

捨石堰周辺の流況解析

FLOW ANALYSIS AROUND A RUBBLE MOUND WEIR

前野詩朗¹, 道奥康治², 森永 智³, 菊池慶太⁴

Shiro MAENO, Kohji MICHIOKU, Satoru MORINAGA and Keita KIKUCHI

¹正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

²正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 工修 岡山県津山地方振興局

⁴学生会員 岡山大学大学院 自然科学研究科環境システム学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

Nature-friendly hydraulic structures such as a rubble mound weir have attracted attention in recent years. Therefore, it is important to establish the analytical model to analyze the flow around such a porous weir. The VOF method is used for modeling the flow around a trapezoidal porous weir and Porous Body Model is employed to express a porous part of the weir. The treatment of the resistance force is also examined to express the difference of permeability of a porous weir. The numerical results show that the VOF method can be applied to the flow over an impermeable trapezoidal weir. Moreover, the flow of the porous part was approximately obtained by using the Porous Body Model.

Key Words: rubble mound weir, nature-friendly structure, VOF, porous media, turbulent flow

1. はじめに

河川の縦断方向のつながりを分断する堰は、水を最大限利用するという観点からコンクリートを使用した不透水性の構造が多く、川の自然環境機能を阻害する構造物として非難されることが多い。一方、自然石を用いた堰（以下、捨石堰と呼ぶ）は、低水時においても堰体中を絶えず水が流れ、景観、環境面において不透水性の堰よりも有利な点が多い。そこで著者らは不透水性の堰構造の代わりに捨石堰を構築し、基本的な水位－流量特性やそれらを規定する水理量を明らかにしている^{1),2),3),4),5),6)}。また、堰の破壊は堰の利水機能を低下させるだけでなく、堰周辺の護岸の破壊をもたらし、河川の治水機能をも低下させる。このような観点から、堰の破壊過程についても実験的な検討を行い、石礫の初動機構に着目した破壊モデルを提案している^{7),8)}。今後、捨石堰の構造物設計を行うためには、堰上げ効果がどの程度期待できるか、また、初期破壊が生じる堰下流法面の石礫にどの程度の流体力が作用するのか、などの多孔質堰周辺の流況を事前に把握することができる解析モデルを構築することの工学上の意義は大きい。

以上のことを考慮して、本研究では、堰周辺の流れを解析するために、複雑な自由表面をよく再現す

るとされているVOF法⁹⁾を用いて、多孔質堰周辺の流況解析モデルを構築することを目的とする。このために、本研究では、まず、不透水性の台形堰を対象として、実験値との比較によりVOF法の有効性を示す。その後、自然石礫で構築された多孔質堰を対象としてモデルの適用性を検討する。その際、不確定要素である石礫間を流下する際の石礫の抵抗力の取り扱い方法についても合わせて検討する。

2. 実験の概要

本研究では、図-1に示すような水路長5m、水路幅0.4m、水路高0.6mの可変勾配循環水路に各種堰モデルを設置して実験を行った。堰モデルは、捨石堰が平均粒径3.2cmと4.8cmの2種類の堰（それぞれCase1, Case2とし、それぞれの堰の間隙率は0.403, 0.412とほぼ同程度である。）を用いた(写真-1)。これらについて、堰破壊時の流速、水深、および間隙水圧などの水理量について計測を行った。

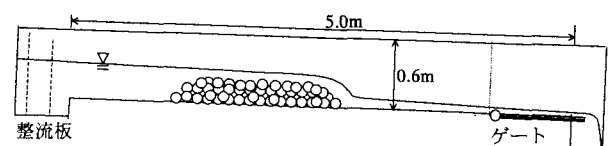
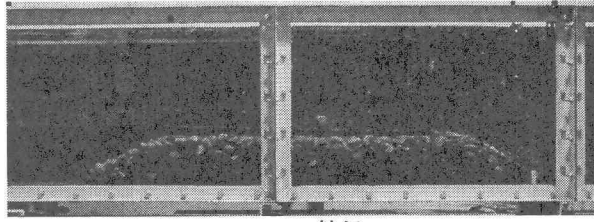
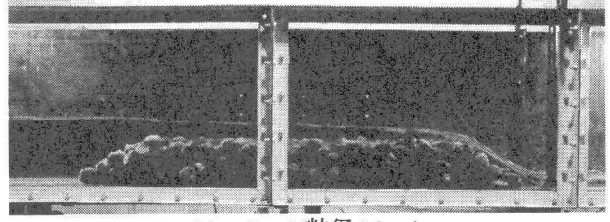


