

急流河川の三次元流れと石礫河岸に作用する流体力に関する研究 Study of three dimensional flows and forces on gravel-banks in the steep rivers

15N3100002G 加藤 翔吾
Shogo KATO

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

1. 序論

洪水時の急流河川の河岸水衝部は、流れが速く、河岸際で水面が時空間的に激しく変動するため、河岸侵食が発生する。河岸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。河岸侵食機構の説明には、河岸近傍の水面変動と流れの三次元構造の理解が特に重要である。

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、大掛かり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。奥石ら²⁾は、非静水圧準三次元解析法(一般底面流速解析法)を現地実験水路に適用し、河岸水衝部における局所流れ場の解析精度の向上を行った。しかし、水衝部の河岸近傍における水面変動を含む大規模流れの三次元構造と河岸侵食の関係については、まだ十分に明らかにされていない。

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し、得られた結果を踏まえて、河岸侵食に繋がる流体力の評価を行った。

2. 常願寺川現地実験

(1) 実験概要

図-1は常願寺川現地実験水路を示す。図-2(a), (b)は、それぞれ水衝部①と水衝部②の実験中の状況を示す。全長170m、堤間幅20m、縦断勾配1/200の実験水路の中に幅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-2(a)に示す水衝部①には洗掘・侵食が起こらないように河岸保護工が設置され、図-2(b)に示す水衝部②にはコンクリート製の垂直壁の護岸と護岸の前面に巨石付き盛土砂州²⁾が設置されている。実験水路には、約6.9m³/sの流量を流下させ、水衝部①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⁾²⁾。

(2) 実験結果

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)で水面が大きく波打っている(図-

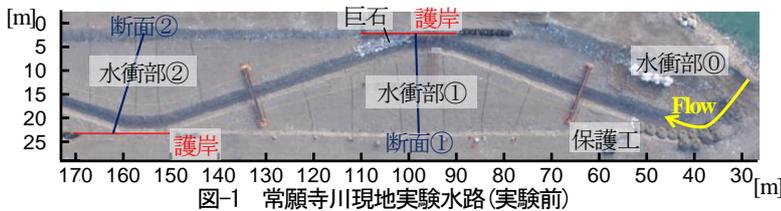
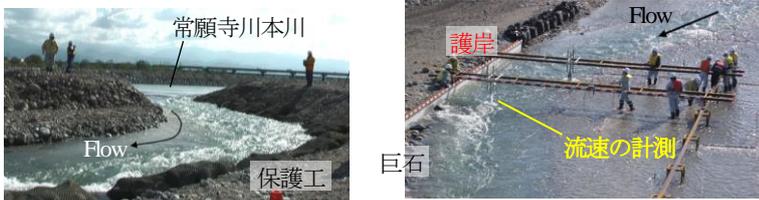


図-1 常願寺川現地実験水路(実験前)



