

不連続変形法と粒子法を用いた固体と流体の 連成数値解析に関する研究

久野 実希子^{1*}・三木 茂²・大西 有三³・佐々木 猛⁴・楠見 晴重³

¹関西大学大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²基礎地盤コンサルタンツ株式会社 技術本部地盤・岩盤解析室 (〒136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7)

³関西大学 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁴サンコーコンサルタント株式会社 東日本支店 地質部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

*E-mail: k150096@kansai-u.ac.jp

近年、豪雨の増加により全国各地で土砂災害が発生しており、このような水に起因する災害の減災対策が研究・開発されている。しかし、流体中の岩石がどのように移動するのかを解明することは非常に困難であり、効率的な手法が未だ開発されていない。そこで、本研究では固体と流体の相互作用問題に着目し、固体部には不連続変形法(DDA)を、流体部にはメッシュフリー解析法の一つである粒子法(MPS)を用いた新たな解析手法を提案した。流体の岩塊への作用については、流体中の岩塊(DDAブロック)に領域を定義し、この領域内を水粒子が通過する際に、DDAブロックに流体力を作用させた。そして、その相互作用理解のため基本問題を解き、実現象と比較することで解析手法の有効性を示した。

Key Words : DDA, MPS, particle method, coupling analysis

1. はじめに

我が国は、全国土の約70%を山地や丘陵地が占め、地震や火山活動も活発である上に台風や豪雨等に見舞われやすい。特に近年では、豪雨による土石流や地震による液状化などの水と地盤の相互作用に起因する災害により、全国各地で甚大な損害や犠牲者が出ている。この問題に対して、地震・豪雨災害のメカニズムを明らかにし、それに基づいた対策、減災予防を行うために、多くの機関で減災対策が研究開発されている。従来の研究においては、混相流として扱う連続体モデル¹⁾や、大変形を伴う破壊解析には、個別要素法(DEM)等の離散的な手法^{2,3)}が適用されてきたが、地盤の大変形をシミュレーションすることのできる解析法は未だにない。

そこで、本研究では、不連続変形法(DDA)と粒子法(MPS)を組み合わせた新たな解析手法の開発を試みた。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)が一般的であるが、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。そのため、固体部には、不連続性体の解析手法として大変形を伴う動的挙動の再現性および回転挙動の再

現性に優れている不連続変形法⁴⁾を用いた。

また、大変形問題を取り扱うことができる解析手法として、最近では粒子法が注目されている。粒子法は、計算格子を必要としないLagrange的解析手法であり、連続体の支配方程式の離散化に基づく計算手法である。流体力学の分野で近年検討が進められており、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るため、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。粒子法としては、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法やMPS(Moving Particle Simulation)法が有名である。SPH法は、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⁵⁾。一方、MPS法については地盤工学分野へ適用した例⁶⁾は多くなく、剛体と流体のシミュレーションを同時に行う上で、DDAとMPSをどのように結合するかは、数値シミュレーション研究において大きな課題である。以上のことから、本研究では、不連続変形法と粒子法の両者を組み合わせて、固体と流体の相互作用の算定方法に工夫を凝らすことで、土粒子と水の連成解析手法の検討を行った。

2. 解析手法

(1) 不連続変形法

固体部においては、陰解法に基づき解が安定しやすい不連続変形法 (DDA) を用いて解析する。DDA は、ブロックの剛体変位、剛体回転、要素ひずみを未知数として、式(1)のハミルトン原理に基づく固体の接触を含む全体系の運動方程式について、エネルギー最小化原理により釣り合い方程式を導出するものである。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad \left(\dot{u} = \frac{du}{dt}, \ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2} \right) \quad (1)$$

ここに、 M : 質量マトリックス、 C : 減衰マトリックス ($= \eta M$)、 η : 粘性係数、 K : 剛性マトリックス、 F : 外力ベクトル、 t : 時間、 u : ブロック重心における変位、 $\dot{u}$: 変位速度、 $\ddot{u}$: 変位加速度である。なお、計算過程の簡略化のため、円 (剛体) 要素を用いる^{7,8)}。

(2) 粒子法

不連続変形法に加えて、本研究では、境界条件が刻々変わる状態での水の動きを粒子法の一つである MPS 法により追跡する。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⁹⁾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。粒子法では、流体の支配方程式である式(2)に示すナビエーストークス方程式に従って流体粒子を移動させ、流体シミュレーションを行う。