図-1 実験装置



(a) Case1(粒径3.2cm)



(b) Case2(粒径4.8cm)

写真-1 実験に用いた捨石堰

3. 解析の概要

3.1 VOF法の概要

本研究では、磯部ら⁹⁾が開発した数値波動水路を参考にして、石礫部分を間隙水が通過する際の抵抗力項の取り扱い方法を検討する。解析に用いた基礎式を以下に示す。

連続式：

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

運動方程式：

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right) \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma_v g - R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \quad (3)$$

VOF関数 F の移流方程式：

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ここに、 x, z ：水平、鉛直座標、 u, w ：流速の水平、鉛直成分、 ρ ：密度、 $P = p + 2\rho k/3$ ； p ：圧力、 k ：乱流エネルギー、 ε ：乱流エネルギー散逸率、 ν_e ：分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和、 g ：重力加速度、 R_x, R_z ：水平、鉛直方向の多孔質体からの抵抗力、 γ_v ：空隙率、 γ_x, γ_z ：水平、鉛直方向面積透過率であり、 C_M を慣性力係数として $\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M$ 、 $\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M$ 、 $\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M$ である。

乱流モデルについては $k-\varepsilon$ モデルを用いて、 $\nu_e = \nu + \nu_t$ とした。

k 方程式：

$$\gamma_v \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u k}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_k \left[\frac{\partial k}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_k \left[\frac{\partial k}{\partial z} \right] \right) + \gamma_v G_s - \gamma_v \varepsilon \quad (5)$$

ε 方程式：

$$\gamma_v \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_\varepsilon \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_\varepsilon \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] \right) + \gamma_v C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_s - \gamma_v C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\nu_t = C_\mu (k^2 / \varepsilon), \quad \nu_k = \nu + \nu_t / \sigma_k, \quad \nu_\varepsilon = \nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon$$

$$G_s = \nu_t \{ 2(\partial u / \partial x)^2 + 2(\partial w / \partial z)^2 + (\partial w / \partial x + \partial u / \partial z)^2 \}$$

モデル中の定数は磯部ら⁹⁾の研究を参考にして、 $C_\mu = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.00$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.30$ 、 $C_1 = 1.44$ 、 $C_2 = 1.92$ とした。なお、 $k-\varepsilon$ モデルに多孔質抵抗を考慮する必要があると考えられるが、現段階では、その効果が明らかでないため、本研究では、 $k-\varepsilon$ モデルにおける多孔質抵抗の影響は無視することにした。

3.2 解析モデル

図-2は、堰構造物を含む流れ場を鉛直2次元的にモデル化したものである。310cm×60cmの解析領域内に x 方向に2.5cm、 z 方向に1.25cm間隔のメッシュを設定し、灰色で塗りつぶされた2次元堰モデルを障害物として設ける。なお、対象となる堰構造物には、不透水性の堰と間隙を含んだ堰の2種類を用いた。初期条件は図中に示すように堰上流側に水を満たしておき、解析領域全体の流速 u, w を0としている。以上のような解析モデルに上流側から水を流入させ、解析を進めた。水路勾配については、基礎式の重力加速度項において重力を x 方向と z 方向成分に分解することで表現した。

3.3 境界条件および解析条件

上流端については、計算開始後20秒後に設定した流量となるように直線的に流量を増加させ、その後は一定流入量を与えた。各時間における流量を単位幅流量に換算し、上流端の水深で割ることで平均流速を求め、その流速を水深方向に一樣に与えている。下流端については、自由流出とした。河床および、不透水性堰の構造物境界では、実験結果を考慮してスリップ条件を用いた。

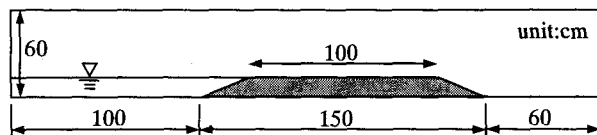


図-2 解析モデル

解析条件を表-1に示す。解析で用いた流量については、基本的に実験値と同様の値を用いることで実験値との比較を行いやすくした。なお、多孔質部分の抵抗の取り扱いについては、以下で説明する二通りの手法を採用した。

