

VOF-DEM 連成モデルによる捨石堰の破壊予測

DESTRUCTION PREDICTION OF A RUBBLE MOUND WEIR USING VOF-DEM COUPLED MODEL

前野詩朗¹・富田晃生²・脇野修平³
Shiro MAENO, Akio TOMITA and Shuhei WAKINO

¹正会員 工博 岡山大学准教授 環境学研究科社会基盤環境学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

²学生会員 岡山大学環境学研究科社会基盤環境学専攻修士課程 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

³正会員 広島県尾三地域事務所建設局工務第二課 (〒723-8520 三原市円一町 2-4-1)

Nature friendly hydraulic structures such as a rubble mound weir have attracted attention in recent years. Therefore, it is important to establish an analytical model to analyze the flow around such a porous weir. The aim of this study is to develop a destruction prediction model for the rubble mound weir under a gradual increase of discharge. The VOF (Volume of Fluid) method was used for the flow analysis around and through the rubble mound weir, and the DEM (Distinct Element Method) was used to express the failure process. A proposed VOF-DEM coupled model can feed back the movement of the DEM particles to the flow analysis of the VOF. It is confirmed that the proposed model can reproduce the step by step destruction of the rubble mound weir similar to the experimental results.

Key Words : *nature friendly structure, rubble mound weir, natural stone, VOF, DEM*

1. はじめに

近年、河川環境を保護するために自然にやさしい材料を用いた多自然川づくりが全国各地で進められており、その中でも不透過性の堰の代替構造物として自然石を用いた堰（以下、捨石堰と呼ぶ）の利用が期待されている。このような石礫を用いた透過性の堰の実用化を目指して、道奥ら^{1),2),3)}は、矩形の捨石堰を用いて実験的かつ理論的検討を進め、非越流時のみならず越流時の「水位－流量」の関係を明らかにした。また、著者ら^{4),5),6)}は、台形の捨石堰を用いて堰の破壊過程について実験的な検討を行うとともに石礫の初動機構に着目した破壊モデルを提案し、捨石堰の破壊が堰下流法面で段階的に進行することや、石礫の初動が石礫の転倒により生じることを明らかにしている。さらに、波浪場のために開発された磯部ら⁷⁾の数値波動水路をもとに改良した VOF (Volume of Fluid) 法を用いて河川の流れを再現し、捨石堰の流況解析を行った⁸⁾。その結果、VOF 法が河川の流れに対しても有効であることを示し、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した。また、基礎式中に多孔質抵抗として層流抵抗と乱流抵抗の両者を考慮した抵抗則を導入することによって、多孔質堰周辺の流れを精度よく再現できる流況解析モデルを提案した。

一方、VOF 法と個別要素法 (DEM; Distinct Element Method) とを併用して流体解析と粒状態構造物の変形を取り扱った例がある。例えば、伊藤ら^{9),10)}、荒木ら¹¹⁾が挙げられるが、これまでの研究では粒子の移動が流れに考慮されていないか、もしくは、変形が落ち着くまで流体解析に反映させないものや、変形による間隙率の変化が考慮されていないものなど、連成方法に課題があり、粒子と流体の相互応答がうまく表現されていないものが多い。また、前野ら¹²⁾は、DEM を用いて捨石堰の破壊シミュレーションを行っているが、前述の解析例と同様に流れ場との連成が考慮されていない点が課題であった。

以上のことを考慮して、本研究では、捨石堰を対象として流量を徐々に増加させた際の流体力の変化を VOF 法により計算し、得られた流体力を石礫に働く作用力として DEM 解析に順次組み込むことで、捨石堰の破壊過程を捉えるシミュレーションを行う。さらに、VOF 法の解析に石礫の移動もフィードバックすることで、捨石堰の破壊に伴う流れや流体力の変化も追跡し、従来の研究で明らかにされている捨石堰の段階的な破壊が再現できるかを確認する。また、過去の水理模型による破壊実験との比較によって、解析モデルの妥当性を検証する。

2. 解析の概要

(1) VOF 法の概要

多孔質体内部の流れを再現するために、本研究では、Edward et al.¹³⁾や道奥ら¹⁴⁾と同様に捨石堰の透過性の効果を間隙率 n を用いて表した基礎式を用いることにする。以下に連続式、運動方程式、並びに VOF 関数 F の移流項を示す。

