

捨石堰における通過流量特性

PERMEABILITY OF A RUBBLE MOUND WEIR

道奥康治¹・福岡達信²・古澤孝明³

Kohji MICHIOKU, Tatsunobu FUKUOKA and Takaaki FURUSAWA

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

²正会員 修(工) 建設技術研究所名古屋支店 (〒460-0003名古屋市中区錦1-3-18)

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)

The authors propose a rubble-mound-weir as a flow control structure of nature-friendly. It is expected that this type of weir would allow aquatic animals traveling along the streamwise direction, while conventional structures made of metal and concrete completely block their movement along a river. Once a discharge flow-depth relationship is identified, even such a permeable structure could have a function to impound water and control river flow. The present paper is to examine hydraulic characteristics of the rubble-mound-weir. Main focus was placed on an open channel flow running through the weir. The system is a turbulent flow running through porous media that is connected to an open channel flow at the up- and downstream direction. Water surface profiles and a discharge-water depth relationship were experimentally and theoretically investigated.

Key Words : *weir, rubble mound, subsurface flow, porous media flow, flow resistance, discharge curve*

1. はじめに

堰やダムは河川生態系を縦断方向に分断するため、川の自然環境機能を阻害するものとして非難を受けることが多くなった。写真-1は粗石を用いた落差工の一例（ドナウ川、ドイツ、バーデン・ビュルテンブルグ州）である。これと同様に、自然石を用いて河川生態系が上下流方向に移動できるような透過性の堰上げ構造物ー「捨石



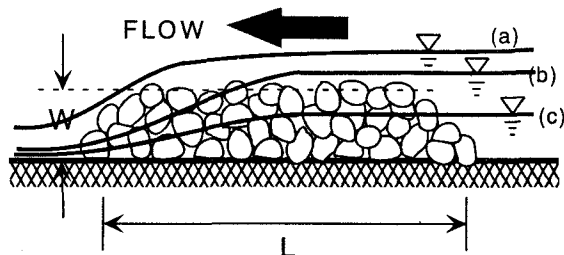
写真-1 ドナウ川の捨石落差工 (Rough Ramp)¹⁾

堰」ーを構築して実用化することを考える。捨石堰は間隙を有して流水疎通性を確保する一方、堰体の流水抵抗によって堰上げ効果も発揮するので、流水の疎通や水生生物の移動を許容しながらも堰機能を発揮することを期待できる。また、水質・生態系の上下流方向の可動性、再曝気による自浄効果の向上などを考慮すると、コンクリートや鋼製の不透過堰より高い環境機能を有すると考えられる。疎通性と堰上げ効果、すなわち「水位ー流量」曲線などの水理特性が明らかになれば中小河川への適用も可能と思われる。本報告では水理実験と流れの一次元解析により捨石堰の水理特性を検討する。

2. 捨石堰を越える流れ

図-1のように粗石を積み上げた捨石堰を考える。現実には、越流状態により次の三種類の流況が存在する。

- (a) **越流型**：全区間で自由水面が堰天端より高い。天端より上層は粗面上の開水路流、下層は被圧の多孔質流の二層構造を有する。
- (b) **遷移型**：上流側では自由水面を有し、「粗面開水路流ー被圧多孔質流」の二層流である。下流側で



(a) 越流型, (b) 遷移型, (c) 非越流型

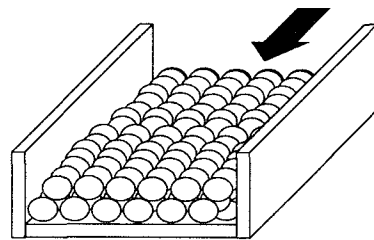
図-1 流れの分類

は水面が多孔質体中に潜り込む。

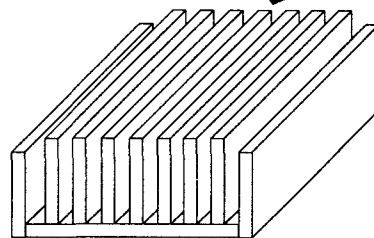
(c) 非越流型：全区間において自由水面が堰天端より低く、多孔質体内に水面を有する。

ここで対象とする流れでは、堰本来の背水機能を発揮するために堰より上流では常流である。一方、下流区間の状態によって、(A) 堰より下流が常流で下流側からの背水の影響を受ける場合(S-flow)と、(B) 下流が射流で堰区間に支配断面があらわれる場合(C-flow)の二ケースに分類される。

