

穴あきダム周辺の水みち形成とその堆砂輸送 に及ぼす影響に関する数値解析的研究

NUMERICAL STUDY ON SEDIMENT TRANSPORTATION AND FLOW PASS FORMATION AROUND A
DRY DAM

北海道大学大学院工学院 ○学生員 村田雄輝 (Yuki Murata)
北海道大学大学院工学研究院准教授 正会員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
北海道大学大学院工学研究院教授 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

我が国は世界でも有数の多雨地域に位置しているだけでなく、急峻な地形のため大雨が降ると洪水の被害を受けやすいことから、治水対策は重要な課題である。しかし、代表的な治水対策である多目的ダムは、上流からの土砂の遮断によるダム下流の河床低下や、貯水池内での濁水の発生、生態系の破壊など多くの問題が指摘されている。

このような背景から、ダムの機能を治水のみに絞り、通常は水を貯留せず、洪水時のみにダム湖が出現する穴あきダムが最近注目されている。穴あきダムは河床近くに常用洪水吐を設置するゲートレス構造により、流れの連続性が確保され、平水時には水と土砂を流下させる。洪水時にはダムのせき上げ効果によって洪水を抑えることから、穴あきダムは環境への配慮、堆砂対策、治水機能を有した理想的な治水構造物であると考えられている。しかしながら、一般的に穴あきダム上流部では、図-1(島根県益田川ダム上流部)に示すような礫溜まりや水みちが形成されると報告されている。水みちが形成されることによって局所的な掃流力が増加し、穴あきダム周辺の土砂輸送能力が大きくなる反面、砂州の固定による景観の変化、植生の繁茂による汚濁物の堆積や疎通能力の減退などが懸念され、これらはダムを健全に管理していくうえで重要な問題であると考えられる。しかしながら、穴あきダム周辺の水みち形成のメカニズムについてはまだ十分な研究が行われていない。

既往の研究において、木村らによって直線水路を用いた穴あきダム水理実験¹⁾が行われ、穴あきダム周辺の水みち形成に関する研究が行われている。本研究では平面



図-1 穴あきダム上流部の様子(島根県益田川ダム)

二次元計算モデルを用いて、木村らの実験結果の再現を試み、実験結果と計算結果の比較を通じて横断方向の土砂分布を考慮した土砂移動特性の検討を実施したものである。

2. 木村らによる穴あきダム水理模型実験の概要¹⁾

実験水路は水路長 12m、幅 0.3m の直線水路で行われ、河床材料は平均粒径 0.9334mm の混合珪砂が用いられた。河床勾配は 1/50 である。穴あきダムは上流端から 11m 地点に設置し、常用洪水吐は高さ 2cm、幅 2.5cm である。流量は 270cm³/s の一定流量としている。

図-2 に初期河床および通水後の河床高コンターを示す。通水開始とともに上流から中流域へ交互砂洲が形成され、砂州の移動とともに流下方向へ堆砂が進行していく結果が得られた。通水終了後の河床高コンターにはダム直上流付近において明確な水みちの形成が確認できる。

3. 穴あきダムを考慮した平面二次元数値解析モデルの構築

3.1 モデル構築の基本方針

穴あき周辺の数値解析モデルとしては、村田ら²⁾によって一次元モデルと三次元モデルが提案されている。しかし、ダム周辺の比較的広範囲の土砂移動形態を砂州移動なども含めて検討するには平面二次元モデルが有効である。そこで、村田ら²⁾の一次元モデルを参考にして、穴あきダムを考慮した平面二次元モデルの構築を次のような方針で行なった。

・ダムは解析領域の下流端に設置し、ダム及び上流部の流れと土砂移動を考慮する。

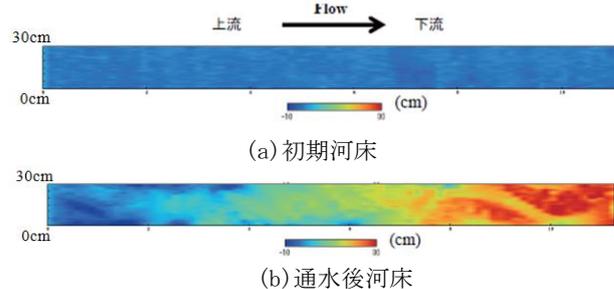


図-2 直線水路における河床変動の実験結果¹⁾

- ・水位が常用洪水吐の天端高さ未満の場合は、開水路流として流出フラックスを計算し、放水口以上の場合はオリフィスとして流出フラックスを次のように与える。

$$M = C_Q(H_t - z_b)\sqrt{2g(H_u - H_t)} \quad (1)$$

ここに、 M ：常用洪水吐位置の単位幅流量、 g ：重力加速度、 H_t ：放水口天端高さ、 z_b ：常用洪水吐位置の河床高、 H_u ：ダム堤体直上流水位、 C_Q ：流量係数（村田ら²⁾にならい0.7とした。）である。

