

河床堆積層を通じた河川水の伏流強度に関する新たな評価式の提案

名城大学工学部 正会員 原田 守博
 名城大学大学院 学生会員 ○鈴木 裕幸
 名城大学工学部 谷口 将一

1. はじめに

沖積平野における地下水解析では、伏流や湧出など河川と地下水の水交換を考慮する必要がある。河道近傍の地下水位が河川水位よりも低い場合には、河川から帯水層へ河床堆積層を通じて伏流が発生する。このとき地下水位が河床よりも高い場合、伏流水は飽和浸透流となり、河道の単位長さ当りの流量である伏流強度について、実用的な評価式がすでに確立している¹⁾。しかしながら、地下水位が河床よりも低い場合には、河床からの伏流が不飽和浸透流となって現象は複雑なものとなる。こうした状況は、例えば扇状地の上流域において観測され²⁾、河川水と地下水位の間に乖離が生じている。このときの伏流強度について、現在までに一応の評価式は提案されている¹⁾ものの、その物理的意味は明確とはいえない。そこで本研究では、河床下の不飽和浸透流について数値シミュレーションを行い、地下水位が河床より低い場合の伏流現象の実態を明らかにするとともに、伏流強度のより汎用的な評価式を提案し、その有効性を検証した。

2. 伏流強度の評価式

従来の伏流強度 q^* の評価式は MODFLOW や PLASM 等、多くの主要な地下水シミュレーションモデルで使用されている。地下水位 ϕ が河床高 z よりも高い場合 ($\phi > z$)、 q^* はダルシー則によって河床堆積層の上端と下端のピエゾ水頭の差に比例することから、評価式(1)のように求められる。一方、 ϕ が z より低い場合 ($\phi < z$) は、図-1に示すように、河床下に不飽和な土壤層が発生する。このときの q^* の評価式として上記のモデルでは式(2)が用いられてきた。しかし、式(2)は $\phi = z$ となる状況を想定したに過ぎず、不飽和層が存在する $\phi < z$ の場合に対応していないと思われる。そこで、河床下における不飽和浸透過程を解析することによって、評価式(2)の有効性について検証を試みる。

3. 不飽和浸透流の数値シミュレーション

一般に多孔質媒体中の浸透流は、含水率の増加に伴い不飽和状態から飽和状態に移行する。したがって、浸透流の解析には、双方の状態にわたって適用可能な基礎方程式を用いることが望ましい。そこで本研究では、不飽和浸透流の数値シミュレーションとして、Richards の方程式(3)を飽和域にまで拡張して解くこととする。式(3)を解くに当たり、毛管ポテンシャル ψ ・含水率 θ ・不飽和透水係数 k^{uns} の三者の関係式として、Brooks and Corey の式(4)(5)を使用した。

今回のシミュレーションでは、図-2に示すような鉛直2次元の領域を対象として、定常状態の不飽和浸透現象を取り扱う。解析領域は、河床から深さ 5m の地下水面まで、河道の中心から横方向に 50m までとし、河床堆積層の厚さは 0.5m とした。境界条件として、河川と地下水が存在する部分には水位指定境

$$q^* = \frac{k_1}{d}(hr + z - \phi) \cdot B, \quad \phi > z \quad (1)$$

$$q^* = \frac{k_1}{d}hr \cdot B, \quad \phi \leq z \quad (2)$$

従来の伏流強度評価式

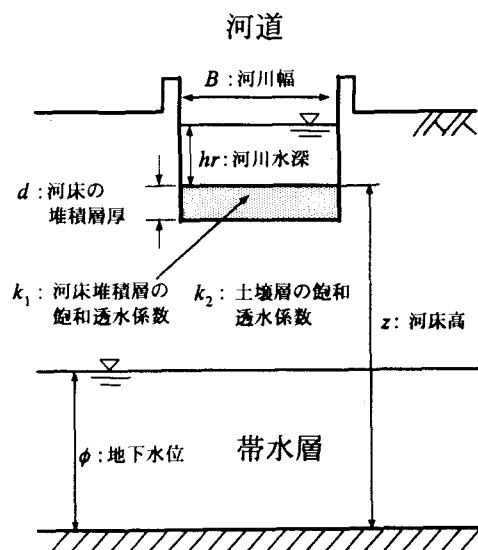


図-1 河川の横断面

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \{ k(\psi) (\nabla \psi + \nabla z) \} \quad (3)$$

$$k^{uns} = k^{sat} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta, \quad \psi, \psi_b < 0 \quad (4)$$

$$\theta = \theta_e \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad (5)$$

不飽和浸透解析の基礎方程式

界, その他の部分については不透水境界を用いた。表-1は解析において想定する3種類の土壌の水理パラメータを示している。土壌パラメータとは, Brooks and Corey の式で用いる飽和透水係数 k^{sat} , 有効含水率 θ_e , 限界毛管ポテンシャル ψ_b のことである。表-2は各層に想定する土壌の種別を表わしている。なお, 河川水深は $hr = 10, 30, 50\text{cm}$ の3種類とした。

