

間隙弾性論に基づく幌延の珪質岩を用いた 室内試験

木山 保¹・松井 裕哉²・J. C. ROEGIERS³・
熊倉 聡¹・小玉 齊明¹・石島 洋二¹

¹正会員 幌延地圏環境研究所 堆積岩特性研究 G (〒098-3221 天塩郡幌延町栄町5番地3)
E-mail: tamotsu.kiyama@mb.megafit.net

²正会員 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (〒098-3207 天塩郡幌延町宮園町1番地8)

³ Mewbourne School of Petroleum and Geological Engineering, The University of Oklahoma,
Norman, Oklahoma 73019-1014, USA

幌延町周辺の地質は、珪藻質泥岩の声間層および硬質頁岩の稚内層などで構成されており、どちらも珪藻化石が堆積した軟岩である。これらの岩石は、高い間隙率と比較的低い透水係数を示すので、間隙弾性論に基づいた評価が有効であると考えられる。幌延町では、日本原子力研究開発機構が深地層研究施設を計画・建設中で、すでに11本の大深度ボーリングを掘削している。これらのコアを用いて、幌延地圏環境研究所の岩石試験装置により、間隙弾性論に基づく室内試験を実施した。試験法の開発にあたり、通常の三軸圧力セル内で K_0 試験が行なえるように、コアの周変位をフィードバックして拘束圧を制御できる試験システムを構築した。特徴的なデータおよび試験法の確立に向けて知見が得られたので報告する。

Key Words : poroelasticity, Horonobe, diatomaceous, siliceous shale, K_0 test, Koetoi & Wakkanai formations, tri-axial compression test

1. はじめに

北海道天塩郡幌延町周辺の地質は、珪藻質泥岩の声間層や硬質頁岩の稚内層などで構成されている。地質年代は、前者が後期中新世中期から前期鮮新世、後者が中期中新世後期で、その境界は整合で接しており、どちらも珪藻化石を多量に含んでいる。これらの岩石は高い間隙率と低い透水性を示すので、飽和状態の地下深部に構造物を建設する場合は、空洞周辺の再配分応力による水応力連成挙動を表現できる間隙弾性論 (poroelasticity) に基づく岩盤挙動の検討が重要であると考えられる。

このような背景から、著者らは、地表で採取された稚内層のブロックから整形した供試体および日本原子力研究開発機構がボーリング調査で採取したコアから整形した供試体などを用いて、間隙弾性論に基づいた室内岩石試験法の開発を目指し、予備的な試験を実施した。本報告では、予備的試験において、これまでに得られた知見と今後の課題を述べる。

2. 間隙弾性論に関するパラメータ

間隙弾性論に関する基本的なパラメータについて触れる。等方な飽和多孔質媒体に対する間隙弾性論の概念は、静水圧 σ を受ける場合には次のような構成方程式で表現される。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma \\ p \end{pmatrix}$$

ここで、 ε は体積ひずみ、 ζ は間隙流体の増分、 p は間隙圧である。また、 $a_{11} \cdots a_{22}$ は、

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left. \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} \right|_{p=0} \equiv \frac{1}{K} \\ a_{12} &= \left. \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p} \right|_{\sigma=0} \equiv \frac{1}{H} \\ a_{21} &= \left. \frac{\Delta \zeta}{\Delta \sigma} \right|_{p=0} \equiv \frac{1}{H_1} \\ a_{22} &= \left. \frac{\Delta \zeta}{\Delta p} \right|_{\sigma=0} \equiv \frac{1}{R} \end{aligned}$$

である。1/K は、間隙圧を一定とした排水条件における圧縮率で、応力と体積ひずみとの関係から求められる。K は、排水条件における体積弾性率と呼ばれる。1/H は、応力を一定とした条件において、間隙圧と体積ひずみの関係から求められる。一方 1/H₀ は、間隙圧を一定とした排水条件において、応力と間隙流体の増分との関係から求められ、1/H に等しい。1/R は、応力を一定とした条件において、間隙圧と間隙流体の増分の関係から求められ、非拘束条件における比貯留係数 S₀ と呼ばれる。

$$S_{\sigma} = \left. \frac{\Delta \zeta}{\Delta p} \right|_{\sigma=0} \equiv \frac{1}{R}$$

