

排砂ゲートに制約された河岸侵食を伴う 堆積土砂フラッシュに関する研究

STUDY ON FLUSHING SEDIMENT WITH BANK EROSION INFLUENCED BY WIDTH OF FLUSHING GATE

後藤孝臣¹・北村忠紀²・辻本哲郎³

Takaomi GOTO, Tadanori KITAMURA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹ 正会員 工修 名古屋大学工学研究科博士課程後期課程学生 地圏環境工学専攻
中部電力(株)電力技術研究所(〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20 番地の 1)

² 正会員 博(工学) 名古屋大学助手 地圏環境工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³ 正会員 工博 名古屋大学教授 地圏環境工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

There is a problem of aggradation after dam construction. In order to solve the problem, a dam should have a flushing gate to pass the sediment. However, when the flushing gate is not enough large, the intake just upstream of the dam doesn't work due to the sedimentation.

In this paper, we study the bed-deformation caused by a dam by using a flume experiment and numerical simulation. In addition, we study the process of flushing sediment from the dam and the bank erosion under the condition that the water level at the dam is decreased with the width of a flushing gate. As a result, it is clarified that the bed topology is governed the water-level at the dam. Moreover, it is possible to simulate the bed-deformation with flushing sediment and bank erosion by employing a model with respective values for angle of repose in water and in air.

Key Words : Bed-deformation, bank erosion, numerical simulation, flume experiment, flushing sediment

1. はじめに

ダムや堰堤の設置によって生ずる堰上流部の河床上昇や堰下流部の河床低下は、その規模や場所を問わず共通の問題点として古くより存在する。その解決方法として、図-1のようにダムや堰堤の一部に切り欠きのような通水部を設け、洪水時にはその部分から堆積土砂を流下させる方法がよく用いられる。著者ら¹⁾は、このような開口部に設置されたラバーダム等などの可動堰運用に伴う排砂効果を、実験や解析を通じて検討してきた。これは河道の堰堤部分で水位を低下させ、掃流力の増加とともに堆積土砂をフラッシングさせる方法であり、堰の基本的な

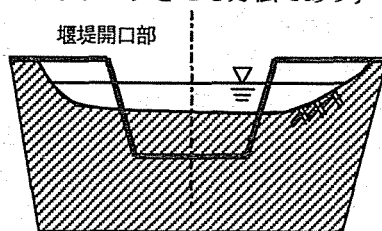


図-1 開口部を持った堰堤からの排砂概念図

機能である貯水、貯砂容量を確保できることから、この種の研究は従来から多く見られる。

芦田・澤井²⁾、水山・下東ら³⁾は、開口部を有するスリットダムを提案し、このスリットダム上流部での分級効果、堰上げ背水による上流部の河床上昇を実験により検討している。また、芦田・江頭ら⁴⁾は、そうした開口部を持つダムが下流部への流出土砂の波形にどのような形で影響するかを実験により検討し、土砂流出の非定常効果について述べた。さらに、岡部ら⁵⁾、田中ら⁶⁾も同様に、開口部をもつダムの上流部の河床形状について実験と解析により検討し、より効果的な機能の付加などを考察している。

本研究は、堰堤と上流部の河床形状の関係について、実験と解析モデルを用いて検討する。その際、土砂フラッシングの過程を観察するが、フラッシングのきっかけとなる堰部における下流端の水位低下とそれに伴う側岸侵食との関係を取り扱うこととする。さらに、開口部幅を変化させて下流部水位を変化させたときのフラッシュ過程の違いについても着目した。

