

1.はじめに 戦後の洪水氾濫が頻発した時期のような、治水上砂防の必要性が特に強調されるような災害は減少傾向にあるが、全国で毎年のように土砂災害は発生している。激甚な水系災害が減少してくると、その背後で静かに推移してきた、環境に関する問題が明るみに出てくるようになり、具体的な対策が望まれている状況にある。例えば、砂防計画の検討においては、海岸までの土砂の流れを考慮するといった、いわゆる流砂系の土砂管理が取り上げられ、現状に即した砂防施設の整備が行なわれようとしている。また一方で、流域の位置する地理的条件など、個々の流域が持つ特性により、毎年のように発生している出水現象や、そのとき発生している土砂移動現象などを踏まえて、そこに生存する動植物を含めた溪流・河川環境のあるべき姿を模索しつつ、砂防事業による人為的な影響を、我々や住民が望ましいと考えることが出来る方向で実施するといった、よりきめの細かい砂防事業の方向性が模索されているところである¹⁾。現状でこれらを検討するためには、まず、これまでの土砂移動現象から、それぞれの水系の今の状況を把握し、過去の類似災害の再発を防止する観点から、即時必要などころには重点的な対策を実施する必要がある。それとともに、事業効果を事前に説明することが可能な手法を用いて具体案を示し、対策を推し進める必要がある。このとき、公表を前提とした砂防事業を実施するための基礎的な情報である土砂移動現象は、背景のある数量を用いて表現されることが望ましく、現状では一次元の河床変動計算を用いた検討が盛んに行なわれている状況にある。

現在行なわれている一次元河床変動計算では、地点地点における土砂の移動量は、各種流砂量式により表現されるが、その適用範囲は実際の土砂流出現象の限られた範囲となる。例えば、混合砂礫に対する流砂実験において、平均粒径と比較して大粒径の砂礫は、河床砂と容易には混合せずに運動を継続する性質のあることが報告されている²⁾。また普段、天気の良い日に近所の小河川へ行き、流量が落ち着いている河床に、比重が水に近いゴルフボール($d=42.9\text{mm}$, $V=42\text{cc}$, $\sigma=1.086$)を置いてみると、1mm以下の河床砂礫が動かない流れであっても、ゴルフボールは、混合砂礫床の凹凸の影響を受けながら、なかなか静止せずに転動し続けることが確認できる。これは、河床勾配や河床形状、河床構成材料、そのときの流れなどの条件よりも、ゴルフボールの持つ形状や水中物体重量($\sigma-\rho$)の影響が大きいと思われる極端な例かもしれないが、河床材料調査などの現場データを説明するために、今有る流砂量式を用いて土砂移動現象を復元することを念頭におくならば、様々な前提条件を元に平衡状態を仮定して導き出された各種流砂量式を用いるよりは、確率的な取扱いが可能な流砂量式を概念を応用して説明することも、現実的な選択肢の1つではないかと考える。今回は、現在提案されている流砂量式の中から非平衡流砂過程を再現可能なモデルを用いて実現象の再現性を向上させるための今後の方向性について、特に砂防えん堤付近の土砂移動現象の再現性を向上させるための項目を整理した。

2. 砂防えん堤の効果 一次元河床変動計算において、砂防えん堤の効果をどのように評価しているかに着目して従来の研究を振り返ると、粗粒化した河道における砂防えん堤群のそれぞれのえん堤における貯留量を正確に表現できる藤田らの研究³⁾や、施設配置計画において施設整備順による流出土砂量低減効率に着目した大久保らの研究⁴⁾などがある。これらの結果は、上流端の流水や流砂の供給条件、正確には、流水や流砂の質量保存則の湧き出し項をどのように評価するかによって、結果が大きく変わるものである。従って、精度向上とは、計算範囲外の現象を、計算範囲最外郭の境界条件に再設定するという作業になる。特に、砂防えん堤などの流水を横断する構造物は、流れや流砂の運動に及ぼす影響が大きく、また、それらより下流の河床変動高は、砂防えん堤に貯留・調節された後の流出土砂量により支配されるものであることから、通常、砂防えん堤地点を境に計算区間を切って、上下流で異なる条件を設定する手法が用いられる。砂防えん堤の効果の評価した事例ではないが、鈴木ら⁵⁾は、災害前後の河床位と河床材料調査を基に、実際の出水時の土砂移動現象の復元を試みている。ここでは、計算区間の流砂の運動に平衡流砂量式と非平衡流砂量式を用いた比較検討を行なっているが、砂防えん堤の下流河道において、平衡流砂量式と、非平衡流砂量式を適用した事例であるため、これを引用して非平衡流砂量式の適用に関する課題を抽出する。

