

ダム下流部における伏流過程の解析 — 環境維持流量の評価に向けて —

A Consideration to River-bed Flow Downstream of Dams
for Evaluation of Environmental Preservation Discharge

原田 守博*
By Morihiro HARADA

Recently, in order to improve the condition of rivers downstream of dams, the preservation discharge from a reservoir has been drained off for conservation of river environment. However, in a watershed basin where sedimentary materials are actively produced from a mountainous area, it is impossible to disregard the seepage flow from river channels, i.e. the river-bed flow, because a thick layer of sediment is formed on the bottom of a valley. The purpose of this research is to consider the hydraulic characteristics of the river-bed flow downstream of dams. Through the theoretical analysis based on the physical principles, the spatial distribution of seepage potential, the seepage rate and its total quantity from the channel have been evaluated. The analytical results have been validated by the numerical simulation combined the river-bed flow with the channel flow.

Keywords: preservation discharge, river-bed flow, seepage rate, seepage potential

1. はじめに

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流域を各地に生む結果となった。とくにダム下流部の減水区間では、河道は水の無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劣悪な河川環境となっていることがある。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放流が行われつつある。実際の例では、維持放流量として流域面積100km²当り0.3~0.5m³/sec程度の値が設定される場合が多い¹⁾。しかし、低水時の流況は流域の水文地質特性や水利用環境によって流域毎に大きく異なるため、維持流量を画一的な基準で議論するのは望ましくない。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は、放流水の一部が河床に伏流浸透してしまい、下流では期待された流況の改善が認められない場合もある。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いえる。本研究は、こうしたダム下流部における伏流浸透過程について、現象の支配要因を明確にするために理論解析を行い、流況の保全に必要な維持流量の評価に対して基礎的情報を提供しようとしたものである。

* 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. ダム下流部における伏流過程の理論解析

2.1 対象とする河川形態

本研究では、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、ダム下流部において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考える。まず、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。とくに、ダムからの維持放流量 Q が与えられたときの河道から地下への伏流強度 q の場所的変化と伏流総量 Q_s 、ならびに河谷堆積層中の浸透流の平面ポテンシャル分布 ϕ を、堆積層の透水係数 k と層厚 H_0 および河道から側岸までの堆積層幅 w と河床勾配 I を媒介として議論する。

2.2 基礎方程式と境界条件

解析解の導出に当たって、以下の仮定を行う。

- (1) 河道は河谷の中央をダムから直線的に流れる一様断面とする。
 - (2) 堆積層の基盤に当たる河谷は流下方向のみに傾斜している。
 - (3) 堆積層厚は均一とし、河谷の勾配と河床表面の勾配とは等しい。
 - (4) 伏流水はダルシー則に従い、透水係数は空間的に一定とする。
 - (5) 伏流水はデュビーの仮定に従い、基礎式は線形化できるものとする。
 - (6) 維持流量の検討を目的とするので、定常状態の流れを取り扱う。
- これらの仮定により、伏流水の支配方程式は次式ようになる。

$$H_0 \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) - I \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

ここに、 x ：側岸から河川の横断方向に測った距離、 y ：ダム地点から流下方向に測った距離、 H_0 ：河道近傍の伏流水の水深、 I ：河谷の勾配であり、河谷の標高を $z(y)$ とすると緩勾配では $I = -\partial z / \partial y$ である。 $\phi(x, y)$ ： H_0 を基準として測った伏流水面までの距離であり、伏流水の水深は $h(x, y) = H_0 + \phi(x, y)$ で表される。河道は河谷の中央に位置し、右岸側のみを解析することにすれば、境界条件は以下ようになる。

$$y = 0; \frac{\partial \phi}{\partial y} = I \quad (2), \quad y \rightarrow \infty; \frac{\partial \phi}{\partial y} \rightarrow 0 \quad (3)$$

$$x = 0; \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (4), \quad x = w; \phi = 0 \quad (5)$$

