

(34) 結晶片岩中の断層粘土に関する地質・工学的特性

(株)大林組技術研究所 正会員 O桑原 徹、鈴木健一郎
同 上 正会員 丸山 誠、平間邦興

1 緒言

断層は節理などの亀裂と比較すると、その連続性や広がりが大きいために局部的な存在ではあるが、地下水などの各種物質移動の過程でまた力学的な弱層として特異な役割を果たしている。断層以外の不連続面を含む岩盤、いわゆる節理性岩盤はクラックテンソルなどの概念により等価な連続体に置き換えて考えられるが^{1),2)}、断層は不連続面としてはジョイント要素として取り扱われるなど、両者は異なった取り扱いを受けている。断層は亀裂の密集体、粘土分の多い断層粘土、土砂状の粉砕物からなる断層角れきなどからなるが、最近の岩盤内構造物の設計の高度化に対して、断層一節理性岩盤の相互作用を検討する上でも断層の系統的な研究は一つの課題と考えている³⁾。

今回の報告は特に断層粘土を主体とする断層を対象にして、(1)地質的特性、(2)断層粘土の組織、物理特性、透水性、(3)断層粘土の鉱物化学組成、物質移動など、(4)断層粘土の強度変形特性、という点に分けて検討し、断層研究の試みを行ったものである。

2 地質的特性

調査領域の岩盤区分は、目視観察、弾性波速度、ロックシュミットハンマー反発度、及び各種室内試験によると大きく母岩、破碎帯、断層に分けられる。母岩は緩みの少ない新鮮な岩盤(CM級)で、破碎帯は微少な亀裂も発達し変質の進んだ部分(CL級)であり、断層は主に断層粘土(D級)からなる。岩盤は結晶片岩の黒色片岩と緑色片岩からなり、断層粘土も主に黒色片岩に由来するものである。これら断層の分布と岩質区分は図-1に示す。母岩と破碎帯が連続的に変化する

のに対して、断層粘土へは不連続に変化している。

断層は交差する2本からなりその幅は1-5mで、主断層面は約80度傾斜している。これらの断層は新第三紀の火山岩類を変位させているが、断層に沿う変動地形やリニアメントは認められないので、活動は第四紀以前に終了したと思われる。

3 断層の組織、物理特性、透水性

母岩は写真-1に示すように異方性の原因となる明瞭な片状組織を持つ(写真-1A)が、断層粘土は原岩組織をほぼ失っており機械的に破碎された一次ケイ酸塩鉱物の石英粒子と二次的に形成された基質部分の粘土分からなる(写真-1C, D, E)。マイクロラックも石英粒子の中にしばしば見られるが、露頭スケールでは節理状の亀裂は少ない。粒度分布(図-2)からみると断層粘土は粘土分かられき分まで広い範囲にわたっており、三角座標分類上はF, SF, GFで、砂質シルトやしらすなどに相当する。今回得られた粒度分布はGaudin-Schuhmann分布に従う一般的な粉砕物質の分布とも異なっている。今回の試料が細粒分をより多く含むが、これは断層粘土が単なる機械的破碎作用のみでなく後述するように断層物質の化学的变化によるものも多いことを示している。物理試験結果によれば(表-1)、母岩から断層粘土にかけて物理特性は変化するが特に断層粘土の部分でそれが著しい。断層粘土は地下水位の上昇下降に伴いスレーキング状に劣化したり、再び固化したり変化が激しい。

変水位透水試験によれば透水係数は $2.5-25 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ であり、粒度分布からHazen, Creagerらによる推定方法に従えばそれぞれ $0.7-14 \times 10^{-6}$, $3-40 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ と