(1) ポーラスモデルにおける多孔質抵抗

樺山ら¹⁰⁾は、原子炉内の熱流動解析に用いられているポーラスボディモデルを自由表面を有する波動場の数値計算に適用している。その中で、多孔質体の抗力項に関しては、通常、レイノルズ数が大きく乱流場となるため、Forchheimer型の抵抗則を用いた。Forchheimer型の抵抗則には、水理実験によって定まる層流抵抗係数と乱流抵抗係数を含む。そこで樺山らは、ローレンツの等価仕事の法則を用い線形化を行い、乱流の抵抗が支配的になるとの見解から最終的に以下に示す速度の2乗に比例する乱流抵抗の項のみを用いている。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_d}{\delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (7)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_d}{\delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (8)$$

ここに、 δx , δz : x , z 方向格子間隔, C_d : 抵抗係数である。

(2) 層流抵抗と乱流抵抗からなる多孔質抵抗

Forchheimer型の抵抗則において、層流抵抗と乱流抵抗の取り扱いが必要となるが、多孔体中で定常流に対する圧力損失項については、Ward¹¹⁾によって次式が提案されている。

$$-\frac{1}{\rho} \nabla(p + \rho g z) = \frac{\nu \gamma_v}{K} u + \frac{C \gamma_v^2}{\sqrt{K}} \sqrt{u^2 + w^2} u \quad (9)$$

この抵抗則を式(2)および、式(3)に適用すると多孔質抵抗は、

$$R_x = \gamma_v^2 u \left(\frac{\nu}{K} + \frac{C}{\sqrt{K}} \gamma_v \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (10)$$

$$R_z = \gamma_v^2 w \left(\frac{\nu}{K} + \frac{C}{\sqrt{K}} \gamma_v \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (11)$$

と表される。なお、本式は、樺木¹²⁾による透水性物体内部での波の基礎方程式も参考にしている。

ここに、 K は固有透水係数、 C は乱れによる抵抗係数である。 K は、種々の研究者による実験結果を総合して清水¹³⁾により式(12)で与えられ、 C は、Arbhabhiramaら¹⁴⁾によって式(13)で与えられる。

$$\sqrt{K} = ed \quad (12)$$

表-1 勾配による石礫の噛み合わせの変化

Run	流量Q(l/s)	粒径	間隙率	石礫による抵抗項の扱い
Run-1	29.87	不透水	—	—
Run-2	15.09	4.8	0.412	式(7), (8) ($C_d=0.9$)
Run-3	15.09	4.8	0.412	式(10), (11) ($C=0.2188$)
Run-4	15.47	3.2	0.403	式(7), (8) ($C_d=0.9$)
Run-5	15.47	3.2	0.403	式(10), (11) ($C=0.2222$)
Run-6	1.83	4.8	0.412	式(10), (11) ($C=0.2188$)
Run-7	1.33	3.2	0.403	式(10), (11) ($C=0.2222$)

$$C = f \left(\frac{d}{\sqrt{K/\gamma_v}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

ここに、 d は粒子の粒径、 e と f は実験的に与えられるパラメータである。本解析では、過去に、本実験と同程度の粒径を用いた捨石堰について道奥⁴⁾が行った実験により得られた $(e, f) = (0.0196, 41.0)$ を用いた。

樺山¹⁰⁾が採用している手法によると、間隙率が同程度で粒径が異なる場合に抵抗係数 C_d を決定するのが困難であるが、固有透水係数を用いると粒径の変化に対応し易くなることがわかる。本実験では、表に示すように粒径の違いによる間隙率の差がほとんどなかったため、両ケースとも $C_d = 0.9$ を用いた。

4. 解析結果および考察

(1) 不透水性堰越流流れの検討

図-3は、不透水性堰に29.87(l/s)流したときの水面形について実験結果と解析結果を比較したものである。図-4(a), (b)は、流速分布について実験結果と解析結果を示している。(c)は堰周辺の代表的な断面における流速の流下方向成分の実験値と解析値を示している。これらの図より、水面形については、解析結果は実験結果から得られた台形堰周辺の流況を良く再現できていることがわかる。流速分布について見ると、デカルト座標系の影響を受けて上流側法面部分が階段状の格子形状になり、法面近傍の流れの抵抗が過大評価されたため、25cm断面の堰天端付近の流速が小さくなる。そのため、流速分布の示す傾向が実験値と異なるが、それ以外の解析結果は、流れの概略を再現できている。

