

破碎帯地すべり粘土の力学特性

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FRACTURED ZONE LANDSLIDE CLAY

矢田部龍一*・八木則男**・榎 明潔***

By Ryuichi YATABE, Norio YAGI and Meiketsu ENOKI

The shear strength characteristics of clay forming slip layers of fractured zone landslides are investigated by triaxial tests. The angle of shearing resistance ϕ' on the landslide clay does not change with remoulding. The angle of shearing resistance of landslide clay, approximately $25^\circ \sim 30^\circ$, is smaller than one of marine clay in Japan. This is one of the reason which the landslide occurs at gentle slope. The value of c' on the normally and over consolidated specimens is zero. Therefore, the main factor of landslide is the increase of the pore water pressure.

The clay minerals are investigated by X-ray diffraction method. Absorbed ions are assayed by absorptimetry. It was cleared that the gradation, clay minerals and absorbed ions have influence on the strength characteristics of landslide clay.

Keywords: landslide, clay, triaxial test, clay mineral

1. ま え が き

三波川帯および御荷鉢帯などの変成岩地帯では、数多くの地すべりが発生している。この地帯の地すべりはいわゆる破碎帯地すべりとよばれており、四国は最多発地域である。破碎帯地すべりに関するこれまでの研究は、地質学的観点からのものが多く、土質力学的には未解明な点が多い。破碎帯地すべりであっても、薄層の地すべり粘土が存在する場合が多く、すべりはこの粘土層で起こっている。粘土層ですべているにもかかわらず、従来地すべり粘土の存在はすべり面の確認程度にとどまり、力学特性に関する研究はほとんどなされていない。また、安定対策工においても地すべり粘土の力学特性を考慮に入れることはあまりなかったように思われる。

著者らは、破碎帯地すべりの1つである犬寄地すべりの挙動を、地すべり粘土の強度・変形特性を考慮して解析すれば定量的に評価できる可能性があることをすでに示している^{1),2)}。地すべりの変形挙動を定量的に評価できれば、設計を行うにあたって安定に関する検討のみな

らず変形の観点からの検討も行うことができる。また、地すべり粘土の強度特性などを調べておけば、実際に安定解析を行う場合の非常に有意義な情報となり得るものと思われる。

そこで、本研究では、四国の地すべり地で採取した10数種類の地すべり粘土の力学特性を調べ、また、粘土鉱物と吸着イオンの分析を行い、それらが強度特性に与える影響について検討を加えた。

2. 乱した破碎帯地すべり粘土の力学試験をする意味

従来、地すべり粘土の力学試験は不攪乱および乱れた地すべり試料ともにあまりなされていないが、それは次のような理由によるものと思われる。

① 破碎帯地すべりでは、一般的に地すべり粘土はごく薄層で存在し、粘土試料の量がごくわずかであるという理由などで、不攪乱地すべり粘土試料のサンプリングとせん断試験が困難である。

② 不攪乱試料と乱れた試料とでは力学定数が異なり、乱れた試料で試験をしてもほとんど意味がないと思われる。

③ これまで、破碎帯地すべりでも粘土のせん断試験結果に基づいて安定解析が行われたことが何例もある。

* 正会員 工博 愛媛大学助手 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科(同上)

*** 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科(同上)

しかし、安全率は1よりかなり大きい場合が多く、現実の挙動を説明できないとして、実際の設計では逆算 c 、 ϕ が用いられてきた。したがって、現状では設計に際して地すべり粘土のせん断特性はほとんど調べられていない。

①の問題に関しては、実際、すべり面の粘土を不攪乱状態でサンプリングするには、多大な時間と労力を必要とする³⁾。したがって、不攪乱試料を採取し、せん断試験を行った例はほとんどない。しかし、乱れた状態のものはボーリングコアあるいは露頭などから比較的簡単に入手可能である。ボーリングコアはすべり面の確認や地質の把握のために使用されるのが主で、力学試験は行われなまま保管されている場合が多い。せん断試験などを行うには、わずかのボーリングコアの試料（三軸供試体1個100 cm³程度である）があれば十分である。また、地すべりの末端部では露頭がでているケースもかなりある。特に、末端部が沢筋にでている場合などは比較的容易に採取することが可能である。

②の乱れの問題であるが、地すべり粘土は不攪乱といってもいわゆる正規あるいは過圧密状態とは異なり、もともと大変形という攪乱を受けた後再圧密された状態にある。このような履歴を考慮して、地すべり粘土のせん断特性を調べた研究もなされている⁴⁾。ところで、安定解析に用いる土の有効応力基準による強度定数 c' 、 ϕ' のうち、内部摩擦角 ϕ' はあまり変わらないといわれている。

著者らは乱れが有効応力基準による強度定数に与える影響をすでに調べている^{5),6)}。そして、不攪乱の海成粘土、繰り返し再圧密粘土およびシルト質土では、乱れによって有効応力基準による強度定数の変化はみられないことを明らかにしている。

Fig. 1は御荷鉾緑色岩が風化した地すべり粘土（佐賀山粘土A）を試料として、乱れによる強度定数の変化を調べるため行った圧密非排水三軸圧縮試験より求めた有効応力経路である。なお、図中NC、OCはそれぞれ、液性限界以上の高含水比で繰り返し再圧密した正規圧密試料、過圧密試料を意味し、RNC、ROCはそれぞれ、液性限界以下の低含水比で繰り返し再圧密した正規圧密試料、過圧密試料を意味している。RNC、ROCは予圧密した試料を人為的に完全に繰り返し再圧密したもので、この含水比では最も乱された状態にある試料である。この結果から、破碎帯地すべり粘土でも有効応力基準による強度定数に乱れの影響はほとんどみられないことが明らかである。

前述したように、地すべり粘土はせん断、圧密という攪乱を何度も受けている。このような多くの履歴を受けても、内部摩擦角 ϕ' は変化しないということを Fig. 1

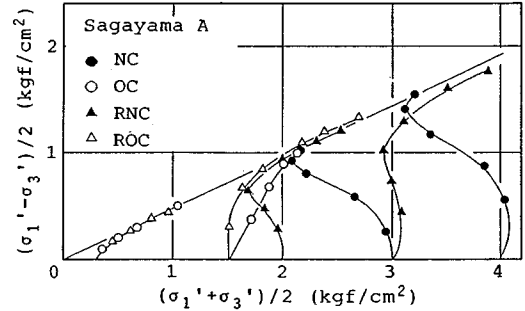


Fig. 1 Failure line terms of effective stress on remoulded Sagayama A clay.

