

落差工の改変に伴う上流河道の 河床応答特性に関する研究

A STUDY ON MORPHOLOGICAL RESPONSE OF RIVER CHANNEL
DUE TO FALLING WORKS IMPROVEMENT

神田佳一¹・佐本佳昭²・武藤裕則³・張 浩⁴・中川 一⁵・南部泰範⁶
Keiichi KANDA, Yoshiaki SAMOTO, Yasunori MUTO, Hao ZHANG,
Hajime NAKAGAWA and Yasunori NANBU

¹正会員 工博 明石工業高等専門学校 教授 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡)

²学生会員 明石工業高等専門学校専攻科 建築・都市システム工学専攻 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡)

³正会員 工博 京都大学准教授 白浜海象観測所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田)

⁴正会員 工博 京都大学助教 宇治川オープンラボラトリー (〒612-8265 京都府京都市伏見区横大路)

⁵正会員 工博 京都大学教授 宇治川オープンラボラトリー (〒612-8265 京都府京都市伏見区横大路)

⁶学生会員 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂)

Falling works are usually constructed to contribute to river bed stabilization in the upstream reach. However, at the same time, they form artificial barriers and inhibit the longitudinal continuity of water, sediment transport and migration of fish, so that they have negative impacts on the eco-system and river landscapes. In order to solve the problem, several improvement schemes can be considered; for example, full removal and height reduction of the falling works, but this possibly can cause instability of the river bed.

This study deals with the response of flow patterns and bed deformation in the upstream reach of river channel due to falling works improvement. A series of laboratory experiments and numerical simulations based on a 2D morphological model under a flood condition are conducted to clarify the effects of the several improvement schemes on bed deformation. The results of this study show that the falling works improvement can contribute to the river scenery being restored into a natural condition.

Key Words : *falling works, morphological response, sand bar, experiment, numerical model*

1. はじめに

気象的及び地形的に洪水が頻発する条件にある我が国において、明治以後の近代河川技術の発展は、治水安全度を飛躍的に向上させてきた。その一方で、人口の集中する都市部では、川は直線化され、魚や水生生物の住みかが消失するなど、自然環境の破壊が急速に進行している。河道の安定化工法として用いられる落差工においても、上流からの流水や土砂をせき止め、湛水域の形成や河床の安定に寄与する一方、土砂流送・生態系・景観等の面からは河床変動や縦横断の連続性が阻害されるなど、環境上の問題点が指摘されている。

近年、このような落差を伴う横断構造物を巡るコンフリクトを解消すべく、流砂の連続性や魚の遡上の阻害要

因となっている横断構造物の全面あるいは一部を撤去・改修するなどの工事が世界各地で行われている。アメリカでは、良好な河川環境の復元のための手段として、1999年までに約500のダムや堰堤が撤去された¹⁾。カナダのBow Riverでは、魚類や水生生物のための良好な河川環境を創出するために、堰堤の大規模な改修プロジェクト²⁾が進行している。韓国においても、用水確保の必要性がなくなった都市部の河川で堰堤や落差工を撤去する試みがなされている^{3), 4)}。

しかしながら、このような構造物の直接的改変は、上流河道の河床低下や不安定化を引き起こす。Pizzuto⁵⁾は、ダム撤去に伴う周辺河床の変動過程を追跡調査し、河道の応答特性を評価・予測するためのさらなる研究の必要性を示唆している。Stanley & Luebkke⁶⁾やCheng & Granta⁷⁾は、ダム撤去による流砂量の変化や河床の動的

変動特性を取り扱っているが、いずれもそれぞれの対象フィールドにおける現地観測の結果から得られたものである。また、土砂調節機能を付加するため、砂防ダムにスリットを設けた場合の土砂流出と上流域の堆砂特性に関する研究^{8) 9)}はいくつか見られるが、沖積地河道の落差工を対象として、構造物の全面撤去を含む改変形状と改変後の河床変動との関係を系統的に取り扱った研究はほとんど行われていない。

