

# 個別要素法を用いた捨石堰の破壊予測

## FAILURE PREDICTION OF A RUBBLE MOUND WEIR USING DISTINCT ELEMENT METHOD

前野詩朗<sup>1</sup>, 道奥康治<sup>2</sup>, 加瀬瑛斗<sup>3</sup>, 菊池慶太<sup>3</sup>

Shiro MAENO, Kohji MICHIOKU, Eito KASE and Keita KIKUCHI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>フェロー会員 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)

<sup>3</sup>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 researcher's attention in recent years. Therefore, it is important to establish a numerical model to predict a possible failure process. In this research, the distinct element method which is used for modeling the aggregate of discontinuous elements is applied to model a failure process of the rubble mound weir. Hydrodynamic forces acting on the rubble-mound weir such as drag force and seepage force which are required in the calculation of DEM was obtained by the flow analysis using VOF technique. It is confirmed that the numerical results using the proposed method can reproduce the movement of particles in the early stage of failure under the steady flow condition. It is also clarified that the contact angle of DEM particles has a significant effect on the failure process.

*Key Words: rubble mound weir, nature-friendly structure, seepage force, distinct element method, failure process, VOF*

### 1. はじめに

近年の自然環境問題に対する意識の高まりを受けて、水と親しみやすいかつての河川を取り戻そうという観点から、治水や利水のことだけを考えるのではなく、景観に配慮し、水生生物にやさしい、自然に近い材料や工法を用いた「多自然型」の川づくりが盛んになってきている。本研究で扱う自然石を用いた透水性の堰（以下、捨石堰と呼ぶ）も、こうした多自然型川づくりの一つである。従来のコンクリートや鋼製の不透水性の堰は、堰上流側の流れを滞留させ、河川が持つ本来の自浄作用を低下させるため、その周辺の水生生物や水質・底質に影響を及ぼす。一方、捨石堰は、景観面や親水性ばかりでなく、これらの問題にも効果を発揮することが期待されている。ところが、捨石堰のような自然石を用いる堰については未解明の部分も多く、設計に際しては明確な指針が確立されていないのが現状である。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きた<sup>1),2),3),4),5)</sup>。さらに、堰内の流速や圧力に関して、VOF法を用いた流

れのモデルを構築し、解析を行ってきた<sup>6),7)</sup>。また、堰の破壊は本来の利水機能を損なうのみならず、周辺の河川護岸の破壊や河床変状をもたらすなど、河川の治水機能をも低下させる。従って、捨石堰の破壊機構を明らかにしておくことが工学上重要な課題であるとの観点から、堰の破壊過程についても実験的な検討を行ってきた<sup>8),9)</sup>。しかし、堰の幾何形状や水理条件などを多種多様に变化させて多くのケースの実験を行うことは、時間やコスト面で効率が悪く、本研究では、従来の研究で得られた、堰内および堰周辺の流れによる流体力をもとに、石礫に作用する力を計算し、石礫の移動による堰の破壊過程のシミュレーションを行う。また、過去に行われた水理模型による破壊実験との比較を行い、解析モデルの妥当性を明らかにする。

### 2. 破壊モデルの概要

#### (1) 個別要素法の概要

本研究では、捨石堰を構成する石礫の破壊過程を再現するための方法として、個別要素法 (DEM, Distinct Element Method)<sup>10)</sup>を採用した。また、解析

