

スリット部の流況や流砂形態に着目したハイドロフォンによる流砂観測の試み

国土交通省北陸地方整備局 立山砂防事務所 酒谷幸彦(現:山梨県),
 浅井誠二(現:北陸地方整備局), 工藤裕之
 日本工営(株)砂防室 ○ 田方 智, 長山孝彦, 日本工営(株)中央研究所 杉山 実, 伊藤隆野
 京都大学防災研究所 藤田正治, 筑波大学大学院 宮本邦明, 京都大学大学院 水山高久

1. 結論: 日本の山地河川におけるハイドロフォンを用いた掃流砂観測(栗原ら 1992, 澤井 2001)が試験的に行われ, その後, 幾つかの現地において, ピット式流砂箱による直接流砂計測との併用(星野ら 2004)や水位計との併用による連続計測(水山ら 2002)による計測が行われ, 山地河川における流水と流砂の不連続性や流砂と水量との関係が明らかになってきた. 最近では, これらの成果を踏まえ, 水位・流量, 掃流砂, 微細粒子を含む濁度を水位計・流速計, ハイドロフォン, 濁度計を合わせた形式により, 掃流砂・ウォッシュロードと水量の関係が, 京都大学防災研究所 流域災害研究センター 穂高砂防観測所によって行われている(堤ら 2008). ここでは, これらの計測手法を参考にしながら, 特に, 穂高砂防観測所で実施されている計測機器を参考にしながら, 常願寺川・津之浦下流砂防堰堤(図-1)において, スリット側面での側面せん断力の予測などに関する問題は残されているものの, 水位・流量といった水量の測定も同時に観測することを念頭においた試験的な現地実験のための機器設置例を報告する. スリット部の縮流等の水理特性を考慮した上で, 流水断面の確定しやすいスリット部を対象として, 側面に鉛直方向にハイドロフォン・流速計を設置し, 流水・流砂の流速分布, 流砂濃度を計測することによって, 計測が困難な浮遊砂も含めた観測手法の可能性を模索しようとしている.

2. ハイドロフォンを用いた流砂観測: ハイドロフォンを用いた流砂計測(音響法)においては, 鉄管に礫が衝突する際の音の, 主として, 鉄管周モードの共振成分をカウントすることによって流砂の個数を計測されていたが, 掃流力が大きい場合, 鉄管内の音が飽和するため, マイクで取得される音圧の電気信号の波形データを直接的に用いる方法が行われるようになってきている(谷口ら 1992, 水山ら 2008, 鈴木ら 2009).

一方, 音響法の特徴として, 共振波形の最大振幅と衝突礫の運動量が線形関係にあることが計測原理の基本となっており, 仮に, 衝突する粒子の幅広い運動量に対して線形関係が成り立つものとするれば, 粒径別流砂量が音の鉄管周モードの共鳴成分と掃流力の一次関数を介して求められることが期待される(栗原ら 1992, 澤井 2001). その際, 粒径別の移動速度やそれに変わる流速の情報(底面流速, 摩擦速度など)が得られると, 近似的に, 流砂の粒径を得ることが可能となる.

3. 流砂移動形態とスリット部の流況: 研究者間での統一的な見解の一致を見ていない部分もあるが, 図-2 に示すように, 掃流と浮流が混在した流れは, 河床近傍の掃流砂層と水面近傍に形成される浮遊砂流の卓越する層の2層構造として説明されている(芦田ら, 2008). 流砂量は粒子濃度と流速の積の水深積分値で定義され, 掃流砂移動層の移動層厚 h_s と浮遊砂流の層厚 h_f に着目すると, 全水深 h_t を用いて, 掃流砂量 q_b , 浮遊砂量 q_s および全流砂量 q_t は, それぞれ, 式(1)で定義される.

$$q_b = \int_0^{h_s} cu dz = c_s h_s u_s, \quad q_s = \int_{h_s}^{h_t} cu dz, \quad q_t = q_b + q_s \quad (1)$$

ここに, c : 流砂の体積濃度, u : 流速, c_s : 掃流砂移動層内の流砂濃度, h_s : 掃流砂移動層の層厚, u_s : 移動層内の平均流速である.

さらに, 掃流砂量は, 式(1)に対して, 土砂の移動体積に着目した変形を行うと, 式(1)の第1式の右辺第2項のように変形され, 流砂体積 $c_s h_s$ と粒子移動速度 u_s の積で表される. さらに, 流砂体積 $c_s h_s$ は無次元掃流力の1乗に比例し, 粒子移動速度 u_s は無次元掃流力の1.5乗に比例する(江頭, 1997). このように見ると, 掃流砂量の評価のためには, 粒子移動体積と移動速度, 一方, 浮遊砂量の評価には, 水量が時間的に変化する現地においては, 沈降速度・摩擦速度比が変化するため, 流速・粒子濃度(体積濃度, 個数密度など)の情報が必要である.

