

捨石堰の流量近似式と越流時の水面形解析

神戸大学大学院	学生員 ○ 羽根田正則
神戸大学工学部	正会員 道奥康治
岡山大学環境理工学部	正会員 前野詩朗
(株)建設技術研究所	正会員 古澤孝明
日本生命保険相互会社	非会員 山澤澄志

1. はじめに：写真-1 のような捨石堰の水利機能を検討する．利水目的の構造物であるので，図-1 に示すように，通常は水面が天端より低い非越流状態にあり，増水時には越流型流れが出現する．堰の水利設計を実施するためには，非越流時の通過流量特性と越流時の堰体安定性を検討する必要がある．まず，非越流時を対象として水面形の一次元解析を行い，堰の通過流量の厳密解を求め，これを検証するための水利実験を行った．しかし，理論解が陰型式で与えられ取り扱いにくいことから，本報告では，これを水深の指数関数に近似した流量算定式を提案する．また，出水時の堰体安定性を検討するために越流型流れの水利特性を検討し，越流時の水面形を解析した．

2. 水利実験：自然石を直方体に積み上げた捨石堰模型を図-2 のように設置した．平均粒径 d_m ，長さ L ，水路床勾配 i ，上流側水深 h_0 と上下流の水深差 Δh をそれぞれ変化させ，越流型流れと非越流型流れについて水利実験を実施した．

3. 非越流型流れの解析の概要¹⁾：図-2 のシステムに対し，流れの一次元解析を行った．断面 0 においては開水路流から多孔質体への急縮流と考え，運動量保存則から，水深比 $\gamma_1 = h_1/h_0$ と無次元流量

(Froude 数) $F_0 = q / \sqrt{gh_0^3}$ の関係式が得られる．ここで $q = Q/B$

は単位幅流量， B は水路幅である．区間は捨石多孔質体であり，Ward²⁾により定式化された管路内の多孔質乱流の抵抗則を適用して水面形の解を求める．これに， $x=0, L$ での境界条件を代入すれば，流量 F_0 の理論解が，無次元堰長さ $l = L/h_0$ と水深比 $\gamma_1, \gamma_2 (=h_2/h_0)$ の陰関数として $\phi(F_0, l, \gamma_1, \gamma_2) = 0$ のように得られる．断面 0 では，多孔質体から開水路へ急拡する流れが生じ，断面 0 と同じようにして運動量保存則を適用すれば，水深比 $\gamma_3 (=h_3/h_0)$ と F_0 の関係が得られる．ただし， $x > L$ の下流区間が射流の場合には， $x=L$ が支配断面となり h_2 は流量から決まる限界水深 h_c となる．以上の水面形の解を接続すれば，無次元流量 F_0 の解が水深(h_0, h_2, h_3)に関する陰型式解として次のように与えられる．

(1) 下流区間が射流の場合(C-Flow)： $F_0 = \phi_c(h_0/L)$ ，(2) 下流区間が常流の場合(S-Flow)： $F_0 = \phi_s(h_0/L, \Delta h/h_0)$



写真-1 捨石堰の例（城春川）

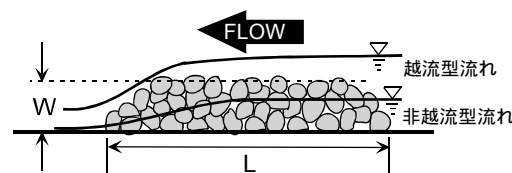


図-1 捨石堰周辺の流況

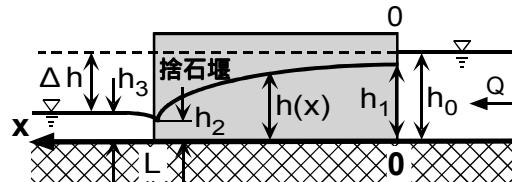
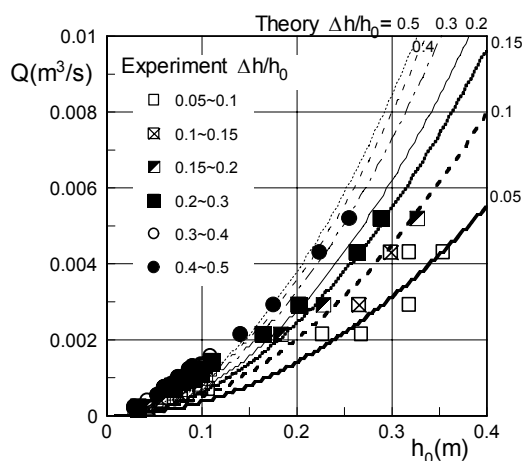


図-2 非越流型流れにおける諸量の定義

図-3 $Q \sim h_0$ 曲線

キーワード：捨石堰，乱流多孔質流，流量算定，堰越流

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1 - 1 Phone: (078)803-6056, FAX: (078)803-6069

4. 流量 - 水位曲線と流量算定式

堰の水理設計には流量 - 水位曲線($Q-h_0$)が必要である。一次元解析の理論解 $F_0=\phi_S(h_0/L, \Delta h/h_0)$ を次元表示の($Q-h_0$)曲線に変換し、実験値と比較した例を図-3に示す。この算定例では、無次元粒径 d_m/h_0 を本実験範囲内での平均値(=0.38)として固定している。図-3 から $Q-h_0$