3. 事例を用いた検討 鈴木ら⁵⁾の検討では、重信川支川表川の重信川との合流点から上流の区間7.1kmを対象とし、平成9年度に実施された河床材料調査結果と、平成12年度に実施された河床材料調査結果の差を、平成11年9月豪雨の影響と見なし、再現計算を行なっている。ここで用いられている地形条件と出水に関するデータ概要を表-1に示す。非平衡流砂量式を用いた検討ケースをA、平衡流砂量式を用いた検討ケースをBとしている。河床変動量に関する再現性は、H6~H12の実績が+128,000m³であるのに対し、ケースAが+57,170m³、ケースBが+55,974m³であり、計算は実績の4割以下の値となっている。しかしながら、再現傾向は、両ケースとも同様の傾向を示している。変動後

表-1 地形条件と出水概要

地形条件	流域	流域面積	78.5 km ²	
	諸元	計算区間延長	7.1 km	
		勾配	1/50~1/100	
		河幅	15~160m	
砂防施設	流入支川		5	
		堰堤工	1基	
		床固工	10基	
		漂流保全工	0.5km	
出水概要	ピーク流量	最上流部	83.4 m ³ /s	
		最下流部	693.3 m ³ /s	
	計算時間		25時間	
	生産条件	崩壊・土石流発生タイミング		3~4時間後
		山腹崩壊による生産土砂量		53,000 m ³
土石流流下による侵食量			245,000 m ³	
生産域の施設効果量			42,000 m ³	
		施設効果を考慮した生産	256,000 m ³	

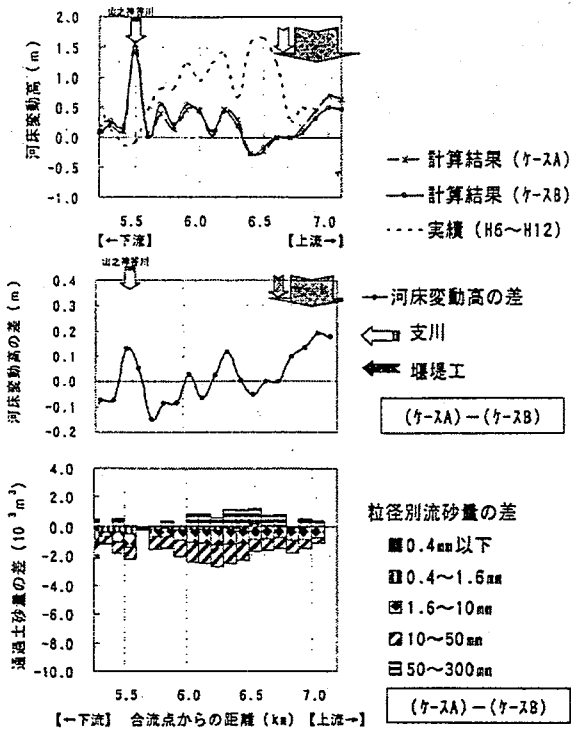


図-1 河床変動高の縦断分布 (計算と実績: 上) と ケースA, Bの比較 (河床変動量の差 (中), 粒径別通過土砂量の差 (下))

の河床材料構成については、実績データで確認される細粒化とほぼ同じスケールである。解析事例を用いて現状と課題を示すと以下ようになる。

① 本川上流端付近(7.0km付近)にえん堤工があり、その下流部の河床変動高計算結果は、実績よりも小さい値を示している。山之神谷川と本川上流端の流入土砂量の問題は別として、本川上流端の砂防えん堤から下流側の粗粒化の伝播を考慮することでどのような傾向がでるのかは検討を要する。

