

III-74

トンネル掘削における岩盤内の
圧縮気体の影響

京都大学工学部	正員	田村	武
同	正員	足立	紀尚
日本鉄道建設公団	正員	土居	則夫

1. はじめに

岩盤内に圧縮された気体があると想定したとき、①トンネル掘削などによる応力解放時にそれが気体法則に従って膨張すること、および②岩盤内の「有効応力」が逡減することから、岩盤に過大な変位が生じるものと考えられる。従来、地下水などの(非圧縮性に近い)流体の存在を仮定した岩盤はしばしば解析されてきたが、気体との力学的な相互作用を考慮した解析例はほとんど見当たらない。本報告では、はじめに圧縮性流体を仮定したBiot (1941) のモデルを弾塑性体にて拡張し、軸対称問題に有限要素法を適用しながら、「非排気」条件のもとでのトンネル掘削に与える圧縮気体圧の影響を検討する。

2. 圧縮空気を含む岩盤のモデル化

Biot (1941) の圧縮性流体を含む有孔物質を弾性体モデルでは、力学量として(全)応力 σ_i の他に、流体圧 p 、また、変形量としてひずみ ε_i の他に内部の空隙の増加を表す量 θ が用いられ、それぞれが線形関係:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= c_{i1}(\dot{\sigma}_i - \alpha \dot{p}) + c_{i2}(\dot{\sigma}_2 - \alpha \dot{p}) + c_{i3}(\dot{\sigma}_3 - \alpha \dot{p}) \\ &= c_{i1}\dot{\sigma}_1 + c_{i2}\dot{\sigma}_2 + c_{i3}\dot{\sigma}_3 - \alpha c_i \dot{p} \quad (i = 1, 2, 3)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\dot{\theta} = -c_1 \alpha \dot{\sigma}_1 - c_2 \alpha \dot{\sigma}_2 - c_3 \alpha \dot{\sigma}_3 + \frac{1}{R} \dot{p} \quad (c_i = c_{i1} + c_{i2} + c_{i3}) \quad (2)$$

で結ばれている。ここに、「 $\cdot$ 」は時間変化率、 C_{ij} (C_i)、 α 、 R は材料定数であり、 $(\sigma_i - \alpha p)$ は「有効応力」である。なお、簡単のためせん断成分は考えていない。

一方、気体法則によれば、(等温下で)

$$p(nV) = p_0(n_0 V_0) \quad (3)$$

が成立する。ここに V は岩塊の体積、 n は間隙率で、先述の θ とは $\dot{\theta} = (nV)/V$ なる関係がある。なお、添字0は初期状態における量を意味する。式(3)を時間で微分したあと、 n を消去すれば

$$0 = \dot{\theta} + \frac{d_0 V_0}{p^2 V} \dot{p} \quad (d_0 = p_0 n_0) \quad (4)$$

を得る。これが「非排気」条件を表す。これと式(2)から $\dot{\theta}$ を消去すれば

$$\dot{p} = \frac{\alpha R p^2 V}{p^2 V + R d_0 V_0} (c_1 \dot{\sigma}_1 + c_2 \dot{\sigma}_2 + c_3 \dot{\sigma}_3) \quad (5)$$

なる「非排気条件での全応力と気体圧の変化率の関係」を得る。この式は、構成式(1)から $\dot{p}$ を消去することと、 $\dot{\sigma}_i$ から $\dot{p}$ を求める場合に用いられる。すなわち、式(5)を(1)に代入すれば、全応力とひずみの増分のみで表した構成式となるが、これを通常の有限要素法に適用すれば「全応力」のもとで、変形解析が可能となる。こうして、 $\dot{\sigma}_i$ を式(5)に代入すれば、 $\dot{p}$ が得られ、同時に有効応力も求めることができる。ここでは、有効応力に対して、等方弾性体およびモール・クーロンの降伏条件を仮定して C_{ij} をまず導出し、上記の方法に従って非排気条件下での全応力に対する構成式を求めながら、増分計算によりトンネル掘削を解析した。塑性範囲においてごくわずかの加工硬化を仮定している。

