九州工業大学工学部	学生会員	○金屋 諒	九州工業大学大学院	正 会 員	重枝	未玲
九州工業大学名誉教授	フェロー会員	秋山壽一郎	九州工業大学大学院	学生会員	武久	晋太郎

## 1. はじめに

洪水時には,流れの変化に伴い河床位や河床材料,河床形態が変化する.安心・安全な河川管理を行う上で, 洪水時の水位,流量に加え,河床位や河床材料,河床形態の時空間的な変化を把握することが重要である<sup>1)</sup>.本 研究は,以上のような背景を踏まえ,混合砂礫河川を対象に,近似リーマン解法を用いた平面2次元河床変動モデ ルにより,河床低下によるarmouring時の河床位および粒度分布の推定を試みたものである.

## 2. 平面2次元河床変動モデルの概要

図-1の定義図に,平面2次元河 床変動モデルに用いた記号を示す.

流れの基礎方程式は,式(1)の2 次元浅水流方程式である.式中の 河床および摩擦勾配は,それぞれ 式(2)および(3)で,流速係数Ø,粗 度高さksは,それぞれ式(4),式(5) で算定する.

混合砂礫河床の河床変動の基礎 方程式は,全粒径と交換層の概念 に基づく粒径別の流砂の連続の式

<sup>2)</sup>であり、それぞれ式(6)と式(7)で表される.x,y方向の流砂 量は、主流方向の全流砂量 $q_{BT}$ と粒径別流砂量 $q_{Bj}$ とを用いると 式(8)のように表される.また、 $q_{BT}$ と $q_{Bj}$ には式(9)の関係があ る. $q_{Bj}$ の算定には、①遮蔽効果に修正エギアザロフ式を適用 した芦田・道上<sup>3)</sup>の流砂量式と、②礫間に存在する砂の影響を 考慮したWilcok and Crowe<sup>4)</sup>の流砂量式を用いた.交換層厚 $L_a$ は式(10)より算定する.交換層と貯留層との境界での粒度比





図-1 流れと河床変動の定義図

率 $f_{ij}$ はHoey and Ferguson<sup>5</sup>が提案する式(11)を用いた.式(11)では,掃流砂の粒度が河床上昇時に堆積層へ取り残される砂礫に及ぼす影響が考慮されており,その影響は交換層と流砂量の粒度の重み係数a(=0~1)で表される. Toro-Escobar *et. al.*の研究<sup>6</sup>によれば $a \Rightarrow 0.3$ であることが分っている.なお,a=1の場合,堆積層へ取り残される砂礫は交換層の粒度となり平野<sup>2</sup>)の式と一致する.

流れと混合砂礫河床変動の基礎方程式の離散化は、いずれも有限体積法(FVM)に基づき行った.時間積分には Eulerの陽解法を用いた.流れの数値流束には、近似リーマン解法の一つで HLL(Harten, Lax and van Leer)の数値

流束より数値拡散が小さい HLLC(Harten, Lax, van Leer Contact)<sup>7)</sup> を用いた.河床変動の数値流束と粒度比率の数値流束には風上 型の数値流束を用いた.

## 3. モデルの適用

本モデルを粗粒化を伴う河床低下の実験<sup>8</sup>に適用し,河床低下 によるarmouring時の河床位および粒度分布の推定を試みた.解析 は,流砂量式に芦田・道上式<sup>3)</sup>を用いたAM-modelとWilcok and Crowe式<sup>4)</sup>を用いたWC-modelに加え,従来のモデルとの比較を目 的に,流砂量式に芦田・道上式<sup>3)</sup>,交換層と貯留層との境界での 粒度比率f<sub>li</sub>に平野<sup>2)</sup>の式(式(11)で*a*=1)を用いたAMH-modelで行っ





た.