本研究は、防災上必要な河道の安定性とそこでの横断構造物の役割を評価するとともに、環境上必要な河床変動や縦の連続性の定量化を目指すことを目標とし、両要請を担保する方策を模索するものである。ここでは、横断構造物として落差工を採り上げ、その改変形状や改変前の河床位をパラメータとした系統的な模型実験を行うとともに、平面2次元の数値計算モデルを用いた数値解析により、落差工の改変に伴う上流河道の流れと河床の応答特性について考察した。

2. 落差工の改変に伴う河床の応答に関する実験

(1) 実験の概要

実験は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置された全長21m、幅0.5m、高さ0.3mの側面ガラス張りの循環式鋼製水路を用いて行われた。水路勾配は $I = 1/200$ である。水路下端から8mの位置に高さ11.7cmの落差工模型を設置し、その上流は河床材料として平均粒径 $d = 0.155\text{cm}$ のほぼ一様な珪砂を敷き詰めた移動床とした。砂の敷高 D は、落差工上流部に湛水域が形成される場合 (RunA) と、満砂状態 (RunB) の2通りを設定し、それぞれ、 $D = 8.5\text{cm}$ 及び 11.7cm としている。流量は、 $Q = 8,160\text{cm}^3/\text{s}$ に設定した。これは、現地河川において、数年に1度生起するような洪水¹⁰⁾を想定したもので、満砂状態における等流時の掃流力と河床砂の限界掃流力との比が2程度となる動的な条件である。等流時の水理量を表-1にまとめる。落差工の改変形状を図-1に示す。高さ11.7cmの落差工 (Initial) に対して、全幅を1.6cm (TypeI) 及び3.2cm (TypeII) 撤去した場合、水路中央部の1/3幅 (16cm) を1.6cm (TypeIII) 及び3.2cm (TypeIV) 切り欠いた場合の計4通りである。

実験は、落差工の改変形状と上流部の砂の初期敷高を変えて行った10通りであり、落差工上流部の河床形状、水路中央における水位及び表面流況の時間変化を計測した。実験条件を表-2に示す。RunA0及びRunB0は、改変前の落差工形状において、それぞれ所定の敷高で120min通水したものである。他のケースでは、これらの最終の河床形状を初期条件として、落差工の形状を変化させた後、再び通水している。ただし、RunB33は、落差工の改変 (TypeIII) と同時に、上流河道の低水路を改変断面と同じ高さで掘削した場合をモデル化したものであって、

表-1 等流時の水理諸元

流量 Q	8,160 cm^3/s	等流水深 h_0	4.18cm
平均流速 V_0	39.0 cm/s	河床勾配 I	1/200
τ_{*0}	0.070	τ_{*c}	0.036
フルード数 F_r	0.66	レイノルズ数 R_e	14,000

τ_{*0} : 無次元掃流力, τ_{*c} : 河床砂の限界無次元掃流力

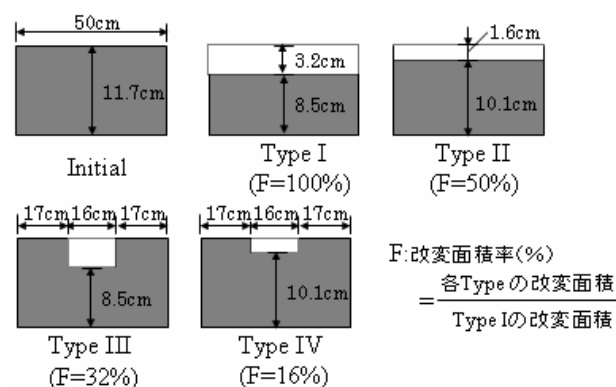


図-1 落差工の改変形状

表-2 実験条件

落差工の改変形状	敷高 $D = 8.5\text{cm}$	敷高 $D = 11.7\text{cm}$
Initial	RunA0	RunB0
Type I	RunA1	RunB1
Type II	RunA2	—
Type III	RunA3	RunB3
Type IV	RunA4	RunB4
TypeIII (低水路掘削)	—	RunB33

河床の初期条件を、低水路の深さ3.2cm、底面幅16cm、及び左右岸の勾配が河床砂の静止摩擦角となる複断面形状とした。通水時間は各実験条件によって異なるが、いずれの場合も、落差工改変後の上流河道の河床形状が安定し、ほぼ準平衡状態とみなせるまで通水を行った。

