

大きな石による河床再生技術に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON RIVER IMPROVING METHOD TO RECOVER GRAVEL BED RIVER WITH LARGE STONES

福島雅紀¹・櫻井寿之²・箱石憲昭³

Masaki FUKUSHIMA, Toshiyuki SAKURAI and Noriaki HAKOISHI

¹正会員 工博 (独)土木研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム 主任研究員(〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 工修 (独)土木研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム 主任研究員(同上)

³正会員 (独)土木研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム 上席研究員(同上)

In most Japanese rivers, it is a principal problem of maintaining and improving river channel where gravel-bar area have decreased with forestation at flood channel, which is generally known being caused by construction of cross river structures, gravel mining and so on. As a result of bed degradation, bed rock or hardpan is exposed in several rivers. Recently, large stones are used as a countermeasure for the problem to keep sand and gravel on bed rock or hardpan. However, it is not clear that what rate of large stones and how they should be set in the river. So, effect of large stones on sedimentation was studied in a flume, where cobble was used as a large stone. As one conclusion of some, it was clarified that sediment discharge decreased by 20 to 30 percent of sediment discharge in case of no large stone after setting several large stones on river bed with its half height covered with original riverbed materials.

Key Words : *Experimental Study, bed rock, hardpan, sedimentation, deposition*

1. はじめに

河川横断構造物の設置, 砂利採取等の影響から, 河道内樹林化と相俟って礫河原の減少が指摘される河川が全国的に見受けられる¹⁾. また, それらの問題と関連して生じる河床低下に伴って未固結堆積層が喪失し, 山地河道で見られるような岩盤や軟岩が露出した箇所が沖積河道でも確認されるようになってきた. 石川県の由来となった手取川, 広い河原が広がっていたことで知られる多摩川, 鬼怒川などでも岩盤等の露出が確認され, 治水上または河川環境上の観点から種々の問題を生じさせている. 本論文では, このような状態の河床に砂礫を堆積させ, 未固結堆積層が連続的に見られる沖積河道を復元することを河床再生と定義する. 近年, 岩盤等の露出した河道において大きな石を用いて未固結堆積層の再生を試験的に実施している河川もある. 手取川においても2008年から現地試験が開始されているが, 石狩川水系豊平川の支川真駒内川の取り組み²⁾は先駆的と言える. 玉石を連結した水制を配置して上流から流れてきた砂礫を堆積させることで未固結堆積層を回復させるものであるが, 水制の配置を検討するにあたっては模型実験を実施している. いくつかの配置で現地施工を行い, その効果も

徐々に確認され始めている. 上下流の土砂の連続性を考慮すると, 下流河道の河床低下といった悪影響が懸念されるが, 大きな石の配置の仕方を検討することによって流砂量を適切に制御することができれば, その影響も緩和できる. また, 土丹層上に薄く砂礫が堆積する多摩川, 浅川などでも有効な手法と考えられる. 岩盤等が露出した河道では大きな石自体の固定手法も問題となり, 河床再生の実施に大きな困難が伴うことも想定されるが, 砂礫層が残る河道では大きな石を粒径の半分程度を埋めて敷設することで, 比較的容易にその効果を期待できよう. その上, 露岩等の露出を未然に防止できる可能性もある. ここで, 「大きな石」と言った表現は工学上明確な定義ではないが, 通常の出水では移動しない河床材料を指すものとする.

図-1に河床再生のイメージを示す. 中小規模の出水時には移動しない大きな石を河床に配置することで通過土砂量を制御し, 露岩部等の未固結堆積層の薄い区間への砂礫の堆積を促進するものである. 図中の Q_s は砂礫層が存在する区間, Q_{s1} は露岩等が生じた区間, Q_{s2} は大きな石を敷設した区間で, A, B断面を一定期間, 例えば一出水で通過する流砂量である. 露岩の影響は, 河床の粗度が小さくなり砂礫が止まりにくくなることと考えるが, 結果として $Q_{s1} \geq Q_s$ と言える. 大きな石の効果については, 芦田・高橋・水山³⁾が水路

