

蛇紋岩の風化粘性土の強度特性

横田公忠¹・矢田部龍一²・八木則男³

¹正会員 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3)

²正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

³正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科

日本各地の蛇紋岩の風化した粘性土の強度特性ならびに含有鉱物を調べた。その結果、強度特性に関しては、 ϕ' が 30° 前後と大きく、 ϕ_r への低下が殆どないものと、 ϕ' が 30° を下回り、 ϕ_r への低下も大きいものの2つに大別できた。この強度特性の違いは含有鉱物の違いにあることを鉱物分析により示した。即ち、前者はアンティゴライトやクリソタイルを含み、後者は、モンモリロナイトやクロライトを含んでおり、それがせん断抵抗角に大きく影響していることを示した。

Key Words : *serpentine, clay, shear test, angle of shear resistance, clay mineral*

1. ま え が き

蛇紋岩は北海道の神居古潭帯から南は九州の三波川帯まで、日本列島の地質構造線に沿って分布しており、時に難工事の原因となることから土木技術者には比較的名の知れた岩である。ところで、蛇紋岩とは蛇紋石を主成分鉱物とする岩石で、かんらん岩や輝石等の超塩基性岩から蛇紋岩化作用で生成されたものである。蛇紋岩化作用とは水を含まない鉱物から水を含む鉱物への変化、つまり加水反応である。蛇紋岩は加水反応により生成されており、非常に弱い岩石であることと、蛇紋岩地帯が地質的に脆弱な地質構造帯や断層構造に沿って分布していることから、前述したように土木工事を行う上で様々な問題を引き起こしてきている。

蛇紋岩の鉱物的・化学的特性や地質的特徴に関しては多くの研究がなされている^{1), 2), 3)}。工学的にも多くの工事報告はなされているが、力学的研究は非常に少なく、野地⁴⁾による強度特性に及ぼすタルクの影響に関する研究がなされている程度である。

本研究は、風化蛇紋岩の強度特性を調べ、風化蛇紋岩が各種の難工事の原因となる力学的根拠を明らかにすることを目的としている。

2. 蛇紋岩の一般的特性

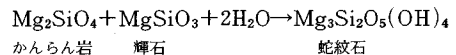
従来の研究で明らかにされている蛇紋岩の特性の内、建設工事を行う上で問題を引き起こす原因となると思われる蛇紋岩の性質を簡単にまとめておく。

蛇紋岩は超塩基性岩 (SiO_2 含有量が 45 wt% 以下の

火成岩) のうちの斜長石、かすみ岩などの珪長質岩を除いた超苦鉄質岩 (かんらん岩、輝石、角せん岩など、殆どが有色鉱物からなり、色指数が 70 以上のもの) が蛇紋岩化作用により変成したものである。

蛇紋石 ($\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$) の主要な鉱物はアンティゴライトとクリソタイルそれとリザーサイトである。これら三種は同一の化学組成を持ちながら結晶構造が異なる。蛇紋石鉱物はカオリン鉱物と同様 2 層構造をしており、カオリンの 2 Al の代わりに 3 Mg が入っている。したがって、形態はカオリン鉱物と類似で、アンティゴライトは主に六角板状結晶を、クリソタイルは主に中空管状結晶をしており、化学的、電気的に安定であり、不活性である^{5), 6)}。

蛇紋石が形成される過程の一例を示すと次のようである。



反応式でわかるように蛇紋岩化作用は加水反応であり、それに伴う体積膨張により 3.2~4.4 程度であった原岩の比重が 2.5~3.0 程度に変化している。

蛇紋石形成に関しては、この反応式以外にも原岩や接する岩体の岩種により 6 種類の反応式が明らかにされている⁷⁾。その場合には蛇紋石以外にブルーサイト、菱苦土石、タルク、カルサイト、フォレストライト、クロライトが形成される。タルクは蛇紋岩中に多く含まれているが、モース硬度が 1 と最も軟らかい鉱物であり、せん断抵抗角が小さいことが推測される。また、クロライトは緑色片岩、御荷鉾緑色岩、グリーントフの主要鉱物であり、それらが分布する地域の地すべりを引き起こす原

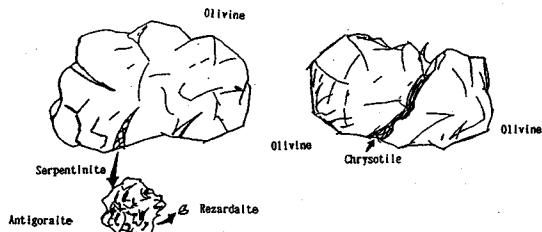


Fig.1 Schematic diagram of metamorphic process in serpentine

因の一つとなっている鉱物で、せん断抵抗角はかなり小さい⁸⁾。カルサイト（方解石）は水に溶けやすいので、風化を促進すると思われる。このように、蛇紋岩は蛇紋岩化作用時に既に風化を受けやすい鉱物を形成しており、また、強度的に弱いと考えられる鉱物も同時に形成している。

蛇紋岩が建設工事に際して問題を引き起こす主要な原因として考えられるものは、破碎、風化が進んだ岩体が多いことと風化して形成される粘性土の強度が小さいことである。

破碎、風化が進んでいる岩体が多い理由として前述した蛇紋岩そのものが弱い岩であるということ以外に次のことも考えられる。Fig.1 に変成過程を模式的に示す。まず、かんらん石や輝石の劈開面に沿って楔状に蛇紋石化（アンティゴライト）し、原石の大割が進行する。小割状態になると残っていたかんらん石の部分が蛇紋石化（アンティゴライト）し、それ以上に小割状態が進行するとアンティゴライト部分はリザードタイト化する。小割作用の結果、蛇紋岩の多くは網目構造をしている⁹⁾。また、原かんらん石とかんらん石の接合部分はクリソタイル化している。このように、蛇紋岩化作用は小割作用であり、また、接合部のクリソタイルは比較的結合力が弱いので蛇紋岩は破碎されやすいことがわかる。さらにFig.2 に示した分布図から明らかなように、蛇紋岩は構造線や断層破碎帯に沿って貫入している場合が多い。薄い貫入岩体は多くの場合破碎が非常に進んでおり、粘土化している層も多く見受けられるが、これは岩体が小さいため貫入時に既に破碎されていることが多いからであると思われる。また、地質的な弱部に貫入している場合が多いので、貫入以降に起こる断層運動により破碎される確率が高く、一般的に地下水が豊富であり、風化が促進されやすいと考えられる。

