

電力中央研究所報告

地盤耐震工学における
数値解析手法の現状と課題
－シームレスな解析の実現に向けて－
調査報告：N15011

平成28年5月

 電力中央研究所



CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

地盤耐震工学における 数値解析手法の現状と課題 －シームレスな解析の実現に向けて－

吉田 泰基*

キーワード：周辺斜面
有限要素法
粒子法
個別要素法
ハイブリッド法

Key Words : Surrounding Slope
Finite Element Method
Particle Method
Distinct Element Method
Hybrid Method

Current Problems and Subjects on Numerical Analysis of Earthquake Geotechnical Engineering - For Seamless Analysis -

Taiki Yoshida

Abstract

There are continuum and discontinuum analyses in the evaluation of seismic stability of surrounding slope in nuclear power plant facility. However, we cannot rationally evaluate such seismic stability due to excessive conservative margin of the results by each analysis. If we can simulate the behavior from small to large deformation by hybridizing them, we can contribute not only to the rationalization of the slope stability evaluation but also the enhancement of evaluation precision in the numerical analysis. In this review, the previous numerical analyses and application cases of them in earthquake geotechnical engineering were classified into three categories, that is, continuum analysis, discontinuum one and the hybridizing process to identify their research themes. The present review has revealed that the research themes are the standardization of condition for conversion, construction of the technique to determine parameters related to conversion and the reasonable physical property set of DEM(Distinct Element Method) after conversion. Our future work will be development of a numerical analysis code hybridizing continuum and discontinuum analyses based on the identified research themes.

(Civil Engineering Research Laboratory Rep.No.N15011)

(平成 28 年 2 月 29 日 承認)

* 地球工学研究所 地震工学領域 研究員

背 景

原子力発電所周辺斜面の地震時安定性評価手法には、連続体解析と不連続体解析の 2 つの解析手法が存在し、独立して知見の蓄積が進められている。一方、複数の解析手法を用いて保守的な評価を行っている現状では、過度に保守的になり、合理性に欠ける場合がある。そこで、連続体解析と不連続体解析を適切にハイブリッドすることで、1 つの解析手法により微小変形から崩落に至る挙動を再現できれば、斜面の地震時安定性評価手法の合理化に資するだけでなく、解析手法の評価精度の向上が期待される（図 1）。

目 的

地盤耐震工学分野での数値解析事例を中心に、連続体解析、不連続体解析および両者のハイブリッド解析という 3 つの視点で整理し、今後の研究課題を抽出する。

主な成果

1. 地盤耐震工学における数値解析手法の現状

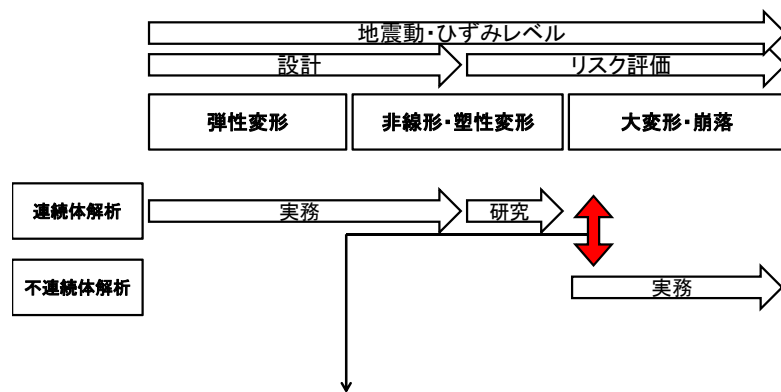
連続体解析では、有限要素法（Finite Element Method, 以下、FEM と記載）による評価が主流であるが、最近では、粒子法（連続体の方程式を粒子で離散化する数値解析手法）を用いた例も見られる。FEM の研究としては、非線形解析による地盤の変形量評価に関するものが多い。一方で、粒子法は実証例は少なく、解析手法自体の開発に主眼が置かれている。さらに、解析手法固有のパラメータが複数あり、試行錯誤的に決められている状況である。不連続体解析では、個別要素法（Distinct Element Method, 以下、DEM と記載）を用いた例が多いが、パラメータの設定は、粒子法同様、課題が残る。一方、ハイブリッド解析では、FEM、粒子法と DEM をハイブリッドし、力の伝達を計算している解析事例がある。

2. 連続体解析と不連続体解析のハイブリッドにおける課題

- 1) 連続体解析における要素から不連続体解析における要素に変換する（以下、要素変換と記載）条件、それに関する定数の設定方法の標準化である。
- 2) 要素変換後の合理的な DEM 粒子の物性設定である。ばね定数や粘性減衰係数は理論式の適用や材料実験などにより決定している例がある。回転抵抗は、DEM 粒子を用いた解析で、強応力鎖の安定性やすべり面との関係性が指摘されているものの、チューニングパラメータが存在するため、室内試験などから推定する必要がある。

今後の展開

抽出した課題を踏まえて、ハイブリッド解析コードを開発する（図 2）。



- ・複数の解析手法を用いて保守的な評価を行っている
- ・一つの解析手法により, 評価手法の合理化や精度向上の可能性有

図1 原子力発電所周辺斜面の地震時安定性評価手法の現状と課題

複数の解析手法を用いて保守的な評価を行っている現状では, 解析手法間の結果の整合性がとれないことや過度に保守的になり合理性に欠ける場合がある。

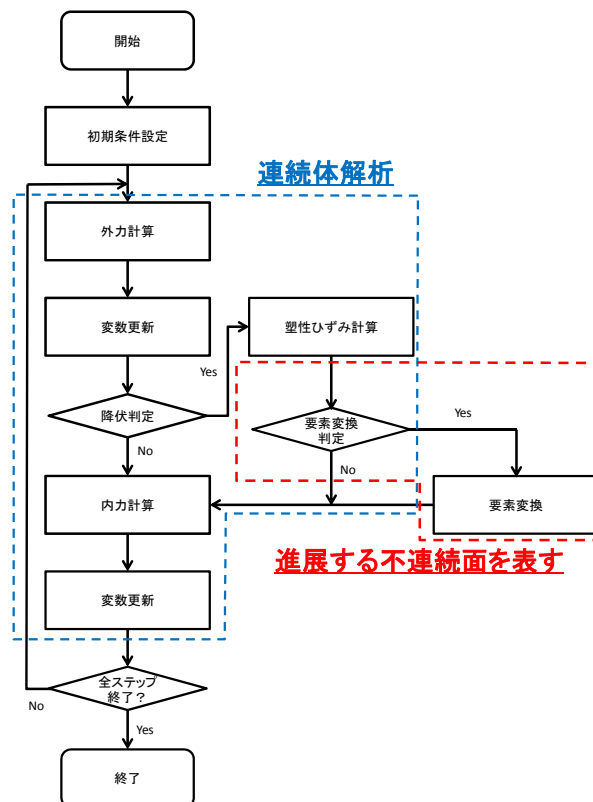


図2 ハイブリッド解析コードの計算フロー

連続体解析に要素変換機能を導入にすることで, 地盤材料に進展する不連続面を表せる可能性がある。

目 次

1. はじめに	1
2. 連続体解析	1
2.1 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法	2
2.2 MPS (Moving Particle Simulation) 法	3
2.3 MPM (Material Point Method)	3
2.4 解析事例	4
2.5 まとめ	6
3. 不連続体解析	8
3.1 DEM (Distinct Element Method)	8
3.2 解析事例	8
3.3 課題	9
3.4 まとめ	10
4. 連続体解析と不連続体解析のハイブリッド解析	11
4.1 ハイブリッド解析を扱った解析事例	11
4.2 粒状体の流動現象	12
4.3 まとめ	13
5. まとめ	14
6. 今後の展開	14
謝辞	17
参考文献	17

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、原子力発電所の安全性確保がより一層求められている。そして、原子力発電所を再稼働するため、電力会社は原子力規制庁の新規制基準適合審査を受けている。審査の過程で、多くのサイトで基準地震動が従来よりも大幅に大きくなっている。このため、耐震設計の許容値を満たすためには、これまでに以上に多くの検討が必要になっている。さらには、再稼働後の安全性向上評価書で実施される確率論的リスク評価により、設計を超えた地震動も想定した評価が必要になっている。

これまで原子力発電所周辺斜面の地震時安定性評価では、等価線形解析を用いたすべり安全率評価が行われてきた。ただし、直接的に地震後の残留変位を評価できる手法ではなく、すべり安全率が1を下回ることと、大規模な崩壊が生じることは必ずしも等価ではないことが指摘されている^[1]。大規模な崩壊が生じない場合、等価線形解析によるすべり安全率評価では過度に保守的な評価になり、斜面の耐震安定性の検討の際、合理性に欠ける場合がある。

そこで、すべるか否かの評価に加えて、破壊箇所や変形量の評価、崩壊した後の土塊、岩塊の崩落挙動を高精度に予測することが求められている。破壊箇所や変形量の評価には、時刻歴非線形解析、崩壊した後の崩落挙動評価には、DEMの研究が進められている。

