

河川の掃流砂量の測定と掃流砂量観測技術・ 評価技術に関する研究

STUDY ON OBSERVATION TECHNIQUE AND ASSESSMENT OF BED LOAD DISCHARGE

曾山和宏¹・大熊義史²・畠中泰彦³・浅野文典⁴・福岡捷二⁵
Kazuhiro SOYAMA, Yoshifumi OHKUMA, Yasuhiko HATANAKA,
Fuminori ASANO and Shoji FUKUOKA

¹ 前国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所調査第一課 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)

² 前国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所調査第一課長 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)

³ 前国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所副所長 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)

⁴ 正会員, 工修 株式会社大林組, 夕張シューパローダム建設所 (〒068-0671 北海道夕張市鹿島緑町)

⁵ フェロー, 工博, Ph.D, 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The estimation of bed load in rivers is important for flood control and river environment. However, it is difficult to measure properly bed load because of the complexity of sediment transport phenomena near the river bed. This is the reason why measurements of bed load have not been performed for a long time in Japan and reliable bed load formula expressing sediment transport in rivers have not been proposed.

In this study, we carried out field experiments of stable channel formation and bed load measurement in the observation channel excavated in the Jyoganji river field. These experimental results proved that bed load in stony bed rivers was expressed properly by Fukuoka's bed load formula. Technical issues were presented concerning observation method and estimation of bed load.

Key Words : field experiment, stony bed river, observation technique of bed load, channel cross-sectional form, grain size distribution, Fukuoka's bed load formula,

1. 序論

今日河川技術が進展し、河川管理に生かされてきているが、今なお多くの河川で、土砂移動のバランスが崩れ、河床低下や河道の滞筋化、それに伴う河道内の樹林化など河川管理上の多くの問題が生じている¹⁾。原因はいろいろ考えられるが、本来河道が持つべき健全な流砂運動を考慮に入れた川づくりを行っていないこと、河道を流れる掃流砂量についての十分な知見を有していないことが理由の一つである。掃流砂量は安定な河道の形成に関係し、それは治水だけでなく河川環境、生態環境に密接に関係することから、治水、環境の両面から掃流砂量の的確な理解が重要である^{1), 2)}。

河道設計、管理を適切に行うためには、流量、河幅、水深、河床材料の粒径、土砂輸送量等の相互の関係を理解することが重要である。河道を流れる掃流砂量が、洪

水流の掃流力だけでなく、河幅、断面形など河道の器と密接に関係していることが最近福岡らによって示されてきた。福岡^{3), 4), 5)}は、沖積地河川の安定な河道形状、河道幅は、流域の特徴を表す河道形成流量、河道勾配、河床材料(粒度分布)に支配され则认为、次元解析により日本および海外の自然河道の無次元河幅無次元水深は流域の特性を表す物理量からなる無次元河道形成流量により表現できることを示し、さらに、河幅、水深が決まればそこでの掃流砂量も決まるとの考えのもとに、河道断面形を考慮した無次元掃流砂量式^{6), 7)}を導いた。従来の無次元掃流砂量式が、無次元掃流力の関数で表現されたのとは異なり、福岡の流砂量式は、流量、河床勾配、代表粒径で表現された無次元流量と河床勾配の積で表現されており、容易に定まる物理諸量を用いて流砂量が決まる式形を持つ。福岡の無次元掃流砂量式は、広く変化する河道条件、洪水流条件のもとで観測され、公表されているアメリカ、日本等の現地での掃流砂量観測値を説明

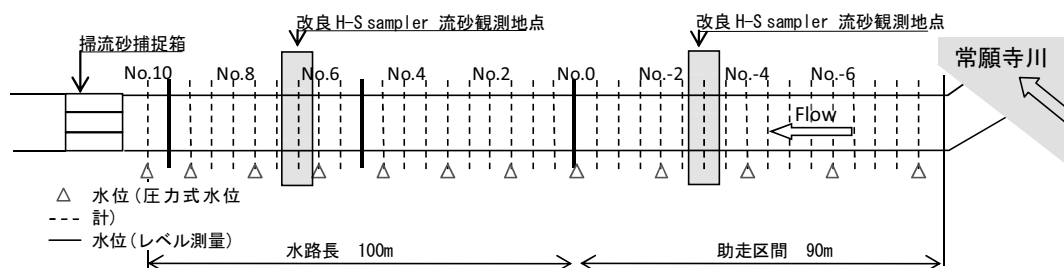


図-1 実験水路平面図



写真-1 改良H-S sampler



写真-2 改良H-S samplerによる流砂観測状況 (通水5回目)



