

常願寺川現地実験水路における 河岸防護工近傍の流れの三次元構造と 河岸に作用する流体力の評価

THREE-DIMENSIONAL FLOWS AGAINST BANK PROTECTION WORKS AND
FORCES ON RIVER BANKS IN THE JYOGANJI RIVER FILED EXPERIMENT

加藤翔吾¹・福岡捷二²・内田龍彦³
Shogo KATO, Shoji FUKUOKA and Tatsuhiko UCHIDA

¹正会員 株式会社建設技術研究所 研究センターつくば (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 博(工) 広島大学大学院 准教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

At flow attacking points against bank protection works in the steep rivers, local three-dimensional flows and free-surface spatial-temporal fluctuations cause river bed scouring and bank erosion. Three-dimensional flow structures and free-surface fluctuations are important to understand river bed scouring and bank erosion against bank protection works in steep rivers.

In this study, we have two objectives. First, we show structures of three-dimensional flows and free-surface fluctuations against flow attacking points by using the computation results of the General Bottom Velocity Computation method. Second, we show the evaluation method of forces brought by three-dimensional flows around gravel river bank. As a result, forces of three-dimensional flows and free-surface fluctuations are clarified in relation to bank erosions, and the forces on gravel river bank are evaluated by the vector sum of bottom pressure gradient and bottom shear stress.

Key Words : gravel-bed river, three-dimensional flow structure, forces on river bank, field experiment

1. 序論

護岸前面の砂州が水衝部となる場合、速い流速のため、侵食が高水敷から堤防際まで達すると、堤防の被災に繋がり、大規模洪水氾濫の可能性が高くなる。護岸近傍の砂州河床の洗掘や侵食を説明するには、護岸にあたる流れの三次元構造と水面変動の理解は特に重要である。

急流河川の水衝部近傍における流れ場と侵食・洗掘機構及びその解析法の構築を目的とし、常願寺川の高水敷上に作られた現地実験水路を用いて、大規模でかつ詳細な検討が行われてきた。小池田ら¹⁾は、現地実験水路で得られた実測データから、巨石付き盛土砂州²⁾設置による水衝部の河岸防護効果を明らかにした。興石ら³⁾⁴⁾は、非静水圧準三次元解析法(一般底面流速解析法)⁵⁾を現地実験水路に適用し、水衝部における局所流場の解析精度の向上を行った。しかし、急流河川の水衝部を含む河岸の

侵食には、水面変動や流れの三次元構造が重要な役割を果たすが、これらについては十分に検討されていない。

石礫河川の河床洗掘及び河岸侵食量の算定には、河床や河岸の石礫に働く流体力を算定する必要がある。これまで、砂河川の河床底面や河岸に作用する流体力は、底面せん断力で評価してきた。しかし、急流河川の礫床は、石礫を含む幅広い粒径集団で構成されているため、石礫に作用する流体力が底面せん断力だけで評価できている保証はない。石礫に作用する流体力は、石礫周りの力を直接算定することで求めることはできるが、石礫よりも細かい計算格子を用いた非静水圧の三次元解析を行う必要があり、現地河川への適用は現実的ではない。そのため、石礫よりも大きな計算格子を用いて、石礫に働く力の評価方法が必要である。

本研究では、常願寺川現地実験水路の実測データと非静水圧準三次元解析の結果から、河岸防護工近傍における水面変動と水衝部流れの三次元構造を明らかにする。

そして、急流河川の河床の洗掘や河岸の侵食を引き起こす石礫に作用する流体力の評価法を示す。

2. 常願寺川現地実験の概要と実測結果

図-1は常願寺川現地実験水路を示す。水路は複断面蛇行流路で全長170m、縦断勾配1/200、堤間幅20mの中に、幅4.0m、深さ0.7mの低水路を有する。図-2(a), (b)は、それぞれ実験中の水衝部①と水衝部②の状況を示す。図-2(a)に示す水衝部①は、流入部付近のため、外岸侵食が起こらないように河岸保護工を設置した。水衝部②にはコンクリート製の垂直壁の護岸と護岸前面に巨石付き盛土砂州²⁾が設置され、水衝部②には護岸の前面に巨石を有しない盛土砂州が設置された。実験は、約6.9m³/sの定常流量条件下で、水衝部①の付近でADCPを用いた流速分布の計測が行われた(図-2(b))。実験の詳細は文献を参照されたい^{1),3),4)}。

