

(23) 膨張性泥岩の膨張性および物理・力学特性についての考察

西松建設株式会社 正会員 ○ 稲葉 力
西松建設株式会社 正会員 平田 篤夫
鉄道建設公団 正会員 友田 孝

1. はじめに

新潟県南西部地域に広く分布する新第三紀堆積岩のトンネル掘削工事の際、多く発生する膨張性地圧についてはそれがこれまでの経験的な地圧に比べてはるかに大きいことから、種々議論が行われている¹⁾。筆者等は既往の研究および当社が施工中のトンネル切羽から求めた岩石試料の室内試験結果から、膨張性地圧の大小と土盛り、地山の強度および含水比は比較的強い相関関係にあり、2次元弾塑性モデルによる数値解析を行って地山強度比がトンネル内空断面の変形挙動に大きく影響することを確認した。

地山の含水比が増大すると切羽からの試料の採取およびその成形が困難となる。そこで、対象としている軟岩は固結度が低く、しかも異方性が顕著ではないこと、また大きな空隙や割れ目のない均質な材料であることから含水比を調整した人工試料も定性的には地山と同一の挙動を示すものと考えた。試験結果も自然泥岩供試体によるものと同様の傾向を示した。

膨張性地圧を発生する地山の挙動は主としてその材料特性に支配されると考えられる。以下に室内試験結果と膨張性地圧との関係を述べる。

2. 膨張性地圧

図1は水平方向の内空変位率（内空相対変位/トンネル幅）をパラメータにとり、土盛りと一軸圧縮強さについて整理したものである。地山強度比が2以下になると変形量が急に大きくなることを示している。表1は当社施工の北陸自動車道能生トンネル、北越北線鍋立山トンネル、赤倉トンネルの物理試験の結果²⁾を単純平均したもので、統計処理は行っていないが膨張性地圧の大小の定性的目安となるものとする。膨張性地圧は鍋立山トンネルが最も大きく、赤倉トンネル、能生トンネルの順に小さいといえ、 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子の含有量、塑性指数および塑性比³⁾と膨張性地圧との相関性は弱く、塩基交換容量（以下CECと略する）、自然含水比と地強度比が膨張性地圧の大小と比較的良好な相関性を示している。また、谷本によるモール・クーロン式を用いて塑性域を表現したリングモデル⁴⁾の計算を行った。図2はその結果、地山強度比に応じて流動域が大きく変化することを示している。

3. 室内試験

3.1 物理試験

単位体積重量・含水比・真比重・粒度分布・コンシステンシー・浸水崩壊度・CEC・メチレンブルー吸着量・吸水膨張試験の各物理試験を行った。最も特徴があると考えられる自然含水比と鍋立山トンネルの距離程の関係を図3に示す。●は最近の試験結果で、←は現在施工している

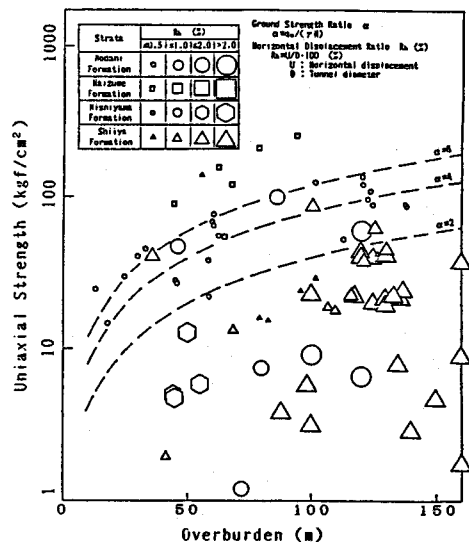


図1 水平方向内空変位率と一軸圧縮強度、土盛りの関係

表1 物理試験結果の比較

	膨張性	2μm 含有率 (%)	塑性指数 (PI)	塩基交換容量 (meq/100mg)	塑性比	含水比 (%)	地山強度比
鍋立山トンネル	超 大	40.3	98.7	38.0	2.70	22.2	1.01
赤倉トンネル	大	24.5	42.4	29.7	2.12	19.9	1.09
能生トンネル	小	37.5	88.3	28.4	3.77	17.0	3.36

