

ずい道工事における風化じゃ紋岩の土質化学的研究

喜 田 大 三
辻 博 和

Geochemical Research on Weathered Serpentinite for Tunnel Construction

Daizo Kita
Hirokazu Tsuji

Abstract

Excessive earth pressure occasionally causes much damage to tunnel construction in a serpentinite belt. The geochemical research reported herein was conducted to study the cause of such earth pressure. The following results were obtained: (1) no clay mineral capable of swelling is included and chrysotile and antigolite are the dominant clay minerals, (2) weathered parts of serpentinite are easily sheared and reduced to flow by a little increase of water, (3) the weathered part, in which clay particles are oriented in a certain direction, is easily sheared in this direction.

Finally, it is suggested that the excessive earth pressure in a serpentinite belt is not attributed to “swell of clay minerals” but to “flow of earth induced by shear of the weathered part”.

概 要

じゃ紋岩地帯のずい道掘削時には、異常な膨張性土圧が発生し、施工が困難になる場合が多い。しかし、この膨張性土圧の発生原因については、いまだ充分解明されていない。そこで、この発生原因を究明すべく、3種のじゃ紋岩を対象として土質化学的検討を行なった。

その結果、以下のことが判明した。(1) 膨潤性を示す粘土鉱物は認められず、クリソタイルとアンチゴライトが主要粘土鉱物である。(2) 風化部分は、わずかな水分増加により、容易にセン断破壊され、液状化しやすい状態にある。(3) 風化部分を構成する粘土粒子は、一定方向に配向しており、風化部分はセン断破壊をその方向に容易に受けやすい。

以上のことから、じゃ紋岩地帯に発生する膨張性土圧は、「構成鉱物の吸水膨張」によるのではなく、「風化部分のセン断破壊による地層の流動」によるものと判定した。

1. はじめに

近畿地方の宮津と河守を結ぶ宮守線建設に際し、当社は辛皮ずい道(写真-1)と普甲ずい道の施工を担当したが、当地区はボーリング調査の段階でじゃ紋岩

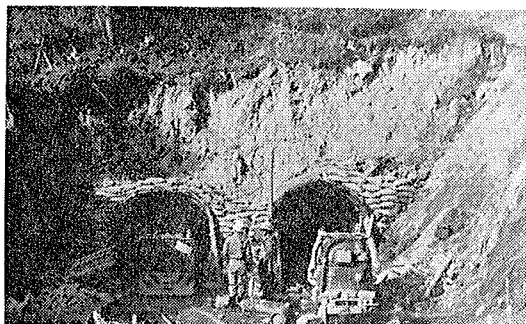


写真-1 辛皮ずい道工事風景

地帯であることが判明した。

じゃ紋岩地帯のずい道掘削時には、周知のように、風化の進んだじゃ紋岩はずい道の内空に向かって、ある安定状態に達するまで、徐々にあるいは急速に、押し出してくるという特徴を持っている。特に、滑石分の多いじゃ紋岩に水が回った場合には、施工が相当困難であるとされている。四国地方予讃線夜昼トンネル、房総西線嶺岡トンネルあるいは九州地方篠栗線篠栗トンネルなどでは、大きな膨張性土圧が発生して、非常に難工事だったと言われている。

以上のような、じゃ紋岩地帯のずい道掘削において発生する異常な膨張性土圧は、函館本線神居ずい道の風化帯、破碎帯で $15\text{t}/\text{m}^2$ 程度¹⁾、また、北海道紅葉山線新登川トンネルの葉片状じゃ紋岩地帯で $10\sim 18\text{t}/\text{m}^2$ 、塊状じゃ紋岩地帯で $5\sim 6\text{t}/\text{m}^2$ ²⁾であったと報告されて

いる。

しかし、上記のような異常な膨張性土圧を発現させる原因あるいは発生機構に関する報告は皆無に等しい。

ところで、一般にずい道掘削時に発生する膨張性土圧の原因は、以下の3つに分類される。

- (1) 構成鉱物の吸水膨張
- (2) 地層の破壊と塑性変形
- (3) 潜在応力の解放

じゃ紋岩地帯については、上記のうち原因(1)(2)が関与している可能性があるため、今報告では、辛皮ずい道、普甲ずい道のじゃ紋岩地帯を対象として、これらの原因を、土質化学的手法によって検討し、膨張性土圧の発生機構を究明しようとした。

