

侵食性側岸を有する急勾配流路における 流出流量の特性

CHARACTERISTICS OF THE RUNOFF OF SEDIMENT AND WATER IN A LATERAL ERODIBLE STRAIGHT CHANNEL WITH STEEP SLOPE

橋本晴行¹・朴 埼璨²・池松伸也³・高岡広樹⁴・

Haruyuki HASHIMOTO, Kichan PARK, Shinya IKEMATSU, Hiroki TAKAOKA

¹正会員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工修 九州大学助手 大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 九州大学技官 大学院工学府(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴学生員 九州大学大学院工学府(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

There occurs significant gully erosion and sediment runoff by rainfall on the slope of the Mt. Unzen Fugendake. This causes a large increase of bed elevation and sometimes great damage to the houses in the downstream area of the slope. In order to prevent the disasters, the prediction of the runoff of sediment and water is an important problem. It is necessary to understand the process of erosion and variation of a gully to estimate the runoff of sediment and water from the mountain slope.

The purpose of this study is to investigate discharge of sediment and water, sediment concentration, bank erosion and bed variation in the lateral erodible straight channel at steep slope.

From the experiments it is found that bank erosion causes an increase in discharge of sediment and water and sediment concentration in the channel.

Key Words: debris flow, mud flow, eroded bank, discharge, sediment concentration

1. はじめに

現在, 火山活動により火山噴出物が堆積して不安定な状態となっている雲仙普賢岳の土石流警戒区域では, 土石流災害を防ぐために導流堤, 砂防ダム, 遊砂地などの施設が建設されている. このような施設を計画する際には, 流出土砂量の予測や流路変動の機構について知る必要がある. 普賢岳山腹の扇状地より上流域を踏査すると, 深い谷が発達しており, このような所では侵食に伴い側岸土砂が流路内に崩落したりして, 流出流量や流砂濃度を規定する要因のひとつとなっていることが考えられる. しかしながら, 従来, 側岸侵食による崩落土砂が流出流量や流砂濃度に与える影響について調べた研究はほとんどなく, それらの関連性については全く未解明な状態となっている.

著者ら¹⁾は, 従来より側岸からの崩落土砂に着目し, 水路勾配 $\theta_0 = 6^\circ$ に設置した移動床水路におい

て一本の長方形断面の流路を設け, 上流より給水することで, 側岸土砂の崩落を伴う場合の流出流量, 流砂濃度の特性について調べてきた. 本研究は, さらに水路勾配を $\theta_0 = 10^\circ, 14^\circ$ とより急な勾配に設定するなど条件を変えて実験を追加し, 流出流量, 流砂濃度の特性およびそれらと流路の侵食特性との関係について調べたものである.

2. 実験方法

実験に使用した水路は全長 7.0 m, 幅 30 cm の片側アクリルライト製の可変勾配水路である(図-1). 水路勾配 $\theta_0 = 6^\circ, 10^\circ, 14^\circ$, 移動床部の長さは $L_b = 5.7$ m とした. 実験はそれぞれの勾配に対し Case A, B, C の 3 種類行った. まず, Case A の実験においては, 図-2(a) のように, 水路左岸側壁に沿って幅 $B_0 = 5$ cm, 深さ D_0 の長方形断面の流路を設けた. 流路の深さ D_0 は 2.5 cm, 5.0 cm, 7.5 cm の