(注) 塑性比は、塑性指数/塑性限界
地山強度比は、一軸圧縮強さ/土盛り圧
表中の数字は入手したデータを単純に平均したものである。

区間である。この区間の含水比は比較的高く、単位体積重量は低くなる傾向が認められる。2 μ m以下の土粒子の含有量・コンシステンシー・と距離程にはほとんど相関性が見られなかった。

3. 2 人工泥岩について

地山は比較的硬い部分と柔らかい部分により構成されている場合があり、地山は部分的にはかならずしも均質ではない。しかしながら、地山には潜在的な割れ目はなく、その挙動は材料としての性質に影響されるものと考えられる。そこで、人工試料供試体による力学試験を実施することとした。

切羽から採取したブロックを小割りにして炉乾燥させた後、微粉砕した。それに所定の水を添加して練り返してから、モールドに詰め、圧縮成形したものを人工試料とした。作成した試料の寸法は、径50mm、長さ100mmである。モールド内の試料に加える圧力は筆者等の実験結果と桜井の報告⁵⁾から150kgf/cm²を標準とした。圧縮速度は変位制御で1%/minとして、所定の荷重に達した時点で載荷を終了した。時間にして30~60分である。含水比が30%を越えるとモールドとピストンの隙間から試料がはみ出して、70kgf/cm²程度までしか荷重を加えることができなかった。なお、ピストンで圧密中に、排水は見られなかった。

3. 3 一軸圧縮試験について

図4に含水比と一軸圧縮強度、単位体積重量の関係を示す。図中には桜井による結果およびその回帰式も併記している。単位体積重量は地山とはほぼ同程度で、一軸圧縮強度は人工試

