

捨石堰の「水位－流量」特性を規定する水理量

"DISCHARGE-WATER-LEVEL" CHARACTERISTICS IN A FLOW THROUGH A PERMEABLE RUBBLE MOUND WEIR

道奥康治¹・前野詩朗²・古澤孝明³・羽根田正則³

Kohji MICHIOKU, Shiro MAENO, Takaaki FURUSAWA and Masanori HANEDA,

¹正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

³学生員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

A rubble mound weir is designed to be a discharge controlling system in nature-friendly river works. This allows streamwise transports of aquatic lives as well as of physical and chemical substances. A riverine ecological web might be better preserved by such a river structure than by conventional types of weirs and dams that completely block streamwise immigration of aquatic lives. For both purposes of flood control and water reservation, a "discharge-water-level" relationship is required in order to perform the structural design. In the present study flow discharge through the porous weir is experimentally examined in laboratory test flumes. The experimental condition is limited to a submerged flow in which the water surface is kept below the weir's crown. The flow discharge is correlated with hydraulic parameters such as water levels, weir's porosity and length, etc.. Performing a one-dimensional flow analysis, the discharge is successfully described as a function of the parameters. The agreement between the theory and experiment is satisfactory. The present theory would provide a design guideline of the structure.

Key Words : Porous weir, rubble mound, subsurface flow, flow resistance, discharge curve, one-dimensional analysis

1. はじめに

ダムや堰など河川の横断構造物は、河川生態系や各種物質の上下流方向移動を阻止する。土砂問題に象徴されるように、物質循環の非平衡は流域の防災・環境面に様々なマイナスの影響を与える。今後の河川管理には水系一環で上流から下流に至る物質循環の連続性を確保することが求められている。

著者らは石礫・ブロックなどを積み上げて構築される図-1のような「捨石堰」を考え、水理設計のための技術的課題を検討してきた¹⁾。コンクリートや鋼板など不透過性の堰構造物に比べると、生態系・物質の通過が容易であり、河川縦断の物質循環を阻害することは少ない。捨石堰の疎通能や安定性など水理特性が明らかになれば、流量・水位制御システムとして設計することが可能となる。捨石堰には、本来の水位調整機能の他に、①流れの減勢、②再曝気、③生物・物質の移動経路の提供など付加的な機能を期待することができる。

捨石堰の水理設計を実施するためには、以下の情報が必要である。

- a) 水位－流量曲線と堰諸元の関係
 - b) 流体力と堰体の安定性
 - c) 土砂による間隙の目詰まりと堰上流の堆砂
 - d) 堰上流の貯水池水質、堰の再曝気・水質浄化能力
 - e) 魚類、甲殻類など水生生物の挙動
- c)は土砂水理学的課題、d)、e)は環境水理学的課題である。

本文では、a)に関して、捨石堰の上下流水深、堰長さ、間隙率などの特性量が通過流量におよぼす影響を実験的・理論的に検討する。また、b)の捨石堰の安定性については、間隙水圧や流体力との関係から別途検討を行っている²⁾。

2. 関連する河川工学的な問題

多自然的な河川改修の普及にともない、護岸基部や落差工に石礫や植生など多孔性の自然材料を用いる施工例が増えている。従来型の透過水制やブロック護岸なども

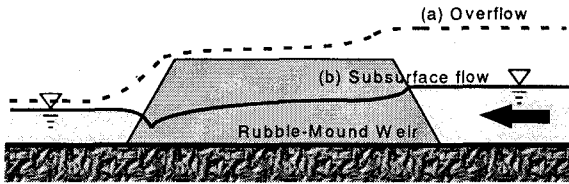


図-1 捨石堰を通過する流況

含め、多孔質材料を用いた水工構造物では流れが多孔部を通過・越流する場合が多く見られる。構造物周辺の流況や流体力を評価して構造設計を行うためには、捨石堰の水理特性を定量的に評価しなければならない。

一方、粗な砂礫から構成される砂州内を河川水が伏流する場合、砂州多孔体の水質浄化作用を期待できる。砂州の水質浄化機能は、砂州内の通過時間や流量に依存していることから、本研究は河川自浄作用を考える上でも有用である。

