

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04041

研究課題名(和文)地盤物性の統一的解釈基準の策定に向けた土ゲノム概念の創出とその工学的有用性

研究課題名(英文)Construction of soil genome concept for evaluating the geotechnical properties and its engineering benefits

研究代表者

田中 政典(Tanaka, Masanori)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・専門研究員

研究者番号：20371768

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究から次のことがわかった。

関東ロームのような非晶質粘土が粘土鉱物を持つ土に変化することを透過型電子顕微鏡によって確認した。本結果から、火山灰質粘性土が海洋環境下で粘土鉱物に変化することを証明できた。原子間力顕微鏡を用いて粘土粒子の摩擦力と粘性を測定し、ミクロ領域における粘性粒子表面の摩擦特性および表面物性を定量的に検討した。粘土単位層の摩擦力(ミクロ強度)は大変位せん断から求まるせん断力(マクロ強度)より大きいことを示した。沈定体積試験は、膨張性粘土か非膨張性粘土かを簡易に判定できる。この判定方法は、拡散電気二重層とファン・デル・ワールス力の釣り合いで説明できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The following conclusions were obtained.

1) It was confirmed that the amorphous clays such as Kanto Loam change into soils with clay minerals by Transmission Electron Microscope (TEM). From this result, it was proved that volcanic cohesive clays change into clay minerals under marine environment. 2) The friction force and viscosity of the clay particles were measured using an Atomic Force Microscope (AFM), and the friction characteristics and physical properties of the surface of clay particle in the micro region were quantitatively examined. The friction force (micro strength) of the clay unit layer was larger than the shear force (macro strength) obtained from large displacement shear test. 3) The sediment volume test is a test to identify the degree of expansivity of clays. We showed that this method can be explained by the balance between diffused electric double layer and van der Waals force.

研究分野：地盤工学

キーワード：土の物理化学的性質 粘土鉱物 土のせん断強さ 堆積環境

1. 研究開始当初の背景

地盤の工学的特性は、堆積時の環境および堆積後の物理的あるいは化学的な作用によって大きな影響を受ける。また、同じ環境下で形成された地盤であっても、その後の沈降や隆起などの環境変化によって土の工学的特性は大きく異なる。海成粘性土の生成に関しても、陸域から供給される非晶質の火山灰質粘性土が海水中に堆積して 2:1 型粘土鉱物へと変化していることが報告されている。さらに、海水中に堆積した地盤には黄鉄鉱(FeS_2)が多量に生成されるが、陸化するとこれが酸化されて、酸化鉄と硫化物とに分離される。酸化鉄は、土粒子同士を物理・化学的あるいは電気的な力で結合する固結物質として作用し、硫化物の生成は土を酸化させ、せん断強さを低下させる。多くの研究者は、この固結作用を土の地域性に由来するものと考え、「土の地域性」あるいは「セメンテーション」と総称したが、その生成メカニズムの解明は十分とはいえない。この「土の地域性」を解明するためには、土を土要素として把握し、それが土の工学的特性にどのような影響を及ぼしているのか定量的に明らかにしなければならない。

2. 研究の目的

地盤は、堆積時の環境や堆積後の物理的あるいは化学的な作用を受け、様々な工学的特性を持つ。この結果、地球上には多様な地盤が存在することとなり、それぞれの地域によって地盤の工学的特性は異なる。我々はこれを「土の地域性」と総称している。また、我が国の海成粘性土の生成を熟慮すると、陸域から非晶質の火山灰質粘性土が河川等によって沿岸域に運搬され、海水中に堆積して結晶構造を持つ粘土へと変化する。このような様々な地盤や変化を統一的に説明するためには、土生来の性質を土要素として把握する必要がある。そこで、本研究は、土ゲノム概念(粘土鉱物や土に吸着している化学物質等の基本要素と工学的特性の体系化)を創出することにより、土の地域性や変化を本質的に解明し、その工学的有用性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、土の起源や堆積環境に着目して、その土を鉱物組成、微化石や年代測定など地球物理化学的な分析を行うとともに、微視構造を電子顕微鏡(SEM)などを用いて観察および分析を行い、土ゲノム概念を創出して、その工学的有用性を検証するものである。また、本研究は、自然環境下において非晶質の火山灰質粘性土が結晶構造を持つ粘性土に変化する過程について再現実験を試みるととも