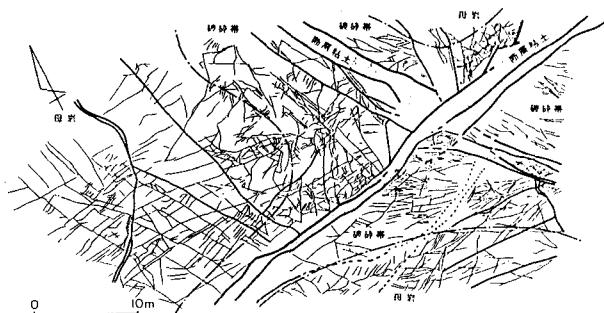


図-1 地質状況

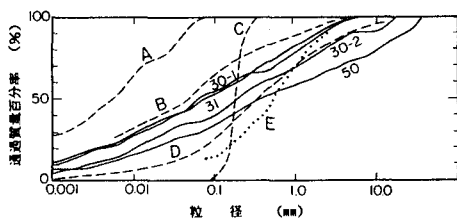


図-2 粒度分布

No. 30-1, 30-2, 31, 50: 今回の試験試料(断層粘土)、A: セリサイト粘土、B: 砂質シルト、C: 豊浦標準砂、D: シラス、E: 破碎物質

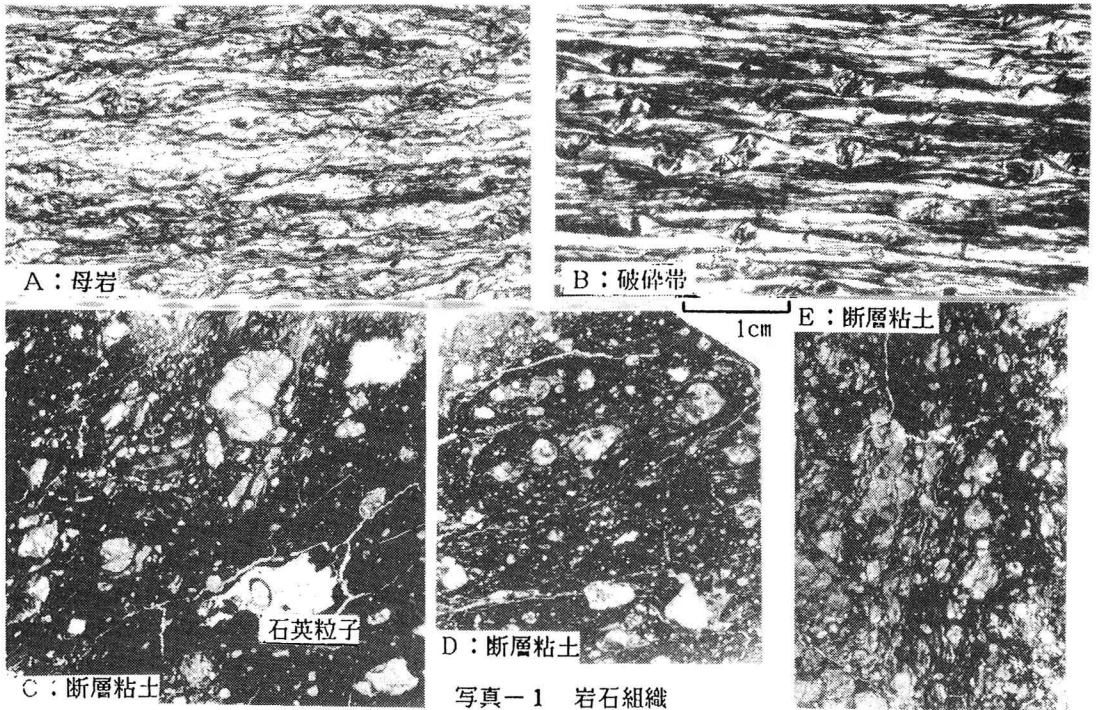


写真-1 岩石組織

なる。両者は比較的一致している。ルジオン試験によると、断層部分の透水係数は 6.5×10^{-5} cm/sec以下で、断層周辺の岩盤では $3-26 \times 10^{-5}$ cm/secである。したがって透水係数は断層の方が約一桁小さく、断層の部分が周辺の節理性岩盤に対してやや遮水性を示すものと言える。

4 鉱物化学組成、物質移動

断層粘土の形成は、(1)断層の変位に伴う岩盤の脆性破壊による細粒化、摩擦熱による変質・粘土化、(2)火山活動や花崗岩の上昇に伴う多様な化学成分を含んだ高温の熱水溶液、地表付近での地下水の上昇や雨水の浸透などに伴う二次的風化変質作用、による長期間における複雑な過程を経て現在見るような断層粘土が形成されている^{4)~8)}。

