

河川水の伏没現象に関する水理学的検討

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

1. はじめに

河川の流れは、河床への浸入や地下水湧出など周辺の帯水層と水の交換をしつつ流れている。その交換量は通常、河川流量に比べ小さいが、堰によって流量の多くが取水される場合や、透水性の高い地盤上を流下する河川では、流量は著しく減少し、ときには河道が枯渇して「水無し川」となることもある。こうした河道の枯渇は河川の生態系や景観にとって障害となるため、河川環境を保全するには伏没現象を含む河川の流況変化過程を明らかにする必要がある。本研究は、盆地状の地形を例にとり、河川と帯水層の相互作用に伴う河道流況の変化について水理実験を行なうとともに、理論解析との比較検討を試みた。

2. 水理実験

(1) 対象とする現象：筆者らは、河床への伏流により河道の流量が減少する過程について検討を進めてきたが¹⁾、今回はとくに河道の流れが完全に伏没する現象を取り扱う。対象とする現象は、図-1のような狭窄部に挟まれた盆地地形であり、直線河道に帯水層が結合した状況を想定する。この場合、河道流量は帯水層への浸入のため減少し、伏流量が河道流量に等しくなった地点で伏没現象が起こる。この地点を「伏没点」と呼ぶ。その後、河道の流量は帯水層からの湧出により回復する。

(2) 実験装置：伏没現象の基本的特性を解明するために水理実験を行なった。実験水路は河道と帯水層から構成され、河道部 ($B=2\text{cm}$) の河床および帯水層 ($L=283\text{cm}$, $W=60\text{cm}$) にはガラスビーズ (透水係数 $k=3.8\times 10^{-2}\text{ m/s}$) を各々5cmと9cmに充填した。実験では水路勾配 I を3通り、上流端の流入量 Q_0 を4通りに変化させ、河道上の水深分布を測定した。河道の流水抵抗を Manning の粗度係数で表すと、 $n=1.1\times 10^{-2}\text{ m}^{-1/3}\text{ s}$ であった。

3. 解析モデル

河川水と帯水層との相互作用について水理モデルを作成し、伏没現象の再現を試みた。

上流端からの河道流入量を Q_0 、地点 x における帯水層への伏流流束 $q^*(x)$ を用いて表すと、河道流量 $Q(x)$ は連続式(1)で与えられる。勾配 I で傾斜した帯水層中の伏流水位 $\phi(x,y)$ は、帯水層の平均水深を H_0 とすると Dupuit の仮定により式(2)に従う。ここに $\varepsilon=I/H_0$ である。伏流水の境界条件は、図-1より周囲の3辺は不透水であるが、河道に接する辺では河道の水位で設定される。しかし、河道の水深分布は帯水層との相互作用の結果として定まるため、ここでは次の手順によって求めることとした。まず、河道の水面形を仮定して伏流水位 $\phi(x,y)$ を解析することにより、河道近傍での伏流流束 $q^*(x)$ が求まる。つぎに、 $q^*(x)$ を式(1)に代入して河道流量 $Q(x)$ を得る。河道の水深分布 $h(x)$ は本来、水面形方程式で与えられる。しかし、ここでは河道が枯渇する現象を対象とするので水面形は不連続となり、水面形方程式では解析できない。そこで近似的に、Manning 則を用いた式(3)で河道水深を逆算することとする。得られた $h(x)$ を帯水層の境界水位に用いて上記の計算を反復することにより、相互作用の結果としての河道水面形が確定される。

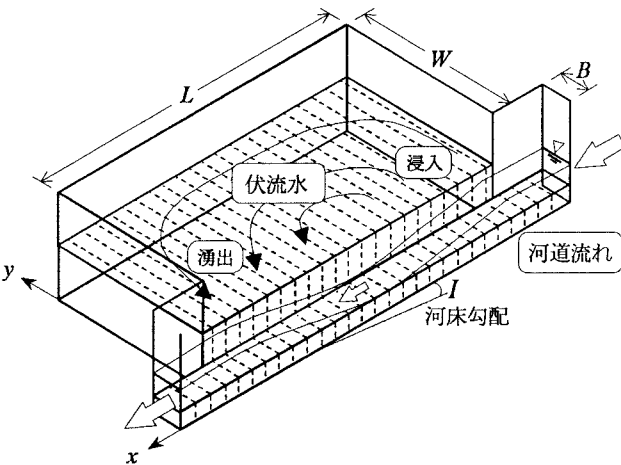


図-1 対象とする現象

$$Q(x) = Q_0 - \int_0^x q^*(x) dx \quad \dots\dots\dots (1)$$
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$
$$h(x) = \left(\frac{nQ(x)}{B I^{1/2}} \right)^{3/5} \quad \dots\dots\dots (3)$$

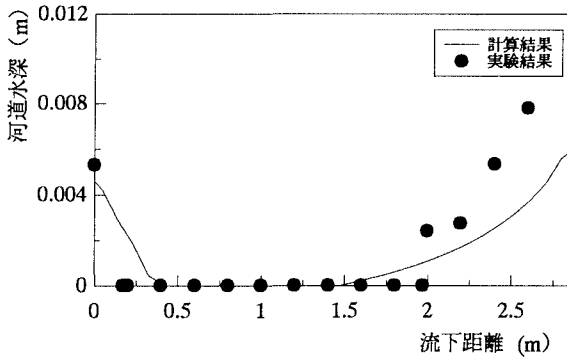


図-2 河道水面形の実験と解析の比較
(流量 $Q_0=3.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 水路勾配 $I=1/100$)

