

四国の中央構造線活断層系の断層粘土の強度特性

Strength Characteristics of Clay in Active Fault of Tectonic Line

矢田部 龍 一 (やたべ りゅういち)
愛媛大学教授 工学部

八 木 則 男 (やぎ のりお)
愛媛大学教授 工学部

横 田 公 忠 (よこた きぬただ)
愛媛大学助手 工学部

上 野 将 司 (うえの まさし)
(株)応用地質 技術本部 技師長

1. ま え が き

地震国である日本には多くの活断層が分布している。しかし、建設工事に際して極力、活断層を避けてきたこともあり、活断層の工学的性質、特に断層粘土の強度特性は余り調べられていない。

四国には東西方向に日本でも第一級の大断層である中央構造線が走っている。この中央構造線に沿って並走もしくは雁行する断層群が分布しているが、第四紀に活動した断層群を総称して中央構造線活断層系と呼んでいる。四国ではこれまで建設工事に際してこの活断層系に触れることを極力避けてきた。しかし、四国縦貫自動車道の建設に際しては用地が取れないこともあり、中央構造線活断層系に沿って工事が進められており、数箇所中央構造線をまたいでいる。中央構造線沿いの建設工事は難工事となることが多い¹⁾。また、兵庫県南部地震以降、四国の活断層の数地点でトレンチ調査が既に行われている。これらの活断層のトレンチ調査や高速道路の建設工事に際して遭遇した数箇所の活断層の露頭から断層粘土を入手した。

本報告では、まず活断層より採取した断層粘土の含有鉱物と強度特性を調べた結果を述べる。行った試験は、各種物性試験、三軸圧縮試験ならびにリングせん断試験、それとX線回折による鉱物分析である。

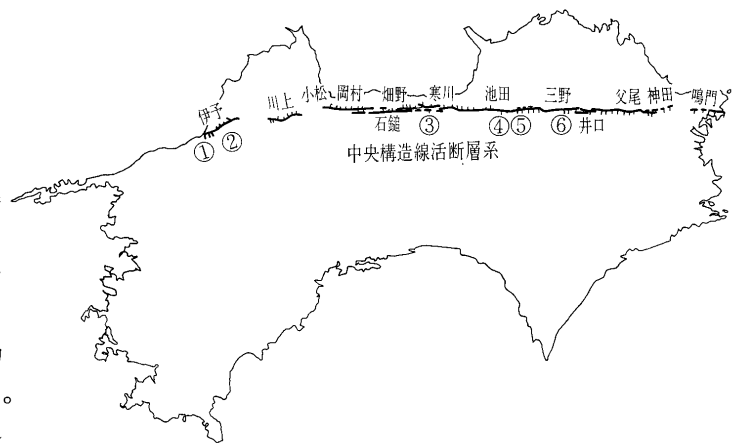
断層粘土と成因は若干異なるが、同様に破碎され、風化して粘土化した土としては、地すべり地のすべり面の土があげられる。成因が異なる活断層の断層粘土と地すべり地のすべり面の粘土の強度・鉱物特性が似通ったものであるのか、あるいは異なったものであるのかを調べるために、地すべり地の粘土の強度・鉱物特性も併せて調べ、比較検討した。

最後に、中央構造線の活動に伴い形成された大破碎帯の土質特性の鉛直分布を調べ、大破碎帯における建設工事に際しての留意点を示した。

2. 中央構造線活断層系の断層粘土の強度特性

2.1 試料と試験方法

試料は図—1に示した6地点のトレンチ露頭と切土法面に現れた露頭、それとボーリングコアから採取した



図—1 中央構造線活断層系と試料採取位置

計21種類を用いた。ここで、四国の中央構造線活断層系について簡単に説明しておく。中央構造線は堆積岩である和泉層群と変成岩の三波川帯を境する大断層であり、中央構造線活断層系はこれに沿ったもしくは雁行した断層である。四国では図—1に示すように西から順に伊予、川上、小松、岡村、石槌、畑野、寒川、池田、三野、井口、父尾、神田、鳴門の各断層が確認されている²⁾。活断層の活動度は四国の北東部から中央部にかけてがA級、四国の北西部でA～B級にランクされている。断層運動としては右横ずれが卓越しており、移動速度は千年間で数mと推定されている³⁾。

