

氏名	渡邊 真悟		
授与学位	博士(工学)		
学位記番号	理工博甲第696号		
学位授与年月日	平成28年3月17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) 環境共生系専攻		
学位論文題目	広範な粒度から成る砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性に関する研究		
論文審査委員	主査	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 准教授	鈴木 素之
		山口大学 助教	吉本 憲正

【学位論文内容の要旨】

2011年に発生した東日本大震災において、東京湾岸の埋立地盤で広範囲に液状化が発生し、住宅、道路や地下埋設管などのインフラ施設等に大きな被害を引き起こした。これらの地盤は浚渫土で埋め立てた地盤であり、海底で浚渫された砂に粘土が混じっていたとされている。これまでに、細粒分を含む砂地盤や非活性のシルト地盤で液状化が発生しており、液状化に関する研究対象も細粒分を含まない砂からより細粒分含有率の高い土に至るまで広がりをみせている。

本研究は、広範な粒度から成る砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性を明らかにすることを目的としている。そのため、非活性細粒土および活性を有する細粒土をそれぞれ珪砂と様々な割合で混合することで、広範な粒度から成る試料を人工的に作製し一連の非排水繰返しせん断試験を行った。また、細粒分を含む埋立地盤から得られた土質試験データを用い、室内試験で得られた知見に対する実証検討および非排水繰返しせん断強度を適切に評価するための指標について検討を実施した。この一連の研究成果が、砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性を解明する一助につながるものとする。本論文は、以下の5章から構成されている。

第1章「序論」では、砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性および混合土の骨格構造に関する既往の研究成果を概説した。その中で、混合土全体の間隙状態を表すパラメータや、混合土内に存在する細粒土の物理特性を表すパラメータが、混合土の非排水繰返しせん断特性を評価するうえで重要になることを示した。また、現行の各種技術基準における液状化予測・判定手法を示し、細粒土の補正方法についても概説した。

第2章「試料特性および試験方法」では、室内試験に用いた砂・細粒土混合土の物理特性、非排水繰返しせん断試験に用いる供試体の作製方法および試験方法について詳細を解説した。砂・細粒土混合土の供試体作製については、粗粒土が構造の主体を成す領域と細粒土が構造の主体を成す領域で、供試体作製方法を変更しなければならないことを述べた。また、非活性細粒土を混合した試料については、飽和・通水過程における体積収縮に伴い混合土の間隙状態が変化するため、供試体作製後、飽和・通水後、圧密後のそれぞれのタイミングで計測した3種類の間隙比を用い、混合土

の構造状態について評価を行った。さらに、活性を有する細粒土を混合した試料も含め、間隙比と細粒分含有率関係をモデル化することで、細粒分含有率の増加に伴う混合土の骨格構造遷移について考察を行った。

第3章「砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性」では、砂・非活性細粒土および砂・活性細粒土の非排水繰返しせん断試験結果を基に、非排水繰返しせん断挙動や強度特性の評価を行った。その結果、粗粒土が構造の主体となる領域において、密詰め状態では細粒分含有率の増加に伴い非排水繰返しせん断強度は大きく低下するが、緩詰め状態ではゆるやかに上昇することが明らかとなった。また、混合土の細粒分含有率増加に伴い、混合土内に存在する粗粒土の噛み合いが消失し、次第に細粒土特有の挙動に近づいていくことも明らかとなった。さらに、細粒土の体積に寄与率を乗じて求めた等価骨格間隙比および等価骨格間隙比から求めた等価骨格相対密度と非排水繰返しせん断強度の関係性を検討し、粗粒土が構造の主体を成す領域では両者の間に良好な対応関係があることを示した。なお、混合土の等価骨格間隙比を求めるための寄与率については、細粒土と粗粒土の粒径比を用いた推定式を提案した。

第4章「現場データを用いた砂・細粒土混合土の液状化強度評価」では、細粒分を含む埋立地盤から得られた土質試験データを用い、室内試験で明らかとなった砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性の実証検討を行った。なお、本章では、各種技術基準の液状化予測・判定手法を参考に、液状化対象となる範囲内の土に対する非排水繰返しせん断強度を液状化強度とし、結果の整理を行っている。その結果、砂・細粒土混合土の間隙比、細粒分含有率、塑性指数の対応関係を検討することで、粗粒土が構造の主体を成す領域と細粒土が構造の主体を成す領域の境界把握が可能となった。また、粗粒土が構造の主体を成す領域では、等価骨格間隙比や等価骨格相対密度が液状化強度と良い対応関係を示し、有効な評価指標となることを明らかにした。さらに、細粒土が構造の主体を成す領域では、細粒土の物理的性質が発揮されるため、混合土の構造状態を表す間隙比よりも、細粒土の物理的性質を表す塑性指数の方が有効な評価指標になることを明らかにした。

第5章「結論」では、各章ごとに得られた知見を要約し、全体の結論としている。

【論文審査結果の要旨】

2011年に発生した東日本大震災において、東京湾岸の埋立地盤で広範囲に液状化が発生し、住宅、道路や地下埋設管などのインフラ施設等に大きな被害を引き起こした。これらの地盤は浚渫土で埋め立てた地盤であり、海底で浚渫された砂に粘土が混じっていたとされている。これまでも、細粒分を含む砂地盤や非活性のシルト地盤で液状化が発生しており、液状化に関する研究対象は、細粒分を含まない砂からより細粒分含有率の高い土に至るまで広がりを見せている。

