

三主応力試験装置を用いた堆積軟岩の変形特性に関する基礎的研究

Fundamental study on the deformation characteristics of sedimentary soft rock from true triaxial tests

早野 公敏*・佐藤 剛司*・古関 潤一*・龍岡 文夫**

Kimitoshi Hayano, Takeshi Sato, Junichi Koseki and Fumio Tatsuoka

堆積軟岩を対象とする土木工事が増加し、特に地盤の変形問題が重要視されている。そこで均質な堆積軟岩の変形特性を明らかにするために、新たに中間主応力を制御できる三主応力試験装置を開発し、角柱供試体の三方向の主ひずみを局所的に測定し、三主応力の自動制御等において、目標とした性能が得られた。また、ヤング率とポアソン比の初期構造の異性が小さい一方で、直応力が増加する方向のヤング率は増加し、直応力が変化しない方向のヤング率はほとんど変化しないという応力状態誘導異性を示すことを明らかにした。

1. はじめに

近年、堆積軟岩を対象とする土木工事が増加している。橋梁の基礎や LNG タンクのような重要構造物の施工や都心部の近接施工では、特に地盤の変形問題が重要視される。そこで、比較的均質な地盤を対象として、堆積軟岩の変形特性に関して基礎的な研究を行なうために、中間主応力を制御できる三主応力試験装置を新たに開発し、角柱供試体の三方向の主ひずみを局所的に測定した。

2. 実験装置

本システム (図1, 図2, 写真1) は、

- ① 三主応力制御三軸セル
- ② 中拘束圧制御システム^[1]
- ③ 中間主応力制御システム
- ④ 高荷重微小変位制御装置システム^[2]

で構成されている。

三主応力制御三軸セル (図2, 写真1) は、中圧三軸セル (最大拘束圧 30 kgf/cm², 最大軸荷重 10 tf) と中間主応力制御装置付拘束板からなる。これは平面ひずみ圧縮試験装置^[3]と同様の基本構造を持つが、中間主応力用ロードセル (容量 5 tf) を取付けた拘束板と相対する拘束板に薄形油圧シリンダーを三個取付けて、中間主応力を 15 kgf/cm² まで制御可能にした。拘束板全体をベアリング

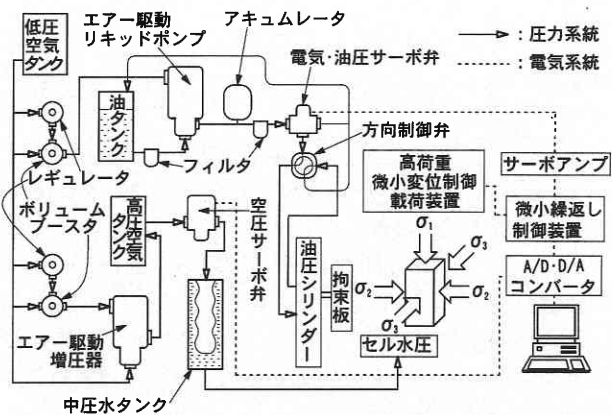


図1 三主応力制御システム全体図

の上に乗せて、拘束板の水平方向の変位を拘束しないようにした。また、供試体の σ_2 面の摩擦をグリースで低減し、その摩擦力をフリクション測定用ロードセル (容量 100 kgf) で確認できるようにした。供試体は σ_2 面の幅 6 cm, σ_3 面の幅 8 cm, 高さ 16 cm の角柱に整形したものをを用いる。3 方向の局所主ひずみの測定は、供試体側面で軸ひずみを縦 LDT で、 σ_2 方向の水平ひずみを 2 箇所 4 個の横 LDT で測定し^[4], σ_3 方向の水平ひずみは二つの高さにセットした二対の非接触変位計で供試体の幅の変化を正確に測定できる。

中拘束圧制御システム (図1) は、低圧縮空気 (10 kgf/cm² 以下) を高圧縮空気 (30 kgf/cm²) に増圧するエア駆動増圧器と、高圧縮空気の圧力を自動コントロ

