

石礫蛇行河川の二次元河床変動解析法 に関する研究

STUDY ON TWO-DIMENSIONAL RIVERBED VARIATION ANALYSIS IN MEANDERING CHANNELS WITH STONY BED

長田健吾¹・福岡捷二²
Kengo OSADA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構助教(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー Ph.D 工博 中央大学理工学部特任教授, 中央大学研究開発機構教授(同上)

We developed the new method of one-dimensional riverbed variation analysis by considering the mechanism of riverbed variation in stony bed rivers. However, the one-dimensional method cannot illustrate the riverbed scouring near the brink of channel bank, bank erosion and channel deformation in channels with a complicate cross-section. In this study, we developed the new method of two-dimensional riverbed variation analysis by considering the mechanism of riverbed variation and bank erosion in stony bed rivers. We verified the applicability of the two-dimensional model from the field experimental results which was acquired in a meandering channel of the Joganji river.

Key Words : stony bed rivers, boulder, field experiment, bank erosion, two-dimensional riverbed variation analysis

1. はじめに

巨石(粒径30cm以上)を有する石礫河川では, 巨石等の大きな河床材料が露出するため形状抵抗の形で流体力を受持ち, 周囲の相対的に小さい河床材料を静止状態に保ち河床を安定させる¹⁾. しかし, 既往の河床変動解析法では, このような巨石の効果を十分に考慮できていないため, 石礫河川の河床変動量を見積もることが困難である. 石礫河川の土砂移動, 河床変動量を精度良く予測できる解析法の構築は, 石礫河川の河道計画に貢献するとともに, 石の少なくなった下流河道における課題(河道の滞筋化, 河岸際の深掘れ, 土丹の露出等)に対しても石を用いた対応策の検討を可能にし, 洪水流と土砂移動の観点から上下流を通じた適切な河道計画を構築する上で特に重要である^{2), 3)}.

著者らは, 常願寺川現地実験で明らかとなった石礫河川の河床変動機構を考慮した, 新しい次元河床変動解析法を構築した⁴⁾. 解析法の特徴として, 第一に, 石礫河川の土砂移動は, 巨石等の大きな河床材料の存在が, 中小の砂や礫の移動に大きく影響することから, 既往の解析法のように平衡流砂量式で流砂量を評価するのでは

なく, 凹凸が存在する場における非平衡な流砂現象を再現できるようにした. すなわち, 大きな河床材料による遮蔽係数を考慮した離脱量式, 底面との衝突を考慮した堆積量式, 跳躍解析による粒子速度から, 流砂量を評価している. 第二に, 巨石等の大きな河床材料が河床に露出すると, 河床表層は大きな凹凸が付き, 表層には大きな空隙空間が形成される. この空隙を捉えることが, 石礫河川の河床変動を精度よく見積もるために重要であることから, 各粒径の高さを時々刻々計算する式を構築し, 河床表層の凹凸(空隙)を捉えられるようにした. 第三に, 露出した巨石の形状抵抗を考慮するため, 河床のD90粒径を用いた抵抗評価式を構築した. 構築した次元解析法を, 常願寺川現地実験に適用し, 石礫河川における水面形, 河床変動量, 河床粒度分布を精度よく説明できることを示した. しかし, 河道の滞筋化や, 河岸際の深掘れなどは, 次元解析法では説明できないため, 石礫河川の河床変動を説明することのできる平面次元河床変動解析法の構築が必要である.

本研究では, 上述の次元河床変動解析法の特徴を生かした, 石礫河川における平面次元河床変動解析法を構築する. 平面次元解析では, 横断方向流砂量や側岸侵食を適切に捉えられるようにすることが重要である.

砂礫河川の側岸侵食量の算定には長谷川の式⁵⁾が一般に用いられているが、そこでは横断勾配が安息角を越えないように側岸から土砂を補給されるように補正を行う。しかし、石礫河川では、中小の砂の抜け出しにより河岸が粗粒化し、河岸が安定化する機構があり¹⁾、安息角補正では侵食量が過大に見積もられる。本解析法では、河床横断勾配を考慮した離脱量式を構築し、河床変動と側岸侵食を一体的に扱うことのできるモデルの構築を行う。構築した解析法を、常願寺川で行われた蛇行水路実験⁶⁾に適用し、解析法の検証を行う。

