

山地溪流での河床変動を扱う際の実用モデルと試行例

日本工営(株) ○伊藤隆郭, 長山孝彦, 渡部春樹, 水野裕斗, 京都大学名誉教授 水山高久(故人), 藤田正治

1. はじめに: 筆者らは以前より山地溪流における実用的な1次元河床変動モデルを開発・適用してきた¹⁾。また, 計算結果の現場への適用のため, 流砂観測がされている出水に適用し, 観測柵や濁度計の計測値と比較した。その結果, 掃流砂量は比較的良い一致を見たが, 細粒成分は, ある粒径階での土砂濃度の再現がよいものの, 土砂量全体の予測には過大な予測結果が得られ²⁾, 浮遊砂の基準面濃度の改良が必要となった。

ここでは, 掃流砂量式に若干の改良を加え, 高濃度の混合砂の流れに対して容易にすると共に, 同式の既往研究との比較により一般性を示す。また, 浮遊砂の取り扱いには, 巻き上がり・沈降と拡散型モデルを用いるが, 基準面濃度に関する改良を行うことにより, 既往成果との比較により, その一般性を示す。次いで, 施設を複数有する溪流への適用を行いその有用性と課題を示す。

2. 実用的な1次元河床変動モデル: 侵食速度を用いず, 崩壊・土石流は別途計算し, 土砂流～掃流・浮遊砂流が形成される, 勾配が約 10° 以下の領域において, 掃流砂量式や浮遊砂の巻き上がり・沈降モデルを適用する。

1)掃流砂: 既往報告と同様に EMI 式³⁾を用いる。混合砂への適用のために, 移動限界の影響を付加し, 流速係数に上限値(便宜的に, 8.0)を設定した。図-1は幾つかの流砂量式との比較である。図-2は, EMI 式を既往データと比較したものである^{3),4)}。掃流力の幅広い領域で EMI 式は実験データとの一致は良い。両図を詳細に見ると, 無次元掃流力 τ_* が約 0.5 より小さい領域では, 芦田・道上式と EMI 式の実験データが位置する。

2)浮遊砂: 既往検討では, 基準面濃度には芦田・道上式⁵⁾を主体に適用したが, 既往の実験データや予測式⁶⁾に対して, 外挿線を引くことにした。図-3は, 外挿線を下式のように定式化して示したものである。

$$\cdot w_0/u_* \geq 0.01 : C_a = 0.0152 \left(\frac{1}{w_0/u_*} - 1 \right)^{0.8} \quad (1)$$