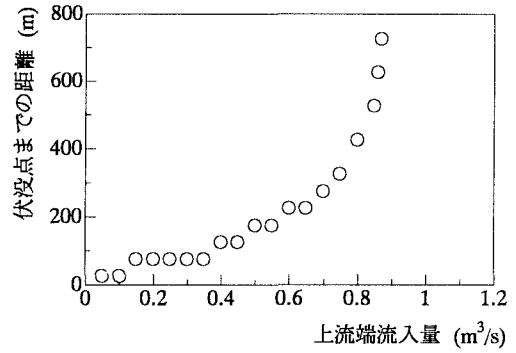


図-3 伏没位置に及ぼす上流端流入量の影響
(帯水層厚さ $H_0=25 \text{ m}$, 透水係数 $k=0.006 \text{ m/s}$)

4. 水理実験による解析モデルの検証

河道の水面形について実験値と解析結果の比較を図-2に示す。図から分かるように、河道水深の実験値は、帯水層への浸入による流量減少に伴い、上流部で急激に低下して伏没が生じている。その後、帯水層からの湧出によって下流部で徐々に回復している。実線で表される解析結果は、こうした実験値の変化傾向を概略ではあるが再現できている。とくに伏没現象については、水面形方程式を用いた従来の手法では解析できなかっただけに、今回の解析モデルが有用であることが示された。

5. 伏没現象を支配する要因

実験により検証された水理モデルを用いて、伏没現象の発生を左右する支配要因について調べる。ここでは実際の中小河川を想定して、河道幅 $B=10\text{m}$ 、河床勾配 $I=1/100$ の河道の両側に、層厚 $H_0=25\text{m}$ の帯水層が長さ $L=1500\text{m}$ 、幅 $W=300\text{m}$ にわたって分布する場合を考える。河道の Manning の粗度係数は $n=0.07\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。図-3は上流端流入量の違いによる伏没位置の変化を示したものである。図をみると、流入量が増えるにつれて伏没点の位置は下流側へ移動するものの、その変化は一様でない。流入量が $0.9\text{m}^3/\text{s}$ を超える場合は伏没しないが、その直前では僅かな流量増加によって伏没点位置が大きく移動しているのがわかる。

つぎに上流端流入量を $Q_0=0.5\text{m}^3/\text{s}$ に固定したとき、透水係数・帯水層厚さの変化が伏没位置に及ぼす影響について調べる。図-4は透水係数を $0.004\sim 0.05\text{m/s}$ で変化させたものである。図をみると、伏没位置は透水係数が 0.01m/s 以上になるとあまり変化が見られなくなるが、 0.01m/s 以下では大きく移動する。一般に、透水係数は値の変化幅が大きいことが知られているが、比較的小さな値の範囲で伏没の発生が支配されていると推察される。図-5は帯水層厚さを $14.5\sim 40\text{m}$ に変化させたものである。これによると、層厚が 20m までの範囲では伏没位置は大きく移動するが、その後は変化幅が小さくなっている。これらの結果から、伏没位置は、河道流入量だけでなく帯水層の諸特性によって変化するが、特性ごとに特定の範囲で伏没が決定されることがわかる。

6. おわりに

本研究では、室内実験によって水理モデルを検証し、伏没現象を支配している要因について解析した。今後は、今回の結果を踏まえて詳細な検討を進め、伏没が発生する条件を表す指標の定式化をめざす予定である。

参考文献 1) 原田守博・柘植裕介：河川と帯水層の相互作用を考慮した河川流況の解析，土木学会第55回年講概要集，II-145，2000

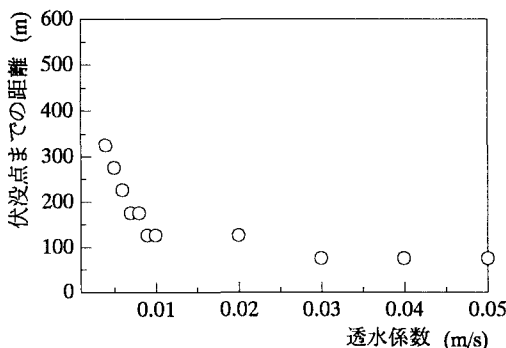


図-4 伏没位置に及ぼす透水係数の影響
(流入量 $Q_0=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 帯水層厚さ $H_0=25 \text{ m}$)

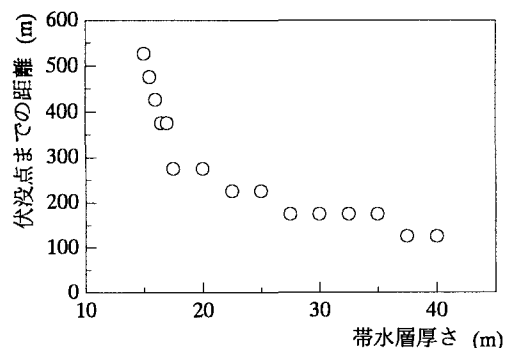


図-5 伏没位置に及ぼす帯水層厚さの影響
(流入量 $Q_0=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 透水係数 $k=0.006 \text{ m/s}$)