

置き土砂の侵食・流送に関する実験的研究

EROSION AND TRANSPORT OF SEDIMENT LOCALLY PLACED IN AN OPEN CHANNEL

黒田 佳祥¹・橋本 晴行²・池松 伸也¹・原田 民司郎³

Yoshiaki KURODA, Haruyuki HASHIMOTO, Shinya IKEMATSU and Tamishirou HARADA

¹九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: river35@civil.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: hasimoto@civil.kyushu-u.ac.jp

³㈱建設環境研究所 (〒812-0022 福岡市博多区神屋町 4-5)

E-mail: haradat@kensetsukankyo.co.jp

Key Words: sediment control, bed erosion, sediment transport

1. はじめに

最近, 計画堆砂量を超えるダムの増加が懸念されており, ダムの貯水能力の減少, 下流の河床低下, 海岸侵食などの問題が顕在化しつつある¹⁾.

そのため, 貯砂ダムの設置や土砂バイパス, フラッシング排砂など様々な堆砂対策, 下流河道への置き土砂による土砂還元などの方策が検討・実施されている²⁾.

置き土砂とはダム貯水池や貯砂ダムの堆砂を掘削・浚渫し, ダム下流河道の高水敷等に設置し, 洪水の営力により流下させる手法である. それほど多くの土砂は排出できないが, 特別な施設を必要とせず適用範囲の広い経済的な手法である. しかしながら, いくつかの現

地における実施例はあるものの, 還元土砂量, 置き土砂の設置位置, 置き土砂形状の有効な決定法は未だ確立されていない.

置き土砂は, 長島ダム, 下久保ダム, 秋葉ダム, 三春ダムなどにおいてすでに実施されており, 表-1に示すようにいくつかの知見が得られている³⁾. 特に, 三春ダムでは, 置き土砂による下流への土砂還元試験が実施されるとともに, 平面2次元河床変動モデルを用いて土砂還元に伴う土砂流出の再現計算が行われている.

しかしながら, 置き土砂を土砂管理の手法として適切に管理・実施していくためには, 置き土砂の侵食・流送の物理的挙動に関する知見がまだ十分得られていない

表-1 置き土砂の実施例³⁾

実施ダム	置き土砂量	設置位置	形状	得られた知見
長島ダム (大井川)	20,000m ³	塩郷堰堤下流 ダム下流約37km	長さ400m*幅 50m*厚さ1m	洪水規模が大きいほど, 最大流下距離が長かった. 粒径が小さいトレーサーほど, 最大流下距離が長かった.
下久保ダム (利根川)	2,000m ³	ダム直下	-	洪水初期には無次元掃流力 τ_* と流出土砂量との間に相関関係が見られたが, 水位が高くなると置土により洪水が堰上げられ, τ_* の増加にもかかわらず, 流出土砂量は増加しない. 土砂流出は $\tau_*=0.5$ より始まった.
秋葉ダム (天竜川)	10,000m ³	ダム直下	-	$\tau_*=0.05$ 程度(礫の掃流限界相当)から流出が始まり, τ_* に比例して土砂流出が増加した. 放流量約1,500m ³ /sに相当する $\tau_*=0.15$ でほぼ全量が流下した.
三春ダム (阿武隈川)	900m ³	ダム直下	長さ60m	モニタリングの結果から侵食量は流量がピークに達してから一時的に増加することが明らかになっており, 再現計算でもその傾向が再現された.

ことが現状である。

本研究では、特に粗粒化した河床で土量・形状の異なる置き土砂に関する実験を行った。実際の現地においても、置き土砂の設置点はダム下流河道のように置き土砂の粒径に対して大きい粒径で構成されている場合が多い。本研究では、始めに各タイプの侵食・流送過程を定性的に把握する実験を行った。加えて流送される置き土砂の流砂量を計測する実験を行い、各タイプについて定量的な比較を行った。以上の2種類の実験から、粗粒化した河床における置き土砂の侵食・流送過程について基礎的な知見を見出すことが本研究の目的である。

