

混合砂河床における水制周辺の 局所洗掘及び粒度変化に関する研究

STUDY ON LOCAL SCOUR AND VARIATION OF BED COMPOSITION
AROUND SPUR DYKE IN A NONUNIFORM SEDIMENT BED

水谷英朗¹・中川一²・川池健司³・馬場康之⁴・張浩⁴
Hideaki MIZUTANI, Hajime NAKAGAWA, Kenji KAWAIKE, Yasuyuki BABA
and Hao ZHANG

¹正会員 修(工) 株式会社ハイドロソフト技術研究所 (〒550-0015 大阪市西区南堀江1-7-4)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所 (同上)

⁴正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所 (同上)

Non-uniform sediment transport plays an important role in the assessment of riverbed stability and habitat suitability. In this study, we carried out movable bed experiments around a spur dyke in the Ujigawa Open Laboratory, Kyoto University. Both uniform and non-uniform sediment beds have been used and the changes of the bed configuration have been compared with each other. In case of non-uniform sediment bed, the grain size distribution of the bed surface has been measured and two zonal deposition areas of fine sediments have been confirmed. Numerical simulation of the local scour process and the variation of the bed composition is also conducted using a 3D flow model, together with a mixed sand, non-equilibrium sediment transport model. The numerical results are compared with those of the experiments and the model performance is examined. It is found that the numerical results show generally good agreement with the experiment measurements.

Key Words : spur dyke, local scour, non-uniform sediment bed, non-equilibrium sediment transport

1. はじめに

近年、水制設置は洗掘防止のための護岸対策や航路確保の目的だけでなく、積極的に河床の洗掘・堆積を生じさせることで河道の多様性の創出および河川環境向上の目的のために設置する試みが行われている。その水制がもたらす河川環境は、設置後だけでなく長期に亘って維持されることが求められるため、事前に水制設置後の流れと河床変動を精度よく予測し、河床変化や水制の効果を確認しておく必要がある。

これまで水制周辺の洗掘機構の解明・洗掘深予測に関して数多くの実験的研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾が行われ、洗掘深の予測式が作られ、越流と非越流型、そして透過と不透過型の水制周辺における3次元的な流れ場の構造についても明らかになりつつある。しかし、それらの局所洗掘に着目した移動床実験の多くは、粒径の様な均一砂河床を用いた実験であり、混合砂を用いた移動床実験の研究事例

は多くない。そのため実河川のような混合砂河床については現在も不明な点が多く残っているのが実情である。河床材料の粒度分布は河川を構成する重要な要素であり、流れに対する河床の安定性は河床表層の粒度分布が大きく寄与し、そして植生や魚の産卵床等の水生動植物のハビタット評価を行う上でも必要な情報でもあるため、混合砂河床を用いた実験については重要度が高いと言える。

そこで本研究では、実河川を念頭におき混合砂河床を用いた水制周辺の局所洗掘に関する移動床実験を行った。平均粒径が同程度の均一砂と混合砂河床を用いて水制周辺の移動床実験を行い、通水後の両ケースの平衡河床形状の比較を行った。また、混合砂ケースについては河床表層の粒度分布の計測を行い、粒度分布の平面的な変化、粒径の小さな砂粒の移動経路とその堆積域に着目し考察を行った。

また、本研究で行った混合砂移動床実験を3次元流れ解析モデルおよび非平衡流砂モデルによる河床変動解析によって再現を試みた。その数値解析結果と実験結果の

比較を通じて計算モデルの妥当性および課題の検討を行った。

2. 混合砂河床を用いた水制周辺の移動床実験

(1) 実験概要

実験水路は幅0.4m、長さ8m、路床勾配 $i=1/1000$ の長方形直線開水路を用いた。図-1に示すように上流側から4mの位置に長さ1.7mのサンドピットを設けた水路を用いた。水路の下流端にはゲートが設けられており、その高さを変えることによって水位の調節を行うことが可能となっている。また、移動床開始地点（サンドピット上流端）から50cm下流の右岸側に長さ10cm、幅1cmの非越流型不透水制を側壁に直角になるように設置した。