ここに、 w は河道から側岸までの河床幅である。図-2はこれらの境界条件を模式的に示したものである。式(2)(4)はそれぞれダムおよび側岸が不透水であることを示す。また、式(5)は河道水位が伏流水にとって境界水位となっていることを意味するが、河道の水面形は伏流による流量減少に伴い流下方向に変化する。その変化量は、河道部分の水面形方程式に伏流強度すなわち河道単位長さ当りの浸透量の場所的分布を与えることにより算定できる。すなわち、河道部との境界水位を正しく知るには、伏流現象と河道流れの両者を同時に解く必要がある。しかし、解析解を導くためには境界条件の単純化が必要であり、伏流による河道の水深変化とその影響は後ほど検討することにして、ここでは伏流による河道水深の変化は小さく、近似的に流下方向に一定であると仮定する。

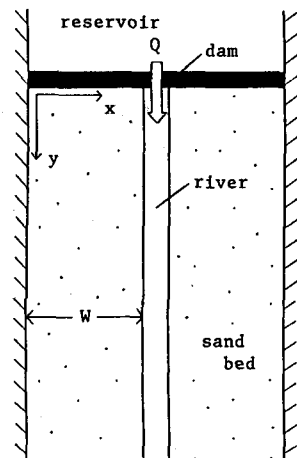
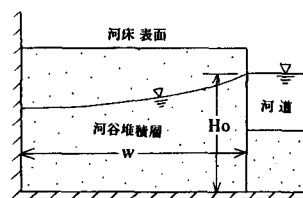
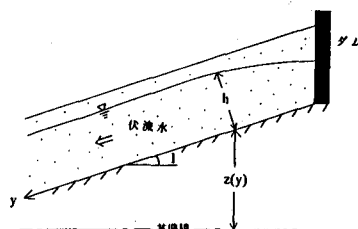


図-1 対象とする河川形態



a. 横断(x)方向



b. 縦断(y)方向

図-2 伏流水の境界条件

2.3 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(1)を解析する。変数分離法により ϕ の一般解を求め、境界条件である式(3)(4)(5)を考慮すれば、解の形は次のようになる²⁾。

$$\phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-P_n y} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (6)$$

境界条件：式(2)で表される関数 $\left[0 \leq x < w : \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = I, \quad x = w : \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \right]$ を、周期 $4w$ をもつフーリエ余弦級数で表現することにより、堆積層中の伏流水のポテンシャル $\Phi(x, y)$ は、

$$\Phi(x, y) = h(x, y) \cos I + z(y) = \{H_0 + \phi(x, y)\} \cos I + z(y) \quad (7)$$

$$h(x, y) = H_0 + \phi(x, y) = H_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I \cdot (-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi \cdot P_n} \cdot e^{-P_n y} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (8)$$

$$\text{と表される。ここに、} P_n = \frac{1}{2} \left[-\alpha + \left\{ \alpha^2 + \left(\frac{(2n-1)\pi}{w} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \quad (9)$$

河道から堆積層への伏流強度 $q(y)$ は、 k を河谷堆積層の透水係数とすると、式(7)(8)(9)により

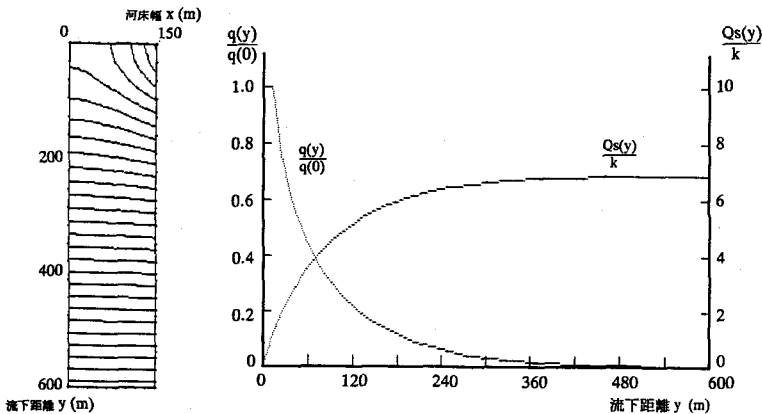
$$q(y) = k \cdot H_0 \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=w} = \frac{2kH_0I \cdot \cos I}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-P_n y}}{P_n} \quad (10)$$

