

砂州の安定性解析の妥当性検証

新潟大学大学院自然科学研究科 ○学生員 茂木 大知
新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 関 翔平
新潟大学災害・復興科学研究 正会員 安田 浩保
新潟大学理学部理学科 非会員 早坂 圭司
新潟大学工学部工学科 非会員 村松 正吾

1 はじめに

直線流路化された河川では、波高と波長の規模がそれぞれ水深規模と川幅規模である交互(自由)砂州が形成される。交互砂州の存在は、その上を流れる流水への影響や流路変動、植生の繁茂などと関連が深いため、工学的に重要な問題である。これまで、その形成機構の解明のため、解析的手法や数値計算、地形学的方法、模型実験などの手法により科学的に研究されてきた。

交互砂州の形成条件の特定には、二次元浅水流式と Exner 式を用いた数理モデルによる安定性解析が行われてきた。安定性解析は、川幅の 1/2 と等流水深の比で表される β が臨界値を超えると、底面の生来的な不安定性により、微小な 3 次元擾乱から砂州のような幾何学形状が発達することを示す。線形の安定性解析^{1),2)}は、パラメータ空間において安定条件を規定する水理量の予測と、発達する砂州の波長や波の移流速度を予測できる。しかし、安定性解析により予測された波長や波速の妥当性の検証は、計測手法が制約となり、実河川や模型実験における計測値との比較は十分に行われていない。

茂木ら³⁾は、模型水路における底面に砂州が形成・発達する過程を対象とした、時間と空間に高分解能な水面と底面の非接触計測手法である Stream Tomography(ST)を開発した。この計測値を用いて、石原・安田⁴⁾は砂州が形成する条件における底面の移動速度の空間分布を定量化を可能とし、安定性解析によって推定される波速の妥当性を確認した。しかし、安定性解析の推定する波数と波速の両者については、ST の実測値のような高密度計測に基づく妥当性の検証は行われてない。そこで、本研究では、砂州が形成される条件における模型実験を実施し、その計測結果を用いて安定性解析が推定する波数と波速の妥当性を検証した。

2 模型実験

本研究では、安定性解析の妥当性検証を目的として、次に示す模型実験を実施した。その後、実験の計測データを

用いて波数解析と底面速度の算定し、線形安定性解析の推定値と比較した。

2.1 実験条件

本研究における模型実験は、12×0.45 m (全長×幅)、勾配 1/100 の矩形断面水路を用いた。水路床には、平均粒径 0.76 mm の珪砂を 5 cm の厚さで平坦に敷設した。水理条件は、底面に交互砂州が発達する条件とするため、上流端から供給される流量を 2.5 L/s とした。この時、砂州の発生の指標となる川幅水深比²⁾は 15.6 である。実験は、ST を用いて水面と底面を 1 分間隔で計測し、再現性の確保のため、この条件の実験を 5 回繰り返して実施した。通水時間は、初回実験において十分に交互砂州が底面に確認された 60 分までとした。

図-1 に、通水開始から 50 分における底面の計測結果を示す。底面側岸付近の洗掘部において、水深が測定範囲を超えたことで欠測が発生したが、後述する波数解析においては当該部分は避けたため影響はない。図からは、底面において、縦断的に左右交互に洗掘と堆積を繰り返す交互砂州が明瞭に形成されていることが確認できる。また、水面についても、底面の砂州の形状に対応するような縦断的な分布が確認できる。

2.2 波数解析結果

図-2 に、上述の実験条件を与えた安定性解析の neutral curve と実験から得られた水面と底面の 1D 波数解析結果を示す。図上段の安定性解析は、Colombini⁵⁾が示した係数行列を解析に解くことで実施した。また、図中には、赤点で推定された卓越波数を示す。図下段に示す 1D 波数解析は、実験における各時刻の水面・底面の計測結果において、測定範囲 0.5 m から 6.5 m の範囲の壁面付近を避けた 25 縦断測線を対象とした。各時刻毎に一般性の高い波数解析結果を得るため、5 通水の各時刻における解析結果より、その平均値を得た。図中の白点線は、安定性解析によって推定された卓越波数である。