実験は,幅0.8(m),長さ20(m),初期の河床勾配1/100の直線水路で行われており,河床には図-2に示す粒度分布 を持つ混合砂礫が敷き詰められている.上流端からは流量*Q*=0.0314(m<sup>3</sup>/s)の水を流入させ,armouringを伴う河床 低下を生じさせている.測定項目は水位,河床高および粒度分布である.

解析領域を160個の三角セルで分割し、流れの上下流端の境界条件には流量と水位を、河床変動の境界条件には は上流端に流砂量0(m<sup>3</sup>/s)を、下流端には河床高を与えた.

計算にはパラメータ $n_a$ ,  $\lambda_b$ ,  $n_k$ , aの値が必要となる. AM-model, WC-modelでは $n_a$ =1.0,  $\lambda_b$ =0.4,  $n_k$ =3.5, a=0.28, AMH-modelでは $n_a$ =3.5,  $\lambda_b$ =0.4,  $n_k$ =3.5, a=1.0の場合に実測結果との整合性が高いことが確認された. 一方, WC-modelではパラメータを変化させても河床低下の経過時間変化を再現することができず, いずれも定性的には後述する結果と同様な結果となった.

図-3は、上流端から7(m)、10(m)、13(m)地点での河床低下量の経時変化について、解析結果と実験値を示した ものである.実験値では(1) 0~100分では河床が低下し、(2) その割は徐々に低下し、100分以降はほぼ0となり、 河床がarmouringされるプロセスが確認できる.AMとAMH-modelでは実験で観測されたプロセスを的確にとらえ ており、河床低下を十分な精度で再現していることがわかる.一方、WC-modelではAM-modelに比べ河床低下に 長い時間が必要であり、このようなプロセスは再現できてはいないが、時間の経過とともに河床高は実験値に近 づくことがわかる.

図-2は、通水600分後の粒度分布の解析結果と実験値との比較を示したものである.これより、(1) AM、AMH、WC-modelのいずれも粗粒子成分の粒度比率は再現していること、(2) WC-modelでは、上述のように河床低下プロセスを再現できないために、実験値よりも河床材料の粒径が細かく予測されること、(3) 一方、AMとAMH-model については分布は概ね再現しており、特に、AM-modelは、AMH-modelに比べ細粒子成分までも適切に評価していること、などが確認できる.このように、AM-modelであれば適切なパラメータ値を用いることで、河床低下によるarmouringを適切に再現できることが確認された.なお、いずれのモデルも粒度比率が0~1の範囲に収まらないなどの問題は発生しなかった.

## 4. おわりに

本研究では,混合砂礫河川を対象に,有限体積法と近似リーマン解法に基づく平面2次元河床変動モデルを用い, 河床低下によるarmouring時の河床位および粒度分布の推定を試みた.その結果,本モデルは,従来のモデルに比 べ高い精度で,同現象を再現することができるが,交換層と貯留層での粒度比率の求め方に課題が残ることがわ かった.今後はこの点について改善したいと考えている.

**参考文献**:1)国土交通省:河川砂防技術基準調查編,2012.,2) 平野宗夫:土木学会論文報告集,第195号, pp.55-65, 1971., 3) 芦田和男,道上正規:土木学会論文報告集,第206号, pp.59-69, 1972.,4) Wilcock, P. R. and Crowe, J. C.: Surface-based transport model for mixed-sized sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol129. No.2, pp.120-128, 2003., 5) Hoey, T. B. and Ferguson, R. I.: Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: Model development and illustration, *Water Resources and Research*, Vol.30, pp.2251-2260, 1994., 6) Toro-Escobar, C. M., Parker, G., and Paola, C.: Transfer function for the deposition of poorly sorted gravel in response to streambed aggradation, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.34, No.1, pp.35–54, 1996., 7) Toro, E. F.: *Shock-capturing method for free-surface shallow flows*, Wiley, New York, 2001., 8) 芦田和男, 道上 正規:第15回水理講演会公演集, pp.31-36, 1971.