

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580357

研究課題名(和文) 有明粘土地盤の強度・圧密特性の把握・解明と嵩上げ盛土時の干拓堤防の安定性評価

研究課題名(英文) Investigation of the strength and consolidation characteristics of Ariake clay grounds and stability evaluation of the reclamation dike in a raising embankment.

研究代表者

東 孝寛 (HIGASHI, Takahiro)

九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00181066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：一面せん断試験や一軸圧縮試験などから求まる有明粘土地盤の非排水せん断強度間の定量的関係を明らかにし、一軸圧縮試験から求まる粘着力を短期安定問題の設計強度として使用できることを検証した。また、有明粘土の強度増加率や内部摩擦角に密度依存性があること、非排水せん断強度の異方性の特徴、ポシュレフの破壊規準の適用性に関する知見、などを把握した。嵩上げ盛土時の干拓堤防の安定性評価・挙動予測に関しては、有限要素法を用いた圧密変形解析により、すべり破壊の検討や残留沈下予測が可能なが分かった。さらに、ニューラルネットワークモデルにより早期の沈下観測データのみで精度の高い沈下予測ができることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The quantitative relations among the undrained shear strengths of Ariake clay grounds obtained from box shear tests and unconfined compression tests, etc. were clarified. As a result, it was verified to be able to use the cohesions obtained from unconfined compression tests as a design strength of the short-term stability problem. Moreover, the existence of density-dependencies in the rate of strength increase and the internal friction angle, the characteristics of undrained shear strength anisotropy and the findings concerning the applicability of Hvorslev's failure criterion, etc. were grasped for Ariake clay deposits. It was found that the consolidation deformation analysis using finite element method was very useful for the stability evaluation and the behavior prediction of the reclamation dike in a raising embankment. In addition, it was confirmed to be able to carry out the settlement prediction with high accuracy by neural network model using the only early observation data.

研究分野：農業土木学・地盤工学

キーワード：有明粘土地盤 強度特性 圧密特性 干拓堤防 嵩上げ盛土 挙動予測 安定性評価 有限要素法

## 1. 研究開始当初の背景

有明海沿岸域の広大な干拓地は、干拓堤防などの海岸保全施設により防護されている。干拓堤防の基礎地盤（有明粘土地盤）は極めて軟弱な粘土層であり、堤体自重などによる粘土層の圧密沈下により堤防天端高が低下するため、災害に対する防護機能は経年的に低下して行く。そのため、盛土高さが2~3mにも達するような堤防の嵩上げ（工事）が実施されることも多く、最近も嵩上げ盛土中の大きなすべり破壊（事故）が連続して発生していた。このような状況もあり、嵩上げ盛土時の干拓堤防の的確な安定性評価（すべり破壊の検討と沈下予測など）が重要な課題となっており、有明粘土地盤の力学的性質（強度・圧密特性など）の把握・解明と的確な安定性評価手法の開発が期待されていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究開始時、上記の背景を踏まえて、下記の3つの目的（目標）を設定した。

(1) 有明粘土地盤の非排水せん断強度特性の把握・解明である。具体的には、地盤（有明粘土）の非排水せん断強度に影響を及ぼす試料の乱れや強度異方性、試験条件の違いなどの影響度について実験的に定量化し、嵩上げ盛土時の干拓堤防の的確な安定性評価手法の開発につなげることを意図していた。

(2) 有明粘土の圧密特性（特に二次圧密特性）の把握・解明である。嵩上げ盛土による干拓堤防の残留沈下量を的確に評価（予測）すること、ならびに有限要素法（FEM）による圧密変形解析に使用する土の構成モデルの圧密に関するパラメータの精度向上を目指していた。

(3) 嵩上げ盛土時の干拓堤防の的確な安定性評価手法の開発である。具体的には、以下の様な内容である。

我が国において多用されている一軸圧縮試験から求める粘着力を土（粘土）の非排水せん断強度（設計強度）として使用する方法の有明粘土地盤への適用性についての検討。

比較的簡便な地盤の非排水せん断強度評価手法として提案されている、水平（堆積面に平行）に切り出された供試体を有効上載圧力で圧密したときの定体積一面せん断強度を安定性評価の際の土の設計強度として使用する方法の有明粘土地盤への適用性についての検討。

