

不攪乱蛇紋岩および蛇紋岩粘性土の物理・力学特性

Physical and Mechanical Properties of undisturbed serpentine and serpentine originated clay

北海道大学大学院 ○学生員 藤 澤 久子 (Hisako FUJISAWA)
 同 上 フェロー 三田地 利之 (Toshiyuki MITACHI)
 同 上 正会員 工 藤 豊 (Yutaka KUDOH)

1. はじめに

蛇紋岩は主に蛇紋石からなる変成岩の一種であり、日本列島の地質構造線に沿って全国各地に分布している。一口に蛇紋岩といわれるものでも自然における産状岩質は極めて多様であり、更に応力解放や水の影響といった条件により物性が様々に変化するため、土木工事に際して種々の問題を引き起こす岩体であることが知られている。筆者らは一昨年から北海道神居古潭帯に産出する蛇紋岩について、不攪乱状態で採取された蛇紋岩および試験後の試料を粉碎して再構成した蛇紋岩粘性土を室内各種三軸圧縮試験に供し、力学的性質を調べてきた^{1),2)}。その結果、蛇紋岩が容易に破碎、泥状化することが確認でき、蛇紋岩粘性土は粘土と同様の強度特性を示すことがわかった。しかしながら上述のような実務上の問題に直結する力学特性を見出すまでには至っていない。本報告はその後実施した追加実験の結果を加えて、これまでの力学試験結果を総括するとともに、新たに実施した①X線回折による鉱物分析、②スメクタイトの定量分析結果、③圧密容器を利用した膨潤圧試験、④不攪乱蛇紋岩の葉片に沿う一面せん断試験の結果について報告するものである。

2. 不攪乱蛇紋岩と蛇紋岩粘性土の強度特性の比較

2.1 試験試料

本研究に用いた試料は、北海道横断自動車道東占冠トンネル地質調査に関わる蛇紋岩で、北海道勇払郡占冠村で採取された葉片状蛇紋岩試料である。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 $425\mu\text{m}$ ふるいにかけ、その通過分を 200kPa で予圧密したものである。

2.2 実験概要および実験条件

実験は圧密非排水三軸圧縮(CU)試験と繰返し定圧一面せん断(RDBS)試験である。CU 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²⁾。CU 試験では原位置の土被り圧に相当する応力(p')まで等方圧密後、非排水せん断を行った。圧密の打ち切り基準として 3 t 法を適用し、非排水せん断時のひずみ速度は $0.1\%/min$ である。

RDBS 試験における供試体寸法は、高さ 20mm、直径 60mm であり、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载荷後、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 $0.2\text{mm}/min$ 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 6mm 、せん断箱間隔は 0.2mm である。

2.3 実験結果および考察

(1) 圧密非排水三軸圧縮(CU)試験結果

図-1 に CU 試験における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を示す。データはともにせん断開始時の平均有効応力が 400kPa 程度の試験である。不攪乱蛇紋岩は過圧密的な状態にあると考えられるため、右上がりの経路を辿っており、不攪乱蛇紋岩の主応力差の最大値は蛇紋岩粘性土の約 4 倍となっている。このことから蛇紋岩(あるいはその風化粘性土)の強度そのものを知るためには、変成岩としての蛇紋岩の“先行圧密応力に相当する応力”を把握し、現在の土被り応力との関係からダイレイタンス特性を推定する方法を探る必要がある。図-2 に $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 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。横田ら³⁾は占冠地区の 2 箇所から採取した蛇紋岩風化粘土(繰返し再構成試料)について $\phi' = 30.3^\circ$ 、 31.2° を報告している。したがってこれらの実験結果を合わせて考えると、不攪乱蛇紋岩