(a) 水衝部① (b) 水衝部②

図-2 実験中の水衝部の状況

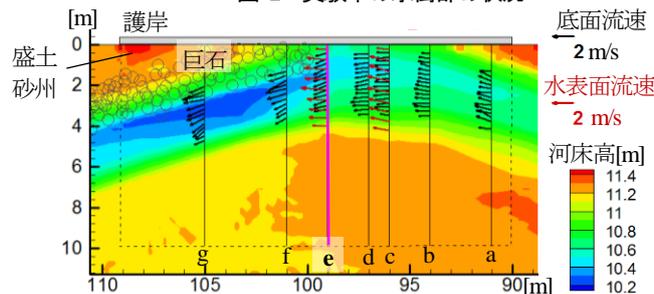


図-3 水衝部①における実測の水表面・底面流速の縦断変化²⁾

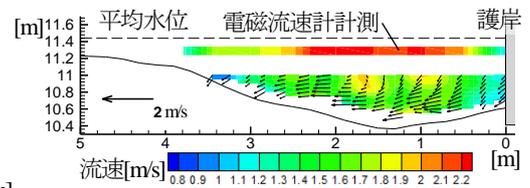


図-4 実測(ADCP計測)の主流速カウンターと二次流ベクトル(断面e)²⁾

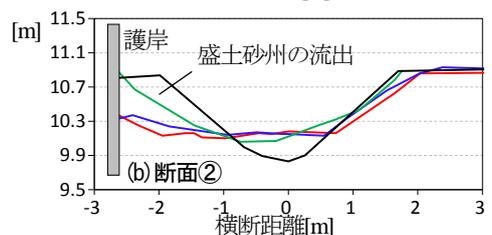
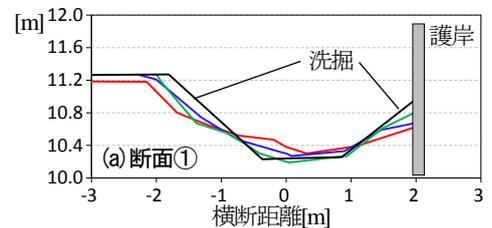


図-5 水衝部①、②における通水前後の盛土砂州と河床の状況²⁾

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主流は左岸側に発生し、断面e~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、底面の流れは河岸の境界に沿う方向に跳ねられている。図-4は、水衝部①の断面e(図-3)における主流方向流速をコンターで示し、二次流をベクトルで示す。断面eでは強い二次流が生じ、護岸際で強い下降流が発生する。これは断面a~dにおいて、左岸主流の大きな運動量が二次流によって右岸側に輸送されたため、断面eより下流の右岸では速い流速が発生している。図-5(a)は水衝部①の護岸前面に巨石付き盛土砂州²⁾を設置した断面①を、図-5(b)は水衝部②の巨石を持たない盛土砂州を設置した断面②における通水前後の河床の変化を示す。断面①は巨石付き盛土砂州直上流の断面を計測し、断面②は盛土砂州の前縁を計測した(図-1)。図-6(a), (b)は水衝部②の通水前の盛土砂州前縁の法肩(赤色点線)と法尻(黄色点線)及び通水後の状況を示す。通水中に、断面①では右岸護岸際の巨石前面の河床が徐々に洗掘されたが、盛土砂州は維持された。断面②では巨石が無いため、盛土砂州が大部分流出した(図-5(b), 図-6(a), (b))。断面①で巨石付き盛土砂州の前縁(図-4)は、図-2(b)に示す水面が空間的に波打っている部分であり、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る。また、巨石が盛土砂州の維持に有効であり、水衝作用に伴う河床洗掘の軽減に効果的であることが分かる。

3. 非静水圧準三次元解析法の現地実験水路への適用

(1) 解析方法と解析条件

図-1に示す30m~130m区間は通水前後の河床高変化が小さかったため、流れ場の計算に固定床条件で非静水圧準三次元解析法²⁾を適用した。水衝部の河岸近傍では、二次流による強い下降流が発生しているため(図-4)、非静水圧準三次元解析法を用いた。図-7は、解析領域における非静水圧準三次元解析法の考え方を示す。非静水圧準三次元解析法では、河床境界面(平均河床高)よりも少し上の底面付近の流速 u_b が重要な変数である。河岸際では、石礫のある河床境界面で複雑な流れ場を形成するため、底面流速 u_b の信頼性に課題があった。内田ら³⁾は、底面高 z_b より下の抵抗則領域の非平衡流れについて、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-7)。しかし、底面高 z_b より下の非平衡流れ領域の解析への導入は、支配方程式の数を増やすことになるため、本研究では底面粗度に空間分布を与える簡略化を行い、河床境界面近傍に非平衡流れを生じさせて底面流速 u_b を求めた。底面粗度の設置は、

