

急流礫床河川における洗掘深センサーの開発

DEVELOPMENT OF A SCOUR DEPTH GAUGE FOR STEEP GRAVEL RIVERS

河原能久¹・内田龍彦²・吉田 晋³・木村成弘⁴

Yoshihisa KAWAHARA, Tatsuhiko UCHIDA, Susumu YOSHIDA and Naruhiro KIMURA

¹フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁴非会員 広島県土木局土木整備部河川課 (〒730-8511 広島県広島市中区基町10番52号)

Recently floods in steep slope rivers have caused serious damages on levees and revetment works, highlighting urgent need to monitor local scour near river banks. The present study proposes a new sensing method that can measure scour depth continuously and quantitatively during floods. The sensor consists of blocks with internal resistors and conductive interfaces on the block surfaces. The principle to measure scour depth is to detect the number of blocks washed away by measuring the change in resistance of the sensor. Prototypes are produced and their performance is tested not only in a flume under active transport of coarse gravels but also in a river with man-made flood. It is confirmed that the present sensor can reasonably detect scour depth and that it gives similar results with those by conventional methods using bricks or colored gravels. A formula is also developed to specify the weight and dimension of the sensor block. Weak points of the sensor are also discussed to improve its performance.

Key Words : *scour depth, steep rivers, gravel bed, sensor, electric resistance, flume experiment, field measurement*

1. 序論

近年, 全国各地で急流河川やそれに隣接する道路の被災が多発している。広島県においても平成17年台風14号, 平成18年台風13号によって太田川水系の支川を中心に甚大な洗掘・侵食被害が発生した。急流河川における堤防の侵食に対しては, 河床洗掘に伴う最大洗掘深の評価や流水による侵食幅の設定に基づき護岸の設計を行っているが, 被災原因を解明することが必要となっている。また, 堤防の維持管理の強化をはかるために, 現状の堤防や河岸の状況を把握し, 侵食被害を未然に防ぐことの必要性が高まってきている²⁾。そのような状況の中で, 洗掘の実態が定量的に把握できていないことが大きな障害となっている。現在, 洗掘深の計測技術が開発されつつある¹⁾が, 試験段階のものが多く, 信頼性や実用性の高い計測技術は確立されていないと考えられる。とりわけ, 巨礫が移動する急流河川に適用できる洗掘深計測技術の開発は焦眉の課題となっている。

洗掘深の調査では, これまで河床に埋め込んだレンガブロックや色砂の残存量を出水後に掘り起こし, 最大洗掘深を計測する方法がとられていた。しかし, 河床材料

の粒径が大きい急流河川においては掘り起こすための労力や費用が大きくなるという問題がある。また, 原理的に洪水時の最大洗掘深と埋め戻し量しか計測することができず, 出水中の状況をリアルタイムに把握することができないことや, レンガブロックが河床高さの変化に追従するかなどの問題がある。

最近, レンガブロックの代わりに, 電波を発信するセンサーを河床部に埋め込み, 洗掘により浮上したセンサーが発信する電波を護岸部の受信機で受信し, センサーIDと受信時刻を記録することにより, 洗掘箇所や洗掘深を把握する技術が開発されている¹³⁾。これは河岸の侵食状況をリアルタイムに把握することを可能にするものである。しかし, 設置後にセンサーの動作確認が行えないこと, 急流河川に適用する場合において流されたセンサーが受信範囲内で水面に浮上するのか, 礫などの衝突に耐えられるかなどについて検証が必要であると推察される。

また, 地中通信を利用する新しい技術が提案されている⁴⁾。平均粒径程度の河床材料に電極を取り付け, 高さ調整用のスペーサーを挟んで所定の高さにまで積み上げたものとデータの受信機器を一体化して埋設するものであり, 電極の付いた河床材料が流出すると電極が外れ,