に、粘土鉱物の観点から地盤の改良効果と「土の地域性」について検討する。さらに、本研究は、微小ひずみ領域のせん断特性を知ることのできるナノインデントや AFM、あるいは分子動力学法などを導入して、土のせん断発現メカニズムを微視構造の観点から明らかにし、さまざまな土に対して最適な試験方法を提案する。

関東地方に降灰した非晶質の火山灰が東京湾に堆積し、結晶構造を持つまでの過程を再現する。火山灰は鹿沼土を使用する。鹿沼土は非晶質といえども、アロフェンやイモゴライトを含んでいるため、原土と 500°C で加熱し土構造を破壊した 2 試料を準備する。これらの試料を海洋環境下で堆積させ、X 線回折試験および透過型電子顕微鏡(TEM)により結晶構造を確認する。また、同じセメント量であっても地域によって地盤改良効果が異なることを土ゲノムの観点から検証する。

4. 研究成果

土の工学的特性を支配する土ゲノムの検討について、土粒子、固結物質や珪藻微化石などの土ゲノムの基本要素を提案し、珪藻微化石と塑性図の関係、液性限界と塩分濃度との関係を明らかにした。以下に研究成果を述べる。

(1) 土ゲノムの要素として、堆積環境、粘土鉱物、珪藻微化石等の植物・生物由来の物質、分濃度、酸化鉄、pH が重要な因子であることがわかった。

(2) 東京湾粘土の X 線回折試験結果から深度方向に粘土鉱物の結晶度が高くなっていることを明らかにした。この成果を基に、火山灰質粘性土(関東ローム)を海水中に約 10 ヶ月間水浸し、関東ロームのような非晶質粘土が粘土鉱物を持つ土に変化することを透過型電子顕微鏡(TEM)によって確認した。図-1 に TEM 写真を示す。写真で線のように見えているのは干渉縞である。干渉縞の間隔から Al シートと Si シートが層状に重なっているものと考えられる。

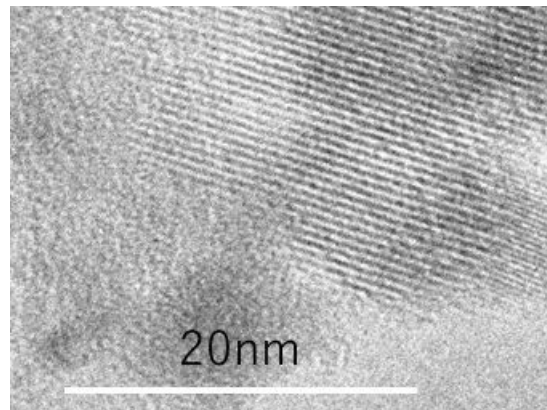


図-1 TEM 写真(200kV × 250k)

撮影に用いた試料は、鹿沼土を 500 ° C で加熱し、鹿沼土そのものの構造を消失させた後、海水中に推進させたものである。本結果から、火山灰質粘性土が自然の海洋環境下で粘土鉱物に変化することを証明できた。

(3)土の液性限界と塑性限界との関係において、土が非塑性になるパターンは4種類あり、このパターンは土の保水能力によって支配されていることを示した。一方、土の物理的な性質は一般に不変である、とされているが、凍結融解によって液性限界が下がることが示された。図-2 に凍結による液性限界の変化を示す。図中の KT ~ FB は用いた試料を示す。

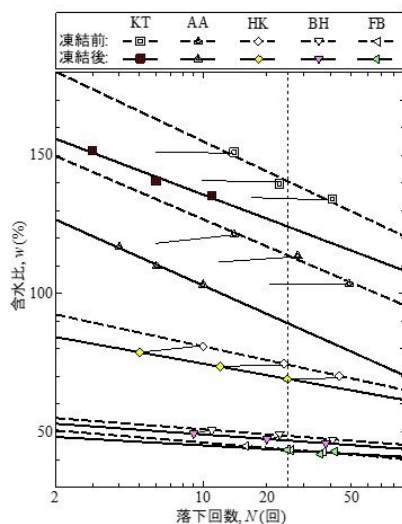


図-2 凍結による液性限界の変化

すべての試料は、凍結することによって液性限界が低下している。しかしながら、凍結前の液性限界が低い粘土では、凍結による液性限界の変化は小さい。この原因は、液性限界の大きな試料は、大きな間隙を持っており、凍結による影響は大きい。この原因については、間隙の大小によるものと考えられる。すなわち、凍結するとき試料の間隙水は、失われ、その後、水浸してもある大きさ以下の間隙には水が浸透できないことが考えられる。

