

(120)断層粘土・地すべり粘土の微視的構造

(株)熊谷組 地質基礎研究部 正会員 ○ 飯酒孟 久夫
川 越 健

Scanning electron microscopic observation of clayish materials formed by faults and landslide

Hisao ISAHAI , Kumagai Gumi Co., Ltd
Takesi KAWAGOE , Kumagai Gumi Co., Ltd

Abstract

During geological field work or bore-hole examination , sometimes it is extremely difficult to clearly distinguish the clayish fault gouge formed by shear strains at the depth or clayish slide zone formed by landslide near the earth's surface from clayish part simply formed by hydrothermal alteration along the narrow fractures.

By using the scanning electron microscope , the present authors tried to find the characteristic features of clayish materials formed by fault movement and landslide , clearly different from clayish materials formed by simple rock alteration due to hydrothermal solutions , with the following results :

- (1) particular marks on slickensides suggest shearing record.
- (2) many slip surfaces are recognized in vertical planes parallel to the striation on slickensides.
- (3) plastic deformation is associated with relative slip among clay minerals.
- (4) flaky materials such as clay minerals and lens-shaped fine grained particles are apt to be induced preferred orientation.

1. はじめに

岩盤中に存在する断層破碎帯の識別は、露頭範囲が限定される時やボーリングコアで判断する際に、しばしば熱水変質帯との区別が困難な場合がある。また、地すべり地帯でのすべり面の判定は、計測が実施されない場合や移動が停止している際には極めて困難である。もし、微小な試料からせん断帯特有の特徴が把握されれば、これらの問題に対して非常に有効な判断材料になると思われる。

筆者等は、せん断帯特有の微細構造を把握するため、現地で採取した断層粘土・地すべり粘土の鏡肌や粘土断面内の微細構造を走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)を用いて観察を行っている。ここでは、せん断帯に見られる構成粘土鉱物や微細粒子の形態的特徴について報告する。

2. せん断帯内の構造

植村(1977)によれば、せん断面の形成機構については種々の異なる説があるが、まず最初に微細な断裂が生じ、次第にそれらが連結され巨視的せん断面の形成に至る、という点ではほぼ意見が一致している。しかし、初期に発生する微細な断裂が伸長性のものか、それともせん断性のものかという点で大きく意見が分かっている。

永広ほか(1974)は、中新統の硬質頁岩を用いた高圧三軸圧縮試験に基づいて、封圧 $P_c = 300 \sim 3000 \text{ kgf/cm}^2$ の割れ目の発達過程について次の様に述べている。破壊前には、conjugate set をなすせん断性の微小割れ目が発達し、echelon 状に配列するようになり、ある一定の長さに成長した微小割れ目は、歪の進行に伴い σ_1 軸に対しより大きい角度をなす方向に曲がりながら成長し、隣りあった微小割れ目と互いに連絡しながら巨視的なせん断帯へと発展していく。

また、小出(1983)は、echelon 割れ目群を構成する個々の小割れ目の方向と割れ目帯全体の延長方向とが約 45° をなす高角echelon 割れ目と、小割れ目と割れ目帯延長方向とのなす角が約 15° 以内の低角echelon 割れ目を区別している(図-1)。高角echelon 割れ目を構成する小割れ目は引張り割れ目であり、低角echelon 割れ目は構成小割れ目でも通常せん断割れ目である。引張り割れ目が生じ易い部分は、封圧から間隙圧を引いた有効圧が低い場合や岩質がぜい性的な場合である、としている。

永広ほか(1974)の試験結果では、個々の微小割れ目と割れ目帯全体とが成す角度は $\theta < 15^\circ$ であり、微小割れ目はせん断性の低角echelon 割れ目に相当するため、小出(1983)の報告と矛盾していない。

基本的なせん断帯の用語および

概念についてSkempton(1966)は、図-2を用いて簡潔な説明を加え、せん断帯の構造は、(主)変位せん断面(D), echelon 状のリールせん断面(R), 共役性のリールせん断面(R'), スラストせん断面(P), 破断面(T) とに整理され、 $(D, R) = (D, P) = \phi/2$, $(D, R') = 90^\circ - \phi/2$, $(D, T) = 45^\circ$ の方向をなすと述べている。