以上、簡単に述べたが、蛇紋岩は加水反応で形成されているので弱い鉱物であること、蛇紋岩化作用の段階で風化を受けやすい鉱物や強度的に弱い鉱物を含んでいること、構造線等の断層破碎帯に貫入しているという地質的特徴により物理的に破碎されている確率が高いこと、さらに、地下水の豊富な環境下であり、化学的な風化を

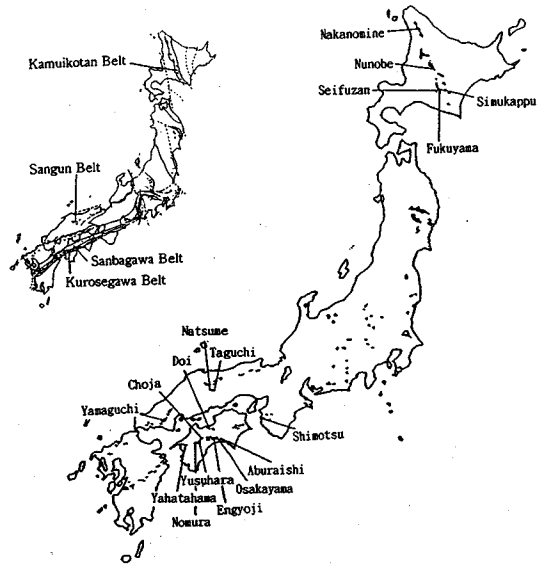


Fig.2 Distribution map of serpentine in Japan and station of sampling

受けやすいことという条件を併せ持っている。これらの要因により建設工事に際して問題を起こしやすい岩体となっていると考えられる。

次に、蛇紋岩の風化した粘性土の強度特性を調べ、蛇紋岩が種々の問題を引き起こす土質力学的な背景を検討する。

3. 風化蛇紋岩の強度特性

(1) 試料

試料の採取位置をFig.2 に示す。図には蛇紋岩の分布も示している¹⁰⁾。三波川帯から4箇所、黒瀬川帯から4箇所、三郡変成帯から3箇所、それと神居古潭帯から5箇所の計16地点の蛇紋岩を採取した。なお、各地質帯の分布状況はFig.1 に併せて示す。採取地点の概要を簡単に示す。

三波川帯

八幡浜地区の試料はトンネルの盤ぶくれ現場から採取した粘土状蛇紋岩である。蛇紋岩体は大半が細粒化しており、一部は粘土化している。野村地区の試料は切土のり面から採取した葉片状蛇紋岩である。蛇紋岩体は塊状～葉片状を呈している。富郷地区の試料は切土のり面から採取した塊状蛇紋岩である。本地区の蛇紋岩体近くでは、かんらん岩を基礎岩盤としてダムの建設が進められている。下津地区の試料は切土のり面から採取した粘土状蛇紋岩である。蛇紋岩は三波川の変成岩体にレンズ状に貫入しており、葉片状～粘土状を呈している。本地区

Table 1 Physical properties and grain size distribution

Sample	Point	WL(%)	WP(%)	I _p	GS	grain size distribution (%)			
						Clay	Silt	Sand	Gravel
Yawatahama	Out crop	53.5	30.6	22.9	2.85	28.6	16.3	35.0	20.1
ShimotsuS-1	Out crop	28.3	16.4	11.9	2.83	5.6	36.0	56.3	2.1
ShimotsuS2-1	Out crop	28.4	9.4	19.0	2.64	13.3	37.8	32.1	16.8
ShimotsuS2-2	Out crop	32.6	15.9	16.7	2.67	13.6	40.7	28.2	17.5
ShimotsuS-3	Out crop	22.1	12.2	9.9	2.93	15.5	35.6	36.3	12.6
ShimotsuS-4	Out crop	40.1	14.8	25.3	2.61	9.3	26.2	61.3	3.2
ShimotsuS-5	Out crop	31.6	14.6	17.0	2.74	11.8	15.0	51.8	21.4
Toyohashi	Out crop	-	-	-	-	11.1	30.6	26.7	32.7
Yusuhara	Out crop	36.9	16.8	20.1	2.71	18.6	48.8	27.5	5.1
Cyouja S-1	Out crop	46.7	20.3	26.4	2.67	9.3	27.5	57.5	5.7
Cyouja Bor. 7	GL-28~29m	30.0	19.7	10.3	2.60	9.9	4.9	73.8	11.4
Cyouja Bor. 7	GL-36~38m	24.4	14.3	10.1	2.66	7.3	5.1	32.5	55.1
Cyouja Bor. 7	GL-44~45m	41.2	18.6	22.6	2.53	31.1	26.9	34.4	7.6
Engyouji-1	Out crop	49.5	17.7	31.8	2.56	8.6	46.9	31.3	13.2
Engyouji-2	-	43.2	16.7	26.5	2.63	6.8	8.0	74.5	10.7
Ousakayama	-	48.3	19.1	29.2	2.63	11.1	3.8	43.7	41.1
Yamaguchi-1	Out crop	40.5	25.7	14.8	2.72	29.3	39.3	25.0	6.4
Yamaguchi-2	-	32.4	20.0	12.4	2.71	6.3	7.9	30.1	55.1
Taguchi-1	GL-27~28m	49.5	17.7	31.8	2.72	16.8	21.2	40.6	21.4
Taguchi-2	GL-28~29m	20.1	11.0	9.1	2.74	11.8	26.2	40.6	21.4
Taguchi-3	GL-29~30m	25.9	14.7	11.2	2.63	13.0	11.9	49.4	25.7
Natsuhi	GL-20~22m	34.1	12.2	21.9	2.72	28.0	26.9	39.4	5.7
Shimukappu-1	Out crop	84.1	31.5	52.6	2.51	21.1	16.3	43.1	19.5
Shimukappu-3	Out crop	62.9	25.7	37.2	2.57	15.5	10.6	34.4	39.5
Nunobe-1	Out crop	55.5	29.5	26.0	2.60	13.0	36.9	38.7	11.4
Nunobe-2	Out crop	55.4	24.9	30.5	2.59	15.5	16.9	54.4	13.2
Fukuyama-1	Out crop	38.4	30.3	8.1	2.60	18.6	23.2	58.2	0.0
Fukuyama-2	Out crop	34.6	14.7	19.8	2.57	14.9	12.5	46.2	26.4
Seihuzan-1	Out crop	97.7	31.5	66.2	2.61	3.6	61.9	32.5	2.0
Seihuzan-2	Out crop	112.0	31.3	80.7	2.67	17.3	42.0	36.3	4.5
Nakanomine	Out crop	105.0	52.6	52.4	2.67	19.9	16.2	43.2	20.7

