

膨張性泥岩の土圧予測について

日本鉄道建設公団東京支社 正員 井上 俊 隆
 ○ 大成建設(株) 技術研究所 正員 青 砥 宏

1. まえがき 新第三紀泥岩中にトンネルを掘削する例は、最近、特に裏日本地方に多く、大部分は膨張性土圧に遭遇している。

膨張性土圧の発生機構については未知な点が多いが、その原因として、①岩石中の膨張性粘土鉱物の吸水膨張②地山岩石のせん断破壊と軟弱化による粘塑性流動③平均主応力低下による体積膨張⁽¹⁾等がある。

押し出し現象あるいはこれを支保しようとする場合の土圧現象は、地山岩石の力学的性質と深い関連をもつものであるが、膨張性地山においては岩石の力学的性質を把握することが困難な場合が多い。すなわち力学試験に耐えうるサンプルのサンプリングが不可能、あるいは可能であってもそのサンプルが地山を代表するものとなり得ない場合があるからである。新潟県地方に広く分布する新第三紀泥岩類ではこのような例が多く、岩石の力学的性質からトンネル土圧性状を予測することは困難となる。そこで力学的性質にかわってトンネル土圧性状予測に寄与する因子を見出すことが必要となる。ここに、膨張性泥岩に遭遇した北越北線赤倉トンネルでの土圧予測に関する経過を述べる。赤倉トンネルにおいては、サンプリングおよび試験の容易さを考慮し、泥岩構成粒子の物理的性質、化学的性質に着目し、特に含有粘土鉱物、構成粒子の粒度、液塑性限界、C.E.C.の測定結果から土圧の概略予測を行って、膨張性泥岩部分のトンネル掘削を安全かつ経済的に行ったものであり、本文では赤倉トンネルでの調査結果を示すとともに、新潟県地方の新第三紀泥岩トンネルの土圧性状を概略予測する手法について論じるものである。泥岩試験法詳細については既報⁽²⁾を参照されたい。

2. 赤倉トンネルにおける泥岩物性とトンネル土圧 赤倉トンネルの地質は、椎谷層、西山層、灰爪層および魚沼層よりなり、このうち椎谷層、西山層、灰爪層で膨張性土圧に遭遇し工事は難渋した。特に椎谷層掘削時の土圧は強大であり、数度の縫返しを余儀なくされた。

図-1に地山強度比(一軸圧縮強度と土被り圧力の比)と土圧の関係を示した。図-1より、赤倉トンネルにおいては「地山岩石の一軸圧縮強度が低く土被り圧力が大きい程土圧が大きい」という一般通念⁽³⁾は適用できなかった。これは一軸圧縮強度が地山岩石の力学的性質を十分に代表しうるものでなかったことに原因があると思われる。この点が解決されれば、トンネル土圧を論じる上で有効な因子となるであろう。

以下に赤倉トンネルにおける泥岩の鉱物的、物理的、化学的物性とトンネル土圧の関係を紹介する。ここでいう全土圧とは、円型断面の支保工軸力測定値をもとに、支保工ピッチ、吹付けコンクリートの剛性を考慮して算出したものであり、ある程度の誤差を含んでいるものである。

泥岩粉砕物のX線回折解析(粉末法)および2μ以下の微粒部分のX線回折解析(定方位法)により、泥岩の主要鉱物の同定を行うとともに、特に粘土鉱物のおおまかな含有量比較を行った。(粘土鉱物同定に関する詳細について既報⁽⁴⁾を参照されたい。)表-1に各試料の含有粘土鉱物とそのおおまかな量比を示した。表-1において試料1, 2は椎谷層、試料3~10は灰爪

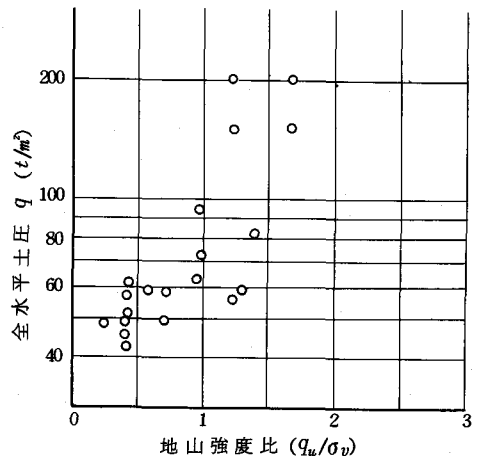


図-1 地山強度比と全水平土圧の関係(赤倉)