2. 地質概要および供試試料

福井県の小浜湾の北西岸にはじまり、舞鶴、夜久野をへて、岡山県南東部まで約150kmにわたって、夜久野基性逆(へい)入岩類があり、この進入岩類の発達の特徴の1つとして、舞鶴地帯の北縁・大江山山塊一帯などに、今回実験に供したじゃ紋岩あるいはカンラン岩の深成岩が存在している。

今回施工した地区について、弾性波探査およびボーリング調査などによって地質調査を行なった結果によれば、図-1に示すように、辛皮ずい道が風化の進んだ葉片状じゃ紋岩、普甲ずい道が塊状じゃ紋岩となっている。

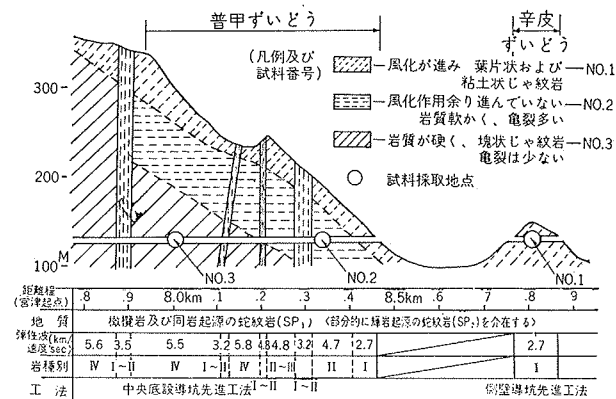


図-1 地質縦断面図

特徴	土色		2mm以下粒径分布					膨張度
	風化部分	岩石部分	通過%	>0.2	0.02~	0.002~	>	
No.1 粘土状および葉片状じゃ紋岩 かなり軟質 指に屈感多	明緑灰色 7.5GY ₂	マトリックス 暗青灰色5B ₂ [*] じゃ紋様青灰色 10BG ₂ [*] 明オリブ灰色 5GY ₂ [*]	88.6	50.2	17.7	9.4	27.7	1.29
No.2 葉片状および塊状じゃ紋岩 軟質 指に屈感あり	明緑灰色 7.5GY ₂	マトリックス青黒色 5BG ₂ [*] ・じゃ紋 様緑灰色10G ₂ [*]	20.2	46.9	29.9	10.6	22.6	1.25
No.3 塊状じゃ紋岩 一部葉片状じゃ紋岩 硬質 ガラガラした感じ	明緑灰色 7.5GY ₂	マトリックス青黒色 5BG ₂ [*] ・じゃ紋 様緑灰色10G ₂ [*]	13.2	61.7	17.9	9.2	11.2	1.05

表-1 供試試料の特徴

しかし、後者において、塊状じゃ紋岩は単独で1つの岩帯として存在するのではなく、塊状じゃ紋岩の相互の間隙を風化の進んだ葉片状じゃ紋岩が縫うように脈状に入っていた。

今回の実験には、弾性波速度が異なり、風化の程度の異なる3種のじゃ紋岩を供試した。すなわち、風化の程度がかなり進んだ葉片状のもの(No. 1)、部分的にしか風化していない塊状のもの(No. 3)、以上の中間的なもの(No. 2)を採取した。供試した試料の土色および2・3の特徴は表-1に示すとおりである。

3. 風化部分の構成鉱物の同定

3.1. はじめに

ずい道掘削時に発生する膨張性土圧を考える場合、第1章で述べたように、まず第1に、モンモリロナイトに代表されるような粘土鉱物あるいは構成鉱物自身の吸水膨張による膨張性土圧か否かを判定する必要がある。

そこで、試料の2mm以下画分を採取し、構成鉱物の種類の判定(同定)を行なった。

3.2. 実験項目と実験方法

(1) X線分析 分析装置: 島津製作所製の自記X線回折装置(GX-3B型)。測定条件: CuK α (Ni), 40KV, 20mA, 2°/min, 試料調整: 風乾土を乳鉢で粉碎し、0.2mm以下を無方位試料とした。

