

1 次元河床変動解析を用いた狭窄部土砂動態のモデル化に関する基礎的研究

名古屋大学大学院 学生員 ○戸田世知
 名古屋大学大学院 学生員 寺本敦子
 名古屋大学大学院 正 員 辻本哲郎

1. はじめに 本研究では狭窄部に着目し狭窄部でおこる複雑な現象を簡単に捉え、総合土砂管理に生かせるシステムを構築することを目指す。洪水時において狭窄部の上流では堰上げが生じ土砂が堆積し、下流への流出土砂量は減少する。一方、狭窄部内の河床が洗掘されると下流への土砂供給は増加する。また、流量低減時や先行した大洪水により過大に洗掘されている場合には狭窄部内の河床が埋め戻され、下流への土砂供給は減少する。このような狭窄部による供給土砂量の変化は下流の河床上昇、または低下を引き起こし、護岸や水制、橋脚などでの局所洗掘や砂州波高の増大に影響を及ぼしかねない。本研究では、狭窄部での微視的現象を巨視的に見た流砂系でのモデリングに取り入れる研究の一環として、まずモデル化した狭窄部を用いて一次元数値解析を行い、一定流量通水時の狭窄部内の河床変動を通して下流河道への供給土砂量についての検討を行う。

2. 狭窄部のモデル化 図1に示すように sine-curve を用いて実験室スケールでの狭窄部をモデル化し、矩形断面を用い、流路幅 $B=0.1\text{m}$ 、河床粒径 $d=2\text{mm}$ とした。また、収縮率 $B_g/B=0.3, 0.5, 0.7$ とし、狭窄部の長さ $L=3\sim 6\text{m}$ 、勾配 $I=3/1000\sim 1/50$ の間で変化させた。ただし、本狭窄部の横断面形状は対称であるため数値解析では流路の半断面に対して行う。

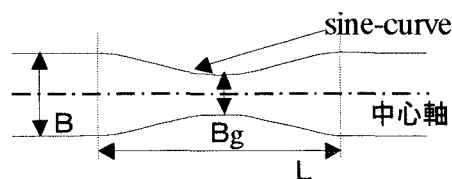


図1 モデル化した狭窄部

3. 数値解析の方法 流れの計算は、非定常項を含む連続式、運動方程式を基礎式とし、collocate 格子を用いた有限体積法により離散化して解いた。河床変動は掃流砂のみを対象とし、流砂の連続式に掃流砂量についての芦田・道上式を用いて算出した。

4. 狭窄部での現象 一次元数値解析により得られた狭窄部の現象は以下に述べる特性を持ち、これは筆者ら¹⁾の室内実験の結果をよく再現している。平坦河床に一定流量通水した場合、狭窄部の上流で水位の堰上げが起こり、狭窄部内の河床が洗掘され下流へ土砂を排出する。洗掘により狭窄部での流水断面積を確保すると上流側の水位の堰上げは解消され、狭窄部内での流下方向の掃流力の変化が小さくなり洗掘量が減少し、最終的に動的平衡状態に至る。ただし、流路幅 B での無次元掃流力 τ_0 が限界無次元掃流力 τ_c に近い流量では、狭窄部の上流で顕著な堰上げが生じず、狭窄部の洗掘により逆に上流での河床低下を引き起こし、狭窄部内は安定しにくい。次に、流量 Q_1 で形成された平衡河床に流量 Q_2 を通水したケースで、 $Q_1 > Q_2$ においては平坦河床からの遷移過程と同様な現象が生じる。一方、 $Q_1 < Q_2$ では通水後における上流での堰上げは生じず、また、狭窄部への流入土砂は洗掘孔に堆積し、河床の埋め戻しが生じる。両ケースで形成される最終河床形状は初期形状によらず同じであり、流量、狭窄部平面形状、勾配により動的平衡形状を持つと言える。つまり、初期河床が通水される流量の動的平衡河床に比べ洗掘されているかにより、狭窄部での現象が異なり、下流への流出土砂量 $Q_{\text{out}}(t)$ は大きく変化する。この為、動的平衡河床を把握することが重要となる。また、狭窄部の現象による下流への流出土砂量の時間変化とその変化の時間スケールも把握する必要がある。

