

(84) ガス発生を考慮した非線形軟岩トンネル解析

近畿大学理工学部 久武勝保
神戸大学工学部 桜井春輔
日本鉄道建設公団 土井則夫
西松建設(株) 稲葉 力

Non-linear Analysis of Soft Rock Tunnel Considering Existence of Gas

M. HISATAKE kinki University
S. SAKURAI Kobe University
N. DOI Japan Railway Construction
Public Corporation
T. INABA Nishimatu Construction CO., LTD

Abstract

A theoretical method to calculate ground stresses, strains and displacements around a circular tunnel is newly presented under consideration of existence of gas. In the analysis, expansion of gas due to reduction of mean principal stress, non-linear stress-strain relationships, brittle strength reduction and post-peak dilatancy of the rocks are taken into account.

The influence of gas expansion on tunnel movements is analytically investigated.

1. 緒 論

トンネルの膨張特性の原因は種々考えられるが、その一つに、地山中でガスが発生・膨張し、トンネルのはらみ出しに影響するのではないかと考えられる場合がある。しかし、ガスの発生メカニズムと共に、そのトンネル膨張に及ぼす影響について、力学的に明らかにした研究は少ない。

そこで、本研究では地山中に飽和あるいは不飽和状態で存在する油が、トンネル掘削に基づく平均主応力減少に起因して気化し、ガスとして発生すると共に、その後のさらなる応力減少により、ガスの気体膨張の形でトンネルがはらみ出すのではないかと考え、等方初期応力円形トンネルの膨張特性について、解析的に検討した。

なお、下記に示す軟岩及びガスの諸特性が仮定されている。

- 1) 軟岩はピーク強度までは、拘束圧によって異なる非線形応力・ひずみ関係を呈する。
- 2) ピーク強度に達した後、強度低下を示す場合もある。
- 3) 降伏領域ではダイレイタンスによる体積膨張を示す。
- 4) ガスはボイル・シャルルの法則に従う。

2. 解析条件

2. 1 軟岩の応力-ひずみ特性

本解析ではピーク強度に達するまでは、八面体空間における一般化された双曲線応力・ひずみ関係(図-1)を採用する。

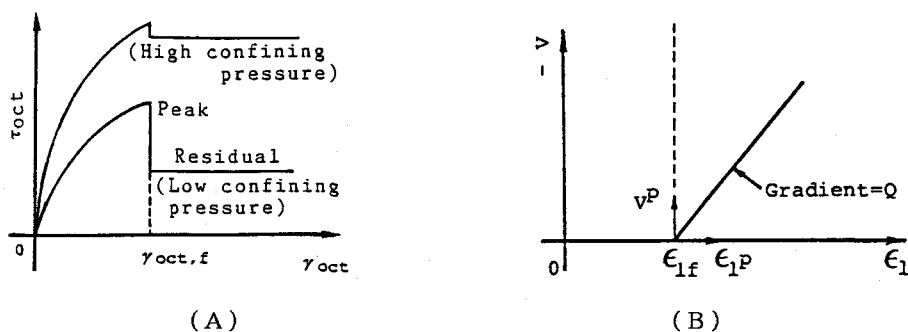


図-1 軟岩の構成関係

$$\tau_{oct} = \frac{\gamma_{oct}}{e_1 + f_1 \cdot \gamma_{oct}} \quad (1)$$

ここに、

$$\tau_{oct} = [(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_2 - \sigma_3) + (\sigma_3 - \sigma_1)]^{0.5} / 3$$

$$\gamma_{oct} = 2 [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)]^{0.5} / 3$$

$$e_1 = 1/G_i, \quad f_1 = R/\tau_{oct,f}, \quad R = \tau_{oct,f}/\tau_{oct,ult}$$

G_i : 初期接線せん断弾性係数、 $\tau_{oct,f}$: 有限ひずみにおいて生じる観測最大応力

$\tau_{oct,ult}$: 双曲線モデルから求められる終局応力、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 最大, 中間, 最小主応力、

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: 最大, 中間, 最小主ひずみ

なお、 G_i 、 $\tau_{oct,f}$ は、それぞれ拘束圧の関数であるとするが、これらの比、 $G_i/\tau_{oct,f}$ は一定であると仮定する。また、本解析においては、体積変化はピーク強度に達した後のみ生じ、ピーク強度に達するまでは生じないと仮定する。

