

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23780250

研究課題名(和文) 微小領域における地盤の力学的挙動の定量的評価とその応用

研究課題名(英文) Evaluation of Microscopic Behaviour for Clay by Using Micro-indenter and its Application

研究代表者

金山 素平 (KANAYAMA, Motohei)

岩手大学・農学部・准教授

研究者番号：60398104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、マイクロスケールにおける粘土の力学的挙動の定量的評価に重点を置き、求まる強度について検討した。また、上記の試験から求まる強度と室内試験から求まる強度との比較を行った。その結果、Micro Indenterを用いた押し込み試験によって、粘土の微小領域における力学的挙動を評価可能であることを示した。この試験結果を基にTerzaghiの支持力公式を利用した粘着力は、一軸圧縮試験から求まる非排水せん断強度とほぼ同等の値を示すことを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the shear strength determined by a micro indentation test was examined focusing on the quantitative evaluation of the micro-scale mechanical behaviour of clay. The comparison of the cohesion obtained from the micro indentation test and unconfined compression test for clay samples indicated in the micro indentation test results by cyclic loading underestimate the cohesion while those by monotonic loading estimate the cohesion accurately. It is noted that the loading rate should be selected according to the clay sample because strength is affected by the rate effect. From these results, it was found that the microscopic mechanical behaviour of clay can be evaluated by mean of the micro indentation test.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：粘土 微視的挙動 マイクロインデンテーション 速度効果 非排水せん断強度 微生物

1. 研究開始当初の背景

わが国の長い歴史の中で、農地・農業用水等の資源は、多くの自治体および農家中心の地域の人々たちによって築かれ、管理され、農業生産において最も基礎的な資源であると認識されている。これら農地・農業用水等の資源は、適切に管理されることではじめて機能を十分に発揮するものであり、その機能が損なわれると復旧は非常に困難であることから、良好な状態で維持管理していくことが望まれる。また、地域の農地・農業用水等の資源の水循環システムが形成する多面的機能の発揮や生物の多様性の確保が社会的に求められ、これらを次世代に適切に引き継ぐことが重要である。近年、農家経済が厳しい状況の中で、更新時期を迎える農業用施設の長寿命化を図り、既存施設の有効活用を実現することによって、限られた予算内で施設の機能を維持するという必要性が論じられている。

全国有数の農業地帯として知られている有明海沿岸低平地帯には、軟弱粘土地盤上に建設された海岸堤防や道路などの盛土構造物は建設途中や建設後においても大きな沈下を示し、大方の沈下が終了しても長期間にわたる残留沈下が観測されている。必要とされる施設の性能を発揮または維持するうえで、長期的に継続する構造物の沈下が与える損害は大きい。残留沈下については古くから研究が行われているが、未だそのメカニズムの解明には至っていない。地盤を構成する土粒子および間隙の微視的な挙動(移動・閉塞)が集積した結果、地盤の巨視的な挙動(圧縮・変形)として現れる。したがって、従来から行われている軟弱粘土地盤における既存干拓堤防の残留沈下状況調査や沈下・土質データの収集、残留沈下についての定性的・定量的な分析に加えて、新たにマイクロスケールにおける地盤の力学的挙動の定量的評価とその応用を検討することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景を踏まえて3つの目標を設定する。1つ目の目標は地盤の微小領域における応力変形特性を明らかにすることである。2つ目の目標は、地盤の微視的構造の観察を行い、得られた応力変形特性と関連付けることである。3つ目の目標は、得られた微視的挙動の結果から地盤の巨視的な強度、変形特性との相関性の検討と実問題への適用性を検討することである。最終的には、現地における非破壊試験に準じた迅速な強度定数評価試験として応用し、現場測定技術の向上に資することを目標とする。

3. 研究の方法

(1) マイクロインデンテーション試験に使用した試料は、有明粘土と市販のカオリン粘土の2種類である。有明粘土は、練返しおよび不攪乱状態、カオリン粘土は練返しを使用