2. 置き土砂の侵食・流送に関する実験

(1) 実験方法

図-1に実験に用いた水路の模式図を、写真-1に設置した置き土砂の状況を示す。

実験水路は長さ1200cm、幅30cm、河床勾配1/95.3の直線水路である。水路の河床は固定床とし、河床全面に粗度材料を隙間なく張り付けた。粗粒化しているダムの下流河道に置き土砂を設置することを想定し、河床の粗度として中礫を用いた。置き土砂として、河床粗度の10分の1程度の粒径の粗砂を用いた。流量は、置き土砂が掃流の形式で輸送されるように設定した。置き土砂は上流から $x=525\text{cm} \sim 575\text{cm}$ の区間に水路右岸側壁に沿って設置した。表-2に実験条件を示す。ここに、ポイントゲージで測定した河床の粗度高さは平均で約0.67cmとなった。

置き土砂は直方体になるよう整形し、そのスケールを表-3に示す。便宜上、Type 1のスケールを標準として、Type 1より幅の広いType 2(写真-1)と、Type 1より厚さが大きいType 3の計3種類の模型を置き土砂として実験に用いた。置き土砂は十分に圧密し、水で飽和した状態にしておく。

時間 t の開始は流れの先端が置き土砂に衝突した時点とし、それから5分間通水した。また座標は図-1に示すように設定した。

実験では、置き土砂の侵食・流送の状況の撮影と通水停止後の河床高の測定を行った。すなわち、ビデオカメラ及びデジタルカメラを用い、30秒、1分、2分、3分、4分、5分経過後の置き土砂の侵食・流送の状況を撮影した。またポイントゲージを用いて河床高を測定した。

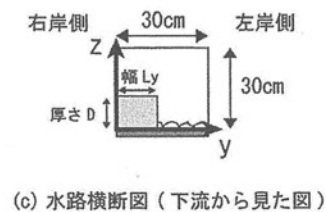
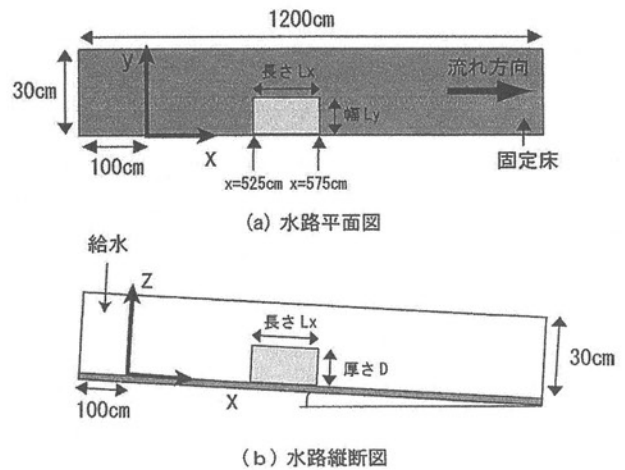


図-1 実験水路の模式図

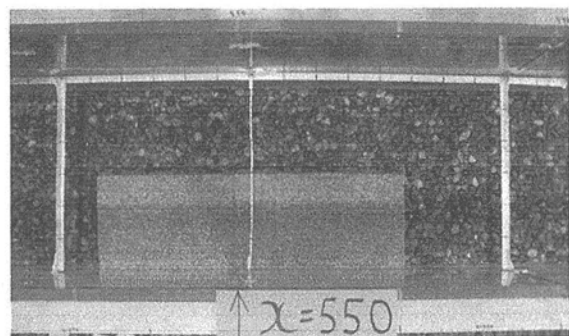


写真-1 設置された置き土砂と水路底面の状況 (Type 2)

表-2 実験条件

水路長	$L=12\text{m}$
水路幅	$B=30\text{cm}$
水路勾配	$I=1/95.3$
単位幅流量	$q_{w0}=100\text{cm}^2/\text{s}$
粗度粒径	$k=1.27\text{cm}$
置き土砂粒径	$d=1.10\text{mm}$
置き土砂比重	$\sigma/\rho=2.64$
通水時間	$T=5\text{分}$

表-3 置き土砂の形状

置き土砂形状	$L_x(\text{cm})$	$L_y(\text{cm})$	$D(\text{cm})$	土量(cm^3)
Type 1	50	10	5	2500
Type 2	50	15	5	3750
Type 3	50	10	10	5000

