3次元測量データを用いた横断構造物の予防保全に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 6
担当チーム：水工チーム
研究担当者：猪股広典、小関博司

【要旨】
近年、ALB 測量データをはじめとして河道及び構造物の 3 次元測量データが取得されてきており、橋梁や堰をはじめとした横断構造物について、これらのデータを活用した効率的な管理が求められている。本研究では最初に、横断構造物の被災事例・対策事例について文献調査した。次に、3 次元測量データを活用して橋脚を含む河道の 3 次元河床変動解析を試行し、現実的な計算時間で計算を実行するための課題を整理した。さらに、二極化が生じている河道を対象として、ラジコンボートに搭載した ADCP による澪筋河床高の計測を行った。
キーワード：床止め工、橋脚、水力発電ダム、三次元河床変動解析、Acoustic Doppler Current Profiler

1. はじめに

近年、直轄河川において ALB 測量による定期縦横断測量が行われるようになってきており、河川管理業務の効率化・高度化を目的として三次元地形データを基礎資料とした三次元管内図が作成されている[例えば 1)]。これらのデータを活用することで、堰、床止め、橋梁をはじめとした河川横断構造物の維持管理を効率的に実施することが考えられる。本研究課題では、上記背景を踏まえ、次の達成目標を掲げて研究を行った。

① 横断構造物における河床低下・洗掘発生事例に関するメカニズム解明
②3 次元測量データを用いた河床変動計算条件の合理的設定方法の提示
③ 予防保全対策（点検方法、頻度、工法等）の具体化

2. 横断構造物における河床低下・洗掘発生事例

横断構造物のうち、床止め工、橋梁、発電ダムを対象として、河床低下や局所洗掘等による被災事例および対策事例を収集し、被災メカニズムや対策工について調査した。

床止め工については、山本ら [2)]が移動床の水理模型実験を用いて、跳水の発生位置や護床工ブロックの流出状況を整理した。また、楊ら [3)]が非圧縮気液二相流 VOF モデルと多孔物質中の流れを扱う Darcy-Forchheimer 則によって構成される鉛直二次元モデルを用いて山本らの実験結果の再現と現象の詳細な把握を行い、護床工ブロックの形状を検討した。

橋梁については、猪股ら [4)]は近年発生した橋脚の洗掘被災について複数の事例を調査した。その結果、砂利河川で河道の二極化が生じている箇所における被災事例が多いことを指摘するとともに、予防保全においては、橋脚上流の局所洗掘だけでなく橋梁上下流の河道が河床低下しているかを把握することも重要であるとしている。

発電ダムについては、Kitamura et al.[5)]が下流で局所洗掘が生じている水力発電ダムを対象に移動床水理実験及び三次元流況解析を実施し、ゲートの運用方法に起因した平面渦によってダム下流の局所洗掘が引き起こされることを示すとともに、ゲート運用の変更による洗掘緩和効果、対策工について検討した。

以上の文献調査から、下記のことが分かった。

- 床止め工や発電ダムのような流水が越流する形式の構造物については、跳水位置による洗掘状況の把握が構造物の維持管理の観点から重要であることが分かった。また橋梁については、橋脚上流側の局所洗掘だけでなく、セグメントスケールの河床低下の把握が重要であった。
- 横断構造物下流の洗掘現象メカニズムの解明や対策工の検討はこれまでも実施されてきていることが分かるとともに、特に三次元的な流れを伴う洗掘現象の把握については主に移動床実験によって行われてきていることが分かった。