2.2 強度基準

実際の岩盤の残留強度はピーク強度と完全残留強度の間に存在する。完全な残留強度状態では、強度は拘束圧の一次関数で表現されるため、ピーク強度及び残留強度に対して下記のような破壊基準を用いる。

$$\text{ピーク強度} : \sigma_1 = N_r \cdot \sigma_3 + (m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2)^{0.5} \quad (2)$$

$$\text{残留強度} : \sigma_1 = N_r \cdot \sigma_3 + (m_r \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s_r \cdot \sigma_c^2)^{0.5} \quad (3)$$

ここに、 $N_r = \tan^2(45^\circ + \phi_r/2)$ 、 ϕ_r : 完全残留状態時の摩擦角、
 m, s, m_r, s_r : 岩の特性に応じて決まる定数、 σ_c : インタクトな岩盤の一軸圧縮強度

3. 解析手法

2. の条件の下において、応力に関する本解析手法の詳細は、文献1) に発表しているので、その結果を示せば以下の通りである。

3.1 残留強度領域内の応力

$$\left(\frac{r_i}{r} \right) \left\{ \frac{a \cdot \sigma_r + (b_1 \cdot \sigma_r + c_1)^{0.5}}{a \cdot p_i + (b_1 \cdot p_i + c_1)^{0.5}} \right\}^\alpha \left\{ \frac{2a (b_1 \cdot p_i + c_1)^{0.5} + b_1 - (4a^2 \cdot c_1 + b_1^2)^{0.5}}{2a (b_1 \cdot \sigma_r + c_1)^{0.5} + b_1 - (4a^2 \cdot c_1 + b_1^2)^{0.5}} \right\}^{\beta_1} \cdot \left\{ \frac{2a (b_1 \cdot \sigma_r + c_1)^{0.5} + b_1 + (4a^2 \cdot c_1 + b_1^2)^{0.5}}{2a (b_1 \cdot p_i + b_1)^{0.5} + b_1 + (4a^2 \cdot c_1 + b_1^2)^{0.5}} \right\}^{\beta_1} = 1 \quad (4)$$

ここに、 $a = 2 \sin \phi_r / (1 - \sin \phi_r)$ 、 $b_1 = m_r \cdot \sigma_c$ 、 $c_1 = s_r \cdot \sigma_c^2$ 、 $\alpha = 1/a$ 、 $\beta_1 = b_1 / \{a (4a^2 \cdot c_1 + b_1^2)^{0.5}\}$ 、 p_i は、覆工外面からトンネル内壁に作用する内圧
式(4)は、Newton-Raphson法やSimplex法などの数値計算によって容易に解くことが出来る。

3.2 ピーク強度領域内の応力

ピーク強度領域内の応力 σ_r は次式の様に表される。

$$\left\{ \frac{a \cdot \sigma_r + (b \cdot \sigma_r + c)^{0.5}}{a \cdot P + (b \cdot P + c)^{0.5}} \right\}^\alpha \cdot \left\{ \frac{2a (b \cdot P + c)^{0.5} + b - (4a^2 c + b^2)^{0.5}}{2a (b \cdot \sigma_r + c)^{0.5} + b - (4a^2 c + b^2)^{0.5}} \right\}^{\beta_2} \cdot \left\{ \frac{2a (b \cdot \sigma_r + c)^{0.5} + b + (4a^2 c + b^2)^{0.5}}{2a (b \cdot P + c)^{0.5} + b + (4a^2 c + b^2)^{0.5}} \right\}^{\beta_2} \cdot \left\{ \frac{A}{k r^2} + 1 \right\}^\gamma = 1 \quad (5)$$

