

(57) 三軸圧縮試験機による堆積軟岩の高圧 K_0 圧密試験

東京大学工学部	学生会員	○細谷真一
東京大学工学部	正会員	徳永朋祥
地質調査所	正会員	高橋学
東京大学工学部	正会員	小島圭二
東京大学工学部	正会員	登坂博行

Trends of changes in K_0 and permeability of soft rocks obtained from high-stress K_0 -consolidation tests.

Shin-ichi HOSOYA, Tomochika TOKUNAGA, University of Tokyo
Manabu TAKAHASHI, Geological Survey of Japan
Keiji KOJIMA, Hiroyuki TOSAKA, University of Tokyo

Abstract

High-stress K_0 -consolidation/swelling tests using triaxial compression apparatus were carried out to evaluate change of K_0 value of soft rocks. Permeability measurements were also carried out before each loading/unloading operation with transient pulse method. Samples used in the experiments were muddy soft rocks from Kazusa Formation in Boso Peninsula. K_0 of the sample was constant ($K_0=0.6$) up to about 750kgf/cm² during normal consolidation process while K_0 increased during overconsolidation conditions. Change of K_0 of the sample was consistent with that of soils, and results were expressed by overconsolidation ratio as usually done for soils. Permeability change during overconsolidation conditions was smaller enough than that in normal consolidation process. Thus, permeability-porosity relationship can be evaluated by the equation $k = k_0 (\phi / \phi_0)^*$ for analyzing problems accompanying larger porosity change.

1. はじめに

堆積軟岩は圧密降伏応力以上の応力に対しては正規圧密の挙動をすることが知られており(細野ほか, 1993)、この過程において、一般に軟岩は大きな物性変化を示す。従って長期的な圧密挙動のモデル化を行うためには、考慮すべき物性の圧密に伴う変化を的確に把握することが重要となってくる。我々は、特に泥質堆積物の透水性に着目し、スラリーを圧密させることにより機械的な圧縮過程での浸透率の変化を間隙率の関数として整理してきた(Tokunaga et al., 1994)。今回は、自然状態である程度圧密固化した堆積軟岩を供試体とし、その圧密・除荷に伴う浸透率の変化を計測した。さらに本実験では、供試体の変形量、応力状態を正確に測定することを目的とし、岩石用の三軸圧縮試験機を用いて一次元圧密(三軸 K_0 圧密)を行った。これにより、静止土圧係数 K_0 (有効応力比: $K_0 \equiv \sigma_h / \sigma_v$)の計測が可能となった。ここでは、圧密・除荷過程における K_0 、浸透率の変化の計測結果について試験方法と併せて報告する。

2. 試験方法

2. 1 供試体とその準備

供試体は、千葉県市原市折津付近の養老川にて採取した上総層群梅方瀬層のブロックサンプルを直径30mm、高さ60mmの円柱形に成形したものをを用いた。試料の物理的性質、粒径分布は表1に示されている。成形され

た試料を脱気水中に置き減圧し飽和させた後、周方向のひずみを計測するために供試体の側面中央に、周方向に2枚で一周するような形でひずみゲージを貼る。圧密時、透水試験時の排水、注水は供試体の長軸の両端から行うので供試体の上下端にはステンレス製の分水板、エンドピースを密着させる。側面は拘束圧を与える油と供試体を隔離するためにシリコンゴムを塗る。このシリコンゴムは透水試験時に供試体の側面に沿った流れを防ぐ効果もある。シリコンゴムが十分に乾燥するのを待ち、エンドピースまでを固定した供試体を球座に取り付け三軸室内に静置する(図1参照)。

2. 2 三軸K₀圧密試験の方法

実験装置の概要は図1に示した。実験の手順は、以下の通りである。供試体を三軸室にセットし配管をすべて接続した後に、配管内を減圧し脱気水を注入する。その後、背圧(間隙水圧:40kgf/cm²)を負荷し配管内を完全に飽和させる。この初期状態から、圧密時にはベッセル下部からピストンを上昇させて軸力を与え、これによって生じる供試体の周方向のひずみを打ち消す程度の拘束圧(油圧)をハンドポンプによって加圧し供試体を一次的に変形させてゆく。供試体からの排水に伴い背圧が上昇するので±3kgf/cm²の範囲で適宜配管系からの排水を行う。ピストンは常に一定応力値を保つように自動で制御されるが、拘束圧と背圧の制御は圧密終了までの間、供試体の変形に応じて手動で行う。この方法で供試体の周方向のひずみは0.05%以下に抑えられる。圧密終了は軸変位が30分あたり0.01mm以下になった時点とし、ピストンを固定し透水試験を行う。透水試験終了後は再び載荷を行い、この繰り返しにより各圧密終了(打ち切り)段階での応力状態、軸変位、浸透率を測定してゆく。なお、間隙率は土粒子が非圧縮性であるとして軸変位から算出した。