(2) 多孔質堰越流流れの検討

図-5は、粒径4.8cmのRun2およびRun3の水面形の解析結果を実験値と比較したものである。また、図-6は、粒径3.2cmの場合について図-5と同様に示したものである。図-5より、何れの解析結果においても、75cm～150cm断面付近からの越流部分で実験

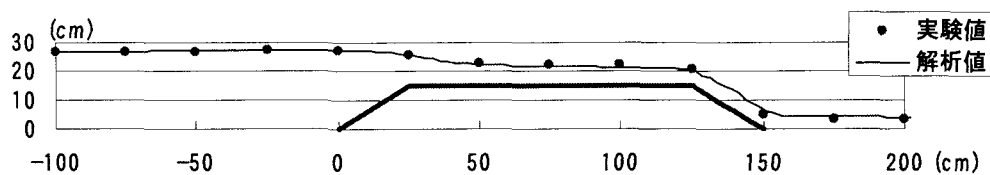
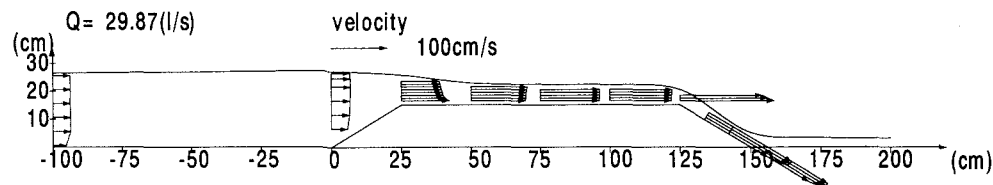
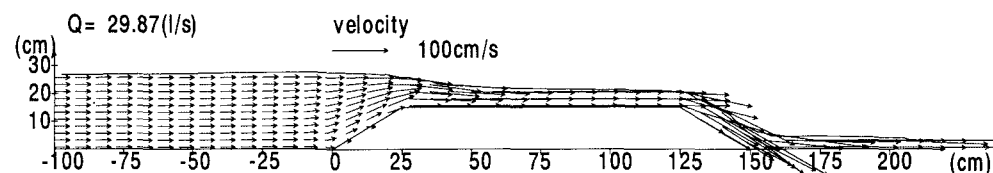


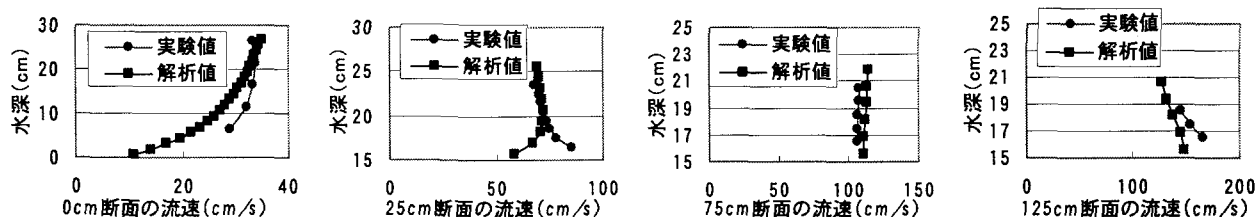
図-3 水面形の実験値と解析値の比較 (Run1, 不透水性堰)



(a) 実験結果 (不透水性堰)



(b) 解析結果 (Run1, 不透水性堰)



(c) 各断面の流速比較 (Run1, 不透水性堰)

図-4 流速分布の実験値と解析値の比較 (Run1, 不透水性堰)

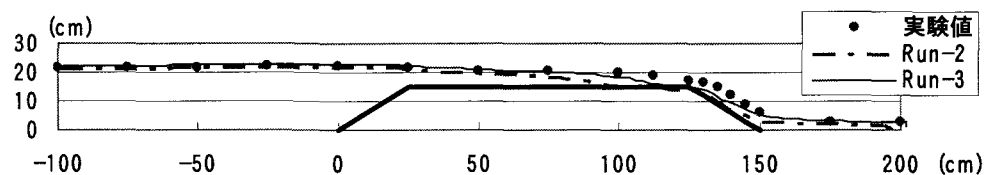


図-5 水面形の実験値と解析値の比較 (Run2, 3, 多孔質堰, 粒径4.8cm)