は示している。したがって、海成の不攪乱粘土および繰り返し地すべり粘土の試験結果から考える限りでは、地すべり粘土試料を再度繰り返し作成した供試体を用いても、地すべり粘土が不攪乱状態でもっていた内部摩擦角をある程度正確に求めることができると思われる。ただし、不攪乱の地すべり粘土試料に対するせん断試験により確かめる必要があることはいうまでもない。また、当然のことではあるが、吸着イオンなどが変化すれば内部摩擦角も変わると思われる⁷⁾。

③の安全率が1より大きいという問題であるが、その理由が2つ考えられる。1つは残留強度の問題である。第三紀層の地すべり粘土では残留強度 c_r 、 ϕ_r が非常に小さく⁸⁾、それを用いれば安全率はほぼ1程度になるという報告が多くなされている。しかし、破碎帯地すべり粘土では、 ϕ_r の低下はあまり大きくないともわれている。ちなみに著者らが不攪乱および乱した破碎帯地すべり粘土に対して行った三軸圧縮試験では30%程度の軸ひずみでもせん断強度の低下はみられなかった⁹⁾。しかし、残留強度を求めるためにはリングせん断試験機などで大変形を与えなければならないという指摘がなされているので、この点については今後さらに検討の必要があると思われる。もう1つの理由は地すべり地が現に滑動しているからといって、安全率は必ずしも1である必要はないということである。すなわち、安全率が1になっていなくても、その応力レベルに応じた変形がクリープ的に起こるからである¹⁰⁾。したがって、粘土のせん断試験結果に基づいて行った安定解析による安全率が1より大きくても、粘土のせん断試験が無意味であるという理由にはならない。

ところで、現実的には、地すべりが一般的に非常に複雑な現象であるため、設計には現状安全率を1などと仮定して強度定数を逆算して用いていることが多い。すなわち、複雑な現象、たとえば力学定数の場所による不均一さ、間隙水圧の複雑な分布、すべり面の複雑な幾何形状などの大半を逆算した強度定数に丸め込んでいる。逆

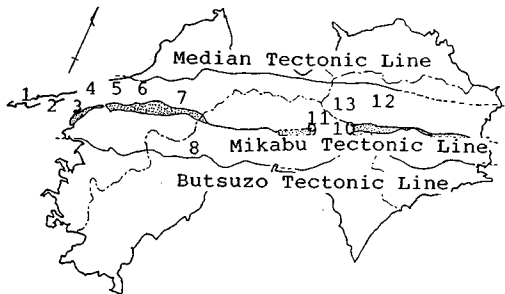
算法が使われているのは、1つには実用的かつ簡便な方法であるからであると思われる。しかし、だからといって逆算法により求められた強度定数が正解であるという保証はない。地すべりは力学的つり合いの問題である。すべりを起こそうとする力が土のせん断抵抗を越えたときに、すべりが発生する。したがって、地すべりが粘土をすべり層として動いている以上、地すべり機構の解明のためには地すべり粘土の力学試験を行い、せん断特性を明らかにしておくことが重要であると思われる。

なお、以上の検討は破碎帯地すべりを対象としたものである。他の地すべりを対象としては、たとえば、Skempton¹¹⁾の先駆的研究を始めとして、これまで地すべり粘土の力学特性に関して多くの研究がなされてきていることはいうまでもない。

3. 破碎帯地すべり粘土の力学特性

(1) 試料, 実験方法

試料には、Fig.2に示した、(1)愛媛県西宇和郡瀬戸町



(1) Mitsukue, (2) Kumachi, (3) Oku, (4) Kamiokubo, (5) Honmura, (6) Inuyose, (7) Kuma, (8) Choja, (9) Sagayama, (10) Nuta, (11) Kawadotsurebi, (12) Fuki, (13) Nishiumine

Fig.2 Location map.

三机(三机粘土A),(2)愛媛県西宇和郡伊方町(九町粘土), (3)愛媛県西宇和郡保内町須川(奥粘土), (4)愛媛県伊予郡双海町上大久保(上大久保粘土), (5)愛媛県伊予郡双海町串(本村粘土), (6)愛媛県伊予郡中山町犬寄(犬寄粘土), (7)愛媛県上浮穴郡久万町(久万粘土), (8)高知県高岡郡仁淀村長者(長者粘土A), (9)高知県長岡郡大豊町佐賀山(佐賀山粘土A, B), (10)高知県長岡郡大豊町怒田(怒田粘土), (11)高知県長岡郡大豊町川戸連火(川戸連火粘土), で採取した11地点, 12種類の地すべり粘土を使用した。以後、試料は括弧内に示した呼称を用いる。

Table 1に各試料の母岩の種類と粒度ならびに試料の採取法を示す。母岩およびFig.2からわかるように、地質的には佐賀山粘土Aと怒田粘土が御荷鉢帯、長者粘土が秩父帯、久万粘土が第三紀層であり、それ以外はすべて三波川帯である。試料はすべて0.25mmのふるいを通して粒度調整しており、粒度分布は土壌物理の分野で用いられている沈定法により求めている。なお、本村地すべりでは、2つのボーリングコアからすべり面の粘土を採取し、三机地すべり(三机粘土B)および長者地す

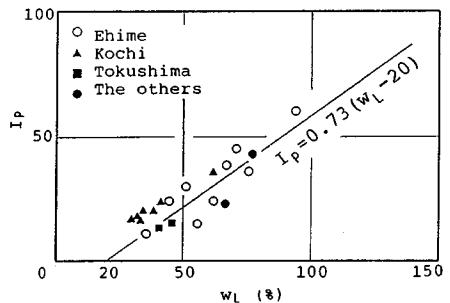


Fig.3 Plasticity chart.

Table 1 Physical properties, gradation and parent rock.

