

## A Study on the Applicability of Distinct Element Method to EPS Block Fill

(個別要素法のEPSブロック軽量盛土への適用性に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

非線形で復元性の小さい土の挙動を扱う地盤工学の分野において数値解析手法は有効な道具であり、その中でも有限要素法はその適用性の広さから地盤工学の分野で最も一般的に用いられている数値解析手法である。しかし、有限要素法は本来連続体を扱うために開発された手法であり、ジョイント要素などを用いたとしても不連続体の解析には限界があるといえる。

一方、個別要素法は、岩盤の崩落現象、粒状材料の変形挙動などの解析を目的として開発された比較的新しい数値解析手法の一つであり、集合体の解析には適している手法である。しかしながら、地盤工学における個別要素法の適用性は、岩盤の解析を除けば、砂粒子のせん断過程をシミュレートするような微視的な構造を対象とする分野での定性的な表現にとどまっているのが現状である。

また近年、地盤工学の分野において新材料を用いた土工法が盛んに用いられるようになってきており、その中でも発泡スチロール (EPS, Expanded Poly-Styrole) ブロックを積み重ねて建設される軽量盛土工法は、軟弱地盤対策工法として実績を上げている工法である。しかし、その挙動を解析する際に用いられるモデルは、ブロックの集合体であるEPS盛土を連続体とみなすもので、荷重伝達機構や基礎地盤が不同沈下を起こした場合の応力集中特性、地震時の応答特性など集合体特性の影響が強い力学挙動についてはほとんど明らかにされていない。

本研究では、模型実験を通してEPSブロック集合体の力学的特性を把握した後、個別要素法と連続体解析に優れている有限要素法の2種類の解析手法をとりあげて実験結果との比較から数値解析手法の定性的・定量的適用性について検討している。また、解析的にEPS盛土の合理的な設計に結び付く様々な条件下でのEPS盛土の挙動特性についても調べている。

第1部では本研究でとりあげた数値解析手法の個別要素法と有限要素法の説明を行っている。有限要素法には種々のバリエーションが存在するが、本研究では連続体のみを扱う最も一般的な方法を採用している。一方の個別要素法は動的解析が一般的であるが、静的問題であるEPS模型盛土の荷重伝達実験や変形実験では、動的解析で問題となる減衰項を無視できる静的解法を採用し、振動特性を解析する場合には動的解法を採用している。また、振動特性などの動的問題では、EPSブロック接触時の非線形性の与える影響が大きいためから接触の面積を考慮する非線形接触を取り入れた解析を行っている。

第2部は、EPS盛土の荷重伝達特性と不同沈下による変形時の挙動についてまとめている。

第1章ではEPS模型盛土表面に載荷した荷重の基礎地盤部分への伝達機構を調べる荷重伝達実験について、その実験方法および実験結果を示し、各数値解析手法との比較を行っている。この実験は準静的問題と考えられ、静的解法を用いた個別要素法によって解析された。荷重伝達実験の結果、ブロックの積み重ね方によって生じるジョイントが形成するEPS盛土の内部構造が荷重伝達特性に支配的な要因であることが示唆されており、荷重伝達機構などの準静的問題に対しての静的解法による個別要素法の定性的・定量的適用性について述べている。また、実際の施工で用いられる緊結金具と呼ばれるずれ止めの効果について要素実験を行い、そ

の効果について検討した後、緊結金具要素を考慮した個別要素法の有効性について検討している。緊結金具の要素実験から、EPSブロックと緊結金具間のせん断抵抗力の載荷速度依存性が示されている。

第2章ではEPS模型盛土底部の1つのEPSブロックにジャッキによって鉛直方向に変位を与え、大変形時の個々のEPSブロックの変位挙動ならびに基礎地盤部分に伝わる荷重の変化について検討するための変形実験を行っている。数値解析結果は実験結果と比較され、静的解法による個別要素法の大変形問題における適用性について明らかにしている。

第3章では個別要素法のEPS盛土への適用性が確認されたことから、解析的に集中荷重による応力分布特性について調べるためにパラメトリックスタディーを行い、EPS盛土を構成するブロック断面寸法比や、今回定義された盛土高さを内部構造の影響を考慮して修正する「構造的荷重長」に支配されることを示している。また、要素数の少ない模型盛土とは異なり実際のEPS盛土を個別要素法で解析することは計算時間等の問題から困難であるので、集中荷重が作用時の応力分布特性について個別要素法を用いて解析的に検討し、台形分布を仮定した応力分布を求める簡易推定法を提案している。

第4章では基礎地盤の不同沈下による応力集中特性について解析的に検討しており、応力集中特性は盛土の高さに依存し、盛土高さの数パーセントの沈下量で不同沈下が生じていない場合の5倍もの応力が一つのブロックに集中する場合があることが示されている。

第5章では、第2章でEPSブロックの配列構造が荷重伝達特性に与える影響について示唆されていることから、ブロック間のジョイントの方向を操作して荷重分散効果を高める盛土形状を検討している。実験では台形や平行四辺形の断面をもつEPSブロックを用いて、荷重伝達実験を行っており、ジョイントの方向を載荷点の外側に向けることで、載荷点直下の応力を分散させることができることが示されている。数値解析手法との比較において、線形接触を仮定した静的解法による個別要素法は、鋭角なブロックの角の影響を過大に評価する傾向にあることが示されている。

