

研究ノート

流域管理システム (WMS) を用いた住吉川流域における
砂防堰堤の流出土砂量低減効果の評価事例Example of using the watershed-management system (WMS) to evaluate the effect
that Sabo dam has on reducing sediment discharge富田 陽子^{*1}

Yoko TOMITA

鈴木 伴征^{*3}

Tomoyuki SUZUKI

森 俊勇^{*2}

Toshio MORI

水山高久^{*4}

Takahisa MIZUYAMA

武蔵 由育^{*3}

Yoshiiku MUSASHI

Abstract

We have been developing a system called a watershed-management system (WMS). It consists of a rainfall-runoff model, a sediment discharge model and a deformation of riverbed model. WMS was applied to the Sumiyoshi River, and the parameters of the model were determined by considering the observation results. By conducting simulations under various conditions, for instance it was found that several Sabo dams in a downstream area are enough to control the amount of sediment caused by rainfall over a period of 10 years if their sediment trapping capacity is maintained by removal works. This paper explains the model, and describes the validation results.

Key words : watershed-management system (WMS), quantification of reducing sediment discharge with a Sabo dam, planning debris exclusion works, Sumiyoshi River, Mount Rokko

1. はじめに

筆者らは、過去に検討した「砂防施設計画策定支援システム (CASFPS)」(以下、「CASFPS」という)(水山ら, 1998)を改良して、六甲山系住吉川での流砂観測データを用いて、山地流域においてすべての降雨に対して土砂生産・土砂流出を推定し、砂防施設や治山施設がその土砂流出にどのように影響するのかを評価する仕組み(以下、「流域管理システム (WMS)」という)を開発した(富田ら, 2014 a; 2014 b)。CASFPSは流路に沿う河床変動計算に重きを置くもので、山地溪流の土砂生産・流出量については任意に与え、流水の運動方程式、流砂量の計算、流砂の連続式を連立して解き、水通し幅などの砂防堰堤の諸元を組み込むことによって砂防施設による土砂流出低減効果を評価するものである。流域管理システム (WMS) は、CASFPSを基礎にして流出解析モデル、土砂流出計算モデル、河床変動計算モデルを統合し(図-1)、山地流域における土砂生産・流出量を推定できるなどCASFPSにはなかった特性を付加したものである。流域管理システム (WMS) の特性を次に挙げる。

1) 山地流域における土砂の移動を追跡するため、土石

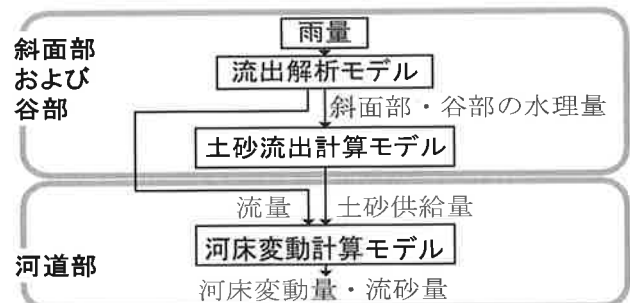


図-1 流域管理システム (WMS) の構成 (富田ら, 2014 a)
Fig.1 Structure of the watershed management system

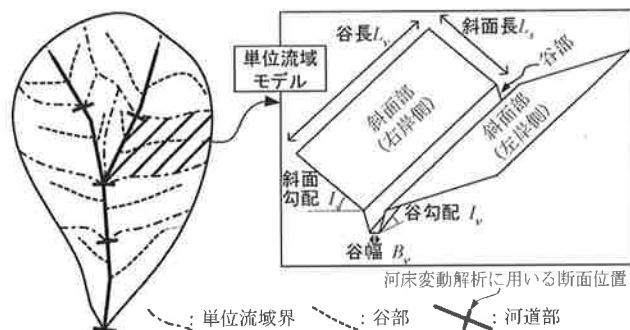


図-2 本研究で用いた流域の地形区分 (富田ら, 2014 a)
Fig.2 Modeling of watershed slopes and channels

*1 正会員 国土交通省北陸地方整備局神通川水系砂防事務所(現新潟県土木部都市局) Member, Jinzu River Sabo Office, Hokuriku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (Now in Urban Planning Bureau, Department of Public Works, Niigata Prefecture (tomita.yoko@pref.niigata.lg.jp) *2 正会員 (一財)砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation
*3 正会員 八千代エンジニアリング(株) Member, Yachiyo Engineering Co., Ltd. *4 正会員 京都大学大学院農学研究科 Member, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

流の発生・非発生を評価できるようにゼロ次谷も流路とした流域区分（図-2）を行い、すべての降雨に対して流域の斜面部・谷部・河道の各場所において土砂の生産量、堆積量、流出量を予測できる。

2) 特性曲線法に基づく降雨・流出解析モデルにおいて、中間流層を上層と下層に多層化したモデルを導入して、下層の透水係数を小さく設定することで山地の保水能力をモデル化した（富田ら，2014 b）。