今回の試験は同一ブロックから成形した3つの供試体を用いて載荷・除荷のパターンのみを変更して3回行った。その載荷・除荷パターンを図2に模式的に表した。除荷の方法は圧力と供試体の変形方向を逆にするだけで基本的には圧密時と同様である。最終の除荷の後に装置を解体し供試体を取り出し、密度、間隙率、間隙径分布等を測定する。

なお、軸力の測定はベッセル上部のロードセルによって行われ、その分解能は0.01tfであり、軸

表1 試料の物理的性質、粒径分布

ρ_s	ρ_w	q_u	e_0	ϕ_0	Grading (%)		
g/cm ³	g/cm ³	kgf/cm ²			Clay	Silt	Sand
1.94	2.62	166	0.738	0.425	15.6	77.8	6.6

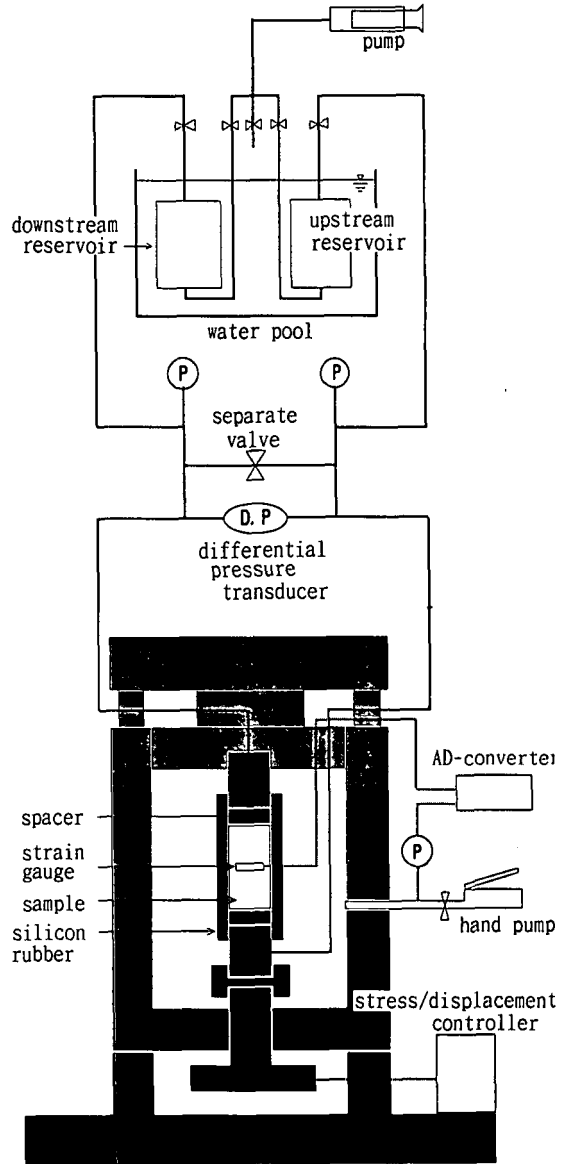


図1 実験装置の模式図

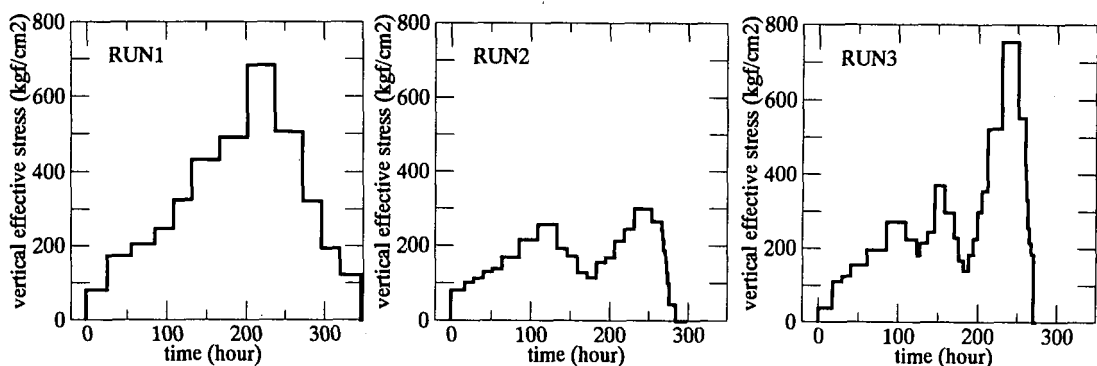


図2 載荷パターン

変位はピストンに取り付けた分解能が0.001mmであるGAPセンサーによって計測された。また、拘束圧の分解能は0.1kgf/cm²である。なお、実験期間中は、室温を26±0.5℃に制御した。

