

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
神戸大学大学院	学生会員	○羽根田正則
日本生命保険相互会社	非会員	山澤澄志

1. はじめに

近年、自然環境に対する意識の高まりの中、従来の不透過型の堰やダムの河川環境への影響が問題となっている。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、捨石堰の水利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。捨石堰は疎通性を持ち水質・生態系の縦断方向移動が可能であるなど、高い環境機能が期待できる。本報告では捨石堰の安定性を検討するため、図-1に示すような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を算定することを検討する。

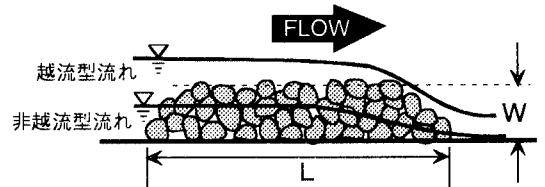


図-1 捨石堰周辺の流況

2. 実験装置と方法

平均粒径： $d_m=1.9, 4.1\text{cm}$ の二種類の石をそれぞれ長さ： $L=30, 60\text{cm}$ ，高さ： $W=10, 20\text{cm}$ の直方体に開水路に積み上げ、水路床勾配 $i=1/400$ のもとに実験を行った。

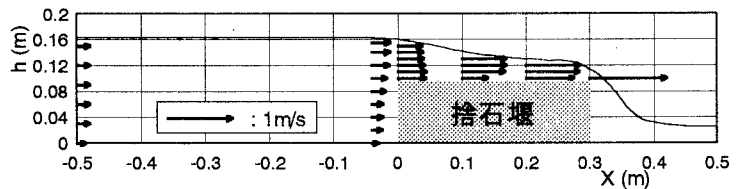


図-2 越流型流れにおける流速分布

そして、流量、堰の上流側、下流側の水深を計測した。流量は自由水面が完全に堰天端を越えるように調整した。また、各堰形状毎に、ビトー管を用いて堰上中央断面の流速を計測した。流速の計測断面は堰上流端を0cmとして $L=30\text{cm}$ の場合は流下方向に0cm, 10cm, 20cm, 30cm、 $L=60\text{cm}$ の場合は流下方向に0cm, 15cm, 30cm, 45cm, 60cmの点において計測した。両Caseとも上流側-50cm、-4cmの断面も測定を行っている。

3. 堰上部の流れと堰内部の流れとの流量の輸送・交換

捨石堰は、従来の不透過型の堰のように堰上部だけを通流するのではなく、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、堰上部の流速を求め、流速より堰上部の流量の変化を求めることにより上部と内部での流量の輸送・交換について検討する。図-2に越流型流れにおける流速分布を示す。そして、流速分布より流速計測断面ごとの単位幅流量を近似的に算出した。図-3に堰上部と堰体内の流量の変化を示す。また、堰上部流れのFroude数 F_1 の変化も示す。図-3より堰区間の上流側では堰体内から堰上部へ流量が輸送され、堰区間の下流側では堰上部から堰体内に流量が輸送されていることがわかる。

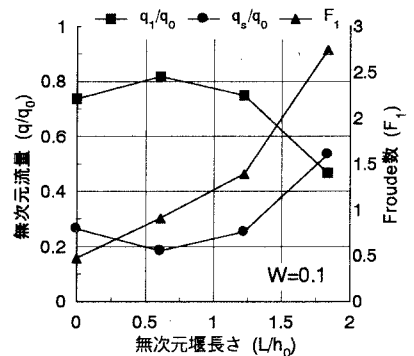


図-3 堰上部と堰体内の流量変化

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区間は開水路流から堰区間の二層流へと接続する急変流である。ここでは、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二断面間の水深を関連づける。写真-1に越流型流れにおける水面形の一例を示す。堰の上流端部の急変流部分が確認できる。I-II区間に関しては、堰上部を流れる粗度を持つ開水路流と堰体内を流れる被圧多孔質流との二層の流れに分けて考える。堰区間の上流側では、堰上部と堰内部での流量の交換を各層における流速差による連行であると考え。連行は、流速の遅い層から速い層へ流質の輸送が生ずるとする。よって、堰上部・下部それぞれの運動方程式は次のようになる。

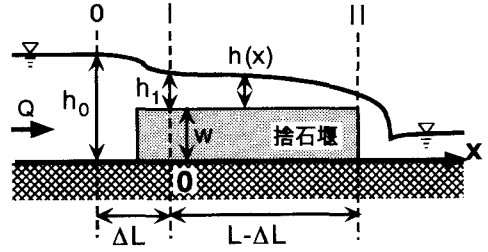


図-4 越流型流れの模式図



写真-1 越流型流れにおける水面形の一例

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{U_1^2}{2g} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} - i + \frac{\tau_w P}{\rho g A} + \frac{q_i}{gh} (|U_1 - U_2| + U_1) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U_2^2}{2g} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} - i + C_1 U_s + C_2 U_s^2 - \frac{q_i}{gW} (|U_1 - U_2| + U_2) = 0 \quad (2)$$

ここで、 h ：堰上部の水深、 W ：堰高さ、 U_1 ：堰上部の流速、 U_2 ：堰内部の実流速、 U_s ：堰内部の見かけの流速、 τ_w ：摩擦抵抗、 P ：潤辺、 q_i ：連行流量である。 $C_1 U_s + C_2 U_s^2$ は、多孔質流の層流・乱流抵抗則である。式(1)、(2)のそれぞれ左辺最後の項が連行による抵抗を表す。連続条件は、

$$\frac{d}{dx} (U_1 h) = q_i = - \frac{d}{dx} (U_2 n W) = - \frac{d}{dx} (U_s W)$$

$$\text{あるいは、} q = U_1 h + U_s W \quad (3)$$

である。 q ：単位幅流量である。式(1)～(3)を連立させ解く

ことで水面形の解が求まる。堰区間下流側では、速度差による連行とは逆方向の質量の輸送が起こっている。ここでは、堰上部の流れが堰内部に潜り込みながら流下していると考えられるので、連行を伴わない二層流であると考え。よって、水面形の解は式(1)～(3)に含まれる連行に関する項を省くことで求まる。また、堰内部の流速分布の非一様性を補正するため、 α ：流速補正係数を用いる。連行の方向についての境界条件には図-3より、 $F_1=1.0$ を用いる。

5. 理論と実験の比較

図-5は実験から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、一次元解析の妥当性が検証される。また、 α によって堰内部の流れの非一様性も適切に評価されている。開水路流と多孔質体内の流量比も適切に評価される。

6. むすび

合理的な水理設計のもとに捨石堰を構築するため、本報告での解析解に基づいて越流型流れにおける越流量や堰材料に作用する水圧を算定し、捨石堰の安定性について検討を進めていく予定である。

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

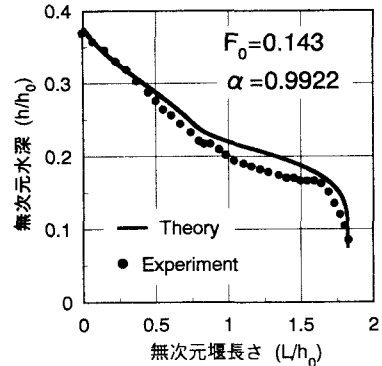


図-5 水面形