本研究は、広範な粒度から成る砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性を明らかにすることを目的としている。そのため、非活性細粒土および活性を有する細粒土をそれぞれ珪砂と様々な割合で混合することで広範な粒度から成る試料を人工的に作製し、一連の非排水繰返しせん断試験を行った。また、細粒分を含む埋立地盤で得られた土質試験データを用い、室内試験で得られた知見に対する実証検討を行うとともに、非排水繰返しせん断強度を適切に評価するための指標について検討を行った。本論文は、以下の5章から構成されている。

第1章「序論」では、砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性および混合土の骨格構造に関する既往の研究成果を概説した。その中で、混合土全体の構造状態を表すパラメータや、混合土内に存在する細粒土の性質を表すパラメータが、混合土の非排水繰返しせん断特性を評価するうえで重要になることを示した。また、現行の各種技術基準における液状化予測・判定手法を示し、細粒分の補正方法についても概説した。

第2章「試料特性および試験方法」では、室内試験に用いた砂・細粒土混合土の物理特性、非排水繰返しせん断試験に用いる供試体の作製方法および試験方法について詳細を解説した。砂・細粒土混合土の供試体作製については、砂が構造の主体を成す領域と細粒土が構造の主体を成す領域で、供試体作製方法を変更しなければならないことを述べた。また、非活性細粒土を混合した試料については、飽和・通水過程における体積収縮に伴い混合土の間隙状態が変化するため、供試体作製後、飽和・通水後、圧密後のそれぞれのタイミングで計測した3種類の間隙比を用い、混合土の構造状態について評価を行った。さらに、活性を有する細粒土を混合した試料も含め、混合土の「間隙比と細粒分含有率関係」をモデル化することで、細粒分含有率の増加に伴う混合土の骨格構造の遷移について考察を行った。

第3章「砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性」では、砂・非活性細粒土および砂・活性細粒土に対する非排水繰返しせん断試験結果を基に、非排水繰返しせん断挙動や強度特性の評価を行った。その結果、砂が構造の主体と成す領域において、密詰め状態では細粒分含有率の増加に伴い非排水繰返しせん断強度が大きく低下し、緩詰め状態ではゆるやかに上昇することが明らかとなった。また、混合土の細粒分含有率増加に伴い、混合土内に存在する砂骨格の噛み合いが消失し、次第に細粒土特有の挙動に近づいていくことも明らかとなった。さらに、細粒土の体積に寄与率を乗じて求めた等価骨格間隙比、等価骨格間隙比から求めた等価骨格相対密度と非排水繰返しせん断強度の関係性をそれぞれ検討し、砂が構造の主体を成す領域では、両者の間に良好な対応関係があることを示した。なお、混合土の等価骨格間隙比を求めるための寄与率については、細粒土と粗粒土（砂）の粒径比を用いる推定式を提案した。

第4章「現場データを用いた砂・細粒土混合土の液状化強度評価」では、細粒分を含む埋立地盤で得られた土質試験データを用い、室内試験で明らかとなった砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性の実証検討を行った。なお、本章では、各種技術基準の液状化予測・判定手法を参考に、液状化対象となる範囲内の土に対する非排水繰返しせん断強度を『液状化強度』として扱い結果の整理を行っている。その結果、砂・細粒土混合土の間隙比、塑性指数、細粒分含有率の対応関係を検討することで、砂が構造の主体を成す領域と細粒土が構造の主体を成す領域との境界把握が可能となった。また、砂が構造の主体を成す領域では、等価骨格間隙比や等価骨格相対密度が液状化強度と良い対応関係を示し、液状化強度の評価にあたって有効な指標になることを明らかにした。さらに、細粒土が構造の主体を成す領域では、細粒土の物理的性質が発揮されるため、混合土の構造状態を表す指標よりも細粒土の物理的性質を表す塑性指数が有効な評価指標になることを明らかにした。

第5章「結論」では、各章ごとに得られた知見を要約し、全体の結論としている。

公聴会における主な質問内容は、以下の通りである。(1)現行の液状化予測・判定手法に対する本研究成果の位置付けについて。(2)細粒土が構造の主体を成す領域においては、塑性指数のみの強度評価でよいのか？(3)細粒分が高くなる範囲すなわち粘土側の範囲に至るまで、塑性指数と非排水繰返しせん断強度の関係性を検討して欲しい。(4)本研究成果を踏まえ、実務における「混合土の非排水繰返しせん断強度の評価方法」について考えを述べて欲しい。(5)混合土の骨格構造は、細粒分含有率のみならず経年変化によっても変化すると考えるため、本研究成果との関連について考えを述べて欲しい。これらいずれの質問に対しても、発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する対応などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。（関連論文 3 編）

- 1) 渡邊真悟, 兵動正幸, 東佳佑, 梶山慎太郎: 広範な粒度から成る砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性の評価, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol.71, No.4, pp.301-316, 2015.
- 2) Watanabe, S. and Hyodo, M. : Effect of fines content on monotonic and cyclic shear characteristics of sand-clay mixtures, Proc. International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro IS-Cambridge, pp.1317-1322, 2014.
- 3) Watanabe, S. and Hyodo, M.: Effect of water content of clay on dynamic deformation characteristics of sand and clay mixtures, Proc. 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, JPN-136, 2015.