2. 石礫河川における平面二次元河床変動解析法

図-1に、石礫河川における平面二次元河床変動解析法の過程を示す。河床変動解析では、洪水時に観測された水面形の時間変化を一体的に捉え、流れと河床変動を同時に解析することが、精度よい解析結果を見積もる上で特に重要である^{2), 3)}。このため流れの非定常平面二次元解析と河床変動解析を一体的に組み合わせたモデルを構築する。非定常平面二次元洪水流解析は、式(1)、式(2)に示す一般化座標系の連続式と運動方程式(ξ方向のみ記載)を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta q^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{q^x}{J} \left(u^\xi \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{q^y}{J} \left(u^\xi \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) - \frac{F_{D90}^\xi}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) \quad (2) \end{aligned}$$

ここに、 $F_{D90}^\xi, F_{D90}^\eta$ は、ξ方向およびη方向の河床抵抗値を表わし、河床表層のD90粒径を用いて式(3)、式(4)により評価する。

$$\begin{cases} F_{D90}^\xi = \xi_x F_x + \xi_y F_y \\ F_{D90}^\eta = \eta_x F_x + \eta_y F_y \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_x = N_{D90} \frac{\varepsilon_{D90}}{2} \rho C_D \alpha_2 d_{90}^2 u_f^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \\ F_y = N_{D90} \frac{\varepsilon_{D90}}{2} \rho C_D \alpha_2 d_{90}^2 u_f^2 \cdot \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \end{cases} \quad (4)$$

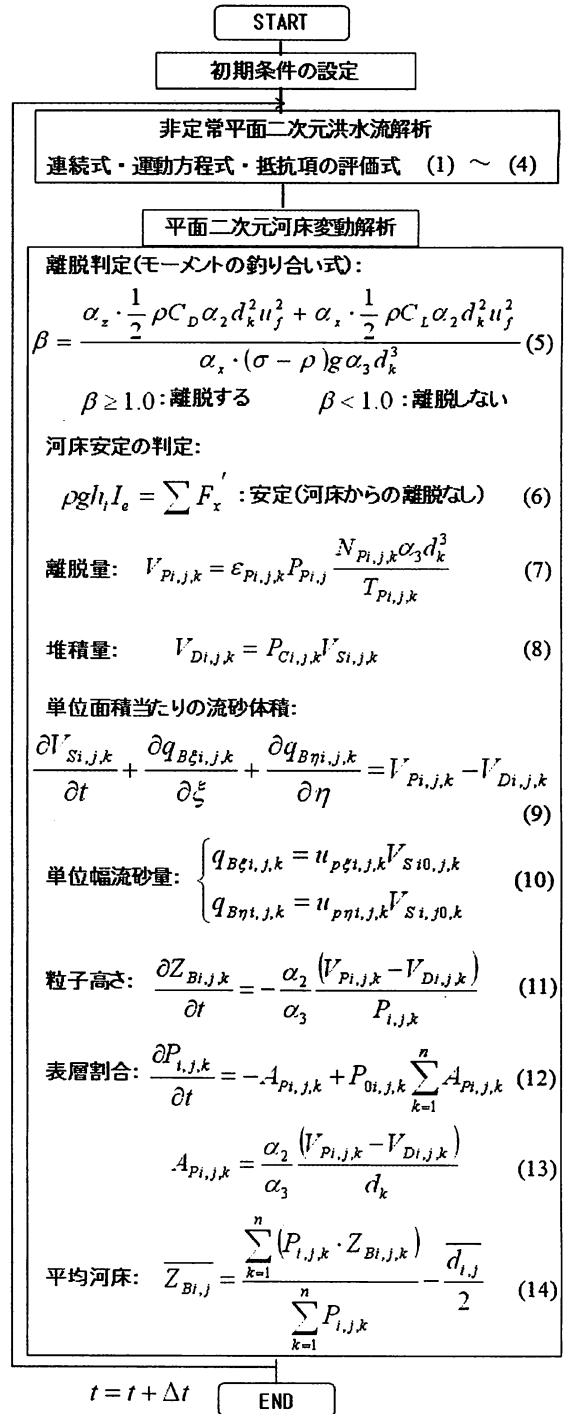


図-1 平面二次元河床変動解析法の過程

ここに、 N_{D90} : D90の単位面積あたりに存在する個数、 ε_{D90} : D90の遮蔽係数である。また、本研究では、蛇行水路を対象とするため、長田ら⁷⁾により提案された二次流の項を運動方程式の項に付加した。