No.	Soil sample	Sampling	Parent rock	Gradation (%)			W _L (%)	W _P (%)	G _s	A
				<2μm	2-20μm	20μm<				
1	Mitsukue A	Boring core	Green schist	23.5	44.3	32.2	70.5	25.5	2.97	1.91
2	Kumachi A	Out crop	Green schist	20.8	40.6	38.6	75.6	39.5	2.57	1.74
3	Oku	Boring core	Green schist	18.2	41.9	39.9	44.1	24.0	2.95	1.10
4	Kamiokubo	Boring core	Crystalline schist	10.1	42.5	47.5	94.4	34.5	2.59	5.89
5	Honmura	Boring core	Green-black schist	—	—	—	50.5	26.8	2.87	—
6	Honmura	Boring core	Green-black schist	23.4	32.9	43.7	57.5	28.5	2.91	1.24
7	Inuyose	Boring core	Crystalline schist	19.8	33.7	46.5	35.9	24.2	2.75	0.59
8	Kuma	Out crop	Tertiary mudstone	—	—	—	55.4	40.3	2.61	—
9	Choja A	Boring core	Loam	12.0	14.9	73.1	34.2	13.9	2.79	1.69
10	Sagayama A	Out crop	Green stone	25.0	44.6	30.4	42.5	26.8	2.95	0.63
11	Sagayama B	Out crop	Black schist	7.6	19.6	72.8	32.4	14.1	2.79	2.41
12	Nuta	Boring core	Green stone	26.9	34.2	38.9	33.5	16.7	3.02	0.62
13	Kawadotsurebi	Out crop	Black schist	28.7	33.7	37.6	41.4	17.4	2.74	0.84
14	Mitsukue B	Boring core	Green schist	12.7	36.3	51.0	61.9	37.2	2.98	1.94
15	Kumachi B	Out crop	Green schist	—	—	—	66.3	27.5	2.70	—
16	Kumachi C	Out crop	Green schist	6.8	27.1	66.1	44.3	20.1	3.03	3.55
17	Choja B	Boring core	Slate	18.6	20.8	60.6	30.0	13.0	2.76	0.92
18	Choja C	Boring core	Serpentinized slate	11.4	18.1	70.5	60.5	24.7	2.68	3.14
19	Fuki	Out crop	Black schist	1.5	8.0	90.5	45.6	30.4	2.70	10.13
20	Nishiumine	Out crop	Black schist	—	—	—	40.6	27.4	2.71	—
21	Yoneyama	—	Tertiary mudstone	1.2	16.9	81.9	66.1	42.3	2.62	19.83
22	Hiroshima	—	(Marine clay)	26.5	55.4	18.1	77.4	37.9	2.68	1.62

べり（長者粘土 B, C）のボーリングコアには、ひずみ計による観測データからはすべりの兆候はみられないが、粘土化している部分があったので、それらの試料も併せて調べ、表に併記してある。また、徳島県の吹地すべり地（吹粘土）および西宇峰地すべり地（西宇峰粘土）で採取した風化して粘土化した試料（すべり面のものではない）も調べたので併記してある。なお、比較のため広島湾内の掛ノ浦で採取した海成粘土（海成広島粘土）および第三紀層の地すべりである新潟県柏崎市米山の地すべり地で採取した地すべり粘土（米山粘土）の力学特性も調べたので併記してある。

おのおのの試料の土粒子比重 G_s 、液性限界 w_L 、塑性限界 w_p 、活性度 A_r をまとめて Table 1 に示す。また、塑性図を Fig. 3 に示す。ここで、 I_p は塑性指数である。破碎帯地すべり粘土試料は A 線上あるいはそれより上に位置しているものが多い。新潟県に行った調査¹²⁾による

と魚沼層群の粘土はほぼ A 線に、新第三紀層の粘土は $I_p = 0.92(w_L - 20)$ に沿って分布していることが明らかにされている。これから破碎帯地すべり粘土は第三紀の粘土と比べて若干高塑性であるが、極端な違いはみられないことがわかる。また、活性度をみると多くの試料が 2 付近の値であり、中程度の活性度を示している。この結果からイライト系の粘土鉱物が含まれていることが予想される。吹粘土、米山粘土の活性度は高く、モンモリロナイトが含まれていることが予想される。

圧密に関する諸定数は標準圧密試験により求めた。また、せん断試験は圧密非排水三軸圧縮試験により行った。供試体の作成は、粘土を液性限界以上の高含水比で練り返し、飽和度を高めるために真空脱気を行った後、圧密することにより行った。三軸試験用の供試体は、直径 35 mm、高さ 80 mm である。なお、練り返しに使う水の中にイオンが含まれていると粘土試料のせん断特性に影響を与えると思われるので、練り返しには純水を用いている。圧密は等方圧密とし、圧密時間はすべて 24 時間である。非排水三軸圧縮試験は正規圧密状態および一部過圧密状態の供試体に対して行い、正規圧密の場合の

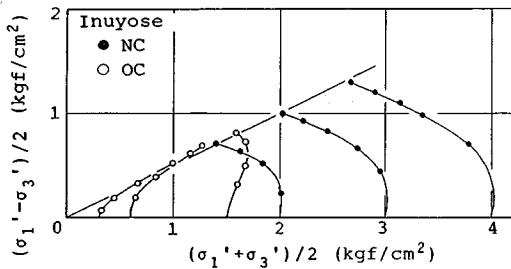


Fig. 4 Stress paths and failure line of landslide clay (Inuyose).

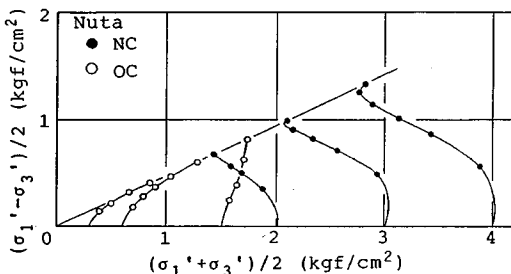


Fig. 5 Stress paths and failure line of landslide clay (Nuta).

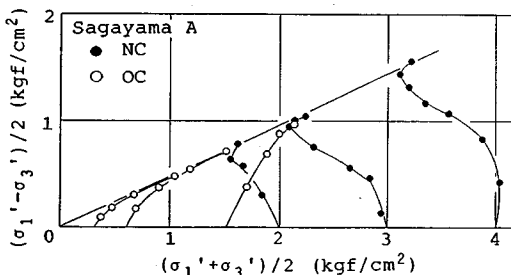


Fig. 6 Stress paths and failure line of landslide clay (Sagayama A).