準平衡状態での水位の測定にはポイントゲージを用い、通水後の河床形状はレーザー変位計で測定した。また、表面流況については、粒径 $50\mu\text{m}$ のPVC粉末をトレーサーとして、その挙動を水路斜め後方からDVCで撮影し、藤田¹¹⁾のLSPIV解析手法を用いて表面流速を評価した。

(2) 実験結果及び考察

a) $D = 8.5\text{cm}$ の場合 (RunA)

上流砂層の初期敷高 D が落差工高さより低い場合 (RunA0~RunA4)の水路中央における水位 H と河床位 Z の縦断分布を図-2に示す。高さの基面位置は落差工設置断面の水路床とし、上流方向に縦断距離 X をとっている。また、図-3は河床形状のコンター図を示している (Z' は水路床からの鉛直距離)。図中の赤色は砂を一様に敷き詰めた状態 (敷高8.5cm)からの河床上

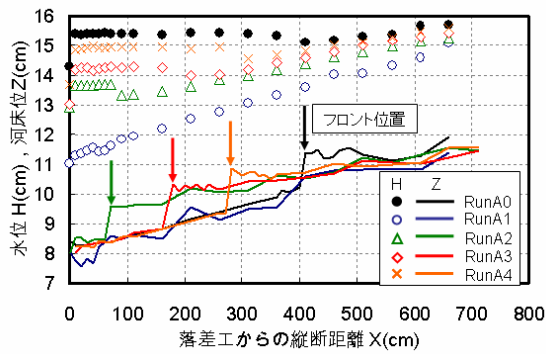


図-2 水位・河床位の縦断分布 (RunA)

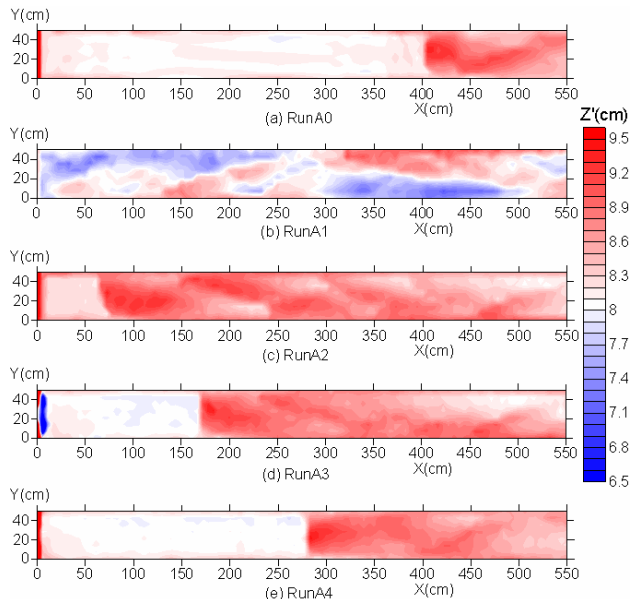


図-3 河床形状のコンター図 (RunA)

昇を、青色は河床低下を表している。

改変前の落差工 (RunA0) の上流部では、水位の堰上げが $X = 400\text{cm}$ まで達しており、そこでは背後からの土砂供給により、舌状のフロントを有するデルタ地形が形成されている。その高さは 1.3cm 程度であって、デルタ上には短波長の交互砂州が見られる (図-3(a))。落差工の改変に伴って湛水域の水位は低下し、図-2の矢印で示されるように、デルタはその形状を変えずに下流側に移動している (RunA2～RunA4)。落差工を初期河床位まで撤去したRunA1では、水面形は低下背水となり、デルタは完全にフラッシュされて消滅している (図-3(b))。このとき、上流河道の全域で流砂が存在する動的平衡状態となっており、デルタ上のものよりも長い波長の交互砂州が発達している。また、落差工の中央部1/3を改変した場合、切下げ高の大きいRunA3では、落差工の直上流 (図-3(d)の $X=0\text{cm}$ 近傍) において、左右対称な局所洗掘が生じている。これについては次項でふれる。

落差工の改変面積率 F と落差工上の水位の低下量 ΔH 及びデルタフロントの移動量 ΔL との関係を示せば、図-4のようである。 ΔH 及び ΔL は、いずれも落差工の改変幅にはよらず、 F と正の相関関係にある。