L_x : x 方向長さ, L_y : y 方向長さ, D : 厚さ

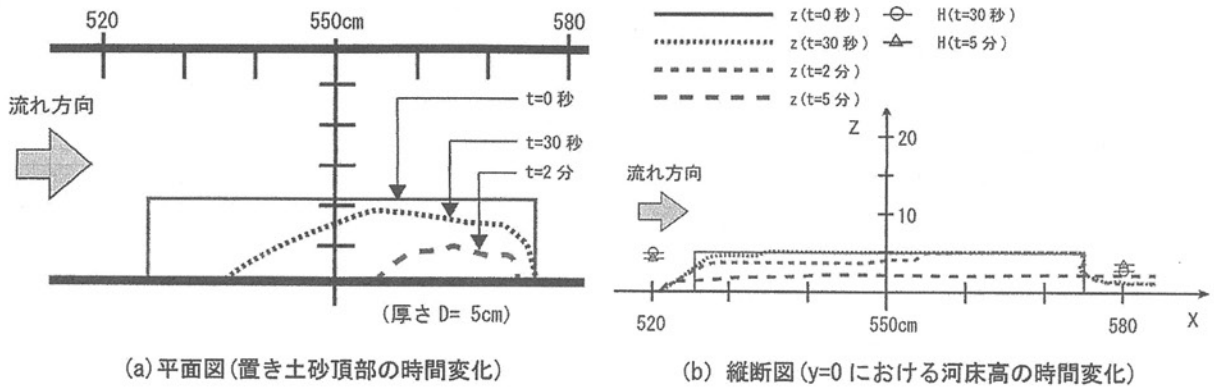


図-2 Type 1 の置き土砂の侵食過程

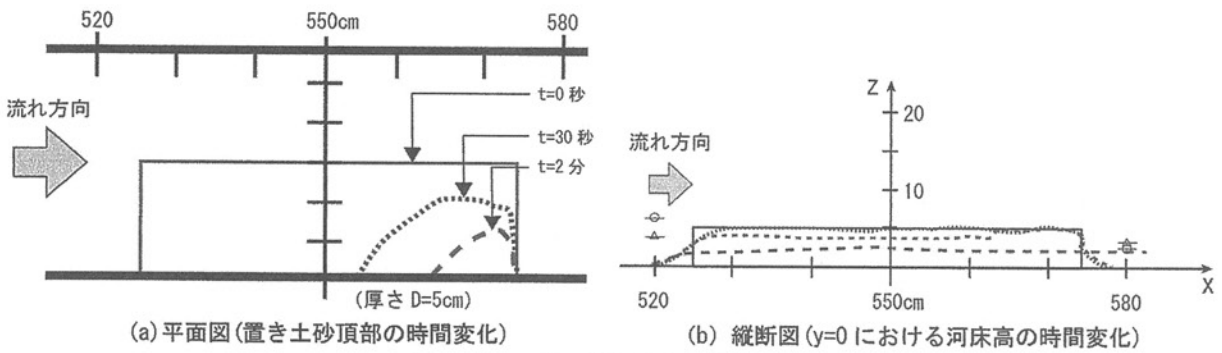


図-3 Type 2 の置き土砂の侵食過程

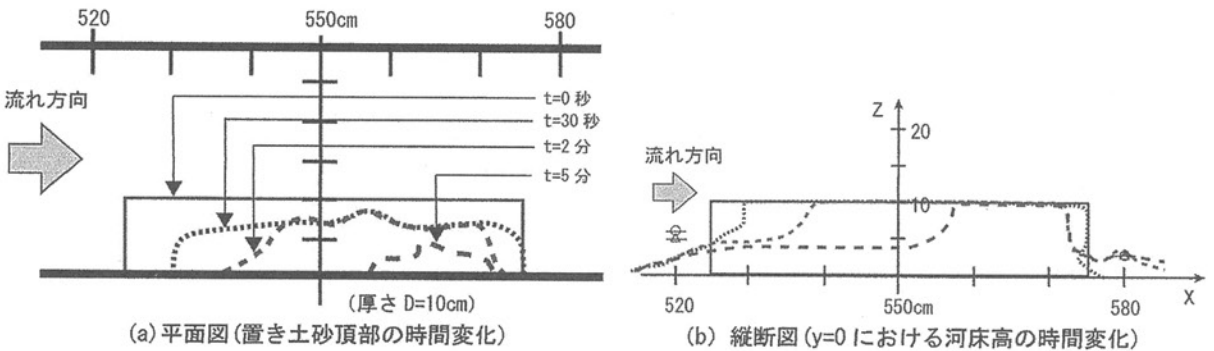


図-4 Type 3 の置き土砂の侵食過程

(2) 実験結果と考察

a) 置き土砂の侵食過程

図-2, 3, 4は置き土砂の侵食過程の時間変化を示したものである。ここに、図中の線は、(a)平面図において侵食された置き土砂の頂部の時間変化を、(b)縦断面図において $y=0\text{cm}$ における河床高の時間変化をそれぞれ示している。また(b)縦断面図には、流れの状況を把握するために $x=520\text{cm}$, $x=580\text{cm}$ における水位も示している。ビデオカメラによる観測から、置き土砂のタイプにより侵食の形態が異なり、それは次のように進行することが分かった。Type 1と幅の広いType 2の置き土砂は通水初期の段階でのみ崩落を生じ、その後は流水のせん断力により侵食が進行して置き土砂を下流に流出させた。Type 2では置き土砂による流路幅の縮小により

流れが堰上げられ、置き土砂の上面が一部水没した。そのためType 2はType 1に比べ、置き土砂の上流部分において侵食が速く進行した。

