

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

北陸地方の河川複合災害のモデリングと応用

研究代表者氏名 木村 一郎¹⁾
研究分担者氏名 安田 浩保²⁾

1) 富山大学 都市デザイン学部 都市・交通デザイン学科 2) 新潟大学 災害・復興科学研究所

研究要旨

急峻な地形と湿潤な気候を背景とする北陸地方河川における水・土砂・流木の三者が関わる複合災害について、その予測と減災に資する基盤技術の高度化を図る。災害メカニズムの複雑さを考慮して、構築する技術は数値シミュレーションモデルを主とし、固・液混相流の力学体系を基礎とする。本年度の研究では、特に急流河川において深刻な橋脚周辺の局所洗掘現象、および出水時の流木の橋脚等への衝突捕捉過程について検討した。両者において、数値解析モデルの精度検証のための水理模型実験と計算結果の比較を実施し、数値解析モデルの精度を担保するとともに、現象における物理機構についても検討を実施した。特に、橋脚周辺の局所洗掘の再現には、たとえ定性的な特性についても三次元モデルを用いることが必要であること、三次元モデルは流木の橋脚への捕捉における流木リチャードソン数依存性のある程度再現できることなどを示した。

A. 研究目的

北陸地方の河川は地形が急峻で、年間を通じた湿潤な降水にも恵まれ、豊富な流量、活発な土砂輸送、多量の流木の生産と流送などに共通の特性が認められる。このような河川における災害は、水流のみによるものよりも、水・土砂・流木からなる複合災害となることが多く、その基盤となるのは固・液混相流の力学体系に他ならない。ところが、既往の河川災害のモデルは、単相（水のみ）、あるいは二相（水と土砂）によるものがほとんどで、急流河川災害の特性を十分な精度で再現・予測できるものとはなっていない。

本研究では、急流河川災害の特性を再現できる数値解析モデルの構築を行い、特徴的な現象への再現性の確認と、精度向上を目的として研究を進める。急流河川におけるさまざまな現象や問題点の中で、特に河川構造物の安全性について深刻な問題である橋脚周辺の局所洗掘現象（図1参照）と、近年増え続ける出水時の流木の橋脚等への衝突捕捉の2点について検討した。両者において、数値解析モデルの精度検証のための水理模型実

験と計算結果の比較を実施し、数値解析モデルの精度を担保するとともに、現象における物理機構についても検討を実施した。



図1 黒部川扇頂付近の橋脚周辺河床洗掘現況

B. 研究方法

(1) 橋脚周辺の局所洗掘現象について

まず、検証データを得るために、本年度、別途予算で富山大学において設置された急流河川回流型実験装置（幅15cm、長さ4m）を用いて、水理模型実験を実施した。橋脚を模した角柱（主流方向3cm×横断方向2cm）を河道中央に一本設置していた。また、土砂の代わりに比重が砂よりも小さい（比重1.3）カラー粒子を用いた。カラー粒子を

用いたのは、砂の移動形態を目視で観察しやすいことも一因である。河床高さの計測にはハンディ型の3D スキャナを用いた。これは、解像度 0.2mm（テクスチャを取得する場合は 0.5mm）で、非接触で河床形状データを取得できるもので、通水前後で計測を実施した。また、両者の差分を専用ソフトで求めることで、容易に河床変動（堆積、洗掘箇所やその大きさ）を求めることができる。

次に数値解析については、平面二次元モデル（iRIC Nays2DH）と、三次元モデル（iRIC NaysCUBE）の二つを用い、両者の再現性を比較した。後者の三次元モデルは木村が開発を行ったものである。三次元モデルについては、洗掘孔付近の掃流力を適切に再現できるように、抵抗則のモデル化に改良を実施した。

（2）橋脚による流木捕捉について

検証に用いる実験は、2017年に北園らが行った実験を採用した。この実験では水理条件を変化させた場合の流木の捕捉率と沈下率が計測されている。また、これまでに、流木リチャードソン数が流木の沈下率や透過率を支配することが指摘されている。既往の流木リチャードソン数は長さスケールに水深を用いているが、今回は流木のスタックの三次元性を議論する場合、長さスケールは流木直径を用いることが適切である点を新たに指摘し、これに基づいて実験データを整理しなおした。

数値解析モデルは iRIC NaysCUBE をベースに流木動態モデルを三次元化したソルバーを用い、水理実験と同条件で数値解析を実施する。この際、流木投入の初期条件を適切に与える必要がある。本研究では橋脚の十分上流の空中から河道に自由落下させる「パッキング」という方法を用いた。また、投下させる際の流木の初期姿勢が、後の流送、捕捉過程の大きな影響を及ぼすことが判明したため、初期姿勢のYaw角を乱数で与え、同じ条件で5回ずつ数値解析を実施することで、初期角度依存性を検討するとともに、5回分の試行の沈下率、透過率の平均値を算出した。

C. 研究結果

（1）橋脚周辺の局所洗掘現象について

図2は、流木70/minで3min間通水したのちの河床の様子である。橋脚周辺の馬蹄渦に相当する

部分に局所洗掘が発生している。一方、図3は三次元モデルによる水路中心軸上の河床変動の計算結果であり、馬蹄渦の発生と橋脚上流側の局所洗掘の様子が良好に再現されている。一方、平面二次元モデルでは、橋脚の側面の洗掘は再現されるものの、橋脚直上流の洗掘を再現できず、定性的に異なる結果となった。このことは、モデル選択が定量的な性質のみならず、定性的な特性の再現においても重要であることを意味している。

