

神戸大学工学部
（建設技術研究所）
神戸大学大学院

正会員 道奥康治
正会員 福岡達信
学生員 ○古澤孝明

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である。同様に、堰についても石礫を用いて構築すれば、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できるであろう。「捨石堰」は水質・生態系の縦断方向疎通性、再曝気促進など不透過構造の堰より環境機能が低いと考えられるので、設計に要する越流量や堰上げ効果など水理特性が明らかになれば実用化が可能であろう。本報告では水理実験によりこれを検討する。



写真-1 ドナウ川（本川）上流部の捨石落差工¹⁾(Rough Ramp)

2. 流況の分類

捨石堰を越える流れは、図-1のように、(a) 全区間で堰天端より自由水面が高い「完全越流」、(c) 自由水面が天端より低く石礫多孔質体中を流れる「多孔質流れ」、(b) 上流側は自由水面を有するが下流側で潜り込む「不完全越流」に分類される。

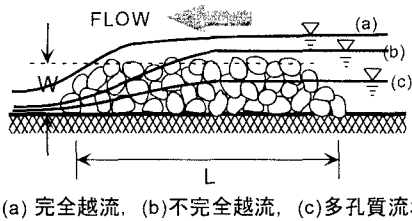
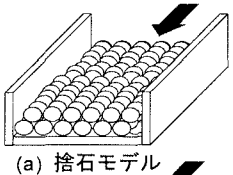
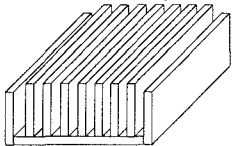


図-1 流れの分類

完全越流は、被圧多孔質流と開水路流からなる二層流である。これら三種の流れはさらに、下流側が常流と射流になる場合に分類される。越流量を規定する水理量はこれらの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。本論では、多孔質体の抵抗則を明らかにするために(c)の多孔質流を対象とする。



(a) 捨石モデル



(b) ヘルショウモデル
図-2 堰モデル

3. 実験装置と方法

図-2に示すように二種類の実験を行った。一つは、石礫を開水路に一定厚さに積み上げた(a) 捨石モデル、もう一つは水面計測のために実施された(b) ヘルショウモデルである。捨石モデルは、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： $W=5\sim 10\text{cm}$ とした。ヘルショウモデルについては長さ： $L=75\text{cm}$ 、高さ： $W=25\text{cm}$ 、厚さ 0.8cm の亚克力樹脂板を 0.7cm 間隔で流れ方向に平行に30枚並べた。それぞれの実験において、種々の水路床勾配 I に対して上流側水深 h_0 が一定となるように流量を設定した。捨石モデルの場合、自由水面が堰天端を越えないように流量調整した。

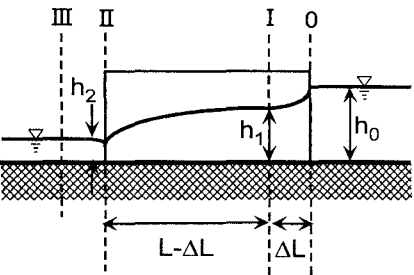


図-3 多孔質流れにおける諸量の定義

4. 水面形の一次元解析

図-3において多孔質流と開水路の接続部における0-I間とII-III間は急変流である。それぞれ、

急拡流，急縮流に相当するので運動量保存則を用い，二断面間の水深が関連づけられる．写真-2はヘルシウモデルにおける水面形であり，堰の上下流端部での急変流が確認される．I-II区間に関しては，Ward²⁾による多孔質流の層流・乱流抵抗則を応用して，流れの一次元解析を行い水面形と流量が算定される．

I-II区間でエネルギー保存則を用いると

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{U^2}{2g} \right) + \frac{dh}{dx} - i + \frac{v}{gK} U_s + \frac{c}{g\sqrt{K}} U_s^2 = 0 \quad (1)$$

