

稚内層珪質泥岩の力学特性

羽柴公博*1 福井勝則*1 杉田裕*2 真田昌慶*2,3

珪藻土や、それが変成作用により岩石化した珪質岩は、北海道から秋田県、能登半島、隠岐諸島へかけて日本海側に広く分布しており、珪質岩の岩盤中に構造物を建設する際には、その力学特性を把握しておく必要がある。本研究では、北海道天塩郡幌延町の地下深部に分布する珪質岩である稚内層珪質泥岩を用いて、一軸圧縮試験、圧裂引張試験、乾燥収縮試験、時間依存性挙動と強度回復特性を調べる試験を行った。その結果、変形・破壊特性におよぼす水分の影響が大きく、試験室の標準的な環境下で乾燥させるだけで、最大で0.9%程度の軸方向の収縮歪が生じ、強度が2倍程度になることがわかった。時間依存性挙動と強度回復特性に関しては、岩石としては標準的な特性を持っていることがわかった。

Keywords: 珪質泥岩, 一軸圧縮強度, 圧裂引張強度, 乾燥収縮, 時間依存性挙動, 強度回復

Diatomaceous earth and siliceous rock are widespread in the areas along the Sea of Japan in Hokkaido Prefecture, Akita Prefecture, Noto Peninsula and Oki Islands. To construct underground structures in the siliceous rock mass, it is essential to understand its mechanical properties. In this study, siliceous mudstone of the Wakkanai formation obtained from the deep underground in Horonobe, Hokkaido was applied to various laboratory tests; uniaxial compression test, Brazilian tension test, drying shrinkage test and the test to investigate the time dependent behavior and strength recovery. The testing results showed that water has a huge effect on the deformation and failure of the siliceous mudstone; when the specimen is air dried in room temperature, the axial shrinkage strain reaches 0.9% and the strength is twice larger than that in wet condition. It was found that the siliceous mudstone exhibits the same degree of time dependent behavior and strength recovery as other rocks such as tuff and sandstone.

Keywords: siliceous mudstone, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, drying shrinkage, time dependent behavior, strength recovery

1 緒言

日本原子力研究開発機構は北海道天塩郡幌延町において地下研究施設を建設しており[1]、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を行っている。地下坑道は堆積岩の一種である珪質岩中に設けられている。珪藻土や、それが変成作用により岩石化した珪質岩は、北海道から秋田県、能登半島、隠岐諸島へかけて日本海側に広く分布しており[2]、珪質岩の岩盤中に構造物を建設する際には、その力学特性を把握しておく必要がある。

真田ら[3]は、幌延町に分布する珪質岩の密度、空隙率、弾性波速度、一軸圧縮強度、ヤング率、圧裂引張強度などを取得した。これらの基礎的な項目に関しては数多くのデータが取得されており、深度1000m程度までのデータは、過去に得られた国内に分布する新第三紀堆積岩のデータ[4]の範囲内におおむね入っている。しかし最近の研究により、珪質岩に特徴的な力学特性も報告されるようになってきた。例えば、工業用材料（濾過助剤、担体、吸収剤など）や窯業用材料（保温材、建材など）としても使用される珪質岩は、含水状態によって体積が大きく変化することがわかってきた[5, 6, 7]。空隙率は大きい透水性係数は小さいので、水分が変形・破壊挙動に影響をおよぼす可能性があることも報告されている[8]。地下構造物の長期的な安定性評価においては、時間依存性挙動[9, 10]や強度回復特性[11, 12,

13]を知ることが重要であるが、珪質岩についてはそれらに関する知見は少ない。

本研究では、幌延町の地下深部に分布する珪質岩である稚内層珪質泥岩を用いて、変形・破壊特性、時間依存性挙動、強度回復特性に関する試験を行った。以下では、稚内層珪質泥岩に特徴的な特性や、これまであまり知られていない時間依存性挙動、強度回復特性について報告する。さらに、それらの特徴を実際の岩盤へ適用する上での留意点、および今後の課題についても述べる。

2 試料岩石

幌延町とその周辺では、中部中新統の増幌層を不整合におおって、稚内層、声間層、勇知層、更別層がそれぞれ整合漸移関係で累重している[14]。今回試料を採取した地域では、上位層として珪藻質泥岩の声間層が、下位層として珪質泥岩の稚内層が分布している。両層はいずれも珪藻質泥を根源とした堆積岩であり、累進的埋没続成作用によりシリカ鉱物の相変化が進み、珪藻質泥岩が硬化したものが珪質泥岩であると報告されている[15]。地下水位は地表面に近く原位置岩盤はほぼ含水飽和状態にあること、珪質泥岩は泥岩ではあるものの粘土鉱物は少ないため、耐スレーキング性指数は高く、膨潤圧は小さいことなども報告されている[14]。

