

ADCP 搭載ラジコンボートと位置同定システムを用いた 河川橋脚周辺の流況・洗掘計測法の開発

東京理科大学大学院 学生会員 ○廣次 義崇, 柏田 仁, 井上 隆, 二瓶 泰雄

1. はじめに

近年の豪雨災害の激甚化と共に、河川橋梁被害は増大しており、多くは橋脚周辺の局所洗掘による橋脚の沈下・転倒が要因となっている。橋脚周辺の局所洗掘は、数多くの研究者により古くから研究されており、基本メカニズムとしては、橋脚周辺に形成される3次元らせん渦構造による橋脚前面の洗掘であることが室内実験や数値解析により明らかにされている¹⁾。橋脚周辺の洗掘深は、一般には等流水深や橋脚幅との関係性が知られるが²⁾、それらのばらつきは非常に大きく、最大洗掘深の評価は容易ではない。特に、現地河川の橋脚洗掘現象を考えると、①洪水時には流量増減に伴い洗掘深も時間的に大きく変化すると共に、②橋脚周囲の中・小規模河床変動の影響を受け、かつ、河床材料は非一様であり、橋脚周辺の洗掘現象は非定常性や非平衡性が極めて強い複雑現象である。そのため、洪水流及び非平衡性を考慮した河床変動の一体解析法の構築と共に、洪水時用の流速・河床変動モニタリング手法の開発が必要不可欠である。後者として流速鉛直分布と河床変動（水深）計測に超音波ドップラー流速分布計（ADCP）が有用である。しかしながら、洪水時の高流速条件下でのADCPの位置制御が容易でないことや、橋梁直下のGPS計測が困難であるため位置同定できないことが課題となる。本研究では、ADCP搭載ラジコンボートと位置同定手法に基づく橋脚周辺の流況・河床変動計測システムを新たに開発する。このうち、位置同定には、レーザー光測距による3次元点群データを取得するLiDAR（Laser Imaging Detection And Ranging）をベースとし、DV（Digital Video）カメラ画像と組み合わせた効率的な手法とする。本システムの基本性能を検証するため、本システムを江戸川野田橋における橋脚周辺の流速鉛直分布・河床高計測に適用した。

2. 研究方法

(1) 本システムの概要：本モニタリングシステムの全体像は、**図-1**に示すように、流速鉛直分布・河床変動計測用のADCPと、その位置制御用ラジコンボート、ADCP位置計測、から構成される。ADCPには一般的なWorkhorse1200kHz（Teledyne RDI製）を用い、4方向のビームから求められる流速鉛直分布及びビーム毎の水深（河床高さ）が得られる。ラジコンボートとしては、既存のADCP搭載用ボート（Riverboat）にスラスター2台（着脱式RCユニット、**株**ハイドロシステム開発製）を取り付け、橋上からラジコン操作を行う。スラスターの出力最大の場合には、流速2.0m/sでも対応可能であるが、スラスターのプロペラ部分にごみが引っかかると出力が落ちるため、橋上からロープで繋いだ状態とする。位置計測には、自動車の自動運転技術にも活用されているLiDAR（Livox Mid-70, Livox製）を鉛直下向きに固定設置し、橋上からADCPの水平・鉛直位置を計測する。ただし、LiDARにより膨大な点群の時系列データが得られるため、ADCP位置を知る上では無駄が多い。そこで、LiDARの脇に設置するDVカメラ（HC-WX990M, Panasonic製）により水表面の撮影も並行して行う。代表的な画像を用いて動画上のADCP位置とLiDAR計測値の相関関係を求め、動画データから時々刻々のADCP位置を効率的に算出する。

(2) 現地観測概要：本システムを用い、江戸川・野田橋（河口より39.5km地点）における左岸側から2つ目の橋脚周辺での流速・河床変動観測を行った（**図-2**）。観測日は2021/9/15（水位0.95Y.P.m）と11/4（0.08Y.P.m）であり、いずれも平水時である。観測内容としては、9/15ではスラスターが無かったため、位置同定システムの精度検証を主目的とした。ここではトータルステーションTS（SET500, SOKKIA社製）を左岸堤防上に設置し、ADCP上に取り付けた360度プリズムを用いて3次元位置を計測し、本位置同定システムの結果と比べた。この際、TSやLiDARの設置位置は、RTK-GNSS（R10 Model2, Trimble製）により計測した。同日には橋脚周辺の流速・河床変動計測を各1~2分間を計9セット実施した。スラスターを用いた11/4では、橋脚周辺の流速・河床変動計測として橋脚前面の固定観測（5