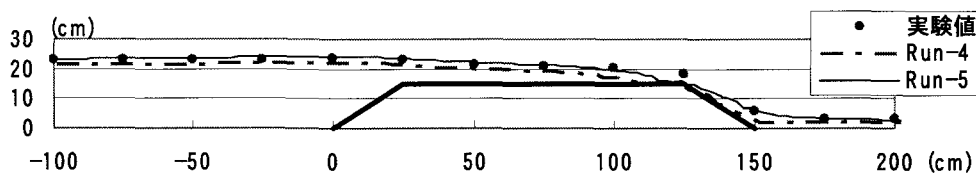


図-6 水面形の実験値と解析値の比較 (Run4, 5, 多孔質堰, 粒径3.2cm)

値と一致しない部分があるものの、堰上流側の水面形は、よく一致しているのがわかる。

これに比べて、図-6の水面形をみると、Run5は、実験値と良好な一致を示すが、Run4は、それより小さくなり実験値と一致しなくなる。これは、Run4の場合、多孔質部分の抵抗係数を間隙率のみにより決まる C_d で評価したため、粒径の変化による空隙の大きさの違いを取り入れることができなかったこと

が原因である。一方、透水係数で評価可能なRun5の場合には、実験結果を良く再現できており、粒径の違いによる堰上げ効果の違いを表現できていることがわかる。

また、図-7は、Run3の場合の流速分布について実験結果と比較したものである。この図より、0cm、25cm、75cmの各断面において解析結果は、実験値を若干下回るものの、その分布は、実験値とほぼ同

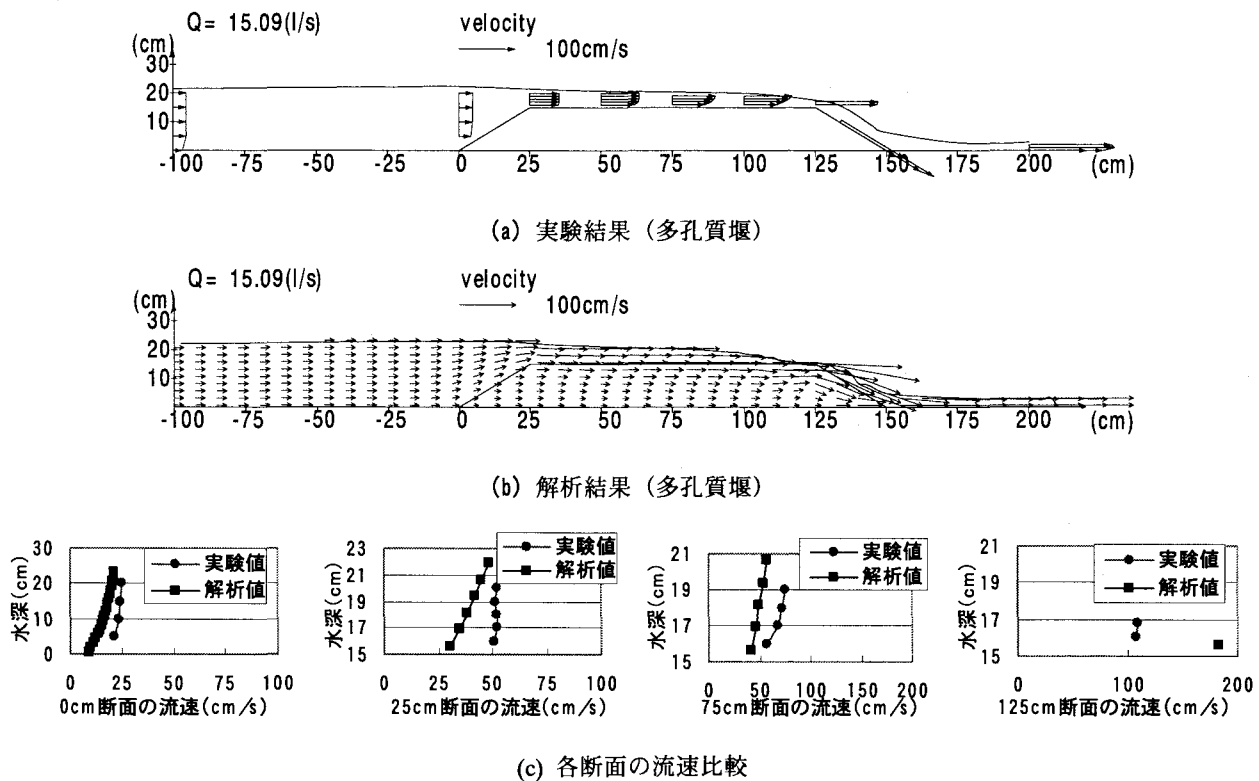


図-7 流速分布の実験値と解析値の比較 (Run3, 多孔質堰)