5. 動的平衡形状 各流量で形成される狭窄部内の平衡河床形状について、平坦河床からの河床洗掘深 $\Delta Z_b(x)$ を最大洗掘深 D_c で、縦断距離 x を狭窄部長さ L で割ることで無次元化したものを比較すると、流量・河床勾配に関わらず、収縮率ごとにほぼ一致した。つまり、平衡状態での無次元河床形状は狭窄部の平面形状に依存していると言える。よって、狭窄部の形状に応じた無次元河床形状が得られれば、流量・河床勾配ごとの最大洗掘深 D_c を求めることで各平衡形状が分り、平衡形状における平坦河床からの体積変化量 V_c も得られる。

5.1 最大洗掘深 D_c 最大洗掘深 D_c は、道上らの研究²⁾を参考に考え、道上らの提案式の τ_0 が τ_c に近い領域への拡張を行う。最大洗掘深 D_c は、流砂量式、Manning の式、エネルギー保存式からそれぞれ得られる式(1), (2),

(3)の3式からなる連立方程式を解くことにより算出できる。

$$\left\{ \left(\frac{u_{*c}}{u_{*0}} \right)^2 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*0}} \right\} \frac{u_{*c}}{u_{*0}} = \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*0}} \right) \frac{B_0}{B_g} \dots (1) \quad \frac{h_g}{h_0} = \left(\frac{B_0 u_{*0}}{B_g u_{*c}} \right)^{\frac{6}{7}} \dots (2)$$

$$\frac{D_e}{h_0} = \frac{\alpha Fr_0^2}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{B_0}{B_g} \right)^2 \left(\frac{h_0}{h_g} \right)^2 \right\} + \left\{ 1 - \left(\frac{h_0}{h_g} \right) \right\} \dots (3)$$

ここで, u_* : 摩擦速度, u_{*c} : 限界掃流力に対する摩擦速度, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, B : 流路幅, h : 水深, α : エネルギー補正係数とした。また, 添え字の0及びgは狭窄部外での等流状態及び狭窄部内での値を意味する。図2に(1)~(3)式から得られる最大洗掘深 D_e と Fr 数の関係を示す。数値解析結果では Fr 数が大きな範囲では τ_{*c}/τ_{*0} が小さいほど D_e/h_0 は大きくなり, 逆に Fr 数が小さな範囲では τ_{*c}/τ_{*0} が大きいほど D_e/h_0 は大きくなっている。理論式でも τ_{*c}/τ_{*0} の項を考慮することでこの傾向を表現している。よって, 理論式では τ_{*c}/τ_{*0} を考慮する必要がある, 式(1)~(3)を解くことにより最大洗掘深 D_e を求めることができる。

6. 動的平衡への体積変化 狭窄部での体積変化量の時間変化 $dV(t)/dt$ は, 狭窄部からの流出土砂量 Q_{out} と狭窄部への流入土砂量 Q_{in} の差である。流出土砂量は狭窄部での状態に依存して単純に算出できないため流出土砂量を体積変化量 $V(t)$ の時間変化量と流入土砂量として捉える。まず体積変化量の時間変化 $dV(t)/dt$ の算出が必要となるが, $d(V(t)/V_e)/dt$ を時間 t の指数関数で近似することを前程として, 本研究では平坦河床から平衡形状への遷移過程における体積変化量 $V(t)$ の時間変化を式(4)の指数関数を用いて近似を試みる。近似では, $V/V_e=99\%$ 以下の範囲に対し90%以下で重み付けし, 数値計算結果との誤差が最小となるようにした。

$$\frac{V(t)}{V_e} = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{T_e} \right)^\alpha \right\} \dots (4)$$