しかし、上記の様な外部情勢も踏まえると、複数の解析手法を用いた評価では、解析手法間の結果の整合性がとれないことや過度に保守的な評価になり、合理性に欠ける場合があることが予想される。一方、連続体解析と不連続体解析を適切にハイブリッドすることで、斜面に進展する不連続面を表し、一連の斜面の挙動をシームレスに再現できれば、斜面の地震時安定性評価の合理化に資するだけでなく、解析手法

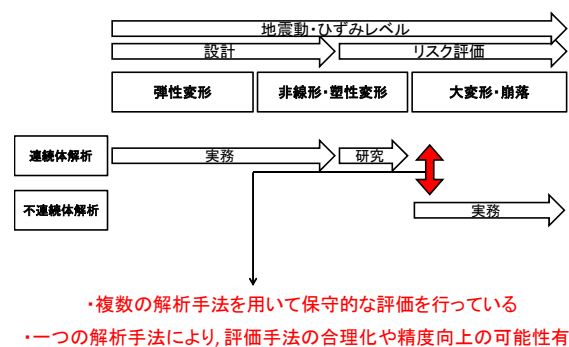


図 1-1 斜面の地震時安定性評価手法の現状

の評価精度の向上が期待される（図 1-1）。

本報告書では、地盤耐震工学分野での数値解析事例を中心に、連続体解析、不連続体解析、連続体解析と不連続体解析のハイブリッド解析の3つの視点で整理し、今後のシームレスな解析の実現に向けた研究課題を抽出する。構成は以下の通りである。2章では、連続体解析について整理し、3章では不連続体解析について整理する。4章では、ハイブリッド解析、5章では1~4章のまとめ、6章では今後の展開について述べる。

2. 連続体解析

これまで原子力発電所周辺斜面の地震時安定性評価では、動的解析として等価線形解析によるすべり安全率評価が行われてきた。等価線形解析では、地盤の非破壊を前提とし、地盤の応力-ひずみ関係に非線形の効果を考えて線形に設定することで、地震時の応答を評価する。その結果を基に、すべり線上の滑動力と抵抗力の比からすべり安全率が算出され、安定性照査が行われてきた。

さらに、1章でも述べた様に、外部情勢から、地盤の破壊を考慮し得る時刻歴非線形解析の高度化が求められている。当所においては、石丸ら^[2]により、時刻歴非線形解析の高度化に向けた研究が進められている。

一方、計算力学の分野では、連続体解析で粒子法が注目されている。従来用いられてきた格子法（FVM, FEM）には、メッシュ作成に多大な労力を有する、大変形時にメッシュ形状が破たんする、メッシュを再分割する際の計算負荷が大きいなどの問題点が存在する。一方で、粒子法は非構造の計算点として粒子のみを用いた連続体解析であるため、上記のようなデメリットを解消できる可能性があり、注目を集めている。そこで、粒子法の中で、SPH 法、MPS 法、MPM について概説する。

連続体力学における流体、弾性体の支配方程式は、それぞれ式(2.1), (2.2)のようになる。

$$\frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F}_{ex} \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t} = \text{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{F}_{ex} \quad (2.2)$$

ただし、 $\mathbf{v}$ は速度、 ρ は密度、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{F}_{ex}$ は外力、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力を表す。

式(2.1), (2.2)の偏微分演算子の離散化手法に各手法の特徴がある。

2.1 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法

SPH 法は、宇宙物理学の分野で発達してきた数値解析手法であり、Lucy^[3]や Gingold ら^[4]によって提案された手法である。SPH 法の離散化手法はカーネル近似、粒子近似という 2 つの考え方に基づいて行われている（図 2-1）。

カーネル近似は、カーネル関数を用いた積分により空間の位置 $\mathbf{x}$ における任意の関数 $f(\mathbf{x})$ を表すことであり、式(2.3)の様に表される。

$$f(\mathbf{x}) \approx \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (2.3)$$

ただし、 Ω は積分定数（体積）、 $\mathbf{x}'$ は体積 Ω に含まれる位置、 $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$ は位置 $\mathbf{x}'$ における $\mathbf{x}$ のカーネル関数、 h は平滑化距離を表す。

粒子近似とは、その粒子の影響半径内にある粒子のパラメータを積分して、その粒子のパラメータを近似的に求めることである。よって、式(2.3)における積分表現は式(2.4)の様に書ける。

$$f(\mathbf{x}) = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (2.4)$$

ただし、 m_j は粒子 j の質量、 ρ_j は粒子 j の密度を示している。

以上より、関数 $f(\mathbf{x})$ の勾配、ラプラシアンはそれぞれ式(2.5), (2.6)の様に表される。

$$\nabla f(\mathbf{x}) = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}) = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) \nabla^2 W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (2.6)$$

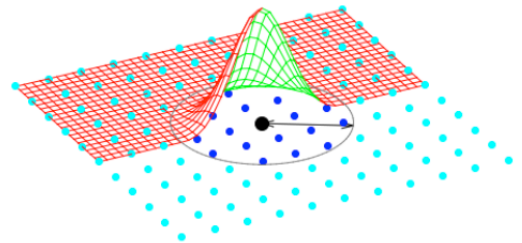


図 2-1 SPH 法の粒子とカーネル近似^[5]

2.2 MPS (Moving Particle Simulation) 法

MPS 法は、越塚^[6]によって開発された手法であり、偏微分演算子を粒子間相互作用モデルで離散化するものである。

MPS 法における、関数 $f(\mathbf{x})$ の勾配、ラプラシアンはそれぞれ式(2.7)、(2.8)の様に表される。ただし、 D_0 、 n_0 、 λ 、 r_e はそれぞれ次元数、基準粒子数密度、モデル定数（式(2.10)）、影響半径である。ただし、式(2.9)は粒子数密度であり、 $t=0$ の時の値を初期粒子数密度とする。また、重み関数 $w(r)$ は式(2.11)の様に表される。

$$\nabla f(\mathbf{r}_i) = \frac{D_0}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{f(\mathbf{r}_j) - f(\mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right\} \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 f(\mathbf{r}_i) = \frac{2D_0}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (f(\mathbf{r}_j) - f(\mathbf{r}_i)) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (2.8)$$

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (2.9)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (2.10)$$

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & \text{for } r \leq r_e \\ 0 & \text{for } r > r_e \end{cases} \quad (2.11)$$

以上の離散化により、近傍の粒子が垂直方向およびせん断方向ばねおよび圧力によって接続されていると解釈することが可能であり^[6]、DEM における粒子の集合体モデルを拡張したものになっている^[7]（図 2-2）。ただし、粒子の回転による変位が差し引かれていることに注意する必要がある。それは、応力計算において、ひ

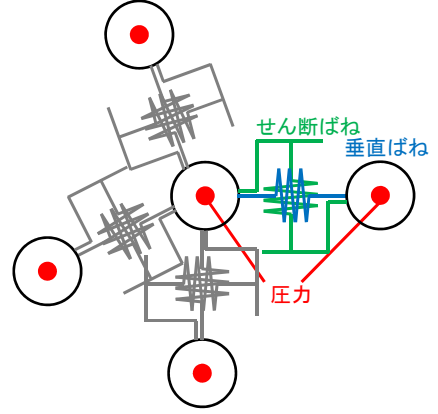


図 2-2 弾性体解析における離散化によるばねと圧力の解釈

ずみテンソル、応力テンソルの全成分でなく、粒子間相対位置ベクトル $\mathbf{r}_{ij}$ 方向で内積をとった値を考えているからである。例えば、粒子間の法線方向の応力は式(2.12)のようになる。

$$\sigma_{ij}^n = 2\mu \varepsilon_{ij}^n = 2\mu \frac{u_{ij}^n}{|\mathbf{r}_{ij}^0|} \quad (2.12)$$

ただし、 σ_{ij}^n 、 ε_{ij}^n 、 u_{ij}^n はそれぞれ応力、ひずみ、変位の粒子間相対位置ベクトル $\mathbf{r}_{ij}$ 方向の成分である。そして、粒子間にかかる力は、粒子間の相対変位と線形の関係になっており、これはばねによる力と解釈できる。

2.3 MPM (Material Point Method)

メッシュフリー法の一つとして、Sulsky ら^[8]によって提唱された MPM は、粒子群により、応力やひずみなどの物理量を輸送しながら、大変形時の挙動を表現し、粒子群裏に設定した背面格子群で FEM と同様なひずみ増分計算を行う。粒子 p の位置 $\mathbf{x}_p^k$ (k : ステップ数) での背面格子群への内挿関数 $N_i(\mathbf{x}_p^k) (= N_{ip}^k)$ とその勾配関数 $\mathbf{G}_p^k (= \nabla N_{ip}^k)$ を計算し、それらを用いて、粒子群と背面格子群の間で物理量の情報をやりとりしながら、計算を進めていく（図 2-3）。

