制群に対する越流時/非越流時における3次元的な流れの構造の変化を、室内実験および数値計算により検討し、その土砂輸送に対する影響の把握を目指す。これにより、水制間に構築される地形が、水位変動に依存して変遷していく状況について考察する。また透過、不透過の両水制に対して同様の検討を行なう。第二に、透過水制内での乱れの影響を考慮可能な3次元数値計算モデルの構築を目指し、透過水制内部流れに対するRANSモデルを、開水路部分に対するLESモデルに合成することを試みる。これにより透過水制からの小規模な乱れの生成を直接的にモデルに取り込み、計算精度の向上を目指す。第三に、浮遊砂輸送3次元数値計算モデルの完成を目指す。浮遊砂の輸送を本研究における実験項目として加えることで、モデルの比較対照として用いることが可能となり、その精度の向上と完成が期待される。

3. 研究の方法

本計画を通しての研究項目は以下となる。
 i) 単一水制および水制群周りの3次元流れ構造と浮遊砂輸送機構の把握のための実験、ii) 透過構造物による乱れの影響を取り入れた非定常3次元流れの数値計算モデルおよび浮遊砂輸送モデルの構築、iii) 実験および数値計算により得られた結果を総合的に検討した水制周辺の流れの構造および土砂輸送機構の解明、である。これらの項目に対し以下の手法を用いて検討を行った。
 i) 単一水制および水制群周りの3次元流れ構造と浮遊砂輸送機構の把握のための実験：非越流時の単一水制を対象とした実験は、越流時の基礎的な流れ構造の把握のために行う。実験では東京工業大学土木工学専攻水工学実験室に存在する1.2m幅の水路を用いて、そこに不透過の単一水制を設置し、電磁流速計を用いて流れの3次元的な流速分布を計測する。得られた流速から空間分布を求めた場合、時間平均化された分布しか得られないが、各点では時系列データによる計測結果を有することから、スペクトル解析などの手法により卓越する波数成分の確認を行なうことが可能である。この結果と数値計算モデルとの比較から、流れの瞬間的構造の把握に対して、乱れの時間スケールと空間スケールを関連させた定量的な裏づけを行なう。また水制群を対象とした実験に関しては、水制群周辺の流れ場のみならず、その構造と浮遊砂輸送過程の関連を検討する。流れ場に対する

電磁流速計による測定に加えて、不透過水制群に対しては水平2次元平面上のPIVを適用し(図1)、渦構造の特性を確認する。また浮遊砂に関しては、塩ビ粒子による浮遊砂の供給を行ない、水制群周辺の土砂輸送機構を観察するために実験を行う。具体的には、濁度計により特徴的な各所の浮遊砂濃度分布を計測し、濃度分布の3次元的な把握を試みる。さらに水制天端の3次元流れが重要となる越流水制群を対象とした実験に関しては、PIVによる平面流れ場の情報を集積し MASCONE モデルを適用することで、鉛直方向成分の流速を補間し、流れ自体の3次元的な構造の再現を試み、浮遊砂輸送への影響を検討する。

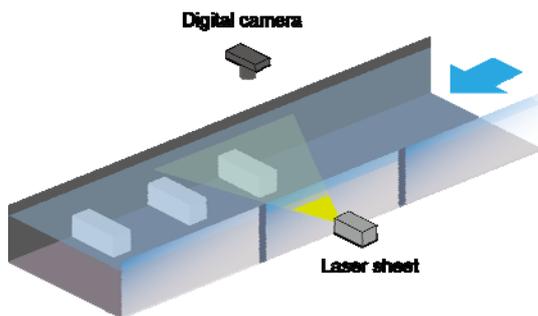


図1 本研究でのPIV計測の模式図

ii) 多孔体による乱れの影響を取り入れた非定常3次元流れの数値計算モデルおよび浮遊砂輸送モデルの構築: 透過構造物を有さない開水路に対する3次元非定常流れ解析のための数値計算モデルは、既に代表者により LES 型のモデルが構築されており、そのモデルを適用する。透過構造物が存在する流れ場に対しては、透過性を有する領域の乱れの影響を考慮した RANS 型モデルを上記 LES モデルに組み込み、ハイブリッドモデルとしての構築を行う。本研究では、透過水制を構成する杭群が有する形状的特性から乱れのスケールが決まると仮定したゼロ方程式型 RANS モデルと、杭群が乱れのソースであるとして、乱流エネルギーの輸送方程式に明示的に取り込んだ1方程式型 RANS モデルの、両者のモデルを検討する。また浮遊砂輸送モデルの完成であるが、現状ですでに基礎部分の構築を終えた浮遊砂輸送モデルに関して、実際の実験結果と比較することにより、適用性の確認と向上を目指す。さらに慣性の影響下にある微細な粒子の運動を検討する際には、粒子に対する運動方程式から直接的にその軌跡を計算するDNS的なモデルを用いる。