次に、平面二次元河床変動解析法について説明する。まず、河床からの離脱に関する解析過程について説明する。各計算メッシュの各粒径に対して、モーメントのつり合いを表現した式(5)を用いて離脱判定を行う。図-2に、離脱に関する模式図を示す。離脱判定粒子に対して θ_k の角度で下方に固定粒子(粒径D80)を配置し、離脱の有無を判断する。角度 θ_k は、式(15)により計算する。

$$\theta_k = 90.0 - 45.0 \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \frac{(Z_{Bi,j,k} - Z_{d80i,j})}{d_{80i,j}}\right\} - \theta_{Ci,j} \quad (15)$$

ここに、 $Z_{Bi,j,k}$ ：各粒径の高さ、 $Z_{d80i,j}$ ：各メッシュにおけるD80の高さである。また、 $\theta_{Ci,j}$ は、各計算メッシュにおける流速ベクトルに直交する方向の河床・側岸勾配角である。式(15)は、粒子高さ $Z_{Bi,j,k}$ とD80の高さ $Z_{d80i,j}$ の関係から両者が同じであれば45度となり、D80よりも粒子高さが高い場合、45度より小さくなり離脱しやすくなる。一方、D80の方が高い場合は、45度より大きくなり離脱しづらい条件となる。このような各粒径の高さ関係に加えて、河床・側岸の傾斜の影響を θ_c で考慮した。傾斜が大きくなれば、 θ_k が小さくなり、より離脱の可能性が高くなる。ただし、後述する離脱時間 T_p の計算を行う必要があるため、 θ_k の最小値を10度に設定した。河床安定の判定は、上述の離脱判定をD80およびD90に対して行い、この両者がともに離脱しないと判断された場合、河床に掛かる流体力のすべてをD80以上の粒径集団が受け持つとし、D80より小さい河床材料には流体力が働かないとして、このメッシュからの離脱量をゼロとした。

上述の過程を経て離脱すると判断された粒径について、単位面積・単位時間あたりの河床からの離脱量を式(7)により算出する⁴⁾。ここに、 ε_p ：離脱対象粒径よりも大きな河床材料による遮蔽効果を評価する係数、 P_p ：河床表層の各粒径の凹凸を考慮した係数である。河床表層に存在する各粒径の体積は、 $N_{pi,j,k} \alpha_3 d_k^3$ で評価されるが、実際には河床表層の同一粒径の中でも凹凸があり、表層に存在する全粒子が離脱対象にはならないことから、 P_p により離脱量を制御する。 P_{pi} は、流体から河床に掛かる力と、粒子に掛かる抗力の総和の比で評価し、以下の式により算出する。

$$P_{pi,j} = \frac{\rho g h_i I_e}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{N_{pi,j,k}}{2} \rho C_D \alpha_2 d_k^2 u_j^2 \right)} \quad (16)$$

離脱時間 T_p は、図-2の離脱判定位置から粒子の運動方程式を解き、固定粒子の頂点に達するまでの時間とした。図-3に、本解析に用いる各変数の定義点を示す。離脱量は、計算メッシュを構成する格子辺の中心点で計算を行う(V_{PU}, V_{PR})。ただし、後述する流砂堆積 V_S 、粒子高さ Z_{Bk} 、表層割合 P は、メッシュの中心で定義され、これらの計算に離脱量が必要であるため、計算メッシュの周囲4点の平均値を計算メッシュ中心点の値とした。

単位面積・単位時間あたりに河床へ堆積する量 V_D は、移動する粒子が、河床面との衝突により停止するとの考えから、その計算メッシュ内を移動する粒子の各粒径の体積 V_S と、後述する跳躍解析により評価される河床粒子との衝突割合(停止割合) P_c を用いて式(8)により評価する。単位面積あたりの流砂体積は、河床からの離脱量、河床への堆積量と、計算格子上で評価する ξ 方向単位幅流砂量 $q_{B\xi}$ および η 方向単位幅流砂量 $q_{B\eta}$ を用いて式(9)により評価する。単位幅流砂量 $q_{B\xi}$ 、 $q_{B\eta}$ は、単位

