

黄河中流支川窟野河流域における流出解析と土砂流出評価

九州大学工学部
九州大学大学院工学研究院
九州大学大学院工学府
九州大学大学院工学府

学生員 池本亮二
正 員 橋本晴行
学生員 高岡広樹
正 員 池松伸也

1. はじめに

黄河中流域では、その支川が黄土高原を深く切り刻みながら通過するため、微細土砂を高濃度に含有した洪水が本川に流れ込み、高濃度流れを発生させ、流域内の水利・電源開発などの障害や河床上昇による洪水疎通能力の低下の原因となっている。従って、高濃度洪水による土砂輸送の正確な評価は、それらの問題解決のための基礎情報を提供するものであり、長年の課題となっている。

本研究は、黄河中流支川の窟野河(Kuye River)を選び(図-1)、窟野河流域における水理・水文資料の現地観測結果を用いて、流域の流出特性を調べるとともに、貯留関数法によって流出解析を行う。さらに、流出解析結果を用いて土砂流出の評価を行う。

2. 窟野河流域の流出特性

解析対象河川の窟野河流域の平面図を図-2 に流域特性を表-1 に示す。流域面積から見ると、我が国では、窟野河は淀川(流域面積 $A=8,240\text{km}^2$)に匹敵する。河床勾配は $1/510\sim 1/290$ を示し、比較的急勾配の砂河川である。表-2 に流出係数を示す。流出係数は次式によって求めた。

$$\Sigma Q=10^3\times f\left(\Sigma r\right)A$$
 (1)

$$Q_p=\frac{1}{3.6}f_p\bar{r}A$$
 (2)

ここに ΣQ ；総流量(m^3)、 Q_p ；ピーク流量(m^3/s)、 r ；降雨強度(mm/hr)、 A ；流域面積(km^2)、 Σr ；総降雨量(mm)、 $\bar{r}$ ；ピーク到達時間内の平均降雨強度(mm/hr)、 f ；平均的な流出係数、 f_p ；ピーク時の流出係数である。表から $f=0.17\sim 0.61$ 、 $f_p=0.38\sim 1.57$ であることが分かる。 f は f_p より小さな値をとり、 f_p は 1 より大きな値をとることがある。それはピーク時には土砂を高濃度に含有するためであると考えられる。

3. 流出解析

各雨量観測点における降雨波形を用い、流量観測点での流域平均雨量を求め、これらを用いて貯留関数法により流出解析を行う。解析対象時間は1979年8月7日～14日である。

3.1 基礎式

貯留関数法の基礎式は次式で表される。

$$\frac{ds}{dt}=r-q$$
 (3)

ここに、 t ：時間(hr)、 s ：貯留高(mm)、 r ：雨量強度(mm/hr)、 q ：直接流出高(mm/hr)である。また、 s は q の関数で表され、本解析では二価の非線形モデル²⁾

$$s=k_1q^{p_1}+k_2\frac{dq^{p_2}}{dt}$$
 (4)

を用いる。ここに、 k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 ：モデル定数であり、パラメータ p_1 、 p_2 については $p_1=0.6$ 、 $p_2=0.465$ とされている。

雨量強度 r としてはティーセン法により求めた面積雨量を用いる。図-3 に温家川(図-2 中①)における流域の面積雨量を示す。



図-1 黄河中流域における主な支川

表-1 窟野河の流域特性

流域面積 (km^2)	8706
流路延長 (km)	241.8
平均年間雨量 (mm)	396.2
流域内人口密度 (人/ km^2)	34

表-2 窟野河の流出係数

場所	期間	流出係数 f	ピーク流出係数 f_p
王道恒塔	1979/8/7～9	0.23	0.39
	1979/8/10～12	0.17	0.29
	1979/8/12～14	0.53	1.21
神木	1979/8/7～9	0.22	0.65
	1979/8/10～12	0.23	0.55
	1979/8/12～14	0.46	0.86
温家川	1979/8/7～9	0.26	1.07
	1979/8/10～12	0.36	0.55
	1979/8/12～14	0.61	1.57



図-2 窟野河の流域平面図

32 解析結果

洪水 1 波形毎に流出解析を行い、パラメータ k_1 , k_2 の同定を行った。その結果の 1 例を図-4 に示す。図中には同じ観測点における実測値も示している。実測のピーク時刻は 8 月 8 日 3 時 44 分、ピーク流量は $5180(\text{m}^3/\text{s})$ である。計算値のピーク時刻は 8 月 8 日の 5 時 00 分、ピーク流量は $4370(\text{m}^3/\text{s})$ である。

パラメータ k_1 , k_2 の同定した値を表-3 に示す。 $k_1=1\sim23$, $k_2=3\sim11$ であり、平均的には $k_1=10.5$, $k_2=5.3$ となった。

4. 土砂流出量の評価

流出解析結果を用いて流砂量の評価を行う。まず、流れを等流と仮定することにより、次式から水深を計算する。

$$Q = A \sqrt{\frac{8}{f}} \sqrt{ghI} \quad A = F_a(h) \quad (5)$$

ここに、 Q : 流出流量, f : 摩擦損失係数, g : 重力加速度, h : 水深, I : 河床勾配, A : 流水断面積である。また $F_a(h)$ は h の関数である。