越流量を規定する水理量はこうした流況により異なるので、各分類に応じた越流則を考える必要がある。その中で、図-1のいずれの流れを解析する上においても、多孔質体内の疎通能と抵抗特性を知ることが必要である。本研究では、(c)の非越流型流れに対象を限定して実験と一次元解析を実施し、粗な多孔質乱流の抵抗則を用いて水面形と通過流量を検討した。



(a) 捨石モデル



(b) ヘルショウモデル

図-2 堰モデル

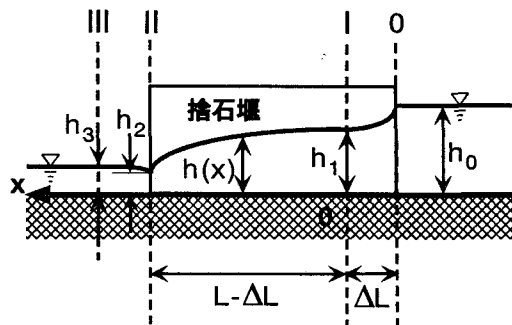


図-3 非越流型流れにおける諸量の定義

3. 実験装置と方法

図-2に示す二種類の実験を行った。一つは、石礫を開水路に直方体状に一定厚さに積み上げた(a) 捨石モデル、もう一つは堰体内の水面形計測のために実施された(b) ヘルショウモデルである。前者の実験は、捨石堰の「流量－水位」特性を明らかにするために実施された。後者の実験は、「流量－水位」特性と水面形について流れの一次元解析と比較し、解析に用いた抵抗則を検証するために実施された。

捨石モデルについては、平均粒径 $d_m = 1.9, 3.6\text{cm}$ の二種類、長さ： $L = 30, 75\text{cm}$ の二種類、高さ： $W = 5 \sim 10\text{cm}$ 、間隙率： $\lambda = 0.43 \sim 0.47$ の範囲で実験条件が設定された。ヘルショウモデルでは長さ： $L = 75\text{cm}$ 、高さ： $W = 25\text{cm}$ 、厚さ 0.8cm の亚克力樹脂製板30枚を 0.7cm 間隔で流れ方向に平行に並べた。この場合、間隙率は $\lambda = 0.47$ で一定である。それぞれの実験において、様々な水路床勾配に対し上流側水深 h_0 が一定となるように流量が設定された。堰上流端と下流端の水深は $1/10\text{mm}$ 目盛り読みのポイントゲージにより計測された。ただし、捨石モデルの場合、図-1(c)の流れとなるように自由水面が堰天端を越えない範囲で流量が調整された。

4. 非越流型流れの水面形、越流量の解析

図-3のように捨石堰をはさむ流れを三区間に分割し、諸量を定義する。0－I区間は開水路流から捨石区間へと接続する部分で、断面急縮をとともう急変流である。同じく、II－III区間も捨石区間から開水路流へと接続する断面急膨の急変流である。両区間とも運動量の保存則を用いて二断面間の水理量を関連づける。

I－II区間は、乱流多孔質流であり、適切な抵抗則を用いれば水面形の一次元解析が可能である。

写真-2にヘルショウモデルの実験における水面形の一例を示す。堰の上流側と下流側の境界付近に急変流が確認される。また、堰区間内では0－I区間の水位急変部より下流へと漸変する水面形が続き、堰下流端で常流から射流への遷移をとともう低下背水曲線が見られる。

以下、各区間について流れのモデル化を試みる。

(1) 0－I区間（急縮流区間）

図-3の断面0－I間、幅 B_0 から B_1 に狭まる急縮流と考えて、0－I区間の運動量保存則は次式のようなになる。

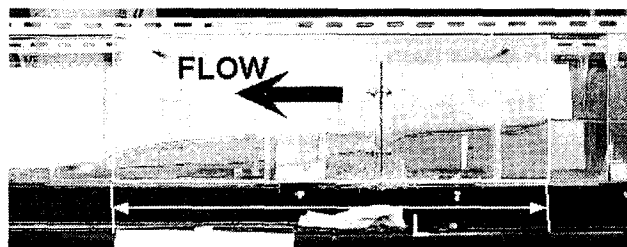


写真-2 ヘルショウモデルにおける多孔質体内の水面形

$$\rho Q(\delta_1 U_1 - U_0) = \frac{1}{2} \rho g B_0 h_0^2 - \frac{1}{2} \rho g (B_0 - B_1) h^2 - \frac{1}{2} \rho g B_1 h_1^2 \quad (1)$$