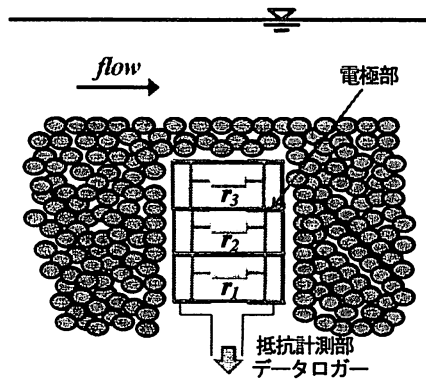


図-1 本研究における洗掘深センサーの概念

それを受発信装置が感知し、その信号を送信するものである。この技術は地中通信により設置後のセンサーの動作確認が可能であり興味深い。ただし、コストの低減や埋設後の電力の確保などの課題が残されているものと推測される。

本研究は、急流河川における洗掘深を洪水中に連続的に測定し、多数の地点に設置するために低廉である計測器の開発を目標としている。そのための第一段階として、河床低下に伴ってブロックが流出すると電気抵抗が変化し、その変化量から洗掘深を測定する機器を試作した。以下では、センサーの概要、水理実験でのブロックの挙動、河床低下に追従するためのブロック諸元の決定法を説明する。最後に、小規模な出水に対して本センサーの結果と従来のレンガ法や着色した礫を使用した方法による結果との比較を報告する。

2. 洗掘深センサーの概要

(1) 原理

本研究では洗掘深を電気抵抗の変化として取得する方法を考える。センサーの概要を図-1に示す。各ブロックに抵抗器を埋め込み、ブロック上下面に腐食しない電極部を設け、それらを積み重ねることによってブロック群として並列回路を構成する。最上部のブロックが流失すると、残存ブロック群の抵抗値が変化するが、その変化量から洗掘深を定量的に把握するというものである。なお、ブロックは塩ビ製であり、その内部に砂などを詰めて重量を調整している。

なお、データロガーやバッテリーはブロック群の下にボックス内に設置され、有線または無線で送受信される予定であるが、本研究では上部のブロック群であるセンサーの挙動について検討する。

(2) 動作状況と課題

実験水路において、河床に設置されたブロック群がどのような挙動を示しながら流出するのかを観察するとともに、電気抵抗を計測した。実験では可変勾配型直線水

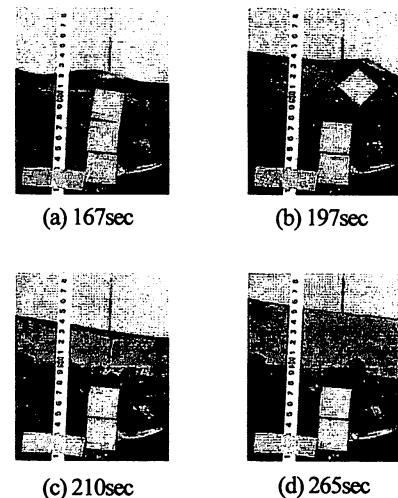


図-2 ブロックの挙動

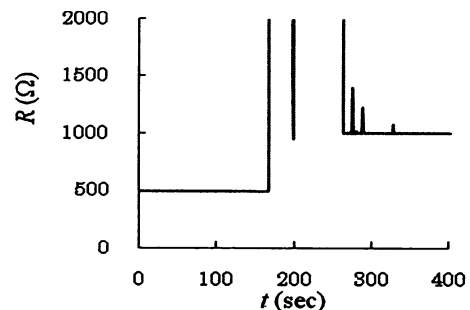


図-3 ブロック群の電気抵抗の経時変化

路（全長24m、水路幅0.2m）を用いた。水路床に平均粒径2.3cmの礫を敷き、一辺が3cmの立方体のブロック（内部に抵抗1kΩを設置）2個をデータ取得用ブロック（ブロック上面に電極を有し、抵抗値を外部へ有線で出力する）の上に載せ、サンプリング間隔1秒で電気抵抗を計測した。初期の河床勾配を1/15とし、流量40.0ℓ/secを通水し、疑似等流状態で河床低下とブロックの挙動を観察した。

図-2に通水中のブロックの挙動を示す。図(a)では最上段のブロックが少し浮き上がっており、図(b)ではそのブロックが流出している。また、図(c)では残ったブロックの上部を礫が移動しており、図(d)では礫がブロックの上に乗っている。