また、間隙弾性論に関する重要なパラメータとして、Skempton定数とBiot-Wills定数が挙げられる。Skempton定数 B は、間隙流体の増分をゼロとした非排水条件における応力と間隙圧との関係から求められ、さらに上述の R および H との関係は以下のである。

$$B = \frac{R}{H} = - \left. \frac{\Delta p}{\Delta \sigma} \right|_{\zeta=0}$$

体積ひずみが増えない拘束条件における比貯留係数 S_ε は、次のように定義される。

$$S_{\varepsilon} = \left. \frac{\Delta \zeta}{\Delta p} \right|_{\varepsilon=0} \equiv \frac{1}{M}$$

Biot-Wills定数 α は、間隙圧を一定とした排水条件における体積ひずみと間隙流体の増分との関係から求められ、さらに上述の K および H との関係は以下のである。

$$\alpha = \frac{K}{H} = \left. \frac{\zeta}{\varepsilon} \right|_{p=0}$$

本研究では、堆積環境は一軸ひずみ状態のいわゆる K₀ 圧密であったと仮定し、α は K₀ 試験において測定した。

排水条件における体積弾性率 K に対して、非排水条件における体積弾性率 K_u は、

$$K_u \equiv \left. \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \right|_{\zeta=0} = \frac{K}{1 - \alpha B}$$

のように表される。

排水条件および非排水条件における三軸圧縮試験において、それぞれヤング率 E および E_u およびポアソン比 ν および ν_u が測定される。

以上に示したパラメータは、さまざまな形で表現される。一例として、ν_u を ν、α および B で表すと以下のようである。

$$\nu_u = \frac{3\nu + \alpha B(1 - 2\nu)}{3 - \alpha B(1 - 2\nu)}$$

3. 試験方法

(1) 試験システム概要

試験システムは、図-1 に示すように、ロードフレーム、圧力容器、封圧発生装置、シリンジポンプ、コントローラなどから構成される。計測系は、周方向変位計、軸アクチュエータ変位計、圧力容器内ロードセル、封圧圧力計、シリンジポンプ圧力計、シリンジポンプ流量計などから構成される。ロードフレームの最大軸荷重は 500 kN、最大封圧は 50 MPa である。ロードフレームと封圧発生装置のコントローラは、デジタルサーボ制御機構を採用しており、計測系からの生の計測信号のみならず、演算処理を施した信号によるサーボ制御が可能である。例えば、このシステムでは供試体用の軸変位計を用いていない。その代わりに、弾性係数が既知の鋼製のダミー供試体を試験機にセットし、軸荷重および封圧を加え、その際の軸アクチュエータ変位計の出力から、ロードフレームの剛性を計算し、軸アクチュエータ変位・軸荷重・封圧から、供試体の上下端面間変位を示す近似式を作成し、コントローラに入力する。近似式で計算された上下端面間変位を制御変数として軸アクチュエータをチューニングしておき、この制御変数を一定とした試験を実施すると、いわゆる剛性試験に等価な試験が可能となる。また、通常の三軸圧縮試験において、周方向変位計の信号は軸アクチュエータの制御に用いることがあるが、ここでは K₀ 試験を行なうために、周方向変位計で封圧発生装置を制御するモードを構築した。具体的には、軸荷重の増加に伴い供試体周方向に伸張側の変位が発生しようとした場合には封圧を増加し、横方向の変位を抑制し、軸方向載荷応力に関わらず常に一軸ひずみ状態での変形を維持する試験を可能とした。実際には、軸載荷のためにピストンロッドが圧力容器に貫入出すると容器内の液体に干渉し封圧が変化するので、十分なチューニングを実施しないと制御が安定しない。シリンジポンプの最大圧力は