した。カオリン試料の物理的性質は、土粒子密度 ρ_s は 2.60 g/cm^3 、液性限界 w_L は78%、塑性限界 w_p は27%である。一軸圧縮試験による非排水せん断強度 s_u ($q_u/2$)は 27.5 kN/m^2 である。一方有明粘土試料は、佐賀県にて採取した不攪乱有明粘土試料と練返し有明粘土である。基本的な物理的性質として、土粒子密度 ρ_s は $2.63 - 2.64 \text{ g/cm}^3$ 、自然含水比 w_n は89 - 92%、液性限界 w_L は67 - 82%、塑性限界 w_p は31 - 36%、粘土分は46 - 64%、シルト分は33 - 48%、砂分は3 - 6%の範囲にある。一軸圧縮強度の二分の一に相当する非排水せん断強度 s_u は $21 - 33 \text{ kN/m}^2$ である。

本研究において、万能圧縮試験機(A&D株、RTG-1210: **Photo.1**)を用いて使用した。主な特徴は、ロードセル容量は5N、荷重測定範囲はロードセル容量の1/500まで(すなわち、精度を損なうことなくロードセル容量の0.2%まで測定可能)、荷重精度は読み値の $\pm 1.0\%$ 、速度範囲は $0.05 - 1000 \text{ mm/min}$ である。ロードセルの先端に取り付けてあるロッドの直径は3mm、先端の形状は球状である。本試験の載荷方法は、変位制御による載荷を採用した。



Photo.1 マイクロインデンター試験機

上記マイクロインデンター試験機を使用した繰返し載荷除荷試験を行った。繰返し載荷回数が試料の強度に与える影響を検討するために、1, 2, 5, 10 および 20 回の5通りの載荷回数を採用した。最大貫入量は1mmとし、載荷速度は 0.1 mm/sec とした。また、載荷速度が試料の強度に及ぼす影響を把握するため、追加試験を行った。採用した載荷速度は、0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 および 1 mm/sec の7通りである。試料作製方法は、円形のカッターリングを使用して供試体を作製した。その際インデント表面はストレートエッジを使用して均した。

(2) 現在、環境保全や資源リサイクルに対する関心が全世界で高まっており、農業工学・地盤工学分野においても周辺環境に配慮した施工法・地盤改良工法等の技術開発が望まれている。地盤の力学的特性・透水性を改

良する技術に関しては、セメントや水ガラスなどの人工材料を用いた工法(グラウト工法)が一般的である。しかし、近年では環境負荷の少ない新たな地盤改良法として微生物の力を利用した手法(バイオグラウト工法)が注目されており、国内外において研究されている(川崎ら, 2006; Victoria et al., 2007)。しかし、これまでの研究において、固結生成物の物理的・力学的評価は十分とはいえず、さらに、用いるセメント物質の選択に関する詳しい考慮がなされていない。そこで、本研究では資源の再利用を含めた新たなバイオグラウトを開発することを目的とし、使用するセメント物質に産業廃棄物として廃棄されるカキ殻を焼成して粉末状にしたものをカルシウム源として採用し、その固化性能を力学的に評価した。

本研究ではカルシウム源として、500, 750, 1000 で1時間焼成処理を行ったカキ殻および無処理のカキ殻(NT)を用いた。各カキ殻に対して蒸留水および豊浦標準砂(土粒子密度 $\rho_s = 2.640\text{g/cm}^3$)、イースト菌(日清製粉(株), カメリア), グルコースを混ぜ、試料を作製した。各試料を用いてバッチ試験による Ca^{2+} 濃度とpHの測定を行い、マイクロインデント(Photo.1)による硬度の測定を行った。

4. 研究成果

(1) 本研究では、マイクロスケールにおける粘土の力学的挙動の定量的評価に重点を置き、求まる強度について検討を行った。

Fig.1 は、遠心载荷を受けたカオリン試料の荷重-押し込み深さ曲線とその関係から求まる粘着力 c と押し込み深さの関係を示した図である。左図において、繰返し载荷回数が増加と共に、測定した荷重値のばらつきが大きくなっている。荷重-押し込み曲線は、押し込み深さが増大するにつれて荷重がほぼ直線的に増大する傾向にある。

右図中の実線は一軸圧縮強度 q_u の1/2の値である。求めた c 値と $q_u/2$ 値を比較すると、繰返し载荷回数が40回以外の結果において、両者は概ね一致している。40回の繰返し载荷試験においては、求まる c 値のばらつきが非