iii) 実験および数値計算により得られた結果を総合的に検討した水制周辺の流れの構造および土砂輸送機構の解明: 検討には、ここまでの実験および浮遊砂輸送モデルによる計算から得られた結果を用いるものとし、水制を利用した川作りに対する知見を得るものとする。特に、これまで検討が難しかっ

た透過性構造物や越流部が問題となるケースでは、浮遊砂輸送の数値計算モデルの適用法に関して、本研究により新たに行われた実験や計算からのフィードバックが期待される。

4. 研究成果

i) 単一水制および水制群周りの3次元流れ構造と浮遊砂輸送機構の把握のための実験: 不透過水制の越流に関する実験では、数値計算結果との比較を行うことで、越流時には水制天端周辺の水深において水平面上のせん断面が生じることにより、非越流時とは異なる複雑な流れ場が出現していることが確認された(図2)。透過水制群に対しての実験では、透過水制群では流れ場の構造は水制設置間隔と水制長から決まるアスペクト比に依存せず、流速低減に関する遷移域(せん断面主流域側に存在する2次流に代表的される)と平衡領域(せん断面上の水平渦とリブ構造に代表される)との間で差が存在することが確認された。また浮遊砂濃度分布は、水制設置域では一様に低下し、水制のない主流域側では流下方向に一様であることが確認された。不透過水制群を対象とした実験では、水平面上にレーザーシートを照射して撮影された動画に対しPIV計測を適用することで、流れ場の空間的な構造を明らかにし、浮遊砂の輸送との関連に対して検討を試みた。結果として、越流を有する場合は水制上を通過した流れが複雑な構造を水制間の流れ場にもたらしており、これが浮遊砂の輸送にも影響を与えていることが確認された。さらに3次元での流速成分の推定に MASCONE モデルを適用し、平面2次元の実験結果から越流水制周辺での3次元的な流れ場の構造を再構成することを試みた。これにより得られた3次元流れ場と、PIV時の相関係数(鉛直方向の粒子運動の活発さを示すと仮定)の分布を比較することで、越流部分にある横断方向軸周りの渦度の強い領域において、浮遊砂のような沈降性粒子の鉛直方向の輸送が活発であることが示された。

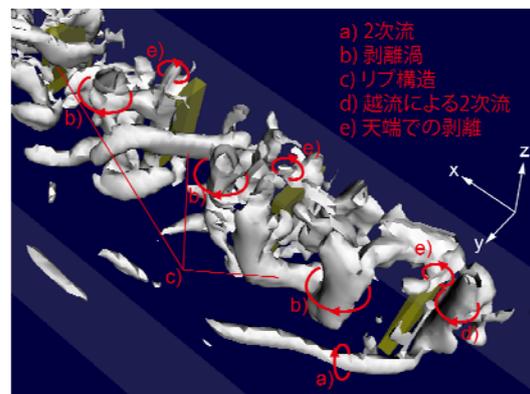


図2 不透過水制越流時の流れの構造

ii) 多孔体による乱れの影響を取り入れた非定常3次元流れの数値計算モデルおよび浮遊砂輸送モデルの構築：流れ場の数値計算に関して、透過型水制間では RANS として、それ以外では LES モデルとして振る舞うハイブリッドモデルの構築を行った。杭群の形状から乱れのスケールを規定する0方程式型のモデルの構築を行ったほか、1方程式型の RANS モデルと LES モデルの合成を試みた。1方程式モデルを新たに適用することで、透過水制群に対して乱流エネルギーの輸送方程式を含むモデルを用いることが可能となり、透過水制を構成する杭群からのエネルギー供給をモデル上で記述することが可能となった。これにより透過水制群と主流部との間に存在するせん断面上での乱流統計量の再現性が向上した。透過水制群周辺での浮遊砂輸送モデルの構築に関しては、透過水制のもたらす格子乱流的な小規模な乱れが浮遊砂粒子の拡散に大きく影響を及ぼすことが確認された。また慣性の影響下にある浮遊砂粒子の微細な挙動の再現に関して、乱流中の粒子の挙動を直接記述する運動方程式を適用することで、前述のランダムウォークモデルのような統計的振る舞いでない、解像された渦構造に対する直接的な粒子挙動の追跡を試みた。

