

◆ 国土交通省技術研究会報告特集 ◆

流砂系における土砂移動実態に関する研究

国土交通省河川局砂防部砂防計画課
 国土交通省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
 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム

1. はじめに

最上流の山腹斜面から河口、漂砂域までの土砂が移動する領域(流砂系)において、土砂や洪水の氾濫、ダム貯水池における堆砂、河床低下に伴う人工構造物の基礎部損傷、河口閉塞や海岸侵食等に見られるような土砂問題が顕在化している。河川審議会総合土砂管理小委員会(平成9年度~10年度)において、このような土砂問題への対策が議論された。その結果、小委員会は場所の連続性(流砂系一貫)、時間の連続性、土砂の量と質(粒径)、水との関連といった視点から総合的な土砂管理を実施すべきであると報告した。

このためには、流砂系一貫の土砂移動の実態を把握しなければならない。そこで、国土技術研究会では、流砂系における総合的な土砂管理を行うための基礎資料収集を目的として、既往観測資料の収集・整理及び現地での土砂移動モニタリング(観測)を平成11年度より開始した。

本報告では、国土技術研究会の主な検討項目を整理し、それぞれの結果を報告する。

2. 検討項目

本研究課題で検討した主な事項は次の通りである。

- (1) モニタリング機器の開発と解析方法
- (2) 土砂移動実態の把握
- (3) 砂防施設の土砂調節効果

3. モニタリング機器の開発と解析方法

3.1 モニタリング機器

今回モニタリングで対象とした流砂は、掃流砂と浮遊砂である。

掃流砂は河床付近を移動するため、採取器は出水中でも河床付近まで到達できなければならない

い。そこで、可搬型として土研式採水器(写真-1)、角型・丸型サンプラー(写真-2)、固定型として砂防堰堤の水通し天端に採水口を設けたシステム(写真-3)等が開発された。