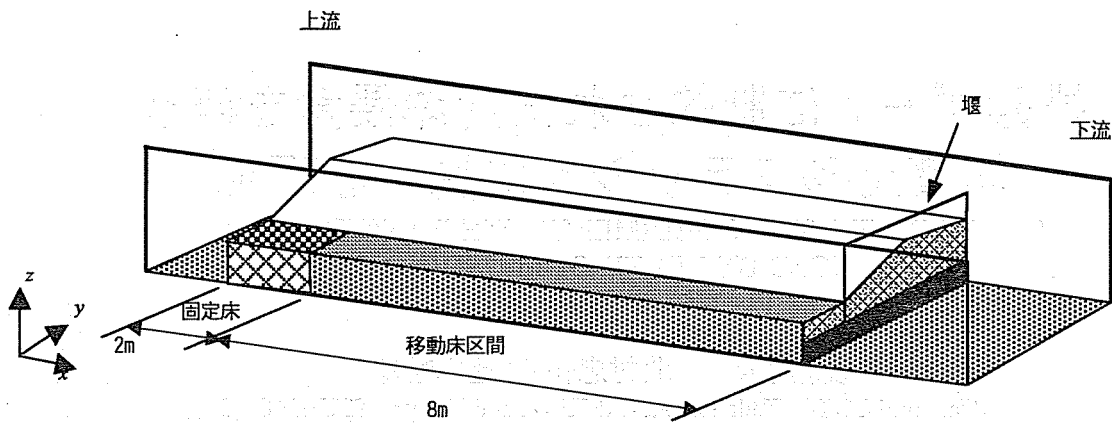


図-1 実験水路概要図

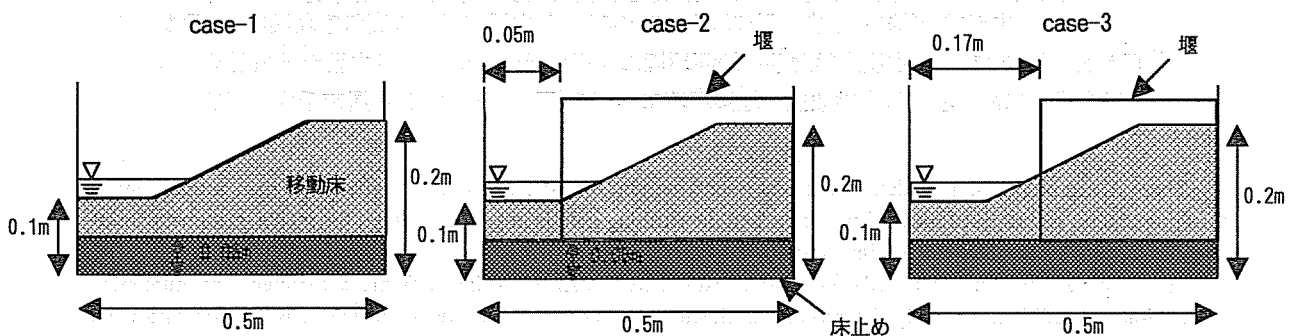


図-2 実験ケースの違いによる堰の設定方法

2. 実験の概要

本研究で使用した水路は長さ 10m、幅 0.5m の可変勾配水路である。その水路に粒径 0.88mm のけい砂を 8m にわたって敷き詰め、上流側に 2m の長さで整流区間として木製の箱を設置し、下流側には全幅で水路床から 0.05m の高さの床止工を設置した。また、水路勾配は 1/500 である。実験水路および付随する工作物の配置図を図-1 に示す。移動床部分を形成するに当たり、低水路敷を水路床から 0.1m、高水敷に続く河岸の傾斜を 22.5 度、高水敷を高さ 0.2m という半断面形状とし、これに各実験条件に見合った一定流量を通水した。本実験は、下流端の河床高を 0.1m から堰高 0.05m に落とすことで、下流端がコントロールセクションとなり、流路拡幅を伴う河床低下が上流へ伝播する様子を観察する。その際、堰開口部の影響がどのように上流部の河床形状に影響するか比較するものである。観測は、一定の時間間隔ごとに通水を停止し地形をポイントゲージで計測した。また、通水停止数分前に $y=0m$ における河床高及び水位を水路側壁より計測した。

次に、実験条件を表-1 及び図-2 に示す。Case-1 は、下流端は床止工のみで堰が無いタイプである。一方、Case-2、Case-3 の実験ケースについては、下流端に堰を設けて堰開口部の効果による河岸の侵食状況を考察することにした。

表-1 実験条件表

Case	下流端堰条件	Run	流量(m ³ /s)
Case-1	堰無し	Run-1	0.0016
	堰無し	Run-2	0.0044
Case-2	幅 5cm 開口	Run-1	0.0016
	幅 5cm 開口	Run-2	0.0016
Case-3	幅 17cm 開口	Run-1	0.0044
	幅 17cm 開口	Run-2	0.0044