写真-3 掃流砂捕捉箱

する式であることが示されてきた。

洪水時の掃流砂量を現地で観測することは、大変な労力を要し、技術的に容易なことではない。しかし、アメリカでは、1940年代から流砂量観測が営々と行われており、観測値とともに様々な観測機器や観測技術が提案されている^{8),9)}。一方、日本では、1960年代に建設省土木研究所などが主導して、全国の河川で集中的に流砂量観測が実施されたが¹⁰⁾、大陸の河川に比して洪水継続時間が短く、流量変化が大きいこと等から流砂量観測が困難でかつ精度が低く、行政的な要請も低かったこと等もあって、流砂量観測が実施されていないのが実情である。

河道設計に際しては、対象河川の洪水時の流砂量等、流砂現象の正しい情報を知り、活用することが基本であり、治水、環境の調和した川づくりのためには、流砂量観測が求められる。

本研究では、常願寺川河川敷水路で掃流砂量観測法、観測技術の改良と、掃流砂量の評価法の検討を主目的に安定な河道の形成実験と観測を行った。安定河道形成時の河幅などの横断形状と河道形成流量、河床勾配、河床材料粒度分布の関係(福岡の式)を調べ、さらに、石礫河川に対する福岡の無次元掃流砂量式の適用性について検討する。

2. 常願寺川現地実験

(1) 実験水路

現地実験水路は、常願寺川6.1kmの砂州を素ぼり掘削することにより設けた。図-1に実験水路の平面図を示す。実験水路は河川の滞筋に相当する直線水路で、全長190m(うち土砂供給のための助走区間90m、断面観測区間100m)、初期水路断面は幅4.9m、河床幅1.0m、高さ1.3mの拡幅可能な自然河岸からなる単断面水路である。水路の縦断勾配は実験箇所のある平均河床勾配相当の1/200

である。水路の河床材料は現地河床材料をそのまま使用している。実験水路への流量は、常願寺川本川をコンクリートブロックにより締切り、本川水位を堰上げ、調節した流量を通水した。実験水路の上流端及び本川からの土砂供給はない状態で通水し、実験水路下流端には水路に流れる流砂を全量捕捉できる施設として、縦6.2m、横2.2m、深さ1.0mの鋼製ボックスを3基設置した。

(2) 測定項目

観測項目は、水位、流量、河床縦横断形状、河床材料粒度分布の時・空間変化及び掃流砂量である。水圧式水位計は、助走区間として設けたNo.0より上流の区間では20m毎に、No.0より下流の区間では15m毎に流路の中央に設置し、2秒間隔で観測した。また、レベル測量による水位観測も行った。流量の観測は図-1に示すNo.0, No.5, No.9'の各測線でプライス式流速計を用いて流速を測定し、区分横断面積を乗じることで算出した。流速測定は、水深に応じて1点法、または2点法とした。横断方向には3~5点測った。また、流量観測時には各流量観測断面の横断形状を標尺を用いて測定した。河床材料調査は、各通水終了後に表層画像調査を行い、通水5回目終了後にふるい分け試験を行った。また、下流端掃流砂捕捉箱に堆積した土砂量、samplerにより捕捉した土砂量についてもふるい分け試験を行った。各測定項目の測

