

大成建設技術研究所 正員 ○領家 邦泰

〃 青砥 宏

〃 飯星 茂

1. まえがき

東北・裏日本に広く分布する新第三紀堆積岩の中に、膨張性泥岩と称される軟弱地質がある。膨張性泥岩中にトンネルを掘削すると、切羽の崩壊、側壁の押し出し、盤ぶくれ等の押し出し現象や、これを支保工等で支保しようとする場合に生じる強大な土圧現象に遭遇することがある。これらのいわゆる膨圧現象の発生機構に関しては未知な点が多く、その解明が急がれている。本文では、地山の応力解放による地山岩石の体積変化が膨圧現象に及ぼす影響について検討した。

2. 膨圧発生機構について

膨張性土圧あるいは膨圧という用語は多分に現象記述的であり、明確な定義づけはむずかしいようである。ここではトンネル掘削後徐々に生じるトンネル内空への地山の押し出しを、支保工あるいは覆工で支保しようとする場合に発生する土圧を膨圧（膨張性土圧）と呼ぶ。一般に膨圧は、従来の支保形式では所要内空断面を確保出来ないような強大な土圧である。膨圧現象は地中にトンネルを掘ることによって発生するのであり、トンネル掘削による地山の諸状態の変化、すなわち応力状態の変化、水圧分布の変化、地熱変化、地山岩石に関する物理化学的環境の変化等に起因するものである。筆者らは、膨圧発生原因が、これら諸要因の複合的なものであると考え、各要因1つ1つについて検討することにした。最初にトンネル掘削による地山応力状態の変化をとりあげる。地山応力状態の変化としては、平均主応力の減少とせん断応力の増加が考えられ、これらに起因する現象として体積膨張、破壊領域の発生、せん断変形の発生等がある。体積膨張は平均主応力の減少、せん断時のダイレタンシーによって生じるが、本文では平均主応力の減少による体積膨張について検討する。トンネル掘削に伴う地山平均主応力の減少によって生じる体積膨張量は、花崗岩のような硬岩類では小さいが、泥岩・凝灰岩のような軟岩類では無視出来ない。この体積膨張は圧密の逆現象であり、応力解放によって生じる地山岩石内の負の間げき圧の消散と密接に関係している。従ってかなりの時間依存性をもつ現象であると思われる。一般に第四紀粘土では、液性限界が高い程、また堆積年代が古い程その粘土の圧縮指数 C_c は大きく、 C_c と除荷時の $e \sim \log p$ 曲線の傾き比 (C_s/C_c) は高膨潤性粘土程大きいといわれている。⁽¹⁾ トンネルで問題となる膨張性泥岩は、膨潤性 2 : 1 型粘土鉱物であるモンモリロナイトを多量に含有している事が多く、応力解放による体積膨張量も大きいものと想像される。⁽²⁾

3. 泥岩の膨潤試験結果

新潟県に分布する新第三紀泥岩類について、圧密試験装置および高圧三軸圧縮試験装置を用いて、除荷過程における体積変化を測定した。試料の諸性質を表-1に示す。試料Aはボーリングコアをそのまま用いて、高圧三軸セル内で試験した。試料Bは泥岩塊をナイフで削り出し、圧密リング内で試験した。このため試料Bは供試体と圧密リングの間に若干のすきまが生じており、膨潤量が小さ目に測定されている可能性がある。試料Aのうち1供試体は気乾試料についての吸気試験である。図-1は平均主応力の減少に伴う体積変化を示したものであり、 $\sigma_m = 50 \text{ kg/cm}^2$ の時の体積を1として体積ひずみで表示した。高圧三軸のデータは $\sigma_1 = \sigma_3$ であり $\sigma_m = \sigma_3$ として、圧密試験装置のデータは $\sigma_m = 2p/3$ としてプロットした。平均主応力が1オーダー減少すると試料Aでは約0.25%、試料Bでは約0.5%の体積膨張が生じることがわかる。膨潤に要する時間は圧密時間に比べると短かく、約1/10であった。