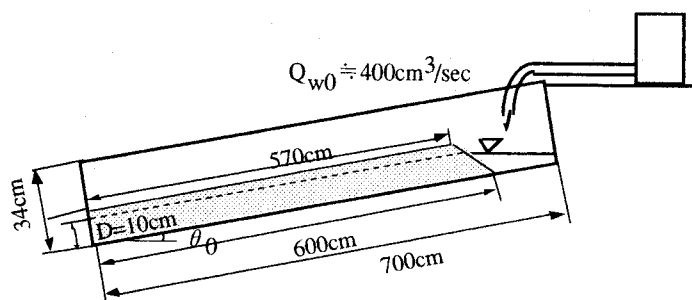


図-1 水路図

表-1 実験条件

Run No.	$\theta (^{\circ})$	D(cm)	D ₀ (cm)	B(cm)	B ₀ (cm)	側岸侵食の有無
Case A Run 1	6	10	2.5	30	5	片岸侵食
Case A Run 2	6	10	5	30	5	片岸侵食
Case A Run 3	6	10	7.5	30	5	片岸侵食
Case B Run 4	6	10	2.5	30	5	両岸侵食
Case C Run 5	6	10	/	/	5	側岸侵食なし
Case C Run 6	6	10	/	/	10	側岸侵食なし
Case A Run 7	10	10	2.5	30	5	片岸侵食
Case A Run 8	10	10	5	30	5	片岸侵食
Case A Run 9	10	10	7.5	30	5	片岸侵食
Case B Run 10	10	10	2.5	30	5	両岸侵食
Case B Run 11	10	10	5	30	5	両岸侵食
Case C Run 12	10	10	/	/	5	側岸侵食なし
Case C Run 13	10	10	/	/	10	側岸侵食なし
Case A Run 14	14	10	2.5	30	5	片岸侵食
Case B Run 15	14	10	2.5	30	5	両岸侵食
Case C Run 16	14	10	/	/	5	側岸侵食なし
Case C Run 17	14	10	/	/	10	側岸侵食なし

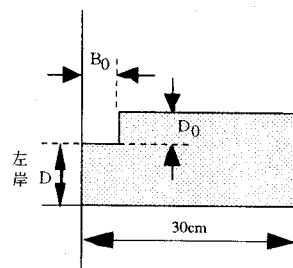


図-2(a) 片岸侵食を伴う場合の初期横断面 (Case A)

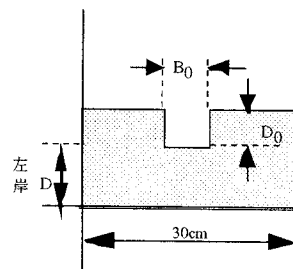


図-2(b) 両岸侵食を伴う場合の初期横断面 (Case B)

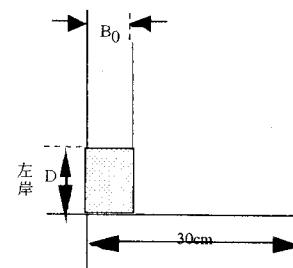


図-2(c) 側岸侵食を伴わない場合の初期横断面 (Case C)

3通りとした。Case Bの実験においては(図-2(b))、幅 $B_0=5.0$ cm、深さ $D_0=2.5, 5.0$ cm の長方形断面の流路を水路の中央に設け、両岸侵食を伴う実験を行った。Case Cの実験においては(図-2(c))、水路を塩化ビニール板で仕切り、幅5.0 cmあるいは10 cmの水路とし、側岸侵食のない状態で実験を行った。河床材料にはほぼ均一な粒度分布を持つ平均粒径 $d=0.17$ mm、比重 $\sigma/\rho=2.61$ の細砂を用いた。この細砂の最密充填濃度 C_s は $C_s=0.51$ であった。また、河床の初期含水比 w はCase Aの場合、流路床で $w=31\%$ 、天端上で $w=29\%$ であった。表-1に実験条件を示す。実験は、上流より一定流量 $Q_{w0}=400$ cm³/sの水を所定の時間通水して行った。水と土砂を合わせた流量 Q_t 、流砂濃度 C_T は、下流端で流れを採取することにより、水位、河床は側壁から、また流路幅は真上からそれぞれビデオ撮影することにより測定した。

3. 実験結果

図-3 (a),(b),(c)は、水路下流端で計測された流出流量 Q_t と流砂濃度 C_T の時間的な変化を示したもので、棒グラフは流出流量の無次元量 Q_t/Q_{w0} を×印は流砂濃度 C_T をそれぞれ表している。ここに、 Q_t は水と土砂を合わせた流出流量、 Q_{w0} は上流端からの供給水量である。

まず、 6° の実験において、片岸侵食のRun 1~3について見ると、流出流量 Q_t/Q_{w0} は通水後60秒付近までは増加し、その後、減少する。流路の深さ D_0 による顕著な差異は見られないが、流路の深さがもっとも浅いRun 1ではほぼ連続的に流量が変化するのにに対して、Run 2, 3については、 $t=50$ 秒において流量が一時急減する。これは流量測定の際のビデオ撮影からも確認され、その時間を図中に矢印で示している。また、流砂濃度 C_T は、通水後

