

ずい道工事における膨潤性泥岩の土質化学的研究

喜 田 大 三
辻 博 和

Geochemical Research on Swelling Mudstone Encountered in Tunnel Construction

Daizo Kita
Hirokazu Tsuji

Abstract

Excessive earth pressure occasionally causes much damage during tunnel driving in a mudstone belt. The geochemical research reported herein was conducted to study the cause of such pressure. The following results were obtained: (1) montmorillonite was the dominant clay mineral and its content was 22% in sample No. 1, 30% in No. 2, 37% in No. 3, and 74% in No. 4, (2) the montmorillonite in No. 1 and No. 2 was Na-montmorillonite, while that in No. 3 and No. 4 was Ca-montmorillonite, (3) the swelling pressures measured were 27.8 t/m² for No. 1, 55 t/m² for No. 2, 12.5 t/m² for No. 3 and 35 t/m² for No. 4. Finally, it is suggested that the excessive earth pressure in a mudstone belt may be attributed to "swelling of montmorillonite" and that the degree of earth pressure is affected not only by the content of montmorillonite, but also the kind of exchangeable cation adsorbed by the montmorillonite.

概 要

第三紀の泥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十分に解明されていない。そこで、4種の泥岩を対象として、土質化学的性質および吸水時の膨潤特性を検討した。その結果以下のことが判明した。

(1) 主要粘土鉱物はモンモリロナイトであり、その含有量はNo.1で22%、No.2で30%、No.3で37%、No.4で74%である。(2) No.1、No.2のモンモリロナイトはNa型モンモリロナイトであり、No.3、No.4はCa型モンモリロナイトである。(3) 吸水時に発生する最大膨潤圧はNo.1で27.8 t/m²、No.2で55 t/m²、No.3で12.5 t/m²、No.4で35 t/m²である。

以上のことから、泥岩地帯に発生する膨張性土圧は「モンモリロナイトの吸水膨張(膨潤)」に由来し、その程度はモンモリロナイト含有量ばかりでなく、モンモリロナイト粒子界面に吸着している陽イオンの種類によって大きく影響されると判定した。

1. まえがき

ずい道工事においては、地山が内空へ押し出してきて内空断面が縮小するという謂ゆる「地山の膨張現象」が発生することが多い。その際、支保工あるいは覆工が存在する場合、膨張性土圧が発生する。具体的には、切羽の押し出し、盤ぶくれ・支保工等のはり出し挫屈等の事故となり、工事の施工上大きな問題となる。

この地山の膨張現象を代表的発生原因別に分類し、表一に示す。著者らは、先に風化じゃ紋岩を対象にして土質化学的手法を用いその膨張性土圧の発生機構を検討

発 生 原 因	発 生 地 帯
(1) モンモリロナイト等の構成鉱物の吸水膨脹	第三紀の地層で褶曲帯に存在する軟岩地帯 温泉付近の温泉余土地帯
(2) 地層の破壊と塑性変形	風化した紋岩・結晶片岩等の変質帯
(3) 弾性ひずみエネルギーの解放	造山帯にある硬質砂岩・花崗岩地帯

表一 地山の膨張現象の分類

し、その発生原因は「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」すなわち表中の原因(2)「地層の破壊と塑性変形」であることを究明している¹⁾。原因(3)「弾性ひずみエネルギーの解放」による膨張は山

はねに代表されるもので、清水トンネルの掘削に際し現われたのは有名である。また、第三紀の軟岩地帯あるいは温泉近辺の温泉余土地帯で発生する地山の膨張は、土中に含有するモンモリロナイト等に起因し、その原因は「モンモリロナイト等の構成構物の吸水膨張」によるものとされている²⁾。

ところで、第三紀の軟岩でモンモリロナイトを含む土であっても、その地山の膨張程度は多種多様である。たとえば、支保工における膨張性土圧の測定結果でも、米坂線宇津トンネルで1.0 t/m²、信越線米山トンネルで10 t/m²、また北陸本線頸城トンネルでは150 t/m²と報告されている。²⁾ 勿論、膨張性土圧の発生程度は、周辺地山の力学的状態、地下水の状態、掘削方法の種類等によっても大きく影響されるので一概には断言できないが、単にモンモリロナイトを含有する土であるからと言って、膨張性土圧が発生するとは言い難い。

