

# 断 層 破 碎 帯 の 性 状

いまにし せい や  
今 西 誠 也\*

## 1. はじめに

日本列島は太平洋の縁に沿って、ニュージーランドからケルマデック・トンガ・サモア・フィジー・ソロモンの諸島を経て、ニューギニアの北岸を通り、フィリピン・台湾・千島・カムチャッカ半島東岸・アリューシャン・アラスカを通してさらに南北アメリカ大陸の西岸に沿ってチリまで延々とつながる環太平洋変動帯の一部を構成する弧状列島である。この地域においては、古い地質時代から現在まで、地下に貯蔵された巨大なエネルギーが何回となく放出されて地殻変動が繰返され、火山爆発、陸地の上昇と沈降、地塊の圧縮、変形、破壊などが起こり、その結果、地質構造が非常に複雑になっている。

建設工事の対象となる岩盤は、古い地質時代のものから、新しい地質時代に生成されたものまでである。岩質は生成以来の幾多の地殻変動、河水、雨水、温度変化などの営力を受けて、岩石の変質・変形が広く行なわれ、広域変成作用、構造線、断層、シユウ曲、層理、節理、き裂などの割れ目が発生している。

## 2. 断層破碎帯

建設工事の対象となる岩盤には、大小の破断面が発達している。地質学の立場では、破断面に沿って両側の岩盤が相対的に転位したものを断層、相対的転位のないものを節理として区別している。しかし建設工事においては、相対的転位の有無・大小などよりも、岩盤の破碎の程度、分布、物理的性質が重要な問題となってくる。

われわれは著しく破碎された帯状の地質不良箇所を断層、断層破碎帯、断層群、シェアーゾーン、破碎帯などという用語で呼んでいる。一般的には破碎帯、断層破碎帯などと呼んでいるが、地質学の定義とは異なる意味で使われていると思われる。地質学的な立場から考えると、この名称に含まれる意味には、構造線、断層、変成帯、シユウ曲帯などの破碎作用の進んだゾーンを総括的に呼んでいるようである。

断層という用語は地質学と土木工学との間での取扱いについてはなんらの解釈の違いがない。地殻はヒズミ力を受けると湾曲する。剛性の高い岩盤は強大なヒズミ力によ

て破断し、破断面に沿って転位することによってヒズミ力を解放する。断層とは岩盤の破断面または破断の起こった狭い幅の帯で、その両側が相対的に転位したもので、その転位の量については制限はない。破断面を断層面と呼び、断層面は岩盤相互のセン断によって平滑な面となっている。この断層面は実際にはある幅を持った帯状の部分であることが多く、この帯状の部分は断層運動による圧碎された角レキ、粘土となっている。逆断層は圧縮によって発生するので、引張りによって発生する正断層に比べると、破碎作用が大きく、粘土、角レキも多く、建設工事に重大な影響を与えることになる。

断層は単独で1枚の面として発生するとは限らない。断層が発生すると、その面に沿う部分の岩石の強度が落ちるため、繰返し破断が起こり、その結果、両側の岩石の破壊が進行し、多数の断層面が密集してある幅をもつことになる。セン断が密に集まり、面と面との間が薄い板状になったセン断帯と、いろいろの方向の破断面が集まってある方向に延びる破碎帯となる。

