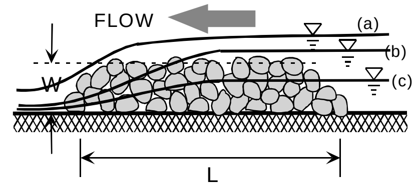
すていしぜき
捨石堰の水理特性

神戸大学大学院　学生員　古澤孝明
神戸大学工学部　正会員　道奥康治
(株)建設技術研究所　正会員　福岡達信

１．はじめに：河川生態の上下流方向移動を可能にする堰上げ構造物として，図-1 のように粗石を積み上げた「捨石堰」の実用化を考える．捨石堰は間隙を有して流水疎通性を確保する一方，ある程度の堰上げ効果も有するので，適切な水理設計さえ行えば堰機能を発揮すると思われる．透過構造なので水質・生態系の縦断移動を可能にし，再曝気促進によって河川の自浄効果を向上させるなど，コンクリートや鋼製の従来型堰より高い環境機能を期待できる．本報告では捨石堰の越流量・疎通能や堰上げ効果などの水理特性を検討する．

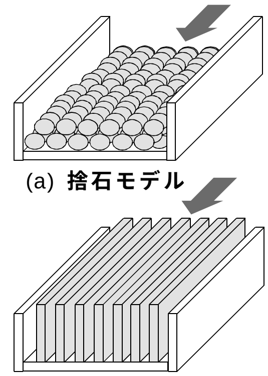


(a) 完全越流，(b)不完全越流，(c)多孔質流れ

図-1　流れの分類

２．越流状態の分類：実験に基づけば，図-1 のように，(a) 堰の上流から下流まで全区間で越流する「完全越流」，(c) 堰内部のみを流れる「多孔質流」，(b) 堰区間途中で水面が潜り込む「不完全越流」の三種類に分類された．(a)と(b)は粗面開水路流と被圧多孔質流からなる二層流である．現時点では，多孔質体の疎通能と抵抗特性が明らかでないため，(c)の多孔質流を検討する．

３．実験装置と方法：(a) 平均粒径： d_m =1.9，3.6cm の二種類の礫石を，長さ：L =30，75cm の二種類，高さ： W=5～10cm で開水路に積み上げた「捨石堰モデル」と，(b) 堰体内の水面形計測を目的として長さ：L =75cm，高さ：W =25cm，厚さ0.8cm のアクリル樹脂製板 30 枚を流れ方向に等間隔に並べた「ヘルショウ堰モデル」の二種類について実験を行った（図-2 参照）．様々な水路床勾配 i に対して上流側水深 h_0 が一定となるように流量を調整し，図-2(a)の場合には水面が堰天端を超えないような条件で実験を行った．


(a) 捨石モデル

(b) ヘルショウモデル

図-2 二つのモデル

４．水面形と越流量の解析：図-3 に示すように，０－ⅠとⅡ－Ⅲの区間は急変流であり，運動量保存則を用いて二断面の水理量を関連づける．Ⅰ－Ⅱ区間については，乱流多孔質流の抵抗則[1]を用いて次のように一次元のエネルギー保存則を定式化する．

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

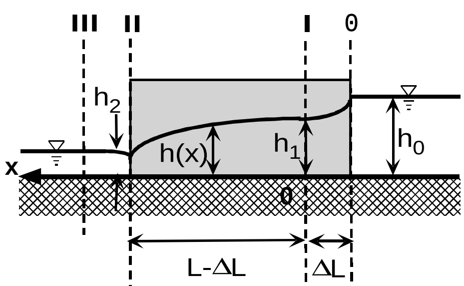


図-3 多孔質流の定義

ここで，U: 実流速，U_S: 見かけの流速，h: 水深，i: 水路床勾配，ν: 動粘性係数である．係数 c は Arbhabhirama[2]らによって $c=100\left(d_m/\sqrt{K/\lambda}\right)^{-3/2}$ （λ: 間隙率）と与えられる．$\sqrt{K}$ 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[3]によってまとめられた種々の結果より $\sqrt{K}=0.028d_m$ とする．以上の諸係数を代入し，境界条件[x=0 で h=h_1]を与えて式（1）を積分すれば，水面形の厳密解を次のように得る．