上記（1）についての検討結果を踏まえた上でのすべり破壊検討のための安定解析に使用する土（粘土）の非排水せん断強度（設計強度）の合理的な決定方法についての検討。

弾塑性有限要素法（FEM）による二次元の圧密変形解析手法を用いた嵩上げ盛土時の干拓堤防の安定性評価（すべり破壊の検討）と挙動（沈下）予測についての検討と実問題

への適用。

## 3. 研究の方法

(1) 有明粘土地盤の非排水せん断強度特性の把握・解明

乱した（練返し）試料や乱さない（不攪乱）試料についての室内での土質試験（各種物理・化学試験や力学試験（一軸圧縮試験、一面せん断試験、室内ペーンせん断試験など））を実施するとともに、既存の土質試験データを活用して検討した。

(2) 有明粘土地盤の圧密特性の把握・解明

乱さない試料についての段階載荷や定ひずみ速度載荷による圧密試験を実施するとともに、既存の圧密試験結果や干拓堤防実測沈下データなどを活用して検討した。

(3) 嵩上げ盛土時の干拓堤防の的確な安定性評価手法の開発についての検討

(1)と(2)により得られた知見と、実際にすべり破壊を起こした地点の現地調査結果（土質試験結果を含む）、弾塑性有限要素法（FEM）による圧密変形解析手法を用いた数値シミュレーション結果などを併用して検討を進めた。

## 4. 研究成果

(1) 有明粘土地盤の強度特性

東岸域（筑後川、菊池川下流域）、北岸域（佐賀県南西部）、西岸域（長崎県諫早湾沿岸）の各試料土の既存の土質試験結果、および新たに実施した北岸域の乱さない試料土についての土質（物理・化学・力学）試験結果をもとに検討した。その結果、有明粘土の強度増加率や内部摩擦角に密度（間隙比）依存性があり、特に西岸域（諫早）試料では、圧密による骨組み構造の変化の影響が強く示唆され、ボッシュ（Hvorslev）の破壊規準は適用できず、一般化したボッシュの破壊規準が適用できることが明らかとなった。

乱さない有明粘土の一軸圧縮試験から求める粘着力（一軸圧縮強度の1/2）、室内ペーンせん断強度は、それぞれ有効土被り圧で圧密後の定体積一面せん断強度の0.85~0.90、0.75~0.80倍程度となることを明らかにした。さらに、北岸域の乱さない有明粘土試料では、試料の乱れ（主に応力解放）に起因する強度低下が顕著（38~66%（平均で約56%）の低下）なことや非排水せん断強度の異方性が存在すること、主動せん断方向と受働せん断方向の中間方向にせん断する（y方向せん断という）場合の非排水せん断強度は、水平方向に切り出した供試体の同一圧密条件下での非排水せん断強度とほぼ一致すること、非排水せん断強度の異方性が有効土被り圧よりかなり高い圧密圧力で圧密するとほぼ消失すること、ボッシュの破壊規準が適用できること、などを確認した。

北岸域の乱さない有明粘土試料では、東岸

域（菊池川河口）試料と同様に，有効土被り圧の1.5倍以上の圧密圧力で圧密した場合，定体積一面せん断時のベクトルカーブ（せん断応力-有効垂直応力関係）は，原点に対してほぼ相似となり，強度増加率や内部摩擦角，有効垂直応力比は，それぞれほぼ一定となることを確認した。これらの一定となる値は，同程度の破壊時の乾燥密度を有する西岸域（諫早）試料の値とほぼ一致した。