3) 土砂供給単位となる流域において、生産土砂は一出水中に全量が流出することは少なく、出水中～出水後に流域内に残存堆積しその後の出水で二次的に移動する。土砂流出計算モデルでは、流出土砂量は斜面部・谷部の水理量に基づいて侵食あるいは土石流の発生による場合を計算する。

4) 河床変動は、土砂流出計算モデルにより算出された谷部から河道部への流出土砂量を条件に計算するものとし、砂防施設・治山施設による水位や土砂通過の影響、除石による土砂の除去をモデルに組み込んで砂防施設・治山施設による流出土砂量の低減効果を検討できる。

すなわち、流域地形をゼロ次谷を基準に分割し（図-2）、その流域で観測している雨量、流量（水位）、流砂量、堰堤堆砂量データに基づきパラメータを設定して各モデルを作成するので個々の流域の状況を反映させることができ、降雨のみを条件として与えることにより流出解析、土砂生産・流出解析、河床変動解析を取り扱うことができ、任意の地点における砂防施設の整備状況に応じた土砂流出低減効果についても評価することができる。砂防事業の現場においては、除石計画・砂防施設配置計画、スリット化による事業効果の判断等により有効に活用できる。

この流域管理システム（WMS）を用いて、六甲山系住吉川流域において砂防堰堤の整備状況を変化させたシミュレーションを行い、砂防堰堤による流出土砂量の低減効果、除石による流出土砂量の低減効果について定量的な評価を試みたので報告する。

流域管理システム（WMS）で用いる基礎方程式は富田ら（2014 a；2014 b）による。

2. 計画規模降雨時の砂防堰堤による流出土砂量の低減効果の検討

2.1 計算の条件

ここでは、砂防堰堤の整備段階に応じて流出土砂量がどのように変化しているのかを試算することとする。

計画規模降雨は、国土交通省六甲砂防事務所が想定している1/200年確率、72時間雨量479.2mmとし、計画規模引き伸ばし時間雨量を用いる（図-3）。

砂防堰堤の整備段階は、図-4および表-1に示すように次の4段階に区分する。

1) 「1957年（S32）までに整備」

住吉川で直轄施工が開始された昭和13年度～昭和42

年7月豪雨災害発生時まで完成した砂防堰堤。ただし、1958（S33）年度～1967（S42）年7月までに完成した砂防堰堤はない。

2) 「1974年（S49）までに整備」

1967年（S42）7月豪雨災害後～1974（S49）年度までのおおよそ昭和40年代に完成した砂防堰堤。ただし、

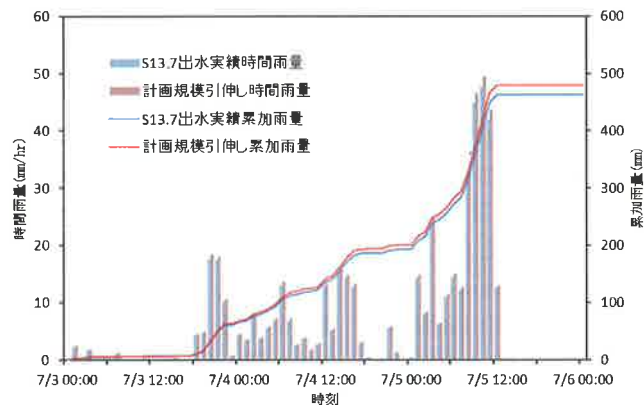


図-3 計画規模降雨波形

Fig.3 Design rainfall



図-4 住吉川流域の砂防堰堤位置

Fig.4 Map showing location of Sabo dams in Sumiyoshi River

表-1 砂防堰堤の堆砂状況

Table 1 Calculation conditions (volume of sedimentation)

住吉川流域			
備考	完成基数	貯砂容量 (m ³)	堆砂量 (m ³) (2004 時点) ※3
1957 年 (S 32) までに整備された砂防堰堤	13	703,000	313,360
1974 年 (S 49) までに整備された砂防堰堤 ※1	7	453,000	41,020
1984 年 (S 59) までに整備された砂防堰堤	22	546,070	62,522
2009 年 (H 21) までに整備された砂防堰堤 ※2	21	493,430	28,500
計	63	2,200,500	445,402

※1 1958～1968（S33～S43）年の間に完成した砂防堰堤はない。

※2 2000～2009（H12～H21）年の間に完成した砂防堰堤はない。

※3 2004 時点の堆砂量は、筆者らが LP データをもとに推定したものである。

1968 (S 43) 年度までに完成した砂防堰堤はない。

3) 「1984 年 (S 59) までに整備」

1975 (S 50) 年度～1984 (S 59) 年度までの昭和 50 年代に完成した砂防堰堤。

4) 「2009 年 (H 21) までに整備」

1985 (S 60) 年度～2009 (H 21) 年度までの昭和 60 年度以降に完成した砂防堰堤。ただし、2000 (H 12) 年度～2009 (H 21) 年度の間に完成した砂防堰堤はない。

