

石礫蛇行河川の洪水流・河床変動解析法に関する研究

日揮株式会社 正会員 ○前嶋達也
中央大学研究開発機構 正会員 長田健吾

国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所 曾山和宏
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡捷二

1. 研究背景及び目的

石礫河川は、30cmを超える巨石から2mm程度の砂まで非常に幅広い粒径から河床が構成されている。また、河床勾配が急であるため、洪水時の流体力が大きく土砂移動が活発になる。石礫河川の河川管理上、河床変動解析技術は重要な検討課題である。図-1に従来の混合粒径河床変動解析法（河床の連続式、粒径別砂礫の連続式、流砂量式）を石礫河川に適用した解析結果を示す。解析の粒度分布は、実測値に比べて小さく計算されている。従来の解析法では、河床安定に支配的な粒径及び移動する粒径集団が実現象とは異なるため、石礫河川の河床変動及び河床材料分布を十分に再現することはできない。本研究では、底面流速解法を用いた準三次元洪水流解析法¹⁾と石礫河川の河床変動解析法²⁾を組み合わせたモデルを構築し、著者らが2009年に常願寺川で行った石礫複断面蛇行河道実験³⁾に適用し、石礫河川の河床変動解析法の高度化を目的としている。

2. 解析法の概要と解析条件

2009年常願寺川現地実験³⁾は、蛇行長190m、低水路幅3m、左右岸高水敷幅2m、全水路幅8mとなる複断面蛇行河道に異なる流量規模の通水を4回行った。本検討では、河床変動が顕著に生じたCase3（流量8.0m³/s、低水路水深0.8m、水面幅8.0m）を解析対象とする。実験水路は大きく蛇行しており、土砂移動は二次流の影響を強く受けるため、流れの解析には、内田・福岡¹⁾の渦度方程式を用いて底面流速を算出する準三次元洪水流解析法を用いた。底面流速は、水深積分した渦度と水表面流速を用いて(1)式より算出される。

$$u_{bx} = u_{sx} - \Omega_y h, \quad u_{by} = u_{sy} + \Omega_x h \quad (1)$$

ここに、 u_{bx}, u_{by} : x, y 方向の底面流速, u_{sx}, u_{sy} : x, y 方向の水表面流速, Ω_x, Ω_y : x, y 方向の水深平均渦度, h : 水深を表している。河床変動解析は、上述した解析法により求めた流れの情報を用いて一体的に行う。図-2に石礫河川の河床変動解析法の概略図を示す。各粒径に働く抗力を用いて離脱判定を行い、河床からの離脱量 V_{pk} 、及び凹凸を考慮した河床上での停止割合 P_{ck} を算定し、河床への堆積量 V_{Dk} を計算する((2), (3)式)。

$$V_{Pi,j,k} = \varepsilon_{Pi,j,k} \frac{N_{Pi,j,k} \alpha_3 d_k^3}{T_{Pi,j,k}} \quad (2)$$

$$V_{Di,j,k} = P_{Ci,j,k} V_{mi,j,k} \quad (3)$$

ここに、 i, j は格子番号, α_2, α_3 は形状係数, ε_{pk} : 大きな粒径の遮蔽効果を考慮した離脱割合, T_{pk} : 離脱時間, N_p : 各粒径の個数, P_k : 表層割合, d_k : 粒径, V_{mk} : 流砂体積である。また、河床からの離脱量と堆積量を用いて、(4)式に示す各粒径の高さ Z_{Bk} を時々刻々計算することで、時間的に変化する河床表層の凹凸（空隙率）を表現する。流砂量 q_{bx}, q_{by} は、(5)式に示す単位面積当たりの流砂体積 V_m と粒子速度 u_{px}, u_{py} を用いて(6)式より求める。

$$\frac{\partial Z_{Bi,j,k}}{\partial t} = -\frac{\alpha_2 (V_{Pi,j,k} - V_{Di,j,k})}{\alpha_3 P_{i,j,k}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_{mi,j,k}}{\partial t} + \frac{\partial q_{Bxi,j,k}}{\partial \xi} + \frac{\partial q_{Byi,j,k}}{\partial \eta} = V_{Pi,j,k} - V_{Di,j,k} \quad (5)$$

$$q_{Bxi,j,k} = u_{pxi,j,k} V_{Si,j,k}, \quad q_{Byi,j,k} = u_{pyi,j,k} V_{Si,j,k} \quad (6)$$

図-3に解析で用いた粒度分布を示す。実測の表層画像解析と

ふるい分け試験結果（4回目通水（Case4）終了後の表層下0.3m～0.6mのデータ）を参考に表層と下層に分けて与えている。上下流の境界条件は、観測された水位ハイドログラフを用いた。実験では、上流端からの土砂供給は

