

学 位 論 文 題 名

粘土地盤の力学特性に及ぼす年代効果と その定量的評価法に関する研究

学位論文内容の要旨

近年，都市機能の拡張に伴い，「粘土地盤の小ひずみでの変形挙動の評価と予測」が地盤工学の最重要課題の一つとなってきた．一方，自然に堆積した粘土地盤は，長期二次圧縮，土粒子間セメンテーションの付加，等の年代効果により，その変形・強度特性は年代効果が小さい室内再構成土のそれとは随分と異なることが知られている．翻って，自然堆積粘土の力学の現状は，変形・強度特性のモデル化がむしろ先行しており，物性としての年代効果の同定（あるいは定量化）が後追い状態にある．

本論文において著者は，このような現状打破の必要性・緊急性を強調した上で，「自然堆積粘土地盤の力学特性に及ぼす年代効果の評価」に関する工学的的方法論を模索している．年代効果の評価のための物性値として著者は，原位置・室内での測定が容易であり，二次圧縮時の微小な体積変化やセメンテーションの付加に対して敏感かつ確実に反応する微小ひずみ（0.0001%）におけるせん断弾性係数 G_{ssx} に注目している．研究の端緒として，北海道大学地盤工学講座で独自に開発された三軸試験装置を使用し，世界各国から採取した「自然堆積粘土試料とそれらの室内再構成試料」を用いて，両者の力学挙動を比較検討している．要するに，「年代効果のない室内再構成粘土の力学的性質は，年代効果を受けた自然堆積粘土の力学的性質を評価する上での基本となる」，との三笠/Burland の考えを本研究の出発点とし，発展させている．

第2章では，本論文の主たるテーマに関する既往の研究をまとめた．まず，せん断弾性係数に着目した土の構造指標であるメタ安定度指数の概念と定義について論じた．近年，室内試験では，微小ひずみ域での物性値（ヤング弾性係数，せん断弾性係数）が頻繁に測定されている．これらの測定を可能にした高精度な軸変位制御が可能な三軸試験装置や，圧電素子を装着したベンダー圧密試験装置を紹介した．つぎに，年代効果の概念を一次元圧密過程での間隙比と鉛直応力，せん断弾性係数の関係における自然堆積粘土と再構成試料の違いに着目して論じた．また，三笠の基本式に基づきながら年代効果の定量指標であるメタ安定度指数の概念を論じた．最後に，実際の自然堆積粘土とその再構成粘土の圧密試験結果から，メタ安定度指数の実測例を示した．

第3章では，本研究で使用した多機能三軸試験装置の特徴を述べた．自動化された Ko 圧

密方法、データの自動収録が可能な三軸試験装置の概要を説明した。また、再構成試料の作成方法や、自然堆積粘土のB値を高めるために使用した二重負圧法を含めた実験手順をごく簡単に説明した。

第4章では、本研究で用いた自然堆積粘土および採取地盤の概要を述べた。対象とした地盤は我国の沖積海成粘土(有明, 尼崎)および海外4ヶ国の沖積海成粘土, Louiseville(カナダ), Bangkok(タイ), Drammen(ノルウェー), Pusan(韓国)である。各地盤ごとに、サンプリング調査地点, 土性, 基本的な諸物性値の深さ方向の変化について述べた。有明粘土はスメクタイトを含むために単位体積重量は小さく, 逆に Drammen 粘土はロックフラワーを含むために大きい。この他に, 土粒子間に結合性を有する Louiseville や Bothkennaer 粘土地盤では, せん断弾性波速度測定から得られたせん断弾性係数は他の粘土と比べ大きい特徴を明らかにした。

第5章では, 年代効果の少ない室内再構成試料と自然堆積粘土を用いた三軸試験, および段階載荷式圧密試験から得られた力学的性質(圧縮指数 C_c , せん断抵抗角 ϕ' , K_0 値, s_u/σ'_{vc} の値)を比較し, 自然堆積粘土のもつ年代効果の影響について議論した。同時に, 過去に他の研究者により提案されているコンシステンシー限界と土の力学的諸性質との経験・実験式による予測値との比較を行い, 年代効果を反映しないコンシステンシー限界を用いて自然堆積粘土の力学的挙動をどこまで説明できるのか考察した。