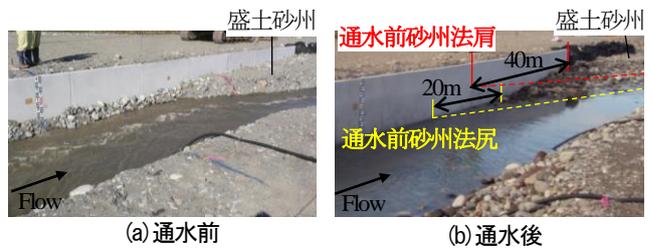


図-6 通水前後の盛土砂州の前縁の状況(水衝部②)

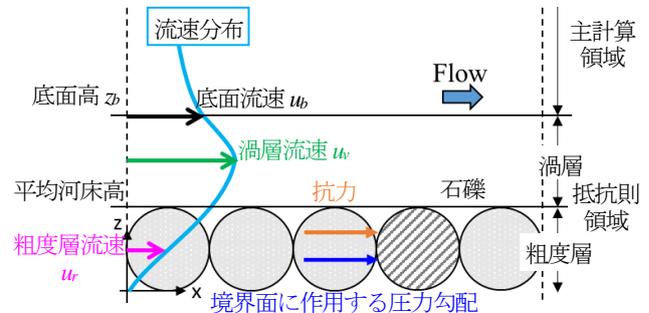


図-7 非静水圧準三次元解析法の解析領域における考え方³⁾

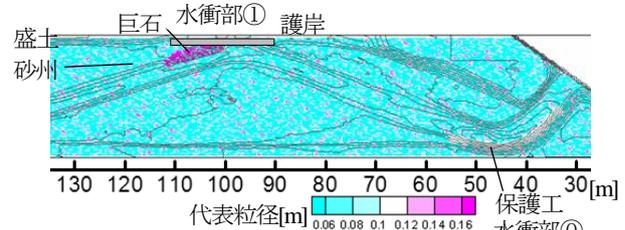


図-8 底面粗度分布

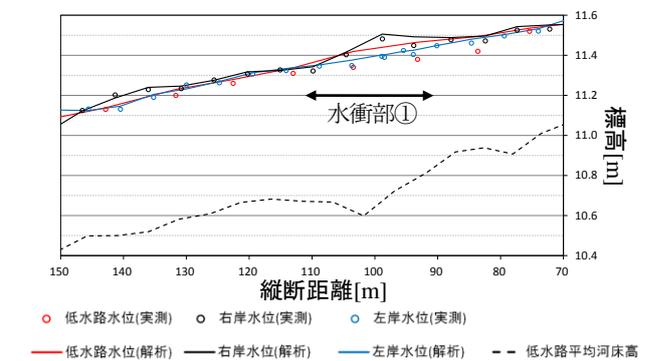


図-9 縦断水面形の比較

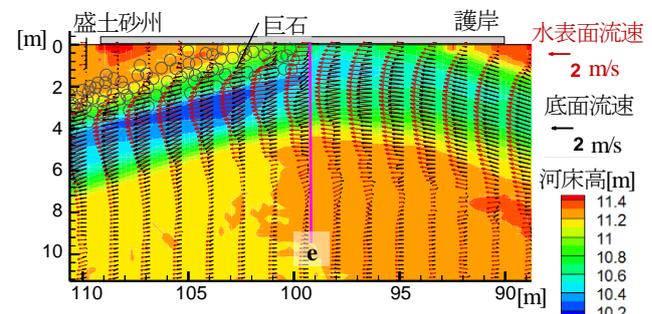


図-10 水衝部①における解析の水表面・底面流速の縦断変化

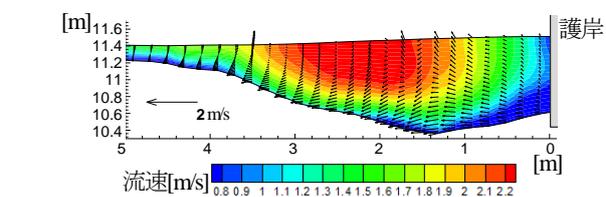


図-11 解析の主流速コンターと二次流ベクトル(断面 e)