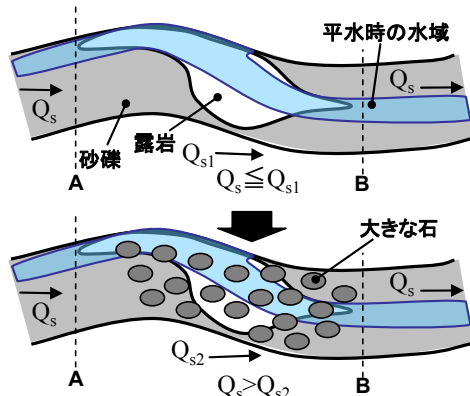


図-1 大きな石を用いた河床再生のイメージ

実験によって確認し、大きな石の割合が重量百分率で5%程度では大きな影響はなく、10%以上になると流砂量が低減する可能性があることを述べている。また、岡部・肥本⁴⁾は、大きな石を含む混合粒径の流砂量式が存在しないことから、大きな石とその後流域による流砂の制限領域の発生、および大きな石の突出状況に応じた形状抵抗による有効掃流力の変化を考慮して、大きな石が存在する場合での流砂量の算定法を提案している。流砂量式の精緻化といった観点からは有効であるが、算定式に含まれるパラメータの多さなど、実用面ではその用途が限定される。具体的には、現状の河床に対して、どの程度の割合で大きな石を配置すれば流砂量を目標値まで低減できるのか、また非常に薄い未固結堆積層を維持するためにはどの程度の割合で大きな石を配置する必要があるかなどといった観点からは、その答えを得にくい。そこで、比較的大きな河床材料まで移動させることができる実験水路を用いて、表層に占める大きな石の割合を変化させた時の流砂量を実験的に調べた。流砂量に加え、礫の移動速度、移動層厚も合わせて計測した。なお、実験水路では平均粒径15mm、最大粒径45mm程度の河床材料を用いて実験し、大きな石としては粒径100mmのほぼ均一な大礫を用いた。ここで、現地への適用を考え実験のスケールを1～1/10と仮定すると、平均粒径15mm～150mmの礫床河道に適用できると考えられるが、元河床と大きな石との粒径比、元河床の粒度分布なども実験結果に影響すると考えられ、後述する結果が限定された実験条件の下で導かれた結果であることを念頭に置きつつ現地への適用を検討すべきである。なお、フルード数は0.9程度、水深粒径比は7～20、砂粒レイノルズ数が 10^4 オーダーの実験であり、流砂の相似性は保たれていると考えている。以下、2章では実験の概要を述べ、3章で実験結果、4章で実験結果を踏まえた河床再生のポイントを考察する。

2. 大きな石の流砂への影響に関する水路実験

実験に用いた水路は、図-2に示す長さ30m、幅1m、深さ0.8mの土砂循環装置付可変勾配水路である。掃流砂は、水路下流端に設置された篩い分け機で浮遊砂と分離され、ベ

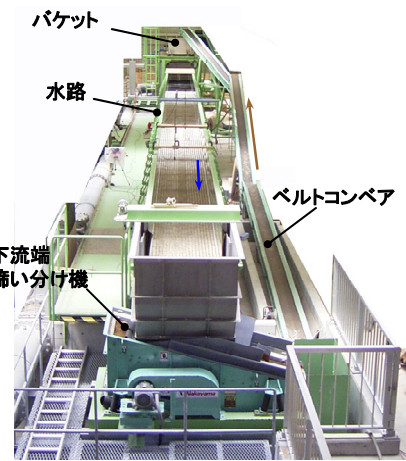


図-2 土砂循環装置付可変勾配水路

表-1 実験条件

Case	水路 勾配	流量 (m^3/s)	河床材料		
			$D_{50}(\text{mm})$	D_{84}/D_{16}	$P_{LS}(\%)$
Case0	1/100	0.18～0.52	15.0	3.3	0.0
Case1	1/100	0.2～0.52	20.1	3.4	2.3
Case2	1/100	0.2～0.52	22.5	3.7	5.2
Case3	1/100	0.2～0.52	27.0	4.9	10.7
Case4	1/100	0.2～0.52	31.2	6.7	15.9
Case5	1/100	0.2～0.52	34.6	12.0	20.1
Case6	1/100	0.2～0.52	43.0	11.7	30.2