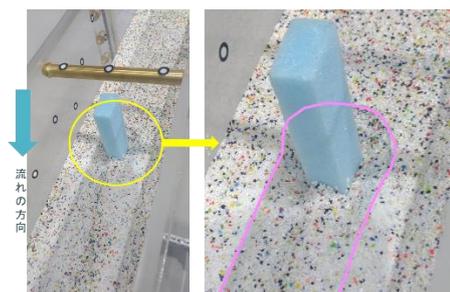


図2 実験における河床洗掘の様子

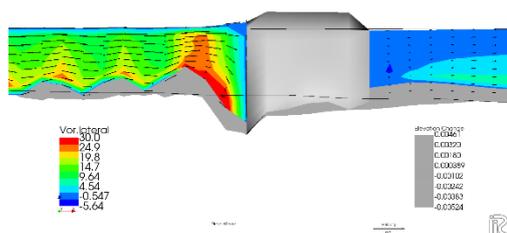


図3 三次元モデルにおける水路就寝軸状の河床変動と、流速ベクトルの様子(t=3min)

（2）橋脚による流木捕捉現象について

図4は2つのケースについて、流木の橋脚による捕捉の状況を実験と計算で比較したものである。両者は似通った堆積状況を示しているように見える。

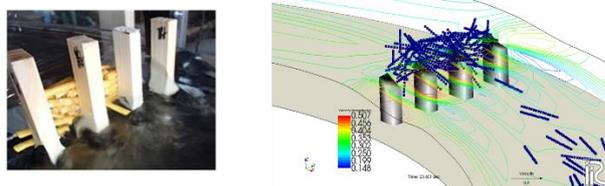


図4 橋脚による流木捕捉現象の再現状況

一方、流木リチャードソン数と沈下率、捕捉率の依存関係について、水理模型実験では、流木リチャードソン数が大きくなると沈下率が低下し、捕捉率が増加することが示されている。流木リチャードソン数は慣性力に対する浮力の比を表す無次元数である。流木リチャードソン数の長さス

ケールとして、既往の研究では水深が用いられていたが、現象に則したスケールとして、これを流木の直径に置き換えた。この修正流木リチャードソン数についても、沈下率、捕捉率の依存関係は既往の結果とほぼ同様となった。

三次元モデルを用いた数値シミュレーションを水理模型実験と同一の条件で実施したところ、流木リチャードソン数の依存性について、定性的には実験と同様の結果が得られた。しかし、数値解析結果では、捕捉率、沈下率がともに過小に評価されることが示され、この理由は流木同士のかみ合わせによる力が十分評価されていないことが原因と推測された。この点のモデル改良は今後の課題である。

D. 考察

橋脚周辺の河床洗堀の検討では、水一土砂の二相の相互作用が現象の鍵となる。一方、橋脚による流木捕捉の現象は、水一流木との二相の力学が現象を支配する。前述のように、いずれの場合も三次元モデルによる数値解析結果はおおむねこれらの現象を再現することができた。このことは、急流河川の諸問題について、三次元数値シミュレーションモデルの有用性を示す結果といえる。しかしながら、実スケールにおけるモデルの適用性については検討の余地があり、この点は今後の課題である。

E. 結論

本研究により北陸地方の河川の特徴である急勾配の流れ場における水流、流木、河床変動を再現する数値解析モデルを構築し、これを水理模型実験の結果と比較することで、その妥当性と問題点を明らかにしたものである。数値解析による再現性はおおむね良好と判断されたが、流木の捕捉率が過小に評価されるなど、いくつかの問題点が指摘された。今後は、さらに多様な実験条件でモデルの検証と改良を進めるとともに、実スケールの現象への提供性を検討していうことが必要と考えられる。

F. 研究発表

1. 論文発表 (掲載誌名・巻号・頁・発行年を記入し、

掲載論文あるいはPDFファイルを別紙で1部提出)

[1]原田紹臣, 木村一郎, 朝位孝二, 里深好文, 水

山高: 流域特性を考慮した流木対策の提案, 河川技術論文集, 第25巻, pp.675-680, 2019.

[2]Yasuyuki Shimizu, Jonathan Nelson, Kattia Arnez Ferrel, Kazutake Asahi, Sanjay Giri, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Chang-Lae Jang, Taeun Kang, Ichiro Kimura, Tomoko Kyuka, Jagriti Mishra, Mohamed Nabi, Supapap Patsinghasanee and Satomi Yamaguchi: State of Science, Advances in computational morphodynamics using the International River Interface Cooperative (iRIC) software, EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS (online), pp.1-27, DOI: 10.1002/esp.4653, John Wiley & Sons Ltd., 2019.

[3]Ichiro Kimura, Kazuya Kitazono: Effects of the driftwood Richardson number and applicability of a 3D-2D model to heavy wood jamming around obstacles, Environmental Fluid Mechanics (online), <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09709-6>, Springer Nature B.V., pp.1-23, 2019.

[4]Taeun Kang, Ichiro Kimura and Shinichiro Onda: COMPUTATIONAL MODELING FOR DRIFTWOOD COLLISION DYNAMICS IN SHALLOW FLOWS CONSIDERING PROJECTION AREA, ROOT WAD AND ANISOTROPIC BED FRICTION, E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, September 1-6, 2019, pp.103-109, Panamá City, Panamá, doi:10.3850/38WC092019-0150, 2019.

[5]Norio Harada, Ichiro Kimura, Yoshifumi Satofuka and Taahisa Mizuyama: DEBRIS-WOOD CAPTURE EFFECT CONTROLLED BY CONCRETE-SLIT DAM UNDER LOW-GRADIENT FLOW, E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, September 1-6, 2019, Panama City, Panama, doi:10.3850/38WC092019-0460, 2019.

2. 学会発表 (学会名・発表年月・開催地なども記入)

なし

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

なし