

# 浸透破壊現象への粒子法の適用性検討

野原 慎太郎<sup>1\*</sup>・末永 弘<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(一財)電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-0021 千葉県我孫子市我孫子1646)

\*E-mail: nohara-s@criepi.denken.or.jp

地盤内で生じる浸透破壊は斜面を不安定化させる要因として考えられている。浸透破壊に関する既往の研究は室内実験が主であり、数値解析による検討はそれほど多くない。そこで、大変形問題を比較的容易に表現することができる解析手法としてLagrange的解析手法であるMPS法に着目し、地盤内で起こる浸透破壊現象への適用性について検討を行った。まず始めに、MPS法で問題となる圧力振動を抑制することを目的とし、MPS法の改良を行った。次に、改良したMPS法を用い、地盤ビンガム流体とみなし、単純なモデルを用いて変形解析を行った。解析の結果、地盤の変形挙動を概ね表現することができた。以上のことから、粒子法によって浸透破壊に伴う地盤の変形を表現することができる可能性を示した。

**Key Words** : seepage failure, slope stability, MPS, bingham liquid

## 1. はじめに

降雨を要因とする斜面災害は毎年全国各地で起きている。特に近年は時間降雨量が数十mmを超える降雨量が記録されることもあり、降雨に対する斜面の安定性評価がますます重要となっている。降雨がもたらす斜面の不安定化作用としては、間隙水圧の上昇による自重の増加や不飽和斜面内の飽和度の上昇に伴う粘着力の低下が主であり、これらメカニズムに基づき斜面安定性が評価されることが多い<sup>1)</sup>。一方、過去に起きた斜面災害の調査報告では、崩壊斜面内にパイピングが生じた痕跡が確認されている<sup>2)</sup>。その規模は小規模なものから大規模なものまで様々であるが、パイピングが斜面を不安定化させる要因の一つであることが指摘されている。しかし、パイピングが斜面安定に与える影響については未だ明らかにされていないのが現状である。

パイピングとは、透水性の不均質性、地形、植物の根の枯死や土中動物の活動等が影響し、地盤内に局所的な動水勾配が作用し土粒子が流出することによって地盤内にパイプ状の水みちが発生する現象を指す<sup>3)</sup>。一旦パイピングが発生するとその部分の動水勾配が更に大きくなって浸透力が増加し、パイピングの進行が進む。こういった現象は、クイックサンド、ルーフィング、ヒービング等に細分化されることもあるが、本稿では浸透がもたらす地盤内の破壊現象を総称して浸透破壊と呼ぶこととする。浸透破壊に関する既往の研究としては、カラムや模型を用いた室内実験が主であり<sup>4)</sup>、数値解析に関する

検討は必ずしも多くない。そこで、著者らは浸透破壊を表現することができる解析手法の開発に取り組んでいる。

斜面安定評価に用いられる数値解析手法としては、有限要素法や有限差分法に代表される格子を使った解析手法(格子法)が一般的である。格子法は、多くの研究者によって計算精度や計算速度の向上が図られており、現場へ適用した例も多い。但し、斜面崩壊のような破壊の進展に伴う大変形問題では、ある段階を超えると計算が安定しなくなり、計算が進行しなくなるという欠点を有する。以上のことから、大変形問題であっても安定して表現することができる解析手法の開発が望まれる。岩盤力学の分野において、大変形問題を取り扱う解析手法としては個別要素法(DEM)が有名である<sup>5)</sup>。個別要素法は、地盤を離散体の集合とみなす解析手法であり、大変形問題を容易に取り扱うことができる。しかし、現場や室内試験で得たパラメーターを直接入力パラメーターとして使用することは困難であり、パラメーターを設定する際には注意が必要である。また、今回対象とする浸透破壊現象では流体の挙動を取り扱うことが必要不可欠であるが、個別要素法では流体の挙動を考慮することができない。

