

投稿論文 (和文)
PAPERS

山地河川における河谷堆積層への伏流過程と 河道流況の変化に関する研究

原田守博¹・高木不折²

¹正会員 工博 名城大学講師 理工学部土木工学科 (〒468 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

²正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

河川流域のなかには、ダム下流部の減水区間で河道が枯渇状態になる場合があり、河川環境として種々の問題を生んでいる。近年、貯水池から環境維持流量が放流されつつあるが、河谷内に厚い堆積層をもつ河川では伏流現象が卓越し、期待されたほど流況が改善されないケースがある。本研究は、ダム下流部の伏流過程について、現象の支配要因を明確にするために理論解析を行い、環境維持流量の評価に基礎的情報を提供しようとしたものである。導出された解析解を数値解によって検証するとともに、水理実験や実際の山地河川における現地観測結果とも比較し、理論解の有効性を検討した。本研究によって、従来、十分な解析がなされて来なかった伏流現象について、水理学的特性の一端が明らかとなった。

Key Words : river-bed flow, seepage rate, seepage potential, permeability, environmental preservation discharge

1. 序 論

わが国の多くの河川では、戦後、多数のダム貯水池が建設され、高い治水・利水効果を挙げている。しかし一方で、貯水池の建設は、自然河道に流水の乏しい河川を生む結果となった。とくにダム下流部のいわゆる「減水区間」では、河道は流れの乏しい枯渇状態となっており、生態系保全の面からだけでなく河川景観的にも様々な問題を生むとともに、強風時に砂塵が舞うなど流域住民にとっても望ましくない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流域もある。しかしながら、放流量が十分でない場合には、流水の大半が河床に伏流浸透してしまい、期待された流況の改善が認められないケースも考えられる。これは、とくに土砂生産が盛んで、河谷内に厚い浸透性河床が形成された流域で顕著となる。上流部で生産された多量の土砂によって河床が著しく上昇した河川では、新規に放流を行ってもかなりの流量が河谷の堆積層へ伏流する場合がある。したがって、そうした流域では、維持流量を決める際に河床への伏流状況を定量的に明らかにしておくことが重要となるが、これまでに十分な調査や検討は行われていない。本研究は、こうした問題意識のもとに、ダムなどから流下する河道水が河谷堆積層へ飽和浸透する現象について理論解析し、河川流況の保全に必要な環境維持流量を評価するため基礎的情報を提供しようとし

たものである。

2. 問題の設定

(1) 河川の維持流量評価の現状

河川の維持流量は、流水の正常な機能を維持するために必要な流量として、舟運・漁業・景観・塩害の防止・河口閉塞の防止・河川管理施設の保護・地下水位の維持・動植物の保存・流水の清潔保持・水利流量などを総合的に考慮して定めるものとされている¹⁾。これらのうち、漁業や動植物保護など生態系に係わる項目や景観および親水活動に係わる項目は、河川環境の適正な管理と密接に結び付いたものであるため、必要な水量と水質の定量化をめざして、近年、積極的な取り組みが行われている²⁾。

こうした河川環境を保全するための環境維持流量は、とくに中・上流域で行われる水力開発の場合、放流量が開発の経済性に直接影響を及ぼすため、その流量決定にはとりわけ難しい要素が含まれている。

最近の例では、ダムからの維持放流量として流域面積 100 km² 当り 0.3~0.5 m³/sec 程度の値が設定される場合が多い³⁾。しかし、前述の維持流量の評価に関わる項目は流域や対象地点によってローカリティをもっているため、維持流量を「流域面積当り云々」といった画一的な基準で議論するのは妥当でない。たとえば、本研究の主題である伏流現象についても、流域の地形地質や水文

特性によって河床の状態が大きく異なることから、すべての河川を一様に取り扱うことは難しく、流域の特質に応じた環境維持流量の評価が必要であろう。

(2) 対象とする河川形態

河川の伏流現象は流域の水文地質特性に大きく支配される。一般に、流域が不透水性の岩盤で構成される河川の方が、第三紀層など未固結な地質の流域の河川よりも伏流は少ないと考えられる。しかしながら、河谷がたとえば岩盤で覆われていても、山地斜面の崩壊が激しい流域では、河谷に合流する沢から膨大な土砂が流入し、河谷内に厚い堆積層が形成される。そうした場合、流水は堆積河床上の凹部を河道として流れるが(写真—1)、河床の構成砂礫は粒径が大きいために、河床は非常に高い透水性をもち、河川水の相当量が堆積層中に伏流し地下水として流下することになる。とくに、河川全体の流量が少ない場合には、伏流によって河道中の流れが伏没し、河道が枯渇するケースも生じうる(写真—2)。