実験に使用した砂は、珪砂3号、4号、6号を用い、それぞれ平均粒径は1.7mm、1.03mm、0.31mmとなっている。均一砂ケースは珪砂4号を用い、混合砂ケースについては平均粒径が均一砂ケースと同程度になるように、3号と6号を1対1の割合で混合して河床を作成した。図-2に使用した珪砂および混合砂ケースの粒度分布を示す。

実験条件を表-1に示す。本実験の水理条件では、活発な土砂移動は水制周辺のみに限られるため、今回の実験では上流からの土砂供給は行っていない。

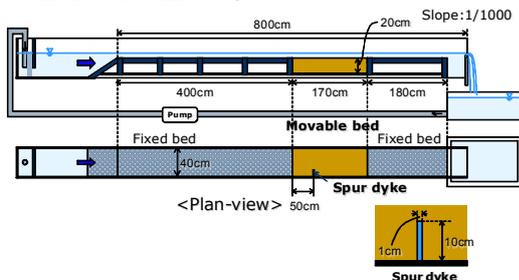


図-1 実験装置の諸元

表-1 実験条件

水路床勾配	1/1000
水路幅 (cm)	40
流量 (l/s)	5.7
水深 (cm)	5.0
平均流速 (cm/s)	28.5
河床材料 平均粒径 (mm)	均一砂; $D_m=1.03$ 混合砂; $D_m=1.00$

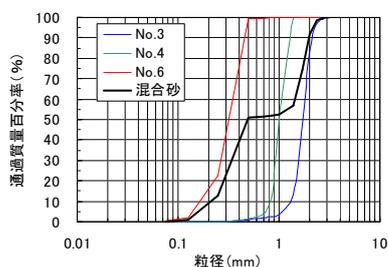


図-2 河床砂の粒径加積曲線

(2) 実験結果と考察

均一砂・混合砂の両ケースともに、実験開始とともに水制頭部付近において河床低下が始まり洗掘孔が形成される。そして、水制頭部付近の河床低下の後に、水制前面の下降流による渦のために水制前面において洗掘が生じ洗掘孔が大きく発達していった。今回の実験条件では、洗掘孔は30分程度まで早く洗掘が進行して大きくなり、その後は洗掘孔上流側の砂がずり落ちる現象により徐々に洗掘が進行した。

通水3時間後の平衡河床となった河床変動量を等高線で示したものを図-3に示す。最大洗掘深は均一砂ケースで約11.7cm、混合砂ケースでは約9.9cmとなり、最大洗掘地点は両ケースともに水制前面に生じている。水制前面の洗掘孔の河床勾配は約 27° 、横断方向の河床勾配は約 31° と砂の水中安息角程度となり、水制頭部から下流側の河床勾配は 15° 程度と洗掘孔内では河床勾配が緩い領域となっている。通水開始後は水制頭部で洗掘された土砂がそのまま下流で堆積するが、時間が進行するにしたがってその土砂は下流へ流される。しかし、水制下流の側壁付近まで到達した土砂については、流速が小さい領域であるため堆積域が形成された。

平均粒径が同程度の均一砂・混合砂移動床実験において、水制周辺の平衡河床の形状、洗掘堆積域の傾向に大きな違いはないものの、洗掘深や洗掘孔の大きさに違いが確認された。今回の実験条件においては、混合砂ケースの最大洗掘深の方が約1.8cm小さく、均一砂ケースに比べ15%程小さい結果となっている。また洗掘孔の大きさの違いを確認するために、水制周辺の1.0cm以上洗掘されている領域の洗掘量を比較した場合、混合砂ケースの洗掘量は均一砂の半分程度となりその差は大きい。混合砂ケースの最大洗掘深及び洗掘量の軽減については、粒径がより均一でない混合砂ケースの方が、小さい粒径が大きな粒径の遮蔽により移動しにくくなる効果が働き、均一砂ケースに比べ洗掘深が小さくなったと推察される。