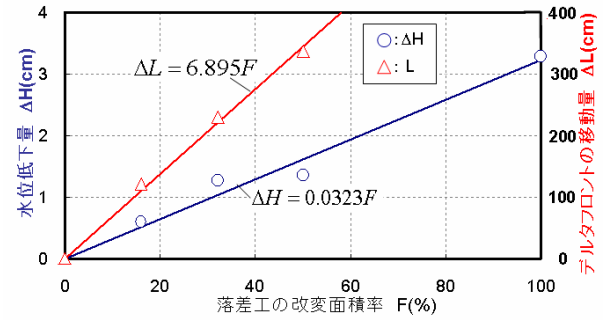


図-4 落差工の改変面積率と水位低下量及びデルタフロントの移動量との関係

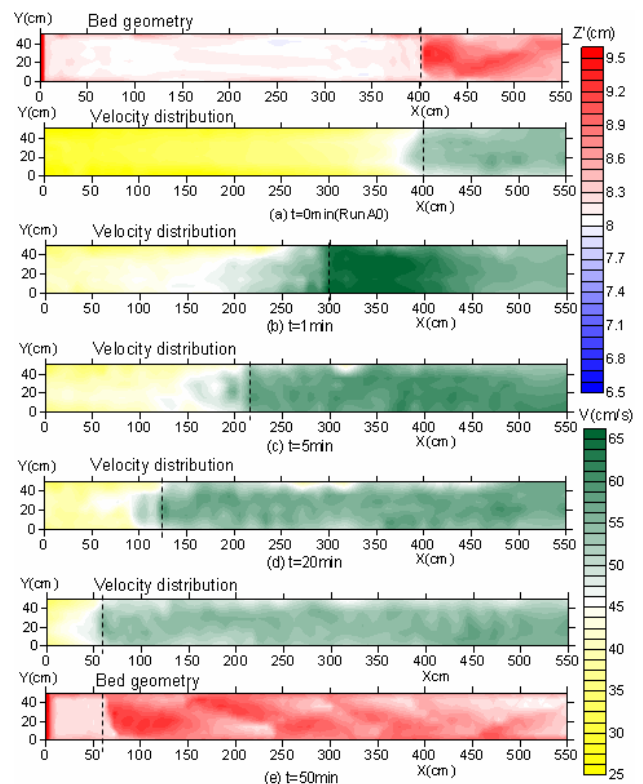


図-5 表面流速分布の時間変化 (RunA2)

図-5は、RunA2において、落差工の改変前 (RunA0) から改変後の準平衡状態に至るまでの表面流速 V の平面分布の時間変化を、RunA0及びRunA2の河床形状の結果とともに示したものである。図中、各時刻におけるデルタフロントの位置を破線で示している。改変直後 ($t=1\text{min}$) では、フロント付近 ($X=300\sim350\text{cm}$) で 60cm/s (V_0 の約1.5倍) を超える高速領域が存在し、大きな掃流力の発現により流砂運動が活発であることがわかる。このため、フロントの移動速度は大きい。時間の経過とともに ($t=5\sim50\text{min}$) デルタ上の流速は次第に減速し、フロントの移動速度も減少している。このとき、上流からの交互砂州の発達に伴って、流速の比較的高速領域と遅い領域が交互に表れるようになる。 $t=50\text{min}$ では、フロントの移動速度は 1cm/min 以下となっており、準平衡状態に達しているものと考えられる。

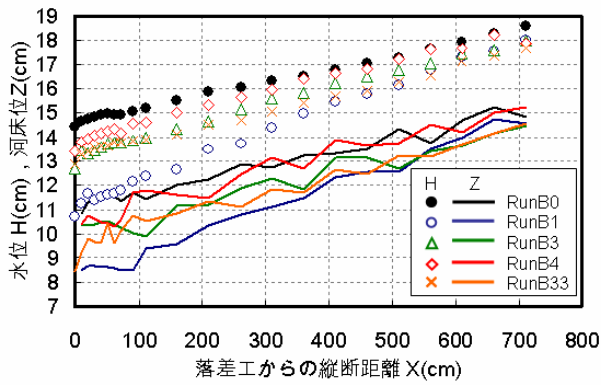


図-6 水位・河床位の縦断分布 (RunB)