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

ここに、 v : 速度、 t : 時間間隔、 D/Dt : ラグランジュ微分、 ρ : 密度、 P : 圧力、 ∇ : ナブラ、 ∇^2 : ラプラシアンである。下記は、Koshizuka ほか(1996)によって示された式(2)の微分演算子に対する離散モデルである。式(3)は勾配モデル、式(4)はラプラシアンモデルを表す。

$$\langle \nabla \varphi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\varphi_j - \varphi_i}{|r_j - r_i|^2} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \varphi \rangle_i = \frac{2d}{n^0 \lambda^0} \sum_{j \neq i} (\varphi_j - \varphi_i) w(|r_j - r_i|) \quad (4)$$

$$\lambda^0 = \frac{\sum_{j \neq i} |r_j^0 - r_i^0|^2 w(r_j^0 - r_i^0)}{\sum_{j \neq i} w(r_j^0 - r_i^0)}$$

ここに、 φ : 変数、 r_i, r_j : 位置ベクトル、 w : 重み関数、 d : 次元数、 n^0 : 初期粒子数密度である。

各モデルには、式(5)に示す重み関数 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。

$$w(|r_j - r_i|) = \frac{r_e}{|r_j - r_i|} \quad (0 \leq r < r_e) \quad (5)$$

$$w(|r_j - r_i|) = 0 \quad (r_e \leq r)$$

3. 連成解析

(1) 連成解析方法

粒子法解析においても、DDA解析においても初期状態を設定する必要がある。粒子法解析では、流速場を設定しておく必要が、DDA解析では、自重解析により円要素間の接触力を作用させておく必要がある場合がある。

そこで、プログラムでは、初期状態解析として粒子法および DDA それぞれで解析を行い、その結果を重ね合わせた後、連成解析を実施する方法を用いている。初期状態解析の重ね合わせの方法を、図-1 に模式的に示す。粒子法解析結果と DDA 解析結果を重ね合わせ、円要素内の水粒子を削除し、円要素内に壁粒子を配置することで、解析モデルの作成を行っている。ここで、壁粒子とは、壁境界に設置する座標を固定した粒子であり、圧力を流体と同様に計算するためのものである。この際、粒子法解析での流速、水圧と、DDA 解析での円要素の速度は保持され、この状態から連成解析を開始する。

DDA 円要素と粒子法水粒子との重ね合わせについて、DDA 解析から粒子法解析への作用は、図-2 に示す DDA 円要素のモデル化で行っている。円要素の内部に配置し