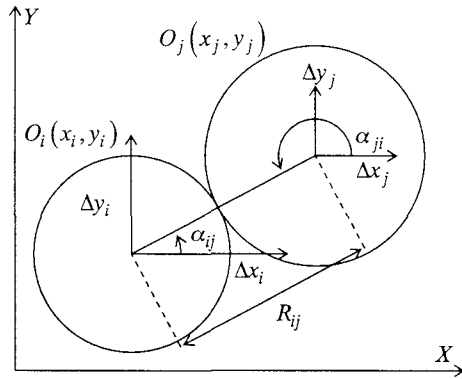


図-1 要素接触判定

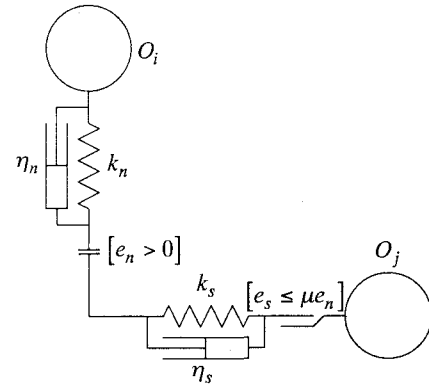


図-2 要素間作用力モデル

表-1 モデル定数

粒径(cm)	3.2		4.8	
	Inter-element	Wall-element	Inter-element	Wall-element
Δt(sec)	1.0 × 10 <sup>-4</sup>			
k <sub>n</sub> (N/m)	3.09 × 10 <sup>5</sup>	6.18 × 10 <sup>5</sup>	1.04 × 10 <sup>6</sup>	2.09 × 10 <sup>6</sup>
k <sub>s</sub> (N/m)	1.19 × 10 <sup>5</sup>	2.38 × 10 <sup>5</sup>	4.01 × 10 <sup>5</sup>	8.02 × 10 <sup>5</sup>
η <sub>n</sub> (N·s/m)	2.78 × 10 <sup>2</sup>	5.56 × 10 <sup>2</sup>	9.39 × 10 <sup>2</sup>	1.88 × 10 <sup>3</sup>
η <sub>s</sub> (N·s/m)	1.73 × 10 <sup>2</sup>	3.45 × 10 <sup>2</sup>	5.82 × 10 <sup>2</sup>	1.16 × 10 <sup>3</sup>
μ	0.577	0.176	0.577	0.176

に必要な諸量（流速や浸透力など）に関しては、磯部らの数値波動水路<sup>11)</sup>に基づく著者らの堰内流れの解析値を用いた。解析には後藤らのMBSコード<sup>12)</sup>を基礎としたプログラムを用いた。

個別要素法はCundallらによって提案された不連続要素の集合体の解析手法である。個々の要素が運動方程式を満足し、要素間の力の伝達は接触点でのみ起こり、作用・反作用の法則に従うものとしている。Cundallらが当初考えたモデルは多角形要素を用いたものであったが、これは要素間の接触判定が複雑であり、粒子数の多い解析には不向きであった。この問題を解決するため、Cundallらや木山らによって、接触判定が容易な円形要素が用いられるようになった<sup>13)</sup>。本研究でも円形要素を採用している。以下に計算過程を示す。

## (2) 基礎式

### a) 要素間接触判定法

任意の円形要素*i*が時刻*t* - Δ*t*から*t*に至る微小時間Δ*t*間の水平、鉛直、回転方向の変位をそれぞれΔ*x*<sub>*i*</sub>、Δ*y*<sub>*i*</sub>、Δφ<sub>*i*</sub>と定義する。

図-1に示すように、任意の要素*i*、*j*が接近するときの接触判定は、次式で与えられる。

$$r_i + r_j \leq R_{ij} \quad (1)$$

ここに、(x<sub>*i*</sub>, y<sub>*i*</sub>)、(x<sub>*j*</sub>, y<sub>*j*</sub>)：要素*i*、*j*の座標、r<sub>*i*</sub>、r<sub>*j*</sub>：要素*i*、*j*の半径、R<sub>*ij*</sub>：要素*i*、*j*間の距離である。

### b) 要素間作用力算定法

要素間の接触状態を図-2のようにモデル化する。各要素の接点には、法線および接線方向に、各々弾性スプリング（ばね定数k<sub>*n*</sub>、k<sub>*s*</sub>）と粘性ダッシュポット（減衰定数η<sub>*n*</sub>、η<sub>*s*</sub>）を配置する。さらに、法線方向には引っ張りに抵抗しないジョイントを、接線方向には一定以上の力が作用すると滑動するジョイントを配置した。要素*i*、*j*間の法線および接線方向の作用力f<sub>*n*</sub>、f<sub>*s*</sub>は、