3. 実験結果

(1) 全体的な傾向

図-3 に実験状況の写真を示す。下流端に堰のない状態と下流端に堰がある状態を示す。床止工と低水敷河床との高さに 0.05m の高低差があることと下流端で段落ち部を設けているため、通水開始とともに下流端側から河床低下が始まる。その河床低下は時間の経過とともに徐々に上流へと伝播していくが、河床低下と同時に河岸の侵食も進行させながら徐々に上流へと伝播していく状況が観察された。河岸の侵食過程は、実験流量によって変化が大きく、 $Q=0.0044m^3/s$ (Run-2) で流量の大きいケースでは侵食過程が早かった。全体的に横断形状を考察してみると、水中部での河床の横断形状はほぼフラットに近い形であるのに対して、空中部での河岸は写真に見られるようにほぼ 90° に近い

形で切り立っている。この90°に近い河岸が時間の経過とともに間欠的に河道部に崩落し、流され河床が形成されていく。すべての実験ケースについて、流路幅

は若干下流から広がっていく傾向が見られた。これは下流端の急激な河床低下により下流側から河床低下が始まるので、それに呼応し河岸の侵食も下流側から進

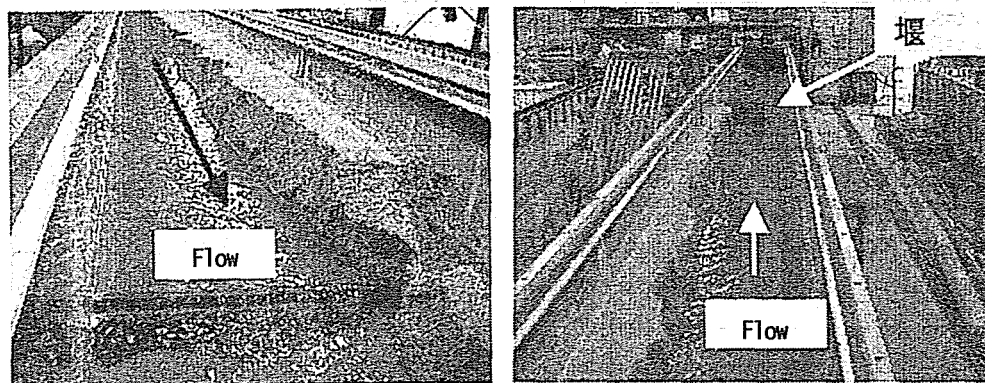


図-3 実験状況写真(左: Case-1, 右: Case-3)