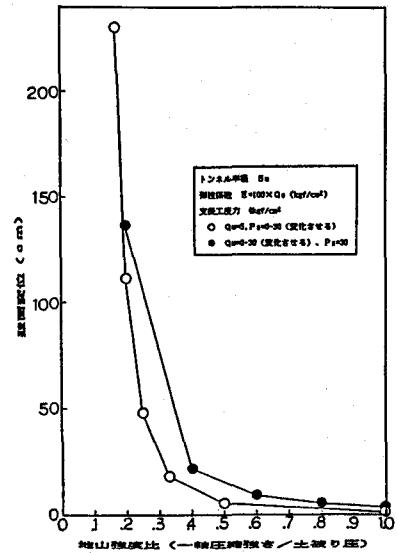


図2 地山強度比と壁面変位の関係

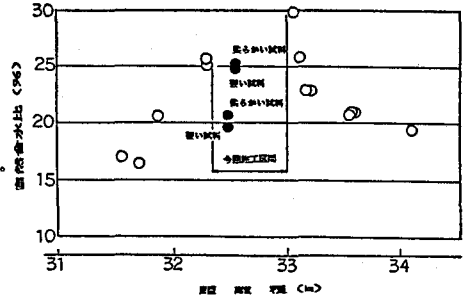


図3 鍋立山トンネルにおける距離による自然含水比の変動

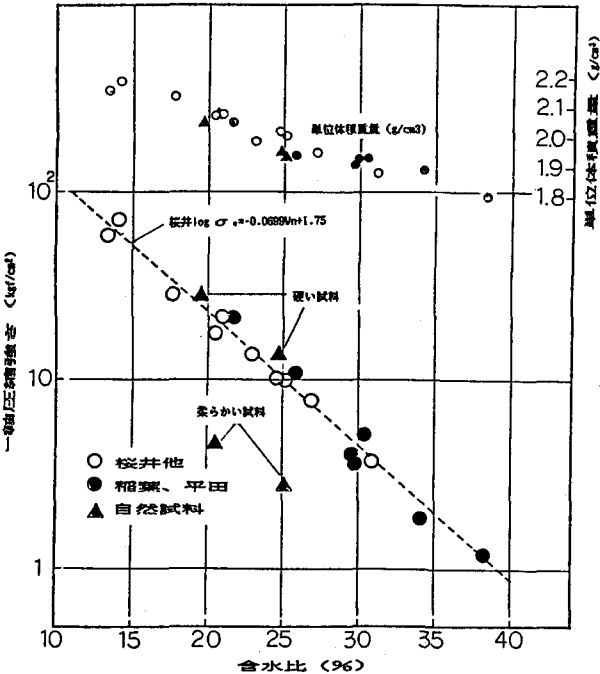


図4 含水比と一軸圧縮強度の関係

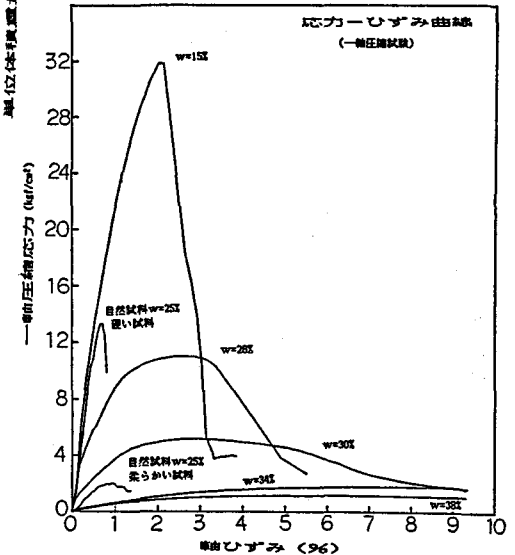


図5 一軸圧縮試験による応力-ひずみ関係

料の方が大きい。これは、自然試料供試体の成形の際に発生する割れ目や供試体自体の不均質さによるものと考えられる。また、地山の中でも比較的硬い部分の試料は人工試料の一軸圧縮強度と同程度で、柔らかい部分の強度はやや低い。

図5は自然試料と人工試料の一軸圧縮強度試験による応力ひずみ線図である。含水比の増加にともなう、脆性的な挙動から延性的な挙動を示すようになる。また、含水比25%程度が脆性から延性を示す境界域のように考えられる。

3. 4 三軸圧縮試験について

側圧は、10, 20, 40kgf/cm²の3種類とし、圧密開始時にバックプレッシャーを3kgf/cm²加えた。ひずみ速度は全て0.1%/minである。なお、今回の試験結果は試料の個数が少なく、さらに、圧密方法、せん断速度等にも検討が必要であると考えられる。図6は、含水比が20%、30%で側圧が10, 40kgf/cm²の場合の、軸ひずみ(ϵ_1)と主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)の関係を示している。自然試料(含水比25%)で比較的硬かった試料、柔らかかった試料の結果も併せて示している。一軸圧縮試験の結果と同様、含水比が20%ではひずみ軟化現象を示すが、含水比30%ではひずみ軟化現象を示さない。自然試料の結果は、人工試料の含水比20%と30%の結果の間を示す。有効応力で表示すると、図7に示すように含水比が30%の場合、せん断に伴って試料は急激に間げき水圧を増し、有効拘束圧が零となる。すなわち一軸圧縮試験を行っていることと同様の状態になる。実際に一軸圧縮強度とほぼ同程度の強度である。このことは固結度の低い軟岩では拘束圧を増加しても拘束効果が発揮されないことを示している。含水比が20%の場合には、有効拘束圧は減少するものの零までには至らない。拘束圧を大きくすれば多少なりとも拘束圧効果があると考えられる。含水比が増加すると、せん断に伴う有効拘束圧と平均有効主応力の極端な減少、および流動化現象が生じるものと考えられる。

