

神戸大学工学部

正会員 道奥康治

(株)阪神電気鉄道

正会員○羽根田正則

神戸大学大学院

学生員 南條雅志

岡山大学環境理工学部

正会員 前野詩朗

1. はじめに

近年、従来の不透過型の河川構造物に代わるものとして、石礫や木材など自然材料を用いた河川護岸や杵・牛などのように流れを柔に制御する透過性構造物の機能が見直されている。そこで、道奥ら¹⁾は石礫やブロックなどにより構築される「捨石堰」を考え、捨石堰の水理設計のために非越流型の流れについて流量と水深の関係を定式化した。本報告では捨石堰の安定性を検討するため、全区間において堰を完全に越流する越流型流れの水面形、上下層流量の流下方向変化について検討する。

2. 実験方法と水理条件

実験は岡山大学環境理工学部設置された長さ5.0m×高さ0.6m×幅0.4mで勾配 $i=1/400$ の開水路で行なわれた。平均粒径が二種類($d_m=1.9\text{cm}$, 4.1cm)の石礫を所定の長さ、高さの直方体に積み上げ、崩れないように補強した。流速はピトー管によって堰上中央断面の流速を計測し、水深はポイントゲージと画像から計測された。実験条件を表-1に示す。

表-1 水理条件

Case	堰長さ $L(\text{cm})$	堰高さ $W(\text{cm})$	粒径 $d_m(\text{cm})$	間隙率 α	流量 Q (l/s)	$Re \times 10^3$	Fr
1	30	10	4.1	0.38	7.47~24.1	17~54	0.11~0.2
2			1.9	0.33	6.23~25.0	14~58	0.09~0.2
3		20	4.1	0.38	11.6~24.9	27~60	0.08~0.1
4			1.9	0.33	7.03~22.4	17~55	0.05~0.1
5	60	10	4.1	0.38	7.18~26.5	17~62	0.10~0.2
6			1.9	0.33	6.94~25.8	16~58	0.09~0.2
7		20	4.1	0.38	18.5~26.4	42~58	0.10~0.1
8			1.9	0.33	11.1~32.0	25~70	0.07~0.1

(Re, F_0): 上流の等流区間での Reynolds 数, Froude 数

3. 堰上部の流速分布と上下層流量の流下方向変化

捨石堰は、従来の不透過型の堰のように堰上部だけを流れるのではなく、透過性があるので堰内部にも水は流れる。よって、堰天端において上部と内部で流量の輸送が生じると考えられる。そこで、図-1に示す堰上部の流速分布を近似的に断面積分して、堰上部の単位幅流量 q_U を求め、全単位幅流量 q との差から堰体内の単位幅流量 $q_S=q-q_U$ を算出する。上下層無次元流量(q_U, q_S)/ q の流下方向変化を図-2に示す。実験値は記号で、理論解(後述)は曲線で示されている。図-3より堰区間の上流側では堰体内から堰上部へ質量が輸送され、堰区間の下流側では堰上部から堰体内に質量が輸送されていることがわかる。

4. 水面形の一次元解析

図-4に越流型流れの模式図を示す。図-4において0-I区間は、断面の一部が急縮となる段上り流れであるので運動量保存則を用いて解析を行う。I-II区間に関しては、堰上部を粗度を持つ開水路流と堰体内を多孔質流との二層の流れに分けて考える。

上下層の連続式は以下のである。

$$\frac{d}{dx}(U_U h) = q_i = -\frac{d}{dx}(U_L n W) = -\frac{d}{dx}(U_S W) \quad (1)$$

ここで、 U_U : 上層の平均流速, U_L : 下層(堰体内)

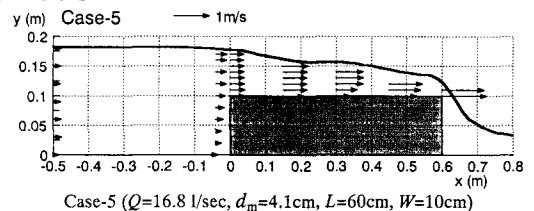
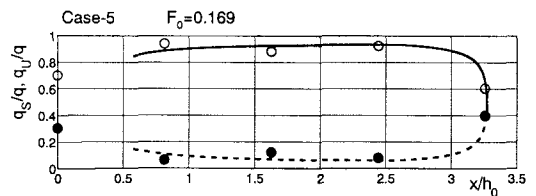


図-2 流速分布の例

Case-5 ($Q=16.8\text{ l/sec}$, $d_m=4.1\text{cm}$, $L=60\text{cm}$, $W=10\text{cm}$)図-3 上層と下層の流量(q_U, q_S)/ q の流下方向変化

の実流速, $U_s (=nU_L)$: 下層の見かけ流速, h : 上層の水
深である。 q_i : 堰天端界面を通過する交換速度であり、
堰体から開水路流に向かう輸送の場合を正とする。単位
幅流量 q は次式であらわされる。