浮遊砂は河床面付近から水面に渡って濃度分布を持ちながら移動する。正確な浮遊砂量を計測す

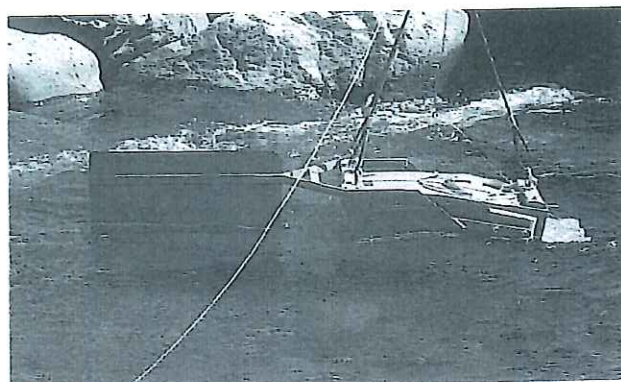


写真-1 土研式採水機

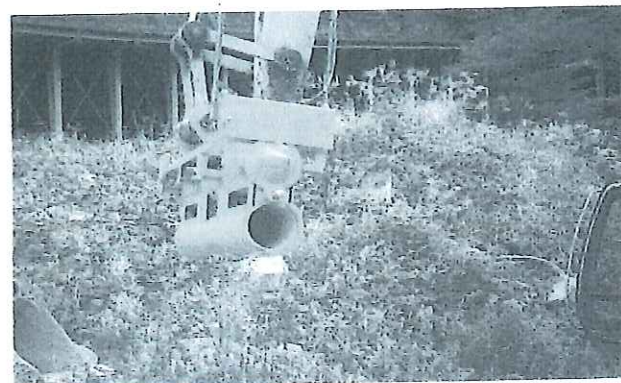


写真-2 丸型サンプラー

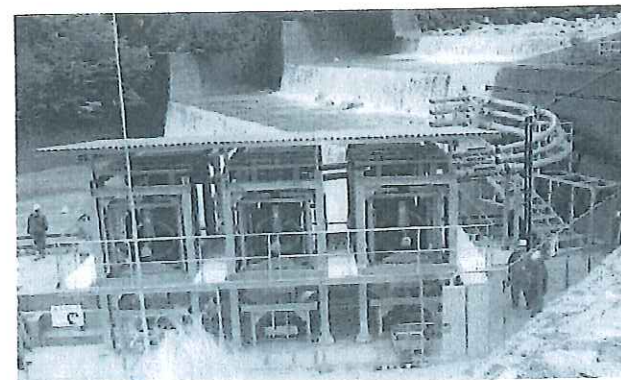


写真-3 固定型

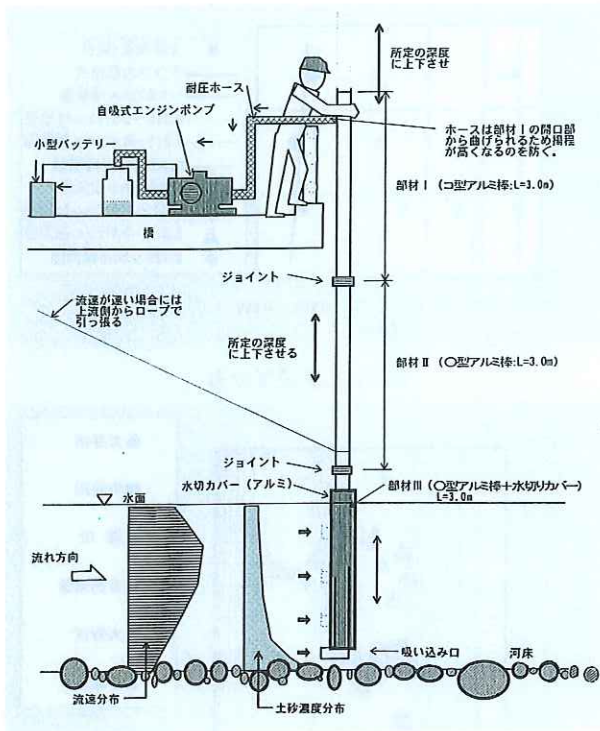


図-1 自給式エンジンポンプ採水器

るためには、深さ方向の濃度分布を計測する必要がある。そこで、長さ4m程度の棒にパイプを接続し、自給式ポンプで流水を吸い上げるシステム(図-1、以後、自給式ポンプと呼ぶ)や、砂防堰堤の袖部に採水口を深さ方向にいくつか設けたシステム(写真-3)を開発した。

砂防領域は急勾配河川であるため、流速が速く、流砂の粒径も大きい。前述のモニタリング機器には、観測が可能な流速等といったような適用範囲がある。それは平成13年度の概要集¹⁾にまとめたのでそちらを参考にさせていただきたい。

3.2 解析方法

掃流砂量は採取した土砂量を計測することで分かる。しかし、浮遊砂量は計測した土砂濃度分布から推定しなければならない。ここでは、その推定方法を整理する。

自給式ポンプの採水口径の都合上、約2mm以下の土砂しか採取できなかったため、2mm以上の土砂をラウス分布(基準面濃度はLane-Kalinske式)を仮定して浮遊砂量を推定する必要がある。粒径階別の浮遊砂量は式(1)で求める。

$$Q_{Si} = Q \cdot C_i \quad (1)$$

ここで、 Q_{Si} : 単位時間当たりの粒径*i*の浮遊砂量(m^3/sec)、 Q : 流量(m^3/sec)、 C_i : 深さ*z*方向で平均した粒径*i*の浮遊砂土砂濃度である。ま

た、 C_i は式(2)から計算する。

$$C_i = \frac{1}{h} \left\{ \int_0^a c_{bi} dy + \int_a^h c_{fi} dy \right\} \quad (2)$$

ここで、 h : 水深(m)、 a : 河床面から基準面濃度を算出した高さ(m)、 c_{fi} : 粒径*i*の河床から高さ*y*における土砂濃度である。 c_{fi} はラウス分布(式(3))²⁾を仮定して求める。

$$\frac{c_{fi}}{C_{bi}} = \left(\frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^\alpha$$

$$\alpha = \frac{\omega}{\beta \kappa u_*} \quad (3)$$

ここで、 C_{bi} : 河床面から高さ*b*における粒径*i*浮遊砂土砂濃度(基準面土砂濃度)、 ω : 粒径*i*の土砂の沈降速度、 κ : カルマン定数、 u_* : 摩擦速度($=\sqrt{gh_i}$ 、 g : 重力加速度、 i : 勾配)、 β : 定数である。また、式(4)の指数部分 α は粒径に応じて決まる係数である。基準面土砂濃度 C_{bi} (ppm)はLane-Kalinskeの式(式(4))³⁾を用いる。