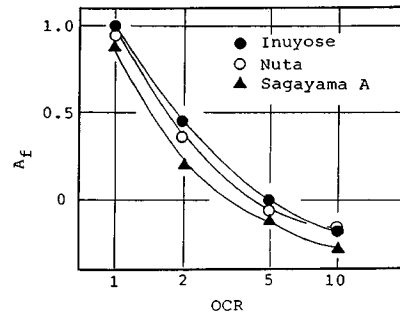


Fig. 7 Relationship between A_r and over consolidation ratio OCR.

Table 2 Mechanical and permeable properties.

No.	Soil sample	ϕ (°)	A_r	C_c	C_u	k_v (10^{-5} cm/sec)
1	Mitsukue A	31.2	1.02	0.477	0.082	1.9 - 11.0
2	Kuwachi A	31.3	0.90	0.379	0.071	3.2 - 25.2
3	Oku	29.5	0.91	—	—	—
4	Kamiokubo	28.5	0.98	—	—	—
5	Honmura I	29.5	0.93	—	—	—
	Honmura II	28.9	0.97	—	—	—
6	Inuyose	30.0	1.00	0.237	0.047	0.68
7	Kuma	28.4	0.60	—	—	—
8	Choja A	30.0	0.95	0.272	0.048	3.8 - 17.8
	Sagayama A	28.5	0.90	0.296	0.062	14.2 - 51.4
9	Sagayama B	25.2	0.77	0.197	0.066	45.4 - 97.2
10	Nuta	28.4	0.94	0.274	0.076	—
11	Kawadotsurubi	26.2	0.90	0.389	0.052	2.3 - 12.3
1	Mitsukue B	35.0	0.85	0.463	0.128	5.8 - 51.2
2	Kuwachi B	32.7	0.86	0.465	0.100	0.79 - 6.4
	Kuwachi C	33.4	0.75	—	—	—
8	Choja B	33.8	0.90	0.179	0.030	0.6 - 15.9
	Choja C	34.9	1.06	0.354	0.053	9.8 - 46.5
12	Fuki	34.4	—	0.400	0.052	17.5 - 213.0
13	Nishiumine	32.3	0.86	—	—	—
14	Yoneyama	37.6	0.80	0.374	0.047	91.9 - 932.0
15	Hiroshima	43.0	—	—	—	—

圧密圧力は、2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm²、過圧密の場合は先行圧密圧力を3.0 kgf/cm²、過圧密比を10, 5, 2として試験した。変位速度は、 4.4×10^{-2} mm/minである。三軸圧縮試験時にはバックプレッシャー2.0 kgf/cm²を作用させ、間隙水圧係数のB値が0.95以上の供試体についてのみ試験を行った。

(2) 実験結果と考察

実験結果の一例として犬寄粘土と怒田粘土および佐賀山粘土Aの有効応力経路をFig. 4, 5, 6に示す。また、犬寄粘土、怒田粘土および佐賀山粘土Aの破壊時の間隙水圧係数と過圧密比の関係をFig. 7に示す。Table 2に各粘土試料に対する有効応力基準による内部摩擦角 ϕ' 、正規圧密状態における破壊時の間隙水圧係数 A_r 、圧縮指数 C_c 、膨潤指数 C_u 、それと標準圧密試験より求めた飽和透水係数 k_s を示す。有効応力基準による粘着力 c' は表には示していないが、いずれの試料でもほぼゼロであった。

ここで、これらの結果のうち安定問題に直接関係する強度定数について考えてみる。

まず、有効応力基準による見掛けの粘着力 c' に関してであるが、今回調べた限りでは、四国の破砕帯地すべりのすべり面の粘土は、正規圧密状態のみならず過圧密状態でも c' はほぼゼロである。過圧密状態で c' がゼロである粘土は、 c' をもつものとは比べて、間隙水圧増加に伴う過圧密化によってせん断強度の低下割合は大きい。このようなせん断特性をもつ粘土がすべる場合、間隙水圧の増加に伴う有効応力の低下がすべりの主要因となる。実際、四国の破砕帯地域で発生している地すべりのほとんどが多雨期に大きくすべり、渇水期にはほとんど停止していることから考えてみても、地すべりの主要因が間隙水圧の増加に伴う有効応力の低下であることが明らかである。

次に、有効応力基準による見掛けの内部摩擦角 ϕ' に関してであるが、すでにFig. 1に示したように乱しても ϕ' はあまり変化しないので、本実験結果は一般的な意味をもっていると考えてよい。今回得られた地すべり粘土の ϕ' は25°~31°程度である。日本における沖積海成粘土の ϕ' は35°前後であるが、それと比較すると破砕帯地すべり粘土の ϕ' はかなり小さい。地すべり粘土の ϕ' が小さいということは重要なことであって、緩傾斜地ですべりが生じる素因の1つであろう。なお、長者および三机地すべり地のすべり面以外の粘土の ϕ' は、すべり面のそれよりも4°~5°大きく、九町粘土でも1°~2°大きい。また、吹地すべり、西宇峰地すべりのそれも他の地すべり地のものと比較して若干大きい。これから、すべりが生じてから弱くなったのか、あるいは元々弱い部分であるからすべったのかは不明であるが、地す

べり土塊の中ですべり面の部分の粘土の強度定数が他の部分のそれと比べて小さいことがわかる。

ところで、第三紀層の地すべりは、破砕帯地すべりと比べて一般的に緩傾斜地ですべりが発生している。したがって、地すべり粘土の ϕ' も破砕帯地すべりのものと比べて小さいと想像される。しかし、今回試験した米山地すべり粘土の ϕ' は37.6°と破砕帯地すべり粘土の ϕ' と比較してかなり大きい。ただし、Table 1の粒度組成で示したように、今回試験した米山粘土は2 μ m以下の粘土分が少なく、その影響が ϕ' に現われたのかもしれない。破砕帯地すべりと第三紀層の地すべりとは、その挙動に違いがあることが指摘されているが、今後、地すべり粘土の力学特性の比較を行うことも必要である。