(4)塩分濃度とコンシステンシー限界との関係を明らかにした。図-3 に液性限界と塩分濃度との関係を模式的に示す。主要粘土鉱物がスメクタイト(モンモリロナイト)である試料は、塩分濃度が高くなることに従って、液性限界は低くなる。主要粘土鉱物と同じスメクタイトであっても非モンモリロナイト試料では、塩分濃度が高くなることに従って、液性限界は高くなる。同じスメクタイト試料であっても、モンモリロナイトであるのか非モンモリロナイト試料かによってそれらの挙動は大きく異なる。カオリナイト試料の液性限界は、塩分濃度が高くなっていても変化はほとんど見られない。液性限界は粘土鉱物の影響を強く受けていることが明らかと

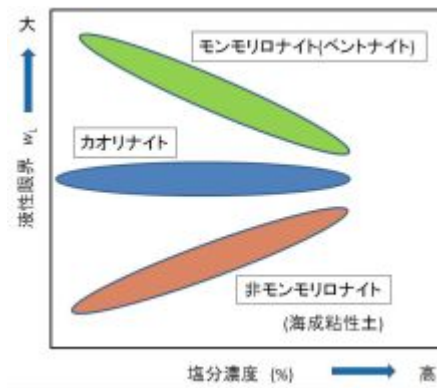


図-3 液性限界と塩分濃度との関係

なった。

(5)X線小角散乱法による実験結果において、固体から塑性限界に至る過程では、単位粘土層の層間距離は水分子1層~3層であり、塑性限界付近では不連続な遷移領域が存在することを示した。図-4 に層間距離とコンシステンシー限界の関係を示す。図中の w_p は塑性限界、 w_L は液性限界を示す。含水比5~10%における層間距離はおおよそ1.25nm、含水比10~45%での層間距離は1.5nm、塑性限界付近の層間距離はおおよそ1.85nmである。土の表面にはNa分子(直径0.8nm)がそれぞれ1層あるので、含水比5~10%における水分子は1層、含水比10~45%の水分子は2層、塑性限界付近の水分子は3層あるものと考えられる。また、塑性限界から液性限界までは連続的に層間距離が増加していくことがわかった。

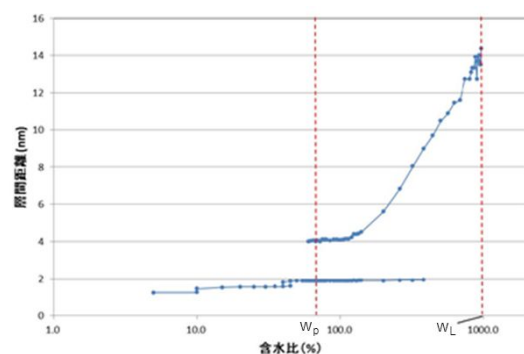


図-4 層間距離とコンシステンシー限界

(6)原子間力顕微鏡(AFM)を用いて粘土粒子の摩擦力と粘性を測定し、ミクロ領域における粘性粒子表面の摩擦特性および表面物性を定量的に検討した。図-5 に AFM と一面せん断試験(Direct shear test, 以下 DST と呼ぶ)から得られた、拘束圧と摩擦力との関係を示す。AFM から得られた摩擦力は、拘束圧が増加しても一定であり、DST から得られた摩擦力より大きい。この結果、粘土単位層の摩擦力(ミクロ強度)は大変せん断から求まるせん断力(マクロ強度)より大きいことが明