3. 通過流量の解析

(1) 対象とする流れ

ここでは、水面が堰天端より低い図-1に示す(b)の非越流タイプについて通過流量を求める。取水堰として用いる場合には、(b)の低水流況が一般的と考えられる。

簡単のために、堰形状を図-2のような直方体として一次元解析を行う。解析区間を上流から、①堰上流側境界 ($x=0$) 周辺の急変流、②堰体内 ($x=0\sim L$) の漸変流、③堰下流側境界 ($x=L$) 周辺の急変流に分ける。ここで、 L は堰長である。

(2) 解析の概要¹⁾

単位幅流量を q とする。各区間の流れは以下のように解析される。

① 堰上流端 ($x=0$)

開水路流から堰体内の流れへ移行する際に流水断面積は急減する。幅や水深が急縮する開水路流と同じ運動量原理に基づけば、堰上流の水深 h_0 は図-2のように堰内で h_1 へと急減する。境界をはさんだ二断面間に運動量保存則を適用すれば、水深 h_0 と h_1 との比 $\gamma_1=h_1/h_0$ は、Froude数 F_0 の関数として次式で与えられる。

$$F_0^2 = \frac{\lambda^2 \gamma_1 (1 - \gamma_1^2)}{2(\delta_1 - \delta_0 \lambda \gamma_1)} \quad (1)$$

ここで、 $F_0 = q / \sqrt{gh_0^3}$ ：堰上流におけるFroude数（または無次元流量）、 g ：重力加速度、 δ_0 、 δ_1 ：上下流側断面における運動量補正係数、 $\lambda = n^{2/3}$ 、 n ：堰体の間隙率である。

実際には、 h_0 から h_1 への水面形は、図-1に示すようにある有限区間 ΔL で遷移する。ヘルシウ型捨石堰モデルの実験¹⁾では側壁からの水面形が計測され、遷移区間

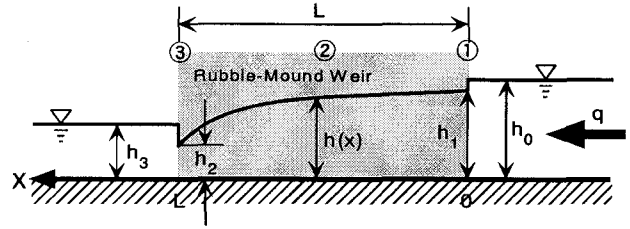


図-2 一次元解析における諸量の定義

長が $\Delta L = o(h_1)$ であることを確認したが、捨石堰を用いた本実験においては水面形計測が困難であった。ここでは、側壁で観測された水面形では $\Delta L \approx 0$ であること、本実験条件では $\Delta L/L \approx o(h_1/L) \leq 0.1$ であることから、図-2のように水面遷移区間長を $\Delta L=0$ として以後の解析を実施する。

② 堰体内 ($x=0\sim L$)

Ward³⁾によって得られた抵抗則を、ここで対象とするような自由水面をともなう多孔質流へ適用して、堰体内の動水勾配をあらわすと、堰体内の運動方程式は次のようになる。

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{U^2}{2g} \right) + \frac{dh}{dx} - i + \frac{\nu}{gK} U_s + \frac{c}{g\sqrt{K}} U_s^2 = 0 \quad (2)$$

$\frac{\nu}{gK} U_s \quad \frac{c}{g\sqrt{K}} U_s^2$
 $D_{lam} \quad D_{turb}$

ここで、 $U = q/nh$ ：実流速、 $U_s = q/h$ ：見かけの流速、 i ：水路床勾配、 ν ：動粘性係数である。多孔体の流体抵抗特性を規定する係数(c, K)は次式で与えられる^{4), 5)}。

$$c = f \cdot \left(\frac{d_m}{\sqrt{K/n}} \right)^{-3/2}, \quad \sqrt{K} = e \cdot d_m \quad (3)$$

ここで、 d_m は粒径である。Arbhabhirama⁴⁾や清水⁵⁾は式(3)の未定定数(e, f)として多孔質管路流の実験から(e, f)=(0.028, 100)を得ている。

