

氏名	藤本 哲生		
授与学位	博士(工学)		
学位記番号	理工博甲第639号		
学位授与年月日	平成26年9月24日		
学位授与の要件	学位規則第4条1項		
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)システム設計工学系専攻		
学位論文題目	拘束圧下で養生したセメント安定処理土の強度発現メカニズムと強度特性の評価		
論文審査委員	主査	山口大学 准教授	鈴木 素之
		山口大学 教授	兵動 正幸
		山口大学 教授	松田 博
		山口大学 教授	中田 幸男
		山口大学 助教	吉本 憲正

## 【学位論文内容の要旨】

軟弱地盤対策工法の一つにセメントおよびセメント系固化材を用いた安定処理工法がある。本工法は、土試料にセメントを添加・混合することにより短期的に発現される物性の改良とセメントの水和反応による硬化、長期的に発現されるポズラン反応による硬化により強度の改善を行うものである。本工法の特徴は、対象土の性質に合わせてセメントの種類や量を調整して添加・混合することにより比較的短期間で目標とする強度が得られる点であり、軟弱地盤が分布する沿岸部の平野における経済活動が盛んな我が国では今後も耐震対策(特に、液状化対策)、建設発生土の土質改良による再利用、汚染土壌の不溶化処理などの土壌汚染対策など建設事業において利用されると考えられる。

本工法の現行の設計指針では、セメント安定処理土の設計基準強度を決定するために原則として対象土を用いて室内配合試験を実施するよう規定している。現行の室内配合試験では、対象土に安定材を添加した後、大気圧下で所定期間(一般的に、7日間あるいは28日間)養生した供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、室内配合試験における一軸圧縮強さに室内配合試験と現場施工との条件の違いを調整するパラメータである「現場/室内強度比」を乗じた値である設計基準強度が目標とする強度を満足するよう安定材添加量が決定されている。ここで、原位置の安定処理地盤中の土要素には施工直後から有効土被り圧に相当する鉛直応力 $\sigma_v'$ およびそれに静止土圧係数を乗じた水平応力 $\sigma_h'$ に相当する拘束圧が作用しているため、その影響により非排水強度が深度方向に増加していると考えられる。しかし、前述したように安定処理土の設計基準強度は大気圧下で養生した供試体の一軸圧縮強さから設定されており、また、安定処理地盤では非排水強度の深度方向の強度増加は考慮されていないことから原位置における拘束圧の影響が考慮されていない点が課題である。今後、経済的、合理的な設計を行うためには原位置に近い拘束圧下で養生した安定処理土が実際に発揮する強度・変形特性を明らかにすることが重要であると考えられる。

そこで、本研究では土試料として特殊土に分類されるローム、浚渫土、泥炭を用いて一次元圧密状態で養生した安定処理土に対して一軸圧縮試験を実施することにより拘束圧下で養生した安定処理土の一軸圧縮強度特性を調べた。その結果、特殊土においても既往の研究結果と同様に養生時の拘束圧の増加に対して一軸圧縮強度が直線的に増加することを示した。また、土試料の物理的性質と拘束圧による強度増加指標 $\alpha$ 、 $\beta$ との相関について調べた結果、土試料の液性限界 $w_L$ 、塑性指数 $I_p$ 、細粒分含有率 $F_c$ の増加に対し $\alpha$ 、 $\beta$ は減少する傾向があることを明らかにした。これにより、土試料の物理的性質と室内配合試験による一軸圧縮強度を把握することにより拘束圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮強度を推定することが可能である。

次に、一次元圧密および等方圧密した安定処理土に対してそれぞれ一軸圧縮試験および圧密非排水三軸圧縮試験を実施することにより圧密時の応力状態の違いが圧密および非排水せん断特性に及ぼす影響を調べた。その結果、安定処理土の圧密時の体積変化量は圧密時の応力状態に依存し、等方圧密状態での体積変化量と非排水せん断強度は一次元圧密状態の約1.5倍となることを明らかにした。また、三軸圧縮試験において等方圧密応力の載荷を遅らせた場合の安定処理土の圧密および非排水せん断特性について調べた結果、等方圧密応力を載荷するまでの時間が遅れると非排水せん断強度を過小評価する可能性があることを示した。さらに、三軸圧縮試験において圧密時の圧密応力が安定処理土の残留強度に及ぼす影響に

ついて調べた結果、圧密時の圧密圧力の増加とともに残留強度も増加する傾向があることを明らかにした。

最後に、土粒子、水、空気、安定材の4相とセメント水和反応を考慮した安定処理土モデルを提案し、それにより算出した間隙比の変化の観点から拘束圧下で養生した安定処理土の強度発現メカニズムについて調べた。その結果、非排水せん断強度に及ぼす密度増加とセメンテーションの発達の寄与を評価することができることを示した。