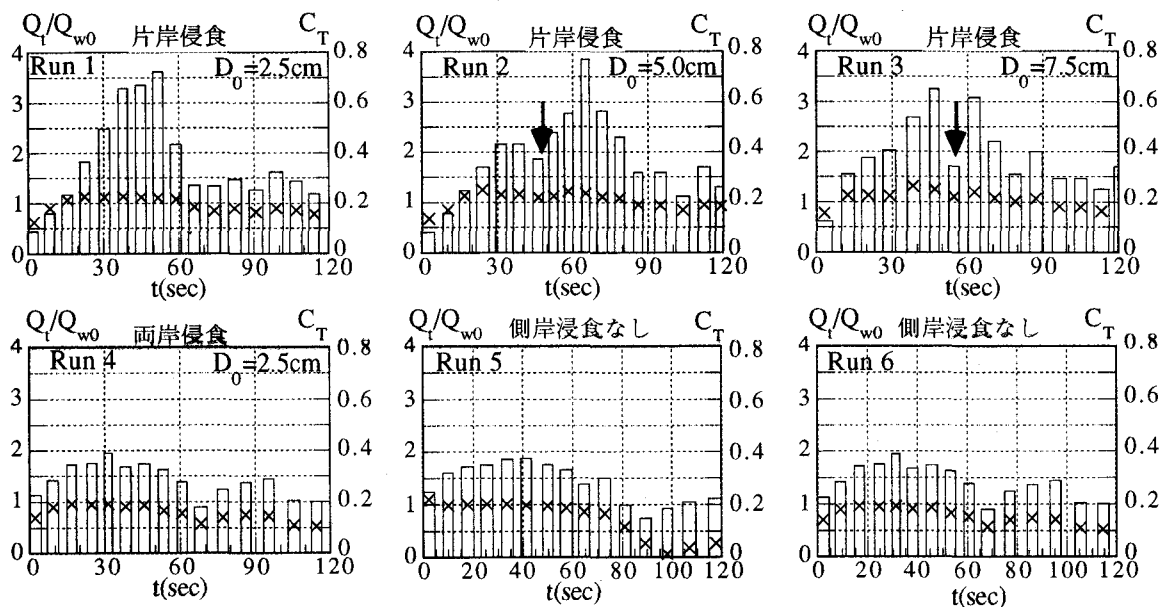


図-3(a) 水路勾配 $\theta_0 = 6^\circ$ における流量と流砂濃度の時間変化(棒グラフ: Q_t/Q_{w0} , ×印: C_T)