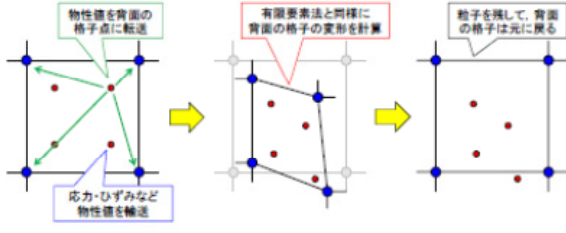


図 2-3 MPM の特徴^[9]

具体的に、粒子群から背面格子群に情報を渡すには、式(2.13)、(2.14)から内挿関数及び勾配関数を用いて背面格子内粒子群のもつ物理量の情報を集約することで、背面格子点での内力 $\mathbf{f}_i^{int,k}$ 、外力 $\mathbf{f}_i^{ext,k}$ を求め、式(2.15)からその加速度 $\mathbf{a}_i^k$ を求める。

$$\mathbf{f}_i^{int,k} = -\sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{G}_{ip}^k \cdot \boldsymbol{\sigma}_p^{s,k} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{f}_i^{ext,k} = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{b}_p^k N_i(\mathbf{x}_p^k) + V_p \int_{\partial\Omega} N_i(\mathbf{x}) \cdot \boldsymbol{\tau}^k dS \quad (2.14)$$

$$\mathbf{a}_i^k = (\mathbf{f}_i^{int,k} + \mathbf{f}_i^{ext,k}) / m_i^k \quad (2.15)$$

ここで、 N_p は粒子数、 M_p は粒子質量、 $\boldsymbol{\sigma}_p^{s,k}$ は粒子 p が持つ単位体積あたりの応力テンソル、 $\mathbf{b}_p^k$ は粒子 p の体積力、 V_p は粒子 p の体積、 $\boldsymbol{\tau}^k$ は境界上の応力である。

また、背面格子群から格子内の粒子群への情報の受け渡しについては、式(2.15)から求められる背面格子点での速度 $\mathbf{v}_i^{k+1}$ より、次ステップの粒子 p のひずみ増分 $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1}$ が式(2.16)で求められる。ただし、 N_n は一格子が持つ節点の個数である。

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1} = \frac{\Delta\tau}{2} \sum_{i=1}^{N_n} \{ \mathbf{G}_{ip}^{k+1} \mathbf{v}_i^{k+1} + (\mathbf{G}_{ip}^{k+1} \mathbf{v}_i^{k+1})^T \} \quad (2.16)$$

2.4 解析事例

2.3 では、SPH 法、MPS 法、MPM の特徴である離散化手法の違いについて示した。それを踏まえて、ハイブリッド解析では、連続体解析として MPM を除く、SPH 法、MPS 法を用いることが望ましいと言える。なぜならば、SPH 法や MPS 法は、連続体解析における粒子と不連続体解析における粒子の接触モデル（4 章）の合理化を行えばよいが、MPM は、それに加えて、背面格子群と DEM における粒子との情報のやり取りを行わなければならない。よって、SPH 法及び MPS 法を用いた解析事例についていくつか概説する。

小野^[5]は、SPH 法による地震応答解析手法について、有限要素法の解析精度を実現し得る計算式を提案し、それに加えてレイリー減衰の導入を試みた。

その手法を踏まえて、SPH 解析を行い、有限要素法の結果と比較して、その妥当性を報告している。

また、平滑化距離、粒子数密度、レイリー減衰の大きさの解析結果に関する感度分析を行い、平滑化距離、粒子数密度、レイリー減衰の大きさを変化させた時、それぞれ、解析精度、すべり面の発達過程、すべり面の発生過程に違いが生じると指摘した。

一方で、五十里ら^[10]は地震時の津波誘発型斜面崩壊について、地盤弾塑性構成則を導入し、地盤の応力解析、崩壊発生過程での土塊相互作用解析まで MPS 法を適用して数値解析を行っている。

その研究における弾塑性計算の流れは、4 つに分けられる。それは、弾性体計算、降伏判定、塑性ひずみ計算、破壊判定である。以下、降伏判定、塑性ひずみ計算、破壊判定について概説する。

塑性計算において、ひずみ増分 $d\boldsymbol{\varepsilon}$ は弾性ひず

み増分 $d\varepsilon^e$ と塑性ひずみ増分 $d\varepsilon^p$ に加算分解され、式(2.17)のようになる。

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (2.17)$$

塑性ひずみ増分については、応力のスカラー関数である塑性ポテンシャルの存在を仮定する流れ則に従い、式(2.18)の様に書ける。

$$\{d\varepsilon^p\} = d\Lambda \left\{ \frac{\partial \psi}{\partial \sigma} \right\} \quad (2.18)$$

ただし、 ψ は塑性ポテンシャル関数、 $d\Lambda$ は正のスカラー量であり、コンシステンシー条件式 (2.19)

$$df_y = \left\{ \frac{\partial f_y}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} = 0 \quad (2.19)$$

を用いて求められる。ここに、 f_y は降伏関数である。式(2.19)は、地盤を弾完全塑性体として、降伏曲面上では降伏関数の全微分は 0 であることから得られる。以上より、式(2.20)で $d\Lambda$ が求まる。

$$d\Lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial f_y}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \{d\varepsilon\}}{\left\{ \frac{\partial f_y}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial \Psi}{\partial \sigma} \right\}} \quad (2.20)$$

ただし、 $[D^e]$ は弾性マトリックスである。これを用いて、塑性ひずみを得る。

降伏関数として、Drucker-Prager 式

$$f_y(\sigma) = -\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa \quad (2.21)$$

を用いた（ただし、 I_1 は応力の第 1 不変量、 J_2 は偏差応力の第 2 不変量である）。平面ひずみ条件下で行う時、 α 、 κ は材料定数である。

また、塑性ポテンシャル関数には、関連流れ則を適用して、式(2.22)の様に表すとした。

$$\Psi(\sigma) = f_y(\sigma) \quad (2.22)$$

破壊条件として、塑性ひずみの第 2 不変量

$$J_{2i}^p = \frac{1}{2} \{ -(\text{tr}(\varepsilon_i^p))^2 + \text{tr}((\varepsilon_i^p)^2) \}$$

を用いて、

$$\text{if } (J_{2i}^p > \beta_s) \text{ then } \delta = 0 \quad (2.23)$$

式(2.23)で表すとした。ここに、 δ は土粒子の接続状態に関するデルタ関数、 β_s はチューニングパラメータである。彼らは、以上の計算方法が、斜面鉛直地盤の崩壊などの既往の知見と図 2-4 の様に定性的に一致し、この手法の有効性に言及した。

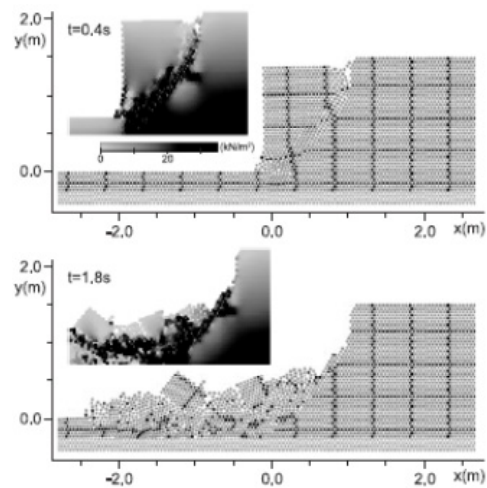


図 2-4 鉛直斜面地盤の崩壊^[10]

一方で、吉田^[11]も鉛直な崖の自重崩壊解析を行っている。彼は、越塚^[6]の破壊判定式(2.24)

$$\frac{|\mathbf{r}_{ij}| - |\mathbf{r}_{ij}^0|}{|\mathbf{r}_{ij}^0|} > \varepsilon_{\max} \quad (2.24)$$

(ただし、 $\mathbf{r}_{ij}, \mathbf{r}_{ij}^0, \varepsilon_{\max}$ は現在及び初期の粒子間相対位置ベクトル、引張限界ひずみとする)

に変えて式(2.25)、(2.26)を提案した。

$$\tau_{\max} = c_{ij} + \sigma_{ij}^n \tan \phi_{ij} \quad (2.25)$$

$$\sigma_{ij}^n < c_t \quad (2.26)$$

ただし、 $\tau_{\max}$ は最大せん断応力、 c_{ij} は粘着力、 σ_{ij}^n は粒子間の直応力、 ϕ_{ij} は内部摩擦角で、粒子 i, j の平均値を表す。また、式(2.26)は粒子間の接続の切断基準で、 c_t は引張り強度を表す。