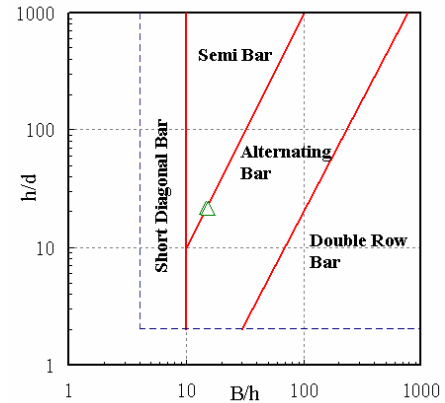


図-9 中規模河床形態の領域区分図

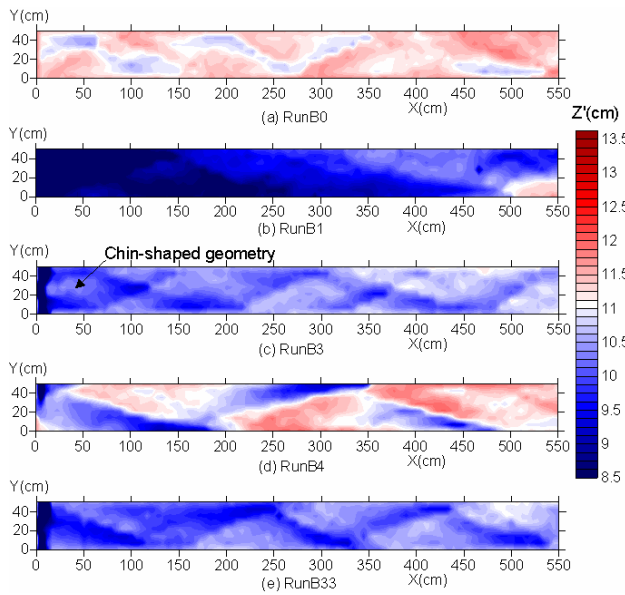


図-7 河床形状のコンター図 (RunB)

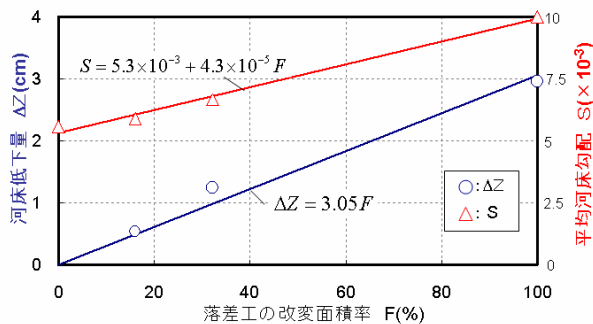


図-8 落差工の改変面積率と河床低下量及び平均河床勾配との関係

表-3 砂州の形状特性

	λ_B/B	Z_B/B
RunB0	1.3	0.023
RunB1	2.4	0.026
RunB3	1.2~1.6	0.023
RunB4	3.6	0.063
RunB33	1.6	0.024

λ_B : 砂州の波長, Z_B : 砂州の波高, B : 水路幅

b) $D=11.7\text{cm}$ の場合 (RunB)

図-6は、満砂状態の落差工を改変した場合の水路中央の水位と河床位の縦断分布である。また、図-3と同様に河床形状のコンター図を図-7に示す。改変前 (RunB0) では、落差工近傍を除いてほぼ等流状態となっており、落差工の上流全域において交互砂州が発達している。

図-6から分かるように改変後の落差工面積の欠損により、水位及び河床位はともに低下するが、その変化は落差工に近づくほど顕著である。その結果、水面及び河床の勾配が増大している。落差工の改変面積率 F と落差工背面での河床低下量 ΔZ 及び平均河床勾配 S との関係を示せば、図-8のようである。ここでも、 ΔZ 及び S は F と比例関係にあり、それぞれ、図中の回帰式で表される。

