

急流河川の河岸侵食を引き起こす三次元流れ場の構造に関する研究

中央大学大学院理工学研究科 学生会員 ○加藤 翔吾

中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

急流河川の三次元流れは、大きなエネルギーを持ち河岸に衝突するため、河岸侵食を引き起こす。急流河川の河岸侵食機構を説明する上で、河岸近傍の三次元流れ場を理解することは重要である。興石ら¹⁾、内田ら²⁾は、非静水圧準三次元解析法(一般底面流速解析法)を常願寺川現地実験流れに適用し、堤防護岸際の局所流れにおける水理現象理解に有効であることを示した。しかし、壁面や河岸近傍の三次元流れ場が河岸に与える影響について、具体的な検討はされていない。本研究では、常願寺川現地実験を対象とし、非静水圧準三次元解析法を用いた解析結果から、河岸近傍における三次元流れ場について説明し、河岸侵食を説明するためには河岸の境界形状を形づくる石礫に作用する流体力を明らかにしなければならないことを示す。

2. 実験条件と解析方法

図-1 は常願寺川現地実験で使用した実験水路と河床高コンターを示す。水路は流路全長 170m、堤間幅 20m、縦断勾配 1/200 の中に幅 4.0m、深さ 0.7m の低水路を有する複断面蛇行流路である。図-1 の水衝部①は洗掘・侵食が起らないように防護工を設置し、水衝部①にはコンクリート製の垂直壁の護岸と護岸の根元には巨石を設置している。流量 $6.9\text{m}^3/\text{s}$ を流下させ、水衝部①で三次元流れの計測が行われた。次に解析条件を示す。流れ場の計算には非静水圧準三次元解析を適用し、固定床の条件で行った。図-2 は流れ場の計算法の解析領域の模式図を示す。内田ら²⁾は、石礫近傍の流速(粗度層流速)を算出するために、渦層、粗度層を非平衡流れと仮定し導出した。その際、各層の運動方程式を用いたが、合わせて 4 本の偏微分方程式が必要となる。本研究では、渦層と粗度層を平衡流れとして求めた底面流速を用いて、非定常項を無視した渦層、粗度層の運動方程式から粗度層流速を算出した。解析の境界条件は上下流に観測水位を与えた。石礫河川は広い範囲で見るとほぼ同じ粒度分布を構成しているが、狭い範囲で見ると場所毎に異なる粒径集団を有する。本検討では、実測の水位縦断分布や流量、流速分布を説明するように、 $k_s=0.14\text{m}$ と $k_s=0.06\text{m}$ の底面粗度をランダムに配置した。実験、解析条件の詳細は文献を参考にされたい^{1),2)}。

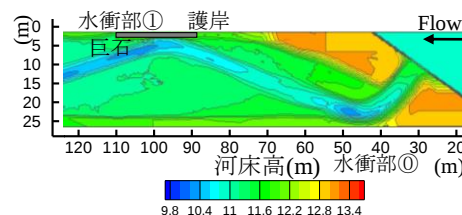


図-1 常願寺現地実験河床高コンター

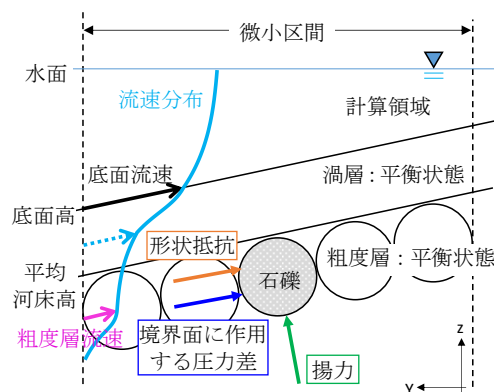


図-2 解析領域の模式図

3. 急流河川の三次元流れ場と河岸侵食機構

図-3 は、縦断水面形の実測と解析結果を低水路平均河床高と共に示す。水衝部①において、解析値は河道の湾曲に伴う左右岸の水位差を良好に再現している。図-4 (a), (b) は、それぞれ水衝部①における水表面流速(赤色)と底面流速(黒色)の実測と解析結果をベクトルで示す。コンター

の色は河床高を示す。護岸沿いの底面流速の解析結果は、実測よりも小さく計算される。これは用いた解析法の底面渦度の供給を平衡状態と仮定しているため、水衝部位置の粗面近傍の非平衡流れを十分に評価できていないためである。しかし、全体的に見て、巨石の水跳ね効果による水表面流速の主流の向きや底面