その結果、式(2.24)では不自然な解析結果となっていた鉛直崖の自然な自重崩壊を図 2-5 の様に再現した。

また、吉田ら^[7]は、MPS 法を用いて強非線形の応答問題についてヤング率の微小変化、計算環境の違い、初期粒子配置の違いなどに対して、大きな応答の違いが表れる場合があることを示した。

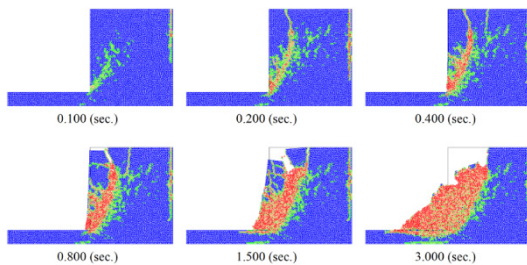


図 2-5 鉛直崖の自重崩壊^[11]

2.5 まとめ

2.1～2.4 では SPH 法、MPS 法、MPM の基本式及び SPH 法、MPS 法を用いた斜面安定性評価に関する解析事例について概観した。それらの特徴は表 2-1 の様にまとめられる。

基本式に関して、3 手法のそれぞれの特徴は、上述の様に連続体力学における流体、固体の支配方程式(2.1)、(2.2)の離散化方法の違いに表れている。具体的に、補間関数として、SPH 法はカーネル関数、MPS 法は重み関数、MPM は形状関数を用いて、離散化を行っている。カーネル関数は、粒子のもつ変数値にカーネル関数をかけて重ね合わせることでその変数の空間分布、重み関数は、偏微分演算子の離散化の際に用いる粒子間相互作用モデルの強さ、形状関数は、通常の FEM と同様の要素を構成する節点変位の補間関数を表している。

SPH 法、MPS 法の解析事例に関して、斜面の崩壊事例に関する解析的研究は、定性的に自然な再現解析は可能になっている。しかしながら、実証的な検証事例が不足していると思われるので、更なる実証的研究の蓄積が必要である。

また、粒子法の解析手法には固有の設定条件が存在する。解析手法固有の設定条件とは、室内試験結果より論理的に決定できないが、設定を要する条件と定義する。SPH 法は平滑化距離、カーネル関数、Rayleigh 減衰、粒子数密度、粒径、初期粒子配置、自由表面判定用のパラメータであり、MPS 法では、影響半径、重み関数、Rayleigh 減衰、粒子数密度、粒径、初期粒子配置、自由表面判定用のパラメータである。また、MPM では、内挿関数がそれに当たる。そこで、小野^[5]や吉田ら^[7]の研究を踏まえて解析手法固有の設定条件が解析結果（滑り面の発達過程、発生過程、崩壊領域）に与える影響をまとめると、表 2-2 の様になる。表 2-2 より、不明の欄が多く体系的に整理されているとは言い難い。

以上より、粒子法を斜面の地震時安定性評価に向けて、高度化していく際の課題は2つある。

1 つ目は、粒子法を用いた斜面の地震時安定性評価の実証的研究を蓄積することである。現時点では、どの程度その解析手法が実験結果を再現できるのか検証した事例は少ない。具体的に、弾塑性表現の高度化が重要な課題になってくると思われる。

2 つ目は、解析手法固有の設定条件が解析結果に与える影響についての体系的な整理を行うことである。表 2-2 から、解析手法固有のパラメータが解析結果に与える影響について体系的な整理が行われているとは言い難い。しかし、実際の地盤材料を用いた室内試験結果を根拠に値を決定できない以上、実務では保守的な評価ができるように条件を設定する必要がある。その様に条件を設定するためには、その条件が崩壊領域や土塊の最大崩落到達距離に与える影響を体系的に整理する必要がある。

表 2-2 解析手法固有の設定条件が結果に与える影響^{[5][7]}

	解析結果 (SPH 法)	解析結果 (MPS 法)
平滑化距離 影響半径	影響有	不明
補間関数	不明	※重み関数は 影響半径に 従属するため 省略
Rayleigh 減衰	影響有	不明
粒子数密度	影響有	不明
粒径	不明	影響有
初期粒子配置	不明	影響有
自由表面判定 用パラメータ	不明	不明

表 2-1 粒子法のまとめ（阿部^[9]に一部加筆）

数値解析手法	特徴	利点	欠点	解析事例
SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法	カーネル関数で、応力を空間分布として計算	斜面崩壊への適用事例が多い	Tensile instability の存在	斜面崩壊 ^{[5][12]} 断層変位 ^[25]
MPS (Moving Particle Simulation) 法	粒子間相互作用モデルにより、応力を粒子間で計算し、DEM を拡張した様な定式化	DEM との親和性が高く、不連続体域を精緻に表現できる可能性が有る	Fixed kernel の使用、破壊ひずみの設定の必要性	室内試験 ^[11] 斜面崩壊 ^{[10][11]}
MPM (Material Point Method)	Lagrange 的手法、Euler 的手法を連成して計算	Tensile instability が無い	背景メッシュを粒子が通過する際、ノイズが発生	室内試験 ^[13] 斜面崩壊 ^[9]

3. 不連続体解析

2 章では 4 つの解析手法 (FEM, SPH 法, MPS 法, MPM) について概観した。以下は、地盤耐震工学において、頻繁に登場する DEM について概説し、今後の課題について言及する。

3.1 DEM (Distinct Element Method)

DEM は Cundall^[14]によって提案された解析手法で、解析対象を微小な粒子の集合体としてモデル化し、個々の粒子の運動を解析することで、集合体全体の挙動や反力を解析できる手法である。2 粒子 i, j が式(3.1)を満たす時のみ、接触と判定し、バネ・ダッシュポットにより、力計算を行う。

$$r_i + r_j \geq L_{ij} \quad (3.1)$$

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.2)$$

ただし、 $x_i, x_j, y_i, y_j, r_i, r_j$ は粒子 i, j の x 座標, y 座標, 粒子半径とする。

以上より、集合体を形成する粒子間において接点の形成と解消という機能が簡便に入り、不連続面を形成できることや、マクロな構成関係なしに材料の挙動を表せるというメリットがある。一方で、ミクロなパラメータを室内試験から一意的に決定することが難しく、試行錯誤的に決定しなければならないことが多いというデメリットがある。

3.2 解析事例

中瀬ら^[15]は DEM を用いて平面ひずみ試験に対する適用可能性を検証した。彼らは、実験で

アクリル丸棒で供試体を作成し、材料定数を理論的に求め、DEM を用いてシミュレーションを行い定量的に再現を行った。そして、粒状体の圧縮過程でせん断帯が形成される時、せん断帯を形成する粒子の回転が卓越することを指摘した。

恒川ら^[16]は DEM により、3 軸圧縮試験の分布粒径の影響を調べている。具体的に、均等粒径かつ規則配置(3DE)、または分布粒径かつランダム配置(3DD)の 2 ケースについて数値実験を行っている。その結果、3DD において、体積ひずみ-軸ひずみの関係が図 3-1 の様に室内試験の結果と良く一致することを示している。また、3DE において、図 3-2 より最大主応力差が過度に大きくなっている。原因として均等粒径モデルでは要素が規則的に配置されているため、初期は非常に粒子間のかみ合わせが良く、大きなせん断力に抵抗するものの、一度破壊するとかみ合わせが一度に外れてしまうため、残留強度が極端に低下すると考察されていた。

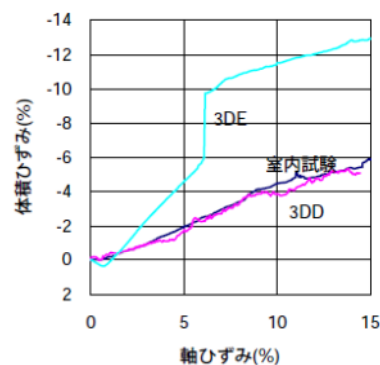


図 3-1 軸ひずみ-体積ひずみ関係^[16]

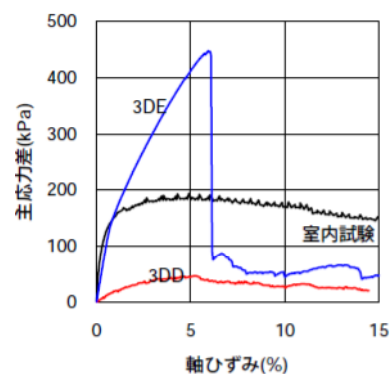


図 3-2 軸ひずみ-主応力差^[16]

清水ら^[17]は粒子間結合力をモデル化した DEM モデルを開発し、ベントナイト供試体と壁面の間に作用する摩擦力と供試体縦横比に注目した膨潤圧試験のシミュレーションを行った。その結果より、彼らは、飽和率分布状態による供試体内の局所的な膨潤量の違いや流体の浸潤による強度や弾性係数などの力学特性の低下が原因と考えられる供試体内部の変位挙動について言及した。

