

河道への置き砂還元プロセスの 平面 2 次元数値シミュレーション

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATIONS OF RETURNING PROCESS OF THE SEDIMENTS TO THE RIVER

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・小牧 貴大³・高須賀 真哉⁴

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Takahiro KOMAKI, Shinya TAKASUKA

¹正会員 博士(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒 804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

³正会員 (株) 都市開発コンサルタント 設計部 (〒 804-0012 北九州市戸畑区中原東 1-7-11)
(九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程)

⁴学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒 804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

The returning process of sediments, which were deposited in the reservoir, to the river was investigated experimentally and numerically. A two-dimensional numerical model for the bed variation was constructed based on the finite-volume method (FVM), flux-difference splitting (FDS) scheme and unstructured grid system. The model could also treat the mobile as well as fixed bed based on the technique proposed by Struiksmas. The experiments of the returning process of the sediments to the river were conducted and the data of water level and bed variation were obtained. Against these data, the model verifications were performed. It showed that the model had the ability to reproduce the returning process of the sediments to the river.

Key Words : *sediment transport, dam break flow, 2-D numerical simulation, finite-volume method, flux difference splitting*

1. はじめに

近年, ダム貯水池の機能保全や水系一貫とした土砂管理の立場から, フラッシング排砂, 排砂バイパストンネル, 置き砂などによるダム堆砂の河道への還元が実施されている。置き砂は, 浚渫したダム堆砂をダム下流の河道内に設置し, 人工洪水や出水時の掃流力により土砂を下流域に還元する方法であり, 幾つかの水系で既に試験的に実施されている^{1), 2)}。

相模川は置き砂が試験的に実施されている河川の一つであり, そこでは置き砂の設置効果についてモニタリング調査が行われている^{1), 2)}。その調査結果では, 置き砂の設置高さが平水位程度である場合には土砂が常時流下し, 置き砂設置位置の直下流に急拡部かつ湾曲部の内側などの土砂が堆積しやすい河道特性を有する箇所がある場合には中州が形成されやすく, その中州により水がよどみ景観や水質が悪化した可能性があること, 予想した掃流力を下回る場合に置き砂が長期にわたり残置され, 内部に含まれる有機物の腐植等が発生し, 水質の悪化を招く可能性があること, などが報告

されている²⁾。このように, 土砂還元を実施する上で, 最適な置き砂の設置高さや位置, 置き砂の流送時の流量, 置き砂が下流域へ及ぼす影響の評価など, 様々な課題が残っているのが実情である。

置き砂の河道への還元プロセスは, 上述したように河道特性や水理条件によって影響を受けるため, そのプロセスの予測には任意の河道形状や水理条件に対応できる数値シミュレーションが有効な手段であると考えられる。置き砂はダムの直下流に置かれる場合が多く, そこでは常・射流が混在した流れになること, 出水や人工洪水により置き砂は流送されるため流れの非定常性についても無視できないこと, 粗粒化が進行している場合には河床や岩盤面が露出する河床で置き砂が流送されることなどから, これらを取り扱えることが, 数値シミュレーションモデルには求められる。

常射流が混在する区間では, 流れの特性速度と河床擾乱の特性速度の関係が相対的に無視できなくなるため, 流れと河床変動の相互干渉を考慮する必要性が指摘されている³⁾。しかし, 相互干渉を考慮する場合, 数値モデルが煩雑になるとともに計算効率の悪化を招くた

め、実用性の課題が残される⁴⁾。これに対し、Kassem and Chaudhry⁵⁾のように、相互干渉を考慮するモデルと考慮しないモデルによる計算比較を行い、後者を用いた場合でも、十分な精度で河床変動計算が行えることを示した研究も存在する。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、置き砂が下流に及ぼす影響を検討可能な数値シミュレーションモデルの開発を目的としたものである。ここでは、まず、流れと河床変動の時間スケールが大きく異なると考え、これらの相互干渉を考慮しない平面 2 次元河床変動数値モデルを構築した。次に、洪水を想定したダム破壊流れを用い、1 次元および 2 次元的に設置した置き砂の還元プロセスに関する水理実験を行い、その還元の初期プロセスに関するデータを収集した。最後に、実験結果に基づき構築した平面 2 次元河床変動数値モデルの検証を行った。