そこで、北越北線鍋立山トンネルおよび上越新幹線魚沼トンネルにおける第三紀の泥岩を対象にして、土質化学的性質および吸水時の膨潤特性の検討を行いこれらの土の膨張性土圧の発生機構を究明しようとした。

2. 供試試料

試料としては表-2に示す4点を供試した。試料の自然含水比は14~28%の範囲にあり、各試料とも塑性限界付近の値を示していた。乾燥密度に試料間の違いがみられ、No.1~No.3で1.65~1.77 g/cm³であるのに対してNo.4では1.50 g/cm³と低い値を示した。

なお、各試料の採取地点における地山の膨張程度の概要は以下の通りである。No.2では、膨大な膨張性土圧が発生しその盤ぶくれ量は50~100 cm/4週間であり、No.4でも、支保工のほり出しが顕著で、その盤ぶくれ

試料番号	No.1	No.2	No.3	No.4	
採取ずい道	北越北線鍋立山ずい道		上越新幹線魚沼ずい道		
採取地層	新三紀 西山~椎谷層	新三紀 寺泊層	新三紀	新三紀	
岩質	凝灰質泥岩	凝灰質泥岩	凝灰質泥岩	黒色泥岩	
土色	2.5GY 5/1 オリーブ灰色	5GY 3/1 暗オリーブ灰色	5GY 6/1 オリーブ灰色	10G 7/1 緑黒色	
自然含水比 (%)	13.7	20.6	15.2	28.1	
真比重	2.69	2.72	2.63	2.67	
湿潤密度 (g/cm ³)	2.01	1.99	1.97	1.95	
乾燥密度 (g/cm ³)	1.77	1.65	1.71	1.52	
間隙比	0.52	0.65	0.54	0.75	
飽和度 (%)	70.9	86.2	74.0	100.0	
コンシ テンシー	液性限界(%)	95.2	171.1	57.7	126.7
	塑性指数	81.8	151.1	39.6	97.6
粒度 分布	砂分(%)	7	1	17	2
	シルト分(%)	53	45	43	25
	粘土分(%)	40	54	40	73
	(2μ以下)	(29)	(48)	(37)	(62)
一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	48.6	14.6	30.3	9.9	

表-2 供試試料の一般的性質

量は50~60 cm/4週間であった。また、No.1では盤ぶくれ量が7~10 cm/4週間であり、No.3では地山の膨張がほとんど認められなかった。

3. 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等に代表されるような構成鉱物自身の吸水膨張による膨張性土圧か否か判定する必要がある。そこで試料中の構成鉱物の同定(種類の判定)を行った。

3.2. 実験項目と方法

(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: Cu, K α (Ni), 40 kV, 20 mA, 2°/min。試料調整: 風乾土を乳鉢で粉碎し、0.2 mm以下を定方位試料とした。

(2) 電子顕微鏡観察 分析装置: 日本電子製スーパーコープ(JEM 30B型)。測定条件: 電子加速電圧30 kV。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ウム膜上にのせ、風乾後検鏡した。

3.3. 実験結果と考察

試料のX線回折図を図-1に示す。また図中にはエチ

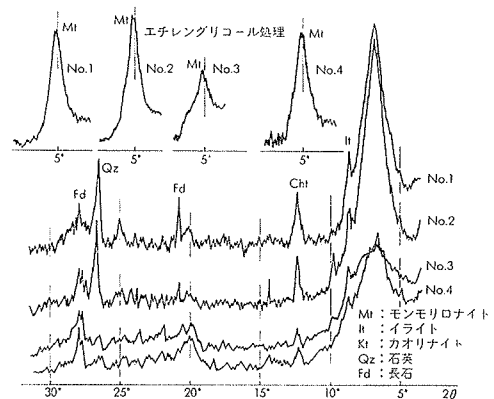


図-1 試料のX線回折曲線

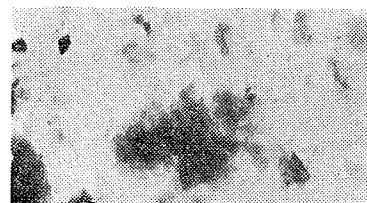


写真-1
No. 2の電子顕微鏡
写真 ×5,000
(縮毛様を呈した無定
形のモンモリロナイ
トが多数観察される)



