

論文の内容の要旨

論文題目 セメント改良砂の引張及びせん断破壊特性に関する研究

氏 名 並河 努

深層混合工法などによるセメント系地盤改良工法は、構造物基礎、掘削時の山留め、液状化対策などに広く用いられてきており、近年では改良体の高強度化などにより、柱状、壁状といった改良形式が利用されるようになってきている。柱状、壁状といった改良形式の場合、曲げ変形等による応力が発生するため、設計において内的安定の検討が重要となる。セメント系改良地盤の設計における内的安定に関しては、改良体を弾性体と仮定して許容応力度の照査を行うのが一般的な設計手法であるが、性能設計の導入によりこのような従来型の許容応力度の照査だけでは対応できない場合が生じてきている。特に、兵庫県南部地震以来大地震時におけるセメント改良体の安全性が要求されるようになってきており、改良地盤の終局状態における評価が必要となってきた。

改良地盤の設計において FEM 解析を用いることが多くなってきたが、改良体を弾性体としてモデル化し解析により得られた応力と設計強度を比較する手法が一般に用いられている。そして、このような手法では、解析結果において局所的な応力が設計強度を上回る場合、その部分破壊が改良体に要求される性能に対し許容されるか否か判断できないため改良体の形状を変更し、改良体内の全ての領域において算定される応力が設計強度を下回るように設計し直さなければならない。このような現行の手法では、条件によりかなり保守的な設計になる場合があると考えられ、改良土のピーク応力後の挙動を明らかにし、改良体の部分的な破壊を許容した手法を用いれば、設計において改良体の大幅

な合理化が可能となると考えられる。

そこで、本研究では、セメント改良砂のせん断及び引張破壊特性を明らかにし、改良砂のピーク応力状態後の力学挙動を表現できるモデルを開発することにより、改良体の終局状態を評価できる手法を構築することを目的とした。特に、ピーク応力状態後の引張及びせん断軟化関係を明らかにし、その挙動をモデル化することをねらいとしている。以下では、各章ごとの検討内容と得られた成果を述べる。

1章では、研究の背景、目的及び既往の研究について述べている。

2章では、引張ピーク応力及びその後の軟化挙動を調べることを目的とした曲げ試験について述べている。切欠を入れた供試体を用いた曲げ試験結果より、コンクリートと同様にセメント改良砂においても、引張ピーク応力後ひずみ軟化型の応力 - ひずみ関係が存在することが明らかとなった。そして、引張破壊時におけるセメント改良砂(一軸圧縮強度 1800kPa程度)の破壊エネルギー G_f が7~12N/m程度であることがわかった。さらに、荷重 - たわみ関係と荷重 - ひび割れ開口変位より、セメント改良砂の引張軟化関係を同定し、その引張軟化関係が1/4バイリニアモデルで表現可能であることを示した。

3章では、せん断ピーク応力及びその後の軟化挙動を調べることを目的とした平面ひずみ圧縮試験について述べている。中間主応力の大きさを変えた擬似平面ひずみ圧縮試験を実施し、三軸圧縮条件に比較して平面ひずみ条件では最大軸差応力が1.2倍程度になること、平面ひずみ条件では中間主応力が最大軸差応力に与える影響が少ないことを明らかにした。平面ひずみ圧縮試験では、画像解析を行いピーク応力状態後の軟化過程での供試体表面のひずみ分布を観測した。その結果、圧密拘束圧が低い場合(9.8kPa)縦割れ破壊が生じ、圧密拘束圧が高くなると(88kPa)せん断破壊が生じることが明らかとなった。ピーク応力状態後の軟化関係は、画像解析の結果を用いて、破壊領域(せん断帯)における局所的な変形より算定した。また、試験後の供試体表面の顕微鏡観察結果より、せん断帯の初期幅が0.6mm程度(砂粒径の3倍程度)であることを明らかにした。さらに、せん断軟化過程での破壊エネルギーを算定し、引張破壊エネルギーとせん断破壊エネルギーの差は、セメンテーションの分離面積の違いによりある程度説明できることを示した。

4章では本研究で構築したセメント改良砂の弾塑性モデルについて述べている。本モデルでは、既往の研究及び本研究での室内試験結果より、引張とせん断の2つの破壊基準を設けた。引張とせん断のピーク応力後の軟化関係は、2

章曲げ試験と 3 章平面ひずみ圧縮試験の結果より定めた。軟化関係においては、ひずみの局所化によるメッシュサイズ依存性を低減するために、特性長さとメッシュサイズに関する変数を導入した。さらに、損傷テンソルを導入することにより、引張軟化過程における誘導異方性の表現を試みた。

5 章では提案したモデルの検証解析について述べている。4 つの室内試験、三軸圧縮試験、三軸引張試験、平面ひずみ圧縮試験、3 点曲げ試験（切欠あり）を対象とした FEM 解析を実施し、ひずみ硬化及び軟化挙動に関するモデルの検証を行った。試験結果と解析結果の比較より、三軸圧縮及び引張条件下でのピーク応力状態までのひずみ硬化挙動、切欠入り曲げ試験条件でのピーク荷重及び荷重 - 変位関係、平面ひずみ圧縮条件でのひずみの局所化を伴う軟化挙動に関して提案モデルの妥当性を示した。

6 章では、引張強度を決定するために実施される一軸引張試験、割裂試験、曲げ試験の FEM 解析について述べている。これら 3 試験から算定される引張強度の違いの原因を明らかにすることと、提案モデルの検証が解析の目的である。解析結果は一軸引張試験、割裂試験、曲げ試験結果をほぼ再現できており、提案モデルの妥当性が確認された。また解析結果より、3 試験から算定される引張強度に関して以下のことが明らかとなった。一軸引張試験で得られる引張強度は材料としての引張強度と概ね一致する。割裂試験では荷重帯下の圧縮力によりせん断破壊が発生するため荷重が抑制され、得られる引張応力は過少評価となる。曲げ試験では梁引張側の応力が引張強度に達した後も軟化挙動により応力が再配分されるため荷重が増加し続け、その結果引張強度が過大評価される。

7 章では、遠心模型実験の FEM 解析について述べている。実際の境界値問題における提案モデルの検証を行うことを目的とし、実物構造物の応力状態に近い条件で実施された遠心模型実験を対象とした FEM 解析を実施した。曲げの破壊形態を示す条件で実施された 2 種類の実験を対象に FEM 解析を行ったが、解析結果は概ね実験結果を再現しており、提案モデルの妥当性が確認された。また、解析結果より、改良体が曲げの破壊形態を示す条件では、従来行われている改良体を弾性体でモデル化した解析により算定される改良体内部応力と引張強度を比較する手法を用いると、かなり保守側の判定となることがわかった。このことは、実構造物において、本研究で開発した提案モデルを用いた FEM 解析を実施すれば、改良体の合理的な設計が可能となることを示唆している。

8 章では格子状地盤改良による液状化防止工法の FEM 解析について述べている。提案したモデルを用いた FEM 解析の効果の確認を目的とし、格子状地盤改良の動的 3 次元解析を実施した。解析結果より、改良体を弾性体としてモデル化すると、大地震時において改良壁交差部に大きな引張応力が生じ、設計が成立しなくなることがわかった。一方、改良体を提案した弾塑性モデルでモデル化した場合、地震中改良体はコーナー部より進行的に引張破壊するが、液状化抑制効果は保持されることがわかった。これより、提案したモデルによる解析を用いると、大地震時における改良体の部分破壊を許容できる設計が可能となり、液状化防止工法の合理化が図れることが明らかとなった。

9 章では本論文の結論をまとめている。