

山間盆地における河川と帯水層の相互作用に関する水理実験

名城大学理工学部 正 員 原田 守博

名城大学大学院 学生員 ○ 柘植 裕介

名城大学理工学部 河合 慎五

1. はじめに

河川水は、河床への伏流浸透や地下水の湧水など、周辺の帯水層と相互に作用を及ぼしながら流れている。そうした効果は通常、河川流量に比べ小さいため重要視されていないが、発電や水資源のため流量の多くが取水される河川や、扇状地など透水性の高い地盤上を流下する河川では、地中への伏流が卓越し、ときには河道が枯渇して「水無し川」となることもある。流量の著しい減少は水温変化や水質の悪化をも招き、生態系の維持や河川景観の保全にとって大きな障害となる。したがって、こうした河川の流況を考える上では、河川と地下水の交流関係が重要な要素となってくる。本研究では、河川環境を保全するための最小流量を評価する基礎的研究として、山間の盆地地形を例にとり、河川と帯水層の相互作用とそれに伴う河道流況の変化を理論解析し、水理実験によって検証した。

2. 理論解析

(1) 対象とする現象：図-1のように直線河道に堆積層が結合した状況を想定する。上流から河道を流下する流量は、堆積層に隣接する区間で伏流浸透のため減少するが、区間の後半では堆積層からの湧出によって元の流量に回復する。この河川と堆積層の間の交流により河道の水面形がどのように変化するかを解析する。図のモデルは山間盆地を想定したものであるが、堆積層の幅 W や長さ L を変化させることにより、扇状地を流下する河川や溪谷の狭窄部下流を流れる河川など、さまざまな状況に対応できる。

(2) 基礎方程式：河道流量 $Q(x)$ は、上流端からの河道流入量を Q_0 、地点 x までの堆積層への伏流総量 $q^*(x)$ とすると、連続式(1)が成り立つ。伏流を伴う場合の河道の水面形方程式は、Chezy 則を用いると、式(2)となる。ここに $h(x)$ ：河道水深、 I ：水路勾配である。勾配 I で傾斜した堆積層中の伏流水位 $\phi(x,y)$ は、透水係数を k 、伏流水の平均水深を H_0 とすると、Dupuit の仮定により式(3)に従う。ここに $\alpha = I/H_0$ である。伏流水の境界条件は図-1より周囲の3辺は不透水条件であるが、河道に接する辺では河川との相互作用の結果として決まるため不定である。しかし、河道水深の変化が小さい場合、河道水位を一定と仮定すれば、 $\phi(x,y)$ の分布を近似的に求めることができ、河道単位長さ当りの伏流強度 $q^*(x)$ は式(4)(5)の解析解で表わされる。すると、伏流総量 $Q^*(x)$ は式(6)で与えられるので、式(1)に代入して $Q(x)$ を得ることができる。 $Q(x)$ と $q^*(x)$ を用いて、非線形微分方程式(2)を数値計算することにより、河道の水面形状を求めることができる。

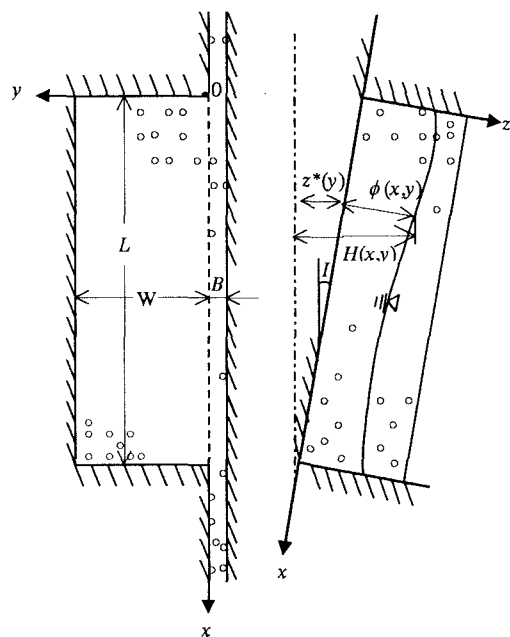


図-1 対象現象

$$Q(x) = Q_0 - Q^*(x) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I - \frac{Q(x)^2}{C^2 h^3 B^2} - \frac{q^*(x)Q(x)}{gh^2 B^2}}{1 - \frac{Q(x)^2}{gh^3 B^2}} \quad \dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \alpha \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q^*(x) = \frac{-2kH_0 I \cos I}{W} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{e^{p_1 L} - e^{p_2 L}} \cdot \left\{ \frac{e^{p_1 x}}{p_1} (e^{p_2 L} - 1) - \frac{e^{p_2 x}}{p_2} (e^{p_1 L} - 1) \right\} \quad \dots (4)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} \left\{ \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4 \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2W} \right\}^2} \right\} \quad \dots (5)$$

$$p_2 = \frac{1}{2} \left\{ \alpha - \sqrt{\alpha^2 + 4 \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2W} \right\}^2} \right\}$$

$$Q^*(x) = \int_0^x q^*(x) dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