2. 基礎方程式

(1) 流れの基礎方程式

流れの基礎方程式は 2 次元浅水流方程式であり、 U を保存量ベクトルとして、 E と F をそれぞれ x と y 方向の流束ベクトル、および S を発生項・消滅項ベクトルとすると式 (1) で表される。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix};$$

$$F = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}; \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ -gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

ここに、 t は時間、 h は水深、 u と v はそれぞれ x と y 方向の流速、 g は重力加速度、 S_{ox} と S_{oy} はそれぞれ x と y 方向の河床勾配、 S_{fx} と S_{fy} はそれぞれ x と y 方向の摩擦勾配である。ここで、基準水平面河床高を z_b とすると、河床勾配 S_{ox} と S_{oy} はそれぞれ式 (2) で表される。

$$S_{ox} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}; \quad S_{oy} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (2)$$

また、摩擦勾配 S_{fx} と S_{fy} は、マンニングの粗度係数 n を用いると、それぞれ式 (3) で与えられる。

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}; \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

(2) 河床変動の基礎方程式

河床変動の基礎方程式は流砂の連続の式であり、次式で表される。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda_b} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

ここに、 λ_b = 河床材料の空隙率、 q_{Bx} と q_{By} はそれぞれ x と y 方向の流砂量である。掃流砂のみを考慮し、主流方向の流砂量 q_{Bs} については、芦田・道上の式⁶⁾より、主流に垂直な方向の流砂量 q_{Bn} については長谷川の式⁷⁾より算定した。ただし、流れの基礎式では 2 次流の影響を考慮していないため、式 (6) においても 2 次流に関する項は省略した。

$$q_{Bs} = 17 \sqrt{sgd^3} \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad (5)$$

$$q_{Bn} = q_{Bs} \left(-\sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (6)$$

ここに、 s は砂の水中比重、 d は粒径、 $\tau_*(=u_*^2/sgd)$ は無次元掃流力、 $\tau_{*c}(=u_{*c}^2/sgd)$ は無次元限界掃流力、 u_* は摩擦速度である。また、限界摩擦速度 u_{*c} は岩垣の式⁸⁾により算定する。なお、上記の流砂量式では有効摩擦速度を摩擦速度で近似している。 μ_s と μ_k は河床材料の静止および動摩擦係数であり、砂の物性を考慮して $\mu_s=1.0$ および $\mu_k=0.45$ を用いた。摩擦速度 u_* は、主流方向の摩擦勾配を $S_{fs} = (n^2(u^2 + v^2))/h^{4/3}$ とし次式より求めた。

$$u_*^2 = ghS_{fs} \quad (7)$$

(3) 還元プロセスにおける固定床の取り扱い

粗粒化が進行している場合や岩盤面が露出している場合には河床を固定床として取り扱う。ここでは、Struiksma⁹⁾が提案している方法に基づき、河床に固定物がある場合の流砂量 q'_{Bs} を次式で与える。

$$q'_{Bs} = \phi q_{Bs} \quad (8)$$

$$\phi = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta}{\delta_a}\right); \quad \delta \leq \delta_a \quad (9)$$

$$\phi = 1; \quad \delta > \delta_a \quad (10)$$

ここに δ は河床面から固定床までの距離、 δ_a は流砂が河床下の固定床の影響を受けなくなる限界の厚さであり、ここでは水深の 1% とした。 ϕ は流砂量補正係数であり、式 (9) および (10) により 0 から 1 の間に設定される。