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \quad (2)$$

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t \quad (3)$$

と表され、右辺の各項は以下の式で計算される。

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + k_n \Delta u_n \quad (4)$$

$$[d_n]_t = \eta_n \Delta u_n / \Delta t \quad (5)$$

$$[e_s]_t = [e_s]_{t-\Delta t} + k_s \Delta u_s \quad (6)$$

$$[d_s]_t = \eta_s \Delta u_s / \Delta t \quad (7)$$

ここに、e<sub>*n*</sub>、e<sub>*s*</sub>：法線および接線方向のばねによる抗力、d<sub>*n*</sub>、d<sub>*s*</sub>：法線および接線方向のダッシュポットによる抗力、Δu<sub>*n*</sub>、Δu<sub>*s*</sub>：法線（接近を正）および接線方向（反時計回りを正）の相対変位増分である。また、法線および接線方向のジョイントの効果は次式で表される。

[e<sub>*n*</sub>]<sub>*t*</sub> ≤ 0 のとき、

$$[e_n]_t = [d_n]_t = 0, [e_s]_t = [d_s]_t = 0 \quad (8)$$

[e<sub>*s*</sub>]<sub>*t*</sub> > μ[e<sub>*n*</sub>]<sub>*t*</sub> のとき、

$$[e_s]_t = \mu[e_n]_t \cdot \text{sign}([e_s]_t), [d_s]_t = 0 \quad (9)$$

ここに、μ：摩擦係数、sign(*a*)は変数*a*の正負を表す記号である。計算に用いたモデル定数は、後藤ら<sup>12)</sup>の研究のΔ*t*による安定条件を考慮して、表-1の