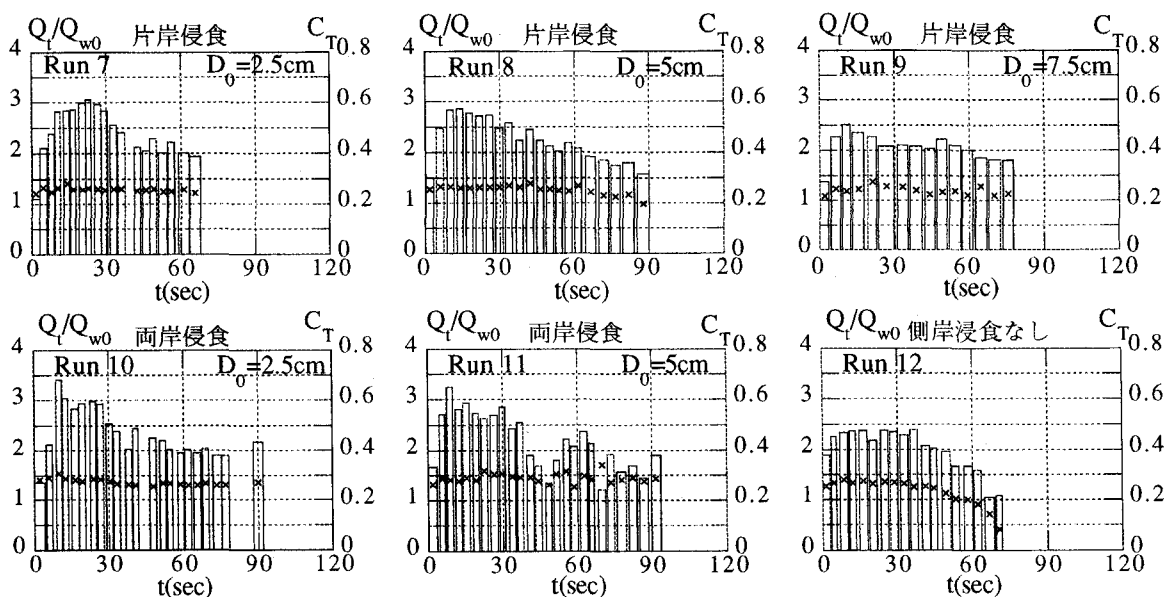


図-3(b) 水路勾配 $\theta_0 = 10^\circ$ における流量と流砂濃度の時間変化(棒グラフ: Q_t/Q_{w0} , ×印: C_T)

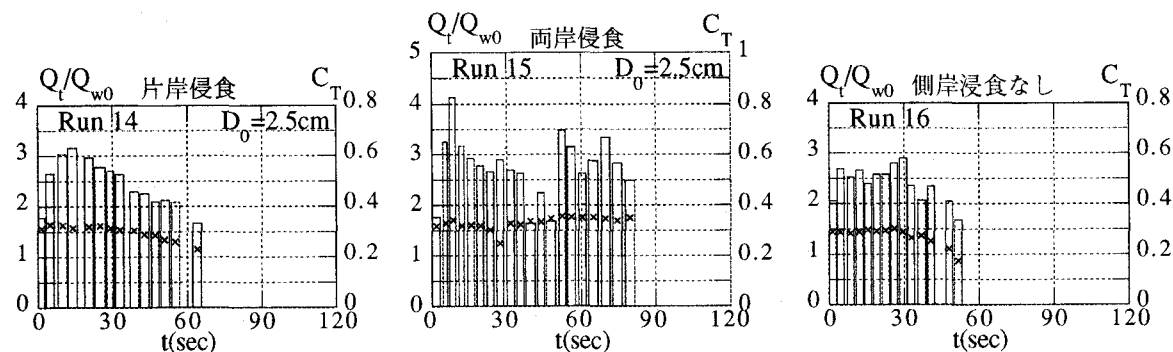


図-3(c) 水路勾配 $\theta_0 = 14^\circ$ における流量と流砂濃度の時間変化(棒グラフ: Q_t/Q_{w0} , ×印: C_T)

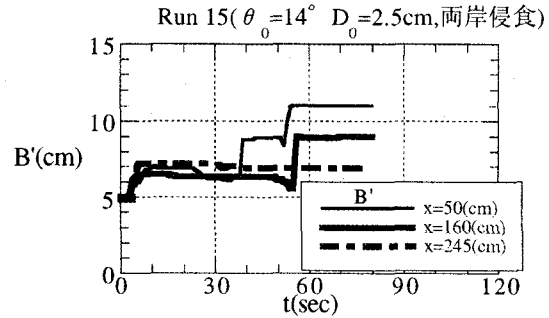
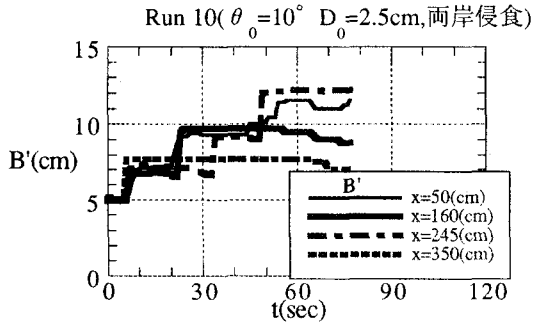
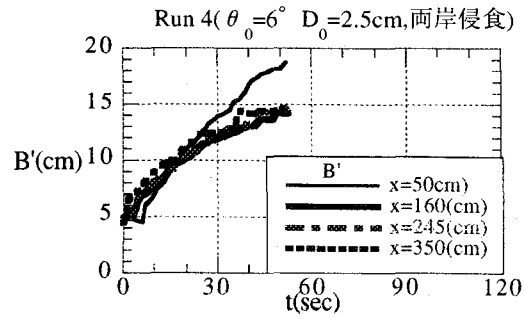
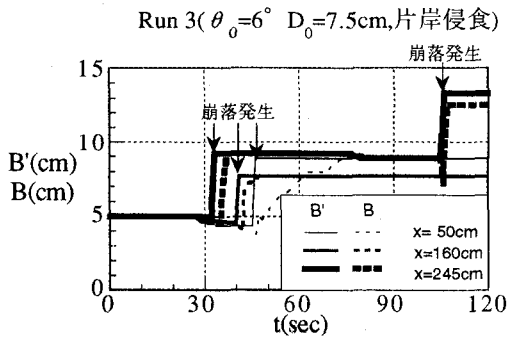