層、試料11は魚沼層であり、椎谷層では強大な膨張性土圧、灰爪層では膨張性ではあるが相対的に中程度の土圧、魚沼層では小さい土圧に遭遇している。赤倉トンネルにおいては、モンモリロナイト含有量が大きい泥岩部分程土圧が大きく、土圧性状も膨張性、押し出し性であった。

図-2に2 μ 以下の粒子の含有率と土圧の関係を示した。図-2よりわかるように、2 μ 以下の粒子の含有率 ρ と土圧の対数の関係は直線で近似しうる。X線回折解析結果より赤倉トンネル泥岩の主要粘土鉱物はモンモリロナイトであることがわかっている。また各粘土鉱物の粒径を考えあわせれば、2 μ 以下の粒子の含有率はモンモリロナイト含有率と密接に関連していると思われる。すなわち図-2からもモンモリロナイト含有率の高い泥岩程土圧が大きいことがわかる。

図-3は塑性指数 I_p と土圧の関係を示したものであるが、 I_p が高い程土圧は大きいようである。液性限界 w_L についても同様の関係が得られている。図-4は赤倉トンネル、北陸本線頸城トンネル、上越新幹線六日町トンネル、同・大沢トンネル、北越北線鍋立山トンネルの資料を塑性図にプロットしたものであるが、ほぼA-線と $I_p=0.984(w_L-17)$ の線の間位置している。

C.E.C.はモンモリロナイト含有量を表す1つの指標として導入したものであるが、ゼオライトやバーミキュライトあるいはアロフェン等の高C.E.C.鉱物が多量に含まれている試料については、C.E.C.からモンモリロナイト含有量を推測することは不可能となる。赤倉トンネル泥岩においても灰爪層の試料でゼオライトの存在が確認されているが、その量は少く問題とならない。すなわちC.E.C.は赤倉トンネル泥岩の鉱物組成(特にモンモリロナイト含有量)を反映した値となりうると思われる。図-5はC.E.C.と土圧の関係を示したものであるが、C.E.C.が大きい程土圧が大きいことがわかる。参考までに泥岩構成粒子の交換性陽イオン測定結果を表-2に示す。試料1, 2は強大な膨張性土圧が作用した椎谷層、試料3~8は灰爪層、試料9は魚沼層であるが、 Mg^{++}/Ca^{++} の値に顕著な差異が認められる。交換性陽イオンの

表-1 各試料の相対的粘土鉱物含有量及びC.E.C., 2 μ >粘土含有量

試料	採取位置	モンモリロナイト	クロライト	イライト	セオライト	カオリナイト	C.E.C. (meq/100g)	粘土含有量(%)	その他の鉱物
1	5K200	●		●		●	38.7	42.5	α -石英, 斜長石, α -クリストバライト
2	5K240	●		●		●	43.0	40.4	"
3	6K100	●	●	●	●	●	26.4	19.5	同上及びマグネタイト
4	6K363	●	●	●	●	●	24.7	15.7	"
5	6K657	●	●	●	●	●	25.1	16.8	"
6	6K761	●	●	●	●	●	25.1	12.1	"
7	7K104	●	●	●		●	29.2	26.0	"
8	7K183.6	●	●	●		●	24.6	17.0	"
9	7K509	●	●	●	●	●	23.2	32.5	"
10	7K756	●	●	●		●	25.1	22.0	"
11	9K831*	●	●	●		●	21.2	15.0	α -石英, 斜長石, α -クリストバライト

● 多 — ● 少 *魚沼層泥岩

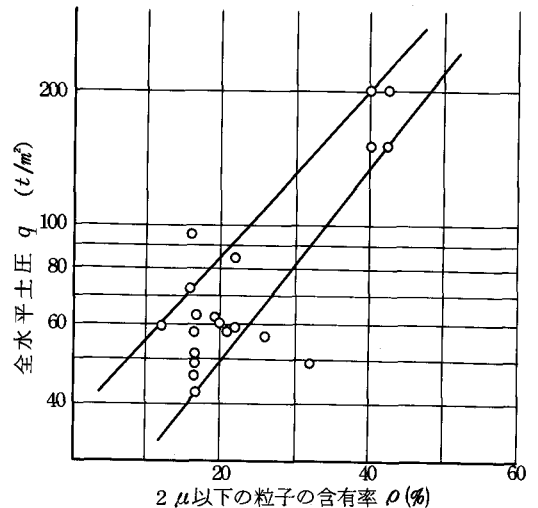


図-2 粒度と全水平土圧の関係(赤倉)

