

断層破砕帯の工学的物性評価に関する研究

桑原 徹 平間 邦興

Study on Engineering Material Evaluation of Fault and Sheared Zone

Tohru Kuwahara Kunioki Hiramata

Abstract

Material evaluations of faults and sheared zones were carried out from an engineering point of view in this study. ① The geological properties of 16 faults and sheared zones in Japan were investigated and both mineral and chemical components were identified using samples of fault clay and breccia which were gathered from these sites. Cluster analyses and multi-variables analyses were carried out based on these results. ② The fault and sheared zones were subdivided into three types of zones: ① a fault zone consisting of fault clay and breccia, ② a sheared zone which is a fracture zone and an altered zone around a fault zone, and ③ host rock which is a fresh rock mass. Characteristics of changes from fault zone to host rock were explained regarding rock textures, physical and permeability characteristics, strength and deformation characteristics, and mineralogical and chemical characteristics. ③ Widths of sheared zones developed around faults were investigated and correlations between them were obtained.

概 要

この邦文は断層破砕帯の工学的評価の研究結果を次の点に関してまとめたものである。① 全国16箇所の断層破砕帯試料について調査分析し、併せてこれらのデータについてクラスター分析と重回帰分析を実施し断層破砕帯の地質特性について検討した。② 硬岩及び軟岩中の断層破砕帯について、断層破砕帯を含む岩盤を「断層—断層周辺の破砕帯—母岩」という変化でとらえ、調査試験分析により岩盤の岩石組織、物理透水特性、強度変形特性、及び鉱物化学特性の変化を明らかにした。③ 断層周辺に発達する破砕帯と断層の幅について調査し、これらの間の関係式を得た。

1. はじめに

断層破砕帯は地盤岩盤の工学的評価を行なう場合、構造物のサイト選定や安定性評価などの点からしばしば問題になる。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局所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。しかし断層破砕帯に関する研究は、断層活動に関する地質学的研究¹⁾や地震予知に関する超深部を想定した高温高压条件下での断層物質の地球物理学的研究²⁾などに多くあるが、工学的立場からみた研究は比較的限られている。

断層破砕帯の工学的問題は大きく二つに分けられる。一つは耐震安全性評価のためであるが、活断層を対象とした断層の活動性評価の研究である。これは活断層全体としての活動性評価の研究と、断層物質そのものの研究による活動時期（再来周期）の研究とがある。前者は主に通産省地質調査所³⁾や東京大学地震研究所及び各大学^{4),5)}などで、後者は電力中央研究所^{6),7)}により系統的な研究が行なわれた。これらの研究手法は工学的というよりはむしろ理学的であるので、適用に際しては理学的結論に対する工学的評価に際して問題を生じることもある。

もう一つは断層破砕帯の岩盤としての強度変形特性等

に関する研究である。これについては破砕帯材料の動的試験⁸⁾や重要構造物の設計などに際して原位置試験が実施されているが、母岩、形成年代、規模などの相違により生ずる、多様な断層破砕帯の全体的な状況や特徴、また断層破砕帯から周辺の母岩へと変化する際の工学的物性の変化などについて、研究は少ない。

ここでは断層破砕帯を構成する断層粘土や断層角れきの試料を対象にして、①鉱物組成に基づく断層物質の分類、及びクラスター分析や重回帰分析による断層物質の把握を行ない、②硬岩及び軟岩中の2つの断層について、断層破砕帯の組織、物理特性、透水特性、鉱物化学特性、強度変形特性などを調査試験分析し、③母岩から破砕帯を経て断層に至る岩盤について、これらの工学的物性変化について検討した。

2. 断層破砕帯物質の地質的特性

ここで対象とした断層破砕帯の地質学的要素は表-1に示す。

2.1 鉱物組成による地質的特性

断層破砕帯構成物質の鉱物組成は、X線分析の結果に基づく表-1、2のようにまとめられる。一次鉱物に関しては、母岩の種類にかかわらず石英と長石は共通に含まれる。粘土鉱物に関しては、流紋岩起源ではクロラ

イトと雲母が多く、スメクタイトは少ない。花崗岩・片麻岩起源ではクロライト、スメクタイト、雲母が少量ずつ含まれる。一方泥質岩起源ではスメクタイト、雲母が多く、凝灰岩起源ではスメクタイトが卓越する。特徴的なのは泥岩中のパイライトの存在であるが、これは二次的な変質鉱物というよりも、還元的环境下における初生的な起源と考えられる。また凝灰岩中の斜ブチロル沸石の存在は火山起源の初生的なものと同判断できる。結晶片岩起源では、イライト、雲母、スメクタイト/雲母混合層鉱物からなる。

したがって流紋岩・花崗岩・片麻岩などの酸性岩起源の断層物質はクロライト、イライトを多く含み、堆積岩起源の泥質岩・凝灰岩、結晶片岩は特にスメクタイトを多量に含んでいる。

2.2 クラスタ分析による地質特性の検討

クラスタ分析は多数の個体があるときに、それぞれの特徴に基づいてグループ分けする手法である。この時基本となるのは「なるべく似たもの同士を一塊にする」ということであるので、似ているかどうかを測る尺度が必要となる。通常このような尺度として「類似度」「距離」といった概念を導入する。

ここでは表-1に基づきクラスタ分析を実施した。

断層の構成要素としては「活動様式」「活動時期」「活動度」「長さ」「幅」「古期の熱水変質」「現在の温泉放熱量」、工学的に問題となる「スメクタイト、クロライト、イライトの含有量」、及び「鉄、マグネシウム含有