$$C_{bi} = 5.55 \cdot \Delta F(\omega) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{u_*}{\omega} \right) \exp \left\{ \left(-\frac{\omega}{u_*} \right)^2 \right\} \right]^{1.61} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta F(\omega)$: 沈降速度 ω なる粒径が河床砂礫中に占める割合(%)である。ラウス分布曲線(式(3))が観測結果とうまく合うように基準面土砂濃度(式(3))を調整して、土砂濃度分布 $c_{fi}(y)$ を設定する。次節では、こうした推定方法によって作成した土砂動態マップを示す。

4. 土砂移動実態の把握

本研究では、流砂系一貫とした土砂移動実態を表す手法として、土砂動態マップを作成した。以下に、姫川で作成した土砂動態マップを紹介する。また、土砂移動の将来を予測するためには、河床変動計算など数値計算によるところが大きい。その数値計算で最も重要となるのが、流砂量式である。そこで次に、安倍川流域の玉機橋での流砂量の観測結果と流砂量式を比較したものを紹介する。

4.1 土砂動態マップ

姫川は長野県北安曇郡白馬村南部を水源とし、北流しながら日本海に注ぐ流域面積約722km²、幹線流路延長約60km、平均河床勾配約1/80の急流河川である。本川沿いが糸魚川-静岡構造線の

活動による影響を受けていることから降雨等に伴い崩壊、土石流、地すべり等が発生しやすい地域となっている。

姫川では、浮遊砂および掃流砂観測を図-2に示す9地点で実施した。浮遊砂、掃流砂の観測地点は根知川、小滝川、大所川、浦川、中谷川、土谷川(以上、姫川本川との合流点直上流地点)、山本橋(砂防基準点下流)、来馬河原(浦川合流点下流)、土谷川合流点直下である。

モニタリングは、秋雨前線に伴う平成12年11月1日02:00~11月3日16:00の降雨中に実施した。最大時間雨量は9mm(平岩観測所11月2日13:00)、連続雨量は109mm(平岩観測所)であった。浮遊砂および掃流砂のサンプリングは、出水期間中の11月2日10:20、11:25、13:18、15:00の時刻に実施した。

式(1)で用いる流量 Q は、降雨量の観測結果から中安の総合単位図法に基づいて計算し、流砂量観測時の水位観測結果に基づいて補正した。その結果、支川の最大流量は $127\text{m}^3/\text{s}$ (11月2日15:00、観測地点:大所川)であった。ちなみに、姫川本川の最大流量は土谷川合流点直下流で $114\text{m}^3/\text{s}$ 、山本橋で $368\text{m}^3/\text{s}$ であった。