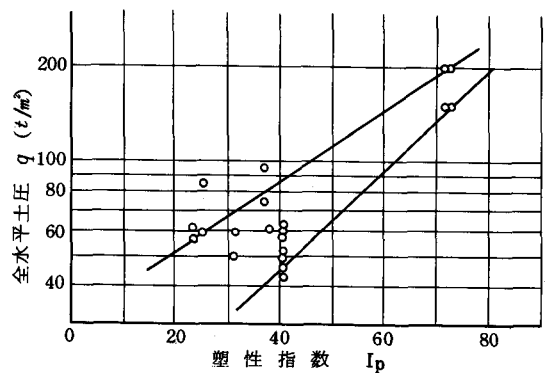


図-3 塑性指数と全水平土圧の関係(赤倉)

種類と量は少からず泥岩の力学的性質に影響を及ぼすものであろうと想像されるが、現段階ではデータが少く詳細は不明である。

以上を簡単にまとめると次のようになる。

- ①赤倉トンネルにおける膨張性泥岩はモンモリロナイトを主要粘土鉱物とする新第三紀（椎谷層，灰爪層）泥岩である。
- ②膨張性，押し出し性土圧性状は，泥岩中に含まれるモンモリロナイトの量比と密接に関係している。
- ③泥岩中のモンモリロナイト含有量は泥岩構成粒子の粒度，コンシステンシー，C.E.C.等により概略把握が可能である。

赤倉トンネルでは上述の関係より，トンネル土圧を予測し，断面，支保形式，施工法の決定を行った。

3. 新第三紀泥岩トンネルの土圧予測の一手法

赤倉トンネルにおいて得られた諸関係が，基本的には新潟県地方に分布する新第三紀泥岩トンネルにおいても成立すると仮定し，土圧と泥岩物性の関係について考える。

土圧に影響を及ぼす因子として次の4グループを考える。(1)初期応力(地質構造上の応力，土被り圧力等)(2)泥岩物性，地質構造，地下水条件等(3)トンネル断面積，断面形状等(4)掘削方法，支保形式等。ここで，初期応力はほぼ土被り圧力に等しいと考え，断層等の特殊な地質構造上の弱点及び特別な地下水圧作用がないような条件のもとで，土圧は主として土被り圧力と泥岩物性によって決定されると仮定する。(実際には(3)(4)の影響もかなり大きいと思われる)そこで，全土圧(全水平土圧) q と土被り圧力の比 $(q/\sigma_z)^{(7)}$ という指標を導入する。 (q/σ_z) は膨張性トンネルにおける土圧係数的意味を持っており， (q/σ_z) が1.0の時土被り圧力がそのままトンネル支保構造に作用することになる。膨張性土圧，押し出し性土圧の発生原因が，①平均主応力低下に伴う体積変化，②時間依存性をもつ泥岩のせん断特性，③平均主応力低下，化学反応，吸水膨張等による力学特性の劣化の3点にあるとすると，土圧はモンモリロナイト含有量と密接な関係があると想像される。(ダイレタンシーによる体積変化についてはデータがないので割愛する)

図-6は，赤倉トンネル⁽⁷⁾，頸城トンネル⁽⁸⁾，六日町トンネル⁽⁷⁾，鍋立山トンネル⁽⁸⁾の資料をもとに， (q/σ_z)