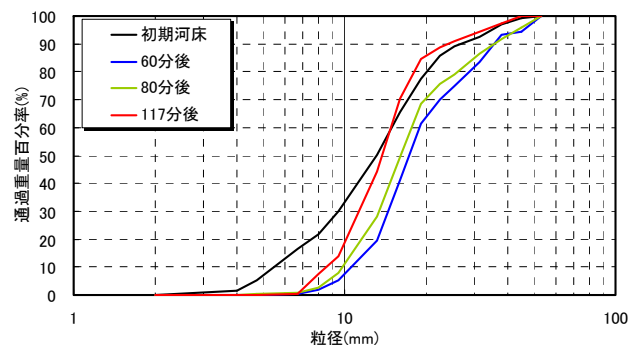


図-3 初期河床および流砂の粒度分布の変化(Case0)

ルトコンベアによって上流端のバケットまで運搬される。なお、ここでは浮遊砂は扱っていない。表-1に実験条件および河床材料の特性を示す。Case1～6の河床は、図-3に示すCase0の初期河床材料に直径約100mmの大礫を表に P_{LS} で示す割合で敷設した場合の状態である(写真-1)。図-4に示すように、水路床に厚さ20cmで図-3の初期河床材料を敷き詰め、大礫の半分を河床に埋めた。その際、大礫の半分の重量に相当する初期河床材料を除去した。なお、通水前後で大礫の埋没状況は局所的な堆積、侵食は見られたが、全体としては大きく変化しなかった。粒度分布の算出にあたっては、河床材料を採取する層の厚さで粒度分布が異なる。ここでは、河床表面から突出した大礫を含め、大礫の粒径に相当する100mmの深さまでの材料について粒度分布を算定した。なお、表-1の条件で掃流力が最も大きくなる流量 $0.52\text{m}^3/\text{s}$ 、水路勾配1/100の条件では、大礫がほとんど移動しないことを確認している。また、Case0の河床材料の準

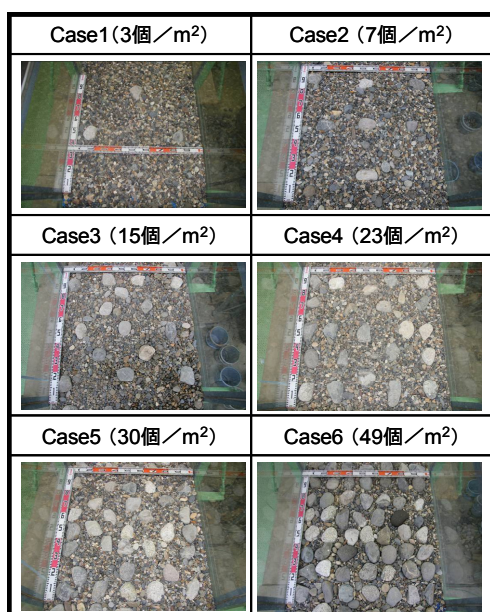


写真-1 大礫の敷設状況 (括弧内は大礫の設置数)

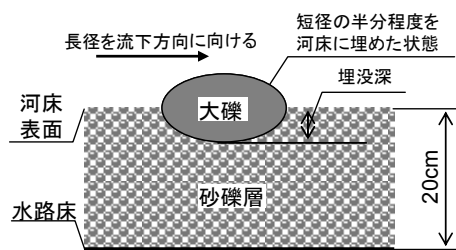


図-4 水路側面から見た大礫の敷設状況

備にあたっては、粒径6.4mm, 9.4mm, 15mm, 25mm, 40mmのほぼ均一な材料を混合して製作した。

実験では、河床表面に占める大礫の割合を変化させ、主に①流砂量、②粒径ごとの粒子の移動速度、③移動層厚について、それぞれの変化を調べた。①の流砂量の計測にあたっては、ベルトコンベアの接続部に採取箱を設置し、一定量の流砂を採取する作業を3回実施し、それぞれの採取時間で割った採取量の平均値をもって流砂量とした。砂礫の流送現象においては、流砂量が時間的に変動することがあるので、それらの変動を考慮して、平均的な流砂量が得られるように3回の採取を行った。ちなみに、流量が0.52m³/s時の1回の採取時間は3～10秒であった。また、流量を徐々に増加させ、河床材料の移動限界についても確認した。②の移動状況の把握においては、前述した5つの粒径ごとに25個の着色した河床材料を準備し、通水途中にNo.13地点から投入した。ここで、No.13地点は水路上流端から13mに位置し、以下同様に表現する。その後、約5分間通水し、通水停止後に着色された河床材料を水路内で探索し、移動距離を計測するとともに、横断面内での位置、埋没状況を確認した。③の移動層厚調査では、②の着色礫の埋没状況も参考にし、河床に平均粒径4mmの均一粒径の礫を円筒状（直径5cm程度、深さ15cm程度）に埋設し、置換された高さを計測することで移動層厚を計測した（以下、色砂置換法と呼ぶ）。その際、横断方向に5点（左岸壁面から5cm, 25cm,