写真-2
No. 4の電子顕微鏡
写真 ×5,000
(縮毛様を呈した無定
形のモンモリロナイ
トが多数観察される)

レングリコール (EG) 処理した試料の回折図も併記した。

以上のX線回折図から、四試料とも粘土鉱物としてモンモリロナイト、イラスト、カオリナイトを、一次鉱物として石英・長石を含有していることが判明した。

つぎに、電子顕微鏡観察を実施した結果、写真一1・2に示すように、4試料ともモンモリロナイトの綿毛様を呈した無定形の集合体が多数観察された。このことから、4試料とも主要粘土鉱物はモンモリロナイトであると判定した。

したがって、4試料ともモンモリロナイトの吸水膨張(膨潤)が原因となり、膨張性土圧が発生することが予想される。

4. 土質化学的性質の検討

4.1. はじめに

粘土鉱物モンモリロナイトは盤状の結晶構造を有し、普通地盤中に含まれるカオリナイト・ハロイサイトらの粘土鉱物に比べて非常に大きな負荷電を有している。そして水が供給されると、盤状の結晶層間に毛管力で吸水してゆく過程で、粘土粒子界面に負のジータ電位が発生し、盤状粘土粒子相互は反発し合って膨潤する。

そこで、この膨潤の大小に影響すると考えられるモンモリロナイトの含有量さらにはそのモンモリロナイト粒子界面の物理化学的性質等を検討した。

4.2. 実験項目と方法

(1) 膨潤度 毛管湿潤法で、粉体乾土1g当りの最大吸水量を測定する。

(2) 水素イオン濃度指数 (pH) H₂O で土を10倍に希釈してガラス電極で測定する。

(3) 陽イオン交換容量 (CEC) 粘土粒子に吸着し

試料番号		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
膨潤度 (ml/g)		2.16	2.91	1.26	2.50
pH		9.8	9.8	6.3	7.9
水陽イオン溶解性量 (me/100g)	Na	7.5	13.0	0.1	12.0
	K	0.2	0.2	0.1	0.2
	Ca	0.3	0.7	0.3	0.3
	Mg	0.3	0.6	0.2	0.2
	total	8.3	14.5	0.7	12.7
交換イオン性量 (me/100g)	Na	7.7	12.4	0.8	7.7
	K	2.1	1.3	1.1	2.0
	Ca	7.3	6.3	16.7	52.9
	Mg	2.2	1.6	4.5	7.7
	total	19.3	21.6	23.1	70.3
陽イオン交換容量 (me/100g)		24.7	33.2	38.6	79.9
ESP (両イオン交換率%)		31.2	37.3	2.1	9.6
比表面積 (m ² /g)		160	215	280	536
モンモリロナイト含有量(計算値%)		22	30	37	74

表一3 試料の土質化学的性質

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測定する。

(4) 交換性陽イオン量 CEC 測定に際し、置換されてきた陽イオン量を測定する。

(5) 水溶性陽イオン量 土中水中に含まれている陽イオン量を測定する。

(6) 比表面積 土粒子が110°C グリセロール雰囲気中で、安定にグリセロール単分子層を吸着することを利用して、比表面積を測定する。

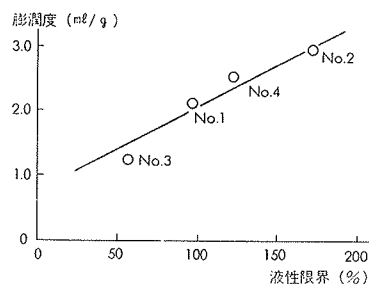
4.3. 実験結果と考察

実験結果を表一3に示す。

(1) 膨潤度

土の膨潤性の大小を示す指標となる膨潤度は、No. 1が約2.2, No. 2が約2.9, No. 3が約1.5, No. 4が約2.5であった。このように、モンモリロナイトを含有する4試料でもその膨潤性は大きく相異していた。