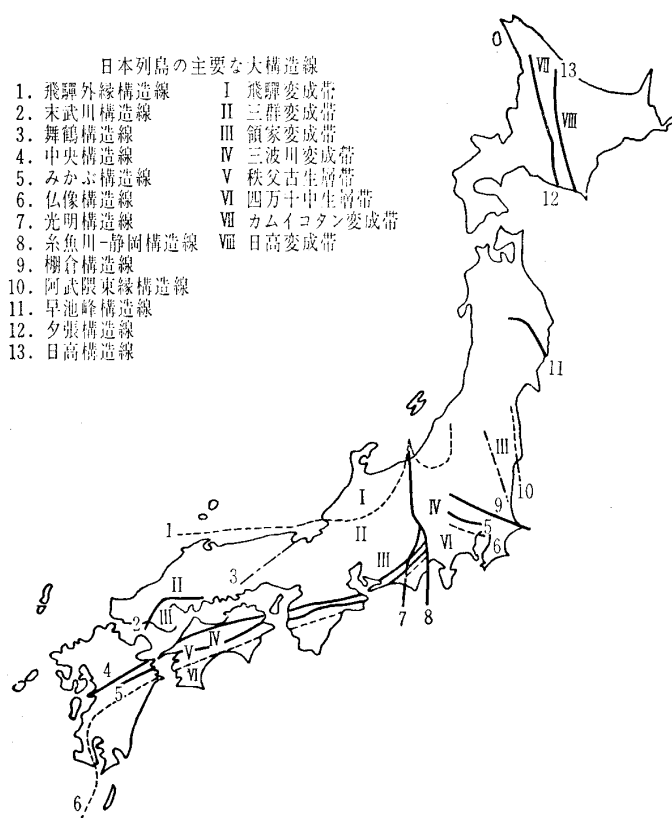
断層面に沿って物理的・化学的風化、割れ目の拡大、岩体の塊状化、粒状化、粘土化が起こるだけでなく、断層に沿う変質作用（熱水作用）によって、岩石を構成する造岩鉱物はたん白石、明ばん石、絹雲母、方解石、緑泥石、緑レン石、滑石、石膏、沸石、ジャ紋石などが生成し、最終的には粘土鉱物となる。

断層と同じようなもので構造線と呼ばれるものがある。中央構造線、糸魚川——静岡構造線などである。延長が数10 km から数100 km もある長大な線状の帯状地帯に沿って、衝上断層、横ずれ断層が起こり、これに沿って火成活動が繰返し起こって、岩石が広範囲にわたって破碎されたり、両側の地質、岩石が大きな違いがある場合には、構造線または構造帯と呼ばれる。これらの構造線はそれ自体が巨大な破碎帯である。

同じような意味で変成帯を忘れてはならない。構造線と同様に数10 km ～数100 km にわたって帯状に分布している。日本列島には6つの変成帯がある。三群変成帯、傾家変成帯、三波川変成帯などと呼ばれているものである。これらの変成帯では千枚岩、結晶片岩、片麻岩が一定の順序で帯状に配列している。変成帯は大規模な断層、シユウ曲、あるいは各種の深成岩と密接な関係にある。変成作用は地

\* 建設省 土木研究所 地質官

## 総 説



図一 日本列島の主要な大構造線 (参考文献2)

下深部における激しい圧縮変形、高温・高圧の作用を受けて生ずる緑泥石、石墨、絹雲母、沸石などが含まれてくる。変成岩は片理が発達しているために、地下水の浸透を受けやすく、変成作用によって生じたこれらの鉱物はいずれも軟質で、風化・破碎作用を受けやすい。

地殻変動が著しくなるとシユウ曲が起こる。圧縮作用によってできたもので、シユウ曲の著しい帯状の地帯をシユウ曲帯と呼んでいる。凸形のシユウ曲を背斜、凹形のシユウ曲を向斜という。剛性の著しい岩盤は破断を起こし断層を発生するが、塑性的な岩盤はシユウ曲しやすい。したがってシユウ曲と断層とは相伴って現われることが多い。シユウ曲の背斜部や向斜部は、ヒズミが集中するために、この部分に断層、割れ目が多くなる。このため背斜部や向斜部の岩石はぜい弱化していることが多い。特にケツ岩などの弱いタイ積岩のシユウ曲帯は著しいかく乱作用を受けることがある。

以上のことから、われわれが通常使っている断層破碎帯、破碎帯という用語は、構造線、断層、変成帯、シユウ曲帯などを含んでいるが、広義にはいろいろの圧碎作用、変成作用によって、角レキ→粘土状に粉碎された不規則な割れ目の多い、ある程度の方向性と幅を持つゾーンを定義しているようである。