- ・流れは通常の水深積分された連続式と運動方程式で計算し、乱流モデルはゼロ方程式モデルとする。
- ・土砂移動として当面掃流砂のみを考慮する。

3. 2 土砂輸送モデル

紙面の制約上土砂輸送モデルについてのみ概要を述べる。流れのモデルについては文献³⁾を参照されたい。

河床変動は掃流砂のみを考慮し、平衡流砂量式で河床勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した Kovacs & Parker モデル⁴⁾を簡略化した次の山口・泉の式⁴⁾で評価する。

$$q_{Bs} = \frac{K}{\left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c\right)} \left[\tau^* - \tau_c^* \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c\right) \right] \times \left[\tau^{*1/2} - \tau_c^{*1/2} \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c\right)^{1/2} \right] \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) g d^3} \quad (2)$$

ここに、 z_b ：河床高、 q_{Bs} ：流線方向の掃流砂量、 K ：補正関数、 s ：流線方向の座標、 μ_c ：動摩擦係数、 τ^* ：無次元掃流力、 τ_c^* ：無次元限界掃流力、 σ ：河床材料密度（2650kg/m³）、 ρ ：水の密度（1000kg/m³）をそれぞれ表す。一方、横断方向の流砂量 q_{Bn} については次の長谷川式⁸⁾により評価する。

$$q_{Bn} = q_B^{AM} \left[-\frac{h}{r} N_* - \frac{\partial z_b}{\partial n} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_c \tau_*}} \right] \quad (3)$$

$$q_B^{AM} = K \left[\tau^* - \tau_c^* \right] \left[\tau^{*1/2} - \tau_c^{*1/2} \right] \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) g d^3} \quad (4)$$

ここに、 n ：横断方向の座標、 μ_s ：静止摩擦係数、 r ：流線の曲率半径、 N_* ：定数(=7)をそれぞれ表す。河床の連続式は、

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q_b^x}{\partial x} + \frac{\partial q_b^y}{\partial y} \right] = 0 \quad (5)$$

である。ここに、 λ ：河床砂の空隙率、 q_b^x ： x 方向の掃流砂量フラックス成分、 q_b^y ： y 方向の掃流砂量フラックス成分をそれぞれ表す

なお、河床勾配が安息角を超えた場合には、周囲の格子で土砂を配分して勾配が安息角以下になるよう収束計算を実施している。安息角は32°とした。

4. 数値計算結果とその考察

木村ら¹⁾の幅広水路実験の結果を解析することによって、本数値解析モデルによる穴あきダム周辺の水みち形成の再現性とメカニズムについての考察を行う。

4. 1 計算条件

計算水路長は4mとし、下流端に穴あきダムを設置した。常用洪水吐は幅狭水路の場合と同様に高さ2cm、幅2.5cmである。水路幅は0.3m、河床勾配は1/50とした。縦断方向の計算格子を400、横断方向を24で区切り、格子間隔は縦断方向が5cm、横断方向が1.25cmとした。計算粒径は実験用いられた粒径の平均粒径を採用し、0.9334mmとした。流量は実験と同様に270cm³/sの定流状態で通水した。

4. 2 結果の考察

時刻30min、60min、90min、120minにおける計算結果の河床変動量の分布（左）と流線の様子を図-3に示す。水道の形成が再現されている。計算結果から示唆された水みちの形成過程は次の通りである。まず、図-3(a)に示すような複列砂洲が形成され、これが下流方向へ進行していく。堆砂がダム付近まで到達すると、図-3(b)のように、ダム付近の堆砂が左岸に集中するとともに、単列砂洲へ移行する。t=90min 移行水みちの位置はほぼ固定されるとともに、時間とともに明確化していく。図-3(d)に示す t=120min の水みちの定性的特性は実験結果（図-2(b)）とほぼ適合することから、本平面二次元解析モデルは穴あきダム上流側の水みち形成をほぼ再現していると考えられる。