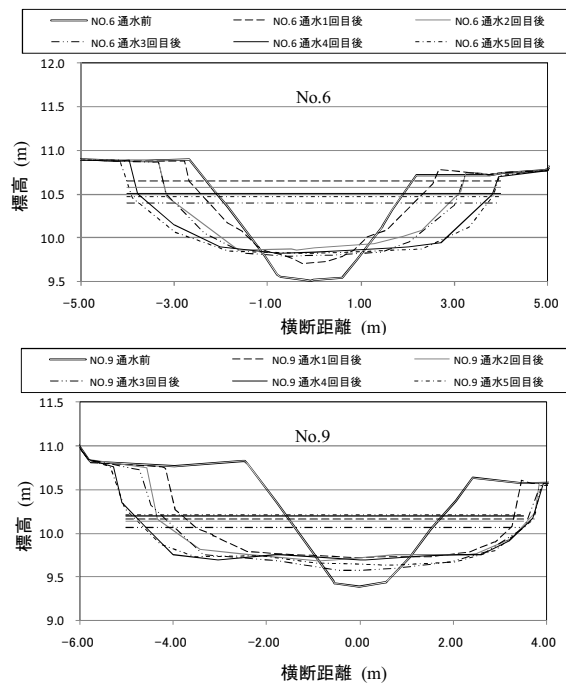


図-2 水位・横断面形状

定位置を図-1に示す。

(3) 流砂量の観測方法

改良H-S sampler

写真-1に、実験に用いた掃流砂採取器を示す。採取器は、Helley-Smith bedload sampler⁹⁾(以下H-S sampler)を改良したもので、流入口の形を従来の正方形でなく、20cm×10cmの横長のもので、改良H-S samplerと呼ぶ。土砂を捕捉する袋は1mmメッシュである。観測は、写真-2に示すようにバックホーのバケット先端に掃流砂採取器をワイヤで吊し、採砂器流入口の上部に付けたロープを上流から引っ張ることで、流入口が流向に対し垂直な方向に位置するように通水中の水路の中央部に静置した。静置時間は採砂量が捕捉袋の半分程度になるように1分~2分を設定した。単位幅掃流砂量は、採取土砂の質量を計測し、静置時間と流入口の幅(20cm)で除すことにより算出し、全掃流砂量は、水路横断形状から土砂移動が生じている幅で単位幅掃流砂量を積分し算出した。

掃流砂捕捉箱

写真-3に示す実験水路下流端に設置した掃流砂捕捉箱を用い、配備したクレーンに取り付けたゴンドラに人が乗り、掃流砂捕捉箱を24の区間に分けたそれぞれの地点を測量することにより、捕捉箱内に堆積する掃流砂の堆積形状の時間変化を算出することにより、時間ごとの掃流砂量を算定した。ここで、堆積土砂の空隙率は $\lambda=0.4$ を用いている。なお、通水後、掃流砂捕捉箱に堆積した掃流砂は、その都度、バックホーと人力により土砂を掻き出して、通水毎に空の状態にして実験に臨んだ。

(4) 実験工程

通水は5回行った。通水1回目は、素ぼり掘削した初期水路に対し、 $5.3\text{m}^3/\text{s}$ の流量を流し流量に応じた河道を形成した。初期断面からの河岸拡幅により大量の土砂が河床を流れることが想定されたため、掃流砂捕捉箱には蓋をして流砂はすべて通過させた。通水2回目は、 $7.2\text{m}^3/\text{s}$ の流量を1時間20分流通した。この実験では、1回目の $5.3\text{m}^3/\text{s}$ から $7.2\text{m}^3/\text{s}$ に流量を増大させたために河岸浸食・拡幅が生じ、それに伴い著しい量の土砂が流れたため、下流端の掃流砂捕捉箱は通水途中で満砂状態になった。改良H-S samplerによりNo.-3地点で流砂観測を試みたが、観測データは、河岸侵食を伴うときのものであり、また、この段階での流砂観測が不慣れであったためにSamplerの静置がうまくいかなかった。3回目は、1回目と2回目の実験流量の中間流量 $6.4\text{m}^3/\text{s}$ を1時間40分通水し、改良H-S samplerおよび掃流砂捕捉箱による流砂量観測の両方を行った。このときの流砂量は、2回目の実験では通水時間が短かったために、河床にとどまっていた砂礫が主に採取されている。通水4回目は、 $9.5\text{m}^3/\text{s}$ の流量を1時間10分通水した。改良H-S samplerによる掃流砂観測を行い、下流端捕捉箱での流砂量観測は行わなかった。通水5回目は、4回目と同程度の $9.8\text{m}^3/\text{s}$ の流量を1時間40分流通した。4回目、5回目の総計3時間の通水によって河道断面形、水理量に対応した動的に安定な河道が形成され、平衡河道での掃流砂量が流下していると考えられる。No.6'地点で改良H-S samplerによる流砂観測と掃流砂捕捉箱による観測を行った。5回目の通水では、掃流砂捕捉箱は満砂することはなく、量的には十分余裕があった。

