神居古潭帯に分布する蛇紋岩の不攪乱状態および 再構成粘性土試料の力学特性

Mechanical properties of undisturbed and reconstituted serpentinite originated from the Kamuikotan belt in Hokkaido

三田地利之^{a)*}・藤澤久子^{b)}・和智真太郎^{c)}・大河原正文^{d)}・工藤 豊^{a)}

Toshiyuki MITACHI, Hisako FUJISAWA, Shintaro WACHI, Masafumi OKAWARA and Yutaka KUDOH

Abstract

Various laboratory tests such as triaxial test, reversal direct box shear test, swelling pressure test, slaking test were carried out to investigate the mechanical properties of serpentinite using the undisturbed and reconstituted samples originated from the Kamuikotan belt in Hokkaido. From the test results, it was concluded as follows.

The residual angle of shearing resistance ϕ'_r , as well as the peak angle of shearing resistance ϕ'_p , were unexpectedly large by showing $\phi'_r = 27 \sim 28^\circ$ and $\phi'_p = 31 \pm 2^\circ$ irrespective of the state of undisturbed or reconstituted. But the undrained strength of the reconstituted specimen was less than one fourth of the undisturbed one due to marked difference of dilatancy characteristics of those specimens. The angle of shearing resistance between the pre-existing foliated flakes of serpentinite exhibited 6.5° at minimum.

Key words : triaxial compression test, reversal direct box shear test, residual state angle of shear resistance, swelling pressure, slaking

和文要旨

北海道神居古潭帯で採取された蛇紋岩の不攪乱状態および再構成の試料について、三軸圧縮試験、繰返し一面せん断試験、膨潤圧試験、スレーキング試験などの各種力学試験を実施した。試験の結果、蛇紋岩のピークせん断抵抗角 ϕ'_p は不攪乱、再構成によらず、 $31 \pm 2^\circ$ 程度の値をとり、残留状態のせん断抵抗角 ϕ'_r は $27 \sim 28^\circ$ と予想外に大きい。しかし、蛇紋岩粘性土の非排水せん断強度はダイラタンシー特性の違いから、不攪乱蛇紋岩の4分の1以下と大幅に低下する。また、予め葉片に沿って二分し、試料の表面を磨いた状態での試験結果から得られた葉片に沿う最小のせん断抵抗角は 6.5° を示した。

キーワード：三軸圧縮試験、繰返し一面せん断試験、残留状態せん断抵抗角、膨潤圧、スレーキング

1. はじめに

北海道を南北に縦断する神居古潭帯に点々と分布する蛇紋岩地域は日本有数のものであり、過去に切り土やトンネル施工中の地すべりや崩壊、強大な土圧の発生等の難工事を強いられてきた¹⁾。

蛇紋岩体の中心部には比較的堅硬な塊状の蛇紋岩が存在するが、風化過程からみると中心から外れるに従い葉片状となり、更に他の地質体との境界部では粘土状へと変化して分布することが知られている²⁾。また、塊状蛇紋岩も応力解放や水の影響により容易に風化し、葉片状、粘土状となり得る。これらの地質学的検討から蛇紋岩体は非常に脆弱な岩体であるとされ、鉱物学的・化学的特性や地質学的特徴に関しては多くの研究がなされている^{3), 4)}。さらに近年の研究の結果、蛇紋岩を構成する鉱物、タルクやスメクタイト等の存在がその強度特性および強度低下に大きな影響を及ぼしていると考えられている。工学的観点からの工事報告もなされているが^{1), 5), 6)}、

力学的研究は比較的少ない。また、既往の力学的研究では風化が進んで粘土化した蛇紋岩風化粘性土^{2), 7), 8), 9)}、あるいは蛇紋岩を粉砕して細粒化したもの^{10), 11)}を用いており、不攪乱状態で採取された蛇紋岩を用いた研究ではなく、また蛇紋岩を不攪乱状態で三軸試験に供することは困難であるとされてきた。したがって、従来の力学的研究では、蛇紋岩そのものの強度特性を把握したとは言い難い。

北海道神居古潭帯に位置する勇払郡占冠村の地すべり地帯を通る道路トンネル坑口付近の地質調査に際して、蛇紋岩の不攪乱試料の採取が試みられた。本研究ではこの不攪乱試料を用いて、圧密非排水三軸圧縮試験と繰返し定圧一面せん断試験を行い、試験後の試料を粉砕して再構成した供試体についての試験結果と比較し、自然状態の蛇紋岩の力学特性を明らかにしようとするものである。加えて、X線回折による鉱物分析、スメクタイトの定量分析のほか不攪乱蛇紋岩の葉片に沿う一面せん断試験、スレーキング試験および圧密容器を利用した膨潤圧試験の結果についても報告する。

2. 構成鉱物

2.1 X線回折による分析結果

蛇紋石の主要な鉱物はアンティゴライト、クリソタイ

* 連絡著者 / corresponding author

a) 北海道大学大学院工学研究科
Graduate School of Eng. Hokkaido Univ.
〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目
Kita-13 Nishi-8, Sapporo, 060-8628, Japan

b) 日本工営株式会社
Nippon Koei Co., Ltd.

c) 前田建設工業株式会社
Maeda Corporation

d) 岩手大学工学部建設環境工学科
Iwate Univ.