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

$$n \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -n^2 \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g_x - R_x \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(n \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(n \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} \quad (2)$$

$$n \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -n^2 \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g_z - R_z \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(n \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(n \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} \quad (3)$$

$$n \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial uF}{\partial x} + \frac{\partial wF}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ここに、 x, z : 水平、鉛直座標、 u, w : 流速の水平、鉛直成分(多孔質部は見かけの流速)、 ρ : 流体密度、 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_x, g_z : x, z 方向の加速度、 R_x, R_z : x, z 方向の抵抗力である。また、乱流モデルについては標準型 $k - \varepsilon$ モデルを用いた。ここで、 R_x, R_z については前野ら¹⁵⁾と同様に、個有透水係数と呼ばれる面積の次元を持つ透水係数 K 、乱れによる抵抗係数 C を用いて、次式で与える。

$$R_x = u \left(\frac{\nu}{K} + \frac{C}{\sqrt{K}} \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (5)$$

$$R_z = w \left(\frac{\nu}{K} + \frac{C}{\sqrt{K}} \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (6)$$

$$K = n^3 D_{sp}^2 / \{k_1(1-n)^2\}, \quad C = k_2 / \sqrt{k_1 n^3} \quad (7)$$

ここに、 ν : 動粘性係数、 u, w : x 方向及び z 方向のみかけの流速、 n : 間隙率、 D_{sp} : 粒径、 k_1, k_2 : 層流抵抗及び乱流抵抗の係数である。また、 (k_1, k_2) については、道奥ら¹⁴⁾が用いた方法を参考に、非越流流れと越流流れ 2 つのケースについて、実験値と解析値の水深の誤差を最小にする (k_1, k_2) を数値実験的に求め、 $(k_1, k_2) = (200, 2.8)$ とした。

(2) 個別要素法の概要

個別要素法では、堰を構成する石礫を剛体として仮定している。さらに石礫を円形と仮定し、摩擦係数を与えることによって捨石同士の噛み合わせを表現している。粒子間の相互作用は弾性スプリングと粘性ダッシュポットで表現し、各粒子の運動方程式を計算することによ

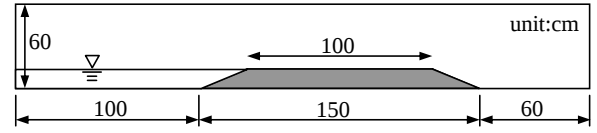


図-1 堰形状

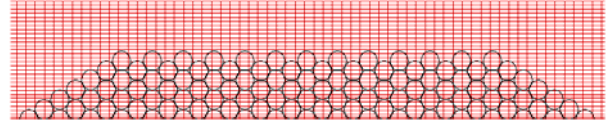


図-2 DEM 初期パッキング結果と VOF メッシュ

て粒子の運動を解析する。また、粒子間の力の伝達は接触点でのみ起こるものとしている。なお、本研究で使

用したモデルは、後藤ら¹⁶⁾の DEM コードに捨石堰の流れに起因する外力項を付加したものである。

粒子 i における座標 (x_i, z_i) 、角速度 θ_i に関する基礎式は、接触粒子を j とおくと以下のように表される。

$$(M_i + M'_i) \ddot{x}_i = \sum_j \{ -f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij} \}_j + F_x \quad (8)$$

$$(M_i + M'_i) \ddot{z}_i = \sum_j \{ -f_n \sin \alpha_{ij} + f_s \cos \alpha_{ij} \}_j - (M_i - \rho_w V_i) g + F_z \quad (9)$$

$$I_i \ddot{\theta}_i = \frac{d_i}{2} \cdot \sum_j \{ f_s \}_j \quad (10)$$

ここで、 M_i : 粒子の質量、 M'_i : 付加質量、 α_{ij} : 粒子 i, j の接触角、 f_n, f_s : 粒子 i, j 間の法線および接線方向の作用力、 F_x, F_z : 粒子に作用する x 方向および z 方向の流体力、 V_i : 粒子の体積、 I_i : 粒子の慣性モーメント、 d_i : 粒径、 ρ_w : 水の密度である。なお、付加質量 M'_i は付加質量係数 C_M を用いて、 $M'_i = \rho_w C_M V_i$ で表される。 C_M には 0.5 を用いた。また、流体から受ける外力 F_x および F_z としては前野ら¹²⁾と同様に、流れによる力と圧力勾配による力を考慮し、バネ定数、粘性定数等のモデル定数は後藤ら¹⁶⁾と同様の方法により、 $\alpha_{tn} = 20.0$ および $\alpha_{cn} = 1.3$ を与えた。