本研究での試料岩石として、幌延町の深度300m以深で採取された稚内層珪質泥岩を用いた。稚内層珪質泥岩の空隙率は30~50%、P波弾性波速度は2~2.5 km/s、一軸圧縮強度は5~30 MPa、ヤング率は1~5 GPa、圧裂引張強度は0.5~4 MPaと報告されている[3]。室内透水試験では 10^{-12} ~ 10^{-11} m/sの透水性係数が得られている[16]。今回の試験に用いた試料の概要をTable 1にまとめた。稚内層珪質泥岩は緒状構造や成層構造が認められるので、Table 2に示したように、高さ方向もしくは載荷方向が層理面（以下では層と呼

Mechanical properties of siliceous mudstone of the Wakkanai formation by Kimihiro HASHIBA (hashiba@sys.t.u-tokyo.ac.jp), Katsunori FUKUI, Yutaka SUGITA, Masanori SANADA

*1 東京大学 工学系研究科 システム創成学専攻
Department of Systems Innovation, The University of Tokyo
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

*2 (独)日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

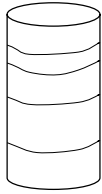
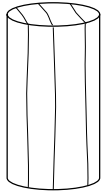
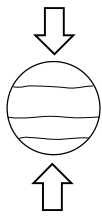
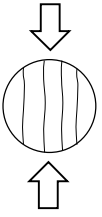

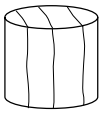
*3 現所属 西松建設(株)
Nishimatsu Construction Co., Ltd
〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10

(Received 2 July 2014; accepted 6 September 2014)

Table 1 Testing conditions.

	一軸圧縮試験	圧裂引張試験	乾燥収縮試験	押し込み試験 ^{*1} 一軸圧縮試験 ^{*2}
試料の採取深度	350m	350m ^{*3} 510m ^{*4} , 990m ^{*4}	350m	350m
採取した試料の形状	ブロック	*3: ブロック *4: ボーリングコア	ブロック	ボーリングコア
試験片の寸法	φ25mm×h50mm	φ25mm×h13mm	φ25mm×h50mm	φ25mm×h25mm
含水状態	含水飽和, 室内で乾燥, 恒温器で乾燥	含水飽和, 室内で乾燥, 恒温器で乾燥	試験中に変化	*1: 含水飽和 *2: 押し込み試験後
載荷方法	歪速度10 ⁻⁴ /s	変位速度0.0005mm/sと 0.005mm/sで切替	-	*1: 変位速度0.0005mm/sと 0.005mm/sで切替 *2: 変位速度0.005mm/s

Table 2 Bedding planes in the specimen.

	層に垂直	層に平行
一軸圧縮試験 乾燥収縮試験		
圧裂引張試験		
押し込み試験と 一軸圧縮試験		

ぶ)に対して垂直と平行になる2種類の試験片で試験を行った。

作製した試験片は水中で保管した。試験片によって水道水を用いたり原位置で採取した地下水を用いたりしたが、今回は試験片の整形から試験の実施まで4ヶ月程度と短かったため、用いた水による試験結果の違いは見られなかった。しかし、水道水中に保管した場合は、1年程度経過すると試験片が変色することがあった。変形・破壊特性にどのような影響があるかはわからないが、試験片の保管には原位置の地下水を用いた方が良いでしょう。

3 一軸圧縮試験と圧裂引張試験

稚内層珪質泥岩の一軸圧縮試験と圧裂引張試験はこれま

でも行われてきたが、含水飽和状態での試験がほとんどであり、層の影響(異方性)もほとんど考慮されてこなかった。そこで、含水状態と層の影響を調べるための試験を行った。なお、含水状態によって岩石の変形・破壊特性が変化することは古くから知られているが[17, 18, 19, 20], 珪質岩を対象とした研究例は少ない。また本研究では、従来ほとんど知られていない、変形・破壊特性への水分の影響と、4章で述べる乾燥収縮特性の関係についても検討した。

一軸圧縮試験には、含水飽和状態の試験片、試験室内で乾燥させた試験片、105℃に保たれた恒温器内で重量変化がなくなるまで乾燥させた試験片を用いた。試験片の含水状態は、次式で計算される飽和度 D (%) で表すことにした。

$$D = \frac{W_w - W}{W_w - W_d} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 W_w は乾燥させる前の含水飽和状態での重量、 W は試験開始直前の重量、 W_d は恒温器で乾燥させた後の重量である。 W_w と W は同一の試験片で測定できるが、 W_d を測定するために乾燥させてしまうと、再び湿潤状態にした際に破損してしまう場合があったので、 W_d は別の6本の試験片の平均値を用いた。載荷は容量1500kNのサーボ試験機を用いて、歪速度10⁻⁴/sで行った。試験は、含水飽和状態の試験片は水中で、試験室内で乾燥させた試験片は大気中で行った。恒温器で乾燥させた試験片は真空脱気を行いながら常温に戻した後、乾燥剤を入れて密封した容器内で試験を行った。