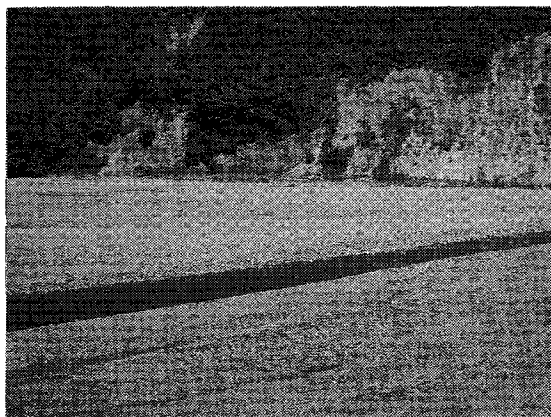
本研究では、こうした不透水性岩盤で囲まれた河谷内に多量の土砂が堆積して、幅広い浸透性河床が形成された河川を想定し、河床への伏流により河道流量が流下に伴って減少する過程を議論することにする。浸透性河床をもつ河川の伏流過程の解析は、古くから Muskat⁴⁾ や Polubarinova-Kochina⁵⁾, Bower⁶⁾, 宇野⁷⁾ などをはじめとする多数の研究者が取り組んで来ているが、それらの多くは河川の横断面における伏流水面形や浸透流量を鉛直二次元問題として扱ったものがほとんどである。しかし、ここでは見方を変えて、図—1のように、ダムから下流に延びた河川を平面的に捉え、河川水が河道から有限の幅をもった河谷堆積層に飽和浸透する状況を考える。このとき伏流が続くならば、やがては河道から流水がなくなる状態、すなわち、砂漠など乾燥地域で見られる伏没流 (losing stream), あるいは湿潤地域でも扇状地などで天井川として見られる失水河川 (influent river) と同様の状態が生じうる。本研究では、そうした河道水の伏没現象に到る前段の過程として、上流からの維持流量が与えられたときの河道から地下への伏流強度の場所的变化と伏流総量、ならびに河谷堆積層中の伏流水の平面的ポテンシャル分布を、堆積層の透水係数と層厚および河道から側岸までの堆積層幅と河床勾配を媒介として議論することにする。

3. 浸透性河床への伏流現象の理論解析

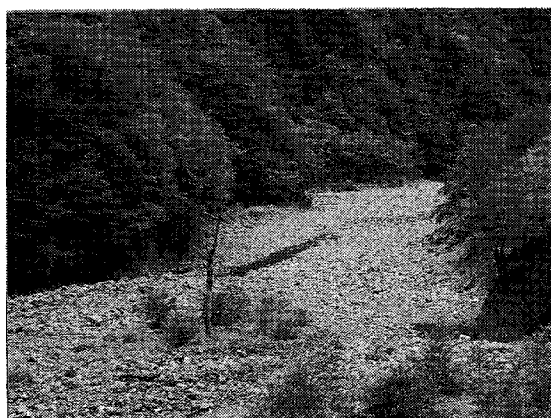
(1) 基礎方程式と境界条件

実際の河川の流れは非常に複雑であるため、解析に当たって以下の仮定を行う。

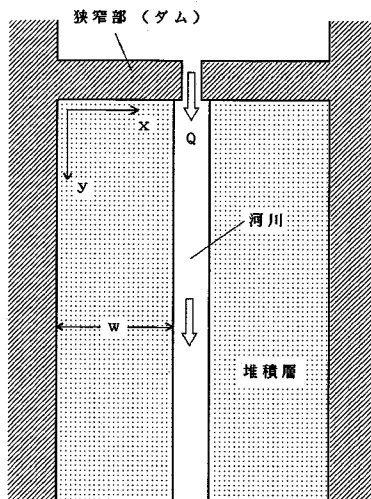
a) 一般に河道は湾曲しており、また常に河谷の中央を



写真—1 堆積河床上の流水河道



写真—2 伏没により枯渇した河道



図—1 対象とする河川形態

流れているわけではないが、ここでは近似的にダムから下流に向けて直線的に伸びた一様断面の河川を取り扱う。

- b) 河谷底面の勾配は流下方向のみに存在し、流れに直交する方向には傾斜していない。
- c) 河谷上に土砂堆積層は均一の厚さで分布し、河谷底面の勾配と河床表面の勾配とは等しい。
- d) 伏流水はダルシー則に従って流動し、透水係数は場所的に一定とする。
- b) 伏流水の流れはデュプイの準一様流の仮定に従い、平均水深を用いて線形化して取り扱える。
- f) 維持流量の検討を目的とするので、定常状態の流れを対象とする。

これらの仮定により、本研究における伏流水の支配方程式を導く。まず、平面2次元の等方均質層中の定常不圧浸透流の基礎方程式は、デュプイの仮定により、

$$k \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h \frac{\partial}{\partial x} (h+z) \right\} + k \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h \frac{\partial}{\partial y} (h+z) \right\} = 0 \quad (1)$$

ここに、 x ：側岸から河川に直交する方向に測った水平距離、 y ：ダム地点から河床に沿って流下方向に測った距離、 k ：河谷堆積層の透水係数、 h ：伏流水の水深、 $z(y)$ ：河谷底面の標高である。上式は仮定 b) により、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) - I \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

となる。ここに、 I ：河谷底面の流下方向の勾配であり、緩勾配では $I = -\partial z / \partial y$ (> 0) である。仮定 e) により、伏流水の水深 $h(x, y)$ が平均水深 H_0 を用いて次式で表されるとすると、

$$h(x, y) = H_0 + \phi(x, y), \quad |H_0| \gg |\phi(x, y)| \quad (3)$$

式(2)は線形化できて、伏流水の支配方程式として次式が得られる。

$$H_0 \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) - I \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

上式中の H_0 は伏流水の平均水深であり、堆積層の層厚と密接な係わりがある。ここでは H_0 として河道近傍の伏流水深を採っている。

つぎに、河道は河谷の中央に位置するので、右岸側のみを解析することにすれば、境界条件は以下のように設定することができる。

$$x=0; \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$x=w; \phi = 0 \quad (6)$$

$$y=0; \frac{\partial \phi}{\partial y} = I \quad (7)$$

$$y \rightarrow \infty; \frac{\partial \phi}{\partial y} \rightarrow 0 \quad (8)$$

