

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760354

研究課題名（和文）

破砕や泥濘化などに由来した各種特殊土の力学挙動の骨格構造概念に基づく弾塑性記述

研究課題名（英文）

Elasto-plastic description of mechanical behavior for unusual soils based on soil skeleton structure concept

研究代表者

中井 健太郎 (NAKAI KENTARO)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60402484

研究成果の概要（和文）：特殊土とは、設計施工上、取り扱いが厄介な土であり、通常の施工管理では予測できないような問題・被害を起こしうる。近年の重要な社会インフラは、泥岩等の特殊土や砂や粘土が混在した中間土で埋め立てられた人工埋立地盤上に立地されることが多く、特殊土の力学挙動を正確に把握し、設計・施工に役立てることは重要課題である。本研究課題では、特殊土および中間土を用いて各種室内試験を実施し、力学特性を把握するとともに骨格構造概念に基づく解釈を加えた。

研究成果の概要(英文): Unusual soil is the soil which became the problem that the handling is difficult in design construction. Moreover, unusual soil foundation often causes extensive ground damage which cannot predict by the normal construction management. Recent years, many important infrastructures are constructed on an artificial reclaimed foundation filled up with unusual soils and intermediate soils. Therefore, it is very important to comprehend the mechanical behavior of unusual soils properly and make use for adequately design construction. In this research, various laboratory experiments were conducted using unusual soils and intermediate soils for the purpose of understanding and interpreting its mechanical behavior based on a soil skeleton structure concept.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：土質力学，地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：特殊土，中間土，骨格構造概念，室内試験，弾塑性構成式

1. 研究開始当初の背景

特殊土は *unusual soil, problem soil, special soil* と訳され、地盤工学用語辞典によると「従来の地盤工学の手法だけでは、設計施工ができないような土をいい、外国でいう普通でない土、あるいは問題土のこと」と記述される。主な特殊土としては、高含水比、不透水性、卓越した二次圧密、塑性流動性を有する『有機質土』、水浸によって組織の結合力が破壊

されて泥状化あるいは細粒化してしまう軟岩や泥岩などの『スレーキング材料』、粒子が多孔質で角張っており、粒子破砕に伴う高い圧縮性を示すまさ土やしらすなどの『破砕性材料』、高含水比、乱したときの強度低下、乾湿による締固め特性の変化を示す『関東ローム』等を挙げることができる。いずれも、①教科書や試験法に一般に書かれている性状とかなり異なる反応を示す土、②扱いにく

く、施工性の悪い土、③災害を受けやすい土、として特徴付けることができる。特殊土が地盤工学上の問題となった最近の話題としては、以下を挙げることができる。

<事例 1> 現在建設中の舞鶴若狭自動車道では、N 値が 0~1 程度の粘土層と腐植土から構成される軟弱層が GL.-40m 付近まで厚く堆積しており、特に腐植土層の自然含水比は 100~400%で有機物を多量に含むため大きな沈下が予想されている。実際、施工前に建設された試験盛土では、盛土計画高約 8m を確保するために盛土施工厚が最大 15m にも達した。当初の予想を大幅に上回る大規模沈下が発生するとともに、周辺地盤への広範囲にわたる変状（地盤隆起や側方変位）が見られており、建設工事における地盤改良工法の選定が入念に行われている。

<事例 2> 2009 年 8 月に発生した駿河湾地震によって、東名高速道路牧之原 SA 付近の道路盛土が崩落した。盛土崩落要因は、水が流れ込みやすい現場の地形や地質と、盛土の下部層に使用した泥岩が劣化したことによる地盤の弱体化だったと報告されている。盛土施工（締固め基準）は規定どおりに行われて平常時は安定を保っていたものの、泥岩が吸水作用によって徐々に劣化（スレーキング）したために、地震によって盛土は弱った下部から崩落したと考えられている。

このように、特殊土は設計施工管理上、取り扱いが厄介な問題となってきた土であり、通常の施工管理では予測できないような問題・被害を起こしている。特殊土はその生成起源から、分布には地域的な特異性がある。それぞれの地域では、これらの特殊土は広域的に分布しており、設計施工管理上、もっとも多く施工対象となってきた土である。しかし、定量性かつ客観性を持った工学的分類法が確立されているとは言い難く、管理にあたっては技術者の経験や知識が重要であった。