3. 数値モデル

(1) 流れの数値モデル

基礎方程式の離散化は有限体積法 (FVM) に基づき行った．時間積分には Euler の陽解法を，空間積分には常・射混在流が安定して計算できる流束差分法 (FDS) を用いた．発生項は地盤高勾配として空間微分を含むため，流束ベクトルと同様な手法で風上化を行った．また，摩擦勾配については，計算メッシュ重心で定義される保存量 U に基づき計算を行った．計算格子には，任意の河道形状が再現可能な非構造格子を用いた．なお，解析手法の詳細については参考文献¹⁰⁾を参照されたい．

(2) 河床変動の数値モデル

有限体積法に基づく場合，河床変動計算における基礎方程式は次のように離散化される．

$$z_{bi}^{n+1} = z_{bi}^n - \frac{\Delta t}{1 - \lambda_b} \left[\frac{1}{S_i} \sum_{k=1}^{N_e} (L_k (q_{Bk}^* \cdot \mathbf{n}_k)) \right] \quad (11)$$

ここに， z_{bi} はセル i における z_b の平均値， n は時間に関する添え字， S_i はセル i の面積， k はセル i を構成するセル境界線を区別するために振られるセル境界線番号， N_e はセル i の全セル境界線数， Δt は時間の刻み幅， L_k は k 番目のセル境界線の長さ， $q_{Bk}^* \cdot \mathbf{n}_k$ は k 番目のセル境界線を流出入する流砂量に対応する数値流束である．

$$q_{Bk}^* \cdot \mathbf{n}_k = \frac{1}{2} (q_{BR} + q_{BL}) \cdot \mathbf{n}_k - \left| \frac{q_{BR} \cdot \mathbf{n}_k - q_{BL} \cdot \mathbf{n}_k}{z_{bR} - z_{bL}} \right| (z_{bR} - z_{bL}) \quad (12)$$

ここに， $q_{BR/L} \cdot \mathbf{n}_k$ は，それぞれ外向き法線方向を正とする k 番目のセル境界線の右側/左側流束ベクトル， $z_{bR/L}$ は k 番目のセル境界線を挟む右側/左側のセル内平均河床高である．ただし， $q_{BR/L}$ は式 (5) による主流方向流砂量に式 (6) を用いた主流直角方向流砂量を考慮し，式 (8)，(9)，(10) により固定・移動床を評価した流砂量フラックスである．

4. 実験

実験水路は，水路幅 B ，長さ L の貯水槽と河道から構成されており，貯水槽には初期水深 h_0 で水が貯留されている． x 方向の原点 O にはゲートが設置されており，これを瞬間的に取り除きダム破壊流れを発生させた．置き砂には比重 $s=2.65$ ，中央粒径 $d=0.75\text{mm}$ の一様砂を用いた．

実験は，(1) 水路横断方向に一樣になるように置き砂を設置した場合 (1 次元実験)，(2) 水路の右岸側のみに設置した場合 (2 次元実験) の 2 通りについて行った．

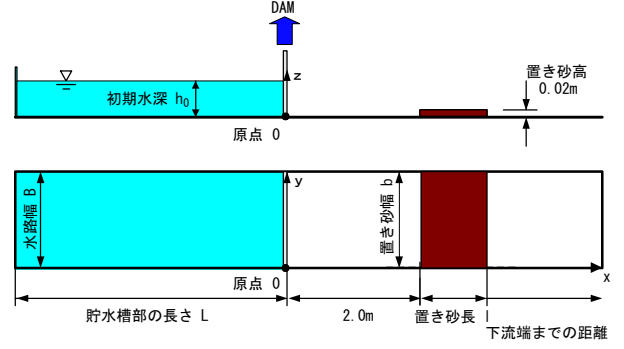


図-1 実験装置および流れの定義図 (1 次元実験)