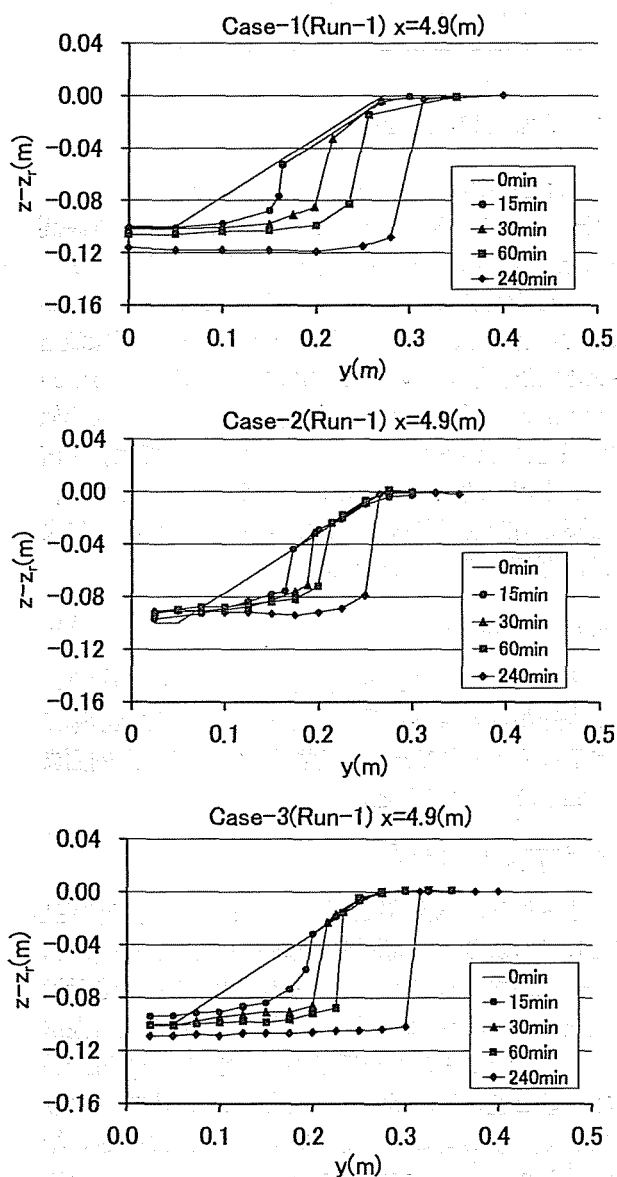


図-4 河床横断形状の時間的変化

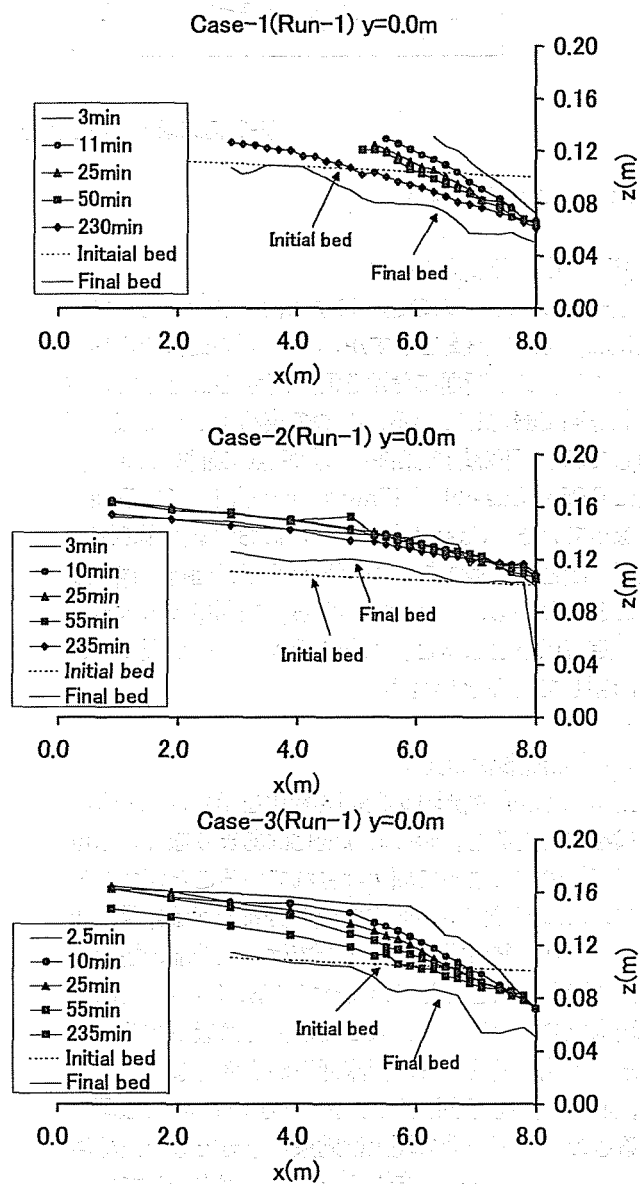


図-5 水位縦断形状の時間的変化

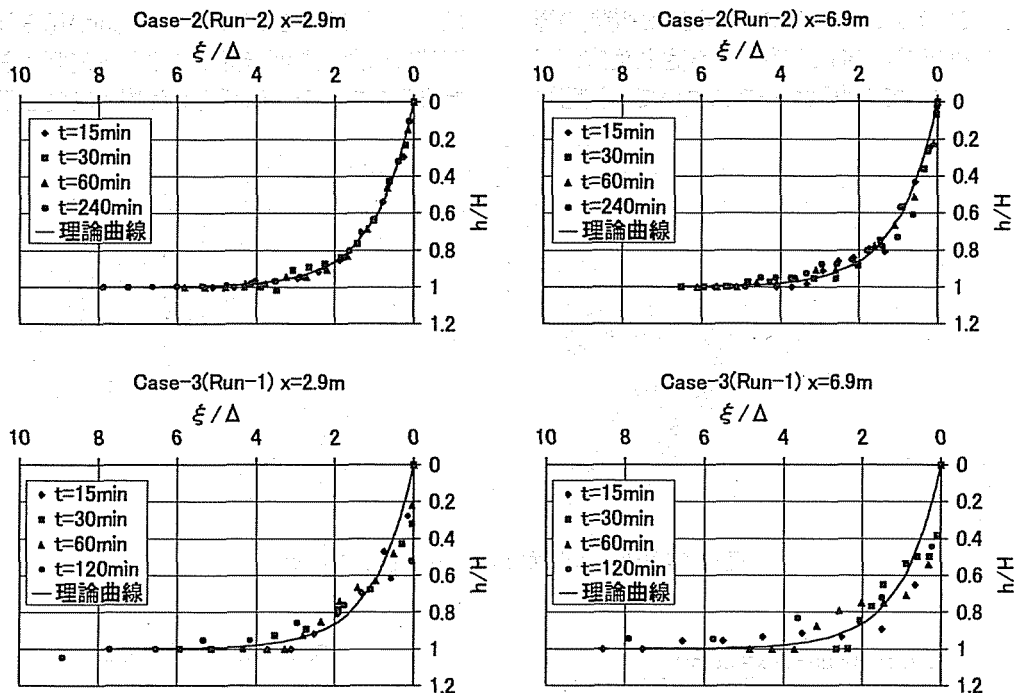


図-6 河床低下、堰上げを伴った横断面形状の変遷過程

んだものと考えられる。

(2) 河床横断面形状の変化

図-4に実験ケースの違いによる河床横断面図を示す。縦軸は、河床の標高を示すが、Case間の比較を容易にするため、ある断面における河岸高さを z_r として相対的な標高で表現している。3つの実験はすべて流量が同じであり、下流端の条件が、堰が無い条件(Case-1)、堰に0.05m(Case-2)、0.17m(Case-3)開口している条件となっている。Case-1とCase-3における河岸の進行過程にほとんど差がないが、Case-2だけ進行過程が遅いことがわかる。今回の実験から、堰開口部の大きさが一定値以下となると、土砂フラッシング状況に大きく影響してくるといえる。

(3) 水位縦断面形状の変化

図-5に水位縦断面形状の時間的変化を示す。Case-2の実験結果を見ると、時間的な変化はあまりなく、水位が下流端の堰によって堰上げされていることがわかる。一方、Case-1とCase-3の時間的分布形状は非常に類似しており、開口幅17cmの堰では、上流部の堰上げによる影響はほとんど無いようである。Case-2では下流端水位の堰上げ効果によって掃流力は低下する。そのため下流端近傍からの河床低下が小さくなると同時に、河岸の侵食過程も遅くなる。一方Case-3では堰があるものの、下流端の堰上げ効果が十分でないため河岸の侵食が、Case-1とほとんど差ない程進行している。侵食過程は、このように下流端の水位によって大きく影響されることがわかる。