ル, リザーダイトであるとされるが, 蛇紋岩は一般に蛇紋石だけで構成されているわけではなく, その他にタルク, カルサイト, クロライト, スメクタイトといった鉱物が含まれている場合があることが知られている。近年の研究の結果, これらタルクやスメクタイト等が多く含まれる蛇紋岩のせん断抵抗角は, 含有量の少ない蛇紋岩のせん断抵抗角よりも小さく, 地すべりなどの問題を引き起こしやすいのではないかと考えられている⁷⁾。

そこで構成鉱物の同定のためにX線回折を行った。試験は粉末法で行い, 試料は2種類で, 異なる2箇所のボーリング孔からの試料である。試料Ⅰは蛇紋岩を粉碎し, 試料Ⅱは粉碎せずに自然に崩れた試料を74 μ mふるいに通した試料である。

回折図を図-1に示す。図より試料Ⅰおよび試料Ⅱとも12°と24°に明瞭なピークが見られることから蛇紋石であるクリソタイル, リザーダイトが含まれていることがわかる。また, 試料Ⅱでは6°付近と19°付近にピークが見られ, これは膨潤性の粘土鉱物(スメクタイトあるいはクロライト)とタルクと考えられる。

2.2 スメクタイトの定量分析

スメクタイトの含有割合を調べるためにメチレンブルー吸着法(MB法)を行った。X線回折と同様, 74 μ mふるい通過試料を用いた。その結果スメクタイト含有量は約3~26%と幅広く, 同地帯の蛇紋岩でも含有割合はかなり異なることがわかった。

3. 圧密非排水三軸圧縮試験における強度特性

試料は, 軟岩用ダブルコアチューブを用い, ミストボーリングによって採取された葉片状蛇紋岩である。採取深度は地表面下7.0m~20.5mの範囲である。試料の側面は淡緑あるいは暗緑色塊状で滑らかであり, 断面は暗緑色の葉片状であるものが多く, そのほとんどが蛇紋石を主成分鉱物とする蛇紋岩であるが, 若干の方解石, 滑石を含むもの, また膨潤性粘土鉱物を多く含むものもあった。供試体の成形にあたっては, 試験に支障をきた

すような大きなクラックの見られない部分を使用するようにした。

3.1 実験概要

試験に用いた試料は, 大部分が非常に脆く剥離性の著しい葉片状であったため, 供試体の作製には細心の注意を払い, アクリル製のコアチューブに入ったまま, 所定の高さ(125mm)に切断し, チューブを外してそのままの直径(83mm)で試験に供した^{12), 13)}。表-1に試料の初期状態と実験条件を示す。

実験は①原位置の土被り圧相当の応力(p'_c)まで等方圧密②その後所定の応力(p'_s)まで除荷(Rの記号を付しており, たとえば p'_c の1/2まで除荷した場合CR2U)③せん断の3過程と排水条件UU, CU, CDの組み合わせの違いによる5種類の三軸圧縮試験である。CRU試験については除荷の程度を3種類に変えている。

圧密・膨張の打ち切り基準として3t法を適用し, 排水・非排水せん断時のひずみ速度はそれぞれ0.002%/minおよび0.1%/minで, 排水試験(CD, CRD)以外はいずれも間隙水圧の測定を伴う試験である。なお, 初期状態の飽和度は表-1に示すように試料によってばらつきがあるが, 三軸試験の圧密過程開始時点からすべての供試体について200kPaの背圧を載荷している。圧密および膨張に要した時間はそれぞれ250~400分および700~1000分であった。

3.2 試験結果および考察

(1) 応力-ひずみ挙動

図-2~5はCU及びCRU試験の主応力差 $q(=\sigma'_a - \sigma'_c)$ ~軸ひずみ ε_a 関係を示したものであり, 図-3以降では圧密・膨張時の応力条件の違いによって分けて表示した。図-3はCU試験における結果である。等方圧密圧力と共に, 非排水強度が増大していることがわかる。軸ひずみ15%時点で試験を終了することを基準としたが, CU3試験ではロードセルの限界によりやむなく実験を中止し, CU2試験においては供試体にせん断面が現れ, メンブレンの限界であると判断し実験を終了した。CU2の試料はカルサイトとタルクを含んでいたが, 一般に強度の低いとされるタルクの影響は明確に現れていないようである。