3. 3 次元測量データを用いた河床変動計算条件の合理的設定方法の提示

前章においては、これまでに実施されてきた横断構造物の被災事例や対策事例について述べた。その中で、三次元的な流れを伴う現象については主として水理実

験によりメカニズム解明や対策工の検討が行われていることを述べた。移動床実験の場合、フルード則により縮尺を決めるため、レイノルズ則の縮尺を満たすことが難しく、構造物周辺の乱流現象を適切に評価できているのか判断が難しい。また実験の実施には多大な労力を伴うといった課題がある。そのため、構造物周辺の河床変動解析を実施する場合、実スケールにおける準三次元または三次元の解析が望ましい。また、実河川の場合、構造物近傍に設置されている水制や護岸等が流況や河床変動に影響を与える可能性があるため、対象とする構造物の上下流も含めて解析できることが望ましい。これらの理由に鑑み、本章では、三次元数値解析の利活用に関する動向調査、実河川を対象として実施した三次元河床変動計算について述べる。

3.1 三次元数値解析の利活用に関する動向調査

ここでは、業務報告書及び学術論文についてレビュー・整理を実施した。業務報告書については、業務実績データベースであるコリンズ・テクリスから業務 7 件を抽出し、発注者から報告書を貸与いただいた。また学術論文については、直近 10 年程度の土木学会論文集、水工学論文集、河川技術論文集から準三次元または三次元の解析が行われた論文を 7 件抽出した。

業務報告書を調査した結果、流況解析及び河床変動解析に準三次元解析が用いられていた。三次元解析は、流況解析に用いられていたが河床変動解析には用いられていなかった。学術論文を調査した結果、準三次元解析は構造物周辺の流況解析[例えば 6)]に用いられることが多く、三次元解析は流況解析[例えば 7)]やダムの取水口周辺の河床変動解析[例えば 8)]に用いられていた。その一方で、実河川を対象とした三次元河床変動計算は実施されていない状況であった。

3.2 実河川を対象とした 3 次元固定床解析の試行

取水口やダム周辺の河床変動解析の実績がある太田らのモデル [8)]を、橋脚を含む河道に適用し、その実現可能性や今後の課題を検討した。

3.2.1 解析モデル

太田らのモデルは流体の運動方程式としてレイノルズ平均方程式を用いている。また、堆積土砂をポーラス法により模擬し、浸透流を考慮する。自由水面は VOF 法により追跡する。乱流モデルには$k-\omega$SST モデルを用いる。なお、一連の流体解析は、オープンソース流体解析ライブラリ OpenFOAM を改変したものであり、詳細については太田・佐藤 [9)]を参照されたい

3.2.2 計算条件

計算対象は、河道の二極化が進んだ複断面河道である。セグメント区分は 2-1 である。解析対象範囲は、河道延長約 2.5km、川幅（堤防間距離）は 300～400m あり、そのうち低水路幅が 50～100m、高水敷幅が 200～300m である。当該橋梁は過年度の中規模出水により低水路に位置する 3 基の橋脚のうち中央の 1 基が沈下した。低水路に位置する橋脚 3 基を解析モデルに反映した。ここでは、定常流量（200m^3/s）で 2000 秒の固定床計算を行った。

水平方向の格子辺長は、河道部において 5m とし、橋脚近傍で 1.25m とした。橋脚躯体幅は 3m であるため、格子 2 個程度で分割されている。鉛直方向の格子は、水位に応じて水深を 10 分割以上する格子間隔とし、標高が上がると共に 0.1m から 0.5m に増加させた。格子数の総数は約 1060 万個である。

3.2.3 計算結果

(1) 計算コスト

計算資源はスーパーコンピュータシステム FOCUS の F システムであり、400 並列で計算した。計算速度は実時間 2000 秒に対して CPU 時間 24 時間（CPU 時間/実時間≒40）であり、被災時の洪水の継続時間である実時間 48 時間（2 日間）を計算するために 80 日間程度必要と見込まれた。

(2) 流況

河道全体の流況を**図-1** に示す。白色の凹凸は地形、青色は水面を表している。黒色のベクトルは水面近傍の流速を表す。ベクトルは流入部周辺に表示されているが、下流では表示されていないため、定常状態に達していないことを示している。

