

トンネル掘削に伴う吸水膨張量・膨張圧に関する数値解析について

吉岡尚也 木村 薫
斎藤二郎

Numerical Analysis of Swelling Displacement and Swelling Pressure due to Tunnel Excavation

Hisaya Yoshioka Kaoru Kimura
Jiro Saito

Abstract

When excavating a tunnel in ground consisting of material such as mudstone, solfataric clay or serpentinite, there are cases in which rock stresses are much greater than the values anticipated in design. Such extreme rock stresses can be considered as being caused by moisture absorption and swelling. In this paper, an analysis technique for explaining the degree of swelling is indicated while a method of estimating the input constant is described.

概 要

泥岩、温泉余土、蛇紋岩などのような地山にトンネルを掘削すると、掘削前に予想して設計値よりもはるかに大きい岩圧がかかることがある。このような異常な岩圧の発生原因が吸水膨張に起因しているものとして、膨張の程度を解析できる F.E.M. 解析手法を示すとともに入力定数の推定方法についても述べている。

1. はじめに

膨張性地圧の発生原因として、(1) 吸水膨張説、(2) 粘土化膨張性、(3) 塑性流動説、(4) 潜在応力の解放説などがあるが、ここでわれわれが取り扱うのは吸水膨張によるものである。このような膨張に関する研究は、従来粘土鉱物の研究とともになされてきた。谷津¹⁾もトンネル現場や地すべり地帯の岩石について粘土鉱物の分析や吸水膨張試験を行ない、岩石の吸水膨張のメカニズムについて述べている。

筆者ら²⁾も吸水膨張挙動を把握するために、円柱の供試体を用いた室内吸水膨張試験を行なっている。この結果をもとにある仮定をおいて F.E.M. 解析してみたところ、解析結果と実験結果によい一致が見られた。

2. F. E. M. 解析のための基礎式

筆者ら²⁾の実験結果にも示されているように、吸水膨張ひずみと時間との関係が片対数紙上に整理されたもの

は、村山³⁾の実験結果と同じように、S字の傾向を示している。この関係が時間・圧密量曲線と逆の傾向を示すことから、吸水による膨張現象は圧密理論の式と弾性体の応力ひずみ関係を組み合わせて表現されうることを暗示している。

吸水過程の現象が圧密理論と同じ形の式、すなわち、
$$\partial\phi/\partial t = a^2(\partial^2\phi/\partial x^2 + \partial^2\phi/\partial y^2) \dots\dots\dots(1)$$
で表現できるものとする。

ここに、 t は時間を意味し、また圧密理論の間ゲキ水圧に相当する ϕ のことを飽和度と名づけ、圧密係数に相当する a^2 のことを吸水膨張係数と名づけることにする。

つぎに、吸水によって生ずる膨張ひずみ ϵ_0 は平面ひずみ問題の場合(1)から求まる飽和度 ϕ を用いて、

$$\{\epsilon_0\} = (1+\nu) \{\alpha\phi \ \alpha\phi \ 0\}^T \dots\dots\dots(2)$$

のようなベクトルで表わされるものとする。

ここに、 ν はポアソン比を意味し、また α のことを吸水膨張ひずみ係数と呼ぶことにする。

したがって、吸水によって生じる膨張量 δ および膨張

圧 σ については、それぞれよく知られた以下の関係から求められる。

$$\begin{cases} \{\delta\} = -[K]^{-1}\{F\}_{e0} \\ \{\sigma\} = [D]\{\varepsilon_0\} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{F\}_{e0}$ は膨張ひずみ節点力、 $[D]$ は弾性マトリックスを意味している。

一方、軸対称問題のときも同様にして求められるが、(2)に対応する式は、

$$\{\varepsilon_0\} = \{\alpha\phi \ \alpha\phi \ \alpha\phi \ 0\}^T \quad \dots\dots\dots(2')$$

のようなベクトルで表わされるものとする。

3. 入力定数の推定方法

解析を行なうにあたり、特に重要な入力定数は(1)、(2)式あるいは(2)'式の係数にあたる吸水膨張係数 a^2 と吸水膨張ひずみ係数 α の二つである。これら二つの定数についてはつぎのような方法で推定してみた。