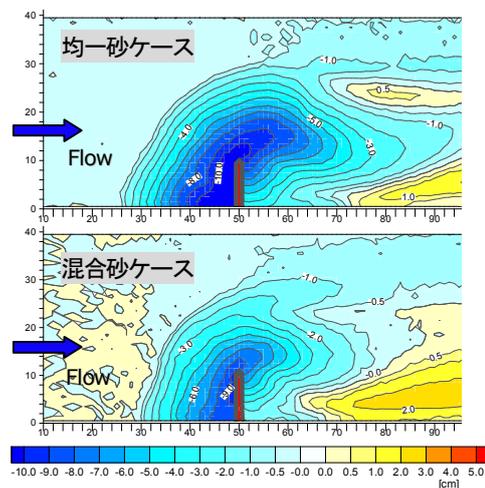


図-3 実験結果の河床変動量コンター図

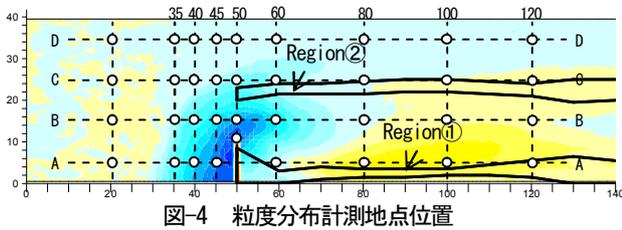


図-4 粒度分布計測地点位置

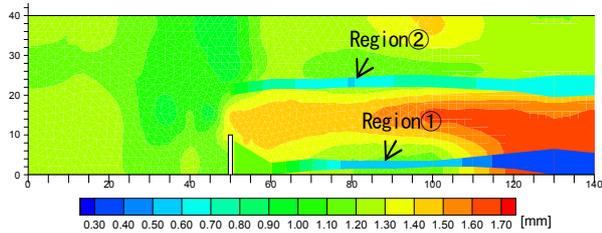


図-5 粒度分布計測結果(平均粒径コンター)

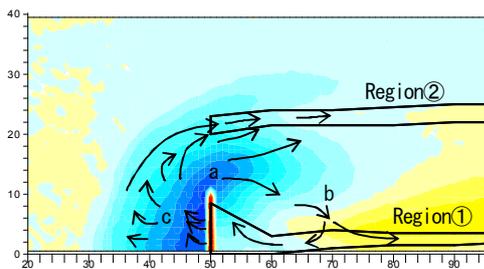


図-6 砂粒移動経路のスケッチ

図-4には本研究で河床表層粒度分布の計測を行った地点を示す。図-5にはその計測結果より作成した平均粒径コンター図を示す。図-4の実線で囲んだ2つの領域は、通水3時間後の河床表層において小さな粒径が目立って堆積した領域である。水制下流の側壁に沿って堆積する領域 (Region①) と洗掘孔の縁に沿った位置から下流に向かった領域 (Region②) の2つの帯状の領域において、粒径の小さな砂粒が移動および堆積する実験結果となり、その帯に挟まれる領域には粒径の大きな砂粒が河床表層に多く存在する実験結果となった。

図-6は目視によって確認した洗掘孔がある程度発達した時の粒径の小さな砂粒移動経路をスケッチしたものである。地点aの水制頭部では、砂粒が巻き上げられRegion①に向かう砂粒とRegion②に向かう砂粒の両方が存在する。地点b付近では水制直下流の渦によって水制直下流側へ戻される砂粒、もしくは渦に戻されず、そのままRegion①の側壁に沿って下流へと運搬される砂粒が確認された。地点cでは、水制前面の下降流により河床底面では上流向き流れとなる。その上流向き流れによって水制周辺でPick-upされた粒径の小さな砂粒は、洗掘孔の縁付近まで運ばれ、その後、縁に沿って下流へ運ばれRegion②で下流へ運搬もしくは堆積される。また、地点c付近における粒径の比較的大きな砂粒については、河床勾配から洗掘孔中心方向に働く重力が小さい砂粒より大きいために洗掘孔の縁まで運ばれるものは少なく、