26MPa, シリンジ容量は507cm³, 流量制御範囲は 0.001~204 cm³/minである。

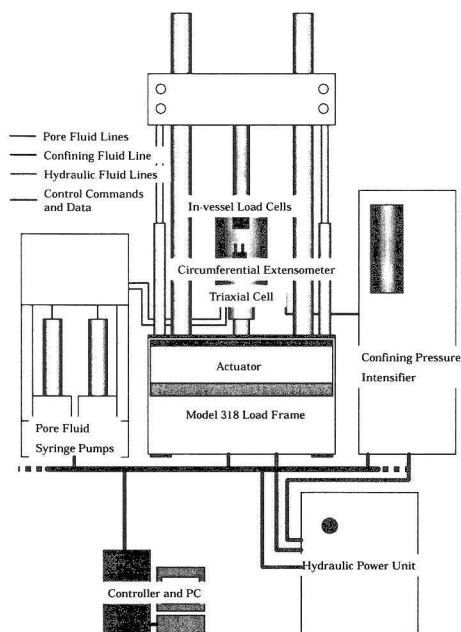


図-1 試験システム概要

(2) 供試体の作製と養生

供試体は、直径50 mm、高さ120 mmの円柱状を原則とした。間隙弾性論に基づく試験を実施する場合、供試体の飽和状態は試験結果に大きく影響を及ぼす。花崗岩のような硬岩であれば、乾燥状態で十分に真空脱気し、これに脱気水を注入する方法で、飽和度を高めることが可能であるが、珪質岩は、採取後、一旦乾燥状態にすると性質が変化してしまうことが多く、この方法は適用できない。従って、コア採取後、可能な限り気中にさらさないように供試体の整形、養生および試験機へのセットを行なうこととした。まず、直径約82 mmの採取コアから、直径50 mmのサブコアを抜く際には、図-2に示すようにコアを水中に沈めた状態で行なった。掘削水は水道水とした。サブコアを移動する場合も水で満たされた容器に入れた状態を維持した。供試体の両端面は平面研削盤で研削するが、気中に露出しないように容器を作製し、研削用のブレードが水面と一致するようにして作業を進めた。わずかながら供試体が気中に露出する可能性があるが、ブレードを完全に水中に沈めると研削が困難になる。整形後の養生は、室温・水中で行った。

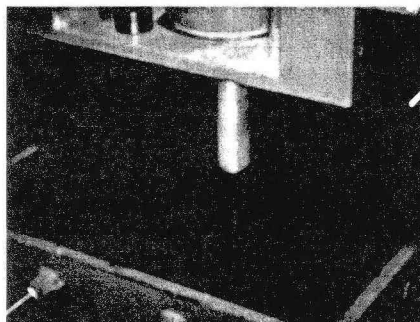


図-2 水中浸漬した状態でのサブコアリング

供試体は、200meshのステンレス金網を介して、両端面をエンドピースで挟み、側面はフッ素樹脂系熱収縮チューブのジャケットで覆って圧力容器にセットした。エンドピースには供試体への注排水用ポートが設けてある。エンドピースとジャケットのシールは、自己融着テープと帯状シールを併用した。手順としては、下側のエンドピースに予めジャケットを固定し、これを供試体が入っている水槽に沈め、水中で供試体を挿入してから気中に取り出し、上側のエンドピースをセットしジャケットを収縮させた(図-3)。この方法により、供試体は気中に曝すことなく、試験に供することが可能となった。



図-3 ジャケットに水が満たされた状態で熱収縮させるので、供試体は気中に曝されない

(3) 応力経路

今回の予備的試験では、一連の試験を大きく11のPhaseに区分し、間隙弾性に関連するデータの取得を試みた。以下に、各Phaseの詳細と目的を示す。なお、図4は、実際の試験データから作図した応力経路である。