## 【論文審査結果の要旨】

軟弱地盤対策工であるセメント安定処理土の設計基準強度は、室内における大気圧下養生した安定処理土供試体の一軸圧縮強さを基に決定されている。しかし、安定処理土からなる地盤においても、原位置での安定材との攪拌混合処理の直後から、土要素には有効土被りに相当する拘束圧が作用し、その状態でセメント水和反応等によりセメンテーションが発達していく。したがって、現行の技術体系では、セメント安定処理土の室内養生中においては、原位置で受ける拘束圧の影響が考慮されていない点が課題である。申請者がこの点に着目し研究に着手する以前においても、室内試験レベルでセメント安定処理土の強度特性に及ぼす拘束圧の影響について研究がなされていたが、供試体に拘束圧を作用させるまでの実験条件の設定に現場条件との乖離があり、必ずしも十分かつ統一的な知見が得られていなかった。

そこで、申請者は、土の物理的性質および圧密時の応力状態が異なる条件で安定処理土に対して一軸ならびに三軸圧縮試験を実施し、その試験結果に基づいて、拘束圧下で養生した安定処理土の非排水せん断特性とその影響要因について詳細に検討した。また、申請者は、拘束圧下で養生した処理土の強度発現途上の相構成にセメント水和反応を取り入れた土構造モデルを考案し、そのモデルから算出したセメント水和生成物を考慮した間隙比の観点で圧密による強度発現メカニズムの解明を試みた。

学位論文では、得られた成果が以下の5章にまとめられた。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、既往の研究結果を整理した上で、本研究の新規性が示された。また、本論文の内容と構成が述べられた。

第2章では、実際の施工で問題となる特殊土に分類されるローム、浚渫土および泥炭を用いて、一次元圧密条件下で養生した場合の安定処理土の一軸圧縮強度特性が示され、特殊土についても養生時の拘束圧により一軸圧縮強さが増加する圧密養生効果が認められることを明らかにした。また、本研究と既往の研究の試験結果を基に、未処理土の物理的性質と圧密養生効果指標に良好な相関があることを明らかにし、その関係を精度よく近似した式により、大気圧下養生した場合の一軸圧縮強さから、拘束圧下で養生した場合の一軸圧縮強さを推定する方法が示された。

第3章では、一次元および等方圧密状態で養生した安定処理土の圧密・非排水せん断特性が明らかにされ、養生中の圧密応力状態の違いが圧密過程における体積変化量や非排水せん断強度に影響を及ぼしていることが定量的に示された。また、三軸試験において安定処理土供試体に等方圧密応力を作用させるまでの時間の遅れがピーク強度の過小評価をもたらすことが指摘された。さらに、ピーク強度と同様に残留強度も養生時の圧密圧力の影響を受けることが明らかにされた。

第4章では、申請者が考案したセメント水和生成物を考慮したモデルにより拘束圧下で養生した安定処理土の間隙比を算出する方法が示され、安定処理土の非排水せん断強度と間隙比の関係性が明らかにされた。また、拘束圧下で養生した安定処理土において供試体の密度増加とセメンテーションの発達の相乗効果によって強度増加していくプロセスがセメンテーション層を考慮した間隙比の変化量の観点で合理的に説明できることが示された。

第5章では、各章で得られた知見が総括され、本研究の有効性や今後の展望が示された。

申請者が研究を開始した時点では拘束圧下で養生した安定処理土の強度・変形特性に関する研究が内外に存在したが、申請者の研究においては未処理土の物理的性質に着目して安定処理土の拘束圧による強度増加特性を整理・説明した点に新規性が認められる。また、セメンテーション相を考慮した土構造モデルを考案し、土の状態量の観点で強度増加メカニズムを解明した点にも新規性が認められる。また、合理的・経済的な設計を目指している安定処理土の技術体系において原位置で受ける拘束圧の影響を考慮することに成功した点に有効性および実用性が認められ、特に安定処理した供試体に拘束圧を作用させるまでの経過時間によって安定処理土の非排水強度が過小評価される可能性があることを指摘した点は、現行の強度評価方法の改善を促すものであり、高く評価してよい点であると考えられる。その他、三軸圧縮試験装置において供試体に安定処理直後から拘束圧を載荷するよう実験上の工夫をした上で、精度の高い多数の実験データを取得した点に信頼性が認められる。

公聴会においては、審査委員ならびに参加者から、1) 特殊土の圧密養生効果が一般的な土質と比較して低くなった原因、2) 圧密時の応力状態により強度が異なった理由の根拠、3) 安定処理土の強度と細孔構造(比表面積)の関係などに関して質疑がなされ、いずれの質問に対しても的確な答弁がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、新規性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分に値するものと判断した。