図-3は、図-2の実験時の電気抵抗の変化を示している。160sec以前では抵抗値は500Ωであり、その値は2個のブロックが残存していることと一致している。一方、167sec時点では電気抵抗値は2000Ωを超えており、全ブロックが流出した状態となっている。これは最上段のブロックが浮き上がった際に2段目のブロックと最下部のデータ取得用ブロックの電極が離れた状態になったためである。なお、その原因は細粒分が電極間に挟まったためではない。200sec付近を除き260sec時点ごろまでその状態が続いている。礫がブロックの上部にしっかりと乗った265sec時点以降ではブロック1個を検出している。

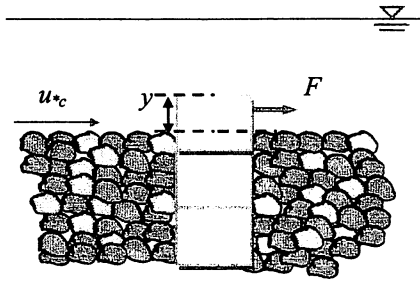


図-4 ブロックの移動限界状態における抗力

以上の結果より、ブロックの流出に伴う電気抵抗の変は、ブロック内部に埋め込む抵抗の大きさを工夫すれば、容易に検出可能であり、したがって洗掘深を推定する可能性は高い。しかし、礫の衝突や、最上部のブロックの転動によるブロックの振動や最下部の電極部の接触不良を抑制することの必要性が明らかとなった。これに対する解決策はまだ見出せていないが、電極部の材質（導電性ラバーなど）やブロックの重量などを検討する予定である。

3. ブロック諸元の決定方法

ブロックの残存個数から洗掘深を算出するためには、ブロックが河床低下に追従するように流出することが不可欠であり、そのようにブロック諸元を決定することが必要である。ここでは、ブロックの流出時におけるブロック諸元と河床高の関係式、すなわち、ブロック諸元の算定式を導出する。そして、水理実験によって算定式の中の実験定数を決定する。

(1) ブロックの移動限界高さとは河床高の関係

粗面上の乱流の流速分布は式 (1) で表される。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} + A_r \quad (1)$$

ここで、 u ：流速、 u_* ：摩擦速度、 z ：河床面からの高さ、 k_s ：相当粗度、 $\kappa=0.4$ 、 $A_r=8.5$ である。

図-4のようにブロックが礫河床に設置されているとき、最上段のブロックに作用する抗力 F は式 (2) で表される。

$$F = C_D A \frac{\rho}{2} u_b^2 \quad (2)$$

ここに、 ρ ：水の密度、 C_D ：抗力係数、 A ：投影面積、 u_b ：ブロックに作用する流体力を決める流速である。 u_b は対数分布則より式 (3) のように示される。

$$\frac{u_b}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\beta y}{2.5d} + A_r \quad (3)$$

ここで、 y ：河床面からブロック上面までの高さ、 β ：ブロックに作用する流速の位置を表す定数である。また、平坦な河床における相当粗度は河床材料の平均粒径 d の2

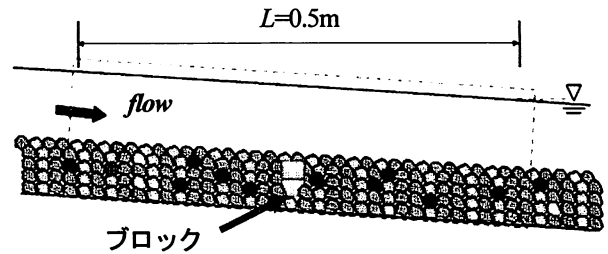


図-5 ブロック流出実験の概要

～3倍程度である³⁾ことから $k_s=2.5d$ としている。したがって、ブロックに作用する抗力は式 (4) で示される。

$$F = C_D A \frac{\rho}{2} u_*^2 \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{\beta y}{2.5d} + A_r \right)^2 \quad (4)$$

ここで、河床の礫が移動限界状態にあるとすると、 $u_* = u_{*c}$ であるから式 (4) は式 (5) となる。また、本研究では河床面を $u_* = u_{*c}$ となる面と定義する。

$$F = C_D A \frac{\rho}{2} u_{*c}^2 \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{\beta y}{2.5d} + A_r \right)^2 \quad (5)$$

