

(15) 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

A CONSIDERATION TO THE RIVER-BED FLOW IN DOWNSTREAM OF DAM
FOR EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL PRESERVATION DISCHARGE

原 田 守 博 *
Morihiro HARADA*

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

KEYWORDS ; river-bed flow, river environment, preservation discharge, dam, permeability, seepage, sedimentary layer

1. はじめに

わが国の多くの河川では、戦後、数多くのダム貯水池が建設されたために、自然河道に流水の乏しい流域が各地で見られる結果となった。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。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、部分的に成果を挙げている流域もある。しかしながら一方で、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大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いえる。本研究は、こうした問題意識のもとに、貯水池から放流された流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、ダム下流部における河川流況の保全に必要な維持流量を評価するための基礎情報を提供しようとしたものである。

* 名城大学理工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Meijo University

2. 問題の設定

2. 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・塩害防止・河口閉塞防止・河川管理施設の保護・地下水位の維持・動植物の保護・流水の清潔保持・水利流量などを総合的に考慮して定めものとされている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や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、必要な水量と水質を定量化をめざして、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100km²当り0.3~0.5m³/sec程度の値が設定される場合が多い³⁾。しかし、維持流量の評価に関わる上記の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……」といった画一的な基準で議論するのは危険でさえある。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べきではなく、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. 2 対象とする河川形態

解析モデルを設定するに先立って、対象とする河川形態について実例をまじえて述べておこう。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、一般に不透水岩盤で構成される古生層の流域の方が、未固結な第三紀層を流下する河川よりも伏流は少ないと考えられがちである。しかしながら、河谷がたとえ不透水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、写真-1のように河谷に合流する沢から膨大な土砂が流入し、河谷内に相当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(写真-2)が、河床の構成砂礫は粒径が十分に大きいために(写真-3)、河床は非常に高い透水性をもち、河川水のある部分は河床中を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-4)。

本研究では、こうした不透水の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⁾、Bouwer⁶⁾、宇野⁷⁾などをはじめとする多数の研究者が取り組んできているが、それらの多くは河川の横断面における伏



写真-1 崩壊性流域における河道への土砂流入

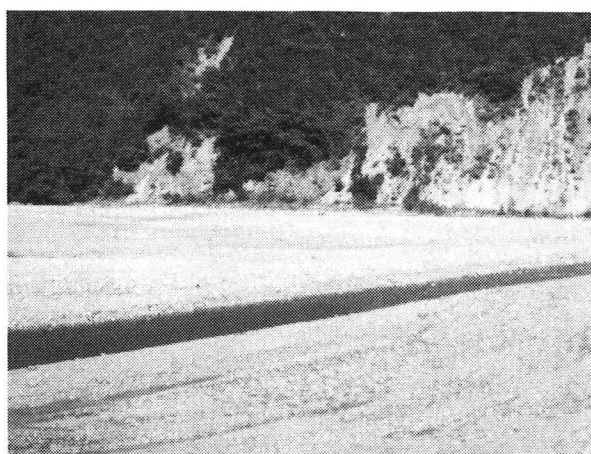


写真-2 堆積河床上の流水河道



写真-3 中流部における河床砂礫



写真-4 伏没により枯渇した河道

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、ここでは少し見方を変えて、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堆積河床に飽和浸透の形式で伏流してゆく状況を考える。このとき流下方向に河川形態が変わらなければ、伏流は永続的に続き、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)と同様の状態が生ずる。本研究では、そうした伏没現象をも念頭において、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 の場所的变化と伏流総量 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、河谷堆積層の透水係数 k と層厚 H_0 および河道から側岸までの河床幅 w と河床勾配 I を媒介として議論することにする。