橋脚周辺の流況を**図-2** に示す。図中の黄色線は河床面および橋脚の位置を示す。橋脚上流側で下降流の発生が確認できる。コンターは水の占有率であり、青は空気のみ、赤は水のみであることを表している。青と赤の境界が水面を意味する。本来であれば、水面の位置より下が流体で満たされている（白や青が発生しない）状態が望ましいが、計算結果は流体中に空気が混入した状態となった。

また、流速 10m/s 以上の計算値の発生により、計算時間間隔が小さくなり、計算時間の増加要因となったことが確認された。今後、格子の品質や解析条件等を見直し、計算時間や流況の改善を行う必要がある。

4. 予防保全対策（点検方法、頻度、工法等）の具体化

橋梁や護岸といった河川構造物の被災は、河道の二極化に伴う河床低下を一因として発生することが報告されている [4)10)]。そのため、二極化した河道の澪筋部河

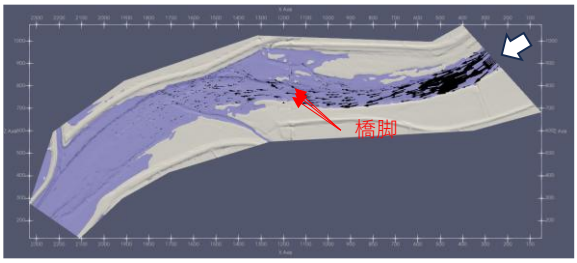

図-1　計算領域全体の流況

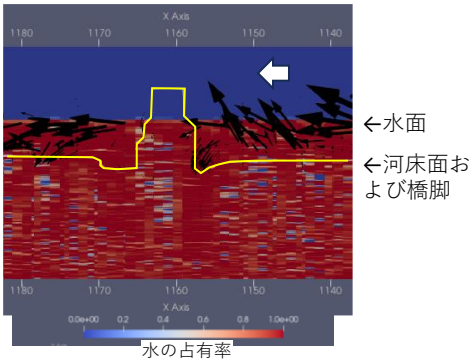

図-2　橋脚周辺の流況（縦断図）

床高を把握することは、河道及び河川構造物の維持管理の観点から重要と考えられるため、河床形状が変化する中小出水後も含めて適切な頻度で計測することが望ましい。しかし、基本的に河川の測量は 5 年に 1 度実施される定期横断測量だけであり、また定期横断測量において一般的に測量に用いられている ALB 測量は非常に高価であるため、頻繁に実施することには適していない。ここでは、二極化した河道の澪筋部河床高を廉価に計測するための方法について検討した。

4.1　計測の考え方、計測場所

山田ら [11]はソナー（又は Acoustic Doppler Current Profiler: ADCP）を搭載したラジコンボートを用いることで、橋梁がない箇所においても河床高の計測が可能となるが、流速によってはラジコンボートの推力が不十分で操作が困難となることを指摘している。特に二極化した河道では澪筋部の流速が速くなることが考えられ、例えば木曽川のセグメント 1 区間においては平水時でも 2 m/s より大きな流速の流れが発生しているためラジコンボートの推力不足が懸念される。そのため、二極化河道において ADCP を搭載したラジコンボートを用いて航行ルートを工夫し、水中部の河床高計測を実施した。具体的には、ラジコンボートの航行ルートの概要を**図-3** に示す。まず流速がほとんどない水際から上流側に向かい（①）、上流側に到達したら澪筋側に移動し（②）、測線の上流端に到達したら、ボートを流れに任せて流下させる（③）。ボートが測線の下流端に到達したら、推力を使用して水際部に戻り（④）、再び上流に移動し次の計測測線に移動することを繰り返す。

上記のラジコンボートの航行方法による澪筋部河床高の計測を、河床勾配約 1/400、川幅約 50m、縦断距離約 100m の区間において試行した。

4.2　計測機器および計測方法

計測機器の構成はラジコンボート（全長 1.4m、幅 1.2m）、ADCP（River Pro、RD Instruments 社製）、GNSS、データ転送装置、バッテリーであり、総重量は約 30kg である。機器の状況を**図-3** の左上に示す。ラジコンボートの最大対応流速は 2m/s、喫水深は最小 0.5m である。