試験手順で設定した応力条件は、原位置の深度や、堆積環境を考慮した。とくに堆積盆で堆積物が圧密される

過程は、一軸ひずみ状態であると判断して、 K_0 試験を採用することとした。

表-1 試験手順

Phase0: ジャケットの密着
供試体の周方向変位をジャケットの外周で計測するので、ジャケットを供試体に密着させるため、非排水条件で、封圧を1MPaまで、 3.33×10^{-3} MPa/sの加圧・減圧速度で、2cycle履歴させる。
Phase1: 非排水条件における弾性定数の測定
3種類の異なる封圧において、非排水条件で、軸差応力が1MPaまでの載荷を行なう。封圧、軸差力ともに、速やかに載荷する。封圧は、0.05, 2 および4 MPaとした。ここでは、非排水ヤング率: E_v 、非排水ポアソン比: ν_v 、Skempton定数: B、非排水体積弾性率: K_v を計測する。
Phase2: 応力状態の安定化
前Phaseでは速やかな載荷を行なっているため、適当な時間をかけて供試体の応力条件の安定化と均質化を図る。
Phase3: K_0試験
排水条件で、軸方向の全応力が8MPaまで、 K_0 試験を行なう。排水条件が満たされるように載荷速度は低く設定し、一軸ひずみ状態が達成されるように、周変位計の出力が変化しないように封圧を制御する。ここでは、排水体積弾性率: K_v 、Biot-Willis定数 α を計測する。
Phase4: 静水圧に移行
排水条件で、静水圧で8MPaとなるように制御する。制御としては、軸差応力の減少と封圧の増加を同時に進行させる。
Phase5: 排水条件における軸差力の増加
排水条件で、軸方向の全応力が11.2MPaまで、軸差力を増加させる。このとき、封圧は3MPaで一定とする（いわゆる排水条件の三軸圧縮試験）。コアの採取深度で予想される鉛直応力から、11.2MPaを決定した。ここでは、排水ヤング率: E_v 、排水ポアソン比: ν_v を計測する。
Phase6: 静水圧に移行
排水条件で、静水圧で11.2MPaとなるように制御する。
Phase7: 応力状態の安定化
適当な時間をかけて供試体の応力条件の安定化と均質化を図る。
Phase8: 非排水条件における弾性定数の測定
3種類の異なる封圧において、非排水条件で、軸差応力が1MPaまでの載荷を行なう。封圧、軸差力ともに、速やかに載荷する。封圧は、11.2, 13 および15 MPaとした。ここでは、Phase1と同様に、非排水ヤング率: E_v 、非排水ポアソン比: ν_v 、Skempton定数: B、非排水体積弾性率: K_v を計測する。
Phase9: 除荷
軸差力、封圧および間隙水圧を、速やかに除荷する。2分間で、軸差力を1MPa、封圧を0.5MPa、間隙水圧を大気圧とした。
Phase10: 非排水条件での軸差荷
封圧を0.5MPaとし、非排水条件で、軸差応力が8MPaまで載荷した。ここでは、非排水ヤング率: E_v 、非排水ポアソン比: ν_v を計測する。
Phase11: 排水条件での軸差荷
封圧を0.5MPaとし、排水条件で、軸差応力が8MPaまで載荷した。ここでは、排水ヤング率: E_v 、排水ポアソン比: ν_v を計測する。

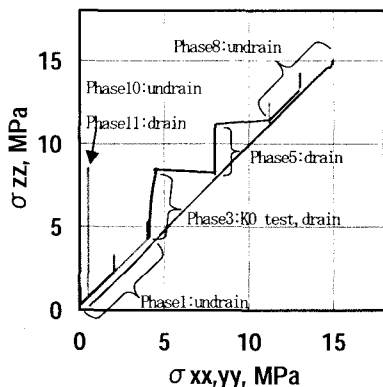


図-4 試験における応力経路。横軸は供試体の周方向の応力（封圧），縦軸は供試体軸方向の全応力を示す。

4. 試験結果および考察

今回の予備的室内試験の事例として、日本原子力研究開発機構のボーリングのうちHDB-6孔の声問層と稚内層の漸移帯部分のコアを用いた試験結果を示す。

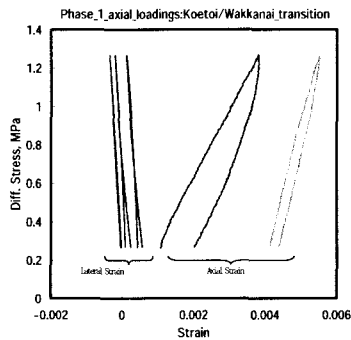


図-5 Phase1における軸差応力-ひずみ線図。差応力-軸ひずみ曲線（Axial Strain）は、左から封圧が0.05, 2および4MPaとなっている。最初の軸載荷である封圧が0.05MPaのとき、ヤング率は他よりも低く、除荷時の残留ひずみが多い。