2. 研究の目的

上述の通り、特殊土は設計施工管理上、身近な土であるが、その力学特性が十分に解明されているとは言い難い。そこで、本研究課題の目的は、特殊土が有する特異な地盤工学的性質を室内試験で把握し、弾塑性力学の言葉で説明するとともに、特殊土地盤で生じる特徴的問題の発生要因や発生メカニズムを解明することである。

(1) 特殊土・中間土の力学特性の把握

標準圧密試験機、静的/動的三軸試験機および中空ねじり試験機を用いて、スレーキング材料や有機質土、関東ロームなどの特異な地盤工学的性質を示す特殊土の力学特性を把握する。近年急増する海上埋立地盤では、砂と粘土が混在した中間土が埋立に用いられるが、細粒分を多く含む中間土も本研究課

題の対象とする。

(2) 骨格構造概念に基づく特殊土の力学挙動記述と構成モデルの精緻化

骨格構造（構造・過圧密・異方性）の発展の仕方に着目して、特殊土の各種室内力学試験結果と構成式応答との対比から、弾塑性力学に基づいた力学挙動の記述を試みる。必要に応じて、構成モデルの高度化に努める。

3. 研究の方法

(1) 既往研究成果のデータ整理と特殊土を用いた動的試験の実施

研究代表者はこれまでに、スレーキングのし易さの異なる泥岩、結晶片岩、愛鷹ロームを用いて、圧密試験および非排水三軸圧縮試験を行ってきた。既往研究成果のデータ整理を行い、これら特殊土の圧縮特性およびせん断特性の把握を試みる。さらに、三軸試験機や中空ねじり試験機を用いて非排水繰返しせん断試験（液状化試験）や動的変形試験を実施し、これまでの静的力学挙動だけでなく、特殊土の動的力学挙動の把握を試みる。

研究対象とする土試料は既往の研究に用いた試料だけでなく、地盤工学上、特殊土が問題となった場所からサンプリングを行っていく。

(2) 骨格構造概念に基づく特殊土の力学挙動記述と構成モデルの精緻化

研究代表者も開発に携わった SYS カムクレイモデルを用いて、室内力学試験結果の再現を試みる。研究代表者はこれまでに構造高位化概念を提案し、砂のサイクリックモビリティ挙動や鋭敏粘土の高延性挙動を説明しているが、本研究課題で実施する室内力学試験結果と構成モデルの応答とを対比しながら、特殊土への適用性を確認するとともに、必要に応じて、構成モデルおよび骨格構造（構造・過圧密・異方性）の発展則を改良し、一層発展させる。

研究成果を通して、特殊土が示す特異な地盤工学的性質や問題発生要因とその発生メカニズムを、骨格構造概念に基づいて説明・考察する。

4. 研究成果

(1) 泥岩岩塊集合体の粘土化を伴う力学挙動の把握と骨格構造概念に基づく解釈

山間部の道路工事や大深度掘削により大量に排出する第三紀泥岩、とくに泥岩岩塊集合体の力学挙動の把握は、泥岩を地盤材料として用いる場合に非常に重要である。ところが、泥岩は一般にスレーキングを起こすという特徴を持つため、泥岩を地盤材料として取り扱う場合、スレーキングを伴う力学挙動の把握が重要となる。スレーキングとは、乾湿繰返しにより細かく破碎・細粒化されることであるが、さらに降雨時の泥岩上をダンプ走

行すると粘土化が進行することも大きな問題である。このように泥岩岩塊集合体は、スレーキングを伴うとさらにその挙動は複雑になる。

泥岩を盛土材料として利用するため、泥岩の特徴であるスレーキングについて、そのメカニズムを骨格構造概念に基づき解釈した。すなわち、構造を有し、超過圧密状態である泥岩粒が、排水せん断による構造の低位化と正規圧密土化に至る現象としてスレーキングをとらえた。さらに泥岩岩塊集合体の力学挙動を把握するため、スレーキングのしやすさの異なる2種類の泥岩について、母岩および岩塊集合体、そして繰返し状態での標準圧密試験を行い、岩砕集合体の試験結果に対し、SYS カムクレイモデルを用いて数値シミュレーションを行った。その結果、スレーキングのしやすい泥岩は、構造が劣化しやすく、過圧密解消の程度が遅い土で、骨格構造概念に基づく「砂」に類似した挙動であること、スレーキングしにくい泥岩は、逆に、「粘土」に類似した挙動であることを示した。最後に、水～土連成有限変形解析により、凝灰岩盛土の地震時変形破壊挙動をシミュレートし、泥岩岩塊盛土の設計には、圧縮挙動だけでなくせん断挙動も考慮する必要があることを結論付けた。