式(2)は水面形 $h(x)$ に関する方程式を構成する。これを図-2の境界条件

$$x=0 \text{ で } h=h_1, \quad x=L \text{ で } h=h_2 \quad (4)$$

のもとで積分する。

得られた解を上流断面での諸量(h_0, q)を用いて無次元化すれば次式を得る。

$$\begin{aligned} & \gamma_1 - \gamma_2 + li \\ &= \frac{a}{2} \ln \left| \frac{\gamma_2^2 - a\gamma_2 - b}{\gamma_1 - a\gamma_1 - b} \right| + \frac{a^2/2 + b}{\sqrt{a^2 + 4b}} \ln \left| \frac{(\gamma_1 - \beta)(\gamma_2 - \alpha)}{(\gamma_1 - \alpha)(\gamma_2 - \beta)} \right| \\ & - \frac{d}{\sqrt{a^2 + 4b}} \left\{ \frac{1}{\alpha} \ln \left| \frac{\gamma_1(\gamma_2 - \alpha)}{(\gamma_1 - \alpha)\gamma_2} \right| - \frac{1}{\beta} \ln \left| \frac{\gamma_1(\gamma_2 - \beta)}{(\gamma_1 - \beta)\gamma_2} \right| \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、

$$(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \left(a \pm \sqrt{a^2 + 4b} \right),$$

$$a = \frac{F_0^2}{ki \text{ Re}}, \quad b = \frac{cF_0^2}{\sqrt{ki}}, \quad d = \frac{F_0^2}{n^2} \quad \text{であり,}$$

$\gamma_2=h_2/h_0$: 堰下流端における無次元水深, $Re=q/\nu$: Reynolds 数, $k=K/h_0^2$: 堰体間隙の無次元長さスケール, $l=L/h_0$: 無次元堰長である.

式(5)は流量 q , 堰上下流端の水深(h_1, h_2), 堰長 L の無次元量とおしを次のように関連づける.

$$\phi(F_0, \gamma_1, \gamma_2, l)=0 \tag{6}$$

その他に, 式(6)は無次元パラメータ($Re, n, d_m/h_0, i$)によっても規定される.

③ 堰下流側端 ($x=L$)

下流側が射流の場合と常流の場合で, $x=L$ における水面接続条件は以下のように異なる.

(a) 堰の下流が射流の場合 (C-flow)

$x=L$ が支配断面となり, 流量はここで規定される. h_2 は限界水深 h_c となり, 式(2)の特異点条件から次式を得る.

$$\frac{h_c}{h_0} = \frac{h_2}{h_0} = \gamma_2 = \left(\frac{F_0}{n}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{7}$$

(b) 堰の下流が常流の場合 (S-flow)

水流は捨石間隙中から開水路へと急転する. ここで, 流れは多孔体内でも開水路区間でも常流状態 (フルード数が1以下) に保たれた上での遷移である. 幅や水深が急転する開水路流の場合と同様, 運動量を保存するためには水深が h_2 から h_3 へと増加しなければならない (図-2). 流水断面の急転を考慮して運動量保存を定式化すれば水深 h_2 と h_3 の関係が次式のように与えられる.

$$F_0^2 = \frac{\lambda \gamma_3 (\gamma_2^2 - \gamma_3^2)}{2 \{ \delta_3 \lambda - \delta_2 (\gamma_3 / \gamma_2) \}} \tag{8}$$

ここで, $\gamma_3=h_3/h_0$ は堰下流側の無次元水深であり, $x=0$ の場合と同様, 水面形の遷移区間長を0としている.

(3) 流量算定法

以上の各区間の解を連立させて上下流の水面形が接続される. 流量は堰下流側の条件に応じて以下の手順で算定される.

(a) 堰の下流が射流の場合 (C-flow)

式(1), (6), (7)において(γ_1, γ_2)が媒介変数となり, Froude数 F_0 (無次元流量) は無次元堰長($l=L/h_0$)あるいは無次元水深 h_0/L の関数として次のように与えられる.

$$F_0 = \Omega_C(h_0/L) \tag{9}$$

(b) 堰の下流が常流の場合 (S-flow)

式(1), (6), (8)において(γ_1, γ_2)が媒介変数となり, F_0 が l (または h_0/L) と γ_3 (または $(h_0-h_3)/h_0 \equiv \Delta h/h_0$) の関数として次のように算定される.

$$F_0 = \Omega_S(h_0/L, \Delta h/h_0) \tag{10}$$

ここで, $\Delta h/h_0$ が下流からの堰上げ効果をあらわす無次元パラメータである. $\Delta h/h_0$ が増大するほど下流からの背水の影響は小さくなり, S-flowはC-flowへと漸近する. この時, 式(10)は式(9)に一致する.