なお、Dumbleton³⁾ や Dakshanamurthy⁴⁾ らは土の膨潤性の程度を土の液性限界の大小から分類しており、今回の4試料についても、図一2に示すように、膨潤度は液性限界と非常によく対応している。



図一2 液性限界と膨張度との関係

(2) モンモリロナイト含有量

モンモリロナイト含有量の算出はつぎに述べる2方法で行った。粘土鉱物は一般に陽イオン交換能を持っている。そしてこの容量は粘土鉱物の種類によって大きく異なり、特にモンモリロナイトでは高い値を示す。先章で明らかになったように、試料中の主要粘土鉱物がモンモリロナイトであることから、試料の陽イオン交換容量(CEC)はモンモリロナイトによるものと考えられる。そこで、試料No. 2およびNo. 4の1μ以下の粘土を採取し、これを純粋のモンモリロナイトとしてそのCECを測定し、この値を標準値として、試料中のモンモリロナイト含有量を算出した。

また、粘土鉱物の比表面積もその種類によって大きく異なり、特にモンモリロナイトでは高い値を示す。そこでCEC法と同様にして標準値を求め、試料中のモンモリロナイト含有量を算出した。

上記の2方法による算出結果は多少異なったが、ここでは両結果を平均して試料のモンモリロナイト含有量とした。

モンモリロナイト含有量はNo. 1で22%, No. 2で30%

%, No. 3 で 37%, No. 4 で 74% であった。

4 試料において、モンモリロナイト含有量と先の膨潤度との関係を検討すると、両者の間には対応関係は認められなかった。たとえば、No. 2 ではモンモリロナイト含有量が 30% でも膨潤度は約 2.9 と非常に大きいのにに対し、No. 4 では含有量が 74% と大きいにもかかわらず、膨潤度は約 2.5 と No. 2 に比較して低かった。

したがって、土中のモンモリロナイト含有量だけでは膨潤性の大小を判断することができないことが判明した。

(3) モンモリロナイトの界面化学的性質

モンモリロナイト粒子の界面に吸着している代表的交換性陽イオンは Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} イオンである。これらのイオンのうち、主要な交換性イオンは試料種によって大きく異なっていた。すなわち、No. 1 が Na^+ , Ca^{++} イオン、No. 2 が Na^+ イオン、No. 3・No. 4 が Ca^{++} イオンであった。

そこで、交換性の Na^+ イオンが陽イオン交換容量に占める割合 (ESP) を算出したところ、以下の通りであった。No. 1 が 31%, No. 2 が 37%, No. 3 が 2%, No. 4 が 10%。I. Shainberg ら⁵⁾によれば、ESP の値が 15% を超えると、モンモリロナイトの性状に Na^+ イオンの影響が顕著に現われるとされている。このことから、No. 1, No. 2 のモンモリロナイトは Na 型モンモリロナイト、No. 3, No. 4 は Ca 型モンモリロナイトと推定した。ただし No. 4 については、ESP の値が 10% であり、かつ水溶性陽イオンとして Na^+ イオンをかなり含んでいるので、やや Na 型モンモリロナイトに近いものと思われる。

一般に Na 型モンモリロナイトは Ca 型モンモリロナイトに比べて、水中における負のジータ電位が高いため、粘土粒子の水和力・保水力が大きい。したがって、No. 1 および No. 2 は Na 型モンモリロナイトを含んでいるため、そのモンモリロナイト含有量自体は低いけれども、高い膨潤度を示したものと判定した。

なお、Na 型モンモリロナイトを含む No. 1 と No. 2 あるいは Ca 型を含む No. 3 と No. 4 というようにモンモリロナイトの型ごとに比較すれば、当然のこととして膨潤度はモンモリロナイト含有量に対応していた。