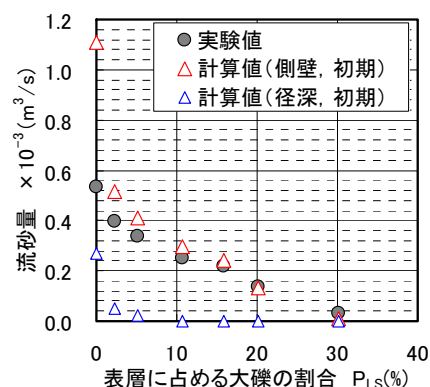


図-5 大礫の割合が流砂量に与える影響

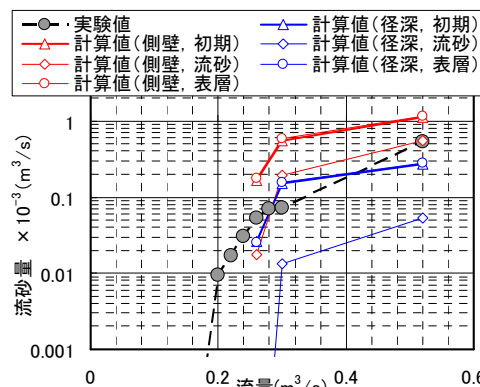


図-6 流砂量の実験値と計算値との比較

50cm, 75cm, 95cm), 縦断方向の3点 (No.15地点, No.20地点, No.25地点) で計測した。さらに、流砂および通水後の表層材料の粒度分布、水深、河床高を適宜計測した。

3. 実験結果

(1) 大きな石の流砂量への影響

図-5は、流量を0.52m³/s、水路勾配を1/100として連続通水し、定常状態となった後の流砂量をプロットした結果である。通水開始時には、時間の経過とともに減少傾向であった流砂量がある値で安定する。個々のケースで安定するまでの時間は異なるが、20分から90分程度であった。その時に計測された流砂量を図示した。水路勾配、流量を固定したため、いずれのケースにおいても水深は0.3m程度、水面勾配は1/100程度となり、摩擦速度は0.18m/s程度であった。なお、ここで示した流砂量は空隙を除いた値であり、以下同様の表記とする。図-6は、Case0の粒度分布 ($P_{LS}=0\%$) について、流量の変化に伴う流砂量を計測した結果である。図中には、河床変動計算でよく使われる芦田・道上による混合砂礫の掃流砂量式⁵⁾により算定した計算値を示した。ここで、移動限界掃流力の算定には後述するEgiazaroffの式を用いた。また、摩擦速度の算定にあたっては有効掃流力を考慮するとともに、計算に用いる径深として河積を潤辺で割って算出した径深（凡例では「径深」と表示）、側壁の粗度 $0.011\text{s/m}^{1/3}$ を考慮して算定した径深⁶⁾（凡例では「側壁」と表示）の2通りで計算している。また、河床材料の粒度分布とし

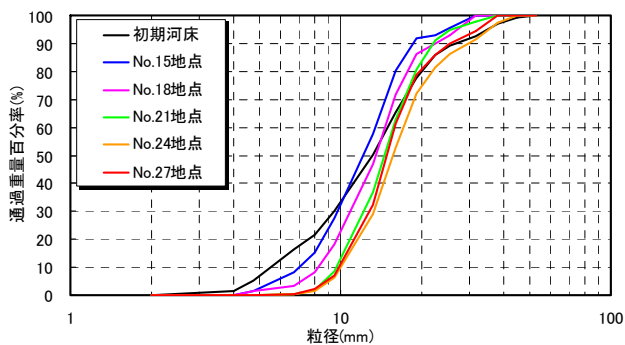


図-7 初期河床および通水後の河床の粒度分布の変化(Case0)