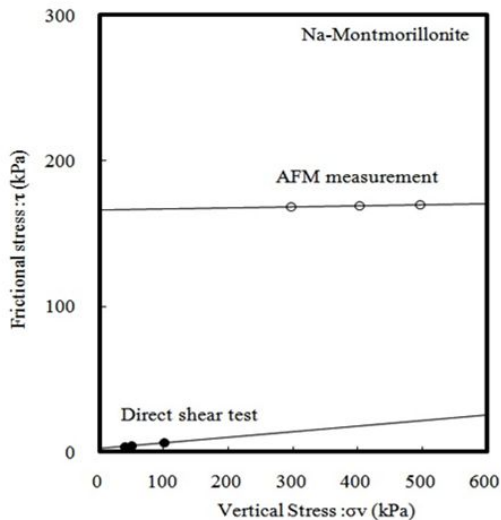


図-5 拘束圧と摩擦力の関係

らかである。また、ミクロ強度は速度依存性を示すことが明らかとなった。なお、試料は、Na型モンモリロナイトの乾燥試料を用いた。

(7) ナノインデント試験によって、微小ひずみ領域におけるせん断強さの速度依存性が明らかとなった。図-6にナノインデント試験から得られた硬度と押し込み速度との関係を示す。硬度は鉛直力を有効断面積で除しており、微小ひずみ領域におけるせん断力に相当する。硬度は押し込み速度が増加することによって増加していることがわかる。また、微小なひずみ領域における土のせん断強さについては、ナノインデント試験から得られるせん断強さは、土被りの影響を受けないテルツァギの支持力公式を適用できることがわかった。この結果は、AFMで得られた結果と同様であった。ナノインデント試験では、湿潤状態の佐賀有明試料を用いた。

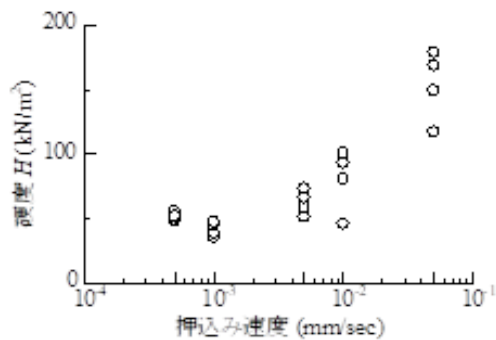


図-6 硬度と押し込み速度との関係

(8) セメント改良土の強度発現メカニズムの検討については、海水環境下におけるセメント処理土の強度発現機構を明らかにするため、マグネシウム(Mg)に着目した実験を行った。この結果、Mg含有量が増加することに従

ってセメント改良土の強度発現を阻害することがわかった。

(9) 化学的固結作用が土の工学的特性に及ぼす影響を調べるため、メキシコ粘土を対象としてセメンテーションに関する実験を行い、化学的固結を受けたメキシコ粘土は、細粒分が少なくても比表面積や液性限界(土の保水性)がベントナイトよりも大きくなることを示した。

(10) 粘土中の酸化鉄は、液性限界を低下させ土のせん断強さを増加させることを示した。これは酸化鉄がマイナス電荷を持つ単位粘土層表面に結合し、粒子間反発力を低減させるため、相対的にファンデルワールス力が優勢となり、凝集力を高めるためと考えられる。海水中に堆積した地盤が干陸し、地下水位が低下すると地盤内のパイライトは酸化され酸化鉄が生成される。地盤は堆積後の環境変化によって工学的特性が変化する。

(11) 沈定体積試験の沈定体積と経過時間との関係から、膨張性粘土であるのか非膨張性粘土であるのか簡単に見分ける方法を見出した。図-7にCaCl₂が0.2%の時の沈定体積試験から得られた沈定体積と経過時間との関係を示す。イライト、笠岡粘土、クニボンド、クニゲルV1、博多粘土、有明粘土および東京湾粘土を使用した。この試料の中でモンモリロナイトを主体とする膨張性粘土はクニゲルV1のみである。図からクニゲルV1の沈降速度は遅く、200分を過ぎた頃から沈定体積の減少が顕著に表れる。その他の試料については100分程度で一定値になる。膨張性粘土か非膨張性粘土かを判定するには、30分経過した時点で沈定体積が初期値の60%以下であれば、膨張性粘土、それ以下であれば非膨張性粘土と判断できる。これらの挙動についても拡散電気二重層とファンデルワールス力の釣り合いから説明が可能である。従来、沈定体積試験から膨張性粘土あるいは非膨張性粘土を判定する方法は、一週間程度かかっていたが、本研究成果から30分程度で判別が可能であることを示した。