ここで、 g : 重力加速度、 h : 水深、 Q : 流量、 δ_1 : 運動量補正係数である。また、0-I断面間の急縮位置における水深を $h' = h_0$ とおく。

連続条件、 $Q = U_0 B_0 h_0 = U_1 B_1 h_1$ 、を用いて上式を整理すると

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

を得る。上式より、0-I断面間の水深比 $\gamma_1 = h_1/h_0$ が断面0でのFroude数（あるいは無次元流量） $F_0 = q/\sqrt{gh_0^3}$ の関数として与えられる。なお、ヘルショウモデルの構造より、 $\lambda = B_1/B_0$ を多孔質区間の間隙率とおいている。

(2) I-II区間（堰区間の流れ）

Ward²⁾による多孔質流の抵抗則を用いれば、捨石堰体内のある点における動水勾配は次式で与えられる。

$$I = i - \frac{dh}{dx} = \frac{\nu}{gK} U_s + \frac{c}{g\sqrt{K}} U_s^2 \quad (3)$$

ここで、 ν : 動粘性係数、 $U_s = q/h$: 見かけの流速、 q : 単位幅流量である。式(3)右辺の第1項は層流抵抗、第2項は乱流抵抗である。

係数 c は、Arbhabhiramaら(1973)³⁾によって次のように与えられる。

$$c = 100 \left(\frac{d_m}{\sqrt{K/\lambda}} \right)^{-3/2} \quad (4)$$

ここで、 $\sqrt{K}$ は開水路の径深 $R = A/S$ に相当する長さスケールである。清水は、種々の研究者による実験結果を総合して次の実験式を与えている⁴⁾。

$$\sqrt{K} = 0.0139 d_m \quad (5)$$

I-II区間でのエネルギー保存則は次式のようなである。

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{U^2}{2g} + h + z \right) + \text{Loss} = 0 \quad (6)$$

ここで、 $U = q/\lambda h = U_s/\lambda$: は実流速である。

式(3)の抵抗則を式(6)に代入すれば、多孔質区間におけ

るエネルギー保存則は次のようになる。

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{U^2}{2g} \right) + \frac{dh}{dx} - i + \frac{\nu}{gK} U_s + \frac{c}{g\sqrt{K}} U_s^2 = 0 \quad (7)$$

$U = q/\lambda h = U_s/\lambda$ を考慮して、式(7)は水面形 $h(x)$ を与える次の微分方程式となる。

$$\frac{dh}{dx} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \frac{q^2}{gh^3} \right) = i - \frac{\nu}{gK} \frac{q}{h} - \frac{c}{g\sqrt{K}} \frac{q^2}{h^2} \quad (8)$$

上式を無次元表示すると以下のようになる。

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{i \left(\eta^3 - \frac{F_1^2}{ki \text{Re}} \eta^2 - \frac{c F_1^2}{\sqrt{ki}} \eta \right)}{\eta^3 - \frac{F_1^2}{\lambda^2}} \quad (9)$$

ここで、各変数は断面Iの諸量を用いて以下のように無次元化されている。

$\xi = x/h_1$: 流下方向座標（断面Iで $\xi=0$ ）

$\eta = h/h_1$: 無次元水深

$\text{Re} = q/\nu$: Reynolds数

$F_1 = q/\sqrt{gh_1^3}$: 断面IでのFroude数

$k = K/h_1^2$: 多孔質の無次元長さスケール

式(9)を断面Iでの境界条件

$$\xi=0 \text{ で } \eta=1 \quad (10)$$

の下に積分すると水面形に関する次の解を得る。

$$1 - \eta + \xi i = \frac{a}{2} \ln \left| \frac{\eta^2 - a\eta - b}{1 - a - b} \right| + \frac{a^2/2 + b}{\sqrt{a^2 + 4b}} \ln \left| \frac{(1-\beta)(\eta-\alpha)}{(1-\alpha)(\eta-\beta)} \right| - \frac{d}{\sqrt{a^2 + 4b}} \left\{ \frac{1}{\alpha} \ln \left| \frac{\eta - \alpha}{(1-\alpha)\eta} \right| - \frac{1}{\beta} \ln \left| \frac{\eta - \beta}{(1-\beta)\eta} \right| \right\} \quad (11)$$