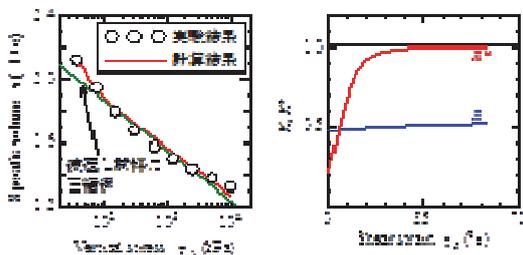


図-1 粘土化のしやすい泥岩岩塊集合体(亀山泥岩)の一次元圧縮挙動(実験と計算)

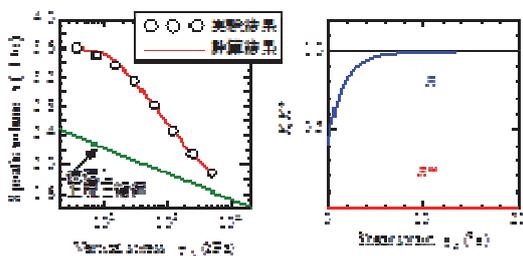


図-2 粘土化のしにくい泥岩岩塊集合体(有間川泥岩)の一次元圧縮挙動(実験と計算)

(2) 自然堆積粘土の非排水繰返しせん断と繰返し載荷後の圧縮挙動の把握

地震被害と言うと砂質地盤の液状化現象が有名であり、液状化強度特性を調べるために、砂質土を用いた非排水繰返しせん断試験が数多く行われている。近年では、軟弱な沖

積平野や(砂や粘土が混在した)中間土で埋め立てられた(海上)人工埋立地盤上に重要な社会インフラが集中しており、砂質土だけでなく、粘性土や中間土の動的特性把握が非常に重要となってきている。

そこで、自然堆積した粘土から砂、そして両者の混在した中間土や泥岩等の特殊土まで gradation 豊かな各種地盤材料の力学挙動を単調載荷、繰返し載荷を問わずに把握し、統一的に説明する土骨格の弾塑性構成式の開発・精緻化に必要な基礎データ蓄積のために、軟弱な自然堆積粘土の非排水繰返しせん断特性および繰返しせん断後の圧密特性の把握を試みた。繰返し載荷を受けた緩い砂は、有効応力がほぼゼロとなってサイクリックモビリティ(液状化)を示すことが有名である。一方、粘性土は有効応力がゼロとはならず、液状化はしないと考えられてきた。ところが、ネッキング破壊が生じないように、変位振幅一定のもとで変位制御非排水繰返し載荷試験を行ったところ、粘性土であっても繰返し載荷とともに剛性が徐々に低下し、有効応力もほぼゼロまで減少することがわかった。また、水～土連成動的有限変形解析結果から、鋭敏な軟弱粘土が繰返しせん断時に示す大きな塑性圧縮(平均有効応力の低下)は、繰返し載荷に伴って土が乱される(構造が低位化する)ことが原因であることを示した。この構造低位化は繰返し載荷中だけでなく再圧密時にも生じており、繰返し載荷後の圧縮量の増加に寄与していることを示し、軟弱粘土地盤で生じる地震後の長期圧密沈下被害の原因であることを示唆した。

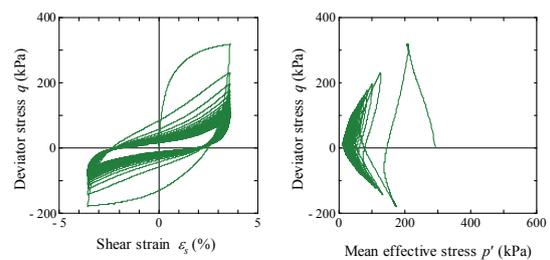


図-3 鋭敏な粘性土の変位制御による非排水繰返しせん断挙動

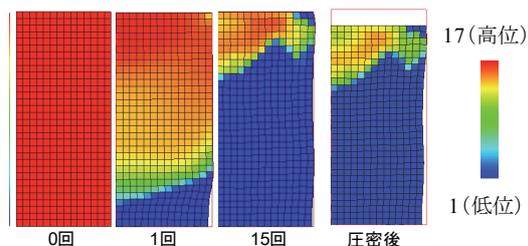


図-4 繰返し載荷に伴う構造低位化の様子

(3) 浦安市から採取した細粒分を多く含むシ

ルト質砂の力学特性の把握

東北地方太平洋沖地震(2011)では、浦安市をはじめとして、東京湾沿岸部の埋立地盤において広範囲に液状化被害が発生した。液状化地域周辺から採取した土試料の粒度特性を調べたところ、従来は液状化しにくいと考えられてきた細粒分を多く含む土であったことがわかっている。