試料の母岩と物性それと粒度分布を表—1に示す。なお、粒度分布の内、一部は2mm以下の試料の結果のみ示してある。今回の試料の母岩は和泉層群の泥岩・頁岩や砂岩、それと断層に貫入した安山岩、流紋岩などである。塑性指数は10%から40%足らずと、比較的low塑性である。粒度はシルト分以下の細粒分含有率が50%を越えるものも多い。中には粘土分含有率が50%を越えるものもある。これから度重なる断層運動の履歴とその後の風化作用により細粒化が進んでいることがわかる。

行っ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。三軸試験で有効応力基準によるせん断抵抗角 ϕ' を、リングせん断試験で残留状態でのせん断抵抗角 ϕ_r を求めた。供試体はいずれも420 μm のふるい通過分を、純水で練り返し再圧密したものである。また、見かけの粘着力 c' と残留状態での粘着力成分 c_r はともにゼ

表—1 各種物性ならびに粒度分布

試料名	母 岩	w_L	w_p	I_p	G_s	粒度分布 (%)			
						粘土	シルト	砂	礫
①	1 泥 岩	40.9	11.5	29.4	2.57	15.0	50.0	35.0	—
	2 泥 岩	36.0	11.5	24.5	2.58	12.2	41.8	46.0	—
	3 泥 岩	31.9	6.9	25.0	2.63	18.5	25.0	56.5	—
	4 泥 岩	40.9	13.7	27.2	2.68	12.2	64.7	23.1	—
	5 泥 岩	31.9	6.9	25.0	2.63	23.0	22.0	55.0	—
②	1 安 山 岩	—	—	—	—	—	—	—	—
	2 泥 岩	—	—	—	—	—	—	—	—
	3 泥 質 片 岩	34.4	9.4	25.0	2.80	34.9	28.8	16.3	20.0
	4 泥 質 片 岩	37.1	14.0	23.1	2.73	57.2	12.9	4.9	25.0
③	1 流 紋 岩	39.5	15.3	24.2	2.68	20.3	24.7	55.0	—
	2 流 紋 岩	60.9	25.2	35.7	2.69	15.0	41.4	43.6	—
	3 断層ガウジ	31.2	12.1	19.2	2.73	12.1	27.9	60.0	—
	4 断層ガウジ	37.7	14.0	23.7	2.64	20.3	45.0	34.7	—
	5 断層ガウジ	27.4	13.5	13.9	2.64	12.4	17.3	70.3	—
④	1 流 紋 岩	54.3	16.5	37.8	2.71	15.1	45.2	39.7	—
	2 砂 岩	30.1	10.2	19.9	2.72	17.8	67.1	15.1	—
	3 泥 質 変 岩	52.1	13.9	38.2	2.72	63.7	29.3	7.0	—
⑤	1 砂 岩	42.5	23.1	19.4	2.80	19.6	22.8	27.6	30.1
	2 泥 岩	39.4	26.8	12.6	2.70	25.9	19.8	24.3	29.8
⑥	1 泥 岩	35.8	24.3	11.5	2.80	29.8	18.4	26.8	24.6
	2 泥 岩	46.9	22.6	24.3	2.80	25.7	22.4	29.3	22.9

口であったので表示していない。 ϕ' と ϕ_r を求めたのは、これらが乱れや応力履歴などの影響を受けにくい力学定数である^{4),5)}のと同時に支持力、土圧、斜面安定問題などに幅広く使われるからである。

粘性土の力学的性質には含有粘土鉱物が大きく影響することが知られている。そこで、鉱物分析をX線回折により行った。試験は粉末法により行った。まず無処理の試料に対してX線回折による鉱物分析を行い、更に分析が必要な試料に対しては500°C加熱処理とエチレングリコール処理を行った。

