

◆ 土砂災害特集 ◆

連続するスリット砂防堰堤の土砂調節効果に与える降雨波形の影響

水野秀明* 寺田秀樹**

1. はじめに

土砂調節量の確保や下流の河床低下の防止といった防災的な理由や、魚道の確保といった環境的な配慮等から、スリット砂防堰堤が建設されてきた。また、最近ではスリット砂防堰堤を連続して配置するような計画がなされている。

スリット砂防堰堤を連続して配置する際には、それらのスリット砂防堰堤群が対象とする洪水期間中にどれだけの土砂量を調節し、下流において土砂・洪水氾濫が生じないような河床変動に制御できるのかという点等を検討しておかなければならない。それらを推定する有力な手法として、河床変動計算がある。スリット砂防堰堤が1基だけ設置された場合の土砂調節効果を河床変動計算に基づいて検証したところされ、良好な結果が得られた¹⁾。また、スリット砂防堰堤を連続して配置した場合には、ピーク流砂量は減少するが、通過土砂量は余り減少しないこと²⁾、初期河床がアーマコートで覆われている場合には堰堤群としての効果が期待できること³⁾や、河床の状態や洪水

波形の違いにより、スリット砂防堰堤群としての土砂捕捉量が異なること⁴⁾が報告された。

実際に現場で河床変動計算に基づいてスリット砂防堰堤群の効果を推定する場合、十分な流量の観測記録がある場合を除いて、キネマティック・ウェーブ法などの流出解析によって流量を推定することになる。従って、設定した降雨波形によっては、流出解析結果が変わるので、土砂調節効果の推定結果が変化すると想定される。しかし、降雨波形の違いによる、スリット砂防堰堤群の土砂調節効果の変化を検討した事例は余りない。そこで、本報告では、降雨波形の違いがスリット砂防堰堤群の土砂調節量と下流の河床変動に与える影響を、流出解析と河床変動計算を組み合わせたモデルによって明らかにする。

2. 河床変動計算に基づいた土砂調節効果の推定

2.1 概要

本報告では、黒部川流域祖母谷をモデルとする。図-1は黒部川流域祖母谷の流域図で、流域面積は27.2km²である。対象とする洪水は平成7年7月の豪雨⁵⁾によって発生したものとする。図-2は祖母谷流域の最上流部に設置されている白馬岳雨量観測所(図-1)で観測された、平成7年7月における降雨で、降雨期間は287時間、総雨量は1955mm、最大時間雨量は123mmであった。

本報告では、前述の推定⁶⁾に用いた手法を適用して、流出解析と河床変動計算を行う。また、図-1のように仮定の基準点を設定する。スリット砂防堰堤は基準点から上流3kmの区間に配置する。以後、この区間を検討対象区間と呼ぶ。

2.2 流出解析

流出解析はキネマティック・ウェーブ法⁷⁾に基づいて行う。流域内を幾つかの矩形斜面と河道に分割して、それらを組み合わせる。

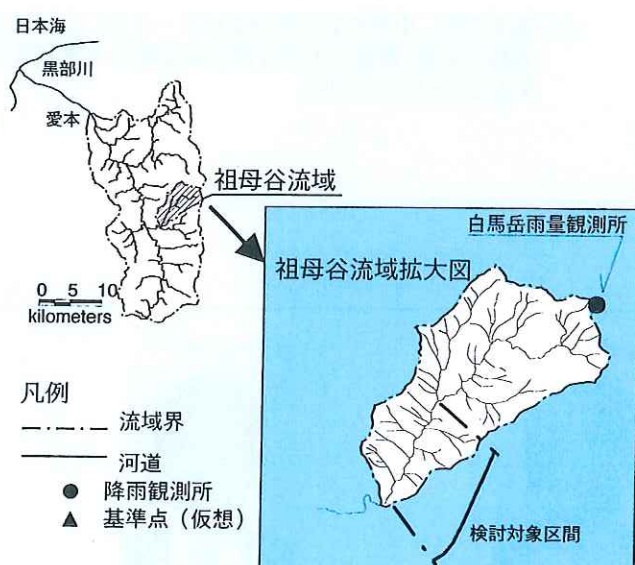


図-1 流域図

矩形斜面から河道への流出過程は式 (1) と式 (2) から計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (1)$$