### 3. 断層破碎帯の性質

地盤がヒズミ力を受けて破断し、相対転位することによって断層は発生する。破断面すなわち断層面に沿って、圧

碎された粘土、角レキ、き裂、節理、割れ目ができる。全体的にはある程度の幅と方向性を持つが、詳細に検討すると決して一定の方向とはかぎらない。き裂、節理、割れ目などや個々の断層では、引張りによる力を受けた地域では、引張りの方向に直角であり、圧縮による場合は、応力の方向に対して、 $45^\circ$  の互いに直角な2方向のものがある。

断層面には両側の岩盤が転位するために、多くの場合、俗に鏡肌と呼ばれる平滑な面ができる。鏡肌の表面には、岩盤の転位の方向に並んだ擦痕が残っている。断層面のほかに、しばしば断層に沿って両側の岩盤が破碎されてできた断層角レキや細かく碎かれてできた粘土ができる。また大規模な断層では、断層運動によって、上下盤の岩石に強い力が働くため、岩石を細かく碎きながら再結晶させて、元の岩石の性質とは違った岩石を、断層面に沿って生ずることがある。この岩石を圧碎岩と呼んでいる。

断層のなかには、最近できて現在も動き続けている断層や、古い断層であっても現在も動いている断層がある。これらを活断層と呼んでいる。西南日本を外帯、内帯に区分する大構造線である中央構造線は中世代末期の断層であるが、その活動は1回だけではなく、同じ線に沿って何回も活動しており、その両側の地塊は現在も1年間数mmの速度で変位している。カリフォルニアのサンアンドレアス断層は、カリフォルニア州を南北に縦断し、メキシコ国境をこえ、カリフォルニア湾に達する延長1,000 kmもの大地質構造線であるが、中生代白亜紀以来活動を続け、現在でも断層の東側の地塊は西側に対して南方に1年間数cmの速度で移動し、地震も活発に起こっている。丹那断層、阿寺断層、跡津川断層も活断層である。

変位はクリープ的なものと、活動ごとに段階的に変位するものがある。いずれにしても建設工事に重大な影響を与えるものである。1930年の丹那断層では東海道線丹那トンネル(建設中)が変位した例もある。

岩盤がセン断破壊を強く受けると、岩石は粉碎化され、さらに地下水による物理的・化学的風化作用、断層に沿う熱水作用などによって粘土質物となる。セン断破壊の程度の弱まるにつれて、粘土質物に角レキを混じえる層、砂状の岩屑に角レキを混じえる層、角レキを主とし角レキ間に薄い粘土質物をはさむ層、比較的大きい岩塊と角レキを混じえる層、割れ目の密に発達した層、比較的割れ目の多い層となる。