(3) 解析モデルと解析条件

(a) 解析対象モデル

図-1 は、本研究で採用した堰構造物の形状である。これは、過去に前野ら^{4), 5), 6)}が行った破壊実験において、越流時に破壊の起こる粒径 4.8cm の場合を対象としてモデル化したものである。図-2 には、VOF 法における解析メッシュと DEM の初期パッキング結果を示している。本研究では、粒子の初期配列を決定するために、各要素間と河床との間にわずかな間隙を残した非接触状態から、自由落下を想定した計算を行い、要素のパッキングを行った。全ての要素がほぼ停止した時点でパッキング完了と判断した。パッキングに要した時間は 0.8 秒である。実験では、下流側最下層の石礫を河床に固定しているため、本モデルも、最下層の最も下流側の 1 粒子を固定粒子として、移動を制限している。VOF 法では、 x 方向に

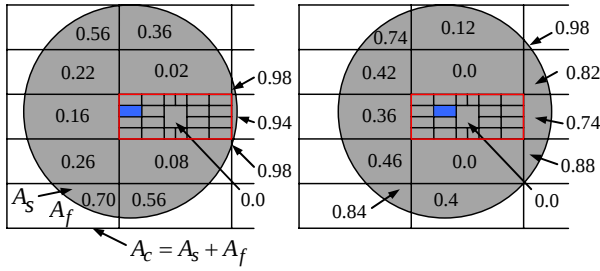


図-3 間隙率の補正と更新（概念図）

2.5cm, z 方向に 1.0cm 間隔でメッシュを設定している。なお, z 方向の最下段のメッシュのみ間隔が 0.5cm であるのは, 流量が少ない場合など水位が低い時に, 計算が不安定になるのを避けるためである。

(b) 計算条件

流量に関しては, 破壊実験と前野ら⁹⁾の解析結果から, 15(l/s)前後で法面の抜け出し破壊が起こり, その後段階的に破壊が進行していくと予想されることから, 幅を持たせて 10~25(l/s)までとし, 120 秒間かけて線形的に増加させた。パラメータの設定については, 計算時間ステップを $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ (sec)として, 付加質量係数 C_M は 1.0, 粒子間の摩擦係数は木山ら¹⁷⁾を参考に $\mu = 0.577$, 粒子と壁との摩擦係数は $\mu = 0.176$ とした。

(4) VOF-DEM の連成方法

VOF 法で多孔質部を解析する場合には, 式(2)~式(4)に示すように, 流れ場を支配する基礎式に間隙率が必要となる。また, 式(5)~式(7)に示すように, 流体が多孔質体から受ける抗力の算定においても間隙率が重要な要素となる。よって, 捨石および砂粒子の変形やかみ合わせの変化による間隙率の変化は, 流体部と多孔質体境界付近の流体運動に大きな影響を与えるため, VOF-DEM の連成にあたっては, DEM 粒子の移動に伴う間隙率の変化を更新し, VOF 法へフィードバックするモデルが必要となる。前野ら¹⁵⁾は潜堤を対象とした VOF-DEM-FEM 連成モデルにおいて, メッシュサイズよりも小さな粒子を対象とした連成手法を提案しているが, DEM 粒子がメッシュサイズよりも大きい場合には適用できないため, 本研究では, 以下のような方法を採用した。