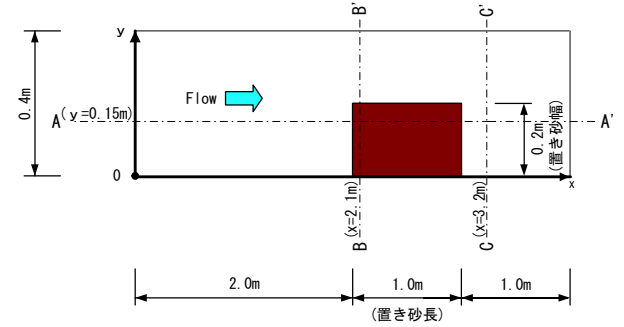


図-2 実験装置および流れの定義図 (2 次元実験)

1 次元と 2 次元実験の実験装置および置き砂の設置状況を図-1 と図-2 にそれぞれ示す．

1 次元実験では，水路幅 $B=0.6\text{m}$ ，貯水槽部の長さ $L=5.0\text{m}$ ，河道の長さ $=15.0\text{m}$ の実験水路を用い，置き砂を $x=2.0\text{m}$ の位置から長さ $l=2.0\text{m}$ ，高さ $z_b=0.02\text{m}$ で設置した．初期水深を一定にして 3 回のダム破壊流れを発生させ，各ダム破壊流れについて水路中心線上の置き砂形状を測定した．初期水深 h_0 は， $h_0=0.075\text{m}$ ， 0.100m および 0.125m の 3 通りに変化させた．このような実験を同一条件下で 3 回繰り返し，再現性の確認を行った．

2 次元実験では，水路幅 $B=0.4\text{m}$ ，貯水槽部の長さ $L=4.0\text{m}$ ，河道の長さ $=4.0\text{m}$ の実験水路を用い，図-2 に示すように置き砂を長さ $1.0\text{m} \times$ 幅 $0.2\text{m} \times$ 高さ 0.02m で設置した．なお，初期水深 h_0 は 0.100m とした．測定は，図-2 に示すように縦断形状，横断形状をそれぞれ 1 断面，置き砂の還元状況を示すフロントの横断形状を，ゲート開放から 2 秒後，5 秒後，8 秒後における水位と河床高について行った．

5. モデルの検証

(1) 計算条件

ドライベッド状態では計算不能になるので，極めて小さな水深 $h_v=0.001\text{m}$ を与えた．マンギングの粗度係数は，固定床 (水路底) では $n=0.01$ ，移動床 (置き砂上) で

は $n=0.014$ とした．砂の空隙率は $\lambda_b=0.4$ とした．流れおよび河床変動の開境界条件としては，式 (13) を適用した．また，閉境界条件は流速には，式 (14) を与えた．

$$h_R = h_L ; (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_R = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_L ; z_{bR} = z_{bL} \quad (13)$$

$$(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_R = -(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_L \quad (14)$$

河床の初期条件については，最初のダム破壊流れについては置き砂の初期形状を与え，2 回目，3 回目のダム破壊流れについては，それぞれ 1 回目，2 回目の最終的な河床形状を与えた．初期水深 h_0 を変化させた数値実験に基づけば，いずれの場合についてもゲート開放から 60 秒後には最終的な河床形状が得られた．

(2) 水位と置き砂形状の時間変化

図-3 は， $h_0=0.075\text{m}$ の場合の水路中心線上の水位と置き砂形状の縦断変化について，ゲート開放 3 秒後，5 秒後，8 秒後の計算結果 (Num.) と実験結果 (Exp.) とを比較したものである．図中の step1～3 はダム破壊流れの回数を示している．実験および数値計算のいずれも，ゲート開放後，2 秒程度で置き砂位置に流れのフロントが到着することが確認された．実験結果によると，置き砂形状はダム破壊 step1 において最も変形が大きく，step2 と step3 における変形は小さいことがわかる．計算結果と実験結果とを比較すると，step1 の水面形状と河床形状は，他の step に比べ再現性が劣ることが確認できる．これは，step1 では他の step とは異なり置き砂の初期形状と河道底面との境界で河床形状が不連続となるため，このような不連続部を取り扱うことのできない平面 2 次元解析では精度が劣ったと考えられる．しかしながら，河床に不連続部が存在しない step2，step3 においては，河床高・水位ともに実験結果を非常に良好に再現していることがわかる．