母岩の黒色片岩は偏光顕微鏡によると(写真-2)、石英、斜長石、曹長石、白雲母、石墨、磁鉄鉱、ざくろ石、燐灰石、緑泥石からなり、石英が約78%、白雲母が9%、緑泥石が約8%を占める。X線回折分析(図-3)によると母岩では粘土鉱物はほとんど認められず、破碎帯部分は石英(Qt)、斜長石(Pl)、イライト質雲母(Mi)からなるほか、粘土鉱物としては緑泥石(Ch)、イライト質雲母、イライト/ス멕タイト混合層鉱物(I/S)を生じている。断層粘土はイライト/ス멕タイト混合層鉱物、緑泥石、イライト質雲母などの粘土鉱

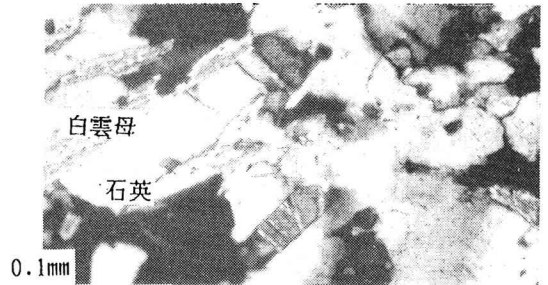


写真-2 偏光顕微鏡写真

	母岩	破碎帯	断層粘土
単位体積重量 (g/cm ³)	2.70-2.78	2.63-2.68	2.16-2.30
土粒子の比重	2.767-2.773	2.814	2.797
含水比 (%)	0.10-0.13	0.23	9.2-15.5
開隙比			0.413
透水係数 (cm/sec)	1×10^{-9} , $4-5 \times 10^{-9}$ (放射流型 透水試験)		$2.5-3.4 \times 10^{-6}$ $9.1-25 \times 10^{-6}$ (変水位透水 試験)

表-1 物理、透水試験

物、及び一次ケイ酸塩鉱物の残存である石英、斜長石からなる。粘土鉱物の結晶度は破碎帯よりも断層粘土中で著しく良くなり、岩盤の粘土化に伴い塩基交換容量も同様に母岩の1.1ml/100g、破碎帯の1.2ml/100gから断層粘土に於て3.8-9.6ml/100gと著しい増加を生じる。このような破碎帯や断層粘土における粘土鉱物組

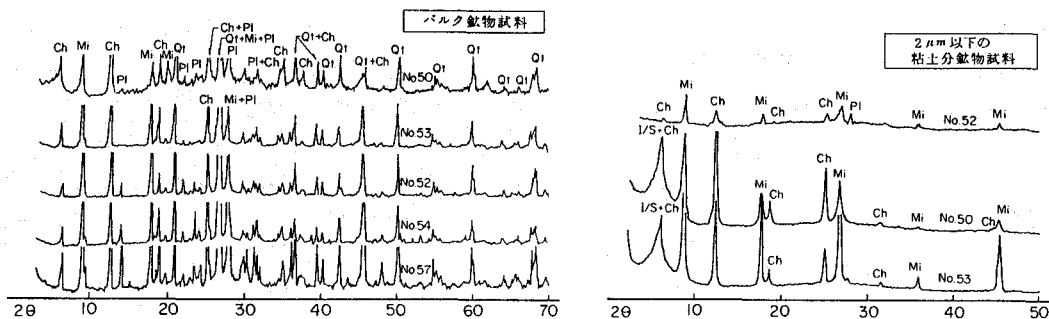


図-3 X線回折分析 (試料番号は表-2を参照)

成は日本のような冷温帯湿潤気候地域に発達するカオリナイト-モンモリロナイト型風化殻⁹⁾によるものとも異なり、断層粘土中に新たに形成されているイライト/スメクタイト混合層鉱物の存在からみて、当地域の新第三紀火山活動に伴う熱水溶液による変質作用によるものであろう。