図-3 は, 図-2 におけるある粒子部分を拡大して示したものであり, 図の青い塗りつぶしの部分の中心に粒子の中心が位置しているものとする。図中の数字はその時の各セルにおける間隙率を示している。単純に 2 次元場の粒子配列から得られる間隙率をそのまま用いると, 円柱粒子を仮定しているため, 例えば, 粒子の中心が位置する VOF セル (図の赤枠の部分) では, 図に示すように間隙率が 0 となり, 3 次元的なかみ合わせをもつ実際の粒子配列からなる間隙率と一致しなくなる。そこで本研究では, 各セルに占める粒子面積 A_s を算出した後, 実験により得られた捨石部の間隙率 n_{exp} を 0.41 として, 間隙率 n を以下のように補正した。

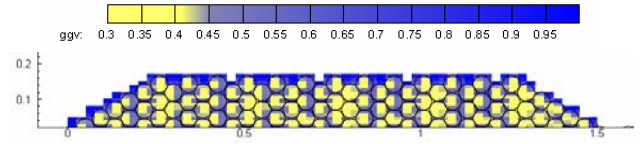


図-4 空隙率の分布

$$n = (A_f + A_s n_{\text{exp}}) / (A_f + A_s) \quad (11)$$

ここに, A_f は各セルに占める粒子円外の間隙面積であり, 間隙率が定義されるセルの面積を A_c とすると, $A_c = A_s + A_f$ である。

このようにして間隙率を算出できるが, 微小な粒子位置の移動による間隙率の変化をその都度計算すると解析に対する時間的な負荷が大きくなる。そこで本研究ではあらかじめ図-3 に示すように, 粒子の中心が存在するセルをさらに 21 個に小分けにした小セルの中に粒子の中心が位置するそれぞれの場合について, 粒子の存在する各セルに占める粒子面積 A_s を算出しておき, 粒子位置の判定のみで間隙率を与えることができるようにした。図より, 同じセル内であっても, 各セルの間隙率が異なるのがわかる。セル内に他の粒子がある場合には, 粒子の占有面積 A_s を重ね合わせて間隙率を算出した。

以上のように粒子周りのセルに間隙率を持たせることで, 多孔質体内ではほぼ間隙率が実験値に近い 0.41 となった (図-4)。さらに, 粒子位置が変化することによって間隙率も更新されるため, VOF 法における多孔質抵抗を適切に評価できるようになる。

(5) 実験の概要

(a) 捨石堰の実験結果

前野ら^{4), 5)}の捨石堰の実験によると, 通水流量の増加に伴い, まず, 堰下流法面にある特に噛み合わせの弱い石礫が 2, 3 個抜け出す初期破壊が発生するが, 堰本体は崩れない。その後, 下流側法面の粒子が浮き上がり, 抜け出そうとするが, 下側の粒子との噛み合いでロックされる。さらに流量を増加させていくと, 法面中央付近の粒子が完全に抜け出し, それに伴い上側の粒子が転がり落ちてくるために法肩まで崩壊する第 2 段階の破壊が発生する。ここでいったん堰は安定するが, 流量を増やしていくにしたがって, 天端付近の粒子が崩壊し, 大きな崩れを見せる 3 次的, 4 次的な破壊へと段階的に進むことが分かっている。

(b) 捨石堰法面石礫の引っ張り実験

過去の実験に加え, 今回初期破壊における解析モデルの妥当性を明らかにするために, 簡単な実験を行った。図-5 に示すように, 過去の実験, 解析から初期破壊の起こる法面の石礫を鉛直, 水平, 斜めの 3 方向からモーメントが加わらないように力を加え, どの程度で抜け出すのかをバネはかりを用いて空気中で測定した。ここで, 斜め方向とは, 堰の法面に対して垂直な方向である。また, 堰の法面の勾配は前野ら^{4), 5)}の実験を参考に, 27°程

度とした。表-1 は、10 回行って得られた各方向の抵抗力の平均値である。その結果、堰の法面粒子の、鉛直、斜め方向の引っ張りに対する抵抗力は、水平方向のそれに比べていずれも 6 割程度しかないことがわかる。このことは、前野ら¹²⁾が解析で示したように、法面粒子の抜け出しには圧力勾配に起因する法面に垂直な力の影響が大きいという解析結果と一致する。