(2) 示差熱分析 分析装置: 島津製作所製の自記示差熱分析装置(DT-2A型)。測定条件: 中性物質 α -Al₂O₃, 雰囲気大気中。試料調整: X線分析の場合と同様

(3) 赤外線吸収スペクトル分析 分析装置: 島津製作所製の赤外分光光度計(IR-27G型)。測定方法: プリズム NaCl。試料調整: KBr法による。

(4) 電子顕微鏡観察 分析装置: 日本電子製スーパーペースコープ(JEM30B型)。測定条件: 電子加速電圧30KV。試料調整: 薄い懸濁液を作成し、これをカーボン蒸着したコロジオン膜上にのせ、風乾後検鏡した。

3.3. 実験結果と考察

鉱物の同定結果を表-2に示す。

表-2に示したように、供試試料の粘土分を構成する粘土鉱物の大部分は、No. 1・No. 2ではクリソタ

試料	構成鉱物		
	主要粘土鉱物	その他の粘土鉱物	その他の鉱物
No. 1	クリソタイル	クロライト	加水石こう・滑石
No. 2	クリソタイル	クロライト	加水石こう・滑石
No. 3	アンチゴライト	クロライト	クリソタイル

表-2 試料の構成鉱物

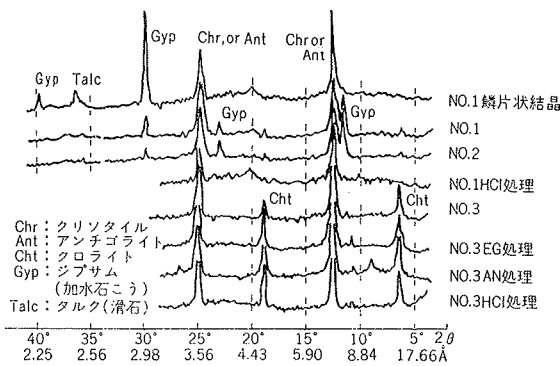


図-2 試料のX線回折曲線

イル, No. 3 ではアンチゴライトであった。また, 粘土鉱物の一部分はクロライトであるが, No. 1・No. 2 ではその量はわずかであった。さらにその他の一次鉱物として, No. 1・No. 2 は加水石こうと滑石を含んでいた。

以上の結果によれば, いずれの試料にも膨潤性を示すモンモリロナイトなどの粘土鉱物は含まれず, 粘土鉱物自身による吸水膨張が原因となる膨張性土圧の発生は考えられなかった。

以下, これらの粘土鉱物および一次鉱物の同定経過を説明する。

まず, 試料のX線回折曲線を図-2に示す。いずれの試料とも 7.22 Å・3.64 Å に大きなピークが見られ, これらのピークは塩酸(HCl)処理で消失しなかった。これらのピークはじゃ紋岩の風化によって生成した粘土鉱物クリソタイル・アンチゴライト(これらをじゃ紋石とも言う)のピークと思われるので, その判定は, 後述のように, X線分析以外の方法で行なった。

また, No. 3に顕著で No. 1・No. 2にもわずかに見られる 4.77 Å・14.24 Å のピークは塩酸処理・硝酸アンモニア(AN)処理あるいはエチレングリコール(EG)処理しても, 消失または移動しないため, 非膨潤性クロライトのピークと判定される。

そして, No. 1・No. 2の 7.75 Å・3.89 Å および 3.03 Å のピークは加水石こうと思われる。そこで確認のため, No. 1・No. 2のじゃ紋石の表面に付着している白色鱗片をはいで分析したところ, 3.03 Å・2.27 Åにピークがあらわれ石こうの存在を確認した。さらに, 滑石の2.47 Åのピークも新たにあらわれた。