ダム、トンネルなどの実際の建設工事現場において遭遇する断層破碎帯は粘土から比較的割れ目の多い層が組み合わさった形で現われることが多い。

#### ① 破碎作用が集中的に起こるもの

(a) 集中的なセン断破壊を受けたために、破碎帯は全部粘土質物となるが、その両側の岩石は破壊作用を受けない堅硬な岩盤として残る。

(b) セン断破壊が少し弱いために、破碎帯は粘土質物だけ

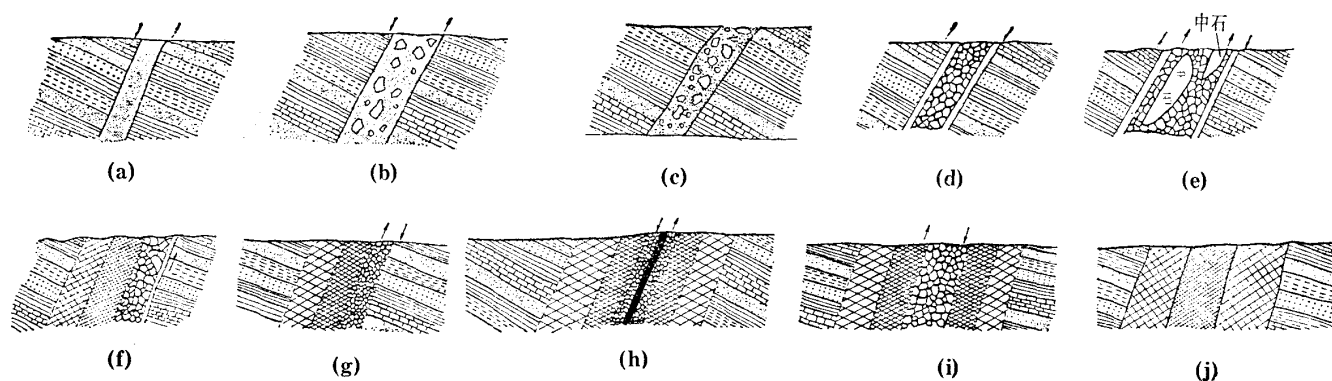


図-2 断層破砕帯の状態(参考文献3)

ではなく、角レキを含んでいるもの。両側の岩石は破壊作用を受けない。

(c) さらにセン断破壊が弱いために、破砕帯には粘土質物はなく、砂状の岩屑と角レキから構成される。両側の岩は破壊作用を受けない。

(d) 両側の堅硬岩との境界に力が集中したために、両側の境界部は粘土物質となっているが、その間は角レキを主とし、角レキ間に薄い粘土質物をはさんでいる。

(e) 前者と同様であるが、破砕されない比較的大きい岩塊が、角レキを主とし角レキ間に薄い粘土質物をはさむ層に囲まれて存在している。

(2) 破砕作用が片側に起こるもの

(f) セン断破壊が岩盤の片側についてのみ行なわれる。セン断破壊が集中的に起こるところが粘土質物となり、破壊が弱くなるにつれて、角レキを主とし角レキ間に薄い粘土をはさむ層、割れ目の密に発達した岩盤、比較的割れ目の多い岩盤となる。粘土質物は新鮮な岩盤と接している。

(g) 前者に比べてセン断破壊が弱いために、粘土質物が生成されない。明りょうな断層がないのが特徴である。

(3) 破砕作用が両側に及ぶもの

(h) セン断破壊は集中的に起こり、その部分は粘土質物となる。破壊は両側に及ぶが、距離が離れるにつれて左右対称的に減少する。

(i) セン断破壊は前者に比べて弱いために、粘土質物は生成されない。角レキを主とし角レキ間に薄い粘土をはさむ層を中心として影響が少なくなっている。明りょうな断層面がない。

(j) セン断破壊がきわめて弱いために、割れ目の密に発達した岩盤の両側に比較的割れ目の多い岩盤がある。

建設工事において問題になるのは、個々の断層よりも、断層破砕帯としての規模と性質である。断層破砕帯の有無、幅、延長、構成物質、粘土と角レキの量比、粘土の性質、節理・クラックの幅、密度、破砕帯の強度や変形性、透水性が重要な問題となってくる。

#### 4. 断層破砕帯と建設工事

##### 4.1 斜 面

われわれが断層破砕帯と呼んでいる地域には地スベリ、崩壊が多い。断層破砕帯は前述したように、粘土、粘土に角レキを混じえる層、砂状の岩屑に角レキを混じえる層、角レキを主とし角レキ間に薄い粘土をはさむ層、比較的大きい岩塊と角レキを混じえる層、割れ目の密に発達した岩盤、比較的割れ目の多い岩盤が発達している。どれをみても力学的な弱面であり、浸透水の通路であり、新鮮な岩盤に対して不連続面として役割を果たすことになる。

破砕された岩盤はそれ自体が滑材となる細粒物質を含むばかりでなく、石墨を含んだり、ジャ紋岩化したり、また風化しやすい粘土鉱物を含んでいるので、浸透水による軟弱化が起こり滑動しやすくなる。

地スベリ、崩壊は新第三系中新世の地層における断層破砕帯、中央構造線、御荷鉾構造線、仏像構造線、糸魚川—静岡構造線などの大構造線にみられるように、地質時代のいかんにかかわらず発生している。これらの現象は破砕度、変成度の影響の著しい地帯に多く、影響の弱くなるにつれて減少する。