ここに、 w ：流水の存在する河道から側岸までの距離である。

これらの境界条件を模式的に示せば、図-3のようになる。 x 方向について、式(5)は側岸が不透水であることを示し、式(6)は河道が伏流水にとって境界水位

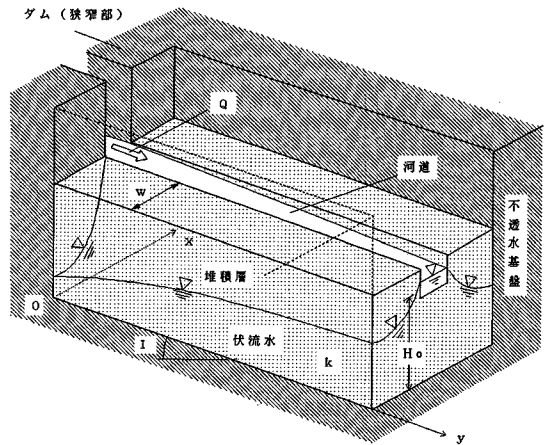
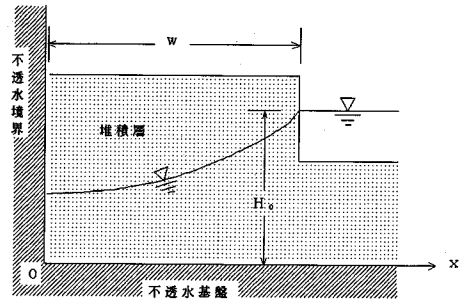
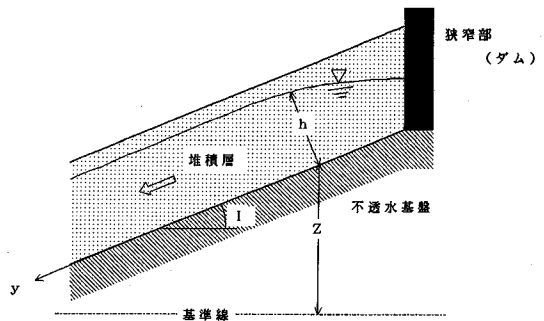


図-2 対象とする伏流現象



(a) 横断 (x 方向 (下流から見た場合))



(b) 縦断 (y 方向 (堆積層の部分))

図-3 境界条件の模式図

となっていることを意味する。 y 方向について見れば、式(7)はダムが不透水壁でダム直下の水面勾配は水平であること、式(8)は十分流下した地点の水面勾配は河谷勾配に等しくなることを表している。

これらの境界条件のうち、式(6)については若干の検討を加えねばならない。式(6)は、 ϕ の基準である H_0 が空間的一定値であることから、河道水位が流下方向に一定であることを意味しているが、言うまでもなく、河道の水面形は伏流による河道流量の減少に伴い流下方

向に変化する。その変化量は、河道流れの水面形方程式⁸⁾に伏流強度すなわち河道単位長さ当りの浸透漏水量の場所的分布を与えて解くことによって算定することができる。したがって、伏流を伴う河道流況の変化を正しく知るには、河道流れと伏流現象の両者を同時に解く必要がある。しかし、後述するように、伏流による河道水深の変化量は伏流水の平均水深に比べて事実上小さく、伏流量の算定に大きな影響は及ぼさない。その詳細は4章で述べることにして、ここでは伏流強度分布の理論解を得るために、敢えて河川水深一定の仮定をおき、境界条件の単純化を図ることとする。

(2) 伏流水の平面ポテンシャル分布

さて、これらの境界条件のもとで基礎式(4)を解析する。変数分離法により ϕ の一般解は、

$$\phi(x, y) = \{C_1 \cos \sqrt{\lambda}x + C_2 \sin \sqrt{\lambda}x\} \cdot \{C_3 e^{m_1 y} + C_4 e^{m_2 y}\} \quad (9)$$

ここに、 $C_{1,2,3,4}$:未知定数、 λ :正の定数、 $m_{1,2}$:特性方程式の根。 $\alpha = I/H_0$ とすると、

$$m_1 = \frac{1}{2} \{ \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\lambda} \}, \quad m_2 = \frac{1}{2} \{ \alpha - \sqrt{\alpha^2 + 4\lambda} \}$$

である。境界条件を考慮した特殊解を求めるに当たり、式(8)により、 $y \rightarrow \infty$ のとき $\phi'(y) \rightarrow 0$ であるためには、 $C_3 = 0$ でなくてはならない。よって、 $A = C_1 C_4$ 、 $B = C_2 C_4$ 、 $m_2 = -P$ ($P > 0$)とおくと、

$$\phi(x, y) = e^{-Py} \{ A \cos \sqrt{\lambda}x + B \sin \sqrt{\lambda}x \} \quad (10)$$

上式を x で微分し、境界条件として式(5)を用いれば、 $B = 0$ となる。また、境界条件の式(6)により、

$$e^{-Py} A \cos \sqrt{\lambda}w = 0$$

$A = 0$ は無意味であるから $A \neq 0$ とすると、

$$\cos \sqrt{\lambda}w = 0$$

$$\therefore \sqrt{\lambda} = \frac{(2n-1)\pi}{2w}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (11)$$