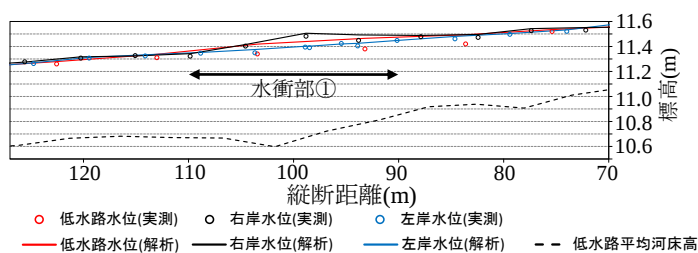


図-3 縦断水面形の比較

キーワード 急流河川、非静水圧準三次元解析法、石礫、河岸侵食、三次元流れ場

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

流速が内側に向く流れ場の変化を良く説明出来ている。

次に、河岸近傍の流れ場の特徴について示す。図-5は解析結果の水面の状況を示す。水衝部①と水衝部②の河岸近傍において、水面は空間的に激しく変化している。図-6は、斜めから見た水衝部①の低水路外岸から出発した流跡線(水粒子の移動軌跡)を示す。流跡線の色は鉛直方向流速を示す。水衝部①手前から出発した水粒子は、護岸前面で下降し(青色)、河岸の斜面に沿って上昇する(赤色)。図-7は、水衝部①における河床底面に作用する圧力勾配の合力をベクトルで表し、大きさをコンターで示す。図-5, 6, 7から、水粒子が大きく上昇する河岸近傍では、水面が空間的に波打ち、圧力勾配の大きさは主流部と比べて大きくなる。さらに、凹凸のある河岸斜面において、水粒子は変動しながら流下し(図-6)、流れの圧力勾配の空間分布は大きく変動する(図-7)。

次に、河岸表面形状を形づくる底面の石礫近傍の流れ場を示す。図-8は、水衝部①における底面石礫近傍の粗度層流速(ピンク色)と底面流速(黒色)をベクトルで示す。コンターの色は河床高を示す。底面流速は、河岸際と低水路内で流速差を持つが、粗度層流速は、河岸際と低水路内でほぼ同じ流速である。このように河岸近傍では、流れ場の特徴を踏まえた流体力の評価をする必要がある。本研究では、河岸際の三次元流れ場に起因する「境界面に作用する圧力差」と「粗度層流速から求めた抗力」のベクトルの和で流体力を表す(図-2)。図-9は、河岸表層の石礫に働く単位体積当たりの流体力の向きをベクトルで表し、大きさをコンターで示す。河岸前面において、河岸表層の石礫に働く流体力の向きと大きさが大きく変化している。河岸における流体力の向きや大きさの変化は、水粒子が三次元的な変動をする場所(図-6)や圧力勾配の空間分布が変化している位置(図-7)と良い対応を示す。以上から、急流河川の河岸近傍の流れ場の三次元構造は、河岸近傍の流体力の値に密接に関係する。急流河川の河岸侵食は、大きな流体力を受ける凸部から河岸の石礫の抜け出しが進行し、新たな凹凸形状が生まれる。急流河川の河岸侵食機構を説明するためには、河岸表層の石礫に働く流体力を適切に評価する必要がある。

次に、河岸表面形状を形づくる底面の石礫近傍の流れ場を示す。図-8は、水衝部①における底面石礫近傍の粗度層流速(ピンク色)と底面流速(黒色)をベクトルで示す。コンターの色は河床高を示す。底面流速は、河岸際と低水路内で流速差を持つが、粗度層流速は、河岸際と低水路内でほぼ同じ流速である。このように河岸近傍では、流れ場の特徴を踏まえた流体力の評価をする必要がある。本研究では、河岸際の三次元流れ場に起因する「境界面に作用する圧力差」と「粗度層流速から求めた抗力」のベクトルの和で流体力を表す(図-2)。図-9は、河岸表層の石礫に働く単位体積当たりの流体力の向きをベクトルで表し、大きさをコンターで示す。河岸前面において、河岸表層の石礫に働く流体力の向きと大きさが大きく変化している。河岸における流体力の向きや大きさの変化は、水粒子が三次元的な変動をする場所(図-6)や圧力勾配の空間分布が変化している位置(図-7)と良い対応を示す。以上から、急流河川の河岸近傍の流れ場の三次元構造は、河岸近傍の流体力の値に密接に関係する。急流河川の河岸侵食は、大きな流体力を受ける凸部から河岸の石礫の抜け出しが進行し、新たな凹凸形状が生まれる。急流河川の河岸侵食機構を説明するためには、河岸表層の石礫に働く流体力を適切に評価する必要がある。