以下に、結果を示す。流れの水衝部である流入部の外岸(水衝部①)や巨石の周辺(水衝部②)では、水面が大きく変動している(図-2(a), (b))。図-3は、水衝部①における水表面流速(赤色)と底面流速(黒色)の実測結果をベクトルで示す。コンターの色は河床高を示す。断面a~dにおいて、水表面と底面の流れは左岸側に寄り、断面

~gにおいて、徐々に右岸側へ移動する。巨石の前面では、水表面の流れは右岸へ向かうが、底面は河岸境界に沿って流れている。図-4(a)は水衝部②の通水中の状況を示し、図-4(b)は通水前の盛土砂州前縁法肩(赤色点線)と法尻(黄色点線)及び通水後の状況を示す。水衝部②の盛土砂州前縁は、通水によって洗掘され流出した。盛土砂州の前縁は、図-4(a)に示す水面が空間的に変動している場所であり、水衝部では激しい水面変動と三次元流れ場が顕著に見られ、巨石を有しない砂州の流出が見られる。実験の詳細は文献を参照されたい^{1),3),4)}。

3. 非静水圧準三次元解析法の常願寺川現地実験水路への適用

(1) 解析方法

水衝部近傍では、水面が時空間的に激しく変動し、三次元的な流れとなっているため(図-2)、静水圧分布からの偏差が生じる。このため、非静水圧準三次元解析法を適用した。解析法は、奥石ら^{3),4)}と同じであるが、河床面の粗度分布の与え方に奥石ら^{3),4)}と違いがある。河床面の粗度分布の与え方については3.(2)で説明する。図-5は非静水圧準三次元解析法の解析領域を示す。非静水圧準三次元解析法は、河床境界面(平均河床高)よりも少し上の底面高さから水面高さまでを主計算領域として、流速

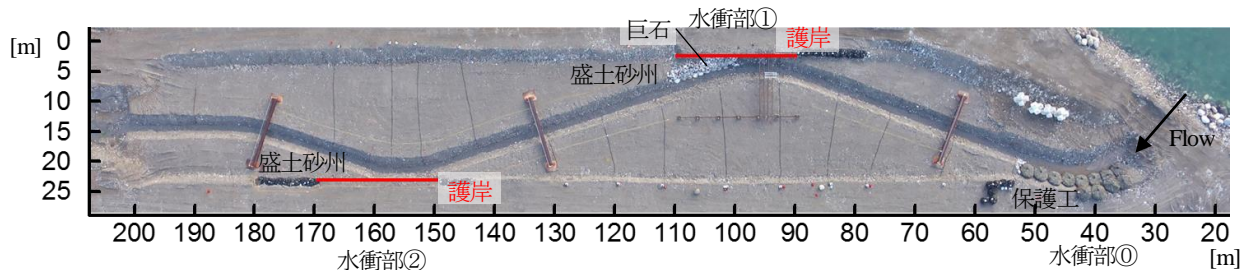
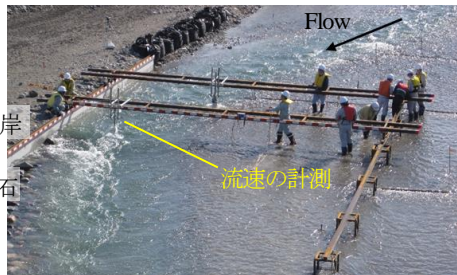


図-1 常願寺川現地実験水路



(a) 水衝部①



(b) 水衝部②

図-2 実験中の水衝部の状況

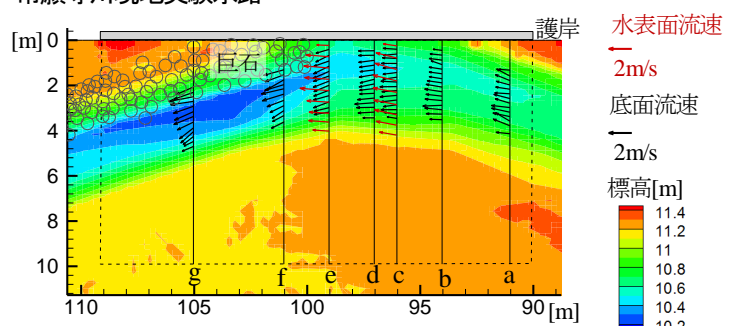


図-3 水衝部①の水表面・底面流速の縦断変化(実測)⁴⁾



(a) 通水中

(b) 通水後

図-4 通水による盛土砂州の前縁の状況(水衝部②)