表-3は、砂州の波長及び波高特性をまとめたものである。また、平均水深を用いて村本・藤田¹²⁾の河床形態の領域区分に本実験結果を適用すれば、図-9のようである。各Runで水深 h がほぼ等しいため、図-9では全て準砂州と交互砂州の境界線上の同一点にプロットされるが、砂州の形状特性は、図-7からも明らかのように、落差工の改変形状や初期河床形状によって大きく異なっている。特に、落差工の中央部1/3を3.2cm切り下げたRunB3では、落差工の近傍の局所洗掘の背後に顎状に突き出た堆砂地形が発達し、その上流部には複列砂州と交互砂州が混在するような複雑な河床形態となっている。この顎状の堆砂地形は落差工の改変直後に出現し、その後も安定な形状を保っており、上流部の砂州の複列化の支配要因となっているものと考えられる。一方、同じ改変断面で低水路を掘削した状態から通水したRunB33では、顎状地形は存在しておらず、明瞭な交互砂州が発達している。このように、落差工改変後の上流河道の河床形態は、落差工近傍の局所地形や河床勾配によって複雑な特性を示すが、これらの関係を定量化するには、改変形状に関してより多くの実験条件の設定が必要である。

RunB3及びRunB33では、落差工近傍においてRunA3と同様に、局所的な二次流による洗掘が生じている。それらの最深部 ($X=2\text{cm}$) における河床の横断形状を比較

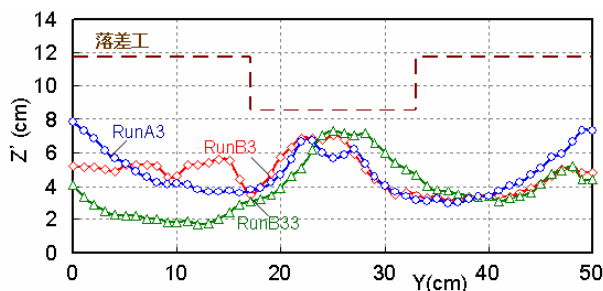


図-10 局所洗掘最深部の横断形状

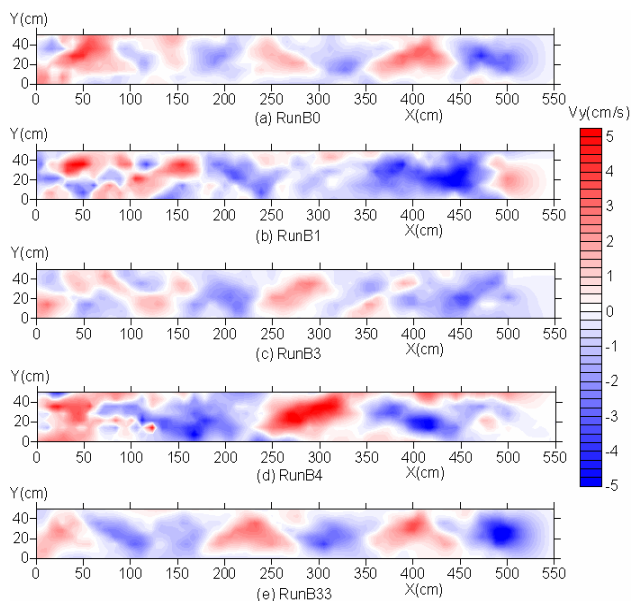


図-11 横断方向流速分布 (RunB)

したものを図-10に示す。洗掘形状はいずれも落差工の形状と逆位相の対称形であって、初期の河床条件による有意な差異は見られず、断面の急縮に伴って改変部の両側に生じる剥離渦によって形成されたものと考えられる。

次に、表面流速の横断方向成分 V_y の平面分布を示せば、図-11のようである。赤色は右岸方向の、青色は左岸方向の流速を表している。図-7の河床形状と比較すると、赤色域と青色域が砂州の形状に対応して交互に表れており、砂州の前縁線に直交して蛇行する流れの特性がうまく捉えられている。

3. 平面二次元流の数値解析

(1) 解析方法

基礎式は、以下に示すような、水深平均した流れと流砂の連続式及び X 、 Y 方向の運動方程式である。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial X} + \frac{\partial(hv)}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$(1-\lambda) \frac{\partial Z}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_{bX}}{\partial X} + \frac{\partial q_{bY}}{\partial Y} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial X} + \frac{\partial(huv)}{\partial Y} = -gh \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(h\tau_{XX})}{\partial X} + \frac{\partial(h\tau_{XY})}{\partial Y} \right\} - \frac{\tau_{bX}}{\rho} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial X} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial Y} = -gh \frac{\partial H}{\partial Y} + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(h\tau_{YX})}{\partial X} + \frac{\partial(h\tau_{YY})}{\partial Y} \right\} - \frac{\tau_{bY}}{\rho} \quad (4)$$