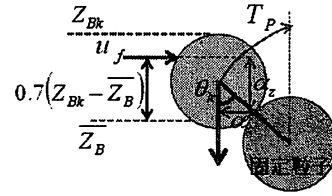


図-2 離脱計算の概要

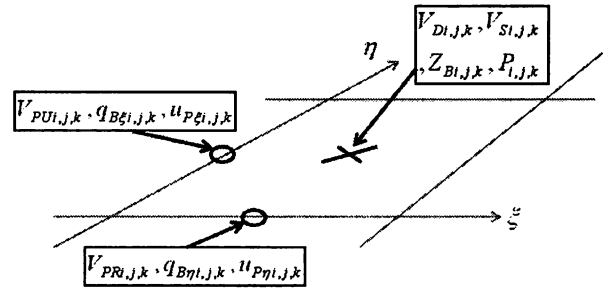


図-3 各変数の定義点

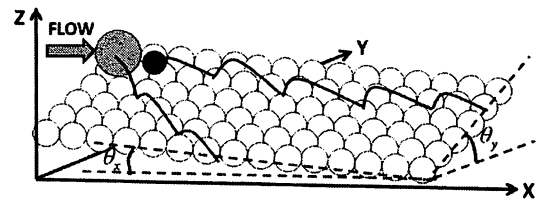


図-4 跳躍解析の概要

面積あたりの流砂体積と ξ, η 方向の粒子速度 $u_{p\xi}, u_{p\eta}$ を用いて式(10)により評価する。ここで、式(10)の下付き $i0, j0$ は、風上側を示し、粒子速度 $u_{p\xi}, u_{p\eta}$ の正負により対象メッシュを判定する。粒子速度は、図-4に示すように平均粒径を整列に敷き並べた河床を設定し、河床との衝突・反発を考慮して粒子の運動方程式により跳躍解析を行う。各粒径に関して5秒間の跳躍解析を行い、その移動距離から粒子速度を評価する。河床への堆積量の算定に用いる停止割合は、跳躍解析において底面粒子との衝突割合を算定し、衝突割合を停止割合として評価した。

各粒径の高さ Z_{Bk} (粒子の頂点と定義する)、表層割合 P_k は、各粒径の河床からの離脱量 V_p 、河床への堆積量 V_D を用いて式(11)、式(13)により評価する。ここに、 P_0 ：表層下の粒度分布である。また、洪水解析に用いるメッシュごとの平均河床 Z_B は、式(14)で計算する。各粒径の高さの平均値を計算し(右辺第1項)、その高さから平均粒径の半径(右辺第2項)を引いた高さとした。

3. 常願寺川蛇行水路河床変動実験への適用と考察

(1) 蛇行水路実験の概要と解析条件

構築した石礫河川の平面二次元河床変動解析法を、常願寺川で2006年に行われた蛇行水路実験¹⁾の結果に適用し、モデルの検証を行う。蛇行水路実験は、常願寺川

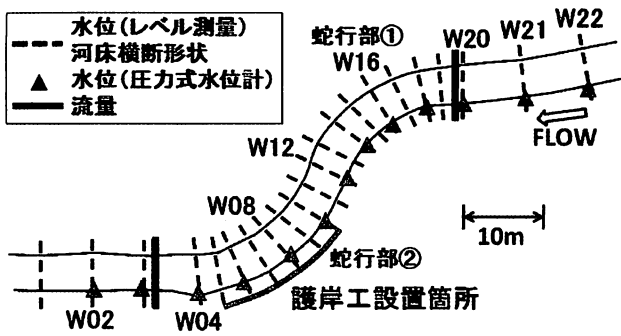


図-5 実験水路平面と各観測位置

表-1 観測流量

case		S1	S2	S3
上流側観測点	観測時刻	10:50	11:16	11:35
	観測流量(m ³ /s)	4.0	6.3	10.9
下流側観測点	観測時刻	10:50	11:15	11:34
	観測流量(m ³ /s)	2.8	5.7	10.1