と圧力の鉛直分布を解くことなく、底面流速と水表面流速及び底面での非静水圧成分を求め、流れの三次元構造を説明するものである。底面流速は、渦度の定義式を水深積分した式(1)より評価する。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \left(\frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

ここに、 $i, j=1,2$, $x_1, x_2: x, y$ 方向(水平面), u_{bi} : 底面流速, u_{si} : 水表面流速, ε_{ij3} : Levi-Civita記号, Ω_i : 水深平均渦度, h : 水深, W : 水深平均鉛直方向流速, w_s, w_b : 水面, 底面の鉛直方向流速, z_s : 水面高, z_b : 底面高である。流速の鉛直分布は三次関数を仮定した式(2)で表す。

$$u'_i = u_i - U_i = \Delta u_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta u_i (-4\eta^3 + 3\eta^2) \quad (2)$$

ここに、 $\eta = (z_s - z)/h$, $\Delta u_i = u_{si} - U_i$, $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$, U_i : x_i 方向の水深平均流速である。

底面の静水圧分布からの偏差成分は、鉛直方向運動方程式を水深積分した式(3)で評価する。

$$\frac{dp_b}{\rho} = \frac{\partial h W U_j}{\partial x_j} + \frac{\tau_{bi}}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここに、 z_b : 河床高, dp : 静水圧分布からの偏差圧力 ($dp = p - g(z_s - z)$), dp_b : 底面における dp , τ_{bi} : 底面せん断応力, W : 水深平均鉛直方向流速である。解析の詳細は文献を参照されたい⁵⁾。

(2) 解析条件

石礫河床は、底面で複雑な流れ場を形成するため、護岸際の底面流速 u_b の信頼性に課題があった。内田ら⁶⁾は、底面高 z_b より下の粗度要素のある領域での非平衡流れに着目し、連続式と運動方程式を解き、底面流速 u_b を算出し、解析の信頼性を高めた(図-5)。石礫河川では、大小様々な粒径の河床材料が堆積しており、河床面近傍における複雑な流れ場の形成要因の一つとなっている。本研究では、内田ら⁶⁾のように底面高 z_b より下の非平衡流れ領域の支配方程式を解かず、簡単のため石礫河床の不均一な底面粗度の分布を与えて底面流速 u_b を求める。底面粗度の値と分布は、実測の水位縦断分布、流量、流速分布を説明するように $k_s=0.14\text{m}$ と $k_s=0.06\text{m}$ をランダムに与えた(図-6)。なお、河岸保護工を設置した水衝部①と巨石付き盛土砂州⁷⁾を設置した水衝部②は、 $k_s=0.10\text{m}$ と $k_s=0.20\text{m}$ の粗度分布をそれぞれ与えた。解析の境界条件は上下流端に観測水位を与えた。地形は縦断幅0.5m, 横断幅0.25mのデカルト座標メッシュに、5.0m毎の測量結果とADCP河床形状測定結果を用いて作成した⁴⁾。

(3) 実測と解析の比較及び既往の結果との比較^{4), 6)}

図-7は、縦断水面形の実測結果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、解析結果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-8は、水衝部①における水表面流速(赤色ベクトル)と底面流速(黒色ベクトル)の解析結果を示す。コンターの