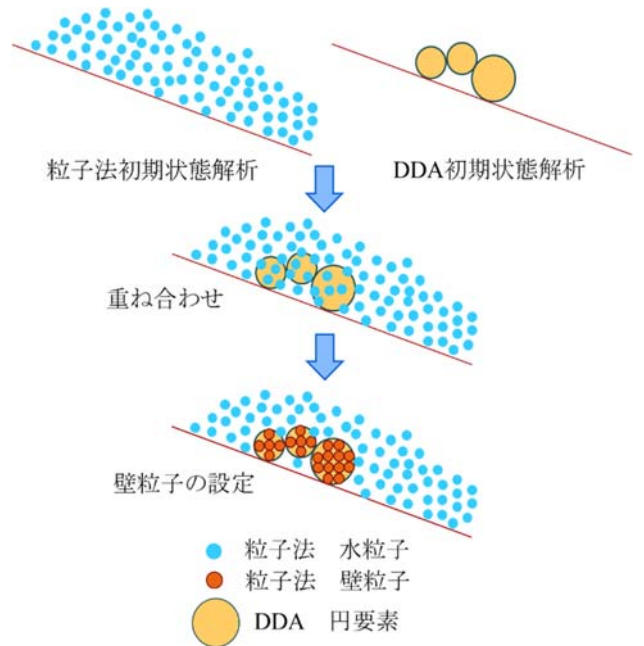


図-1 連成解析の手順

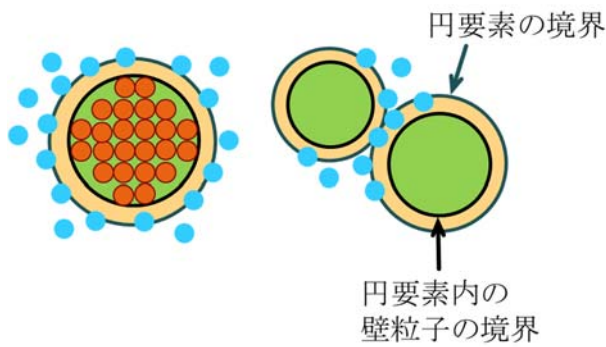


図-2 DDA 円要素のモデル化

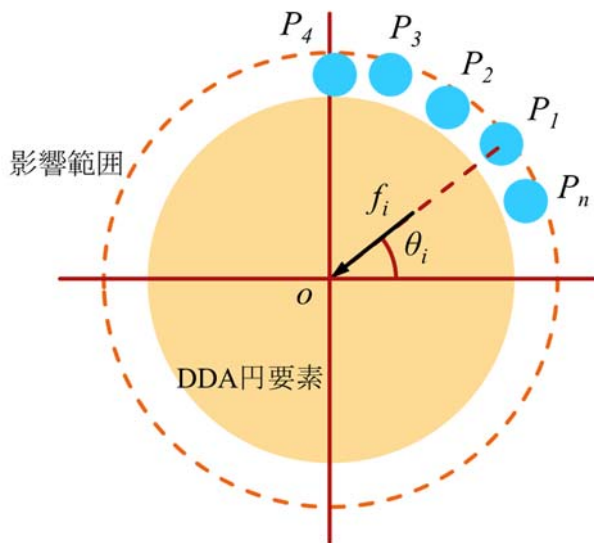


図-3 水粒子から円要素への作用

た粒子法の壁粒子は、DDA 解析における円要素の移動に合わせて移動する。また、DDA 円要素外周の内部に壁粒子の境界を設けることで、DDA 円要素が接触した状態であっても、水粒子の通過を可能としている。粒子法の解析においては、粒子同士は大きく貫入しない仕組みが組み込まれているため、DDA 円要素内を粒子法粒子がすり抜けることはなく、加えて、DDA 円要素は粒子法における壁として作用する。

(2) 水粒子からDDA円要素への作用

岩塊間の流体の影響を考慮するため、図-3に示すような円要素に対する影響範囲を定義した。水粒子からDDA円要素への作用は、円要素周辺に位置する水粒子からの水圧で行う。影響範囲にある水粒子*i*における水圧を P_i 、水粒子の代表直径を d とすると、この水粒子が円要素表面に作用する力 f_i は、円要素中心に向かう方向となり、その大きさは dP_i となる。また、円要素中心に作用する力は式(6)となる。

$$\begin{pmatrix} f_{x,i} \\ f_{y,i} \end{pmatrix} = -d_i P_i \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

円要素周囲の全ての水粒子について、この力を重ね合わせることで円要素に作用する水圧による力を得ることができる。影響範囲を円要素に隣接する水粒子となる範囲に設定し、円要素周辺に十分な水粒子が存在すれば、近似的に水圧を円要素に作用させることができる。この方法では、水圧の勾配に応じた力が円要素に作用することになり、円要素に作用する浮力についても自動的に考慮されることになる。

4. 解析例と結果

(1) 解析モデル

図-4に解析モデルを示す。連成解析における土粒子と流体の相互作用の効果と有効性を確認するため、ボーリング現象を簡略化したモデルを作成した。水位が異なる2つのパイプA、Bを並べ、底を連結させる。パイプB内には半径0.3～0.5mのDDA円要素を配置し、2つのパイプの水位変化をみる。粒子法解析およびDDA解析における物性値と解析パラメータを表-1と表-2に示す。