表-2 断層破碎帯の鉱物組成

| | 流紋岩起源 | 花崗岩片麻岩起源 | 泥質岩起源 | 凝灰岩起源 | 結晶片岩起源 |
|-----------|-------|----------|-------|-------|--------|
| 石 英 | ++++ | ++++ | ++++ | +++ | ++++ |
| クリストバライト | - | + | - | - | - |
| 長 石 | +++ | +++ | + | ++++ | ++++ |
| 角 閃 石 | - | △ | - | - | - |
| 斜ブチプロ輝石 | - | - | - | ++ | - |
| スメクタイト | + | ++ | +++ | ++++ | ++++ |
| クロライト | +++ | ++ | ++ | + | ++ |
| イ ラ イ ト | +++ | ++ | +++ | + | +++ |
| カオリナイト | △ | - | - | - | - |
| パーミキュライト | - | + | - | - | - |
| カルサイト | △ | △ | - | - | - |
| ハロイサイト | △ | - | - | - | - |
| リン 灰 石 | △ | - | - | - | - |
| コ ラ ン グ ム | △ | - | - | - | - |
| 菱 鉄 鉱 | - | + | - | - | - |
| パイロフィライト | - | △ | - | - | - |
| ゼオライト | - | + | - | - | - |
| パイライト | - | - | ++ | - | - |
| 石 膏 | - | - | + | - | - |

[含有量] +++++:多, ++++:中, ++:少, +:微量
△:稀, -:無し

表-1 各種断層破碎帯の地質要素

| No. | 活動様式 | 活動 ⁵⁾ 時期 | 活動度 ⁵⁾ | 長さ (km) | 幅 (m) | 古期 ^{9),10)} 熱水変質 | 現在の温泉 ¹⁰⁾ 放熱量 | 断層物質 | 母岩 | 構成 鉱 物 | | | 化 学 組 成 | |
|----------------------|------|---------------------|-------------------|---------|-------|---------------------------|--------------------------|------|----------------|---------------------|---------------------|-----------|----------------------|--|
| | | | | | | | | | | 一 次 鉱 物 | 粘 土 質 鉱 物 | 結 晶 質 鉱 物 | SiO ₂ (%) | Fe ₂ O ₃ +MgO(%) |
| 1 A | R | ~Q | B | 12 | <1 | + | ++ | C | Ry | Qz, Fd | Sm, Il, Ka, ch | 58.51 | 8.91 | |
| ++ | | | | | | | S | Ry | Qz, Fd | Sm, Il, ch, Ca | 75.45 | 2.56 | | |
| ++ | | | | | | | S | Ry | Qz, Fd | Il, ch | 65.75 | 6.41 | | |
| 2 A | R | ~Q | B | 12 | 20 | + | ++ | S | Ry | Qz, Fd | Il, Sm, ch | 76.88 | 2.79 | |
| 3 A | T | T | - | 15 | 5 | + + | + | C | Ms | Qz, Fd | Sm, Il, ch | 56.98 | 7.58 | |
| 4 B | R | ~Q | B~C | 18 | 1 | + | ~++ | C | Ry | Qz, Fd | Ha | 66.52 | 2.73 | |
| 5 A | R | ~Q | B | 16 | 10 | + | ++ | S | Gr | Qz, Fd | ch, Zo, Sm, Il | 72.03 | 4.54 | |
| ++ | | | | | | | S | Gr | Qz, Fd | Si, Cpt, Zo, ch | 68.12 | 7.35 | | |
| ++ | | | | | | | S | Gr | Qz, Fd | Si, Zo, ch, Cpt, Sm | 66.31 | 7.71 | | |
| 6 B | R? | ~Q | - | 35 | 2 | + | ++ | C | Gr | Qz, Fd | Sm, Il | 65.38 | 2.06 | |
| 7 A | L | ~C | - | 70 | 2000 | + | ++~+ | S | Bn | Qz, Fd, Am | Cr, ch, Sm, Il | 66.05 | 6.17 | |
| 7 B | | | | | | | ++~+ | S | Bn | Qz, Fd, Am | ch, Cr, Ca, Sm, Il | 69.24 | 7.21 | |
| 8 A | L | ~Q | A~B | 37 | 30 | + | - | C | S _l | Qz | Py, Sm, ch, Il | 57.30 | 10.23 | |
| 9 A | ? | T? | - | 1> | 0.5 | + + | ~++ | C | Ry | Qz, Fd | ch, Il | 64.29 | 6.88 | |
| 9 B | | | | | | | ~++ | S | Ry | Qz, Fd | ch, Il | 64.09 | 7.00 | |
| 9 C | | | | | | | ~++ | C | Ry | Qz, Fd | ch, Il | 61.38 | 7.98 | |
| 10 A | N | T | - | 8 | 1 | + + | + | C | Tf | Fd, Qz | Sm, Pyro | 53.37 | 9.32 | |
| 10 C | | | | | | | + | C | Tf | Qz, Fd | Sm, Il, ch | 66.87 | 5.19 | |
| 11 A | T | ~Q | B | 2> | 1 | + | - | C | Gr | Qz, Fd | ch, Il, Sm | 69.32 | 5.25 | |
| 12 A | T | J | - | 5 | 5 | + | ~++ | C | S _l | Qz, Fd | ch, Il, Py, Sm, GP | 75.99 | 5.41 | |
| 13 A | S | C? | - | 1> | 1 | + + | + | C | Bsh | Qz, Fd | Sm, ch, Il | 53.22 | 8.75 | |
| 13 B | | | | | | | + | C | Gsh | Qz, Fd | Sm, ch, Il | 68.33 | 7.96 | |
| 13 C | | | | | | | + | S | Bsh | Qz, Fd | ch, Il | 68.94 | 6.21 | |
| 13 D | | | | | | | + | S | Bsh | Qz, Fd | Sm, ch, Il | 67.99 | 7.37 | |
| 14 B | ? | T? | - | <1 | 0.2 | + + | + | C | An | Qz, Fd | Ch, Ka, Cr, Ver, Il | 45.76 | 10.53 | |
| 15 A | N | T | - | 10 | 0.5 | + | ++ | C | Cg | Qt, Fd | Sm, ch, Il, Ka, Ca | 38.52 | 12.77 | |
| 16 B | R | ~Q | B | 16 | >5 | + | ++ | S | Gr | Qt, Fd, Bi | Ka, Ver | - | - | |
| 16 C | | | | | | | ++ | S | Gr | Fd, Qt, Am | Ver, Ka | - | - | |
| 16 E | | | | | | | ++ | S | Gr | Am, Fd, Qt, Bi | Ka, Ver, ch | - | - | |
| 16 G | | | | | | | ++ | S | Gr | Fd, Qt, Am, Bi | Ka, Ver, ch | - | - | |
| SA-6 ⁶⁾ | | | | | | | ++ | C | ? | Qt, Fd | Sm, ch, Il | 64.67 | 5.18 | |
| SA-10 ⁶⁾ | R | T~Q | A | 60 | 1.3 | + | ++ | S | Gr | Qt, Fd | Sm, Il, ch, Ta | 71.15 | 1.66 | |
| SP5-11 ¹⁾ | R | ~Q | C | 10 | 3 | + | + | C | sch | Qt, Fd | Dol, Mag, Il, Ka | 52.7 | 10.49 | |