3. 5 超音波速度測定について

流動化現象生じるような材料では、一軸圧縮試験のような静的な試験で求めた弾性係数が地山の実際の弾性係数を表現していない可能性がある。

そこで、超音波パルス法によって図8に示すように

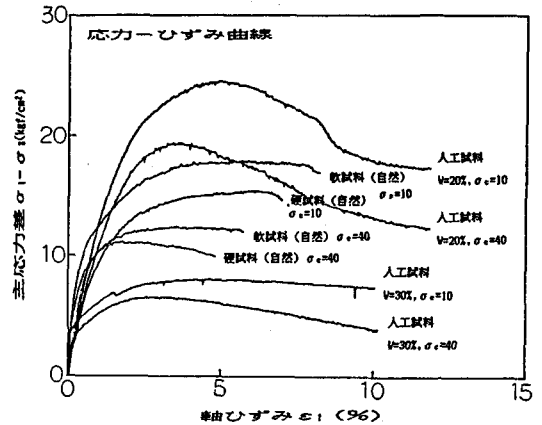


図6 三軸試験による主応力差と軸ひずみの関係

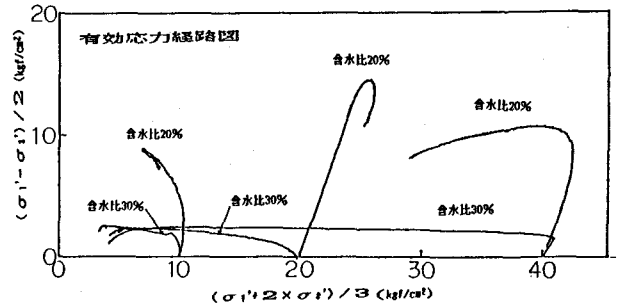


図7 有効応力経路図

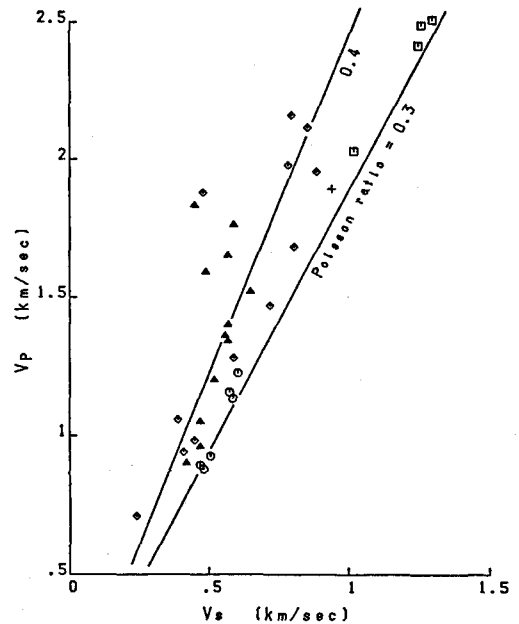


図8 超音波速度測定結果

P波、S波速度を自然泥岩、人工泥岩について測定して、非破壊的に弾性係数を求めた。このとき、動ポアソン比は0.3~0.4の範囲に分布しているが、S波の測定精度がP波に比べて格段に悪く、後続位相をS波の初動と誤判定している可能性が大である。したがって、動ポアソン比は0.3の方向に近づくものと考えられる。図9にポアソン比を0.3と仮定して補正した動弾性係数と50%割線弾性係数との関係を示す。含水比が増加すると破壊形態が変化することを考慮して、破壊形態が同一の材料についての比較を行うことが望ましいが、実用的な範囲で相関性があるものと考えられる。

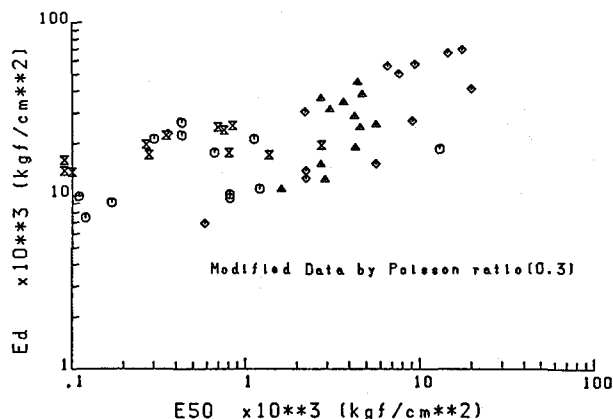


図9 静弾性係数と動弾性係数

供試体に加えらるる振動エネルギーは粘性抵抗により減衰する⁶⁾。そこで、人工泥岩における振動エネルギー吸収係数を含水比との関係を図10に整理した。供試体と振動子の接合の程度によって大きく測定精度が変動するため接着剤を用いて接合した。含水比25%から30%にかけて吸収係数が大きくなり、材料の粘性抵抗が増加しているものと考えられる。したがって、静的な挙動に対しても含水比25%付近で材料の物性が変化することが予想される。