清水ら^[18]は間隙水圧を考慮した粒子-流体連成モデルを用いた DEM により、飽和砂層内の 2 次元液状化シミュレーションを行った。計算方法として、図 3-3 の様に、粒子塊と流体格子の 2 つを考え、流体の圧力について、流体格子間の圧力差による拡散の影響と粒子塊の体積変化による流体の圧縮性の影響を微小時間毎に計算して、圧力を求めた。そして、求めた流体圧力に流体格子内の間隙を形成する粒子の占有面積を乗じた力が体積力として、粒子に作用するとした。以上より、流れの局所的な時間変化や非均一性を追跡することができ、初期間隙率の違いによる諸量の応答の違いを表現した。

新井ら^[19]は、DEM を用いた地震時における副断層の出現解析を行った。彼らは、主断層と副断層の両方の再現解析に成功し（図 3-4、図 3-5）、ころがり摩擦の大きさと副断層の発生の関係について考察した。

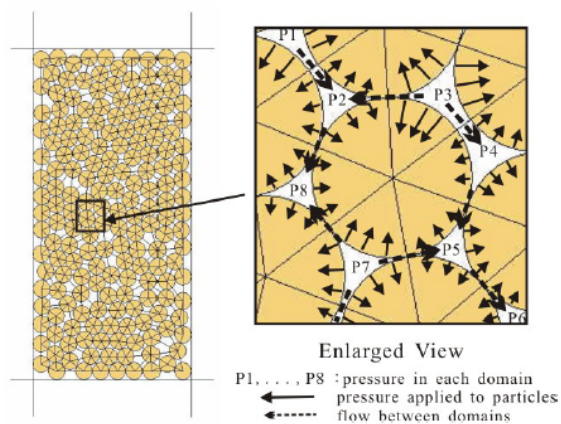


図 3-3 粒子塊と流体格子^[18]



図 3-4 強制変位前の砂箱の解析モデル^[19]

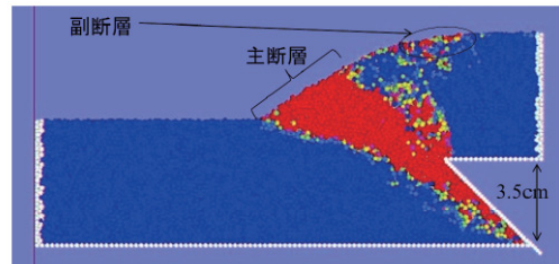


図 3-5 変形後の砂箱を模擬した解析モデル^[19]

3.3 課題

DEM に関する情報の不確実性が最も重要な問題である。DEM に関する情報は、変形・強度特性に関する情報と幾何学的情報に関する情報の 2 つである。具体的に、変形・強度特性に関する情報とは、法線方向・接線方向のばね定数、ダッシュポット、摩擦係数であり、幾何学的な情報とは、粒度分布、粒径、初期粒子配置である。

前者については、ヘルツの弾性接触理論解、反発係数の式などが存在し、理論的に求められるが、現実的に地盤材料の不均質性の強さから上手く再現できないことも多く、試行錯誤により、パラメータを求めているのが実情である。

また、幾何学的情報（粒径、粒度分布、構造）の内、構造に関して、実地盤材料の構造を解析モデルに反映させることは現実的でないと思われる。実際には、CT スキャナなどの非破壊検査装置から得たデジタル画像を直接的に用いたモデル作成の概念（イメージベースモデリング）が提案されている^[20]が、特に大規模実験で、不均質性が高い地盤材料の各々の複雑形状を精緻にモデリングするのは莫大な粒子数を要するため、時間・経済的コストの観点から、現時点で

はあまり適当でない可能性が高い。しかし一方で、鄒ら^[21]は粒状体の弾塑性挙動は材料内部の構造に依存するため、特性評価には、内部粒子の充填構造、接触状態、粒子間すべり面分布などの微視的構造の特性を表現することが求められると言及している。また、稲垣^[22]は粒子法を用いた破壊解析において、破壊断面の法線方向が粒子の相対位置ベクトルに限定されてしまうことを指摘している。すなわち、粒子法も含めて、粒子を用いた解析手法において、幾何学的情報は材料の弾塑性挙動から破壊面の決定まで影響を与え得ると言える。以上より、幾何学的情報が最終的な解析結果に与える影響を、感度分析を行いながら、その全体像を明らかにしていく必要がある。その際の、主たる分析的視点として、平均配位数とファブリックテンソルの2つが挙げられることが多い。以下に、その定義式を示す。

平均配位数 N_c は、福間ら^[23]によると、1 粒子当たりの接点数のことであり、粒子総数を M 、接点総数を N とすると、式(3.3)の様に表される。

$$N_c = \frac{2N}{M} \quad (3.3)$$

また、ファブリックテンソル F_{ij} は、粒子集合体内部の微視的構造を表す指標として最も一般的な指標であり、式(3.4)のような二階のテンソル F_{ij} として表される。

$$F_{ij} = \frac{1}{2N} \sum_{c=1}^{2N} n_i^c n_j^c \quad (3.4)$$

式(3.4)を展開して式(3.5)のようになる。

$$\begin{pmatrix} F_{xx} & F_{xy} \\ F_{yx} & F_{yy} \end{pmatrix} = \frac{1}{2N} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{2N} n_x^k n_x^k & \sum_{k=1}^{2N} n_x^k n_y^k \\ \sum_{k=1}^{2N} n_y^k n_x^k & \sum_{k=1}^{2N} n_y^k n_y^k \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

x 軸に対するベクトルの方向を θ とすれば、接触 k の法線ベクトルは式(3.6)で表される。

$$\mathbf{n}^k = \begin{pmatrix} n_x^k \\ n_y^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta^k \\ \sin \theta^k \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

式(3.5)、(3.6)より、ファブリックテンソルは式(3.7)によって表される。

$$\begin{pmatrix} F_{xx} & F_{xy} \\ F_{yx} & F_{yy} \end{pmatrix} = \frac{1}{2N} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{2N} \cos^2 \theta^k & \sum_{k=1}^{2N} \cos \theta^k \sin \theta^k \\ \sum_{k=1}^{2N} \sin \theta^k \cos \theta^k & \sum_{k=1}^{2N} \sin^2 \theta^k \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

以上より、最大ファブリックの大きさを F_1 、最小ファブリックの大きさを F_2 とすると、固有値を求めて、式(3.8)の様に表される。

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (F_{xx} + F_{yy}) \pm \sqrt{\frac{1}{4} (F_{xx} - F_{yy})^2 + F_{xy}^2} \quad (3.8)$$

以上より、異方性の強さを表す重要な指標として用いられる主値の比 $\frac{F_1}{F_2}$ を視点の一つとして、それらの違いが最終結果に与える影響を考察していくことが必要である。

3.4 まとめ

DEM を用いた数値解析手法の基本式および解析事例を概観した。メリットとして、容易に不連続面を形成し、マクロな構成関係の必要なく地盤材料の挙動が表現可能である点がある。一方で、デメリットとして、室内試験でミクロな物性を決定できないことが多く、恣意性が入り込むなどの点がある。しかし、パラメータの不確定性の問題を除けば、解析事例として、室内試験、液状化現象、断層変位問題など広範な地盤耐震工学における問題に適用されており、

汎用性の高い解析手法であると言える。

また、変形・強度特性及び幾何学的情報は、実際の斜面模型や実地盤のものを知り得ることは難しい。そこで、巨視的な値は複数の固有状態の確率の期待値であると解釈しようとする試みもある。例えば、伊藤^[24]らは確率的性能照査手法に用いるため、確率理論により、複数のパラメータを確率変数とすることで、DEM の拡張を図っている。

4. 連続体解析と不連続体解析のハイブリッド解析

2 章 及び 3 章で連続体解析及び不連続体解析に関して、概観し、それぞれ独立して現状分析・課題抽出を行ってきた。1 章で述べた様なシームレスな解析を考える際は、連続体解析と不連続体解析の適切なハイブリッド解析が求められる。現状では、SPH 法、MPS 法、FEM を拡張し、ハイブリッド解析を行っている例がいくつか見られる。そこで、以下に概説し、斜面の地震時安定性評価に適用する際の課題を抽出する。

4.1 ハイブリッド解析を扱った解析事例

小野ら^[25]は、断層変位に伴って地表面に出現する食い違い量を予測するために、SPH 法をベースに不連続面を新たに考慮できる解析モデルを導入し、解析を行っている。

彼らは、粒子 i が粒子 j より受ける力 f^{ji} の大きさ $|f^{ji}|$ を式 (4.1) により、求めている。

$$|f^{ji}| = D \left\{ \left(\frac{r^i + r^j}{d^{ji}} \right)^a - \left(\frac{r^i + r^j}{d^{ji}} \right)^b \right\} \left(\frac{1}{d^{ji}} \right)^2 \quad (4.1)$$