$$\cdot w_0/u_* < 0.01 : C_a = \alpha C_* , \alpha = 1.0 \quad (2)$$

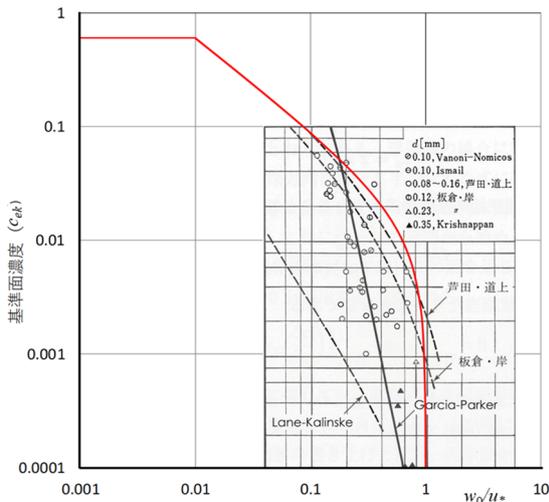


図-3 基準面濃度の外挿線と既往成果との比較

3)河床変動モデル: 下式のように混合砂による時間発展を解くが, 流砂の出入り, 巻き上がり・沈降による河床位の時間変化や粒径の時間変化を解く。

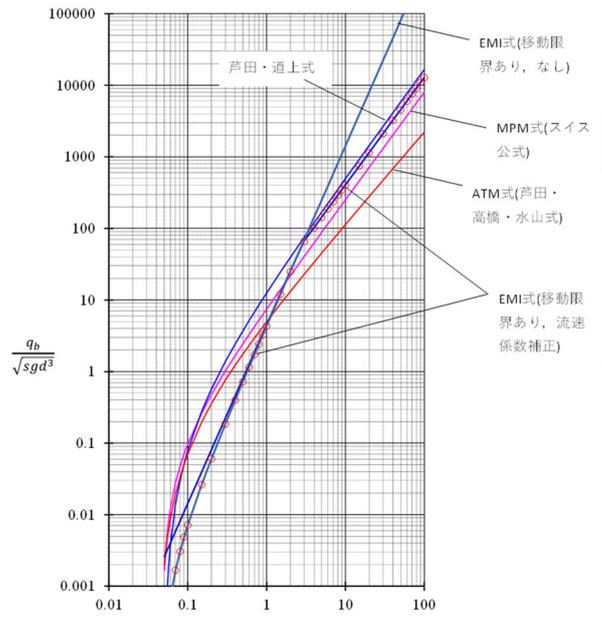


図-1 掃流砂量式の比較

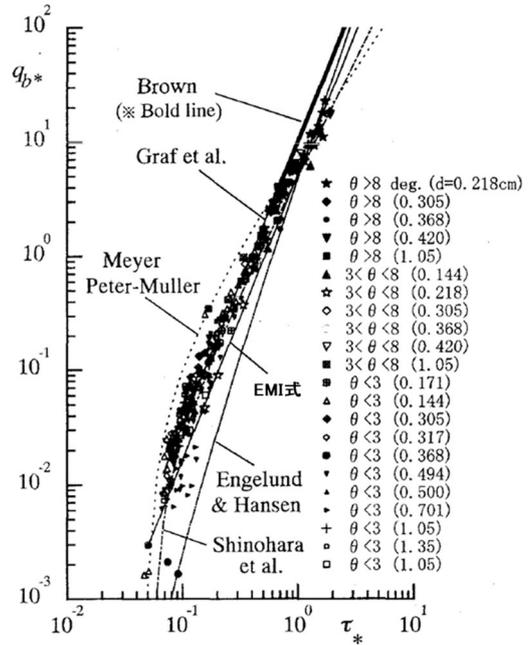


図-2 掃流砂量式と既往データの比較(伊藤ら⁴⁾に加筆)

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{B} \sum_k \left\{ \frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\partial B_b q_{bk}}{\partial x} + \frac{1}{1-\lambda_s} B_s (E_{sk} - D_{sk}) \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (A c_k) + \frac{\partial}{\partial x} (A u c_k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(A E_{sk} \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + B_s (E_{sk} - D_{sk}) = 0, E_{sk} = w_k c_{ek}, D_{sk} = w_k c_{ak} \quad (4)$$

ここに, 添字 k : 粒径階の番号, q_{bk} : 流下方向 x の粒径階 d_k の単位幅の掃流砂量, E_{sk}, D_{sk} : 粒径 d_k の浮遊砂の河床付近における単位面積当たりの浮上量と沈降量, z_b : 河床高, λ_b, λ_s : 掃流砂, 浮遊砂の空隙率, B : 河道幅, B_s : 流砂幅, c_k : 浮遊砂の粒径 d_k の断面平均濃度, u : 断

面ケ平均流速である。

3. 施設の取り扱いと実現場への適用: 対象とする溪流は、図-6に示すように、前報²⁾と同じであって、透過・不透過型堰堤が並び、堤高が41mの不透過型堰堤(「O」)の下流には透過型堰堤(「OZ」, 「S」)が連続して並ぶ。計算で与えたハイドログラフ、粒度分布・粒径階の区分は、図-4, 5および表-1に示す通りである。流量は対象流域の計画規模相当の波形を与え、その後、河床材料の95%粒径の移動限界流量の相当する流量を計画規模の波形の時間の約4倍の時間で定常的に与えた。

堰堤の取り扱いは、①透過幅や不透過堰堤の水通し幅を計算の河道幅として与えるケースと②堰堤の透過幅・水通し幅に対して水位・流量関係を与えるケース⁷⁾の計算を行った。これは堰堤堆砂域で生じる3次元的で、かつ、非静水圧領域の水理現象を1次元計算で便宜的に扱うための比較のための比較試算である。

図-6の中段と下段は、それぞれ、施設を地形幅で模擬したものと施設断面に水位・流量関係を与えたものの河床変動量の縦断分布の時間変化を示している。なお、同図は計画規模相当のハイドログラフを与えている間の計算値である。堤高が14.5mよりも小さい堰堤の上下流や堆砂域での河床変動量には、両者の取り扱いでは大きい違いが見られないが、堤高が14.5mよりも大きい堰堤の堆砂域や上下流と下流域では河床変動量において、両者の違いが明瞭に現れている。図には示していないが、計算終了時(145時間)では、この傾向は更に大きくなる。一方、土砂量についてみる。上流端から与えた流入土砂量は見かけ692,000 m³に対し、計算下流端での流出土砂量は、いずれのケースも見かけ13,000 m³であった。下流端で流出土砂量から見ると、土砂量に違いはないが、流出土砂量の粒径構成が異なり、土砂の質の違いが現れることになる。

今後、1次元計算における堰堤の堆砂域でのモデル化、基準面濃度の最大値、式(2)の α の改良、細粒成分の流体相への遷移の扱い等も進め、更なる改良を進めていく予定である。

4. おわりに: 以前の検討事例を延長して、河道に透過・不透過型砂防堰堤を有する区間の1次元河床変動計算を行った。これは、筆者らが以前より示してきた実用モデルであり、既往研究で適用性が示された掃流砂量式や浮遊砂の巻き上がり・沈降を入れた拡散型モデルである。浮遊砂の基準面濃度は統計的な処理を行ったが、最大値等の設定に課題が残った。また、堰堤断面での水位・流量関係を適用すると、堤高が大きい施設からの土砂流出や連続する透過型堰堤からの土砂流出が解析出来るようである。

参考文献: 1) 渡部ら: 2020年度砂防学会研究発表会概要集(予稿集にて略), pp.207-208, 2020, 2) 濱原ら: 2021年度予稿集, pp.373-374, 2021, 3) 土木学会 編: 水理公式集[平成11年度版], 147, 1999, 4) 伊藤ら: 水工学論文集, 45, pp.649-654, 2001, 5) 芦田ら: 京大防災研年報, 13号B, pp.233-242, 1970, 6) 関根雅人: 移動床流れの水理学, 共立出版, 2005年2月14日, 7) 伊藤ら: 砂防学会誌, 68, 2, pp.23-34, 2015.

