

大成建設(株) ○里 優 渡村 勝美

1. はじめに

岩盤中に掘削される空洞の安定性は、主として力学的見地から議論される場合が多い。しかし、比較的含水率の高い岩盤において観測されるトンネル壁面の膨み出し等には、空洞掘削に伴う間隙水の移動が関与していると考えられること、あるいは、岩盤の変形、強度特性に対し、間隙水圧や含水率がかなりの影響を及ぼすことなどから、空洞の安定性に係る水理学的な要因についても、充分検討を施す必要がある。本報告は、このような観点から、岩盤の変形挙動と間隙水の移動との関連性について考察を加えるとともに、これらの相互作用を考慮した、地下構造物の安定解析手法の開発を試みるものである。

2. 岩盤の変形と間隙水の移動との相互作用

土質力学の分野では、水の移動と土質材料の変形との相互作用に関する様々な研究が行なわれている。図-1(a)は、土の圧密現象の説明に用いられているモデルである。水を十分に含んだ土に対し、体積変化を生じさせるような外力を、瞬時に作用させた場合、水の剛性が土の構造骨格のそれにくらべて極めて大きいので、構造骨格に応力が生じ得ず、外力は大部分、間隙水圧として領域に貯えられる。この後、水の移動が生ずれば、始めて構造骨格は変形し、応力(有効応力)が発生する。このような土と水との相互作用は、水の剛性と構造骨格の剛性の二つのバネの並列モデルで近似的に表わすことができる。即ち、加えられた外力は、間隙水圧と有効応力の和と密につり合っていると考えるわけである。一方岩盤においては、水が、クラックや節理面等の岩盤内部の空隙に多く存在するため、土の場合とは若干様子が異なってくる(図-1(b))まで、瞬時に外力を作用させた場合においても、岩盤自体の変形が生じ応力が発生し、また、内部の空隙の開閉によって間隙水圧も発生すると考えられる。岩盤内部の空隙どうしが連続している場合には、圧力勾配により水の移動が生ずるが、この質料変化は、岩盤内部のひずみ変化となるため、このときの岩盤の応力変化は、土の場合と異なり、周囲の拘束条件に依存する。例えば、周囲の変形が全て拘束されており、領域より水の流出が生じた場合には、岩盤の応力は徐々に減少し、これとつり合って間隙水圧も減少する。また、周囲の変形を拘束しない場合には、岩盤は収縮するものの、岩盤内の応力、及び間隙水圧は、あまり変化しないことになる。このような相互作用は、二つのバネの直列モデルで近似的に表わすことができる。

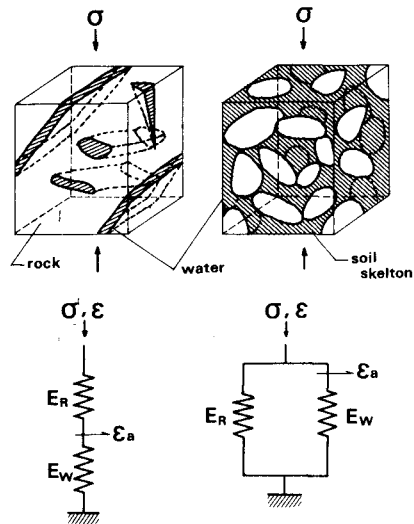


図-1 水の移動と変形

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \phi) = \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_a + \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial t} \phi \quad (1)$$

K: 透水係数, ϕ : 間隙水圧

m: 貯留に関する係数

$$a_1 \frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \phi) = \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_a \quad (2)$$

$$(1-a_1) \frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \phi) = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial t} \phi_a \quad (3)$$

 a_1 : 定数

岩盤における間隙水の移動と変形との相互作用は、以上のことより、(1)~(3)式によって記述することができる。(1)式は、水の運動がダルシー則に従って決定した上で導かれる間隙水の質量保存則である。左辺は質料の変化を表わし、右辺第一項は、これの一部を補った岩盤の変形、第二項は、水自身の変形や飽和度の変化など、岩盤の変形に影響を及ぼさずに補なわれた質量をそれぞれ表わして

いる。(1)式は、このまま解くことが困難なため、岩盤が受け持つ質量変化の割合を表わす定数 Q_1 を導入し、(1)式を(2)、(3)式に分離することとした。 Q_1 は $0 \leq Q_1 \leq 1$ の値をとり、 $Q_1 = 0$ では、水の質量変化が岩盤の変形に全く影響を及ぼさず、水の移動を記述する方程式は浸透流型となる。 $Q_1 = 1$ では、質量変化を全て岩盤の変形が補ない、間隙水圧の変化は、岩盤の応力状態に依存することになる。