$$q = \sqrt{I} / n \cdot h^{5/3} \quad (2)$$

ここで、 h ：流水断面積、 q ：斜面上での単位幅流量、 r_e ：有効降雨量、 n ：等価粗度 (本報告では 0.04)、 I ：斜面勾配、 t ：時間、 x ：距離である。河道における流出過程は式 (3) と式 (4) から追跡する。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

$$A = \left(\frac{n}{K_1^{2/3} \cdot 1/2} \right)^{\frac{3}{2\alpha+3}} \cdot Q^{\frac{3}{2\alpha+3}} \quad (4)$$

ここで、 A ：河道内の流下断面積、 Q ：河道内の流量、 n ：マンシングの粗度係数、 S ：河床勾配、 K_1 、 α ：定数である。

2.2 河床変動計算

河床変動計算は 1 次元で行った。河道における流水の追跡には式 (3)、(4) を用いた。

流砂の連続式は式 (5) の通りである。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

ここで、 z ：河床位、 λ ：堆積土砂の空隙率 (= 0.6)、 B ：河道幅、 Q_s ：全流砂量である。河道幅は地形図から読みとった河幅とレジーム則 (本報告では係数を 3.5 とした⁶⁾) により推定した河幅 (式 (6)) を比較し、狭い方を採用した。また、河床は、平成 7 年 7 月出水の再現性が良かった固定床とした⁶⁾。

$$B = 3.5\sqrt{Q} \quad (6)$$

流砂量 Q_S については、掃流砂量 Q_B は芦田・高橋・水山式⁸⁾、浮遊砂量 Q_F は Lane-Kalinske の式 (9) に河床付近の濃度として芦田・道上式¹⁰⁾ を用いて推定した。

$$Q_S = Q_B + Q_F \quad (7)$$

土砂は、流出解析で設定した各矩形斜面より河道に流入する流量 q から、掃流砂量と浮遊砂量を

計算し、河道に供給した。但し、総供給土砂量は平成 7 年 7 月出水時の総流出土砂量⁶⁾ を参考に本検討では 49 万 m^3 程度とし、斜面からの供給土砂量の総和がその値に達した時点で給砂を止めた。

スリット砂防堰堤におけるせき上げ水深¹¹⁾ は式 (8) で与えた。

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2gh_S^3} \quad (8)$$

ここで、 μ ：流量係数 (本報告では 0.65 を用いた)、 h_S ：スリット砂防堰堤におけるせき上げ水深である。

2.3 計算条件

図-2、3、4、5 は計算に用いた降雨波形である。白馬岳雨量観測所で観測した実績の降雨量に基づいて、総降雨量と最大時間雨量は変化させずに、波形のみを変化させた。図-2 の最大時間雨量を記録した時刻を挟んだ 3 時間分 (16 時間後～18 時間) の時間雨量を、76 時間後～78 時間後と入れ替えた場合 (図-3)、138 時間後～140 時間後と入れ替えた場合 (図-4)、220 時間後～222 時間後と入れ替えた場合 (図-5) を設定した。以後、降雨波形を図-2 から 5 の順番に、それぞれ降雨波形 1、降雨波形 2、降雨波形 3、降雨波形 4 と呼ぶ。

なお、図-2 から 5 には、後述する流出解析の結

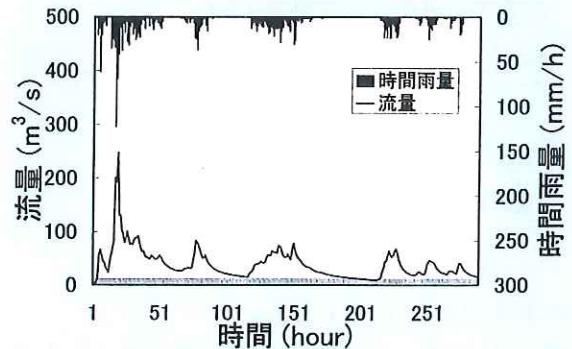


図-2 降雨と流量 (降雨波形 1)