図-4 流路幅の時間的变化(B': 天端幅 B: 水面幅)

$t=10\sim20$ 秒においてピークとなり、 $t=50\sim60$ 秒付近まで一定値を示した後、漸減していく。次に、両岸侵食を伴うRun 4についてみると、Run 1～3よりも増減の少ないグラフで、流出流量 Q_t は通水後40秒付近までは増加し、その後減少する。ピーク流量は片岸侵食のケースよりもかなり小さい値を示す。側岸侵食のないRun 5, 6について見ると、流出流量 Q_t は通水後30秒付近まではゆるやかに増加し、その後減少する。片岸侵食を伴うRun 1～3のそれに比べてピーク流量は著しく小さくなるのがわかる。また、流砂濃度 C_T も若干小さい。

次に水路勾配 $\theta_0=10^\circ$ の実験(Run 7～13)において、片岸侵食のRun 7～9では、 $t=20$ 秒で流出流量 Q_t/Q_{w0} はピークとなる。流路の深さ D_0 による大きな差異は見られないが、 $\theta_0=6^\circ$ の実験のように流量が一時急減する現象は見られなかった。 $\theta_0=10^\circ$ の場合、側岸侵食は顕著ではなく、ほとんど崩落土砂はなかった。一方、両岸侵食をとともうRun 10, 11では、ピーク流量は片岸侵食の場合より大きくなった。しかしながら、流路の深さ D_0 の違いによる差異は見られない。Run 7～11では、側岸侵食のないRun 12よりピーク流量は大きくなった。流砂濃度のピーク値は、両岸侵食の場合が大きく、片岸侵食の場合、側岸侵食のない場合とおなじピーク値となった。

$\theta_0=14^\circ$ の場合、片岸侵食のRun 14は側岸侵食のないRun 16とほとんど同じハイドログラフを示す。これは、水路勾配が急なため、側岸侵食より河床侵食が卓越するためである。しかし、両岸侵食を伴うRun 15の場合、 $t=40$ 秒で流量が一時急減

する。

側岸侵食を伴う場合は、それを伴わない場合に比べて、流量、流砂濃度がともに増加している。しかしながら、水路勾配が急になると流量、流砂濃度ともあまり差異はなくなる。これは、勾配が急になるにつれ、側岸侵食に対して河床侵食が卓越し、側岸からの土砂供給が少なくなるためと考えられる。

紙面の都合上、図は省略しているが、側岸土砂には不飽和によるサクシンのため、見かけの粘着力が作用し、流路の横断形状は垂直に切り立った状態、もしくはオーバーハングの状態を呈しながら侵食が進行している。

図-4は流路幅の時間的な変化を片岸侵食のRun 3と両岸侵食のRun 4, 10, 15についてそれぞれ示している。まず、片岸侵食のRun 3では、横断面がオーバーハングの状態で侵食が進み、ある時間間隔で側岸土砂の崩落が発生している。前述のRun 2, 3における流量の急減は、側岸土砂の崩落後に発生しており、崩落土砂のせき止めの影響が現れたものと考えられる。

一方、両岸侵食の場合、 $\theta_0=6^\circ$ では、一気に崩落するのではなく、徐々に拡幅が進行するため、流量の急減は起こらない。 $\theta_0=10^\circ, 14^\circ$ では、ある時間間隔で土砂が崩落している。