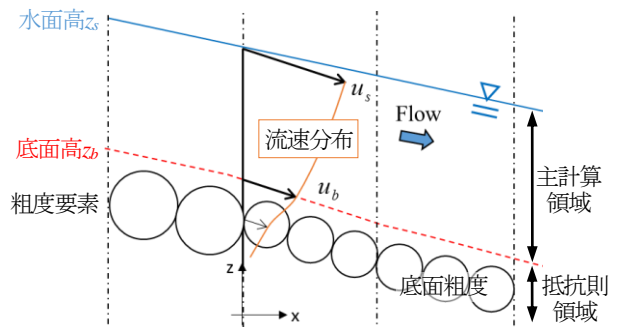


図-5 非静水圧準三次元解析法の解析領域

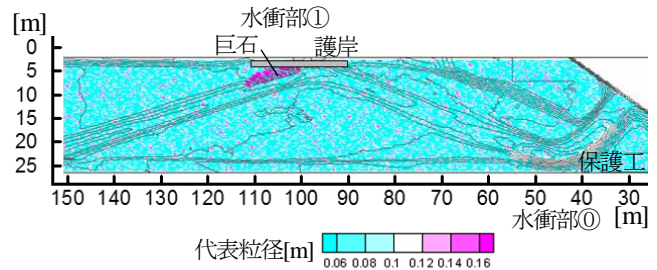


図-6 底面粗度分布

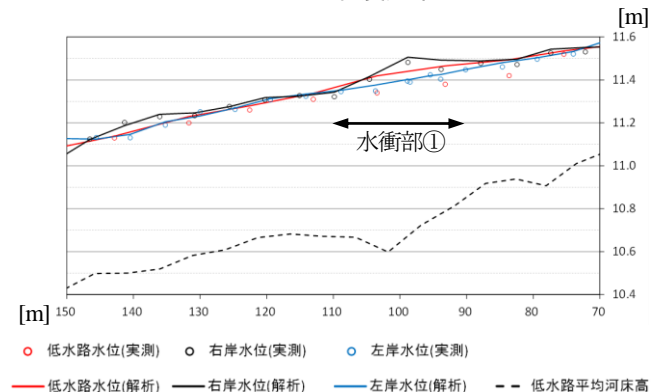


図-7 縦断水面形の比較

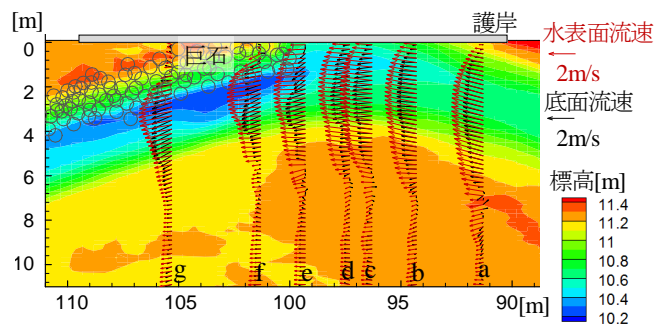


図-8 水衝部①の水表面・底面流速の縦断変化(解析)