ここで、 $a = \frac{F_1^2}{ki \text{Re}}$, $b = \frac{c F_1^2}{\sqrt{ki}}$, $d = \frac{F_1^2}{\lambda^2}$,

$$(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \left(a \pm \sqrt{a^2 + 4b} \right) \text{ とおいている。}$$

式(11)において、断面IIにおける条件

$$\xi=l \equiv (L-\Delta L)/h_1 \text{ で } \eta=\eta_2 \equiv h_2/h_1 \quad (12)$$

を代入すれば、無次元長さ l 、上下流水深比 $\eta_2 = h_2/h_1$ の多孔質体の断面IにおけるFroude数 F_1 が次式のように与えられる。

$$\phi \left(\frac{L-\Delta L}{h_1}, \frac{h_2}{h_1}, F_1 \right) = 0 \quad (13)$$

(3) II-III区間（堰の下流側区間）

前述のように、下流側が射流になる場合と常流になる場合に分類される。

①下流側が射流（断面Ⅱが支配断面）の場合（C-flow）

写真-2のように堰の下流端で急激な水面低下とともに限界水深 h_c があらわれ、これによって多孔質体内の水面形と流量が支配される。限界水深は、式(9)の分母が0であるという水面形方程式の特異点条件によって次式のように与えられる。

$$\eta_c = \left(\frac{F_1}{\lambda}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

ここで、 $\eta_c = h_c / h_1$ は無次元限界水深である。

②下流側が常流の場合（S-flow）

I－II区間とは逆に急拡の流れであり、II－III間の運動量保存則が次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \rho Q(U_3 - U_2) \\ &= \frac{1}{2} \rho g B_1 h_2^2 + \frac{1}{2} \rho g (B_0 - B_1) h^2 - \frac{1}{2} \rho g B_0 h_3^2 \quad (15) \end{aligned}$$

ここで、断面II－III間にある急拡位置での水深を $h'' = h_0$ とおき、連続条件、 $Q = U_2 B_1 h_2 = U_3 B_0 h_3$ ，を用いると次式を得る。

$$F_2^2 = \frac{\gamma_3(1 - \gamma_3^2)}{2\lambda(\lambda - \gamma_3)} \quad (16)$$

ここで、 $\gamma_3 = h_3/h_2$ ， $\lambda = B_1/B_0$ である。

(4) 流量の算定

以上に示した各区間の水理量どおしの関係に基づいて、堰における上下流水位と流量の関係が以下の手順で算定される。

① 下流側が射流の場合（C-flow）

断面II付近に支配断面があらわれるため、流量は限界水深 h_c によって決まる。式(14)から得られる限界水深 h_c を断面IIの水深 h_2 に等置する。すなわち、 $h_2 = h_c$ とおく。これより、 h_2/h_1 は F_1 の関数としてあらわされ、さらに $F_1 = \gamma_1^{-3/2} F_0$ を考慮すれば式(13)は次のような関数形となる。

$$\phi\left\{\frac{L - \Delta L}{h_0} \gamma_1^{-1}, \gamma_1^{-\frac{3}{2}} F_0\right\} = 0 \quad (17)$$