5. 自然状態にある試料の膨潤特性

5.1. はじめに

前章で、土の膨潤性にはモンモリロナイト含有量ばかりでなくモンモリロナイト粒子界面の物理化学的性質が大きく影響していることが判明した。ところで、自然状態における土の膨潤現象は、周辺拘束された場合には膨潤圧の発生として、また周辺が解放された場合には膨潤

体積の増大として現われる。そこで、本章では、自然状態の土について上記の膨潤特性を測定した。

5.2. 吸水膨潤圧および膨潤体積測定法

自然状態の土塊から 3 cm × 3 cm × 3 cm の供試体を切り出し、写真-3 に示す装置で膨潤特性を測定した⁶⁾。

側方拘束したセル中で試料に底部から毛管湿潤法で吸水せしめ、上方へだけの膨張を自由になるようにして膨潤体積を、そして上方から荷重を加え常に平衡状態を保たせるようにして膨潤圧をそれぞれ測定した。

5.3. 実験結果と考察

吸水膨潤圧の測定結果を図-3 に示す。

いずれの試料についても、吸水時間とともに膨潤圧は増大し、一定時間後に平衡値 (最大値) に達した。その際、この最大値に達する経緯は 2 つに大別された。すなわち、No. 3, No. 4 については吸水 10 時間まで膨潤圧は急激に増大し、ほぼ 1 日で最大値に達した。これに対し No. 1, No. 2 については吸水 2 日まで途々に増大し、ほぼ 3 日で最大値に達した。先章で明らかになったように No. 1, No. 2 のモンモリロナイトは Na 型モンモリロナイトであり、No. 3, No. 4 は Ca 型であることから、この違いが吸水時間～膨潤圧の関係における経緯に影響したものと考えられる。

吸水膨潤体積の測定結果は特に図示しないが、やはり No. 1, No. 2 と No. 3, No. 4 とではその発生経緯が異なっていた。その際、最大値に達する吸水時間は膨潤圧の測定時よりも長く、No. 1, No. 2 で約 7 日、No. 3, No.

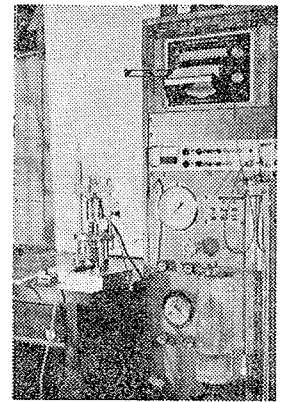


写真-3 膨潤特性測定装置

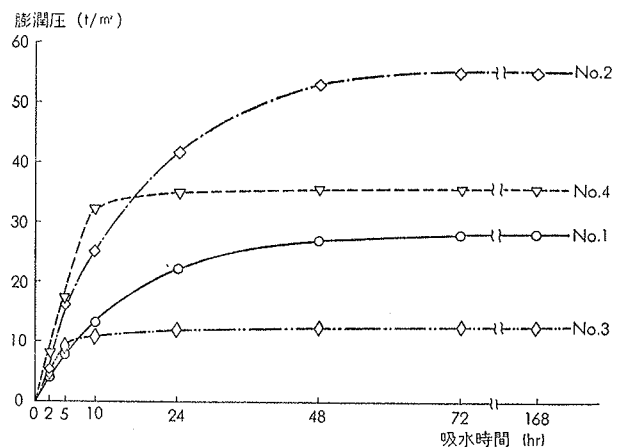


図-3 吸水時間～膨潤圧曲線

4で約3日であった。

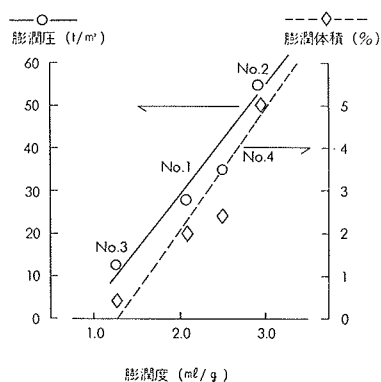
つぎに、吸水時における最大膨潤圧および最大膨潤体積を試料別に比較するために、吸水7日後の値を表一4に示す。

試料番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
最大膨潤圧	27.8 t/m ²	55.0 t/m ²	12.5 t/m ²	35.6 t/m ²
最大膨潤体積 %	2.0%	5.0%	0.4%	2.5%