いずれの場合も勾配が急になるにつれ、側岸侵食は小さくなるので、拡幅の進行は緩やかである。

図-5～10は、下流端から流出する流量、流砂量について先端から所定の時間範囲に渡って平均化

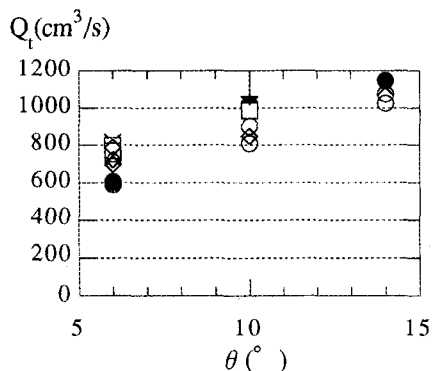


図-5 流出流量と水路勾配の関係

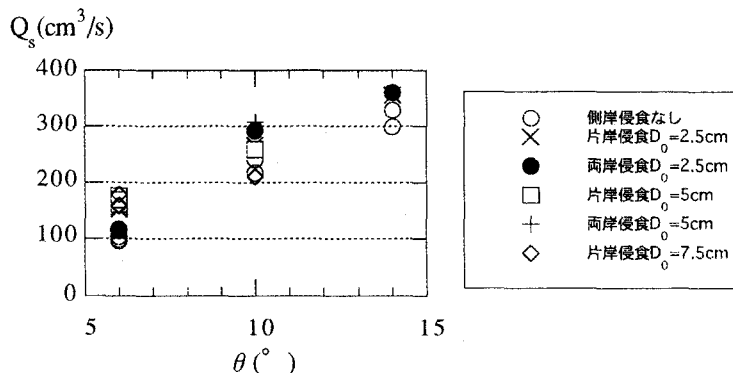


図-6 流砂量と水路勾配の関係

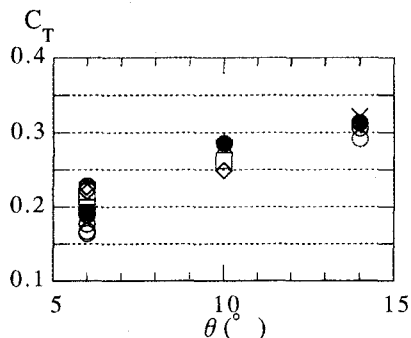


図-7 流砂濃度と水路勾配の関係

した結果を示したものである。その時間は、水路上流部で固定床が露出するまでの時間で、

$\theta_0=6^\circ$ の場合 $t=100$ 秒、 $\theta_0=10^\circ$ 、 14° の場合 $t=30$ 秒としている。

図-5は流量 Q を水路勾配 θ_0 に対しプロットした結果である。 $\theta_0=6^\circ$ の場合、両岸侵食が伴う場合に比べ、片岸侵食が伴う場合の方が流出流量 Q は大きくなる。しかし、 $\theta_0=10^\circ$ 、 14° の場合、両岸侵食を伴う場合の方が片岸侵食を伴う場合より、流出流量 Q は大きくなる。

図-6は流砂量 Q_s と水路勾配 θ_0 との関係である。 Q と同様、 $\theta_0=6^\circ$ の場合、両岸侵食に比べ片岸侵食の方が Q_s も大きくなり、 $\theta_0=10^\circ$ 、 14° の場合、片岸侵食に比べ両岸侵食の方が大きくなる。

図-7は流砂濃度 C_T と水路勾配 θ_0 との関係である。水路勾配 θ_0 が大きいほど、ばらつきは小さくなる。 $\theta_0=6^\circ$ の場合、側岸侵食なしの流砂濃度が最小となる。片岸侵食や両岸侵食、流路の深さ D_0 による違いは見られない。 $\theta_0=10^\circ$ の場合、両岸侵食が伴う場合大きくなり、片岸侵食が伴う場合、側岸侵食なしの場合よりも小さくなる。 $\theta_0=14^\circ$ の場合、片岸侵食を伴う場合が最大となるが、側岸侵食なし、片岸侵食、両岸侵食とも近い値となる。

図-8(a)は流砂濃度 C_T と流出流量 Q との関係を表したものである。また、比較のため、図-8(b)はピーク時における流砂濃度 C_T と流出流量 Q を示す。図中の曲線は、定常状態の条件下で得られた理論式