図-3は姫川本川と土谷川との合流点における観測結果と、式(1)から(4)を用いて推定した土砂濃度分布である。ここで、図-3は、全流砂量を表

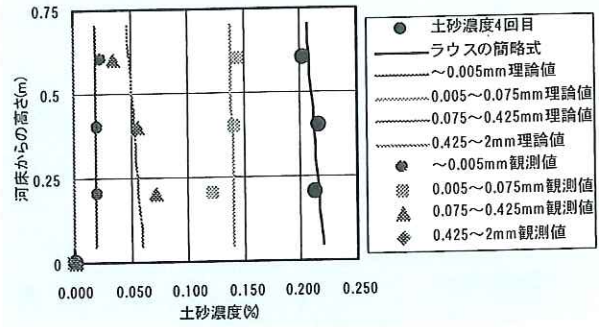


図-3 土砂濃度分布

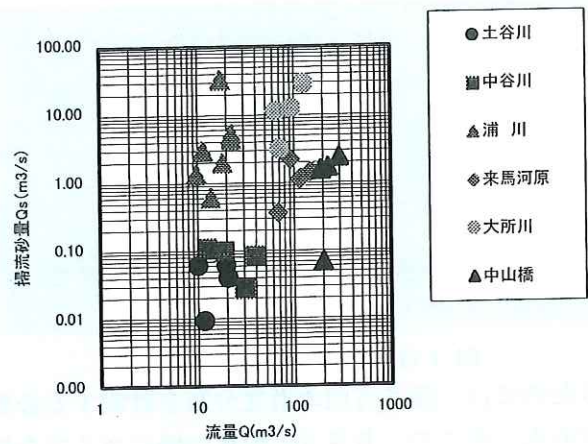


図-4 掃流砂の $Q - Q_s$

現していることとし、流量—掃流砂量 ($Q - Q_s$) の関係をプロットしたのが、図-4である。さらに、図-4に示す掃流砂の $Q - Q_s$ 及び同様に作成した浮遊砂の $Q - Q_s$ から推定した土砂動態マップを図-5に示す。図-5から、今回の一洪水中に中山橋を通過した土砂のほとんどが0.075mm以下のシルト成分であったこと、2.0mm以上の粒径の土砂は来馬河原より下流にはほとんど流下しなかったこと等が推定できた。このように、山地域から河口域までモニタリングに基づいた土砂動態マップを作成することにより、土砂移動の量、質(粒径)、場所を視覚的に把握することが出来るため、土砂管理を行う上で基礎的な資料となる。

4.2 観測結果と流砂量式

安倍川の玉機橋において一洪水を対象に実施したモニタリング観測結果から、観測結果と浮遊砂量式及び全流砂量式とを比較した。図-6は玉機橋における全浮遊砂量と流量との関係である。なお、全浮遊砂量は、浮遊砂の深さ方向の土砂濃度分布(観測値)に基づいて推定した各粒径階毎の浮遊砂量を総和した。また、図中には参考のために、浮遊砂量式として道上式⁴⁾とLane-Kalinske式²⁾をプロットし、全流砂量式としてBrown式⁵⁾を



図-2 観測箇所(姫川)

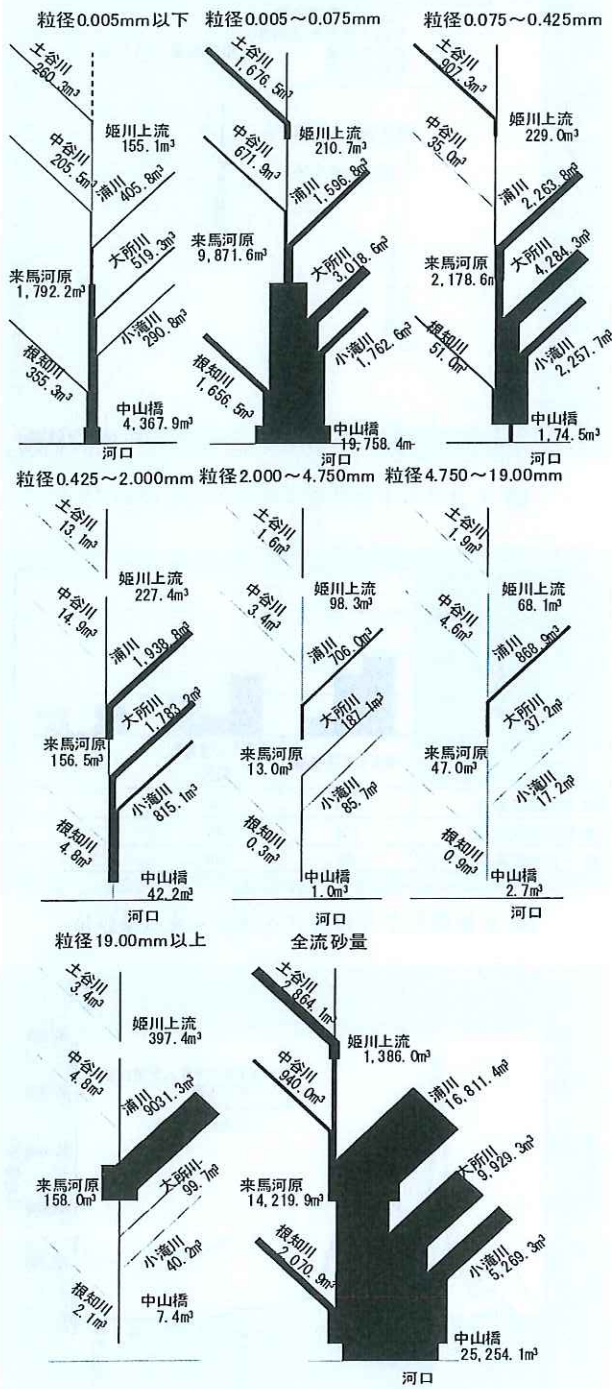


図-5 土砂動態マップ(姫川)