4. 結論

本研究では、常願寺川現地実験の水衝部を含む区間を対象とし、非静水圧準三次元解析法により、河岸近傍における三次元流れ場と流体力について示した。その結果、河岸の境界形状を考慮した三次元流れ場が河岸侵食機構の説明に重要であることを示した。急流河川では、河岸崩落した石礫材料が河岸際に堆積し、横断的に緩やかな勾配を持つ河道断面形状が形成される。三次元流れ場の解析に河岸際の石礫の堆積形状を取り込み、河岸侵食機構を説明することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 奥石, 内田, 福岡: 護岸水衝部における三次元流れと河床形状の観測法と解析法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp. I_1171-I_1176, 2013. 2) 内田, 福岡: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.2, pp.43-62, 2015.

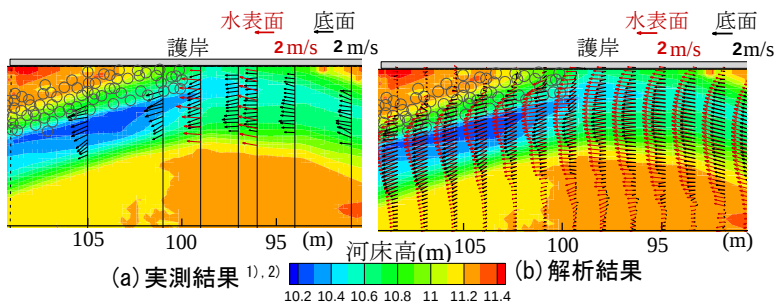


図-4 水衝部①における水表面、底面流速

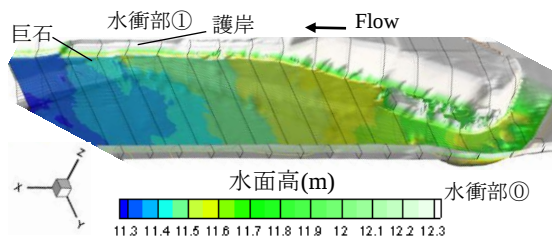


図-5 解析結果の水面の状況

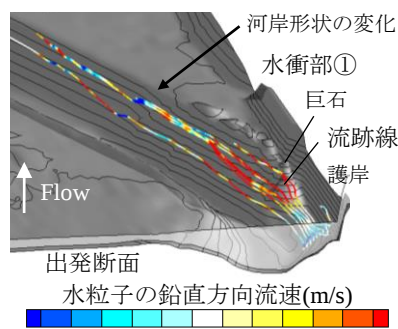


図-6 水衝部①における水粒子の軌跡

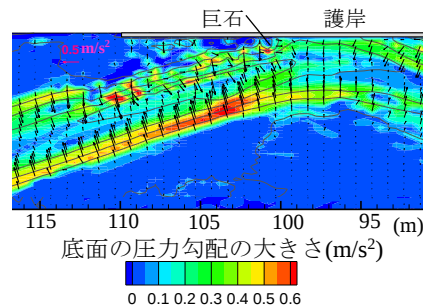


図-7 水衝部①における河床底面の圧力勾配のコンター

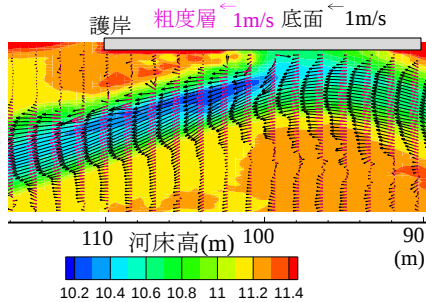


図-8 底面流速と石礫近傍の流速

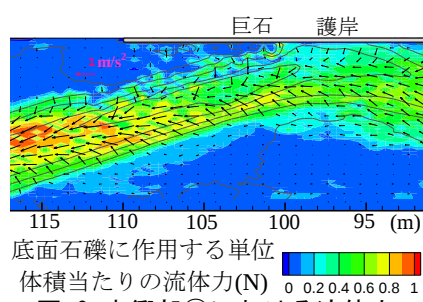


図-9 水衝部①における流体力