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻

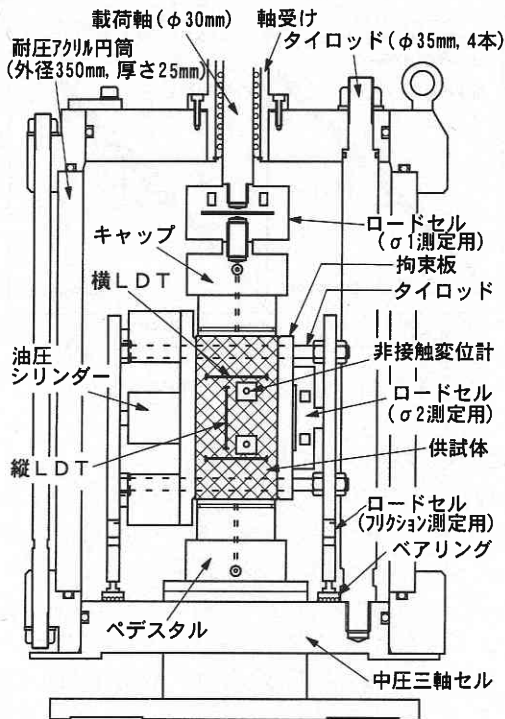


図2 三主応力制御三軸セル

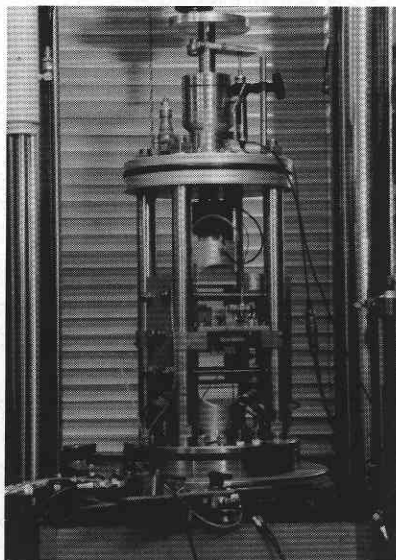


写真1 三主応力制御三軸セル全体写真

ールする空圧サーボ弁, 制御空気圧をセル水圧に変換するバルーンを内蔵した中圧水タンクからなる. エアー駆動増圧器は低圧空気で駆動し, パイロット作動バルブにより自動的にピストン往復運動を行い, 設定圧力で自動停止する. 空圧サーボ弁は, ノズルフラッパー弁タイプでサーボアンブ・圧力センサを内蔵しており, 高い分解能

(0.001 kgf/cm²以下) で高精度のセル水圧制御ができる.

中間主応力制御システム (図1) は, 高油圧源を作り出すエアー駆動リキッドポンプとそれを制御する電気・油圧サーボ弁, 中間主応力载荷油圧シリンダーで構成されている. エアー駆動リキッドポンプの基本的な構造はエアー増圧器と同様である. リキッドポンプと電気・油圧サーボ弁の間に小型アクムレータを付けて油圧の蓄積と脈動の緩和を行う. 電気・油圧サーボ弁は, 定格圧力 140 kgf/cm² で最大流量 0.3 l/min と低流量・超小型で高応答性を有し, サーボアンブとの組み合わせにより小型油圧シリンダーを制御する. 従来非常に大がかりとなった電気・油圧サーボシステムを, 小スペースで精度良く構築する事ができた. 高荷重微小変位制御载荷システムは, 文献 [2] に示すものを用いた.

3. 実験方法

試料は, 上総層郡の堆積軟岩で神奈川県相模原市の実験洞で地下約 50 m の深さからブロックサンプリングにより採取されたものである. 供試体の長軸方向が採取した原地盤に対して垂直あるいは水平方向となるように整形した (図3). 以下では, それぞれを V-供試体, H-供試体と称する. 供試体の飽和化後, 原位置有効上載圧 5 kgf/cm² まで等方圧密を行い, 軸载荷速度 0.0032 mm/min で軸荷重を増加させて排水せん断を行った. せん断中に様々な軸差応力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ で, 微小振幅の鉛直繰返し载荷 (水平応力一定) と中間主応力载荷用拘束板を用いた微小振幅水平繰返し载荷 (鉛直応力一定) を行った.