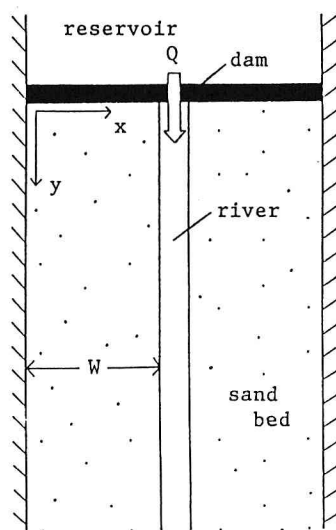


図-1 対象とする河川形態

3. 浸透性河床への伏流現象の理論解析

3.1 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。

- (1) 一般に河道は湾曲しており、また常に河谷の中央を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。
- (2) 河谷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。
- (3) 河谷上に土砂堆積層は均一の厚さで分布し、河谷の勾配と河床勾配とは等しい。
- (4) 伏流水はダルシー則に従って流動し、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、平均的な水深を用いて線形化して扱える。
- (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、 H_0 ：伏流水の代表的水深であり、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。 I ：河谷の流下方向の勾配であり、河谷の標高を $z(y)$ とすると緩勾配では $I = -\partial z / \partial y (>0)$ 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 $h = H_0 + \phi(x, y)$ で表される。

つぎに、河道は河谷の中央に位置するので、図-2のような右岸側の伏流過程のみについて解析を行うことにし、境界条件を以下のように設定した。

$$x = 0 ; \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$x = w ; \phi = 0 \quad (3)$$

$$y = 0 ; \frac{\partial \phi}{\partial y} = I \quad (4)$$

$$y \rightarrow \infty ; \frac{\partial \phi}{\partial y} \rightarrow 0 \quad (5)$$

(2)

(3)

(4)

(5)

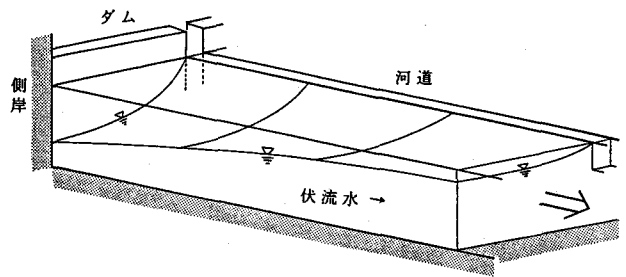
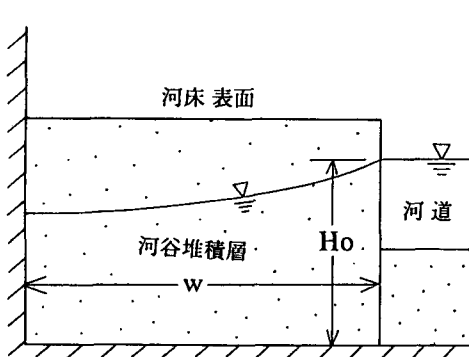
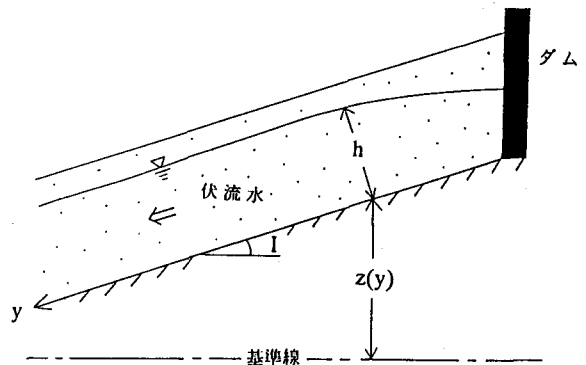


図-2 ダム下流部の伏流過程

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。まず x 方向について、式(2)は側岸が不透水であることを示し、式(3)は河道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。 y 方向について見れば、式(4)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(5)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。



(a) 横断(x)方向



(b) 縦断(y)方向

図-3 設定した境界条件の模式図

これらの境界条件のうち、式(3)については若干の検討を加えねばならない。式(3)は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って流下方向に変化する。その変化量は、浸透性河床上の水面形方程式⁸⁾に伏流強度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、伏流を伴う河道流量の変化は、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、一般に伏流強度の大きさに比べ水深の変化幅は小さいうえ、伏流強度は伏流強度は流下に伴って減少する。そこで本研究では、伏流強度の場所的分布を探ることを優先的に考え、伏流量の評価に大きな影響を与えない範囲で、敢えて河川水深一定の仮定をおくことにする。

3. 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(1)を解析する。変数分離法により $\phi(x, y)$ の一般解は、

$$\phi(x, y) = \{ C_1 \cos \sqrt{\lambda} x + C_2 \sin \sqrt{\lambda} x \} \{ C_3 e^{m_1 y} + C_4 e^{m_2 y} \} \quad (6)$$