また、石丸ほか(1991)は、定体積一面せん断試験の肉眼観察結果から、モリヤイト含有量の多い $\phi' = 0$ 試料の場合は主変位せん断面(D)しか存在しない一面型であるが、 $\phi' > 0$ の試料ではリールせん断面(R) やスラストせん断面(P) が認められる多面型となり、 ϕ' 値の増加につれせん断幅も大きくなると述べている。

3. 観察試料

3-1 採取試料

筆者らが観察した調査試料は、断層粘土3試料・地すべり面粘土1試料およびせん断を受けていない試料として段丘堆積物の砂質泥層1試料の計5試料であり、このうち鏡肌を有する試料は、モリヤイトを含有する(F1)(S1)の2試料である。イソグロ-

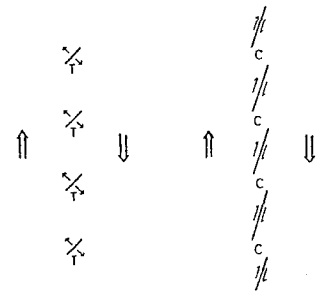


図-1 echelon 割れ目³⁾

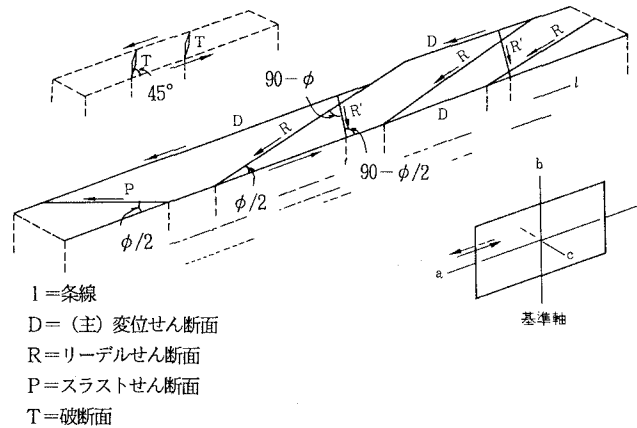


図-2 せん断帯の概念⁴⁾

表-1 観察試料の概要とX線分析結果

試料名	鏡肌	構成鉱物	母岩	時代
断層粘土 (F1)	有	Quartz>Ca-Montmorillonite>Anorthite >Kaolinite, illite, Clinoptilolite	凝灰質礫岩	鮮新世
断層粘土 (F2)	無	Quartz>Chlorite>Muscovite >Kaolinite	粘板岩	中生代
断層粘土 (F3)	無	Quartz>Albite, Sericite	粘板岩	中世代
地すべり粘土(S1)	有	Ca-Montmorillonite>Quartz	凝灰岩	中新世 ~漸新世
段丘堆積物 (T1)	無	Quartz>Chlorite>Albite>sericite	砂質泥層	沖積世

ル処理による(001)面の底面間隔の膨潤量から、モンモリロナイトの膨潤率は約15%である。また、(F1)と(S1)のモンモリロナイト含有率は各々数10%、約90%であることから、粘土自体の膨潤率は数%、約14%である。

各試料の概要とX線分析結果は表-1にまとめられている。

3-2 試料の調整

走査型電子顕微鏡の観察標本は、試料を採取後自然乾燥させた後、断面を乱さない様に小指の先端部ほどに小割りして作製した。金属によるコーティングには、ターゲット金属としてAuを用いたイオンパattering法を採用した。

4. 走査型電子顕微鏡の観察像

走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)で試料の拡大像を得る原理は、真空中鏡体で細く絞られた電子ビームを試料表面に入射し、試料表面のごく近く(〜10nm)で発生する二次電子の放出量が、入射点の凹凸に応じて変化する現象を利用する。試料表面には、平均膜厚5〜20nmの重金属(Au, Pt等)をコーティングさせるため、二次電子の多くはコーティング膜から発生するものである。