表-1 実験条件(三軸圧縮試験)

Table 1 Experimental condition for triaxial compression test series

試験名	採取深度 (m)	湿潤密度 (g/cm ³)	p'_c (kPa)	p'_s (kPa)	初期含水比 (%)	初期飽和度 (%)
UU1	8.7~9.1	2.14	100	100	8.2	62.5
CU1	8.7~9.1	2.08	178	178	8.8	59.2
CU2	13.2~13.9	2.33	312	312	6.8	81.0
CU3	14.9~15.5	2.41	394	394	5.9	90.9
CR2U1	13.2~13.9	2.34	310	155	6.2	78.1
CR2U2	16.7~17.4	2.33	400	200	5.8	72.9
CR4U1	14.9~15.5	2.43	360	90	6.1	98.2
CR8U1	19.6~20.1	2.27	500	63	11.5	98.6
CD1	12.1~12.9	2.13	260	260	8.6	63.5
CR2D1	16.7~17.4	2.37	400	200	4.5	67.7

図-1 X線回折図

Fig. 1 Results of X-ray diffraction analysis

図-2 三軸圧縮試験における応力-ひずみ関係

Fig. 2 Stress-strain relationships obtained by triaxial compression tests

図-4 応力-ひずみ関係 (CU 3, CRU試験)

Fig. 4 Stress-strain relationships obtained by CU 3 and CRU tests

図-3 応力-ひずみ関係 (CU, CD試験)

Fig. 3 Stress-strain relationships obtained by CU tests

図-5 応力-ひずみ関係 (CU 2, CR 2 U, CR 2 D試験)

Fig. 5 Stress-strain relationships obtained by CU2, CR 2 U and CR 2 D test

図-4は等方圧密圧力の近似したCU3とCR4U1およびCR8U1試験を比較したものである。CR4U1試験はCU3試験の約2/3、CR8U1試験は約1/2程度まで強度が低下している。図-6は図-4に対応する過圧密状態における非排水せん断強度 S_u とせん断前の有効応力 p との比 S_u/p 値である。データ数が少なく、且つばらつきがあって大まかな数値でしかないが、図より算出される傾きはおよそ0.64である。粘土についての既往の多数の実験結果¹⁴⁾が0.77~0.86の範囲の値に入っていることから、蛇紋岩の吸水膨張による強度低下の割合は、粘土に比べて大きいと言える。

図-5は先行圧密圧力のほぼ等しいCU2とCR2U1およびCR2D1試験を比較したものであり、図から圧密応力の除荷によって約1/2まで強度が低下したことがわかる。写真-1はCR2U1試験の試験後の状態である。このように明瞭なせん断面が現れることが多く、試験後の典型的な例である。

図-7~10は上記の応力~ひずみ関係に対応する間隙水圧~ひずみ関係を示したものであり、CU1以外のすべての試験において、せん断の後半で負の間隙水圧が発生しており、初期に間隙水圧が急激に増加した後、比較的ひずみの小さい段階で減少過程に移行している。図-

図-6 過圧密状態における S_u/p 値

Fig. 6 S_u/p value in overconsolidated state

8は圧密応力の異なる3本のCU試験の比較であるが、CU2、CU3試験では負の間隙水圧が発生しており、過圧密粘土に類似した挙動を示している。図-9はCU3とCR4U1、CR8U1試験の比較で、CR4U1とCR8U1試験はよく似た挙動を示した。CR4U1試験においては最も大きな負の間隙水圧が発生しており、これが図

写真-1 三軸圧縮試験における供試体の破壊状況
Photo 1 State of specimen after triaxial compression test

図-7 非排水三軸圧縮試験における間隙水圧-ひずみ関係
Fig. 7 Pore water pressure vs. strain relationships obtained by undrained triaxial compression tests

図-8 間隙水圧-ひずみ関係 (CU試験)
Fig. 8 Pore water pressure vs. strain relationships obtained by CU tests

— 4 における主応力差に反映されているものと説明できる。

図-11は排水せん断中の体積ひずみ (ε_v) ~ 軸ひずみ関係を示したもので、図からわかるように拘束圧の減少

図-9 間隙水圧-ひずみ関係 (CU 3, CRU試験)
Fig. 9 Pore water pressure vs. strain relationships obtained by CU 3 and CRU tests

図-10 間隙水圧-ひずみ関係 (CU2, CR 2 U試験)
Fig. 10 Pore water pressure vs. strain relationships obtained by CU 2 and CR 2 U test