ここに、 $C_{1,2,3,4}$ ：未知定数、 λ ：正の定数、 m_1, m_2 は相異なる実根であり、 $\alpha = I/H_0$ とすると、

$$m_1 = \frac{1}{2} \{ \alpha + \sqrt{(\alpha^2 + 4\lambda)} \} (>0), \quad m_2 = \frac{1}{2} \{ \alpha - \sqrt{(\alpha^2 + 4\lambda)} \} (<0)$$

境界条件：式(5)により、 $y \rightarrow \infty$ ； $Y'(y) \rightarrow 0$ 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、

$$\phi(x, y) = e^{-Py} (A \cos \sqrt{\lambda} x + B \sin \sqrt{\lambda} x) \quad (7)$$

上式を x 方向に微分し、境界条件：式(2)を用いれば、 $B = 0$ となる。

また、境界条件：式(3)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、

$$\cos \sqrt{\lambda} w = 0 \quad \therefore \sqrt{\lambda} = \frac{(2n-1)\pi}{2w}, \quad n=1, 2, \dots \quad (8)$$

$$\text{以上により、} \quad \phi(x, y) = A e^{-Py} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (9)$$

したがって、次の無限級数もまた解である。

$$\phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-P_n y} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x, \quad \therefore \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{y=0} = \sum_{n=1}^{\infty} -P_n A_n \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (10)$$

境界条件：式(3)(4)により、

$$0 \leq x < w; \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{y=0} = I \quad (11),$$

$$x = w; \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (12)$$

式(11)(12)で表される関数 $\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0}$ を周期 $4w$ をもつフーリエ余弦級数で表現すると,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{2n-1} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \\ \text{ここに, } \beta_{2n-1} &= \frac{2}{w} \int_0^w I \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \, dx = \frac{4I}{(2n-1)\pi} \sin \frac{(2n-1)\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\text{式(10)=(13)であるから, } A_n = \frac{-4I}{(2n-1)\pi \cdot P_n} \sin \frac{(2n-1)\pi}{2}$$

よって, 堆積層中の伏流水の水深分布は次式で表される.

$$H_0 + \phi(x, y) = H_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I \cdot (-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi \cdot P_n} \cdot e^{-P_n y} \cos \frac{(2n-1)\pi}{2w} x \quad (14)$$

$$\text{ここに, } P_n = \frac{1}{2} \left[-\alpha + \left\{ \alpha^2 + \left(\frac{(2n-1)\pi}{w} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \quad (15)$$

上式を用いることにより, 伏流水の平面的なポテンシャル分布 $\Phi(x, y)$ は次式で与えられる.

$$\Phi(x, y) = \{H_0 + \phi(x, y)\} \cos I + z(y) \quad (16)$$

3.3 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単位幅当りの伏流量 $q(y)$ は,

$$q(y) = k \cdot H_0 \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=w} \quad (17)$$

で求められる. ここに, k : 河谷堆積層の透水係数である. 式(14)(15)により, $q(y)$ は

$$q(y) = k \cdot H_0 \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=w} \cdot \cos I = \frac{2kH_0I \cdot \cos I}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-P_n y}}{P_n} \quad (18)$$

となり, ダム地点から流下距離 L までの伏流量の総和 $Q_s(L)$ は次式で表される.

$$Q_s(L) = \int_0^L q(y) dy = \frac{2kH_0I \cdot \cos I}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - e^{-P_n L})}{P_n^2} \quad (19)$$