② 本川上流端と山ノ神谷川合流点の流入境界条件の設定方法に改良の余地があると考えられるが、単純に土砂量を掃流力見合いで与える供給条件であるために、河床変動量実績にあわせようとするとこのような結果となってしまふ。

③ 本川上流端の砂防えん堤の堆砂域における、土砂移動現象の再現性を向上させることが、より適切な境界条件の設定に繋がる。えん堤を乗り越える効果を一次元河床変動計算の中に取り入れることによって、えん堤地点において計算を区切ることなく実施することが出来る。

4.今後の方向性 以上のような課題に対して、非平衡性が顕在化する局所的な現象に適用可能な流砂量式を用いることによってどのような解決策が考えられるかを示す。中川・辻本が提案している非平衡流砂量式は(1)式であり、その

$$q_{Bi}(t) = \sum_{k=1}^K \left\{ n_{ik}(t) \cdot p_{sik}(t) \cdot \sum_{s=K-k}^{\infty} \mu_{i,s} \right\} \cdot A_3 \cdot d_i^3 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dn_{ik}(t)}{dt} = - \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{p_{i0}}{d_i^2} d_j^2 - \delta_{ij} \right) \cdot \left(\sum_{l=1}^{k-1} \left\{ n_{il}(t) \cdot p_{sjl}(t) \cdot \mu_{j,k-l} \right\} - n_{jk}(t) \cdot p_{sjk}(t) \right) \right] \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$p_{si}(t) \cdot \sqrt{d_i / (\rho / \sigma - 1) g} = 0.03 \cdot \tau_{*ci} (1 - \tau_{*ci} / \tau_{*ci}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

補助方程式として(2)(3)の式で構成されている。ここで、 q_{Bi} : 粒径別流砂量, n_{ik} : 時刻 t の第 k 区間での第 i ラスの砂の表面露出個数, p_{sik} : 体積分布, μ_i : 粒径別の平均step length: 第粒径階の平均粒径, A_3 : 体積に関する形状係数, d_i : 粒径階別の代表粒径, τ_{*ci} : 粒径別の無次元限界掃流力 ($\tau_{*c0} = 0.035$ として修正エギアザロフ式より求める), K : 着目する地点の直上流区間, N : 粒径クラス数, p_{i0} : 時刻 $t=0$ における粒度分布である。

- ① 砂防えん堤によって上下流に遮断される土砂移動現象の効果は、上流側からの土砂供給が無い場合に限り、下流側の粗粒化の伝播過程として再現される。
- ② 砂防えん堤の堆砂域における土砂移動現象は、上流域の土砂生産現象との関連が大きく、土砂移動現象の時間スケールに応じた取扱いが必要である。
- ③ えん堤水通し断面を通過する土砂の成分を表現する方法を考える。現地調査データをもとに、(1)式の n_{ik} (粒径別の砂の表面露出個数、時間的な変化は(2)式で追跡)、 p_{sik} (体積分布、(3)式で推定)を用いて評価する手法を検討する。

5.おわりに 砂防えん堤の下流部が含まれる平衡流砂量式と非平衡流砂量式を用いた一次元河床変動計算の検討事例を基に、非平衡流砂量式の適用に関する課題を抽出し、今後の検討項目を示した。今後も、実現象の再現性を向上させるために非平衡流砂量式を用いた検討を進めたい。

参考文献 1) 柘木, 池谷, 高橋, 西井, 小柳, 青木: 砂防溪流における河床変動が水生生物に及ぼす影響, 平成16年度砂防学会概要集 (投稿中). 2) 芦田, 高橋, 水山: 山地河川の掃流砂量に関する研究, 新砂防, 107号, 昭和53年4月. 3) 藤田, 水山, 武蔵: 砂防ダム群の土砂流出調節効果, 水工学論文集, 第45巻, 2001.2. 4) 大久保, 水山, 蒲, 井戸: 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. 5) 鈴木, 片山, 安田, 尾崎: 重信川における平成11年度豪雨時の土砂移動現象とモデル化について, 平成15年度砂防学会概要集, pp.98-99.