

超低ひずみ速度域における 粘性土の一次元圧縮挙動に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、海上空港や海面型廃棄物最終処分場などの建設のため、水深の大きな沖合でも大規模な埋立工事が行われるようになってきた。このような埋立工事を行う地点では、軟弱な粘性土地盤が厚く堆積している場合が多いため、埋立荷重によって生じる圧密沈下、特に二次圧密と呼ばれる長期的なクリープ沈下が地盤工学上問題となる。例えば、関西国際空港では、建設海域の水深が深く、埋立荷重が非常に大きくなるため、沖積粘土層のみならず、地盤改良を行っていない洪積粘土層でも沈下が生じている。洪積粘土層の沈下の特徴は、圧密荷重が圧密降伏応力に近いので、有効応力の増加による沈下より、長期的な二次圧密沈下量が卓越することである。このため、二次圧密挙動の予測が、空港管理の上で極めて重要となる。

しかしながら、従来の一次元圧密理論では、圧密沈下量は有効応力によって一義的に決まるため、二次圧密を含めた粘性挙動に起因するクリープ沈下挙動を予測することができない。このため、粘土固有の粘性的な圧縮挙動を取り入れた“ひずみ速度依存性”に関する研究が最近注目を集めている。

ひずみ速度依存型の一次元圧密モデルでは、土の有効応力-ひずみ関係のひずみ速度依存性を規定した Isotache 則と呼ばれる経験則が使用されている。関西国際空港 II 期島の沈下予測においても Isotache 則が導入されており、従来法よりも沈下量を適切に再現できるとして、沈下予測精度のさらなる向上に向けた研究が現在進められている。沈下予測精度の向上のためには、原位置から採取された不攪乱粘性土試料を用いた室内試験から、ひずみ速度依存性を精度よく定量評価することが要求される。特に、原位置で観測されているような低速ひずみ速度域 (10^{-10}s^{-1} 以下) における圧密特性を明らかにすることが重要となる。従来の研究では、対象地盤から採取した不攪乱粘性土試料を用いて、一定荷重載荷による長期クリープ試験によって、低速ひずみ速度域におけるひずみ速度依存性を評価してきた。しかしながら、この方法では、試験時間が長期化するうえに、試料の不均質性に起因する試験結果のばらつきによって、高い精度でひずみ速度依存性を定量評価することが困難であった。

このような問題を克服するために、本研究では、超低速定ひずみ速度圧密 (SCRS) 試験装置を開発した。SCRS 試験装置は、粘性土供試体に一定のひずみ速度で連続的に荷重を載荷する、ひずみ速度制御型の圧密試験装置である。載荷装置には、高精度デジタルサーボモーターを用いているため、従来の装置に比べて高い精度で軸変位制御が可能であり、載荷中のひずみ速度の急変によるモーターのバックラッシュの影響も極めて小さい。ひずみ速度は、初期高さ 20mm の供試体に対して、 10^{-4}s^{-1} から 10^{-10}s^{-1} の超低速域まで再現することができる。

上述した試験装置の特徴を利用して、試験時間の長期化と試料の不均質の問題を克服するために、本研究では低速ひずみ速度域におけるひずみ速度依存性を詳細に観察する SCRS 試験方法につい

て検討した。その結果、SCRS 試験の载荷中に、ひずみ速度を急激に減少させ、有効応力の変化を計測する方法が有効であることを示した。試験結果の整理、および解釈は、Isotache 則に基づき行われた。Isotache 則は、厳密には、粘塑性ひずみに対する圧縮則であるため、SCRS 試験より得られる全ひずみ量から弾性ひずみを差し引く必要がある。したがって、弾性ひずみの定義および測定が非常に重要となる。しかしながら、粘性土の除荷・再载荷挙動は極めて非線形であり、さらにヒステリシスループを描くため、弾性の定義が難しい。このため、本研究では除荷・再载荷試験により粘性土の弾性係数（膨潤指数）について詳細に検討した。その結果、弾性ひずみの影響は、ひずみ速度急変直後、すなわちひずみ速度の遷移領域に現れることを明らかにしたうえで、任意の粘塑性ひずみ速度における有効応力と粘塑性ひずみ関係の位置を規定する指標 R^p を提案した。