2.2 断層粘土の ϕ' と ϕ_r ならびに含有鉱物

表—2 に ϕ' と ϕ_r それと含有鉱物を示す。また、図—2 に ϕ' と ϕ_r を示す。図—2 の横軸には I_p を取ってある。

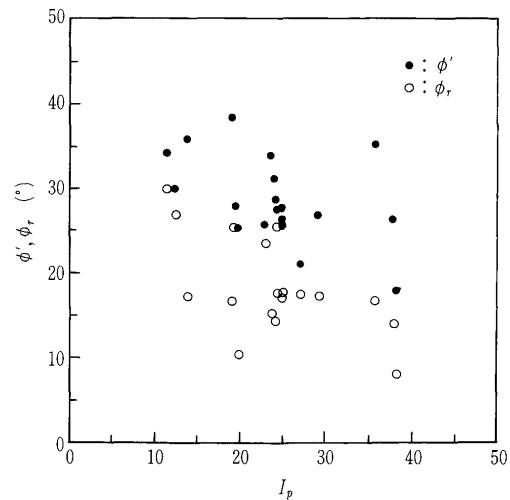
今回調べた断層粘土の ϕ' は16.8°~38.3°と試料によって20°以上も異なっているが、大まかにみれば25°~30°程度のものが多い。この ϕ' は日本の海成粘土のそれと比べると10°程度小さい。また、 ϕ_r は8.0°~33.4°と試料によって20°強も異なっている。 ϕ' から ϕ_r への低下量をみると試料によってかなり異なる。 ϕ_r への低下は大変形状状態で扁平な粘土粒子がすべり面に沿って配向することにより起こるといわれている^{6),7)}。したがって、扁平な粒子が多く含まれているほど ϕ_r への低下が著しい。

以上示したせん断試験結果から断層粘土は ϕ' と ϕ_r が大きいものでも30°強、小さいものでは10°~20°というような値であるので、建設工事を行う際には弱面として当然問題を引き起こすことが予想される。しかし、そのせん断抵抗角は断層粘土ごとにより異なるので試験に

表—2 せん断抵抗角と含有鉱物

試料名		$\phi'(^{\circ})$	$\phi_r(^{\circ})$	構 成 鉱 物
①	1	26.7	17.2	Chl, Ver, Qua, Fel
	2	27.4	17.5	Chl, Ver, Qua, Fel
	3	26.3	17.6	Chl, Ver, Qua, Fel
	4	20.9	17.4	Chl, Ver, Qua, Fel
	5	25.7	17.1	Chl, Ver, Qua, Fel
②	1	34.4	33.4	Sme, Chl, Mic, Qua, Fel
	2	16.8	14.3	Sme, Chl, Mic, Qua, Fel
	3	27.6	25.6	Sme, Chl, Mic, Qua, Fel
	4	25.6	23.4	Chl, Mic, Qua, Fel
③	1	31.1	14.2	Chl, Mus, Ver, Qua, Fel
	2	35.2	16.7	Chl, Mus, Ver, Qua, Fel
	3	38.3	16.6	Chl, Mus, Ver, Qua, Fel
	4	33.7	15.1	Chl, Mus, Ver, Qua, Fel
	5	35.9	17.2	Chl, Mus, Ver, Qua, Fel
④	1	26.0	14.0	Sme, Chl, Mic, Qua, Fel
	2	25.2	10.4	Sme, Chl, Qua, Fel
	3	17.6	8.0	Sme, Chl, Qua, Fel
⑤	1	27.8	25.3	Mic, Mus, Chl, Qua
	2	30.0	26.8	Sme, Kao, Qua, Fel
⑥	1	34.2	30.0	Chl, Mus, Tre
	2	28.6	25.4	Chl, Mic, Qua, Fel

Chl : クロライト Ver : パーミキュライト Mic : 雲母
Sme : スメクタイト Mus : マスコバイト Kao : カオリナイト
Tre : トレモライト Qua : 石英 Fel : 長石

図—2 せん断抵抗角 ϕ' , ϕ_r と塑性指数の関係

より調べる必要がある。

含有鉱物としてはクロライトが21試料に含有されており、石英と長石が19~20試料に、パーミキュライトが10試料に、スメクタイトと雲母、それとマスコバイトは7試料に、カオリナイトとトレモライトは1試料に含まれている。堆積岩である和泉層群から採取した試料が多いことを考えるとクロライト、石英、長石、パーミキュライト、雲母、マスコバイト、スメクタイトがかなり多くの試料に含まれていることはうなずける。クロライトは3層構造の粘土鉱物で緑色片岩や緑色岩の風化粘土に多く含まれているが、和泉層群では長石や雲母