式(9),(10)において流量を規定するその他の無次元パラ

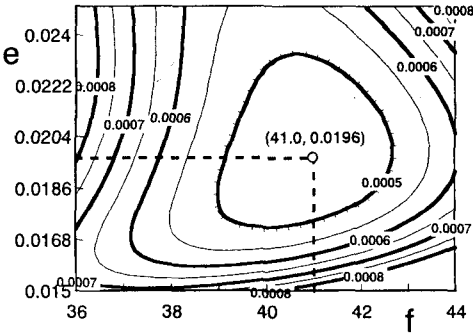


図-3 堰体パラメータ (e, f) の同定

表-1 実験条件

	実験Ⅰ (K-水路)	実験Ⅱ (O-水路)
平均粒径 d_m	1.91cm, 3.46cm	1.95cm, 4.1cm
堰長さ L	30cm, 75cm	30cm, 60cm
間隙率 n	0.32~0.37	0.37, 0.38
水路勾配 i	1/200, 1/400, 1/800	1/400
Reynolds数	250~4000	5000~18000
Froude数	0.008~0.055	0.01~0.07

メータは, Re : レイノルズ数, n : 堰体材料の間隙率, d_m/h_0 : 無次元粒径, i : 河床勾配である.

(4) 堰体パラメータの同定

石礫やブロックなど多孔質材料からなる堰体の流体抵抗は式(3)中のパラメータ (c, K) に規定される. ここでは, 式(3)が捨石堰にも適用できると考え, 同式に含まれる経験定数(e, f)を求める. 全実験ケースについて, 流量の理論解と実験値との誤差の自乗和 ε を算定し, これが極小化されるような(e, f)の組み合わせを求めた. 図-3には, 本実験から得られた ε と(e, f)との関係を示す. 同図より最適値として(e, f)= (0.0196, 41.0) が得られた. これは, 清水らによる結果⁹⁾(e, f)=(0.028, 100)ときわめて近く, 式(3)は彼らの実験とは条件の異なる捨石堰の流れにも適用できる普遍的な関係である.

4. 水理実験

昨年度, C-flowのみを対象に行った実験では, 水路 (以降, 「K-水路」と称する) の供給流量が小さく, 通過流量におよぼすReynolds数の影響を無視することができなかった. 本年度は大型水路 (以降 「O-水路」と称する) を用いた実験を並行し, Reynolds数の影響, すなわち捨石堰の模型縮尺効果を確認した. さらに, C-flowとS-flowの両方について広範な水理条件のもとに実験を行った. いずれの実験においても石礫材料を一定高さの直方体に積み上げ, ネットで崩れないように補強して捨石堰を構築する.