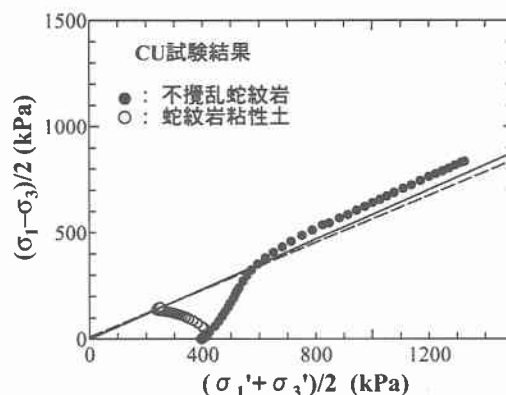
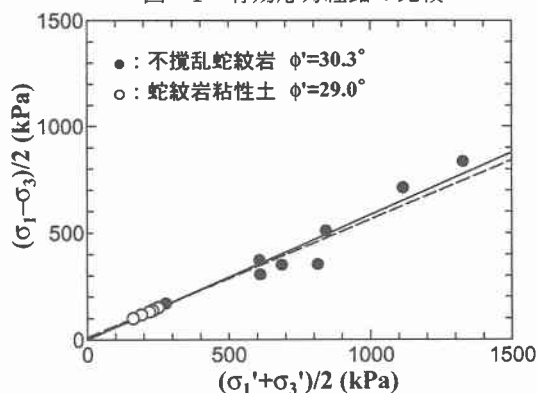


図-1 有効応力経路の比較

図-2 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 関

の有効応力に基づくせん断抵抗角に与える繰り返しおよび風化の影響は、ほとんどないと考えられる。

(2) 繰返し定圧一面せん断(RDBS)試験結果

図-3 にせん断応力～鉛直圧密応力関係を示す。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、不攪乱と再構成試料の ϕ' 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ほぼ一致し、 $\phi'_p(\phi'_s)$ から ϕ'_r への低下はおおよそ 6° である。横田ら³⁾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 $\phi'_r=30.3^\circ$ (図-1)と、繰返し一面せん断による $\phi'_r=27.7^\circ$ 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。

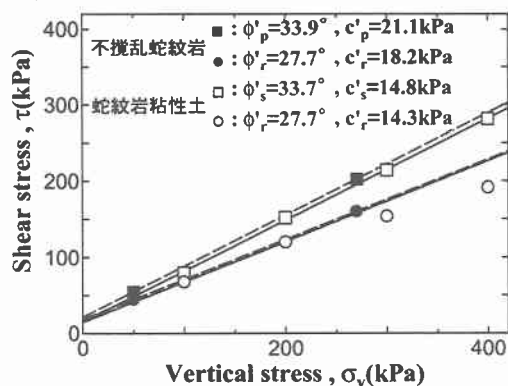


図-3 せん断応力～鉛直圧密応力関係

3. 構成鉱物

3.1 X線回折の方法と分析結果

蛇紋石の主要な鉱物はアンティゴライト、クリソタイル、リザーダイトである。しかし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。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³⁾。

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、試料は二種類、どちらも北海道神居古潭帯に産出する蛇紋岩であるが、異なるボーリング孔からの試料である。蛇紋岩Ⅰは蛇紋岩を粉砕し、蛇紋岩Ⅱは粉砕せずに自然に崩れた試料を $74\mu\text{m}$ ふるいに通した試料である。

回折図を図-4 に示す。図より蛇紋岩Ⅰおよび蛇紋岩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、蛇紋岩Ⅱでは 6° 付近と 29° 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)とタルクではないかと思われる。

3.2 スメクタイトの定量分析

X線回折結果は定性分析のため、鉱物の含有割合はわ

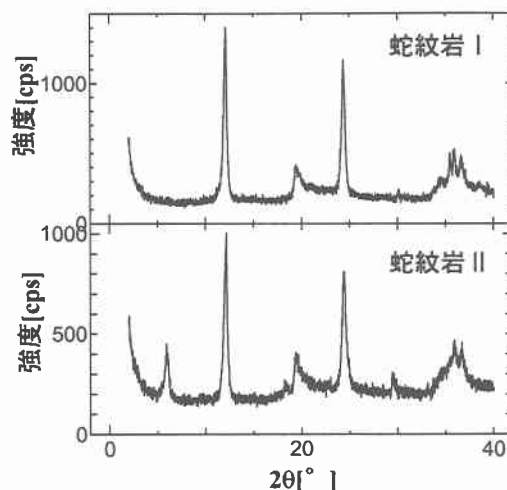


図-4 X線回折図

からない。しかしながら前述したように含有鉱物が蛇紋岩の強度特性に影響を及ぼしていると考えられており、特にスメクタイトは膨張性の粘土鉱物のうち主要なものであり、地すべり発生の要因とされている鉱物である。その含有の割合を調べるためにMB法を行った。この方法はメチレンブルーがスメクタイトに吸着される性質を利用したものでX線回折と同様、 $74\mu\text{m}$ 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 $2.85\sim 25.65\%$ と幅広く、同地帯の蛇紋岩でも含有割合は異なることがわかった。