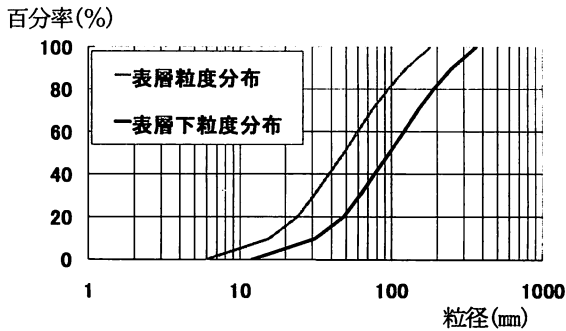


図-6 初期粒度分布

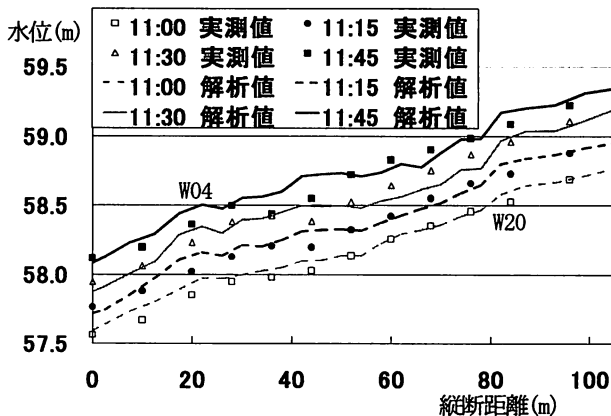


図-7 水位観測値(水位計)と解析水位の比較(左岸)

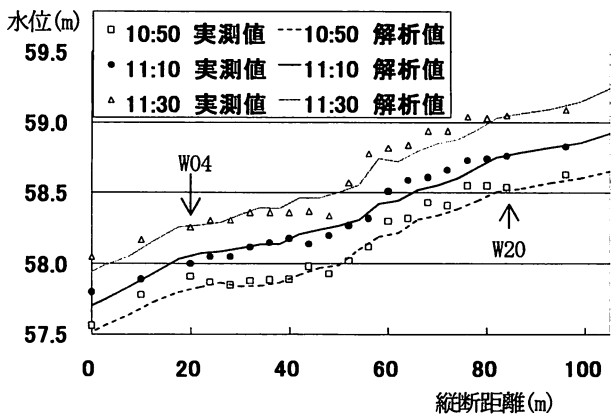


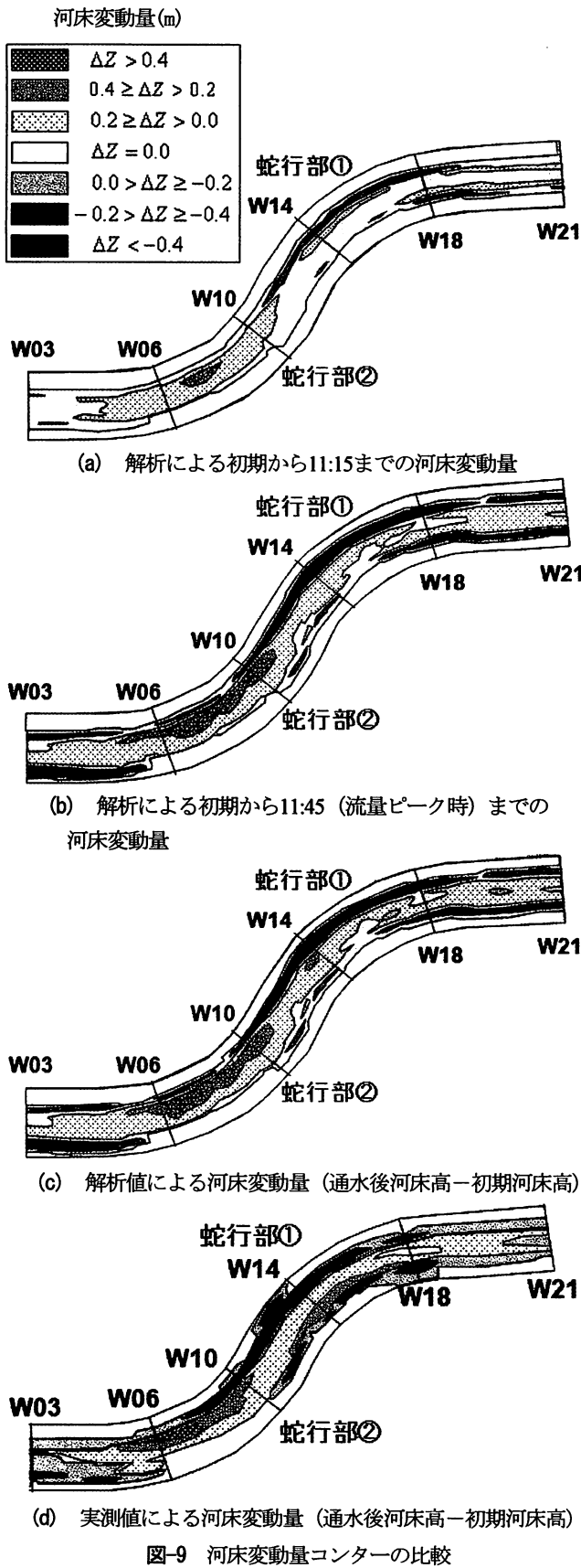
図-8 水位観測値(レベル)と解析水位の比較(右岸)