第3部ではEPS盛土の振動特性について実験と解析を行っている。

第1章では形状の異なるEPS盛土についての模型実験の方法と結果を示しており、EPS盛土の振動特性はブロック間の摩擦特性に大きく影響を受け、載荷重の大きさに伴う摩擦特性の変化を考慮することが重要であることが示されており、ブロックの個数増加に伴ってブロック間の回転やロッキング振動による衝突の影響が増大することから、加速度増幅率は低減し、全体の剛性も低下するという結果が得られている。

第2章ではEPS盛土を連続弾性体と仮定した場合のせん断波の振動解、ならびに個別要素法による解析結果を実験結果と比較し、適用性について検討している。連続弾性体の振動解の誘導の際にはEPS盛土をEPSの層状地盤と考え、層間にせん断バネと滑り要素を考慮した解の誘導も行っており、実験結果との比較からこの滑り要素によって加速度増幅率の大きさを表現できることが示されている。しかし、2次元の解であるのでEPS盛土全体の形状やブロックの個数の影響は表現することや、載荷重の違いによる摩擦特性の変化も再現することに限界があることが指摘されている。

第3章では非線形接触を考慮した動的解法を用いた個別要素法と実験結果との比較を行っている。加速度増幅率の大きさ自体は要素を剛体とみなしているので実験とは異なるものの、載荷重による摩擦特性の変化を適切に評価できるならば、ブロック間の衝突による増幅率の減衰や剛性の低下を表現でき、EPS盛土全体の形状効果もある程度表現できることが示されており、弾性論による振動解の修正法についての情報を与えられる可能性を示している。

第4部は本研究の結論を総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 岐 祥 介  
副 査 教 授 三 田 地 利 之  
副 査 教 授 石 島 洋 二  
副 査 助 教 授 三 浦 均 也

学 位 論 文 題 名

## A Study on the Applicability of Distinct Element Method to EPS Block Fill

(個別要素法のEPSブロック軽量盛土への適用性に関する研究)

非線形で復元性の小さい土の挙動を扱う際、数値解析は有効な手法で、中でも有限要素法はその適用性の広さから地盤工学の分野で最も一般的に用いられている。しかし、有限要素法は本来連続体を扱うために開発された手法であるため、ジョイント要素などを用いたとしても不連続体の解析には限界がある。さらに、大変形をとともなう種々の破壊現象は、既往の手法では取り扱うことが困難な不連続体の挙動解析を必要としている。

本研究でとりあげた個別要素法は、岩盤の崩落現象、粒状材料の変形挙動などの解析を目的として開発された比較的新しい数値解析手法の一つで、離散要素の相互作用を考慮する不連続体の大変形問題を取り扱うことのできる数値解析手法として、地盤工学を含む広い分野で注目を集めている。しかし、地盤工学における個別要素法の適用は、節理の発達した岩盤の解析等を除けば、砂のせん断過程をシミュレートするような砂粒子の微視的な構造を対象とする分野での定性的な表現にとどまっているのが現状であり、また、個別要素法は材料のモデル化や計算アルゴリズムに問題を含んでいるために、要素のモデル化は非現実的な場合が多く、設計などの実際問題への適用性についてはさらに検討が必要とされている。

近年、地盤工学の分野において新材料を用いた土工法が盛んに用いられており、その中でも発泡スチロール (EPS, Expanded Poly-Styrene) ブロックを積み重ねて建設する軽量盛土工法は軟弱地盤対策工法として実績を挙げているが、その挙動解析の際に用いられるモデルは、ブロックの集合体であるEPS盛土を連続体とみなすもので、荷重伝達機構や基礎地盤が不同沈下を起こした場合の応力集中特性、地震時の応答特性など、集合体特性の影響が強い力学挙動についてはほとんど明らかにされていない。

本研究は、静的問題や動的問題に対する個別要素法の最適なアルゴリズムを提案し、設計問題などへの実用的な適用性について、種々のブロック配列構造で建設されるEPS盛土を例にとりあげて検討している。また、これらの成果に基づき、EPS盛土の合理的な設計に結び付く、様々な条件下でのEPS盛土の挙動特性について解析的に調べている。

本研究の主要な成果は以下のように要約される。

- 1) 従来、動的手法が一般的であった個別要素法において、静的問題および動的問題それぞれについて運動方程式の定式化を行い、静的手法として、つり合い平衡条件のみを考えて反復計算アルゴリズムを最適化した手法と、動的手法として接触の非線形性を考慮した手法をそれぞれ提案した。
- 2) 本研究で提案した、2つの解析手法を選択できる個別要素法の定量的適用性を含めた適用範囲を明らかにするために、振動台実験を含む一連の模型実験を行い、不連続体としてのEPSブロック盛土における、連続体に比して応力の集中傾向が強い等の、静的および動的な力学特性を明らかにした。
- 3) 反復計算アルゴリズムを最適化した静的手法による個別要素法は、静的条件におけるEPSブロック集合体の荷重伝達特性および変形特性を大変形時においても、定量的に評価できることを明らかにした。
- 4) EPSブロック盛土の振動特性は、静的特性と同様にブロックの配列構造や上載荷重の影響を受けるが、動的な解析手法を用いた個別要素法によって、盛土の振動増幅や共振など基本的な振動特性が定量的に評価できることを明らかにした。

以上のように本研究は、静的および動的条件に対し、最適なアルゴリズムを使い分けることによって、EPS盛土のような不連続集合体の大変形問題および振動挙動を含む設計問題においても、個別要素法が適用可能であることを室内模型実験との照査によって明らかにしている。また、静的、動的条件に対応できる適用範囲の広い個別要素法の開発も同時に行っており、地盤工学の発展に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。