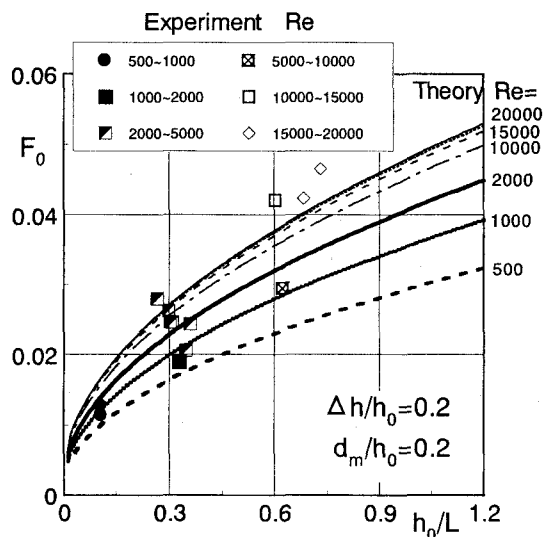


図-4 $F_0 \sim h_0/L$ におよぼすReynolds数の影響

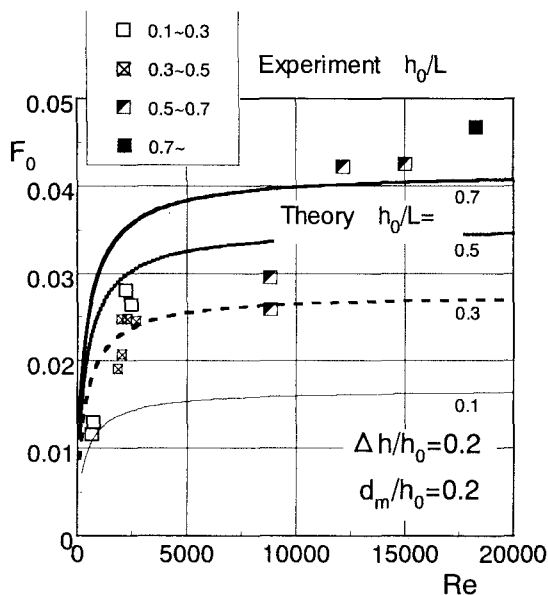


図-5 F_0 とReの関係

(a) K-水路(実験Ⅰ)は、神戸大学工学部に設置された長さ7.0m×高さ0.2m×幅0.45mの可変勾配開水路で、可能最大流量は $Q_{\max}=0.01\text{m}^3/\text{s}$ である。下流側の水深は水路下流端のスルースゲートで調整される。

(b) O-水路(実験Ⅱ)は、岡山大学環境理工学部に設置された長さ5.0m×高さ0.6m×幅0.4mの可変勾配開水路で、可能最大流量は $Q_{\max}=0.05\text{m}^3/\text{s}$ である。下流側水深は水路下流端の倒伏堰で調整される。

流量・河床勾配の調整と下流端堰の操作によって、堰上流側の水深 h_0 、上下流の水位差 Δh を変化させた。水面形は1/10mm精度のポイントゲージにより計測された。

実験条件を表-1に示す。同表からわかるように、実験ⅠとⅡの間ではReynolds数以外の水理量をほぼ一致させており、規模の異なる二つの水路を用いて捨石堰の模型縮尺効果や水理特性を検討した。

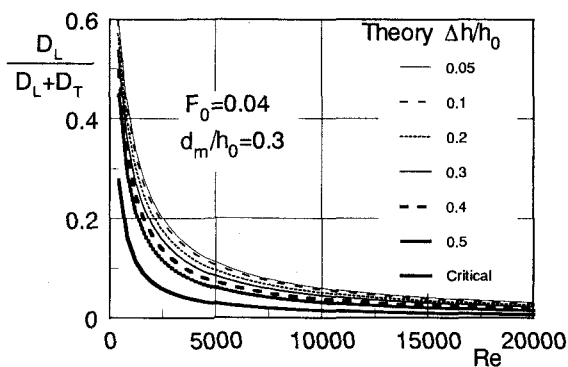


図-6 層流抵抗力の割合とReynolds数

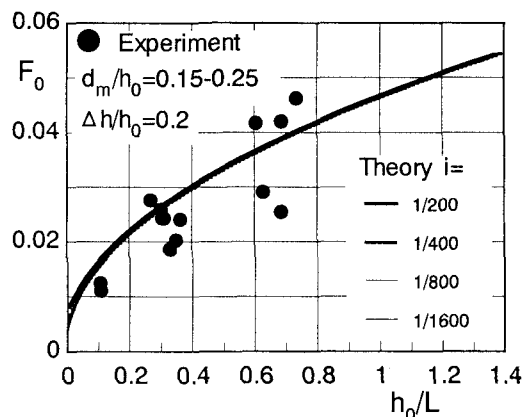


図-7 水路床勾配の影響

5. 通過流量におよぼす水理特性量の影響

(1) Reynolds数の影響(模型の縮尺効果)

式(3)のように、多孔体中の流水抵抗は層流成分と乱流成分からなる。昨年の実験では、最大流量が限定されたため、Reynolds数が流れの特性に大きく影響した。しかし、実際の河川では粘性の影響が小さいため、縮尺効果があらわれない程度に大きなスケールの実験を行う必要がある。