図-4は、t=3200secにおけるダム上流側の瞬間的な流況（ベクトルと流速コンター）を示したものである。洪水吐に集中する流れの周囲に死水域が生じており、せん断不安定による渦運動が認められる。この不安定性が流線を蛇行させ、水みちの偏奇を促すと推測される。

4. 3 水みちが土砂輸送に及ぼす影響

水みちが形成されると局所的な掃流力の増加につながり、穴あきダムの土砂移動特性に影響を与えると考えられる。平面二次元解析結果をもとにこの点を検討する。

(1) 移動限界粒径による評価

堆砂の移動を表す指標として村田ら²⁾は移動限界粒径を提案した。これは、与えられた掃流力によって移動できる最大の粒径を表すものであり、摩擦速度から岩垣式を用いて単一粒径としての移動限界を求め、局所的な無次元掃流力と限界掃流力が等しい粒径として算出される。

穴あきダムの場合、ダム堤体から上流側に向かうにつれ、移動限界粒径が大きくなることが示されている²⁾。

(2) 平面二次元解析結果における移動限界粒径の分布

平面二次元解析結果を下に、通水開始後2min、30min、60minの移動限界粒径を算出した。この際、水みちの影響を検討するため、横断面内の最大掃流力による移動限界粒径と、平均掃流力による移動限界粒径の両方を求め、主流方向の分布としてプロットしたものが図-5である。

図-5(a)の通水開始後2分の計算結果では、平均値と最大値に大きな変化がみられない。これは、通水初期で水みちがまだ形成されていないためである。下流で移動限界粒径が0の領域があるが、これは堰上げによる掃流力低下による。通水開始後30分では最大値に4か所の

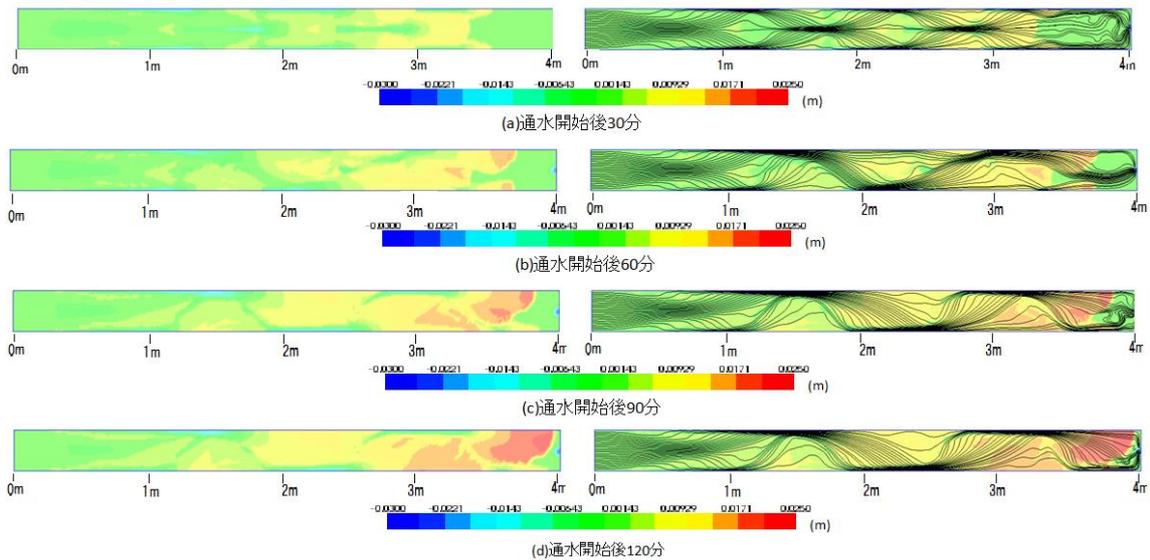


図 - 3 河床変動量 (左) および流線 (右) の変化

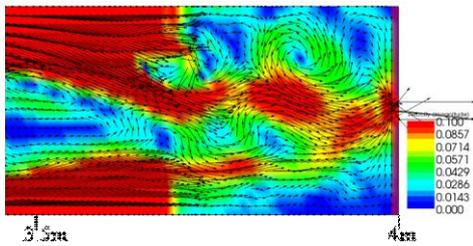
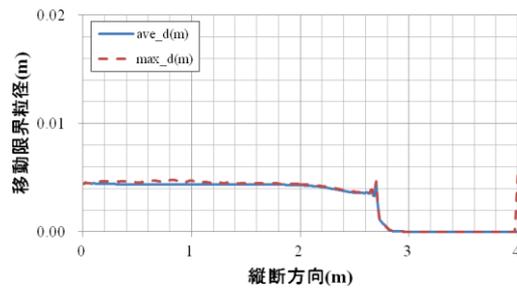