破砕帯地すべり粘土の ϕ' は、日本の海成粘土のそれと比べて一般的に小さいということが明らかになったが、その理由として次のようなことが考えられる。

- ① 粘土鉱物の違い
- ② 吸着イオンの違い
- ③ 粒度分布の違い

そこで、次章以下で、これらが破砕帯地すべり粘土のせん断特性に与える影響を調べ、検討を加える。

4. 粘土鉱物分析とイオン分析

粘土鉱物および吸着イオンが破砕帯地すべり粘土のせん断特性に与える影響を調べる前に、地すべり粘土の鉱物分析ならびに吸着イオンの分析を行った。用いた試料は、犬寄粘土、怒田粘土、佐賀山粘土A, B, 川戸連火粘土、長者粘土、それと海成広島粘土である。

(1) 粘土鉱物分析

鉱物分析はX線回折により行った。

a) 粘土画分 (<2 μ m) の分離

おのおの風乾細土10.0gを用い、まず、有機物を除くため7%過酸化水素で加熱処理を行った。そして、1M水酸化ナトリウムを加えてpH10に調整し、5時間往復振とうした。その分散した懸濁液を1l容沈定シリンダーに移し、沈定法により粘土画分 (<2 μ m) を分離した。粘土画分の分離は、粘土画分が取れなくなるまで繰り返した(9~10回)。分離した粘土画分は塩化ナトリウム溶液を加えて凝集させ保存した。

粒径組成を求めるため、粘土画分を分離後、シルト画分(2~20 μ m)を沈定法により繰り返し分離し、残りを砂分として各画分を定量した。

b) X線回折

試料全体のX線回折の手順は次のようである。まず試料の一部を取り、風乾後メノウの乳鉢で粉碎した。その後アルミホルダーに充填し、粉末法によりX線回折を行った。

粘土画分，シルト画分のX線回折の手順は次のようである。粘土 30 mg を含む懸濁液を 3 本の 10 ml 容ガラス製遠心分離管に採取した。2 本は 1M 塩化カリウムで、もう 1 本は 0.5M 塩化マグネシウムでそれぞれ 3 回遠沈洗浄を行った。過剰塩を除去するため水を加えて遠沈洗浄した。次に水 1 ml を添加し，懸濁させ，その懸濁液をスライドガラス (28×48 mm) の全体を被うように滴下した。風乾後，カリウム飽和試料とマグネシウム飽和試料のX線回折を取り，さらにその後カリウム飽和試料の 1 つはヒドラジン処理を行い，もう 1 つは 100°C，300°C および 550°C で加熱し，マグネシウム飽和試料はグリセロール処理 (10% V/V グリセロールをスプレーする) を施してそれぞれのX線回折を取った。X線回折は次の条件で行った。

対陰極：銅，管電流：10 mA，管電圧：30 kV，スリット系：1°-0.3 mm-1°，走査速度：2°/min，時定数：2，フルスケール：1 000～4 000 cps (粘土画分・シルト画分)，1 000 cps (試料全体)，チャート速度：1 cm/min

c) 実験結果と考察

佐賀山粘土 A の X 線回折図の一例を Fig. 8 に示す。この図から，クロライト (13.9 Å, 7.08 Å, 4.70 Å, 3.55 Å) による回折線が最も強く現われており，次いで長石類 (3.12 Å)，角閃石 (8.35 Å) が認められる。結果は示していないが，Mg 飽和・風乾処理，K 飽和・風乾処理および K 飽和・550°C 加熱処理をした試料に対しての X 線回折結果からも，クロライトがその大部分を占めていることが明らかになった。また，Mg 飽和・風乾処理をした試料に対する X 線回折で 14.03 Å にみられたピークが，グリセロール処理により少量が 17.67 Å に移行したためスメクタイトの存在が確認された。

他の試料についても同様に種々の処理を施した試料に対して X 線回折を行い，粘土鉱物を調べた。その結果をまとめて Table 3 に示す。

御荷鋳帯の主要粘土鉱物はスメクタイトとクロライトである。また，三波川帯ではいずれの粘土にもイライト，クロライト，カオリナイトが含まれ，他にスメクタイト，タルク，パーミキュライトが含まれているものもある。四国の三波川帯および御荷鋳帯の地すべり地の粘土に対して従来行われている鉱物分析結果から，イライト，カオリナイトは御荷鋳帯にはみられないということやモンモリロナイト (スメクタイト) は御荷鋳帯には多数みられるが，三波川帯では少数であるということ，また，三波川帯と御荷鋳帯の地すべり粘土は，その主要粘土鉱物としてクロライトを有するなどという報告がなされているが¹³⁾⁻¹⁵⁾，今回の分析結果でも同様な傾向を示している。なお，海成広島粘土と破砕帯地すべり粘土の粘土鉱物に顕著な相違は認められない。

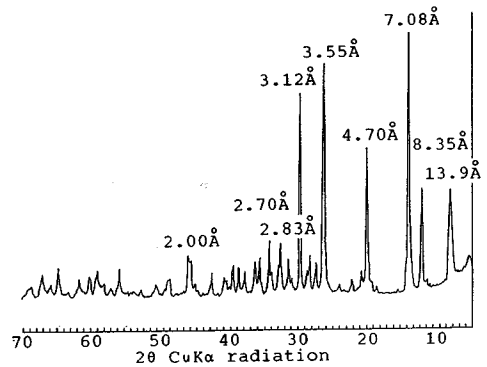


Fig. 8 Record of X-ray diffraction on Sagayama A clay.

Table 3 Results of X-ray diffraction.

Grain size Soil sample	Clay fraction ($< 2 \mu\text{m}$)	Silt fraction ($2 \mu\text{m} <, < 20 \mu\text{m}$)
Inuyose	Chlorite, Vermiculite, Talc, Illite, Kaolinite	Chlorite, Kaolinite, Talc >> Mica
Choja A	Chlorite, Illite, Vermiculite, Feldspar	Chlorite, Vermiculite, Mica(or Talc), Quartz,
Sagayama A	Chlorite, Smectite Amphibole	Chlorite, Amphibole Feldspar
Sagayama B	Illite > Chlorite	Mica(Illite), Chlorite Quartz, Feldspar
Nuta	Chlorite, Smectite Amphibole	Chlorite, Amphibole Feldspar
Kawadotsurebi	Smectite, Illite, Chlorite, Kaolinite	Chlorite, Mica Quartz, Feldspar
Hiroshima (Marine clay)	Smectite, Illite, Chlorite, Kaolinite	Illite, Feldspar, Amphi- bole, Quartz, Kaolinite

Table 4 Exchangeable cation.