Fig. 1には、層に対して垂直に載荷した試験片での応力-歪曲線を示した。同一の飽和度でも試験片ごとに結果はばらついたが、ここでは各飽和度での標準的な結果を示した。飽和度による応力-歪曲線の形状の違いは小さく、試験開始からほぼ直線的に応力が増加していき、応力-歪曲線が若干上に凸になった後にピーク強度に達し、その後は急激に応力が減少した。層に対して平行に載荷した試験片での応力-歪曲線も似た形状であった。Fig. 2には、飽和度と一軸圧縮強度および50%接線ヤング率の関係を示した。図(a)に実線と破線で示したように、強度は飽和度が100%から約60%までは増加し、その後10%程度までは変化が少

なく、0%になるとまた増加した。飽和度と一軸圧縮強度の関係は、定性的には泥岩や頁岩と似た傾向であった[17, 18]。ヤング率は層に平行に载荷した方がやや大きかったが、試験片ごとのばらつきに比べて飽和度の影響は小さかった。

圧裂引張試験も、含水飽和状態の試験片、試験室内で乾燥させた試験片、105°Cに保たれた恒温器内で重量変化がなくなるまで乾燥させた試験片を用いて実施した。载荷は、容量 10 kN のサーボ試験機を用いて、変位が 0.015 mm 増

加するごとに、変位速度を 0.0005 mm/s と 0.005 mm/s とで交互に切り換えながら行った。なお、変位速度を切り換えたのは時間依存性挙動を調べるためであったが、圧裂引張試験では時間依存性挙動の程度を把握することが難しかったので、時間依存性挙動の詳細は 5 章で述べる。一軸圧縮試験と同様に、含水飽和状態の試験片は水中で、恒温器で乾燥させた試験片は乾燥剤を入れた容器内で試験を行った。

Table 3 に圧裂引張試験の結果をまとめた。一軸圧縮強度は層による影響はあまり見られなかったが、圧裂引張強度は層に垂直に载荷した場合は平行に载荷した場合の 1.4~1.9 倍であった。圧裂引張試験に用いた試験片は寸法が小さく、式(1)で計算した飽和度のばらつきが大きかった。そのため、飽和度を用いた整理は行わなかったが、乾燥(試験室)は飽和度 10~20%と推定される。飽和状態での圧裂引張強度に比べて、乾燥(試験室)が 2.0 倍、乾燥(恒温器)が 2.5~2.7 倍というのは Fig. 2(a)の一軸圧縮強度と定量的にも似た結果であった。

4 乾燥収縮試験

声間層珪質泥岩や稚内層珪質泥岩は、含水状態によって体積が大きく変化すること、すなわち、乾燥とともに体積が大きく減少していくことが最近になって報告されている[5, 6, 7]。しかしながら、報告されているデータは少なく、強度試験結果との比較などは行われていない。そこで、試験片が乾燥していく際の変形量を測定し(乾燥収縮試験)、3 章で述べた強度試験結果との比較・検討を行った。

試験では、水中に保管してあった試験片を取り出して布で軽く拭いた後に、ステンレス製の板に載せた。試験片上

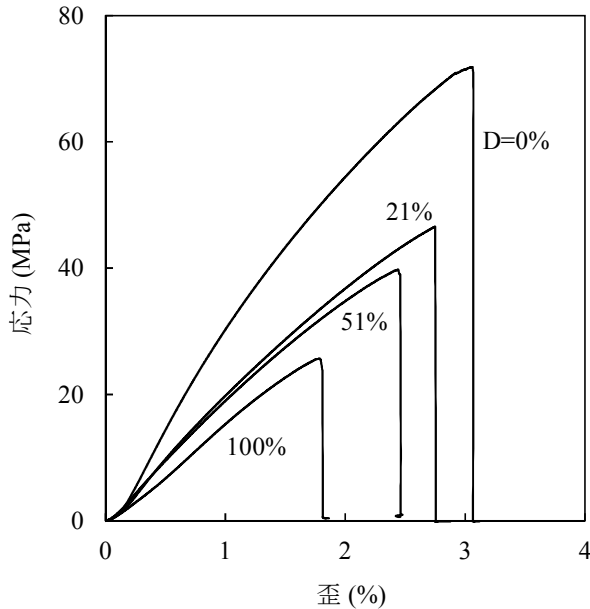
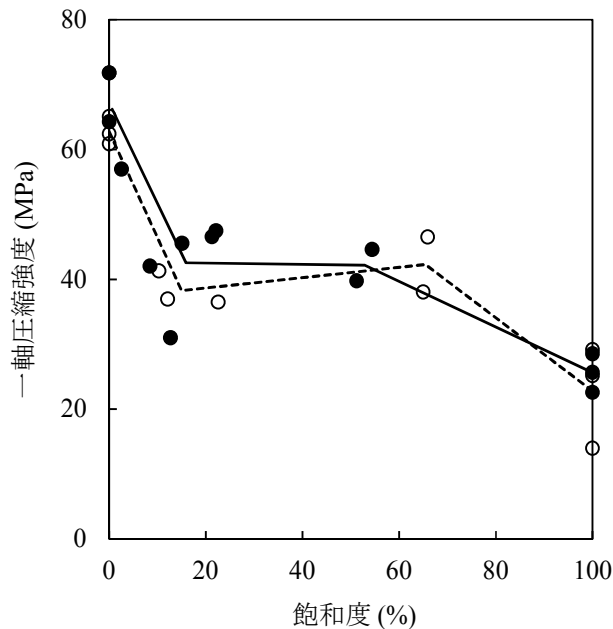
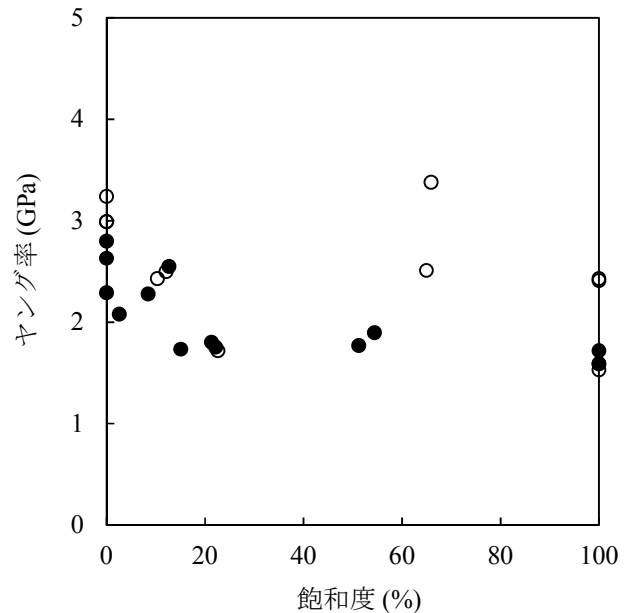


