

交互砂州の形成過程におけるエネルギー損失の変化

新潟大学工学部建設学科社会基盤工学コース
新潟大学大学院自然科学研究科
新潟大学災害・復興科学研究所

学生員○齋藤 選
学生員 五十嵐 拓実
正員 安田 浩保

1. はじめに

水底面の土砂を流水が流送できる物理状態においては水底面に水深規模や流路幅規模の河床波と呼ばれる周期的な起伏が自律的に形成される。このような周期形状の発生と発達の詳しい物理機構は分かっていない。また、結晶構造から細胞まで様々な物理と生物において自己組織化現象が存在すること¹⁾が知られ、交互砂州は、同一の物理条件においては同一の周期形状が形成されることなどから自己組織化現象であることが推測される。しかし、現時点ではそのことは明確にされていない。

一般に河床波が形成されると、その周期的な形状により形状抵抗が増減することが知られている。砂堆などの小規模河床波がもたらす形状抵抗²⁾については詳しく調べられている。一方で、交互砂州などの中規模河床波が形状抵抗を発現するかどうかの議論の前例は著者らの知る限りない。自己組織化現象の特徴の一つは、任意の初期状態から始動した自己組織化現象はエネルギーを減少させながらエネルギー最小状態に到達することである。中規模河床波の形成とその時の形状抵抗の関係性が明らかになれば、交互砂州などの中規模河床波は自己組織化現象として形成されるという論証の一つが得られる。

本研究では、交互砂州が自己組織化現象であるかどうかを判断する第一段階として、模型実験と数値解析の両者から交互砂州が自律的に形成される過程におけるエネルギー損失の変化について調べた。

2. 模型実験による交互砂州の発達過程における粗度係数の推定

本章では、まず、以下の水理条件を与え、平坦床から交互砂州を自律的に形成する模型実験を行った。つぎに、この模型実験から得られた水深を再現するように粗度係数を試行錯誤で変化させる数値解析を行い、数値解析と模型実験との水深が最小となる粗度係数を推定した。

(1) 模型実験の概要

本研究の模型実験では全長 12m、水路幅 0.45m、水路床勾配は 1/200 の直線水路を使用した。流量は 1.7 l/s を与え、初期の水深は約 1cm である。河床材料には平均粒径が 0.76 mm の 4 号珪砂を用いた。無次元掃流力は 0.08、黒木・岸³⁾の領域区分における川幅水深比は 11.1 となり、同領域区分においては交互砂州の発生領域となる。実験中は上流端の底面勾配を維持するために 20 分毎に 600g の給砂を行った。これらの模型実験における水面と水底の曲面形状は、星野ら⁵⁾が開発した計測法によって 10 分ごとに 1cm 四方の解像度で計測した。

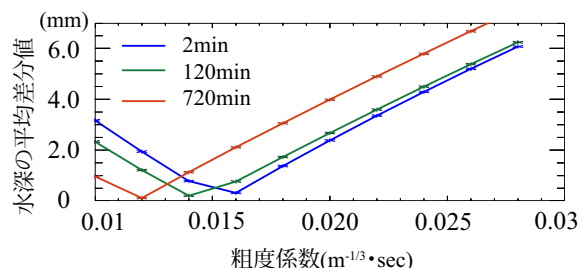


図-1 模型実験と数値解析の水深差分と粗度係数の関係

(2) 粗度係数の逆推定

移動床水理の未知数は流速、水深、底面高、粗度係数の 4 つであることに對し、移動床水理の支配方程式は運動の式と流水と流砂の連続の式の 3 つだけである。このため、粗度係数は既知とするか試行錯誤により決定することが一般的である。これに對し、本研究では、計測により水深と底面高が得られている。一般には未知である水深が計測により既知であることから、この水深が再現されるように粗度係数の調整を繰り返せば、交互砂州の発達過程毎での粗度係数を逆推定できる。そこで、本研究では、平面 2 次元の流れと河床変動のソルバーである Nays2D⁴⁾ を用い、粗度係数を 0.010 から 0.028 まで 0.002 刻みで変化させた固定床水理解析を行い、模型実験とこの水理解析から得た水深分布が最小となる粗度係数を求めた。

これらの水理解析の結果を図-1 と図-2 に示した。図-1 は横軸が粗度係数、縦軸が水理解析と模型実験の水深の差分を示し、青線が通水開始から 2 分後、緑線が 120 分後、赤線が 720 分後である。同図の縦軸の水深の差分は、流下方向 7m と流路幅方向 0.45m の計測範囲内の平面的な平均値である。また、図-2 の中段の図は通水開始から模型実験と水理解析の水深の差分の平面図を示している。これらの図から、いずれの時刻においても水深の差分が最小となる一つの粗度係数が存在する分かる。この時の模型実験と水理解析の水深の差分は最大でも ±3mm であった。また、これらの図から、各時刻における計測範囲内の全体で平均した水深の差分が最小となる時の粗度係数は、通水開始 2 分では 0.016、120 分後では 0.014、720 分後では 0.012 と次第に減少していることが分かった。このことは、平坦床に比べ、交互砂州の形成時のほうが水路全体としては 25% ほど流れやすい物理状態へ遷移していることを示唆する。