3. 実験結果

(1) 水路縦横断面形状及び河床材料粒度分布

図-2に各通水時のNo.6、No.9断面の水位と通水終了後の横断面形状を示す。1回目の通水により、台形状に掘削された初期断面が通水に伴う拡幅と側岸から供給される土砂が河道中央に堆積することにより、滑らかな潤辺形状を有するほぼ船底形の断面^{2), 4), 5)}が形成されていることが分かる。横断形状は、流量が増加する通水2回目、通水4回目と顕著に拡幅し、通水3回目、通水5回目のように直前流量と同程度の流量が通水されている場合は横断面形の変化は小さく安定な河道が形成されていることが分かる。流量の増加に対し河岸拡幅は、河岸勾配をほぼ維持したまま起きている。図-3(a)にNo.6断面での各実験通水終了後の表層画像解析法により算出した河床材料粒度分布を示す。比較のため通水5回目終了後のNo.6断面での河床材料のふるい分け試験結果を併せて示している。表層画像解析法では細粒分の粒子の識別が難しいため、ふるい分け試験結果より細粒分が少なく測定されているが、粒径の大きい部分については、顕著な差異は生じていない。図-3(b)は、流量の増加によって河床構成材料の粒径がどのように変化するかを比較して

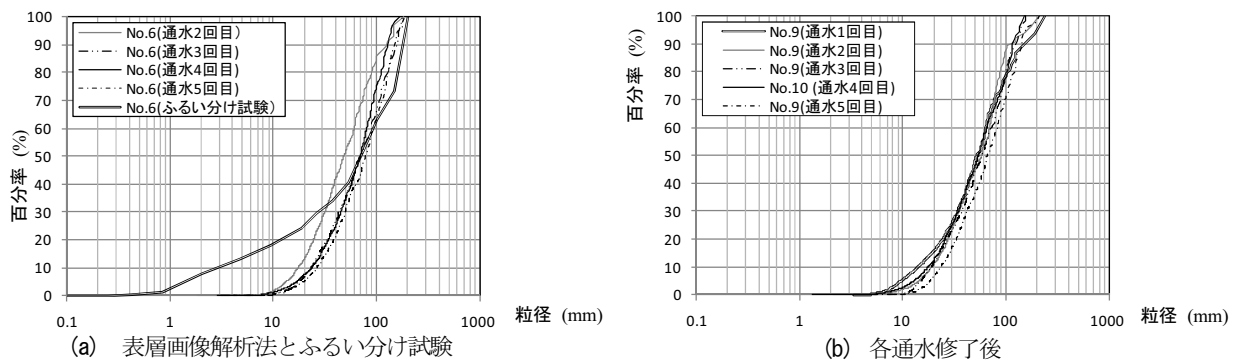


図-3 粒度分布の比較

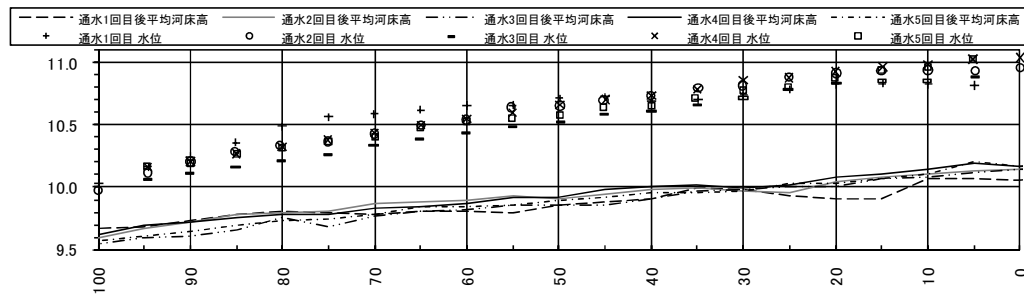


図-4 観測水位・平均河床高縦断面図

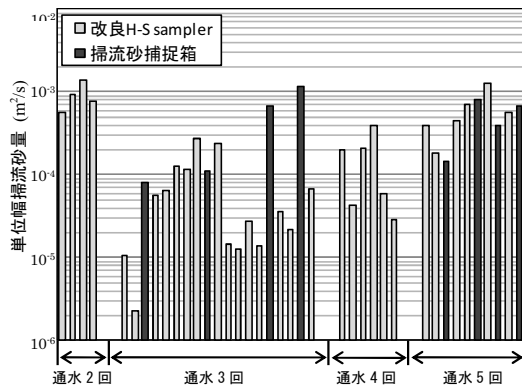


図-5 流砂量観測結果 (単位幅流砂量)

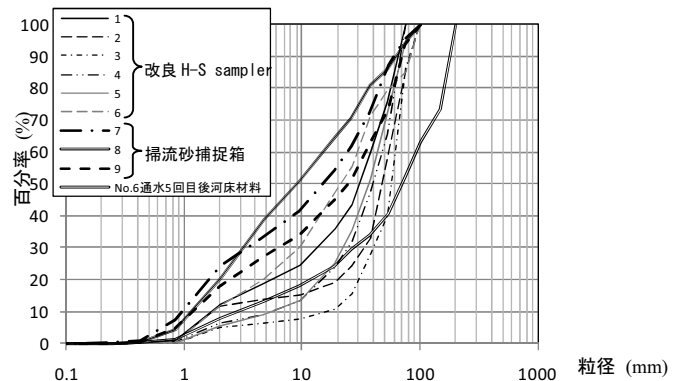


図-6 観測土砂の粒度分布