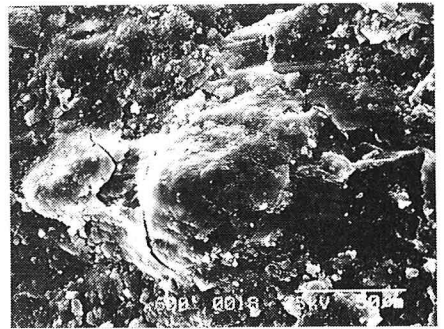
SEMで得られるコントラストは試料表面の凹凸に依存するが、解像しようとする試料表面の微細構造との関係にはSEMに特徴的な効果がある。試料表面が入射ビームに垂直である時は、二次電子発生量が最も少なく(暗く)、角度が大きくなるほど多く(明るく)なる。また、試料面の凹凸の端(エッジ)では、そのエッジ部分すれすれにビームが入射するために二次電子放出量が極めて多く非常に明るくなる。

5. 走査型電子顕微鏡下の微細構造

主変位せん断面(D)である鏡肌はせん断に伴う種々の痕跡を残存しており、また、せん断帯の断面内には様々な特色ある微細構造が観察される。これらから、せん断帯の識別や活動履歴を検討する上で貴重な情報が提供される。

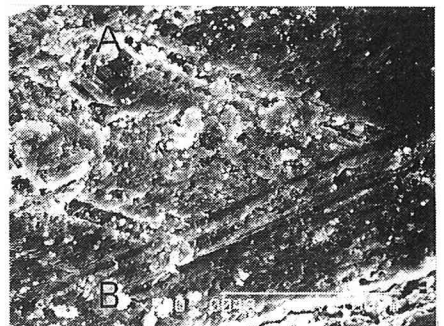
5-1 鏡肌の構造

Ph-1、2は、それぞれ断層粘土(F1)、地すべり粘土(S1)の鏡肌を上から撮影した写真を示している。断層粘土(F1)の鏡肌には肉眼で1方向の条線が認められ、SEM観察ではPh-1に示すフルトキャスト状の形態を有する微細粒子が存在している。X線分析結果から、この微細粒子は石英か斜長石または岩石の小粒子と考えられる。キャストの左側端部は急に盛り上がり、その頂点から右側に向かって次第に低くなり、流線型のちりめん皺を持つ鏡肌に移過している。この方向は肉眼観察による条線方向に一致しており、紙面手前の上盤側が右方向に転移したと推定される。



Ph-1 (F1) の鏡肌

また、Ph-2の地すべり粘土(S1)には2方向の条線A、Bが存在しており、同一の鏡肌において方向の異なるすべりが発生したことを示している。条線Aは条線Bによって切られているのが認められることから、条線Bは新期のすべりを示す痕跡と考えられる。さらに、条線Aは条線Bと比較し相対的に溝が深く、部分的に粘土鉱物で被覆されている。条線A生成時のせん断に伴う粒子の細粒化が生じたため、新期のすべり発生時には溝が浅くなり、条線Aが粘土鉱物で覆われたと考えられる。試料の肉眼観察では、条線Bは連続性が良好で容易に識別出来るが、条線Aは連続性が乏しいため肉眼では識別が困難である。