となる。さらに、流下距離 L までの伏流総量 $Q_s(L)$ は、式(10)を y について $0 \sim L$ で積分すればよい。

図-3は、上式から求めた(a)右岸側の伏流ポテンシャル Φ の平面分布 (0.1mコンター) と、(b)伏流強度と伏流総量の場所的分布の一例である。試算では、実際の河川形態を想定して、 $I = 1/200$, $w = 150\text{m}$, $H_0 = 10\text{m}$ と設定した。これらの図より、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。

3. 伏流による河道の水深変化を考慮した伏流現象の数値解析

解析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、堆積層中の流れと河道の流れの両者を解くことを試みた。まず ① 伏流水の基礎式(1)を陰解法にて差分解析し、伏流強度の分布 $q(y)$



a. ポテンシャル分布

b. 伏流強度と伏流総量の場所的变化

図-3 解析解による堆積層への伏流過程の試算結果

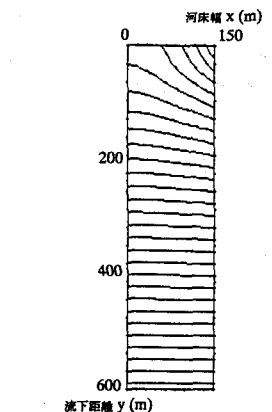


図-4 数値解による

ポテンシャル分布

を求める。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水深分布を計算する。そして、③ 求められた水面形を境界条件として再度伏流解析を行う反復計算を解が収束するまで実施した。解析に当たり、 I, w, H_0 は図-3と同様の値を用い、河道は幅5m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 $k=0.1\text{m/s}$ として、流下距離600m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。図-4は、数値解析による伏流ポテンシャルの分布を、河道水深一定とした場合について示したものである。図-3(a)と比較すれば分かるように、差分解は解析解とほぼ同様な結果を与えている。

図-5に示す河道流れにおいて、流量 Q_1 の等流状態(水深 H_1)が破線で示されている。いま、ダムから維持放流量 Q_t 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、流れが等流状態に漸近する過程を考えると、上流端での流入量は $Q_t = Q_1 + 2Q_s(L)$ 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なった結果を図-6に示す。図の横軸はダムからの河道流入量 Q_t を示し、左縦軸は Q_t に占める伏流総量の割合、右縦軸は等流水深 H_1 に対する水深変化幅 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 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。しかし、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20%に上っている。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解析解が伏流過程の評価に有効であることを示唆している。

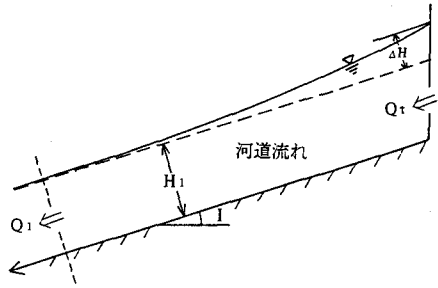


図-5 伏流に伴う河道の水深変化

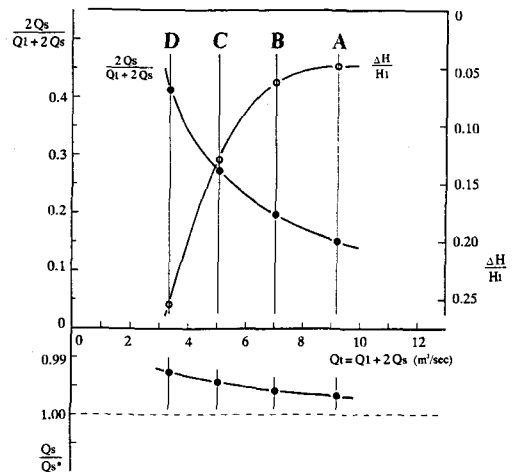


図-6 河道の水深変化が伏流総量に及ぼす影響

4. おわりに

本研究で扱ったような直線的な河川形態では、2節で述べた解析解が有効であることが示された。今後、河道が蛇行する場合など一般的な河川形態について検討するとともに、ダムからの放流水が全て伏没して河道が枯渇する場合についても研究を進めてゆく予定である。

参考文献

- 1) 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，昭和57年3月。
- 2) 原田守博：環境維持流量評価のためのダム下流部の伏流過程に関する考察，環境システム研究，Vol.21，pp.85-93，土木学会，1993。