一方、ブロックの移動限界状態は次式 (6) で表される。

$$F = W_w \tan \varphi \quad (6)$$

ここで、 W_w ：ブロックの水中重量である。 φ は移動限界角度であり、転動の場合には直方体であれば $\tan \varphi = L_s / h_b$ となる。ここで、 h_b ：抗力の作用点位置と転動点との垂直距離であり、 y や d の関数となる。また、 L_s ：ブロックの重心位置と転動点との水平距離である。ブロック幅を b 、ブロック高さを k とすると、式 (5) と式 (6) から式 (7) が得られる。

$$\frac{W_w}{bk \frac{\rho u_{*c}^2}{2}} = \frac{C_D}{\tan \varphi} \frac{y}{k} \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{\beta y}{2.5d} + A_r \right)^2 \quad (7)$$

式 (7) の左辺はブロックの諸元で決定されるが、右辺は y の関数である。そこで、式 (7) をブロックの諸元の算定式とし、その妥当性と式中の定数値を水理実験により検討する。

(2) 水理実験

全長24m、水路幅0.2mの可変勾配型直線水路内に平均粒径2.3cmの礫を敷き詰め、初期河床勾配を1/10とした。礫床にブロックを設置した（図-5参照）。下流の堰を用いて河床材料が動かないように水を貯めた後、流量40.0 l/secを通水し、河床低下を引き起こし最上段のブロックを流出させた。最上段のブロックが流出した時の検査区間（0.5m長さ）の上下流端の水位、区間内の4地点での水位、水深を計測した。そして、運動量則に基づき平均底面剪断力、限界摩擦速度を算出した。また、ブロック

表-1 実験条件

	重量 W (g)	$\tan \phi$	u_{*c}^2 (cm^2/s^2)	実験回数
1	38.2	0.87	441	3
2	38.2	0.84	440	3
3	49.3	0.84	452	1
4	58.4	0.75	542	3

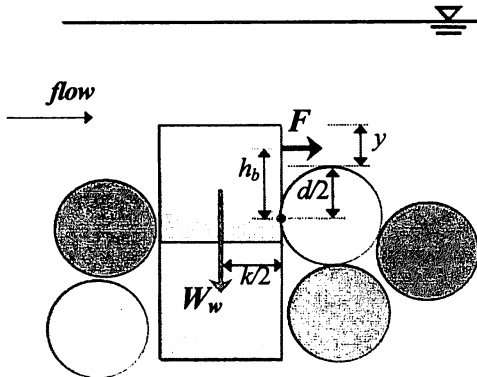


図-6 ブロックの転動点の位置

流出の直後に通水を止め、ブロック周りの礫の最頂部の高さを計測した。ブロック最上段の上面と礫最頂部の高さの平均値との差 y を算出した。

表-1に実験条件と実験結果を示す。各ブロックは一辺が3cmの立方体であり、塩ビ製である。ブロックの重量 W はブロックに砂とともに混ぜる小径の鉛の量を増加させることによって変化させた。実験はほぼ同一な初期条件のもとで繰り返して行い、得られた結果の平均値である $\tan \phi$ や限界摩擦速度の2乗の値を表中に記している。図-2で説明したようにブロックは転動して流出するが、転動点の位置は次のように計算される（図-6参照）。