[活動様式] R: 右ずれ断層, L: 左ずれ断層, N: 正断層, T: 逆断層

[活動時期] Q: 第四紀, T: 第三紀, C: 白亜紀, J: ジュラ紀

[活動度: 平均変位速度 (m/1000年)] A: 1~10, B: 0.1~1, C: 0.01~0.1

[古期熱水変質] ++: 大, +: 小, -: 稀

[現在の温泉放熱量: Wm⁻²] +: >10³, ++: >10⁴, -: 0

[断層物質] C: 断層粘土, S: 断層角れき

[母岩] Ry: 流紋岩, Ms: 泥岩, Gr: 花崗岩, Bn: 黒雲母片麻岩, S_l: 粘板岩, Tf: 凝灰岩, Bsh: 黒色片岩, Gsh: 緑色片岩, An: 安山岩, Cg: れき岩, Sch: 結晶片岩

[一次鉱物] Qz: 石英, Fd: 長石, Bi: 黒雲母, Am: 角閃石

[二次鉱物] Sm: スメクタイト, Il: イライト, Ka: カオリナイト, Ch: クロライト, Ca: カルサイト, Ha: ハロイサイト, Zo: セオライト, Si: 菱鉄鉱, Cpt: 斜ブチロル沸石, Cr: クリストバライト, Py: 黄鉄鉱, Pyro: パイロフィライト, Ta: 沸石, Ver: パーミキュライト, Dol: ドロマイト, Mag: 磁鉄鉱, Gp: 石膏

量」,「シリカ分含有量」を取り上げた。距離尺度としては「標準化ユークリッド平方距離」を用いた。すなわち,

$$d_{ij}^2 = \sum (X_{ki} - X_{kj})^2 / S_k^2$$

ただし, d_{ij} : 距離, S_k^2 : X_k の分散

次にクラスター同士からさらに新たなクラスターを作るときにも同様な概念で行なうが,「クラスター間距離」としては「最短距離法」を用いた。これはクラスターとクラスターの間をそれぞれに属する個体と個体内,最も近いもの同士の距離をクラスター間の距離として,新たなクラスターの作成を行なうものである¹²⁾。解析結果は図-1に示した。この結果,類似性の要因としては化学組成が相対的に重要であるのに対して,粘土鉱物の含有量や地下からの放熱量の分布は影響が小さい。断層物質は化学組成により大きく2つに分類された。一方は鉄,マグネシウムに乏しくシリカ分に富み,母岩としては花崗岩,流紋岩に対応する。他方は逆に鉄,マグネシウムに富みシリカ分に乏しく,母岩としては泥岩・凝灰岩,結晶片岩に相当する。

2.3 重回帰分析による地質特性の検討

ある変数 Y (従属変数) と, それに影響を与えると考えられる変数 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ (説明変数) の間の関係式を求め, それに基づいて各 X_i の影響の大きさを評価したり分析する手法を重回帰分析という。

従属変数 Y と説明変数 X_i の関係は次のようになる。

$$Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + \dots + b_k \cdot X_k + e$$

母数 $a, b_1, b_2, b_3, \dots, b_k$ は最小自乗法により計算する。すなわち,

$$D = \sum \{ Y - (a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + \dots + b_k \cdot X_k) \}^2$$

において各母数で偏微分して0と置いて得られる正規方程式を解くことにより,母数が求まる¹²⁾。

ここは表-1に基づき工学的に問題となる粘土鉱物「スメクタイト,クロライト,イライト」の出現が,どのような地質特性に依存するかを検討した。従属変数 Y は粘土鉱物の「スメクタイト,クロライト,イライトの総量」であり,説明変数 X_i は,断層破碎帯の「活動様式: X_1 」「長さ: X_2 」「幅: X_3 」「古期の熱水変質作用: X_4 」「現在の温泉放熱量: X_5 」「鉄,マグネシウム含有量: X_6 」を選択した。ここでは変数直接指定で重回帰分析を実施した。その結果,得られた重回帰式は次のようになる。

$$Y = 1.63 + 1.31 \cdot X_1 - 0.12 \cdot X_2 + 0.003 \cdot X_3 + 1.58 \cdot X_4 - 1.06 \cdot X_5 + 0.03 \cdot X_6$$

ここで各変数を正規化したものが標準化偏回帰係数であり,以下のようなになる。

活動様式: $X_1 = 0.412$, 長さ: $X_2 = -0.449$, 幅: $X_3 = 0.678$, 古期の熱水変質作用: $X_4 = 0.295$, 現在の温泉放熱量: $X_5 = -0.276$, 鉄,マグネシウム含有量: $X_6 = 0.029$