3. 解析例と考察

表-1に解析条件等を示す。初期全応力は等方であり、それから気体圧に係数 α を乗じて差をとったものが有効応力である。半径方向に50個の線形要素に分割して有限要素法を用いた。外径 r における変位は拘束されており、内径 r_i における初期地圧を200回の繰返しにより除荷した。図-1は粘着力 $c=5 \text{ kgf/cm}^2$ 、初期気体圧 20 kgf/cm^2 の場合の有効応力と気体圧分布を示している。周知のように(等方)弾性体の範囲で軸対称問題を解析すると、体積ひずみは半径方向に一樣となることから気体圧も一樣になる。しかし、図-1の σ'_θ の折れ曲がり点である弾塑性境界より内部では、岩盤が余分に膨張し気体圧 p は降下している。ライニングのない状態を仮定しているため、トンネル周辺では全応力 σ_r は0となる。しかるに非排気条件のもとでは、そこで気体圧が残存するため、有効応力 σ'_r は負となる。図-2は、粘着力をパラメータにしたとき、初期気体圧によってトンネル内壁の変位(コンバージェンス)がどのように変化するかを調べたものである。なお、同図には参考のため、完全な弾性体に対するものも記されている。この図からわかるように、すべての場合において気体圧が大きくなると、変位が単調に大きくなる。とくに粘着力の小さい場合ではその傾向が著しい。図-3は、図-2に対応して、それぞれの場合の弾塑性境界の拡がりを示したものであるが、気体圧の効果は結果として塑性変形の大きさとして反映していることが窺える。

以上の結果は微小変形理論に基づいたものであるが、実際上、着目すべきトンネル周辺部においては、岩盤変位が大きくなるため、それを加味したうえで、気体との相互作用を検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1) Biot, M. A. : General Theory of Three-Dimensional Consolidation, Journ. Appl. Phys., vol.12, pp.155-164, 1941.

解析条件	表-1
内径 $r_i = 3 \text{ m}$	土被り $H = 150 \text{ m}$
外径 $r_o = 30 \text{ m}$	単位体積重量 $\gamma = 2 \text{ gf/cm}^3$
ヤング率 $E = 2000 \text{ kgf/cm}^2$	ポアソン比 $\nu = 0.333$
内部摩擦角 $\phi = 25^\circ$	初期間隙率 $n_o = 0.3$
式(1)の係数 $\alpha = 0.4$	
式(2)の係数 $R = \beta K$	
ただし、 $\beta = 0.5$	K : 弾(塑)性体積弾性係数

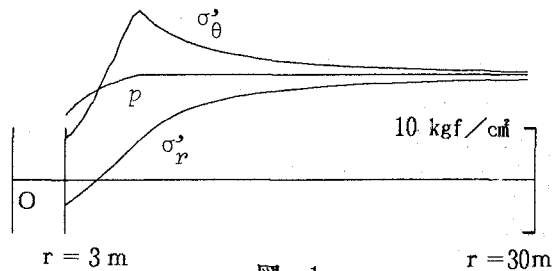


図-1

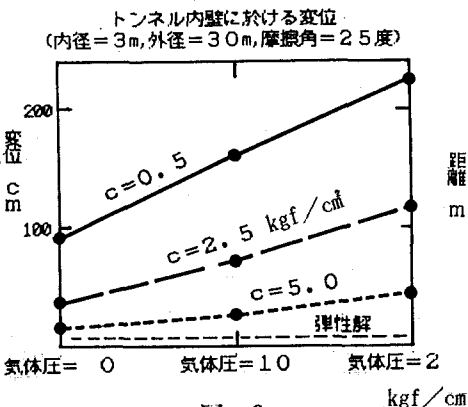


図-2

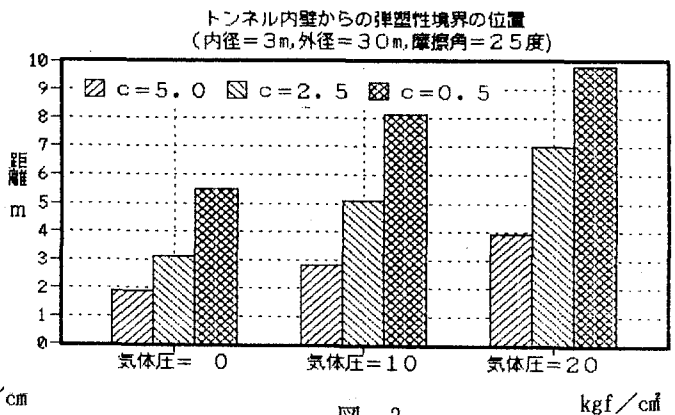


図-3