Ph-2 (S1) の鏡肌

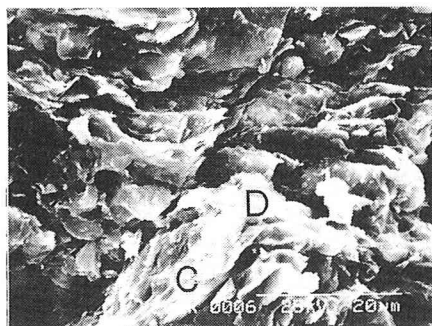
5-2 断面内の構造

断層粘土(F2)には鏡肌が存在しないけれども、露頭観察より得られた走向傾斜から、推定された断層面に垂直な断面を示したのがPh-3~4である。Ph-3は約40°傾斜の微細割れ目に沿って、粘土鉱物が切断されている状況を示している。微細割れ目の下盤側に当たるC付近では、せん断方向に沿って粘土鉱物が定方向配位しているが、D付近では右下に大きく屈曲し約30°で傾斜している。さらに高倍率の観察では、屈曲方向に粘土鉱物が引きちぎられた状況が認められ、明瞭な微細割れ目の下盤側に右ずれのせん断面がもう1つ存在することが判る。Ph-4では、粘土鉱物がS字型に塑性変形を受けており、曲率の最大点を結ぶ左上から右下にかけてE、F2本の微細な割れ目が存在している。粘土鉱物の変形状況から、割れ目Eは右ずれのせん断面といえ、割れ目Fは左ずれのせん断面と考えられる。さらに、この写真の左下には、石英または岩石の微小粒子が存在しており、割れ目Fに沿って配向している。その他の箇所での観察結果においても、Ph-3、4で認められた約40°傾斜の微細割れ目とE、F方向の低角の微細割れ目が多数存在しており、それはリールせん断面(R, R') かスラストせん断面(P) に相当するものであろう。また、この標本の一部には、微小粒子の中央に粒子を転移させない高角の破断面(T) が認められた。さらに、Ph-1の鏡肌に存在したちりめん皺状の変形が、せん断型の微細割れ目の表面にも認められる場合がある。

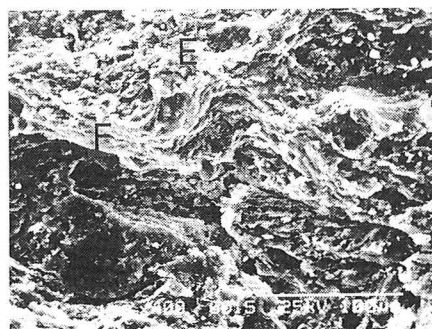
Ph-5~6、7~8は、それぞれ断層粘土(F1)、地すべり粘土(S1)の鏡肌に垂直な断面像を示している。いずれの写真も断面の左右方向が条線方向と一致しているが、(S1)の場合は条線Bに沿った断面である。

Ph-5には断面と伴に鏡肌も撮影されているが、鏡肌付近は粘土鉱物の非常に密な層が形成されていることが判る。本層の厚さは約20 μm であるが、この写真では、試料小割り時に形成された粘土鉱物の垂れ下がりが認められる。この密な層は(F1)の標本には全体に分布する訳ではないが、モレリ叶付含有量の多い標本(S1)には全体に渡って存在している。

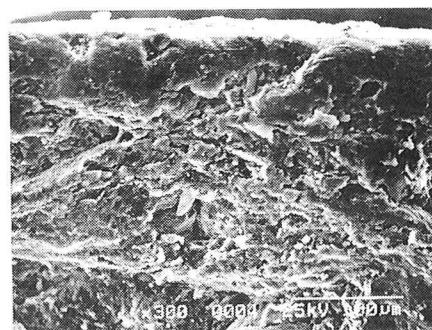
Ph-5~6には、鏡肌にほぼ平行な微細割れ目と10~20°、約50°で傾斜する微細割れ目の3種類が卓越している。鏡肌に平行な微細割れ目は、変位せん断面(D) に相当している。傾斜角10~20°の微細割れ目は、リールせん断面(R) かスラストせん断面(P) に相当すると考えられるが、約50°傾斜の微細割れ目は傾斜角から判断して破断面(T) か小出(1983)の高角echelon 割れ目に近いものであろう。しかし、これらは引張り割れ目ではなく、むしろ、Ph-6のGには約50°傾斜で配向する紡錘状小粒子が存在することから、せん断型の割れ目と推測される。



