

## 粘性土の弾性係数の測定および評価方法に関する研究

### 学位論文内容の要旨

近年、土質力学および地盤工学の分野において課題となっているものの一つに、長大橋梁の基礎、高層ビル、大規模・大深度掘削・トンネル掘削等や都市部での近接施工時における地盤・構造物系の変位問題がある。実際に、このような地盤掘削や構造物の荷重による地盤内のひずみは1%程度以下、硬質地盤の場合には更に小さいこと（0.1 %程度以下）が報告されており、許容変位は従来の構造物のものに比べて小さく、必要とされる地盤のバネ定数は対象となる地盤材料の微小～小ひずみ域におけるヤング率あるいはせん断弾性係数に相当する。

このような背景により、研究レベルにおいても地盤材料の微小～小ひずみ領域における変形特性に関する研究が精力的に行われ始め、20世紀後半の情報・コンピュータ技術の急速な発展に伴い、高々10cm程度の土供試体要素の微小な変形を高精度に測定あるいは制御することが可能となってきた。

しかしながら、この種の研究において対象となっている地盤材料を比較すると、粘性土に関するものが最も少ない。これは、大規模・重要構造物は硬質地盤材料の上に建設されることが多く、このような小ひずみレベルでの変形特性の把握が不可欠である事例が決して多くはないこともあるが、以下に挙げる粘性土に特有の試験方法および試験結果の解釈に関する困難さによる部分も大きいと考えられる。まず、粘性土は他の地盤材料に比べて剛性が低く、弾性的な挙動示す領域が極めて小さいこと。次に、他の地盤材料に比べて変形挙動におけるひずみ速度、クリープなどの粘性に起因する要因や载荷開始前の応力・ひずみ・時間履歴の影響などが顕著であること。さらに、粘性土は他の地盤材料に比べて透水係数が小さいために、試験が長期化することである。

そこで本研究では、対象とする地盤材料を粘性土に限定し、主に室内三軸試験によって以下の3つの事項を目的とし、これらを明らかにした。第1には、上記の3つの問題点をクリアし、粘性土のヤング率やせん断弾性係数といった弾性係数を正確に測定するための試験装置・方法の開発である。第2には、各種弾性係数（排水・非排水ヤング率、せん断弾性係数）の増減を支配する要因の把握やこれらの定式化といった評価方法の確立である。第3には、弾性係数をその後の変形挙動を支配する重要な物性値（ベンチマーク的存在）の一つと考え、他の力学的性質との関連などを把握することにより、弾性係数を工学的に応用することについての検討である。

本論文は7章から構成され、各章の概要は以下の通りとなっている。

第1章は序論とし、本研究の背景・目的について記載するとともに、本研究に深く関連する文献をまとめ、本研究の位置づけを行っている。

第2章は高精度三軸試験装置・方法の開発とし、高精度の軸変位の載荷・測定を可能にしたデジタルサーボモーターについてなど、本研究のために開発した試験システムのメカニカルな部分の特徴を詳述するとともに、より高精度な試験結果を得られるための試験方法上の工夫点および性能を生かした幾つかの試験例を示すことにより、本試験システムの多面的な性能を評価している。

第3章はベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数の評価とし、送・受信波時刻歴の自動記録を目的として開発したせん断弾性波速度測定システムの詳細を述べた上で、送信波の波形・周波数、伝達距離、ベンダーエレメントの初動の向きなどに着目して実施された数多くの試験結果より、せん断弾性波の見極めを困難にする near-field-effect を考慮した伝播時間同定法の提案を試みている。

第4章は非排水条件下におけるヤング率の定式化とし、粘性土の弾性係数に影響を及ぼす諸要因について検討した結果、圧密履歴に伴う間隙比と弾性係数の相互関係が粘性土特有の  $e \sim \log p'$  関係と強い相関があることを見出し、この関係を用いて、諸要因の影響を考慮し得る定式化を試みている。さらに、物性の異なる試料による試験結果との比較や定式化に用いたパラメータに関する検討、更には他の研究成果との比較などから、定式化結果の汎用性についても議論している。

第5章は弾性係数の相関とし、クリープの影響に着目して排水条件下における弾性係数の評価方法について検討した上で、ベンダーエレメント試験より得られたせん断弾性係数、前章で議論した非排水条件下でのヤング率を含めて3つの弾性係数の応力レベル依存性や等方弾性体の仮定の是非、更にはポアソン比などについて議論している。