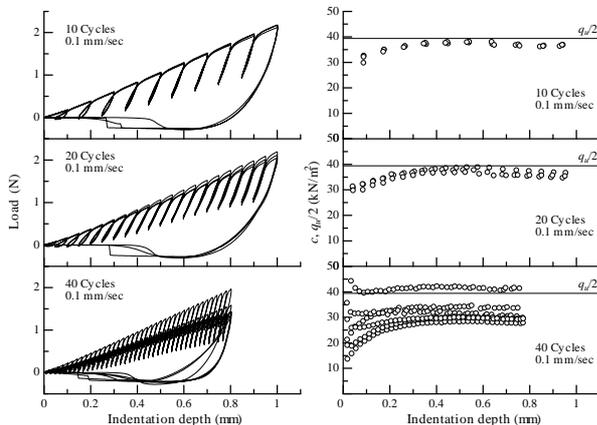


Fig.1 Microscopic behaviour for pre-consolidated kaolin clay

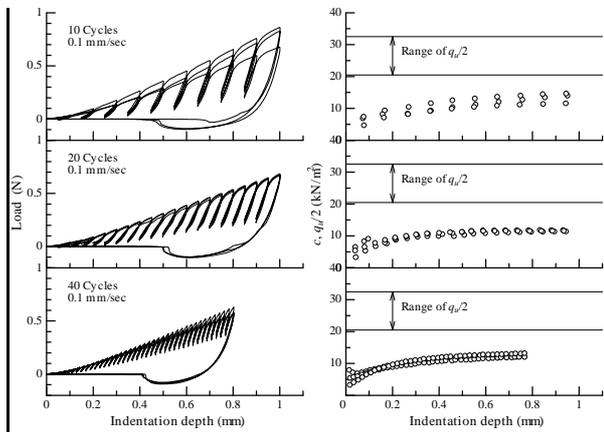


Fig.2 Microscopic behaviour for undisturbed Ariake clay

常に大きくなっている。この原因としては、押し込み深さが $20\mu\text{m}$ と微小であること、試料の不均質性の影響、試験開始時における载荷ロッドの設置問題等、様々の要因が考えられる。試験結果を総合的に考察すると、 c 値と $q_u/2$ 値が概ね一致するデータも見られるが、全体的に c 値は $q_u/2$ 値と比較して若干過小評価する傾向にあることが分かる。

Fig.2 は、**Fig.1**と同様に、不攪乱状態の有明粘土試料に対してインデント試験を行った結果である。試料の含水比は95.8%であった。各試験において、測定した荷重値の若干のばらつきがみられる。この理由として、構成する粘土粒子の大きさが小さいこと、自然堆積粘土であるため構造を有し珪藻や有機物等の粘土鉱物以外の物質を含有することから押し込み箇所の違い、つまり試料状態が均質でないこと等が挙げられる。荷重-押し込み曲線は、押し込み深さが増大するにつれて荷重がやや曲線的に増大する傾向にあり、カオリン試料の曲線形状と異なる。右図は、 c 値を押し込み深さに対して示した図である。押し込み開始時における c 値の変動は、押し込みの増加に対して増加あるいは減少傾向を示している。その後、押し込み深さが $0.5 - 0.6\text{mm}$ 以上となると、硬度はほぼ一定の値を示す傾向にあるが、やや増加傾向を示す。カオリン試料と明らかに異なる傾向は、先述のように、構成する粘土粒子の大きさ、構造の有無および粘土鉱物以外の物質の存在等による試料の不均一性が原因となっている可能性がある。求めた c 値は、 $q_u/2$ 値の分布範囲と比較して過小評価である。この原因については、選定したインデント速度の影響、つまり速度効果の影響が考えられる。

最後に、各試料を用いて载荷速度が硬度に及ぼす影響を評価した。**Fig.3** は、カオリン試料および有明粘土試料の速度効果についてまとめた図である。上図がカオリン試料、下図が有明粘土試料の結果である。試験条件としては、最大押し込み深度を 0.5mm 、単一载荷・除荷による試験である。繰返し载荷試験の結果において、 0.5mm 程度の押し込み深さであれば、評価した粘着力 c がほぼ一定値を示していたことから、押し込み深度を 0.5mm と