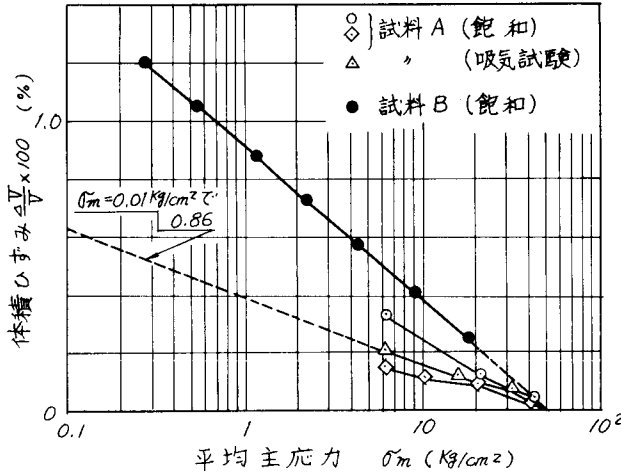
4. トンネル掘削による応力変化とそれに伴うトンネル内空への押し出し量の概算

トンネル掘削に

による地山岩石の応力状態の変化を、F.E.M. 解析により求めた。解析は地山を等方等質の線型弾性体とみなし、平面ひずみの2次元問題として行った。図-2のように地山をモデル化し、トンネル掘削前後の応力状態の比較を行った。トンネルは直径7m断面積 38.5 m^2 の円型断面、外力はトンネル中央部で $\sigma_x = 0.80 \sigma_z$ となるようにした。表-2は各エレメントの平均主応力の減少割合 (σ_{m1}/σ_{m0}) とそれに対応するエレメント

表－1 試料の諸性質・その他

試料	A	B
地層	西山層	椎谷層
岩質	凝灰質泥岩	泥岩
比重 G_s	2.463	2.689
2 μ 以下の粒子の含有率 (%)	20	41
液性限界 w_L (%)	不能	93.4
塑性限界 w_P (%)	27.5	20.8
C.E.C (meq/100g)	15	40
自然含水比 w_n (%)	30	18
乾燥密度 γ_t (g/cm ³)	1.45	1.80
一軸圧縮強度 q_u (kg/cm ²)	95	37
変形係数 E_{90} (kg/cm ²)	1×10^4	2.5×10^3
主要粘土鉱物	少量のモンモリロナイト	多量のモンモリロナイト
試験装置	高圧三軸	圧密試験装置
供試体直径 D (mm)	47～49	約 60
供試体高さ H (mm)	65～75	約 20
供試体成型方法	コアー切断	削り出し



図－1 除荷時の体積変化

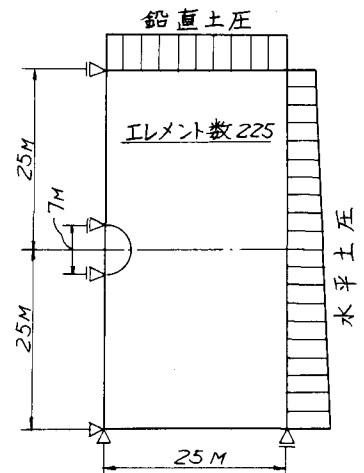
面積の全体面積に対する百分率の関係を示したものである。ここで σ_{m0} 、 σ_{m1} は各々掘削前後の各エレメントの平均主応力であり、 $\sigma_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ として算定した。表－2 よりトンネル掘削による各エレメントの平均主応力の減少割合 (σ_{m1}/σ_{m0}) は概略 0.75 程度であることがわかった。今回の応力解析モデルでは、周辺部においても (σ_{m1}/σ_{m0}) は 0.75 程度であり、若干モデルが小さかったようである。トンネル土被り圧力を 200 t/m^2 とした場合の、トンネル掘削による体積膨張量を図－1、表－2 から算定すると、トンネル長手方向の単位奥行き m 当り、西山層で約 0.54 m^3 、椎谷層で約 1.60 m^3 となる。この量をそのまま押し出し量とすると、坑壁の平均相対変位量は各々約 5 cm 、 15 cm となる。各エレメントの体積膨張量がそのまま押し出し量となることはないにしても、これらの値はトンネル設計・施工上決して無視しうるものではない。トンネル掘削に伴う地山の体積膨張量は、膨圧現象に影響を及ぼすオーダーであることがわかる。

表－2

平均主応力の低下率 (σ_{m1}/σ_{m0})	図－2 モデルにおける面積百分率 (%)
0.35	0.035
0.45	0.070
0.55	2.847
0.65	17.070
0.75	67.277
0.85	12.699

5. あとがき 新第三紀泥岩類について、応力解放による体積膨張量を測定し、トンネル掘削に伴う地山平均主応力の減少による地山の体積膨張量を概算したところ、膨圧現象を議論する上で無視出来ない量であることがわかった。次に地山岩石のセン断クリープと膨圧現象の関連について調べる予定である。

(引用文献) (1)例えば土質工学会編：「土質工学ハンドブック」pp 154, (2)山崎・山内監訳：「土質力学の基礎」鹿島出版会



図－2 応力解析モデル