を得る。上式において0－I区間の長さ ΔL を理論的に求める手段はないため、次元解析的に

$$\frac{\Delta L}{h_0} = G(F_0, \lambda, \frac{d_m}{h_0}) = 0 \quad (18)$$

と記述し、この関数形を実験的に求める。

また、 γ_1 と F_0 は式(2)を介して関連づけられることから、結局、式(17)は F_0 が上流側の無次元水深 h_0/L （水面勾配に相当）の関数

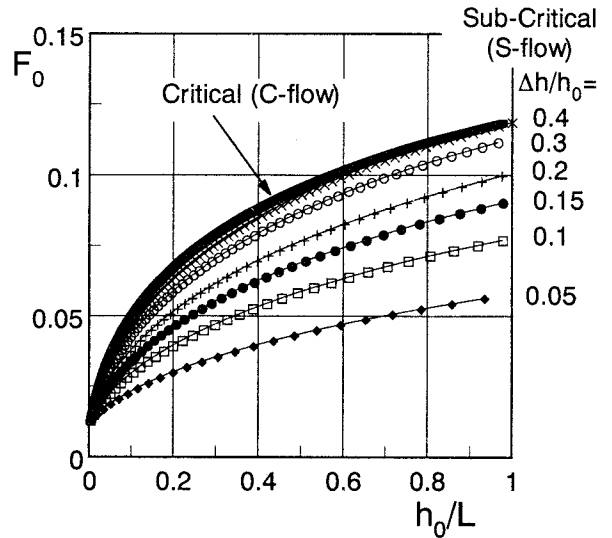


図-4 断面0でのFroude数 F_0 （無次元流量）と $(h_0/L, \Delta h/h_0)$ との関係

$$F_0 = \Omega_1(h_0 / L) \quad (19)$$

としてあらわされる。

② 下流側が常流の場合（S-flow）

I－II間の水面形は下流側の背水の影響を受けるので、流量は h_0 だけではなく h_2 にも依存する。この場合、式(13)は次のように表記される。

$$\phi\left\{\frac{L - \Delta L}{h_0} \gamma_1^{-1}, \gamma_1^{-1} \frac{h_2}{h_0}, \gamma_1^{-\frac{3}{2}} F_0\right\} = 0 \quad (20)$$

一方、0－I間とII－III間の水深比、 $\gamma_1 \equiv h_1/h_0$ と $\gamma_3 \equiv h_3/h_2$ は断面0およびIIにおけるFroude数(F_0, F_2)の関数として、それぞれ式(2), (16)で与えられる。これらと式(20)を連立させれば、 F_0 が

$$F_0 = \Omega_2(h_0 / L, \Delta h / h_0) \quad (21)$$

なる関数形式で算定される。ここで、 $\Delta h \equiv h_3 - h_0$ である。

式(21)と式(19)との比較からわかるように、下流からの堰上げがあるS-flowの場合、流量は堰上流の水位 h_0 だけではなく、上下流水位差 Δh にも規定される。

計算例として、 $Re=5,000$ ， $i=1/500$ ， $\lambda=0.4$ ， $\Delta L/h_0=0.0$ の場合に対する式(19), (21)の解を示すと図-4のようである。C-flow, S-flowともに無次元水深（または堰区間の水面勾配） h_0/L の増加とともにFroude数 F_0 （無次元流量）が単調に増加する。上下流水位差 $\Delta h/h_0$ が小さい場合は、堰上げ背水の影響を受けるS-flowであり、 $\Delta h/h_0$ が大きほど F_0 が大きい。しかし、 $\Delta h/h_0$ がある程度以上大きくなると、 $\Delta h/h_0$ に対する F_0 の増加は鈍り、C-flowへ漸近する。C-flowでは、 F_0 が h_0/L のみに依存する単調増加関数となる。

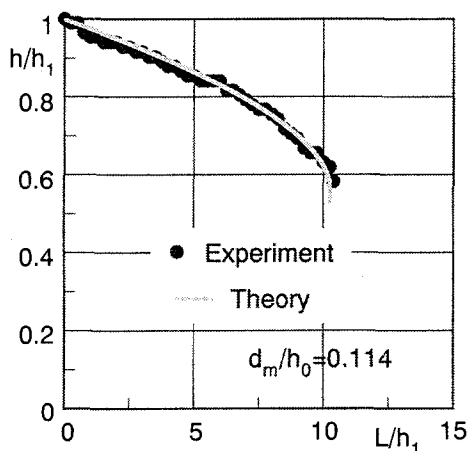


図-5 水面形（ヘルショウモデル）

5. 水面形（ヘルショウモデル）

写真-2に示すようなヘルショウモデルの実験から水面形を求め、先の理論と比較する。

まず、ヘルショウモデルが捨石多孔質体と異なる構造を有するので、多孔質流れの実験から得られた抵抗則に含まれる式(4)、(5)の比例係数をヘルショウモデルに適合するように新たに同定しなければならない。ここでは、全ケースについて水面形の「理論－実験」間の自乗誤差の和が極小化されるような比例係数の組み合わせを多変量解析より求めた。

図-5に実験値と理論値との比較例を示す。全体的な両者の適合度から、式(11)の水面形の解が適切であることを確認できる。しかし、下流端においては理論値と実験値の間にずれが生じている。これは、堰下流端で支配断面が生じて水面形の理論値に特異点があられるためであり、流線曲率を考慮しない一次元解析においてはこの部分で実験値と完全に一致させることは難しい。