そこで、液状化被害の程度の異なる浦安市内2地点で採取した不攪乱試料を用いて各種室内試験を実施し、物理特性および力学特性の把握を試み、細粒分を含む土が甚大な液状化被害を引き起こした原因解明のための基礎データを収集した。その結果、①液状化したと考えられる土は、工学的分類ではシルト混じり砂：S-Mに分類されること、②不攪乱試料の圧密排水せん断挙動は正のダイレタンシー挙動を示し、ある程度密な状態にあること、③不攪乱試料および攪乱試料を用いた繰返し非排水三軸試験結果から、同じ密度であっても、液状化強度比は不攪乱試料の方が攪乱試料よりも大きいこと、④変形特性を求めるための繰返し三軸試験を実施したところ、不攪乱試料の方が攪乱試料よりも初期剛性が大きい、せん断ひずみが大きくなるにつれて両者の差異はなくなること、⑤上記特徴は、自然堆積時に構造が発達したことによる疑似過圧密効果として説明することができること、を示した。

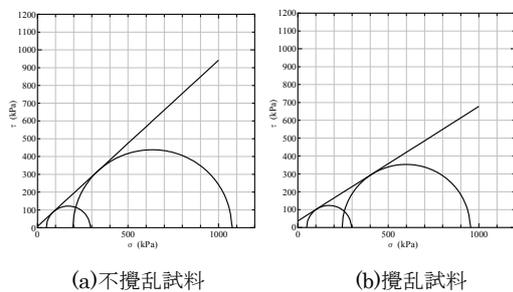


図-5 不攪乱試料と同密度に密度調整した攪乱試料の圧密排水せん断試験から得られたモールの応力円

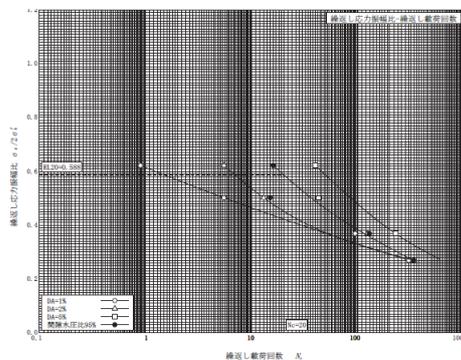


図-6 不攪乱試料の液状化強度曲線

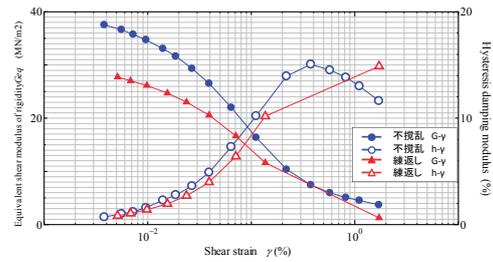


図-7 不攪乱試料と密度調整した再構成試料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 中野正樹, 中井健太郎, 酒井崇之 (2012): 泥岩岩塊集合体の粘土化を伴う力学挙動の骨格構造概念に基づく解釈, 地盤工学会誌, 報告, 掲載決定.

〔学会発表〕(計3件)

- ① 中井健太郎: 浦安市の地盤から採取された沖積粘性土の力学特性の把握, 第47回地盤工学研究発表会, 2012年7月12~14日(発表確定), 八戸工業大学(青森県).
- ② 中井健太郎: The effect of stratigraphic composition and dip of deeper layer on the occurrence of subsurface liquefaction, 6th International Workshop on New Frontiers in Computational Geomechanics, 2012年5月23日発表, 高山グリーンホテル(岐阜県).
- ③ 中井健太郎: 繰返し載荷によって乱された自然堆積粘土の圧縮/せん断挙動, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月11日発表, 神戸国際会議場(兵庫県).

6. 研究組織

(1)研究代表者

中井 健太郎 (NAKAI KENTARO)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 60402484

(2)研究分担者なし

(3)連携研究者なし