個別要素法以外に大変形問題を取り扱うことができる解析手法として、最近粒子法が注目されている<sup>6)</sup>。粒子法は、計算格子を必要としないLagrange的解析手法であり、格子法と同じく連続体の支配方程式の離散化に基づく計算手法である。各タイムステップにおいて粒子iの影響半径内に入る粒子を探索し、粒子iと影響半径内

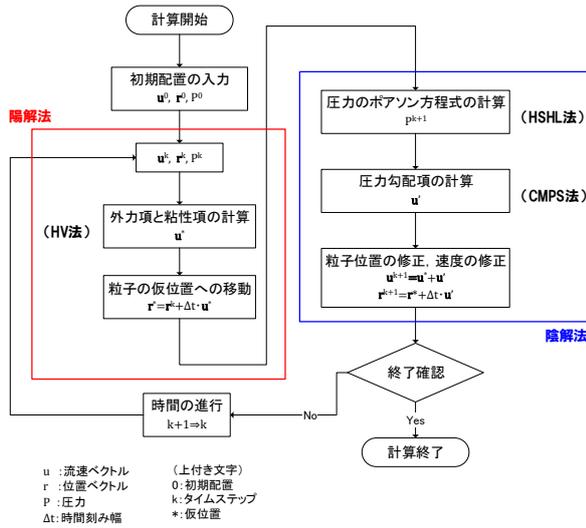


図-1 計算アルゴリズム

に入る隣接粒子 $j$ との間で変数をやり取りして計算が進行する。流体力学の分野で近年検討が進められている解析手法であり、流体の大変形、分離、合体といった複雑な現象を容易に表現することができ、自由表面を有する流体挙動の解析手法として適用が進められている。従って、斜面崩壊のような大変形問題への適用性も高いと考えられ、地盤工学分野への適用が期待される。

粒子法としては、SPH法やMPS法が有名である。SPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)は、近年地盤工学分野への適用が進められている解析手法であり、前田ら(2004)は固相(土)と流体相(水、空気)を連成した解析を行い、地盤内の浸透破壊現象を粒子法によって表現する試みを行っている<sup>7)</sup>。一方、MPS法(Moving Particle Semi-implicit)については地盤工学分野へ適用した例は多くない。MPS法はSPH法に比べて微分演算子の離散化精度を比較的高く保つことができ、計算負荷が相対的に低いとする報告もあることから<sup>8)</sup>、今後地盤工学分野への適用が期待される。以上のことから、本稿ではMPS法による地盤内の浸透破壊現象への適用性について検討した結果について報告する。

## 2. 解析手法

MPS法は、非圧縮流体の挙動を取り扱うことを目的としてKoshizukaほか(1996)によって開発された解析手法である<sup>9)</sup>。式(1)にMPS法の支配方程式(Navier-Stokes方程式)を示す。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{u}$  : 流速ベクトル、 $\rho$  : 密度、 $P$  : 圧力、 $\mu$  : 粘性係数、 $\mathbf{F}$  : 外力であり、 $D/Dt$ はLagrange微分を表す。

MPS法はLagrange的解析手法であるため、Navier-Stokes式の移流項を計算する必要がなく、Euler的解析手法で問題となる数値拡散を気にしなくて良いことも利点としてあげられる。ここで、過去の論文に従って、式(1)の右辺第1項を圧力勾配項、右辺第2項を粘性項、右辺第3項を外力項と呼ぶこととする<sup>9)</sup>。MPS法では、粘性項と外力項を陽的に、圧力勾配項を陰的に解く半陰解法(Semi-implicit)によって計算が進行する。図-1にMPS法の計算アルゴリズムを示す。