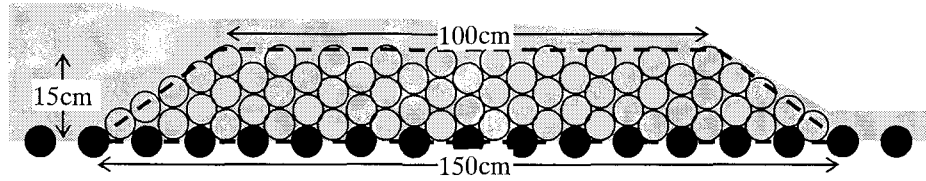


図-3 堰モデル

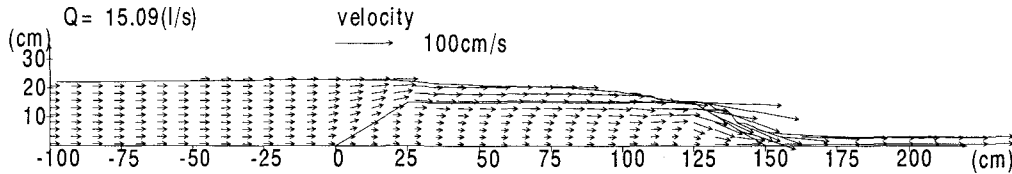


図-4 流速分布の例

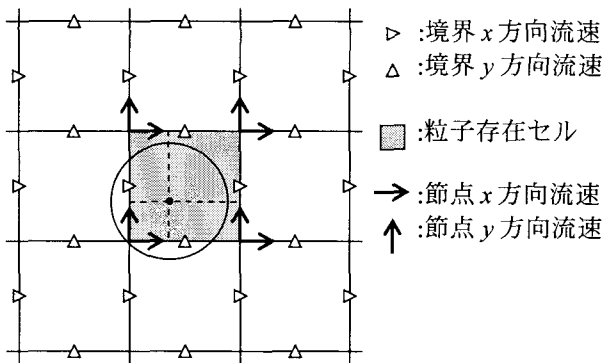


図-5 作用流速計算

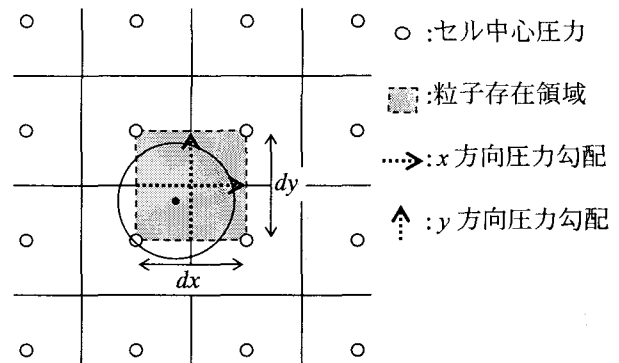


図-6 作用浸透圧力計算

ように決定した。

### c) 運動方程式

個々の要素間の作用力をまとめると、各要素の並進および回転の運動方程式は

$$[F_{xi}]_t = \sum_j \{ -[f_n]_t \sin \alpha_{ij} - [f_s]_t \cos \alpha_{ij} \} + f_{Dx} + f_{Px} \quad (10)$$

$$[F_{yi}]_t = \sum_j \{ -[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij} \} - m_i g + f_{Dy} + f_{Py} \quad (11)$$

$$[M_i]_t = r_i \cdot \sum_j \{ [f_s]_t \} \quad (12)$$

となる。ここに、 $\alpha_{ij}$  : 要素  $i$ ,  $j$  の接触角,  $m_i$  : 要素  $i$  の質量,  $f_{Dx}$ ,  $f_{Dy}$  :  $x$ ,  $y$  方向の抗力,  $f_{Px}$ ,  $f_{Py}$  :  $x$ ,  $y$  方向の浸透力,  $g$  : 重力加速度である。これを逐次積分して、各要素の運動を追跡する。

## 3. 解析モデル

### (1) 堰モデル

従来の研究<sup>8),9)</sup>により、堰の破壊は下流法面上の3

次元の拘束力の比較的少ない箇所から始まることが明らかにされている。このような点を考慮すると、2次元の取り扱いにおいても、ある程度石礫の移動限界を把握することが可能であると考えられる。本研究では計算の簡便性なども考慮して、2次元モデルを適用した。

解析では、過去に行った破壊実験と比較するため、図-3のような形状の堰モデルを採用した。塗りつぶされた粒子は、河床を表す固定粒子で、滑らかでないのは、実際の河床の状況を再現するためである。縮尺は概ね実際の河川構造物の1/10~1/15程度を想定している。また、利用した堰内流れモデルの流体力データは、 $x$ 方向に2.5cm,  $y$ 方向に1.25cm間隔のメッシュに基づいているため、DEMの解析領域にも同様のメッシュを設定して、以下に述べる流体力の算出の際に必要な粒子位置を決めた。

### (2) 流体力の取扱い

#### a) 抗力の計算

流れの計算結果から、図-4のような流速分布が得られる。このデータから、各セル境界における水平方向および鉛直方向の流速を読み取り、各々平均して各セルの4隅における流速を計算する(図-5参

表-2 解析条件

	粒径(cm)	流量(l/s)	備考
Case1-a	3.2	1.33	
Case1-b		15.47	
Case1-c			粒子間接触角を変更
Case2	4.8	15.07	

照) . 粒子が位置するセルの4隅の節点における流速をもとに, セル内における粒子位置を考慮して重み付き平均によって, 粒子に作用する流速を算出する. ここで求められた流速を用い, 次式により抗力を算出する.

$$f_{Dx} = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi d^2}{4} |u| u \quad (13)$$

$$f_{Dy} = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi d^2}{4} |v| v \quad (14)$$

ここに,  $C_D (=1.0)$  は抗力係数,  $u, v$  は水平, 鉛直方向の流速,  $d$  は粒径である. なお, 本研究では, 主に粒子の初期移動限界に着目したため, 粒子移動後の相対速度は無視している. 今後, 破壊過程を再現するモデルを構築する際には, この影響も考慮する必要がある. また, ここで用いた流速は, 堰内流れを解析するモデルにおいて, 堰部分を間隙率0.4の透水性構造物として取り扱っており, 堰を出入りする流れの質量保存則は満足されている.