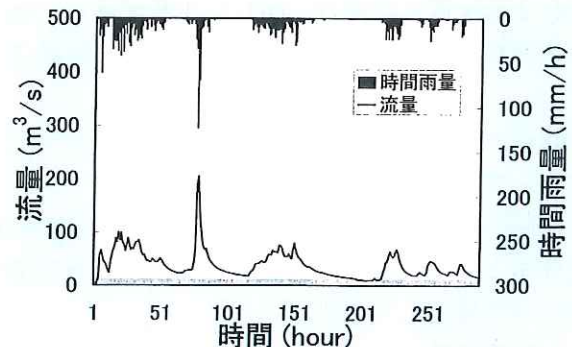


図-3 降雨と流量 (降雨波形 2)

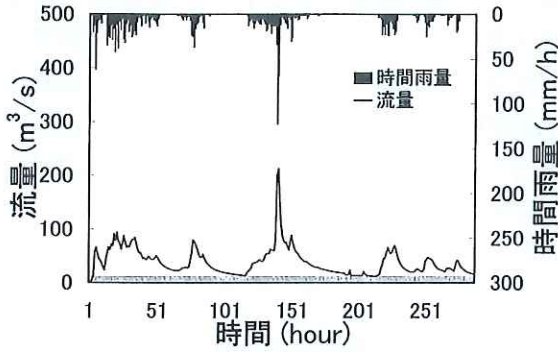


図-4 降雨と流量 (降雨波形 3)

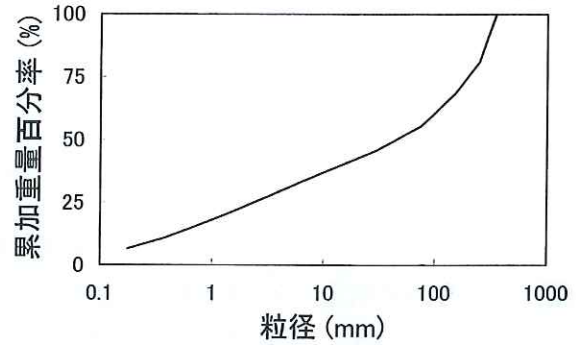


図-7 粒度曲線

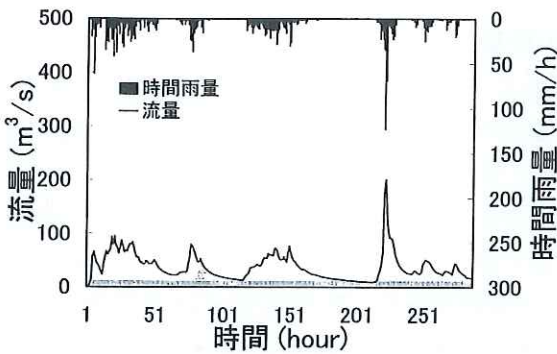


図-5 降雨と流量 (降雨波形 4)

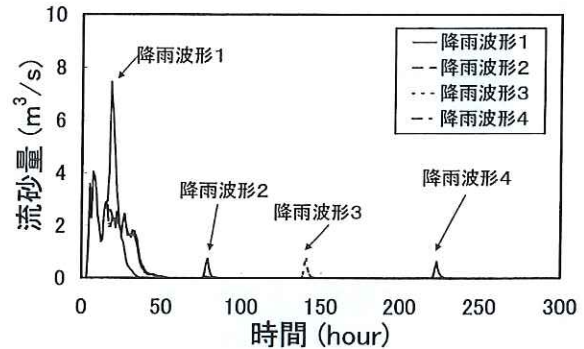


図-8 流砂量の時間変化 (検討対象区間の上流端)

