

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 早野 公敏

堆積軟岩は、海底等に堆積した粘土・シルト・砂等の土質材料が長期に亘る密度化や粒子間膠着等の続成作用により剛性・強度が増加した地盤材料であり、硬岩に到る過程の途中にある。堆積軟岩の地盤は、我が国では広く存在していて、近年では長大橋梁・高層ビル・原子力発電所・ロックフィルダム、トンネル・大深度大規模地下構造物の基礎地盤として活用されている。

従来から堆積軟岩上や内部に構造物を建設することは少なくなかった。工事規模は相対的に小さいため、通常建設工事に伴う応力変化による堆積軟岩地盤の安定性や地盤変形の大きさは全く問題にならなかった。そのため、堆積軟岩の破壊前の小ひずみレベルでの変形特性を詳細に検討する必要性は一般に少なかった。従来は、原位置堆積軟岩地盤で平板載荷試験や孔内載荷試験を行い、地盤を一様等方線形体と仮定してその結果を解析したり、あるいはコア試料の一軸圧縮試験を行い、圧縮強度の 1/2 での割線ヤング率を求める場合が多かった。しかし、これらの試験法で得られた剛性は相互に整合せず、また実地盤の変形から逆算した剛性よりも一般に小さすぎる場合が多かった。

近年、連続性が高い通常の堆積軟岩地盤では、原位置弾性波速度から求めた弾性状態の変形特性（ヤング率、せん断剛性率）と、三軸試験において乱れの少ないコア試料を原位置と同じ応力状態で圧密して正確に微小ひずみを測定することにより得られた弾性変形特性は基本的に一致することが明らかになってきた。更に、このようにして求めた弾性変形特性を基本にして、変形特性の拘束圧とひずみレベルに対する非線形依存性を考慮することにより建設に伴う軟岩地盤の変形を推定する方法が提案され、実務でも用いられるようになってきた。しかしながら、堆積軟岩の変形特性の詳細については、不明な点が非常に多いのが現状である。本研究は、変形特性のひずみレベルに対する非線形依存性に加えて、変形特性の拘束圧依存性と堆積軟岩の種類の関係、弾性的変形特性の固有異方性体、弾性変形特性の三次元応力状態に対する依存性と応力状態誘導異方性、変形特性の載荷履歴に対する依存性、クリープ変形特性等の粘性について精密な室内実験による研究で明らかにしようとしたものである。

第1章は、序論であり、以上のような研究の背景と目的がまとめられている。

第2章では、まず神奈川県相模原市、東京湾口海底地盤、東京都内の建設現場・建設予定地点の原位置地盤から採取した本研究で用いた不攪乱試料を説明している。対象地盤は、いずれも第四紀初頭の上総層群の堆積軟岩（泥岩と細砂岩）である。次に、本研究のために開発した2種類の室内せん断試験装置を説明している。即ち、拘束圧の容量が 30 kgf/cm^2 であり円柱形の供試体を用いる中圧三軸試験装置と、直方体の供試体を用いる中圧三主応力試験装置である。載荷・記録は、全自動化してある。特に、後者では

軸ひずみとともに側方ひずみを局所変形測定装置(LDT)を用いて正確に測定でき、また同一の供試体を用いて鉛直と水平方向のヤング率・ポアソン比を任意の三次元応力状態で測定出来る所に新規性がある。

第3章は、室内試験計画の説明と本研究で開発した試験方法の説明である。特に、任意の応力経路に沿って任意のひずみ速度での単調載荷、単調載荷試験の途中の任意の応力レベルでクリープ試験を実施してクリープ試験後も単調載荷を再開したり、単調載荷の途中でひずみ速度を任意にかつ大幅に変更する試験法を開発している。特に、従来のクリープ試験法では供試体キャップの変位量からクリープ軸ひずみを求めるが、この方法で測定した軸ひずみには大幅で法則性がない誤差が含まれることを新たに見だし、局所的にクリープ軸ひずみを測定する重要性を示している。また、ひずみを局所的に測定する方法の詳細、三主応力試験装置で剛な拘束版と供試体の間の摩擦を除去する方法と摩擦除去の重要性を実証的に示している。