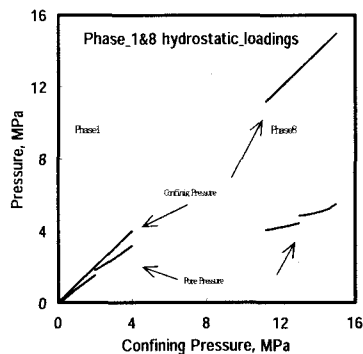


図-6 Phase1およびPhase8における封圧-間隙水圧関係。封圧と間隙水圧の関係から、封圧のレベルが低いPhase1では、封圧のレベルが高いPhase8に比較して、Skempton定数が高い値を示している。

図-5は、Phase1における軸差応力とひずみの関係であり、この結果から非排水条件におけるヤング率とポアソン比が得られる。図-6に示すPhase1およびPhase8における封圧と間隙水圧の関係から異なる封圧におけるSkempton定数が得られる。図-7のPhase1およびPhase3における平均応力と体積ひずみの関係から、非排水および排水条件における体積弾性率が得られる。図-8はPhase3の軸差応力とひずみおよび封圧の関係であるが、周方向のひずみは一定で、軸差応力の増加に伴い封圧が増加しており、周方向変位計を利用した K_0 試験が成功していることがわかる。図-9はPhase3における供試体の変位計測から計算した体積変化量とシリンジポンプに排水された間隙水量の関係であり、このデータからBiot-Willis定数が得られる。図-10に、Phase10およびPhase11における軸差

応力とひずみの関係を示す。非排水条件におけるヤング率が、排水条件のヤング率より大きいことがわかる。

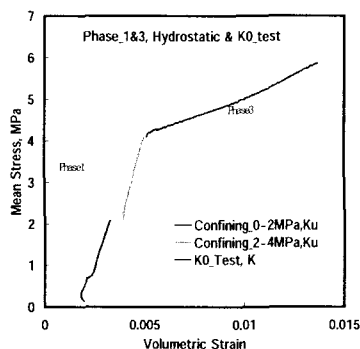


図-7 Phase1およびPhase3における平均応力と体積ひずみの関係。非排水条件のPhase1における体積弾性率は、排水条件のPhase3における体積弾性率より大きい。

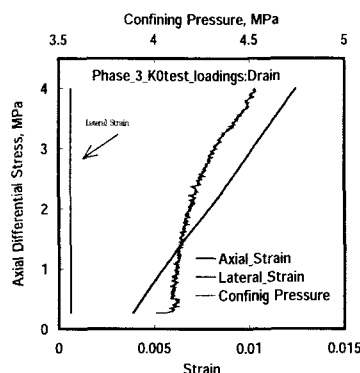


図-8 Phase3の軸差応力とひずみおよび封圧の関係。周方向変位計による封圧の制御により、横ひずみを変化させることなく軸差応力を増加させることが可能となった。

以上の試験で得られた間隙弾性に関するデータを表-2に示す。今回用いた幌延の珪質岩は、非排水条件のヤング率が、繰返し载荷や封圧の影響を受け変化した。具体的には、最初の载荷ではヤング率が低く封圧とヤング率は正の相関を示す。Skempton定数は、Phase1では0.7～0.8であるのに対し、Phase8では0.3～0.4と低い値を示した。また、非排水条件における体積弾性率に関しては、

$$K_u = \frac{E_u}{3(1 - 2\nu_u)}$$

が成り立つ。たとえばPhase1のデータでは、 K_u は353～454MPaと計算され、計測値より低い。Biot-Willis定数は1.15を示したが、原理的に1を超えないはずである。

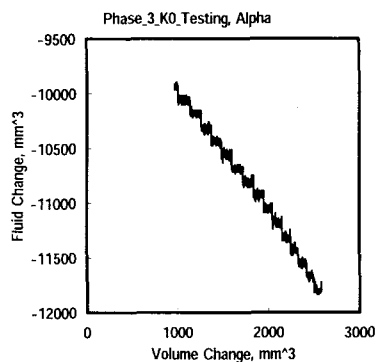


図-9 Phase3における供試体の変位計測から計算した体積変化量とシリジポンプに排水された間隙水量の関係。

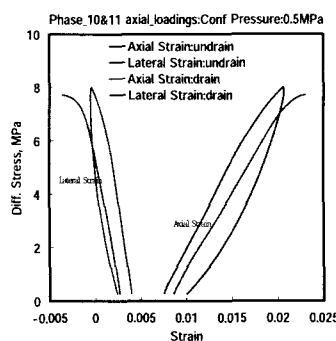


図-10 Phase10およびPhase11における軸差応力-ひずみ線図。非排水条件のPhase10におけるヤング率は、排水条件のPhase11におけるヤング率より大きい。