国内外の種々の粘性土試料に対して SCRS 試験を実施し、低速域における粘性土の圧縮挙動を詳細に観察し、Isotache 則の適用性を調べた。従来、一次元圧密においては、粘性土の圧縮挙動は Isotache 則に従うひずみ速度依存性を示すとされてきた。すなわち粘塑性ひずみ速度が一定ならば、 R^p も一定であると考えられていた。しかしながら、多くの粘土において、非常に遅いひずみ速度による载荷では、ひずみ速度が一定であるにもかかわらず、粘塑性ひずみの増加にともない R^p が増加することが確認された。すなわち、低速域では、粘性土供試体は非 Isotache 的に挙動する。

一方、粘性土は温度効果によっても、ひずみ速度依存性よく似た粘性特性を示すと報告されており、このため本研究でも、圧縮挙動の温度依存性について検討した。その結果、同じ粘塑性ひずみ速度で载荷中には温度が高いほど、 R^p が増加する傾向が確認された。これは、高温条件下で圧密荷重が作用すると二次圧密が促進され、粘土粒子間（あるいは、粘土骨格間）の接触面積が増大し、供試体が硬化する“構造化”によるものと考えられる。同様に、同じ温度では粘塑性ひずみ速度が遅いほど R^p が増加することも確認されており、この原因も“構造化”によるものと推察される。すなわち、試験時の温度が高く、粘塑性ひずみ速度が遅いほど、粘性土供試体の“構造化”が進むため、低速域においては、Isotache 則が適用できなくなることで、実験で得られた結果を説明することができる。

最後に、ひずみ速度依存性の程度を α 、“構造化”のしやすさを β によって定量化し、粘性土の物理特性との関係を調べた。 α は粘塑性ひずみ速度の変化に対する R^p の変化率で、 β は一定の粘塑性ひずみ速度における R^p の変化量で定義されるパラメータである。検討の結果、塑性指数の大きな粘土ほど、 α は大きく、 β は小さくなる傾向にあることが確認された。すなわち、塑性指数の大きな粘土ほど圧縮挙動における、ひずみ速度依存性が大きく、Isotache 的に振る舞うと結論できる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 中 洋 行

副 査 教 授 三 浦 清 一

副 査 教 授 藤 井 義 明

副 査 准教授 石 川 達 也

学 位 論 文 題 名

超低ひずみ速度域における

粘性土の一次元圧縮挙動に関する研究

関西国際空港では、建設海域の水深が深く、埋立荷重が非常に大きくなるため、沖積粘土層のみならず、地盤改良を行っていない洪積粘土層でも沈下が生じている。洪積粘土層の沈下の特徴は、圧密荷重が圧密降伏応力に近いので、有効応力の増加による沈下より、長期的な二次圧密沈下量が卓越することである。このため、二次圧密挙動の予測が、空港管理の上で極めて重要となる。

しかしながら、従来の一次元圧密理論では、圧密沈下量は有効応力によって一義的に決まるため、二次圧密を含めた粘性挙動に起因するクリープ沈下挙動を予測することができない。このため、粘土固有の粘性的な圧縮挙動を取り入れた“ひずみ速度依存性”に関する研究が最近注目を集めている。関西国際空港 II 期島の沈下予測においても、土の有効応力-ひずみ関係のひずみ速度依存性を考慮した Isotache 則が導入されており、従来法よりも沈下量を適切に再現できるとして、沈下予測精度のさらなる向上に向けた研究が現在進められている。