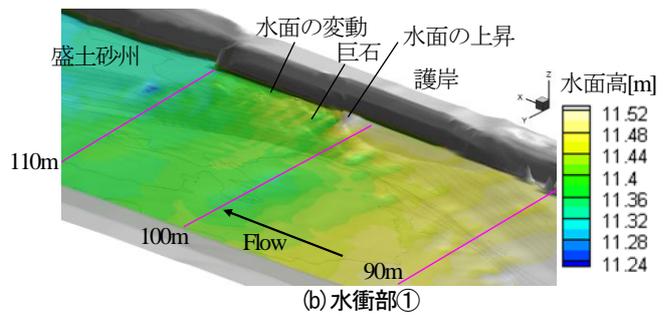
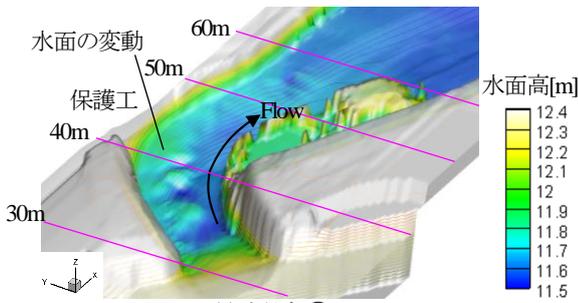


図-12 水衝部における水面変動の状況

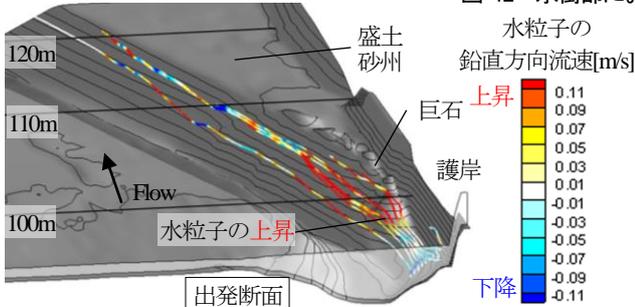


図-13 水衝部①における水粒子の軌跡(流跡線)

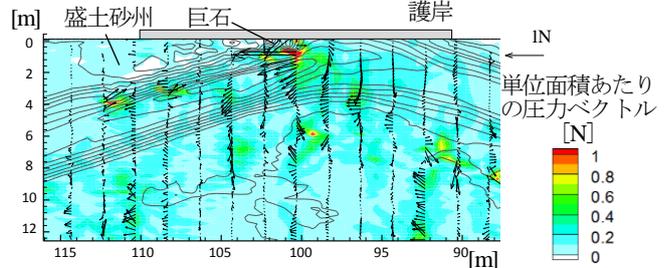


図-14 水衝部①における河床面に作用する圧力の大きさ分布とベクトル

図-8に示すように、実測の水位縦断分布や流量、流速分布を説明するように相当粗度 $k_s=0.14\text{m}$ と $k_s=0.06\text{m}$ をランダムに与えた。なお、河岸保護工を設置した水衝部①と巨石を設置した水衝部②は、 $k_s=0.10\text{m}$ と $k_s=0.20\text{m}$ の底面粗度をそれぞれ与えた。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²⁾。解析の詳細は文献を参照されたい²⁾。

石礫の堆積する粗度層の流速 u_r (図-7)は、非定常項を無視し、簡略化した内田ら³⁾の渦層と粗度層の運動方程式(1),(2)を用いて、one-way計算法によって算出した。

$$u_{vk} \frac{\partial u_{vi}^e}{\partial x_k} = -\frac{\partial (dp_b + \rho g z_s)}{\rho \partial x_i} + \frac{\tau_{bi}(u_{bi}, u_{vi})}{\rho \alpha_b} - \frac{\tau_{ii}(u_{vi}, u_{ri})}{\rho \alpha_b} \quad (1)$$

$$u_{rk} \frac{\partial u_{ri}^e}{\partial x_k} = -\frac{\partial (dp_b + \rho g z_s)}{\rho \partial x_i} + \frac{\tau_{ii}(u_{vi}, u_{ri})}{\rho \alpha_r} - \frac{D_i(u_{ri})}{\rho \alpha_r} \quad (2)$$