4. スリット部側面におけるハイドロフォンの設置: 図-1 に示す津之浦下流砂防堰堤は, 立山砂防事務所管内の常願寺川に位置する砂防堰堤であり, 堰堤地点の流域面積: 131.5km², 堰堤高さ 13.5m, スリット幅 16m, スリット高さ 7m(スリット高さ比= スリット高さ/ スリット幅= 0.438)の堰堤である. また, 計画河床勾配: 1/56, 元河床勾配: 1/28 である. スリット部の流量係数を 0.577(限界水深仮定)と設定した際に, スリット部が満杯になる流量は, 約 1,010m³/s(スリット1門あたり)である. 同堰堤においては, 先駆的に, 右岸側のスリット底面に設置されたハイドロフォンおよび右岸堰堤上流側法面の河床に設置された圧力式水位計を用いて, 流砂観測および水位計測が行われている(水山ら 2002). ハイドロフォンによる流砂計測は幾つかの出水に対してパルスに関するデータが取得され, ハイドロフォン直上流にはピット式流砂箱(2008年2年8日竣工)が設置されている. 水位から流量への変換, もしくは, 水位・流速観測による流量観測は実施されていない.



図-1 津之浦下流砂防堰堤の位置図

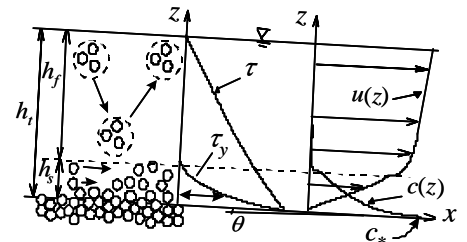


図-2 掃流砂・浮遊砂流の模式図

図-3 は、堰堤を利用した流砂観測における計測断面や計測可能な手法(栗原ら 1992)を参考にしたスリット堰堤での流況や流砂移動に関する模式図である。図-4 は、立山砂防事務所管内の砂防堰堤(スリット高さ比= 3.4)を対象とした水理実験による流況(酒谷ら 2010)である。

堰堤湛水域から下流に向かって流れを見ると、スリット部周辺では、平面・鉛直方向の縮流(例えば、石原ら 1966, 名合 1977)の影響が大きい。スリット入り口からスリット部の領域において、流れの剥離・再付着といった複雑な流況を呈している。同堰堤周辺を対象とした水理実験(水山ら 1997)では、スリット周辺の詳細な流況は示されていないが、図-4 を見る限り、剥離流れによりスリット側面に流水が付着しない流れは生じていない。両実験結果ともに、堰堤湛水域からスリット部の流れは非静水圧流れであり、例えば、スリット内の断面で圧力式水位計を用いた水位計測は適当でないことが分かる。

以上より、断面の確定したスリット部における流水・流砂の観測において、現状での水理的な情報や知見がある程度収集された。そこで、図-3を参照しながら、スリット部における流水・流砂観測の簡易的な観測を試みる。縮流や剥離流などに留意すれば、式(1)や図-2に示すように、流速分布と粒子濃度分布が必要となる。そこで、側壁上のせん断力の推定には若干の課題が残されているものの(江頭ら 1988)、ハイドロフォンや流速計をスリット部の下流側に設置すれば、流速分布と粒子濃度分布のデータが取得できる可能性がある(図-4)。さらに、ハイドロフォンによるデータからは、流砂個数・体積に関する情報が得られ、式(1)に示す関係と流速計のデータを用いると、近似的に粒径別流砂量に関するデータが取得できる可能性がある。

さらに、これらと同一断面のスリット部の河床上にハイドロフォンと流速計を設置すれば、底面と側壁の底面近傍との水理特性に着目すると、両者の同期を取ることによって、底面および側壁とのせん断力の関係が得られる。現時点では、スリット上流側に既設のハイドロフォンがあり、これとの同期を取ることによって、底面と側壁のせん断力の関係が近似的に得られる。

一方、図-5 の計測機器群の設置断面で、水深に関する情報が得られれば、流量の観測も可能となる。詳細な検討には、水理実験や鉛直 2 次元の非静水圧域の数値解析などが必要となり、今後の検討課題としたい。なお、機器設置は 2009 年 10~11 月に行い、動作確認を実施し、出水時の計測の準備等を実施している最中である。ここで紹介した計測を行うにあたり、水位計、濁度計、ハイドロフォン等の計測機器の設置や現地における運用においては、十分でない部分もあり、今後、更なる検討を必要とするが、適宜、準備を行う予定である。

5. 結論: スリット砂防堰堤のスリット部には、平面・鉛直方向の縮流やスリット部での剥離・再付着流れ、非静水圧域の流れなど考慮すべき種々の現象がある。一方、流砂観測においては、掃流砂から Wash load にまたがる流砂を計測することが求められている。本報告においては、スリット部の断面を利用して、清水流量の観測も視野に入れた観測手法とハイドロフォンを用いた新しい流砂計測手法、すなわち、浮遊砂に対するハイドロフォンを用いた簡易的なデータ取得方法に関する新しいアイデアについて紹介し、一部の機器設置が行われたことも紹介した。今後の出水において計測されたデータや計測における種々の情報は、適宜、別報にて報告する予定である。