は、のり面に平行に入っていた粘土化した蛇紋岩層をすべり層としてのり面崩壊を起こした現場である。豊橋地区の試料は切土のり面より採取した粘土状蛇紋岩である。

黒瀬川帯

梯原地区の試料は切土のり面より採取した粘土状蛇紋岩である。本地区の蛇紋岩は全般的には細かな割れ目が発達した葉片状を呈しているが、幅10~50cm程度の小断層が多く介在している。長者地区の試料は地すべり調査のためのボーリングコアよりすべり面付近の粘土化したものを採取した。本地区は平均勾配12°の大規模な地すべり地で、蛇紋岩と粘板岩、輝緑凝灰岩、三滝火成岩類が分布している。蛇紋岩は風化しており、大半が葉片状~粘土状を呈している。円行寺地区の試料は切土のり面より採取した粘土状蛇紋岩である。本地区も地すべり地に指定されている。斜面の勾配は20°~30°とかなり急傾斜である。蛇紋岩は風化しており、大半が葉片状~粘土状を呈している。逢坂山地区の試料はトンネル掘削時に採取した粘土状蛇紋岩である。蛇紋岩は葉片状を主体とし、粘土状蛇紋岩や塊状蛇紋岩も混在している。

三郡変成帯

山口地区の試料は崩壊した切土のり面のすべり面から採取した粘土状蛇紋岩である。蛇紋岩は塊状硬質であるが、三郡変成岩類との境界付近には粘土状蛇紋岩が挟在している。田口地区および夏日地区の試料は地すべり調査のためのボーリングコアより採取したすべり面付近の粘土状蛇紋岩である。両地区とも大規模な地すべり地である。

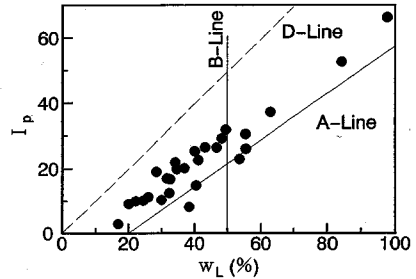


Fig.3 Plasticity chart

神居古潭帯

中の峰地区、清風山地区、布部地区、および占冠地区の試料は、何れものり面から採取した粘土状蛇紋岩であり、福山地区の試料はのり面から採取した塊状~葉片状蛇紋岩である。中の峰地区の蛇紋岩は蛇紋岩帯の最北端のもので葉片状~粘土状を呈している。清風山地区の蛇紋岩は泥岩に貫入した蛇紋岩体の周縁部に分布しており、破碎が進んで葉片状~粘土状を呈している。布部地区は石綿を採取していた鉱山跡地であり、蛇紋岩は葉片状~粘土状を呈している。占冠地区の蛇紋岩は非常に風化が進み、厚く粘土化している。福山地区の近辺の蛇紋岩からなる山は比較的急傾斜で、随所で急斜面の崩壊が起こっている。蛇紋岩は塊状~葉片状を呈している。

試料の物性値および粒度を Table 1 に、塑性図を Fig.3 に示す。塑性指数 I_p は大半が 10~30% であり低塑性である。塑性図では大半が A 線の上、B 線の左に位置している。三波川帯などの四国の破砕帯地すべり地のそれと類似している。粒度はシルト分以下の含有量が 40% を越えるものが大半で、風化による細粒化が進ん