(4) 横断面形状の時間的変化に関する考察

図-4の結果から、水面下における横断面形状が時間的にどのような相似性をもって変化していくか、Ikeda⁹⁾の考え方にに基づき考察することにする。Ikedaは著者らと同様、流路の片側のみを対象して、ほぼ流路が保たれた状態での流路拡幅実験を行い、“Self-formed channel”の横断面形状は、流路拡幅過程においても相似性が保たれているとしている。今回の実験では、下流端の堰上げの効果、河床低下の影響が含まれており、その際の河床横断面形状について考察する。Ikedaによれば砂礫河岸の安定横断面形状は、

$$h/H = 1 - \exp\{-\xi/\Delta\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 h :水深、 H :水路中央の水深、 ξ :水際からの横断距離で与えられる。 Δ は堆積厚に関するパラメータであり、流路幅(水際から水路内面までの距離)を B とすると、

$$\Delta = \frac{1}{H} \int_0^B (H - h) d\xi \quad (2)$$

で与えられる。実験結果より、 h 、 H 、 Δ 、 ξ を決定し、式(1)、(2)より、各時間毎の横断面形状を比較する。

図-6に示すように下流端からの堰上げの影響を受ける実験ケース(Case-2)においては実験値との適合性は良い。下流端からの河床低下が顕著なケース(Case-3)では、 $\xi/\Delta \leq 0.5$ の範囲で実験値の値は理論曲線よりも大きく、 $\xi/\Delta \geq 2.0$ の範囲では、実験値が小さい結果が得られている。すなわち河床低下の著しい部分においては、時間的な相似性は成り立つものの、式(1)よりも側岸が切り立った状態に変遷していくといえる。