プロットした。また、経験式として以下の式もプロットした(式(5))⁶⁾。図-6には $\log \alpha$ と β とともに最小値をとったときの曲線と、ともに最大値をとったときの曲線と、今回の観測結果に基づいて近似した曲線を併記した。

$$Q_s = \alpha Q^\beta$$

$$-6.96 < \log \alpha < -2.00 \quad (5)$$

$$1.26 < \beta < 2.79$$

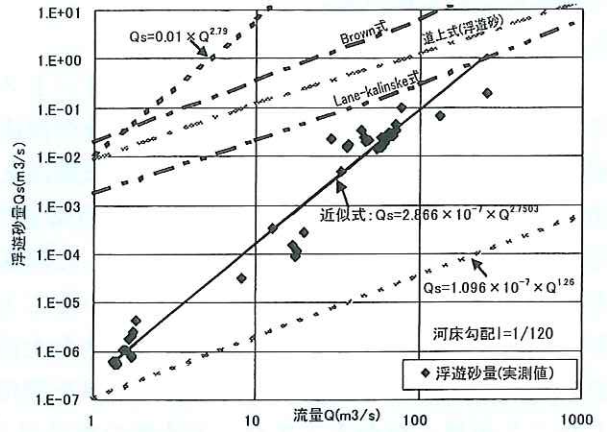


図-6 流量と流砂量の関係(玉機橋)

図-6 から、流量が概ね $30\text{m}^3/\text{sec}$ 以上であれば、観測値は道上式や Lane-Kalinske 式といった浮遊砂量式と概ね一致したが、 $30\text{m}^3/\text{sec}$ 未満になると、観測値はそれらの浮遊砂量式より小さくなった。特に玉機橋における観測結果によると、 $10\text{m}^3/\text{sec}$ 未満の流量では 3 桁程度の違いがあった。このような結果が生じた理由は現時点では判明していないが、流量の少ない時期(平常時)は山地流域等から流送能力に見合うだけの土砂供給が無かったためと思われる。このため、流量の小さい領域での浮遊砂量式の適用には注意を要することが分かる。

5. 砂防施設の土砂調節効果

砂防施設の中でも砂防堰堤は土砂移動をコントロールするための有力なツールの一つである。流砂系における総合的な土砂管理を考えたとき、山地流域の砂防堰堤によって流砂量を下流の要望に沿ったものへと変え(コントロール)しなければならない。このことを考慮すると、砂防堰堤には①土砂を止める効果、②土砂を安全に流す効果、③粒径を調節する効果の3点が求められる。そこで、実際に流域に建設された砂防施設の事例を収集し、上記の効果について検討した。平成13年度は、河床変動計算に基づいて、透過型砂防堰堤の土砂調節効果を評価した。国土技術研究会で収集した事例は、透過型砂防堰堤のうち、堰上げ型として祖母谷7号砂防ダム、湯の入沢第2砂防ダム、閉塞型として大柵沢第2砂防ダムである。各砂防堰堤の諸元等は平成12年度概要集7)に記載したので、そちらを参考にして頂きたい。以下に、黒部川水系祖母谷に設置した祖母谷7号砂防ダム

の効果について述べる。

5.1 透過型砂防堰堤の土砂調節効果

図-7⁸⁾は祖母谷7号砂防ダム(コンクリートスリット堰堤)付近の平成7年7月出水前後の河床変動を示したものである。図-7中の堆砂痕跡高と出水後河床高より、スリット堰堤である祖母谷7号砂防ダムの上流域では、出水時に上昇した河床が、出水後には元河床付近まで回復していることが分かる。すなわち、出水中は流出してきた土砂を一時的に堆砂させるという土砂調節効果を発揮したことが良く分かる。また、下流側の祖母谷6号砂防ダムも同様に土砂調節効果を発揮しているが、河床変動幅から見る限り、効果量は透過型堰堤である7号砂防ダムのほうが大きいことがわかる。

5.2 河床変動計算による土砂調節効果の評価

河床変動計算に用いるパラメータは平成7年に発生した出水を再現できるような値を設定した。平成7年出水における当該ダム付近の土砂収支は図-8、流量ハイドログラフは図-9のとおりである。ただし、図-9中の右側のY軸は1時間あたりの流出土砂量である。計算に際しては、次の4点を仮定した。