図-4、5には、 $\Delta h/h_0=0.2$ 、 $d_m/h_0=0.2$ の場合においてReynolds数が流量 F_0 に及ぼす影響をあらわす。表-1に示すように実験Ⅱ(O-水路)はおおよそ $Re>5000$ の範囲で行われた。この条件下では流量におよぼすReynolds数の影響をほぼ無視し得ることが両図より明らかである。

図-6は式(2)中の抵抗力のうち、第4項の層流成分 D_L が全抵抗成分(D_L+D_T)に占める割合 $D_L/(D_L+D_T)$ をReの関数としてあらわしたものである。同図からもおおよそ $Re>5000$ の範囲において、粘性の影響が無視できることが再確認される。

(2) 水路床勾配の効果

堰体内と周辺の流れは急変的であり、水路床勾配に比べて水面勾配は大きい。したがって、よほど急勾配の河川でない限り流量に及ぼす勾配の影響は小さいと推

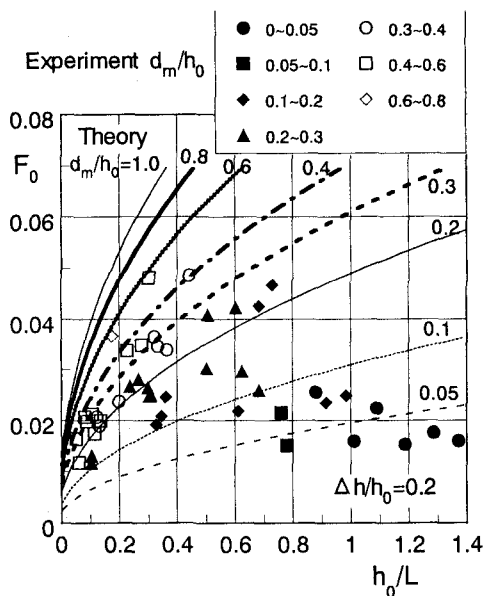


図-8 ($F_0 \sim h_0/L$)に及ぼす無次元粒径 d_m/h_0 の影響

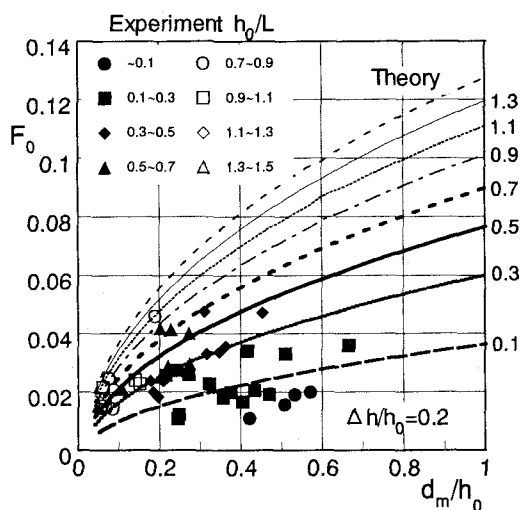


図-9 F_0 と無次元粒径 d_m/h_0 の関係

察される。図-7はいくつかの無次元粒径 d_m/h_0 に対して示した流量 F_0 と水深 h_0/L の関係である。この図から本実験範囲 ($i=1/1600 \sim 1/200$) においては、河床勾配が流量におよぼす影響は非常に小さいことがわかる。ただし、 $i>1/100$ の急勾配水路においても実験・解析を展開し、河床勾配の影響を確認する必要がある。

(3) 粒径 d_m の影響

無次元粒径 d_m/h_0 が流量 F_0 に及ぼす影響を $\Delta h/h_0=0.2$ の場合について図-8, 9に例示する。無次元粒径 d_m/h_0 が大きいほど間隙が大きくなるため、流量 F_0 は増加する。また、 d_m/h_0 が小さい範囲ほど d_m/h_0 の影響は大きい。以上より、流量におよぼす無次元粒径 d_m/h_0 の影響を無視できないことがわかる。