Soil sample	Exchangeable cations me/100 g (%)				pH		dispersion ratio (%)
	Ca	Mg	K	Na	H ₂ O	KCl	
Inuyose	5.28 (76.7)	1.06 (15.4)	0.20 (2.9)	0.34 (5.0)	8.59	7.99	100
Choja A	6.39 (83.7)	0.80 (10.5)	0.22 (2.9)	0.22 (2.9)	8.18	6.61	94.9
Sagayama A	1.68 (61.8)	0.90 (32.1)	0.08 (2.9)	0.06 (2.2)	7.29	4.82	74.1
Sagayama B	4.35 (92.9)	0.14 (3.0)	0.12 (2.6)	0.07 (1.5)	7.88	8.04	58.9
Nuta	1.68 (58.9)	0.84 (28.5)	0.19 (6.7)	0.14 (4.9)	8.08	6.75	100
Kawadotsurebi	15.0 (62.2)	2.88 (11.8)	0.31 (1.7)	0.06 (0.9)	8.21	7.82	60.2
Hiroshima (Marine clay)	17.9 (71.5)	3.70 (14.8)	1.64 (6.5)	1.81 (7.2)	7.78	7.24	66.3

(2) イオン分析

a) 実験方法

風乾細土 2.0 g を用い，1 M・pH 7 の酢酸アンモニウム溶液 30 ml で洗浄した後，洗液中の Ca・Mg・K・Na を原子吸光度法により定量した。

b) 実験結果と考察

実験結果を Table 4 に示す。表中，交換性陽イオンの量は土壌 100 g 当たりのミリ当量数 (meg) で示してある。なお，pH ならびに分散率も併記してある。ここで，分散率とは地すべり粘土の細粒分を風乾させたものを蒸留水中で攪拌したときの粒度 20 μm 以下の含有率 (重量比) である。この結果をみると，全体的には，地すべり粘土は海成広島粘土と比べて，交換性陽イオンの量は少ない。川戸連火粘土，佐賀山粘土 B はともに黒色片岩

であるが、この両者は Na^+ が非常に少なく、それに比べて Ca^{2+} が多い。御荷鉾緑色岩を母岩とする佐賀山粘土 A、怒田粘土は他の地すべり粘土と比べて比率的には Ca^{2+} が少なく、 Mg^{2+} が多い。これは、川戸連火粘土と佐賀山粘土 B は主に雲母（イライト）から構成されており、佐賀山粘土 A と怒田粘土は主に緑泥石鉱物（クロライト）から構成されているからであると思われる。すなわち、モンモリロナイトあるいはパーミキュライトから雲母（イライト）への変化は、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} の増加により、また、緑泥石鉱物（クロライト）への変化は、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} の増加により起こることが確かめられている¹⁶⁾。犬寄粘土と長者粘土は比較的似通っている。

なお、海成粘土の Na^+ が少ないようであるが、これは Ca^{2+} と Mg^{2+} の方が Na^+ より粘土に吸着しやすいということが大きく影響している。また、試料を純水で練り返した後、風乾させていることも影響していると思われる。

5. 破碎帯地すべり粘土の強度特性に与える粒度分布、粘土鉱物、吸着イオンの影響

(1) 粒度分布の影響

試料には佐賀山粘土 A およびその採取試料からふるい分けられた礫分を粉末状に砕いたもの（母岩破碎試料）を用いた。粒度分布を Table 5 に示す。せん断特性は圧密非排水条件の三軸圧縮試験により調べた。試験方法などは前述したとおりである。

有効応力経路を Fig. 9 に示す。 ϕ' 、 A_r は Table 5 に併

Table 5 Gradation and mechanical properties of Sagayama A clay with different grain size.

Soil sample (Sagayama A)	Gradation			ϕ' ($^\circ$)	A_r
	<2 μm	2~20 μm	20 μm <		
Natural	25.0	44.6	30.4	28.5	0.90
a fine	25.1	47.0	27.9	27.2	0.75
b medium	8.8	85.3	5.9	33.1	0.30
c coarse	7.3	26.0	66.7	35.7	0.20
d crushed	24.7	55.0	20.3	30.0	0.85

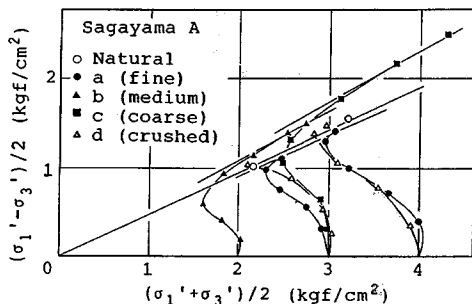


Fig. 9 Stress paths and failure line of Sagayama-A clay with different grain size.

記してある。これから細粒分の減少に伴って ϕ' は増加していることがわかる。また、それとともに A_r 値は低下している。なお、礫分を粉末状に砕いた試料は、ほぼ同じ粒度分布をもつ供試体 A と同様な有効応力経路を示す。これは、形状的には礫であっても風化が進んでおり、かなりの量のもが粘土鉱物粒子にまで破碎されるからである。風化の進んでいない母岩を砕いても粒徑的にはシルト程度までしか破碎されず、粘土分はほとんどないので、地すべり粘土のせん断特性とは異なると考えられる。

今回 1 種類の粘土に対してしか試験を行っていないので断定はできないが、粒度分布、特に粘土分の含有量がせん断特性に与える影響は大きいと思われる。実際の破碎帯地すべり粘土中には礫分も含まれている。今後、礫分まで含めた試料のせん断特性に与える粒度分布の影響を調べる必要がある。また、粘土分の割合とせん断特性との関係を明らかにしておくことも、破碎帯地すべり粘土の強度定数を考えるうえで重要である。