多くはその内側を通過してRegion①とRegion②の間に運搬される。地点c付近からPick-upされる小さな砂粒は水制を大きく迂回するように運ばれ、比較的大きな砂粒はそれより内側を迂回するように下流へ運ばれる傾向がある。これらの理由により、2つの特徴的な帯状の粒径の小さな砂粒の堆積領域とそれに挟まれる粗粒化された領域が形成されたと考えられる。

3. 数値解析法

(1) 非構造格子を用いた3次元流れの計算手法

本研究で用いたZhangら⁶⁾が開発した非構造格子3次元流れ解析モデルの基礎式は、Reynolds平均された3次元の連続式、運動方程式、 $k-\varepsilon$ 方程式である。基礎式をテンソル表記におけるアインシュタインの総和規約で記述したものを次に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 u_i ($i=1,2,3$) は平均流速成分、 x_i はデカルト座標 (x, y, z) 成分、 ρ は水の密度、 f_i は体積力、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 τ_{ij} はレイノルズ応力である。レイノルズ応力については、標準 $k-\varepsilon$ モデルの線形方程式で表され、詳細については紙面の都合上省略する。

(2) 非平衡流砂モデルによる河床変動計算手法

水制工周辺の局所洗掘現象においては、流砂の非平衡現象が卓越し、平衡流砂量式による評価では妥当性を欠くと考えられる⁷⁾。そこで本研究では、Nagataら⁸⁾によって構築されている砂粒の運動方程式を解く非平衡流砂モデルに倣って河床変動モデルの構築を行った。本研究では複雑な形状に適用可能な非構造メッシュを採用し、そして流砂の計算には、粒径別に計算を行う混合砂の河床変動モデルの構築を行った。

本研究のモデルでは、各計算メッシュにおいて各粒径階のpick-up量を計算し、その河床から離脱した代表砂粒について砂粒の運動方程式を計算することによって移動経路を計算している。詳細について、次に記述する。

a) pick-up量の計算

粒径階 k 、メッシュ番号 i からの単位時間あたり離脱土砂量はpick-up rate p_s を用いて次式のように表せる。

$$V_{p(i,k)} = (A_3 d_{(k)}) / A_2 p_{s(i,k)} S_{p(i)} P_{b(i,k)} \quad (3)$$

ここで、 $d_{(k)}$ は粒径階 k の河床材料粒径、 A_2, A_3 は砂粒の2次元、3次元の形状係数 ($=\pi/4, \pi/6$)、 $S_{p(i)}$ は離

脱地点メッシュの鉛直方向射影面積, $p_{b(i,k)}$ は粒径階 k の含有率である.

pick-up rateは局所勾配の影響を考慮した中川・辻本・村上⁹⁾による次式より計算する.

$$p_{s(k)} \sqrt{\frac{d^{(k)}}{(\sigma/\rho-1)g}} = F_0 G_* \tau_{*k} \left(1 - \frac{k_p \phi \tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right)^{m_p} \quad (4)$$

$$G_* = \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \quad (6)$$

ここで, τ_{*k}, τ_{*ck} は粒径階 k の無次元掃流力と無次元限界掃流力, σ は河床材料の密度 ($\sigma/\rho = 2.65$), g は重力加速度, θ_b は河床最大傾斜方向の勾配角, k_L は抗力と揚力の比 ($=0.85$), μ_s は砂の静止摩擦係数 ($=0.7$), ψ は河床付近の流速と砂粒移動方向のなす角度, α は砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角度である. 定数については, 中川ら⁹⁾と同様に $F_0 = 0.03, k_p = 0.7, m_p = 3$ を用いた. なお, pick-up rate 計算地点は, 河床計算メッシュの中央地点で, 各粒径階の無次元限界掃流力については, 岩垣式¹⁰⁾および芦田・道上¹¹⁾により修正されたEgiazaroffの式より求めた.