Koshizukaほか(1996)によって、式(1)の微分演算子に対する離散モデルが示されている<sup>9)</sup>。式(2)に勾配モデル、式(3)にラプラシアンモデルを示す。各モデルには重み関数 $w$ が導入され、粒子 $i$ の影響半径 $r_e$ 内に入る粒子 $j$ との間で相互作用する。

$$\langle \nabla \varphi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{\varphi_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} \cdot w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (2)$$

$$\langle \nabla^2 \varphi \rangle_i = \frac{2d}{n^0 \lambda_0} \sum_{j \neq i} \varphi_{ij} \cdot w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (3)$$

$$\lambda^0 = \frac{|\mathbf{r}_{ij}|^2 w(|\mathbf{r}_{ij}|)}{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_{ij}|)} \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \quad (5)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_j - \varphi_i \quad (6)$$

$$w(|\mathbf{r}_{ij}|) = \frac{r_e}{|\mathbf{r}_{ij}|} \quad (0 \leq r < r_e) \quad (7)$$

$$w(|\mathbf{r}_{ij}|) = 0 \quad (r_e \leq r)$$

ここに、 $\varphi$  : 変数、 $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$  : 位置ベクトル、 $w$  : 重み関数、 $d$  : 次元数、 $n^0$  : 初期粒子数密度、 $r_e$  : 粒子 $i$ の影響圏半径を表す。

## 3. 解析手法の検証

### (1) 概要

Koshizukaほか(1996)によって示されたMPS法(以下、標準MPS法と呼ぶ)は、圧力勾配項を陰的に計算する際、まず始めに式(8)、(9)で表される圧力のポアソン方程式から圧力を反復計算によって求める。次に、式(10)を用いて圧力勾配項を計算する。

$$\langle \nabla^2 P \rangle^{k+1} = -\frac{\rho_0}{\Delta t^2} \frac{n_i - n^0}{n^0} \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow -\frac{1}{\rho_0} \frac{2d}{\lambda^0 n^0} \sum_{j \neq i} (P_j^{k+1} - P_i^{k+1}) \cdot w(|\mathbf{r}_{ij}|) = \frac{1}{\Delta t^2} \frac{n_i - n^0}{n^0} \quad (9)$$

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{P_j - \hat{P}_i}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{w}(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (10)$$

ここに、 $\hat{P}_i$ は粒子i自体の圧力 $P_i$ ではなく、粒子iの影響半径内に入る隣接粒子の最小圧力 $\hat{P}_i$ を表す。

式(9)の左辺は式(3)で示したラプラシアンモデル、式(10)は式(2)に示した勾配モデルが適用されている。これまでの研究によって、標準MPS法を用いて計算された圧力解は振動することが報告されている<sup>9)</sup>。これは、計算粒子同士が重なり合うことを防ぐため、粒子間には常に斥力が作用しており、粒子の座標が微小に変動することが関係している。この課題に対しては、流体力学の分野において標準MPS法の改良が行われており、徐々に圧力の振動が抑制されつつある。本稿では、圧力振動を抑制するための対策として、以下の3つのモデルについて検証を行う。

#### ➤ MPS\_HSHL法<sup>10)</sup>

式(9)の右辺の改良型であるHS法(High-order Source term)と式(9)の左辺の改良型であるHL法(High-order Laplacian)を組み合わせ、圧力のポアソン方程式として式(11)を用いる。圧力のポアソン方程式を改良した式(11)を用いる方法をMPS\_HSHL法と呼ぶこととする。

$$\frac{1}{n^0} \sum_{i \neq j} \frac{3r_e}{|\mathbf{r}_{ij}|^3} (P_j^{k+1} - P_i^{k+1}) \quad (11)$$

$$= -\frac{\rho_0}{n^0 \Delta t} \sum_{i \neq j} \frac{r_e}{|\mathbf{r}_{ij}|^3} (\mathbf{x}_{ij} \mathbf{u}_{ij} + \mathbf{y}_{ij} \mathbf{v}_{ij})$$

$$\mathbf{x}_{ij} = x_j - x_i \quad (12)$$

$$\mathbf{y}_{ij} = y_j - y_i \quad (13)$$

$$\mathbf{u}_{ij} = u_j - u_i \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_{ij} = v_j - v_i \quad (15)$$

ここに、 $x_i, x_j, y_i, y_j$  : 位置ベクトルのx方向, y方向成分,  $u_i, u_j, v_i, v_j$  : 流速ベクトルのx方向, y方向成分を表す。