2.3 透水試験の方法

透水試験はトランジェントパルス法によって計測した。本実験では高橋ほか(1991)と同様なシステムで計測を行った。貯留槽の容積は上流・下流とも約1000cm³、間隙水圧は40kgf/cm²、パルス圧は各試験毎に約0.9kgf/cm²程度に設定し、圧力の変化は容量2kgf/cm²、分解能0.25gf/cm²の差圧計で計測した。計測の一例を図3に示すが、これからわかるように、差圧は室温の変動に応答して変化する。そこでシステムを対称に設計し、温度変化、室内の空気の対流を極力抑えるように測定は夜間に行った。この結果6時間程度の計測で10⁻⁷ダルシー程度の浸透率は十分に計測可能となった。なお、石島ほか(1991)の考察に基づいて、①十分長時間の計測を行う、②貯留槽に比べ供試体は十分小さい、という2点が満たされることを確認し、Brace et al. (1968)の近似解を用いて、浸透率を圧力減衰曲線より算出した。

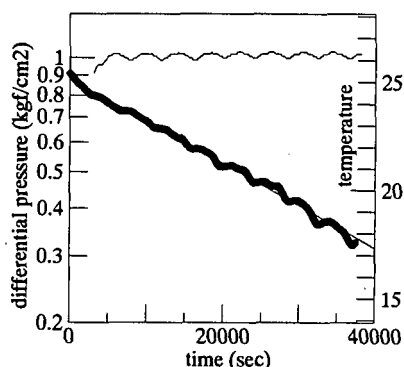


図3 透水試験の時間-差圧曲線と温度変化

3. 堆積軟岩の圧密試験の結果と圧密・除荷に伴うK_oの変化

本研究の圧密試験は三軸室内で供試体を一次元圧密させる三軸K_o圧密試験であり、従来行われていた側方拘束型の一次元圧密試験に比べて以下のような利点がある。まずひとつには供試体側面の摩擦がほとんど無いために供試体の鉛直応力が正確に計測できるという点、もう一点は拘束圧として水平応力が計測できるという点である。すなわち三軸K_o圧密試験では一次元圧密過程中的供試体の応力状態が正確に計測できることになる。ところが現実には堆積軟岩の圧密試験は高圧を載荷する必要があるため、低圧を載荷する土の圧密試験より側面の摩擦の影響が大きくなるにもかかわらず、従来の実験装置では供試体を一次元的に変形させる制御方法等に困難があるため、本実験のような数100kgf/cm²程度の高圧を載荷した三軸K_o圧密試験は行われていない。そこで今回は図1のような岩石用の三軸圧縮試験機を用いて、2.2で述べたような手法により堆積軟岩の三軸K_o圧密を行った。

図4は鉛直有効応力と間隙比の関係である。3回の試験は図2に示

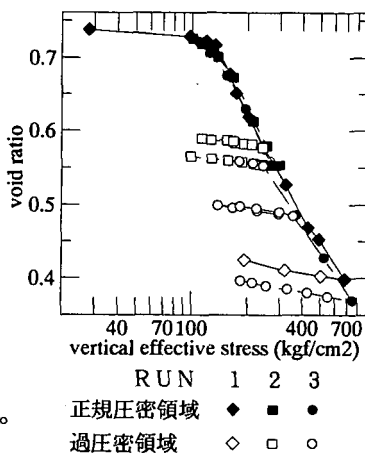


図4 鉛直有効応力と間隙比の関係

したように載荷・除荷のパターンが異なるが、正規圧密過程の結果はほぼ同一傾向を描き、試験自体の再現性が良好なことが確認される。圧密降伏応力は120から140kgf/cm²程度であるがこの圧密降伏応力以降においては供試体は正規圧密し、鉛直有効応力の対数に対し間隙比は直線的に減少する。このような堆積軟岩の正規圧密挙動は、細野ほか(1993)の上総層群の高圧圧密試験の結果や、土の圧密挙動と同様である。図5は各圧密・除荷段階の圧密・除荷終了時点における水平有効応力と鉛直有効応力の関係を示したものである。