乱さない有明粘土を純水によって溶脱（リーチング）した場合は，鋭敏比が極端に大きいクイックレーとならなかったが，人工海水を通水することにより試料をナトリウム飽和させた後に純水によって溶脱した場合は，クイックレーとなった。また，何れの場合も試料土の強度増加率や内部摩擦角などは，溶脱を受けなかった試料土とほぼ同じであった。有明粘土がクイックレーとなる条件は，間隙水中の塩濃度の低下だけでなく，1価のナトリウムイオンに対する2価のカルシウムイオンの割合が小さくなる必要があることが分かった。

#### (2)有明粘土の圧密特性

東岸，北岸，西岸域の各試料土についての既存の段階載荷と定ひずみ速度載荷による圧密試験結果，ならびに新たに実施した北岸域の乱さない試料土についての両圧密試験結果，既存干拓堤防の沈下データ，などをもとに検討した。その結果，有明粘土の正規圧密過程における圧縮指数，体積圧縮係数，圧密係数には，載荷方法やひずみ速度の違いによる影響は認められないことや，定ひずみ速度載荷による圧密試験から求まる圧密降伏応力はひずみ速度が大きいほど大となること，などを確認した。

有明粘土の練返し・乱さない試料の圧縮指数と初期間隙比，膨張指数と圧縮指数の関係，などが再整理できた。

#### (3)嵩上げ盛土時の的確な安定性評価手法（挙動（沈下）予測手法）の開発（圧密特性の解明とも関連）

東岸域の既存干拓堤防を解析対象として選定し，既存の1次元の圧密沈下量評価手法の妥当性の評価や沈下観測データを用いた沈下予測手法についての検討を行った。その結果，ボーリング調査結果から求めた既存干拓堤防基礎地盤（有明粘土層）の圧密沈下量と，既存の1次元圧密沈下量計算法（圧縮指数法）から求まる圧密沈下量がほぼ一致することや，改良したニューラルネットワークモデルにより比較的早期の沈下データのみで精度の高い圧密沈下予測ができること，などを確認した。なお，嵩上げ盛土に伴う圧密沈下は，堤防基礎の有明粘土地盤が正規圧密地盤であり，一次圧密が長期間継続することを考慮して，二次圧密は主な研究対象としないことにした。

#### (4)嵩上げ盛土時の的確な安定性評価手法（すべり破壊の検討と挙動予測手法）の開発

4.(1) で記したように一軸圧縮試験と圧密定体積一面せん断試験から求めた非海水せん断強度の比較から，一軸圧縮試験から求まる非排水せん断強度（粘着力）が短期安定問題における設計強度として使用できることを検証した。同時に，地表面に水平方向に切り出した供試体を有効土被り圧で圧密した後に定体積せん断して求まるせん断強度を設計強度として用いる方法も実用的な手法であることを確認した。

すべり破壊検討のための安定解析に使用する粘性土の非排水せん断強度（設計強度）の決定方法としては，従来通り一軸圧縮試験を主に用い，必要に応じて圧密定体積一面せん断試験（シンウォールサンプリング試料から地表面に水平に切り出した供試体を有効土被り圧で圧密）を併用する方法が簡便で実用的な方法として最適である。

安定性評価手法としての有限要素法による圧密変形解析手法に関しては，北岸域と東岸域の既存干拓堤防を解析対象として選定し，嵩上げ時などの堤体や基礎地盤の挙動予測を有限要素法を用いて行うために必要な解析モデル（メッシュ分割，境界条件の設定など）や入力定数（決定方法などを含む），解析方法（擬似モードの発生など）について再検討した。そして，有明海北岸域の過去にすべり破壊を起こした既存干拓堤防を解析対象として，弾塑性有限要素法を用いた圧密変形解析を実施した。その結果，実際のすべり破壊の特徴を定性的には説明することができた。

最後に，本研究の経費で新たに採取した試料土（熊本県白川河口域で採取）についての土質試験がまだ完了していないことから，今後早急に実施し，これまでに得られた研究成果とあわせて，取りまとめを実施する予定である。さらに，実際の破壊事例についての弾塑性有限要素法による圧密変形解析結果も定量的には実現象（すべり破壊）を説明することができなかったことから，今後，解析に使用した土の構成モデルと地盤強度の関係や，解析手法，有限要素モデル化などについて再検討する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

Phanny He, Masami Ohtsubo, Takahiro Higashi and Motohei Kanayama, Sensitivity of Salt-leached Clay Sediments in the Ariake Bay Area, Japan, Marine Georesources & Geotechnology, 査読有, Vol.33, Issue 5, 2015, 429-436.