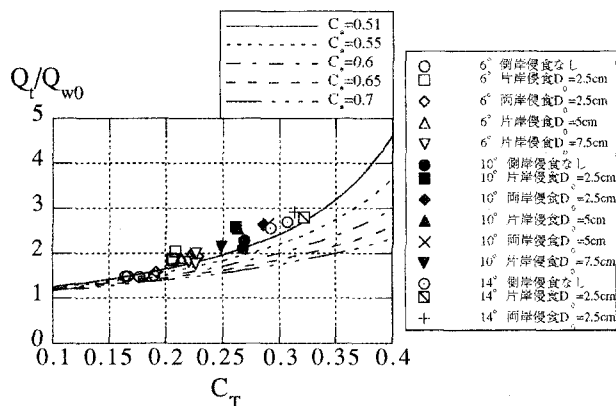


図-8(a) 流出流量と流砂濃度との関係

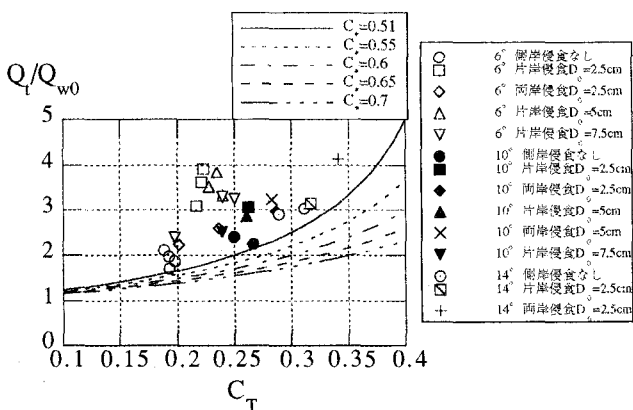


図-8(b) ピーク時における流出流量と流砂濃度との関係

$$\frac{Q}{Q_{w0}} = \frac{C^*}{C^* - C_T} \quad (1)$$

の計算結果を最密充填濃度 C^* をパラメータとして示したものである。図-8(a)から計測値の $C^*=0.51$ の場合に実験値と計算値は一致することが分かる。一方、ピーク時の流量は流砂濃度に対して理論式(1)よりは過大となる。

さて、下流端に流出する流量 Q 中の水量には、水路上流端からの供給水起源の水と流路床起源の水とが含有されている。流路床起源の水量 Q_w^{bed} を算定する方法としては、ひとつは、流出流量 Q 、流砂量 Q_s 、上流端供給水量 Q_{w0} の実験値をそれぞれ