4. 実験結果及び考察

4.1 応力~ひずみ関係

図4 (a) (b) に q と軸ひずみ ϵ_1 の関係を示す. (a) は V-供試体, (b) は H-供試体の実験結果である. LDT_{ave} は二本の縦 LDT による軸ひずみの平均値, External は, ダイアル・ゲージを用いて三軸セル外部で測定した载荷軸の変位から求めた軸ひずみである. 後者は, Bedding Error^[5] によりひずみを過大評価している. 圧縮強度 q_{max} には明確

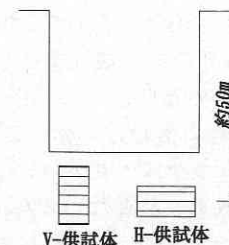


図3 供試体の採取方向

研 究 速 報

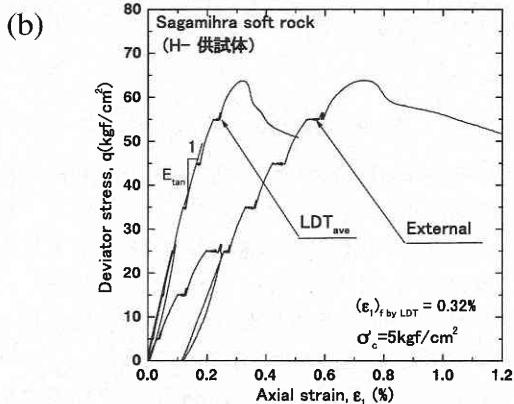
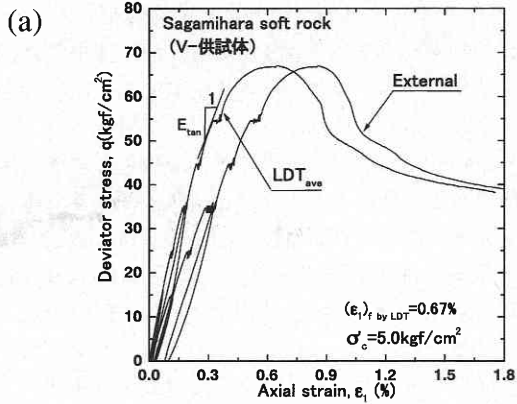


図4 軸差応力qと軸ひずみε₁の関係 (a) V-供試体 (b) H-供試体

な違いが見られないが、破壊ひずみε_fはH-供試体の方が小さい。

4.2 ヤング率E₁, E₂の求め方

弾性係数の応力状態依存性を調べるため、せん断中のいくつかの段階で、以下のような2つの方向の微小振幅繰返し載荷を行った。(1) 鉛直繰返し載荷：水平応力σ₂ = σ₃を一定に保ったまま、供試体の鉛直軸に対して鉛直応力増分dσ₁を変位制御で作用させる微小振幅繰返し載荷を行った。生じるひずみ増分は弾性的な成分dε^eであり、縦LDTの軸ひずみε₁より、供試体の鉛直軸方向のヤング率：E₁ = dσ₁/dε₁^eを求めた。(2) 水平繰返し載荷：鉛直応力σ₁を一定に保ったまま、油圧シリンダーを用いた拘束板の変位により、供試体の一方の水平軸に対して水平応力増分dσ₂を作用させる微小振幅繰返し載荷を行った。もう一方の水平軸方向のσ₃は、一定に保ったままである。鉛直繰返し載荷と同様に横LDTの水平ひずみε₂より、供試体の水平軸方向のヤング率：E₂ = dσ₂/dε₂^eを求めた。図5には鉛直・水平繰返し載荷のヤング率の測定例を示した。弾性的な応力・ひずみ関係が得られていることがわかる。