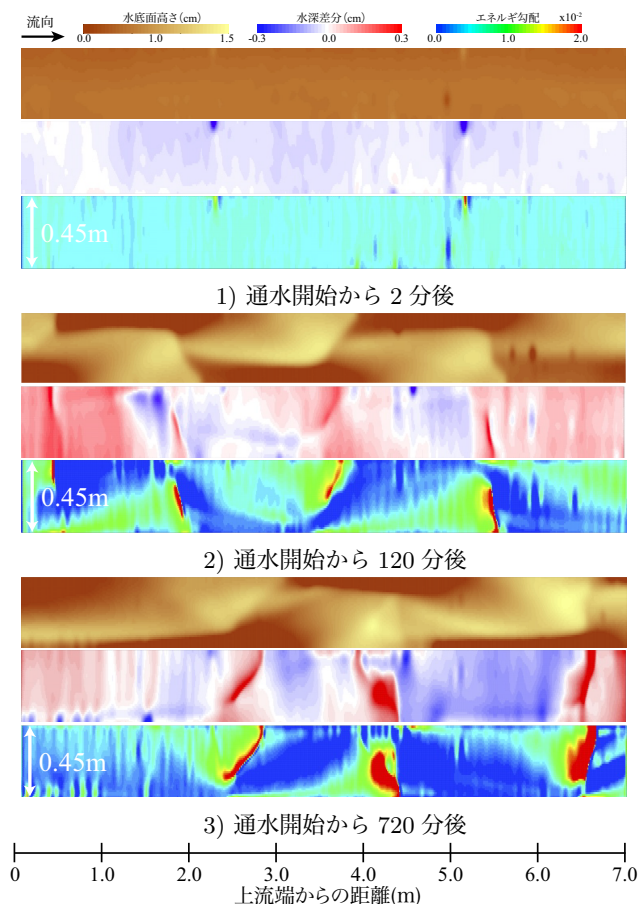


図-2 上図:水底面高さの計測値, 中図:水深の計測値と計算値の差分値, 下図:エネルギー勾配

3. 交互砂州の発達過程における総エネルギー損失の推定

自己組織化現象である場合はエネルギー最小状態に移行する普遍的な性質がある。交互砂州の形成が自己組織化現象であるかどうかを判断するために、交互砂州の発達に伴う総エネルギー損失の変化について計測値と計算値を用いて調べた。

(1) 総エネルギー損失の推定手法

前章で得られた計測値と計算値を用いて総エネルギー損失を推定した。計算値は水深の計測値と計算値の差分が最小となる粗度係数に設定した時の計算結果を使用した。総エネルギー損失を推定するためにエネルギー勾配を求めた。エネルギー勾配は各計算点毎の全水頭を算出し、流下方向の前後断面における全水頭を用いて、中央差分により算出した。全水頭の内訳は、位置水頭は計測値の水底位、圧力水頭と速度水頭は計算値から求めた水深と流速である。

(2) 交互砂州の発達に伴う総エネルギー損失の変化

図-2 の下図に通水開始から 2 分後、120 分後、720 分後におけるエネルギー勾配の分布を示した。通水開始 2 分後は、全区間で一様に 0.005 程度であり、水路床勾配とほぼ平行である。通水開始 120 分後は、交互砂州の形成によりエネルギー勾配の分布が偏在していることが分かる。滞筋部はエネルギー勾配が小さく、交互砂州の堆積部ではエネルギー勾配が大きい傾向であることがわかる。この傾向は、通水開始 720 分後に至るまで継続し、より明瞭と

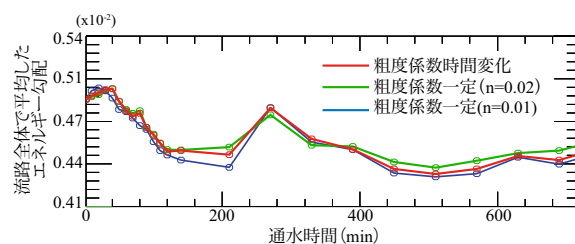


図-3 エネルギー損失の空間分布

なった。全区間での傾向に着目すると、大部分が初期の水色から青色へと変化しており、初期状態と比べてエネルギー勾配が小さくなったことが分かる。

図-3 に水路全体における平均エネルギー勾配の時間変化を赤色の線で示した。通水初期からエネルギー勾配は減少し、交互砂州の形状が明瞭となった通水開始 120 分以降は多少の変動はあるものの、ほぼ一定の値を推移していることが分かる。

以上より、交互砂州の形成に伴いエネルギー勾配が減少していることが示された。このエネルギー勾配の減少は、エネルギー損失の減少と同義である。つまり、交互砂州の形成に伴う総エネルギー損失の減少が示され、同現象が自己組織化現象であることが示唆された。

(3) 総エネルギー損失における形状抵抗の規模の推定

総エネルギー損失は一般に底面の粗度による摩擦損失と形状抵抗の和として考えられるが、その内訳については明らかにならない。そこで、前章の粗度係数を変化させた場合と、粗度係数を一定値にした時の総エネルギー損失を比較し、底面の粗度による摩擦損失と砂州形状による形状損失の規模を推定した。図-3 に各条件毎の水路全体における平均エネルギー勾配の時間変化を示した。同図から粗度係数が一定値の条件と比較しても、両者の違いは小さいことが分かる。このことから、粗度係数の時間変化による摩擦損失の変化は総エネルギー損失の減少の規模に比べて小さいと言える。つまり、総エネルギー損失は交互砂州の形成による形状損失の変化が大部分であることが示された。

4. 結論

本研究では、模型実験の計測値と水理解析の両者を用い、平坦床から交互砂州の形成に至るまでの総エネルギー損失の変化を調べた。その結果、交互砂州の形成に伴って総エネルギー損失が減少していることから、同現象は自己組織化現象であることが示唆された。さらに、エネルギー損失の内訳を調べた結果、その大部分は形状損失の変化によるものであることが示された。

参考文献

- Whitesides et al, Science, Vol.295, 2002
- 岸力, 黒木幹男: 移動床流における河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1973.
- 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第 342 号, pp.87-96, 1984.
- 北海道河川財団, <http://i-ric.org>
- 星野剛, 安田浩保, 倉橋将幸: 交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発, 応用力学論文集特集号, 2017(投稿中).