

膨張性地山

Squeezing Ground

大 塚 康 範 (おおつか やすのり)

応用地質(株) エンジニアリング本部技師長室 顧問, (一社)日本応用地質学会 副会長

1. 膨張性地山の定義

トンネル施工に際し、掘削断面内空側への地山の押し出しと強大な土圧の作用により、施工中の支保工や供用後の覆工に変状を生ずる場合がある。このような現象が生ずる地質を「膨張性地山」と呼んでいる。

膨張性トンネルの発生メカニズムは、スクィーズィング (Squeezing) と膨潤 (Swelling) という異なる現象によるものであるが、トンネル掘削ではこれらの現象が同時に起こることが多いことから、両者を明確に区分せず一括して膨張性地山 (Squeezing ground) として扱われてきた。しかしながら、トンネル分野以外の切土法面の変状や住宅基礎の盤膨れなど、膨潤が主な原因で生ずる現象が知られるようになり、定義の上では両者を明確に区別するようになっている。ここでは、川本・アイダンらにしたがってスクィーズィングを「トンネル掘削に伴う二次応力が周辺岩盤の強度を超えて岩盤を破壊させ、さらに掘削が進むにつれて破壊領域がトンネル壁面から地山内部へと進行し、破壊した岩盤マスがトンネル内空へ押し出す現象」と定義し、スメクタイトに代表される膨潤性粘土鉱物に乾湿の繰返しや水分の供給などが加わり長期間にわたって地山が膨張する現象を膨潤とし、区別して記述する¹⁾。

2. 膨潤性粘土鉱物の成因

膨潤性粘土が生成される過程として、一般的に熱水変質作用、続成作用、風化作用が知られている。熱水変質作用では、地下で高温の熱水が岩石と反応して、岩石の元々の性質が変化する中で膨潤性粘土が形成される。続成作用では、未固結の堆積物が時間をかけて地下に埋没する過程で圧力や温度が上昇する中で膨潤性粘土が形成される。凝灰岩のような火山灰を含む堆積岩などは、この作用により膨潤性粘土が形成されることが知られている。風化作用による膨潤性粘土の形成は、特に地質年代の新しい新第三紀の堆積性軟岩などで見られる現象である。空気中の酸素や二酸化炭素を含む雨水が地下に浸透する過程で、酸化帯と還元帯の境界となる酸化フロントにおいて緑泥石が膨潤性粘土 (スメクタイト) になり、生成された酸性水はさらに地下に浸透して鉱物を溶解し、化学成分を溶脱する風化メカニズムが知られている²⁾。

3. 膨張性地山の指標と室内試験

3.1 スクィーズィングの指標

トンネル掘削の施工性を判定する指標として、次式で定義される地山強度比がある。

$$\text{地山強度比} = \text{岩の一軸圧縮強度 } q_u / \text{初期地圧 } p \cdots \cdots (1)$$

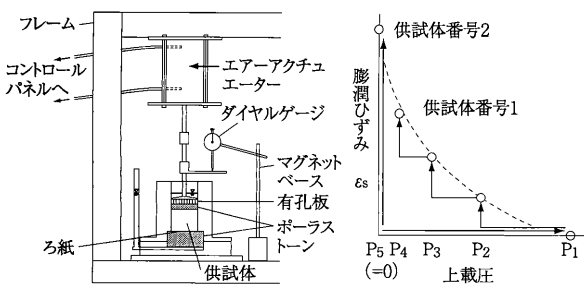
ここで、初期地圧としては通常、土被り圧 (鉛直土圧) を採用する。円形素掘りトンネルの場合、側圧係数 = 1 (鉛直土圧に対する水平土圧の比) の地山においては、地山強度比が 2 以下になるとトンネル周辺に塑性領域が発生し、壁面が内空側に押し出す現象が生じるとされている。

これに対して、川本・アイダンらは、トンネル接線方向ひずみ ($\epsilon_\theta = u/r$, r はトンネル半径, u は壁面変位) に着目し、弾性限界ひずみ ϵ_e で正規化したトンネル壁面ひずみ比 $\epsilon_\theta/\epsilon_e$ をピーク強度のひずみ ϵ_p 、軟化開始時のひずみ ϵ_s 、流動開始時のひずみ ϵ_f から求められる状態ひずみ比 ϵ_p/ϵ_e , ϵ_s/ϵ_e , ϵ_f/ϵ_e と比較することでひずみ軟化地山のスクィーズィングレベルを算定する方法を提案している¹⁾。

3.2 膨潤地山の指標

膨張性地山の指標としては、北陸北線 (現在の北越急行はくほく線) の鍋立山トンネルや赤倉トンネルなど、施工に難渋したトンネルで得られたデータが現在でも参考にされている。物理特性として単位体積重量、自然含水比、 $2\mu\text{m}$ 以下粒子含有率、力学特性として地山強度比、一軸圧縮強度、変形係数、弾性波速度などが膨張性地山の指標として挙げられている。特徴的なのは化学特性として、X線回折、陽イオン交換容量 CEC、そして浸水崩壊度などが取り上げられている点である。これらは、膨潤性粘土鉱物の存在と量比を判断するものである。地山強度比が指標として入っているのは、当時、スクィーズィングと膨潤を区別せずに膨張性地山として一括して評価していたことによる。膨潤地山の力学試験として、膨潤率試験の他に膨潤圧試験がある。前者は側面拘束状態で自由に膨潤させた時の体積変化を見るものであり、後者は体積変化を許さない状態で膨潤圧を測定するものである。膨潤率には圧力依存性があり、この関係を知ることが膨潤地山の対策を考える上で重要である。このために筆者らが考案した膨潤圧試験装置を図-1に示す。少ない供試体で膨潤率と膨潤圧の関係 (膨潤特性曲線と呼ぶ) が求められるのが大きな特徴である³⁾。