(3) 初期水深の変化による置き砂形状の変化

図-4，図-5，図-6 は，各初期水深の水路中心線上における置き砂の最終形状について，計算結果 (Num.) と実験結果 (Exp.) との比較を各 step ごとに行ったものである．前述のように，step2 と step3 における置き砂の形状の変化は step1，step3 間に比べ，顕著でない．したがって，ここでは step1 と step3 における比較のみを行う．これらの図から，計算結果は，全てのケースにおいて置き砂の最終形状を良好に再現していることが確認できる．特に $h_0=0.075\text{m}$ においては step1，step3 の両ケースの再現精度は高いことが確認できる．一方で，初期水深が大きくなる（すなわち非定常性が強くなる）と，再現性が若干崩れてくることも確認できる．図-6 は，初期水深が最も大きい $h_0=0.125\text{m}$ のものであるが，実験結果では， $x=2.5\text{m}$ 付近で小規模のマウンドが形成されているが，数値計算ではこれを再現して

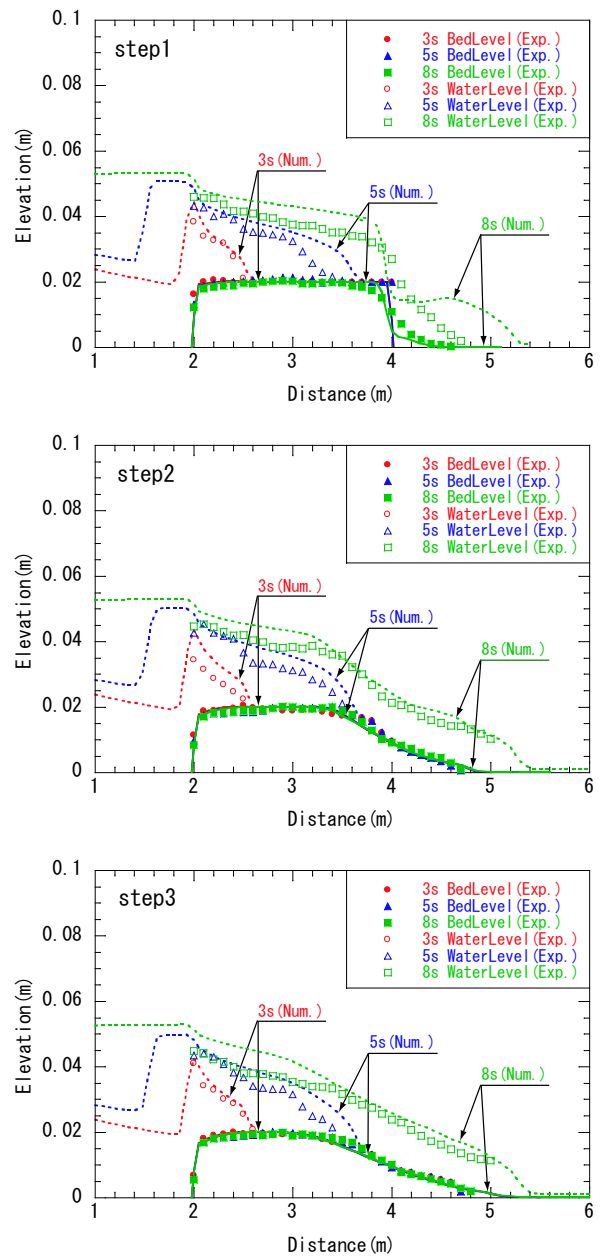


図-3 水位と置き砂形状の時間変化 ($h_0=0.075\text{m}$ ，水路中心線上)

いない．これは，ダム破壊流れのフロント部が置き砂に到着すると，射流から常流へ遷移する際に跳水が発生し 3 次元性の強い流れとなり，激しい砂の巻上げが生じ，これを平面 2 次元モデルでは再現することができないためだと考えられる．これは，本数値モデルはフロント部のような 3 次元性の強い流れ場での河床変動の再現性には限界があることを示している．