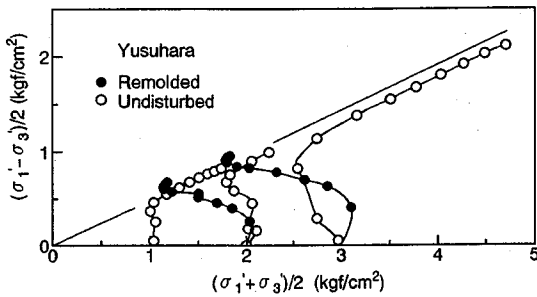


Fig. 4 Effective stress paths and failure strength line by triaxial tests

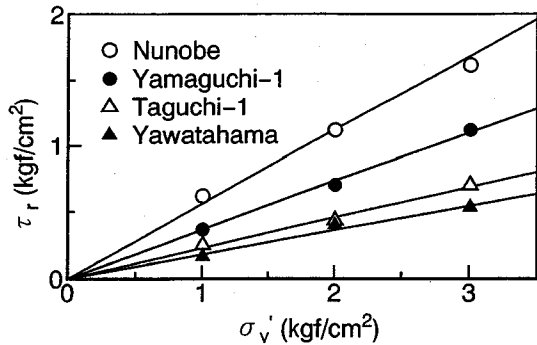


Fig. 5 Residual strength lines by ring shear tests

ている。また、比重は2.5~2.9程度である。

(2) 試験方法

行った試験は圧密非排水三軸圧縮試験とリングせん断試験である。三軸試験は有効応力基準による強度定数を求めるために、また、リングせん断試験は残留強度状態における強度定数を求めるために行った。残留強度特性を調べたのは蛇紋岩に起因する多くの地すべりが発生しており、機構解明のために残留強度特性を明らかにしておく必要があるからである。

試験に用いた試料は何れも420 μ の篩を通してている。三軸試験の供試体の大きさは ϕ 35 mm, h 80 mmで、等方圧で1日間圧密している。軸圧縮変位速度は0.044 mm/minである。

リングせん断試験機は一面せん断タイプのもので、試験機の詳細は参考文献⁸⁾に示す。せん断試験は排水条件で、せん断速度は0.101 cm/minである。この速度の場合、せん断初期に僅かの間隙水圧が発生するが、すぐに消散し、残留強度に殆ど影響を与えないことは既に確かめてある。

(3) 試験結果と考察

Fig. 4に栲原地区の不かく乱試料と繰り返し再圧密試料の有効応力径路ならびに破壊強度線を示す。これから

Table 2 ϕ' and ϕ_r of serpentine

	Sample	Sampling	ϕ'	ϕ_r	$\phi' - \phi_r$	A_f
Sambagawa	Yawahama	Out crop	27.6	10.3	17.3	0.108
	ShimotsuS-1	Out crop	31.7	14.4	17.3	-
	ShimotsuS2-1	Out crop	23.4	20.7	2.7	0.811
	ShimotsuS2-2	Out crop	20.6	12.4	8.2	0.807
	ShimotsuS-3	Out crop	21.0	13.2	7.8	0.805
	ShimotsuS-4	Out crop	23.2	9.4	13.8	0.766
Yusuhara	ShimotsuS-5	Out crop	23.1	8.8	14.3	0.809
	Toyohashi	Out crop	-	49.9	-	-
Kurosegawa	Yusuhara	Out crop	30.1	26.7	3.4	0.720
	Cyouja S-1	Out crop	30.7	27.2	3.5	1.378
	Cyouja Bor. 76L-28~29m		21.7	17.2	4.5	0.914
	Cyouja Bor. 76L-36~38m		26.4	27.3	-0.9	0.739
	Cyouja Bor. 76L-44~45m		23.0	16.8	6.2	0.868
	Engyouji-1	Out crop	29.8	30.6	-0.8	0.921
	Engyouji-2	-	31.2	30.6	0.6	0.773
Sangun	Ousakayama	-	31.6	28.4	3.2	0.916
	Yamaguchi-1	Out crop	24.8	20.2	4.6	0.782
	Yamaguchi-2	-	28.7	8.9	19.8	0.853
	Taguchi-1	6L-27~28m	18.5	12.9	5.6	0.980
	Taguchi-2	6L-28~29m	19.3	14.0	5.3	1.121
	Taguchi-3	6L-29~30m	32.4	32.6	-0.2	0.835
	Natsuhi	6L-20~22m	19.5	16.8	2.7	0.884
	Shimukappu-1	Out crop	30.3	28.2	2.1	1.268
	Shimukappu-3	Out crop	31.2	29.6	1.6	0.793
	Kamukotan	Nunobe-1	Out crop	32.7	29.3	3.4
Nunobe-2		Out crop	34.1	30.1	4.0	0.941
Fukuyama-1		Out crop	34.6	33.6	1.0	0.802
Fukuyama-2		Out crop	32.7	-	32.7	0.998
Seihuzan-1		Out crop	28.2	28.4	-0.2	0.993
Seihuzan-2		Out crop	32.7	28.1	4.6	1.196
Nakanomine	Out crop	31.5	31.5	0.0	0.670	

有効応力径路は若干異なるが、破壊強度線はほぼ等しいことがわかる。また、下津地区の試料でも同様な結果が得られている¹¹⁾。したがって、蛇紋岩の風化した粘性土の有効応力基準に基づく破壊強度線に与える繰り返しの影響は非常に小さいと考えられる。そこで、以下に示す ϕ' は大半が繰り返し再圧密試料を用いた結果であるが、不かく乱状態の試料とはほぼ同様と考えてよい。

Fig. 5にリングせん断試験による残留強度線の一例を示す。残留強度線は原点を通る直線で示され、粘着力はゼロである。

Table 2に三軸試験により得られた有効応力基準によるせん断抵抗角 ϕ' 、リングせん断試験により得られた残留状態でのせん断抵抗角 ϕ_r 、それと $\phi' - \phi_r$ 、ならびに破壊時の間隙水圧係数 A_f を示す。なお、 c' と c_r はいずれもほぼゼロであったので示していない。また、前述したようにリングせん断試験は排水状態で行っており、 ϕ_r はリングが一回転した時点でのせん断強度から求めているが、その時点ではせん断に伴う体積変化がゼロとなり、せん断強度はほぼ一定となっている。