(4) 背水による堰上げ効果 h_3 (or Δh) と堰長 L の影響

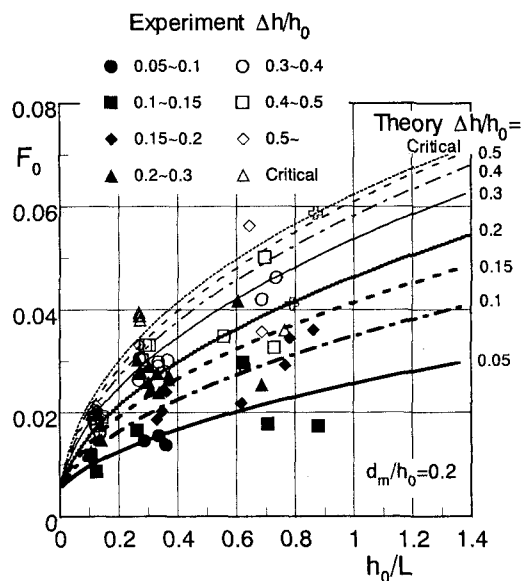


図-10 ($F_0 \sim h_0/L$, $\Delta h/h_0$)の関係

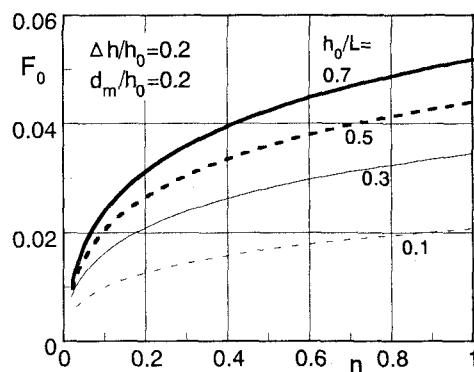


図-11 間隙率 n と流量 F_0 の関係

$d_m/h_0=0.2$ の場合について、 F_0 と(h_0/L , $\Delta h/h_0$)との関係を図-10に示す。同図は無次元化された「水位-流量」曲線に相当する。横軸の h_0/L は上流水深または堰の長さの効果とみなすことができる。同図は水深 h_0 が大きいほど、また堰長 L が短いほど流量が増加することを示している。また当然ではあるが、堰上下流間の水位差 $\Delta h/h_0$ が大きいほど流量は増加する。 $\Delta h/h_0$ が小さいということは、堰下流からの背水の影響が大きいことを意味する。堰上げによって $\Delta h/h_0$ が減少するほど流量は減少する傾向が本理論により検証されている。逆に、 $\Delta h/h_0$ が大きな極限では、堰上げ効果がなくなり、捨石堰下流端で生じる支配断面が流量を規定するようになる。すなわち、S-flowがC-flowに漸近し、流量は $\Delta h/h_0$ とは無関係に h_0/L によってのみ規定される。理論から推定されるこの傾向は実験値と良好に一致している。

(5) 堰体間隙率 n の影響

捨石堰を構築する場合、堰体材料として自然石だけを用いるとは限らず、様々な幾何形状・間隙率の人工ブロックや素材を用いて施工することを想定しなければな

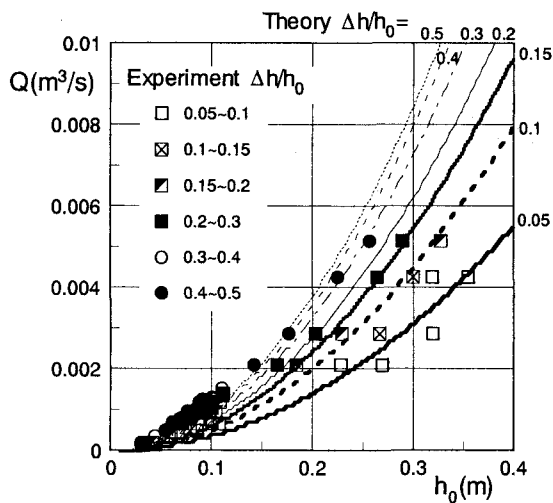


図-12 $Q \sim h_0$ 曲線の例

らない。本実験では表-1のような材料を用いたため、間隙率 n の範囲が必ずしも広くなく、間隙率が流量に及ぼす影響を実験的に示すことはできなかった。ここでは、理論に基づいて間隙率の影響を検討し、図-11に示す。間隙率 n の増大とともに流量が増加すること、この増加傾向は流量の小さい条件においてほど顕著であることがわかる。