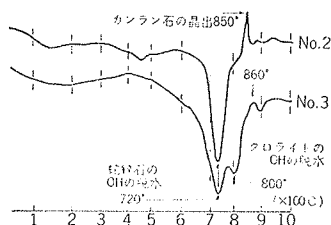


図-3 試料の示差熱曲線

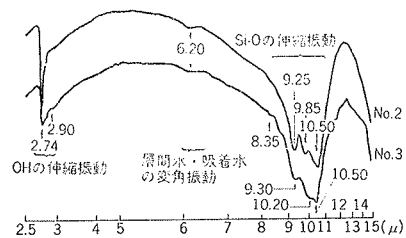


図-4 試料の赤外線吸収スペクトル

つぎに, 示差熱分析・赤外線吸収スペクトル分析について述べる。No.1・No. 2はX線分析の結果, 構成鉱物は同一であると判定されるので, No. 1を省略して, No. 2とNo. 3とについて説明する。

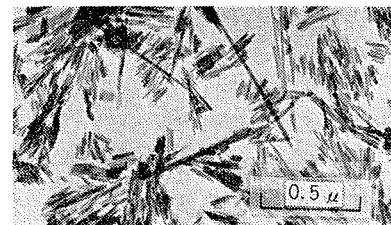
図-3に示す示差熱曲線には, 両試料ともじゃ紋石族の粘土鉱物の存在を裏付けるOHの脱水による吸熱ピークが720°Cに, カンラン石の晶出による発熱ピークが850°C付近に見られた³⁾。また, No. 3については, 上記のピーク以外に800°CにクロライトのOHの脱水による吸熱ピークも見られた。

赤外線吸収スペクトルは図-4に示す。両試料では, 主に 8 μ~13 μの間に結晶構造中の Si-O の伸縮振動による吸収に明確な差が認められる。すなわち, No.2はじゃ紋石のクリソタイルの吸収のみ⁴⁾, No. 3はじゃ紋石のアンチゴライトとクロライトの吸収が重複して見られる。

そして, 電子顕微鏡写真の代表例を写真-2に示す。



No. 1
×25000



No. 2
×25000



No. 3
×10000

写真-2 試料の電子顕微鏡写真

No. 1・No. 2 では針状結晶のクリソタイルが大半を占めている。No. 3 ではクリソタイルがわずかに、棒状結晶のアンチゴライトが多量に含まれている。さらに、薄片状のクロライトも認められた。

4. 風化部分の化学的・物理的性質の検討

4.1. はじめに

前章で、今回のじゃ紋岩地帯の場合には、粘土鉱物自身の吸水膨張は膨張性土圧の発生に関与していないことが明らかになった。しかし、じゃ紋岩の施工記録によると、その異常な膨張性土圧が、雨水・融雪水あるいは湧水などにより土中水量が著しく多くなったときに、発生している⁵⁾ので、第1章に示した膨張性土圧の発生原因(2)「地層の破壊と塑性変形」と関連して、風化部分の水に対する性質を知るために、2・3の化学的、物理的性質を検討した。

4.2. 実験項目と実験方法

(1) 水素イオン濃度指数(pH) H₂Oあるいは1NK Clでそれぞれ10倍に希釈し、ガラス電極で測定する。

(2) 陽イオン交換容量(CEC) 試料に吸着している陽イオンを酢酸アンモニウムで置換し、置換した全アンモニウム量をホールモール法で測定する。

(3) 交換性陽イオン量 (2)において、酢酸アンモニウムで抽出されてきた陽イオンを、Ca・Mg イオンについては EDTA によるキレート滴定で、Na・K イオンについては蛍光分析で測定する。

(4) 活性鉄酸化物量 ハイドロサルファイトで還元し、EDTA とキレートを形成した鉄をO-フェナントロリンで比色定量する。

(5) コンシステンシー試験 JIS 法に準じる。

4.3. 実験結果と考察

試料の化学的性質を表一3に示す。

試料の pH は9付近にあり、土の雰囲気はアルカリ性にあるため、粘土粒子界面にはマイナス荷電のみが存在し、粒子間に正と負の荷電による電気的結合はなく、粒子相互は反発しやすい状態にあると考えられる。

また、陽イオン交換容量は低い値を示した。一般に、この容量が大きい程、土の親水性・粘着力あるいは可

項目 試料	pH		交換性陽イオン(me/100g)					CEC (me/100g)	活性鉄(%)
	H ₂ O	KCl	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	計		
No.1	9.2	8.9	4.7	0.8	0.3	0.1	5.9	6.2	0.37
No.2	9.7	9.6	4.1	1.2	0.3	0	5.6	5.8	0.41
No.3	8.8	8.4	1.1	0.2	0.3	0.1	1.7	1.8	0.37

