

河床堆積層を通じた河川水の伏流浸透量に関する新たな評価式の提案

名城大学理工学部 学生会員 ○ 光永直也

名城大学理工学部 正 会 員 原田守博

1. はじめに

一般に、透水性の河床をもつ河川では、河川水は河床の堆積層へ浸透することにより河川流量が減少する。特に伏流が卓越する際には流水が途切れる「瀬切れ」が発生することもあり、水辺景観だけでなく、水質悪化や生態系の破壊等の悪影響が発生する。そこで近年では、河川の環境維持のための流量確保が課題となっている。河川の環境維持流量を設定するためには、伏流浸透量を評価することが重要であるが、詳細な数値シミュレーションを逐一実施することは煩雑であり、伏流浸透量の簡易な評価式を定めることが求められる。本研究では、伏流浸透量に係わる従来の研究を総括しつつ、より汎用的な伏流浸透量評価式を検討した。

2. 従来の伏流浸透量の評価式とその問題点

本研究で対象とする浸透性河床をもつ河川の模式図を図-1に示す。河床には透水性のやや低い河床堆積層が存在し、その下に透水性の高い不飽和層が広がっているものとする。

河川からの伏流現象は、河川水位と河床下の地下水位との位置関係によって様々なケースが想定される。地下水位が河床高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伏流浸透量について、式(1)のような評価式¹⁾が確立しており、河川管理や広域地下水解析などの実用に供されている。

一方、地下水位が河床高よりも低い場合には伏流が不飽和浸透となって現象は複雑なものとなる。著者らは過去に、地下水面が十分に深い場合について、しばしば使われる評価式(2)には問題があることを指摘し、新たな評価式として式(3)を提案している²⁾。なお、式(3)は不飽和層の透水係数として、Brooks and Corey の関係式(4)を基礎としている。しかしながら、地下水位が浅く(河床堆積層に近く)、地下水面上の不飽和水分分布が浸透現象に影響する場合については十分に検討されていない。

3. 河床下の地下水位が高い場合の伏流浸透量の評価式

ダム下流部における伏流現象の現地調査³⁾により、地下水面が浅い場合に伏流浸透量が增大することが報告され、その理由として、「地下水位が高くなると不飽和層の飽和度が高くなり、不飽和透水係数が増大することによって伏流量が増加する」との考察が示された。一般に、地下水位が浅い場合には河川水位とのピエゾ水頭差が小さくなることから、伏流量が減少する可能性もあり、上記の考察には疑問が残る。本研究では、伏流浸透の水理機構に基づき、地下水面が浅い場合も含めた汎用的な伏流量推定式を導出し、飽和・不飽和浸透解析により有効性を検証した。

図-1において河床堆積層と不飽和層それぞれにダルシー則を適用すると、式(5)、式(6)が得られる。式(6)中の k_2^{uns} は、層厚 l の不飽和層において地下水面上で大きく変化する透水係数 k_2^{uns} の平均値である。河床堆積層と不飽和層の境界面における圧力水頭 ψ_b が共通であることを利用し、式変形を行うと式(7)が導かれる。

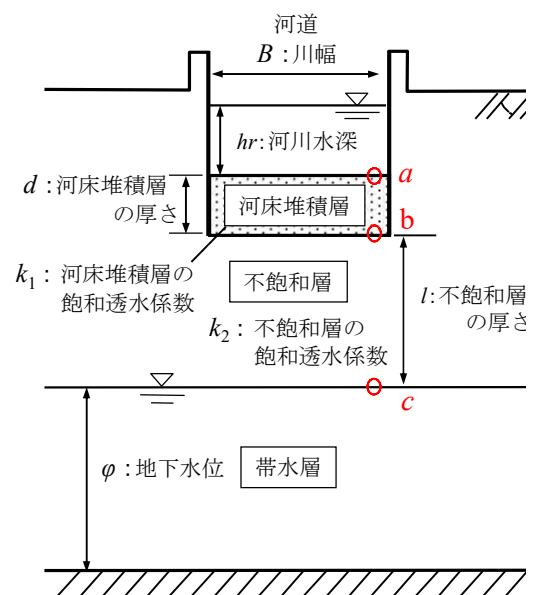


図-1 河川および河床下の横断面

従来の伏流強度評価式

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

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

$$\frac{q^*}{k_1 B} + \frac{\psi_0}{d} \left(\frac{q^*}{k_2 B} \right)^{-1/\eta} - \frac{hr}{d} - 1 = 0 \quad (3)$$

$$k_2^{uns} = k_2 \left(\frac{\psi_0}{\psi} \right)^\eta, \quad \eta = 2 + 3\lambda \quad (4)$$