b) deposition量の計算

後述する運動方程式より計算される砂粒の移動地点における土砂堆積量をstep lengthの確率密度関数を用いて求める. 計算メッシュ i から出発した砂粒の移動経路において, 離脱から n ステップ後の位置における単位時間あたりのdeposition量 $V_{d(i,k,n)}$ は次式で表される.

$$V_{d(i,k,n)} = V_{p(i,k)} f_s(s_{(i,k,n)}) \Delta s \quad (7)$$

ここで, $V_{p(i,k)}$ は計算メッシュ番号 i の粒径階 k のpick-up量, $f_s(s_{(i,k,n)})$ はstep lengthの確率密度関数を表し, $s_{(i,k,n)}$ は計算メッシュ i から離脱した粒径階 k の砂粒の移動距離, Δs は1ステップの砂粒移動距離である.

step lengthの確率密度関数は, 次式のような指数関数を用いる.

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda_{(k)}} \exp\left(-\frac{s_{(i,k,n)}}{\lambda_{(k)}}\right) \quad (8)$$

ここで, $\lambda_{(k)}$ は粒径階 k の砂粒の平均step lengthである. 平均step lengthについてはEinstein¹²⁾が揚力の変動を考慮して提示した次式を用いて求める.

$$\lambda_{(k)} = \lambda_0 d^{(k)} \int_{-B_*/\tau_*-1/\eta_0}^{B_*/\tau_*-1/\eta_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr \quad (9)$$

ここで, η_0 は流体力変動の変動係数, B_* , λ_0 は定数である. η_0, B_*, λ_0 はそれぞれ, 0.5, 0.156, 100とした.

c) 砂粒の運動方程式を用いた移動経路計算

離脱砂粒の移動経路を, 砂粒の滑動形式の運動方程式を用いて計算する. 当該領域に存在する砂粒を全て解くのは計算機負荷, 記憶容量から考えて困難である. そのため, 以下に述べる計算は, あるタイミングに離脱する砂粒の移動経路計算を, 各メッシュにおいて粒径階別に1つの砂粒に代表させている. すなわち, 各メッシュで離脱する粒径階の砂粒分の運動方程式を解くことになる.

まず, 河床平面を表すために $x-z$ 平面, $y-z$ 平面内の河床平面と平行な単位ベクトルを, それぞれ $\mathbf{p}_{b1}, \mathbf{p}_{b2}$ とする. 砂粒に作用する力として, 抗力, 摩擦力, 重力, 浮力, 揚力を考えると, \mathbf{p}_{bj} ($j=1,2$) 方向についての砂粒の運動方程式は以下のようになる.

$$m_{sed} \frac{du_{sedj}}{dt} = D_j + W_j - F_j \quad (j=1,2) \quad (10)$$

ここで, m_{sed} は砂粒の仮想質量であり, 付加質量係数は長田ら¹³⁾と同様に $C_m (=0.5)$ を用いて, 次式で表せる.

$$m_{sed(k)} = \rho(\sigma/\rho + C_m) A_3 d^{(k)3} \quad (11)$$

D_j, F_j, W_j は, 砂粒に作用する抗力, 摩擦力の \mathbf{p}_{bj} 方向成分, 水中重力であり, 粒径階 k の砂粒に作用するそれぞれの大きさを D, F, W とすれば, 次のように表せる.

$$D_{(k)} = \frac{1}{2} C_D \rho (u_{bi} - u_{sedi})^2 c_e A_2 d^{(k)2} \quad (12)$$

$$F_{(k)} = \mu_k \left(W_{(k)} \frac{\cos \theta_{bx} \cos \theta_{by}}{\sin \theta_p} - k_L D_{(k)} \right) \quad (13)$$

$$W_{(k)} = (\sigma - \rho) g A_3 d^{(k)3} \quad (14)$$

ここで, u_{sedj} は砂粒移動速度の \mathbf{p}_{bj} 方向成分, u_{bj} は底面近傍の流速 \mathbf{p}_{bj} 方向成分, C_D は抗力係数 ($=0.4$), c_e は砂粒に作用する抗力の有効断面積に関する係数, μ_k は砂粒の動摩擦係数 ($=0.35$), θ_{bx}, θ_{by} は x, y 方向の河床勾配角, θ_p は \mathbf{p}_{b1} と \mathbf{p}_{b2} のなす角度である.