したがって、解の形は

$$\phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-P_n y} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (12)$$

y で微分すると、

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = \sum_{n=1}^{\infty} (-P_n) \cdot A_n \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (13)$$

境界条件の式(6)、(7)により、

$$0 \leq x < w; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = I \quad (14)$$

$$x = w; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (15)$$

式(14)、(15)で表される関数 $\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0}$ は、 x 方向にステップ状に変化する関数の一部とみなすことができるので、

周期 $4w$ をもつフーリエ余弦級数で表現すると、

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{2n-1} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (16)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \beta_{2n-1} &= \frac{2}{w} \int_0^w I \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x dx \\ &= \frac{4I}{(2n-1)\pi} \sin \frac{(2n-1)\pi}{2} \end{aligned}$$

式(16)を式(13)に代入して、

$$A_n = \frac{-4I}{(2n-1)\pi \cdot P_n} \sin \frac{(2n-1)\pi}{2}$$

よって、堆積層中の伏流水の水深 $h(x, y)$ は次式で表される。

$$h(x, y) = H_0 + \phi(x, y)$$

$$= H_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I \cdot (-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi \cdot P_n} \cdot e^{-P_n y} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (17)$$

ここに、

$$P_n = \frac{1}{2} \left[-\alpha + \left\{ \alpha^2 + \left(\frac{(2n-1)\pi}{w} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \quad (18)$$

また、伏流水の平面的なポテンシャル分布 $\Phi(x, y)$ は、

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= h(x, y) \cos I + z(y) \\ &= \{ H_0 + \phi(x, y) \} \cos I + z(y) \quad (19) \end{aligned}$$

で与えられるので、式(17)、(18)を用いることにより求めることができる。

(3) 河道に沿った伏流強度の場所的変化と伏流総量

河道から堆積層への伏流強度すなわち河道単位長さ当りの浸透漏水量 $q(y)$ は、 k を河谷堆積層の透水係数とすると、式(17)、(18)、(19)により右岸側の場合、

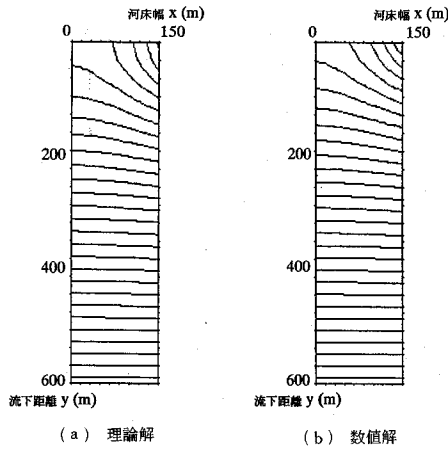
$$\begin{aligned} q(y) &= k \cdot H_0 \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=w} \\ &= k \cdot H_0 \cdot \cos I \cdot \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=w} \\ &= \frac{2k \cdot H_0 \cdot I \cdot \cos I}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-P_n y}}{P_n} \quad (20) \end{aligned}$$

となり、ダム地点から流下距離 L までの右岸側への伏流量の総和 $Q_s(L)$ は次式で表される。

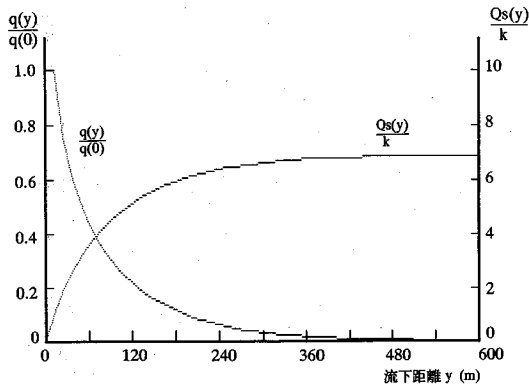
$$\begin{aligned} Q_s(L) &= \int_0^L q(y) dy \\ &= \frac{2k \cdot H_0 \cdot I \cdot \cos I}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - e^{-P_n L})}{P_n^2} \quad (21) \end{aligned}$$

すなわち、ダムからの放流量を Q とすると、河道流量は両岸への伏流により $Q_r(L) = Q - 2Q_s(L)$ まで減少する。

図-4(a)および図-5は、上記の理論解によって求めた右岸側の伏流水のポテンシャル Φ の平面分布(0.1mコンター)と、河道からの伏流強度と伏流総量の場所的分布の一例である。この試算では、実際の河川