すなわち,鉄,マグネシウム含有量に見られるような母岩の化学組成自体及び変質帯と関係の深い放熱量の分

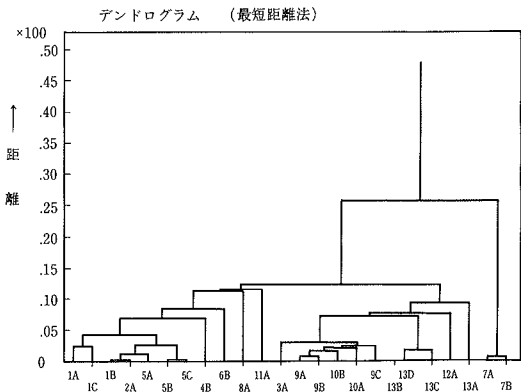


図-1 クラスター分析結果

布も断層の粘土鉱物含有量の大小に最も大きな影響を与えているわけではない。一方,断層の規模を表す幅,すなわち亀裂の大きさと活動度が大きな影響因子となっている。活動性が大きいほど多数の亀裂を生じているからであろう。断層破碎帯を構成する各種の粘土分の起源は,断層の形成を検討する上でしばしば議論される問題点である^{13),14),15)}。その結果,現在見られる粘土鉱物は,断層運動により直接形成された粘土分というよりも,比較的新しい熱水変質作用の影響で断層にそって沈着形成されたとする意見がある。今回の重回帰分析をこのような意見と組み合わせて考えると,スメクタイト,クロライト,イライト,などの出現は,単にもともと粘土鉱物あるいは鉄,マグネシウムを多量に含んでいる母岩に多い,あるいは熱水変質作用を受けやすい場にあるという点以上に,変質作用を促進するための地下水の供給という点に関する「亀裂の量」に直接影響されていると判断される。

2.4 まとめ

以上の点から酸性岩起源の断層はシリカ分に富み,クロライト,イライトを多く含み,一方堆積岩系起源の断層は鉄とマグネシウムに富み,スメクタイトを多く含む。これらはいずれも二次的に形成された場合が多いと考えられる。

3. 断層に伴う岩盤の工学的特性の変化

ここでは特に断層粘土を主体とする断層を対象にして,①地質特性,②断層粘土の組織・物理特性・透水特性,③鉱物化学特性,④強度変形特性,という点に分けて断層を検討し,併せて断層から破碎帯,母岩に至る工学的特性の変化を評価したものである。なお対象とする断層破碎帯は結晶片岩中のもを主体に検討し,一部比較のために軟岩である泥岩・凝灰岩中の断層粘土についても検討した。

3.1 地質特性

結晶片岩からなる調査対象領域の岩盤区分は,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,断層に区分できる。母岩は緩みの少ない新鮮な岩盤(CM級)で,破碎帯は微小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。これらの断層の分布と岩質区分は図-2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的に変化している。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ものと思われる。

断層の力学的分類は一般に断層運動を発生させた際の最大・中間・最小主応力軸($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)の空間的配置によって行なわれている¹⁶⁾。調査地の断層は断層の変位方向から、 σ_1 と σ_3 がほぼ水平面内に、また σ_2 がほぼ鉛直面内にある、ほぼ同時期に一組のペアをなして形成された左ずれ断層と右ずれ断層からなる。このような主応力配置の場合、巨視的には横ずれ断層が図-3のように菱形状の格子をなして分布することが、活断層をはじめとする断層の研究から知られている。従って、調査地はこのような断層の交差部分にあたっていると見え、一つの菱形状岩盤ブロックを考えれば、この中心部から外側へ向かって、母岩、破碎帯、断層(断層粘土)へと変化すると考えられる。

3.2 断層粘土の組織・物理特性・透水特性

結晶片岩の母岩は、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もち(写真1 A)、破碎帯では岩石組織が偏平に伸張され(写真1 B)、断層粘土は原岩組織をほぼ失って、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-1 C, D, E)。マイクロク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-4)からみると断層粘土は粘土分か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碎物質の分布とも異なっている。今回の試料は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はなく後述するように断層物質の化学的変化によるものも多いことを示し

ている。物理試験結果は表-3に示すが、断層粘土は地下水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。

変水位透水試験結果によれば透水係数は $2.5 - 25 \times 10^{-6}$ 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 $0.7 - 12 \times 10^{-6}$, $3 - 40 \times 10^{-6}$ cm/secとなる。両者は比較的一致している。ル

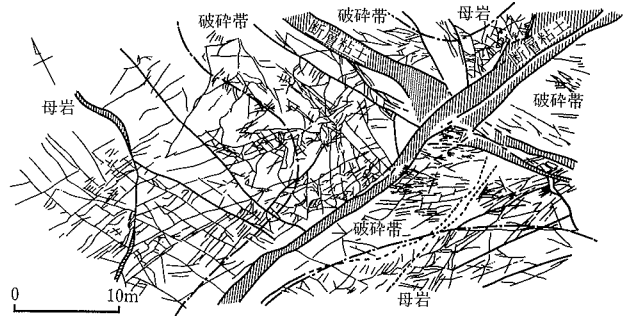


図-2 地質状況

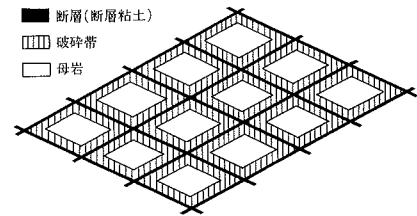
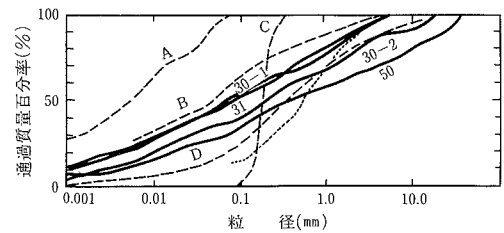