一方、厚さの大きいType 3の置き土砂では置き土砂斜面の崩落が顕著に見られた。しかしType 3はType 1やType 2に比べ、置き土砂の侵食に時間を要し、通水停止後も置き土砂の頂部が一部侵食されずに残った。

以上のことから、いずれのタイプも、まず、流れの先端の衝突と同時に置き土砂の周辺部が崩落した。その後、置き土砂の水際の部分が流水により侵食された。置き土砂の厚さの大きいタイプでは、さらに、置き土砂斜面の不安定化に起因した崩落が発生した。しかしながら、厚さの小さなタイプでは、崩落は生じず、流水のせん断力により侵食が進行した。

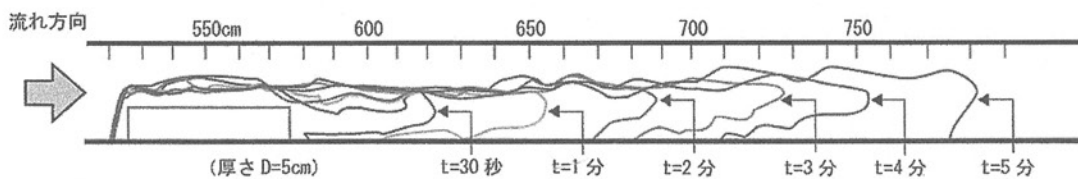


図-5 Type 1 の置き土砂の流送過程の平面図 (Margin の時間変化)

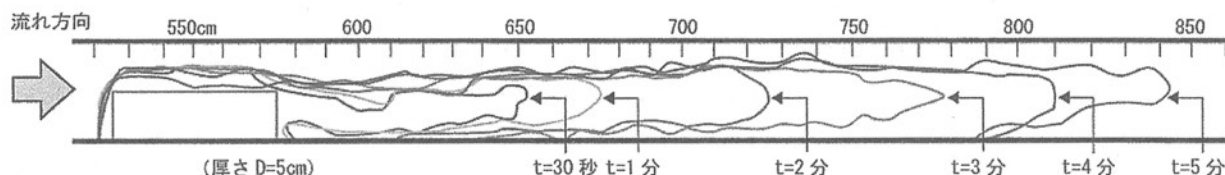


図-6 Type 2 の置き土砂の流送過程の平面図 (Margin の時間変化)

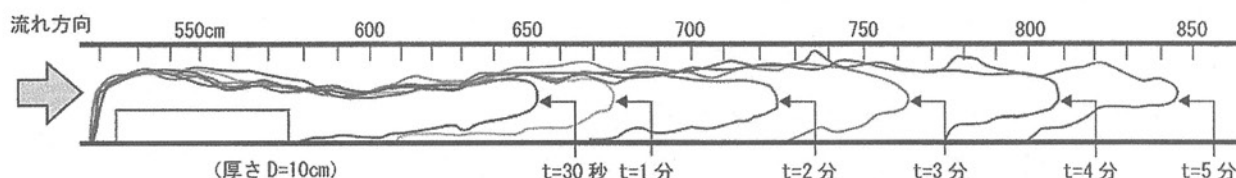


図-7 Type 3 の置き土砂の流送過程の平面図 (Margin の時間変化)

b) 置き土砂の流送過程

図-5, 6, 7に置き土砂の流送過程の平面図を示す。ここに、図中の実線は所定の時間における流送土砂のMarginの部分を示している。Marginは目視で確認できる流送土砂と河床粗度との境界であり、Marginより内側では十分な体積濃度で土砂が流送されていると考えられる。