4. 膨潤圧試験

蛇紋岩地帯における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⁴⁾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⁴⁾、ここでは前述のMB法より蛇紋岩Ⅱにはスメクタイトの存在が確認されているため、(1)に着目して膨潤圧の測定を行った。試料は蛇紋岩Ⅰ、Ⅱの $425\mu\text{m}$ ふるい通過分であり、供試体寸法は直径 60mm 、高さ 20mm とし、静的載荷装置により締固めを行った。実験条件を表-1に示す。なお、試料の初期状態はほぼ乾燥粉末状態である。

表-1 実験条件(膨潤圧試験)

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(%)
swⅠ-1	1.63	3.5	50.5	4.3
swⅠ-2	1.63	3.5	100.2	2.9
swⅠ-3	1.71	6.3	49.0	2.9
swⅠ-4	1.71	6.3	99.5	4.3
swⅠ-5	1.79	10.2	51.8	4.3
swⅠ-6	1.79	10.2	100.7	4.3
swⅡ-1	1.65	3.5	51.2	8.6
swⅡ-2	1.65	3.5	99.8	8.6
swⅡ-3	1.74	6.3	51.6	10.0
swⅡ-4	1.74	6.3	100.2	11.4
swⅡ-5	1.80	10.0	54.8	10.0
swⅡ-6	1.83	10.0	101.1	8.6

4.1 試験装置

本研究に使用した試験装置は標準圧密試験装置である。供試体をセットした後初期載荷を行い、以降軸方向変位が生じない条件を保ちながら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。初期载荷については締固め後、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。

4.2 試験結果と考察

図-5, 6 に膨潤圧～時間関係を示す。締固め応力を 3 パターンに変えて実験を行い、初期载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、蛇紋岩Ⅰと蛇紋岩Ⅱの挙動は明らかに異なることがわかる。図-5 においては締固め応力が等しくても初期载荷応力の大きい方が膨潤圧は 20kPa～40kPa ほど大きいのにに対し、図-6 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。また、条件の等しい試験でも蛇紋岩Ⅱより蛇紋岩Ⅰの方が膨潤圧は大きい。表-1 よりスメクタイト含有量は、蛇紋岩Ⅰが 2.9～4.3%なのに対し、蛇紋岩Ⅱは 10%前後と蛇紋岩Ⅱの方が多。このことから構成鉱物の吸水膨張が、膨張性土圧の発生の直接的な原因とは言えない。いずれにしても蛇紋岩試料の膨張性が確認されたわけだが、いずれも締固め応力に対して膨潤圧の測定値は比較的小さな値を示している。

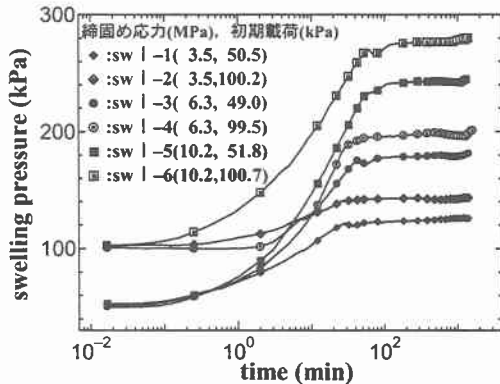


図-5 膨潤圧～時間関係 (蛇紋岩Ⅰ)

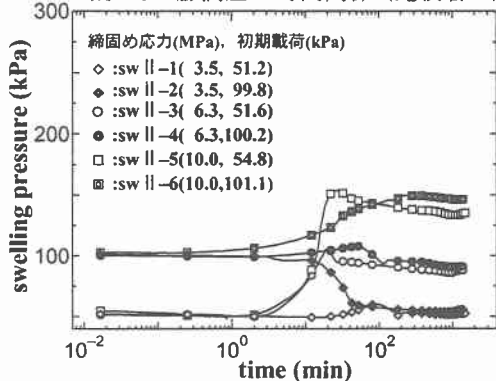


図-6 膨潤圧～時間関係 (蛇紋岩Ⅱ)