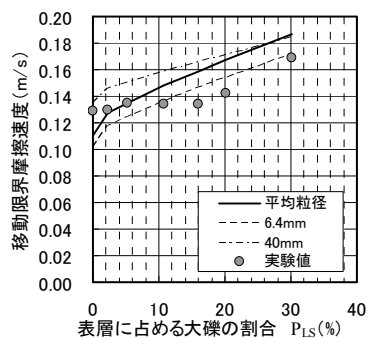


図-8 大礫の移動限界摩擦速度への影響

て、初期河床、流砂および通水後の表層の粒度分布を使った結果をそれぞれ示した。水深およびエネルギー勾配は、流砂量計測時に計測した水深および水面勾配を使った。流砂および通水後の粒度分布は、それぞれ図-3の初期河床、図-7のNo.15地点の粒度分布を使用した。ここで、図-7は、No.15～No.27地点で通水後に、移動層厚の範囲で採取した河床材料の粒度分布である。また、流砂については、通水中の観察でも確認されているように、6.4mm、9.4mmの礫が河床間隙中に徐々に落下し、117分経過後には10mm以下の材料は半分以下になり、15mm程度の材料の割合が増加した。この流砂の粒度分布は通水後の河床の平均的な粒度分布と類似しており、計算では河床の平均的な粒度分布を用いるのが良いことを確認できる。図-6によると、縦軸を対数表示していることもあり計算値が実験値をよく表現しているように見えるが、摩擦速度を算定するために用いる径深、採用する粒度分布によって、実験値に対して0.1～2倍と大きな変動幅を持つことを改めて確認できる。図-5には、河床材料として初期河床材料を用い、2通りの径深で算定した流砂量を示す。流砂量式に大きな石の影響を取り込むため、大きな石を一つの粒径階として粒度分布を与えた。ここで、粒度分布として流砂もしくは平均的な河床の粒度分布を与えるのが良いと考えられたが、流砂には大礫が含まれないこと、通水後に大礫を含めた材料調査を実施していないことから、初期河床の粒度分布を用いた。ガラス側壁を有する幅1m程度の水路に水深0.3mで通水していることから、側壁を考慮した結果が適切であると考えられ、 P_{LS} の増加に伴う流砂量の変化をある程度評価している。大きな石を含む場に、既往の流砂量式を適用する際の問題が指摘されることがあるが、表-1に示す粒度分布程度の範囲であれば、従来