配置1 (透過型砂防堰堤2基)



配置2 (透過型砂防堰堤4基)

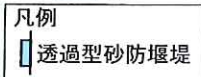
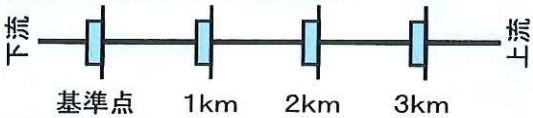


図-6 スリット砂防堰堤の配置パターン

果もあわせてプロットした。

図-6はスリット砂防堰堤の配置パターンを示したものである。計算に際しては、スリット砂防堰堤を2基配置した場合、同じく4基配置した場合の2種類とし、以後、それぞれ配置1、配置2と呼ぶ。

計算ケースは上記のケースを組み合わせさせた8ケースである。

初期の河床材料の粒度分布は供給する流砂の粒度分布とし、災害後に実施された河床材料調査に基づいて設定した(図-7)。

2.4 計算結果

図-2、3、4、5にあわせて示した流出解析の結

果で、検討対象区間の上流端における流量の時間変化である。降雨波形1から4の流量の時間変化を比較すると、流量の最大値が現れる時間が異なった。降雨波形2、3、4の場合の最大値は降雨波形1に比べて低かった。

図-8は検討対象区間の上流端における流砂量の時間変化である。いずれの降雨波形でも、流砂量の最大値は洪水の第1波(50時間後まで)に現れ、降雨波形1の場合の値はその他に比べて2倍程度大きかった。また、降雨波形2、3、4については、時間降雨を差し替えた時刻付近で、わずかに上に凸の波形を示した。

図-9、10は、それぞれ配置1、配置2での基準点における流砂量の時間変化である。いずれの配置パターンでも、流量が最大値を示す時刻付近において、流砂量の最大値が現れた。また、その値は降雨波形によって異なった。

図-11、12は検討対象区間における河床変動計算の結果の一例で、配置2で降雨波形1と4の場合での初期河床に対する河床変動量である。河床変動量は堆積を正とした。図中の最大堆砂量とは、計算を終了するまでの間での、検討対象区間内に堆砂した土砂の総量の最大値である。最大堆砂量となった時刻(最大堆砂時)における降雨波形

1の河床位は降雨波形4の場合と比べると、上流側のスリット砂防堰堤になる程高くなった。降雨波形2、3、4の間で、ほとんど差がなく、同じような河床形であった。配置1の場合も同じような

傾向を示した。最大堆積時刻は降雨波形1から4の順番に、配置1の場合32時間後、38時間後、39時間後、39時間後、配置2の場合で29時間後、41時間後、40時間後、41時間後であった。