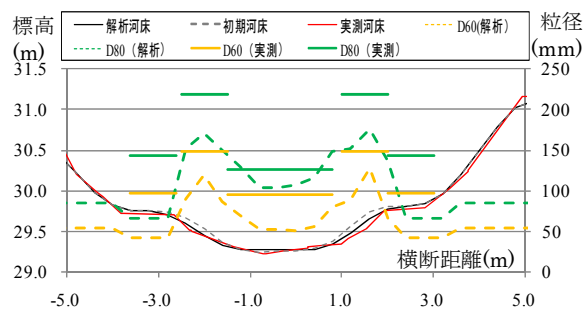


図-1 従来の混合粒径河床変動解析法による解析結果

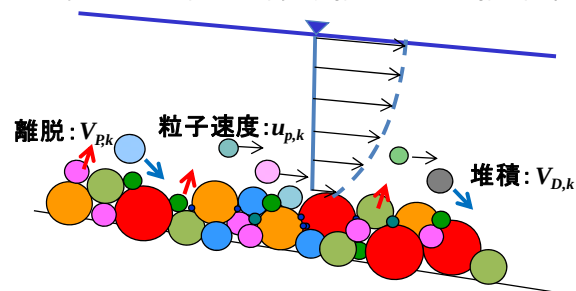


図-2 石礫河床変動解析法

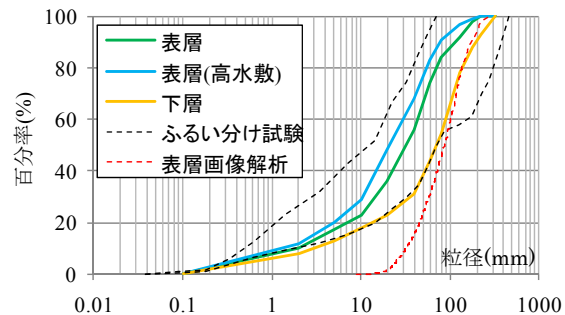


図-3 解析で用いた粒度分布

キーワード 複断面河道, 蛇行, 準三次元洪水流解析, 石礫河床変動解析, 河床材料粒度分布

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1611

ないため、土砂流入のない条件で解析を行った。

3. 解析結果と考察

図-4 に通水開始約 2 時間後の解析水位と観測水位の縦断面図を示す。解析値は、蛇行部における左右岸の水位差を含めて観測水面形と一致している。図-5 に蛇行部の平均流速の横断分布を示す。遠心力により外岸（右岸）に主流が生じる特徴を解析値は再現している。図-6 に直線部（No.4）における河道中央の解析メッシュ内での各粒径の高さ分布を示す。粒径毎に計算される粒子の高さが異なり、大きな粒子は突出する傾向にある。通水時間が長くなると河床材料が粗粒化するため、大きな粒径と小さな粒径の高さの差が大きくなっているのが分かる。320mm 径は、ほとんど移動しない粒径であるため、高さは低い状態となった。実際の河床表面にもこの粒径は出現していないことから、解析結果は妥当であると考えられる。図-7 に通水開始 50 分後の直線部における流砂量の横断分布を示す。130mm や 70mm の石分が主力となり河床を移動している。実験でも 70mm を超える石が河床安定するまでは活発に移動しているのを確認している。図-8 に直線部、蛇行部の解析横断面形状と粒径の横断分布を示す。D₆₀、D₈₀ は河床材料分布の 60%、80% 粒径を示している。直線部では、低水路河岸の侵食とそれに伴う河床材料の粗粒化を良く再現している。蛇行部では、実験中に外岸の流速が加速され二次流が発達するため、外岸高水敷河床が大きく洗掘される。解析値は、蛇行部外岸の河床洗掘及び内岸における洗掘土砂の堆積傾向を捉えている。また、解析の河床材料は、洗掘による粗粒化と内岸の土砂堆積による細粒化により分級が生じている。しかし、蛇行部内岸における細粒土砂の堆積量が十分に再現できていない。各粒径の移動過程（離脱、流下、堆積）は大きな粒径集団（石礫による凹凸）の影響を考慮したモデル化を行っており、小さな粒径集団ほどこの効果を受け流砂量が抑えられる形となっている。しかし、細粒分の移動過程においては、石礫凹凸の間隙をすり抜けながら流下するといった現象も見られるなど、大きな石礫とは移動・停止過程が異なることも考えられるため、細粒分の各移動過程のモデル化については十分に検討する必要がある。石礫河川は、大きな石礫及び河床表層の凹凸が河床安定・土砂移動に重要であり、それら石礫の移動機構については本解析モデルにより再現できることが明らかとなった。