示している。流量の増加によって、若干、粒径が大きくなる傾向は見られるがその変化は小さい。一方、2009年の実験¹¹⁾では、流量規模に応じて河床材料が粗粒化した。この理由は、2009年は河岸に玉石を設置し、側岸の侵食による土砂供給を抑え、十分な時間通水したのに対し、2010年の本実験では、拡幅の度ごとにほぼ同じ粒度分布を有する土砂が供給されたためであると考えられる。図-4に観測された水位と低水路平均河床高の縦断面形を示す。流量が増加する通水2回目後と通水4回目後で河床高が上昇している。これは、拡幅による土砂が河床に堆積することで生じている。一方、通水3回目後と通水5回目後は、その直前の通水2回目と通水4回目とほぼ同じ流量が流れているため、河岸からの土砂供給がほとんど無く、その分河床が低下し、動的に平衡な横断面形となっている。

(2) 流砂量の観測結果

図-5に単位幅流砂量の観測結果を示す。通水2回目は、土砂移動状況を把握するため、掃流砂捕捉箱の蓋を外し

堆積の様子を観察した。河岸拡幅により土砂移動量が多く、通水中に掃流砂捕捉箱が満杯になった。通水3回目は、改良H-S samplerと掃流砂捕捉箱で観測したが、図-5に示すように結果に大きな差異が生じている。掃流砂捕捉箱による観測値は、観測時間毎(10~20分程度)の間に捕捉箱に堆積した流砂量を繰り返し測り、測定された観測値の平均値として算出している。一方、改良H-S Samplerで測定された流砂量が少ないのは、以下の理由が考えられる。実験当初の観測技術が未熟なため、Sampler流入口を流れに対し垂直な向きに固定出来なかったこと、また、河床に静置する際、大きな粒径集団の上に設置し、河床とsamplerの間に隙間ができ、細かい粒径集団を捕捉できていないこと等が考えられる。