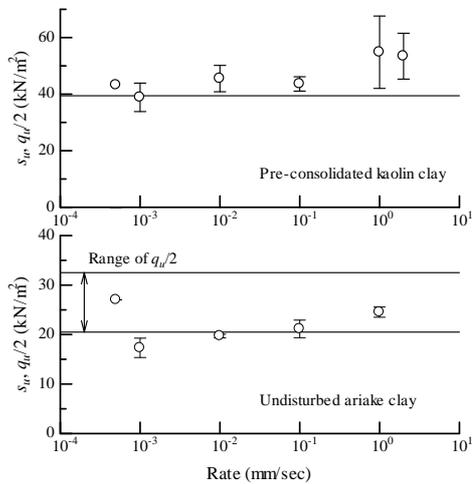


Fig.3 Rate effect on the strength parameter

した。

カオリン試料の結果において、全体的な傾向として速度の増加に伴い硬度はやや増加傾向にあるが、値のばらつきを考慮すれば速度効果の影響があるとは言い難い。また、繰返し載荷から求まる c 値は $q_u/2$ 値と比較して過小評価であったのに対し、単載荷試験から求まる c 値（速度 0.1mm/sec ）はやや過大評価である。有明粘土試料においても同様の傾向が見られる。このことから載荷方法が強度に及ぼす影響があることが分かる。カオリン試料において、本試験で採用した載加速速度の範囲（ $0.0005 \sim 2 \text{ mm/sec}$ ）であれば、 $q_u/2$ 値と概ね同等の c 値を評価することが可能である。

一方、有明粘土試料では、一番遅い載荷速度 0.0005 mm/sec において圧密のため高めの強度を示した。載荷速度 0.0005 mm/sec 以上であれば、載荷速度の増加に伴い硬度が増加する傾向を示した。更なるデータの追加が望まれるが、有明粘土試料においては速度効果により試料の強度の増加が確認された。これについては、試料を構成する粘土粒子の大きさ、つまり主要粘土鉱物の違いおよび粘性が関連していると考えられる。本試験結果によれば、有明粘土試料に関して 0.1mm/sec から 1mm/sec の間の載荷速度を使用すれば、概ね $q_u/2$ に相当する強度を評価できることが分かった。

(2) 本研究では、産業廃棄物であるカキ殻を有効利用するとともに微生物の代謝活動を利用した土の微生物固化処理について実験的に検討した。Fig.4 は、カキ殻を用いて作製した試料を 14 日間養生し、マイクロインデントを用いて硬度評価をした際に得られたグラフである。硬度測定でも、バッチ試験と同様に、蒸留水を用いた試験(Non Yeast Treatment)と、イースト菌を 1 日養生させた溶液を用いた試験(Yeast Treatment)の 2 つを行っている。縦軸は貫入深さ h_c (mm)、横軸は接触硬度 H (kN/m²) を表している。両者のグラフから、砂と蒸留水のみを入

れた Blank 試料の硬度に対し、カキ殻を用いた試料の硬度が大きいことが分かる。これは、カキ殻から溶出した Ca^{2+} が大気中の CO_2 および微生物代謝によって得られた CO_2 と反応し、土粒子間に CaCO_3 として析出したためであると考えられる。特に、1000 で処理したカキ殻においては、バッチ試験の結果より、溶出する Ca^{2+} 濃度が他のカキ殻に比べて高いため、より多くの炭酸カルシウムが析出しやすく、Non Yeast Treatment では、Blank 試料の約 15 倍、Yeast Treatment では Blank 試料の約 10 倍と大幅な硬度の増加が確認された。Non Yeast Treatment における硬度の方が高い値を示した理由としては、高い pH 下ではイースト菌が十分に代謝活動を行っていないため、炭酸カルシウムの析出が試料の乾燥状態に依存しているからであると考えられる。また、その他のカキ殻では、溶出した Ca^{2+} と大気中の CO_2 との反応に加え、イースト菌の代謝活動による CO_2 との反応があるため、Non Yeast Treatment の結果に比べ Yeast Treatment における硬度の方が高い値を示した。以上の結果より、砂試料にカキ殻を加え、微生物固化処理法を適用することで、試料の硬度が増加することを確認した。また、カキ殻の溶解により溶液の pH が上昇するため、イースト菌の代謝活動および炭酸カルシウムの析出反応による pH の低下を制御することが可能であることを確認した。