Fig. 1 Stress-strain curves loaded perpendicular to the bedding planes in uniaxial compression tests. D is the degree of saturation calculated with Eq. (1).



(a) Uniaxial compressive strength. The trends of the results loaded perpendicular and parallel to the bedding planes are shown with the solid and broken lines, respectively.



(b) Young's modulus.

Fig. 2 Relation between the degree of saturation and uniaxial compressive strength or Young's modulus. The results loaded perpendicular and parallel to the bedding planes are shown with ● and ○, respectively.

Table 3 Results of Brazilian tension tests.

採取深度 (m)	層に対する 載荷方向	含水状態	試験数	圧裂引張強度 (MPa)	強度の比 垂直/平行	強度の比 乾燥/飽和
350	垂直	乾燥 (恒温器)	3	8.0	1.5 (乾燥) 1.4 (飽和)	2.7 (垂直)
		飽和	3	2.9		
	平行	乾燥 (恒温器)	3	5.2		
		飽和	3	2.1		
513.00 ~513.30	垂直	乾燥 (試験室)	5	1.5	-	2.0 (垂直)
		飽和	5	0.73		
514.00 ~514.60	垂直	飽和	4	1.4	1.9 (飽和)	-
	平行		4	0.75		
988.45 ~988.85	垂直	飽和	4	3.5	1.8 (飽和)	-
	平行		4	1.9		
989.00 ~989.25	垂直	乾燥 (試験室)	5	5.3	-	2.0 (垂直)
		飽和	5	2.6		

面に直径が試験片と同じ 25 mm で厚さが 0.15 mm のガラス板を載せた状態で、ダイヤルゲージを用いて試験片高さの経時変化を測定した。これらの装置は電子天秤に載せてあり、試験片の重量変化も同時に測定した。すなわち、円柱形試験片の側面から水が蒸発するようにした状態で、試験片の高さと重量の経時変化を測定した。

試験室の温度は 21~24°C に保たれていたが、湿度は変化し夏は約 75% で冬は 40~60% であった。そのため、変形量の経時変化は試験時期によって傾向が変わったが、式(1)から計算される飽和度で整理すると試験時期の影響は見られなかった。Fig. 3 には、飽和度と試験片の軸歪（収縮が負）の関係を示した。図に示した 6 本の試験片は、乾燥収縮試験終了後、温度が 105°C に保たれた恒温器内に入れ、重量の変化がなくなるまで 20 時間程度乾燥させた。各試験片での W_d を用いて式(1)により飽和度を算出し、乾燥収縮試験の終了時点（開始から 24 時間後）と恒温器から取り出した時点でのデータを破線で結んだ。なお、3 章の一軸圧縮試験結果の整理に用いた W_d はこの 6 本の平均値であり、飽和度が 10~70% の試験片は乾燥収縮試験を行った後の試験片である。図の右端から試験が開始され、はじめは飽和度の減少とともに上に凸の曲線を描きながら歪が減少した。飽和度が 60% 程度でグラフは屈曲し、飽和度がそれよりも小さくても歪の変化は小さかった。収縮量は層に対して垂直な方向が大きく、平行な方向の 2 倍程度であった。