#### b) 浸透力の計算

流れの計算結果から, 各セル中心における圧力を読み込み, セルの中心を結んだ新たなメッシュを考慮して, 粒子が存在する領域における圧力勾配を求める (図-6参照). 次式のように, 求められた圧力勾配に粒子を球体と仮定した体積を乗じて, 粒子に作用する浸透力を算出する.

$$f_{Px} = P_{Gx} \frac{\pi d^3}{6} \quad (15)$$

$$f_{Py} = P_{Gy} \frac{\pi d^3}{6} \quad (16)$$

ここに,  $P_{Gx}, P_{Gy}$  は水平, 鉛直方向の圧力勾配である.

#### (3) 解析条件

解析は表-2に示すように, 初期条件を変化させた計4ケースについて行った. 大別して, 粒径3.2cmのCase1と4.8cmのCase2の2パターンで, Case1-aは流量が小さい非越流の場合, Case1-bおよびCase2は実験において堰の大きな破壊が生じた場合, また, Case1-cは, Case1-bから粒子の接触角を変化させた

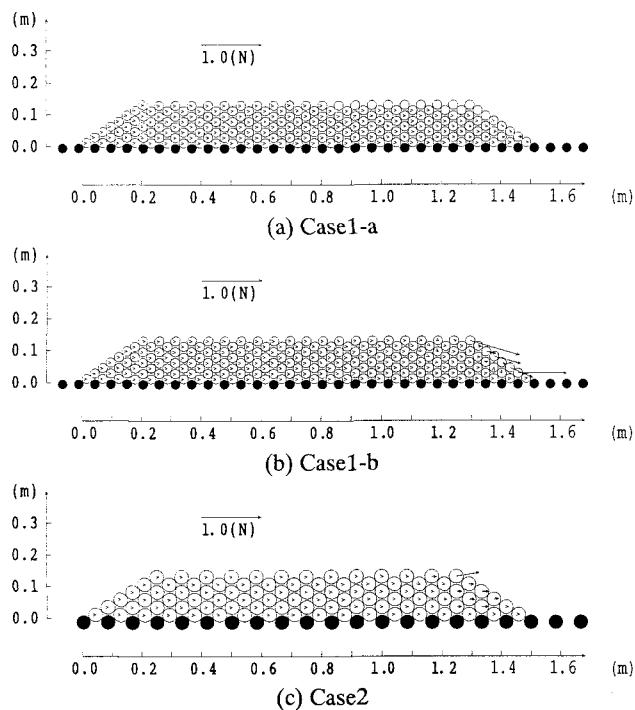


図-7 抗力分布

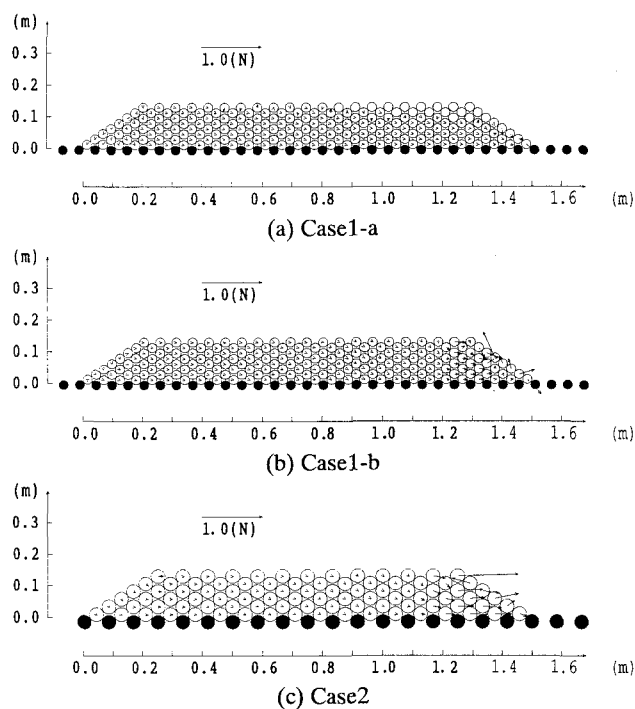


図-8 浸透力分布

場合である. 各ケースにおいては, 基本的に初期状態の堰に設定流量における流体力を瞬時に作用させた.

#### 4. 解析結果および考察

##### (1) 流体力分布

###### a) 抗力分布

図-7は個々の粒子に作用する抗力の分布を示したものである. 下流側法肩および法面では堰表面に大

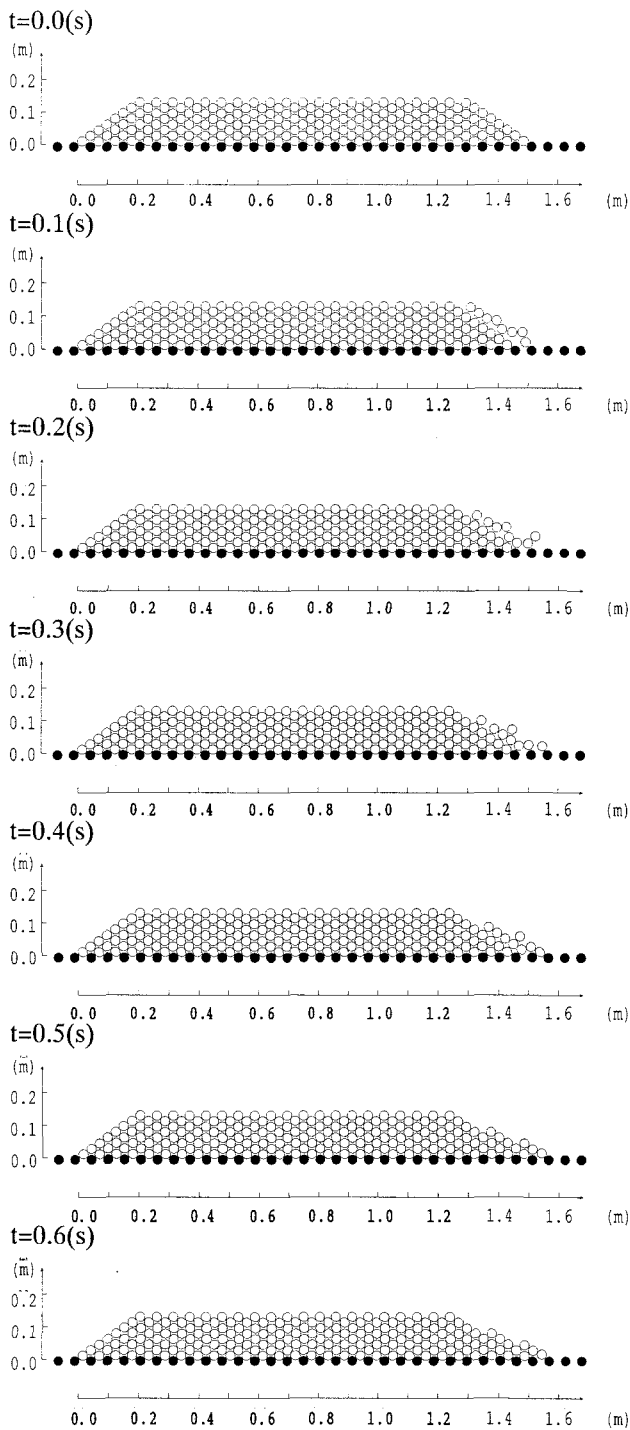


図-9 破壊過程(Case1-b)