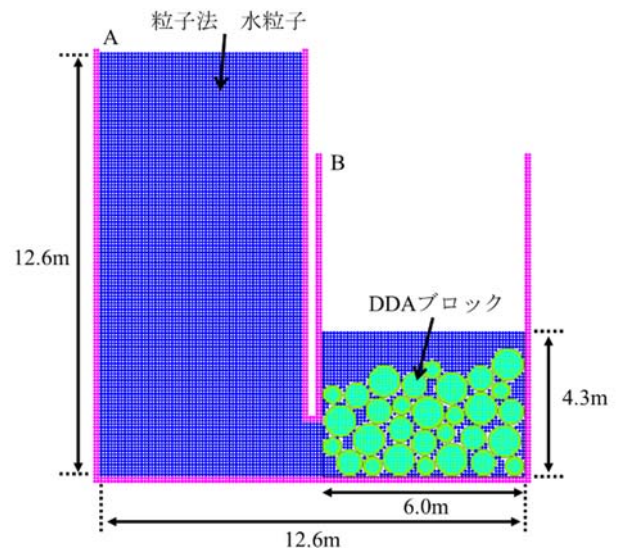


図-4 解析モデル

(2) 解析結果

連成解析結果を図-5に示す。粒子法水粒子は、水圧分布を示しており、パイプAでは水深が深くなるにつれて水圧が高くなっている。パイプBの初期段階では、DDA円要素群は互いに接触しているが、水位が上昇するにつれてDDA円要素間の間隙水圧が上昇し、それに伴い、DDA円要素間は接触力を失い、DDA円要素が動き易いところへ移動。そして、再びDDA円要素が接触しており、ボーリングの一連の流れが再現されていると推定される。なお、水位差は8.3mであり、ボーリング現象の発生条件である理論解よりも大きく設定している。また、