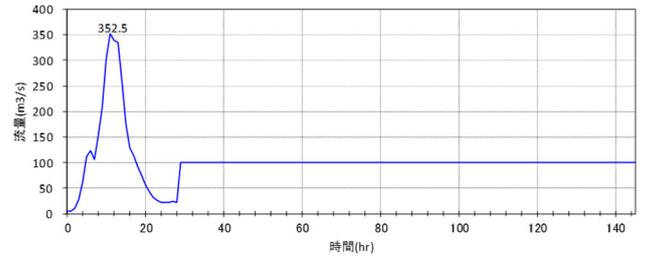


図-4 計算に用いたハイドログラフ

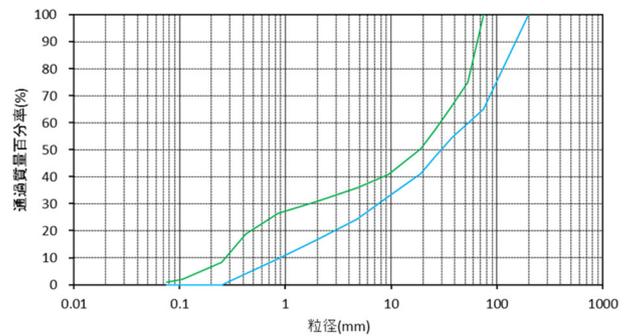


図-5 計算に用いた河床材料と供給土砂の粒度分布

表-1 計算に与えた粒径階

粒径階	粒径範囲 (mm)	代表粒径 (mm)	粒径別割合 (%)		備考
			河床材料	流入土砂	
1	50 ~ 100	70.7	41.0	28.3	本検討では wash load は計算対象としないため、0.2mm以下の割合はゼロとした。
2	20 ~ 50	31.6	16.9	23.6	
3	5 ~ 20	10.0	17.1	16.3	
4	2 ~ 5	3.16	8.3	5.9	
5	0.5 ~ 2	1.00	16.7	25.9	
6	0.2 ~ 0.5	0.316	0.0	0.0	
合計			100.0	100.0	

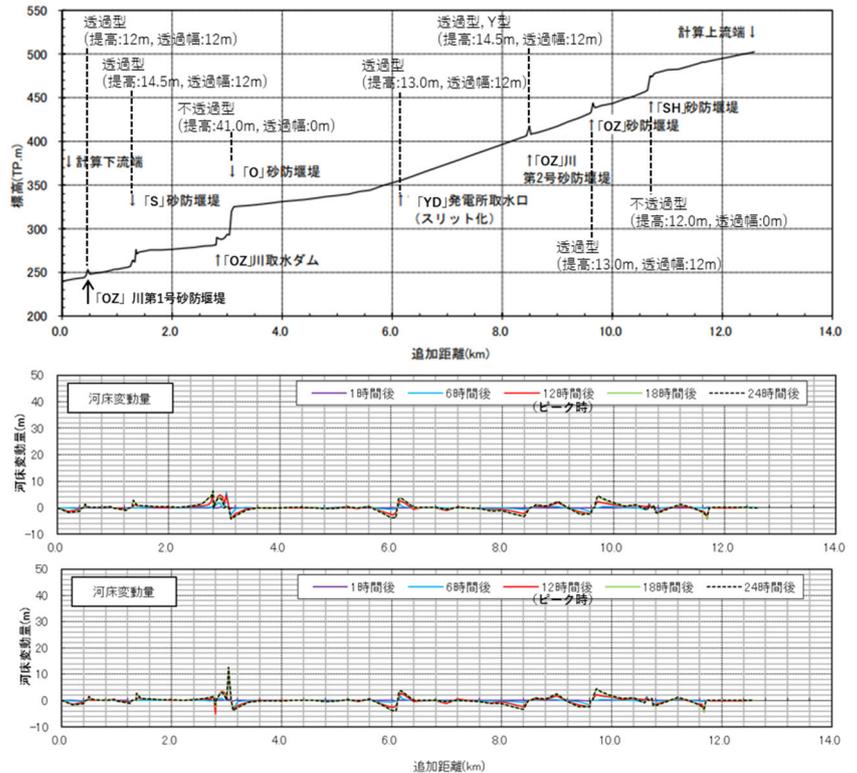


図-6 河床変動量の縦断分布の時間変化(上:施設を地形幅で模擬, 下:施設断面に水位・流量関係を与える)