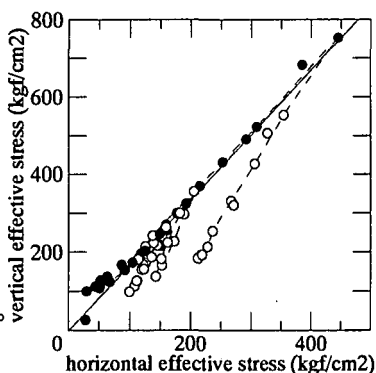


図5 水平有効応力と鉛直有効応力

の関係(直線は $K_0=0.6$ を示す)
 正規圧密領域 ●
 過圧密領域 ○

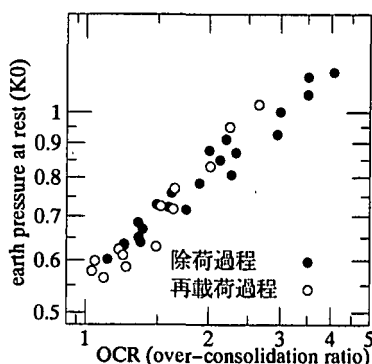


図6 過圧密比と K_0 の関係

Alpan(1967)による関係式は、
 $K_{0oc} = K_{0nc} (OCR)^a$
 ただし、 K_{0oc} :過圧密領域での K_0 、
 K_{0nc} :正規圧密領域での K_0 、
 OCR :過圧密比
 $a = 0.54$ (本実験での値)

正規圧密過程では鉛直有効応力約750kgf/cm²までは K_0 値が一定値0.6をとることがわかる。さらに過圧密状態での K_0 はAlpan(1967)の土に関する実験結果のまとめと同様に過圧密比との関係で整理すると図6のようになる。岩本ほか(1990)は過圧密領域における K_0 の変化に着目し、最大鉛直有効応力が約80kgf/cm²までの実験を行っており、同様の結果を得ている。また、Karig and Hou(1992)は、供試体に泥質スラリーを用い、側方拘束型の一次元圧密試験機のシリンダに圧力計を埋設し、約350kgf/cm²程度まで載荷する実験を行っており、やはり同様の結論を得ている。これらの測定例に今回得られた結果を総合すると、堆積軟岩の圧密挙動は土の圧密挙動と共通性を示しており、地盤内での機械的な圧縮過程に伴う土、軟岩の変形過程の連続性を示唆していると考えらる。

4. 透水試験の結果と過圧密領域における浸透率変化

圧密過程における浸透率(k)の変化は間隙率(ϕ)の関数としてTokunaga et al. (1994)により

$$k = k_0 (\phi / \phi_0)^a \quad (1)$$

の形で整理されている。ここに、

ϕ_0 、 k_0 はある圧密段階での間隙率および浸透率、 a は定数であり、この式の適用範囲は $0.25 < \phi < 0.7$ である。ただし、この式は正規圧密

過程のみを対象としており、現実の地盤内で起こる過圧密領域の評価は行っていない。そこで今回、自然状態で圧密を受けた軟岩をさらに圧密させ、その後除荷・再載荷を行い、過圧密領域での浸透率を評価した。図7は浸透率を有効応力との関係で表したプロットであるが、除荷時の浸透率の回復は圧密時の浸透率の減少に比べ非常に小さい。これはほぼ弾性的であると考えられている過圧密領域での変形量が圧密時の変形量に比べ非常に小さいことによると考えられる。そこで変形量から導かれる間隙率との関係で浸透率を表示すると図8のようになる。図8は両対数グラフで表示されており、このグラフ上での直線関係は(1)式の関係を示す。この図では、正規圧密過