3. 解析結果と実験との比較

(1) 破壊過程

まず、解析スタート時の流量である 10(l/s)から徐々に流量を増やすが、しばらくは、粒子の移動は見受けられなかった。さらに流量を増やし、15(l/s)を越えるあたりから、法面中央付近の粒子が少し浮き上がってくるが、噛み合わせの影響で抜け出しには至らなかった。実験では初期段階の破壊は、流量約 14(l/s) の時点で噛み合わせの特に弱い粒子が抜け出し、脱落したが、本解析で初期段階の法面粒子の抜け出しが見られなかったのは、パッキング時の粒子の噛み合わせが良好なためであったと考えられる。初期破壊過程は再現出来なかったが、実験における初期破壊も大きな形状の変化を伴わないものであるため、予測精度上の問題はないと思われる。

図-6 は、計算開始後 56.8 秒経過し、流量が約 17.1(l/s)まで増加した時に発生した下流側法面付近の第 2 段階の破壊の様子を示している。各図の上部にあるのは、計算開始後の時刻とその時の流量であり、オレンジ色で囲った枠は、破壊の様子を確認のために捨石堰の初期形状の概略を示したものである。図より、まず、浮き上がっていた法面中央付近の粒子が抜け出し、それに伴い上側の粒子が落ちてくることがわかる。これは過去の研究でも明らかのように、法面中央付近の粒子に作用する流体力の影響が表れたもので、本解析モデルでも同じ動きが確認された。さらに法肩の粒子も流れに押し出される形で破壊していった。これにより、破壊が法面から法肩へと進む様子が確認できる。さらに、水色の矢印は流れの流速を示しているが、これを見ると、粒子の抜け落ちた箇所に水が浸入してくるのが分かり、空隙率の変化に伴う流れの変化も再現できたと言える。破壊の起こった際の流量に関しても、実験値 16.5(l/s)と同程度であり、実験経過をよく再現できている。

第 2 段階の破壊の後、法面に残った粒子の一つが流れに押し出されて破壊したが、それ以外に目立った破壊は発生せず、堰はいったん安定を見せた。その後も徐々に流量を増加させると、2 段階の破壊から約 16 秒後、流量約 19.2(l/s)の時に、第 3 段階の破壊が発生した。図-7 はその破壊の様子を示したものである。第 2 段階の破壊と異なり、今度は法面の破壊により表面に出てきた天端部の粒子 2 つが破壊していく様子が分かる。移動した粒子のうち上流側の粒子は、下流側の粒子があった場所に落ち

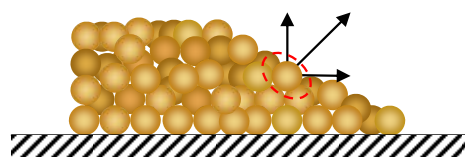


図-5 引っ張り実験概略図

表-1 各方向の抵抗値

鉛直	斜め	水平
2.81N (287g)	3.04N (311g)	4.75N (485g)

込んで停止した。実験では第 3 段階の破壊は 20.4 (l/s)で発生しており、本解析は第 3 段階の破壊も概ね予測できたことがわかる。

以上のように、捨石堰の破壊は下流側法面の粒子の抜け出しによって始まり、その後、法肩、天端部へと移行していく様子を再現できた。また、捨石堰の破壊が安定期と破壊を交互に繰り返すという実験結果も概ね再現できたといえる。各段階の破壊が起こった際の流量も実験結果とほぼ一致しており、本解析モデルは、今後設置される捨石構造物の破壊予測モデルとして有効であることが示された。

(2) 圧力勾配による力及び流れによる抗力

図-8 は、法面の抜け出し破壊が起こる時と、天端部の粒子が脱落する時の各粒子に作用する圧力勾配による力（以下では圧力勾配力とする）の大きさを示したものである。また、破線で囲った粒子は、直後に移動を起こす粒子を示したものである。従来の研究により、法面粒子の抜け出しには、圧力勾配力の影響が大きいことが分かっている。図-8 から見て取れるように、抜け出しを起こす粒子には比較的大きな力が作用していることが分かる。また、特徴的には、水平方向の力に加えて、法面に垂直な向きの力が作用している。これは、抜け出し破壊の特徴である、鉛直もしくは法面に垂直な方向の力に対する法面粒子の抵抗力が比較的弱いという実験結果と概ね一致するものである。また、第 3 段階の破壊の特徴である天端部の粒子の破壊も、同様に法面に垂直な方向への圧力勾配力が大きい。このことから、本解析モデルにおいては、抜け出し破壊の後、段階的に起こる破壊も、圧力勾配力の影響が大きいと結論付けることが出来る。