図-3 断層分布の模式図



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

図-4 断層粘土の粒度分布

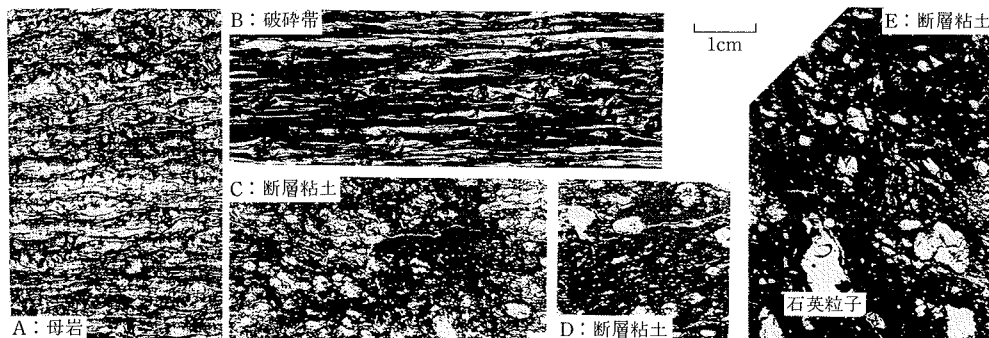


写真-1 断層破碎帯の岩石組織

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 以下である。従って、透水係数は断層の方が一桁小さく、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。

3.3 鉱物化学特性

粘土鉱物の形成は多変量解析にあたっても述べたように、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、あるいは地表付近での地下水の上昇下降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^{13),14),17),18)}。

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線分析(図-5)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、斜長石、イライト質雲母からなるほか、粘土鉱物としてはクロライト、イライト質雲母(Mi)、イライト/スメクタイト混合層鉱物を生じている。断層粘土はイライト/スメクタイト混合層鉱物、クロライト、イライト質雲母などの粘土鉱物、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1.1 me/100 g、破碎帯の1.2 me/100 gから、断層粘土における3.8-9.6 me/100 g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¹⁹⁾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見て、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(表-4、図-6)、母岩-破碎帯-断層と移行するにつれて SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O が減少し、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 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漸変するが、破碎帯から断層にか

けては急激に変化する。花崗岩の風化作用では SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 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²⁰⁾、断層粘土の場合と共通な点もあるが元素によっては異なる点も見られる。

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、スメクタイトの順で大きくなる^{21),22)}ので、母岩から断層粘土に至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。断層中で増加している Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 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、石英脈が幅1 cm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300 m以上あり、 10^{-7} cm/sec以下の透水係数が予想され²³⁾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

表-3 断層破碎帯の物理透水試験結果

| | 母岩 | 破碎帯 | 断層粘土 |
|-----------------------------|----------------------|-----------|--------------------------|
| 単位体積重量(gf/cm ³) | 2.70-2.78 | 2.63-2.6g | 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 |
| 間隙比 | | | 0.413 |
| 透水係数(cm/sec) | 1×10^{-9} | | $2.5-3.3 \times 10^{-6}$ |
| | $4-5 \times 10^{-9}$ | | $9.1-25 \times 10^{-6}$ |
| | (放射流型 透水試験) | | (変水位透水 試験) |

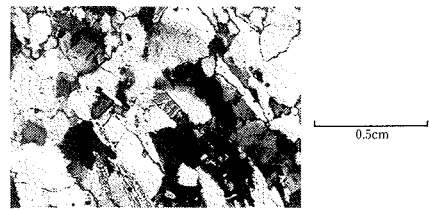


写真-2 岩石の偏光顕微鏡写真

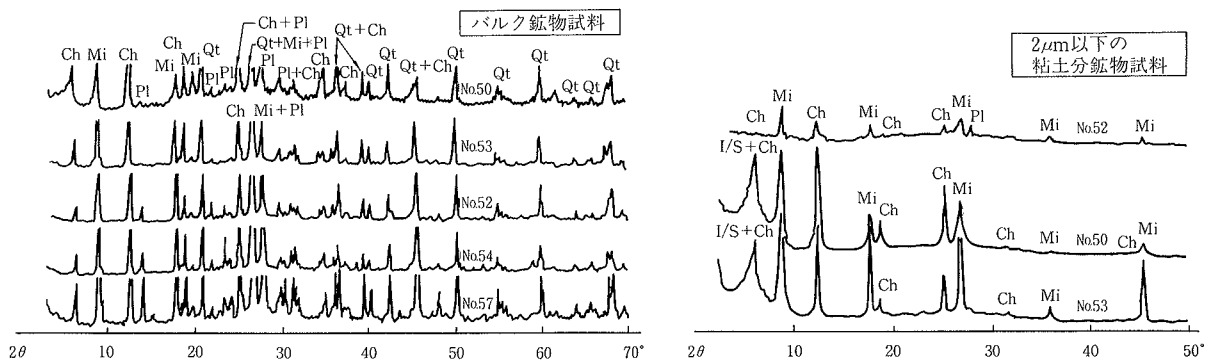
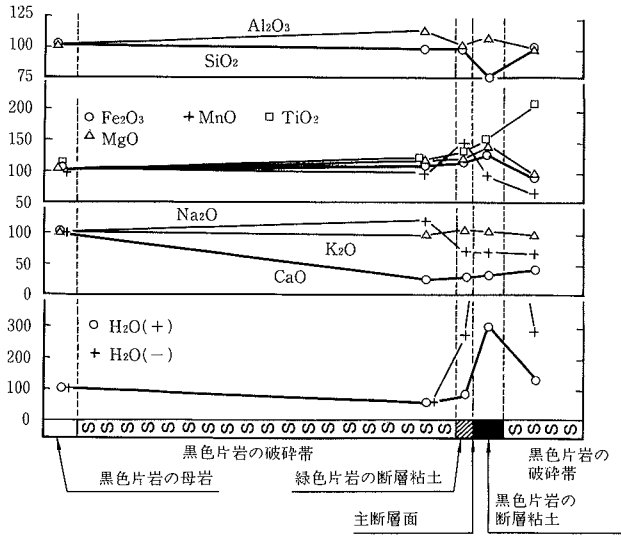