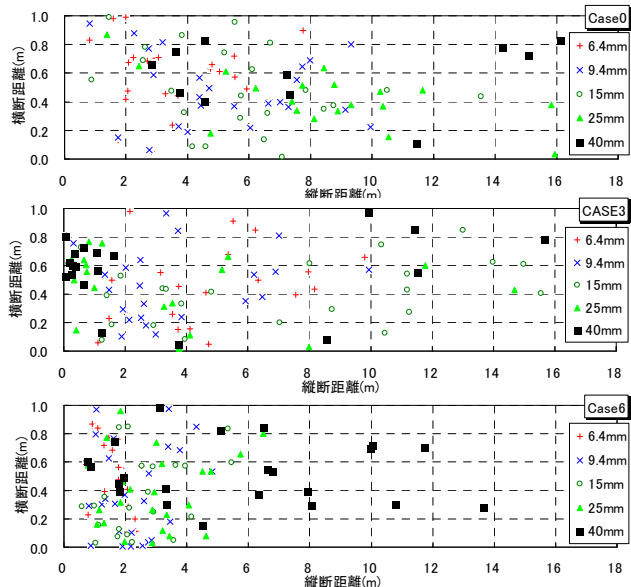


図-9 着色礫の移動後の分布状況

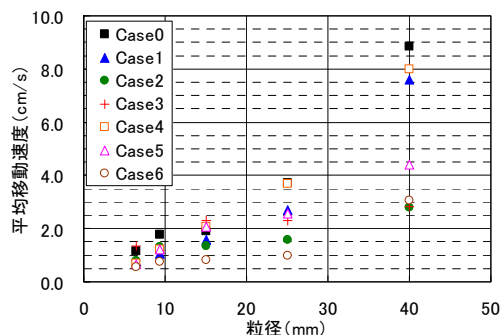


図-10 粒径ごとの平均移動速度

の式が適用可能であることを示す結果であった。

図-8は、観察結果から算出した移動限界摩擦速度をプロットした結果である。計算値は、粒度分布の違いを考慮して、芦田・道上⁹⁾による修正Egiazaroff式を用いて評価した結果である。観察結果によると、6.4mmの最小粒径が移動を開始すると同時に40mmの粒径も移動を開始することが確認されている。 $P_{LS}=0\%$ について見ると、計算上最大粒径が移動を開始する摩擦速度0.135m/s以下で実際に全ての粒径が移動を開始している。 D_{34}/D_{16} が3.3、また図-3に示したように通水後はさらに均一化していたことから、Case0では均一砂と同様の挙動を示したと考えられる⁷⁾。一方、 P_{LS} が徐々に大きくなり実験条件の範囲では移動しない材料が河床に存在すると、移動限界摩擦速度に変化が見られる。 $P_{LS}=0\sim 15.9\%$ では大礫の影響はほとんど見られないが、 P_{LS} が20.1%以上になると徐々に移動限界摩擦速度が大きくなる。図-5でも見られるように、移動限界付近での流砂量評価の信頼性を低下させている一つの原因と考えられる。

(2) 大きな石の流砂の移動速度への影響

図-9は、Case0、Case3およびCase6について着色礫の移動状況を調査した結果を示す。実験条件としては、流量0.52m³/s、水路勾配1/100とした。縦断距離0mが、着色礫を投入した後で河床に着地したと推定される水路上流端から

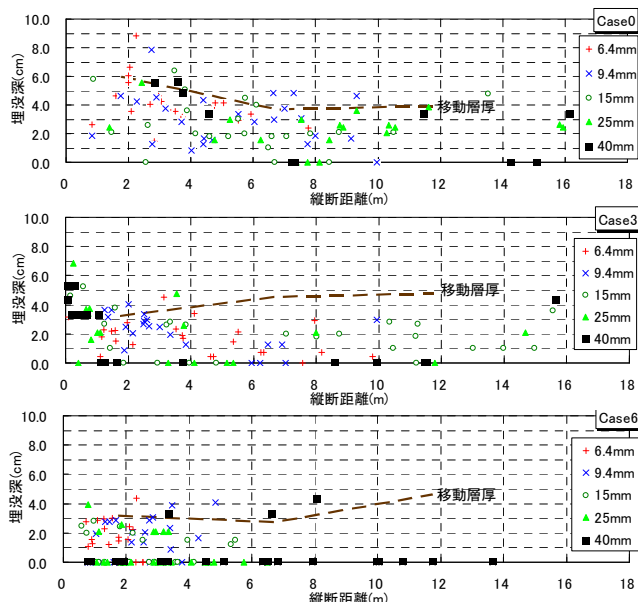


図-11 着色礫の埋没状況と移動層厚

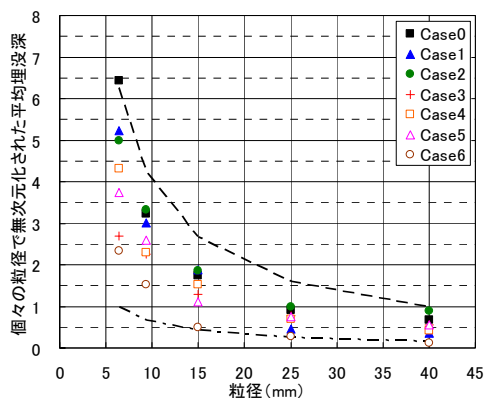


図-12 粒径ごとの平均的な埋没深

13.25mに相当する。図は投入後5分間の通水を継続した後の着色礫の平面分布を示す。データにばらつきが見られるが、 P_{LS} の増加に伴って下流への移動量が減少していることを確認できる。図-10は、全ケースについて上記のデータを整理し、個々の粒子の移動速度を算定後、粒径ごとに平均した移動速度を示す。図-9の移動状況にばらつきが見られたように、 P_{LS} が増加することで粒子の移動速度が低下することを一様に言及することはできないが、いくつかの例外を除くと、その傾向を指摘しても良さそうである。例外として顕著なのは、Case3の粒径6.4mm、Case4の粒径15mm、25mm、40mm、Case5の粒径15mmの場合である。

(3) 大きな石の移動層厚への影響

図-11は、図-9の結果について埋没深を示したものである。ここで、埋没深とは、通水後に着色した礫を探索し確認された位置について、河床表面から着色礫下端までの深さを示す(図-4参照)。また、色砂置換法の調査結果について、中央3点での移動層厚の平均値を移動層厚として示した。壁面から5cm地点での調査結果は移動層厚が極端に小さく、壁面の影響が大きいと考えられたため、ここでは削除した。