図—4 理論解による伏流水のポテンシャル分布と数値解析結果との比較

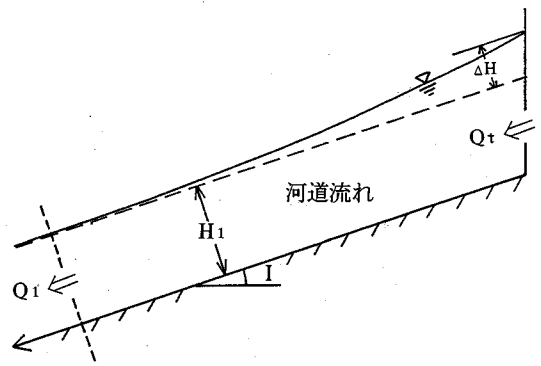


図—5 理論解による伏流過程の試算結果

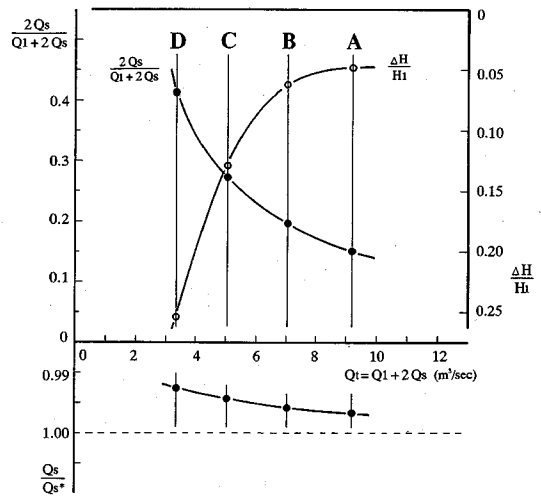
形態を想定して、 $I=1/200$ 、 $w=150$ m、 $H_0=10$ mと設定した。図—4 (b) は、伏流浸透水の基礎式 (4) を陰解法にて差分解析することによって求めた伏流水のポテンシャル分布である。図 (a) (b) を比較すれば分かるように、両者はほぼ同様な結果を与えており、理論解の妥当性が理解される。また、図—5 より、河道から堆積層への伏流浸透はダム直下で大きく、流下するにしたがって急速に減少することが分かる。

4. 伏流による河道水深の変化とその影響

理論解における河道水深一定の仮定について、その妥当性を検証するために、堆積層中の浸透流と河道の開水路流れの両者を解くことを試みた。まず、①伏流水の基礎式 (4) を差分解析し、河道境界からの伏流強度の分布 $q(y)$ を求める。つぎに、② $q(y)$ を河道からの漏水として、河道の水面形方程式をルンゲ-クッタ法にて解き、河道の水深分布を計算する。そして、求められた河



図—6 伏流に伴う河道の水深変化



図—7 河道の水深変化が伏流総量に及ぼす影響

道水面形を境界条件として再度①の伏流解析を行い、解が収束するまで反復計算を実施した。解析例として、 I 、 w 、 H_0 は図—4、5 と同様の値を用い、河道は幅 5 m の矩形水路、マンニングの粗度係数 $n=0.05$ 、堆積層の透水係数 $k=0.1$ m/sec として、流下距離 600 m までの堆積層および河道を解析領域とした。なお、ここでは伏流による水深変化を議論するのが目的なので、伏流が生じない場合の河道流れは等流状態とした。

いま、図—6 に示す河道流れにおいて、ダムから維持放流量 Q が河道に流入して、流下距離 L までの間に左右の河床へ各々 $Q_s(L)$ の伏流総量が浸透し、河道の流れが破線で示される等流状態 (流量 Q_1 、水深 H_1) に漸近する過程を考えると、上流端での流入量は $Q=Q_1+2Q_s(L)$ となる。

種々の等流水深 H_1 に対応する流量 Q_1 を設定し、上記の数値解析を行った結果を図—7 に示す。図の横軸はダムからの河道流入量 Q を示し、左縦軸は Q に占める伏流総量の割合、右縦軸は等流水深 H_1 に対する水深変

化量 ΔH の比率, 下方への縦軸は河道の水深変化を考慮したときの伏流総量と, 水深を一定とした場合の伏流総量の理論解 Q_s^* との比率である. この図によると, ダムからの放流量が最も多い A のケースでは, 放流量に占める伏流総量の割合 (左縦軸) は 15% 程度であり, 水深の変化幅 (右縦軸) は 5% 未満に納まっている. 一方, 放流量が少ない D のケースでは, 伏流総量の占める割合は 40% を越え, 水深の変化率も 25% にのぼっている. しかしながら, 下のプロットを見ると, この D の場合ですら, 伏流総量は水深を一定とした場合と 1% も異なっていない. このことは, 河道の水深変化が伏流現象にはほとんど影響しないことを意味しており, 河道水深を一定と仮定した理論解が伏流過程の評価に有効であることを示唆している.

5. 水理実験による伏流過程の理論解の検証

解析において設定された境界条件と理論解の妥当性を検討するために, 簡単な室内実験を行った. 図-8 は, 実験装置を模式的に示したものである. 図のように, 実験装置は貯水池から直線的に伸びた幅狭の開水路とそれに面する浸透層とから成っている. 河谷堆積層に相当する浸透層はガラスビーズ (粒径 0.7 mm) を一定の層厚で充填したもので, 河道に対応する矩形断面水路とは金網で分断されている. 実験では, 放流量 Q と河床勾配 I をさまざまに変化させることにより, 開水路部分の水深ならびに開水路末端とビーズ層末端からの流出量を測定したが, 実験規模が小さいことや末端部分における水理条件の設定が難しいために, 測定値そのものは理論解を検証するだけの精度をもたなかった. しかし, ビーズ層中の浸透流を動きを赤インクで可視化したところ, 写真-3 に示す結果が得られた. すなわちダム直下で注入されたインクは, 写真のように横断方向の流向成分をもちながら弧を描いて流動し, やがて開水路と平行に流下している. これは, ポテンシャル分布 (図-4 (a) など) から判断される伏流水の流向とよく一致しており, 理論解の有効性を定性的に示すものと考えられる.

6. 河道流況の現地観測による理論解の検証

上記の伏流過程の理論解が実現象に対してどの程度有効であるかを検討するために, 実際の山地河川において伏流に伴う河道流量の場所的变化を現地観測し, 理論解による流量変化と比較した.