4. 結論

本解析法は、従来の混合粒径河床変動解析法では十分に表現することができなかった河床表層材料の粗粒化及び石礫の移動を説明することができ、石礫蛇行河川の流れ、河床変動及び河床材料分布を再現できること示した。しかし、細粒土砂の移動量は十分に再現できていないため、今後、細粒土砂の移動過程のモデル化に関して検討が必要である。

参考文献 1)内田, 福岡, 水工学論文集, 第 54 巻. 2) 長田, 福岡, 河川技術論文集, 第 15 巻. 3)前嶋, 岩佐ら, 水工学論文集, 第 55 巻.

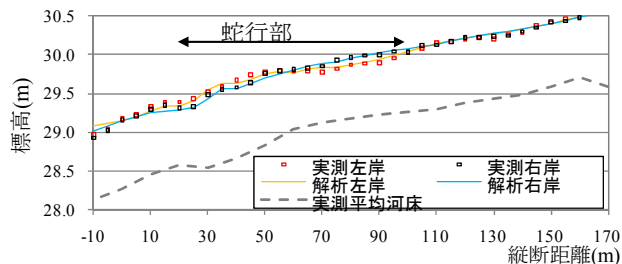


図-4 解析・実測の水位縦断

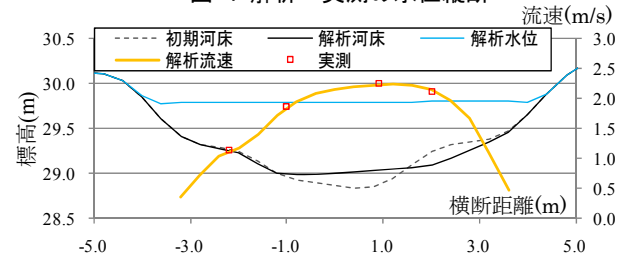


図-5 解析流速分布 (No.9)

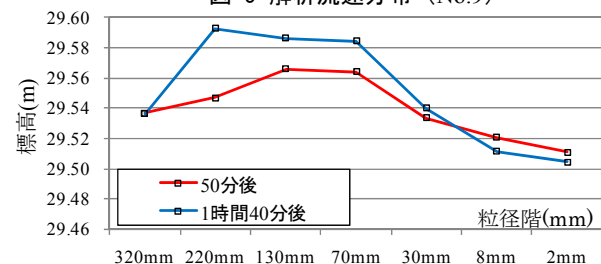


図-6 各粒径の粒子高さ

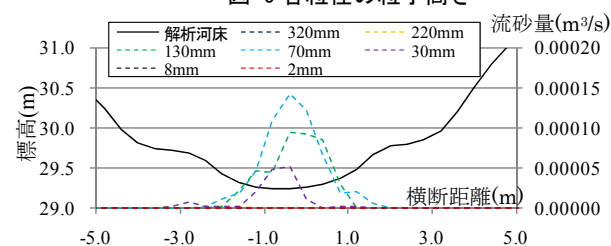
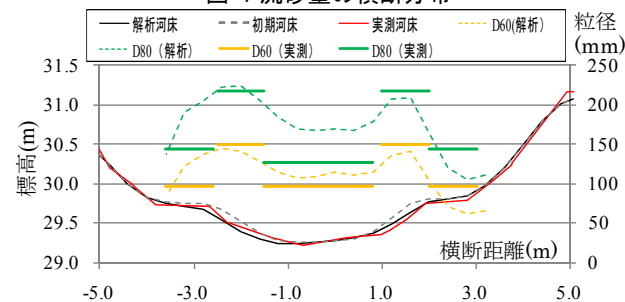
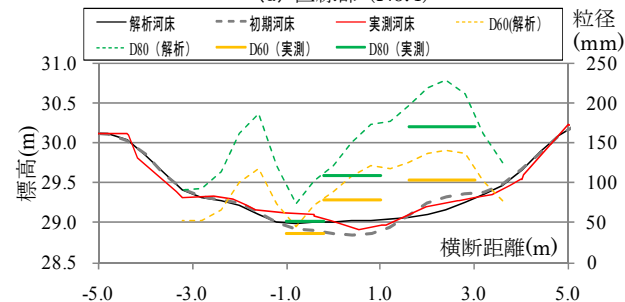


図-7 流砂量の横断分布



(a) 直線部 (No.4)



(b) 直線部 (No.9)

図-8 横断形状と粒径の横断分布