化学組成から見ると(図-4、表-2)、母岩、破碎帯、断層粘土と移行するに連れて SiO_2 , Na_2O , K_2O が減少し、 Fe_2O_3 , MgO , TiO は増加し、さらに $\text{H}_2\text{O}(+)$, $\text{H}_2\text{O}(-)$ は著しく増加している。これらの化学的变化は母岩から破碎帯にかけては漸変するが、破碎帯から断層粘土にかけては急激に変化する。花崗岩の風化作用では SiO_2 , K_2O , Na_2O , CaO の減少、 $\text{H}_2\text{O}(+)$, $\text{H}_2\text{O}(-)$ の増加、Feの減少が認められ¹⁰⁾、断層粘土の場合共通な点もあるが元素によっては異なる点もみられる。

この断層は物質移動に関して開放系での化学反応を生じているが、岩石-熱水反応は比較的平滑な面からなる節理面等の亀裂よりも、破碎されて表面積の大きい断層中でより進むはずである。核種の分配係数を見ると石英、長石、黒雲母、ハロイサイト、カオリナイト、セリサイト、スメクタイトの順序で大きくなる¹¹⁾。

¹²⁾ので、母岩から断層粘土にいたる鉱物組成変化と岩石組織をみると断層内部での大きな吸着が予想される。ナチュラアナログ的な立場でみると、断層中で増加している Fe_2O_3 , MgO , TiO は熱水溶液から供給されたもので、 H_2O は新たに形成された粘土鉱物の構造水や吸着水である。一方失われた SiO_2 , Na_2O , K_2O の移動先は不明であるが、周辺の節理を見るとしばしば方解石や石英脈が幅1cm前後で浸透沈着している。地質構造から判断して過去の土被りは300m以上あり、 10^{-7}cm/sec 以下の透水係数が予想され¹³⁾透水係数は現地盤よりもかなり小さくなるが、節理性岩盤の亀裂中には熱水作用の最終産物である石英脈がしばしば見られる。この中に断層中の損失成分と一緒に含まれる可能性もあるが、石英脈と断層粘土の形成時期の時間的前後関係も重要な

試料番号	母岩	破碎帯	断層粘土
	No. 57	No. 52	No. 54
SiO_2	68.63	68.94	67.99
Al_2O_3	12.89	12.82	14.53
Fe_2O_3	4.73	4.44	5.23
CaO	1.15	0.51	0.31
MgO	1.78	1.77	2.14
K_2O	2.60	2.64	2.63
Na_2O	3.35	2.40	4.11
MnO	0.22	0.15	0.22
TiO_2	0.19	0.40	0.22
$\text{H}_2\text{O}(+)$	4.00	5.21	2.43
$\text{H}_2\text{O}(-)$	0.18	0.52	0.11
Total(%)	99.72	99.80	99.92

表-2 化学組成

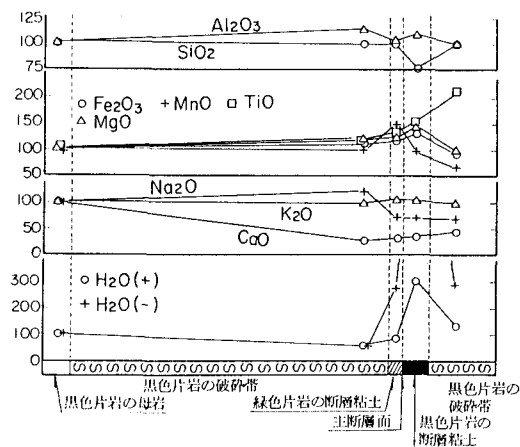


図-4 化学組成の変化

問題となるので現時点では明かではない。

5 強度変形特性

母岩においては著しい強度異方性がある¹⁴⁾が、断層粘土ではその組織からほぼ等方的とみなせる。断層粘土は試料の状況から岩石試験よりも土質試験によるところが大きく、力学試験結果等によると(表-4)断層粘土の部分で母岩と著しく異なっている。

一軸圧縮強度は約0.55kgf/cm²で、三軸圧縮(CU)試験によると粘着力(C)は約0.1kgf/cm²、内部摩擦角

(ϕ)は20度前後となり、「断層粘土」という名前にもかかわらず粒径分布が幅広いために粘土分の持つ粘着力の効果は相対的に小さく、砂質土に近い特性を示す。断層粘土の一軸圧縮強度は母岩、破砕帯に対して不連続的に変化し約1/1000になり、 C , ϕ はそれぞれ1/200, 1/2に低減している。一方弾性波速度は2/3から1/4程度に減少している。