(1) 山地河川における河道流況の現地観測

河道流量の現地観測は, 静岡県のア倍川支流三郷川において 1994 年 3 月および 7 月~9 月に行った. ア倍川

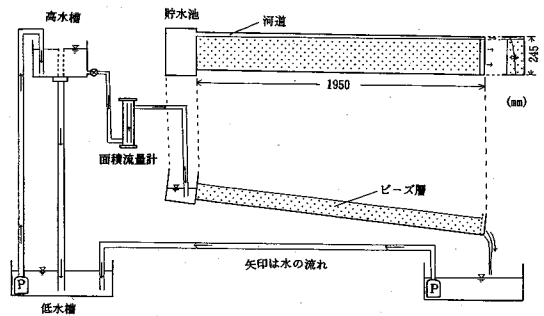


図-8 実験装置の模式図

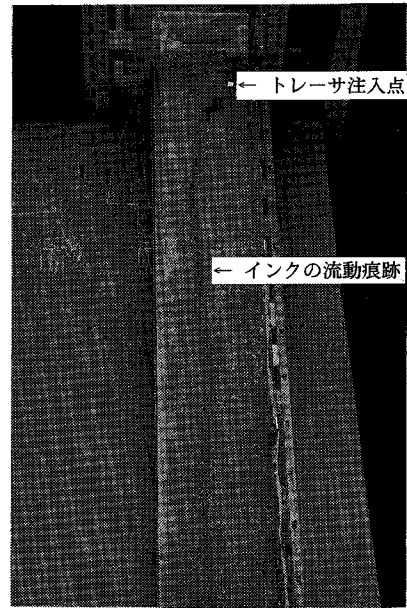


写真-3 ビーズ層中の浸透流の可視化

流域では, フォッサマグナの影を受けて土砂生産が盛んであり, 山間の河谷には膨大な河床堆積物が蓄積されている. 今回の調査地域は, 図-9 に示すように, 岩盤の露出した狭窄部を上流端とする流下距離 400 m の区間である. 狭窄部の河谷幅はわずかに 8 m 程度であるが, その下流で河谷は 50 m 以上にまで広がり, 河床には粗砂を中心とする土砂が堆積しているため, 河道から顕著な伏流現象が生じているものと予想された.

流量観測は, 河道流れへの伏流の影響を評価することが目的であるため, 高い観測精度が要求される. そこで今回は, プロペラ径 13 cm の通常の河川用流速計とプロペラ径 2.5 cm の小型流速計という 2 種類の流速計を併用し (それぞれ流速計 a, b と呼ぶ), 測定値の比較検討も行った. 流速の観測地点は図中に A~E で示す 5 箇所である. 河道の水深は, それぞれの地点で川幅方向に複雑に変化しているが, 概ね 0.25~0.45 m の範囲で

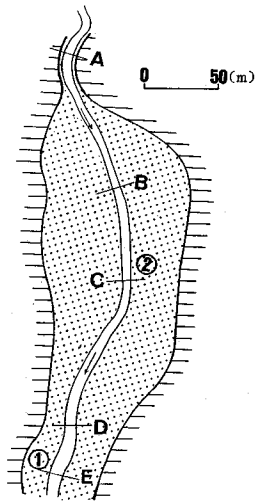


図-9 現地観測地域の概要

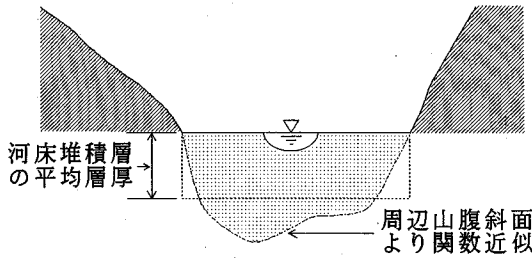


図-10 河谷の断面形状および堆積層厚の推定方法

あった。流量の測定は、各測定地点において川幅方向に 20 cm 間隔で鉛直測線を設け、流速計を上下して測線ごとの平均流速を測定し、それぞれの水深を乗ずることで川幅全体の流量を算出した。

また、河谷堆積層の透水性を知るために、図-9 の地点①②において表層 50 cm までの土砂を複数サンプル採取し、堆積物の粒径加積曲線を求めた。たとえば 20% 粒径を用いて Creager の表⁹⁾から求めた透水係数は、 $k = 1.8 \times 10^{-2} \sim 3.2 \times 10^{-4} (\text{m/sec})$ と幅のある値となった。これは、堆積土砂が砂礫だけでなく細砂も多く含むためと考えられる。また、河床勾配など河川形態を把握するために測量作業を実施した結果、河床の半幅(平均) $w = 50 \text{ m}$ 、河床勾配 $I = 1/80$ が得られた。

河谷堆積層の層厚も伏流現象を評価する上で重要な要素である。ここでは、図-10 に示すように、河川周辺の山腹斜面勾配から河谷の断面形状を推定する作業を複数の断面において行った。それをもとに河谷堆積層の全体積を算出し、河床の平面面積で除することで、平均的な堆積層厚を $H_0 = 3 \text{ m}$ と求めた。

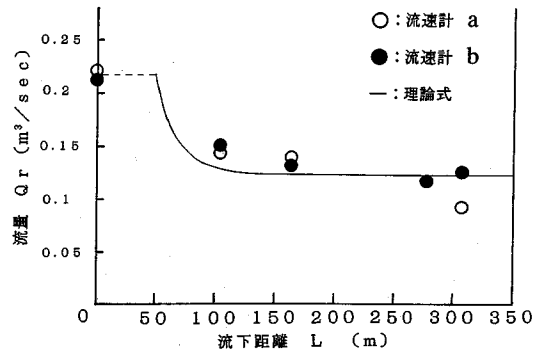


図-11 河道流量の観測値と理論解との比較
(観測日: 1994.8.16, 安倍川支流三郷川)