Fig. 2(a) と Fig. 3 とを比較すると、飽和度が 100% から 60% 程度までは、強度と歪の変化が大きいことがわかる。飽和度 60% 程度から 10% 程度までは、いずれの変化とも小さかった。飽和度が 10% よりも小さくなると強度が急激に増加した。Fig. 1 に示したように、一軸圧縮応力下でのピーク強度での歪（破壊歪）は飽和度 100% で 1.5% 程度、飽和度 0% で 3% 程度であった。一軸引張試験は予備的な検討しか行っていないが、飽和度 100% での破壊歪は 0.1% 程度であった。絶対値で比較すると、飽和度が 100% から 60% 程度まで変化した際に生じる歪は、一軸圧縮応力下での破壊歪よりは小さいものの、一軸引張応力下での破壊歪よりも大きい可能性が高いと言える。

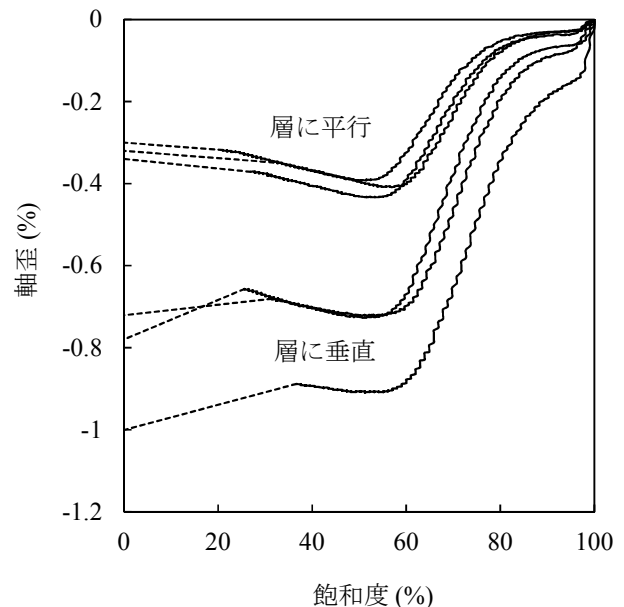


Fig. 3 Relation between the degree of saturation and axial strain in drying shrinkage tests. The strain is negative in shrinkage and measured perpendicular or parallel to the bedding planes.

5 時間依存性挙動と強度回復特性に関する試験

地下構造物の長期的な安定性評価において、岩石の時間依存性挙動を調べるのが重要である。時間依存性挙動としてクリープや応力緩和が知られているが、試験に時間がかかるうえに、他の岩石との比較において定量的な検討は難しい。そこで、羽柴・福井[10]が種々の岩石についてまとめた、時間依存性挙動を表す指標である n の値を求めることにした。なお、 n は後述する式(2)より求められる。一軸応力下での岩石の n は 10~100 の間に入っていることが多く、値が小さいほど時間依存性挙動が大きいことを表す。例えば、湿潤状態での凝灰岩が 10~20、気乾状態での石炭が 100~150 である。時間依存性挙動とともに強度回復特性を知ることも重要である。地下を掘削すると、周辺の岩盤

は損傷を受けるが、適切な支保や埋め戻しを行って岩盤を三軸圧縮応力状態にすれば、損傷を受けた岩盤の強度が徐々に回復することがわかってきた[11, 13]. 大久保ら[11]は、この回復の程度を短時間で容易に把握する方法として押し込み試験を提案し、いったん破壊した岩石の強度が締固めによって徐々に増加していくことを強度回復特性と呼んだ. 本研究では、時間依存性挙動を調べるための載荷速度切換試験[21]と強度回復特性を調べるための押し込み試験[11]を組み合わせ、両方の特性を同時に調べることができる試験法について検討した.

試験では Fig. 4 に示したように、直径が 25 mm で高さが 25 mm の円柱形試験片を内径 27 mm, 外径 50 mm, 高さ 40 mm の鋼製円筒内に設置し、その上に試験片と同じ直径の鋼製円柱を置いて試験片軸方向に荷重を加えた. 初期の試験片の直径は 25 mm であり円筒内壁とは十分な隙間があるので、荷重を加えていくと一軸圧縮応力状態のもとでピーク強度を迎えた. その後は、荷重が減少していくとともに試験片が半径方向に膨張した. 試験片側面と円筒内壁が接触すると荷重は減少から増加に転じ、荷重があらかじめ定めた値（押し込み最大荷重）に達したら除荷した（ここまでを押し込み試験と呼ぶ）. 押し込み試験中は変位速度を 0.0005 mm/s と 0.005 mm/s とで交互に切り換えた. なお、変位速度を切り換える間隔は歪が約 5%になるまでは変位が 0.025 mm 増加するごと、その後は変位が 0.1 mm 増加するごととした. 押し込み試験後に試験片を円筒から取り出して、変位速度 0.005 mm/s で一軸圧縮試験を行った. 押し込み試験と一軸圧縮試験には、容量 1500 kN のサーボ試験機を用いた.

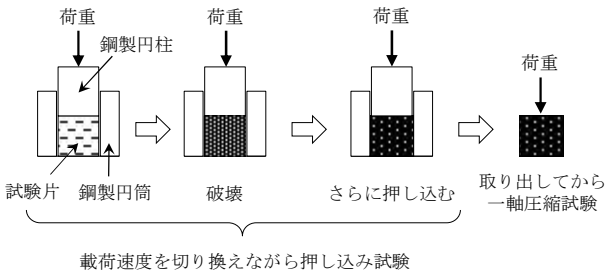


Fig. 4 Procedure of compaction and uniaxial compression test.