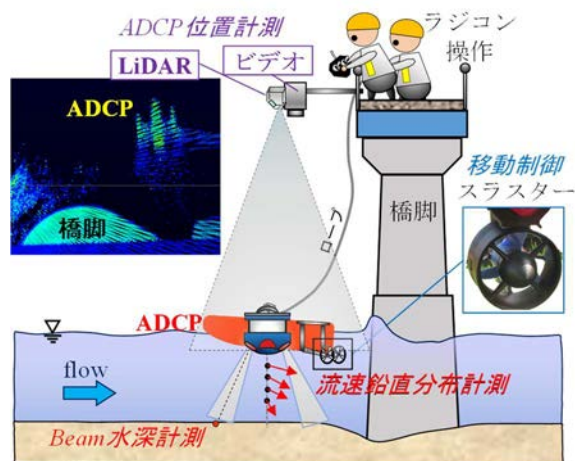


図-1 計測法の全体図

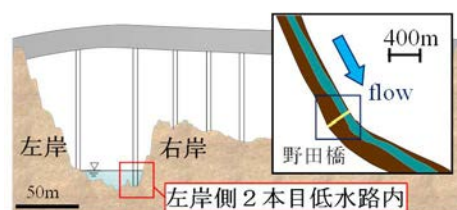


図-2 観測サイトの概要

キーワード：橋脚, 局所洗掘, 三次元流速分布, LiDAR, ADCP

連絡先：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学 5号館 3階 水理研究室 TEL: 04-7124-1501 (内線 4069)

分間)と移動観測(左・右岸側3分間ずつ)を計3セット行った。ADCPはハイスピードサンプリングモードで、2.0秒間隔で計測を行った。

3. 結果と考察

(1)位置同定システムの測定精度: LiDARを用いたADCP位置の測定精度を検証するために、TSとLiDARの計測値を比較した(図面省略)。その結果、両者の差(サンプル数9)は、水平方向では平均15.9cm(標準偏差22.0cm)、鉛直方向では平均4.6cm(標準偏差7.8cm)となった。1回目観測時ではADCPが移動中であったことや、本検証時に用いるRTK-GNSSの計測精度が鉛直(水平)方向4.0cm(2.5cm)であることを考慮すると、LiDARの位置計測精度は概ね良好と言える。また、ADCP水平位置に関するLiDAR計測値(単位:m)と動画上の画素座標(単位:pixel)の相関図を図-3に示す。ここでは、2回目の観測を対象に主流・横断方向に分けてプロットしている。これより、両者は良好な線形関係($R^2=0.98$ 以上)を有することが分かる。これより、この相関式と動画データから、ADCP位置の追跡を効率的かつ高精度にできることが示された。

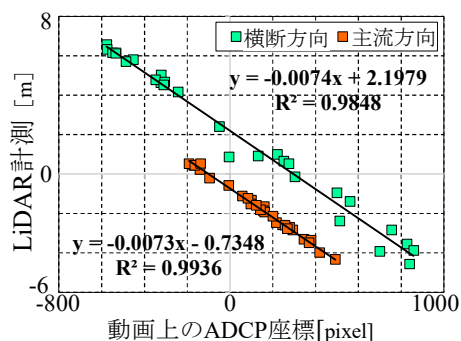


図-3 ADCP水平位置に関するLiDAR計測値と動画座標の関係(2回目)