4. まとめ

実験および解析の結果、以下のことがわかった。

- 1) 鍋立山の泥岩は、含水比25%付近で物性値が大きく変化する。すなわち、含水比25%以上になると延性的な挙動を示すようになり、以下では脆性的な性質が強くなる。
- 2) 鍋立山の人工試料の三軸圧縮試験の結果、含水比が大きいとせん断時に間げき水圧が大きくなり、有効拘束圧がほとんど零となり流動化現象が顕著になる。
- 3) 膨張性泥岩の膨張性の大小は、含水比・土被り圧・一軸圧縮強度に支配され、しかも、含水比と一軸圧縮強度には強い相関がある。

- 4) 動的な試験によっても材料物性の把握が可能である。

参考文献

- 1) 仲野良紀：「膨張性地山の実体」トンネルと地下 1975年10月 713-723P
- 2) 鈴木明人・飯星茂・青砥宏・領家邦泰：「赤倉トンネルにおける膨張性泥岩に関する研究」大成建設技術研究所報 第7号 109-121P
- 3) 斎藤孝夫・三木五三郎：「土の工学的分類とその利用」鹿島出版会 1979年
- 4) 谷本親伯・畠 昭治郎：「切羽周辺での地山挙動を考慮したトンネル支保の基本的概念」土木学会論文報告集 第325号 1982年9月
- 5) 櫻井孝・高橋昭教：「人工泥岩の物理的・力学的性質—第2報 三軸圧縮試験による残留強度強度について—」鉄道技術研究所 鉄道技術研究所速報 No. A-86-185 1986年10月
- 6) 根岸勝雄・高木聖志郎：「超音波技術」東京大学出版会 1984年

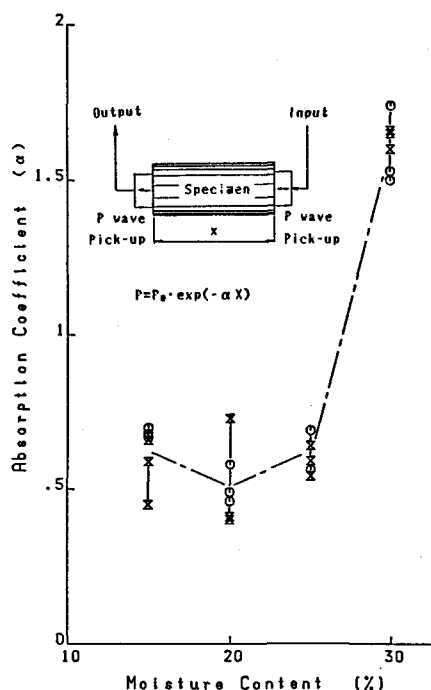


図10 含水比と超音波吸収係数の関係

(23) Study on Expansibility, Physical and Mechanical Properties of Expansive Mudstone

Tsutomu Inaba

Atsuo Hirata

(Nishimatsu Construction Co., Ltd.)

Takashi Tomoda

(Japan Railway Construction Public Corporation)

A series of physical, mechanical and ultrasonic wave test was conducted as for expansive mudstone, which was consisted of natural specimen and artificial specimen. The artificial mudstone was made from completely dried and crashed natural mudstone, which was mixed with prescribed content of water and was compressed. Because sampling and shaping of expansive mudstone is difficult, artificial specimen was employed. And expansibility was examined using simple mathematical model.

Main results obtained are as follows:

- 1) The properties of NABETATEYAMA mudstone extremely change about 25% of moisture content.
- 2) According to the results of triaxial compression tests on NABETATEYAMA artificial mudstone, high pore pressure arose to the great extent that effective confined pressure becomes zero in case of high moisture content, especially over 25%. At same time specimen is liquified.
- 3) A degree of the expansibility is governed by moisture content, overburden pressure and unconfined compressive strength, further there is strong correlation between moisture content and unconfined compressive strength.
- 4) It is also possible to get the properties of the mudstone using dynamic test.