断層破砕帯の粘着力、内部摩擦角は、既往のデータ^{15), 16)}をまとめると(図-5)次のようになる。図中のLow- C /Low- ϕ グループは幅が1m以上の幅広い断層で今回のような断層粘土に近い岩盤状況と見なすことができる。一方High- C /High- ϕ グループは、多数の亀裂やシームを挟んだり土砂状に破砕された岩盤で、亀裂集中帯や断層角れき帯といった状況にある。花崗岩のマサ土と地滑り粘土¹⁶⁾を比較のため図中に示すと、断層粘土の C , ϕ はマサ土よりも地滑り粘土のそれと類似しているが、地滑り粘土でしばしば見られる10度以下の小さな ϕ は、断層粘土では知られていない。

断層粘土の大型一面せん断試験の結果は図-6に示す。当断層粘土は地滑り粘土が示すような明確なピーク強度/残留強度の関係を示さない。この試験は断層のジョイント要素としての特性を求めるためというよりも、断層粘土自体の試験と言える。粘土シームを挟む岩盤の力学特性も報告されている¹⁷⁾が、今回のような規模の大きい断層について直接ジョイント要素として試験から求めるのは困難である。当岩盤では破砕帯と断層部分が明瞭な不連続面を形成しているので、この面をジョイント要素としてとらえ、母岩-破砕帯-ジョイント要素-断層粘土という構成が妥当と考えられる。

6 おわりに

本報告は断層-節理性岩盤の相互作用を考える一環として、Activeではないが規模が大きく、主に黒色片岩起源の断層粘土から構成される断層を例として、そ

	母岩	破砕帯	断層粘土
一軸圧縮強度(kgf/cm ²)	450-700	225-375	0.52-0.57
圧裂・引張強度(kgf/cm ²)	90-130	45-75	
静弾性係数(kgf/cm ²)	1.5-3.5 $\times 10^5$	4-8 $\times 10^4$	
静ポアソン比	0.05-0.20	0.25	
粘着力(kgf/cm ²)	190-270		0.1
内部摩擦角(度)	30-34		17.5-22.5
P波速度(Km/sec)※	1.7-2.3	1.4-1.75	1.6
	1.9-3.3	1.1-1.9	0.6-0.9
ロックジュミット			
ハンマー反発度	20-40	10-25	5

※ 上段：供試体、下段：原位測定

表-3 力学試験、弾性波測定

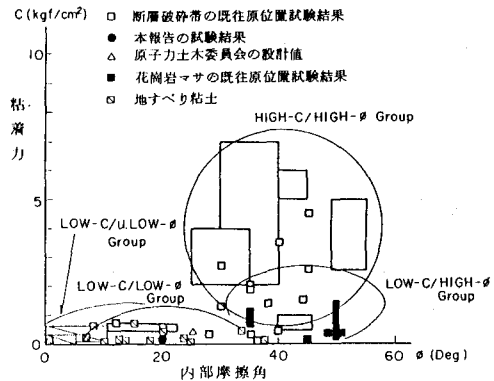


図-5 断層破砕帯の C , ϕ

の地質・工学的特性を検討した。今回の事例では、断層粘土は幅広い粒径分布を持ち一次ケイ酸塩鉱物の残存成分と二次的に形成された粘土分とからなり、周囲の節理性岩盤に対して相対的にやや遮水ゾーンの役割を果たし、また岩盤の鉱物化学的变化とそれに伴って予想される核種の吸着は開放系の下で主として主断層面付近に集中するようである。しかし断層の活動性、規模、組織構造や鉱物化学組成の多様性、あるいは強度変形特性に見られるような脆弱な断層の変形による岩盤のゆるみ等を考えると、透水性と物質の移動・吸着については、断層-節理性岩盤系でいずれが主要な経路になるかという点については一般には様々な場合があると考えられる。ナチュラアナログのためにはこれらを定量的に捉えることが今後必要である。