6. 流量と水理量の関係

式(1)に含まれる運動量補正係数 δ_1 を決めるために実験値と式(1)との比較を図-6に示す。図より最適値として $\delta_1=1.0$ を採用する。

次に、上流側の急変流0-I区間の長さ ΔL に関して式(18)の関数形を検討する。図-7を見ると本実験条件の範囲では、 $(F_0, d_m/h_0)$ に対する有意な傾向は見られない。そこで、解析においては、

$$\Delta L/h_0 = 1.0 \quad (22)$$

を採用する。

これらを用いて、前述の理論に基づき流量を算定し実験値と比較する。なお、本実験は、下流区間が常に射流となるように実施されたので、全ての流れはC-flowに分類される。

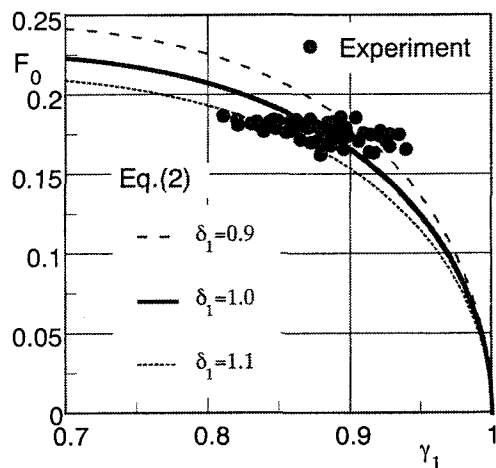


図-6 0-I断面間の水深比 h_1 と F_0 の関係

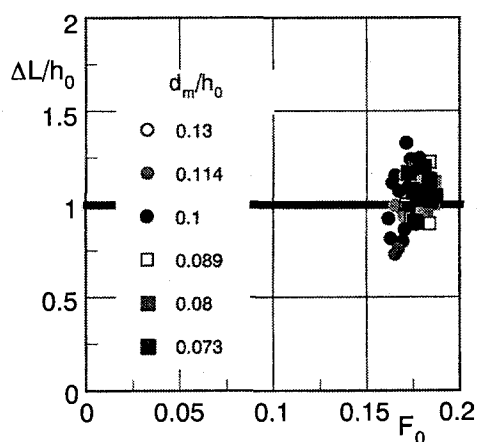


図-7 $\Delta L/h_0$ と $(F_0, d_m/h_0)$ の関係 ($\lambda=0.43\sim0.47$)

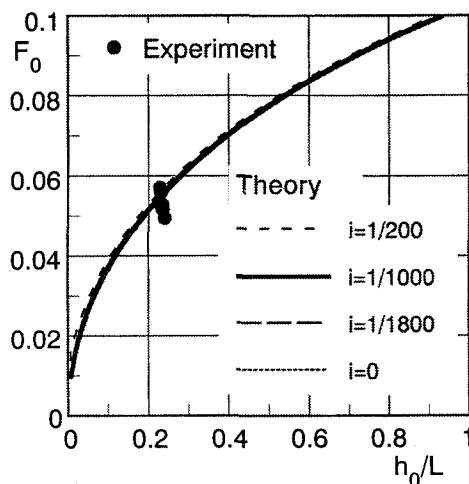


図-8 水路床勾配 i の影響

理論に見られるように、流量評価式(19)にはいくつかの無次元パラメータが含まれている。実験値と理論値を比較しながら $F_0 \sim h_0/L$ の関係におよぼすパラメータの影響を以下に検討する。

まず、水路床勾配の影響を図-8に示す。流量におよぼす水路床勾配の影響は小さいことが確認できる。

図-9は無次元粒径 d_m/h_0 をパラメータとして表示した $F_0 \sim h_0/L$ の関係である。本実験範囲では d_m/h_0 の幅が狭いため実験値から d_m/h_0 の影響を見ることはできないが、理論曲線を見るとより小さな d_m/h_0 の範囲においてその影響があらわれるようである。本実験範囲においては $F_0 \sim h_0/L$ の関係におよぼす d_m/h_0 の影響は小さいと言える。

次に、Reynolds数 Re への依存性を図-10に示す。実験・理論の両方から、" $F_0 \sim h_0/L$ "関係の Re への依存性が弱いことを確認できる。