図 - 4 常用洪水吐付近の流況 (流れは左→右)

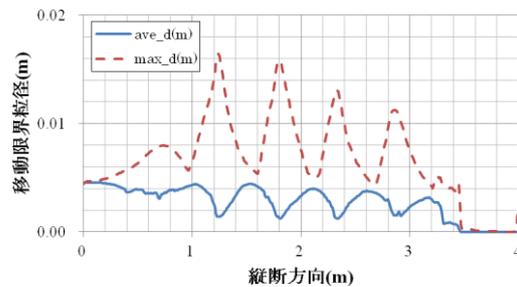
ピークが見られる。図-3(a)よりこのときの河床の様子と流線を見ると、複列砂洲が形成されており、流線が右岸左岸に寄った箇所と中心に寄った箇所の両方で最大限界移動粒径が極大となっている。興味深いのは、移動限界粒径の最大値と平均値が逆位相になっている点である。次に、 $t=60\text{min}$ の図-5 (c)では最大移動限界粒径のピーク数が3に減少している。図-3 (b)を見ると、このときの河床は複列砂洲から単列砂洲に移行していることがわかる。最大移動粒径のピークは流れが右岸あるいは左岸に寄った箇所に生じ、流線が水路中心付近を通る箇所は最大移動粒径が極小となっている。最大限界移動粒径と平均限界移動粒径が逆位相になる点は $t=30\text{min}$ の場合と一致する。堤体近傍では堰上げにより限界移動粒径がほぼ 0 の箇所が存在するが、 $t=2\text{min} \sim 60\text{min}$ の結果を比較すると、この範囲は時間とともに減少する。これは常用洪水吐からの流出によってこの付近の河床が洗掘され、堰上げ領域が徐々に小さくなったことが原因である。

以上より、水みちの形成は掃流力の集中をもたらし、その結果限界移動粒径が局所的に増大することが示された。また、流線の集中する箇所では横断面内の最大移動粒径は増大するが、平均移動粒径は低下することも示された。これより、水みちの形成は排砂を促す効果を有することが示唆されるとともに、その効果が局所的である可能性も指摘された。なお、水みちが堤体上流側で左右どちらかの側岸にかたよって生じる現象は従来から指摘されており、これは砂州の固定化や樹林化、環境などに

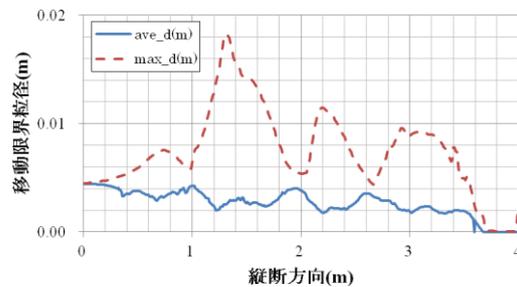
も影響を及ぼすものと懸念されるため、穴あきダムの上流側で十分留意すべき点と考えられる。



(a) 通水開始後 2 分



(b) 通水開始後 30 分



(c) 通水開始後 60 分

図 - 5 移動限界粒径の計算結果 (赤:最大、青:平均)

4. 4 常用洪水吐の形状が水みちに及ぼす影響

本節では常用洪水吐の断面形状が変化した場合に水みち形成に及ぼす影響について考察する。

(1) 比較ケースについて

対象とする水路は木村ら¹⁾と同一とし、常用洪水吐の形状を変化させた表-1 に示す 3 つのケースで比較を行う。すなわち、Case1 は実験と同条件、Case2 は上方に壁の無いスリット型としたもの、Case3 は洪水吐の幅を三倍に拡大したものである。

表-1 比較計算ケース

	常用洪水吐きの断面形状
Case1(基本タイプ)	高さ 2cm×幅 2.5cm
Case2(スリットタイプ)	幅 2.5cm のスリットタイプ
Case3(拡幅タイプ)	高さ 2cm×幅 7.5cm