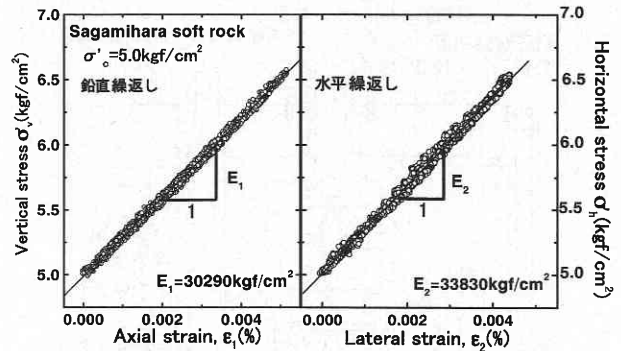


図5 微小振幅繰返し載荷時のE₁, E₂

4.3 変形係数の応力レベル依存性

図4のq ~ ε₁曲線の接線勾配から縦LDTの全軸ひずみ増分dε₁^tに対して接線ヤング率：E_{tan} = dσ₁/dε₁^tを求めた。図6 (a) (b)にV-供試体とH-供試体のE_{tan}とせん断中の2方向の繰返し載荷から得られたE₁, E₂をqに対してプロットしたものを示す。両供試体ともに、qが増加するにつれ、E_{tan}が低下する非線形性を示す。V-供試体は、せん断初期においてE₂がE₁よりもやや大きく、qが増大するにつれてE₁は増加し、逆にE₂は徐々に低下している。一方で、H-供試体ではせん断初期においてE₁ (原位置での水平方向)がE₂よりもやや大きく、qの増加に伴ってE₁の値は増加し、E₂は途中までほとんど変化せず破壊前に大きく低下する。これらの結果から、原地盤では、若干水平方向のヤング率が鉛直方向に比べてやや大きいことが分かる。これは、王による円柱供試体を用いた異方性に関する一連の研究の結論^[6]と整合している。また、直応力が増加するとその方向のヤング率がやや増加する応力状態依存性を示すが、一定直応力方向のヤング率は、せん断を受けてもほとんど変化せず、もしくは低下していくことが分かる。

図7にせん断中のε₁ ~ (ε₂ + ε₃)/2の関係を示す。図中のLocalは、局所測定したものでε₁が縦LDTによる平均値、(ε₂ + ε₃)/2が横LDTと非接触変位計の平均値である。Externalは、外部測定したもので、セル外部のダイヤル・ゲージと供試体の排水量から求めた。外部測定のε₁ ~ (ε₂ + ε₃)/2関係は、図4に見られるようにBedding Errorの影響を強く受けおり、信用できない。局所測定のε₁ ~ (ε₂ + ε₃)/2関係の接線勾配から全ひずみ増分dε^tに対して、接線ポアソン比ν_{tan} = -(dε₂^t + dε₃^t)/2 dε₁^tを定義し、ν_{tan}をせん断応力レベルq/q_{max} (q_{max}は、それぞれの供試体のqの最大値)に対してプロットしたものが、図8である。q/q_{max}が0.5を越えた付近からν_{tan}は急激に増加して破壊に至るが、q/q_{max} = 0.5までは、V-供試体とH-供試体に大