表-1 試算に用いたパラメータ

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
堆積層厚 $H_0(\text{m})$	10	20	10	10
河谷勾配 I	1/100	1/100	1/67	1/100
堆積層幅 $w(\text{m})$	250	250	250	350

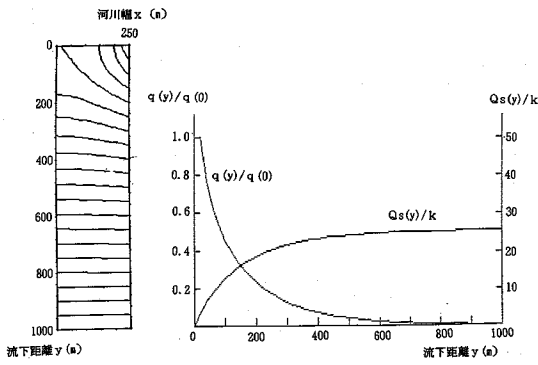
(2) 観測結果および理論解との比較

各計測地点にて得られた河道流量の測定値を流下距離に対してプロットしたものが図-11 である。図中の○は流速計 a、●は b によるものである。2種類の流速計はプロベラ径や回転数の検出方式が異なるものでありながら測定値は非常に接近しており、流量観測の精度は十分なレベルにあると考えられる。

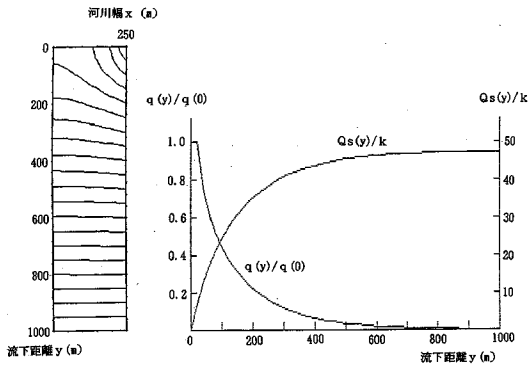
図中の曲線は、伏流過程の理論解、式(21)を用いて求めた河道流量 $Q_r(L)$ の流下方向変化を示したものである。式中のパラメータ H_0 および I 、 w には上述の現地調査で得られた値を採用している。堆積層の飽和透水係数 k は、数値の変動幅が大きいため、ここでは理論解が観測値にできるだけ近づくように、 $k = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ と設定した。このことは、幅広い粒径分布をもつ堆積層にあって、細砂など比較的細粒な土砂層が現象を支配していることを示唆している。また、現地の河床幅は、A 地点より下流 50 m 付近から広がり始めることから、図中の理論曲線は原点をその分だけ移動してある。観測値のプロットと理論曲線を比較すると、両者はよく対応しており、理論解の有効性が認められる。

7. 環境維持流量と下流部の河川流況

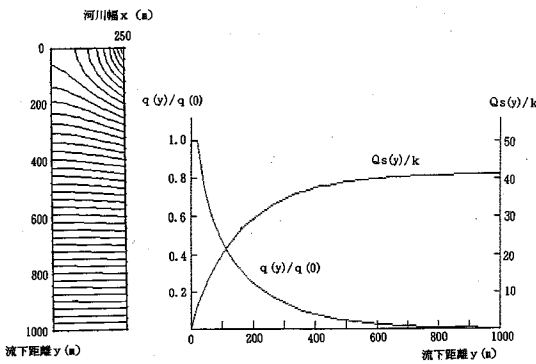
実際の様々な河川形態によって伏流状況がどのように変化するか、導出した理論解を用いて試算してみよう。表-1 は例として設定したパラメータ値を示している。これは、粗礫によって構成される幅広い河床をもった上



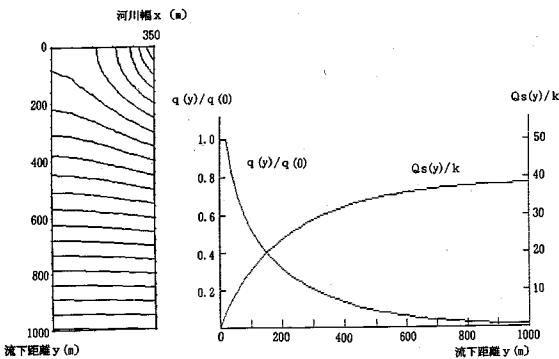
(a) ケース1：基本条件



(b) ケース2：堆積層厚 H_0 2倍



(c) ケース3：河谷勾配 I 1.5倍



(d) ケース4：堆積層幅 w 1.4倍

図-12 伏流水の平面ポテンシャル分布と伏流量の流下方向変化

流から中流域にかけての山地河川を想定したものである。これらの各ケースについて、式(19)から求めた右岸側の伏流水のポテンシャル分布 $\Phi(x, y)$ と、式(20)(21)から求めた伏流強度 $q(y)$ および伏流総量 $Q_s(y)$ の流下方向の変化を図-12(a)~(d)に示す。まず、ポテンシャル $\Phi(x, y)$ の空間分布を見ると、どのケースにおいても、伏流水の水面形はダム直下で河道から側壁に向かって大きく傾斜するものの、数百メートル下流では、伏流水の水位は河道水位と同じレベルまで上昇し、その後、伏流水は等流状態で下流していることが分かる。これに対応して、河道から堆積層への伏流強度はダム直下で大きな値になっているが、流下するにつれて急速に減少してゼロに近づくため伏流総量は一定値に漸近している。