表一4 試料の最大膨潤圧および最大膨潤体積%

表から明らかのように、最も膨潤性が大きいのは No. 2 であり、膨潤圧として 55 t/m²、膨潤体積%として 5.2% を示した。そして最も膨潤性が小さいのは No. 3 であり、膨潤圧として 12.5 t/m²、膨潤体積%として 0.4% を示した。

これらの膨潤圧および膨潤体積%の大小は、図一4に示すように、前章で測定した膨潤度とほぼ対応していた。ただし、No. 4 については、膨潤度が高いにもかかわらず、膨潤圧および膨潤体積%は他の試料と比較して相対的にやや低い値を示した。この原因は、第2章で述べたように、試料の初期状態の違いによるものと思われる。すなわち、他の試料の乾燥密度が 1.65~1.77 g/cm³ であるのに対して、No. 4 のそれは 1.50 g/cm³ と低い値を示していた。



図一4 膨潤度と最大膨潤圧あるいは最大膨潤体積%との関係

本章における膨潤圧および膨潤体積の測定結果と前章の内容を総合すると、自然状態の土の膨潤特性に関してつぎのように推察される。

吸水時に発生する膨潤圧あるいは膨潤体積は、含有する粘土鉱物モンモリロナイトの吸水膨張に由来し、その程度はモンモリロナイトの含有量ばかりでなく、モンモリロナイト粒子界面に吸着している主要な陽イオンの種類によって大きく影響される。その際、土の初期症状にも当然のこととして影響される。

6. まとめ

第三紀の泥岩地帯のずい道掘削時には、異常な膨張性土圧が発生し、支保工のはり出し・挫屈、盤ぶくれ等によって工事の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十分に解明されていない。そこで北越北線鍋立山トンネル (No. 1, No. 2) および上越新幹線魚沼トンネル (No. 3, No. 4) の4種の泥岩を対象にして、土質化学的性質および吸水時の膨潤特性等を検討した。その結果以下のことが判明した。

(1) 4試料とも主要粘土鉱物はモンモリロナイトであり、その含有量は No. 1 で 22%、No. 2 で 30%、No. 3 で 37%、No. 4 で 74% であった。

(2) モンモリロナイト粒子界面に吸着している陽イオンの種類と量を検討し、No. 1・No. 2 は Na 型モンモリロナイト、No. 3, No. 4 は Ca 型モンモリロナイトであった。

(3) 自然状態の土が吸水する際に発生する最大膨潤圧は No. 1 で 27.8 t/m²、No. 2 で 55 t/m²、No. 3 で 12.5 t/m²、No. 4 で 35 t/m² であった。

以上のことから、泥岩地帯に発生する膨張性土圧は、「含有する粘土鉱物モンモリロナイトの吸水膨張(膨潤)」に由来し、その膨張性土圧の程度はモンモリロナイトの含有量ばかりでなくモンモリロナイト粒子界面に吸着している主要な陽イオンの種類によって大きく影響されると判定した。

本研究にあたって、試料採取時には大林組松代工事事務所・幹線魚沼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) 喜田・辻: ずい道工事における風化じゃ紋岩の土質化学的研究, 大林組技術研究所報, No. 7, (1973), p. 146
- 2) 高橋他: トンネルにおける現象的土圧説, 鉄道技術研究報告, No. 770, (1971)
- 3) Dumbleton, M. S.: The Classification and description of Soil for Engineering Purpose, A Suggested Classification of the British System RRL report, (1968)
- 4) Dakshanamurthy, V. 他: A Simple Method of Identifying an Expansive Soil, Soil and Foundations, Vol. 13, No. 1, (1973)
- 5) Shainberg, I. 他: Studies on Na/Ca Montmorillonite Systems. 1. The Swelling Pressure, Soil Science, Vol. III, No. 4, (1971), p. 214
- 6) Alpan, I: An Aparatus for Mesuring the Swelling Pressure in Expansive Soil, Proc. International Conf. Soil Mech. Found. Eng. 4th. Vol. 1, (1957)