図-11 排水三軸圧縮試験中の体積ひずみ-軸ひずみ関係
Fig. 11 Volumetric strain vs. axial strain relationships obtained by drained triaxial compression tests

によって体積膨張 ($\varepsilon_v < 0$) 傾向が表われて吸水が生じていることが分かる。

(2) 有効応力径路およびせん断抵抗角

図-12は不攪乱供試体を用いたすべての試験についてのせん断中の $q-p'$ 面上の有効応力径路 (p' は平均有効主応力) を示したものであり、これを $q_{\max} (= (\sigma'_a -$

図-12 不攪乱蛇紋岩の三軸圧縮試験における有効応力経路
Fig. 12 Effective stress paths of undisturbed serpentinite during triaxial compression test

$\sigma'_r(\max)$ 点のみに着目して表したのが図-13に示す $(\sigma'_a - \sigma'_r)/2 \sim (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ 関係で、有効応力で評価すれば Mohr-Coulomb の破壊基準で統一的な説明が可能であることがわかる。本試験結果は不攪乱状態で採取された蛇紋岩についてのものであるが、図-13の直線の傾きと切片から算出した強度パラメータは $c' = 0$ kPa, $\phi' = 31.6^\circ$ であり、占冠地区の2箇所から採取した蛇紋岩風化粘土(練り返し再構成試料)についての横田ら⁷⁾の試験結果($\phi' = 30.3^\circ, 31.2^\circ$)に近似しており、また北郷ら¹¹⁾が神居古潭帯の南北各地から採取した蛇紋岩粘土およびその細粒分調整試料について行った試験結果($\phi' = 30.0^\circ \sim 36.7^\circ$)の範囲とも一致している。

図-14にCU試験における不攪乱蛇紋岩および再構成蛇紋岩の有効応力経路の比較を示す。なお、再構成蛇紋岩粘性土は、不攪乱試料の試験後に粉碎したものを425 μm ふるいにかけて、その通過分を200kPaで予圧密したものである。データはともにせん断開始時の平均有効主応力が400kPa程度の試験である。不攪乱蛇紋岩は正のダイレイタンス傾向を示す結果、右上がりの経路をたどっており、再構成蛇紋岩の有効応力経路と大幅に異なっている。その結果不攪乱蛇紋岩の主応力差の最大値(軸力の計測能力の限界から7%のひずみで打ち切っている)は再構成蛇紋岩のそれ(15%ひずみでの値)の約4倍となっている。

図-15にCU試験結果のみにあつての $(\sigma'_a - \sigma'_r)/2 \sim (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ 関係の比較を示す。不攪乱蛇紋岩の ϕ' は 30.3° 、再構成蛇紋岩の ϕ' は 29.0° とほとんど一致する。図-14、図-15に示した不攪乱と再構成蛇紋岩についての実験結果、および蛇紋岩風化粘土についての既往の研究結果における ϕ' の値がほとんど一致するということを経合すると、蛇紋岩が風化して粘性土化した場合、せん断抵抗角はほとんど変わらないが、ダイレイタンス特性が大きく変化する結果、強度は不攪乱状態より大幅に低下するといえる。

図-13 不攪乱蛇紋岩の三軸圧縮試験における $(\sigma'_a - \sigma'_r)/2 \sim (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ 関係
Fig. 13 $(\sigma'_a - \sigma'_r)/2$ vs. $(\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ relationships obtained by triaxial compression test for undisturbed serpentinite

図-14 不攪乱蛇紋岩および蛇紋岩粘性土の有効応力経路の比較
Fig. 14 Comparison of effective stress paths on undisturbed and reconstituted serpentinite

4. 繰返し定圧一面せん断試験結果および考察

繰返し一面せん断試験における供試体寸法は、高さ20 mm、直径60mmである。残留状態のせん断抵抗角を求める目的から、試料の中でも特に粘土化している部分をアクリル製コアチューブから切り出し、供試体成型用リングを押し込むようにして成型した。両面排水条件で、所定の圧密応力まで載荷後、3 t法によって圧密を打ち切り、定圧条件の下でせん断速度0.2mm/minで繰返しせん断を行った。繰返し回数は5ないし6回とし、片振幅は6 mm、せん断箱間隔は0.2mmである。

図-16に蛇紋岩の粘土化した部分の不攪乱試料と再構成蛇紋岩粘性土についての繰返し定圧一面せん断試験結果の比較を示す。不攪乱試料についてのピークせん断抵抗角 ϕ'_p と再構成試料のピーク (=完全軟化状態) せん断抵抗角 ϕ'_s とはほとんど一致している。これらの値は前述の三軸試験結果と 3° 程度の差はあるが、不攪乱と

図-15 不攪乱および再構成蛇紋岩における $(\sigma'_a - \sigma'_r)/2 \sim (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ 関係

