



地盤工学のための個別要素法

1. 講座を始めるにあたって

前田 健一 (まえだ けんいち)
名古屋工業大学大学院 教授 社会工学専攻

1.1 個別要素法を取り巻く環境

粒状体の解析手法の代表である個別要素法 (Discrete Element Method ; 以下, DEM と略す) が Cundall ら¹によって提案されてから、既に約40年が経過している。この間に、様々な解析法が提案され研究レベルで用いられてきた。しかし、当初は実務への適用はほとんど進まなかった。その原因の一つとして、コンピュータの性能の制約から、実際に扱える粒子数が限られていたことが挙げられる。その性能がある閾値を超えたことによって、DEM に関する科学全体での論文数は、1990年代から急増し、加速し続けている。地盤の分野においても同様で、特に2000年頃から顕著な増加がみられ、約60%が要素試験、20%がアルゴリズム開発等に関するもの、残りの20%が境界値問題に関するものとの報告もある。具体例には、落石、斜面崩壊、土石流、鉄道バラストや捨石マウンドを始めとして、液状化、構造-地盤の境界挙動、侵食・洗掘・吸出し、空洞化や土質改良などがある。

DEM は、微分方程式を近似的に解く連続体解析とは異なる考え方に基づいており、空間的にバラバラに存在する粒子要素の運動方程式を時間積分するものである。また、最近、注目されている粒子法 (SPH, MPS 等) は、粒子要素を用いた連続体解析であり、DEM とは異なるが、DEM を適切に用いるための知見は、粒子法解析の理解や実行にも大いに役立つ。

有限要素法、有限差分法など連続体の解析に関するソフトウェアでは、そのシェア獲得合戦に鎬をけずっている。この「戦い」は、単なるソフトウェアだけの問題ではなく、それを用いた調査・設計業務にも関わり、大きな利益・損失に繋がる事項である。一方、DEM の場合、未だその域には達していないものの、汎用性の高い商用コードやオープンソースコードなどが開発されており、直に大きな流れが起きると考えられる。現に、特殊なアルゴリズムの導入や考え方でパラメータを特定したりするような方法が提案され、その「流派」がある地域を席捲しているようにも感じられる。内容が適切であれば問題ないが、DEM の良さも活かされていないような状態では、多くの技術者が困惑することになる。工学・実務において数値解析が大切な役割を担う以上、解析手法の原理の理解、正しい使い方の取得、支援システムの構築は、この「戦い」を制する上でも重要な課題である。

1.2 講座の目的

以上のことから、本講座では、DEM に興味はあるもののなかなか導入に踏み切れない、始めてみたもののうまく結果がでない、といった学会員に向けて、地盤工学のための DEM の解析事例集、プログラミングや解析を適切に行うための手引きとなることを目的とした。そのために、以下のような方針で講座を進めることとする。

(1) 魅力と限界を知る

DEM は、構成式が不要で、パラメータの数も少なく、物理的意味が単純なわりに、不連続性・不均質性が強い問題の取り扱い、大変形、流動、接触・剥離、崩壊後の複雑な挙動、そして堆積などの地盤形成過程の再現が可能な解析手法として、その有用性が認められ始めたことは確かである。また、適当な連続体近似によって応力やひずみを知ることができる点も魅力的である。このような数値実験はメカニズムを浮き彫りにする強力な道具となり、設計や対策に役立てることもできる。一方で、広い領域の境界値問題をまとめて計算しようとするには、膨大な粒子数が必要となり、現代の計算機能力をもってしてもほぼ不可能である。そこには、対象とする現象の特徴と地盤の特性を考慮した工夫が要る。

(2) 適切な結果を得るための条件、パラメータを考える

質点の運動方程式と一次元の振動方程式の時間積分について、安定した結果を得るために知識が必要である。また、着目した要素に接触している粒子を効率良く探し、記憶することが計算時間の節約には不可欠である。さらに、パラメータの適切な設定には、力学的判断が求められる。例えば、実問題と同じ粒径を用いて計算するのは無理があるため、対象とする問題の主要因を適切に捉え、割り切った「モデリング」が必要である。これは、模型実験で良い成果を得るために似ている。