iii) 実験および数値計算により得られた結果を総合的に検討した水制周辺の流れの構造および土砂輸送機構の解明：不透水水制に対する実験結果と数値計算モデルによる再現計算の結果から、主流域と水制域の境界にあるせん断領域では、剥離渦とその間のリブ的構造が特徴的に存在すること、これらの構造が横断方向の土砂輸送に影響を与えていることが示唆された。透過水制の場合はその構造は不透水水制ほど明瞭でなく、土砂の輸送には透過流が大きく影響を与えていることが示された。またこの透過流に関してスペクトルを検討すると、杭の後流と同等のスケールの乱れが存在することから、数値計算に際しては透過水制間の拡散係数のみ特定スケールに依存した手法で評価することにより、浮遊砂輸送の計算精度が向上することが確認された。不透水越流水制群に対する検討では、PIV 結果および MASCON モデルによる検討結果と直接的粒子挙動モデルの結果を比較したところ、浮遊砂のような沈降性粒子の鉛直方向への輸送の活発さは、沈降性の粒子が渦構造の周辺において、鉛直下向きの流れに沿って偏方向的に輸送されていることに起因する可能性が示された(図3)。これらの結果から、3次元性が卓越する構造物周辺での浮遊砂の挙動を検討・モデル化する際は、単純な沈降速度や均一的な拡散に着目するのみでなく、重力方向への粒子輸送の指向性を考慮すべきであることが示された。

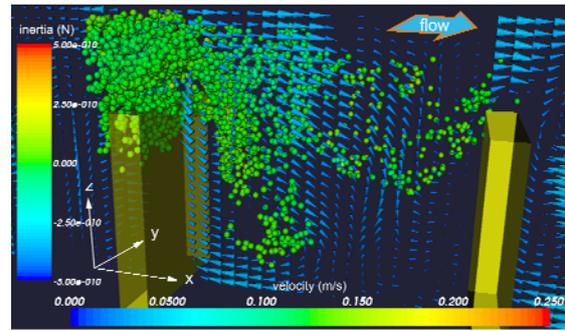


図3 水制越流部での沈降性粒子の輸送

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 赤堀良介、松尾陽介、吉村千洋、越流型水制周辺での流れ場の構造と浮遊砂輸送、土木学会論文集 B1(水工学)、査読有、Vol. 68, No. 4, 2012
- ② Zu-peng Gu, Ryosuke AKAHORI, Syunsuke IKEDA, Study on the transport of suspended sediment in an open channel flow with permeable spur dikes, International Journal of Sediment Research, 査読有, Vol. 26, 2011, 96-111, DOI: 10.1016/S1001-6279(11)60079-6
- ③ 谷 祖鵬、赤堀良介、池田駿介、水制周辺における流れの瞬間構造と浮遊砂輸送の関係に関する研究、混層流、査読有、23巻5号、2010、615-626
- ④ Ryosuke AKAHORI, Kohji MICHIOKU, Numerical calculation of three-dimensional flows in an open channel with a rubble mound groin by using Non-Darcian resistance law, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 査読有, Vol27 No. 1, 2009, 89-103

[学会発表] (計4件)

- ① 赤堀良介、松尾陽介、吉村千洋、越流型水制周辺での流れ場の構造と浮遊砂輸送、第56回水工学講演会、2012年3月8日、愛媛県、松山市
- ② 赤堀良介、池田駿介、Gu Zu-peng、透過水制群周辺における浮遊砂の輸送に関する研究、日本流体力学会年会 2010、2010年9月9日、北海道、札幌市
- ③ Ryosuke AKAHORI, Yosuke MATSUO, Syunsuke IKEDA, Study on open channel flow with a submerged structure, The 6th IAHR Symposium on River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics, 2009年9月22日、Santa Fe, Argentina
- ④ 松尾陽介、赤堀良介、池田駿介、越流型

不透過水制を有する開水路流れに関する
実験的研究、土木学会第 64 回年次学術講
演会、2009 年 9 月 4 日、福岡県、福岡市

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤堀 良介 (AKAHORI RYOSUKE)

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ寒地河川チーム・研
究員

研究者番号：50452503

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：