まず流送の形態について述べる。いずれのタイプの置き土砂も右岸側に寄って流送された。Marginの先端は水路中央付近となった。またMarginの流下幅は約15~25cm程度となった。

次にMargin先端の流下距離について見てみる。t=30秒においては、先端の位置はType 1の置き土砂がx=620cmまで流送されているのに対し、Type 2とType 3ではx=650cmまで流送されていた。先端の流下距離の差は30cmであった。しかしながら、時間の経過に伴ってType 1と、Type 2, 3との差は広がっていき、t=5分後にはType 1の置き土砂はx=780cmまで、Type 2, 3はx=840cmまで流送された。先端の流下距離の差は60cmに拡大した。Type 2, 3の置き土砂は各時間とも同程度の流下距離となっていた。

以上のことから、いずれのタイプの置き土砂も置き土

砂が設置された右岸側に寄って流送され、Margin先端の流下距離はType 1より土量の大きいType 2, 3の方が長くなった。

c) 通水停止後の堆積状況

図-8 (a), (b), (c)は通水停止後の河床高の縦断面図を示したものである。Type 3の置き土砂は通水停止後も頂部が一部侵食されずに残ったことから、置き土砂の設置位置周辺で特に河床高が高くなった。河床高はy=5, 10cmの縦断面においてType 3, 2, 1の順に大きかった。y=15cmの縦断面では各タイプ間で河床高に差異はほとんどなかった。これより右岸壁面に近い縦断面において各タイプ間に堆積の差が見られることが分かった。

図-9 (a), (b), (c)は通水停止後の河床高の等高線を示したものである。Type 1に比べてType 2, 3の置き土砂の方が堆積の傾向が顕著に見られた。しかし堆積の状況は、土量や形状にかかわらずいずれのタイプも似通っていた。

以上のことから、いずれのタイプでも流送土砂の堆積は置き土砂の設置位置直下で起り、土量の大きいType 2, 3では堆積がさらに設置位置直下から水路中央に伸びていた。

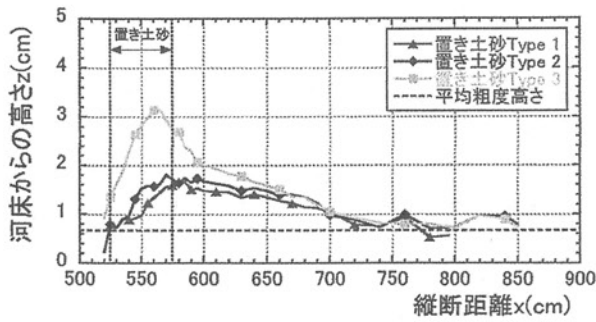


図-8 (a) 通水停止後の縦断方向の河床高 (y=5cm)

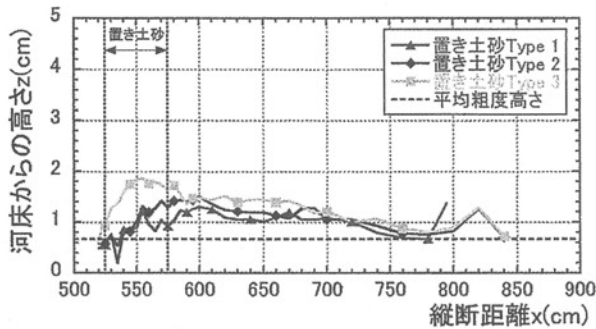


図-8 (b) 通水停止後の縦断方向の河床高 (y=10cm)

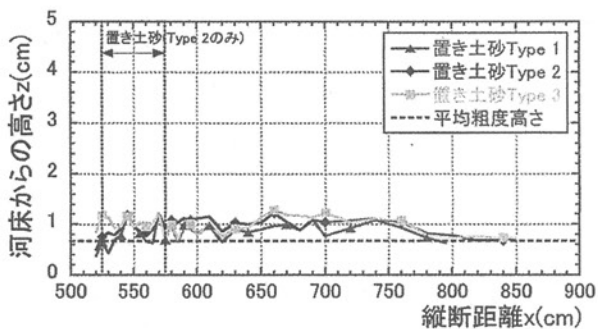


図-8 (c) 通水停止後の縦断方向の河床高 (y=15cm)