(2) 結果の考察

図-6 に通水開始後 30 分、60 分、90 分における各ケースの水みちの形成過程の変化を示す。図-6(a) より、通水開始後 30 分の水みちの形成過程について見ると、Case1(基本タイプ)に比べて、Case2(スリットタイプ)、および Case3(拡幅タイプ)の方が堆砂フロントの進行速度が大きいことがわかる。次に図-6(b)より、通水開始後 60 分の水みち形成過程を見ると、Case1 と Case2 ではダム付近に岸側に沿った水みちの形成がみられる。水みち振れる方向が両者で異なるが、穴の位置はいずれも水路の中心に位置するため、水みちがどちらの壁に偏るかについては規則性無いと考えられる。また、Case1、Case2 ではほぼ全領域で単列砂州となっているのに対し、Case3 に注目すると複列砂州領域がダム付近まで及んでいる。また、ダム堤体付近の水みちについても、水路中央部に位置している。この原因について考えると、図-3 より穴あきダム周辺の水みちの形成については常用洪水吐からの流出によって流線が常用洪水吐に集中し、この流れが周囲の死水域との間に流れの不安定を励起して流線の蛇行を促すことが原因だと考察された。常用洪水吐を拡幅することは、この不安定現象を緩和するため、流線の蛇行が抑制され、水みちの偏奇の進行が他より抑えられたと考えられる。

図-6(c)の通水開始後 90 分の結果を見ると、全ケースで側岸に偏った水みちが堤体付近に形成されている。Case1 に比べて、Case2、3 の方が堆砂のフロントがダム直近まで進行していることがわかる。Case2、3 の流出流量が Case1 より大きく、堰上げ範囲が Case2、3 は Case1 に比べて小さいことに起因する。

以上より、穴あきダムにおいてダム上流側の水みちが側岸による現象は穴あきダムとスリットダムの両方に普遍的に見られる現象であることが示されるとともに、常用洪水吐の幅を大きくすることで、水みちの偏奇をある程度抑制できる可能性も示唆された。

5. 結論

本研究で得られた結果以下に述べる。

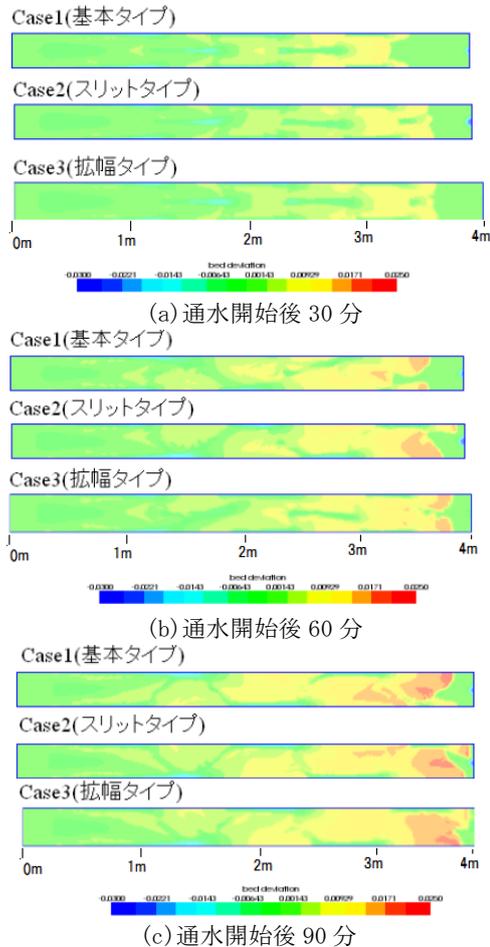


図 - 6 各ケースにおける水みちの形成過程

- (1) 本研究で用いた平面二次元モデルにより、木村ら²⁾の実験の再現計算を試みた結果、穴あきダム周辺の堆砂挙動を定性的に再現することができた。
- (2) 水みちによって、移動限界粒径の横断面内最大値を増加し、排砂が促進されることが指摘された。
- (3) 常用洪水吐の幅を横断方向に広げることが水みちの偏奇を緩和するのにある程度有効であることが示唆された。

参考文献

- 1) 木村祐輔、渡邊康玄、福岡将太：流水型ダムの土砂移動に関する水理模型実験、土木学会北海道支部論文報告集第68号、2012。
- 2) 村田雄輝、木村一郎、清水康之、山口里実：穴あきダム周辺の水理特性と堆砂機構に関する数値解析的研究水工学論文集、pp-、2012。
- 3) Kimura, I., Uijtewaal, W.S.J., Hosoda, T. and Ali M.S. : URANS Computations of Shallow Grid Turbulence, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.135, No.2, pp.118-131, 2009.
- 4) 山口里実、泉典洋：デューン-平坦床遷移過程にみられる亜臨界分岐現象、土木学会論文集、740号、pp. 75-94、2003。
- 5) 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、北海道大学博士論文、pp. 1-184、1984。