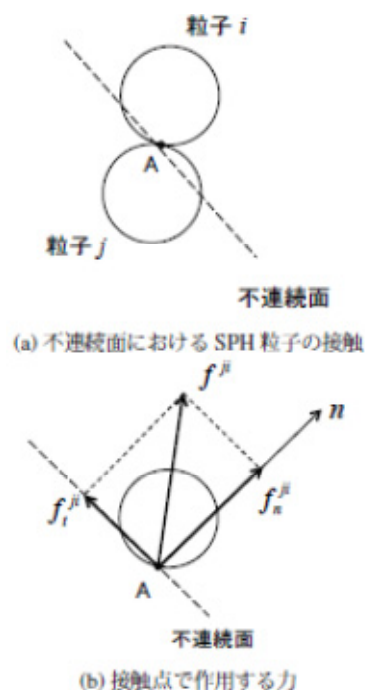


図 4-1 不連続面における力の伝達モデル^[25]

ここに、 r^i は粒子 i に仮定した半径であり、解析モデルの初期状態における粒子の間隔に等しい値を用いた。 d^{ji} は粒子 i と j の中心間距離である。また、 D 、 a 、 b は力の大きさを決めるパラメータであり、彼らは粒子同士に食い込みが見られないように設定した (図 4-1)。

2.4 で解析事例として述べた、五十里ら^[10]や吉田^[11]の MPS 法を用いた数値解析においては、破壊判定後の粒子と破壊前の粒子の接触力計算には DEM と同様の接触モデルを活用している。

また、FEM を用いたハイブリッド解析事例もある。Gordon R.Johnson ら^[26]は、FEM の一要素が指定した塑性ひずみを超えた時に、粒子に変換する機能を導入し (図 4-2)、小さなひずみ領域をメッシュで、大きなひずみ領域を粒子を用いた解析を行っている。そして、図 4-3 の様に、タングステン棒の衝突問題において、実験結果を精度よく再現可能であることを指摘した^[26]。

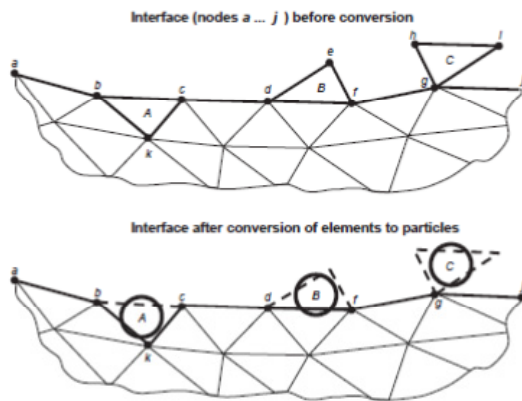


図 4-2 有限要素から粒子への変換^[26]

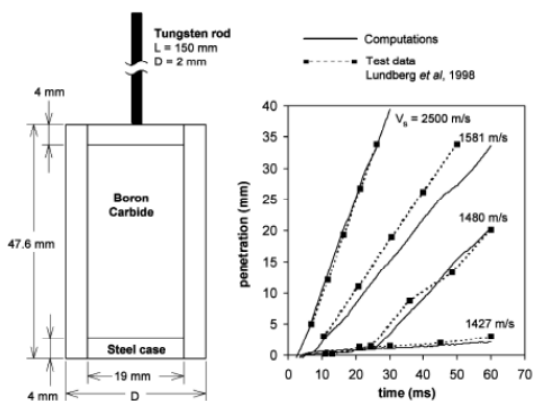


図 4-3 タングステン棒の衝突問題^[26]

4.2 粒状体の流動現象

土塊、岩塊が急速に運動する場合には、すべる（地すべりなど）、落ちる（落石など）、流れる（土石流など）などの場合がある。地すべりの場合に、すべり土塊が地下水、地表水と相まって最終的に土石流のようになる場合もある。ゆえに不連続体の流動現象を適切に表現することは重要である。そして、パラメータの値が粒状体の流動現象に与える影響について様々な意見がある。

例えば、DEMを用いた解析において、Xuら^[27]は流動層の動きには、ダッシュポットや摩擦係数が影響を与えることを指摘している。

一方で、減衰定数は土粒子が大変形・大移動しても、粒子の衝突・接点の解消やその繰返し

が解析対象とする現象において支配的ではない場合には影響がないとする指摘もある^[28]。また、酒井^[29]は、特に混相流の数値解析では、実際のヤング率に基づいて得られるばね定数よりも、時間刻みとの兼ね合いから接触力が非常に重要な体系とならない場合、柔らかいばねを使用することが多いと述べている。

以上の様に、流動現象にも、準静的流動から高速流動現象まで様々な現象があるが、設定条件の感度も変わると思われる。そして、松島^[30]もあるパラメータの感度がそれほど高くない場合も多く、いたずらに物理モデルとしての物性値を追及する必要はないと指摘している。ゆえに、粒状体のパラメータについてどの程度こだわるべきか、実験および解析における感度分析からケースごとに慎重な工学的判断を行っていく必要があると思われる。例えば、土石流の様な流動性の高い崩壊と地すべりの様な剛体すべりに近いものでは、不連続体解析領域のパラメータの感度は異なってくる可能性がある。

また、粒状体の流動現象をマクロに捉えて極性流体モデルで計算する方法がある。極性流体モデルとは、構成要素が内部自由度を持つモデルである。構成要素の回転を独立変数として取り扱い、その速度場との結合を考慮している。以下に、基礎方程式として、連続の式、運動量保存則、角運動量保存則をそれぞれ、式(4.2)、(4.3)、(4.4)の様に示す^[31]。

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (4.2)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} \quad (4.3)$$

$$\frac{2}{5} \rho a^2 \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\mu}_T + 2\tilde{\boldsymbol{\sigma}} \quad (4.4)$$

ただし、 $D/Dt = \partial_t + \mathbf{u} \cdot \nabla$ はラグランジュ微分、 ρ は質量密度、 $\mathbf{u}$ はマクロな流速、 $\boldsymbol{\sigma}$ はストレステンソル、 $\mathbf{g}$ は重力加速度、 a は粒子半径、 $\boldsymbol{\omega}$ は渦度、 $\boldsymbol{\mu}_T$ は偶応力テンソル（トルクの面応力を表現する）、 $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ は極性を考慮したことで現れるストレステンソルの反対称部分である。また、ストレステンソルや偶応力テンソルに関して、物理的考察に基づいた構成方程式を導入する必要がある。

実際に、芹澤ら^[32]は極性流体理論に基づく粉体流動現象を SPH 法により検証を行った。その結果、図 4-4、4-5 の様に粉粒体が、平行移動と回転運動を伴う流動部と非流動部に別れて流動することや安息角の形成、粒径の増加に伴って、流動性が増加する現象を再現している。

一方で、酒井^[29]は、粉体（DEM）と流体（MPS 法）の挙動の違いを示すために、粉体または流体を片側に寄せながら水槽に入れて仕切り板を取り去る数値実験を行った。その結果、図 4-6 の示す様に、粉体は安息角を形成する一方で、流体の表面は水平になりつつあることが分かり、粉体と流体の構成要素である固体粒子

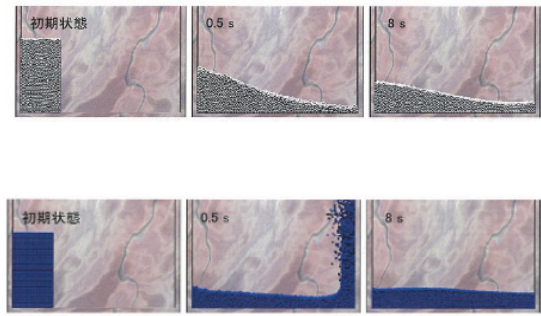


図 4-6 粉体（DEM）と流体（MPS 法）の違い^[29]

の運動方程式の違いから、解析結果が異なることを説明している。以上より、粉体と流体の上記の数値実験で表れる物理的性質の違いとして、図 4-4 や図 4-5 から、安息角形成の有無が挙げられ、極性流体モデルは、粉体と流体の物理的性質の違いを考慮して粉体の流れを記述できる可能性が高い理論体系であると考えられる。実際、早川^[31]も粉体の流動学に求められる理論解析可能な場の方程式として、極性流体理論を挙げている。

4.3 まとめ

SPH 法、MPS 法、FEM を用いてこれまで、連続体解析と不連続体解析のハイブリッド解析が行われてきた。共通して、不連続面間では、DEM と同様の接触モデルを導入し接触力計算を行っているものが多い。

今後の課題は 2 点ある。1 点は、連続体解析における要素から不連続体解析における要素に変換する（以下、要素変換と記載）条件、それに関する定数の設定方法の標準化、2 点目は要素変換後の合理的な DEM 粒子の物性設定である。

1 点目について、例えば五十里らは、塑性ひずみの第 2 不変量の値を設定している。一方で、吉田らは粒子間の直応力と引張強度の関係から変換している。Gordon R. Johnson らは、FEM 要素における塑性ひずみ値の変換基準を設定している。FEM を用いた研究は、実証的な研究であ