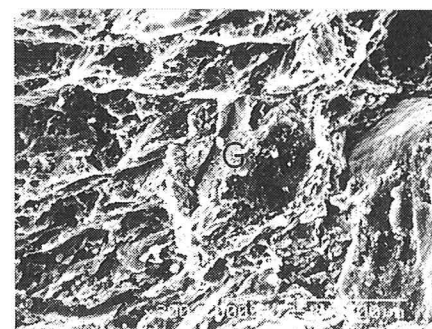
Ph-3 (F2) の断面



Ph-4 (F2) の断面



Ph-5 (F1) の断面



Ph-6 (F1) の断面

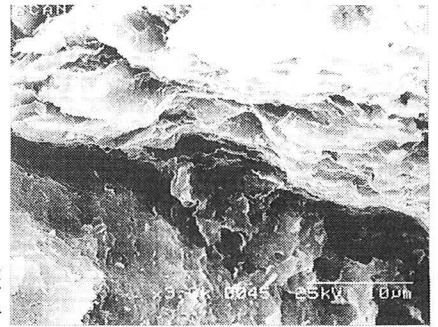
Ph-7には、低角の規則正しい微細割れ目が認められるが、これは試料を自然乾燥させた時の収縮亀裂であり、これには標本(F1)で認められるような明瞭なせん断型の微細割れ目は存在していない。標本(S1)の構成鉱物は90%以上がセリサイトであり、石丸ほか(1991)の一面型のせん断帯に相当すると考えられる。しかし、粘土鉱物以外の小粒子は菱形～紡錘状を呈す傾向にあり、Ph-6のG粒子と同様に収縮亀裂に沿った配列をしている。また、粘土鉱物は鏡肌にはほぼ平行小粒子に沿って定方向配位する傾向にある(Ph-8)。これらから、一面型のせん断帯であるにしても、極微細な何らかの構造的弱面が存在する可能性がある。



Ph-7 (S1) の断面

5-3 他標本の構造

断層粘土(P3)には以上に述べた様な構造は認められなかった。これは、本断層の活動初期に形成された岩石粉の表面上に、その後の風化変質に伴った二次粘土鉱物が成長したからであろう。また、(F1)～(F2)と(S1)に認められたような微視的構造は、段丘堆積物(T1)では全く発見出来なかった。



Ph-8 (S1) の断面

6. 終わりに

走査型電子顕微鏡で認められた微視的構造は、小出(1983)の報告やSkempton(1966)が述べた肉眼スケールの構造と比較的良好対応を示しており、せん断帯の構造にフラクタル性が存在することを示していると考えられる。

筆者らによって観察された構造はせん断帯特有の特徴であり、微小な試料から断層や地すべり面の識別をする上で有効な判断根拠と言える。また、地表踏査や鏡肌の粗滑法則から判断する断層のセンスは、微小な鏡肌表面の痕跡や断面内の微細割れ目のせん断方向から判断出来る可能性を示している。

さらに、微細割れ目の傾斜角が図-2と異なる点は、初期岩盤の不均一性や残留変形時の塑性変形、繰返し活動に伴う構造の乱れなど様々な原因が考えられる。これは、複雑な地質状況や応力条件などを反映した結果であり、せん断帯の活動履歴を検討する上で重要な情報を内蔵していると言える。

7. 謝辞

本研究を推進するに当たり、関陽太郎先生には終始有益な御教示を頂いた。埼玉大学工学部の風間秀彦先生からは貴重な御助言を頂いた。また、観察試料の一部は電力中央研究所の千木良雅弘氏から御提供頂きました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 植村武 (1977) : 断層面の構造と断層運動の進展過程. 地質学雑誌, 83-12, 2)
- 2) 永広昌之ほか(1974) : 高封圧下における岩石の割れ目の形態とその発達過程. 地質学雑誌, 80-11, 3)
- 3) 小出仁(1983) : エッジ 断層系の地震地質学的意義と地震発生機構について. 地学雑誌, 92-3, 4)
- 4) Skempton, A. W. (1966): Some observations on tectonic shear zone. Roc. Mech., 1, 5)
- 5) 石丸恒存ほか(1991) : 未固結堆積物中に形成される剪断面の形態. 地質学雑誌, 97-9