沈下予測精度の向上のためには、原位置から採取された不攪乱粘性土試料を用いた室内試験から、ひずみ速度依存性を精度よく定量評価することが要求される。特に、原位置で観測されているような低ひずみ速度域 (10^{-10}s^{-1} 以下) における圧密特性を明らかにすることが重要となる。従来の研究では、対象地盤から採取した不攪乱粘性土試料を用いて、一定荷重載荷による長期クリープ試験によって、低ひずみ速度域におけるひずみ速度依存性を評価してきた。しかしながら、この方法では、試験時間が長期化するうえに、試料の不均質性に起因する試験結果のばらつきによって、高い精度でひずみ速度依存性を定量評価することが困難であった。

このような問題を克服するために、本研究では、超低ひずみ速度圧密 (SCRS) 試験装置を開発した。SCRS 試験装置は、粘性土供試体に一定のひずみ速度で連続的に荷重を載荷する、ひずみ速度制御型の圧密試験装置である。載荷装置には、高精度デジタルサーボモーターを用いており、ひずみ速度は、初期高さ 20mm の供試体に対して、 10^{-4}s^{-1} から 10^{-10}s^{-1} の超低速域まで再現することができる。筆者は、試験時間の長期化と試料の不均質の問題を克服し、低ひずみ速度域におけるひずみ速度依存性を詳細に観察する SCRS 試験方法について検討し、載荷中にひずみ速度を急激に減少させ、有効応力の変化を計測する方法が有効であることを示した。試験結果の整理は、Isotache 則に基づき

行った。また、ひずみ速度依存性を定量的に評価する指標として、任意の粘塑性ひずみ速度における有効応力と粘塑性ひずみの関係の位置を規定するパラメータ $R^{\nu p}$ を提案した。

国内外の種々の粘性土試料に対して SCRS 試験を実施し、低速域における粘性土の圧縮挙動を詳細に観察し、Isotache 則の適用性を調べた。従来、一次元圧密においては、粘性土の圧縮挙動は Isotache 則に従うひずみ速度依存性を示すとされてきた。すなわち粘塑性ひずみ速度が一定ならば、 $R^{\nu p}$ も一定であると考えられていた。しかしながら、多くの粘土において、非常に遅いひずみ速度による載荷では、ひずみ速度が一定であるにもかかわらず、粘塑性ひずみの増加にともない $R^{\nu p}$ が増加することが確認された。すなわち、低速域では、粘性土供試体は非 Isotache 的に挙動する。

一方、粘性土は温度効果によっても、ひずみ速度依存性によく似た粘性特性を示すと報告されており、このため本研究でも、圧縮挙動の温度依存性について検討した。その結果、同じ粘塑性ひずみ速度で載荷中には温度が高いほど、 $R^{\nu p}$ が増加する傾向が確認された。これは、高温条件下で圧密荷重が作用すると二次圧密が促進され、粘土粒子間（あるいは、粘土骨格間）の接触面積が増大し、供試体が硬化する“構造化”によるものと考えられる。同様に、同じ温度では粘塑性ひずみ速度が遅いほど $R^{\nu p}$ が増加することも確認されており、この原因も“構造化”によるものと推察される。すなわち、試験時の温度が高く、粘塑性ひずみ速度が遅いほど、粘性土供試体の“構造化”が進むため、低速域においては、Isotache 則が適用できなくなることで、実験で得られた結果を説明することができる。

最後に、ひずみ速度依存性の程度を α 、“構造化”のしやすさを β によって定量化し、粘性土の物理特性との関係を調べた。 α は粘塑性ひずみ速度の変化に対する $R^{\nu p}$ の変化率で、 β は一定の粘塑性ひずみ速度における $R^{\nu p}$ の変化量で定義されるパラメータである。検討の結果、塑性指数の大きな粘土ほど、 α は大きく、 β は小さくなる傾向にあることが確認された。すなわち、塑性指数の大きな粘土ほど圧縮挙動における、ひずみ速度依存性が大きく、Isotache 的に振る舞うと結論できる。

これを要するに、著者は、低速ひずみ速度域における粘性土の一次元圧縮挙動について数々の新知見を得たものであり、地盤工学に対して貢献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があるものと認める。