から風化生成されたものと思われる。スメクタイトは3層構造で、極端な膨張性を持ち、せん断強度が極めて小さい性質を持つ粘土鉱物であるが、7試料に含まれているのは興味深い。長石と雲母は風化してまずスメクタイト化するが、スメクタイトは粘土鉱物的により安定なクロライトへと変化する。したがって、スメクタイトよりもクロライトの方が多くの試料に含まれている。パーミキュライトはひる石と呼ばれており、陽イオン交換能力の大きい粘土鉱物である。マスコバイトは白雲母のことであり、泥質片岩に多く含まれている。トレモライトは角せん石のことであり、一次鉱物である。

以上の鉱物分析から断層粘土は断層運動による物理的風化に引き続いて化学的風化が進んでおり、粘土鉱物が生成されていることがわかる。

含有鉱物と ϕ' と ϕ_r の関係をみると他の試料と比べて ϕ' と ϕ_r がかなり小さい二つの試料(②-2および④-3)とも膨張性鉱物であるスメクタイトが含まれているのが特徴的である。ただし、試料②-1, 2, 3の ϕ' と ϕ_r を比べてみるといずれも含有鉱物は同じであるにもかかわらず ϕ' と ϕ_r ともに3試料で10数度も異なっている。これからみると含有鉱物の種類はせん断特性に影響していないように思われる。

ここで、図-3にこれらの試料のX線回折図を示す。図-3には無処理とエチレングリコール(H.G.)処理の2種類の試料の回折結果を併記してある。H.G.処理は試料に膨張性を持つ粘土鉱物の有無を調べることを目的としている。すなわち、膨張性を有している試料をH.G.処理すると層間にH.G.が吸着されて、面間隔 d が14.7Åから17.7Åに変化することにより、無処理とH.G.処理の試料とでは回折強度のピークが異なることになる。

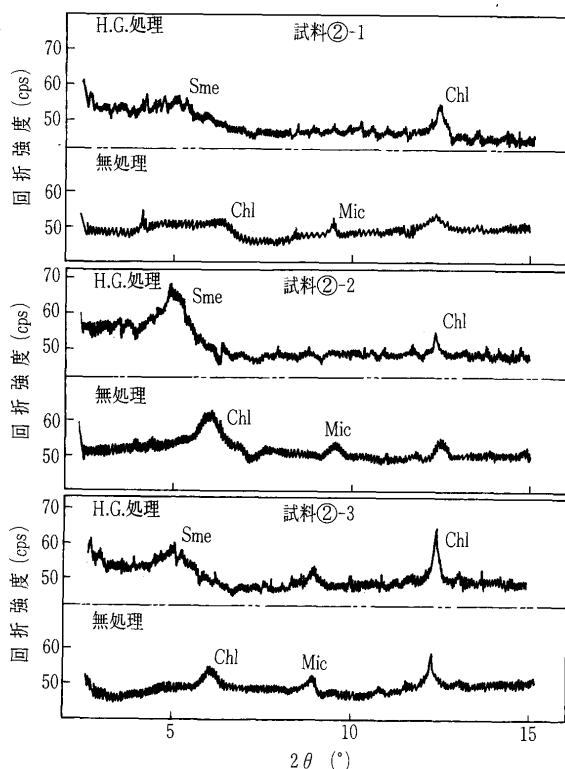


図-3 X線回折結果

図-3からいずれの試料も無処理では 2θ で 6° にみられたピークがエチレングリコール(H.G.)処理で 5° に移動しており、膨張性鉱物であるスメクタイトを含有していることが分かる。しかし、エチレングリコール処理した各試料のスメクタイトのピークの高さは明らかに異なる。試料②-2のピークが最も高く、次いで②-3, ②-1の順であり、特に②-1ではわずかにピークが見て取れるだけである。この3試料だけみればスメクタイト含有量が増えれば ϕ' , ϕ_r とはともに小さくなる。この例から含有鉱物と ϕ' , ϕ_r とはかなり相関づけられる可能性があると考えられるが、そのためには含有鉱物の含有量に対する定量的評価法を確立する必要がある。