図-5 断層破碎帯のX線分析結果



図一六 断層破碎帯における化学組成の変化

中の損失成分が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が重要な問題となるので、現時点では明らかではない。

ところで軟岩である泥岩・凝灰岩中の断層における鉱物組成変化の例を比較のために表一五に示した。主断層は幅1mの断層粘土からなり、露頭観察では断層に接する灰色細粒砂岩を起源にしている。断層と周辺の母岩との鉱物組成の違いを調べると、断層粘土はスメクタイト、石英を多量に含み、母岩の砂岩に対して相対的なスメクタイト、石英の増加、長石、クリストバライトの減少が見られるが、母岩自体に粘土鉱物を含むので、前述の硬岩の場合ほどの違いはない。

3.4 強度変形特性

結晶片岩の母岩においては著しい強度異方性があるが、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、力学試験などによると(表一六)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0.55 kgf/cm²で、三軸圧縮(CU)試験によると粘着力(C)は約0.1 kgf/cm²、粘着力(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も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、破碎帯に対して不連続的に変化して約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。また一軸圧縮強度—静弾性係数、一軸圧縮強度—超音波速度(p波)の関係を母岩と破碎帯に分けて示すと図一七A、7Bのようになる。各物性値の内、母岩と破碎帯試料の結果は回帰直線上に良くのり、風化帯の試験結果はこれからややはずれており、断層粘土はこれらの岩盤部分とは全く不調和である。

一方軟岩中の断層の物理・強度変形特性は、硬岩中の断層の場合と比べると表一七のようにその差は小さい。

表一四 断層破碎帯の化学組成

| 試料番号 | 母岩 | 破碎帯 | | | 断層粘土 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | No57 | No52 | No54 | No50 | No53 |
| SiO ₂ | 68.63 | 68.94 | 67.99 | 53.22 | 68.33 |
| Al ₂ O ₃ | 12.89 | 12.82 | 14.53 | 14.11 | 13.44 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.73 | 4.44 | 5.23 | 6.23 | 5.77 |
| CaO | 1.15 | 0.51 | 0.31 | 0.37 | 0.39 |
| MgO | 1.78 | 1.77 | 2.14 | 2.52 | 2.19 |
| K ₂ O | 2.60 | 2.64 | 2.63 | 2.78 | 2.76 |
| Na ₂ O | 3.35 | 2.40 | 4.11 | 2.46 | 2.51 |
| MnO | 0.22 | 0.15 | 0.22 | 0.21 | 0.32 |
| TiO ₂ | 0.19 | 0.40 | 0.22 | 0.29 | 0.26 |
| H ₂ O(+) | 4.00 | 5.21 | 2.43 | 12.23 | 3.32 |
| H ₂ O(-) | 0.18 | 0.52 | 0.11 | 5.65 | 0.53 |
| Total(%) | 99.72 | 99.80 | 99.92 | 100.07 | 99.82 |

表一五 軟岩中の断層の鉱物組成

| 鉱物名 | 試料番号 | ①砂岩 | ②主断層 | ③凝灰岩 | ④副断層 |
|----------|------|-----|------|------|------|
| 緑泥石 | | | + | | |
| 雲母 | | + | + | | |
| スメクタイト | | ++ | +++ | +++ | +++ |
| カオリナイト | | + | | | |
| 斜方チロル沸石 | | | + | +++ | + |
| 長石 | | +++ | ++ | + | +++ |
| 石英 | | ++ | +++ | + | + |
| クリストバライト | | ++ | | | |
| 普通輝石 | | + | | | |

+++：多い、++：中、+：少ない
新第三紀層中の断層で、断層粘土層の幅は主断層・副断層でそれぞれ1.0m・0.3m

表一六 断層破碎帯における強度変形試験及び弾性波速度測定結果

| | 母岩 | 破碎帯 | 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) | 1.5-3.5×10 ⁵ | 4-8×10 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 |
| ロックシュミット | | | |
| ハンマー反発度 | 20-40 | 10-25 | 5 |

* 上段：供試体、下段：原位置測定

断層破碎帯の粘着力・内部摩擦角は、既往のデータをまとめると^{2),24),他}(図一八)、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出来る。一方High-C/High- ϕ グループは、多数の亀裂やシームを狭んだり土砂状に破碎された岩盤で、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を比較のために図中に示すと、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一九に示す。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と言うよりも、断