堆砂状況は表-2 のようにそれぞれの砂防堰堤の整備段階毎に、堆砂がない場合 (a)、満砂している場合 (b) の 2 通りを設定する。砂防堰堤の現況の整備を示す Case-5 については、2004 年度に六甲砂防事務所が取得した LP データをもとに河床高を想定して現況の堆砂状況 (c) を想定した。

本川と支川の合流点は、本川断面を下流端断面として扱い、支川より先に計算した本川側水位を出発水位として計算する (富田ら, 2014 a)。砂防堰堤は、施設ごとに水通し幅や水通し標高などの施設諸元を入力するとともに設定した除石量 (本稿第 2 章, 第 3 章) を入力し、越流水位を与え、堰堤上流面側の断面として扱い計算する。このとき、河床高が越流頂標高に達していない場合

表-2 解析ケースの設定 (砂防堰堤の堆砂状況)
Table 2 Calculation conditions (Sabo dam conditions)

	施設整備状況 ※1	施設効果量 (千 m ³) ※2	堆砂状況 (2004 時点) ※3
Case-1	無施設	0	—
Case-2 a	1957 年 (S 32)	254	全容量が 空の状態
Case-3 a	1974 年 (S 49)	507	
Case-4 a	1984 年 (S 59)	767	
Case-5 a	2009 年 (H 21)	1,022	
Case-2 b	1957 年 (S 32)	254	満砂状態
Case-3 b	1974 年 (S 49)	507	
Case-4 b	1984 年 (S 59)	767	
Case-5 b	2009 年 (H 21)	1,022	
Case-5 c	2009 年 (H 21)	1,022	現況堆砂状況 ※3

※1 各年までに整備された砂防堰堤

※2 計画捕捉量と流出抑制量の合計値 (国交省, 2007)

※3 LP データをもとに筆者らが推定した 2004 時点の堆砂量

表-3 解析条件 (各定数)
Table 3 Calculation conditions (fixed number)

		項目	記号	単位	値
斜面部	上層	透水係数	k_{12}	m/s	0.0008
		中間流層厚	D_{m1}	m	0.375
	下層	透水係数	k_{22}	m/s	0.00008
		中間流層厚	D_{m2}	m	0.125
谷部	表層	等価粗度	n_s	$m^{-1/3} \cdot s$	0.4
	表層	等価粗度	n_b	$m^{-1/3} \cdot s$	0.04
河道部	白鶴堰堤上流	マンニングの粗度係数	n	$m^{-1/3} \cdot s$	0.04
	白鶴堰堤下流	マンニングの粗度係数	n	$m^{-1/3} \cdot s$	0.03

※流出解析において中間層は斜面部のみに設定 (富田ら, 2012)

※中間流層厚は空隙率 (0.4) を加味している

には掃流砂は捕捉されるものとし、浮遊砂は平衡流砂量に応じて流下するものとする (富田ら, 2014 a)。

その他の計算条件は富田ら (2014 a; 2014 b) に沿って設定する (表-3)。

透水係数、粗度係数等は、六甲山系住吉川の流砂観測データを基に作成した流出解析モデルの再現計算結果 (富田ら, 2014 b) を基に設定する。ただし、谷部の等価粗度は土砂流出計算モデルの再現計算結果 (富田ら, 2014 a) を基に 0.04 とする。

2.2 流出土砂量の変化

表-2 に示した各 Case の計算結果のうち、砂防計画基準点からの流出土砂量を図-5 に示す。また、図-6 に流出土砂量の時系列変化を示す。

これらからは次のことが整理できる。

- 1) 無施設時 (Case-1) の流出土砂量 258 千 m³ に対して、砂防堰堤が各整備段階で堆砂なしとした場合 (Case-2 a～5 a) は 29～45 千 m³ と算出された。これは無施設時の 11～17% 程度であり、流出土砂量は砂防堰堤の整備により大きく減少する。
- 2) 砂防堰堤が各整備段階で満砂していた場合 (Case-2 b～5 b) は、流出土砂量は 127～135 千 m³ と算出された。これは無施設時の 49～52% 程度であり、砂防堰堤に堆砂がない場合と比較すると効果は小さい。
- 3) 現況の施設整備状況・堆砂状況 (Case-5 c) の場合は、流出土砂量は 105 千 m³ と算出された。これは現況の砂防堰堤がすべて満砂していた場合 (Case-5 b) に近い。
- 4) 1957 年までの砂防堰堤整備状況 (Case-2 a, Case-2 b) において、流出土砂量は無施設時から大きく減少した。しかし、その後は砂防堰堤の整備が進むものの流出土砂量に大きな変化は見られない。
- 5) 1957 年までに整備された砂防堰堤の位置を見ると (図-4)、整備対象流域の下流域であり、砂防計画基準点付近である。流域の下流域 (砂防計画基準点