#### ➤ CMPS\_HSHL法<sup>10)</sup>

式(10)に示した勾配モデルの改良型として、式(16)を用いて圧力勾配項を計算する方法をCMPS法(Corrected-MPS)と呼び、HSHL法によって計算された圧力を用いる計算方法をCMPS\_HSHL法と呼ぶこととする。

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(P_i + P_j) - (\hat{P}_i + \hat{P}_j)}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{w}(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (16)$$

#### ➤ CMPS\_HSHL\_HV法<sup>10)</sup>

粘性項を計算する際、式(3)に示したラプラシアンモ

デルではなく、ラプラシアンモデルの改良型であるHL法(式(11)の左辺)を粘性項に適用する方法をHV法(High-order Viscous term)と呼び、HSHL法、CMPS法を組み合わせる方法をCMPS\_HSHL\_HV法と呼ぶ。

$$\frac{\mu}{\rho} \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{1}{n^0} \sum_{i \neq j} \frac{3r_e}{|\mathbf{r}_{ij}|^3} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \quad (17)$$

各計算手法は、図-1に示した流れで適用される。

### (2) 解析条件

前節で示した改良モデルの効果を検証するため、静止状態の水の挙動について粒子法を使って計算する。図-2に解析モデルを示す。水深100mmの矩形水槽において、各粒子には重力加速度のみ作用しており、他の外力は作用していない。底面中央部に位置する粒子の圧力経時変化を測定し、各手法で得た結果を比較する。初期粒子間距離は4mm、粒子総数は1,093である。勾配モデルの影響半径は、文献を参考にして初期粒子間距離の2.1倍、ラプラシアンモデルの影響半径は初期粒子間距離の4.1倍とした<sup>9)</sup>。時間進行については、式(14)で計算されるクーラン数が0.05となるような時間刻み幅を基本とし、最大で0.001秒を超えないよう制御した。標準MPS法では1秒まで、他の方法は2秒まで計算を行った。

$$\Delta t < \frac{C_r \cdot l_0}{u_{max}} \quad (18)$$

ここに、 $C_r$  : クーラン数,  $\Delta t$  : 時間刻み幅,  $u_{max}$  : 流速の最大値,  $l_0$  : 粒子間距離を表す。

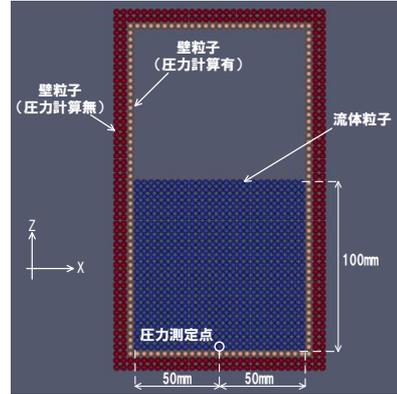


図-2 解析モデル

### (3) 解析結果

図-3に底面中央部の粒子の圧力経時変化を整理した結果を示す。標準MPS法では、計算開始直後から圧力が振動し、1秒経過後も振動が抑制されていない。一方、標準MPS法の改良型である、MPS\_HSHL法、CMPS\_HSHL法、CMPS\_HSHL\_HV法は、解析開始直後は圧力が振動するが標準MPS法ほどではなく、計算が進行するにつれ圧力の振動幅が少なくなる傾向にある。特に、CMPS\_HSHL法やCMPS\_HSHL\_HV法は、圧力振動が全く無くな