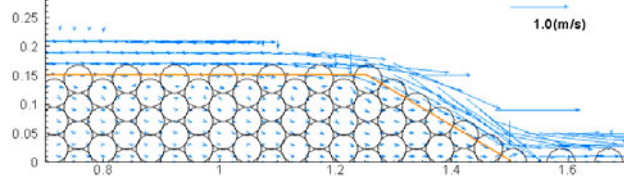
図-9 は、圧力勾配力分布と同時刻における、流れによる抗力の分布図を示している。法肩付近で比較的大きな値を見せるが、圧力勾配力と比較すると粒子の抜け出し破壊への影響は比較的小さいと思われる。

(3) 捨石堰周辺の流れ

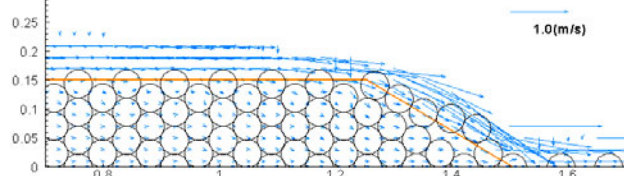
図-10 は、解析スタート時から、流量の増加に伴い変化する捨石堰周辺の流れの流速分布を示したものである。

まず、一様に近づいてきた流れが捨石堰にぶつかり、一

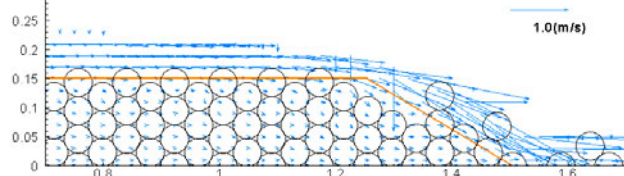
Q=17.1(l/s) 56.8(s)



Q=17.15(l/s) 57.2(s)



Q=17.20(l/s) 57.6(s)



Q=17.25(l/s) 58.0(s)

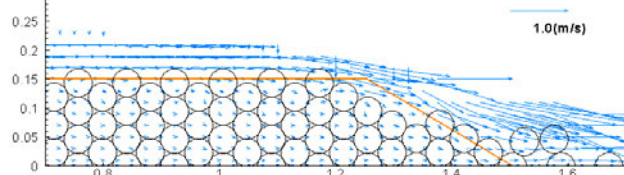
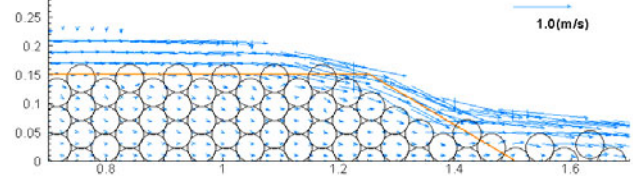
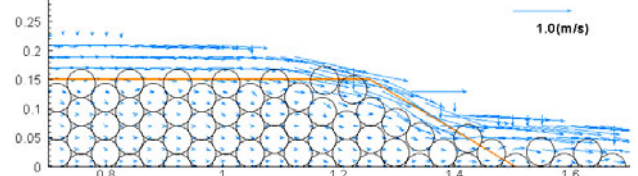


図-6 第2段階破壊時の法面部分の破壊過程

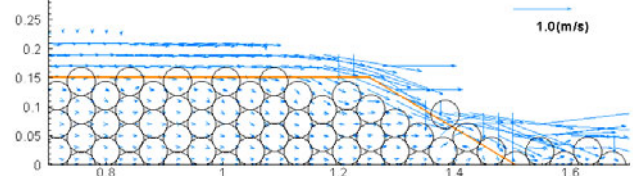
Q=19.2(l/s) 73.6(s)



Q=19.25(l/s) 74.0(s)



Q=19.30(l/s) 74.4(s)



Q=19.35(l/s) 74.8(s)