通水5回目は、写真-2に示すように、主流に向け改良H-S samplerを静置出来たため、図-5に示すように、通水3回目と比較すると、観測データのバラツキが少なく、ほぼ安定した観測結果が得られている。

図-6に通水5回目の改良H-S samplerによる観測土砂と

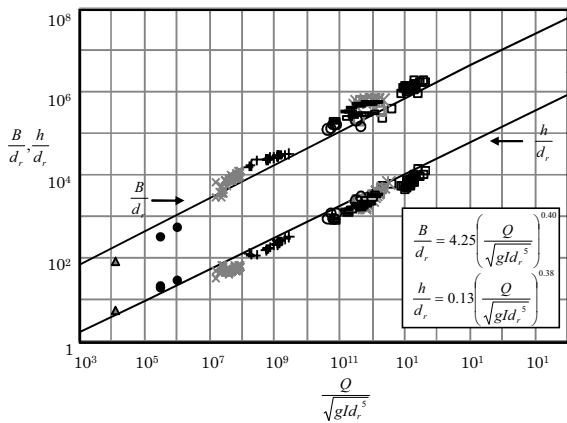


図-7 無次元流量と無次元水面幅、水深の関係

掃流砂捕捉箱による堆積土砂、通水終了後の河床材料のふるい分け試験結果を示す。各通水で観測土砂に対しふるい分け試験を行ったが、安定した河道で行われた流砂観測は5回目であったことから、通水5回目の結果が検討に用いられる。改良H-S samplerにより捕捉される土砂は、その採取方法の不確かさのために、粒度分布のばらつきは大きい。一方、掃流砂捕捉箱で捕えた土砂は、河床を流れるすべての粒径集団を集めていることから、Samplerによって採取された粒径に比して小さい粒径側に寄った分布となっている。

4. 実験結果への福岡の無次元掃流砂量式の適用

福岡^{3), 4), 5)}は、沖積地河川における安定な河道の河幅や水深は、河川流域の特徴を表す河道形成流量、河道勾配、河床材料に支配されると考え、次元解析手法を用い、無次元河幅、無次元水深と無次元流量の関数関係を導いた。そして、国内外の自然河川、および河道拡幅実験データを用い、関数関係を同定し、以下に示す無次元河幅、無次元水深に関する式を導いた。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.40} \quad (1), \quad \frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.38} \quad (2)$$

ここで、 Q ：河道形成流量、 B ：河幅（水面幅）、 h ：水深、 I ：河床勾配、 d_r ：代表粒径、 g ：重力加速度である。また、福岡^{6), 7)}は、河幅、断面形が決まればそこでの土砂移動量も決まるとの考えのもとに、河道断面、河幅の決定機構を考慮した掃流砂量式 式(3)に示す福岡の無次元掃流砂量式を導いた^{6), 11)}。

$$\frac{Q_B}{\sqrt{g} d_r^5} = 0.2 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} I^{1.3} \right) \quad (3)$$

福岡の無次元掃流砂量式(3)は、その後の検討により、右辺項の $I^{1.3}$ よりも $I^{1.0}$ の使い易い式形(4)で与えられる¹²⁾。

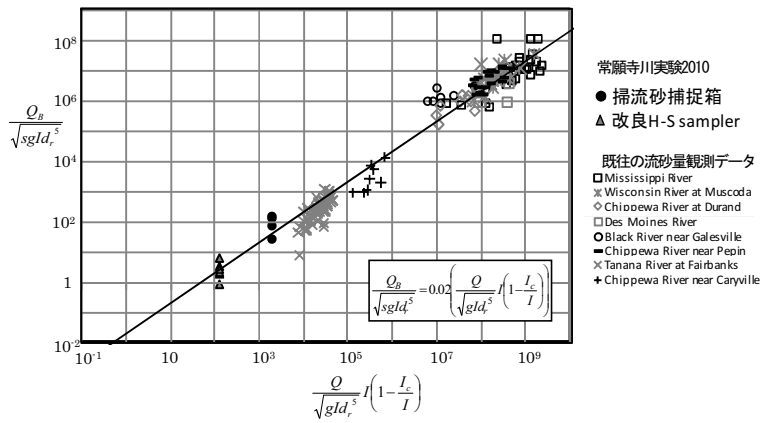


図-8 勾配を乗じた無次元流量と無次元掃流砂量の関係

$$\frac{Q_B}{\sqrt{g} d_r^5} = 0.02 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (4)$$