試験結果をみると ϕ' は18°~35°程度、 ϕ_r は9°~33°程度と試料によりかなり異なっている。また、 ϕ' から ϕ_r への低下量は、 ϕ' が30°を越えるものでは非常に小さく、高々3°~4°である。 ϕ' が30°を切っている試料では、せん断抵抗角の低下が激しいものも多く、20°近い低下を示すものもある。

得られた ϕ' と ϕ_r およびせん断抵抗角の低下量からみ

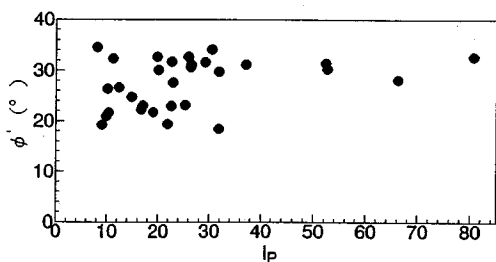


Fig.6 Relation between ϕ' and I_p

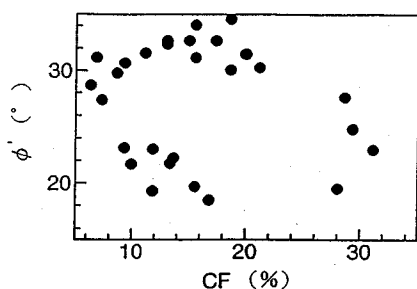


Fig.7 Relation between ϕ' and CF

た蛇紋岩の工学的問題に与える強度特性の影響についてまとめておく。

1) 30° を越える ϕ' を有し、 ϕ_r への低下量が小さい蛇紋岩の風化粘性土では地すべりは非常に起こりにくく、特に再滑動型の地すべりは殆ど起こらないと考えてよいと思われる。

2) 30° を下回る ϕ' と 15° 前後或いはそれを下回る ϕ_r を有する蛇紋岩の風化粘性土では、地すべりを始めとする工学的な問題を非常に引き起こしやすいと推定される。実際、小さなせん断抵抗角を示した八幡浜地区の試料はトンネルの盤ぶくれを起こした現場から採取したものである。下津地区の試料は切土のり面の崩壊したすべり面から採取したものである。本現場では蛇紋岩の風化した粘性土のせん断抵抗角の低下を主要因にするとされる対策工後のすべりが起こり、追加の対策工を行っている。山口地区の試料も切土のり面の崩壊したすべり面から採取したものであり、本現場は 30° 程度のり面勾配で施工したにも関わらず崩壊が起こっている。また、長者、田口、夏日は大規模な緩傾斜の地すべり地であり、クリープ的な地すべり移動が継続している。

以上のように、せん断試験結果から蛇紋岩の風化した粘性土にも工学的に非常に問題を起こしやすいものと比較的稳定なものがあることがわかる。なお、本試験に用いた試料は何れも 420μ の篩を通過させているが、実際の試料は砂礫を含んでいる。残留強度は砂礫含有量に大きく影響されると指摘されているので¹²⁾、厳密には砂礫を含んだ試料に対する試験結果をもとに検討されなけれ

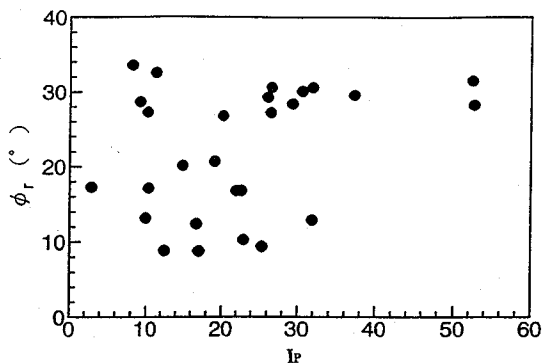


Fig.8 Relation between ϕ_r and I_p

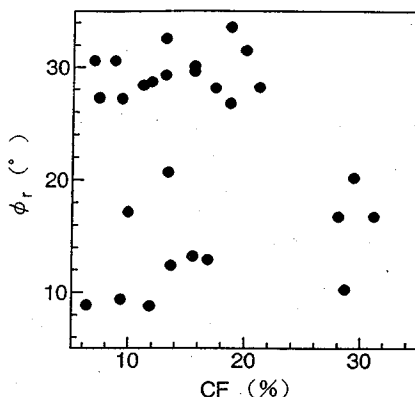


Fig.9 Relation between ϕ_r and CF

ばならないことはいうまでもない。

従来の研究で ϕ_r は I_p や粘土含有量CF($<2\mu$)との間に比較的良好な相関が認められることが指摘されている^{12),13)}。土の強度定数を基本的物性と関係付けておけば工学的には有意義である。そこで、せん断抵抗角と I_p およびCFの関係を調べた。 ϕ' および ϕ_r と I_p の関係をFig.6, 7に、CFとの関係をFig.8, 9に示す。今回調べた蛇紋岩の風化した粘性土のせん断抵抗角(ϕ' , ϕ_r)と I_p およびCFの間には従来指摘されているような相関は認められない。

4. 強度特性と構成鉱物の関係

せん断試験の結果、蛇紋岩の風化した粘性土の ϕ' , ϕ_r は試料毎にかなり異なることが明らかになった。せん断抵抗角に影響する要因としては種々考えられるが、構成鉱物がせん断抵抗角に与える影響を検討してみる。鉱物分析はX線回折により行った。