ここで、摩擦損失係数 f が必要である。窟野河において、 f は泥流型土石流について提案されている次式²⁾

$$N_h \leq 15 \quad \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\xi}{K_{zx}}} N_h \quad (6)$$

$$N_h \geq 15 \quad \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\xi}{K_{zx}}} \frac{N_h^2}{N_h} + \left(\frac{u_{*c}}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \right) \left(1 - \frac{N_{\delta}}{N_h} \right) - \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{N_{\delta}}{N_h} \right) \quad (7)$$

が適用可能である³⁾。ここに無次元量 $N_h = (h/d) \sqrt{\rho_t / (\sigma F(C))}$ であり、 C_* を最密

充填濃度 ($C_* = 0.6$) として $F(C) = (C/C_*)^2 / (1 - C/C_*)$ である。

式(5)から水深 h を計算し、流砂量式より流砂量を評価することができる。ここで本研究では広範な流砂形態に適用可能な次式⁴⁾を用いる。

$$Q_s = 4.7 B \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \frac{1}{(\alpha - I_f) \cos \theta} G \left(I_f, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*} \right) \sqrt{sgd^3} \quad (8)$$

$$G \left(I_f, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*} \right) = 1 + 0.1 \left(\ln \left(\frac{h}{d} \right) \right)^2 (I_f)^{-0.8} \exp \left\{ -2.5 \left(\frac{w_0}{u_*} \right)^{0.5} \right\} \quad (9)$$

ここに、 s : 水中比重, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, I_f : エネルギー勾配, w_0 : 粒子の沈降速度である。また、 $\alpha = 0.875$ である。

図-5 は流出土砂量の計算値と実測値との比較である。

計算値と実測値は比較的一致しているのが分かる。そのため流量ハイドログラフが与えられればその結果を用いて流砂量を評価できる。

5. おわりに

本研究では黄河中流支川の窟野河を対象とし、現地観測雨量を用い貯留関数法により流出解析を行った。さらにその流出解析結果から流砂量を計算した。その結果流砂量の計算値は実測値と近い値となり、現地の降雨データから流砂量を評価することが可能であることが分かった。本研究は、一部、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究推進事業「黄河流域の水利用・管理の高持続性化」(代表 楠田哲也 九州大学教授) の補助の下に行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 水理公式集, 1999.
- 2) 橋本晴行・平野宗夫: 泥流の抵抗則に関する研究, 水工学論文集, 第 39 巻, 1995.
- 3) 橋本晴行・高岡広樹・池松伸也・方紅衛・王兆印: 黄河中流支川窟野河の土砂輸送に関する資料解析的研究, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第 3 巻, 2004.
- 4) 橋本晴行・朴埈・池松伸也・田崎信忠: 急勾配移動床水路における種々の流砂形態に対する統合的流砂量式, 水工学論文集, 第 47 巻, 2003.

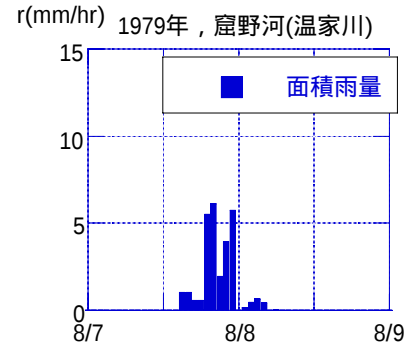


図-3 ティーセン法による面積雨量

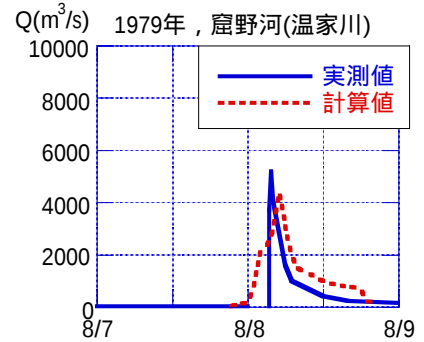


図-4 流量の実測値と計算値との比較

表-3 貯留関数法による係数の値

場所	期間	k_1	k_2
王道恒塔	1979/8/7~1979/8/9	12.5	5.5
	1979/8/10~1979/8/12	23	11
	1979/8/12~1979/8/14	4	4
神木	1979/8/7~1979/8/9	17	6.5
	1979/8/10~1979/8/12	1	4
	1979/8/12~1979/8/14	9	4
温家川	1979/8/7~1979/8/9	15	6
	1979/8/10~1979/8/12	5	3
	1979/8/12~1979/8/14	8	4

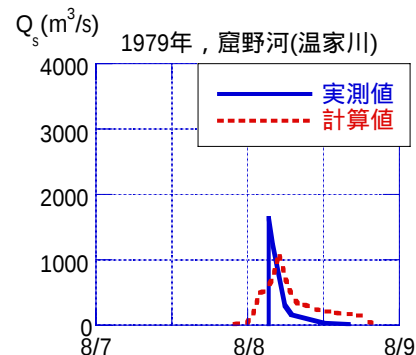


図-5 流砂量の実測値と計算値との比較