きな抗力が作用しているのがわかる。このことは、法面側への粒子の張り出しが大きいCase1-bにおいて、特に顕著である。Case2における法面表層の粒子の抗力がほぼ同流量のCase1-bに比べて小さいのは、堰形状と粒子のパッキング形状の相違による粒子の張り出し具合が影響していると考えられる。なお、抗力の値は全体的に浸透力に比べて小さいが、堰下流法肩部分では抗力の値が大きくなり、法肩粒子の移動に影響を与えていると思われる。

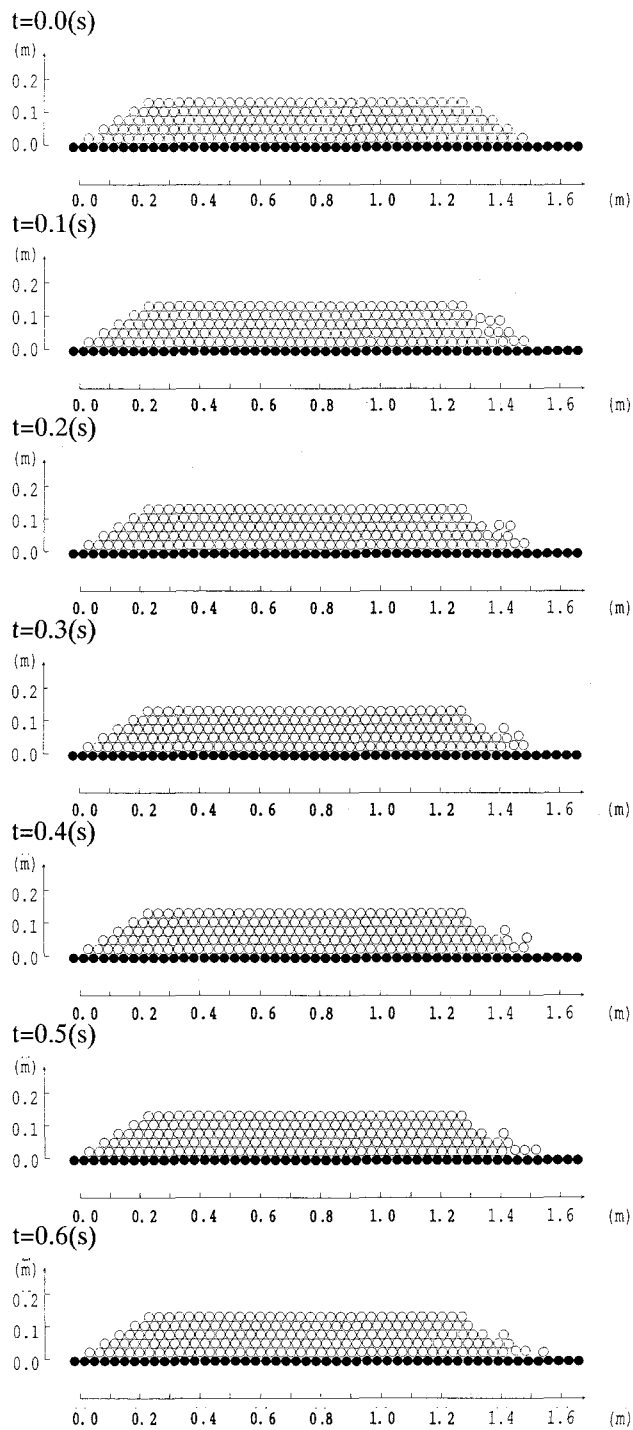


図-10 破壊過程(Case1-c)

#### b) 浸透力分布

Case1-a, Case1-bおよびCase2における堰内の個々の粒子に作用する浸透力の様子を図-8に示した。非越流状態で、極めて流量の少ないCase1-aを除き、下流側法面中央付近の粒子に大きな力が作用しているのがわかる。実験においても、破壊はこの部分の粒子が抜け出すことから始まっている。なお、本解析の流量条件では、堰下流側法面の流速はそれほど高速でなく、また静水圧の影響を削除しているため、堰内下流側では鉛直方向に比べ、流下方向の浸透力