c_e は遮蔽係数に相当するもので, ここでは簡単のため, 静止砂粒に対しては0.4, 移動中の砂粒に対しては1.0を用いた.

d) 河床変動計算

上述した方法によって算出したpick-up量, deposition量を用いて, 河床変動量の計算を行う. pick-up量については, メッシュ中心で定義されているが, deposition量については, その各砂粒の移動経路上で計算されているため, 堆積させる時に河床高定義点への換算を行う必要がある. 以下に, 河床変動量の計算の流れを示す.

- ①メッシュ i から離脱した粒径階 k の n ステップの砂粒位置が含まれるメッシュとその近傍メッシュを抽出する.
- ②deposition量 $V_{d(i,k,n)}$ を計算し, 砂粒が含まれるメッシュとその近傍メッシュへと配分する.

③各計算メッシュにおいて、移動している砂粒全ての土砂堆積配分量を合計する。

④次式よりその計算ステップの河床変動量を計算する。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{\sum_k V_{d(k)} - \sum_k V_{p(k)}}{S_d} \quad (15)$$

ここで、 z_b は河床高、 A_1 は1次元の砂粒の形状係数(=1.0)、 S_d は計算メッシュの鉛直方向射影面積である。

⑤河床の粒度分布計算については、交換層・遷移層・堆積層の概念を取り入れたLiu¹⁴⁾の方法を用いて計算する。以上の①～⑤を河床変動計算過程で毎回行う。

上記②の近傍メッシュへの配分に関しては、砂粒位置とメッシュ中心との距離をその計算メッシュ面積の平方根で無次元化して、重み付きで近傍メッシュに配分を行っている。

また、上述した手法を実現するには、各メッシュから離脱した粒径階別の砂粒の各時間ステップにおける移動地点、移動距離、離脱土砂量、そして、離脱タイミングの異なる砂粒の情報についても同様に計算メモリに記憶させておく必要がある。このため、砂粒のpick-up計算を全ての時間ステップで行うことは、計算機の記憶容量から考えて難しい。したがって、pick-up計算をある時間間隔 Δt_p 毎に行うこととし、流れ計算および砂粒の運動方程式を計算する時間間隔より大きく設定することを行っている。時間間隔 Δt_p 内のpick-up量については、 Δt_p 毎に計算される Δt_p 内でpick-upされる量を計算し、細かい各計算ステップに均等に割り振る。

砂粒の運動方程式については、 Δt が最も小さく全ステップで計算を行い、各砂粒の移動距離に応じてdeposition量を計算する。離脱した砂粒の移動・堆積計算は、離脱時に計算されるpick-up量が堆積してなくなるまで継続して計算を行う。全てのpick-up土砂量が堆積した時、その砂粒が占有していた記憶メモリ領域を開放し、次ステップで離脱される砂粒の記憶領域としている。

河床高は、各ステップ Δt ごとに計算を行い、更新された河床面を用いて計算格子を再構築し計算を進める。

なお、本研究においては、移動粒子同士の衝突などの干渉を無視している。粒径と離脱タイミングの異なる多数の砂粒を同時進行で計算することは行っているが、各メッシュにおいて粒径階別に代表させた砂粒を計算させているため、移動粒子の相互干渉を無視している。

e) 安息角による土砂のSlide

洗掘深が大きくなるにつれて、河床の局所勾配が増大し、非粘着性材料で構成された河床の場合、河床斜面のずり落ち (slide) が生じる。今回の水制周辺の局所洗掘現象の計算においては、このslideのモデル化が不可欠である。したがって、本研究においてある限界角度 $\theta_{b,max}$ 以上の斜面が形成された場合、slideにより限界角を保持するように、土砂移動を生じさせている。本研究では、