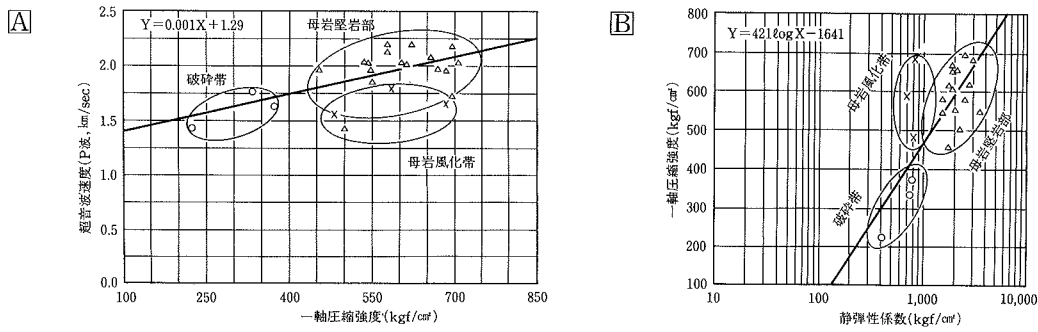


図-7 一軸圧縮強度と超音波速度，静弾性係数との相関性

表-7 軟岩中の断層の物理力学試験結果

| 試験試料 | A号孔 (細粒砂岩) | 主断層 (断層粘土) | B号孔 (火山れき凝灰岩) |
|------------------|---------------|---------------|------------------|
| 試験結果 | | | |
| 単位体積重量 (gf/cm³) | 1.45-1.88 | 1.80-1.89 | 1.76-2.13 |
| 含水比 (%) | 29.7-36.1 | 31.3-42.9 | 14.4-26.2 |
| 真比重 | 2.584-2.657 | 2.641 | 2.420-2.650 |
| 間隙率 (%) | 44.8-56.8 | 46.0-52.3 | 34.8-41.8 |
| P波速度 (km/sec) | 1.50-1.82 | 1.54 | 1.66-2.74 |
| S波速度 (km/sec) | 0.85-1.20 | — | 1.00-1.57 |
| 一軸圧縮強度 (kgf/cm²) | 82.5-176.2 | — | 148.0-408.0 |
| 圧裂引張強度 (kgf/cm²) | 10.8-32.3 | — | 16.6-39.8 |
| 静弾性係数 (kgf/cm²) | 1.0-3.1×10⁴ | — | 1.5-6.9×10⁴ |
| 動弾性係数 (kgf/cm²) | 3.1-5.3×10⁴ | — | 3.2-11.7×10⁴ |
| 静ポアソン比 | 0.10-0.20 | — | 0.06-0.33 |
| 動ポアソン比 | 0.05-0.35 | — | 3.2-11.7×10⁴ |
| 粘着力 (kgf/cm²) | — | 0.35(cu) | — |
| 内部摩擦角 (度) | — | 7(cu) | — |

表-5の断層に対応

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が²⁵⁾、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。

3.5 断層粘土帯と破砕帯の幅の関係

断層が周辺の岩盤に対して影響を与えている範囲がどの程度のものであるかは、工学的にもしばしば問題となる。一般に断層の幅はその断層の総変位量，すなわち断層運動の回数に比例すると考えられ，次のような関係式が断層調査から得られている。

$$D(m) = 100T(m)^{26}$$

$$\log L(m) = 0.68 \pm 0.32 + 0.87 \log T(m)^{27}$$

ただし，T；断層の幅，D；変位量，L；断層の長さ，

断層の幅は数 cm から数 100 m におよぶ。破砕帯は断層の影響で岩盤が劣化した部分であるが，破砕帯の幅については主断層に対する副断層の存在といった点から，破砕帯の分布が不明瞭な場合もある。したがって上述のような関係式を利用して工学的に利用できるような，断層と周辺の破砕帯の広がりとの関係式を求めることは困難である。

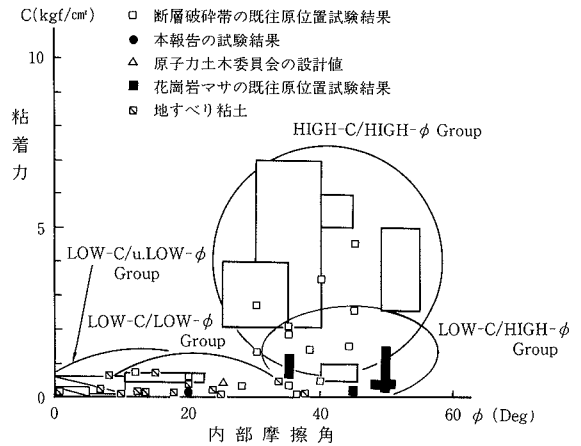


図-8 断層破砕帯におけるせん断特性

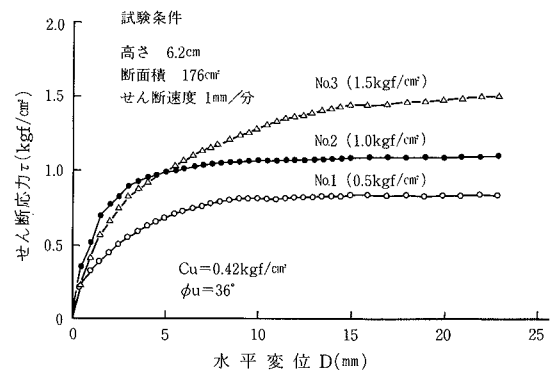


図-9 断層粘土の一面せん断試験結果

そこで今回は，破砕帯と母岩の工学的分類はすでに述べたような地質岩盤調査結果に基づき，図-1の断層及び亀裂の分布図に基づいて，断層の直交方向に調査用測線を設け断層 5 m 毎に調査を行なった。その結果は図-10に示す。すなわち，

断層の非交差部分：WS=1~6 WF

断層の交差部分：WS=3~10 WF

ただし，WS：破砕帯の幅，WF：断層（断層粘土）の幅，単位：m

これから破砕帯の幅は，1本の断層（非交差部分）に対しては断層の幅の6倍程度，断層の複数交差部分では10倍程度みれば良いことになる。従って，断層が集中する部分では周辺岩盤に対する影響が2倍ほど大きくなると