の解は指数関数 $Q = B \cdot X h_0^Y$ に近似され、使いやすい流量算定式に変換できそうである。先の解析と実験²⁾から、($Q-h_0$)に影響する関連物理量は、粒径 d_m 、堰の長さ L 、Reynolds 数 Re 、河床勾配 i であることが示された。このうち、 $i < 1/100$ より緩勾配の水路では河床勾配の影響がほぼ無視し得ること、 $Re > 5,000$ では Reynolds 数の影響がほとんどあらわれないことが明らかになった。したがって実用レベルでは、指数関数型の流量算定式の係数(X, Y)に影響をおよぼす物理量は(d_m, L)のみと考えてよい。本理論解を $Q = B \cdot X h_0^Y$ に回帰し、現実的な捨石材料・堰の大きさの範囲で(X, Y)と(d_m, L)の関係を求めたところ、図-4の関係を得た。 Y は一定と考え、 X については図-4の関係を図表化すれば、指数型の近似式から流量を算定できる。近似式と理論解との適合度を図-5に示す。これより、近似式が十分な精度を持っていることを確認できる。

5. 越流型流れの解析：出水時には写真-2のように流れが堰を越流する。図-6に流速計測例を示す。堰下流の法肩において最大流速が生じ捨石が崩壊しやすい。越流時における堰体構造の安定性を検討するためには、流体力・圧力を評価しなければならない。そこで、堰天端より上層を粗面開水路流、下層を被圧多孔質流と考えた二層流モデルによる水面形・流速の一次元解析を行った。図-7には水面形の理論解と実験値との比較例を示す。理論解は実験値と概ね一致しており、解析の妥当性が確認される（解析の詳細は講演時に報告する）。

参考文献：

- 1) 道奥・前野・古澤・羽根田：水工学論文集，第46巻，pp.487-492，2002。
- 2) Ward, J.C.: J. Hydr. Eng., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964。

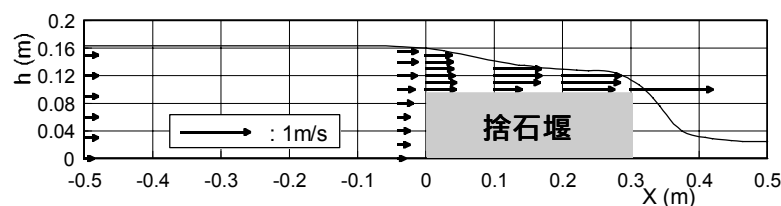


図-6 越流型流れにおける流速分布

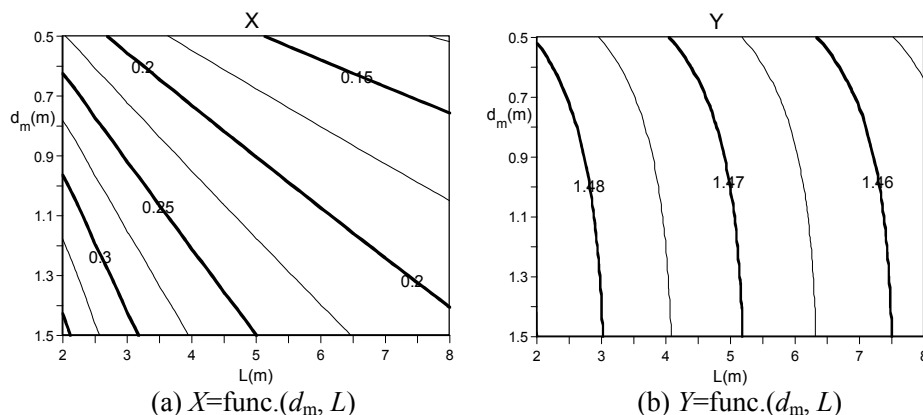


図-4 (X, Y)と(d_m, L)の関係

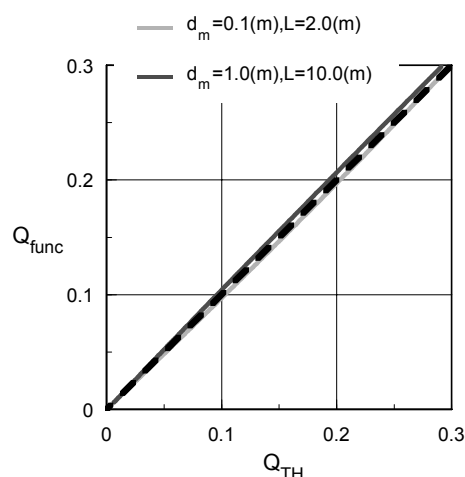


図-5 流量の近似式 Q_{exp} と理論式 Q_{TH} の適合度



写真-2 越流型流れの様子

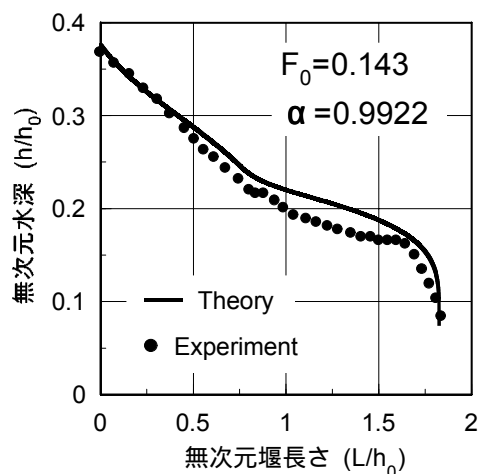


図-6 水面形の解と実験値