$$L_s = \frac{k}{2}, \quad h_s = \frac{y}{2} + \frac{d}{2} \quad (8)$$

したがって、 $\tan \phi$ は次式 (9) で表される。

$$\tan \phi = \frac{L_s}{h_s} = \frac{k}{y + d} \quad (9)$$

ここで、 k : 立方体ブロックの一辺の長さ、 d : 河床材料の平均粒径である。

(3) 諸元の決定と河床面の推定方法

図-7に実験結果を示す。図の横軸の D は式 (7) の左辺であり、再記すると次式で表される。式中の u_{*c}^2 には表-1に示した実験結果を用いている。

$$D = \frac{W_w}{bk \frac{\rho u_{*c}^2}{2}} \quad (10)$$

$C_D=1$ として、 β の値を最小二乗法により求めると $\beta=0.70$ となり、式 (7) は次式のように表される。

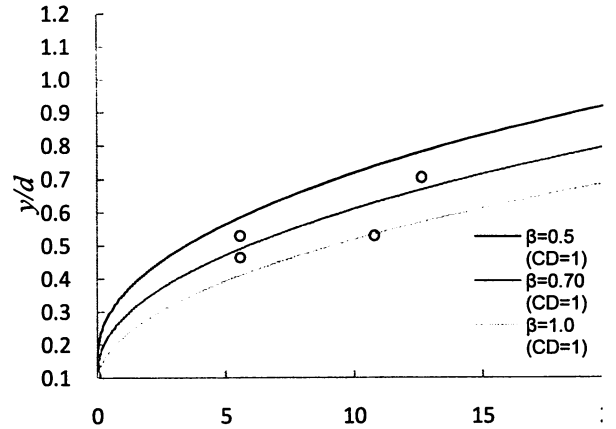


図-7 式(7)中の定数の決定

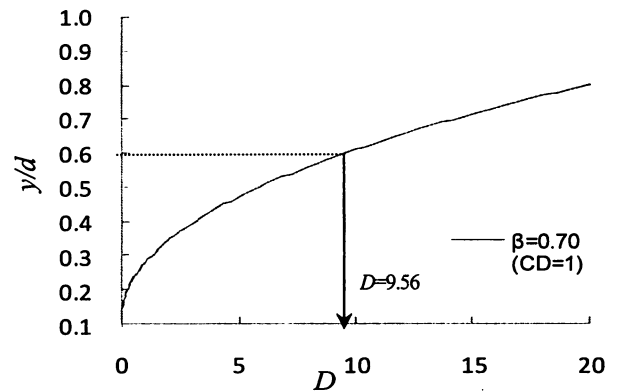


図-8 ブロック諸元の決定方法

$$\frac{W_w}{bk \frac{\rho u_{*c}^2}{2}} = \frac{1}{\tan \phi} \frac{y}{k} \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left(0.28 \frac{y}{d} \right) + A_r \right\}^2 \quad (11)$$

図-7より、式 (11) は実験結果を良好に表現していると考えられる。

一方、式 (11) はブロック諸元を算定式と読むことができる。適当な y/d を与えると式 (11) (または図-8) から D が求まる。 u_{*c} については、岩垣公式を用いて河床材料の平均粒径から算出できると仮定すると、 W_w と bk のみの関係となり、ブロックの寸法を決めれば重量が算出されることとなる。

あるいは、式 (11) はブロックの諸元と u_{*c} が既知である場合、ブロック上面から河床面との距離 y が算出できることを表している。

5. 小規模出水での洗掘深センサーの挙動

平成20年3月18日に江の川水系の灰塚ダムにてフラッシュ放流（最大流量 $100\text{m}^3/\text{sec}$ ）が行われた。その小規模出水に合わせて、灰塚ダム下流の計納地点において、本研究で試作した洗掘深センサーの動作確認を行った。現

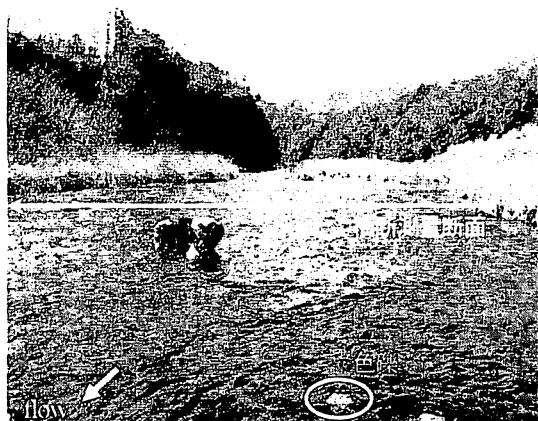


図-9 洗掘深センサーの設置状況

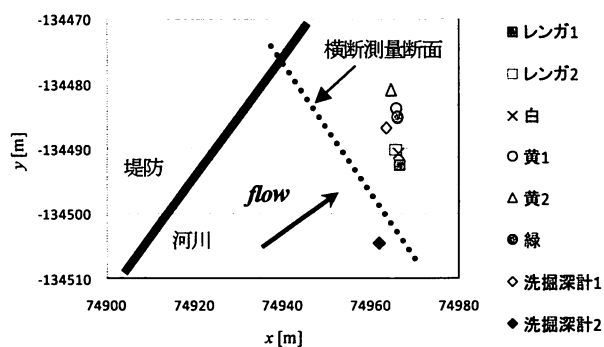


図-10 計測機材の設置位置

地では、洗掘深センサーとともに着色した礫、レンガを設置し、放流前後の河床高の変化や最大洗掘深、埋め戻し量を観測した。なお、測量にはトータルステーションとRTK-GPSを使用した。設置状況を図-9に示す。