4. 河岸侵食を考慮した河床変動解析

(1) 概説

本解析では、著者ら⁹⁾によって開発された平面2次元流れの解析モデルと河岸侵食を考慮した河床変動解析モデルを用いた。河岸侵食の考え方は、河岸が安息角以上の勾配が生じたかどうか判定し、安息角以上の勾配が生じた場合にのみ、土砂収支が合うように解析メッシュに対応するように土砂量を移動させる。ただし、このとき、今回の実験結果では、空中部の河岸高さ、水中部の側岸高さと大きく差が生じていたので、実験結果を勘案しながら、適宜これらの安息角を変化させてみるようにした(水中部は 30° 、空中部は 90°)¹⁰⁾。

境界条件は、まず上流より流量を与える。下流側では、堰開口部を有する解析ケースでは、堰地点で限界水深を与える。一方、堰が無く床止め工のみの解析ケ

ースでは、実験により限界水深が床止め工よりも上流側に発生するために、下流端における水位の2次の微係数を0と仮定した。

(2) 実験結果の再現計算

図-7 に $x=4.9\text{m}$ 地点における河床横断面の時間的変化を示す。また図-8 に $y=0.05\text{m}$ 地点における河床縦断面の時間的変化を示す。図-4 と比較してみると、下流側に堰のない Case-1 では、流路の拡幅速度と河床の標高とともに実験をよく再現していると考えられる。次に 0.05m の開口幅の堰をもつ Case-2 の比較を考察してみる。実験では、堰上げの影響を受けるとともに、通水初期には側岸からの給砂により低水敷の河床が一度上昇する傾向が得られている。図-8 の縦断水位と縦断河床の関係に示されるように、解析においてもこの堰上げによる河床低下の遅れは再現できている。しかし、河床部における横断形状が実験ではほぼ水平に近