表一3 試料の化学的性質

塑性などが大きくなると言われており、3試料とも、粘着力・可塑性などに乏しいと考えられる。

交換性陽イオンについては、その絶対量は少ないが相対的に Mgイオンに富んでいる。これはじゃ紋岩が Mg に富んだ地帯に産出することからうなずける。

そして、活性鉄酸化物の量も3試料とも少なく、活性酸化物による粒子と粒子の結合は期待できない。

以上のような粘土粒子あるいは土粒子の界面化学的性質から判断して、3試料とも可塑性・粘着力などに乏しく、かつ、土粒子間の結合が弱いために、雨水・融雪水あるいは湧水などにより水が供給された場合、容易にセン断破壊され、液状化しやすいと予想される。

つぎに、0.2mm 以下の風化部分についてのコンシステンシー試験結果を述べる。

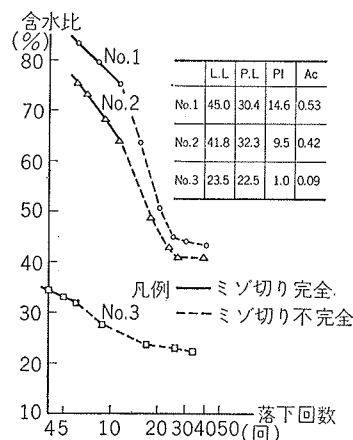
その際、塑性限界は JIS 法で測定可能であったが液性限界は JIS 法では測定できなかった。その理由を以下に考察する。塑性限界の場合、針状もしくは棒状の粘土粒子が測定中に再配列し、平行に配向するためと土粒子間の毛管張力とにより塑性限界が測定できたと推定した。一方、液性限界の場合、落下回数が10回以下のところでは含水比が高くミゾ切りの抵抗が少ないために測定できたが、落下回数10回以上のところでは含水比が低くなり、粘土粒子の配列がランダムであり、ミゾ切りの抵抗が大きく、かつ粘土粒子の界面化学的性質から粘着力に乏しいために、ミゾ切りができなかったと考察した。

そこで、ミゾ切りの方向に最大限粘土粒子を再配列するように試料調整して完全なミゾ切りを得るように努め、流動曲線を求めた。この際にも、図一5に示すように、完全な流動曲線が得られなかったので、落下回数25回付近の含水比から液性限界を求めた。

上記の方法で求め

たコンシステンシーの試験結果は、図一5の中に示した。

3試料とも非常に塑性指数が低く、当然のこととして粘土の活性度も低い。ところで、一般に土の状態は水分量の変化によって、固体→半固体→塑性→液性へと移行するが、今回の試料の自然含水比は塑性限界よりわず



図一5 試料の流動曲線とコンシステンシー

かに低い値であるので、風化部分は、わずかな水分増加によって、セン断破壊され、容易に液化しやすい状態にあると推定される。このことは、先の化学的性質から予想されたことと一致している。

5. 岩石部分中の構成鉱物の配列状態

5.1. はじめに

第4章で、風化部分の水に対する性質を検討した結果、風化部分は、わずかな水分増加によって、容易にセン断破壊され、液化しやすい状態にあることが判明している。しかし、風化部分がセン断を受けやすいか否かを判定するには、風化部分の水に対する性質ばかりでなく、風化部分に含まれる粘土粒子の配列状況も検討する必要がある。

一般に、粘性土がセン断を受ける際、棒状あるいは板状の粘土粒子はセン断面近辺でセン断方向と平行に再配列すると言われている。その再配列時に発生する粒子間の抵抗がセン断抵抗に関与している。

今回のじゃ紋岩については、第3章で明らかになったように、主要粘土鉱物のクリソタイル、アンチゴライトはそれぞれ針状・棒状を呈しており、これらの形状の粘土粒子の配列状況は、特にセン断時に大きな要因になってくると思われる。