第6章では, 近年の室内試験装置の発達によって計測可能となった微小から大ひずみにいたる変形特性(軸差応力最大での軸ひずみ ε_f , E_{sec}/E_{max} , 剛性指数 E_{max}/s_u)について, 再構成および自然堆積粘土の挙動の違いを考察し, 年代効果の影響を議論した。同一地盤中の乱れの少ない自然堆積粘土の $E_{sec}/E_{max} \sim \varepsilon_f$ 関係はほぼ同様な低減曲線となること, および粘土の種類によらず剛性指数 E_{max}/s_u は約 500~700 の値をとることを示した。一方, 再構成試料は自然堆積粘土の $E_{sec}/E_{max} \sim \varepsilon_f$ 関係のほぼ下限となることや, E_{max}/s_u は自然堆積粘土とは異なり, 粘土の種類により 700~1200 の広範囲の値をとることを述べた。

第7章では, 自然堆積粘土のメタ安定度指数 $MI(G_{max})^{1/2}$ と非排水せん断強度比との関連を検討し一定の相関性を明らかにした。例えば, 粘土層下部砂礫層からの地下水のくみ上げによる圧密が生じていると推定される Bangkok 地盤では, $MI(G_{max})^{1/2}$ は粘土層下部ほど小さい傾向があり, しかも, 地盤の有効応力履歴状況に対応するように粘土層下部の試料の s_u/σ'_{vc} が再構成試料に近づくことから, 年代効果を反映した「構造」指標として $MI(G_{max})^{1/2}$ は工学的に有用であることを立証した。

第8章では, メタ安定度指数の工学的適用を検討した。室内試験から得られた $MI(G_{max})^{1/2}$ と s_u/σ'_{vc} の関係に, 原位置せん断弾性波速度試験から得られる深さ方向に連続して得られる $MI(G_f)^{1/2}$ を代用し, 数個の自然堆積粘土供試体およびその再構成試料を用いた室内せん断試験と原位置せん断弾性波速度測定結果をもとに, 深さ方向に連続した非排水せん断強度を推定する方法, MILK 法(Metastability Index coupled with Laboratory Ko consolidation)を提案した。さらに, 提案法の適用を世界3ヶ国にわたる粘土地盤(有明, Drammen, Bangkok)で試み, MILK 法の工学的意義を明らかにした。

第9章は, 本論文で得られた結論のまとめである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	三田地利之
副査	教授	石島洋二
副査	教授	三浦清一
副査	助教授	澁谷啓

学位論文題名

粘土地盤の力学特性に及ぼす年代効果と その定量的評価法に関する研究

自然堆積の粘土地盤は、長期二次圧縮、土粒子間セメンテーションの付加等の年代効果を受けていることから、その変形・強度特性は年代効果のない室内再構成土のそれとは大きく異なることが知られている。一方、自然堆積粘土に関する力学の現状は、変形・強度特性のモデル化がむしろ先行しており、物性としての年代効果の同定（あるいは定量化）が後追い状態にある。また、近年の都市機能の拡張に伴い、粘土地盤の小ひずみでの変形挙動の評価と予測が地盤工学の最重要課題の一つとなってきた。

以上のような背景のもと、著者は、原位置・室内での測定が容易であり、二次圧縮時の微小な体積変化やセメンテーションの付加に対して敏感かつ確実に反応する微小ひずみ（ 10^{-6} オーダー）におけるせん断弾性係数 G_{max} に注目し、自然堆積粘土地盤の力学特性に及ぼす年代効果の評価に関する工学的的方法論を模索している。本研究はその出発点として、「年代効果のない室内再構成粘土の力学的性質は、年代効果を受けた自然堆積粘土の力学的性質を評価する上での基本となる」との三笠/Burlandの考えを発展させ、世界各国から採取した自然堆積粘土試料とそれらの室内再構成試料を用いた力学挙動の比較検討を行ったもので、9章で構成されている。