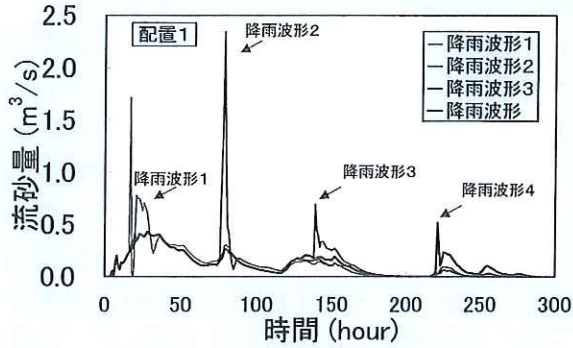


図-9 基準点での流砂量の時間変化

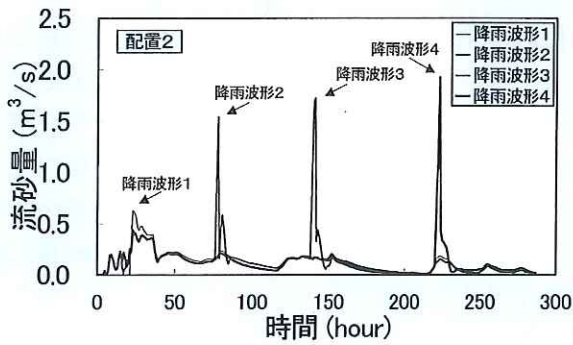


図-10 基準点での流砂量の時間変化

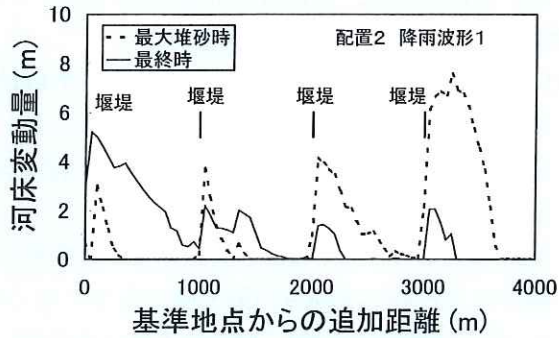


図-11 河床変動量の計算事例

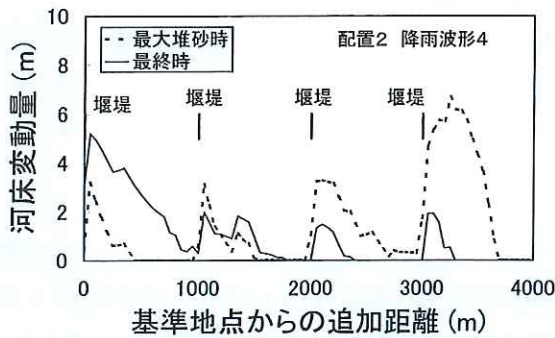


図-12 河床変動量の計算事例

図-13、14は、最大堆積時及び計算終了時の検討対象区間内における堆積土砂量で、それぞれ配置1、配置2の場合である。配置1の場合、最大堆砂量と最終堆砂量は降雨波形1の場合が最も多く、降雨波形2、3、4の最大堆砂量は降雨波形1の値と比べて1.2万m³から1.5万m³程度小さかった。降雨波形2、3、4の最終堆砂量は降雨波形1の値と比べて0.6万m³から1.0万m³程度小さかった。配置2の場合も最大堆砂量と最終堆砂量は降雨波形1の場合が最も多かった。降雨波形2、3、4の最大堆砂量は降雨波形1の値と比べて2.3万m³から2.8万m³程度小さかった。降雨波形2の最終堆砂量は降雨波形1の値とほぼ同じであったが、降雨波形3と4の値は降雨波形1の値と比べて1.4万m³から1.6万m³程度小さかった。

図-15、16は、基準点より下流の区間で、洪水期間中に記録した最高の河床位と初期河床位の差をプロットしたもので、それぞれ配置1、配置2の場合である。河床位の差は堆積を正とする。

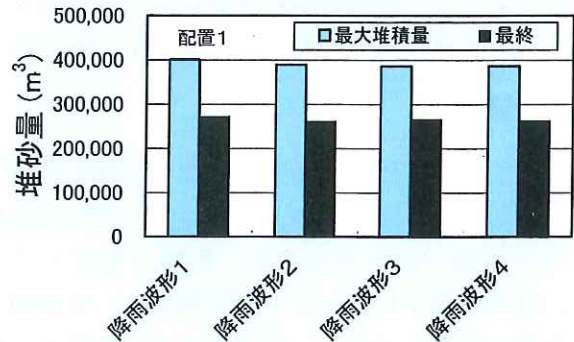


図-13 最大堆砂量と最終堆砂量 (配置1)

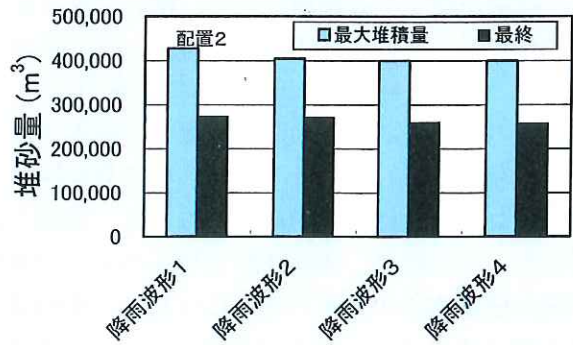


図-14 最大堆砂量と最終堆砂量 (配置2)