ここに、 $i,k=1(x),2(y)$ 、 u_{vi} 、 u_{ri} ：渦層、粗度層における層平均 x_i 方向流速、 u_{bi}^e 、 u_{ri}^e ：平衡状態における u_r に対する u_v と u_r ³⁾、 dp_b ：底面圧力偏差 ($dp_b = p - \rho g(z_s - z)$)、 z_s ：水面高、 $\tau_{bi} = f(u_{bi}, u_{vi})$ ：底面せん断応力³⁾、 u_{bi} ：底面流速、 α_b ：渦層の厚さ³⁾、 $\tau_{ii} = f(u_{vi}, u_{ri})$ ：粗度層上面に作用するせん断応力³⁾、 $\alpha_r = k_s$ ：粗度層の厚さ³⁾、 $D_i = f(u_{ri})$ ：せん断応力に換算された粗度層内の粒子に作用する流体力³⁾である。各項の導出や詳細は文献を参照されたい³⁾。

(2) 実測と解析の比較

図-9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-10は、水衝部①における水表面流速(赤色)と底面流速(黒色)の解析結果を示す。コンターの色は河床高を示す。護岸沿いの底面流速は、凹凸のある河床面を

相当粗度 k_s の大きさ分布で考慮するだけでは、抵抗則領域の非平衡流れを十分に評価できていないため、図-2に示す実測結果よりもやや小さく計算された。しかし、工学的には十分な精度で求められている。図-11は、水衝部①の断面eにおける主流速をコンターで示し、二次流をベクトルで示す。断面eの護岸際の主流速と二次流は実測値(図-3, 4)よりもやや小さいが、低水路内の流速の鉛直分布を良好に再現している。全体的に見て、解析は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を良く説明出来ている。

4. 水衝部近傍における水面変動と三次元流れ場の特徴

水衝部における三次元流れ場の特徴を3章の解析結果を用いて示す。図-12(a), (b)は、それぞれ水衝部①と水衝部②の水面変動の状況を示す。流入部で水面が大きく波打ち、また巨石前面で堰上がり、巨石付き盛土砂州上で時空間的に変動している状況を見ることが出来る(図-12(a), (b))。これは、現地実験水路で見られる状況と類似しており、河岸侵食に密接に関係する水理現象である(図-2(a), (b))。図-13は、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、水粒子の鉛直方向流速を示す。水衝部①の手前から出発した水粒子は、護岸前面で下降し(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。

図-14は、水衝部①における河岸や河床底面に作用する圧力の合力をベクトルで表し、大きさをコンターで示す。図-14に示すように、水面が堰上がり(図-12(b))、水粒子が上昇する巨石の前面(図-13)では、圧力の大きさが低水路内より大きい。これは、水面の時空間変動

が河床境界面に作用する圧力に密接に関係していることを示している。

5. 三次元流れ場の特徴を考慮した流体力評価

4章で示した河岸近傍における流れの三次元構造を踏まえ、「河岸境界面に作用する圧力勾配」と「石礫に作用する抗力」のベクトルの和で流体力を評価する(図-7)。石礫に作用する抗力の算定には、河床面に相当する粗度層の流速を用いる(図-7)。図-15は、one-way計算法(黒色)と内田らによる計算法³⁾(赤色)による水衝部①における粗度層流速の分布を示す。コンターの色は河床高を示す。計算結果は、護岸と巨石の前面で逆流が生じ、内田らの低水路内における流速分布の結果³⁾と良い対応を示している。得られた粗度層流速を用いて、石礫近傍に作用する抗力を評価する。