3. 置き土砂の流砂量に関する実験

(1) 実験方法

置き土砂を図-10のように設置し、置き土砂直下流 (x=1100cm 地点)の流砂量を測定する実験を行った。実験条件は置き土砂の侵食・流送に関する実験と同様であった(表-2)。実験に用いた置き土砂の模型は前述した3種類である(表-3)。流砂量は各置き土砂につき2回測定した。採砂時間はMarginの流下幅がx=1100cmにおいて一定の幅に落ち着いている時間内とした。流下幅は置き土砂の流下状況を水路真上から

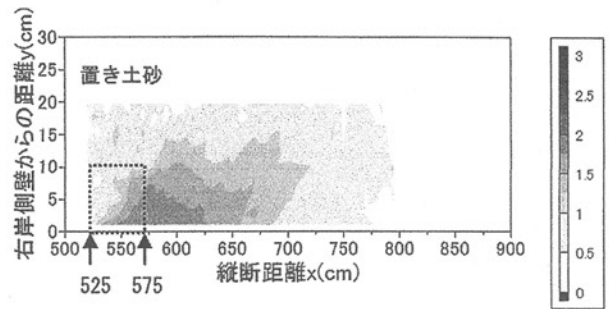


図-9 (a) 通水停止後の等高線図 (Type 1)

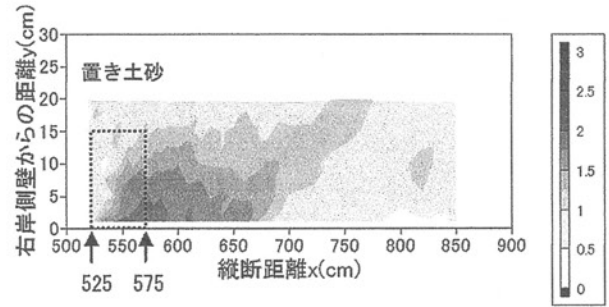


図-9 (b) 通水停止後の等高線図 (Type 2)

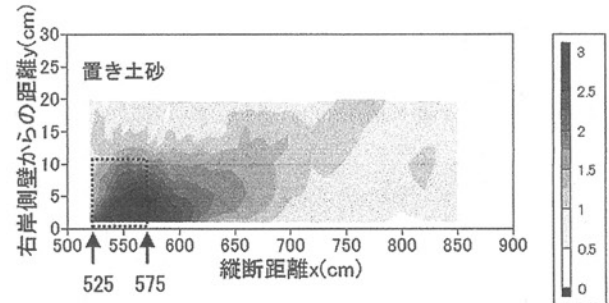


図-9 (c) 通水停止後の等高線図 (Type 3)

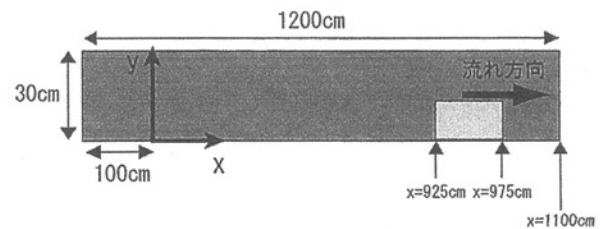


図-10 実験水路の模式図 (平面図)

ビデオカメラで撮影し求めた。また無次元掃流力の算出のため、採砂地点付近の水深を測定した。

本実験では置き土砂の流砂量と平衡流砂量を比較するため、置き土砂と同じ材料を水路全面に十分な厚さで敷き移動床とし、置き土砂なしの場合の流砂量も測定した。

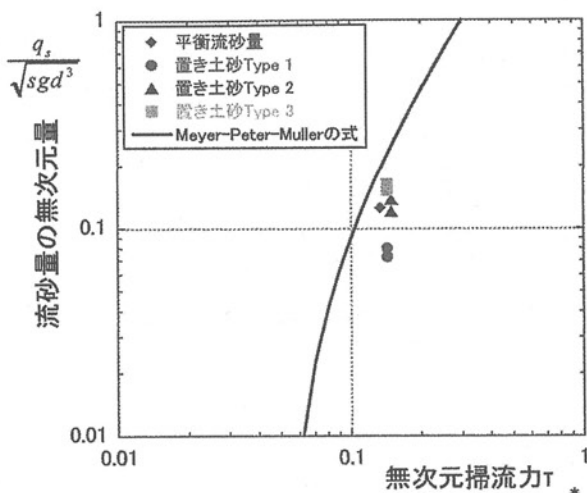


図-1 1 無次元流砂量の比較 (x=1100cm)