Fig. 15 $(\sigma'_a - \sigma'_r)/2$ vs. $(\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ relationships for undisturbed and reconstituted serpentinite

再構成試料の ϕ' の関係は一致している。一方、残留状態のせん断抵抗角も不攪乱と再構成ではほぼ一致し、 ϕ'_s (ϕ'_s) から ϕ'_r への低下はおよそ 6° である。横田ら⁷⁾は蛇紋岩風化粘土の再構成試料について、 ϕ'_p を三軸で、 ϕ'_r をリングせん断試験で求めており、両者の差がおよそ 2° と小さいことを報告している。本研究でも三軸試験の $\phi' = 30.3^\circ$ (図-15) と、繰返し一面せん断による $\phi'_r = 27.7^\circ$ (図-16) との差をとれば、 2.6° であり、北海道神居古潭帯における蛇紋岩のピークから残留状態への強度低下は、比較的小さいことがわかる。

5. 葉片に沿う定圧一面せん断試験による実験結果

蛇紋岩塊は地すべりの直接的な原因ではなく、単に移動土塊を提供しているに過ぎないという指摘がある⁴⁾。しかしながら葉片状蛇紋岩が脆く崩れやすいことは実験を通じて明白であり、新しい試みとして、剥離性の著しい蛇紋岩の葉片に沿う摩擦係数を求める目的で定圧一面

図-16 定圧繰返し一面せん断試験におけるせん断応力-鉛直応力関係

Fig. 16 Shear stress vs. vertical stress relationships obtained by constant pressure direct box shear tests

表-2 実験条件 (一面せん断試験)

Table 2 Experimental condition for direct box shear test on foliated serpentinite specimen

試験名	深度 (m)	σ'_v (kPa)	初期含水比 (%)	水浸有無	断面積 (cm ²)
SF01	16.65~16.75	590	2.7	○	8.3
SF02	16.75~16.85	395	4.0	○	9.9
SF03	16.85~16.95	120	5.3	○	24.5
SF04	16.95~17.05	127	3.7	○	30.8
SF05	17.35~17.55	103	5.5	○	14.3
SF06	17.55~17.65	337	7.1	○	21.8
SF07	15.88~17.05	412	4.8	×	14.3
SF08	17.35~17.40	360	3.5	×	6.8
SF09	17.15~17.25	355	4.4	×	5.5
SF10	17.05~17.15	117	4.1	×	8.4

せん断試験を実施した。

5.1 試験概要

蛇紋岩の剥離面を含むと見られる岩片を選んで試験に供することから、岩片試料の周りを石膏で固めた状態のものを供試体とした。また試料の大きさも不定形であり、断面積は試験後に求めることとなる。石膏の部分も含めた供試体直径は75mm、高さは蛇紋岩の大きさによってそれぞれ異なるが、約40~60mmである。せん断箱間隔はSF01~SF06試験では5mm、SF07~SF10試験では1mm、せん断速度は0.1mm/minである。なおSF07~SF10試験では最小の摩擦係数を求めるために予め試料を二分し、せん断面をサンドペーパーで磨いたものを試料とした。試験条件を表-2に示す。

5.2 供試体作成

供試体を作成するために外径100mm、内径75mmの亚克力円筒を用いた。亚克力円筒は上下に分かれており、せん断箱の高さに対応して下部は21mm、上部は43mmの高さであり、せん断箱に固定するためフランジを設けてある。供試体の作成手順としては下部亚克力円筒の中に石膏を流し込み、固まりきる前にその上に試料を置いて固定する。石膏の強度が影響しないよう、試料の周り、上下せん断箱の間にグリースを満たす。その後上部亚克力円筒を置き、試料が隠れる程度まで石膏を流し込んで供試体の完成となる。また現場の状態に近づけるため、SF01~SF06試験では予め石膏の上部に小孔をあけ試料に蒸留水を供給させて試験を行った。SF07~SF10試験で蒸留水を供給しなかった理由は、磨いたせん断面をなるべく乱さないためである。なお石膏を固める時間を24時間、蒸留水を供給する時間も24時間とした。これを試験前に亚克力円筒ごとせん断箱にセットし試験を行う。せん断箱と供試体概要を模式的に図-17に示す。

5.3 試験結果と考察

岩片試料をそのまま試験に供したSF01~SF06試験と、予めせん断面を磨いたSF07~SF10試験結果のせん断応力~水平変位関係をそれぞれ図-18(a)および(b)に示した。

図-17 葉片に沿う一面せん断試験のせん断箱と供試体概要
Fig. 17 Outline of shear box and foliated serpentinite specimen for the direct shear test along its foliation