(2)橋脚周辺の洗掘状況: 本手法により得られた橋脚周辺における河床高コンターを図-4に示す。ここでは、LiDARによるADCP鉛直位置及びADCPによる4本のビームの測深結果からそれぞれ河床高を求め、それらを逆距離荷重法(IDW)で内挿した結果を図示している。なお、ADCPの傾きについては、ADCP自身の計測値で補正している。また、原点は橋脚の上流端である(X:主流方向,Y:横断方向)。これより、一般的には、橋脚周辺において河床高が低く洗掘が生じているという一般的な結果が見られる。詳細を見ると、河床高の最低値は、橋脚上流側ではなく、橋脚上流端よりやや下流・左岸側(低水路中心側)で見られる(図中×印)。ただし、橋脚の上流側にはマウンド(図中矢印、ごみの一部が堆積)が見られ、そのマウンドとの落差を考えると、橋脚上流側も洗掘が進行していると言える。

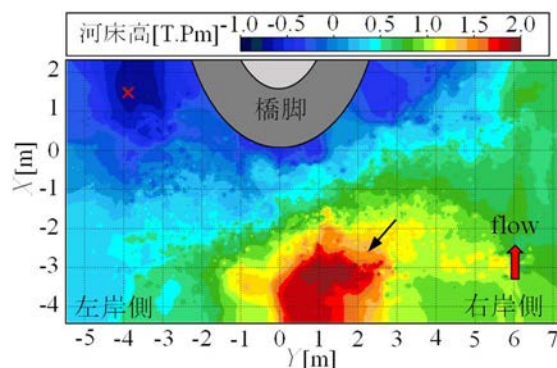


図-4 河床高の平面コンター(2回目)

(3)三次元流動構造と乱流特性: 本手法により計測された三次元流動構造のうち、河床付近における水平流速ベクトルの平面図を図-5に示す。ここでは、ADCPをほぼ固定していた橋脚前面のデータが集中していることに注意されたい。これより、左岸側では順流ベクトルが発達しているのに対して、右岸側では流速が微小もしくは逆流となっており、これらが洗掘量の大小(左岸>右岸)と関係している。また、橋脚前面では、流速の大きさ、向きともに大きく変動しており、乱流の発生が示唆される。そこで橋脚上流端付近にてADCPを固定した時の平均流速とレイノルズ応力の鉛直分布を図-6に示す。図中には、ADCPの平均位置($X=-1.47m$)と河床高の縦断分布も示す。流速鉛直分布としては、変曲点($z=0.85m$ 付近)が見られ、その高さでレイノルズ応力のピークが見られる。これらは局所洗掘時に生じている三次元らせん流の一部と見られ、主流・鉛直方向流速の乱れ成分に関しては負の相関が確認された。以上より、本手法により、橋脚前面における複雑な3次元性の乱れを含む流動構造と河床変動の同時計測が可能であることが明らかとなった。

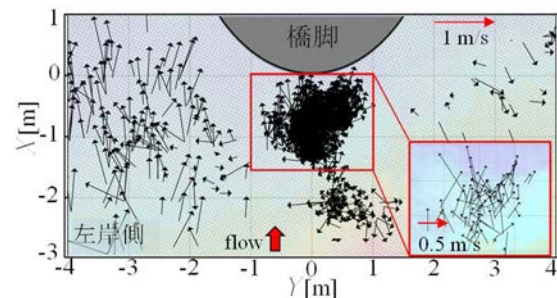


図-5 河床近傍における流速ベクトルの平面分布(2回目)

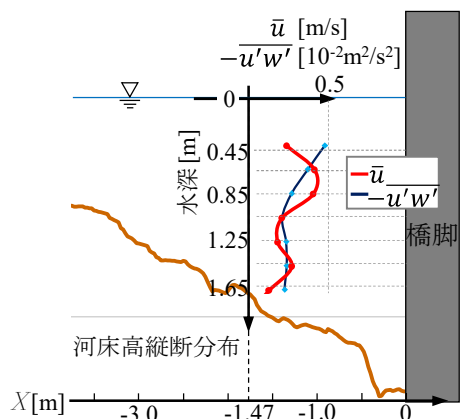


図-6 主流方向流速・レイノルズ応力の鉛直分布(2回目)

謝辞: 研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(A)(研究代表者:二瓶泰雄, 課題番号:21H04577)によって実施された。ここに記して、謝意を表します。

参考文献: 1) Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., and Michelsen, J.: J. Fluid Mech., Vol.534, pp.351-401, 2005.
2) 中川, 鈴木: 京大防災研年報, 17号B, pp. 725-751, 1974.