図3に V/V_e と t/T_e の関係及び近似関数を示す。式中の α , T_e については近似式(4)のパラメータであり, 数値解析結果を用いて求めた。その結果 α は0.4周辺に分布し, 河床勾配・収縮率による一定の傾向がないことから $\alpha=0.4$ とした。また, T_e が動的平衡状態への遷移の時間スケールを決めるパラメータで土砂流出現象を知る際には重要な値となり, 収縮率, 水理量により決定される。図4に示すように T_e は τ_{*c}/τ_{*0} が1付近では急に大きくなるが, それ以外では τ_{*c}/τ_{*0} に対して $\ln T_e$ は直線的に変化し, その傾きは収縮率・河床勾配によらずほぼ一定となっており, T_e は τ_{*c}/τ_{*0} と収縮率, 河床勾配によって決定できる値となる。しかし, $\tau_{*c}/\tau_{*0}=1$ 周辺では河床洗掘の遷移過程異なるため, T_e が急に大きくなり, それら以外の τ_{*c}/τ_{*0} での傾向から外れた。

7. おわりに 本論文では, 1次元河床変動解析を行うことにより狭窄部の動的平衡形状, 動的平衡状態到達までの狭窄部内体積変化量の時間変化の特性を明らかにした。また狭窄部の下流への流出土砂量を求めるための研究過程であるが, このように現象をモデル化し定式化することにより微視的な狭窄部の土砂流出現象を巨視的に捉えることができると考えている。

<参考文献>

- 1) 寺本・辻本・戸田: 狭窄部の流出調節機能に関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演概要集, II-99, pp.198-199, 2001
- 2) M. Michiue, K. Suzuki, O. Hinokidani: Formation of Low-Water Bed by Spur-Dikes in Alluvial Channel, Proc.4th APD-IAHR, pp.685-693, 1984

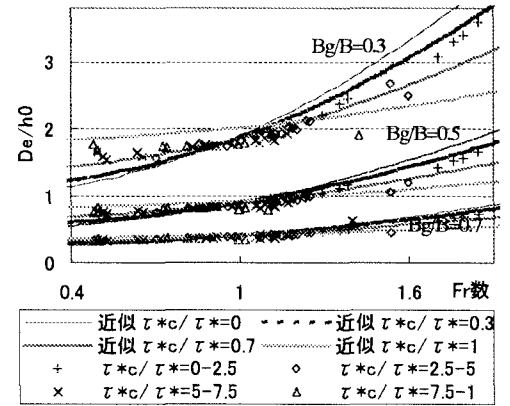


図2 最大洗掘深 D_e と Fr 数の関係

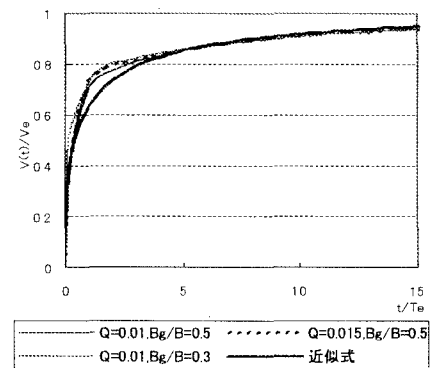


図3 体積変化の時間変化

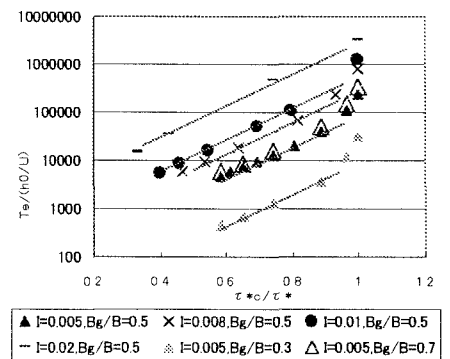


図4 T_e と τ_{*c}/τ_{*0} との関係