

ダム下流部における浸透性河床への伏流過程

名城大学理工学部 正会員 原田 守 博

1. はじめに

わが国の多くの河川では、ダム貯水池の建設によって自然河道に流水の乏しい流域が増加している。枯渇化した河川は、生態学的のみならず景観的にも種々の問題を生むと同時に、流域住民にとっても劣悪な河川環境となっている。近年この問題を緩和するために、貯水池から環境維持流量として一定量の放流が行われ、一部で成果を挙げている。しかし一方で、放流量の大半が河床に伏流浸透し、期待された流況の改善が見られない場合も考えられる。これは、とくに土砂生産が盛んで厚い浸透性河床の形成された流域で顕著となる。こうした流域において、放流によって、河川流況を自然環境として望ましい形に再生しようとするならば、河川水の河床への伏流過程を定量的に明らかにしておくことが不可欠であろう。そして、環境維持流量の具体的な値は、そうした伏流現象をも考慮したうえで評価されるべきであると考えられる。本研究は、河川環境保全のための基礎研究として、貯水池からの放流量が河床へ飽和浸透する場合について検討したものである。

2. 問題の設定

浸透性河床をもつ河川の伏流過程の解析は、古くから Muskat¹⁾ や Polubarinova-Kochina, Bouwer, 宇野などをはじめとする多数の研究者が取り組んできているが、それらの多くは河川の横断断面における伏流水面形や浸透流量を鉛直二次元問題として扱ったものがほとんどである。ここでは少し見方を変えて、図-1のように、ダムから下流にまっすぐに延びた河川を平面的に捉え、河川水が河道から有限の幅をもった堆積河床に飽和浸透してゆく状況を考える。このとき、流下方向に河川形態が変わらなければ、伏流は永続的に続き、やがては河道から流水がなくなる状態、すなわち砂漠などの乾燥地域で見られる失水河川(losing stream)と同様の状態が生ずる。本研究では、そうした現象をも念頭において、ダムからの維持放流量 Q が与えられたときの伏流浸透流の平面ポテンシャル分布 $\phi(x, y)$ ならびに河道から河水が消失するまでの河道長 L を、堆積河床の透水係数 K と河床の層厚 b および河床幅 W を媒介として議論することとする。

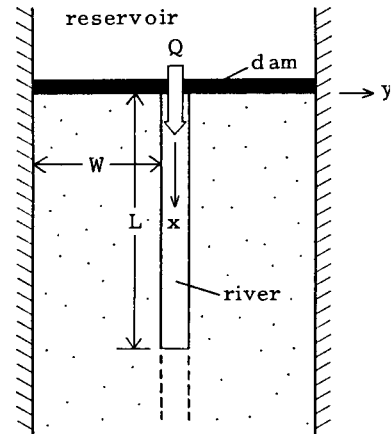


図-1 対象とする河川形態

3. 伏流に伴う堆積河床中の定常ポテンシャル分布

現象を平面での定常浸透と考えれば、支配方程式は x, y 座標でのラプラス式となる。河道の幅に比べ河床幅が十分広い場合を考えれば、河道は 広い領域に水を供給する線源(line source)と見なすことができる。有限線源から水平無限領域への浸透流のポテンシャル分布は、次のように解析的に与えられる¹⁾。

$$\phi(x, y) = \cosh^{-1} H_0, \quad H_0 = \left[\frac{1}{2L^2} \{ x^2 + y^2 + L^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 + L^2)^2 - 4x^2 L^2} \} \right]^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 ϕ : 河床中の浸透流のポテンシャル, x, y : 水平2次元座標, L : 水の存在する河道の長さである。図-1の状況では、浸透の場である河床は幅 W をもった有限領域であり、上式はそのまま適用できないが、鏡像法を用いれば図中の不透水壁を表現することができる。すなわち河道から河床幅 W の2倍の位置に仮想河川を設定し、2本の河川からの浸透に伴うポテンシャル分布を重ね合わせることで、次式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \phi(x, y) &= \cosh^{-1} H_1 + \cosh^{-1} H_2 \\ H_1 &= \left[\frac{1}{2L^2} \{ x^2 + y^2 + L^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 + L^2)^2 - 4x^2 L^2} \} \right]^{1/2} \\ H_2 &= \left[\frac{1}{2L^2} \{ x^2 + (y-2W)^2 + L^2 + \sqrt{(x^2 + (y-2W)^2 + L^2)^2 - 4x^2 L^2} \} \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)によって得られる右岸側のポテンシャル分布を、河道長が $L=0.5W, 2W$ の二つの場合について示したものが図-2である。図からわかるように、解(2)は河道上での等ポテンシャル条件を満たしていない。これは、 x 方向にも変化している ϕ を y 方向の鏡像によって重ね合わせたためである。また、左右の図を比較すると、河道が河床幅に対し短い場合には等ポテンシャル線は楕円形に近い形となるが、河道が長い場合には側壁の効果が顕著となって河川に沿う方向に浸透流が生ずることがわかる。図-3は、ラプラス方程式をFEMにより数値解析した結果である。境界条件は河道上で ϕ =一定、領域の下端で解析解に等しい ϕ 値を与えている。解析解と数値解を比較すると、河道上でのポテンシャル値の差異を除けば、両者のポテンシャル分布は類似しており、式(2)のようなシンプルな解によって伏流形態の概略を知ることが可能といえる。