ここに、 t は時間、 X, Y は直交平面座標、 H は水位、 h は水深、 Z は河床位、 u, v はそれぞれ X, Y 方向の水深平均流速、 g は重力加速度、 ρ は水の密度である。 τ_{bX}, τ_{bY} は底面せん断応力、 $\tau_{XX}, \tau_{XY}, \tau_{YX}, \tau_{YY}$ は水深平均したレイノルズ応力、それぞれ、マンニングの粗度係数及び渦動粘性係数の関数として与えた、 q_{bX}, q_{bY} は X, Y 方向の流砂量、 λ は河床砂の空隙率である。流砂量の算定には、芦田・道上の式を用いている。

基礎式の離散化には、非構造格子上で有限体積法を適用した。詳細については、Zhangらの文献¹³⁾を参照されたい。また、境界条件としては、上流端で一定流量を与え、落差工上では、本間の完全越流公式を適用している。

(2) 解析結果

図-12は、RunA0～RunA4における水位の計算結果を実験結果と比較したものである。ただし、河床の条件は固定床とし、それぞれ、最終の準平衡状態における実験値を与えている。湛水域が形成されるRunA0及びRunA1では、デルタフロントにおける水位上昇と湛水域の水面形に関して、実験結果がうまく再現されている。一方、RunA2～RunA4の砂州が発達している非湛水域では、計算値は実験値よりも5%程度大きくなっている。これは、落差工上下流の水位差が小さい場合の境界条件（越流公式）に誤差が生じたものと考えられ、砂州の形状抵抗や鉛直流速の効果を考慮した底面せん断応力の評価法の導入とともに、今後検討する必要がある。

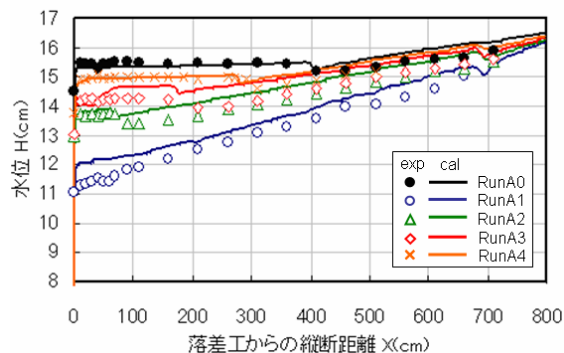


図-12 水位の解析結果と実験結果の比較

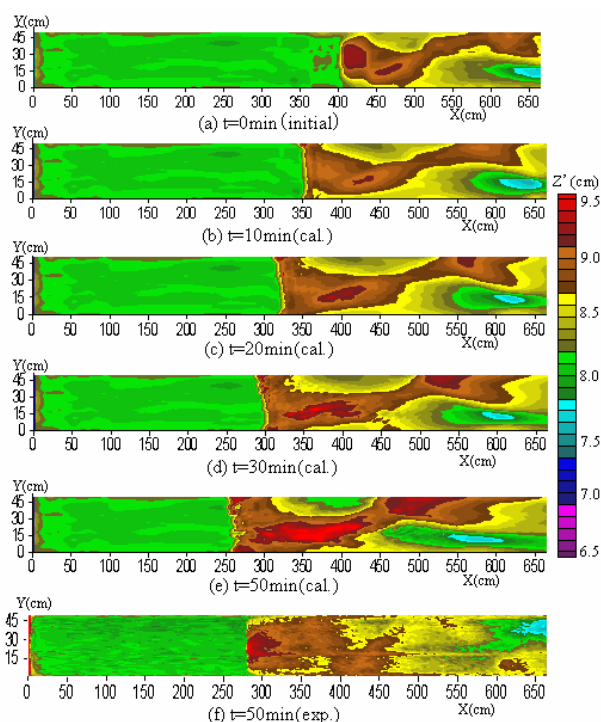


図-13 河床形状の時間変化 (RunA4)