$$1-\gamma_2+\lambda i=\frac{a}{2}\ln\left|\frac{\gamma_2^2-a\gamma_2-b}{1-a-b}\right|+\frac{a^2/2+b}{\sqrt{a^2+4b}}\ln\left|\frac{(1-\beta)(\gamma_2-\alpha)}{(1-\alpha)(\gamma_2-\beta)}\right|-\frac{d}{\sqrt{a^2+4b}}\left\{\frac{1}{\alpha}\ln\left|\frac{\gamma_2-\alpha}{(1-\alpha)\gamma_2}\right|-\frac{1}{\beta}\ln\left|\frac{\gamma_2-\beta}{(1-\beta)\gamma_2}\right|\right\} \qquad (2)$$

ここで， $\gamma_2=h_2/h_1$ ， $\lambda=(L-\Delta L)/h_1$： 無次元の堰長， $a\equiv F_1^2/ki\,\mathrm{Re}$ ， $b\equiv cF_1^2/\sqrt{k}i$ ， $d\equiv F_1^2/\lambda^2$ ，$(\alpha,\beta)=\left(a\pm\sqrt{a^2+4b}\right)/2$， F_1: 断面Ⅰにおける Froude 数， $k=K/h_1^2$ である．

キーワード：堰流量，局所流，捨石堰，水面形解析，乱流多孔質流
連絡先：〒657-8501　神戸市灘区六甲台町１－１　Phone: (078)803-6056, FAX: (078)803-6069

式(2)は所定の水理条件下での下流端水深 h_2 と堰長 $(L\text{-}\Delta L)$ の関係を与えるものであるが，$(L\text{-}\Delta L)\rightarrow x$, $h_2 \rightarrow h(x)$ とおけば，水面形の解を与える．ヘルショウモデルは捨石多孔質体と異なる構造であるため，多孔質流の実験から得られた Ward の抵抗則[1)]に含まれる比例係数を, ヘルショウモデルに適合するよう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」間の誤差が極小化されるような比例係数の組を多変量解析より求めた．図-4 に水面形の一例を示す．

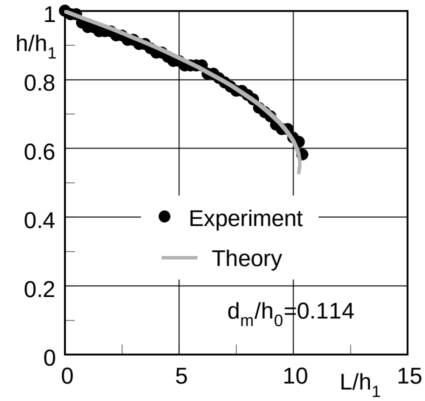


図-4　水面形

５．通過流量：いずれの実験ケースにおいてもⅡ断面で限界水深が現れ，その直下流は射流であった．Ⅱが支配断面であると考えれば，$h_2 \rightarrow h_c$ となり，$h_2/h_1=(F_1/\lambda)^{2/3}$ を得る．また，０－Ⅰ区間の運動量保存則から h_0 と h_1 の関係は

$$F_0^2 = [\gamma_1(\gamma_1^2-1)]/[2(\gamma_1-\delta_1/\lambda)] \quad (3)$$

である．ここで，$\gamma_1 = h_1/h_0$，$F_0 = q/\sqrt{gh_0^3}$：h_0 で規準化した無次元流量（０断面の Froude 数），δ_1：運動量補正係数である．図-5 に実験値と式(3)の比較を示す．図より $\delta_1=1.9$ とする．以上の関係を式(2)に代入すれば，$\phi\{F_0, (L-\Delta L)/h_0\}=0$ なる関数形の方程式が得られ，無次元流量 F_0 が比水深 (h_0/L) の関数として算定される．F_0～h_0/L の関係に介在する各式には様々なパラメータが含まれる．図-6,7,8 には Reynolds 数 Re，水路床勾配 i，無次元粒径 d_m/h_0 にともなう関数関係の変化を示す．いずれの図からもこれら三つのパラメータが F_0～h_0/L の関係におよぼす影響は小さいことが確認される．ここでは本実験条件の範囲内で(Re, i, d_m/h_0)の平均値をとってこれを固定し, 通過流量 Q_0 の理論値を求めた. 図-8 に Q_0～h_0 の理論値を実験結果とともに示す．本解析によって流量が合理的に算定されている．