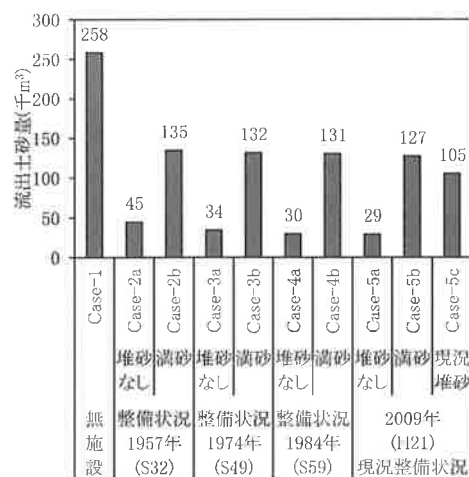


図-5 砂防計画基準点からの流出土砂量の計算結果

Fig.5 Results of calculating the sediment yield from a reference point of design

付近)において砂防堰堤の空容量が確保されていることが流出土砂量を大きく減少させる効果を発揮していると考えられる。

- 6) 無施設の場合と比較して、砂防堰堤があるとその満砂・堆砂なしにかかわらず土砂流出の開始時刻が遅くなり、終息は早まる(図-6)。砂防堰堤があることで流出時間が短くなり流出土砂量は少なくなる。

2.3 河床高の変化

図-5に示した計算結果のうち、砂防堰堤の無施設時の場合(Case-1)と現況施設状況で堆砂状況を変化させた場合(Case-5a~5c)の最大河床高と最大水位の変化を図-7、図-8および図-9に示す。

Case-1(無施設時、流出土砂量258千 m^3)の場合、砂防計画基準点下流の河口から1.2k~2.5kにおいて最大水位が堤防高を越えるが(図-7)、Case-5a(現況施設、堆砂なし、流出土砂量29千 m^3)では砂防計画基準点下流での河床上昇はなくなり最大水位が堤防高を越える箇所はほぼなくなる(図-8)。図-9にこの範囲の河床高と水位の時系列変化を示す。これによると、河床上

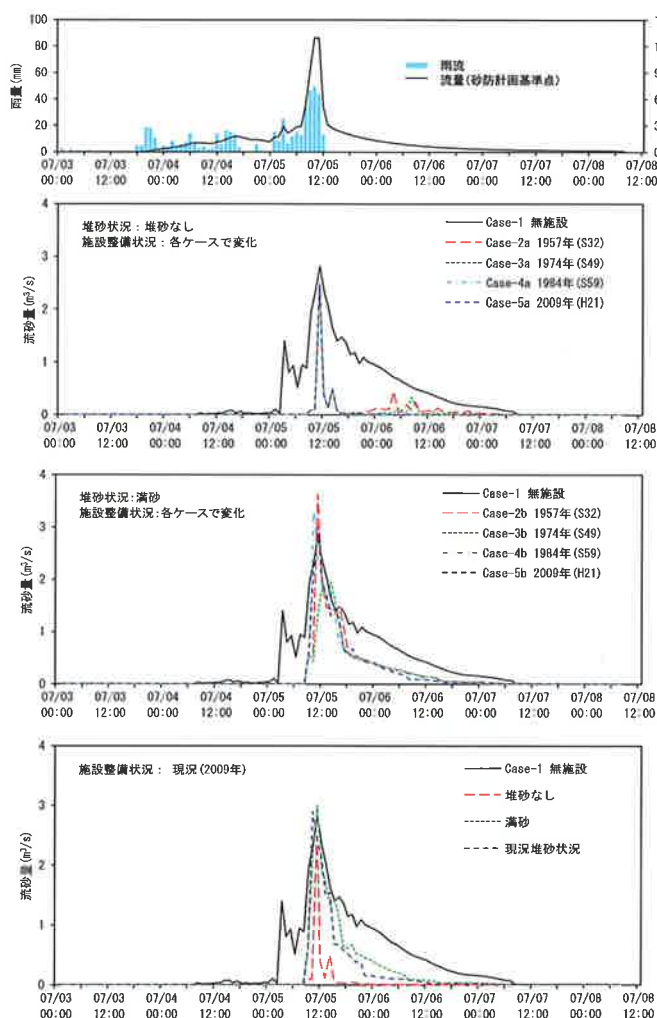


図-6 砂防計画基準点からの流出土砂量の時系列
(計画規模降雨:1/200年)

Fig.6 Time series of the sediment yield from a reference point of design

昇と水位上昇とは連動しており、砂防堰堤の整備による下流への流出土砂量の低減が氾濫防止に有効に機能していることがわかる。特に、図-8に示した現況施設の場合で堆砂がない場合には、河口付近を除けば氾濫箇所はほぼなく、現況において砂防堰堤に空容量が確保されていれば大規模出水時に土砂を捕捉することにより下流への効果が大きいことがわかる。