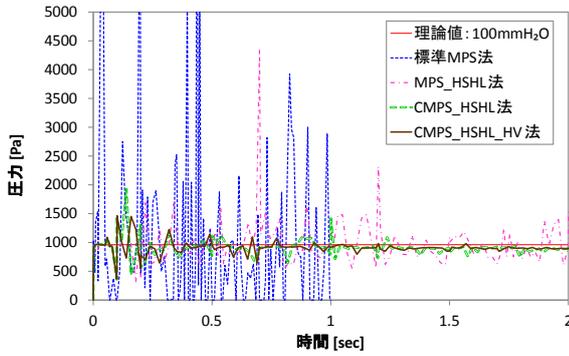


図-3 底面中央部の圧力経時変化

るわけではないが、理論値とほぼ同じ値で推移する結果となった。以上のことから、これ以降もCMPS\_HSHL\_HV法によって計算を行うこととする。

#### 4. ビンガム流体モデルによる変形解析

##### (1) 概要

前章で示した標準MPS法の改良型であるCMPS\_HSHL\_HV法の計算スキームを最大限生かすため、地盤のある粘性をもつ流体として考える。但し、水のように粘性が常に一定の流体（ニュートン流体）ではなく、作用する応力によって粘性が変化する流体（ビンガム流体）として考える。図-4にビンガム流体の概念図を示す。せん断応力 - せん断速度の傾きが粘性係数を表す。ニュートン流体は粘性係数が変化せず一定である。一方、ビンガム流体は降伏応力を切片とする一次関数で表され、降伏応力以下では粘性係数が無限大であり流動しないが、降伏応力以上の応力が作用すると流動を開始する。ビンガム流体モデルを式(19)に示す。

$$\tau = \mu_0 \cdot \dot{\gamma} + \tau_B \quad (19)$$

ここに、 $\tau$ ：せん断応力、 $\mu_0$ ：降伏後の粘性係数、せん断応力、 $\dot{\gamma}$ ：せん断速度、 $\tau_B$ ：降伏応力を表す。

フレッシュコンクリートや泥はビンガム流体と考えられており、これまでもビンガム流体とみなした解析が行われている<sup>11)</sup>。また、地盤工学の分野においても、液化地盤の側方流動や土砂流動をビンガム流体と表現した研究が行われている<sup>12)</sup>。今回対象とする浸透破壊現象においても、局所的に動水勾配が大きくなった箇所では土と水が混合して流動するため、地盤をビンガム流体とみなすことが適当と考えられる。そこで、本稿では地盤をビンガム流体とみなし、MPS法を使って地盤の変形挙動について解析を行う。

##### (2) 支配方程式

式(20)～(23)にビンガム流体の支配方程式を示す<sup>13)</sup>。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{\mu(\dot{\gamma})}{\rho}\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (20)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\Pi_D} \quad (21)$$

$$\Pi_D = \frac{1}{2}\mathbf{D}:\mathbf{D} \quad (22)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}\{(\nabla \otimes \mathbf{u}) + (\nabla \otimes \mathbf{u})^T\} \quad (23)$$

ここに、 $\mathbf{D}$ ：変形速度テンソル、 $\Pi_D$ ：変形速度テンソルの第2不変量を表しており、 $\otimes$ はテンソル積である。

ビンガム流体の粘性係数を計算する際、式(19)で表されるモデルをそのまま計算に用いると、計算が安定しなくなる可能性がある。そこで、式(24)に示した関数を用いてビンガム流体の粘性係数を近似する。式(24)を用いて粘性係数を計算した結果を図-4に示す。図-4は、 $\mu_0 = 0.1\text{Pa}\cdot\text{sec}$ 、 $\tau_B = 1\text{Pa}$ のビンガム流体モデルについて式(24)を用いて近似した結果であり、 $\mu_0 = 0.1\text{Pa}\cdot\text{sec}$ 、 $\tau_B = 1\text{Pa}$ 、 $\alpha = 1000$ である。

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{\alpha\mu_0\left(1 + \frac{\mu_0}{\tau_B}\dot{\gamma}\right)}{1 + \frac{\alpha\mu_0}{\tau_B}\dot{\gamma}} \quad (24)$$