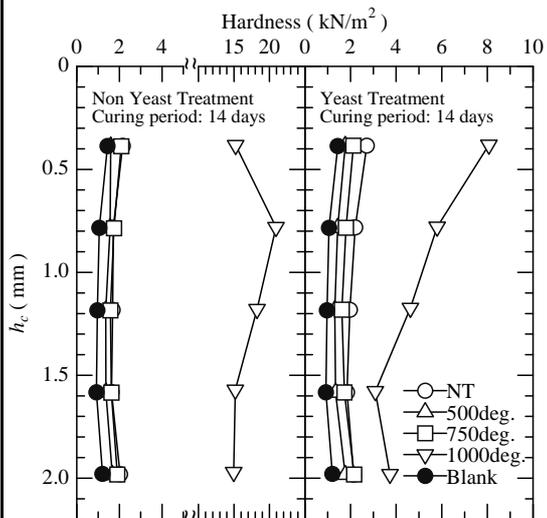


Fig.4 Relationships between hardness and penetration depth for each sample after 14 days

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 4 件)

1. 江口広大, 堀海, 森本愛子, 濱中大介, 金山素平, 田中史彦, 内野敏剛 (2013), インデントーション法によるバイオフィルムの力学特性評価の可能性, 農業食料工学会九州支部誌, 62: 1-5., 査読有

2. 金山素平, 赤司将高, 中野晶子, 大坪政美, 東孝寛 (2013), カキ殻を用いた土の微生物固化処理に関する基礎的研究. 粘土科学 52: 1-8. , 査読有
3. Kanayama, M., Akashi, M., Ohtsubo, M. and Higashi, T. (2012), Cementation of soil due to carbonate precipitation in the presence of oyster shell. Contaminated Sediments 5:175-186. , 査読有
4. Kanayama, M., Ohtsubo, M., Higashi, T., Tanaka, M. and Soga, K. (2012), Evaluation of microscopic behaviour for clay by using micro-indenter. J. Fac. Agric., Kyushu Univ. 57:189-194. , 査読有

〔学会発表〕(計 7件)

1. 江口広大, 堀海, 森本愛子, 濱中大介, 金山素平, 田中史彦, 内野敏剛, インデンテーション法によるバイオフィルムの力学特性評価の可能性. 農業食料工学会第72回年次大会, 2013年9月10日, 北海道帯広市, 帯広畜産大学
2. 岩本晃嗣, 金山素平, 中野晶子, 東孝寛, 大坪政美, カキ殻を利用した土の微生物固化処理技術に関する基礎的研究. 平成25年度農業農村工学会大会講演会, 2013年9月5日, 東京都, 東京農業大学世田谷キャンパス
3. 堀海, 江口広大, 濱中大介, 金山素平, 田中史彦, 内野敏剛, 成熟した Pseudomonas 属バイオフィルムにおける力学的特性の測定の可能性, 第67回農業機械学会九州支部例会, 2013年9月2日, 大分県別府市, 立命館アジア太平洋大学
4. 金山素平, 中野晶子, 岩本晃嗣, カキ殻を利用した土の微生物固化処理技術に関する基礎的研究 マイクロインデンターを用いた固化処理土の強度評価 . 第4回次世代地盤改良技術に関するワークショップ, 2013年7月31日, 北海道札幌市, 寒地土木研究所
5. Kanayama, M., Akashi, M., Ohtsubo, M. and Higashi, T., Cementation of soil due to microbial activity using waste oyster shell, First international seminar of JSPS core to core program, Collaborative project for soil and water conservation in Southeast Asian watersheds, 2012年8月8日, 福岡県福岡市, 西鉄グランドホテル
6. Kanayama, M., Akashi, M., Ohtsubo, M. and Higashi, T., Cementation of soil due to carbonate precipitation in the presence of oyster shell, The 5th International Symposium on Contaminated Sediments: Sustainable Management and Remediation, 2012年5月23日, Motreal, CANADA

7. 金山素平, カキ殻を用いた土の微生物固化処理に関する基礎的研究, 農業農村工学会九州支部講演会, 2011年10月18日, 大分県別府市, ビーコンプラザ

〔その他〕

ホームページ等

岩手大学-研究者情報

http://univdb.iwate-u.ac.jp/profile.php?ISTActId=SCHKOB0010RIni001&userId=781&lang_kbn=0

6. 研究組織

(1)研究代表者

金山 素平 (KANAYAMA, Motohei)

岩手大学・農学部・准教授

研究者番号: 60398104