先述したように、室内吸水膨張試験結果は一般に図-1のようなS字の傾向を示すので、吸水膨張係数 a^2 は、

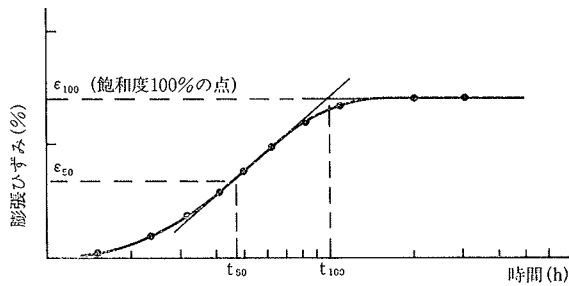


図-1 膨張ひずみ -log t 曲線

圧密係数を求める方法と同じように、

$$a^2 = 0.197 \cdot H^2 / t_{50} \quad (\text{cm}^2 \text{ or } \text{m}^2/\text{h}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

から求める。ここに、 H は試験片の高さを意味している。

一方、吸水膨張ひずみ係数 α は、円柱の供試体を使用していることから軸対称問題になるので(2)'から求めなければならないが、

$$\alpha = \varepsilon_{100} / 2\phi \quad \dots\dots\dots(5)$$

として求めた方が、よいシミュレーション結果が得られるようである。ここに ε_{100} は図-1の飽和度100%に相当するひずみを意味している。

4. シミュレーション

図-2(A)の実線は泥岩を試験片の底面より吸水させたときの膨張ひずみと時間との関係を片対数紙上に整理したものである²⁾。式(4)から吸水膨張係数 a^2 は $0.061 \text{ (cm}^2/\text{h)}$ 、式(5)から吸水膨張ひずみ係数 α は 0.029 となる。他の定数については同図に併記している。同図の○印がシミュレーション結果である。(B)、(C)にもそれ

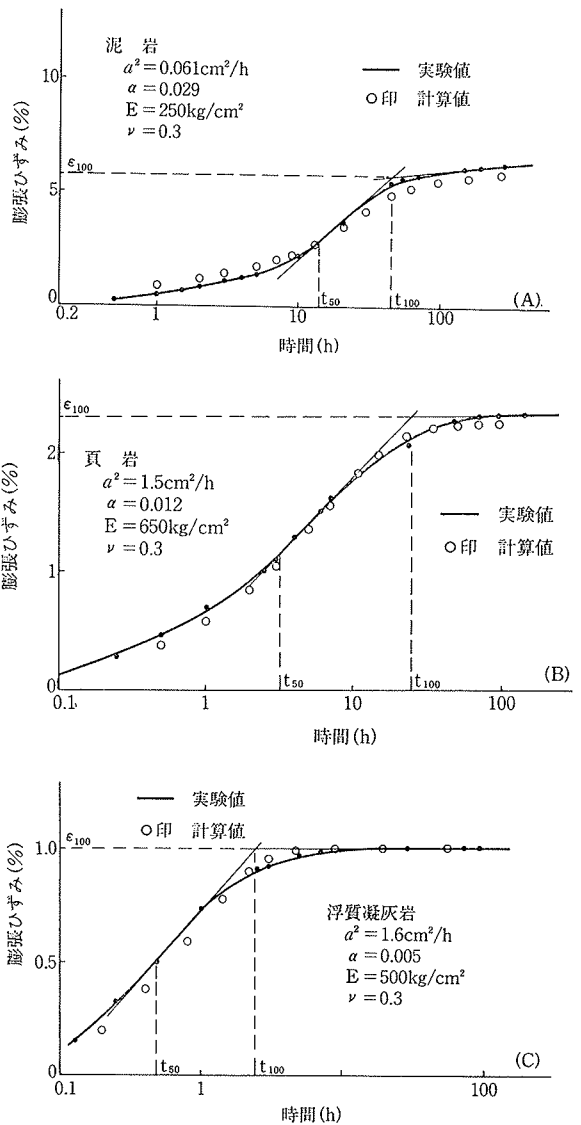


図-2 (A), (B), (C) 吸水膨張試験結果とそのシミュレーション

ぞれ頁岩と浮質凝灰岩の吸水膨張試験結果とそのシミュレーション結果を図示した。

いずれの場合も実験値と計算値との間により一致がみられる。このことより、吸水膨張現象は先に想定した圧密理論の同じ型の式と弾性体の応力ひずみ関係の組み合わせ(すなわち式(1)と式(2)の組み合わせ)で説明しえると言えよう。