以上のように、実験条件の範囲ではパラメータ($Re, i, d_m/h_0$)が" $F_0 \sim h_0/L$ "関係におよぼす影響は小さい。そこで、理論値との比較に関しては、($Re, i, d_m/h_0$)の平均値をとって固定し、流量－水位曲線 ($Q \sim h_0$)を算出する。実験値とともにこれを図-11に示す。本解析によって流量が合理的に算定されている。

7. むすび

粗石で構築される「捨石堰」について通過流量などの水理特性を検討した。多孔質乱流の抵抗則を適用して、捨石堰の水面形と流量に関する一次元解析を実施した。水面形や「水位－流量」の関係について理論と実験とは良好な一致を得た。しかし、ここで検討した流れの形態以外に、堰下流側が常流で下流からの堰上げを受ける場合や堰天端に自由水面があらわれる越流型などその他の流況が日常的にはあらわれる。ここで検証した抵抗則を導入して、広範な水理条件に対する流れの定式化を行う必要がある。また、実用に供するためには水理特性だけでなく、流れに対する構造物の耐力や安定性、生態系への影響、水質浄化機能なども解明しなければならない。

謝辞：本研究は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。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Hartman, G. and Dittrich, A.: 多自然研究, No.40, pp.3-7, 1999.
- 2) Ward,J.C.: Turbulent flows in porous media, J.Hydr. Eng., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964
- 3) Arbbabhirama, A. and Dinoy, Antonio A.: Friction factor and Reynolds number in porous media flow, Jour. Hydr. Eng., Proc. ASCE, Vol.99, HY6, pp901-911, 1973.
- 4) 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.

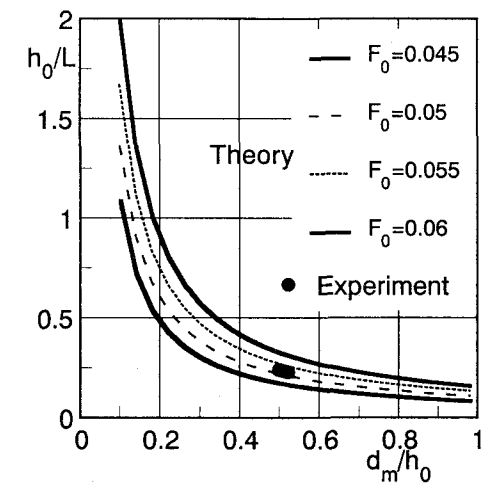


図-9 無次元粒径 d_m/h_0 の影響

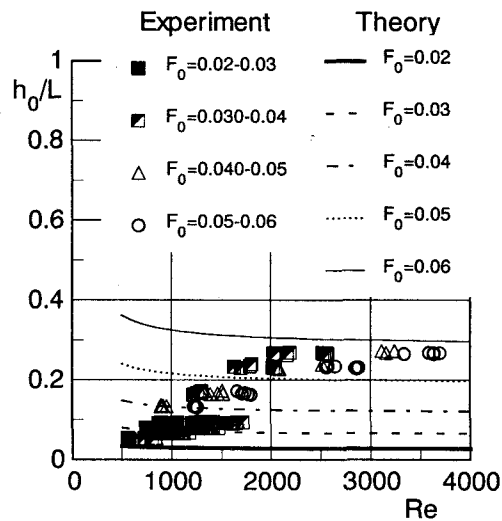


図-10 Reynolds数の影響

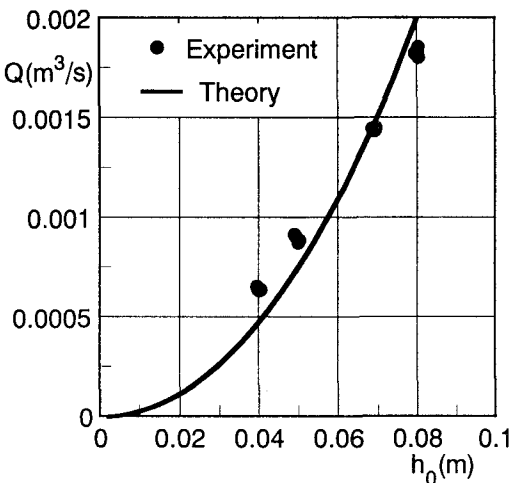


図-11 $Q \sim h_0$ 曲線

(2000.10.2受付)