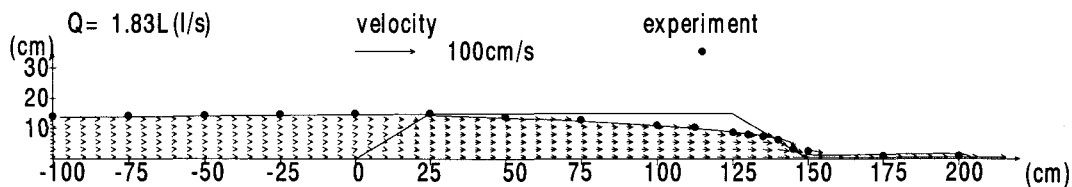


図-8 水面形の実験値と解析値の比較と流速分布 (Run6, 多孔質堰, 粒径4.8cm)

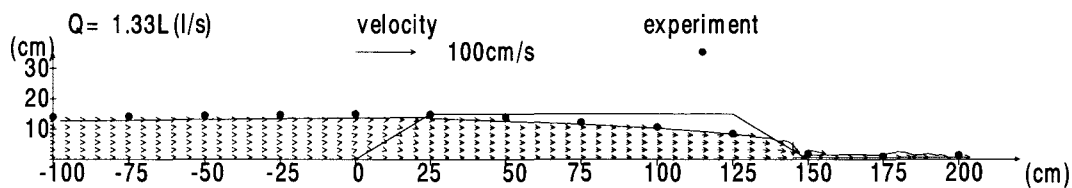


図-9 水面形の実験値と解析値の比較と流速分布 (Run7, 多孔質堰, 粒径3.2cm)

様な傾向が見られる。しかし、125cm断面では、流速の解析値が実験値よりもかなり大きくなった。これは、解析結果の堰上の水深が実験値よりも小さくなったことが原因である。

(3) 多孔質堰非越流流れの検討

図-8、図-9は、Run6とRun7の水面形の解析結果と実験値を比較したものである。この図より、非越流流れでは、何れの粒径を用いた堰においても解析値は、実験結果をよく再現できていることがわかる。また、流速分布を見ても、堰下流端の付近で流速が大きくなっていることがわかる。

(4) 水位-流量曲線の検討

図-10、図-11は、-100cm断面での水深とその時の流量の関係について解析結果と実験値を比較したものである。どちらの粒径を用いた堰の解析結果とも流量15(l/s)までは、実験値と良く一致していることがわかる。しかし、流量が15(l/s)をよりも大きくなると、上流側の堰上げ高さは、実験値を大幅に上回っている。図-3、図-4に示すように不透水性の堰の場合には、15(l/s)を超えるような多流量の時でも実験をよく再現できていることは、既に述べた通りである。これらのことから、流量がある程度以上になると堰内部の流れの乱れによる抵抗が過大に評価