(4)、(5)式は、直列バネの概念から導かれる岩盤の構成式である。

(4)式中の Q_2 は実験定数であり、付加した外力と、生じた間隙水圧の比で与えられる。また ϕ_e は、岩盤の変形に果影響を及ぼさずに生じた間隙水圧変化である。(2)~(5)式、及び、岩盤の平衡方程式(6)を連立させて解くことにより、岩盤における水の移動と変形の相互作用を評価することができる。

3. 数値解析例

(1)~(6)式で表わされる岩盤の挙動を調べるため、数値化手法を用いて、数値解析を試みた。具体的な定式化は、文献(2)に示したので参照されたい。

図-2~4は、静水圧状態にある岩盤にトンネルを掘削した場合の解析結果である。用いた物性値は、次のとおりである。

初期応力 $\sigma_H = \sigma_V = 10 \text{ MPa}$, 初期間隙水圧 10 MPa

$E = 2.5 \times 10^3 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, $K = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/hr}$

純せん断強度 $C = 0.1 \text{ MPa}$, $\phi = 45^\circ$

$Q_1 = 1.0$, $Q_2 = 1.0$

なお、岩盤は等方均質の弾性体と仮定した。

図-2は、時間に伴う応力変化を示している。トンネル周囲では、排水により岩盤が収縮し、ちょうどトンネル壁面の温度が低下した場合と同様に応力が減少していく。また、これとつり合って、間隙水圧分布も変化する。この結果、岩盤の応力状態は、しばしば破壊基準に近づいてゆき、また局所的には引張応力が生ずることから、トンネル周囲には、不安定な領域が拡大してゆく(図-3~4)

4. まとめ

本報告では、岩盤の変形と間隙水の移動との相互作用を、直列バネモデルの概念を用いて表現し、数値解析を試みた。解析結果からは、ここで仮定した相互作用の効果を明瞭に見ることができた。しかしながら、ここで行なった仮定に対する吟味は、未だ不充分であり、今後、実験や数値計算を重ね、検証してゆく所存である。

(参考文献)

(1) Biot, M.A. "General Theory of 3-Dimensional Consolidation" J. of Appl. Phys. vol 12, 1941

(2) 里, 重村 "岩盤内に於ける間隙水および熱の移動を考慮した変形解析手法について" 第16回岩盤力学に関するシンポジウム 1984

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = Q_2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\sigma_{ii}}{3} \right) + \frac{\partial \phi_e}{\partial t} \quad (4)$$

Q_2 : 定数

ϕ_e : K 自身の変形による間隙水圧

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} (\epsilon_{kl} - S_{kl} \epsilon_a) \quad (5)$$

ϵ_a : 体積ひずみ

D: 水を含む岩盤の剛性

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} = 0 \quad (6)$$

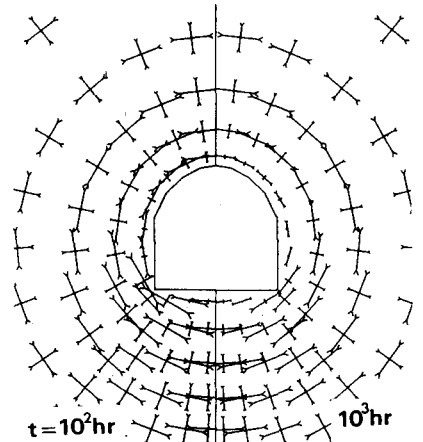


図-2 空洞周囲の応力変化

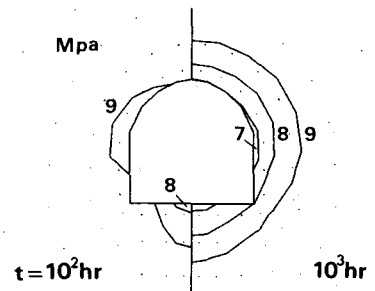
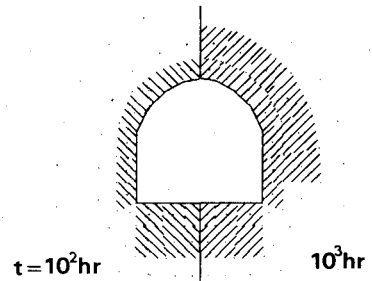


図-3 空洞周囲の間隙水圧変化



▨: 応力状態が強度の80%以上

図-4 破壊条件に対する接近度