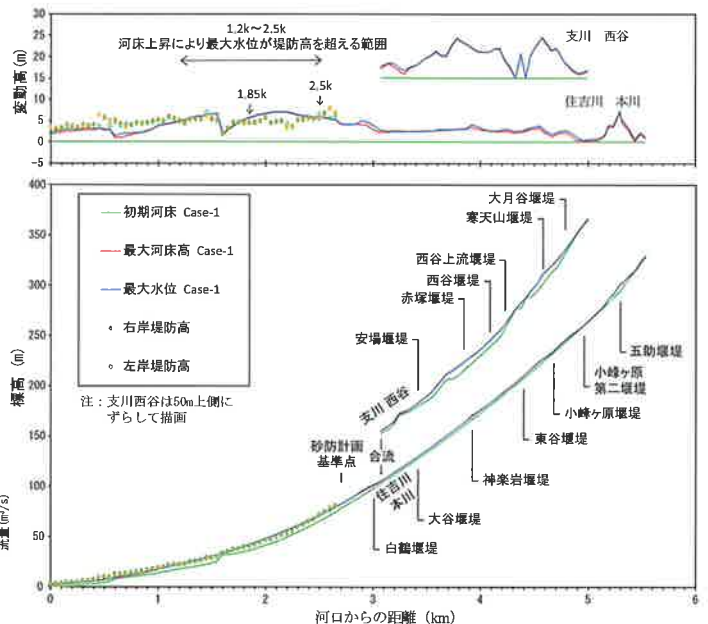


図-7 最大河床高と最大水位の変化
(Case-1: 無施設, 流出土砂量 258 千 m^3)

Fig.7 Results of calculating the deformation of riverbed and change in water level
(Case-1: non-institution, sediment yield 258,000 m^3)

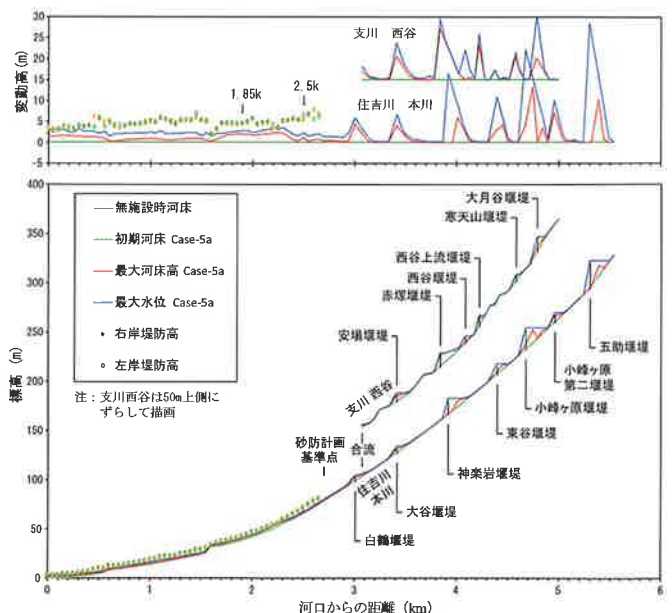


図-8 最大河床高と最大水位の変化
(Case-5a: 現況施設, 堆砂なし, 流出土砂量 29 千 m^3)

Fig.8 Results of calculating the deformation of riverbed and change in water level (Case-5a: present institution, non-sedimentation, sediment yield 29,000 m^3)

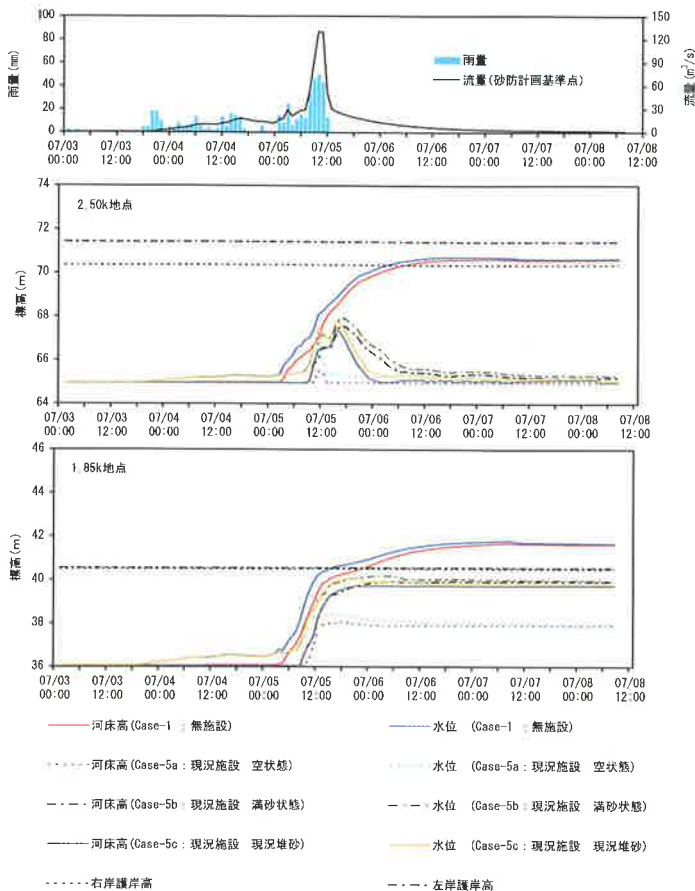


図-9 河床高と水位の変化

Fig.9 Results of calculating the deformation of riverbed and change in water level