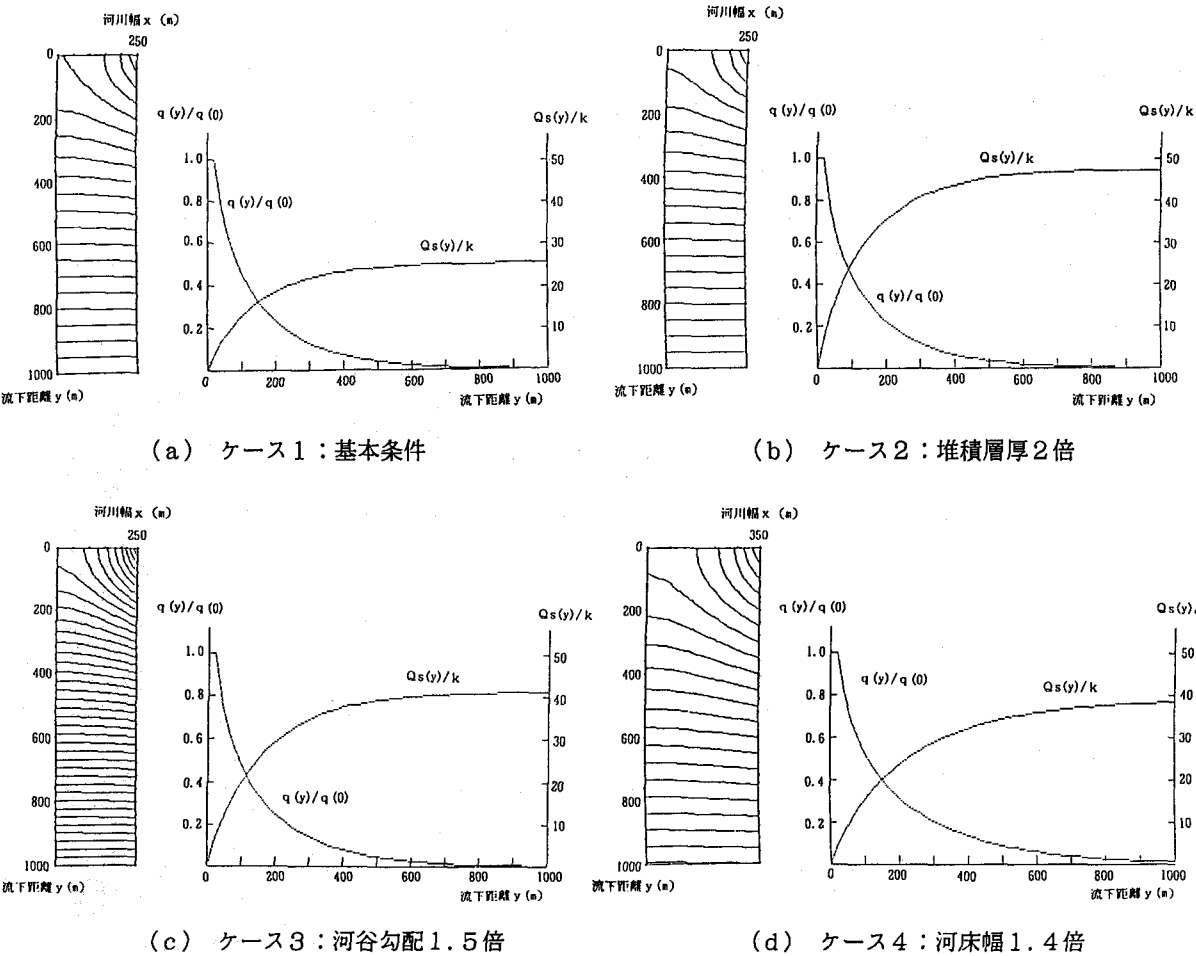
したがって河道流量 $Q_r(L)$ は, ダムからの放流流量を Q とすると, $Q_r(L) = Q - 2Q_s(L)$ まで減少する.

4. 環境維持流量と下流部の河川流況

上述の理論解を用いて実際の伏流状況を試算してみる。表－1 に例として設定したパラメータ値を示す。これは、粗礫によって構成される幅広い河床をもった中流から上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(24)から求めた右岸側の伏流水のポテンシャル分布と、式(26) (27) から求めた伏流強度 q および伏流総量 Qs の流下方向の変化を 図－4 (a)～(d) に示す。まず、ポテンシャル Φ 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

表－1 試算に用いたパラメータ値

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
堆積層厚 H_o (m)	10	20	10	10
河谷勾配 I	1/100	1/100	1/67	1/100
河床幅 w (m)	250	250	250	350