技術手帳

図-1 膨潤圧試験装置と試験手順図³⁾

4. 事例紹介

スキューピングに関しては、昭和50～60年代にかけて NATM が山岳工法の標準工法になる過程で多くの研究事例があるので、ここでは膨潤により高速道路竣工後、5年の歳月を経て路面及び切土法面に変状が顕在化した事例を取り上げる⁴⁾。

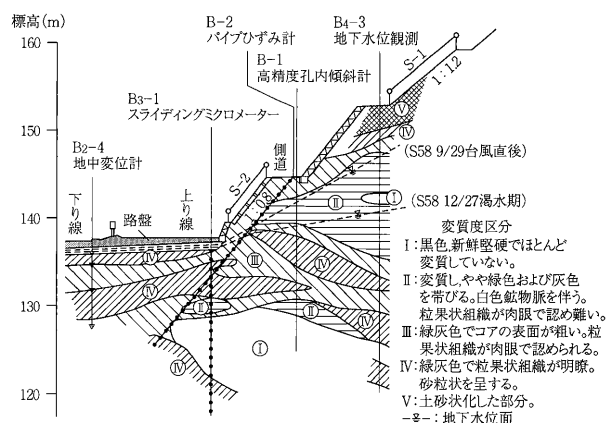
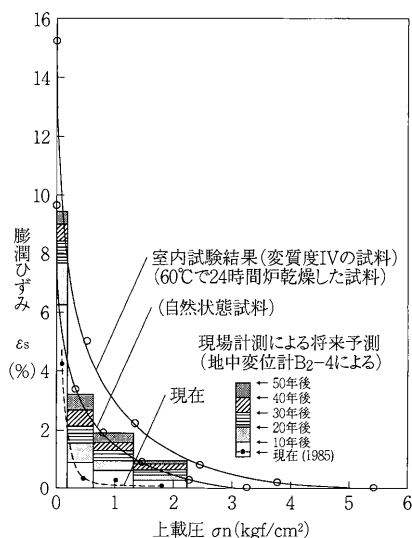
変状箇所は比高40～50 mの丘陵地の尾根部を両カットした部分で、最大切土高は25 mである。地質は、新第三紀中新世のガラス質な安山岩溶岩で、熱水変質によりマシブな部分から含礫状の部分まで漸移する。

図-2の横断面図に風化区分を示したが、変質度Ⅲ～Ⅳの領域に膨潤性粘土鉱物（スメクタイト）を多く含む岩石が分布する。路面下50 cm以浅は乾湿の繰返しの影響を受け、風化劣化の影響が著しい。中央分離帯に設置した B₂-4の深度別地中変位計の長期観測結果からスレーキングの影響を受けるごく表層の変位を片対数プロット、それ以深を両対数プロットで近似することで道路路面下の深度別隆起量を50年後まで予測した。その結果を図-3に示す。同図には先ほど紹介した膨潤圧試験の結果を重ねて表示した。膨潤圧試験は自然状態と炉乾燥させた試料の二通りで行っている。50年後の隆起予測量は、表層付近は炉乾燥させた試料の膨潤特性曲線、それ以深は自然状態の試料のそれに近い。最終的に、路面は道路の縦断線形に余裕のあることから定期的なオーバーレイ、変状した切土法面は表層排土後にロックボルトと吹付工を暫定施工し、最終的に法枠工で対応している。なお、ロックボルトと吹付工による膨潤ひずみの抑制効果を検証した現場実証試験の詳細は、参考文献を参考にしてほしい⁴⁾。

この他の事例として、NATMで施工されたトンネルにおいて、施工時にスキューピングで難渋した箇所が竣工後15年以上経て、インバートが破壊し、突然、路面の隆起と舗装のひび割れが生じて対策工事を施した事例がある⁵⁾。原因はスメクタイトを含む岩石の膨潤と膨潤により強度が低下したことによる地山の応力再配分に伴う塑性変形と考えられている。地山強度の小さな膨張性地山において構造物の長寿命化を考える上で膨潤対策が重要なことを示唆する事例である。

5. おわりに

膨張性地山について、現在ではスキューピングと膨潤を分けて考えることが主流になっており、膨張性地山

図-2 計測断面における変質度区分図⁴⁾図-3 路面隆起量の予測⁴⁾

の訳語（Squeezing ground）も含めて用語の再定義が必要に感じる。膨潤に関しては、膨潤性粘土の圧力依存性に加えて時間依存性に関する研究が必要で、トンネル施工時の支保工と維持管理段階の構造躯体をより合理的なものにする上で重要な技術課題である。

参考文献

- 1) アイダゲン オメール・赤木知之・伊東 孝・川本勝万：スキューピング地山におけるトンネルの挙動とその予測方法，土木学会論文集，No. 448/Ⅲ-19，pp. 73～82，1992.
- 2) 千木良雅弘：風化と崩壊，近未来社，pp. 107～152，1995.
- 3) Otsuka, Y., Tsuruhara, T. and Iriza, J.: Strain restraint of rockbolting and shotcreting to cut slope in swelling rocks, Proceedings of the International symposium on earth reinforcement, pp. 525～530, 1992.
- 4) 植本直之・大塚康範・満 弘之：膨潤性地山における変形挙動と対策工の効果，土と基礎，Vol. 36，No. 5，pp. 43～48，1988.
- 5) 奥井裕三・鶴原敬久・太田裕之・佐久間 智・中田主税：盃山トンネルに発生した急激な路面隆起変状の計測および解析による変状メカニズムの考察，トンネル工学報告集，第19巻，pp. 173～180，2009.

(原稿受理 2015.8.31)