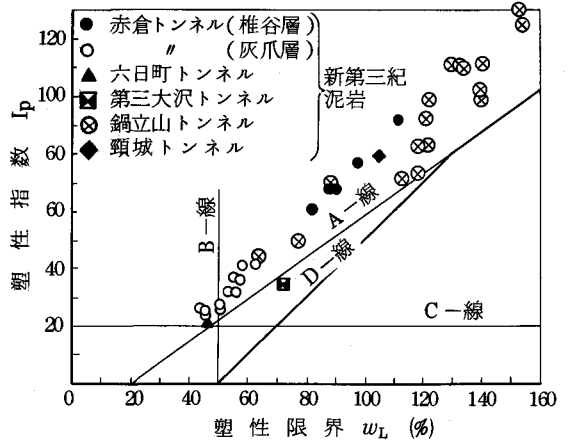


図-4 塑性図上にしめる膨張性泥岩の位置

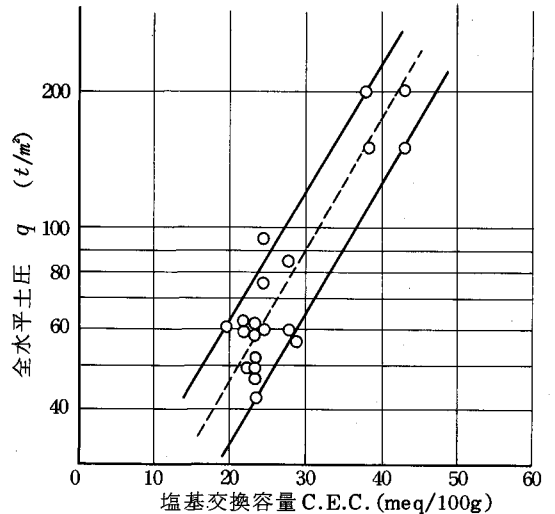


図-5 C.E.C.と全水平土圧の関係(赤倉)

表-2 交換性陽イオン分布

地点	交換性陽イオン分布		$\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{(Na+K)^{+}}$	$\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}}$
	meq/100g ¹⁰	10 meq/100g ¹⁰		
Ⅷ1 5k200	Na ⁺ K ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	1.38	1.61
Ⅷ2 5k240	Na ⁺ K ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	1.37	1.23
Ⅷ3 6k100	Na ⁺ K ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	1.38	0.45
Ⅷ4 6k363	Na ⁺ K ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	1.20	0.59
Ⅷ5 6k657	Na ⁺ K ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	1.12	0.46
Ⅷ6 6k761	Na ⁺ K ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	1.30	0.44
Ⅷ7 7k104	Na ⁺ K ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	1.25	0.40
Ⅷ8 7k183.6	Na ⁺ K ⁺	Mg ⁺⁺ Ca ⁺⁺	2.21	0.27
Ⅷ11 9k831	Na ⁺ K ⁺	Mg ⁺⁺ Ca ⁺⁺	5.05	0.20

と 2μ 以下の粒子の含有率 ρ の関係を調べたものであるが、かなり良い相関が認められる。同様の関係が (q/σ_z) と C.E.C. あるいは I_p の間にも認められる。

図-6 の関係が新潟県地方の新第三紀泥岩トンネルにおいて成立すれば、概略の土圧は土被り圧力 σ_z と 2μ 以下の粒子の含有率 ρ から図-6 を用いて予測することができる。ここでは、前述の(一)(二)の影響を無視しているが、これらの影響は2つの直線の範囲内に含まれる程度ではなからうか。また、断層等の特殊な地質構造あるいは地下水等に関する悪条件の下では、土圧はさらに大きくなるであろうが、一般的には簡便な予測手法と考えられる。

なおこの図はモンモリロナイトを主要粘土鉱物とする新潟県地方の新第三紀泥岩トンネルに関するデータを集めて表示したものであり、堆積条件の異なる泥岩類、主要粘土鉱物の異なる泥岩類(モンモリロナイト以外のクロライト、カオリナイトを主要粘土鉱物とする泥岩類)、ゼオライト、アロフェン等を含む泥岩類あるいは他の堆積岩類(砂岩、頁岩等)への適用は今後の問題である。また図-6 の関係が成立する ρ と σ_z の範囲についても検討する必要がある。

4. あとがき 赤倉トンネルにおける調査試験結果をまとめ、膨張性土圧、押し出し性土圧性状に關する因子をピックアップしながら、新潟県地方の新第三紀泥岩トンネルにおける土圧性状～土被り圧力～岩質間の関係を示した。トンネル土圧性状、押し出し性状の予測は本質的には、これらの現象の発生機構の解明によってなされるものであり、膨張性泥岩の力学的性質の正確な把握が必須となる。この意味で地山の力学的性質を正確に反映しうるような泥岩サンプルのサンプリング方法、試験方法および原位置試験方法の開発が望まれる。