Fig. 5 に、押し込み試験で得られた、層に垂直に載荷した場合の応力-歪曲線の一例を示した. 押し込み試験では試験片はかなり変形したが、簡明さを重んじて、歪は初期長さを基準とし、応力は初期断面積を基準として計算した. そのため、みかけの歪、みかけの応力と称するのが正しいが、煩雑さを避けるため以下では単に歪、応力とする. 図に示したのは、押し込み最大荷重が 78.5 kN での結果である. 載荷開始後ほぼ直線的に応力が増加したが、応力が低い時点から変位速度の切り換えによる応力の増減が観察された. ピーク強度を過ぎてからは、いったん応力は減少し、その後増加したが、一貫して変位速度の切り換えによる応力の増減が観察された. 応力-歪曲線の形状は、層に平行に載荷した場合もほとんど変わらなかった.

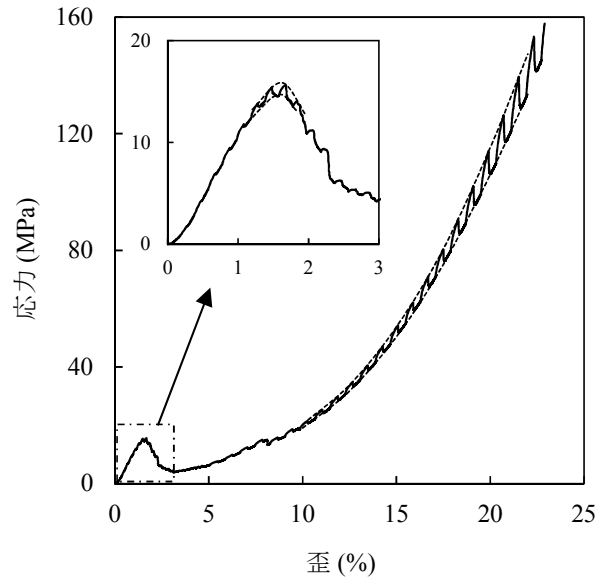


Fig. 5 Result of compaction test. The specimen was loaded perpendicular to the bedding planes with the strain rate alternated between high and low values. Two broken lines are the estimated stress-strain curves corresponding to the two strain rates.

Hashiba et al.[21]が一軸圧縮試験で行ったのと同じように、応力-歪曲線の下側と上側を滑らかにつなぎ、2種類の変位速度 C_s と C_f に対応する曲線を求めた. 2種類の変位速度に対応する一軸圧縮強度 (Fig. 5 中の拡大図のピーク強度) と、2曲線上で歪が 10, 15, 20%での応力を、次式の σ_s と σ_f に代入して n を求めた.

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_s} = \left(\frac{C_f}{C_s} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2)$$

なお Hashiba et al.[21]は、載荷速度切換試験からこのようにして求めた n と、一般的に行われる複数の変位速度での強度試験から求めた n がほぼ一致することを示している. 一軸圧縮強度から求めた n と各歪での応力から求めた n を Fig. 6 に示した. 他の岩石を含めても n の異方性に関する知見はほとんどないが、稚内層珪質泥岩の一軸圧縮強度から求めた n は、層に垂直に載荷した場合は 35~47, 平行に載荷した場合は 26~42 と、垂直に載荷した方が少し大きかった. しかし図よりわかるように、試験片ごとのばらつきに比べるとその差は小さいと言える. 他の岩石を含めても、押し込み試験中の n は今回初めて得られた. その結果、歪の増加とともに各試験片の n も変化した. 試験片ごとのばらつきに比べれば小さかった. ピーク強度と押し込み試験中の n は 26~47 の範囲内に入っており、 n の値としては岩石の標準的な値と言える.

Fig. 7 には、押し込み試験後に行った一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強度を示した. 一軸圧縮試験を行う前に円筒から取り出した試験片の直径を測定し、強度はその値を用いて計算した. 押し込み最大荷重が 19.6 kN での強度は 1 MPa 以下と小さいが、押し込み最大荷重の増加とともに強

度が回復していく様子がわかる。他の岩石を含めても、強度回復特性の異方性に関する知見はほとんどないが、稚内層珪質泥岩の押し込み試験後の強度は、わずかではあるが層に平行に载荷した方が大きかった。

強度回復の程度について、押し込み最大荷重が 78.5 kN での強度を元の一軸圧縮強度で除した値を用いて他の岩石の結果と比較してみる。大久保ら[11]の結果のうち、この値が最も大きかったのは土丹で 1.6 であった。これは元の試験片よりも押し込み試験後の試験片強度の方が大きかったことを示している。稚内層珪質泥岩は 0.13 程度であり、湿潤状態での田下凝灰岩 0.16 や気乾状態での来待砂岩 0.17 と同程度であった。