(1) 観測方法

使用したブロックは一辺5cmの立方体であり、塩ビ製で、重量は210gである。ブロックの上下面にはステンレス板の電極が取り付けられている。各ブロック内に5k Ω の抵抗を取り付け、データ取得用ブロック（内部にデータロガーとバッテリーを配置）の上にブロックを2段積み重ねた。同一の組み合わせの計測器を2箇所に設置した。サンプリング間隔は1分としフラッシュ放流前から放流後の2日間ほど電気抵抗を計測した。

比較用の洗掘深データを得るために、白、黄、緑の礫やレンガを埋設した。色礫の平均粒径は白2.8cm、黄4.1cm、緑6.8cmである。それらの色礫を直径10cm、深さ20cmほどの円柱状に河床に設置し、その表面を周辺の河床面に合わせた後、その位置と河床高をトータルステーションで計測した。また、レンガは市販のものを用い、2箇所に3段ずつ設置した。レンガの寸法は21cm $\times$ 10cm $\times$ 6cmであり、重量は2.3kgである。21cm $\times$ 6cmの面が流れに概ね垂直になるよう設置した。

図-9に示す横断面において横断測量を行った。また、図-10に平面位置を示すように、その近傍の河床に洗掘

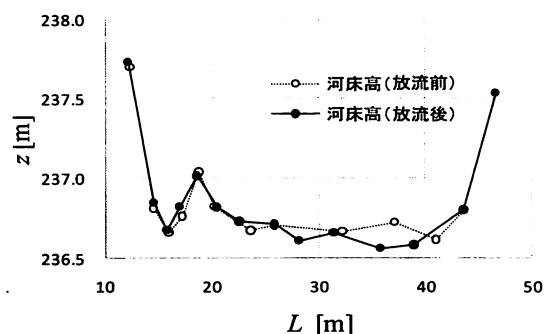


図-11 放流前後での河床高

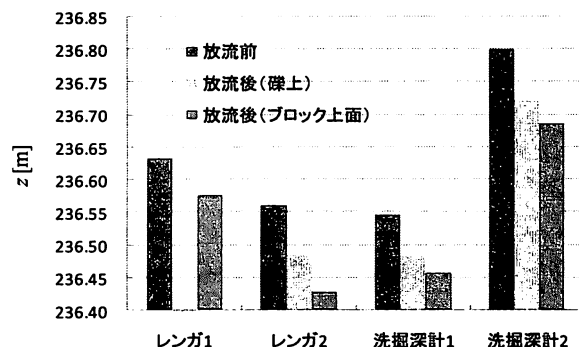
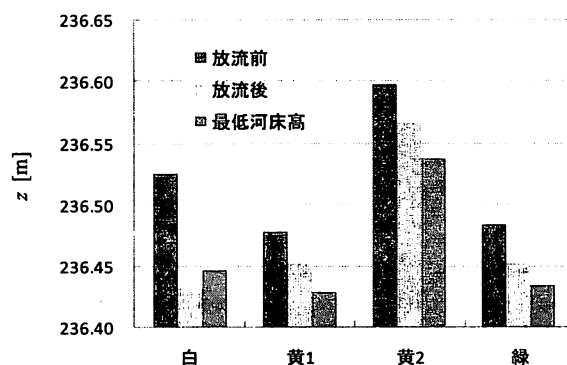