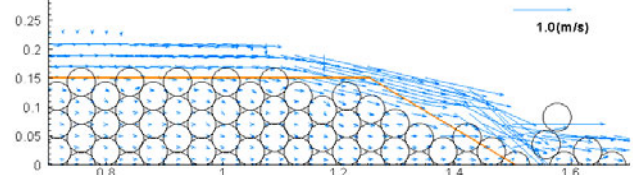
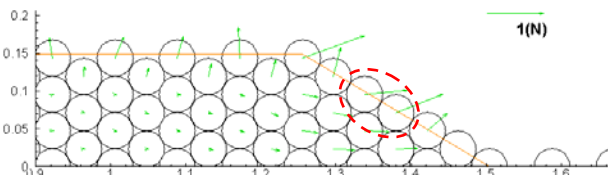


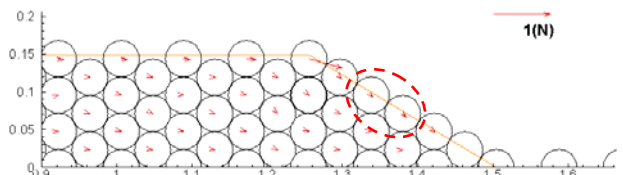
図-7 第3段階破壊時の天端部分の破壊過程

56.8(s)



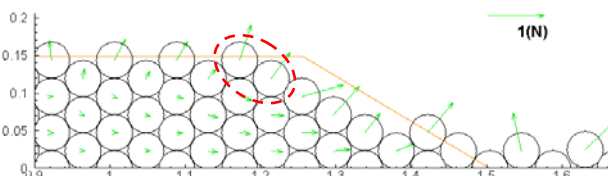
(a) 第2段階破壊時の抗力分布
(法面部分粒子破壊時)

56.8(s)



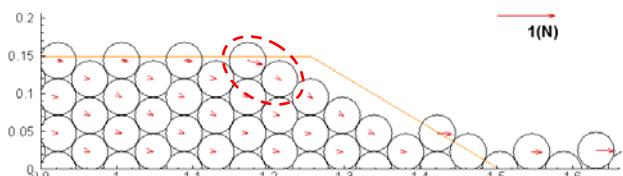
(a) 第2段階破壊時の抗力分布
(法面部分粒子破壊時)

73.6(s)



(b) 第3段階破壊時の圧力勾配力分布
(天端部分粒子破壊時)

73.6(s)



(b) 第3段階破壊時の抗力分布
(天端部分粒子破壊時)

図-8 破壊直前の粒子にかかる圧力勾配力分布

図-9 破壊直前の粒子にかかる抗力分布

部は堰体内に侵入するが、大部分は堰の上流側法面に沿って上昇し、天端に流れ込むことが分かる。さらに下流側法面付近で堰体内に侵入する流れが増加し、下流側法面から出水している。過去の実験からもこのような特徴が確認されており、実験を概ね再現できたといえる。また、流量増加に伴い堰天端上部を流れる流速は増加し、

水位も流量とともに増加している。さらに、オレンジ色の枠は捨石堰の形状の概略を示したものであるが、堰の破壊に伴う流れの変化や、堰を通過した流体の流れも前野ら^{4),5),9)}の実験と良好に一致していると言える。