- ①出水の最大水位及び堆積深は洪水痕跡及び最大堆積痕跡とする。
- ②計算終了時は平成7年8月19日(出水1ヶ月後)測量結果の縦断形状とする。
- ③平成7年7月13日以前の段階で6号砂防ダムの堆砂が7号砂防ダムまで遡上していたとする。
- ④平成7年7月13日の時点は河床低下の段階であったとする。

1)「7号砂防ダムが無い場合」、2)「7号砂防ダムが不透過型ダム(未満砂)であった場合」、3)「7号砂防ダムが透過型ダムであった場合」の3ケースについて河床変動計算を行った。各ケースの土砂流出調節量を図-8に示す。最も最大堆積量が多いのは不透過型ダムのケースであった。これは初期条件として未満砂状態を設定したためである。しかし出水中において一時的に捕捉した量、いわゆる土砂調節量が多いのは透過型のケースであった。

図-9は7号砂防ダム地点から下流への流出土砂量の時間変化(右側の縦軸)である。なお、ピーク流出土砂量が最も少ないのは、不透過型のケース

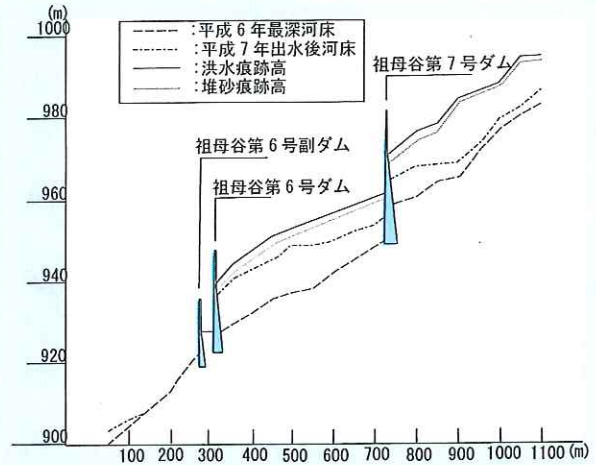


図-7 スリット砂防堰堤付近の河床変動⁸⁾

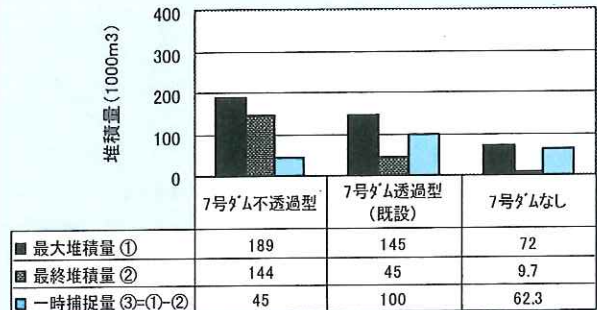


図-8 祖母谷7号砂防ダム地点上流の堆砂量

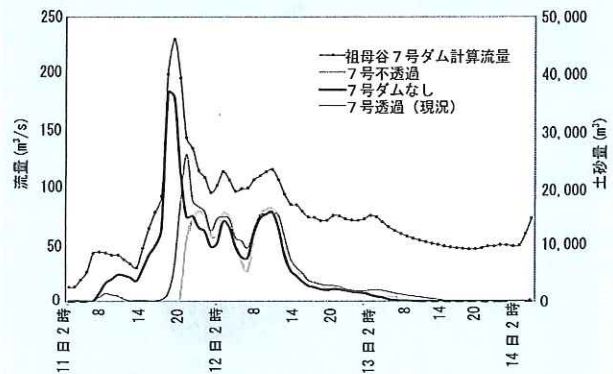


図-9 祖母谷7号砂防ダム地点流出土砂量変化
であり約16,000m³/hとなった。前に述べたように、これは未満砂状態を設定した条件であるためである。

7号砂防ダムを透過型堰堤としたケース(現況)の流出土砂量のピークの生起時間は流量ピークから2時間程度の遅れしかなく、流出ピークを遅延させる効果はあまりないが、ピーク流出土砂量約26,000m³(11日20時)に対し、ピーク流量時の流出土砂量約6,000m³(11日20時)で約8割に