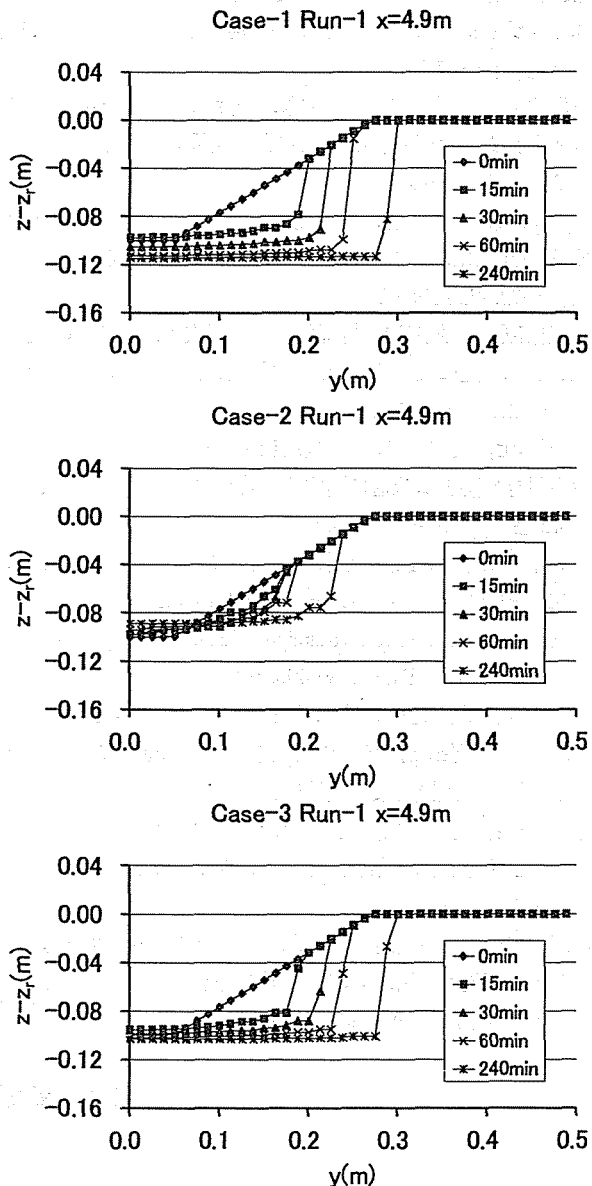


図-7 解析による河床横断形状の時間的変化

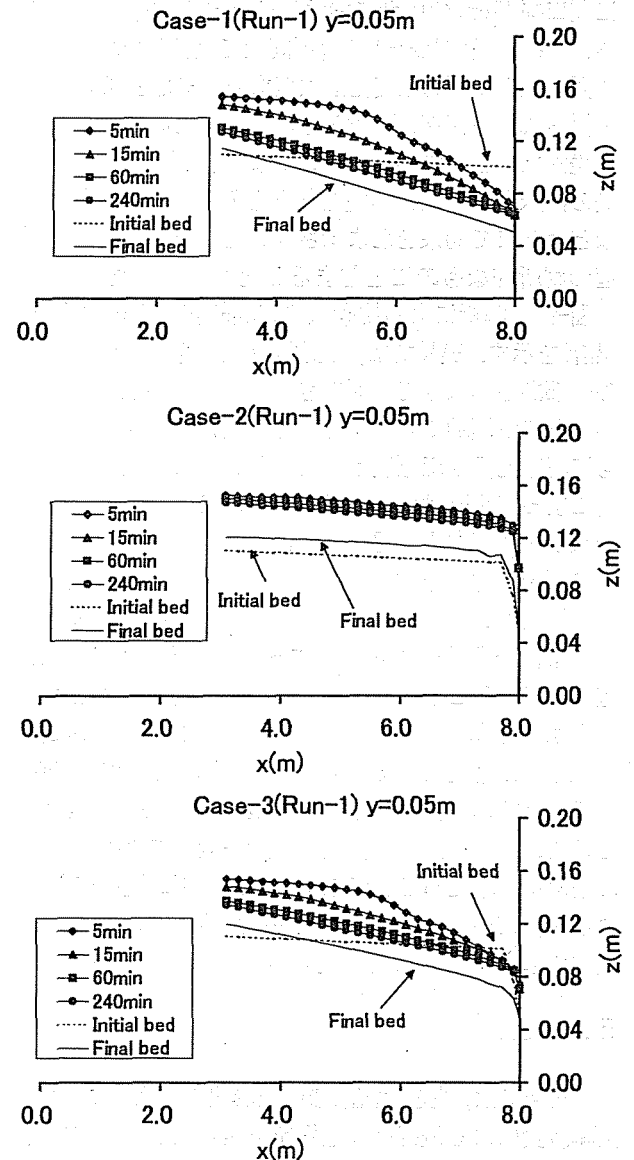


図-8 解析による水位縦断形状の時間的変化

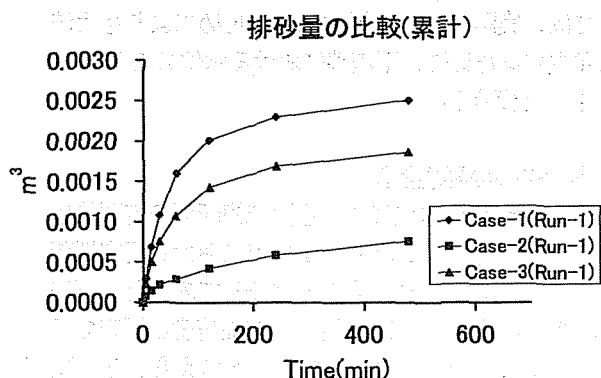


図-9 排砂量の時間的変化比較

い状態で安定しているのに対し、解析ではかなり勾配をもった形状で安定していることがわかる。解析においては水中部の安息角を 30° に設定しているが、この安息角の取り方については単に土粒子の安息角を用いればよいというのではなく、流れの場に応じた安息角を適宜設定できるようにすることが課題である。最後に開口幅 17cm の場合における Case-3 について考察する。Case-1 と Case-3 の解析同士で比較した場合、横断面形状の時間的な変化は大差ない。また図-8 などから得られる下流端における水深を比べてみるとあまり大差がないことがわかった。つまり、堰開口部は上流側の河床形状を決める鍵となるものの、それが堰上げなど上流まで効果をおよぼさないと、その影響は堰周辺の局所的なものにとどまることがわかった。