図-16は、河岸の石礫に働く単位面積あたりの流体力ベクトルの分布を示す。低水路河床において、流体力の向きと大きさは粗度層の流速分布と類似した分布をなす(図-15)。一方、巨石の先端付近では、河岸境界面の圧力と類似した大きな流体力が作用している(図-14)。凹凸のある巨石河岸側面では、流体力は空間分布を持ち、実験の河岸侵食箇所に対応している(図-6(a), (b))。これは、急流河川の河岸侵食が大きな流体力を受ける河岸の凸部から石礫が抜け出し、新たな侵食形状が生まれることに繋がっている。以上から、急流河川の河岸侵食機構を説明するためには、河岸表層に存在する石礫に働く流体力を適切に評価する必要がある。

急流河川の河岸侵食の説明について、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②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、河岸侵食の助長に密接に関係している。図-17は、現地水路における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②では水面時間変動の偏差は2cm~3cmと大きいですが、流下距離と共に徐々に減じ、水衝部①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、河岸侵食に与える影響は無視出来ないため、今後この影響を解析に取り込む必要がある。また、河岸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今後の課題である。

6. 結論

本研究では、常願寺川現地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法を用いた解析から、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岸に作用する流体力の評価を行った。以下に

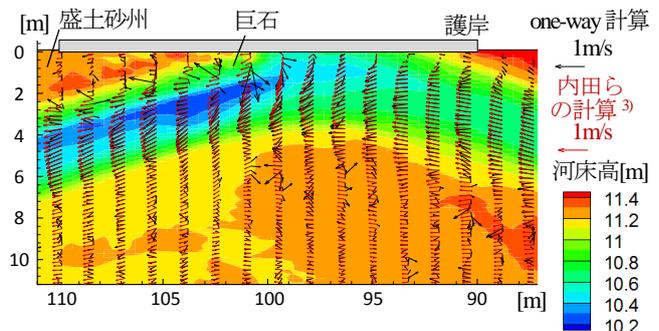


図-15 one-way 計算法と内田らの計算法³⁾の粗度層流速の比較

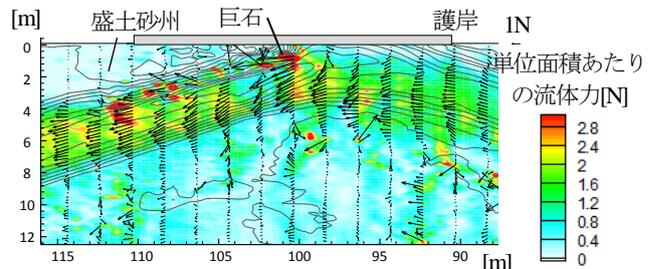


図-16 水衝部①における流体力分布とベクトル

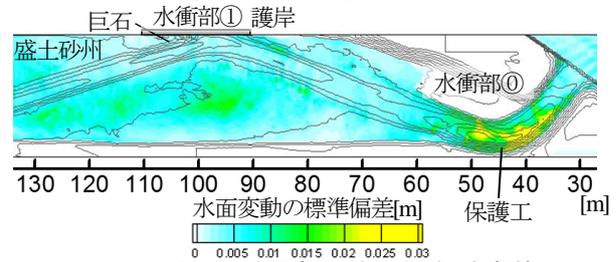


図-17 30秒間の水面変動の標準偏差の解析値

結論を示す。

- 1) 河岸近傍では、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する。
- 2) 石礫境界面近傍の流れ場を説明する基礎方程式を用いて算出した石礫近傍の流速は、非平衡流れの特性を十分評価できることを示した。
- 3) 三次元流れの特徴を考慮し、河岸を構成する石礫に作用する流体力を「境界面に作用する圧力勾配」と「石礫に作用する抗力」の合力で評価した。石礫に作用する流体力が大きくなる場所は、実験中の砂州の流出箇所と良い対応を示した。

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) 興石大, 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. I_1171-I_1176, 2013.
- 3) 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.