実験の性格上、本来ばらつきの少ないデータを望むべくもないが、図に示すように他と大きく異なる傾向を示すものもある。図-19は、図-18に示したせん断応力～水平変位関係におけるピーク時のせん断応力～鉛直応力関係を示したものである。図のプロットにあたり、図-18における挙動が他と異なる傾向を示すSF01, SF02およびSF07を除いても、 ϕ_d の評価が大きく異なることはないとの判断から、特にこれらのデータを除外することはしなかった。図-19に示すように、SF01～SF06試験結果から $\phi_d=34.3^\circ$ （図中、実線）で図-13および図-16に近似する結果が得られた。蛇紋岩の葉片状の部分は実際には滑らかなものであり、この面がせん断面と一致すればもっと小さな値になると思われる。しかし、滑らかではあるが水平とは言い難い葉片部分を強制的にせん断しているので、実験結果は予想外に大きな ϕ_d を示したものであると思われる。一方、サンドペーパーで磨かれた状態のせん断面についてのSF07～SF10試験のせん断応力～鉛直応力関係から蛇紋岩の葉片に沿う最小のせん断抵抗角として $\phi_d=6.5^\circ$ （図中、破線）が得られた。すなわち、蛇紋岩のせん断抵抗角は $6.5^\circ \sim 34.3^\circ$ の範囲にあるが、葉片に沿ったせん断が行われれば、その値は最小値すなわち 6.5° 前後の値に近づくと考えられる。

6. 各種せん断試験結果のまとめ

前章までに示したように、本研究では不攪乱状態および繰返し再構成試料についての圧密非排水三軸圧縮試験、粘土化した状態の不攪乱試料についての繰返し一面せん断試験、さらに不攪乱蛇紋岩の葉片に沿う一面せん断試験を実施した。これらの試験結果を総合すると、以下のようによまとめることができる。

通常の方法で実施された三軸試験や繰返し一面せん断試験から得られる蛇紋岩および蛇紋岩風化粘性土のせん断抵抗角 ϕ' はそのイメージからかけ離れた大きな値（ $\phi'=30^\circ$ 前後）を示す。しかし、粘土化した蛇紋岩の場合、負のダイレイタンスを示す結果、非排水せん断強度は不攪乱状態に比べて極めて小さい。したがって、せん断強度の適切な評価のためにはダイレイタンス特性の把握が不可欠である。一方、不攪乱状態でも葉片に沿うすべり面が発生するようなせん断条件の場合には ϕ'

(a)

(b)

図-18 葉片に沿う一面せん断試験におけるせん断応力～水平変位関係

Fig. 18 Shear stress vs. horizontal displacement relationships for foliated serpentinite

図-19 葉片に沿う一面せん断試験におけるせん断応力～鉛直応力関係

Fig. 19 Shear stress vs. vertical stress relationships for foliated serpentinite

そのものが大きく低下し、最も小さい場合で $\phi'=6^\circ$ 前後の値をとる。次章で述べるようにスレーキングによって容易に固結力が低下することとあわせて考えると、設計にあたっての最悪の条件として、葉片に沿うすべりが生じる場合のせん断抵抗角の大きさを考慮に入れておく必要があると考えられる。

7. スレーキング試験

蛇紋岩のスレーキングの度合いを調べるために、不攪乱蛇紋岩の中から硬質な岩片を選んで、日本道路公団の基準 (KODAN111) による乾湿繰返し方法によってスレーキング試験を実施した。自然含水状態 (含水比6.7%) の岩石試料の質量を測定し、24時間水浸させ、90℃の温度で標準48時間炉乾燥する。乾燥した試料をデシケーター内で室温まで冷まし、その質量を測定した後再び水浸する操作を10回繰り返すことになっているが、1回目炉乾燥後の水浸における吸水量は8.1%で、この水浸において試料は崩壊したので試験終了となった。試料は蒸留水を入れた直後に崩壊し始め、1日後にはほとんど細粒化した。このことより蛇紋岩のスレーキングの度合いは顕著であり、自然状態では硬質であっても水の影響により容易に崩壊し固結力が低下することが確認された。

8. 膨潤圧試験

蛇紋岩地帯でのトンネル工事において、過去に膨張性土圧の発生により難工事を強いられたという報告¹⁵⁾がある。その原因として(1)構成鉱物の吸水膨張、(2)地層の破壊と塑性変形、(3)潜在応力の解放の3つが考えられている¹⁵⁾。ここでは前述のMB法によりスメクタイトの存在が確認されていることから、(1)に着目して膨潤圧の測定を行った。試料はX線回折に用いた試料I、IIと同じボーリング孔 (2ヶ所) で採取された試料の425 μ mふるい通過分であり、以下それぞれ試料A、試料Bとする。供試体寸法は直径60mm、高さ20mmとし、ステンレス製の圧密リングを締固め容器にセットして、乾燥粉末試料を静的に締固めることにより作製した。実験条件を表-3に示す。なお、試料の初期状態は乾燥粉末状態である。