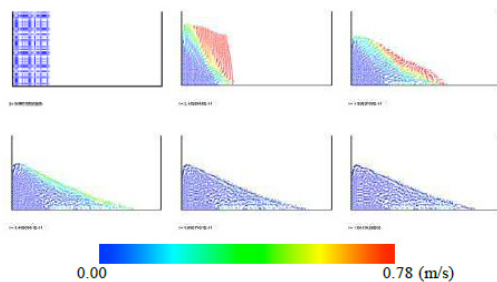


図 4-4 粉粒体の平行移動速度^[32]

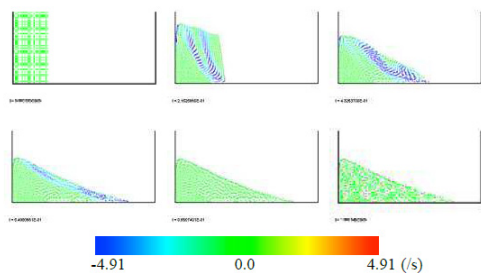


図 4-5 回転角速度の遷移^[32]

るが、粒子法を用いた研究では、2 章でも指摘した様に、実証性に欠けているのが現状である。そこで、要素変換条件の標準的モデルや用いる定数の標準値の検討が必要である。

2 点目について、DEM の様な接触モデルを用いる際、設定条件の不確定性の問題が存在する。しかし、不連続体解析領域における粒状体の評価は、土塊の最大崩落到達距離に影響を与え得る。MPS 法を用いた弾塑性表現の高度化にも影響を与え得る。なぜならば、弾塑性表現の中でもひずみ軟化挙動の表現について、中瀬^[33]は、構造骨格の変形連鎖に伴う荷重方向に対する構造の弱化によるものであると言及しており、DEM 領域の粒子の物性、幾何学的構造の工夫により高度化できる可能性が高い。そこで、3 章で言及した様な分析的視点で DEM に関する設定条件を体系的にまとめる必要がある。また、不連続体解析領域の挙動に関して、マクロモデルとして、極性流体の存在も念頭に置いておく必要があるだろう。

5. まとめ

原子力発電所周辺斜面の地震時安定性評価手法には、連続体解析と不連続体解析の 2 つの解析手法が存在し、独立して知見の蓄積が進められている。一方、複数の解析手法を用いて保守的な評価を行っている現状では、過度に保守的になり、合理性に欠ける場合がある。そこで、連続体解析と不連続体解析を適切にハイブリッドすることで、1 つの解析手法により微小変形から崩落に至る挙動を再現できれば、斜面の地震時安定性評価の合理化に資するだけでなく、評価精度の向上が期待される。

本報告書では、連続体解析、不連続体解析および両者のハイブリッド解析の 3 つの視点で整理し、以下の知見を得た。

- ・連続体解析手法を用いた斜面の地震時安定性

評価手法では、FEM による評価が主流であるが、最近では、粒子法を用いた例も見られる。FEM の研究としては、非線形解析による地盤の変形量評価が多い。一方で、粒子法は実証例が少なく、解析手法固有のパラメータが複数あり、試行錯誤的に決めている。

- ・不連続体解析に関して、DEM を用いた例が多いが、パラメータの設定は、粒子法同様、課題が残る。
- ・ハイブリッド解析に関する解析事例は、SPH 法、MPS 法および FEM を拡張し、粒子間にはばねを仮定して、接触計算を行う事例が多い。

6. 今後の展開

以上より、連続体解析として、FEM、SPH 法、MPS 法、不連続体解析として、DEM などが挙げられる。本テーマでは、連続体解析と不連続体解析のハイブリッドにおいて、"いかに弾塑性変形の滑らかな遷移過程を表現するか"が最も重要である。そのための課題は 2 つある。1 つ目は、連続体解析における要素から不連続体解析における要素に変換する（以下、要素変換と記載）条件、それに関する定数の設定方法の標準化である。現状では、MPS 法を用いた解析事例で、塑性ひずみの第 2 不変量や粒子間の直応力と引張り強度との関係を設定したものや FEM を用いた解析事例で、塑性ひずみの基準を設定し、変換している解析事例がある。ただし、代表的な要素変換条件や定数の設定手法は存在しない。2 つ目は、要素変換後の合理的な DEM 粒子の物性設定である。ばね定数や粘性減衰係数は理論式の適用や材料実験などにより決定している例がある^[15]。回転抵抗は、DEM 粒子を用いた解析で、強応力鎖の安定性やすべり面との関係性が指摘されているものの、チューニングパラメータが存在するため、室内試験などから推定する必要がある。