図-9 に解析による排砂量の時間的変化(排出土砂の累計)を示す。実験では、通水開始とともに下流端の堰の一部あるいは全てが開口されるため、通水初期は排出土砂量が極端に多くなる。その後、時間の経過とともに河床勾配がほぼ安定期に入り、間欠的な河岸の崩落によって土砂は堰堤を通過する。この傾向を、解析結果から考察する。図-9 は、ある時間毎に初期河床からの河床変化量を求め、排出土砂量を算出した(通過土砂量とは異なる)。通水初期の排出土砂量の立ち上がり方は、図-7、図-8 から考察すると、縦断形状の変化に起因していることがわかる。また 1 時間を越えた程度からは、あまり河床は低下していないが、緩やかに排出土砂量は増えている。河床の横断形状は、側岸の傾斜によって、流路から遠くなるほど河岸高が高くなる。そのため流路が拡幅し、高い河岸が崩落すれば、一回の崩落量が増えることになる。河床低下が遅いにも関わらず、緩やかに排出土砂量が増えるのは、こうした理由に起因するものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、堰と上流部の河床形状の関係について、河岸侵食による流路拡幅過程を考察しながら、実験と解析によって考察した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 下流部の堰の存在によって水位は堰上げされる。その堰上げによる水位と堰がない場合の水位に差がないときには、排砂効率が極端に悪くなることはない。
- (2) 河床の横断面形状の変化は、河床低下が顕著な場合を除き、下流端近くまでほぼ時間的に指数関数で定義された形状で変化していくことがわかった。
- (3) 砂礫の空中安息角と水中安息角が異なることを、解析モデルに組み込んだため、河岸の崩落による土砂供給を伴う時の河床縦横断面形状の変化過程を、ほぼ再現することができた。

謝辞：本研究の実験、解析の遂行にあたり、当時名古屋大学工学部学生(現：愛知県庁)の田中良樹氏、同大学院生の山田淳夫氏の多大な協力を得た。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 後藤孝臣, 田中良樹, 北村忠紀, 辻本哲郎: 低堰堤堆積土砂のフラッシュに関する数値解析, 河川技術に関する論文集, 第 6 巻, pp.327-332, 2000.6.
- 2) 芦田和男, 澤井健二: ダム堆砂の排除に関する研究(2), -スリットダムの水理機能, 京大防災研究所年報, 第 22 号 B-2 pp.329-340, 1979.4.
- 3) 水山高久, 下東久巳, 下田義文, 井戸清雄: スリットを有する砂防ダムに関する実験的研究, 第 28 回水理講演会論文集, pp.723-728, 1984.2.
- 4) 芦田和男, 江頭進治, 村岡猛, 里深好文: 砂防ダムの流出土砂調節機能に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 30 号, B-2, pp.421-439, 1987.4.
- 5) 岡部健士, 榎本真二, 穴瀬康雄: ベーン付設によるスリット付き砂防ダム改善に関する実験的検討, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.937-942, 1998.2.
- 6) 田中裕一朗, 呂福祿: 貯水位の低下によるダムの排砂法, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.683-688, 1994.2.
- 7) Ikeda Syunsuke: Self-formed straight channels in sandy beds, Proc. ASCE, Vol.107, HY4, pp.389-406, 1981.
- 8) 後藤孝臣, 北村忠紀, 辻本哲郎: 上・下流域境界条件の変化による直線砂礫流路の側岸侵食を伴う河床低下に関する研究, 土木学会論文集(投稿中).
- 9) 後藤孝臣, 北村忠紀, 辻本哲郎: 土砂供給停止による河床低下と流路拡幅の進行過程, 水工学論文集第 44 号, pp.765-770, 2000.2.
- 10) 芦田和男, 江頭進治, 何智武, 山野邦明, 村岡猛: 砂防ダムの侵食防止機構に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報第 28 号 B-2, pp.337-351, 1985.

(2000.10.2受付)