(1) X線回折の方法と分析結果

構成鉱物の同定のためにX線回折を行った。測定条件

Table 3 Clay minerals analyzed by X-ray diffraction

Sample	Sampling	Chry	Anti	Chlo	Talc	Mont	Fels	Calc
Yawatahama	Out crop, Rock	-	+	*	+			
	Out crop, Clay		+	*				*
Tomisato	Out crop, Rock		+	*				
	Out crop, Clay		+	*				
Nomura	Out crop, Rock	+	*					
	Out crop, Clay	*	+					
Shimotsu	Out crop, Rock	+	*					
	Out crop, Clay	+	*					
S-1	Out crop, Clay			*	-	-		
S2-1	Out crop, Clay	+	-				*	
S2-2	Out crop, Clay	-	+				*	
S-3	Out crop, Clay	-	-	-			*	
S-4	Out crop, Clay	-	-				*	
S-5	Out crop, Clay	-	*				*	
Toyohashi	Out crop, Clay	-				*		
Yusuhara	Out crop, Rock	+	*	+				
	Out crop, Clay	*	*					
Tyouja	Out crop, Rock	-	*	+				
	Out crop, Clay	+	*	-				
Bor. 7	GL-28~29m	-					+	
	GL-36~38m	*	+			-	-	
	GL-44~45m	-	+				*	
Engyouji	Out crop, Clay	*	+					
	Out crop, Rock	*	+	-	-			
Ousakayama	Out crop, Clay		*	*	+			*
	Out crop, Rock		*	*	+			*
Aburaishi	Out crop, Rock	-	+		*			
	Out crop, Clay	-	+		*			
Yamaguchi	Out crop, Rock	-	+		*			
	Out crop, Clay	-	+		*			
Taguchi	Out crop, Rock	*	*	+	-			+
	GL-27~28m	+	+		+		+	
	GL-28~29m	-	+					
	GL-29~30m	-	+					
Natsui	Out crop, Rock	-	*					
	GL-20~22m	+	+				*	
Shimukappu	Out crop, Rock	*	-	-	-			
	Out crop, Clay	*	-	-	-			
Nunobe	Out crop, Rock	*	-	-	-			
	Out crop, Clay	*	+					
Fukuyama	Out crop, Rock	*	-	-	-			
	Out crop, Clay	*	-	-	-			
Seihuzan	Out crop, Clay	*	*	+				
	Out crop, Rock	*	*	-				
Nakanomine	Out crop, Clay	*	+	-	-			

は 30 KV, 15 mA で, ターゲットに Cu , フィルターは Ni を使用した. 走査速度は $1^\circ/\text{min}$ で行った. 試験は粉末法で行った. 粉末試料の作成にはメノウの乳鉢を用いたが, 長時間の粉碎を行うと結晶構造が変化するので指頭に感じない程度の細粉状態で粉碎を中止した. X線回折は, まず全ての試料に対して無処理で行った. そして, 無処理の試料に対するX線回折の結果, モンモリロナイトとクロライトの区別が必要な試料や膨張性を検討しなければならない試料に対しては, 更に 500°C 加熱処理, エチレングリコール処理, 塩酸処理した試料に対してX線回折を行った.

以上の回折結果より得られた鉱物の一覧を Table 3 に示す. ここで, 含有量は主成分を*, 副成分を+, 微量を-で示した. 鉱物含有量の量比は面積強度の算定値を用いて決めている¹⁴⁾. これから主成分の鉱物としてはクリソタイル, アンティゴライト, クロライト, タルク, モンモリロナイトがある. 前述したようにクリソタイルとアンティゴライトは蛇紋石の代表的鉱物である. タルクは蛇紋岩化作用に伴って形成されることが多く, クリ

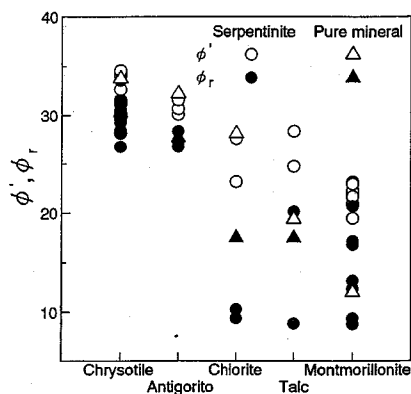


Fig.10 Relation between ϕ' , ϕ , and main component's mineral

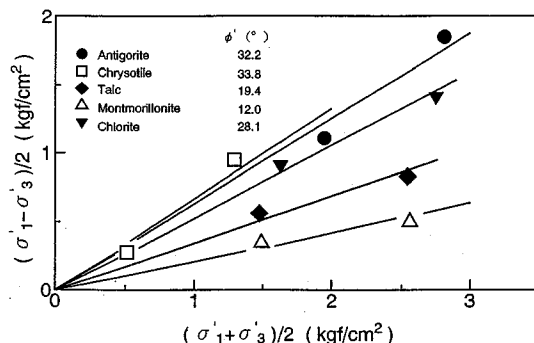


Fig.11 Failure strength lines of minerals involved in serpentine

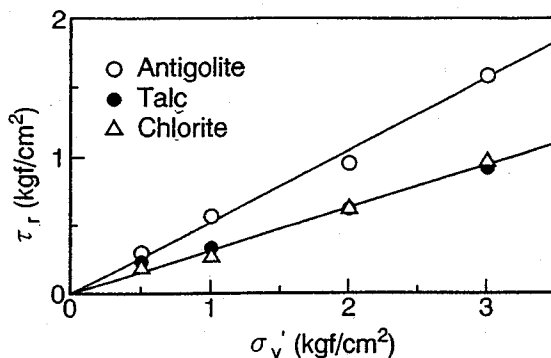


Fig.12 Residual strength lines of minerals involved in serpentine

ソタイルなどの蛇紋石と同様に2層構造をしている. また, クロライトは蛇紋岩化作用時にも形成されるが, 他の岩質との境界部に多く分布していることから蛇紋岩が貫入する際に取り込んだ付近の岩質との相互作用により形成されていると考えられる. クロライトはモンモリロナイトと同様に3層構造をしている. モンモリロナイトは3層構造をしており, 層間に水分子を取り込んで膨張する性質を持つ膨張性鉱物の代表的なものである. 蛇紋