計算結果は、ダイナミックであり魅的な動画を見ることができ、いかにも正解のようである。しかし、計算は万能ではなく、有意義な結果を得るには、計算結果について、Verification (検証) と Validation (妥当性評価) といった数学的評価作業 (V & V) の実施が不可欠である。地盤工学会 TC105 国内委員会（委員長：中田幸男（山口大学））で、DEM についての V & V の実施案作成を行っており、この活動の結果なども反映することとする。

初級講座

表—1.1 本講座の目次予定

回数	章・タイトル	執筆代表者	掲載予定期
1	1. 講座をはじめるにあたって	前田健一（名古屋工業大学）	4月号
2	2. 個別要素法で何ができるのか ・粒状体の強度発現の理解 ・地盤工学、岩盤工学への適用例	中田幸男（山口大学）	4月号
3	3. 一次元の個別要素法 ・個別要素法の基礎 ・接触力モデル ・離散化と安定性 ・解析例と結果の妥当性確認	森口周二（東北大学）	5月号
4	4. 二次元の個別要素法 ・接触モデル ・基礎的アルゴリズム ・近傍粒子探索の効率化 ・解析例と結果の妥当性確認	松島亘志（筑波大学）	6月号
5	5. 個別要素法の様々な拡張 ・三次元への拡張 ・粒子間の結合（ボンド、非円形粒子など） ・物理化学的な粒子間力 ・連成問題（流体、熱など）	小山倫史（関西大学）	7月号
6	6. パラメータの設定と土と地盤の作り方 その1 ・粒状体の物性、力学特性とDEMのパラメータ ・粒径、粒度 ・減衰定数	前田健一（名古屋工業大学）	8月号
7	7. パラメータの設定と土と地盤の作り方 その2 ・粒子形状と摩擦係数 ・パッキング	〃	9月号
8	8. 講座を終えるにあたって	〃	9月号

(3) 土、地盤らしさを数値計算から再認識する

粒子同士の相互作用が、主として衝突という他分野に比べ、地盤の問題では粒子濃度が高く、ギシギシ、ガリガリとひしめき合っている。この特徴をどれだけ理解して使えるかが上手な使い方への鍵となる²⁾。「土らしさ」とは何か、それをどのように、どこまで表現するのか、が解析者の腕の見せ所ということになる。例えば、非円形粒子に比べて、円形粒子を用いた場合、計算時間は短くなるが、実際の砂レベルの高い内部摩擦角を得るために円形粒子の粒子間摩擦係数を限りなく大きくしても、内部摩擦角は一向に大きくならず、供試体は強い正のダイレイタンシー特性を示す。一方、粒子に少し凹凸を付けるだけで十分な強度が発揮され、変形も延性的になる。一見不思議ともいえるこの現象は、進行性破壊の解析を行うには極めて重要である。地盤工学の問題では幾何学的な影響が大きく、粒子の配置だけでなく粒子形状、粒度分布、それらが変化する粒子破碎が支配的である。

1.3 講座の内容

本講座では、土木学会応用力学委員会の粒状体に関するフォーラム・講習会、地盤工学会の数値解析の講習会を行っているメンバーが執筆し、表—1.1のような内容

を予定している。個別要素法で何ができるのか、から始まり、まずは、一次元から粒状体の力学と数値解析手法を学ぶ。一次元での理解は極めて重要である³⁾。次に、二次元、三次元と拡張する。また、今後の地盤工学で大切なトピックスとなりそうな土粒子群と水や空気との相互作用、熱との連成などについても触れる。さらに、岩盤工学、粒状体の力学に関して蓄積された知見を活かしながら、パラメータの意味やその設定方法について、ありがちな失敗例も示しながら、説明を進める。

紙面の制限から全ての項目を網羅することはできないが、本講座の読者には、ぜひ、DEMを活用し、土の物性と土の力学特性や地盤の挙動との深い関連を再発見するということを経験していただきたい。

参考文献

- 1) Cundall P. A. and Strack O. D. L. A discrete model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47–65, 1979.
- 2) TC35国内委員会：講座 粒子特性の評価と工学的意義、土と基礎、Vol. 55, No. 4～No. 9, 2007.
- 3) Simo, J. C. and Hughes, T. J. R.: Computational Inelasticity, *Interdisciplinary Applied Mathematics*, Vol. 7, Springer, 392 p., 1998.