2.3 地すべり地のすべり面の粘土と断層粘土との土質力学特性の比較

断層粘土のように自然地山で粘土化が進んだ土としては、ほかにも地すべり地のすべり面を形成している粘土があげられる。地すべり地のすべり面の粘土も岩石の物理的・化学的風化作用により形成されたものである。断層粘土と地すべり地のすべり面の粘土とでは成因は若干異なるが、同じく岩石の風化により形成されたものである。両者のせん断抵抗角を比較してみる。

四国の地すべりは、御荷鉾緑色岩分布地域で最も密に発生しており、次いで三波川帯での発生頻度が高く、和泉層群や秩父北帯でも地すべりが発生している。瀬戸内側の花崗岩分布地域や太平洋側の四万十帯ではほとんど発生していない。

ここで、和泉層群と三波川帯の地すべり地のすべり面の粘土のせん断抵抗角と先に示した断層粘土のそれを比較してみる。図-4に ϕ' についての比較を示す。なお、地すべり地の粘土も断層粘土と同様に ϕ' はゼロである。図-4から、断層粘土と地すべり地のすべり面の粘土で ϕ' に大きな違いはないことがわかる。ただ、断層の場合は熱水貫入を受けやすく、熱水変質によりスメクタイトのようなせん断強度が小さな粘土が形成されている場合があり、時にかなり小さなせん断抵抗角を示すので注意が必要である。実際、中央構造線沿いの断層近くの切土法面の工事では、白色化した粘土脈に沿ってすべる例が多く見受けられる。

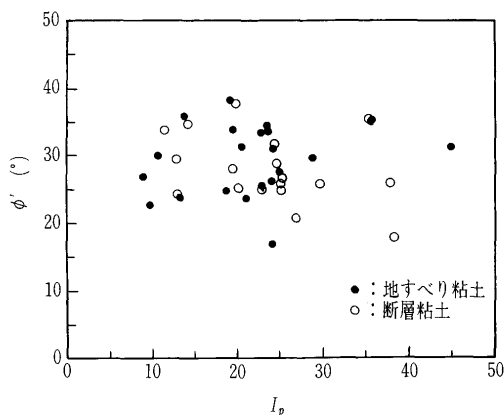
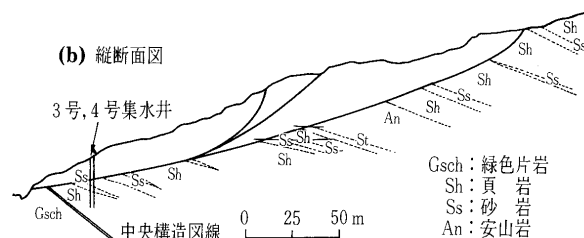
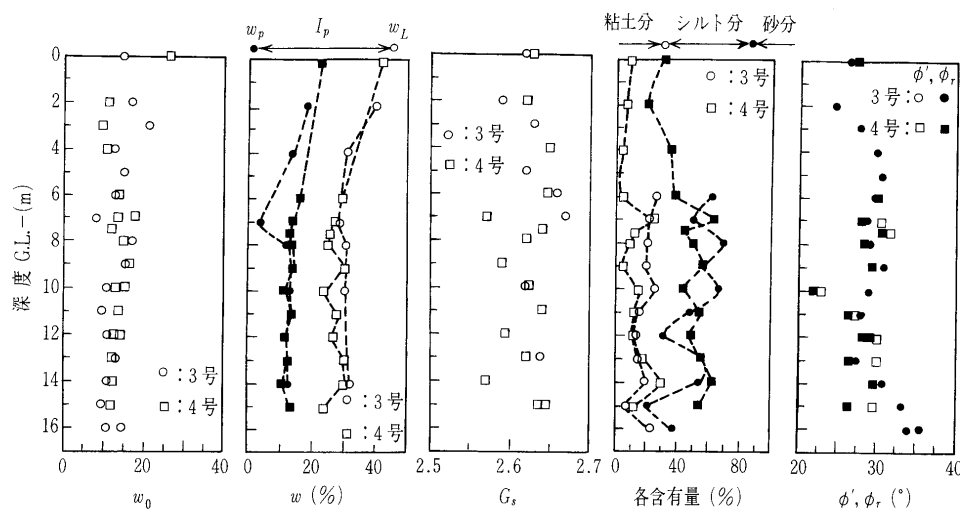