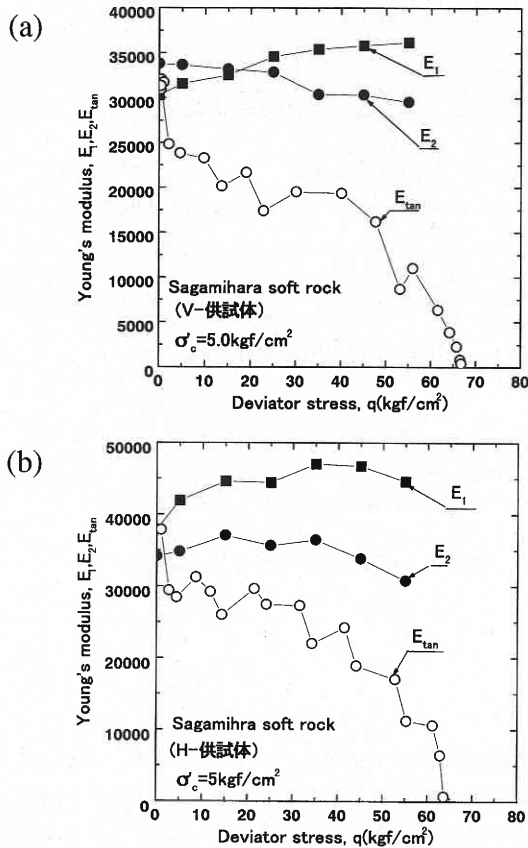


図6 ヤング率 E_1, E_2, E_{tan} と q の関係 (a) V-供試体 (b) H-供試体

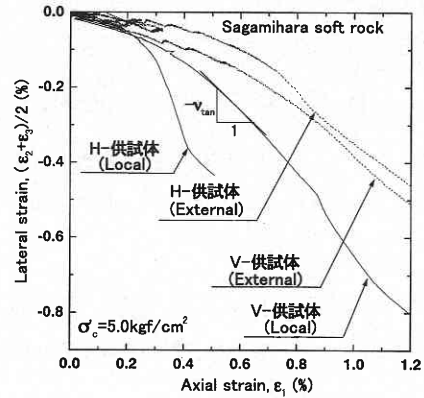


図7 $\epsilon_1 \sim (\epsilon_2 + \epsilon_3)/2$ の関係

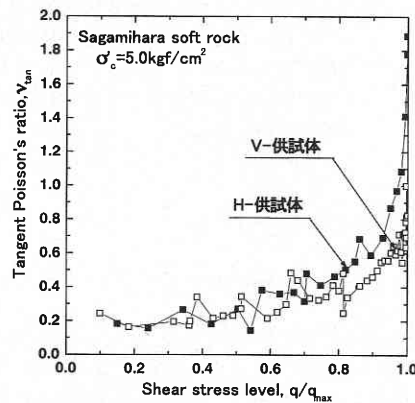


図8 接線ポアソン比 ν_{tan} と q/q_{max} の関係

きな違いが見られない。これは、原地盤の方向性によるポアソン比の違いも小さいことを示唆している。今後より多くのデータの蓄積が必要であると考えている。

5. ま と め

今回開発した三主応力制御三軸試験装置では、かなりコンパクトなシステムのもとで中間主応力・軸差応力の微小振幅繰返し载荷を含む自動制御等において、当初の目標性能を得ることができた。ただし、比較的硬い試料に対しては中間主応力の载荷容量がやや不足がちであり、現在改良中である。本装置を用いて堆積軟岩の変形係数を検討した結果、ヤング率やポアソン比は原地盤の方向性による違いが少ないことを示唆するデータが得られた。また、直応力が増加する方向のヤング率は、応力状態の依存性の影響を受けて増加する一方で、直応力が変化しない方向のヤング率は、せん断応力を受けてもほとんど変化せず、もしくは低下していくことが分かった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、法政大学卒論生の嶋邑勉氏(現

(株)ハザマ)に多大な協力を頂いた。ここに深い感謝の意を表します。

(1998年5月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 王, 早野, 龍岡 (1996): 高精度中圧三軸試験システム, 第31回地盤工学研究発表会, pp.23-24.
- 2) 佐藤, 王, 吉田, 龍岡, 木幡 (1995): 高荷重微小変位制御载荷システム, 第30回地盤工学研究発表会, pp.7-10.
- 3) 佐藤, 早野, 真栄城, 龍岡 (1996): 軟岩の平面ひずみ圧縮試験法の開発, 土木学会第51回年次学術講演会, 第3部, pp.682-683.
- 4) Hayano, K., Sato, T. and Tatsuoka, F. (1997): Deformation characteristics of a sedimentary soft mudstone from triaxial compression tests using rectangular prism specimens, Geotechnique, No.47, Vol. 3, pp. 439-450.
- 5) 龍岡, 小高, 王, 早野, 古関 (1997): 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文報告集, No.561/III-38, pp. 1-17.
- 6) 王 (1996): 三軸試験による堆積軟岩の原位置変形特性に関する研究, 東京大学学位論文.