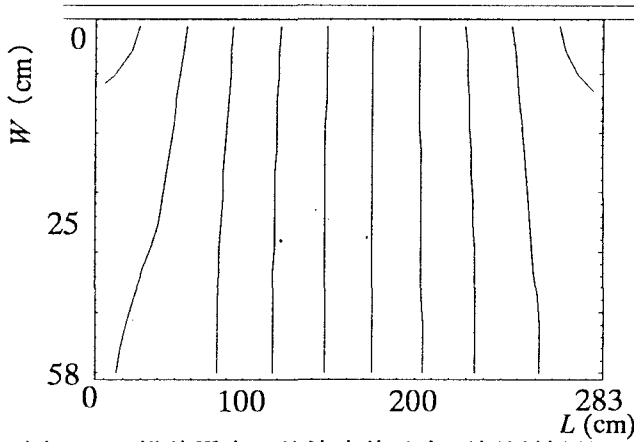


図-2 堆積層中の伏流水位分布（解析結果）

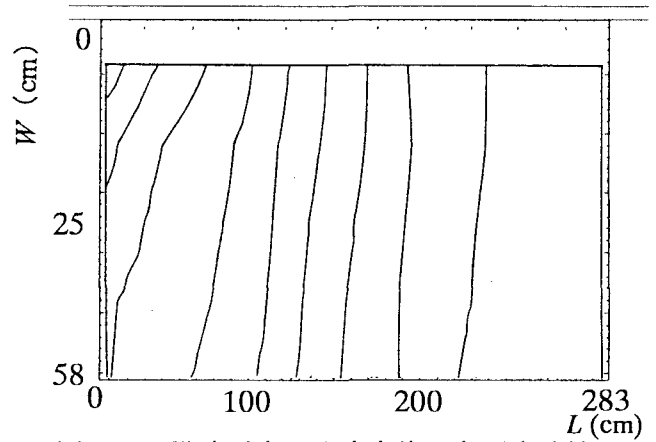


図-3 堆積層中の伏流水位分布（実験結果）

3. 水理実験

解析結果の妥当性を検証するために、開水路（河道）と堆積層から成る実験水路を製作した。河道部（長さ 560cm, $B=2$ cm）の河床および堆積層（ $L=283$ cm, $W=58$ cm）にはガラスビーズ（粒径 3 mm, 透水係数 $k \approx 6 \times 10^9$ cm/sec）を充填し、河道と堆積層を金属ネットで区分した。実験では水路勾配 I を 1/50, 1/100, 1/200 の 3 通りとし、河道上流端の供給流量 Q_0 を 4 通りに変化させて、堆積層中の伏流水位 ϕ の分布、河道上の水面形や伏没点の位置を詳細に測定した。河道部の流水抵抗は Chezy 係数 $C \approx 350$ cm^{1/2}/sec であった。

4. 解析結果と実験値の比較

(1) 堆積層中の伏流水位分布: $Q_0 = 59$ cm³/sec, $I = 1/50$ における堆積層中の伏流水位の解析結果を図-2に示す。これによると、伏流水の流れは上流部（左側）で河道から堆積層内へ向かい、中央部では河道と平行に近づき、やがて下流部（右側）で河道へ流出する様子が認められる。この水位分布が左右でわずかに非対称となっているのは、堆積層全体が下流に傾斜しているためである。図-2と同様な分布が実験結果（図-3）にも現れているが、下流部において両者は一致していない。この原因として、今回の解析が平均水深 H_0 (= 6cm) によって線形化した支配方程式(3)を、河道水位一定の条件で解いていることが考えられる。

(2) 河道の水面形: $Q_0 = 61$ cm³/sec, $I = 1/50$ における河道水面形の解析結果を図-4に示す。これによると、水路上半部では河道から堆積層への伏流によって流量が減少するため、河道水深も低下するが、水路下半部では堆積層からの湧出によって流量が回復し、水深は上昇している。この解析結果は、実験結果（図-5）の変化傾向とよく附合している。しかし両者を詳細に比較すると、とくに後半部で大きな差が認められる。これは、伏流強度の解析に上述した問題点があるためと考えられる。なお、水路勾配や供給流量によって河道の流れが全て伏流する「伏没点」が生じることがあり、詳しい考察を行なっているが、今回は割愛する。

5. おわりに

実験と解析の間で定性的な合致が認められたが、本論における伏流解析は種々の仮定に基づく近似解であるので、今後、工学的な活用も視野に入れて、解析の精度を上げるよう検討を進めていく予定である。

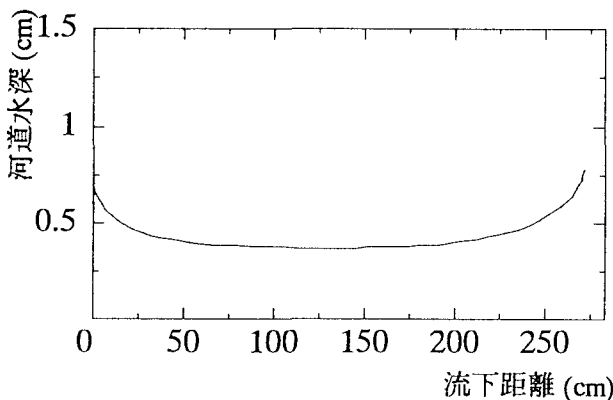


図-4 河道の水面形（解析結果）

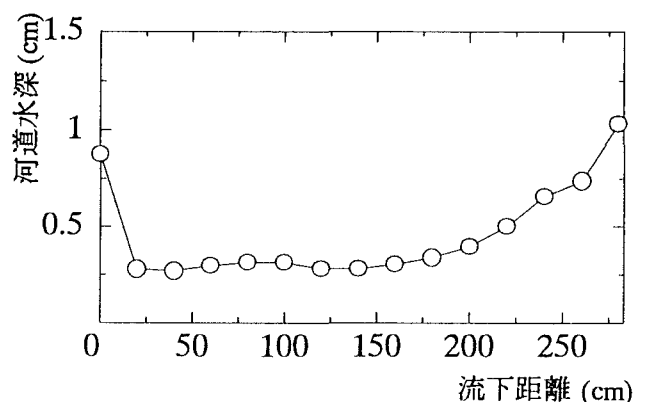


図-5 河道の水面形（実験結果）