第4章では、円柱供試体を用いた三軸試験により堆積軟岩の微小ひずみ領域における供試体軸方向（原位置での鉛直方向）での弾性ヤング率 E_v を詳細に調べた結果をまとめている。その結果、 E_v には拘束圧依存性があり、同一の地質年代では元々の土の粒径が小さくセメンテーションが発達している堆積軟岩程この依存性が小さいことを示している。また、等方・異方応力状態に拘わらず E_v は基本的に鉛直方向の直応力 σ_v の一義的な関数であり、他の直交方向の直応力には独立であることを示している。

第5章は、第4章に示す実験結果を発展させて、一般の三次元応力状態での堆積軟岩の弾性ヤング率とポアソン比を、三主応力試験装置を用いて詳細に調べた結果をまとめている。様々な等方及び異方応力状態で、直方体供試体の軸応力だけを変化させた試験と側方一方向の直応力だけを変化させた時の軸ひずみと側方ひずみを局所的に精密に測定して、堆積軟岩の初期の構造が異方的であるための固有異方性と応力状態が異方的であるために誘起される異方性を区別して測定している。その結果、相模原市と都内の堆積軟岩地盤では、等方応力状態では水平方向のヤング率 E_h は鉛直方向のヤング率 E_v よりも若干大きいとその差は小さいこと、いずれの方向のヤング率もその方向の直応力が増加することを示している。

第6章では、単調載荷と大振幅繰返し載荷を受ける場合での、破壊前の非線形的な応力・ひずみ関係をモデル化する方法を検討している。その方法として、正規化応力 $y = q/q_{\max}$ (q は偏差応力、 q_{\max} はピーク強度で履歴に対して安定的) と正規化軸ひずみ

$$x = \int dx \quad \left(dx = \frac{d\varepsilon_v}{\varepsilon_r} : \varepsilon_r = q_{\max}/E_v : E_v = f(\sigma_v) \text{ は弾性ヤング率で軸応力 } \sigma_v \text{ の一義的関数} \right)$$

で用いることにより、一般的ひずみ硬化型正規化応力ひずみ関係 ($y \sim x$ 関係) が得ら

れることを示している。この知見は、今後より一般的なモデルを開発する場合の基礎になることと思われる。

第7章では、載荷速度が応力・ひずみ関係に与える影響やクリープ変形等の堆積軟岩の変形特性の時間依存性を、系統的な三軸圧縮試験を行うことにより検討している。その結果、繰返し載荷の有無等について同一の載荷履歴に対して、ひずみ速度に関する履歴の相違に拘わらず、任意の状態における応力値は現在のひずみ（より厳密には非可逆ひずみ）の値とひずみ速度（より厳密には非可逆ひずみ速度）の値により一義的に決定されることを実証した。即ち、時間はこのような変形特性の時間依存性を表現する場合には、不適切なパラメータであることを示している。これに対応して、同一の応力状態で同一の経過時間に対するクリープひずみ量は、クリープ載荷開始時のひずみ速度に支配されることを示した。また、除荷過程でクリープ試験を行うとひずみが時間と共に減少する弾性余効の現象が生じること、繰返し載荷を行うと同一の応力状態では初期載荷時よりもクリープ変形量が減少すること等を明らかにした。

第8章は、第7章で示した実験事実に基づいて、載荷途中にひずみ速度が急変したりクリープ載荷を行ったり除荷を行ったりする任意のひずみ速度履歴を持つ載荷条件に対して応力～ひずみ～時間関係を予測できるモデルを提案している。拘束圧一定の三軸圧縮試験と言う限定された条件ではあるが、第7章で示した実験結果をシミュレーションすることで、このモデルの有効性を実証している。特に、クリープ変形のプロセスを、非可逆ひずみ速度が継続して減少して行く現象として、シミュレーションに成功している。

以上要するに、非常に精密な室内装置と実験方法を開発し、更に系統的な精度の高い実験を行うことにより、従来多くの点が不明であった堆積軟岩の微小ひずみからピーク状態までの変形特性に関して新しい知見を示し、今後の本研究分野の発展及び実務設計の改善に寄与する新しい知見を与えている。これらは、土質工学に分野において貢献することが大である。よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。