近い低減を示しており、ピーク流出土砂のカットは十分になされていたことが分かる。

6. まとめ

本研究は平成 11 年度から開始した。平成 11 年度では、モデル流砂系 (石狩川水系黒岳、最上川水系立谷沢川・角川・銅山川、富士川水系早川、天竜川水系与太切川・小渋川、安倍川、姫川、大戸川、日野川、重信川、早明浦ダム上流域、高崎川、古島川、サーン川) の選定、モニタリング計画の策定を主に行った。平成 12 年度はモデル流砂系における既往資料の解析とモニタリングの実施を主に行った。平成 13 年度はモニタリングの継続とともに、モニタリング結果の解析を行った。

過去 3 年の調査において、流量-流砂量曲線、1 洪水中の粒径別流砂量ハイドログラフ・粒径別土砂収支が幾つかの事例で明らかとなった。同時に、総合土砂管理の観点から見た砂防施設の効果も幾つかの事例で明らかとなった。さらに、それらの効果が河床変動計算などの数値計算によって再現可能であることも明らかになった。

7. おわりに

本研究では、土砂移動を山地流域だけでなく、河口・海岸漂砂域に至る流砂系において総合的な土砂管理を実施するための、山地流域における土砂移動実態の把握を主眼に調査を実施した。土砂管理を検討するためには、流砂系における土砂移動の実態を把握しなければならない。しかしながら、平成 13 年度の検討では、平成 12 年から約 1 年間観測された資料に基づいて行ったため、具体的な「総合的な土砂管理」のための対策等を提案するまでの十分な検討結果に至っていない。

また、流域における総合的な土砂管理という観点から見たとき、どのような土砂 (量的、質的) がいつ (時間)、どこで (場) 必要あるいは不要なのか、ということ明らかにしなければならない。例えば、山地流域から河川・海岸域へ供給する土砂は、下流域が必要とするものである必要がある。このように考えると、河口・海岸域では、それぞれの地形を構成する土砂の粒径を明らかにしつつあり、それは流砂系毎に異なる。また、下流域では年間に流出してくる土砂を想定して、対策を考えている。以上のことから、今後は出水期だけで

なく、通年的にモニタリングを実施し、下流域が求める質 (粒径) にあった土砂がどの程度供給されているのか、明らかにしたいと考えている。

謝辞

本研究に関わる各調査にご協力いただいた、国土交通省北海道開発局建設部河川計画課、東北地方整備局河川部河川計画課、関東地方整備局河川部河川計画課、北陸地方整備局河川部河川計画課、中部地方整備局河川部河川計画課、近畿地方整備局河川部河川計画課、中国地方整備局河川部河川計画課、四国地方整備局河川部河川計画課、九州地方整備局河川部河川計画課、内閣府沖縄総合事務局開発建設部河川課にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局砂防部砂防課、国総研砂防研究室：流砂系における土砂移動実態に関する研究、平成 13 年度国土交通省国土技術研究会概要集 (指定課題)、pp.7-43-pp7-49, (2001) .
- 2) P. Y. Julien : Erosion and Sedimentation, Cambridge University Press, 280p, 1994.
- 3) 水山高久：荒廃山地流域における浮遊砂観測資料の解析、土木研究所資料第 2686 号, p.9, 1988.
- 4) 村本嘉雄、道上正規、下島栄一：大戸川における微細土砂の流送過程、京都大学防災研究所, 第 16 号 B, pp.433-447, 1973.
- 5) 藤田光一、宇多高明、服部敦：水系土砂収支分析のための「有効粒径集団」の考え方の提案、土木技術資料 37-12, pp.34-39, 1995.
- 6) 水山高久：山地河川の浮遊砂観測、土木技術資料 22-5, pp.46-51, 1980.
- 7) 建設省河川局砂防部砂防課、土木研究所砂防研究室：流砂系における土砂移動実態に関する研究、平成 12 年度 (第 54 回) 建設省技術研究会概要集 (指定課題)、pp.19-18,2000.
- 8) 三上幸三、田中秀樹、水山高久、藤田正治：スリット砂防ダムの土砂流出調節に関する実証的研究、新砂防, Vol.1, No.4, pp.33-35, 1998.

<文責> 国土技術政策総合研究所
危機管理技術研究センター

砂防研究室長 寺田秀樹
同 砂防研究室研究官 水野秀明