となる．ここで， U ：実流速， h ：水深， i ：水路床勾配， v ：動粘性係数， U_s ：見かけの流速である．係数 c は Arbbabhirama³⁾らによって $c=100(d_m/\sqrt{K/\lambda})^{-3/2}$ と与えられる． λ は間隙率である． $\sqrt{K}$ は開水路の径深に相当する長さスケールであり，ここでは，清水⁴⁾ら種々の実験結果を総合して $\sqrt{K}=0.028d_m$ とする．境界条件を与えて式(1)を積分し，水面形の厳密解が $\phi(F_1, \ell, \gamma_2)=0$ のような関数形で得られた．ここで， F_1 ：断面Iにおける Froude 数， $\ell=(L-\Delta L)/h_1$ ：無次元堰長さ， $\gamma_2=h_2/h_1$ ：水深比である．水面形の解と0-I区間の運動量保存式を組み合わせ，さらに堰下流端で支配断面が現れると仮定すれば，断面0での Froude 数 F_0 （あるいは無次元流量）と相当水面勾配 h_0/L を関連づける $\phi\{F_0, (L-\Delta L)/h_0\}=0$ のような関数形が得られる．次元量に戻せば，流量 Q_0 と水深 h_0 の関係となる．

5. 理論と実験との比較

図-4はヘルシウモデルで得られた水面形の一例である．図より実験値は理論解とほぼ一致しており，一次元解析や抵抗則の妥当性が検証される．さらに， $F_0 \sim h_0/L$ の関係から得られる $Q \sim h_0$ を実験値と比較するとヘルシウモデルについては図-5が，捨石モデルについては図-6が得られた．本理論によって流量が適切に評価されている．

6. むすび

堤体天端より水面が高い完全越流や不完全越流の場合にも上記の抵抗則を適用し，種々の流況と広範な水理条件に対する水面形・越流量の定式化を実施する予定である．

参考文献

- 1) Hartman, G. and Dittrich, A.: 多自然研究, No.40, pp.3-7, 1999 年
- 2) Ward, J.C.: J.Hydr. Eng., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964
- 3) Arbbabhirama, A. et al.: J.Hydr. Eng., ASCE, Vol.99, Hy6, pp.901-911, 1973.
- 4) 清水義彦：京大学位論文，1992 年

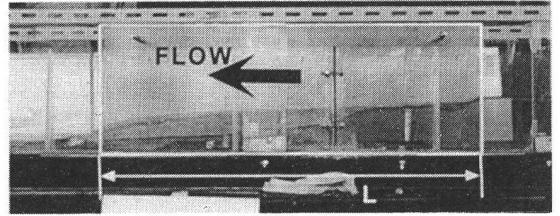


写真-2 多孔質体内の水面形（ヘルシウモデル）

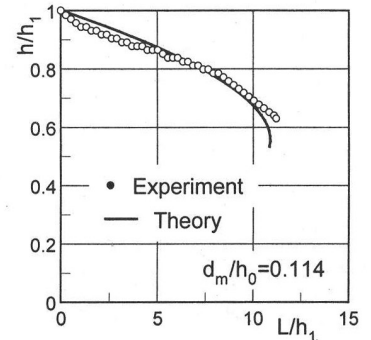


図-4 水面形（ヘルシウモデル）

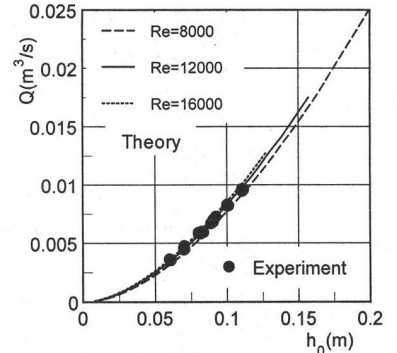


図-5 流量 Q と上流側水深 h_0 （ヘルシウモデル）

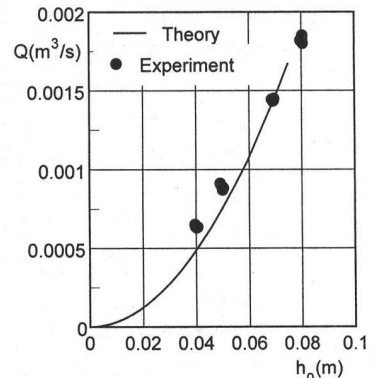


図-6 流量 Q と上流側水深 h_0 （捨石モデル）