8.1 試験装置

試験には定ひずみ速度圧密試験用の載荷装置を用いた。供試体をセットしたのち後述の大きさの初期載荷を行い、載荷フレームを固定した状態で試験開始と同時に浸水させ、ロードセルにより膨潤圧を測定する。但し本実験において最大の場合で0.1mmの軸方向変位が観測されている。初期載荷については、締固め容器から取り出す際に応力が一時解放されることから生じる供試体の膨張を考慮して実施した。

8.2 試験結果と考察

図-20(a)、20(b)に膨潤圧～時間関係を示す。締固め応力を3種類 (3.5, 6.3, 10.2MPa) に変えて実験を行い、初期載荷応力として本研究では試みにそれぞれ約50kPa, 100kPaとして実験を開始した。図より締固め応力が大きい方が膨潤圧も大きい。試料A(SWA1～SWA6)と試料B(SWB1～SWB6)の挙動は明らかに異なることがわかる。図-20(a)においては締固め応力が等しくても初期載荷応力の大きい方が膨潤圧は20kPa～40kPaほど大きいものに対し、図-20(b)ではピークの発現の仕方に緩急の違いはあるが、膨潤圧のピークはほぼ等しい。

表-3 実験条件 (膨潤圧試験)

Table 3 Experimental condition for swelling pressure test

試験名	乾燥密度 (g/cm^3)	締固め応力 (MPa)	初期載荷 (kPa)	スメクタイト 含有量(%)
SWA1	1.63	3.5	51	4.3
SWA2	1.63	3.5	100	2.9
SWA3	1.71	6.3	49	2.9
SWA4	1.71	6.3	100	4.3
SWA5	1.79	10.2	52	4.3
SWA6	1.79	10.2	101	4.3
SWB1	1.65	3.5	51	8.6
SWB2	1.65	3.5	100	8.6
SWB3	1.74	6.3	52	10.0
SWB4	1.74	6.3	100	11.4
SWB5	1.80	10.0	55	10.0
SWB6	1.83	10.0	101	8.6

い。また、条件の等しい試験でも試料Bより試料Aの方が膨潤圧は大きい。表-3よりスメクタイト含有量は、試料Aが2.9～4.3%なのに対し、試料Bは10%前後と含有量が多い。このことから、スメクタイト含有量の多寡が必ずしも発生膨潤圧の大きさに直接結びついていないことが分かる。

筆者らは緩衝材としてのベントナイト・珪砂混合土の力学特性の研究に関連してベントナイト混合率を30, 50, 70%に変えた試料についての膨潤圧測定を行っている¹⁶⁾。その結果によれば、ベントナイト混合率の増加とともに膨潤圧が直線的に増加し、混合率20%の増加に対して150～200kPaの膨潤圧の増加がみられた。蛇紋岩についての膨潤圧の測定結果が前述のような傾向を示したのは、試料A、Bともにスメクタイト含有量が予想外に低かったことによるものではないかと考えられる。

9. 結 論

北海道神居古潭帯に産出する蛇紋岩について各種室内試験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) X線回折およびメチレンブルー吸着法による測定結果から、スメクタイト含有量は比較的少なく、また、膨潤圧の大小が必ずしもスメクタイト含有量と直接的な関係にはないことが分った。
- (2) 圧密非排水 (CU) 三軸圧縮試験におけるせん断抵抗角は不攪乱蛇紋岩および蛇紋岩粘性土ともほぼ一致し、30°前後の値をとる。この値はまた、蛇紋岩風化粘土についての既往の研究結果とも一致する。したがって、これらを総合すると蛇紋岩のせん断抵抗角そのものは繰り返しや風化の影響を受けにくいといえる。しかし、蛇紋岩粘性土の非排水せん断強度はダイレイタンス特性の違いから、不攪乱蛇紋岩よりも大幅に低下する。
- (3) CU試験および繰返し一面せん断試験の結果、蛇紋岩のピークせん断抵抗角 ϕ'_p は不攪乱、再構成に

図-20(a) 膨潤圧-時間関係 (試料A)

Fig. 20(a) Swelling pressure vs. time relationships for sample A

図-20(b) 膨潤圧-時間関係 (試料B)

Fig. 20(b) Swelling pressure vs. time relationships for sample B

よらず, $31 \pm 2^\circ$ 程度の値をとり, 残留状態のせん断抵抗角 ϕ'_r は $27 \sim 28^\circ$ と大きく, ϕ'_p から ϕ'_r への低下は比較的小さい。