簡単に $\theta_{b,max}$ は水中安息角 (=32°) と設定し計算を行い、混合砂の計算であるため河床表層の粒度分布についてもslideにより変化させた。

4. 計算条件

計算メッシュについては、図-7に示すような水制周辺には3角形、その他の領域には4角形メッシュの混在する非構造メッシュを用いた。計算条件については表-2に示す通りである。

5. 計算結果と考察

図-8に混合砂ケースの河床変動結果、図-9には河床表層の平均粒径コンター図を示す。両図ともに計算開始から120分後の平衡河床に達した結果を示している。

最大洗掘深約8.6cmという結果で最大洗掘深については、実験結果と比べると若干小さいものの最大洗掘深の位置や洗掘形状および堆積位置の平面的な傾向は概ね再現できている。

粒度分布結果については、河床表層の平均粒径コンター図より、水制頭部から下流に向けて粒径の粗い領域が発生し、実験結果と似た結果となっている。図-5の平均粒径コンター図Region①の水制下流側の側壁に沿った領域については実験結果と同様に粒径の小さいものが河床表層に堆積した結果となった。また、Region②の同じく小さな粒径が目立って堆積した領域についても、周囲に比べて小さい粒径の土砂が帯状に堆積した結果となり実験結果と似ている。Region②の帯状の位置が計算の方がやや洗掘孔外側へずれているが、これは洗掘深が計算値の方が小さいことが影響しているのではないかと考えている。

また、紙面の都合上結果図は省略しているが、実験と同様に均一砂ケースの計算も実施しており、洗掘深結果について混合砂ケースと比べると、均一砂ケースの方が洗掘が大きく実験と同様の傾向を示している。これは無次元限界掃流力の評価に修正Egiazaroffの式を用いることにより混合砂の遮蔽の影響が考慮されたと考えられる。

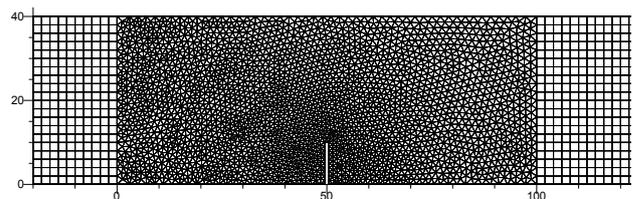


図-7 計算メッシュ図

表-2 計算条件

流れの計算時間間隔	0.1(s)
pick-up計算間隔	0.2(s)
砂粒の移動計算間隔	0.005(s)
河床材料 (d:代表粒径(mm) p=含有率(%))	d1=0.31, p1=50.0 d2=1.70, p2=50.0

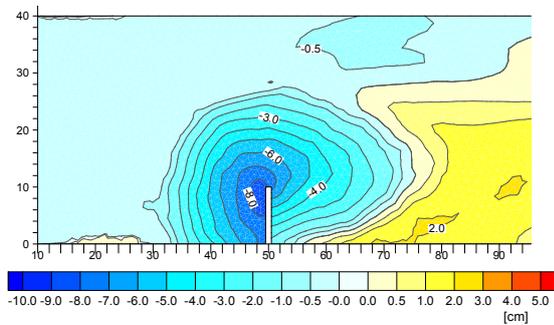


図-8 河床変動量コンター図 (計算結果)

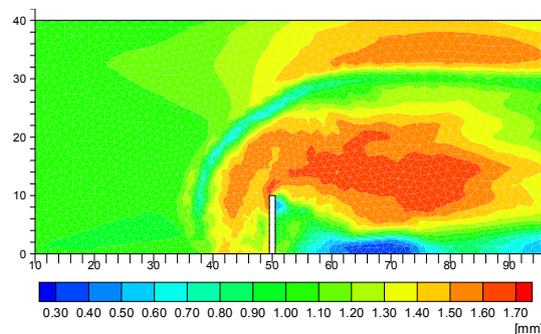


図-9 平均粒径コンター図 (計算結果)