4.3　計測結果

計測した河床高の平面分布を**図-4** に示す。衛星画像(Google map)を背景に、一秒間隔で計測された河床高の点群を示している。衛星画像や計測当時の現場の状況から、黄色枠で囲んだ範囲において白波が立っており、流速が早い範囲と推定される。本計測結果は、白波の位置における河床高分布を示している。計測時の水面近傍（水面から 0.72m 下）の流速値の最大値は約 3m/s、最大水深は約 3m であった。計測に要した時間は数十分程度、必要な人員も 2 名で実施可能であり、実施可能な労力で計測できることが確認された。以上から、二極化した河道の澪筋部計測での利用が今後期待される。

5.　まとめと今後の課題

各達成目標に対して以下の成果を得た。

① 床止め工、橋梁、発電ダムについて、河床低下や局所洗掘による被災事例や対策事例の文献調査を行った。床止め工や発電ダムのような流水が越流する形式の構造物については、跳水位置による洗掘状況の把握が構造物の維持管理の観点から重要であることが分かった。橋梁については、橋脚上流側の局所洗掘だけでなく、セグメントスケールの河床低下の把握が重要であった。また、横断構造物下流の洗掘現象メカニズムの解明や対策工の検討はこれまでも実施されてきていることが分かるとともに、特に三次元的な流れを伴う洗掘現象の把握については主に水理実験によって行われてきていることが分かった。

② 三次元数値解析の動向調査を行い、太田らのグループが構造物周辺の三次元河床変動解析を行っ

ていることを確認した。本研究では太田らのモデルを用いて、橋梁を含む河道の三次元河床変動解析を試行した。その結果、スーパーコンピューターを使用した場合、被災時の洪水の継続時間である実時間 48 時間（2 日間）を計算するために 80 日間程度必要であると推定された。

③ 平水時に流速が速い澪筋を面的に計測することを目的に、ADCP を搭載したラジコンボートを用いて、航行ルートを工夫することにより水中部の河床高計測を実施した。その結果、水面付近の流速 3m/s 程度の流況においても平面的な河床高分布の把握が可能となること、計測に要する人員・時間も現実的であることを確認した。

今後の課題として、以下が挙げられる。

1) 実河川を対象とした三次元河床変動解析の効率的な実行に向けて、メッシュの設定等に関する知見を積み重ねる必要がある。

2) ADCP 搭載ラジコンボートによる二極化河道の澪筋部河床地形計測については、計測事例が一例に留まっているため、事例を積み重ねることにより方法のブラッシュアップを図ることが必要である。また、本手法の活用により洪水前後の河床高変化を計測し、その結果・得られる知見を河道や横断構造物の維持管理手法に反映させることが必要である。

謝辞

本報告書の作成にあたり、河川管理者および道路管理者より、三次元数値解析を用いた業務の報告書を貸与いただいた。三次元河床変動解析の実施にあたり、電力中央研究所　太田一行氏より多大なるご支援を頂また、澪筋の計測の試行にあたり、木曽川上流河川事務所より計測箇所の提供にご協力いただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 荒川下流河川事務所：荒川デジタル河川管内図、https://www.ktr.mlit.go.jp/arage/arage01048.html

2) 山本陽子、中村良二、諏訪義雄：被覆ブロック形式床止め工の変状水理実験から整理された研究課題、河川技術論文集、第 24 巻、pp.143-148、2018

3) 楊宏選、山本陽子、福元豊、細山田得三、大塚悟、福島雅紀：浸透流と跳水の影響を受ける護床工ブロックの流体力特性及びその安定性評価、河川技術論文集、第 26 巻、pp.401-406、2020