(6) 水位—流量曲線

実施設計においては捨石堰の水位—流量曲線が必要である。本実験範囲における d_m/h_0 の平均値(=0.38)に対して理論流量を算定し、 $Q \sim h_0$ の関係を求めた。一例を図-12に示す。下流の背水の影響を受けた場合も含み広範な水理条件のもとで流量が適切に評価されている。

(7) 全実験ケースに関する「実験値—理論値」間の比較

様々なパラメータが関与しているため、全データについて「実験値—理論曲線」間の比較はできない。ここでは、全実験ケースについて理論流量 Q_{TH} を求め、対応する実験値 Q_{EX} との比較を図-13に示す。全てのスケールと水理条件において本理論による流量評価が妥当である。

6. むすび

捨石堰が水利構造物として利用される場合、常時の流れはここで検討したような図-1(b)の状態にあると考えられる。農業用取水堰など経験的に構築された捨石堰が中小の河川に見られるが、本理論に基づいて堰の諸元を決定すれば合理的な水理設計が可能となる。また、本理論を用いれば動水勾配などの関数として粗な多孔質構造物を通過する流量が算定されるので、透過水制、石礫・ブロックなどで構築された護岸、粗礫砂州などの流れを解析することも可能となる。

今後、高水時に出現する越流型流れ(図-1の(a)の状

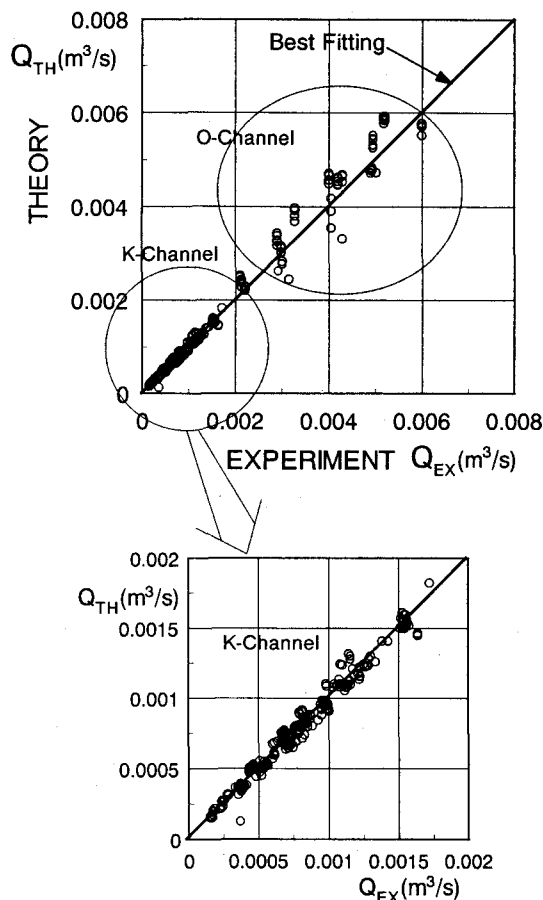


図-13 理論流量 Q_{TH} と実験値 Q_{EX} の比較(全データ)

態)も対象にして、越流量や堰構造体の安定性を検討する必要がある。

本研究は平成12,13年度文部省科学研究費補助金、基盤研究(C)(2)(代表:道奥康治, 課題番号:12650513)の援助のもとに実施された。岡山大学での水理実験に際しては同大学院自然科学研究科、大西利典・森永智両氏の多大なご協力を得た。以上、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 道奥康治・福岡達信・古澤孝明: 捨石堰における通過流量特性, 水工学論文集, 第45巻, pp.391-396, 2001.
- 2) 前野詩朗・道奥康治・森永智・大西利典: 自然石を用いた堰の水理特性, 水工学論文集, 第46巻, 2002.
- 3) Ward, J.C.: Turbulent flows in porous media, J. Hydr. Eng., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964
- 4) Arbbabhirama, A. and Dinoy, Antonio A.: Friction factor and Reynolds number in porous media flow, Jour. Hydr. Eng., Proc. ASCE, Vol.99, HY6, pp.901-911, 1973.
- 5) 清水義彦: 種々の河床粗度形態を有する開水路流れの構造に関する研究, 京都大学学位論文, 1992.

(2001. 10. 1受付)