11.1kmの砂州上に、図-5に示すような2つの蛇行部を有する約120mの水路を作成して行われた。初期の水路幅(底面)は3mで、左右岸に1:1の傾斜が付けられている。上流側蛇行部(蛇行部①)は、自然河岸で形成され、下流側蛇行部(蛇行部②)には、蛇行外岸側に護岸工が設置されている。実験では、上下流2点で流量観測点が設けられ、水位はレベル測量と圧力式水位計を用いて時空間的に密に測定が行われている。また、河床縦横断面形状が密に測られ、河床表面画像解析法およびふるい分け試験により粒度分布の測定が行われている。通水は、堤防決壊実験を含めて3回行われ、今回の検討では、1回目の通水を対象として解析を行う。表-1に、上下流に設置された流量観測点における観測値を示す。段階的に流量を増加させ、最大流量は約11m³/sの通水であった。

解析メッシュは、流下方向約2.5m間隔、横断方向約0.35m間隔で作成した。上下流の水位境界点は、W21とW02とした。解析に与えた表層および表層下の初期粒度分布を図-6に示す。粒度分布形状は、黒田・福岡ら¹⁾の無次元粒度分布をもとに設定した。実験水路は、砂州を素掘りして作成したため、初期の河床表層の粒度分布は小さな材料で構成されていた。そのため、解析に与えた初期の表層粒度分布は、D60を60mmとして設定し、表層下には最大径を350mmとして粒度分布を設定した。解析に用いた粒径は、350mm、270mm、200mm、120mm、80mm、50mm、25mmの7粒径とした。

(2) 解析結果と考察

図-7は、水位計(左岸)で観測された水位観測値と解析水面形(左岸)の比較を示したものである。図-8は、レベル測量により観測された右岸側観測値と解析水面形(右岸)の比較を示す。また、図-9には、実測による河床変動量コンターと、解析による各時刻の河床変動量コンターを示す。図-7、図-8の観測値と解析値の比較より、蛇行部①の外岸側(右岸)で解析水面形が観測水面形を10cm程度下回っているものの、左右岸とも各時刻の解析水面形は観測水面形を概ね再現できている。河床変動量は、図-9(a)、図-9(b)のように、流量規模が大きくなるごとに、蛇行部①で外岸の侵食および蛇行部②で内岸の堆積が大きくなっている。図-9(b)の流量ピーク時と図-9(c)の解析終了時の河床変動量を比較すると、両者の差はほとんどないことが分かる。洪水ピークまでに安定した河床、側岸形状および粒度分布が形成されるため、洪水減水時には、もはや大きな変動が生じない。すなわち、石礫河川では最大流量時に大きな河床材料の移動が最も盛んとなり、それ以後の流量減水時における大きな河床材料の移動はほとんどないため、洪水ピーク時に決まった河床が、流量減水時に維持されることになる。図-9(d)に実測による河床変動量を示す。解析結果である図-9(c)と比較すると、洗掘や堆積の概ねの傾向は再現できている。しかし、蛇行部①の外岸侵食量および内岸



の堆積量が再現できていない箇所がある。図-10に、横断形状の比較を示す。上流側直線部にあたるW20は、河床の堆積および側岸の侵食量が再現できている。蛇行部①にあたるW14では、外岸にあたる右岸側が大きく侵食