(4) 2 次元実験

図-7 は，ダム破壊後の流れフロントが置き砂に到達した後の水面形の計算結果を鳥瞰図で示したものである．これより，ダム破壊流れが置き砂に到達した後，置き砂を越流するとともに回り込みながら下流へ流下す

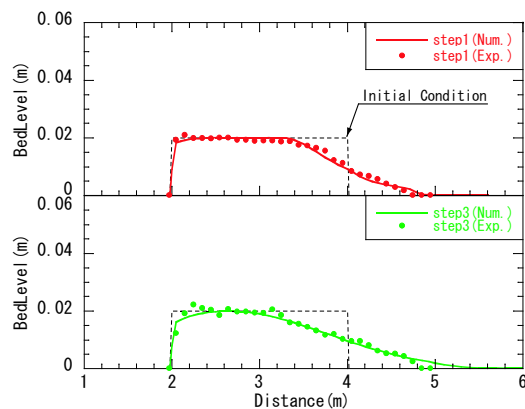


図-4 初期水深 0.075m における置き砂形状

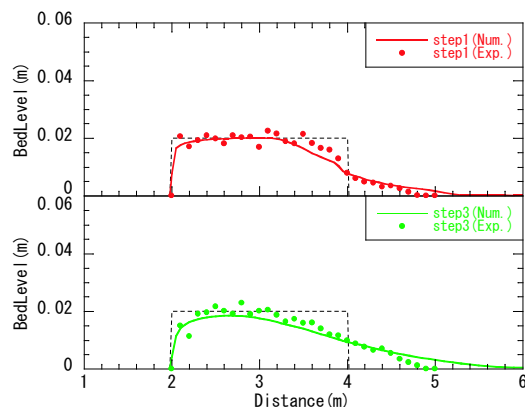


図-5 初期水深 0.100m における置き砂形状

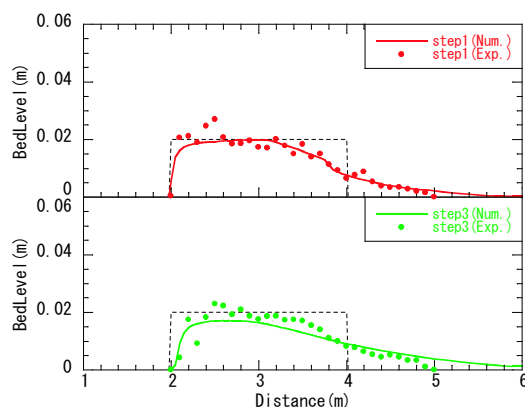


図-6 初期水深 0.125m における置き砂形状

る流れの様子が確認できる。また、置き砂の上流側で発生した水位の上昇が時間とともに下流に伝播する様子も確認できる。

図-8 は図-2 に示す断面 A-A' における水位と置き砂形状の縦断変化を、図-9 は図-2 に示す断面 B-B' の水位と置き砂形状の横断変化を各時間ごとに示したものである。これより、水位の縦断変化については計算結果 (Num.) は実験結果 (Exp.) をある程度再現していることが確認できる。しかし、河床高の縦断変化につ

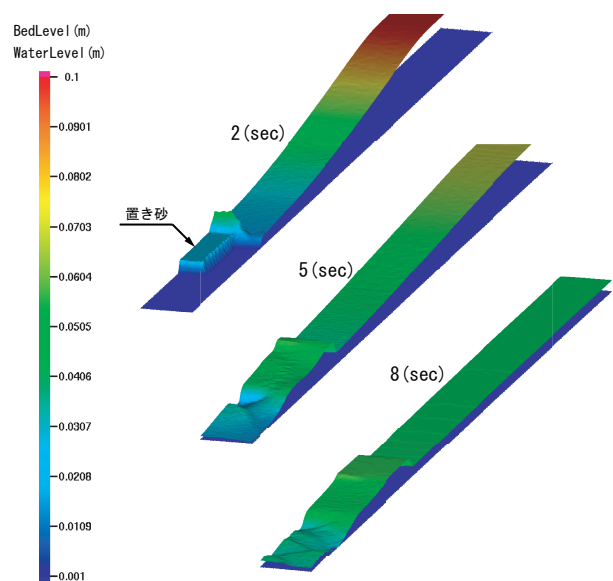


図-7 流れフロントの置き砂衝突後の水面形 (計算結果)