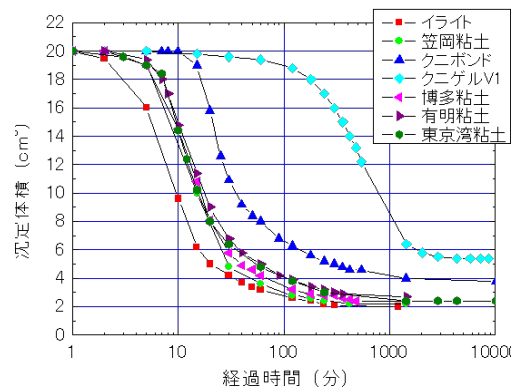


図-7 沈定堆積と経過時間との関係

(12)地盤は、堆積時の環境や堆積後の物理的あるいは化学的な作用を受け、様々な工学的特を持つので、それらの特性を統一的に評価する試験方法が必要となる。本研究では世界的によく実施されているペーンせん断試験について X 線 CT 装置を用いてその発現機構について検討を行った。その結果、ペーンせん断強さは、現行基準によるペーブレード周面積に対するせん断力ではなく、ペーブレード回転方向前面に発生する支持力であることを指摘した。図-8 に東京湾粘土を 68kPa で再構成した試料の X 線 CT 画像を示す。ペーンは時計回りに回転しており、回転方向の後側には密度の低い部分のあることがわかる。また、この時のペーンせん断強さの最大値は、回転角 15° で発揮されており、ペーンせん断強さは支持力で発現されていることを裏付けている。

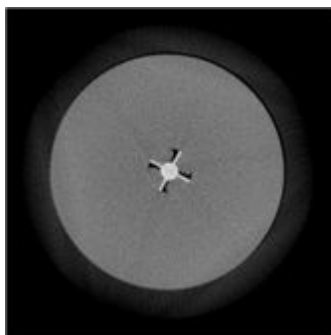


図-8 回転角 30° における X 線 CT 画像

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 6 件)

大河原正文、中山雅、齊藤康明、久常雄大、山川裕美恵、三田地利之：ミクロ領域における粘土鉱物の摩擦力と粘度のせん断強度との関係、粘土科学、第 54 巻第 3 号、査読有、pp. 130-140、2016.

原弘行、末次大輔、松田博、亀井健史：マグネシウム塩を含有する石灰・セメント処理土の強度発現および海水環境下での劣化速度、土木学会論文集 C(地圏工学)、第 72 巻第 4 号、査読有、pp. 294 - 299、2016.

川尻俊三、田中政典、川口貴之、猶原有希子、平林弘、中村大、山下聡：X 線 CT スキャンによるペーンせん断試験時のせん断機構の解釈、地盤工学ジャーナル、第 12 巻第 1 号、査読有、pp. 79-90、2017.

〔学会発表〕(計 24 件)

Tanaka, M., Watabe, Y., Nakajima, M. and Tomita, R.: Effects of Several

Particular Soils on Consistency Limits, Proceedings of the 25th International Ocean and polar Engineering Conference, Vol.2, 査読無, pp.795-801, 2015. 6.25, Kona, USA.

Hirabayashi, H., Saegusa, H., Tanaka, M., Fukasawa, T. and Tomita, R. : Engineering properties and cone factor of Onsoy clay, Louiseville clay and Mexico City clay, Proceedings of the Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5, 査読無, pp.553-558, 2016.9.8, Gold Coast, Australia.

田中政典、渡部要一：地盤物性の評価のための土ゲノム概念の構築について、地盤工学会、2016.9.14、岡山.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

田中 政典 (TANAKA MASANORI)
港湾空港技術研究所・地盤研究領域・専門
研究員
研究者番号：20371768

(2)研究分担者

渡部 要一 (WATABE YOICHI)
北海道大学・工学研究院・教授
研究者番号：00371758

亀井 健史 (KAMEI TAKESHI)
宮崎大学・工学部・教授
研究者番号：30177597

大河原 正文 (OKAWARA MASAFUMI)
岩手大学・工学部・准教授
研究者番号：80223741

川口 貴之 (KAWAGUCHI TAKAYUKI)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号：30177597

(3)連携研究者

大坪 政実 (OHTSUBO MASAMI)
九州大学名誉教授
研究者番号：80112316

片岡 沙都紀 (KATAOKA SATSUKI)
神戸大学・工学研究科・助教
研究者番号：50552080