たとえば、ケース1の場合、300m下流での伏流強度はダム直下の値の10数%にまで減少し、800mより下流では事実上、伏流はほとんど認められない。ちなみに堆積層の飽和透水係数を $k=5 \times 10^{-2}$ m/sec と仮定すると、ダムから800m下流までの伏流総量は、右岸側だけで約 $1.35 \text{ m}^3/\text{sec}$ に達することが分かる。すなわち、河道の流量はダム直下から数百mの範囲で減少し、最終的に左岸側と右岸側を合わせて $2.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上が伏没することになる。したがって、仮にダムから $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ を放流しても、下流の河道流量は $2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 余りに減少する結果となる。以上はケース1の場合であって、堆積層厚が2倍となるケース2では伏流量も倍増している。同様の傾向は、河谷勾配が1.5倍に大きくなるケース3の場合にも見られ、伏流量は増大する。また、ケース4のように堆積層幅がより広くなると、伏流の生じる範囲がさらに下流まで及ぶとともに、伏流量もケース1に比べて増大し、河道流量は一段と減少することが予想される。このように、ダム直下における伏流現象は河道の流況に大きな影響を及ぼすことから、下流における維持流量の確保を考える上で、正しく評価すべき重要な要素といえる。

8. 結 論

本研究では、ダム下流部における伏流過程の水理特性を明らかにするために、浸透流の基礎方程式に基づく理論解析を行うとともに、室内実験および現地観測結果との比較を試みた。得られた知見をまとめると、以下のようである。

- (1) 伏流過程の理論解は数値解析の結果とよく一致し、理論展開の妥当性が確認された。理論解によると、伏流水のポテンシャル分布は、ダム直下では横断方向に大きく変化するものの、ある程度下流では横断方向の変化は小さく、河谷の勾配と同一勾配と

なる。すなわち、河道からの伏流強度はダム直下で大きく、流下に伴い急速に減少することになる。

- (2) 水理実験により伏流水の流れの経路を可視化したところ、ポテンシャル分布の解析結果と一致し、基礎方程式および境界条件の妥当性が定性的に確認された。
- (3) 理論解の実現象への適用性を検討するために、実際の山地河川において伏流浸透による河道流量変化の現地観測を行い、理論と比較したところ、大局的に見て両者はよく対応し、今回導出した理論解の有効性が確かめられた。
- (4) 種々の河川形態について理論解を計算した結果、河道から河谷堆積層への伏流強度および伏流総量は、堆積層の飽和透水係数・堆積層厚および河谷勾配にほぼ比例し、河道から側岸までの堆積層幅にも強く影響を受けることが明らかになった。

謝辞：本研究の遂行に当たり、平成6年度文部省科学研究費(奨励研究(A))および(財)内藤科学技術振興財団による研究助成金(平成5年度)を使用した。ここに記して謝意を表す。また、本論文をまとめるに当たり、岩垣雄一先生(名城大学理工学部)より有益な助

言を賜った。厚く御礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) (社)日本河川協会(編):建設省河川砂防技術基準(案)・計画編, pp. 33-34, 山海堂, 1986年7月.
- 2) たとえば, 建設省河川局河川環境対策室:水環境管理に係わる目標水量・目標水質, 1991年1月.
- 3) 大滝克彦:中小水力開発に伴う維持流量決定の具体的事例, (財)新エネルギー財団水力本部「水力開発の施策・設計・施工・合理化・実施例」, pp. 69-77, 1982年3月.
- 4) Muskat, M.: *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*, McGraw-Hill, 763p., 1937.
- 5) Polubarinova-Kochina: *Theory of Groud Water Movement*, Princeton Univ. Press, 613p., 1962.
- 6) Bouwer, H.: *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill, 480p., 1978.
- 7) 宇野尚雄:地下水位が浅い地盤への水路からの定常浸透における浸透流量と自由水面形, 土木学会論文集, 第157号, pp. 28-41, 1968.
- 8) たとえば, 椿 東一郎:水理学 I, pp. 169-171, 森北出版, 1973.
- 9) 久保田敬一, 河野伊一郎, 宇野尚雄:透水設計へのアプローチ, p. 79, 鹿島出版会, 1976.

(1995.4.5 受付)

A STUDY ON SEEPAGE PROCESS OF RIVER WATER INTO SEDIMENTARY LAYER OF VALLEY AND DECREASE OF CHANNEL DISCHARGE

Morihiro HARADA and Fusetsu TAKAGI

Recently, in order to improve a river environment at downstream of dams, the preservation discharge from a reservoir has been drained off. However, in a mountainous basin where sedimentary materials are actively produced, because a thick layer of sediment is formed on bottom of the valley, it is impossible to disregard existence of the seepage flow from river channels, i.e. the river-bed flow. The purpose of this research is to consider the hydraulic characteristics of the river-bed flow at downstream of dams. Through the theoretical analysis based on physical principles, the spatial distribution of seepage potential, the seepage rate and its total quantity from a channel have been evaluated. The analytical results have been compared with laboratory experiments and field observations, and the quantitative properties of this phenomena have been clarified.