

粘土の変形挙動におよぼす載荷履歴の影響の 実験的解明とその定式化に関する研究

学位論文内容の要旨

土や金属など塑性挙動を示す材料の構成関係の定式化にあたっては主に弾塑性流れ理論が用いられている。地盤材料の力学的特性の定式化にあたりこの理論を陽な形で適用したのはDruckerとHenkelらやケンブリッジ大学グループが初めてである。特にケンブリッジグループが発表したカムクレイと呼ばれる粘土の構成モデルは、粘土のいくつかの特徴的な力学挙動、すなわちせん断載荷履歴のみならず等方載荷履歴によっても塑性硬化が生じることやダイレタンシー等、の定性的な説明が可能であり、現在においては粘土の標準的な構成モデルとなっている。

しかしこのモデルには、次に述べる2つの大きな問題がある。第一は、等方過圧密履歴を受けた粘土について、実際の変形挙動とカムクレイから予測される変形挙動の違いが著しいことである。第二は、せん断履歴を受けた粘土の実際の力学挙動は著しい異方性を示すのに対し、等方硬化モデルであるカムクレイはこれを表現できないことである。このようにカムクレイは載荷履歴を受けた粘土の変形挙動を十分に予測することができず、この問題を解決すべく研究が活発に進められてはいるが、未だに十分な成果が得られていないのが実情である。

本研究では、まず粘土の降伏挙動におよぼす等方過圧密履歴とせん断履歴の影響を解明するための一連の実験を行い、新たに提案するひずみパラメータである面積ひずみを用いて実験結果の整理を行うことにより、等方過圧密粘土の降伏挙動とせん断履歴を受けた粘土の異方降伏挙動が統一的に説明できることを明らかにした。この知見は粘土の降伏挙動の理解に関する新たな地平を切り開くものであるのと同時に、カムクレイ誘導の際の最も基本的な仮定である状態境界面の概念に対して疑問を呈するものであり、また弾塑性流れ理論によって異方性を定式化する際に広く用いられる移動硬化の概念に対しても、その粘土への適用の可否について疑問を呈するものである。

次に本研究ではこの知見を基本とする構成モデルの提案を行っており、モデルと実験結果の比較から、提案モデルが定性的のみならず定量的にも十分な精度で載荷履歴を受けた粘土の応力～ひずみ関係を予測できることを示した。

本論文は7章からなっており、以下にその構成について述べる。

第1章では研究の背景と論文の構成について述べている。

第2章では本研究に関連する既往の研究の概観を行い、本研究の着想にいたった背景とその位置づけについて明らかにしている。

第3章では粘土の力学特性におよぼす載荷履歴の影響を調べるために行った一連の実験について説明している。試料には再構成粘土を使用しており、全体で4つのシリーズからなる三軸圧縮と中空ねじり試験を行った。

第4章では新たなひずみパラメータである σ_3' 軸を法線とする面の面積ひずみ $\bar{\omega}_3$ の提案を行い、この $\bar{\omega}_3$ を用いて実験結果を整理することにより、過圧密粘土の降伏挙動とせん断履歴を受けた粘土の異方降伏挙動が統一的に解釈できることを示している。またカムクレイの基礎となる状態境界面の概念の妥当性や、塑性面積ひずみと塑性体積ひずみの関係、主応力軸と塑性主ひずみ増分軸の共軸性の有無などについても論じている。

第5章では平均有効応力一定条件下における構成モデルを提案している。またモデルと実験結果の比較から、過圧密粘土の降伏挙動やダイラテンシー挙動に現れる過圧密比依存性、せん断履歴を受けた粘土の変形挙動に現れる誘導異方性など、既存のモデルでは十分に表すことのできない粘土の挙動を、提案モデルが定量的にも十分な精度で表現できることを示している。

第6章では第5章で提案したモデルを平均有効応力が変化する条件下においても適用できるように拡張している。拡張されたモデルは非排水せん断試験の有効応力経路や応力～ひずみ関係などを十分な精度で表現可能である。またせん断応力のみならず平均有効応力も変化する応力経路に沿って載荷する際の排水せん断挙動についても精度よく予測可能であることを示している。

第7章は本研究の結論であり、得られた成果についてまとめるとともに、今後の課題と展望について述べている。

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

粘土の変形挙動におよぼす載荷履歴の影響の 実験的解明とその定式化に関する研究

地盤材料の力学的特性のモデルのひとつとしてケンブリッジグループが提案したカムクレイと呼ばれる粘土の構成モデルは、粘土のいくつかの特徴的な力学挙動、すなわちせん断載荷履歴のみならず等方載荷履歴によっても塑性硬化が生じることやダイレタンシー等の説明が可能であり、現時点で粘土の標準的な構成モデルとみなされている。しかしこのモデルは載荷履歴を受けた粘土の変形挙動を十分な精度で予測することができず、この問題を解決すべく研究が活発に進められてはいるが、未だに十分な成果が得られていないのが実情である。

このような背景のもと、本研究は、まず粘土の降伏挙動におよぼす等方過圧密履歴とせん断履歴の影響を解明するための一連の実験を行い、ひずみパラメータとして面積ひずみを用いて実験結果の整理を行うことにより、等方過圧密粘土の降伏挙動とせん断履歴を受けた粘土の異方降伏挙動が統一的に説明できることを明らかにするとともに、この知見を基本として著者が提案したモデルを用いれば、載荷履歴を受けた粘土の応力-ひずみ関係を十分な精度で予測できることを示したもので、7章から構成される。

第1章では研究の背景と論文の構成について述べている。

第2章では本研究に関連する既往の研究の概観を行い、本研究の着想に至った背景とその位置づけについて明らかにしている。

第3章では、粘土の力学特性におよぼす載荷履歴の影響を調べるために行った4つのシリーズからなる一連の三軸圧縮と中空ねじり試験について説明している。

第4章では、新たなひずみパラメータとして σ_3' 軸を法線とする面の面積ひずみ $\bar{\omega}_3$ の提案を行い、この $\bar{\omega}_3$ を用いて実験結果を整理することにより、過圧密粘土の降伏挙動とせん断履歴を受けた粘土の異方降伏挙動が統一的に解釈できることを示している。またカムクレイの基礎となる状態境界面の概念の妥当性や、塑性面積ひずみと塑性体積ひずみの関係、主応力軸と塑性主ひずみ増分軸の共軸性の有無などについても論じている。

第5章では、平均有効応力一定条件下における構成モデルを提案している。またモデルと実験結果の比較から、過圧密粘土の降伏挙動やダイレタンシー挙動に現れる過圧密比依存性、せん断履歴を受けた粘土の変形挙動に現れる誘導異方性など、既存のモデルでは十分に表すことのできない粘土の挙動を、提案モデルが定量的にも十分な精度で表現できることを示している。

第6章では、第5章で提案したモデルを平均有効応力が変化する条件下においても適用できるように拡張している。拡張されたモデルは非排水せん断試験の有効応力経路や応力一ひずみ関係などを十分な精度で表現可能である。またせん断応力と平均有効応力がともに変化する応力経路に沿って載荷する際の排水せん断挙動についても精度よく予測可能であることを示している。

第7章は本研究の結論であり、得られた知見を総括し今後の展望と課題を述べている。

これを要するに著者は、粘土の降伏挙動におよぼす載荷履歴の影響を解明するための一連の詳細な実験結果を基に、新たなひずみパラメータを導入したモデルを提案し、載荷履歴を受けた粘土の応力一ひずみ関係を高い精度で予測できることを示しており、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。