参考文献

- 1) Oda, M.: Soils & Foundations, Vol. 22, No. 4, pp. 96-108 (1982).
- 2) 鈴木、桑原、丸山、平間：第7回 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 115-120 (1987).
- 3) 平間、丸山、桑原、鈴木：土木学会第42回 年次学術講演会講演概要集第3部, pp. 388-389 (1987).
- 4) 金折、猪原、宮腰、佐竹：応用地質, Vol. 23, No. 3,

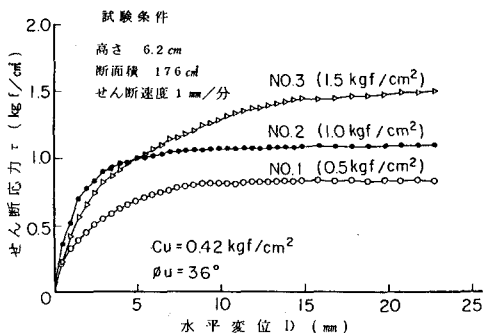


図-6 一面せん断試験

(34) Geotechnical properties of fault clay in the crystalline schist

Tohru Kuwahara, Kenichiro Suzuki

Makoto Maruyama, Kunioki Hirama

Technical Research Institute, Ohbayashi Corporation, Tokyo, Japan

The fault zone has particular properties on both mechanics and material transport against jointed rock mass. We believe the necessities of systematic studies of fault zone, because it is important problem to know the interaction between the fault zone and around jointed rock mass. This paper tried the research and study on the fault zone, as follows.

(1) Geological character, fracture distribution, activity ; this fault zone, which is composed of fault clay derived from the pelitic schist, is not active, but has the typical fault structure of 1-5 meter width.

(2) Texture, physical properties, and permeability of fault clay ; the fault clay, which shows the wide distribution of grain size from less than 0.001mm to 10 mm, is composed of both residual component of original silicate minerals and secondary formed clay minerals. According to the permeability of host rock (8×10^{-6} cm/sec) and fault zone (7.5×10^{-6} cm/sec), fault zone acts as more or less cut-off of water against surrounding jointed rocks mass.

(3) Silicate/clay minerals and chemical component of fault clay, mass transfer ; from the shear zone to fault zone, clay minerals such as illite/smectite mixed layer, chlorite, and illitic mica are increased, and also remarkable change of chemical component are observed, for example, increment of Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , $\text{H}_2\text{O}(\pm)$ and decrement of SiO_2 , Na_2O , K_2O . Mineralogical and chemical changes and absorption of nuclide inferred from published reports may occur along the main fault plane under the open system on chemical reaction.

(4) Strength and deformation properties of fault clay ; cohesion (C) and internal friction angle (ϕ) of fault zone is subdivided into two groups ; one has low C (0-1 kgf/cm²) and low ϕ (10-35 degrees), and the other has high C (1-7 kgf/cm²) and high ϕ (25-55 degrees). This case belongs to the former group.

Considering varieties of fault zones, however, it is further problem that weather permeability and material transport/absorption are controlled by fault zone or cracks in jointed rock mass in general.

pp.9-27(1982)、5)金折、宮腰、猪原、佐竹：応用地質、Vol.23, No.4, pp.5-17(1982)、6)北川、奥野：粘土科学、Vol.23, No.2, pp.45-60(1983)、7)O'Neil, J. R.: PAGEOPH, Vol.112, pp.440-446(1984/1985)、8)Kerrich, R.: PAGEOPH, Vol.124, Nos.1/2, pp.225-268(1986)、9)歌田：岩波講座地球科学5、pp.10-22(1979)、10)木宮：地質学雑誌、Vol.81, pp.349-364(1975)、11)菅野、秋葉：動燃、原安協 地層処分研究成果報告会論文集、pp.20-29(1986)、12)松田：動燃、原安協

地層処分研究成果報告会論文集、pp.66-73(1986)、13)SKBF/KBS:KBS-3(1983)、14)平間、丸山、桑原、鈴木：土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第3部、pp.366-367(1987)、15)西、江刺：電力中央研究所報告、研究報告384033、p.57,(1985)、16)土質工学会：風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用、pp.37-94(1979)、17)足立、矢野、岡：第20回土質工学研究発表会、pp.923-926(1985)