図-12 放流前後の河床高の比較

深計測ブロック、色礫、レンガを周りの河床材料を乱さないように埋めた。

(2) 観測結果

図-11に放流前後の横断面形状を示している。図より、右岸側の河床がやや低下したことが認められる。

図-12にトータルステーションによって測量された河床高に関する結果を示す。縦軸は標高であり、濃い灰色のバーの先端が放流前の河床高、中程度の灰色のバーの先端が放流後の残存した色礫やブロックなどの上面の高さ、淡い灰色のバーの先端が放流後の河床高を示している。そのため、濃い灰色と中程度の灰色のバーの差が最大洗掘深であり、中程度の灰色と淡い灰色のバーの差が埋め戻し量となる。白色の礫のデータにおいて中程度の灰色と淡い灰色のバーの長さが逆転しているのは、トータルステーションでの計測時の反射板の位置による誤差と推測される。図-12より、増水期に最大で5cm $\sim$ 10cm程度の河床低下が発生し、減水期に3cm程度の埋め戻し

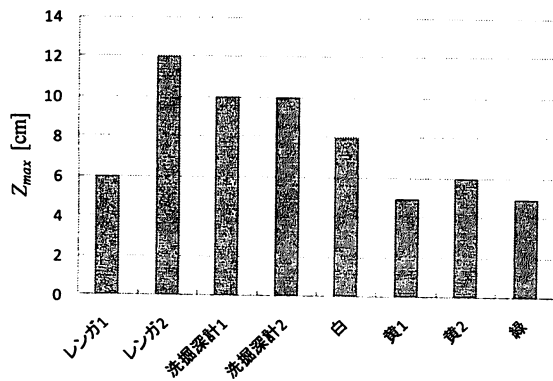


図-13 最大洗掘深の比較

が起こったことが知られる。今回の観測では、試作したセンサーの時系列データが限られた時間帯だけしか取得できなかったが、試作した洗掘深センサーは流量ハイドログラフのピーク以前に2個とも流出したことは確認できている。

より直接的に最大洗掘深を比較したものが図-13である。試作した洗掘深センサーでは2個のブロックが流出したため、最大洗掘深を10cmとしている。従来使用されてきた他の方法と比較すると、本センサーの結果は色礫とレンガの結果の中間に位置し、妥当な結果を与えているように考えられる。なお、平均粒径を5cmと仮定し、岩垣の式を用いて限界摩擦速度を推定し、式(11)より y/d を求めると0.61となる。したがって、2段目のブロックが流出したとき、河床は残存ブロックの上面より約3cm下方に位置していたことになる。すなわち、河床が8cm程度まで低下した段階で2段目のブロックが流出したものと推測される。しかし、未だ検証が不十分であり、より大きな洗掘が発生するような状況での検討が不可欠である。

6. 結論

本研究は、急流河川における洗掘深を計測するために構造の簡単なセンサーを試作し、室内実験と小規模な出

水において基礎的な性能の検討を行った。得られた主要な結論は以下のようなものである。

- 1) ブロック群の電気抵抗の変化から流出したブロック数、したがって洗掘深を推定する方法を提案し、計測の可能性を示すことができた。しかし、同時に電極部の接触不良を改善する必要性が明らかとなった。
- 2) 計測ブロックの諸元の算定式を導出し、水理実験により定数を決定し、使用できる式を提案した。
- 3) センサーを小規模な出水に適用し、従来の最大洗掘深の計測方法と整合する結果を得た。

なお、実用化に向けて改善すべき点や導入すべき技術が多い。今後、室内実験や実河川での洪水への適用を行い、課題を克服して行く予定である。

謝辞：国土交通省中国地方整備局三次河川国道事務所灰塚ダム管理支所にはフラッシュ放流時の観測にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 末次忠司：洗掘センサ，「川の技術のフロント」（辻本哲郎監修，（財）河川環境管理財団編，技報堂出版），pp.40-41，2007。
- 2) 国土交通省河川局治水課：河川堤防質的整備技術ガイドライン（案）および河川堤防モニタリング技術ガイドライン（案）の策定について，http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/05/050609_.html。
- 3) （株）拓和：河床低下計測センサー，<http://www.takuwa.co.jp/mizu/index.html>。
- 4) パシフィックコンサルタンツ（株）：急流河川用「侵食センサー」の開発，http://www.pacific.co.jp/tech/study/water/files/water_96.pdf。
- 5) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，p.192，1985。

(2008. 4. 3受付)