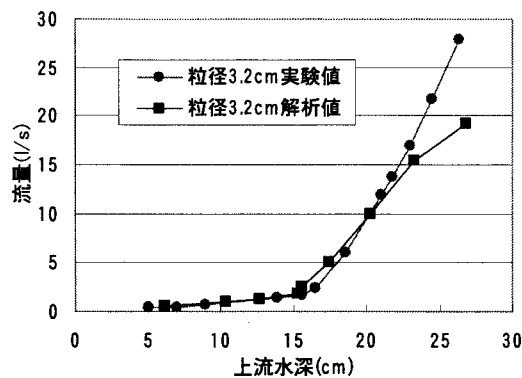


図-10 水位－流量の関係（粒径3.2cm）

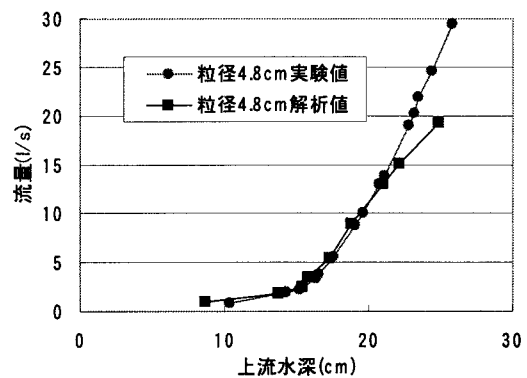


図-11 水位－流量の関係（粒径4.8cm）

されて上流の水位が高くなっているものと考えられる。ここでは掲載していないが、乱れによる係数 C を小さくした解析では、良好な結果を得た。しかし、変更した C の値に根拠が無いことから、今後は、多流量時の C の取り扱いについて検討する必要がある。

5. 結論

本研究では、自由表面を含む堰周辺の流れをVOF法を用いて再現し、ポーラスモデルによって透過性の堰構造物を表現した。これにより捨石堰内部の流れを明らかにし、その結果以下のようなことがわかった。

- 1) VOF法を用いた台形堰周辺流れの解析により、不透水性堰を越える流れの水面形は、実験値をよく再現することができ、また、流速分布も概ね良好な結果を得ることができる。
- 2) ポーラスモデルを用いることによって、多孔質堰内部の水の流れを概略的にではあるが、再現することができる。
- 3) 間隙率だけでなく、石礫の大きさの違いを多孔質体の抵抗の項に取り入れることで堰上げ効果の違いを表現することができるが、流量がある程度以上になった場合、堰内部の乱れによる抵抗が過大に評価されて堰上流の水位が実験値よりも大きくなる。

今後は、流量が多くなった際の実験値と解析値のずれを補正するため、乱れによる抵抗係数の理論的検討を行う必要がある。また、乱流モデルの多孔質抵抗の影響を評価し、より精度のよい解析を行う必要がある。

謝辞：本研究の一部は、（財）ウエスコ学術振興財団学術研究費助成金（代表：前野詩朗）並びに文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)(1)（代表：道奥康治、課題番号：14350268）の補助のもとで行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 前野詩朗，道奥康治，森永智，大西利典：自然石を用いた堰の水理特性，水工学論文集，第46巻，pp.493-498，2002。
- 2) S.Maeno, K.Michioku, S.Morinaga and T.Ohnishi, Hydraulic Characteristics of a Rubble Mound Weir and its Failure Process, Proceedings of 5th ICHE, 2002.
- 3) 道奥康治，福岡達信，古澤孝明：捨石堰における通過流量特性，水工学論文集，第45巻，pp.391-396，2001。
- 4) 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，pp.487-492，2002。
- 5) K.Michioku, S.Maeno, T.Furusawa and M.Haneda, Discharge through a Permeable Rubble Mound Weir, Proceedings of 5th ICHE, 2002.
- 6) 道奥康治，前野詩朗，羽根田正則，古澤孝明：捨石堰を越流・透過する流れの構造と流量解析，土木学会論文集，No.740，pp.131-142，2003。
- 7) 前野詩朗，道奥康治，大西利典，森永智：捨石堰の破壊時の水理特性，応用力学論文集，Vol.5，pp.657-664，2002。
- 8) 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，土木学会水工学論文集，第47巻，pp.781-786，2003。
- 9) 磯部雅彦，高橋重雄，余錫平，榊山勉，藤間功司，川崎浩司，蔣勤，秋山実，大山洋志(1999)：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究-VOF法基本プログラムの作成-，海洋開発論文集，第15巻，pp.321-326。
- 10) 榊山勉，鹿島遼一：ポーラスボディモデルによる透過性防波堤執念の波動解析手法の開発，電力中央研究所報告，U91048，1992。
- 11) Ward, J.C. : Turbulent flow in porous media, Jour. Hydraul. Eng., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964.
- 12) 榎木亨編著：波と漂砂と構造物，技報堂出版，pp.119-121，1991。
- 13) 清水義彦：種々の河床粗度形態を有する開水路流れの構造に関する研究，京都大学学位論文，1992。
- 14) Anat Arbbabhirama and Antonio A.Dinoy : Friction factor and Reynolds number in Porous media flow, Jour. Hydraul. Engrg., ASCE, Vol.99, HY6, pp.901-911, 1973.

（2003年9月30日受付）