謝 辞 膨張性泥岩の研究に際して御指導を頂いた東京大学名誉教授鈴木光先生、東北大学教授庄子貞雄先生、鉄道技術研究所吉川恵也氏に謝辞を表します。

引用文献

- (1) 領家・青砥・飯星：「膨張トンネルの土圧発生機構について」土木学会第32回年講 1977
- (2) 青砥・飯星・金子：「赤倉トンネルにおける第三紀泥岩の諸性質」第10回土質工学研究発表会 1975
- (3) 竹村・大塚：「膨張性トンネルにおける施工管理の一例」土と基礎 Vol.22, 611 1974
- (4) 金子・飯星・青砥：「膨張性トンネルにおける第三紀泥岩の粘土鉱物」土木学会第32回年講 1977
- (5) 土木学会：「トンネル標準示方書(山岳編)・同解説」S.52
- (6) 青砥・飯星・領家：「膨張発生機構について」大成建設技術研究所所内資料・未発表
- (7) 大成建設内部資料による
- (8) 日本鉄道建設公団東京支社内部資料による

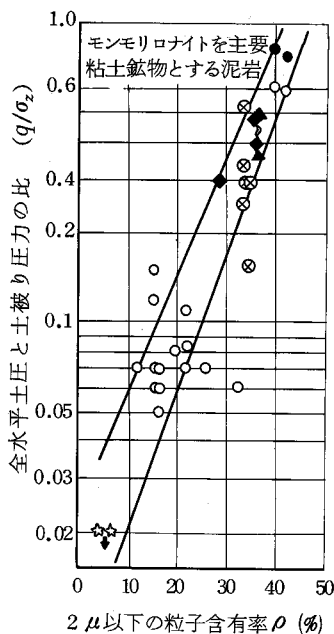


図-6 q/σ_z と ρ の関係(新潟県地方の新第三紀泥岩トンネル)

- 赤倉トンネル(椎谷層)
- 同上(灰爪層)
- ▲ 六日町トンネル(椎谷層)
- ⊗ 鍋立山トンネル(椎谷層)
- ◆ 頸城トンネル(能谷生谷)
- ☆ 赤倉トンネル(魚沼層)*

q : 全水平土圧 (t/m^2)
 σ_z : 土被り圧力 (t/m^2)
 ρ : 2μ 以下の粒子含有率(%)

*カオリナイトを主要粘土鉱物とする砂質泥岩であるが参考までに示す。
 (q/σ_z は0.02以下)

ON THE PREDICTION TECHNIQUE OF GROUND PRESSURE
AT TUNNEL EXCAVATION IN SWELLING MUDSTONE

by Toshitaka INOUE and Hiroshi AOTO

The geology of Northeast Japan is broadly consist of thick layers of mudstone deposited under volcanic activity in the Tertiary Period.

So-called swelling mudstone in these sediments causes great ground pressure during tunnel excavation. Field measurments indicate that the ground pressure could be up to 150 ~ 200 t/m² for the excavation of 7m in diameter for Akakura Tunnel and the displacement could be so large as it reduces the effective tunnel space.

Investigations on the swelling mudstone at Akakura Tunnel discovering secure and economical tunnel design are as follows;

- i) Geological survey
- ii) X-ray refraction analysis of mudstone
- iii) Unconfined compression test of mudstone
- iv) Grain size analysis and measurement of Atterberg limits.
- v) Measurment of Cation Exchange Capacity of mudstone.
- vi) Measurment of ground pressure by load-cell.

Results of investigation are as follows;

- i) It is difficult to find a certain relation between the ground pressure and unconfined compressive strength of mudstone.
- ii) The strongest correlation is observed between the ground pressure and the montmorillonite content within mudstone.
- iii) Montmorillonite content could be estimated from X-ray refraction charts, clay fraction (2μ), plastic index I_p and Cation Exchange Capacity C.E.C..

A new index (q/σ_z) which is the ratio of ground pressure to overburden pressure is presented based on these investigation. The index (q/σ_z) is related to clay fraction ρ by the following equation.

$$\log_{10}(q/\sigma_z) = a \cdot \rho + \log_{10} b \quad (1)$$

$$a : 0.0454 \sim 0.0387, \quad b : 0.007 \sim 0.023$$

This relation is recognized in some tunnel, such as Kubiki Tunnel, Muika-machi Tunnel and Nabetachi-yama Tunnel in Niigata prefecture. Equation (1) could be effective in predicting ground pressure, because ground pressure q may be predicted by only ρ and σ_z .

It may be understood that this method is very convenient for construction management.