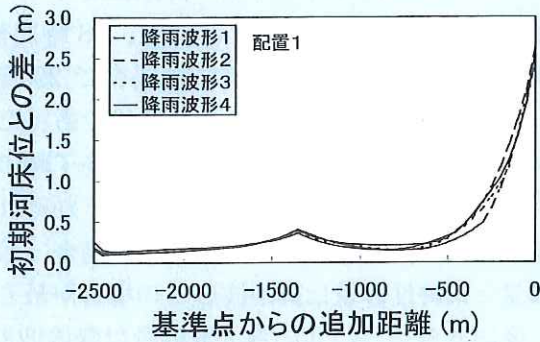


図-15 スリット砂防堰堤群下流での最高河床位

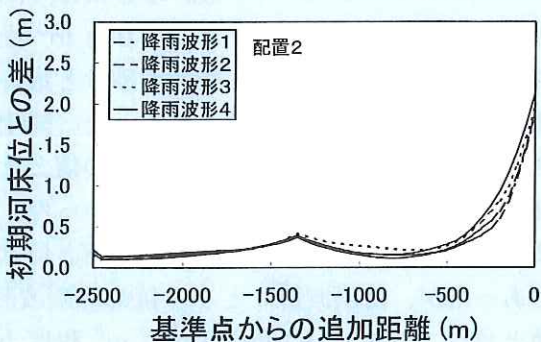


図-16 スリット砂防堰堤群下流での最高河床位

また、基準点からの追加距離は上流向きを正の向きとする。なお、河床の最高位は洪水期間中に流路からの土砂・洪水氾濫の可能性を検討する際に重要となると思われるので比較する。どちらの配置パターンでも、降雨波形の波形による違いはあったが、その違いは最大でも 30cm 程度であった。

3. 考察

降雨波形が流砂量の波形に及ぼす影響を考察する。今回の計算条件では、検討対象区間に堆積した土砂量が流砂量の波形に影響を及ぼしている。洪水の後半にスリット砂防堰堤に一旦堆積した土砂が急激に流出し、堰堤の下流に堆積する現象¹²⁾が報告されているが、今回の計算でも第一波の降雨が終了する時刻付近で、検討対象区間に堆砂が見られた(図-11、12)。第二波以降の洪水では、検討対象区間に流れ込む流砂量(図-8)が少ないので、検討対象区間内の堆砂が侵食されて下流へ流出する。配置1の場合、検討対象区間に堆積した土砂量は時間が経つにつれて、下流へ流出した。その結果、降雨波形3や4のように流量の最大値が出水の後半になるにつれて、流砂量の最大値は小さくなったのであろう。一方、配置2の場合、配置1と比べて2基多くのスリット砂防

堰堤が設置されていたことから、検討対象区間内に堆積した土砂量は下流へ流出しにくかったと考えられる。そのため、降雨波形3や4のように、流量の最大値が出水の後半に現れるにつれて、流砂量の最大値は大きくなったと考えられる。

降雨波形が洪水期間中の最大堆砂量に与える影響を考察する。最大堆砂量は全てのケースで、第一波の洪水期間中に生じた。また、図-8から分かるように、土砂は主に第一波の洪水期間中に流れた。しかし、降雨波形2、3、4の場合、第一波の洪水期間中の流量が降雨波形1の場合と比べて少なかったため、せき上げ水深(式(9))が小さくなった。その結果、降雨波形1と比べて、より多くの土砂が流出し、最大堆積量が少なくなったと考えられる。

検討対象区間の下流における河床変動を見てみると、特に、基準点から下流 200m 付近までの河床(図-15、16)は大きく変動しており、その傾向は基準点での流砂量の最大値の大きさの傾向とほぼ一致した。このことから、検討対象区間の下流における河床変動は基準点を通る流砂量に影響を受けると言える。