ところで、風化した部分の粒子の配列を測定することは困難であったが、幸いなことに、先の実験の供試した風化部分に隣接する部分風化した岩石中には、じゃ紋石のクリソタイルやアンチゴライトが含まれていた。これらの鉱物の配列状況は風化過程においても保持されると考えられるので、岩石中の粒子の配列を測定して風化部分の粒子配列を推定することにした。

5.2. 実験方法

No. 1 では、1方向について、No. 2・No. 3では、じゃ紋岩のじゃ紋様の流れの方向に垂直な方向と平行な方向について薄片を作成し、偏光顕微鏡で検鏡した。

5.3. 実験結果と考察

No. 1 は、ほぼ完全に風化が進み、じゃ紋石化している。No. 2・No. 3 も風化が進み、かなりじゃ紋石化しているが、所々にじゃ紋岩の基岩と思われる輝石を含んでいた。また全試料について、輝石同様じゃ紋岩の基岩と思われるカンラン石の風化残渣の磁鉄鉱が、点在していた。

以下、各試料のじゃ紋石化した部分について述べる。No. 1, No. 2では、粘土鉱物クリソタイルの粒子集合体が繊維状に(写真-3)、No. 3についてはアンチゴライトもしくはクロライトの集合体が柵状に(写真-4)それぞれ観察された⁶⁾。

つぎに、No. 2・No. 3 について、垂直方向薄片と水平方向薄片とで構成粒子の配列状態を比較する。垂直方向では、ある方向への流れ模様が観察され、このことは、クリソタイルあるいはアンチゴライトの粘土粒子が一定方向に配向していることを示唆している。その代表的写真は写真-5、-6に示した。これに対して、平行方向の薄片については、垂直方向薄片に認められた粒子配列の規則性は認められず、写真-7に示されるように、結晶集合体はランダムに配列していた。

すなわち、じゃ紋岩中のじゃ紋石化した部分の粘土鉱物の粒子は、ランダムに配列しているのではなく、

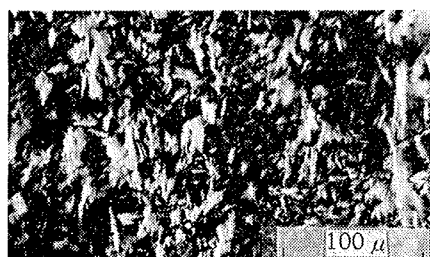


写真-3
No. 1
×150
クロスニコル

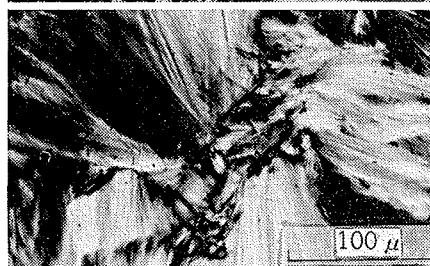


写真-4
No. 3
(平行方向)
×150
クロスニコル

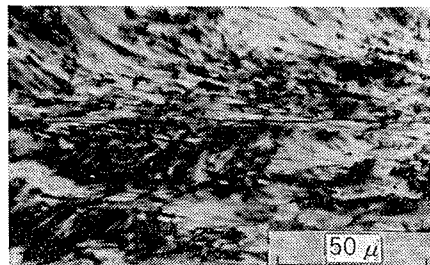


写真-5
No. 3
(垂直方向)
×30
クロスニコル

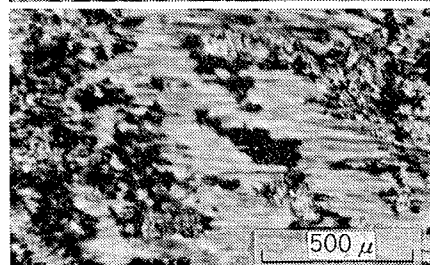


写真-6
No. 2
(垂直方向)
×30
クロスニコル

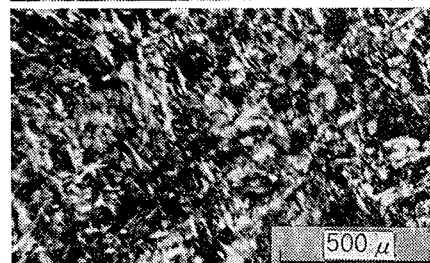


写真-7
No. 2
(平行方向)
×30
クロスニコル

一定方向に配向（オリエンテーション）しており、その方向はじゃ紋岩のじゃ紋様の流れの方向と一致していることが判明した。

構成粒子が一定方向に配向している岩石が風化する場合には、その粒子の配列状況をそのまま保持しながら、配向している方向に風化部分が発達して行くと考えられる。言い換えれば、じゃ紋様の流れの方向にそって脈状に発達している風化部分の粘土粒子は、じゃ紋様の流れの方向と同一方向に配向していると判断した。