岩の風化した粘性土にみられるモンモリロナイトはクロライト等の変質による二次鉱物である。

(2) 含有鉱物が強度定数に与える影響

Fig.10 にせん断抵抗角 ϕ' , ϕ_r と主成分鉱物の関係を示す。これから ϕ' , ϕ_r は主なる構成鉱物であるクリンタイル, アンティゴライト, クロライト, タルク, モンモリロナイトと良い相関を示すことがわかる。

ここで, 蛇紋岩を構成している各種鉱物の強度特性を調べた結果を示す。

実施した試験は圧密非排水三軸試験とリングせん断試験である。試験方法や条件は蛇紋岩の粘性土試料のそれと同様である。

Fig.11 に各種鉱物の三軸試験による破壊強度線を示す。アンティゴライトとクリンタイルの ϕ' はそれぞれ 32.24°, 33.8° とかなり大きく, また, クロライトは 28.12° であり, タルクとモンモリロナイトはそれぞれ 19.4° と 12.03° とかなり小さい。

Fig.12 にリングせん断試験により得られた各種鉱物の残留強度線を示す。アンティゴライトの ϕ_r は 27.7°, クロライトとタルクは共に 17.5° であり, 大きな差を示している。

これから, 各鉱物の ϕ' と ϕ_r は主要な構成鉱物が同じである蛇紋岩の粘土化した試料のそれと比較的近い値を示していることがわかる。したがって, 含有鉱物がせん断抵抗角に与える影響は非常に大きいと考えてよい。

以上の鉱物分析結果および各種鉱物の強度試験結果からみた蛇紋岩の風化した粘性土の強度特性の特徴をまとめておく。

1) クリンタイルとアンティゴライトが主成分の場合 ϕ' および ϕ_r とも 30° 前後であり, 破碎帯地すべり地や第三紀層地すべり地のすべり面の粘性土のそれと比べるとかなり大きい。これまで, 蛇紋岩といえば弱い, 扱いにくいといったイメージがあるが, クリンタイル, アンティゴライトが主成分であれば比較的問題は起こりにくいと思われる。

2) タルクが主成分の場合, ϕ' および ϕ_r はともに 20° 前後である。 ϕ' は他の粘性土と比べるとかなり小さいが, ϕ_r への低下は小さい。タルクが主成分である山口の試料は道路拡幅に伴い初生すべりを起こした現場のすべり面から採取したものである。30° をきるのり勾配で施工したにも関わらず崩壊が発生したのは, すべり面となった土の ϕ' が 20° 近くという予想もできない小さな値であったためである。

3) クロライト, モンモリロナイトが主成分となっている試料のせん断抵抗角は, クリンタイル, アンティゴライトが主成分となっているものより ϕ' , ϕ_r とも 10° 以上小さく, また, 残留強度への低下も大きい。したがっ

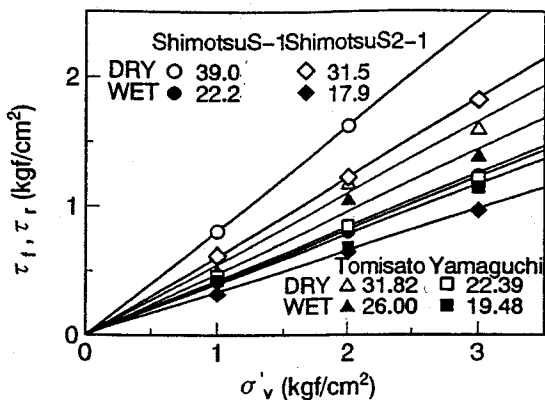


Fig.13 Influence of soak on failure strength line of various weathered serpentines

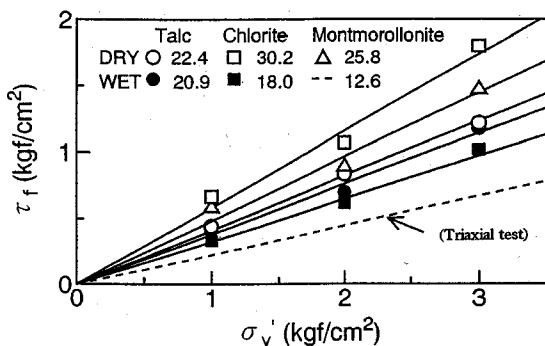


Fig.14 Influence of soak on failure strength line of various clay minerals

て, クロライトやモンモリロナイトが主成分となっている蛇紋岩の風化した粘性土は問題を引き起こす場合が多いと思われる。実際, 前述したように八幡浜地区, 下津地区, 長者地区, それと夏日地区は何れも工学的な問題が起こっている所である。

(3) 水浸による強度低下に及ぼす含有鉱物の影響

蛇紋岩が工学的な問題を引き起こす場合, 地下水の影響を受けていることが多い。鉱物分析により蛇紋岩の風化した粘性土には各種の鉱物が含まれていることが分かったが, モンモリロナイト等の水浸により著しく強度低下する鉱物も含まれている。したがって, 蛇紋岩の風化した粘性土の中には水浸により強度低下するものもあると思われる。そこで, 水浸による強度特性の変化をせん断試験により調べた。

用いた試料はクリンタイルが主成分である富郷, 膨張性クロライトが主成分である下津の S-1 試料, タルクが主成分である山口, それとモンモリロナイトが主成分である下津の S2-1 試料である。富郷の試料は塊状であったので破碎, 細粒化して, 420 μ の篩を通したの