3. 除石による流出土砂量の低減効果の検討

上記2.において、整備対象流域の下流域、すなわち砂防計画基準点付近にある砂防堰堤の空容量が確保されていることが下流への流出土砂量の低減に有効という結果になった。

そこで、ここでは、10年後に計画規模降雨（1/200年確率、72時間雨量479.2mm）が発生すると想定して、それまでの10年間に砂防計画基準点直上流にある砂防堰堤の除石を計画的に行った場合の流出土砂量の低減効果について検討する。

除石は、図-10に示すように、所定の空き容量を確保する範囲より高く堆積した部分の土砂を取り除くという考え方とし、解析においては年の変わり目に堆積断面積を減少させるという方法をとる。

除石を行う砂防堰堤、毎年確保する空容量は表-4のように設定する。また、除石対象施設として選定した砂防堰堤の位置を図-4に示す。

3.1 解析条件

10年間の降雨時系列は荒神山観測所（六甲砂防事務所）の2002～2011年間の時間雨量を与え、除石を考慮した10年間の土砂移動を解析した後計画規模降雨波形（図-3）を与えた場合の砂防計画基準点からの流出土砂量の変化を解析する。なお、この期間の最大時間雨量は

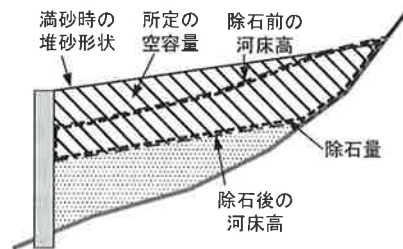


図-10 除石時の河床高変化の概念図

Fig.10 Image of change in deformation of riverbed accompanying removal works

表-4 除石条件

Table 4 Calculation conditions (removal works)

計算ケース	Case-E1	Case-E2	Case-E3	Case-E4	Case-E5
砂防堰堤整備状況	無施設	現況施設	現況施設	現況施設	現況施設
除石条件：確保する空容量（千m³）			3.6	3.6	3.6
白鶴堰堤					
大谷堰堤				10.0	10.0
安場堰堤	除石なし	除石なし	除石なし	10.0	10.0
神楽岩堰堤				除石なし	20.0
赤塚堰堤					20.0

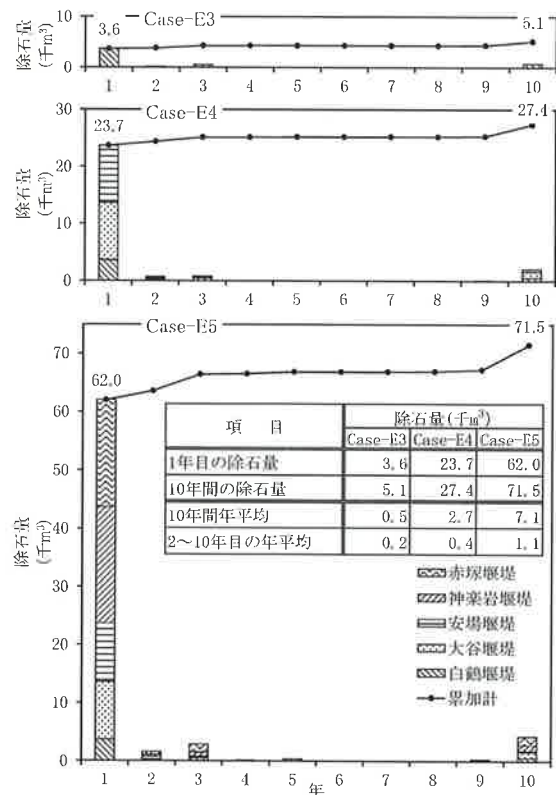


図-11 10年間の除石量

Fig.11 Removal volume for 10 years

40mm程度である。また、計画規模に相当する降雨は生じていない。

3.2 計算結果

10年間の降雨を与えた場合の除石量は図-11のようになった。除石量は1年目に大きく、2年目以降は少なくなる。これは、除石実施対象とした砂防堰堤が現況ではほぼ満砂状態であるため1年目は表-4に示した空容量を確保するために除石量が大きくなるが、2年目以降

は堆砂の進行が小さいため除石量も小さくなるからである。除石量が最も大きい Case-E5 の場合においても 2 年目以降の平均除石量は 1.1 千 m^3 である。平常時の土砂流出が少ない場合には大規模な出水で堆積した土砂を除去しておけば平常時の除石は少なくてすむ。

3.3 流出土砂量の変化

3.3.1 10 年間の流出土砂量の変化

表-5 に上記 3.1 で解析条件とした計画規模降雨発生前の 10 年間の土砂収支を示す。

10 年間で河道へ流出する土砂量（谷部からの流出土砂量）は 21 千 m^3 と算出された。無施設時（Case-E1）では、砂防計画基準点上流の河道の河床変動量がマイナス（侵食）になり、 59 千 m^3 の土砂が砂防計画基準点か