上層の運動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U_U^2}{2g} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} - i + \frac{fU_U^2}{8gh} + E \frac{q_i}{gh} (U_U - U_s) = 0 \quad (2)$$

ここで, f : 摩擦損失係数, A : 断面積, P : 潤
辺長である。

下層の運動方程式は次のようになる。

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{U_L^2}{2g} \right) + \frac{dh}{dx} - i - E \frac{q_i}{gW} (U_U - U_s) + C_1 U_s + C_2 U_s^2 = 0 \quad (3)$$

ここで, $C_1 U_s + C_2 U_s^2$: 非越流型流れの解析に
適用された抵抗則¹⁾である。

また, E は上下層界面における運動量の交
換効率をあらわす係数で, 一般には $E \leq 1$ と
考えられる。本解析では, 上下層内で流速分
布がほぼ一様と考え $|E|=1$ とする。また,
常に $U_U > U_s$ であることから応力の作用方向
を考慮して, $q_i > 0$ の時, $E=1$, $q_i < 0$ の時,
 $E=-1$ とおく。

上述の式(1)~(3)を無次元化し連立させて解くことで I - II 区間の水面形の理論解が求まる。

5. 水面形, 上下層流量の解と各抵抗成分の流下方向変化

I-II 区間の水面形の理論解を実験値とともに図-5 に示す。漸変流方程式に基づくため, 当然のことながら
堰下流端落ちち部の水位低下を再現することはできないが, ほぼ全区間の水面形は再現されている。図-3
に併記した曲線は漸変流区間の無次元上下層流量(q_U, q_s)/ q の理論解である。堰上流側では, 堰体内の多孔
体流れから開水路流への連行加入し, 堰下流側では, 低下背水によって開水路部から堰体内へ質量・運動量
が輸送されている。本理論解はこのような捨石堰の越流・通過流特性を良好に再現している。

理論解に基づいて上下層の運動量方程式に含まれる各抵抗成分の流れへの寄与を調べる。図-6 に理論解
より得られる抵抗成分の流下方向変化を示す。ここで, F_W : 壁面摩擦力, F_I : 上下層界面での内部せん断
力, F_P : 堰体内の流水抵抗力(層流抵抗+乱流抵抗)である。捨石堰の上流から下流に至るまで, 壁面摩擦力
 F_W の影響は小さく, 抵抗力の大部分は界面での内部せん断力 F_I と多孔体の抵抗力 F_P からなる。上流側では
いずれの抵抗項も小さい。しかし, 堰下流端付近で(F_I, F_P)がともに急増する。特に, F_P は捨石材料に作用
する流体力であり, 図-6 の結果は捨石堰が下流端から崩壊し始めるという先の実験結果²⁾を裏付けている。

参考文献

- 1) 道奥康治・前野詩朗・古澤孝明・羽根田正則: 捨石堰の「水位 - 流量」特性を規定する水理量, 水工学
論文集, 第 46 巻, 2002
- 2) 前野詩朗・道奥康治・森永智・大西利典: 捨石堰の破壊機構のモデル化, 水工学論文集, 第 47 巻,
2002

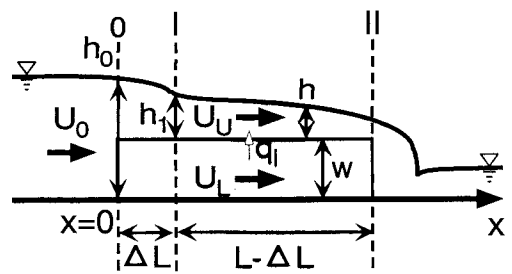


図-4 越流型流れの模式図

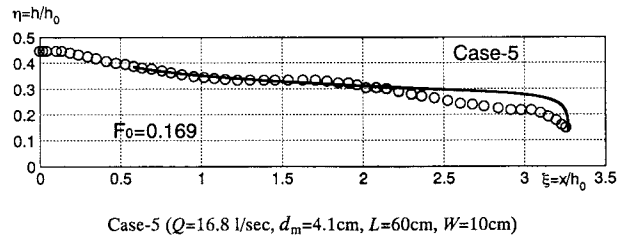


図-5 水面形の理論解(実線)と実験値(白丸)の比較

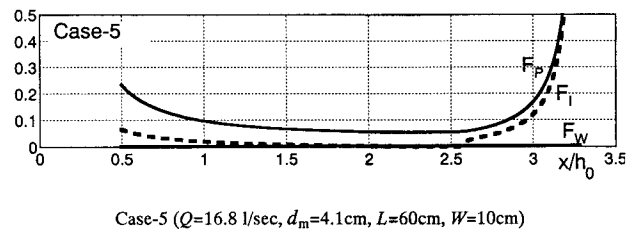


図-6 各抵抗成分の流下方向変化