RunA4について、落差工改变後の河床変動の移動床解析結果を、最終状態 ($t=50\text{min}$) の実験結果とともに示せば、図-13のようである。解析結果では、デルタ上の砂州が時間の経過とともに、形状を変えることなく下流へシフトしていく様子がシミュレートされている。最終の河床形状を比較すると、デルタフロントの位置や右岸上流の砂州形状が少し異なるものの、両者は概ね一致している。このことは、他の実験結果への適用例においても同様であり、本解析モデルは、落差工改变後の河床形状の変化過程を定量的に予測できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、落差工の改变に伴う洪水時の上流河道の流れと河床の応答特性について、実験並びに数値解析を行った。得られた主要な所見を以下にまとめる。

落差工の改变面積及び河床の初期敷高は、落差工上流部の流れ及び河床形態の変化に影響を及ぼす。上流の河床位が落差工高さよりも低い場合、落差工上流部にはその前方に湛水域を有するデルタ地形が形成されるが、断面の改变に伴う水位低下により、そのフロントの移動とともに湛水域は減少する。落差工の改变面積率と水位の低下量及びフロントの移動量との間には正の相関がある。

一方、落差工上流部が満砂状態の場合、改变後の河床には砂州形状が発達するが、その形状特性は改变形状によって異なる。また、断面中央を部分的に改变した場合には、落差工近傍で二次流による局所洗掘が発達する。

これは落差工自体の安定性に影響を及ぼすと考えられるため、今後さらに、その挙動を明らかにする必要がある。

浅水流方程式を用いた数値解析結果は、落差工の改变に伴う水位及び河床の変動過程に関して実験結果と概ね一致しており、その予測手法として有効である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、京都大学防災研究所准教授 竹門康弘先生並びに竹林洋史先生より多大なるご協力とご助言を頂いた。また、本研究は京都大学防災研究所一般共同研究費（代表:神田佳一）の支援を受けている。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) Maclin E., M. Bowman, and A. Bednarek: The Ecology of dam Removal; A Summary of Benefits and impacts, American Rivers, 1999.
- 2) Government of Alberta, <http://www.gov.ab.ca/>, 2008.
- 3) Lee J. H., S.M. Jeong, S.C. Park, K.S. Shin and E.T. Lee: Weir relocation for the improvement of the Geum River scenery and river bed restoration, *Proc. 32nd IAHR Congress*, Venice, Italy, CD-ROM, 2007.
- 4) Ahn H. K., H. Woo, D. S. Rhee and K. H. Cho: A STUDY ON THE EFFECT ON RIVER HABITAT CHANGE BY SMALL DAM REMOVAL, *ADVANCES IN HYDRO-SCIENS AND ENGINEERING*, Nagoya, Japan, CD-ROM, 2008.
- 5) Pizzuto J.: Effects of Dam Removal on River Form and Process, *Bio Science*, Vol.52, No.8, pp.683-691, 2002.
- 6) Stanley E. H. and M. A. Luebke: Short-term changes in channel form and macro invertebrate communities following low-head dam removal, *Journal of North American Benthological Society*, Vol.21, No.1, pp.172-187, 2001.
- 7) Cheng F. and T. Granta: Sediment transport and channel adjustments associated with dam removal; Field observations, *Water Resources Research*, Vol.43, W0344, 2007.
- 8) 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.
- 9) 岡部健二・榎本信二・穴瀬康雄: ベーン工の付設によるスリット付き砂防ダムの改善に関する実験的検討, 水工学論文集, 第42巻, pp.937-942, 1998.
- 10) 山本晃一: 沖積河川学, 山海堂, pp.35-57, 1994.
- 11) 藤田一郎: PIV技術の実河川表面流速への応用, 河川技術論文集, 第4巻, pp.41-46, 1998.
- 12) 村本嘉雄・藤田裕一郎: 中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, pp.275-282, 1978.
- 13) Zhang H., H. Nakagawa, Y. Muto, Y. Muramoto, D. Touchi and Y. Nanbu, *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto univ.*, No.50B, pp.635-651, 2007.

(2008. 9. 30受付)