##### 4.2 トンネル

幅の広い断層破砕帯は土圧、地耐力不足、集中湧水などでトンネル工事の施工条件を悪くさせ、工事の死命を制するようなこともある。

断層破砕帯は前述したように、粘土から割れ目の多い岩盤まで種々の形態を示している。この形態からみて、透水帯ともなりうるし、粘土を伴うためにしゃ水帯ともなりうるということが出来る。また凝集力が弱いために、掘削による地山のユルミ高すなわち荷重が大きいということが同時にいえる。掘削による地山のユルミは、一般に時間の経過とともに進行し、荷重の増加となる。これらの現象は破砕の程度が著しいほど大きくなる。

断層破砕帯では、切羽が自立せず、さらに湧水を伴うことが多いので崩落を起こしやすい。掘削面積の縮小、鏡止めなどを行なう必要にせまられ、掘進能率の低下をきたすことになる。き裂、粘土化などにより、岩盤の強度が不足し、支持力不足となり、支保工・覆工の沈下→破壊につ

## 総 説

なかる。また工事中に支保工が変形し、盤ぶくれを起こすことがある。これはトンネル周辺の地山が内空に向かって押し出してくるためである。一般に地山の内部は重力によって圧縮され、ヒズミの状態になっているので、トンネル（導坑のような小断面でも）を掘削すると、地山は今までの平衡状態が破られて、新しい平衡状態にはいるとして、トンネル周辺で膨張する。堅硬な岩盤ではほとんど問題ないが、粘土、き裂の多い断層破碎帯では著しい変形を示す。膨張性といわれる地圧現象には、岩石が風化して土になるときの容積変化、粘土鉱物（特にモンモリロナイト、石膏など）の膨潤、圧縮による塑性流動、応力解放による膨張などの現象がある。工事における対策としては、裏込め注入によって主働土圧を均等に分布させることや受働土圧を有効に働かせること、インバート設置などを一般的に行なっている。土圧の著しい断層破碎帯では、ロックボルト、吹付けコンクリートの有効性が最近強調されている。NA TM工法と呼ばれるものである。掘削後ただちにロックボルト、吹付けコンクリートを施工することによって、掘削による地山のユルミを最小限に止めること、地山にグランドアーチを形成させ、地山それ自身が荷重を受けるようにするものである。さらにこの工法は若干の変位を許すことによって応力を解放し、土圧の増加速度が十分小さくなってから、最終的な覆工をすることに特徴がある。

トンネルの湧水には、切羽の崩壊、流失などを招くような大量の水がまとまって現われる集中湧水と、浸透水のように長い区間にわたって平均的に湧出する恒常湧水がある。断層破碎帯では集中湧水、恒常湧水が多いと常に考えなければならぬ。断層破碎帯付近では、湧水が大量でなくても、湧水は地盤を軟弱化し、岩目の剝離を促進する。その結果、地圧の増大、支保工基盤の支持力低下、沈下などによる偏圧の作用、凝集力減少による流砂現象、崩壊などの現象を生ずることが多い。

断層破碎帯は透水帯でありかつしゃ水帯でもある。しゃ水帯の性質が集中湧水に結びつくのである。厚い断層粘土などの背後にある被圧水が、掘削によって、一時に流出して崩壊事故を起こすことが多い。図-3で示すような破碎帯では、切羽が断層に近づくにつれて湧水は減少し、粘土に到達するとほとんど湧水はなくなる。しかし断層粘土を突破したときに、粘土によってしゃ水された滞水層から、高压の集中湧水が瞬間的に起こり、切羽の崩壊、流失を起こすとともに、坑道の埋没をひき起こし、長期間の作業停止につながるようになる。このように集中湧水はトンネル工事の死命を制するといってもよいくらいのものであるから、工事着工前の地質調査を入念に行なって、その位置、量を予測することが大切である。また工事中にも常に坑内より、長大水平ボーリングを実施して集中湧水を予知するようにつとめなければならない。