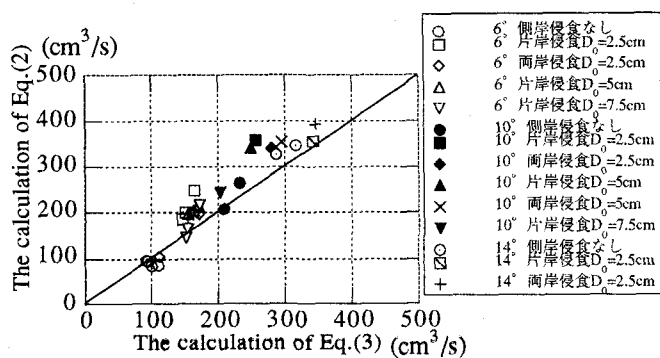


図-9 流路床起源の水量 Q_w^{bed} の評価式の比較

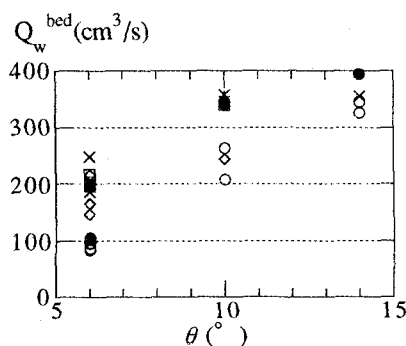


図-10 流路床起源の水量 Q_w^{bed} と水路勾配との関係

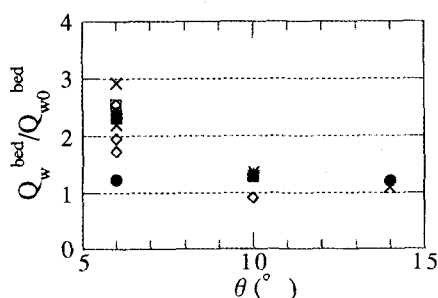


図-11 側岸侵食を伴う場合の流路床起源の水量と側岸侵食を伴わない場合の流路床起源の水量との比

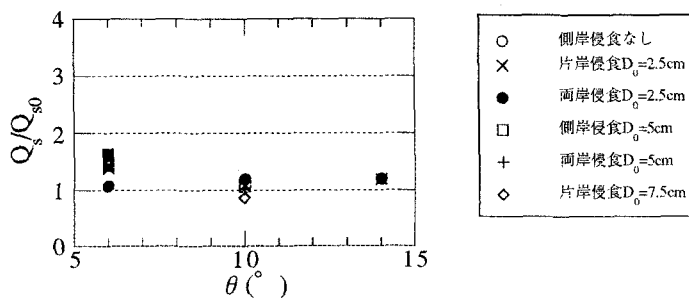


図-12 側岸侵食を伴う場合の流砂量とそれを伴わない場合の流砂量との比

用いて次式

$$Q_w^{\text{bed}} = Q_t - Q_s - Q_{w0} \quad (2)$$

より求めることができる。もうひとつは、河床堆積土砂中の空隙に含有される水量を、河床起源の流砂量 Q_s の実験値を用いて、次式

$$Q_w^{\text{bed}} = \frac{1 - C_s}{C_s} Q_s \quad (3)$$

より求められる。ここに、 C_s は最密充填濃度で、 $C_s = 0.51$ とした。図-9は、そのようにして求められた Q_w^{bed} について前者を縦軸に、後者を横軸にして比較した結果である。図中の実線は両者が一致する場合を示しているが、実験値は実線の付近に集中しており、式(2)、(3)の評価はいずれも妥当であることが分かる。

図-10は式(2)で評価された流路床起源の水量 Q_w^{bed} と水路勾配 θ_0 との関係である。側岸侵食を伴う場合の Q_w^{bed} は、側岸侵食を伴わない場合のそれに比べて大きくなっている。

また、図-11は側岸侵食の伴う場合の Q_w^{bed} の実験値と側岸侵食を伴わない場合の水量 Q_{w0}^{bed} との比を示したものである。 $\theta_0 = 6^\circ$ の場合、その比は大きくなり、最大で3倍近くなる。しかし水路勾配が大きくなると1に近くなる。

図-12は側岸侵食を伴う場合の流砂量 Q_s と側岸侵食を伴わない場合の流砂量 Q_{s0} との比を示したものである。 $\theta_0 = 6^\circ$ の場合1より大きくなり、 $\theta_0 = 10^\circ$,

14° の場合ほとんど1となる。

これらのことは、水路勾配が大きくなれば側岸からの土砂供給が少なくなることを意味している。

4. おわりに

以上、本研究では、側岸侵食を伴う場合の流出流量、流砂濃度の特性を調べた。その結果、側岸からの侵食土砂が流量、流砂濃度を増加させることがわかった。水路勾配 $\theta_0 = 6^\circ$ では、両岸侵食を伴う場合より片岸侵食を伴う場合の方が増加量が大きく、 $\theta_0 = 10^\circ$, 14° では、片岸侵食を伴う場合より両岸侵食を伴う場合の方が増加量は大きい。しかし、水路勾配が大きくなる程、側岸侵食より河床侵食が卓越するため、増加量は小さくなる。また、崩落量が多い場合には、崩落土砂が流れをせき止めるため、流量の急減が発生することも分かった。

謝辞:本研究に際しては、当時九州大学工学部生の押村嘉人(現(株)フジタ)、渡辺聡一(現 日本道路(株))の各氏および現在同大学大学院修士課程の荒渡光貴、椎木武史の各氏には実験、データ整理において多大の助力を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) Kichan Park, 平野宗夫, 橋本晴行, 押村嘉人, 渡辺聡一: 急勾配流路における流出流量の特性に関する実験的研究, 土木学会第53回年次学術講演会, 1998.

(2001. 10. 1受付)