(2) 吸着イオンの影響

吸着イオンがせん断特性に与える影響を調べるため、川戸連火粘土を試料として、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} の 3 種類のイオン交換を行い、そのせん断特性を三軸圧縮試験により調べた。陽イオン交換は次のような手順で行った¹⁷⁾。 Na イオンに交換するためには、風乾試料に 1 M・ NaCl 溶液を加え、振とうした後、静置し上澄み液を取り除くことを 5 回繰り返した。そして、過剰塩を除去するため水を加え、振とうし、沈殿させた。また、 K イオンの場合は 1 M・ KCl 溶液を、 Mg イオンの場合には 0.5 M・ MgCl_2 溶液を用いた。以上の作業により、 Na 、 K 、 Mg イオンに交換された川戸連火粘土の物性を Table 6 に示す。実験は圧密非排水三軸圧縮試験で、試験方法などは前述したとおりである。

有効応力経路を Fig. 10 にまとめて示す。また、 ϕ' と A_r は Table 6 に示されている。有効応力基準による内部摩擦角 ϕ' は Na^+ 、 Mg^{2+} 、自然状態、 K^+ の順に大きくなっている。これは陽イオンの交換侵入力と関係があるものと考えられる。実際、1 価と 2 価の陽イオンについて、1:1 型粘土鉱物やアロフェンでは交換侵入力は通常次のようである。

$$\text{H} > \text{Ba} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Cs} > \text{Rb} > \text{K} = \text{NH}_4 > \text{Na}$$

Table 6 Physical properties of Kawadotsurebi clay with different cations.

Sample	w_L (%)	I_P (%)	ϕ' ($^\circ$)	A_r
Na^+ clay	42.0	15.5	24.7	0.93
K^+ clay	41.9	18.7	30.0	1.02
Mg^{2+} clay	41.0	15.6	26.0	1.07
Natural	41.4	17.4	26.2	0.90

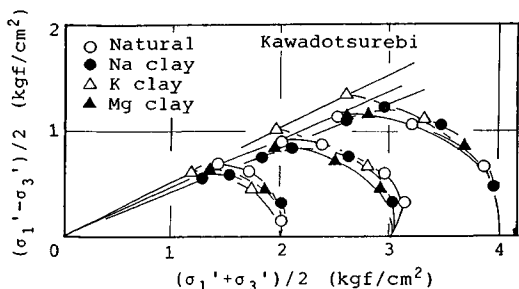


Fig. 10 Stress paths and failure line of Kawadotsurebi clay with different cations.

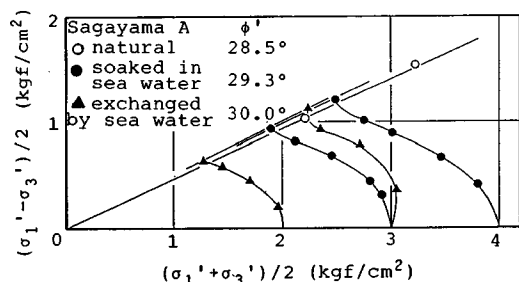


Fig. 11 Stress paths and failure line of Sagayama A clay replaced pore water with sea water.

2:1型粘土鉱物では、K⁺とNH₄⁺は結晶内部のSi四面体層の酸素原子内にあるくぼみにうまくはまりこむことにより強く吸着され、Ca²⁺と順序が逆転する。川戸連火粘土には2:1型粘土鉱物であるスメクタイトとイライイトおよび1:1型粘土鉱物のカオリナイトの3種類が含まれているが、イライイトとカオリナイトはスメクタイトと比べると陽イオン交換容量が小さいため、実質的にはスメクタイトの特性が支配的であると思われる。ここで、自然状態の川戸連火粘土にはCaイオンが多く含まれていたことを考えあわせると、各種イオンに交換された川戸連火粘土のφ'の大小関係は2:1型粘土鉱物の陽イオン交換侵入力と一致していることがわかる。

Fig. 11は佐賀山粘土Aを海水によりイオン交換した試料の圧密非排水三軸圧縮試験により得られた有効応力経路を示したものである。イオン交換は、1M・NaCl溶液を用いて最も交換侵入力の弱いNaイオン粘土に交換した後海水中の陽イオンと交換する方法と単に乾燥試料を海水中に浸すことによる方法とで行っている。この結果をみると海水によりイオン交換した佐賀山粘土Aは若干φ'が増加する傾向がある。これから1つの試料に対する実験結果ではあるが、海成粘土のφ'と比較して地すべり粘土のφ'が小さい理由の1つとして吸着イオンの影響が考えられる。

(3) 粘土鉱物の影響

破碎帯地すべり粘土の粘土鉱物であるイライイト、クロ

Table 7 Mechanical properties of Chlorite, Illite and Vermiculite.

Soil Sample	φ' (°)	A _r	
Chlorite	natural	23.6	1.05
	cation exchanged by sea water	26.1	0.90
Illite	natural	28.8	0.58
	cation exchanged by sea water	30.5	1.10
Vermiculite	natural	24.2	1.00
	cation exchanged by sea water	22.5	0.90

Table 8 Classification of landslide zones by cation, clay mineral and angle of shearing resistance.

	Soil sample	Parent rock	Cation	Clay mineral	φ'
A	Nuta	Green stone	Ca ²⁺ (58.9%) Mg ²⁺ (29.5%)	Chlorite Smectite	28.4°
	Sagayama A	Green stone	Ca ²⁺ (61.8%) Mg ²⁺ (33.1%)	Chlorite Smectite	28.5°
B	Sagayama B	Black schist	Ca ²⁺ (92.9%) Mg ²⁺ (3.0%) Na ⁺ (scarce)	Illite Chlorite	25.2°
	Kawadotsurebi	Black schist	Ca ²⁺ (82.2%) Mg ²⁺ (15.8%) Na ⁺ (scarce)	Illite Smectite	26.2°
C	Inuyose	Crystalline schist	Ca ²⁺ (76.7%) Mg ²⁺ (15.4%)	Chlorite Illite Vermiculite	30.0°
	Choja A	Loam	Ca ²⁺ (83.7%) Mg ²⁺ (10.5%)	Chlorite Illite Vermiculite	30.0°

ライト、パーミキュライトのせん断特性を圧密非排水三軸圧縮試験により調べた。また、おのおのの粘土鉱物試料を海水によりイオン交換した試料のせん断特性も調べた。イオン交換は1M・NaCl溶液を用いて、Naイオンに交換した後、海水のイオンと交換している。せん断試験の方法などは前述したとおりである。なお、破碎帯地すべり粘土ではスメクタイトの含有量が少ないので、今回はスメクタイトのせん断特性を調べていない。