湧水の多い断層破碎帯などにおける工法として採用され

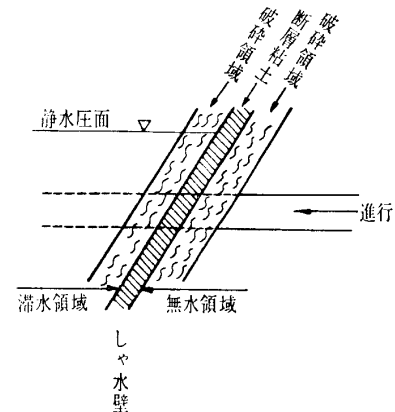


図-3 断層粘土と地下水の貯留状況（参考文献4）

ているものは、水平ボーリング、水抜き坑、ディープウェルなどによる排水、注入工法、圧気工法（山岳トンネルではまれである）などであるが、これらの工法を実施するとともにう回坑を掘進して工程の遅延を防ぐことが多い。

### 4.3 ダ ム

ダム・サイトを選定する場合に、いわゆる断層破碎帯がぜんぜんないという地点は皆無である。ダム工事において、断層破碎帯が問題になるのは、ダム基盤としての強度、透水性、パイピングなどである。ダム基礎岩盤がどの程度の耐荷力あるいはしゃ水性を必要とするかは、ダムの高さ、タイプによって異なる。

岩石そのものの透水性が問題になるのはまれである。岩石の割れ目を通しての透水が大部分であり、この意味で断層破碎帯が特定の問題としてクローズアップされてくる。砂層などと違って、ダルシー（Darcy）の法則は成立しない。岩石のき裂、節理、割れ目、破碎部と新鮮部の境界が水が通り、かつその流速が早いのが特徴である。浸透流の流速が早くなると、パイピングを生じ、さらにそれが拡大され、ダムの安全性が損われることになる。透水性はボーリング孔を利用したルジオンテスト（注入圧力 10 kg/cm<sup>2</sup>、孔長 1m 当たりの透水量  $l$ /分）によって示されることが多い。

ダム基盤の強度としてとりあげられるのは、岩盤の変形性とせん断強度である。コアによる圧縮試験、ジャッキ試験、ブロックせん断試験などによって実施していることが多い。断層破碎帯は岩質の軟弱化、き裂、割れ目などの存在から、強度も弱くかつ異方性が大きい。試験を実施しても、この評価をいかに行なうかが問題で、経験豊富な技術者の高度の判断が特に必要である。

コンクリートダムにおける断層破碎帯は、強度特にせん断強度が非常に小さく、浸透水による揚圧力がダムに影響を与えることに心配がある。特に断層破碎帯がダム基礎面あるいは下流直下に存在する場合（ゆるい角度で下流上りとなる場合）は最もすべりやすい弱層になる。ブロック幅の  $1/3$  以上であると処理が困難であり、ブロック幅近くな

ると安全性に疑問が生じる。

アーチダムでは、アバットメントの両側山腹から下流にかけて、アーチスラストの方向に対して不利な方向にある場合に危険となる。アーチダムの破壊はいずれもアーチアバットメントの支持する基礎岩盤の崩壊で、浸透水流による岩盤の劣化、パイピングおよび岩盤内揚圧力の増大に起因している。

フィルダムでは、ほかのタイプのダムほど断層破碎帯の強度は問題にならない。コア基礎部分の透水性、洪水吐の基盤と掘削斜面の安定に問題がある。特に透水性、パイピングはコアの破壊につながり、グラウトなどの基盤改良工事における施工条件の悪さ（上載荷重の不足、盛立工事との重複）とあいまって、コンクリートダム以上の入念な施工が必要である。断層破碎帯を含めて、全体的にギャラリーを設け、貯水時の監視、改良工事の追加ができるようにすることが必要である。