言える。このようなデータはほとんど公表されていないので、今後データの蓄積を図る必要がある。

4. まとめ

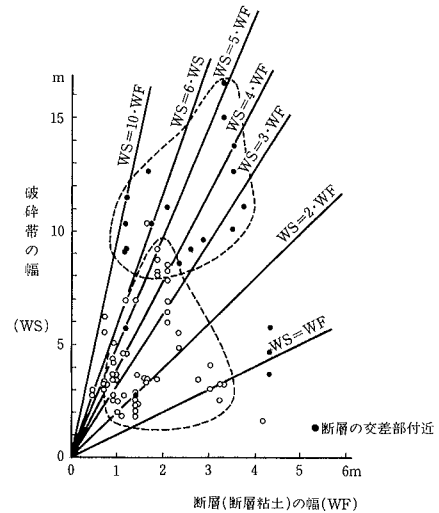
① 全国の断層破砕帯試料について、地質特性、含有鉱物組成及び化学組成について調査分析し、併せてこれらのデータについてクラスター分析や重回帰分析といった多変量解析を実施して断層破砕帯の地質特性について検討した。断層破砕帯の構成物質については、酸性岩起源の場合はシリカ分に富みクロライト、イライトを多く含み、一方堆積性の岩盤起源では鉄とマグネシウムに富みスメクタイトを多く含む。これらはいずれも断層活動後地下水等により二次的に形成された場合が多いと考えられる。

② 硬岩及び軟岩について、断層破砕帯を含む岩盤を「断層—断層周辺の破砕帯—母岩」という変化で捉え、岩盤の岩石組織と物理特性の変化、及び透水特性と強度変形特性、粘土鉱物と化学組成に関して、系統的な変化が調査試験分析により明らかに出来た。

③ 断層周辺に発達する破砕帯の幅は、断層の非交差部分に対しては断層の幅の6倍程度、断層の交差部分では10倍程度であった。

参考文献

- 1) Kuwahara, T.: Late Cretaceous to Pliocene fault systems and corresponding regional tectonic stress fields in the southern part of Northeast Japan, Sci. Rep. Inst. Geoscience Univ. Tsukuba, Vol. 3, p. 49~111, (1982)
- 2) Jones, L. M.: Cyclic loading of simulated fault gouge to large strains, Jour. Geophys. Res., vol. 85, p. 1826~1832, (1980)
- 3) 加藤：地震と活断層の科学，朝倉書店，(1989)
- 4) 松田：活断層の今日的課題，断層研究資料センター，(1989)
- 5) 活断層研究会：日本の活断層，東大出版会，(1980)
- 6) 金折，他：跡津川断層に伴う断層物質(その1，2)，応用地質，Vol. 23, No. 3, p. 9~27, (1982), Vol. 23, No. 4, p. 5~17, (1982)
- 7) 金折，他：断層粘土中の石英粒子の表面構造による断層活動性評価の試み(その1，2)，応用地質，Vol. 23, No. 4, p. 18~32, (1982), Vol. 23, No. 4, p. 65~75, (1982)
- 8) 西，江刺：断層破砕帯材料の力学的特性，電力中央研究所報告，No. 384033, 57p, (1985)
- 9) 通産省地質調査所：1/100万日本地質図，(1978)
- 10) 通産省地質調査所：日本温泉放熱量分布図，(1980)
- 11) 金折，他：淡路島最南端付近における三波川結晶片岩類起源の断層粘土の確認とその意義，地質学雑誌，Vol. 88, p. 701~704, (1982)
- 12) スネデカー，コ克蘭：統計的方法，原書第6版，岩波書店，(1972)
- 13) 北川，柿谷，湊：花崗岩中の粘土細脈を構成する雲母粘土鉱物・モンモリロナイト鉱物・雲母—膨潤性混合層鉱物，



図—10 断層粘土帯と破砕帯の幅にみられる相関性

粘土科学，Vol. 21, No. 4, p. 141~152, (1981)

- 14) 北川，奥野：東広島市付近に分布する花崗岩中の粘土細脈の形成機構，粘土科学，Vol. 23, No. 2, p. 45~60, (1983)
- 15) Wu, F. T.: Mineralogy and physical nature of clay gouge, PAGEOPH., Vol. 116, p. 655~689, (1978)
- 16) Anderson, E. M.: Dynamics of faulting and dyke formation, Oliver & Boyd, Edinburgh, (1951)
- 17) O' Neil, J. R.: Water-Rock interactions in fault gouge, PAGEOPH, Vol. 112, p. 440~446, (1984/1985)
- 18) Kerrich, R.: Fluid infiltration into fault zone; chemical, isotopic and mechanical effects, PAGEOPH, Vol. 124, Nos 1/2, pp. 225~268, (1986)
- 19) 歌田：風化作用とその生成物，岩波書店，岩波講座地球科学5，p. 10~22, (1979)
- 20) 木宮：花崗岩類の物理的風化指標としての引張強度，地質学雑誌 Vol. 81, p. 349~364, (1975)
- 21) 菅野，秋葉：核種の吸着と陽イオン交換容量との関係，動燃，原安協地層処分研究成果報告会論文集，p. 20~29, (1986)
- 22) 松田：粘土鉱物のイオン交換特性に関する研究，動燃，原安協地層処分研究成果報告会論文集，p. 66~73, (1986)
- 23) Bianchi, L. and Snow, D. T.: Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures, Annals of Arid Zone, Vol. 8, No. 2, p. 231~245, (1968)
- 24) 土質工学会：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用，p. 37~94, (1979)
- 25) 足立，矢野，岡：繰り返し荷重下における粘土シームを有する岩盤の力学特性に関する研究，第20回土質工学研究発表会，p. 923~926, (1985)
- 26) Robertoson, E. C.: Continuous formation of gouge and breccia during fault displacement, Issues in rock mechanics, p. 397~404, (1982)
- 27) 緒方，本荘：電力施設の耐震設計における断層活動性の評価，応用地質，Vol. 22, 「建設工事における断層」，p. 67~87, (1981)