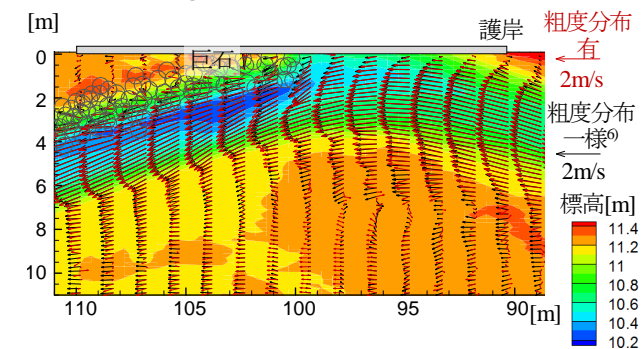


図-9 本検討(赤)と既往(黒)の底面流速の解析結果の比較

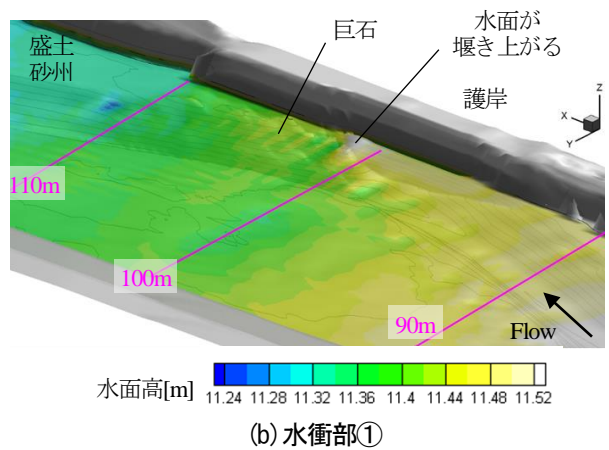
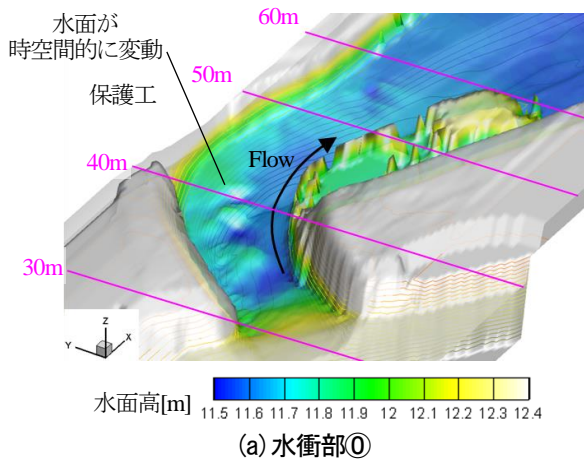


図-10 水衝部における水面変動の状況

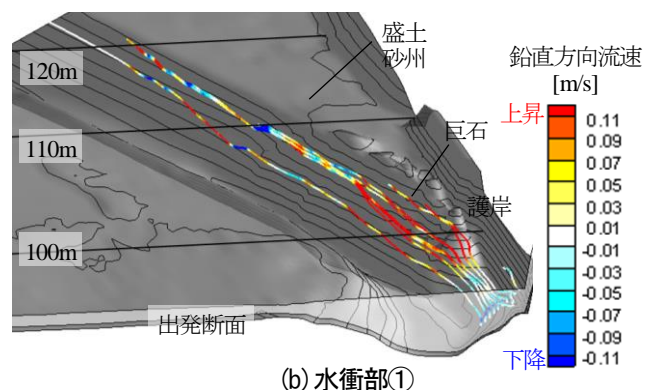
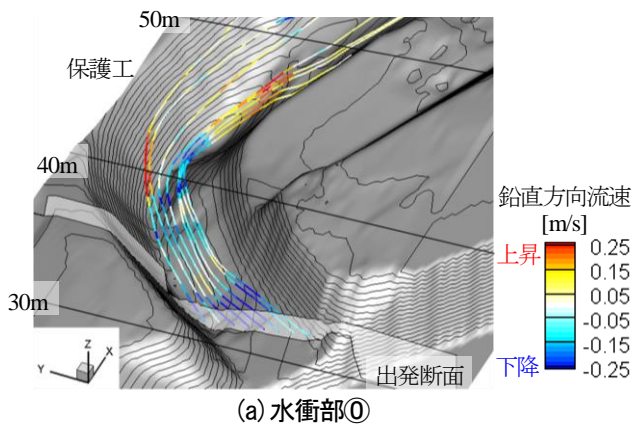


図-11 水衝部における水粒子の移動軌跡(流跡線)