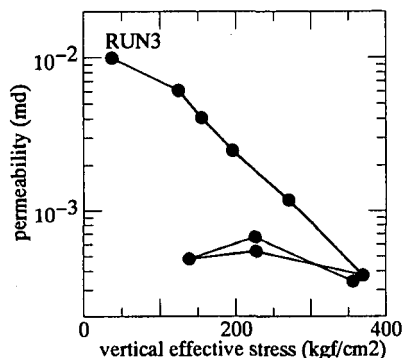


図7 鉛直有効応力と浸透率の関係

載荷・除荷パターンは図2参照

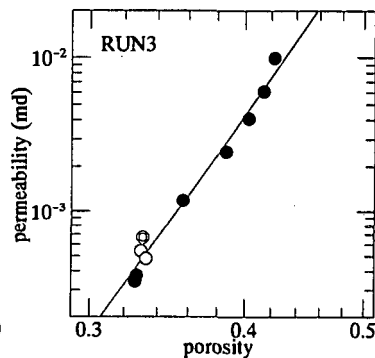


図8 間隙率と浸透率の関係

(両対数) 載荷・除荷パターンは図2参照

正規圧密 ●
 除荷 ○
 再載荷 ○

程での試験結果は直線的にプロットされているが、過圧密領域の試験結果もほぼこの直線に沿ってプロットされている。図9は3回の試験結果すべてをまとめたものであるがやはり図8同様にすべての測定点は直線的にプロットされる。過圧密領域での供試体の変形量は微量であり実験上の測定誤差の範囲に近いので変形量と浸透率の関係を明瞭に見いだすことは困難ではあるが、正規圧密領域に比べて過圧密領域の間隙率および浸透率の変化はきわめて小さいため、間隙率の変化幅の大きな大変形の圧密問題を扱う際には(1)式を用いて浸透率を評価して差し支えないと考えられる。

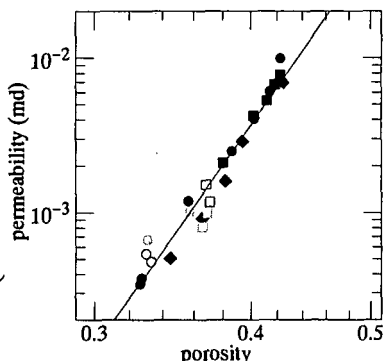


図9 間隙率と浸透率の関係(両対数)

RUN	1	2	3
正規圧密	◆	■	●
除荷		□	○
再載荷		◇	◎

5. まとめ

今回の実験の結果、以下のことが明らかになった。

(1) 三軸圧縮試験機を用いて堆積軟岩の一次元圧密試験(最大鉛直有効応力約750kgf/cm²)を行った。この実験方法では高応力下においても摩擦の影響のない鉛直応力の測定が可能であり、従って堆積軟岩に対しても様々な応力状態における物性変化に関する試験を行うことができる。

(2) 上総層群梅が瀬層の泥質軟岩の三軸K₀圧密試験の結果、正規圧密領域では最大鉛直有効応力約750kgf/cm²まではK₀値は一定値を取り、また過圧密領域ではK₀はこの一定値より大きくなる。さらに、K₀と過圧密比との間には、土で示されている関係 $K_{0OC} = K_{0NC} (OCR)^*$ (Alpan, 1967)と同様の関係が認められた。

(3) 過圧密領域での浸透率の変化は正規圧密領域での変化に比べて小さく、間隙率の変化の大きな問題を扱う場合には、浸透率は過圧密領域を含めて $k = k_0 (\phi / \phi_0)^*$ の関係を用いて評価できると考えられる。

謝辞

本研究における実験は工業技術院地質調査所内で行った。九州大学理学部鈴木清史氏、北海道大学工学部大西康智氏には多大なる協力と助言をいただいた。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- Alpan, I. (1967): The empirical evaluation of the coefficient K₀ and K_{0R}. Soils and Foundations, Vol. 7, 31-40.
- Brace, W. F. Walsh, J. B. and Frango, W. T. (1968): Permeability of Granite under High Pressure. J. Geophys. Res., Vol. 73, 2225-2236.
- 細野高康・小泉和広・杉田信隆・小川正二 (1993): 上総層群の高圧圧密特性. 応用地質, Vol. 34, 223-232.
- 石島洋二・薛自求・高橋学 (1991): 新第三紀堆積岩の透水挙動と等価管路モデルによる解釈. 応用地質, Vol. 32, 121-128.
- 岩本健・斉藤英光・西田和範・田中荘一 (1990): 過圧密な材料のK₀圧密三軸試験について. 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 331-335.
- Karig, D. E and Hou, G. (1992): High-stress Consolidation Experiments and Their Geologic Implications. J. Geophys. Res., Vol. 97, 289-300.
- 高橋学・薛自求・小出仁 (1991): 稲田花崗岩・白浜砂岩・来待砂岩・新第三紀泥質岩の透水特性について. 地質調査所月報, Vol. 142, 305-331.
- Tokunaga, T. Hosoya, S. Kojima, K. and Tosaka, H. (1994): Change of hydraulic properties of muddy deposits during compaction: assessment of mechanical and chemical effect. Proc. 7th IAEG cong., 635-643.