Table 7に実験より得られたφ'とA_rを示す。今回試験した粘土鉱物試料のφ'は23°~29°とかなり小さい。海水によりイオン交換するとパーミキュライトはφ'が若干小さくなり、クロライトとイライイトは大きくなっている。粘土鉱物の分析結果で述べたように、破碎帯地すべり粘土には粘土鉱物としてクロライトとイライイトが多く含まれている。したがって、この実験結果は、海成粘土のφ'と比較して破碎帯地すべり粘土のφ'が小さい理由の1つを示していると思われる。

以上、破碎帯地すべり粘土の強度特性には交換性陽イオンと粘土鉱物が大きく影響を与えていることが明らかになった。ここで、地すべり粘土の粘土鉱物、交換性陽イオン、さらに内部摩擦角φ'をまとめて考え合わせると、Table 8に示すような分類ができることがわかる。これから、場所的には異なった地すべり地の粘土であっても交換性陽イオンと粘土鉱物が似ていれば、内部摩擦角はほぼ等しいことがわかる。

6. あとがき

四国の破碎帯地すべり地より採取した地すべり粘土の鉱物組成、吸着イオン、せん断特性について調べた。得られた結論は以下のようである。

(1) 今回調べた破碎帯地すべり粘土の有効応力基準による内部摩擦角は、一般の海成粘土のそれと比べてかなり小さい。これは、地すべりが緩斜面でも起こる理由の1つである。

(2) 破碎帯地すべり粘土は、正規圧密状態だけでなく、過圧密状態でも有効応力基準による粘着力はほぼゼロである。したがって、地すべりの主要因の1つは間隙水圧の増加に伴う有効応力の低下である。

(3) 主要粘土鉱物は三波川帯ではイライトとクロライトなどであり、御荷鉢帯ではクロライトであるということ、また、イライト、カオリナイトは御荷鉢帯には存在しないことなどが確認された。

(4) 吸着イオンおよび粘土鉱物の特性から地すべり粘土を分類することができる。そして、吸着イオンおよび粘土鉱物が似ていれば内部摩擦角もほぼ等しい。

(5) 破碎帯地すべり粘土の内部摩擦角は一般の海成粘土のそれと比べて小さいが、その理由の1つとして、海水中の陽イオンに交換されたクロライトおよび佐賀山粘土Aの内部摩擦角が増加することなどの実験事実から粘土鉱物および吸着イオンが影響していることが確認された。

今後、さらに多くの地すべり粘土の力学特性を調べるとともに、安定解析、変形解析を行い、地すべり挙動に対して土質力学的観点から総合的な検討を加えることが必要であると思われる。

鉱物分析、イオン分析を行うにあたり、実験装置は愛媛大学農学部農芸化学科土壌学・肥科学講座のものを使用し、同講座の吉永長則教授、松枝直人氏には実験方法、結果の解釈等で多大なご指導を戴いた。試料採取にあたっては、四国地建松山工事事務所、同大洲工事事務所、同吉野川砂防工事事務所、愛媛県松山地方局、高知県土木部砂防課にお世話になった。また、長岡技術科学大学小川正二先生には米山粘土を戴いた。当時愛媛大学大学院生 国富和真(現・鴻池組)、同工学部学生 飯田勝己(現・中国地建)、篠原浩一(現・関東電気工業)、藤元

英樹(現・奥村組土木興業)の4氏には種々の実験を担当して戴いた。関係諸氏、諸機関に感謝致します。

なお、本研究の一部は、昭和62年度文部省科学研究費(奨励研究A)を使用した。

参 考 文 献

- 1) 八木則男・榎 明潔・矢田部龍一・永江正憲：犬奇地すべりの挙動に対する土質力学的検討，地すべり，第23巻，第1号，pp.8~15，1986.
- 2) Yagi, N., Enoki, M. and Yatabe, R.: Analysis of Inuyose landslide based on creep phenomenon, Proc. Vth ICFL, pp.79~83, 1987.
- 3) 高知営林局：昭和60年度祖谷川地区平谷地すべり対策並びに機構調査報告書，1986.
- 4) 小川正二・池田俊雄・趙 茂吉・和田 正：過圧密状態を考慮した地すべり斜面の安定解析，第17回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1089~1092，1982.
- 5) 八木則男・矢田部龍一・松村真一郎：練り返し時含水比の異なる再圧密土の力学特性，土木学会論文報告集，第330号，pp.99~106，1983.
- 6) 八木則男・矢田部龍一：乱れを受けた飽和粘性土の力学特性，土木学会論文報告集，第352号，pp.179~186，1984.
- 7) Grim, R.E.: Applied Clay Mineralogy, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp.204~277, 1962.
- 8) 中村浩之：地すべりとすべり面の残留強度，土木技術資料，Vol.21, No.8, pp.14~19, 1979.
- 9) 榎 明潔・八木則男・矢田部龍一：地すべり粘土の強度定数について，斜面崩壊および地すべりの予知と対策に関するシンポジウム発表論文集，pp.209~216，1988.
- 10) 八木則男・榎 明潔・矢田部龍一：破碎帯地すべりの移動量予測，土木学会論文集，第406号，1989.
- 11) Skempton, A.W.: Long-Term Stability of Clay Slopes, Geotechnique, Vol.14, No.2, pp.77~102, 1964.
- 12) 新潟県農林水産部治山課：地すべり調査総括書Ⅳ一魚沼地域・中越地域編一，pp.53~54，1981.
- 13) 藤本 広：西日本における地すべり層土の粘土鉱物について，地すべり，Vol.3, No.3, pp.14~20，1967.
- 14) 高谷精二：愛媛県における地すべり地の粘土鉱物(1)，応用地質，Vol.18, pp.107~116，1977.
- 15) 高谷精二：結晶片岩地域における地すべりと粘土鉱物(3)一高知県・怒田，八畝地すべり一，新砂防，No.118, pp.18~23，1981.
- 16) 下田 右：粘土鉱物研究法，創造社，pp.195~228，1985.
- 17) 山根一郎・吉永長則：土壌学，文永堂，pp.23~85，1978. (1988.5.16・受付)