(2) 実験結果と考察

各置き土砂の単位幅当たりの流砂量を比較すると、Type 3, 2, 1の順に流砂量が大きかった。特に Type 1 の置き土砂は他のタイプに対してかなり小さい値をとっていた。水路下流端での流送土砂の流下幅はどのタイプの置き土砂も 15cm 程度であり、同程度であった。

図-1 1 に x=1100cm 地点における各置き土砂の流砂量の無次元量を示す。ここに、横軸は無次元掃流力を表している。掃流砂量式は Meyer-Peter-Muller の式を用いた。図-1 1 から、同程度の無次元掃流力であるが、置き土砂の土量・形状によって無次元流砂量が異なることが分かる。Type 3 の置き土砂の流砂量は平衡流砂量よりも多くなるが、Type 2 の流砂量は平衡流砂量と同程度であり、Type 1 のそれは平衡流砂量より少ない結果となった。

図-5, 6, 7 の置き土砂の流送の様子から Type 1 の置き土砂に比べて、Type 2, Type 3 の置き土砂の Margin 先端の流下距離が長い。これらの結果は図-1 1 の流砂量の実験結果に対応していることが分かる。また、Type 2, Type 3 の置き土砂の Margin 先端の流下距離が同じであるにもかかわらず、Type 3 の置き土砂の方が Type 2 の置き土砂よりも流砂量が大きい結果となった。Type 2 と Type 3 の実験では水深が同程度で掃流砂粒の平均移動速度は同程度と考えられるので、両者の移動する体積濃度の差が流砂量に影響を及ぼしていると考えられる。体積濃度に大きく影響を及ぼすのは置き土砂の侵食による流砂の生産量であり、この生産量が置き土砂の流下距離や流砂量に影響を及ぼしていると考えられる。置き土砂の侵食の様子から、幅の広いタイ

プは標準タイプの置き土砂よりも侵食が早く進み、より多くの流砂が生産された。厚さの大きいタイプでは、崩落によりかなりの流砂が生産された。これらがタイプの違う置き土砂の流砂量の差として表れている。また、流砂の一部は河床粗度の間隙に充填するために使われた。標準タイプの置き土砂の流砂量は河床間隙への捕捉の影響を受けて、平衡流砂量よりもかなり小さい流砂量となったと考えられる。

以上のことから、置き土砂の流砂量は各タイプで異なることが分かった。特に置き土砂の厚さの大きいタイプでは、平衡流砂量を上回るような流砂量となった。また一部の流砂は河床粗度の間隙に充填するために使われた。置き土砂の流砂量は侵食による流砂の生産量が大きく影響していると考えられる。

4. 結論

本研究では粗粒化した材料で構成される固定床において 3 種類の形状の置き土砂を実施し、その侵食・流送過程を観測した。

粗粒化している河道において、侵食された置き土砂の一部が河道の粗度の間隙に捕捉されながら流下した。しかし土量・形状の異なる置き土砂間で流下距離や流砂量に違いが生じた。全ての置き土砂において同程度の無次元掃流力であることから、置き土砂の侵食による流砂の生産量の違いが置き土砂の流下距離や流砂量に影響を及ぼしていると考えられる。

今後の展望としては、様々な粒径の河床での流砂量の測定やより大きな流量で流下する場合の置き土砂の流砂量について実験を行いたい。また侵食による流砂の生産量が置き土砂の流送に大きな影響を及ぼすことから、様々な土量・形状の置き土砂についても実験を積み重ねていきたい。

参考文献

- 1) たとえば、宮崎遼・橋本晴行・原田民司郎：小丸川における河床変動計算と土砂収支に関する一考察，第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集，2008。
- 2) 箱石憲昭：ダム堆砂対策の現状と今後の展望，第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集，2008。
- 3) 末次忠司・瀬戸楠美・箱石憲昭・櫻井寿之：物理的な挙動に着目した土砂還元手法のあり方，水利科学，No.302，2008。

(2010. 5. 14 受付)