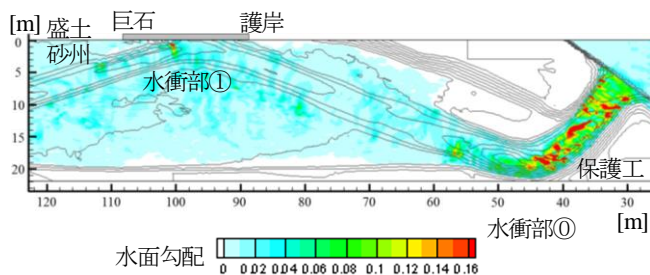


図-12 実験水路内の局所水面勾配の分布

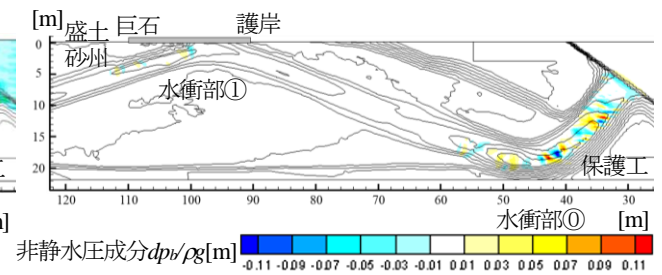


図-13 実験水路内の底面の非静水圧分布

色は河床高を示す。護岸沿いの底面流速は、図-3に示す実測結果よりもやや小さく計算された。図-9は、水衝部①における本検討と既往の検討⁹⁾での底面流速の解析結果の比較を示す。赤色ベクトルは底面粗度に分布を与えた(図-6)本検討の結果を表し、黒色ベクトルは底面粗度を一様に与えた既往の結果⁹⁾を表す。コンターの色は河床高を示す。底面粗度に分布を与えた底面流速は、護岸際では流速ベクトルの向きが低水路方向に水跳ねされているが、大きな差は見られない。しかし、本検討の水表面流速分布と底面流速分布は(図-8)、曲りによる二次流や水表面流速の向き及び巨石の水跳ねにより底面流速が内側に向く流れの状況(図-3)を再現できている。

4. 河岸防護工近傍における流れの三次元構造

3章で得られた解析結果を用いて、河岸防護工近傍における三次元流れ場の特徴を示す。図-10(a), (b)は、それぞれ水衝部①と②の水面変動の状況を示す。水面は、流入部の左岸で大きく変動し、巨石前面で堰上がり、巨石付き盛土砂州²⁾上で変動している状況を見ることが出来る(図-10(a), (b))。これは、現地実験水路で見られた状況と対応しており(図-2(a), (b))、砂州の侵食・流出に密接に関係する(図-4(a), (b))。図-11(a), (b)は、それぞれ水衝部①と②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、水粒子の鉛直方向流速を示す。流入部から出発した水粒子(図-

11(a)は、内岸では河床に沿って流下するが、外岸では水衝部手前で大きく上昇する(赤色)。水衝部①の手前から出発した水粒子(図-11(b))は、水衝部手前で下降し(青色)、巨石の斜面に沿って上昇する(赤色)。その後、巨石付き盛土砂州上や周辺で水粒子は変動しながら流下する。このように、水面の変動と水粒子の変動する場所は良く対応する。

図-12は、実験水路内の局所水面勾配の分布を示す。流入部の水衝部①では、水衝部①と比べて水路内の平均的な水面勾配が大きい。図-13は、底面の非静水圧分布の圧力水頭コンターを示す。急な水面勾配の流入部や巨石前面では、河床底面の静水圧からの偏差成分が大きくなる(図-13)。式(3)に示すように、底面の非静水圧成分 dp_b は、鉛直方向流速 W に関係するため、河床面に作用する非静水圧成分を含めた圧力は、水面の時空間変動と密接に関係する。

5. 石礫に作用する流体力

(1) 石礫群に作用する流体力の評価法

本章では、4章で非静水圧準三次元解析から水衝部や河岸近傍の三次元流れについて検討した主計算領域の下層に図-14に示す石礫群の粗度層を考え、石礫群が受ける流体力を評価する。本研究では、粗度層での流れの加速・減速を無視することで、粗度層内の石礫群に単位体積当たり働く水平方向($i=1,2(x,y)$ 方向)の流体力 f_i を式(4)で表現する。

$$f_i = \frac{\tau_{bi}}{\alpha} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=z_b} \quad (4)$$

ここに、 α :粗度層の厚さ($\alpha=k_s$)、 \bar{p} :粗度層内の平均圧力、 τ_{bi} :粗度層上面に作用する i 方向のせん断応力である。式(4)の粗度層上面に作用する i 方向のせん断応力 τ_{bi} と粗度層内の平均圧力 \bar{p} は、主計算領域の非静水圧準三次元解析から求められる底面流速 u_{bi} と底面圧力 p_b から評価する。非静水圧準三次元解析(一般底面流速解析法)⁶⁾では、底面高と粗度層の間に渦層を定義するが、簡単のため、主計算領域におけるせん断応力(底面せん断応力) τ_{bi} が粗度層上面に作用すると仮定した。底面せん断応力 τ_{bi} は、底面高 z_b 以下で対数分布が成り立つとして式(5)で与える。

$$\tau_{bi} = \rho c_b^2 u_{bi} \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \left(\frac{1}{c_b} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_b}{k_s} + A_r \right) \right) \quad (5)$$