- (4) 葉片に沿って強制的にせん断を生じさせる目的で実施した一面せん断試験結果から得られた蛇紋岩のせん断抵抗角は 34.3° であるが, 予め葉片に沿って二分し, 試料の表面を磨いた状態での試験結果から得られたせん断抵抗角は 6.5° であった。
- (5) 葉片状蛇紋岩は水の供給によって容易にスレーキングを起こし崩壊しやすい。
- (6) 上記(2)~(4)のように, 通常のせん断試験方法によって得られる蛇紋岩および蛇紋岩風化粘性土のせん断抵抗角 ϕ' はそのイメージからかけ離れた大きな値を示す。しかし, 粘土化した蛇紋岩の非排水せん断強度そのものは不攪乱状態に比べて極めて小さく, また, 不攪乱状態でも葉片に沿うすべり面が発生するようなせん断条件の場合には ϕ' そのものが大きく低下する。
- (7) 本研究で実施した各種せん断試験およびスレーキ

ング試験の結果を総合して考えると, 現場の施工条件として排水の重要性は言うまでもないが, 設計にあたっての最悪の条件として, 葉片に沿うすべり面を想定したせん断抵抗角の大きさを考慮に入れておく必要があると考えられる。

謝辞

本研究に用いた蛇紋岩試料は日本道路公団北海道支社より提供を受けたものである。また, 本報告をまとめるにあたり, X線回折分析において北海道大学大学院工学研究科の米田哲朗先生, ならびに小野修司先生のご指導を得た。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野地正保 (1978): 蛇紋岩と土工工事 (第1報) - 蛇紋岩と蛇紋岩化作用 -, 北海道開発局土木試験所月報No. 342, pp. 10-19.
- 2) 矢田部龍一, 横田公忠, 八木則男, 野地正保 (1997): 蛇紋岩地すべりの発生機構に対する検討, 地すべり, 第34巻, 第1号, pp. 24-30.
- 3) 梅津一晴 (1995): 蛇紋岩の土質地質の一検討, 応用地質36巻5号, pp. 46-55.
- 4) 横田公忠, 矢田部龍一, 八木則男 (1998): 蛇紋岩地すべりに対する鉱物学的考察, 地すべり, 第35巻, 第3号, pp. 15-23.
- 5) 野地正保 (1978): 蛇紋岩と土工工事 (第2報) - 蛇紋岩地帯の陸水の水質 -, 北海道開発局土木試験所月報, No. 342, pp. 1-22.
- 6) 野地正保 (1984): 蛇紋岩と土工工事 (第3報) - 神竜幹線導水トンネル -, 北海道開発局土木試験所月報, No. 378, pp. 1-9.
- 7) 横田公忠, 矢田部龍一, 八木則男 (1995): 蛇紋岩の風化粘性土の強度特性, 土木学会論文集, No. 529/III-33, pp. 155-163.
- 8) 横田公忠, 矢田部龍一, 八木則男 (1996): 蛇紋岩の風化粘性土に起因した切土のり面の崩壊に関する一考察, 土木学会論文集, No. 541/III-35, pp. 57-65.
- 9) 横田公忠, 矢田部龍一, 八木則男 (1997): 蛇紋岩地帯の地すべりの発達に及ぼす粘土鉱物とせん断強度の影響, 土木学会論文集, No. 568/III-39, pp. 125-132.
- 10) 北郷 繁 (1973): 蛇紋岩の土質工学的性質, 第8回土質工学研究発表会講演集, pp. 65-72.
- 11) 北郷 繁, 寺崎靖則, 掛橋隆晴, 田中洋行 (1974): 蛇紋岩の土質工学的性質 (第2報), 土質学会北海道支部技術報告集, pp. 33-41.
- 12) 三田地利之, 和智真太郎, 松永卓也 (1999): 不攪乱状態で採取された蛇紋岩の吸水膨張による強度変化, 地盤工学会北海道支部技術報告集第39号, pp. 183-188.
- 13) 和智真太郎, 三田地利之, 川口貴之 (2000): 蛇紋岩粘性土の強度・変形特性, 地盤工学会北海道支部技術報告集第40号, pp. 173-180.
- 14) 地盤工学会 (2000): 土質試験の方法と解説 - 第1回改訂版 -, pp. 496-497.
- 15) 喜田大三, 辻 博和 (1973): ずい道工事における風化蛇紋岩の土質工学的研究, 第8回土質工学研究発表会講演集, pp. 69-72.
- 16) 小松賢司, 三田地利之, 戎 剛史, 谷村匡哉 (2003): 各種室内試験によるベントナイト・珪砂混合土の力学特性, 第58回土木学会年次講演会 (投稿中).

(原稿受付2003年3月11日, 原稿受理2003年9月1日)