いては計算結果は実験値を若干大きめに評価している。一方、図-9 から B-B' 断面については、計算結果は実験値を若干小さく評価していることが分かる。

図-10 は断面 C-C' の水位と河道の河床高を示したものであり、図-9 と比較することにより、河道への縦断方向についての置き砂の還元状況が確認できる。また、図-11 はゲート開放から 5 秒後の水面形と置き砂形状の鳥瞰図について計算結果と実験値との比較を示したものである。これらから、計算結果は横断方向への置き砂の還元状況を若干小さく評価しており、一方で縦断方向については還元状況を若干大きく評価していることが確認できる。これは、本研究で用いた河床変動の数値モデルは河岸侵食等の現象を考慮していないために、横断方向の評価が詳細に実現できていないと考えられる。これについては、モデルの改善も含め今後検討していく予定である。

6. おわりに

本研究では、平面 2 次元流れにおける数値モデルに河床変動の計算手法を組み込み、置き砂の還元プロセスを再現することが可能な数値シミュレーションモデルを構築した。まず、非定常性の強いダム破壊流れにおいて、1 次元的な設置形状について実験を行い、その流れや置き砂形状の変化について数値シミュレーション結果と比較した。次に、2 次元的な設置形状についても同様な比較を行った。

その結果、1 次元的な設置形状による置き砂の還元プロセスについて、ダム破壊流れフロントが置き砂に

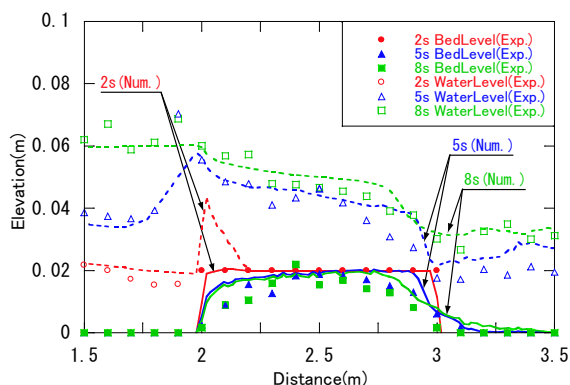


図-8 A-A' 断面 ($y=0.15\text{m}$)

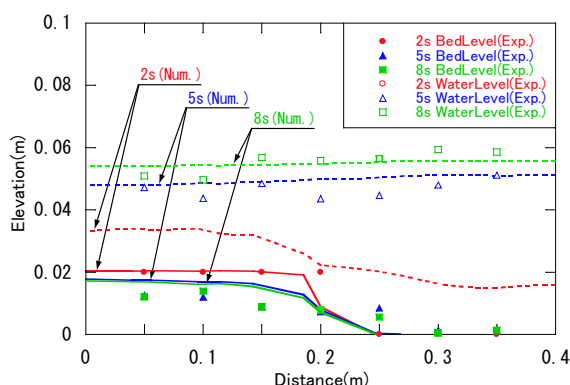


図-9 B-B' 断面 ($x=2.1\text{m}$)

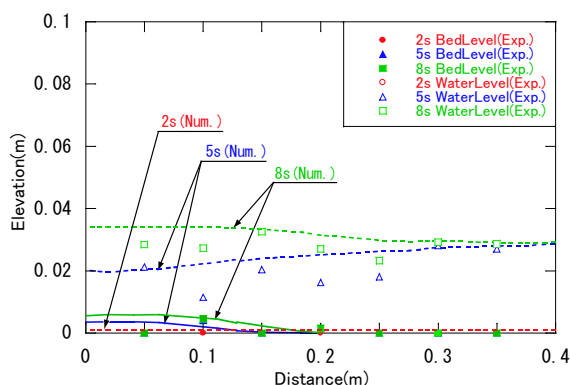


図-10 C-C' 断面 ($x=3.2\text{m}$)