ここに、 $z_b = \alpha_b + \alpha_0$ 、 α_b :渦層の厚さ⁶⁾($\alpha_b = h/(e^3 - 1)$)、 α_0 :対数分布則の原点位置 z_0 と粗度表面高のずれ($\alpha_0 = k_s$)、 $\kappa = 0.41$ 、 $A_r = 8.5$ である。式(4)の粗度層内の平均圧力 \bar{p} は、底面高 z_b における圧力の静水圧成分と非静水圧成分から式(6)のように表す。

$$\bar{p} = \rho gh + dp_b \quad (6)$$

さらに、粗度層内の鉛直方向の圧力勾配 $\partial p / \partial z|_{z=z_b}$ を静水圧分布に従うと仮定すれば、石礫群に単位体積当たり

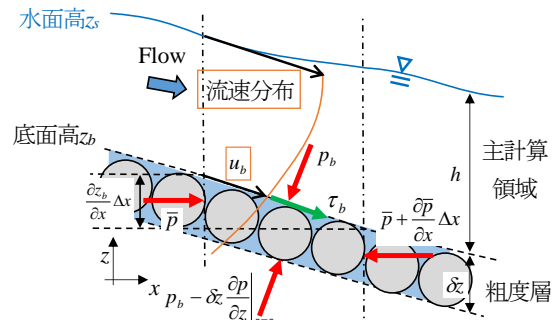
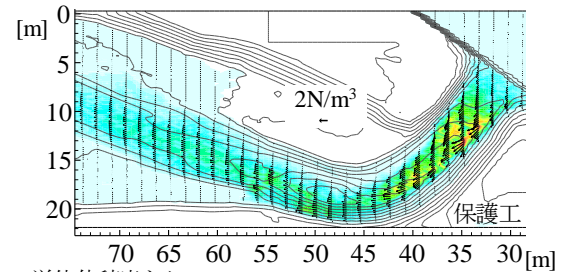
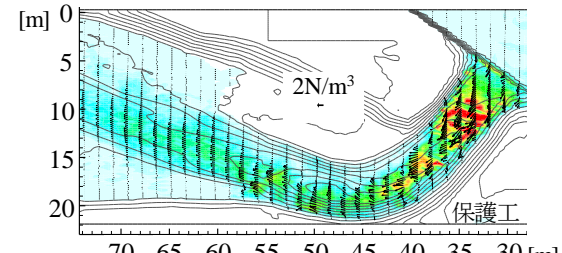


図-14 石礫群を含む粗度層

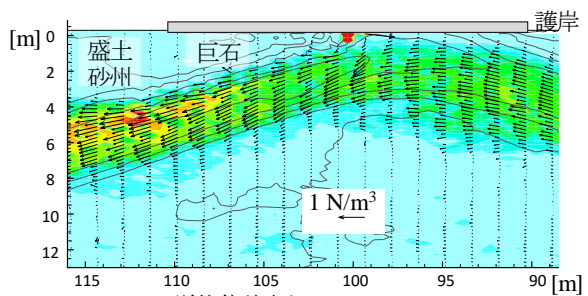


(a) 従来の流体力(式(7)の底面せん断応力のみ)

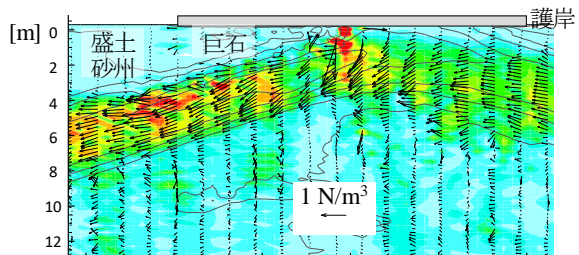


(b) 本検討の流体力,式(7)

図-15 水衝部①における流体力の分布の比較



(a) 従来の流体力(式(7)の底面せん断応力のみ)



(b) 本検討の流体力,式(7)

図-16 水衝部①における流体力の分布の比較

働く*i*方向の流体力*f_i*は最終的に式(7)のように導かれる。

$$f_x = \frac{\rho c_b^2 u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{\alpha} - \rho g \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\partial p_b}{\partial x} \quad (7)$$