4. 結論

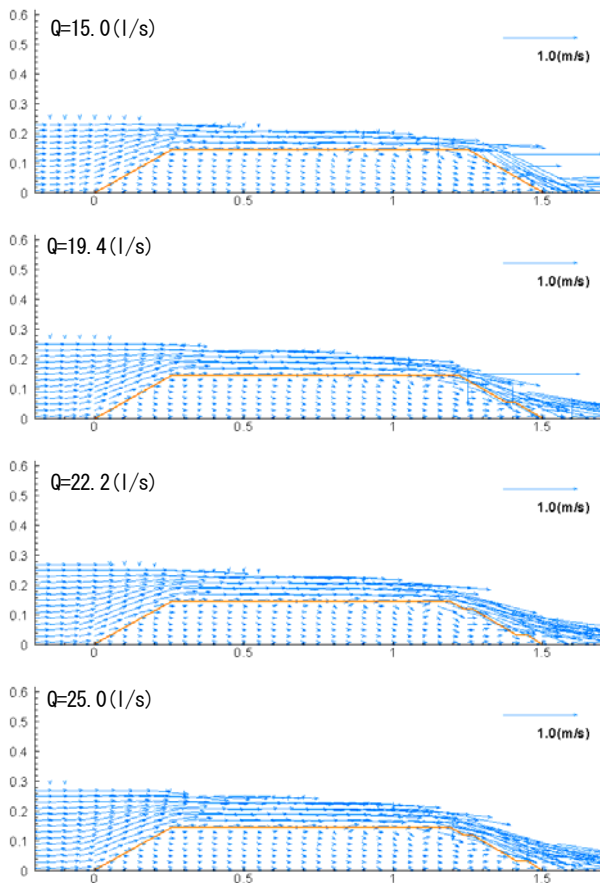


図-10 捨石堰周辺の流れ

本研究では、捨石堰を対象として流量を徐々に増加させた際の流体力の変化を VOF 法により計算し、得られた流体力を石礫に働く作用力として DEM 解析に順次組み込むことで、捨石堰の破壊過程を捉えるシミュレーションを行った。これによって得られた結果を以下にまとめる。

- 1) VOF 法と DEM を連成させた本解析モデルによって、粒子の移動とそれに伴う流体部の変化を同時に追跡できた
- 2) 下流側法面中央付近の石礫の抜け出しから始まり、法肩、天端部へと移行していく捨石堰の破壊の様子を再現できた
- 3) 捨石堰の破壊は、安定期と破壊を交互に繰り返すことが再現できた。
- 4) 捨石堰の法面粒子の抜け出しには法面粒子に作用する圧力勾配による力の影響が大きいという破壊特性が明らかになった。

今後は、粒子の積み上げ方や、勾配の違いによる破壊過程のシミュレーションを行うとともに、実際の粒径に近い混合粒径での解析を行い、モデルの精度をさらに向上させる必要がある。また、本研究では、法面粒子の破壊力の計測実験は静的な条件で行い、実際の流れの中での捨石堰の破壊の計測は行っておらず、粒子が流体から受ける外力の妥当性の検証が十分できていない。したが

って、今後は、破壊時の作用力に関する実験を行い、より現実に即したデータを得る必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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, pp.781-786, 2003.
- 7) 前野詩朗, 小川誠, 道奥康治: 鉛直 2 次元モデルによる多孔質堰を通過する流れの解析, 土木学会論文集, Vol.63 No.1, pp.16-28, 2007.
- 8) 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: 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, 1999.
- 9) 伊藤一教, 東江隆夫, 勝井秀博: DEM 法と VOF 法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.746-750, 2000.
- 10) 伊藤一教, 樋口雄一, 東江隆夫, 勝井秀博: 個別要素法に基づく捨石のランダム性を考慮した潜堤の変形予測手法, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.806-810, 2001.
- 11) 荒木進歩, 小竹康夫, 金澤 剛, 松村章子, 出口一朗: VOF 法と個別要素法の連成解析による傾斜捨石護岸の変形予測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.931-935, 2001.
- 12) 前野詩朗, 道奥康治, 加瀬瑛斗, 菊池慶太: 個別要素法を用いた捨石堰の破壊予測, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.787-792, 2005.
- 13) Edward, C. C., L. Fue-Sang and M. M. Yovanovich: Numerical study of forced flow in a back-step channel through porous layer, 34th, ASME National Heat Transfer Conference, pp. 1-6, 2000.
- 14) 道奥康治, 南條雅志, 石垣泰輔, 前野詩朗: 捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル, 土木学会論文集, No.782/II-70, pp. 31-50, 2005.
- 15) 前野詩朗, 小川 誠, Bierawski, L.G.: VOF-DEM-FEM モデルによる潜堤の挙動解析, 海岸工学論文集, pp. 886-890, 第 53 巻, 2006. 11.
- 16) 後藤仁志, 林 稔, 酒井哲郎: 固液二相流型 MPS 法による波・底泥相互干渉の数値解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.1-5, 2001.
- 17) 木山英郎, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文集, 第 333 号, pp.137-146, 1983.

(2007. 9. 30 受付)