が卓越した形になっている。

## (2) 破壊過程

流量の少ないCase1-aでは破壊は起こらなかった。これは実験結果に整合する。

図-9はCase1-bにおける粒子位置の時間変化を示したものである。計算開始後、まず、下流法面中央付近の粒子が法面に垂直な方向に抜け出し、法面を転がって堰下流側に堆積する(0.1秒~0.4秒)。これらの粒子の移動傾向は、著者らの研究による捨石堰の破壊<sup>9)</sup>の進行過程をよく再現している。粒子が抜け出した付近では、それより上側の粒子が抜けた部分に落ちてくるが、実際には、噛み合わせの影響で全ての石礫が落ちてくるとは限らないことが、従来の実験によって示されている。なお、移動は約0.6秒で収束した。

図には示していないが、Case2ではCase1-aと同様に、法面中央付近の粒子が移動したが、大きな破壊には至らなかった。

## (3) 粒子間接触角の影響

図-10は粒子の積み上げ方(粒子間接触角)を変化させて、隣り合う粒子同士の拘束を小さくしたCase1-cにおける破壊過程を示したものである。各粒子に作用する浸透力や抗力の分布はCase1-bと概ね同じであるが、収束時の堰形状は大きく異なっている。これは、このケースでは、法面表層の粒子が上側の粒子による移動制限を受けることなく自由に移動できること、また、個々の粒子が近傍の粒子に依存することなく安定性を保っているため、抜け出しによる連鎖的な破壊が起こらないことに起因するものと考えられる。

捨石の粒径や形状にもよるが、実際の堰ではCase1-bなどのように、近傍の石礫の移動によって、直接的な力が作用していなくても連鎖的に崩壊する不安定な部分と、このCase1-cのように、近傍の石礫の影響を受けにくい安定な部分が混在していると考えられる。このため、今後はパッキング方法や初期配列も考慮に入れて解析を進める必要がある。

## 5. 結論

本研究では、多孔質堰の流れの解析によって得られる流体力をもとに、個別要素法を用いて、捨石堰の初期破壊現象について、数値力学的観点から検討した。以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

1) 個別要素法を用いた解析モデルにおいて、抗力と浸透力を用いて、粒子が移動し堰が破壊する様子が表現できた。

2) 法面における粒子の抜け出しは、浸透力による影響が大きい。

3) 粒子の安定性は積み上げ方法(粒子間接触角)に大きく影響される。

今後は、破壊による堰形状の変化を流体力に反映できる、DEM-VOFカップリングモデルの構築を目指して、DEMのモデル定数の調整、粒子の積み上げ方法や法面勾配の変化の影響、法面表層の粒子への流体力の与え方などを検討し、実際の捨石堰設計に役立てて行く必要がある。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) K.Michioku, S.Maeno, T.Furusawa and M.Haneda: Discharge through a permeable rubble mound weir, Proc. of 5th ICHE, D-109, 2002.(CD-ROM)
- 3) 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.
- 4) S.Maeno, K.Michioku, S.Morinaga and T.Ohnishi: Hydraulic characteristics of a rubble mound weir and its failure process, Proc. of 5th ICHE, D-170, 2002.(CD-ROM)
- 5) 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.
- 6) 道奥康治, 前野詩朗, 羽根田正則, 古澤孝明: 捨石堰を越流・通過する流れの構造と流量解析, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.131-142, 2003.
- 7) 前野詩朗, 道奥康治, 森永智, 菊池慶太: 捨石堰周辺の流況解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.429-434, 2004.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Cundall,P.A. and O.D.L.Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique 29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 11) 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.
- 12) 後藤仁志, 原田英治, 酒井哲郎: 数値移動床による混合粒径砂の流掃過程のシミュレーション, 水工学論文集, 第44巻, pp.665-670, 2000.
- 13) 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.

(2004.9.30 受付)