ここに、 $\alpha$ ：粘性係数比を表しており、 $\alpha$ と $\mu_0$ の積が静止時のビンガム流体の粘性係数を意味している。

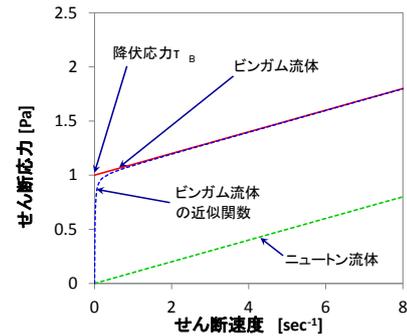


図-4 ビンガム流体モデル

##### (3) 解析条件

地盤内において浸透に伴う物体力が局所的に作用した場合を想定し、MPS法による変形解析を行う。浸透による地盤の変形を表現する場合、前田ら(2004)のように固相と流体相（液相、気相）の挙動を個々に解き<sup>7)</sup>、各相の相互作用を考慮することで地盤全体の変形挙動を表現するといった方法が考えられる。最終的にはそのような方法で固相と流体相の挙動を表現する予定であるが、本稿では固相（ビンガム流体）のみを対象とする。

図-5に解析モデルを示す。幅が50mm或いは100mmの固相（ビンガム流体）において、浸透に伴って生じる外力を想定し側面中央部に位置する粒子に水平方向の加速度（ $1.0\text{m}^2/\text{sec}$ ）を与え続ける。なお、重力加速度は今回与えていない。初期粒子間距離はいずれも4.0mmであり、幅が50mmのモデルの粒子総数は793、幅が100mmのモデルの粒子総数は1,093である。勾配モデルの影響半径は

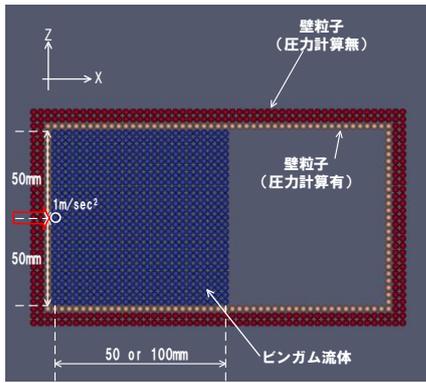


図-5 解析モデル

初期粒子間距離の2.1倍，ラプラスアンモデルの影響半径は初期粒子間距離の4.1倍とした．解析は，外力を与えてから5秒間行うこととし，時間進行については，式(18)によって計算されるクーラン数が0.05を超えない時間刻み幅か，次式で計算される，粘性項を陽的に計算する際の時間刻み幅の基準値 $D_r$ が1.0を超えない時間刻み幅のいずれか小さい方の時間刻み幅を用いることとした．

$$\Delta t < \frac{D_r \cdot l_0^2 \cdot \rho}{\mu} \quad (25)$$

表-1に解析条件を示す．降伏応力 $\tau_B$ は1, 0.5, 0.1, 0.05Paとし，粘性係数比 $\alpha$ は1000，降伏後の粘性係数 $\mu_0$ は0.1Pa\*sec（水の100倍）とした．つまり，静止時の粘性係数は100Pa\*sec（水の10万倍）である．

表-1 解析条件

	幅	降伏応力
case1	100mm	1Pa
case2	50mm	1Pa
case3	100mm	0.5Pa
case4	50mm	0.5Pa
case5	100mm	0.1Pa
case6	50mm	0.1Pa
case7	100mm	0.05Pa
case8	50mm	0.05Pa

#### (4) 解析結果

図-6に解析開始から2.5秒後におけるcase5, case6の粒子分布を示す．今回は，側面中央に位置する粒子に外力を与え続けており，外力を与えた粒子が内部に侵入し，粒子間に斥力が働き固相内部の密度を減少させている．固相と流体相を連成して解析を行う場合は，同一粒子に常に一定の物体力が作用するといった状態は考えられず，今回行った解析は極端な場合であると言える．図-6によれば，幅が100mmのモデル(case5)よりも幅が50mmのモデル(case6)の方が，外力を与えた方とは反対側の側面の変形量が大きくなった．他の解析条件についても同様であり，降伏応力が等しい場合，幅が100mmのモデルよりも幅が50mmのモデルの方が変形量が大きくなった．