表-2 声間稚内漸帯帯コアの間隙弾性定数の測定事例

		E_u MPa	ν_u	B	K_u MPa	K MPa	α	E MPa	ν
phase1	undrain	354 622 709	0.105 0.206 0.24	0.77 0.71	1477 1754				
phase3	drain						194	1.15	
phase5	drain								860 0.065
phase8	undrain	1560 1477 1342 676	0.267 0.18 0.14 0.33	0.268 0.418	2488 2200				
phase10	undrain								
phase11	drain								577 0.32

上記の問題点の主要因としては、ジャケットの材質が考えられる。今回のジャケットは、比較的薄い珪質岩に比べ相対的に剛性が高いため、周方向の変形を抑制している可能性がある。これによりポアソン比が過小評価されれば、上式は実際の K_0 より低く評価される。また、剛性が高いため、ジャケットと供試体の密着が完全でないことが考えられ、このような空隙が残っていると、封圧の増加に伴い空隙からの排水が発生し、Biot-Willis定数が1を超えるエラーが起こりうる。

本試験法では、一軸ひずみ状態を再現するために周方向変位計を用いた K_0 試験過程を取り入れているので、供試体のジャケットは周方向変位計が適用できるものでなければならない。したがって、変位計が埋没するほど軟質なジャケットや供試体に直接樹脂を塗布するタイプのジャケットは適用できない。そこで数種類のジャケットについて試験を実施し、シリコン系熱収縮チューブが、変形や強度への影響が少なく、供試体への密着が良く、周方向変位計による計測にも問題がないことがわかった。

5. まとめ

幌延の珪質岩を用い間隙弾性論に基づく室内試験を実施した。具体的には、1体の供試体を用いて、間隙弾性に関連する諸定数が測定できるような試験手法を提案した。とくに K_0 試験において、周方向変位計を用いて安定した制御が実現できたことは特筆される。一方、ジャケットの剛性など、技術的に克服すべき課題も抽出された。

参考文献

- 1) Wang, H. F.: Theory of Linear Poroelasticity, pp. 17-70, Princeton University Press, 2000.
- 2) Aoki, T., et al.: Measurement of the Undrained Pore Pressure Response of a Shale in Triaxial Tests, Proc. of 11th Conf. Eng. Mech. Div./ASCE, 1996.
- 3) Paterson, M. S. and Wong, T. F.: Experimental Rock Deformation – The Brittle Field, pp. 147-163, Springer, 2005.
- 4) P. A. ドミニコ, F. W. シュワルツ (大西有三監訳): 地下水の科学 I, pp. 77-107, 土木工学社, 1995.

LABORATORY TEST OF HORONobe SILICIC ROCKS BASED ON POROELASTICITY THEORY

Tamotsu KIIYAMA, Hiroya MATSUI, J. C. ROEGIERS, Satoshi KUMAKURA,
Nariaki KODAMA and Yoji ISHIJIMA

The geological features of the Horonobe-cho are composed of Koetoi diatomaceous mudstone and Wakkanai siliceous shale both contained diatom fossils. Because these rocks comparatively show a high porosity and low permeability, it is thought that the evaluation based on the poroelasticity theory is effective. The Underground Research Laboratory is under construction by Japan Atomic Energy Agency in the Horonobe-cho and 11 deep borings have been already dug up and the core in Koetoi and Wakkanai formations has been collected. Then the laboratory tests based on poroelasticity theory were conducted by using these cores with the rock testing machine of Horonobe Research Institute for the Subsurface Environment(H-RISE). The K_0 test is examined in the pressure vessel using the servo control system of the confining pressure with the circumferential extensometer.