ここで、 Q_B ：掃流砂量、 s ：は砂礫の水中比重、 I_c ：河床材料の移動限界を与える勾配である。3. で示した観測データを用いて、常願寺川流砂量観測に対し、式(4)の適用性について検討する。

掃流砂量の測定値には、安定な河幅、断面形の河道で観測ができた通水5回目の掃流砂捕捉箱及び改良H-S samplerによる観測データを用いる。図-7に無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の関係を示す。石礫からなる河岸材料の浸食量の違いにより水路幅は縦断的に一様ではなく、やや異なったが、無次元水面幅の算定に用いる幅は、縦断平均水面幅を用いた。図-8は式(4)と観測掃流砂量との関係を示す。石礫河川では、流砂の移動は全河床幅で起こっているのではなく、中央を挟んである幅内で移動が生じていることから、観測中及び通水後に移動幅を調べ、掃流砂量を求めた。2つの図中には、式(1), (2), (4) の導出に用いた河川データも併せて示している。常願寺川現地実験の無次元流量に対する無次元水面幅の関係は、単断面河道での石礫河岸の拡幅実験のため⁶⁾、式(1)より若干小さい値を示す³⁾ものの、ほぼ式(1)および式(2)が成り立つ。図-8は、無次元流砂量式(4)に対し、現地で観測された掃流砂量データをプロットしている。常願寺川現地掃流砂量観測においても式(4)でほぼ説明できることが分かる。この様に式(4)は、石礫河川においても適用可能な流砂量式となっていることが分かる。

5. 流砂量観測技術・評価技術の向上に向けて

掃流砂量を掃流砂捕捉箱に集め、堆積量の時間変化を測り単位時間当たりの掃流砂量を算定する方法は、確実な方法である。しかし、大きな容量の箱を必要とし、小河川を除いては実行が難しい。一方、Sampler を用いる方法は、多くの課題があるが、有力な方法の一つである。橋梁上からSampler をつりさげ、流砂量を採取すること

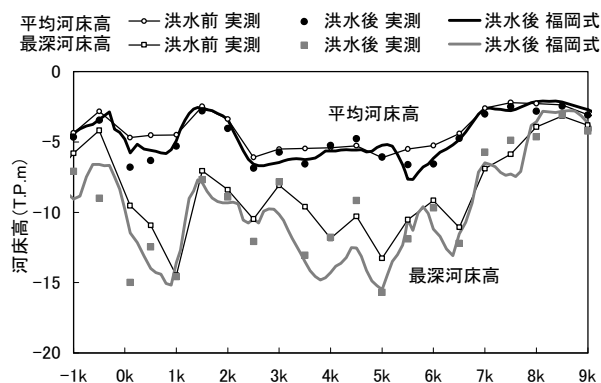


図-9 石狩川昭和56年8月洪水の実測と解析河床高の比較

になるが、荒天時の観測作業は交通規制を含め、相当の制約を受けることになる。掃流砂観測機器は、現地対象地点の河床材料特性に応じた仕様の機種を用いる必要があり、静置状態を確認することが困難であるため、各点で数回観測し、明らかに傾向が異なる観測データは除外することで、観測精度の向上を図ることになる。また、横断方向複数点で観測し全体の流砂量を算出することが望まれる。必要なことは、継続的に流砂量観測を行い、信頼のできるデータを得る技術の蓄積である。