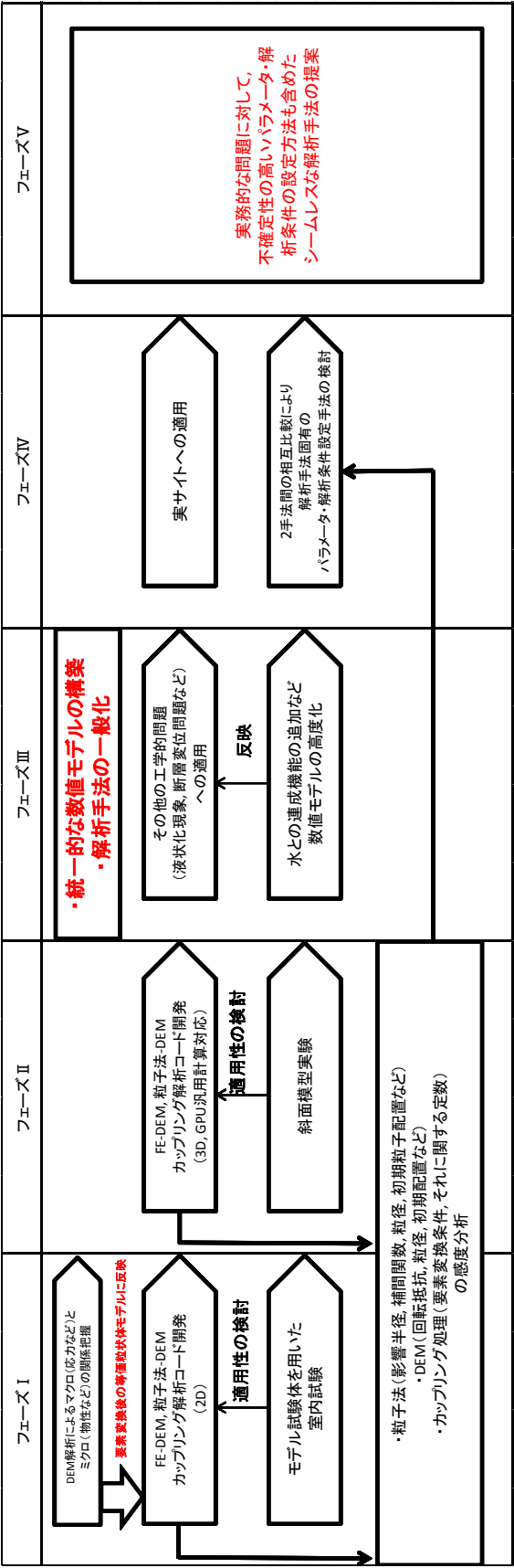


図 6-1 研究ロードマップ

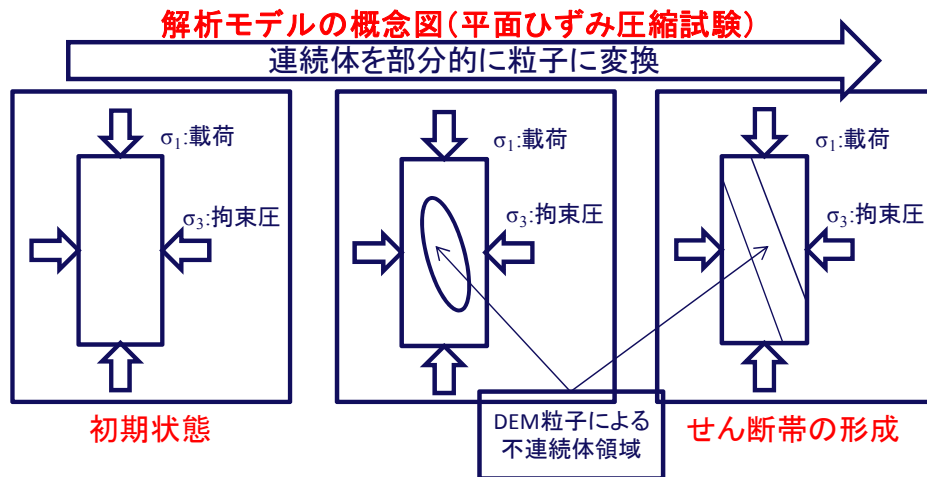


図 6-2 解析モデル概念図

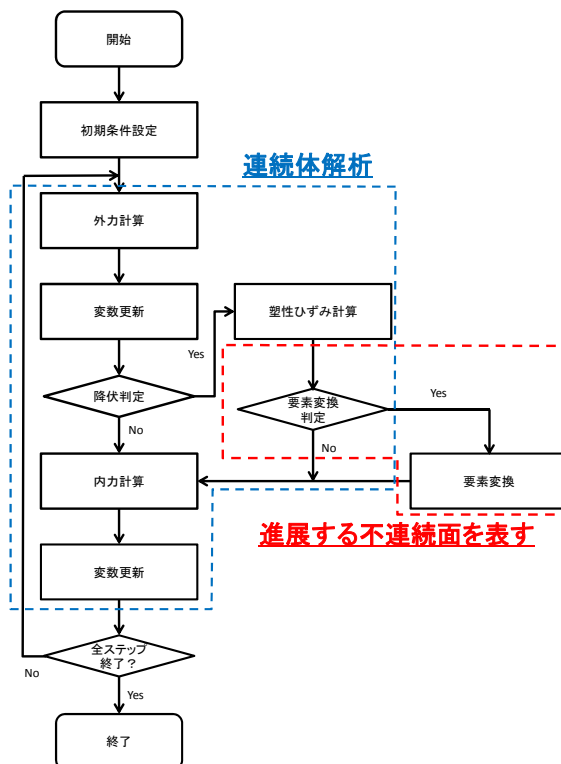


図 6-3 ハイブリッド解析コードの計算フロー

以上より、図 6-1 に研究ロードマップを示す。フェーズⅠでは、モデル試験体を用いた平面ひずみ圧縮試験などの室内試験への適用性の検討を行う（図 6-2）。また、図 6-3 に開発するハイブリッド解析コードの計算フローを示す。フェーズⅡでは、斜面の地震時安定性評価の問題への適用性の検討を行う。特に、粒子法を連

続体解析に用いる解析手法においては、破壊面の位置の精度に関して実証的な研究が少なく実験とともに確認する必要がある。フェーズⅢでは、地盤耐震工学分野で斜面の地震時安定性評価以外の問題（液状化現象、断層変位問題など）への適用性の検討を行い、解析手法としての一般化を図る必要がある。フェーズⅣでは、両者

の比較から解析手法固有の設定条件の決定手法を検討する。フェーズⅤでは、総括として実用的な問題に対して不確定性の高い条件設定方法も踏まえながら、シームレスな解析手法の提案を行う。

謝辞

本報告書を作成するに当たり、岡田 哲実 上席研究員、石丸 真 主任研究員には様々な助言を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 河井正, 石丸真. 地震時のすべり安全率と斜面の滑落の関係に着目した岩盤斜面の耐震安定性評価フローの提案. 電力中央研究所 研究報告 N09030. 2010.
- [2] 石丸真, 岡田哲実, 中村大史. 延性的な崩壊挙動を示す泥岩斜面の地震時残留変位量と時刻歴非線形解析の適用性, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2016.
- [3] Lucy, L.B. A numerical approach to testing of the fission hypothesis, *Astronomical Journal*, Vol. 82, pp.1013-1024, 1977.
- [4] Gingold R. A. and Monaghan, J. J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 181, pp. 375-389, 1977.
- [5] 小野祐輔. SPH 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No.4, I_650-I_660, 2013.
- [6] 越塚誠一. 計算力学レクチャーシリーズ 5 粒子法, 丸善, 2005.
- [7] 吉田郁政, 大庭啓輔, 石丸真. MPS 法あるいは DEM を用いた破壊挙動の不確定性に関する基礎的考察, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No.2, I_365-I_374, 2011.
- [8] D. Sulsky, Z. Chen and H. L. Schreyer. A particle method for history-dependent materials, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 118, issue 1-2, pp.179-196, 1994.
- [9] 阿部慶太. MPM を用いた地盤の大変形・流動解析手法の開発に関する研究, 東京大学, 2013, 博士論文.
- [10] 五十里洋行, 後藤仁志, 吉年英文. 斜面崩壊誘発型津波の数値解析のための流体 - 弾塑性体ハイブリッド粒子法の開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No.1, 046-050, 2009.
- [11] 吉田郁政. MPS 法を用いた地盤構造物の地震時破壊挙動解析のための基礎的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No.1, 93-104, 2011.
- [12] Maeda, K., Sakai, H. and Sakai. M. Development of seepage failure analysis method of ground with smoothed particle hydrodynamics, *Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE*, Vol.23, No.2, 307s-319s, 2006 October. (Translated from a paper which originally appeared on *Journal of Applied Mechanics*, JSCE, Vol.7, pp.775-786, 2004.8)
- [13] 桐山貴俊. Material Point Method を用いた地盤材料の大変形解析, 清水建設研究報告, 第 92 号, 87-98, 2015.
- [14] Cundall, P. A. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, pp. 47-65, 1979.
- [15] 中瀬仁, 安中正, 片平冬樹, 興野俊也. 平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用, 土木学会論文集, No.454, III -20,

- pp.55-64, 1992.
- [16] 恒川裕史, 内田明彦, 畑中宗憲. 3次元個別要素法による三軸圧縮試験のシミュレーション解析, 土木学会第55回年次学術講演会, 2000.
- [17] 清水浩之, 菊池広人, 棚井憲治, 藤田朝雄. 粒状体個別要素法によるベントナイト膨潤圧試験のシミュレーション - 壁面摩擦力および供試体寸法の影響に関する考察 -, JAEA-Research, 2011.
- [18] 清水賀之, 稲川雄宣. 間隙水圧を考慮した粒子 - 流体連成モデルを用いた個別要素法による液状化解析, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.4, pp.800-813, 2010.11.
- [19] 新井夏海, 高尾誠, 中瀬仁, 京谷孝史, 寺田賢二郎, 加藤準治. 個別要素法を用いた地震時における副断層の出現解析, OS10-12, 第62回理論応用力学講演会, 2013.3.
- [20] Hollister, S.J. and Kikuchi, N. Homogenization theory and digital imaging a basis for studying the mechanics and design principles of bone tissue, Biotech. Bioeng, Vol. 43, pp. 586-596, 1994.
- [21] 鄒春躍, 岸野佑次, 京谷孝史. 粒状体におけるエネルギー散逸機構の統計的表現, 応用力学論文集, Vol. 9, pp631-640, 2006.
- [22] 稲垣健太. MPS法を用いた固体解析に関する研究, 東京大学, 2009, 博士論文.
- [23] 福間雅俊, 平林大輝, 前田健一. DEMによる石礫集合体の流れの限界状態に着目した粒子構造特性, 第43回地盤工学研究発表会, E-13, 1018, 2008.
- [24] 伊藤一教, 樋口雄一, 東江隆夫, 勝井秀博. 確率理論に基づく個別要素法の拡張, 海岸工学論文集, No.49, pp.771-775, 2002.
- [25] 小野祐輔, 金光功樹, 谷口朋代, 中瀬仁. 地表断層近傍地盤の大変形を対象としたSPH法に基づく数値解析手法の開発, 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集, II-5, pp.67-72, 2015.
- [26] Gordon R. Johnson, Robert A. Stryk, Stephen R. Beissel, Timothy J. Holmquist. An algorithm to automatically convert distorted finite elements into meshless particles during dynamic deformation, International Journal of Impact Engineering 27, 997-1013, 2002.
- [27] Xu, B. H. and Yu, A. B. Numerical Simulation of the Gas-Solid Flow in a Fluidized Bed by Combining Discrete Particle Method with Computational Fluid Dynamics, Chem. Eng. Sci., 52[16], 2785-2809, 1997.
- [28] 地盤工学会誌, Vol.63, No.8, Ser.No.691, 2015.
- [29] 酒井幹夫. 粉体の数値シミュレーション, 丸善, 2012.
- [30] 前田健一, 中田幸男, 小山倫史, 森口周二, 野々山栄人, 松島亘志. 地盤に関する解析技術(個別要素法)講習会テキスト, 地盤工学会, 土木学会, 2015.
- [31] 早川尚男. 基礎物理としての粉体力学, J. Soc. Powder Technol., Japan, 37, 26-33, 2000.
- [32] 芹澤慎一郎, 伊藤朋之. 極性流体理論に基づく粉粒体流動の数値解析, GS07-GS05-01-01, 第63回理論応用力学講演会, 2014.9.
- [33] 中瀬仁. 平面ひずみ圧縮試験における砂の微視的構造とすべり面の形成過程に関する研究, 東京大学, 2000, 博士論文.

電力中央研究所報告

〔不許複製〕

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所
地球工学研究所長
千葉県我孫子市我孫子1646
電話 04 (7182) 1181 (代)
e-mail cerl-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行・著作・公開 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1
電話 03 (3201) 6601 (代)

ISBN978-4-7983-1470-9