を使用した。その他の試料は何れも粘土化した試料で、 420μ の篩を通過したものをを用いている。

試験は在来型の一面せん断試験機を用いて、変位速度は 0.014 mm/min で、気乾状態と水浸状態の試料に対して試験を行った。

試験結果を Fig.13 に示す。水浸により ϕ_d が最も大きく低下しているのは膨張性クロライトが主成分である下津の S-1 で、 39° から 22° と 20° 近い低下を示している。モンモリロナイトが主成分である下津の S2-1 は 31.5° から 17.9° に低下している。タルクが主成分の山口の蛇紋岩は気乾状態における ϕ_d も 22° と小さいが、水浸してもせん断抵抗角の低下はわずか 3° である。富郷の試料は気乾状態で 32° のものが水浸させると 6° 低下している。

水浸による強度低下には鉱物が影響していることを確認するためクロライト、モンモリロナイト、それとタルクの水浸によるせん断抵抗角の変化を一面せん断試験により調べた。試験結果を Fig.14 に示す。図に示したように、モンモリロナイトは気乾状態で 25.8° のものが水浸させると 12.6° 、タルクは同様に 22.4° が水浸により 20.9° 、クロライトは 30.2° が水浸させることにより 18.0° である。なお、モンモリロナイトの水浸試料の ϕ' は前述した三軸試験結果である。

以上のように水浸による強度定数の低下も鉱物の影響を受けており、クロライトやモンモリロナイトが主成分のものでは特に水浸によるせん断抵抗角の低下が激しいことがわかった。

5. あとがき

日本各地より採取した蛇紋岩の風化した粘性土の強度特性を調べた。得られた結論は次のようである。

- 1) 蛇紋岩は変成時に既に破碎・風化しやすい性質を有しており、貫入時やその後の断層運動により破碎している場合が多いことが土木工学的な問題を引き起こす要因の一つである。
- 2) 蛇紋岩の風化した粘性土のせん断抵抗角は ϕ' が $18^\circ\sim 35^\circ$ 程度、 ϕ_r が $9^\circ\sim 33^\circ$ 程度と試料によってかなり異なる。そして、 ϕ' と ϕ_r は土の基本的物性の一つである I_p や粘土分含有量と相関がない。
- 3) 蛇紋岩の風化した粘性土の鉱物としてはアンティゴライトやクリソタイルという蛇紋石鉱物以外にもタルクやモンモリロナイト、クロライトなどが含まれているものもある。
- 4) ϕ' と ϕ_r は含まれている鉱物の影響を大きく受けている。アンティゴライトやクリソタイルが主成分であ

れば ϕ' と ϕ_r とも 30° 前後ある。タルク、モンモリロナイト、クロライトが主成分の場合には ϕ' は小さく、地すべりなどの問題を引き起こしている場合が多い。また、モンモリロナイトとクロライトが主成分の場合には ϕ_r への低下も著しく、工学的に非常に問題を引き起こしやすいと考えられる。

- 5) 水浸による強度の低下はモンモリロナイトとクロライトが主成分の場合に著しい。

本研究を行うに際して、蛇紋岩試料の採取に際して便宜を計って戴いた関係各位に感謝いたします。また、京都大学防災研究所佐々恭二教授には貴重な討議を戴き、愛媛大学大学院修士青山健氏（現復建調査設計(株)）と愛媛大学卒業生長谷川勝喜氏（現基礎地盤コンサルタンツ(株)）には各種の実験に協力戴いた。

なお、本研究費の一部は（財）砂防・地すべり技術センターの研究開発助成金の援助を受けた。

参考文献

- 1) Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. : Rock Forming Minerals, Vol.3, Longmans, pp.170-190, 1962.
- 2) Research group of peridotite intrusion : Ultrabasic rocks in Japan, *Jour. of Geol. Soc. of Japan*, Vol.73, No.12, pp.543-553, 1967.
- 3) 磯崎行雄, 丸山茂徳 : 日本における造山論の歴史と日本列島の新しい地帯構造区分, 地学雑誌, pp. 697-761, 1991.
- 4) 野地正保 : 蛇紋岩の調査と評価, 地質と調査, 第2号, pp. 34-39, 1989.
- 5) 日本粘土学会編 : 粘土ハンドブック, 技報堂, pp. 54-56, 1967.
- 6) 地学団体研究会・地学辞典編集委員会 : 地学辞典, 平凡社, pp. 205-213, 1970.
- 7) Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. : Rock Forming Minerals, Vol.3, Longmans, pp.185-187, 1962.
- 8) 矢田部龍一, 八木則男, 榎明 潔 : 破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性, 土木学会論文集, 第436号 / III-16, pp.93-101, 1991.
- 9) 橋本光男 : 日本の変成岩, 岩波書店, pp. 130-135, 1987.
- 10) Miyashiro, A. : Some aspects of peridotite and serpentinite in orogenic belts, 1964.
- 11) 横田公忠, 矢田部龍一, 八木則男 : 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, 土木学会論文報告集投稿中.
- 12) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. : The drained residual strength of cohesive soils, *Geotechnique*, Vol.31, No.2, pp.181-213, 1981.
- 13) Skempton, A.W. : Residual strength of clay in landslide, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18, 1985.
- 14) 土木学会岩盤力学委員会編 : 軟岩の調査・試験の指針(案), 土木学会, pp.77-84, 1991.

(1995.4.5 受付)

STRENGTH CHARACTERISTICS OF WEATHERED SERPENTINE

Kinutada YOKOTA, Ryuichi YATABE and Norio YAGI

The strength characteristics of the weathered serpentine which was sampled in various parts of Japan were examined by the triaxial and ring shear tests. The angle of shear resistance of the weathered serpentine was divided broadly into two main groups. One group has ϕ' , ϕ_r of about 30° . It was confirmed by the X-ray analysis that these weathered serpentines were composed of an antigorite and chrysotile. Another has ϕ' less than 30° and the drop of the angle of shear resistance to ϕ_r from ϕ' is remarkable. These weathered serpentines involve a chlorite, talc and montmorillonite.