図-2 の下段の様に、水面と底面における波数解析結果の時間変化はスペクトログラムで示す。スペクトログラムは、

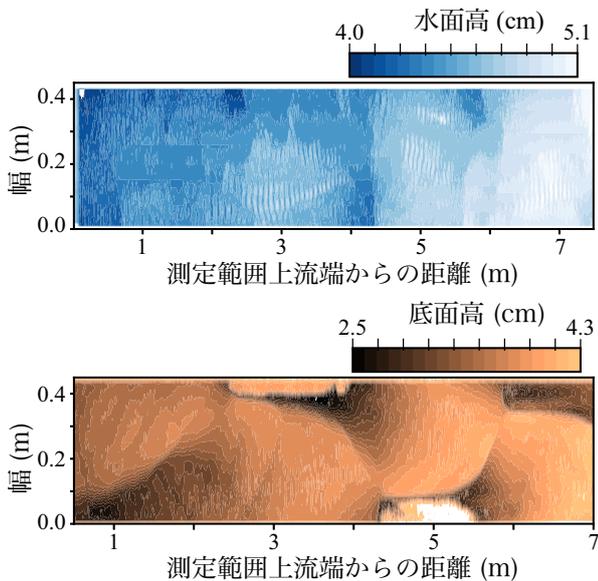


図-1 通水開始から 50 分時点の水面及び底面の計測結果

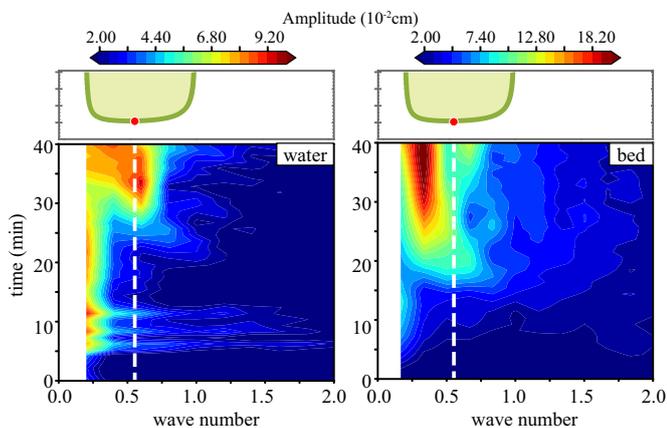


図-2 (上) 安定性解析によって得られた neutral curve. (下) 水面及び底面における波数解析結果

時間軸方向に暖色系へ変化する波数が発達する。水面と底面ので同様の波数が発達していることが確認できるが、発達の様子は異なる。上段の安定性解析結果と比較すると、水面・底面のどちらも発達する波数の範囲は安定性解析で推定された範囲内であった。特に、水面においては、安定性解析で推定された最大卓越波数と波数解析において発達する波数が合致した。その一方で、実際に底面に発達する波数は推定の最大卓越波数と偏差を持つようであり、底面においては実験の方が波長が長い。水面と底面の波数の対応関係を見ると、底面において波数の発達が先行し、それに追従するように水面に同様の波数が発達するようである。また、発達する振幅は、水面に対して底面は 1.5 倍程度大きい。

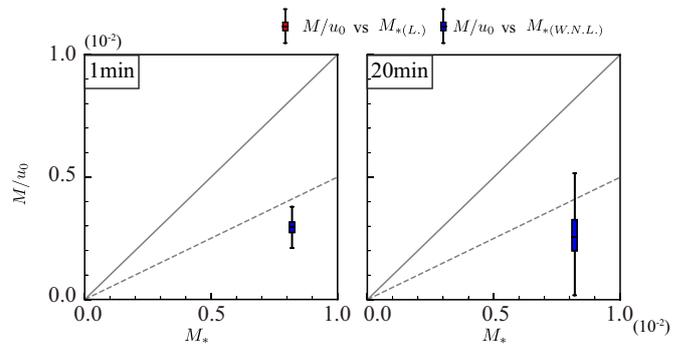


図-3 安定性解析によって得られた波速 M^* (線形/非線形) と計測値から得られた底面の移動速度 M/u_0 の比較。 M^* は線形と非線形で同一の値である。

2.3 底面の移動速度

図-3 に、線形と弱非線形の安定性解析によって推定される波速と、石原・安田⁴⁾の ST の計測値を用いて算定した底面の移動速度を示す。初期と通水中期のどちらにおいても両者は同じオーダーであり、安定性解析による結果は実現象を非常によく推定できることが確認された。また、この比較結果は、既往の模型実験を対象とした研究と同様であった。

3 おわりに

本研究では、砂州を対象とした模型実験における水面と底面の計測値から得た波数解析の結果を用いて安定性解析の妥当性を検証した。その結果、安定性解析が推定する波数と波速の両者とも、計測値と良く整合することが確認された。ただし、この整合性は水面の解析結果に限定され、底面との整合性の確認は今後の課題である。

参考文献

- 1) T. Hayashi, Y. Ozaki, and K. Onishi, On the mechanism of occurrence of three-dimensional bed configurations, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 26, 17-24, 1982.
- 2) 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, No. 342, pp.87-96, 1984.
- 3) Moteki D., Murai T., Hoshino H., Yasuda H., Muramatsu S., Hayasaka K., Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys.Fluids*, doi.org/10.1063/5.0085574, 2022.
- 4) Ishihara M., Yasuda H., On the migrating speed of free alternate bars, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, doi.org/10.1029/2021JF006485, 2022.
- 5) M. Colombini, G. Seminara, and M. Tubino, Finite-amplitude alternate bars, *J. Fluid Mech.*, 181, 213-232, 1987.