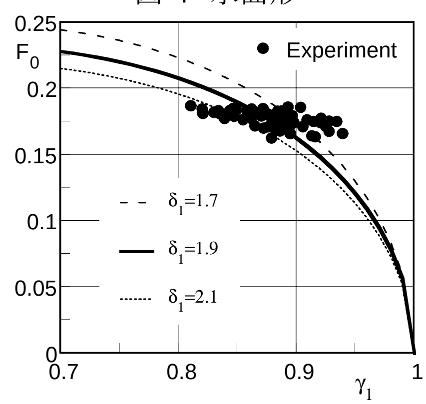


図-5　γ_1～F_0 の関係

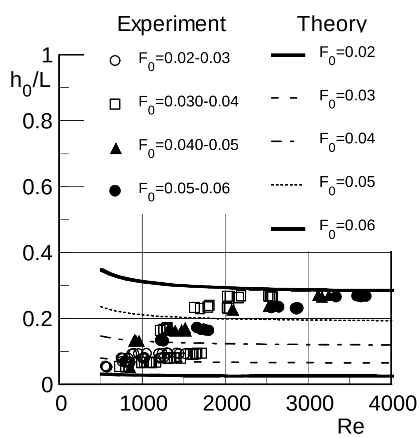


図-6　Re の影響

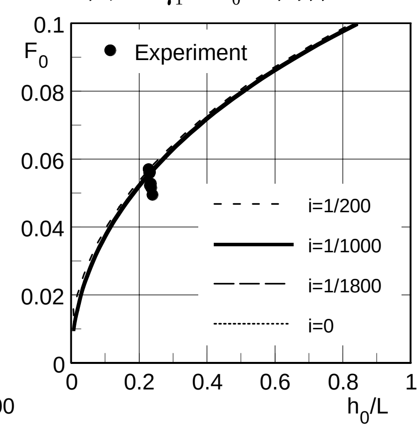


図-7　勾配 i の影響

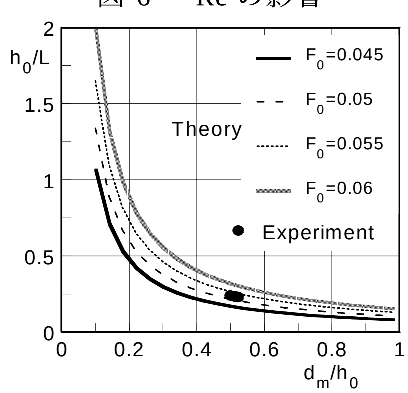


図-8　d_m/h_0 の影響

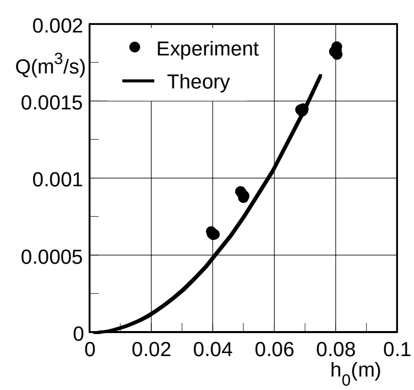


図-9　Q~h_0 の関係

６．むすび：堤体天端より水面が高い完全越流, 不完全越流の場合や下流からの堰上げの影響を受ける場合についても実験・解析を行い，より広範な水理条件の下に越流則を定式化する予定である．

参考文献：

1)　Ward,J.C.: J.Hydr. Eng., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964
2)　Arbhabhirama,A.et al.: J.Hydr. Eng., ASCE, Vol.99, Hy6, pp.901-911, 1973.
3)　清水義彦：京大学位論文，1992 年