以上から、本研究では、粗度層内の石礫に作用する水平方向の流体力は、粗度層内の圧力勾配と底面せん断応力の合力で評価する。

(2) 流体力の算定結果

図-15(a), (b)と図-16(a), (b)は、水衝部①, ②において式(7)を用いた場合と式(7)の第一項のみを用いた場合での石礫群に作用する水平方向の流体力の分布とベクトルを示す。本検討の流体力は、急変部となる流入部や巨石の先端付近(図-11)で大きくなる事が分かる。水衝部①の護岸近傍の巨石の先端では粗度層内の圧力勾配が石礫群に作用する流体力として支配的になる。水衝部より下流の低水路内では、粗度層内の圧力勾配が小さくなり、底面せん断力が流体力の大部分を占める。本検討は鉛直方向の力について考えていないため、河岸の石礫に作用する流体力の評価は今後の課題である。また、流体力の解析結果の妥当性は、今後検証する必要がある。

6. 急流河川の河岸侵食機構の課題

急流河川の河岸侵食について、本文での検討項目以外に取り入れるべき以下の機構が考えられる。図-2(a)に示す水衝部①の外岸では、水面は空間的な変動に加えて、時間的に激しく変動した。このような水面変動は、石礫周囲の砂礫流出のきっかけとなり、河岸侵食の促進に密接に関係している。図-17は、現地水路での30秒間における時間的な水面変動の標準偏差の解析結果を示す。水衝部①では水面時間変動の偏差は2cm~3cmと大きい。流下距離と共に徐々に減じ、水衝部②では1cmを下回る。実験中の水衝部①, ②では水面が約3cmの時間変動をしており、水面変動に起因する河岸からの砂礫の崩落による侵食は無視出来ない。今後この影響を解析に取り込む必要があり、加えて、水面変動について解析法の持つ解像度の影響について検討が必要である。また、河岸から崩落した石礫は河岸際に堆積し、河道断面形状が横断的に緩やかな勾配を持つようになることから、解析に河岸際の石礫の崩落・堆積過程を取り込み、河岸侵食機構を説明することが課題である。

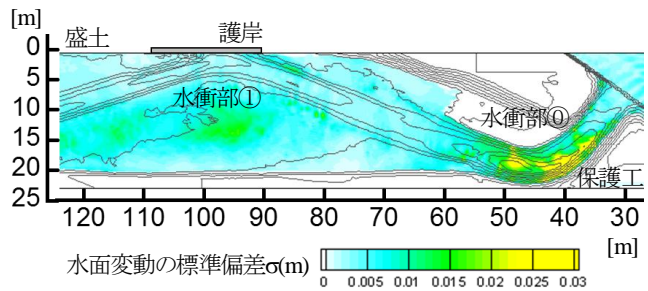


図-17 時間的な水面変動の分布

7. 結論

本研究では、常願寺川現地につくられた大規模な実験水路を対象とし、実測データと非静水圧準三次元解析の結果から、河岸近傍の流れの三次元構造を説明し、その結果を踏まえた河床に作用する流体力の評価法を示した。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 急な水面勾配を有する流入部や水衝部の護岸近傍では、流れが強い三次元構造を持ち、水面が時空間的に激しく変動し、両者は河道の侵食機構に影響を及ぼすことを示した。
- 2) 粗度層内の石礫群に作用する流体力を粗度層の圧力勾配と底面せん断応力の合力で定式化し、流体力の空間分布について調べた。その結果、水面勾配の急な流れ場では石礫に作用する流体力として、粗度層の圧力勾配が重要となることを示した。

参考文献

- 1) 小池田真介, 石井陽, 岩井久, 石川俊之, 福岡捷二: 水衝部対策を施工した砂州による自然性の高い河岸防護工の創出, 河川技術論文集, 第18巻, pp.233-238, 2012.
- 2) 国土交通省北陸地方整備局河川部北陸急流河川研究会: 治水と環境の調和した新たな河岸防護技術の手引き, 2013.
- 3) 奥石大, 内田龍彦, 長谷川賢市, 内藤ゆう子, 福岡捷二: ADCPを用いた局所流計測法の開発と堤防際の水衝部流れへの適用, 河川技術論文集, 第18巻, pp.239-244, 2012.
- 4) 奥石大, 内田龍彦, 福岡捷二: 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.L1171-L1176, 2013.
- 5) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.56, pp.I-1225-1422, 2012.
- 6) 内田龍彦, 福岡捷二: 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.

(2017. 4. 3受付)