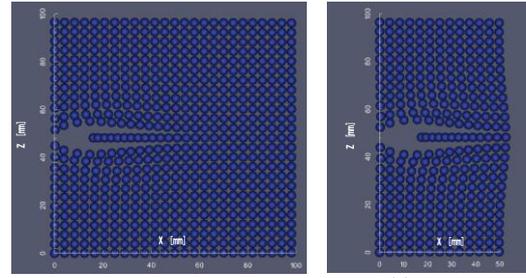


図-6 2.5秒後における解析結果

図-7に2.5秒，5.0秒後における，外力を与えた方とは反対側の側面における変形量を示す．ここで，変形量とは，中央( $Z=50\text{mm}$ )に位置する粒子のX座標である $X_{\text{center}}$ と各粒子のX座標との差を意味する．つまり，変形量が小さいほど中央部との差が小さく矩形形状に近いことを意味し，変形量が大きいほど側面が凸状に変形をしていることを意味する．図-7によれば，降伏応力が小さいほど変形量が大きく，モデルの幅が小さいほど変形量が大きくなる結果となった．

#### (5) 考察

降伏応力が等しい場合，モデル幅が小さいほど変形量が大きくなった．これは実際の地盤において土被りの厚さが小さいほど地表面の変形が大きくなることを表していると考えられる．また，モデル幅が等しい場合，降伏応力が小さいほど変形量が大きくなった．これは地盤の強度が小さいほど変形しやすいことを表していると考えられる．変形が生じた場合，中央部の変形量が最も大きく，中央から外れるに従って変形量が小さくなっており，局所的な変形を表現することができた．以上の結果から，地盤をビンガム流体とみなし，MPS法によって地盤の変形挙動を概ね表現することができたと考えられる．

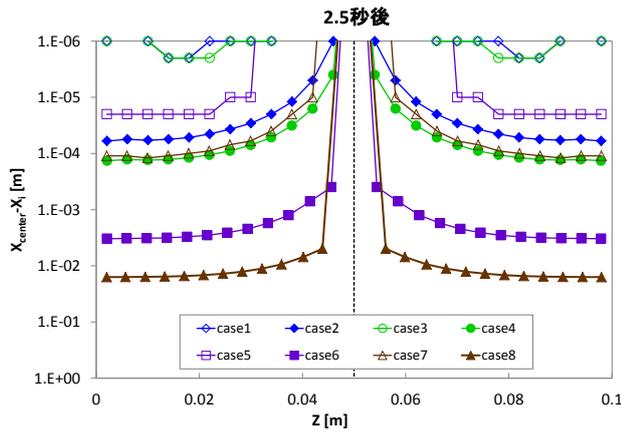
#### (6) 課題

Moriguchiほか(2005)が示したように<sup>12)</sup>，降伏応力にモール・クーロンの破壊基準を取り入れるモデルも提案されている．降伏応力として式(26)を用いることにより，地盤の物性値による影響を直接評価することができることから有効な手法と考えられる．

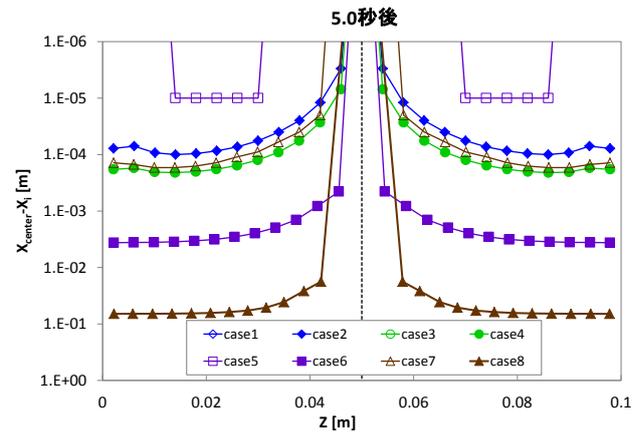
$$\tau = \mu_0 \cdot \dot{\gamma} + \tau_B = \mu_0 \cdot \dot{\gamma} + c + \sigma' \tan \theta \quad (26)$$