Phanny He, Masami Ohtsubo, Hiroshi Abe, Takahiro Higashi and Motohei Kanayama,

Quick clay development and cation composition of pore water in marine sediments from the Ariake Bay area, Japan, International Journal of Geosciences, 査読有, Vol.5, No.6, 2014, 595-606.

Aflakur Ridlo, Masami Ohtsubo, Takahiro Higashi, Motohei Kanayama and Masanori Tanaka, Effects of pore water salinity on the liquid limit of Mexico City clay and the swelling characteristics of its constituent minerals, Clay Science, 査読有, Vol.16, 2012, 105-110.

Aflakur Ridlo, Masami Ohtsubo, Takahiro Higashi, Motohei Kanayama and Masanori Tanaka, Mineralogy and chemistry of Mexico City clay and their contribution to the unusual geotechnical index properties of the clay, Clay Science, 査読有, Vol.16, 2012, 95-104.

[学会発表](計 11 件)

東 孝寛, 大坪政美, 金山素平, 中野晶子, 有明粘土(山脚試料)の強度異方性, 平成 27 年度農業農村工学会大会講演会, 2015 年 9 月 3 日, 岡山市.

金山素平, 岡村祐貴, Alexander Rohe, Leon A. van Paassen, ニューラルネットワークモデルを使用した地盤沈下予測の検討, 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会, 2014 年 8 月 27 日, 新潟市.

Takahiro Higashi, Masami Ohtsubo, Motohei Kanayama, and Akiko Nakano, Undrained shear strength characteristics of Ariake clay (Yamaashi samples), The fifth international seminar of JSPS core to core program, Collaborative project for soil and water conservation in Southeast Asian watersheds, 2014 年 8 月 7 日, 福岡市.

東 孝寛, 金山 素平, 大坪 政美, 有明粘土(諫早湾試料)への一般化した Hvorslev の破壊規準の適用, 第 94 回(平成 25 年度)農業農村工学会九州沖縄支部講演会, 2013 年 11 月 6 日, 宮崎市.

金山 素平, Alexander Rohe, Leon A. van Paassen, 東 孝寛, 大坪政美, 早期の沈下実測データに基づいた沈下予測手法の検討, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会, 2013 年 9 月 4 日, 東京都世田谷区.

Motohei Kanayama, Alexander Rohe, Leon A. Van Paassen, Takahiro Higashi, Examination for predicting ground settlement based on measurement records by using neural network model, Third international seminar of JSPS core to core program, Collaborative project for

soil and water conservation in Southeast Asian watersheds, 2013 年 8 月 8 日, Hanoi, Vietnam.

東 孝寛, 大坪政美, 金山素平, 有明粘土(山脚試料)の非排水せん断強度特性, 平成 24 年度農業農村工学会九州支部大会講演会, 2012 年 11 月 1 日, 長崎市.

東 孝寛, 大坪政美, 金山素平, He Phanny, 有明粘土(山脚試料)の一面せん断強度特性, 平成 24 年度農業農村工学会大会講演会, 2012 年 9 月 19 日, 札幌市.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]  
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東 孝寛 (HIGASHI, Takahiro)  
九州大学・大学院農学研究院・准教授  
研究者番号: 00181066

(2) 研究分担者

大坪 政美 (OHTSUBO, Masami)  
九州大学・大学院農学研究院・名誉教授  
研究者番号: 80112316

金山 素平 (KANAYA, Motohei)  
岩手大学・農学部・准教授  
研究者番号: 60398104