第6章は弾性係数の工学的な応用とし、第4章より明らかになった圧密・膨張履歴に伴う間隙比と弾性係数の相互関係と、粘性土の代表的な特性である  $e \sim \log p'$  関係との強い相関を応用し、弾性係数を非排水せん断強度の推定や圧密降伏応力の特定および過圧密比の算定に適用すること、更には実地盤の年代効果の程度を表現する指標として用いる方法についても検討している。

第7章は結論とし、2～6章において得られた知見について、簡単にまとめた上で、今後の展望と課題を述べている。

# 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

### 粘性土の弾性係数の測定および評価方法に関する研究

一般に地盤材料は剛性が低く、弾性的な挙動を示すひずみが極めて小さいことから、これまで弾性係数の正確な測定と評価が困難で、実務的には塑性ひずみも含んだいわゆる変形係数を設計に用いたり、ひずみレベルに応じてその領域の平均的な弾性係数を用いるといった便法が講じられてきた。しかし近年、高層ビルや長大橋梁の基礎などの大深度掘削において生じる地盤内のひずみの評価、あるいは都市部での近接施工時における地盤・構造物系の変位問題等において、0.1%程度以下のひずみレベルにおける地盤の変形挙動の把握が重要となってきた。このような背景により、0.001~0.1%程度のひずみ領域における地盤材料の変形特性に関する研究が精力的に行われ始め、情報・コンピュータ技術の急速な発展とともに、小さな土供試体を用いる室内試験分野の計測・制御技術も大きく進歩した。しかしながら、粘性土に関するこの種の研究例は極めて少ないのが現状である。これは、大規模・重要構造物は硬質地盤材料の上に建設されることが多く、微小ひずみレベルでの変形特性の把握を不可欠とする事例が必ずしも多くないこともあるが、粘性土に特有の試験の実施および結果の解釈に関する困難さによる部分も大きい。すなわち、粘性土では変形挙動に及ぼすひずみ速度、クリープなどの粘性に起因する要因や載荷開始前の応力・ひずみ・時間履歴の影響などが顕著である。さらに、他の地盤材料に比べて透水係数が小さいために、試験が長期化する傾向がある。

以上のような背景のもと、本研究は、粘性土の弾性係数を正確に測定するための試験装置・方法を開発し、弾性係数の評価方法を確立するとともに、他の力学的性質との関

連を把握することにより，工学的な応用に関する提案を行ったもので，7章からなる．

第1章では，研究の背景とその目的を明らかにするとともに，関連する既往の研究を要約し，本研究の位置づけを行っている．

第2章では，本研究のために開発した高精度三軸試験装置および試験システムの特徴を詳述するとともに，より高い精度の結果を得るための試験方法上の工夫点および性能を生かした幾つかの試験例を示して，本試験システムの多面的な性能を評価している．

第3章では，各種室内力学試験装置に装着したベンダーエレメントに対する任意な電圧波形の送信と得られた送・受信波時刻歴の自動記録を目的として，新たに開発したせん断弾性波速度測定システムの詳細を述べた上で，送信波の波形・周波数，伝達距離などに着目して実施した数多くの試験結果より，送信波の伝播時間同定法の提案を行っている．

第4章では，粘性土の非排水条件下における弾性係数に影響を及ぼす諸要因について検討し，圧密履歴に伴う間隙比 $e$ と弾性係数 $E$ の関係が粘性土特有の $e \sim \log p'$  関係と強い相関があることを見出し，圧密履歴の影響を考慮した定式化を行っている．さらに，物性の異なる試料による試験結果との比較や定式化に用いたパラメータに関する検討，既往の研究成果との比較を通じて，定式化結果の汎用性について論じている．

第5章では，クリープの影響に着目して排水条件下における弾性係数の評価方法について検討した上で，ベンダーエレメント試験より得られたせん断弾性係数，前章で議論した非排水条件下でのヤング率を含めて3つの弾性係数の応力レベル依存性や等方弾性体の仮定の是非，さらにはボアソン比の評価などについて論じている．

第6章では，第4章で明らかになった $e \sim \log E$ 関係と $e \sim \log p'$  関係の強い相関を応用することによって，弾性係数を非排水せん断強度の推定や圧密降伏応力の特定および過圧密比の算定に適用すること，さらには実地盤の年代効果の程度を表現する指標として用いる方法についても検討している．

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，軟弱な粘性土の微小なひずみ領域での変形を正確に測定するユニークな実験手法を開発した上で，弾性係数の評価方法を確立するとともに，粘性土特有の工学的諸性質の推定方法に関する有用な提案を行っており，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．