図－4 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

く傾斜するものの、数百メートル下流では河道水位と同じレベルまで上昇し、その後は河床勾配に従って流下していることが分かる。これに対応して、河道から河床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、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、300 m 下流での伏流強度はダム直下の値の 10 数%にまで減少し、800 m より下流では事実上、伏流は生じていない。ちなみに河床の飽和透水係数を $k = 5 \times 10^{-2} \text{ (m/sec)}$ とすると、ダムから 800m 下流までの伏流総量は、右岸側だけで約 $1.35 \text{ (m}^3\text{/sec)}$ に達することがわかる。すなわち、河道の流量はダム直下から数百 m の範囲で減少するが、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、ダムからの放流量が仮に $5 \text{ (m}^3\text{/sec)}$ であっても、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 のように河床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。

5. 水理実験

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-5 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開水路とそれに面する浸透層とから成っている。堆積河床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、水路部分の水深および水路とビーズ層各々からの流出量を測定したが、実験規模が小さいことや水路末端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-5 に示す結果が得られた。これは、ポテンシャル分布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ることができる。

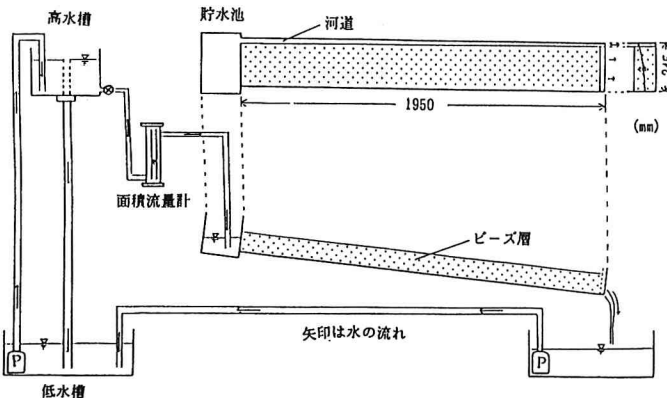


図-5 実験装置の模式図

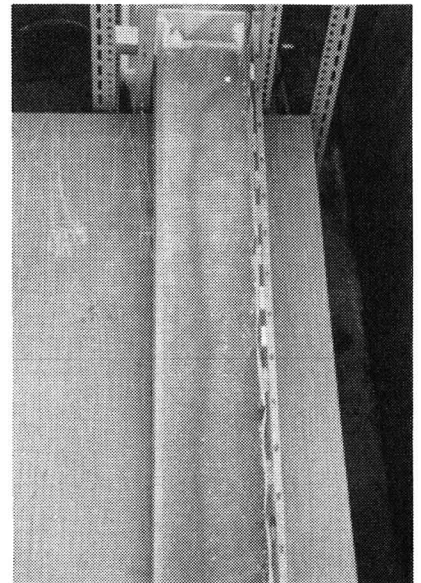


写真-5 ビーズ層中の浸透流の可視化

6. おわりに

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なうとともに、室内実験との比較を試みた。得られた知見をまとめると、以下のようである。

- (1) 伏流水のポテンシャル分布は、ダム直下で大きく変化するものの、ある程度下流では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、流下にともない急速に減少する。
- (2) 理論解析によると、河道から河床への伏流強度および伏流総量は、河床の飽和透水係数・河床層厚（または河道部の水深）・河谷勾配にはほぼ比例し、河道から側岸までの河床幅に反比例する。
- (3) 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、理論の妥当性が定性的に確認された。

3節で述べたように、本論文ではダムから下流に河道が直線的に伸びた場合を対象としてきたが、実際の河道は河床上の砂州をぬって蛇行することが多い。また、山地部では渓谷の側岸そのものが複雑に湾曲しているため、ダム下流部の伏流現象も本論文のように単純ではないと考えられる。こうした湾曲した河川形態についても、今後、理論的検討を進める予定である。

謝 辞：本研究を進めるに当たり、名城大学理工学部長 岩垣雄一教授より有益な助言を賜った。また、中電工事(株) 滝 充弘氏には維持流量に関する文献資料をお見せ頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

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，昭和61年7月。
- 2) 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，平成3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，昭和57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) 原田守博・上田淳一・高橋宏幸：河谷堆積層への伏流過程に関する理論解析，土木学会中部支部・平成4年度研究発表会講演概要集，Ⅱ-29，pp. 201-202，1993.