衝突する直後において、流れの 3 次元性からの砂の巻上げが生じる場合に、再現性に問題が残るものの、水位および河床形状を全体的には精度良く再現できることがわかった。

2 次元的な設置形状における置き砂の還元プロセスは、横断方向の河床変動過程について再現性が若干良くない。実験結果と比較すると、数値計算による置き砂還元量は、縦断方向について過大に評価し、横断方向については過小に評価した。ダム破壊流れ直後の置き砂還元の初期プロセスについてのみの検討であるが、非定常流れにおける 2 次元的な設置形状について、河

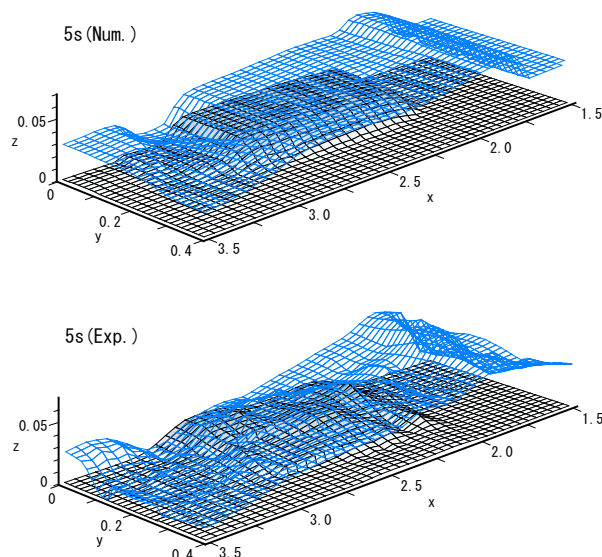


図-11 5 秒後の水面形と置き砂形状

床変動数値計算による再現の困難さが示された。今後、更なる計算精度の向上を目的として、数値モデルに河岸侵食や 2 次流の影響を付加する予定である。

謝辞： 本研究の実験、解析の遂行にあたり、現九州工業大学工学部学生の伊藤崇史君、才木康裕君、当時学生の片山道雄君に多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 相模川水系土砂管理懇談会：相模川の健全な土砂環境をめざして、提言書（本編）、平成 15 年 6 月。
- 2) 神奈川県、国土交通省京浜河川事務所：相模川川づくりのための土砂環境整備検討会、第 2 回検討会資料、平成 17 年 2 月。
- 3) 西本直史、森明巨、板倉忠興、田原達人：FDS 法による 1 次元河床変動解析、土木学会論文集、No. 677/II-55, pp. 103-113, 2001。
- 4) 重枝未玲、秋山壽一郎、山崎勉：FDS を用いた 1 次元河床変動数値モデル、水工学論文集、第 47 巻、pp. 667-672, 2003。
- 5) Kassem, A. and Chaudhry, M.: Comparison of coupled and semicoupled numerical models for alluvial channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 8, pp. 794-802, 1998。
- 6) 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、土木学会論文集、pp. 59-69, 1972。
- 7) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究、北海道大学学位論文、1984。
- 8) 岩垣雄一：限界掃流力に関する流体力学的研究、土木学会論文集、pp. 1-21, 1958。
- 9) Struiksma, N.: Mathematical modeling of bedload transport over non-erodible layers, *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp. 89-98, 1999。
- 10) 秋山壽一郎、重枝未玲、浦 勝：非構造格子を用いた有限体積法に基づく 1 次および 2 次精度平面 2 次元洪水流数値モデル、土木学会論文集、No. 705/II-59, pp. 31-43, 2002。

(2005. 9. 30 受付)