4. 結論

以上の検討から、本報告の計算結果に基づくと、結論は次のようにまとめられる。

- (1) 流砂量の最大値は降雨波形とスリット砂防堰堤の配置基数によって違った傾向を示した。配置基数が少ないと、最大時間雨量が降雨波形の前半にある程、流砂量の最大値は大きくなった。配置基数が多いと、最大時間雨量が降雨波形の後半にある程、流砂量の最大値は大きくなった。
- (2) 最大時間雨量が降雨波形の後半にある程、全洪水期間中の最大堆砂量及び最終堆砂量は少なくなった。
- (3) スリット砂防堰堤を連続して配置した区間の下流端からの流砂量の最大値が大きいほど、その区間の下流での河床の最高位は高くなった。

5. おわりに

今後、連続して配置したスリット砂防堰堤群の土砂調節効果を推定するために、流出解析と河床変動計算を用いる場合が多く出てくると思われる。本報告では、入力条件としての降雨波形によって、

推定結果が変わることが示された。このような背景から、流出解析と河床変動計算に基づいて、スリット砂防堰堤を連続して配置した際の土砂調節効果を推定する場合には、最大雨量の発生時刻が異なる、幾つかの降雨パターンを想定して、計算を実施する必要があるだろう。また、今回行ったような数値計算の精度を検証することやその精度を向上させることを目的として、スリット砂防堰堤を連続して配置した際の土砂調節効果を、土砂移動モニタリング等によって把握していく必要があるだろう。

本報告を行うに際して、国土交通省北陸地方整備局黒部工事事務所には快く資料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水山高久、阿部宗平、矢島重美、井戸清雄：2次元河床変動計算のスリット砂防ダムへの適用例，砂防学会誌，Vol.42，No.5，pp.21-28，1990.
- 2) 大久保駿、水山高久、蒲正之、井戸清雄：連続するスリット砂防ダムの土砂調節効果，砂防学会誌，Vol.50，No.2，pp.14-19，1997.
- 3) 藤田正治、水山高久、武蔵由育：砂防ダム群の土砂流出調節効果，水工学論文集第45巻，pp.697-702，2001.
- 4) 増田覚、水山高久、藤田正治、阿部彦七、小田晃、大槻英樹：連続するスリットダムの土砂調節機能についての基礎的考察，砂防学会誌，Vol.54，No.6，pp.39-42，2002.
- 5) 三上幸三、田中秀基、水山高久、藤田正治：スリット砂防ダムの土砂調節効果に関する実証的研究，砂防学会誌，Vol.51，No.4，pp.33-35，1998.
- 6) 福田克之、松本清則、谷口和哉、椿下康之、清水幹輝、水山高久：出水中におけるスリット砂防堰堤の土砂調節効果に関する研究 -黒部川流域祖母谷支川を対象として-，砂防学会誌，Vol.54，No.6，pp.25-34，2002.
- 7) 土木学会：水理公式集平成11年度版，pp.39，1999.
- 8) 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，砂防学会誌，Vol.30，No.4，pp.9-17，1978.
- 9) 土木学会：流砂量の評価手法，水理公式集平成11年度版，pp.156-173，1999.
- 10) 芦田和男、道上正規：浮遊砂に関する研究(1) -河床付近の濃度-，京都大学防災研究所年報第13号B，p.233-242，1970.
- 11) 水山高久、阿部宗平、矢島重美：スリットの流量係数と堆砂形状，砂防学会誌，Vol.42，No.4，pp.28-30，1989.
- 12) 水山高久、大久保駿、井戸清雄、越智英人：掃流区域におけるスリット砂防ダム配置上の留意点，砂防学会誌，Vol.49，No.5，pp.49-52，1997.

水野秀明*



国土技術政策総合研究所
危機管理技術研究センター
砂防研究室主任研究官，農博
Dr. Hideaki MIZUNO

寺田秀樹**



同 危機管理技術研究センター
砂防研究室長
Hideki TERADA