ここに， $c$ ：粘着力， $\sigma'$ ：有効応力， $\theta$ ：内部摩擦角を表す．

今回は粘性項を陽的に計算したが，この場合式(25)に示したように，粘性係数が大きくなるほど時間刻み幅を小さくしなければならない．大規模な計算を行う場合は，時間刻み幅が小さくなると計算負荷が大きくなるため，粘性項を陰的に計算するよう修正する必要があると考えられる．



(a) 2.5秒後



(b) 5.0秒後

図-7 側方粒子の変形量

更に、今回の解析では固相のみの変形挙動について検討したが、浸透破壊による地盤の変形挙動を表現するには流体の挙動についても取り扱うことが必要不可欠であり、今後は固相と流体相の連成方法について検討しなければならないと考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、浸透破壊がもたらす斜面の変形問題について解析的に表現することを目的とし、粒子法の一つであるMPS法の適用性について検証した。検証の結果、MPS法によって地盤の挙動を概ね表現できることを確認した。

## 参考文献

- 鳥居宣之, 大西剛史: 斜面崩壊危険度評価のための表土層内の降雨浸透過程を簡略化した地下水位算定モデル, 土木学会論文集 C, Vol.67, No.4, pp.441-452, 2011.
- 地盤工学会: 平成 22 年度鹿児島県災害調査報告, [https://www.jiban.or.jp/file/saigai/kagoshima\\_22.pdf](https://www.jiban.or.jp/file/saigai/kagoshima_22.pdf)
- 恩田裕一, 奥西一夫, 飯田智之, 辻村真貴: 水文地形学, 古今書院, 2002.
- 杉井俊夫, 宇野尚雄, 吉田敬, 平野貴士: 限界流速による浸透破壊の発生条件, 地盤工学シンポジウム論文集, Vol.5, pp.83-88, 1993.

- 地盤工学会: 斜面の安定・変形解析入門 2.4 岩盤斜面の安定解析, 丸善出版, 2006.
- 野々山栄人, 沢田和秀, 森口周二, 八嶋厚, 伊藤和也: SPH 法による実大規模斜面掘削実験の二次元再現解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.4, pp.543-555, 2012.
- 前田健一, 坂井守: Smoothed Particle Hydrodynamics 法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発, 応用力学論文集, Vol.7, No.2, pp.775-786, 2004.
- Khayyer, Abbas., 後藤仁志: 粒子法における圧力擾乱低減のための CMPS - HS 法の提案, 海岸工学論文集, Vol.55, No.1, pp.16-20, 2008.
- Koshizuka, S., Oka, Y.: Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, *Nuclear Science Engineering*, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- Khayyer, Abbas., Gotoh, H.: A higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation by the MPS method, *Applied Ocean Research*, Vol.32, pp.124-131, 2010.
- 富山潤, 山田義智, 伊良波繁雄, 入部綱清: ビンガム流体の流動解析における MPS 法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.43-48, 2007.
- Moriguchi, S., Yashima, A., Sawada, K., Ito, M., Uzuoka, R.: NUMERICAL SIMULATION OF FLOW FAILURE OF GEOMATERIALS BASED ON FLUID DYNAMICS, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.2, pp.155-165, 2005.
- 五十里洋行, 後藤仁志, 新井智之: 粒子法型非ニュートン流体モデルによる地滑り津波解析, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, 2012.

## VALIDATION OF SEEPAGE FAILURE WITH PARTICLE METHOD

Shintaro NOHARA, Hiroshi SUENAGA

Seepage failure is important phenomenon for evaluating slope stability. However, there are no numerical simulation methods in order to express ground large deformation with seepage failure. This paper is focused on MPS(Moving Particle Semi-implicit) method, we validated its numerical simulation methods. At first, normal MPS methods was modified for improving pressure fluctuation. Next, ground deformation simulations was conducted by using bingham liquid simulations using simple model, the results show MPS method is effective tools for expressing ground large deformation with seepage failure.