DDA円要素間の間隙の水圧の上昇に伴い、DDA円要素に動きが現れていることから、水圧による流体力が作用していることがわかる。

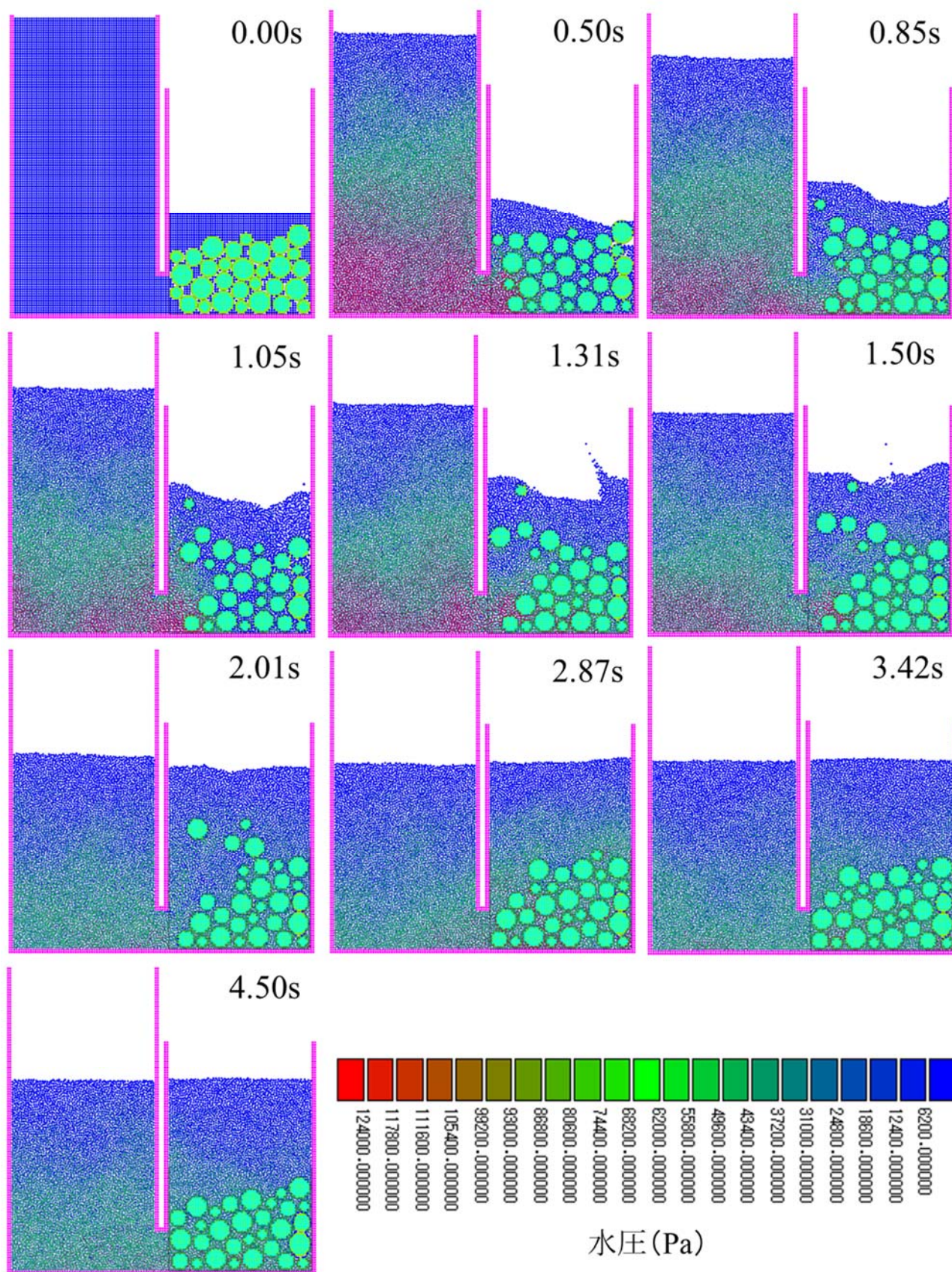


図-5 連成解析結果

表-1 粒子法解析における物性値と解析パラメータ

初期粒子間距離(m)		0.01
密度(kg/m ³)		1000
動粘性係数(m ² /s)		1.0×10^{-6}
圧縮率(1/Pa)		0.45×10^{-7}
重力加速度(m/s ²)		9.8
時間ステップ間隔(s)		0.0005
繰り返し計算回数 (回)	初期設定	0
	連成解析	30000

表-2 DDA解析における物性値と解析パラメータ

半径(m)		0.30~0.50
密度(kg/m ³)		2650
表面の摩擦角(度)		0.0
表面の粘着力(N/m ²)		0.0
速度エネルギー比		1.0
ペナルティバネ係 数(N/m)	鉛直方向	1.0×10^{10}
	せん断方向	1.0×10^8
最大時間ステップ間隔(s)		0.0005
繰り返し計算回数 (回)	初期設定	5000
	連成解析	30000

5. まとめ

本研究では、水に起因する災害の問題について解析的に表現することを目的とし、固体部に不連続変形法を、流体部に粒子法の一つであるMPS法を適用し、両者を組み合わせた解析手法を提案した。粒子法解析で得られる水圧を用い、岩石への水の影響を簡易的に表現し、本解

析手法の有効性について基本的なモデルで解析を行った。その結果、連成解析によってボイリングの挙動を概ね表現できることを確認した。今後、本解析手法と実現象との検証を行い改良・精度向上することで、土石流などの斜面災害にも適用できる可能性があると言える。

参考文献

- 1) Lucy, L.B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astron. J. Vol 82*, pp.1013-1024, 1977.
- 2) Cundall P.A.: A Computer Model for Simulation Progress, Large Scale Movement in Block System, *ISRM Symp.*, Nancy, France, pp.11-18, 1971.
- 3) Uchida, Y. and Hakuno, M.: Analysis of Dry Rock Avalanches and Debris Flows by Granular Assembly Simulation, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, Vol.65*, pp.321-411, 1990.
- 4) Shi G.H. and Goodman R.E.: Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modeling, *Int J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.13, pp.359-380, 1989.
- 5) 前田健一, 坂井守: Smoothed Particle Hydrodynamics 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.
- 6) 野原 慎太郎, 末永弘: 浸透破壊現象への粒子法の適用性検討, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号 8, 2016.
- 7) Ohnishi, Y. and Miki, S.: Development of Circular and Elliptic Disc Elements for DDA, *Proc. 1st. Int. Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulations of Discontinuous Media*, Berkeley, USA, pp.44-51, 1996.
- 8) 楊萌, 操上広志, 三木茂, 大西有三: Study on Modeling the Coupled Hydro-mechanical Processes by Combining DDA and FEM, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, III-102, pp.203-204, 2003.
- 9) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering, Vol.123*, pp.421-434, 1996.

ROCK MASS AND WATER COUPLING ANALYSIS USING DDA (DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS) AND MPS (MOVING PARTICLE SIMULATION) METHOD

Mikiko KUNO, Shigeru MIKI, Yuzo OHNISHI, Takeshi SASAKI
and Harushige KUSUMI

Coupled hydro-mechanical process in porous media represents the interaction between solid particles movement and fluid flow during external and internal loading. It attracts attention in geotechnical engineering field since it causes many disasters such as boiling and landslide.

This study presents a numerical method coupling Discontinuous Deformation Analysis (DDA) method and Moving Particle Simulation (MPS) method to model the interaction between solid particles movement and fluid flow. The simplified example is given to verify the new method, and with an acceptable agreement between the computational results and theoretical calculations, further development is considered.