以上のような粒子の配列状態を持つじゃ紋岩の風化部分がセン断を受ける場合、粒子の配向方向と平行にセン断破壊が容易におこることと推定した。

実際に、塊状じゃ紋岩地帯の普甲ずい道の側壁掘削時に、肌落ちが、じゃ紋様の流れの方向に各所で発生したことは、上記の推定結果の妥当性を示している。

6. まとめ

じゃ紋岩地帯のずい道工事で発生する独特の膨張性土圧の原因として、(1)「構成鉱物の吸水膨張」(2)「じゃ紋岩中の風化部分のセン断破壊による地層の流動」の2つが想定されるので、その原因を究明すべく、辛皮・普甲両ずい道のじゃ紋岩地帯を対象として、土質化学的検討を行なった。

その結果、以下のことが判明した。

(1) 原因(1)と関連して、じゃ紋岩の風化によって生成した粘土鉱物の同定を行なった結果、主要粘土鉱物は針状もしくは棒状のクリソタイル・アンチゴライトであり、いずれの試料にも膨潤性を示すモンモリロナイトなどの粘土鉱物は含まれないので、原因(1)による膨張性土圧の発生はないと判定した。

(2) 原因(2)と関連して風化した部分の水に対する性質を検討した。その結果、粘土粒子あるいは土粒子の界面化学的性質から、3試料とも土粒間の結合も弱く可塑性・粘着力などに乏しく、そして塑性指数も低かったことなどから、わずかな水分増加によって、風化部分は容易にセン断を受けて液状化を呈しやすいたことが判明した。

(3) 原因(2)と関連して、風化部分中での針状・棒状の粘土粒子の配列状態を検討した結果、粘土粒子はじ

ゃ紋様の流れの方向と同一方向に配向していると判断した。この風化部分では、粘土粒子の配向方向すなわちじゃ紋様の流れの方向と平行にセン断される場合がもっともセン断抵抗が少ないために、この方向にセン断破壊が容易におこることが判明した。

以上のことから、じゃ紋岩地帯に発生する膨張性土圧の発生原因は原因(2)「じゃ紋岩中に発達した風化部分のセン断破壊による地層の流動」であると判断した。

なお、今回は試料の都合で、力学的性質については検討できなかったが、今後、じゃ紋岩地帯のずい道工事における設計施工の技術を一層進歩させるために、じゃ紋岩の工学的性質に対する土質化学的性質の関係を明確にして行く予定である。

なお、本報文の内容は1973年6月に開催された土質工学会第8回研究発表会にも報告している。

謝辞

本研究にあたって、試料採取時には大林組宮津工事事務所の方々に多大な御便宜を計っていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 後藤 巖：神居ずい道の地圧測定，トンネル工事講演集 第4集，79～92
- 2) 足立貞彦他：紅葉山線新登川トンネルのじゃ紋岩区間の施工法と膨張土圧の測定結果について，第5回トンネル工学シンポジウム，51～67
- 3) Baratholomew Naay and George T. Faust: Serpentine; Natural Mixtures of Chrysotile and Antigorite, American Mineralogy, Vol. 41, 817～838 (1956)
- 4) G. W. Brindley and J. Zussman: Infra-red Absorption Data for Serpentine Minerals, American Mineralogy, Vol. 46 185～188 (1959)
- 5) 鈴木和也他：じゃ紋岩トンネルと吹付コンクリート(上)(下)，鉄道土木，Vol. 12-1・2, 30～33・96～100 (1970)
- 6) Paul F. Kerr: Optical Mineralogy (1959)