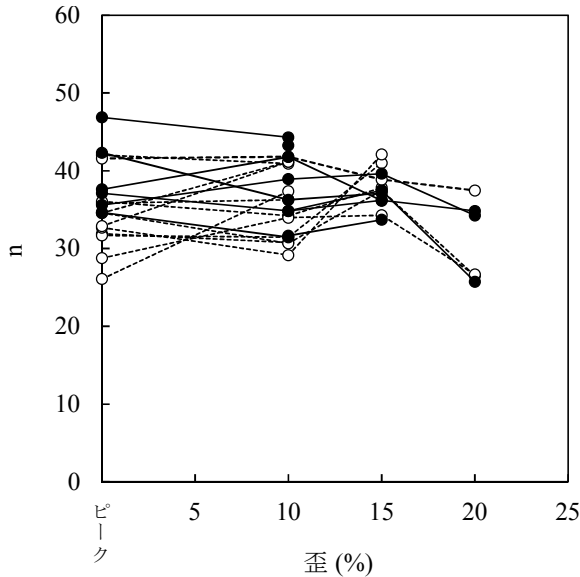


Fig. 6 Values of n in compaction test. The results loaded perpendicular and parallel to the bedding planes are shown with ● and ○, respectively.

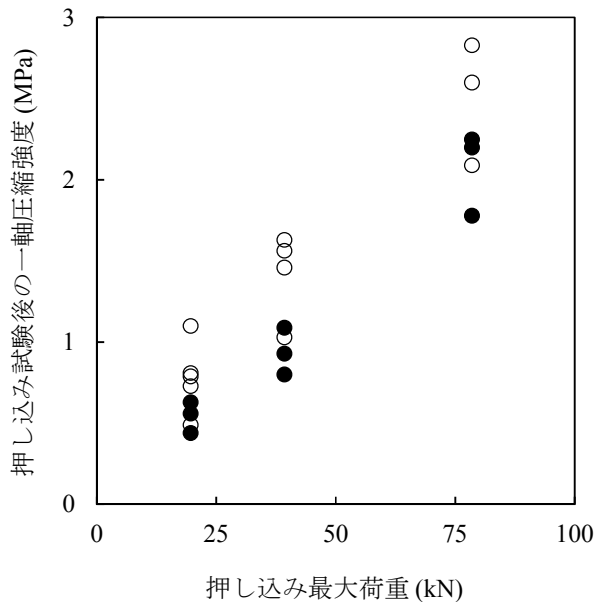


Fig. 7 Relation between the maximum load in compaction test and uniaxial compressive strength of the compacted specimen. The results loaded perpendicular and parallel to the bedding planes are shown with ● and ○, respectively.

6 試験結果の利用上の留意点および今後の課題

稚内層珪質泥岩で特徴的なのは、変形・破壊特性におよぼす水分の影響が大きいことであった。試験室の標準的な環境下で飽和度が 100% から 10% 程度まで変化するだけで、最大で 0.9 % 程度の軸方向の収縮歪が生じ、強度が 2 倍程度になった。地下空洞周辺の岩盤の飽和度はこの範囲にあることが多いと思われるので注意が必要である。

ここで、掘削によって、空洞周辺に圧縮応力とそれともなう歪が生じた場合を考えてみる。乾燥による強度の増加は、空洞がより安全になるように働くので望ましい。また、乾燥収縮によって圧縮応力による歪が減少すると応力が緩和するので、乾燥による収縮量が小さいうちは力学的には安全になると思われる。しかし稚内層珪質泥岩では、掘削での応力再配分によって生じた歪よりも乾燥による収縮歪の方が大きくなる可能性があり、空洞周辺の岩盤に引張破壊が生じるおそれがある。引張破壊なので坑壁の大規模な崩壊には直接はつながらないかもしれないが、天盤の崩落や湧水量の増加、地下水流動の活発化につながる可能性は考えられる。このような場合には、過度の乾燥を抑制する対策などが必要である。このため、原位置で地下空洞周辺岩盤の含水状態を調査することや、数値解析で乾燥収縮による引張破壊の予測をすることなどが今後の課題であろう。その際に、乾燥収縮量や引張強度が、層に対する方向によって変化することも考慮する必要がある。

稚内層珪質泥岩は、岩石としては標準的な時間依存性挙動を持ち、凝灰岩や砂岩と同程度の強度回復特性を示すことがわかった。時間依存性挙動と強度回復特性に関しては、層による影響は小さかった。すなわち、これまでに提案されてきた時間依存性挙動や強度回復現象を表す構成方程式が適用できる可能性が高いので、今後検討していく必要がある。今回の試験は含水飽和状態に限られていたので、今後は時間依存性挙動や強度回復特性におよぼす水分の影響を調べることも重要である。

7 結言

稚内層珪質泥岩の変形・破壊特性、時間依存性挙動、強度回復特性に関する試験を行い、その特徴についてまとめた。稚内層珪質泥岩で特徴的なのは、水分による影響が大きいことであった。試験室の標準的な環境下で乾燥させるだけで、最大で 0.9 % 程度の軸方向の収縮歪が生じ、強度が 2 倍程度になった。乾燥による収縮量や圧裂引張強度が、層に対する方向によって変化することも確認された。

本研究では、従来は別々に行われていた载荷速度切換試験と押し込み試験を組み合わせ、新たな試験法を提案した。この試験により、時間依存性挙動と強度回復特性を同時かつ容易に調べることができた。その結果、時間依存性挙動と強度回復特性に関しては、稚内層珪質泥岩は岩石としては標準的な特性を持っていることがわかった。

また、今回明らかとなった岩石の特徴から、実際の岩盤への適用上の留意点を明示した。三軸圧縮応力下と一軸引張応力下でのデータの取得、試験結果の数値解析プログラ

ムへの組み込み, 本研究で得られた結果の原位置での利用, などが今後の課題である.