第1章では、研究の背景、目的および論文の構成について述べている。

第2章では、本論文の主たるテーマに関する既往の研究をまとめている。まず、微小ひずみ域での物性値（ヤング弾性係数、せん断弾性係数）の測定を可能にした高精度な三軸試験装置や、圧電素子を装着したベンダー圧密試験装置を紹介している。さらに、年代効果を一次元圧密過程での間隙比と鉛直応力、せん断弾性係数の関係における自然堆積粘土と再構成試料の違いに着目して論ずるとともに、年代効果の定量指標として、せん断弾性係数に着目した土の構造指標であるメタ安定度指数 $MI(G)^{PL}$ の概念を論じ、自然堆積粘土とその再構成粘土の圧密試験から、 $MI(G)^{PL}$ の実測例を示している。

第3章では、著者の所属する研究室で独自に開発され、本研究に使用した多機能三軸試験装置の特徴を述べるとともに、再構成試料の作成方法や実験手順について説明している。

第4章では、本研究で対象とした地盤すなわち、我国の沖積海成粘土(有明, 尼崎)および海外4ヶ国の沖積海成粘土地盤, Louiseville(カナダ), Bangkok(タイ), Drammen(ノルウエー), Pusan(韓国)の概要を述べている。各地盤ごとに、サンプリング調査地点、土性、基本的な諸物性値の深さ方向の変化について述べるとともに、各粘土についての成因、構成鉱物等の違いに起因する物理・力学的性質の特徴を明らかにしている。

第5章では、室内再構成試料と自然堆積粘土を用いた三軸試験、および段階載荷式圧密試験から得られた力学的性質(圧縮指数 C_c , せん断抵抗角 ϕ' , K_0 値, s_u/σ'_{vc} の値)を比較し、自然堆積粘土のもつ年代効果の影響について議論している。同時に、年代効果を反映しないコンシステンシー限界を用いた既往の経験・実験式によって、自然堆積粘土の力学的挙動をどこまで説明できるのか検討している。

第6章では、微小から大ひずみに至る変形特性(軸差応力最大での軸ひずみ ε_f , E_{sec}/E_{max} , 剛性指数 E_{max}/s_u)について、年代効果の影響を検討している。その結果、同一地盤中の自然堆積粘土の $E_{sec}/E_{max} \sim \varepsilon_f$ 関係はほぼ同様な低減曲線を示し、再構成試料は自然堆積粘土の $E_{sec}/E_{max} \sim \varepsilon_f$ 関係のほぼ下限となること、自然堆積粘土の剛性指数 E_{max}/s_u は粘土の種類によらず約 500~700 の値をとるが、再構成試料では粘土の種類により 700~1200 の広範囲の値をとることなどの知見を得ている。

第7章では、自然堆積粘土のメタ安定度指数 $MI(G_{max})^{IL}$ と非排水せん断強度比との関連を検討して一定の相関性を明らかにし、年代効果を反映した「構造」指標として $MI(G_{max})^{IL}$ は工学的に有用であることを立証している。

第8章では、室内試験による $MI(G_{max})^{IL}$ と s_u/σ'_{vc} の関係に、原位置せん断弾性波速度試験から深さ方向に連続して得られる $MI(G_f)^{IL}$ を代用し、数個の自然堆積粘土供試体およびその再構成試料を用いた室内せん断試験と原位置せん断弾性波速度測定結果をもとに、深さ方向に連続した非排水せん断強度を推定する方法、MILK法(Metastability Index coupled with Laboratory K_0 consolidation)を提案している。さらに、提案法を世界3ヶ国の粘土地盤(有明, Drammen, Bangkok)に適用し、MILK法の工学的意義を明らかにしている。

第9章は結論で、本研究で得られた知見を総括している。

これを要するに著者は、せん断弾性係数に着目した土の構造指標であるメタ安定度指数を我国および海外4ヶ国の沖積海成粘土地盤に適用し、年代効果を反映した「構造」指標としてのメタ安定度指数の工学的有用性を示すとともに、室内せん断試験と原位置せん断弾性波速度測定結果をもとに、深さ方向に連続した非排水せん断強度を推定する方法を提案しており、地盤工学とりわけ軟弱地盤工学の発展に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。