

論文の要旨

題目 セメンテーションにより高位化した構造と顕著なクリープ特性を有する粘土の圧縮・圧密特性に関する研究

(Study on the compressibility and the consolidation characteristics of clays with developed structure due to cementation, and with prominent creep behavior)

氏名 宇高 薫

粘性土地盤の変形・沈下挙動を予測する上では、圧密試験によって求められる粘土の圧縮曲線を適切にモデル化する必要がある。実務に用いられる粘性土の圧縮曲線のモデルとしては、間隙比 e と圧密圧力 p の対数 $\log p$ について圧密降伏応力を境として、圧縮指数 C_c と膨張指数 C_s という 2 つの勾配を有する直線で表現される。この慣用的な方法が、現在においても実務では主流と言える。しかしながら、これらの方法では予測が著しく困難な地盤もある。大阪湾沿岸の海成粘土地盤は、過去 300 万年にわたって沈降を続けてきた大阪湾に厚く堆積しながらセメンテーションや年代効果を受けて構造が発達し、上述した単純なモデルでは表現が難しいことが知られている。すなわち、一般的な粘土と比較して、同一の圧力レベルでもより高い間隙比を保持し得る。加えて、圧密圧力が圧密降伏応力を越える直後に圧縮指数 C_c が大きく、その後圧密圧力の増加とともに著しく減少するため、圧縮指数 C_c と膨張指数 C_s による 2 つの直線によるモデルでは表現が難しいのである。近年、これら自然堆積粘土の変形挙動を表現する粘土モデルが数多く提案され、土構造物の解析に適用した事例も多く報告されている。一方、これらの提案されているモデルは、概して一般の技術者には難解と言え、一部の比較的大規模または特殊なプロジェクトにおいて適用されるに留まっており、実際の業務において地盤の解析を行う技術者層にまで広く浸透しているとは必ずしも言えない。

そこで、本研究においては、通常の圧密試験から得られる一次元圧縮曲線を用いて、間隙構造の高位化の程度を評価することを目的とした。まず通常の圧密試験より得られる $e-\log p$ 関係に対して簡易にフィッティングできるモデルを考案した。提案モデルは、圧密圧力が十分に大きいときの圧縮曲線（究極基準圧縮曲線 Ultimate Standard Compression curve）と、それからの乖離の程度を表すパラメータを組み合わせた簡易なものとなっている。本モデルにおいて用いられるパラメータは、粘性土の基本的な指標値である液性限界と関連付けたパラメータを基本に、構造の影響を表現するパラメータを付加したものであることが大きな特徴である。提案した簡易モデルを用いることにより、粘土地盤の一次元圧縮の問題に限定して自然堆積粘土地盤の構造の影響を定量的に評価した。「構造係数 A 」と称する構造の程度を表現するパラメータの分布範囲から、海成粘土の構造の影響を以下のように 4 つに分類することができた。すなわち、「著しく高位な構造を有する（区分Ⅳ： $A>0.15$ ）」、「高位な構造を有する（区分Ⅲ： $0.05<A<0.15$ ）」、「堆積構造の影響は弱い（区分Ⅱ： $-0.05<A<0.05$ ）」および「攪乱などにより構造が低位な粘土（区分Ⅰ： $A<-0.05$ ）」である。

また、更新世から完新世にかけて、地質学的な長い年代を経て堆積した自然の海底地盤では、その強度や圧密・圧縮特性は、圧密時の有効応力のほか土の物理・化学的性質や堆積過程の環境

によっても大きく影響を受けることが分かっている。これらの影響は年代効果 (aging) と総称されるが、わが国の沿岸部に堆積する多くの粘土地盤は、海底に堆積して過去に地表面近くに上昇した履歴がないと考えられるので、擬似過圧密は、主に二次圧密とセメンテーションによって生じていると考えられる。一般に、自然堆積粘土は唯一無二のデータとなることから、試料として貴重であり、得られるデータもばらつきを有する。この意味で、セメンテーションにより高間隙構造を有する自然堆積粘土の力学特性を研究する上での問題の一つは、同様の高間隙構造を実験室内で再現する適切な方法が無いことである。室内で自然地盤と同様の高間隙構造を有する粘土試料を作製する技術を開発することは、このような粘土の力学特性の解明や粘土試料を用いた室内模型実験の精度向上に資するとともに、高間隙構造の形成過程を明らかにする点でも重要であると考える。

そこで、練り返した海成粘土に少量のポルトランドセメントを添加混合し、実験室内においてセメンテーションと再圧密を同時に進行させることで、高間隙構造を有する再圧密粘土試料を作製するための実験的検討を行った。作製した粘土に対しては、一次元圧縮曲線を求め、圧縮指数比、上記の圧縮曲線モデルの当てはめ、微視的構造の比較を行って、圧縮特性の高間隙構造の再現性を検討した。5種類の海成粘土について、セメント添加率と一軸圧縮強さの直線関係を用いて強度発現に必要な最小セメント添加率 $c_0(\%)$ を求め、 c_0 を基準とした少量のセメントを添加し一次的に圧密した試料を作製して、一連の圧密試験を行った。この結果、セメント添加率が $(c_0-2.0)\%$ から $(c_0-3.0)\%$ として再圧密した試料において、圧密降伏応力付近の圧密圧力で圧縮指数が最大となり、圧密圧力の増加とともに逡減してセメントを添加しないときの圧縮指数にほぼ等しくなるという圧縮特性を示した。この場合、構造係数 A が 0.1 程度 (構造が高位、区分Ⅲ) の自然粘土の圧縮曲線と類似する圧縮曲線を示す粘土を室内で作製できた。