色砂置換法による調査からは顕著な傾向を確認できないが、着色礫の埋没状況からは、 P_{LS} の増加に伴って、埋没深の浅い着色礫の数が増加している。図-12は、全ケースについて埋没深のデータを粒径ごとに平均した結果である。縦軸は、個々の粒径で無次元化された埋没深であり、1より小さい場合には河床表面に露出した状態で停止していたことが分かる。また、破線は移動可能な粒径の中での最大粒径40mmに相当する移動層厚があったとした時の埋没深であり、最大粒径を各着色礫の粒径で割った値を示した。一点鎖線は最小粒径6.4mmに相当する移動層厚であったとした時の埋没深であり、最小粒径を各着色礫の粒径で割った値を示した。いずれのデータも破線と一点鎖線の間にあり、例えばCase0では交換層の議論でよく言われるように最大粒径程度の移動層厚があったことを確認できる。また、粒径6.4mmで見ると、Case3を除いて P_{LS} の増加に伴って、埋没深が減少する傾向を確認できる。

4. 大きな石を用いて河床再生を行う場合のポイント

前章では、大きな石が流砂に与える影響について実験結果を整理した。既往の研究^{3, 4)}では、このような現象が生じる要因として、大礫およびその後流域の河床材料の移動が制限されること、大礫の形状抵抗によって大礫以外の河床材料に作用する有効掃流力が低減することを述べている。ここでは、大きな石を用いた河床再生といった観点から、以上の実験結果を踏まえて、その適用にあたっての留意点を整理する。

一つ目のポイントは、大きな石による流砂量の低減効果である。既往の流砂量式では大きな石が含まれる場合の評価結果に信頼性がないことが指摘されているが、移動限界に水理条件に近い場合を除けば、大きな石と元河床の粒径比が今回の実験条件の範囲に限定してみれば、大きな石がない場合と同程度に流砂量を精度良く評価できることが確認された。その場合、河床材料の粒度分布を精度良く調査することの重要性、その場の水理量を精度良く評価することの重要性は図-6に示す通りである。したがって、流砂量式が実際の倍半分程度の評価であることを念頭に置きつつ、敷設後に砂礫の移動・堆積状況をモニタリングしながら、大きな石の割合を調整することが事業の進め方としては適切であると言えよう。なお、大きな石の割合を、目的とする値よりも少し多めに敷設することは、事業の効果を明確にする点でよい。岡部・肥本⁴⁾が述べているように、河床材料の突出状況によって大きな石の効果は変化し、大きな石の上に砂礫が堆積し、その突出量が減少すれば、流砂量の低減効果も減少する。このことが過大な設計を許容するポイントとなる。

二つ目のポイントは、大きな石の洗掘防止効果である。大きな石は河岸部を深掘れ部から守る役割をしており⁸⁾、供給されるべき大きな石が存在しない河川にとってはなおさら重要な供給源と言える。つまり、中小洪水時には砂礫を堆積