5. 解析例

一例として膨張性が予測された某トンネルの吸水膨張現象の解析を行なってみた。本トンネル浴いの地質は第三紀凝灰岩からなっており、その解析モデルが図3である。

解析条件を示すと以下ようになる。

- (1) 平面ひずみ問題としてトンネル断面について2次

元的に取り扱う。

(2) 掘削は全断面掘削とし、掘削と同時に掘削壁面から一様に水が吸水されるものとする。

(3) ただし、コンクリートが吹付けられたときは、吹付けコンクリートの裏面の地山から一様に水が吸水されるものとする。

つぎに入力定数であるが、吸水膨張係数 a^2 と吸水膨張ひずみ係数 α については、吸水膨張試験結果よりそれぞれ $0.27(\text{cm}^2/\text{h})$ 、 0.005 とした。一方、ポアソン比は 0.35 を仮定し、ヤング率は別途実施した一軸圧縮試験より 135 kg/cm^2 とした。

図-4 は素掘り状態におけるトンネル壁面の膨張量の経時変化を图示したものである。吸水による膨張量は無視しえる程度であるが、インバート部の膨張量が天端あるいは側壁のそれに比べて大きいのが特長のようである。なお、同図には掘削と同時に吹付けコンクリートで被覆したときのトンネル壁面の経時変化も图示している。ただし、天端と側壁の膨張変位は图示できない程度に拘束されてしまう。

図-5 には吹付けられたコンクリート壁に作用する膨張圧の経時変化を图示した。

トンネル断面の一岩塊から試験片を作製して室内吸水膨張試験を行ない、その試験結果から入力定数を推定して解析したに過ぎないが、ここでの吸水膨張の影響はきわめて小さいと言える。

なお、吹付けられたモルタルの材料特性であるが、吸水膨張係数 a^2 と吸水膨張ひずみ係数については 0 に近い値を、ポアソン比については 0.3 を仮定した。また、ヤング率については $20,000 \sim 150,000 \text{ kg/cm}^2$ の範囲を経時的に変化させた⁴⁾。

6. おわりに

室内吸水膨張試験結果をもとに²⁾、吸水膨張挙動を説

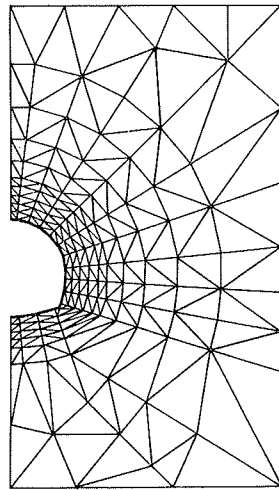


図-3 解析モデル

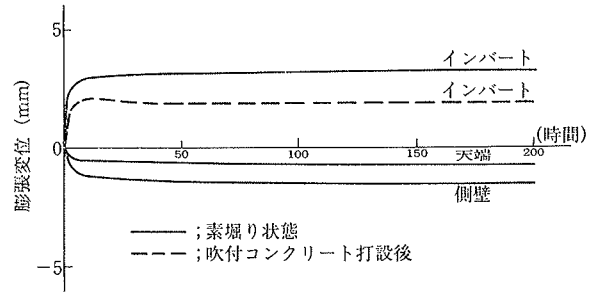


図-4 膨張量の経時変化

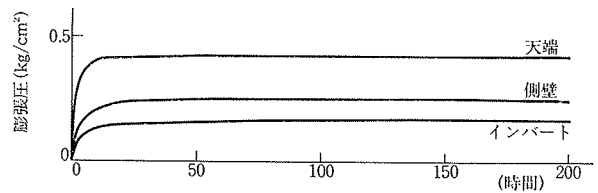


図-5 膨張圧の経時変化

明しうる F.E.M. 解析手法を開発し、解析結果と実験結果を比較したところ、両者の間により一致がみられた。

実際岩盤への適用にあたってはさらに検討を要する問題も少なくないが、地山の膨張性の有無あるいは膨張性のある場合の膨張の程度といったものを、あらかじめ近似的に予測しておくのには、ここに述べた解析手法を使用できる。

参考文献

- 1) 谷津栄寿: 岩盤の吸水膨張について, 岩の力学国内シンポジウム講演集, (1964), pp. 145~154
- 2) 斎藤二郎, 他: 膨張性軟岩の工学的性状について, 大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 95~99
- 3) 村山塑郎, 他: 粘板岩の吸水膨張について, 京都大学防災研究所年報第 8 号, (1965), pp. 495~506
- 4) 土屋 敬, 他: システムロックボルト設計プログラムの開発, 第13回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (1980), pp. 81~84