さて、圧密沈下予測手法の主要なものとしては、通常的设计レベルでは前述した C_c , C_s を用いた Terzaghi 理論による慣用解析が広く用いられているが、顕著なクリープ特性を有する自然粘土地盤では、二次圧縮指数 C_α を導入して解析されることも多い。一方、粘性土の圧密特性に関するひずみ速度効果が注目されてきているが、沈下予測への適用方法については十分には明らかになっていない。また、このクリープ効果は高さ 2cm の室内試験の供試体の結果を用いて、層厚 20m 以上の粘土層の沈下予測をいかに予測するかという問題と密接に関連している。

そこで、本研究では、粘土の応力～ひずみ関係 (圧縮曲線) がひずみ速度に依存すると考えるアイソタックの概念に基づいた圧密沈下予測手法について検討した。具体的には、定ひずみ速度圧密試験 (以下、CRS 試験) ならびに長期圧密試験結果を基に、圧密降伏応力 p_c をひずみ速度の関数とし、 p_c に下限値 p_{cL} が存在するものとして定式化した。さらに、定式化に際して導入した 2 つのパラメータについて、段階载荷による圧密試験を多用する工学的見地から、広く実務に適用できるように設定することにより、任意のひずみ速度に対応する圧縮曲線群を表現できることを示した (アイソタックモデルの構築)。

構築した曲線群を用いて、ひずみ速度依存性を考慮した長期圧密試験の二次圧密挙動に関する考察を試みた。長期圧密試験結果より粘塑性ひずみに関する二次圧密係数 C_α と、粘塑性ひずみで表した圧縮指数 C_c とを用いて C_α/C_c を算出し、 C_α/C_c の値は一定ではなくひずみ速度によって変化すること、一方、深度分布として整理すると、 0.039 ± 0.003 と極めて狭い範囲に分布するため、 C_α/C_c が粘土の種類やひずみ速度等によらず一定であるとする既往の知見 (Mesri and Castro,

1987)と整合することを示した。

次に、層厚の影響について検討するため、室内では比較的層厚の大きい圧密試験が可能な「分割型圧密試験」を行って、実験結果を上述のアイソタックモデルを用いて考察した。まず、層厚 $H = 200\text{mm}$ までの分割型圧密試験結果では、時間軸を層厚で正規化した過剰間隙水圧挙動がいずれの層厚のケースも概ね合致しており、圧密時間に関する H^2 則が成立することを明らかにした。さらに、構造の発達した東カナダのルイズヴィル粘土や大阪湾粘土 Ma12 では、その高い圧縮性によって過剰間隙水圧の停滞現象が起こることを確認した。次に、アイソタックパラメータと基準圧縮曲線を用いて、過剰間隙水圧の評価に理論解をそのまま適用して有効応力を求める手法により、簡便な沈下計算を実施した。長期圧密試験結果について計算値と実験値を比較したところ、両者の一致度は比較的良好であった。しかしながら、十分に正規圧密領域とならない圧密圧力の範囲での試験結果や、供試体の物性にばらつきなどが想定された場合には、計算結果は実験結果とよく一致しなかった。また、アイソタックモデルを組み込んだ土/水連成解析により、構造が発達した自然堆積粘土の分割型圧密試験の結果をシミュレートしたところ、簡易計算では表現できなかった過剰間隙水圧挙動に顕著な変曲点を生じる現象を再現することができた。 p_c の下限値があるモデルと無いモデルについて計算結果を比較すると、いずれの場合も層厚の異なる粘土層の計算圧密曲線（沈下～時間関係）が層厚によらず最終的に一つの曲線に収束する「仮説 B タイプ」となった。ただし、沈下の終息を表現している点で p_c に下限値があるとする提案モデルの方が現実的である。

以上のように、本研究は、慣用沈下解析の適用が難しい高位化した構造を有する粘土および顕著なクリープ特性を有する粘土について、通常圧密試験で得られるデータにより容易に構築できるモデルを提案した。本モデルを用いることにより、限られた情報を基に、より高精度な沈下予測が可能になることを示した。

なお、本研究の中で解決できなかった主な課題としては、次の 2 点が挙げられる。第一に、室内試験において圧縮挙動を再現するために添加したセメントの効果と、自然地盤におけるセメンテーションによる効果の定量的な関係が不明のままである。長期圧密問題にセメンテーションの効果を検討するためには、今後もデータを蓄積し、さらなる検討が必要である。第二に沈下予測手法については、除荷膨張およびその後の再載荷による沈下過程についてのモデル化がなされていない。膨張過程、再沈下過程が本研究で用いたアイソタックの概念で説明可能かを含め、今後検討が必要である。