図-4 断層粘土と地すべり地の粘土の ϕ' の比較



図—5 大規模断層破碎帯の縦断面図



図—6 各種の土質的特性の鉛直分布

3. 大規模な断層破碎帯における土質的特性の鉛直分布の一例

中央構造線は非常に活発な活動履歴を有しており、度重なる断層活動により大規模な断層破碎帯が形成されていることが多い。断層破碎帯は建設工事を行う上で多くの問題を引き起こすと考えられるが、その土質的な構造を調べた例はほとんどない。断層破碎帯の物性や強度特性などの鉛直分布を調べておくことは、今後建設工事を行う上で参考になるとと思われる。

調べた対象地は図—1の地点①の近くに位置している。和泉層群の断層破碎帯であり、地すべりが発生している。縦断面図を図—5に示す。地質的には地表側に和泉層群の崩積土塊が、その下部に和泉層群の破碎帯が、更に、その下部に比較的堅硬な三波川緑色片岩が分布している。崩積土塊ならびに和泉層群の破碎部は調査地点で約20～30 m厚さで分布している。

図—6に16 m深さまでの土質的特性の鉛直分布を示す。液性限界と塑性限界はともに深さ方向に幾分低下する傾向がある。粒度分布をみるとシルト分以下の含有量が多いところで70%、少ないところで20%とばらつきはあるが、深さ方向に特に目立った傾向は認められない。なお、細粒分含有量が少ないところは砂岩が卓越した部分である。 ϕ' , ϕ_r は全体的に20°～30°であるが、時に小さいところもある。15 m以深の30°を越える ϕ_r は砂岩の風化層であるからである。 ϕ' と ϕ_r が小さいところが

連続していれば、すべりを起こす弱面となりえる。深さ方向に ϕ' , ϕ_r はあまり変化しないで比較的小さな値を示しているため、本土塊は地すべりを起こしやすい。これらの調査結果から本対象地では、深さ方向に全体的に風化が進行していることがわかる。このように大規模な断層破碎帯では、かなり深部まで脆弱化している可能性があるため、建設工事を行う上で十分な事前調査が必要である

8)。なお、鉱物分析結果を示してはいないが、全体的にハイドロマイカ、長石、石英が含有されている。

4. あとがき

四国の中央構造線活断層系の断層粘土の土質工学的特性、その中でも特に強度特性と大規模な断層破碎帯の土質的特性の鉛直分布を調べた。その結果、活断層の断層粘土は時としてかなり小さなせん断抵抗角を示すことなどが明らかになった。また、断層粘土のせん断抵抗角には、含有鉱物が

が影響していること、せん断抵抗角と含有鉱物の関係を検討するためには、含有鉱物の定量的な評価が必要であることなどが分かった。

参考文献

- 1) 例えば、横山治郎・久野富弘・石原 久：中央構造線に沿う地帯を掘る 四国縦貫自動車道の之尾トンネル、トンネルと地下、第14巻4号、pp. 7～16, 1983.
- 2) 活断層研究会：新編日本の活断層、東京大学出版会、p. 437, 1991.
- 3) 岡田篤正：中央構造線活断層系の活動区の分割試案、地質学論集、No. 40, pp. 15～30, 1992.
- 4) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：乱さない地すべり地粘性土のせん断特性、地すべり、Vol. 26, No. 4, pp. 3～9, 1990.
- 5) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：破碎帯地すべり地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.
- 6) Lupini, J. F., Skinner, A. E. and Varghan, P. R.: The drained residual strength of cohesive soils, Geotechnique, Vol. 31, No. 2, pp. 181～213, 1981.
- 7) Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M.: Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, No. 3, pp. 671～674, 1987.
- 8) 佐藤修治・宮本 晃・八木則男・奥園誠之：道路建設に伴う中央構造線直上の断層破碎帯における地すべりの機構と対策、土木学会論文集、第546号/Ⅵ-32, pp. 125～132, 1996.

(原稿受理 1998.9.7)