4. 流水の存在する河道長と放流流量

図-3の右側に示した棒グラフは、河道から河床への伏流強度の分布である。これによると、左図(a)では短い区間を大きな強度で浸透しているが、右図(b)では長い区間の上流部で浸透が弱く、河道の先端付近で強く浸透している。これら伏流強度の河道に沿った総和 Q を求めると、(a)(b)共に $4[m^2/s]$ 余りであるすなわち、今回の場合、河道長 L が大きく異なるにも拘らず、伏流総量 Q にはほとんど差異が認められない。

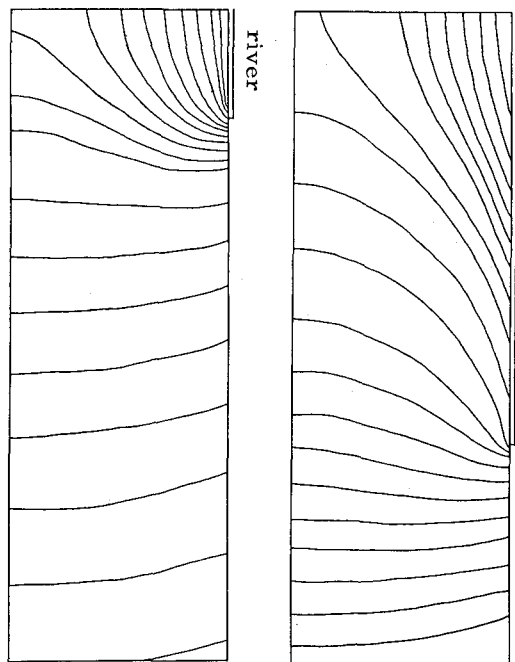
一般に河床幅が非常に広く、 ϕ の分布が式(1)で表されるような場合には、 Q と L との関係は解析的に、

$$L/(a+\sqrt{a^2+L^2})=\exp\{-\pi K b \Delta\phi/Q\} \quad (3)$$

と与えられる。ここに、 K, b :河床の透水係数と層厚、 $\Delta\phi$:短軸長が a の外部楕円(等ポテンシャル線)と線源との間の水頭差である。とくに、 $L \ll a$ であれば、 $L \simeq 2a \cdot \exp\{-\pi K b \Delta\phi/Q\}$ となり、 Q の増大に対して L が長くなる傾向が示される。しかし、 Q の値によっては、 Q の僅かな変化に対して L が非常に大きく変動する領域が存在する。図-3の場合はそうした領域内に相当していることが考えられる。

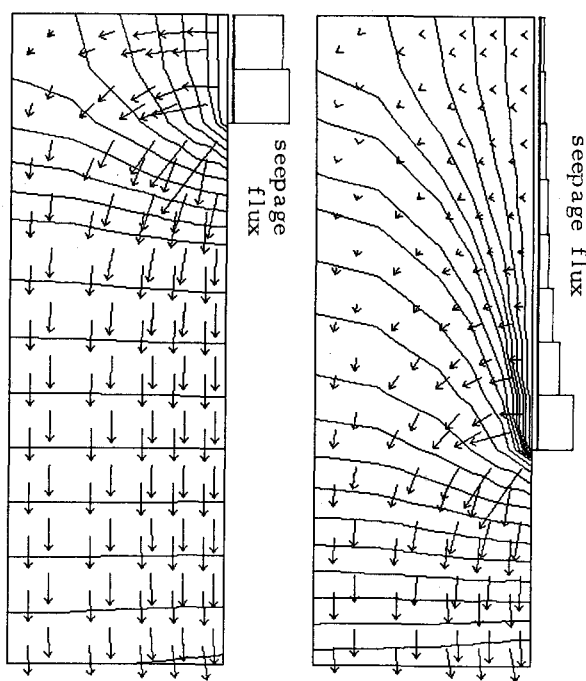
5. おわりに

河床幅が有限な場合の伏流形態について、鏡像法を用いた解析解と数値解とを比較した。今後、放流流量すなわち伏流総量と河道長の関係について詳細に検討し、実際問題への適用に向けて考えを進めてゆきたい。



(a) $L/W=0.5$ (b) $L/W=2.0$

図-2 解析解によるポテンシャル分布



(a) $L/W=0.5$ (b) $L/W=2.0$

図-3 有限要素解析によるポテンシャルと流速の分布

参考文献 1) Muskat, M.: The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, McGraw-Hill, 1937.