伏流浸透量の新たな評価式の導出過程

$$q^* = k_1 B \left(\frac{hr - \psi_b}{d} + 1 \right) \quad (5)$$

$$q^* = \overline{k_2^{uns}} B \left(\frac{\psi_b}{l} + 1 \right) \quad (6)$$

$$q^* = (hr + d + l) \left(\frac{d}{k_1 B} + \frac{l}{\overline{k_2^{uns}} B} \right) \quad (7)$$

$$|\psi|^{-\eta} dz = \frac{q^*}{k_2 B |\psi_0|^\eta} dz - |\psi|^{-\eta} d\psi \quad (8)$$

$$\overline{k_2^{uns}} = \frac{1}{l} \left\{ k_2 \cdot |\psi_0| + \int_{|\psi_0|}^l k_2^{uns} dz \right\} = \frac{1}{l} \left[k_2 \cdot |\psi_0| + \frac{q^* (l - |\psi_0|)}{B} - \frac{k_2 \cdot |\psi_0|^\eta}{1 - \eta} \left\{ hr - d \left(\frac{q^*}{k_1 B} - 1 \right) \right\}^{1-\eta} - |\psi_0|^{1-\eta} \right] \quad (9)$$

不飽和土壌中のダルシー則に前述の透水係数に関する Brooks and Corey の式(4)を代入して変形すると、式(8)が得られる。不飽和層中の透水係数の平均値 $\overline{k_2^{uns}}$ は式(9)の積分に式(8)を用いることによって表される。結果として、式(7)と式(9)を連立して解くことにより、伏流浸透量 q^* が求められる。

4. 導出した評価式の有効性の検証および考察

上記で導出した伏流量推定式の妥当性を検討するため、Richards 方程式を基礎式とした数値シミュレーションによる値と比較する。今回は文献⁹⁾にて使用された手法で、解析領域を図-2のように設定し、飽和・不飽和浸透解析を行った。

図-3は、今回の提案式(7)(9)より求まる伏流浸透量 q^* の評価式と数値解析の結果を比較したものである。図中には従来の提案式(3)も破線で示してある。図の横軸は不飽和層の厚さ l であり、左へ行くほど地下水面が浅くなることを意味する。この図より、今回の提案式は数値解析の結果とよく附合し、従来式(3)で表現できなかった地下水位の浅い場合も含めて伏流浸透現象をよく再現しているといえる。しかし、詳細に見れば、 $l > 70\text{cm}$ の地下水面が深い場合には若干のズレが生じている。この差異については、さらに検討が必要である。

なお、前述した調査報告のような、地下水面が浅くなるにつれて q^* が増大する傾向は認められず、むしろ減少することが示された。言うまでもなく、地下水面が浅くなるにつれて不飽和透水係数は増大するが、透水係数の増大以上に圧力水頭が変化し動水勾配が減少しているものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、河床からの伏流浸透量について、地下水位が浅い場合も含めた広い範囲に適用できる推定式を作成し、有効性を検証した。今後は、地下水面が深い場合に見られる誤差の原因を解明するとともに、今回とは異なる河床の土層構成への適用性について検討し、実用性を高める予定である。

参考文献

- 1) 原田・谷口・鈴木：水工学論文集，第51巻，pp.457-462，2007.
- 2) 杉本・古瀬・馬島：大町ダムの瀬切れ対応の検討について，平成26年度北陸地整 事業研究発表会，平成26年7月

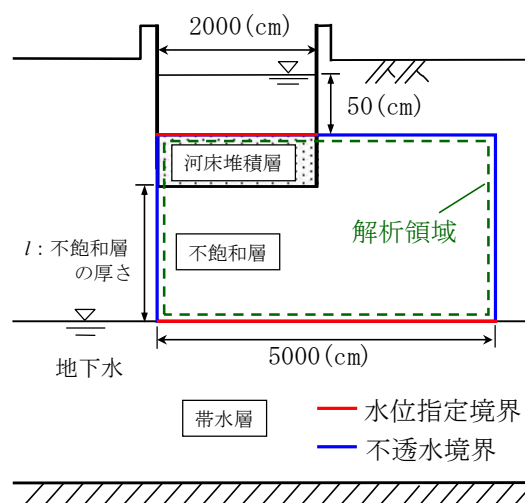


図-2 解析領域および境界条件

表-1 設定したパラメータ

河川水深 hr (cm)	50	川幅 B (cm)	2000
河床堆積層厚 d (cm)	50		
	透水係数 k (cm/s)	限界吸引圧 ψ_0 (cm)	定数 λ
河床堆積層	0.001	-100	2.5
不飽和層	0.01	-50	3

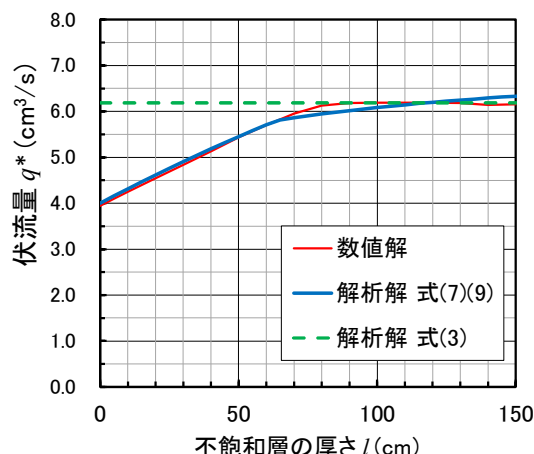


図-3 推定式の有効性の検証