今回の解析では土砂の流砂形態を掃流砂のみで扱っていることが洗掘深の大きさが小さい原因の一つとして考えている。実現象では水制頭部で砂が巻き上げられ洗掘が活発で、浮遊砂の形態で流れに沿って下流へ輸送されているのを確認している。そのため、今回の掃流砂の移動形態として扱った解析では十分に再現ができなかったと考えられ今後の課題である。

6. おわりに

本研究では、平均粒径が同程度の均一砂と混合砂の移動床実験を行い平衡河床形状の比較を行った。今回の実験条件においては、混合砂ケースの最大洗掘深の方が約15%小さく、水制周辺の洗掘量は混合砂ケースの方が均一砂ケースの半分程度となり、河床材料の粒度分布の洗掘に与える影響が大きいことが示された。混合砂ケースの最大洗掘深、洗掘孔の大きさは、平均粒径が同程度でも今回の実験条件と異なる粒度分布を用いれば異なる結果が得られると考えられる。今後、粒度分布の異なるさらなる混合砂実験ケースを実施し、粒度分布の違いが最大洗掘深や洗掘孔の大きさに与える影響を確認する必要があり今後の課題である。

混合砂ケースについては粒度分布の計測を行い、水制周辺において粒径の小さな成分が河床表層に多く堆積、もしくは移動する2つの帯状領域、そしてその2つの帯状間には周囲より粒径が粗くなる領域があることが確認された。

また本研究では、非構造格子3次元流れ解析と非平衡流砂モデルにより混合砂河床における移動床実験の再現

計算を行った。洗掘深は計算の方が若干小さい結果となっているが、洗掘および平均粒径の平面分布は実験結果と似た傾向を示している。

今後、浮遊砂を考慮した数値解析モデルの構築を行い、浮遊砂を考慮した場合のモデルの妥当性について検討していきたい。

謝辞：本研究は（社）近畿建設協会から研究助成（代表：張浩）を受けている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Rahman, M. M. and Muramoto, Y.: Prediction Of Maximum Scour Depth Around Submerged Spur-Dike-Like Structures, *Annual Journal of hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.43, pp.623-628, 1999.
- 2) Elawady, E., Michiue, M. and Hinokidani, O.: Movable Bed Scour Around Submerged Spur-Dikes, *Annual Journal of hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.45, pp.373-378, 2001.
- 3) 李最森, 道奥康治, 前野詩朗, 和中隆志: 捨石水制を配した開水路における流れと河床変動, *水工学論文集*, 第51巻, pp.817-822, 2007.
- 4) 富永晃宏, 田本典秀: 越流型水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, *水工学論文集*, 第48巻, pp.805-810, 2004.
- 5) Zhang, H., Nakagawa, H.: Characteristics of local flow and bed deformation at impermeable and permeable spur dykes, *Annual Journal of hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.53, pp.145-150, 2009.
- 6) Zhang, H., Nakagawa, H., Ishigaki, T. and Muto, Y.: Prediction of 3D flow field and local scouring around spur dykes, *Annual Journal of hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.49, pp.1003-1008, 2005.
- 7) 福岡捷二, 山坂昌成, 安陪和雄: 強い非平衡流砂運動を伴う河床変動, *第28回水理講演会論文集*, pp.679-684, 1984.
- 8) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y.: Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures, *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.131, No.12, pp.1074-1087, 2005.
- 9) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾: 側岸における非平衡流砂過程, *第29回水理講演会論文集*, pp.561-566, 1985.
- 10) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, 第41号, pp.1-21, 1956.
- 11) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, *土木学会論文報告集*, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 12) Einstein, H. A.: Formulas for the transportation of bed load, *Trans. ASCE*, No.2140, pp.561-597, 1942.
- 13) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, 中藤達昭: 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, *土木学会論文報告集*, 第684号, pp.21-34, 2001.
- 14) Liu, B.Y.: Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels, Ph.D Thesis, Kyoto University, 1991.

(2009. 9. 30受付)