参考文献: 1) 石原藤次郎ら: 開水路急縮部の水理的性状に関する研究, 第 10 回水理講演会論文集, pp. 99-104, 1966, 2) 名合宏之: 開水路底流型水門の自由流出に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 264 号, pp. 77-86, 1977, 3) 江頭進治ら: 開水路における河床せん断力の推定法, 第 32 回水理講演会論文集, pp. 503-522, 1988, 4) 栗原淳一ら: 音響を利用した流砂量計測装置について, 新砂防, Vol. 44, No. 5, pp.26-31, 1992, 5) 谷口伸一ら: 音響法による流砂観測のための信号解析, 彦根論叢(滋賀大学経済学会), 276-277 号, pp.323-346, 1992, 6) 水山高久ら: スリット砂防ダムスリット部の流れに関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol. 49, No. 6, pp.34-36, 1997, 7) 江頭進治: 流砂および流砂を伴う流れの力学(3. 掃流砂の力学), 混掃流, 11-4, pp. 388-393, 1997, 8) 澤井健二: 流砂計測技術の現状と展望, 砂防学会誌, Vol. 54, No. 2, pp.75-84, 2001, 9) 水山高久ら: 常願寺川津之浦下流砂防堰堤におけるハイドロフォンによる流砂観測, 砂防学会誌, Vol. 55, No. 3, pp.56-59, 2002, 10) 星野和彦ら: 流砂量計測システム(六甲住吉型)と観測事例, 砂防学会誌, Vol. 56, No. 6, pp.27-32, 2004, 11) 堤大三ら: 山地流域における土砂動態の定量的モニタリング手法の開発, 京大防災研年報, 51 号 B, pp.661-668, 2008, 12) 水山高久ら: 流砂量の多い状態のハイドロフォンによる流砂計測(音圧データの取得), 砂防学会誌, Vol. 61, No. 1, pp.35-38, 2008, 13) 鈴木拓郎ら: 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂計測手法に関する基礎的研究, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 5, pp.18-26, 2010, 14) 芦田和夫ら: 21 世紀の河川学, 京大出版会, 2008, 15) 酒谷幸彦ら: スリットえん堤のスリット部周辺の水理特性, 平成 22 年度 砂防学会研究発表会概要集, 2010(投稿中)。

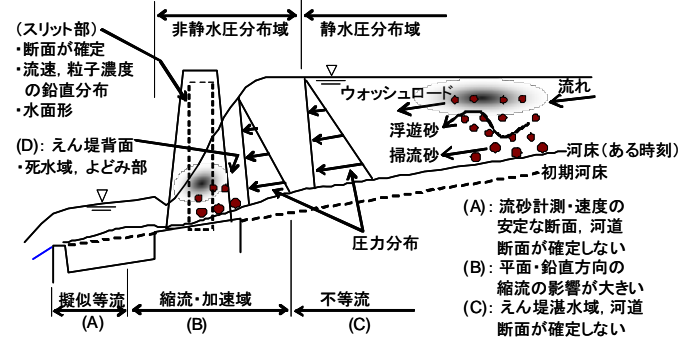


図-3 スリット堰堤周辺の流砂と流れの模式図(定常流)

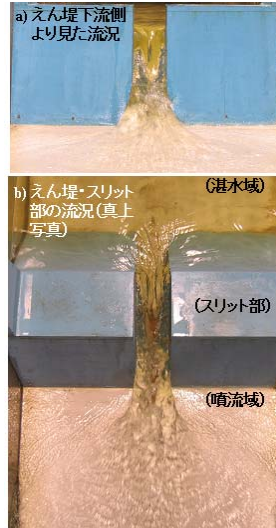


図-4 スリット部の流況の一例(水路実験:スリット高さ/幅= 3.4)

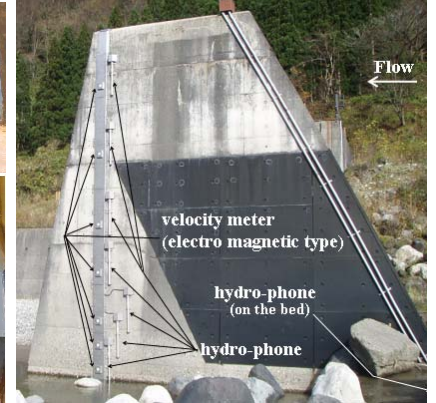


図-5 津之浦下流砂防堰堤の右岸スリットに設置されたハイドロフォンと流速計
(既存の計測機器)
・スリット上流側の河床: ハイドロフォン(1つ)
・スリット河床に設置されたハイドロフォンの直上流: ビット式流砂箱(1つ)