5. 蛇紋岩の葉片に沿う一面せん断試験

蛇紋岩塊は地すべりにおいて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考えられている³⁾。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、本研究では力学的観点からの新しい試みとして、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 ja01～ja09 試験では 1mm, ja10～ja13 試験では 5mm, せん断速度は 0.1mm/min である。なお ja06～ja09 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。

表-2 実験条件 (一面せん断試験)

試験名	深度 (m)	σ'_v (kPa)	初期含水比 (%)	水浸有無	断面積 (cm ²)
ja01	15.98～16.11	346	5.4	○	7.1
ja02	15.88～15.98	243	5.5	○	20.2
ja03	15.78～15.88	498	3.8	○	7.9
ja04	15.68～15.78	78	7.2	○	31.4
ja05	17.25～17.35	102	3.8	○	24.1
ja06	17.25～17.35	684	3.8	×	5.7
ja07	17.35～17.40	360	3.5	×	6.8
ja08	17.15～17.25	355	4.4	×	5.5
ja09	17.05～17.15	117	4.1	×	8.4
ja10	16.65～16.75	590	2.7	○	8.3
ja11	16.75～16.85	395	4.0	○	9.9
ja12	16.85～16.95	120	5.3	○	24.5
ja13	16.95～17.05	127	3.7	○	30.8

5.2 供試体作成

供試体を作成するために外径 100mm, 内径 75mm のアクリル円筒を用いた。アクリル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つばをつけてある。供試体の作成手順としては下部アクリル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、せん断箱間隔にはグリースを満す。その後上部アクリル円筒を置き、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、ja01～ja05 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。ja06～ja09 試験で蒸留水を供給しなかった理由は、磨いたせん断面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。これを試験前にアクリル円筒ごとせん断箱にセットし試験を行う。供試体概要を図-7 に示す。

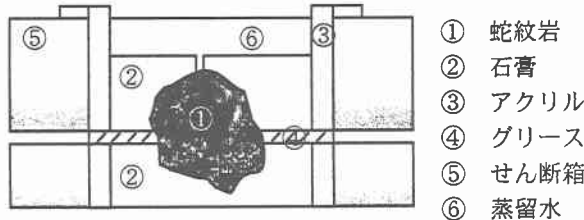


図-7 供試体概要

5.3 試験結果と考察

ja01～ja09 試験についてデータを整理したところ、せん断抵抗角 ϕ_d は 40.9° であり、過去に行ったCU試験、RDBS試験の ϕ' より大きな値となった。蛇紋岩の剥離面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となると思われるが、周りを石膏で固めてあり、更にせん断箱間隔(1mm)によってせん断箇所が固定されるため、より弱い箇所をせん断できなかったという可能性もある。そこでja10～ja13試験においてせん断箱間隔を5mmとし、せん断可能な範囲を広げた試験を行ったが、試料の断面積の大小によりせん断応力～せん断変位関係の挙動に違いが見られた。以上の理由により、試料を予め二分してあるja06～ja09試験を除くすべての試験について、断面積が 10cm^2 未満の試験と 20cm^2 以上の試験とに分け、断面積の違いから検討を行った。図-8, 9に示すせん断応力～せん断変位関係において、断面積が小さい試験ではせん断応力がピークに達した後、急減するのに対し、大きい試験では応力の低下は緩やかである。図-10に示すせん断応力～鉛直応力関係において、断面積が大きい試験のせん断抵抗角 ϕ_d は 36.9° 、小さい試験では $\phi_d=27.6^\circ$ 、 $c_d=136.3\text{kPa}$ という結果を得た。両者には 10° 近い差があり、特に切片の c_d は大きく異なる。この理由として断面積が小さい試料は、石膏により拘束される部分が多くなるため、強い固結力を示したものと思われる。

図-11にja06～ja09試験のせん断応力～せん断変位関係を示す。せん断応力がピークに達した後の強度低下は見られず、これは試料のせん断面が磨かれた状態であるため、一定の摩擦力を保っているためと考えられる。図-12に示すせん断応力～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 $\phi_d=3.1^\circ$ が得られる。