4. 従来の伏流強度評価式の有効性

種々の河川水深において, 上述の不飽和浸透解析により土壌中の水分フラックスを求め, 地下水面に沿って積分して得た伏流強度を図-3に解析値として示す。図の縦軸は, 伏流強度 q^* が河床堆積層の透水係数 k_1 や河川幅 B の影響を強く受けるため, q^* を $k_1 B$ で除したものを, 横軸は河川水深 hr と河床堆積層厚 d の比とした。解析値はケース1, 2ともに河川水深に比例していることが分かる。前述の伏流強度の評価式(2)の有効性を検証するために, 図中に描いて比較したところ, 直線の傾きは解析値と一致しているが, 両者には大きな開きが見られ, 評価式(2)は不適切であることが明らかである。

5. 新たな伏流強度の評価式の提案

従来の評価式(2)が適切でないのは, 土壌中の不飽和浸透流を考慮していないためと考えられる。そこで, 河床堆積層の下面の水圧として毛管ポテンシャル ψ を考え, 堆積層の下面でダルシー則を適用すると式(6)が導かれる。前述のシミュレーション結果から, 土壌中の含水率は鉛直方向に一定であることから, 不飽和浸透流の動水勾配は1に等しいと考えられ, 式(7)が成立する。Brooks and Corey の関係式(4)に式(7)を代入すると, 式(8)が得られる。これを式(6)に代入することにより, 伏流強度 q^* の満足すべき方程式(9)が導かれる。この式は河床堆積層と土壌層の水理特性を含んでおり, 不飽和浸透による伏流強度に関する新たな評価式と呼ぶことができる。

式(9)の妥当性について確認するため, 図-3において解析値と比較した。図から分かるように, 評価式(9)は解析値をよく再現しており, 新しい評価式は有用であるといえる。

6. おわりに

河川から帯水層への伏流強度を推定するに当たり, 地下水位が河床高よりも低い場合, 従来の評価式は有効でないことを明らかにするとともに, 不飽和浸透流を組み込んだ新たな評価式を提案した。今後は, 提案した評価式を基礎として, 伏流強度を簡易に評価するための手法を検討することに加え, 提案式の適用限界についても明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 藤縄克之(編): 地下水モデル, 共立出版, pp.74-79, 1994
- 2) 国土交通省富山工事事務所: 庄川扇状地水環境検討委員会, 第5回資料-1, pp.2-55~2-58, 2003

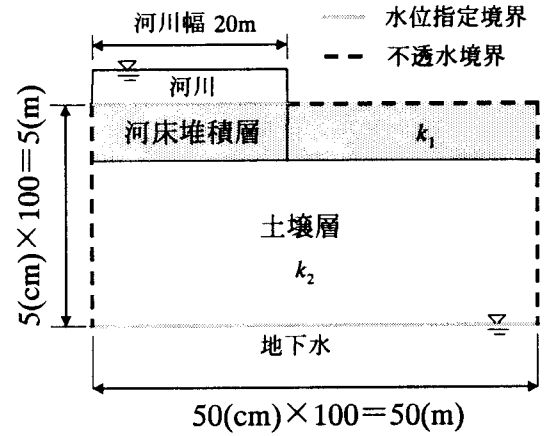


図-2 解析領域と境界条件

表-1 各土壌の水理パラメータ

	k^{sat} (cm/s)	θ_e	ψ_b (cm)
土壌①	0.01	0.4	50
土壌②	0.001	0.3	90
土壌③	0.0001	0.2	140

表-2 想定土壌の設定ケース

	河床堆積層	土壌層
ケース1	土壌②	土壌①
ケース2	土壌③	土壌①

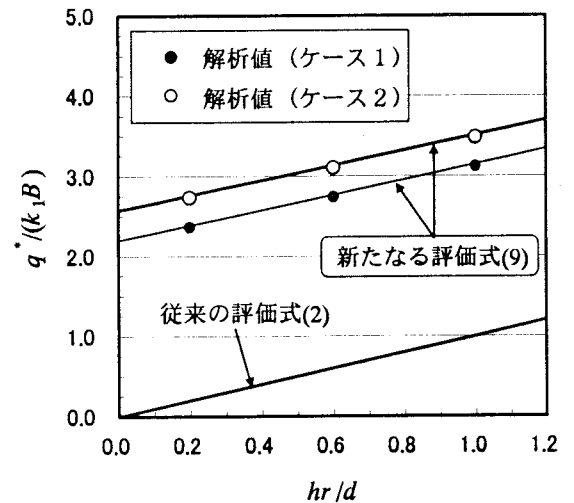


図-3 河川水深に対する伏流強度の変化

$$q^* = \frac{k_1}{d} (hr - \psi) \cdot B + k_1 B, \quad \psi < 0 \quad (6)$$

$$k_2^{uns} = \frac{q^*}{B} \quad (7)$$

$$\psi = \psi_b \left(\frac{k_2^{uns}}{k_2} \right)^{-(1/\eta)} = \psi_b \left(\frac{q^*}{k_2 B} \right)^{-(1/\eta)} \quad (8)$$

$$\frac{\psi_b}{d} \left(\frac{q^*}{k_2 B} \right)^{-1/\eta} - \frac{q^*}{k_1 B} + \frac{hr}{d} + 1 = 0 \quad (9)$$

新たな評価式の導出過程