ら下流へ流出すると算出された。現況施設状況で除石しないとした条件（Case-E2）では、河道の侵食がなくなり供給土砂のすべてが砂防計画基準点上流に堆積して砂防計画基準点から下流への流出土砂量はゼロとなる。現況施設状況で除石を実施するとした条件（Case-E3～E5）の場合は、砂防計画基準点上流河道の河床変動量がマイナスとなり侵食される場合もあるが砂防計画基準点から下流への流出土砂量はゼロとなる。

3.3.2 計画規模出水時の流出土砂量の変化

10 年間の降雨を経たあとの計画規模降雨時の土砂収支を表-6 に、砂防計画基準点から下流への流出土砂量を図-12 に示す。

無施設時（Case-E1）の砂防計画基準点から下流への流出土砂量は 250 千 m^3 と算出された。現況施設状況で除石をしないとした条件（Case-E2）ではこれが 111 千 m^3 と算出された。現況施設状況で除石を実施するとした条件（Case-E3～E5）の場合は、流出土砂量はそれぞれ 106 千 m^3 、 86 千 m^3 、 55 千 m^3 となり、確保した空容量と同程度に流出土砂量が減少する結果となった。

3.4 河床高の変化

図-12 に示した計算結果のうち、無施設の場合（Case-E1）と現況施設で空容量が 63.6 千 m^3 の場合（Case-E5）の最大河床高および最大水位の縦断図を図-13、図-14、に示す。図-13（Case-E1、無施設）では、砂防計画基準点下流の河口から $0.0 \text{ k} \sim 0.45 \text{ k}$ および $1.2 \text{ k} \sim 2.5 \text{ k}$ において最大水位が連続的に堤防高を越える範囲が生じる。図-14（Case-E5、空容量 63.6 千 m^3 確保）では、河口付近を除くと最大水位が堤防高を越える箇所はほぼ解消されており、現況施設状況において、除石により砂防堰堤の空容量を確保することは下流の河床上昇を抑制する効果大きい。

4. まとめ

流域管理システム（WMS）による平常時を含めた今回のシミュレーションで、六甲山系住吉川において砂防

表-5 計画規模降雨発生前の 10 年間の土砂収支
Table 5 Sediment balance for 10 years at the time of rainfall

計算ケース	Case-E1	Case-E2	Case-E3	Case-E4	Case-E5
砂防堰堤整備状況	無施設	現況施設（現況堆砂状況）			
除石条件：確保する空容量（ 千 m^3 ）					
白鶴堰堤			3.6	3.6	3.6
大谷堰堤				10.0	10.0
安場堰堤	除石なし	除石なし	除石なし	10.0	10.0
神楽岩堰堤				20.0	20.0
赤塚堰堤				20.0	20.0
斜面部からの流出土砂量	22	22	22	22	22
谷部での土砂量変化	1	1	1	1	1
谷部からの流出土砂量	21	21	21	21	21
砂防計画基準点上流での河床変動量	-38	21	16	-6	-51
除石量（図-11 より）			5	27	72
砂防計画基準点からの流出土砂量	59	0	0	0	0

表-6 10 年間の降雨を経た後の計画規模降雨時の土砂収支
Table 6 Sediment balance at the design rainfall

計算ケース	Case-E1	Case-E2	Case-E3	Case-E4	Case-E5
砂防堰堤整備状況	無施設	現況施設（現況堆砂状況）			
除石条件：確保する空容量（ 千 m^3 ）					
白鶴堰堤			3.6	3.6	3.6
大谷堰堤				10.0	10.0
安場堰堤	除石なし	除石なし	除石なし	10.0	10.0
神楽岩堰堤				20.0	20.0
赤塚堰堤				20.0	20.0
斜面部からの流出土砂量	1018	1018	1018	1018	1018
谷部での土砂量変化	285	285	285	285	285
谷部からの流出土砂量	733	733	733	733	733
砂防計画基準点上流での河床変動量	483	622	627	647	678
砂防計画基準点からの流出土砂量	250	111	106	86	55
Case-E2 との差			-4	-25	-56