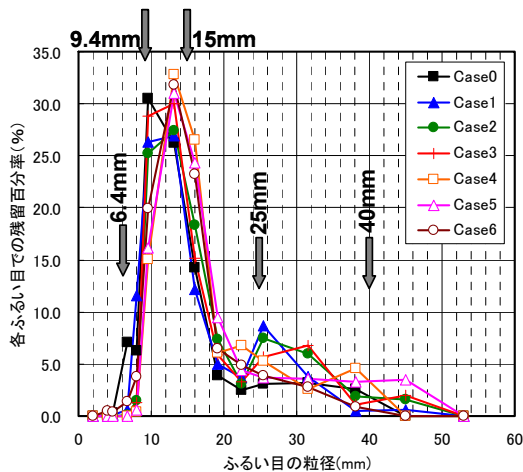


図-13 P_{LS} が流砂の粒度分布に与える影響

させ、大規模出水時には流送される程度の大きな石を敷設することを検討してもよい。大規模出水時に流送された大きな石は下流の深掘れ部を洗掘から守る効果を発揮すると予想される。また、図-6の結果からは大きな石を敷設することによる元の河床材料の移動限界摩擦速度への影響はほとんど気にする必要がないと考えられるが、一つ目のポイントと同様に移動しない河床材料と移動する材料との粒径が一定の粒径比での実験であり、現地観測結果や今後の実験結果なども参考にしながら、さらに検討を加えるべき重要な案件であることをここでも追記しておく。このような条件での議論であるが、 P_{LS} が16%以下では移動限界摩擦速度に大きな影響はなく、写真-1を見ても分かるように $P_{LS}>16\%$ の状況を河川改修によって造成することは景観上想定しにくい。したがって、河床低下を抑制するために大きな石を敷設しても、礫河原の維持にとって重要な攪乱頻度を減少させることには直結せず、むしろ中小規模の出水に伴って大きな石の周辺で局所洗掘が生じ、裸地の形成にとっても好ましいと考えられた。

三つ目のポイントは、河床材料の粒度分布を正確に把握することである。図-13には、Case0～6について、流量を $0.52\text{m}^3/\text{s}$ 、水路勾配を1/100として通水した時の流砂の粒度分布を示した。ここでは、それぞれのふるい目に対する残留百分率を示す。図-10、12の個々の材料の移動速度、埋没深にばらつきが見られたように、流砂の粒度分布も P_{LS} の増加と単純な関係にはなっていない。例えば、 P_{LS} が2.3～5.2%では25mmの礫の移動が増加している。また、 P_{LS} が15.9～20.1%では40mmの礫の移動が増加している。また、 P_{LS} との関係で明確なのは、 P_{LS} の増加とともに、大きな石で遮蔽される粒径、ここでは6.4mmおよび9.4mmの礫の移動は減少している。この P_{LS} の変化に伴う流砂を構成する材料の変化は、解析的な検討は全く行っていないが、個々の粒子のステップ長と関係していると予想された。 P_{LS} の変化は大きな石の間隔を変化させ、粒子のステップ長と何らかの対応関係にあるときに、その移動状況に影響を与えたと考えた。この点については今後検討する余地が多く残されているが、河床再生にあたって注意すべき点と考えられた。

5. おわりに

岩盤や土丹層が露出した河道、もしくは複断面化等の理由で河床に作用する流体力が増加することで現状の河床材料では河床低下が懸念される区間などに未固結堆積層を形成・維持する手法について検討した。主に、大きな石の流砂への影響を実験的に確認するとともに、現地への適用にあたっての留意点を整理した。解析的な観点からすると、議論の余地が多々残されることを認識しているが、実務的な面からすると有効な情報を提供できたと考えている。

また、ダム近傍における河床変動を予測する必要性が高まる中で、本実験結果は河床材料調査に関する重要な知見を示唆していると言える。大きな石を河床表面に敷設することで、流砂量を抑制できることはこれまでも論じられてきたところであるが、大きな石をわずか2.3%の重量百分率の割合で河床に敷設することで流砂量が25%強も減少した。山地河道では粒径のばらつきが指摘されることに加え、転石も多く見られる。したがって、山地河道における場の状態を把握する際に、河床材料調査手法の確立が重要であるとともに、沖積河道よりも綿密な調査を行う必要性があることが示唆された。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室から実験水路を借用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 島谷幸宏・皆川朋子: 日本の扇状地河川の現状と自然環境保全の事例、河川の自然復元に関する国際シンポジウム論文集、(財)リバーフロント整備センター、pp.191-196, 1998.
- 2) 高橋浩輝・丸山昇・竹内亀代司・渡辺恵三: 真駒内川における礫河床の復元に関する実験的研究について(中間報告)、リバーフロント研究所報告、第18号、pp.1-6, 2007.
- 3) 芦田和男・高橋保・水山高久: 山地河川の掃流砂量に関する研究、新砂防、107号、pp.9-17, 1978.
- 4) 岡部健士・肥本一郎: 大径礫を伴う山地河床における流砂の有効掃流力に関する研究、水理講演会論文集、第30回、pp.247-252, 1986.
- 5) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文集、第206号、pp.59-69, 1972.
- 6) Einstein, H. A.: Formulas for the Transportation of Bed Load, Trans. ASCE, Vol. 107, No. 2140, pp.561-577, 1942.
- 7) 山本晃一: 構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂、pp.54-80, 2004.
- 8) 松本将能・工藤美紀男・福岡捷二: 平成20年8月浅川洪水(多摩川水系)による土丹河床の大規模洗掘と河道管理方策、河川技術論文集、第15巻、pp.285-290, 2009.

(2009.9.30受付)