謝辞

研究を進めるに当たって, 日本原子力研究開発機構および前田建設工業株式会社の関係各位から貴重なご助言をいただいた。試験の実施に際して, 東京大学工学系研究科システム創成学専攻職員の畠山正樹氏, 学生の豊田涼氏にご助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 一安謙治, 尾留川剛, 小島亘, 北川義人: 深度500mの立坑を積み込み機一体型自由断面掘削機で掘る。トンネルと地下 **38**, No.10, 35-42 (2007).
- [2] 真山茂樹: 工業材料としての珪藻土。藻類ハンドブック, 759-763 (2012).
- [3] 真田祐幸, 丹生屋純夫, 松井裕哉, 藤井義明: 堆積履歴が幌延地域に分布する珪質岩の力学的特性や微視的構造変化に及ぼす影響。 *Journal of MMIJ* **125**, 521-529 (2009).
- [4] 佐藤稔紀, 谷口航, 藤田朝雄, 長谷川宏: 文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に関するデータの収集(その2)。JNC TN7400 99-011 (1999).
- [5] 前川恵輔, 長田昌彦: 珪藻質泥岩の水分量変化に伴う物性変化に関する研究。第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 53-58 (2012).
- [6] 前川恵輔, 長田昌彦, 多田浩幸, 熊坂博夫: 堆積岩試料における水分量と物性の変化に関する数値解析的検討, 第13回岩の力学国内シンポジウム&第6回日韓ジョイントシンポジウム講演論文集, 179-184 (2013).
- [7] Illankoon, T. N., Yee, S. M., Osada, M., Maekawa, K., Tada, H., Kumasaka, H.: Drying-induced deformation of Horonobe sedimentary rock in the Koetoi and Wakkanai formations, 第13回岩の力学国内シンポジウム&第6回日韓ジョイントシンポジウム講演論文集, 899-904 (2013).
- [8] Okubo, S., Fukui, K., Hashiba, K.: Development of a transparent triaxial cell and observation of rock deformation in compression and creep tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **45**, 351-361 (2008).
- [9] Kemeny, J.: Time-dependent drift degradation due to the progressive failure of rock bridges along discontinuities. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **42**, 35-46 (2005).
- [10] 羽柴公博, 福井勝則: 岩石の時間依存性を表す指標とその利用に関する一考察。 *Journal of MMIJ* **129**, 553-558 (2013).
- [11] 大久保誠介, 福井勝則, 杉田隆博: 緩み領域の強度回復に関する基礎研究。資源と素材 **117**, 631-638 (2001).
- [12] Tsang, C. F., Bernier, F., Davies, C.: Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - in the context of radioactive waste disposal. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **42**, 109-125 (2005).
- [13] Fujii, Y., Ishijima, Y., Ichihara, Y., Kiyama, T., Kumakura, S., Takada, M., Sugawara, T., Narita, T., Kodama, J., Sawada, M., Nakata, E.: Mechanical properties of abandoned and closed roadways in the Kushiro Coal Mine, Japan. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **48**, 585-596 (2011).
- [14] 真田祐幸, 丹生屋純夫, 松井裕哉, 藤井義明: 幌延地域に分布する珪質岩に対する幾つかの岩盤応力測定法の適用性と推定された応力状態。 *Journal of MMIJ* **125**, 530-539 (2009).
- [15] 八幡正弘: 温度調整材料としての頁岩・珪藻質泥岩の特徴について—いわゆる“稚内層珪藻土”の地質鉱物学的特徴—。北海道立地質研究所報告, No.74, 83-95 (2003).
- [16] 下茂道人, 熊本創: 表層部における堆積軟岩の水理・物質移行特性データの取得。JNC TJ5410 2005-003, 16-26 (2005).
- [17] 田中芳則: 泥質岩の含水による強度変化。応用地質 **9**, 82-93 (1968).
- [18] Van Eeckhout, E. M.: The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **13**, 61-67 (1976).
- [19] Kirby, S. H.: Introduction and digest to the special issue on chemical effects of water on the deformation and strengths of rocks. *JGR* **89**, 3991-3995 (1984).
- [20] Hawkins, A. B.: Aspects of rock strength. *Bull. Eng. Geol. Env.* **57**, 17-30 (1998).
- [21] Hashiba, K., Okubo, S., Fukui, K.: A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **43**, 894-904 (2006).