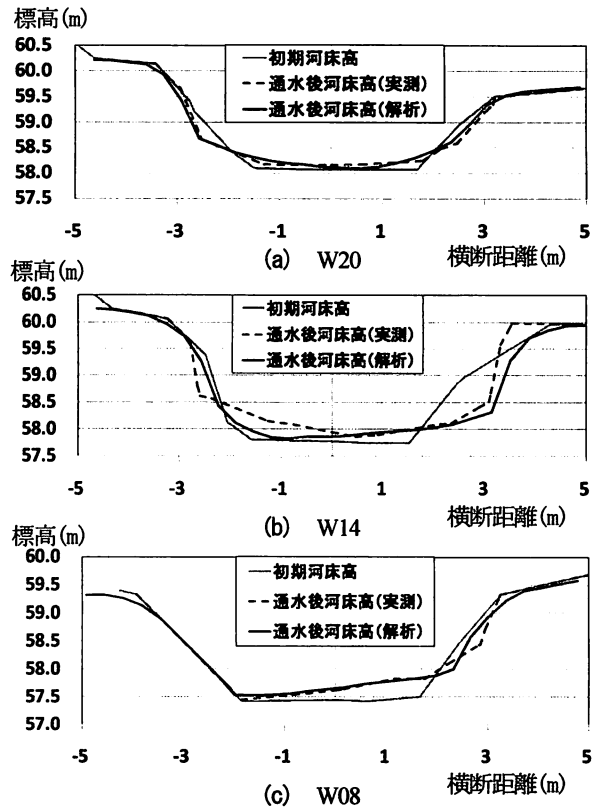


図-10 通水後横断形状の実測値と解析値の比較

をうけ、左岸側の内岸が小さい侵食であることが再現できている。また、その下流のW08における堆積形状も再現できている。しかし、上述したように、外岸の侵食形状が十分には再現できていない。これは、解析モデルにおける粒子速度ベクトルの算定方法に問題があると考えられる。各粒径の粒子速度ベクトルは、その箇所での河床勾配を持つ平坦河床を想定して、跳躍解析による5秒間の移動距離から算定している。このため勾配の小さい場合は速度ベクトルの算定方法は問題がないと考えられるが、30度~60度程度の傾斜が付く側岸部では、粒子速度ベクトルが過大に見積もられ、このような側岸を有する河道については、側岸部における粒子速度の算定方法を改善する必要がある。

図-11に、流量観測値と解析流量ハイドログラフの比較を示す。時々刻々の水面形および河床高が実験値を概ね再現できていることから、解析流量は観測流量を再現している。図-12には、W19 (直線部)とW14 (蛇行部)の粒径別単位幅流砂量の横断分布 (流量ピーク付近の10分間平均値)を示す。直線区間であるW19では、河道中央部の流砂量が、粒径80mmを除いて少なく、傾斜の付く側岸付近で流砂が活発に移動する。河道中心部は、低い流量時に洗掘を受け粗粒化することで、安定な河道を形成する。一方、側岸付近は流量の増加とともに侵食を受けるため、流量ピーク付近では、側岸部の流砂量が河道中心部に比べて多くなる。粒径別に見ると、80mmや120mmの粗石クラスの粒径が活発に移動している。25mmは、周囲の大きな河床材料による遮蔽効果により、

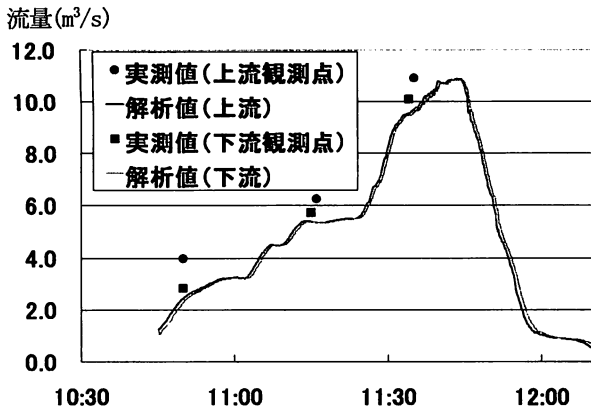
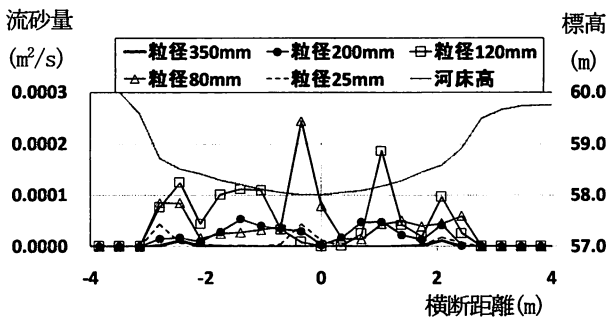
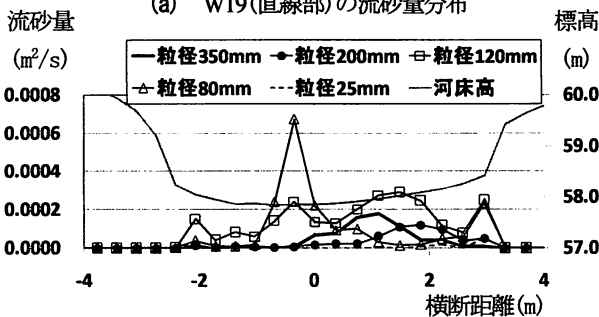