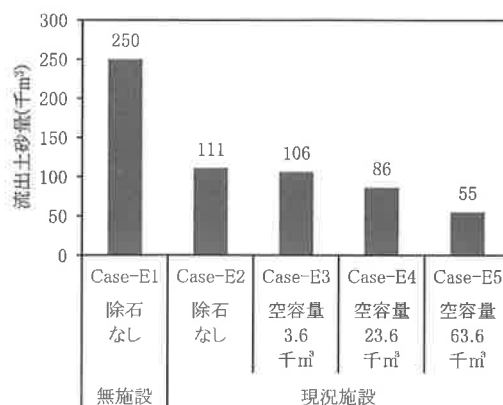


図-12 10 年間の降雨を経た後の計画規模降雨時の流出土砂量の計算結果

Fig. 12 Results of calculating the sediment yield at the design rainfall

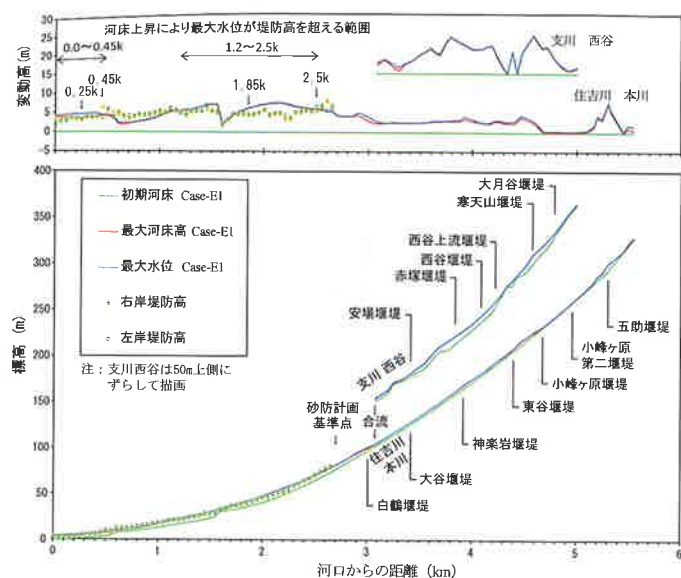


図-13 最大河床高・最大水位の変化 (Case-E1: 無施設)

Fig.13 Results of calculating the deformation of riverbed and change of a water level (Case-E1: non-institution)

計画基準点から下流に流出することが想定される土砂量を低減させるには、砂防計画基準点付近の上流に空容量が確保された砂防堰堤があることが有効となった (図-5 Case-2 a)。このことから、除石を砂防計画基準点付近の既設砂防堰堤で実施したところ、下流への流出土砂量を低減し、河床上昇の抑制に有効であるという結果を得た (図-14)。また、砂防堰堤の整備が進展した現在の施設配置状況においては砂防堰堤の除石を行うだけでも流出土砂量を低減させていくことが可能であるという結果を得た (図-12)。

以上により、流域管理システム (WMS) の活用は砂防堰堤の配置の有効性の判断 (施設配置計画検討) と除石等土砂管理計画の策定に定量的に寄与できることを示した。

本報告の一部は「平成 25 年度砂防学会研究発表会」で公表した。

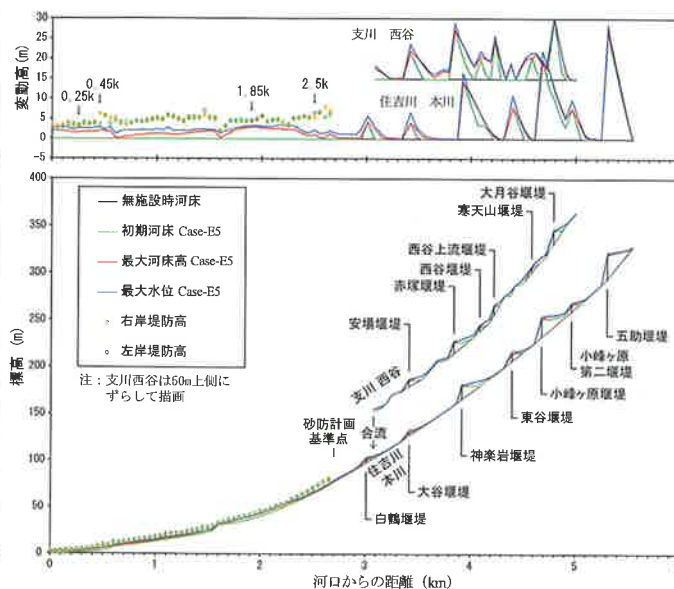


図-14 最大河床高と最大水位の変化 (Case-E5, 現況施設, 空容量 63.6 千 m^3)

Fig.14 Results of calculating the deformation of riverbed and change in water level (Case-E5: present institution, sediment-holding capacity 63,600 m^3)

引用文献

- 国土交通省国土技術政策総合研究所資料第 364 号 (2007): 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編解説)
 水山高久・富田陽子・井戸清雄・藤田正治 (1998): 砂防施設計画策定支援システム—六甲山住吉川を事例とする研究—, 砂防学会誌, Vol. 50, No. 6, p. 40-43
 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武蔵由育・鈴木伴征・水山高久 (2014 a): 流域管理システム (WMS) のための土砂流出計算モデルと河床変動計算モデルの作成, 砂防学会誌, Vol. 66, No. 5, p. 3-12
 富田陽子・森俊勇・武蔵由育・鈴木伴征・水山高久 (2014 b): 流域管理システム (WMS) のための流出解析モデル, 砂防学会誌, Vol. 67, No. 2, p. 15-21

(Received 30 September 2013; Accepted 1 December 2014)