流砂量観測と並行して行う河床変動解析は、掃流砂量の評価法の改善に役立つ。河道の洪水関連データと解析技術の向上は、掃流砂量の評価法の改善をもたらしている¹⁾。今日、国管理の河川においては、主要な河道区間において、水位計を多数配置して洪水流の水面形の時間変化を密に観測している。河道で起こっている水理現象は、確実に水面形に反映することから、観測された水面形の時間変化が解となるように非定常二次元洪水流（または準三次元）と二次元河床変動の式を掃流砂量式を介して一体的に解き、河床変動の時間変化を明らかにし、掃流砂量式の検証が進められている。洪水時の河床変動解析に際して、信頼できる情報は、洪水流の各時間の水面形と洪水後に測られた河床形状である。流砂の初期条件としての洪水前の河床形状の与え方は、洪水後の解析河床形状の信頼度に関係する。このためには、当該の洪水直近に測られた200m間隔（河川によっては500m間隔）の河床横断測量データから河床高の等高線図を描き、これに近年の航空写真から砂州など中規模河床形状の平面形の情報を取り込み、初期河床形状の信頼性を高めることが大切である。流砂の上流端境界条件の扱いも解析では重要である。境界条件には、河川の全掃流砂量を説明する式(4)を用いる¹¹⁾。また、二次元河床変動計算には、式(4)を単位幅流砂量 q_B と単位幅流量 q で書きなおした式(5)を用いる。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgId_r^3}} = 0.02 \left(\frac{q}{\sqrt{gId_r^3}} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (5)$$

図-9は、このようにして行われた石狩川昭和56年8月洪水後に観測された平均河床高と、最深河床高に対し解

析によるそれぞれの河床高の比較である。解析は、観測された水面形の時間変化を解とするように非定常準三次元流れの解析と平面二次元河床変動解析を一体的に行っている。掃流砂量式は式(5)を、浮遊砂量式は、板倉・岸の式を用いている。解析結果は、実測値をよく説明出来ており、石狩川においては、式(4)、式(5)の掃流砂量式の適合度が高いことが分かった。

6. 結論

本研究の主要な結論を示す。

- 1) 河岸が自由に侵食可能な河道における河道形成流量に応じた横断形状は、船底形の横断面形状をとり、動的に安定な河道になることを示した。
- 2) 石礫河道の掃流砂量観測結果から、無次元掃流砂量が福岡の式で表現できることを示した。また、石狩川における洪水時の土砂移動には、福岡の掃流砂量式の適合度が高いことを示した。
- 3) 掃流砂量観測のために必要な観測技術の改良点、掃流砂量評価の精度向上のための考え方をまとめた。

参考文献

- 1) 福岡捷二：土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術—実務上の課題と調査・研究の方向性、河川技術論文集、第14巻、pp. 1-6, 2008。
- 2) 芦田和男、江頭進治、中川 一：21世紀の河川学、安全で自然豊かな河川を目指して、京都大学出版会、2008。
- 3) 福岡捷二：巻頭言、これからの河川管理を考える—自然河川に学ぶ、河川、66巻、第3号、pp. 3-9, 2010。
- 4) 浅野文典、福岡捷二：沖積地河川における安定な川幅・水深・治水と環境の調和を目指した河道断面の決め方、水工学論文集、第54巻、pp. 1021-1026, 2010。
- 5) 福岡捷二：治水と環境の調和した治水適応策としての河幅、断面形の検討方法、河川技術シンポジウム、第16巻、pp.5-10, 2010。
- 6) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適用技術のあり方—治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて、土木学会論文集、F. Vol. 66 No. 4, pp. 471-489, 2010。
- 7) Hubbell, D. W.: Apparatus and techniques for measuring bedload, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1748, 1964。
- 8) Helley, E.J., and Smith, Winchell: Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler, U. S. Geological Survey Open-File Report, 1971。
- 9) 建設省土木研究所、掃流砂量観測、1970。
- 10) 前嶋達也、岩佐将之、長田健吾、福岡捷二：石礫複断面直線—蛇行河道の河床変動および河床材料分布に関する研究、水工学論文集、第55巻、pp. S769-774, 2011。
- 11) 浅野文典、福岡捷二：河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式の導出とその適用性に関する研究、水工学論文集、第55巻、pp. S793-798, 2011。
- 12) 浅野文典、福岡捷二：河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式の導出、第38回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、II-28, 2011。

(2011. 5. 19受付)