図-11 流量観測値と解析値の比較



(a) W19(直線部)の流砂量分布



(b) W14(蛇行部)の流砂量分布

図-12 各粒径の単位幅流砂量分布

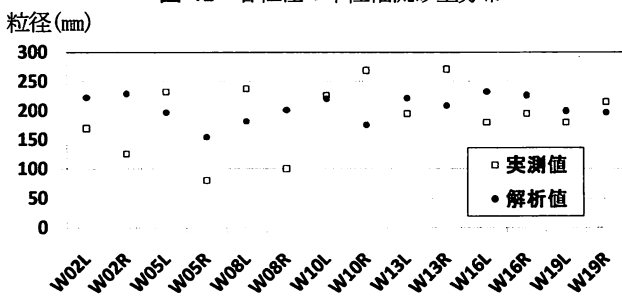


図-13 D80の実測値と解析値の縦断分布の比較

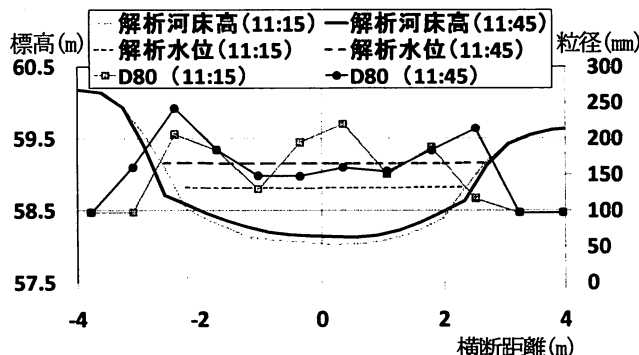


図-14 D80の横断分布 (W20)

流砂量が低くなっている。図-12(b)に示すW14では、蛇行外岸に流砂が集中し、内岸はほとんど移動しないという特徴が表現できている。図-13には、D80の実測値(2回目通水後)と解析値の比較を示す。蛇行部においては、大きく実験値を外れる箇所も見られるが、全体的には、傾向を捉えている。図-14には、D80の横断分布の時間変化を示す。流量の低い段階では、河道中央部が洗掘され、それにより河道中央部が粗粒化する。一方、流量ピーク時では、側岸が侵食を受けることにより側岸から供給された大きな河床材料によって側岸部が粗粒化し、安定な河岸を形成することが捉えられている。以上のように、石礫河川の河床変動および側岸侵食を考慮した平面二次元河床変動解析法は、蛇行水路実験の水面形、河床変動量、流量ハイドロおよび粒度分布を概ね説明できる解析法であることが分かった。

4. 結論

本研究では、石礫河川における河床変動および側岸侵食を考慮した二次元河床変動解析法を構築し、常願寺川蛇行水路実験結果を用いて、その適用性を検証した。その結果、石礫蛇行河川における水面形の時間変化、河床変動量、側岸侵食量および河床材料分布を概ね説明できることを示した。実河川では、複数の滞筋と中州などが存在し、洪水でそれらが洗掘、堆積を生じることで、滞筋変動や河岸際の深掘れを生じている。このような複雑な挙動をする河道においても本解析法の適用性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 長田健吾, 安部友則: 石礫河川の河床安定に果たす石の役割, 水工学論文集, 第52巻, pp. 643-648, 2008.
- 2) 福岡捷二: 土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術-実務上の課題と調査・研究の方向性, 河川技術論文集, 第14巻, pp. 1-6, 2008.
- 3) 福岡捷二: 石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 第44回水工学における夏季研修会講義集, A-1, 2008.
- 4) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の土砂移動機構に着目した新しい1次元河床変動解析法の開発, 水工学論文集, 第52巻, pp. 625-630, 2008.
- 5) 長谷川和義: 非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究, 土木学会論文集, No. 316, pp. 37-50, 1981.
- 6) 塚本洋祐, 福岡捷二, 須賀正志, 澤原和哉, 長田健吾: 石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状, 河川技術論文集, 第14巻, pp. 7-12, 2008.
- 7) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄: 河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 23-39, 1995.

(2009. 4. 9受付)