ダム基盤としての断層破碎帯の補強、改良工事は一般に掘削、コンクリート置換、コンソリデーショングラウト、カーテングラウト、ドレインなどによって行なっている。ダムのタイプ、高さによってその程度は異なるが、入念な地質調査による状況は握、経験豊富なダム技術者、地質技術者の協議と高度の判断が必要である。

貯水池における地スベリが最近非常に多くなっている。イタリアのパイオントダムの例にもあるように、貯水開始後、貯水池内における大量の地スベリ、崩壊事故が発生している。このような現象も大規模な断層破碎帯地域に認められる現象である。貯水面の上昇の際に発生するものと低

下時に発生する場合がある。貯水によって周辺地山の力学的状態が変化し、その安定が崩れることは当然予想されることである。水圧による岩盤破碎、浸透水による岩盤の劣化、間ゲキ水圧の発生によって、スベリ面に作用する有効応力を減少し、摩擦抵抗が減少することが重大な要素となっている。

## 5. おわりに

日本の地質構造を考えると、建設工事において、断層破碎帯を避けることはむりである。入念な調査、設計を行なっても、ダム、トンネル、斜面、地下掘削工事などでは、断層破碎帯によって重大な影響を受けている。断層破碎帯はき裂、節理、割れ目などの分離面、粘土、軟質部、硬質部などが不規則に混ざっているため、その性質は場所、方向によって異なるものである。調査、試験の規模は時間的、経済的制約もあって、限られた試験結果から断層破碎帯の性状を評価している。室内試験、現場試験の方法、試験の解析手法の変化によって値は異なってくる。またこれらの評価が正しいとしても、試験地点が全体を代表しているかについては非常に疑問が多い。

## 参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：岩の工学的性質と設計施工への応用
- 2) 土木学会編：土木技術者のための岩盤力学
- 3) 田中治雄：土木技術者のための地質学，土木施工，13巻6号
- 4) 宮崎政三・高橋彦治：土木地質学，共立出版
- 5) 今西誠也：土木技術者のための地質学，理工図書
- 6) 藤原治義・柴田秀賢：地質学ハンドブック，朝倉書店
- 7) 平凡社：地学辞典
- 8) 古今書院：地学辞典

(原稿受理 1976.11.29)

## 技術手帳

## 土 の 化 学 的 活 性

き た だい ぞう  
喜 田 大 三\*

「土の化学的活性」をつぎのように定義する。土の物理的力学的諸性質はもちろんのこと、土中構造物さらに土工事に関連する諸事象に土の化学的諸性質が影響する場合、このような土を「化学的に活性な土」と称する。

ところで、土とは岩石が物理的・化学的・生物的作用によって風化した結果生成したものであり、土中には石英砂のように化学的に不活性な成分だけでなく、粘土のように化学的に活性な成分を含む。すなわち、粘土分を構成している粘土鉱物は単に大きな表面積を持ち水を吸着しているだけでなく、この鉱物の結晶格子内の同型置換や結晶格子の破壊端面の解離によって、粘土粒子は一般に負に帯電し対イオンとして各種の交換性陽イオンを吸着している。さらに、粘土粒子は鉄・アルミニウムなどの水酸化物、また

有機物などのコロイドをも吸着している。一方、土中水は純水でなく化学的に活性な水溶性の各種成分を含んでいる。このような土中の構成成分が、特に非平衡条件下におかれた場合、複雑な物理化学的反応を発現し、「土の化学的活性」が引き起こされるのである。この「土の化学的活性」を示す顕著な事象を以下に紹介する。

まず、「土の化学的活性」が土の構造に大きく影響している一例として、スカンジナビア諸国に広くタイ積している超鋭敏な粘土・クイックレーについて述べる。かつて海水中にタイ積した粘土が地盤隆起で陸地になり、粘土の間ゲキ水中の塩分が地下水流によって長年月にわたって徐々に溶脱された結果、この粘土地盤では地スベリがひん発している。この事象は物理化学的につぎのように説明できる。粘土粒子間には Van der Waals 力による吸引力と静電気

\* 農博 大林組技術研究所 室長