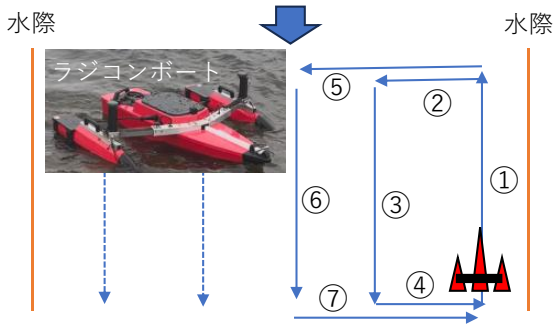

図-3　ボートの航行ルートの概要

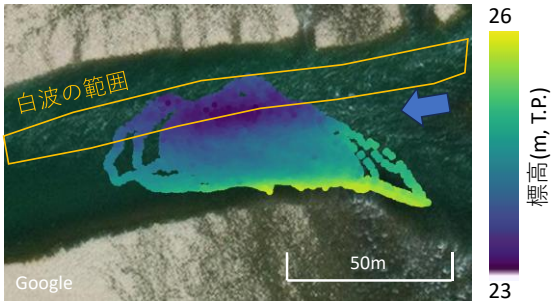

図-4　計測結果

4) 猪股広典、小関博司、新保友啓：洪水時に橋脚洗掘被害を受けた近年の被災事例に関する調査報告、河川技術論文集、第 29 巻、pp.115-120、2023

5) Y. Kitamura, S. Takagi : Hydraulic study on scouring downstream of Funagira Dam spillway apron (Japan), 8th International Conference on Scour and Erosion, 2016

6) 竹村吉晴、福岡捷二、福島雅紀：大河津分水路新第二床固の段階施工計画の数値解析技術(Q3D-FEBS)による改善、河川技術論文集、第 30 巻、pp.263-268、2024

7) 吉田圭介、梶川勇樹、永田貴美久、西山哲、間野耕司、堺浩一、Md. Touhidul ISALM、児子真也：平成 30 年 7 月豪雨時の旭川分流堰周辺の植生分布を考慮した 3 次元洪水流解析、土木学会論文集 B1（水工学）、Vol.76、No.2、I_985-I_990、2020

8) 太田一行、山田浩司、竹中慶、坂本晶子：取水口堆砂軽減のための排砂促進手法－三次元河床変動解析による合理的設計－、河川技術論文集、第 29 巻、pp.539-544、2023

9) 太田一行、佐藤隆宏、新井涼允：細粒分を含む置土の流出・分級に関する Lagrange 型非平衡流砂解析、土木学会論文集 B1（水工学）、Vol.77、No.2、I_685-I_690、2021

10) 板垣修：人の暮らしと水辺環境を両立させる河道保全技術の研究、土木技術資料、令和 6 年 11 月号、pp.6-9、2024

11) 山田浩次、猪股広典、工藤俊：河道の二極化が進む澪筋河床高の簡易・低廉な測定手法の開発、土木技術資料、令和 6 年 11 月号、pp.24-27、2024

A Study on Preventive Maintenance of River Crossing Structures Using Point Cloud

Research Period: FY2021-2024
Research Team: River and Dam Hydraulic Engineering Research Team
Author: INOMATA Hironori
KOSEKI Hiroshi

Abstract: In recent years, 3D survey data of river channels and structures, including ALB survey data, have become increasingly available. There is a growing demand for efficient management of crossing structures, such as bridges and weirs, utilizing this data. In this research, we first organized case studies of damage and countermeasures for groundsill, bridges, and hydropower dams. We also attempted a three-dimensional simulation of river channels including bridge piers using 3D survey data and identified tasks for executing calculations within a realistic computation time. Additionally, we conducted measurements using an ADCP on a radio-controlled boat and successfully measured the areal distribution of riverbed elevation at a low cost by devising the navigation route.

Keywords: Groundsill, Bridge pier, Hydropower dam, Three-dimensional Simulation, Acoustic Doppler Current Profiler