6. まとめ

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

- 1) CU試験およびRDBS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 $27 \sim 28^\circ$ と大きく、 ϕ'_p から ϕ'_r への低下は比較的小さい。
- 2) X線回折およびMB法より、スメクタイト含有分は少なく、スメクタイトの吸水膨張が、膨潤圧の直接原因とは言い難い。
- 3) 一面せん断試験の結果から、蛇紋岩の葉片に沿うせん断抵抗角はスメクタイト含有量に関係なく1)の結果より小さくなると推測される。

ここで、3)の結論については手探り状態の試験であり、現時点で得られているデータの信頼性は決して高いとはいえず、十分なものではない。しかし、鉱物学的な観点から地すべりなどの問題を引き起こし難いのではないかと考えられていた³⁾北海道神居古潭帯の蛇紋岩について、新たな手法により力学特性解明の糸口をつかむことが出来たと考えている。

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

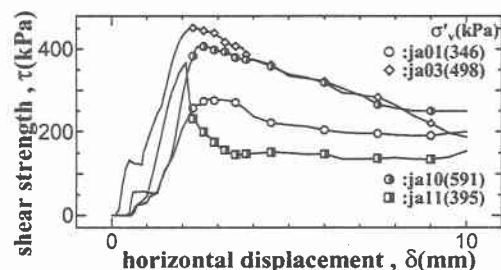


図-8 せん断応力～せん断変位関係(断面積小)

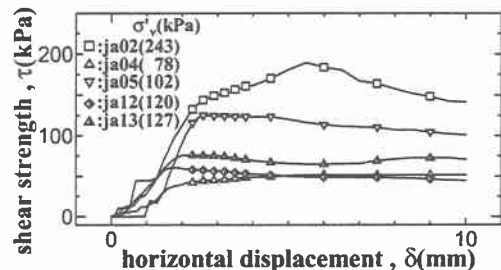


図-9 せん断応力～せん断変位関係(断面積大)

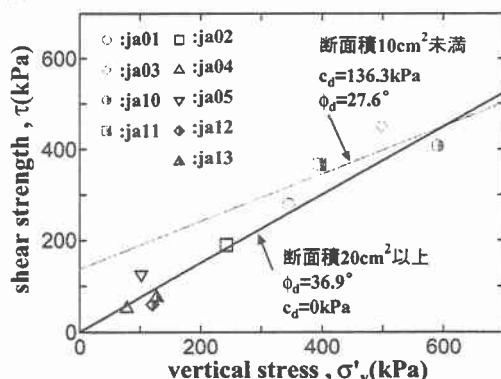


図-10 せん断応力～鉛直応力関係(断面積比較)

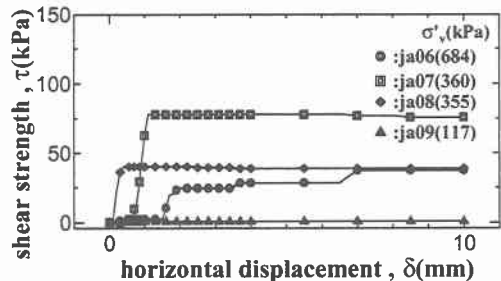


図-11 せん断応力～せん断変位関係(ja06～ja09試験)

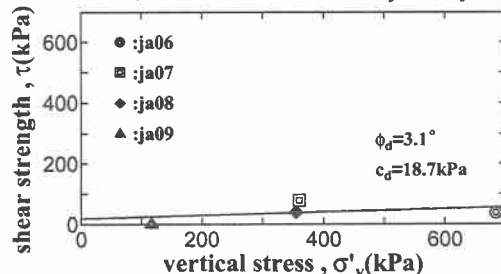


図-12 せん断応力～鉛直応力関係(ja06～ja09試験)

意を表します。

参考文献

- 1) 和智ら：不攪乱蛇紋岩および再構成蛇紋岩粘性土の強度特性，第35回地盤工学研究発表会，p.579-580，2000。
- 2) 藤澤ら：不攪乱蛇紋岩および再構成蛇紋岩粘性土の強度特性（第2報），第56回年次学術講演会講演概要集，p.，2001。
- 3) 横田ら：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，p.155-163，1995。
- 4) 喜田ら：ずい道工事における風化じや紋岩の土質化学的研究，第8回土質工学研究発表会講演集，p.69-72，1973。