ここに、

$$\gamma = \frac{1}{2R}, \quad \beta_2 = \frac{b}{a (4a^2 c + b^2)^{0.5}}, \quad f = R / (\sqrt{6} \cdot \tau_{oct.f})$$

$$k = \frac{R}{2\sqrt{6} \cdot R \cdot (G_i / \tau_{oct.f})}, \quad b = m \cdot \sigma_c, \quad c = s \cdot \sigma_c^2$$

$$A = \frac{R}{1-R} \cdot k \cdot r^{*2}$$

なお、トンネル半径方向変位 u は $u = A/r$ 、また r^* は降伏域半径であり、式(4)、(5)の半径方向応力の釣合より求められる。

3.3 変位の決定

トンネル掘削前の地山中のガス圧力を P 、トンネル掘削後のガス圧力を P^* とすると、掘削によるガス及び岩の総体積変化 ΔV^P は

$$\begin{aligned} \Delta V^P &= \frac{1}{1+e} \cdot \Delta V_R^P + \Delta V_G^P \\ &= \frac{1}{1+e} \cdot \Delta V_R^P - \frac{e}{1+e} \left(1 - \frac{S r}{100} \right) \cdot \frac{P - P^*}{P^*} \end{aligned}$$

$$-\alpha \cdot \frac{(P-P^*)(P+P^*)}{2P^*} \quad (6)$$

ここに、 e 、 S_r (%) はそれぞれ間隙比と飽和度である。また、 ΔV_R^P 、 ΔV_G^P は、それぞれ岩とガスの体積変化であり、 ΔV_R^P は、

$$\Delta V_R^P = -Q \cdot \left(\frac{u}{r} - \frac{R}{1-R} k \right) \quad (7)$$

Q は図-1 参照。式 (7) を式 (6) の右辺に代入した結果が次式

$$\Delta V^P = \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = \frac{u}{r} + \frac{du}{dr} \quad (8)$$

に一致することより、この微分方程式を解いて、塑性域内の変位が求められる。

$$u = \frac{B_1}{B_2 + 1} \cdot r + r \left(\frac{r^*}{r} \right)^{(1+B_2)} \cdot \left\{ k \cdot \frac{R}{1-R} - \frac{B_1}{B_2 + 1} \right\} \quad (9)$$

ここに、

$$B_1 = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{R}{1-R} k \cdot Q - \frac{P-P^*}{P^*} \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \left\{ 1 + \frac{S_r}{100} \left(\frac{P+P^*}{2} \cdot \alpha_s - 1 \right) \right\}$$

$$B_2 = \left\{ 1 + \frac{1}{1+e} \cdot Q \right\}$$

上式中、 P^* は一般に r の関数であるが、ここでは、トンネル壁面 ($r=r_i$) 及び弾塑性境界 ($r=r^*$) でのガス圧力の平均値を用いる。

また、ピーク強度領域内の変位は

$$u = k \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{r^{*2}}{r}$$

4. 考 察

本解析を適応した地山のパラメータを表-1 に示す。

表-1 地山のパラメータ

一軸圧縮強度 = 3 kgf/cm²、初期応力 = 29.9 kgf/cm²、トンネル半径 = 3 m、 $R = 0.857$ 、 $G_i / \tau_{oct} = 7\%$ 、 $m = m^* = 2.21$ 、 $s = s^* = 1.0$ 、含水比 = 27.5%、岩の比重 = 2.68、湿潤密度 = 1.926 t f / m³、間隙比 = 0.773、飽和度 = 95.3%、オズワルドの溶解係数 = 0.0389

図-3は、内圧比 p_i/P をパラメータとし、ガスの発生を考慮した解析としない解析において、トンネル周辺地山の変位がどの程度違うかを比較して示したものである。図中黒丸で示した位置で地山は降伏し、それより深いところでは両解析による違いはないが、しかし、降伏領域内の変位は、内圧比の小なるほど、ガスの存在を考慮した場合で大である。

図-4は、内圧比が0.3の場合において、間隙比 e の違いによりトンネル境界変位がどの程度違うかを調べたものであるが、これよりトンネル変位に及ぼす e の影響が非常に大であるのが理解できる。しかし e の増加と共に変位の増加率は双曲線的に減少している。

図-5は、トンネル壁面変位に及ぼす飽和度 S_r の影響を示したものであるが、飽和度の減少にともない壁面変位が線形的に増加するのが理解できる。これは、不飽和状態では、トンネル掘削以前に既存のガスが存在し、掘削により既存ガスが膨張することから容易に理解できる。

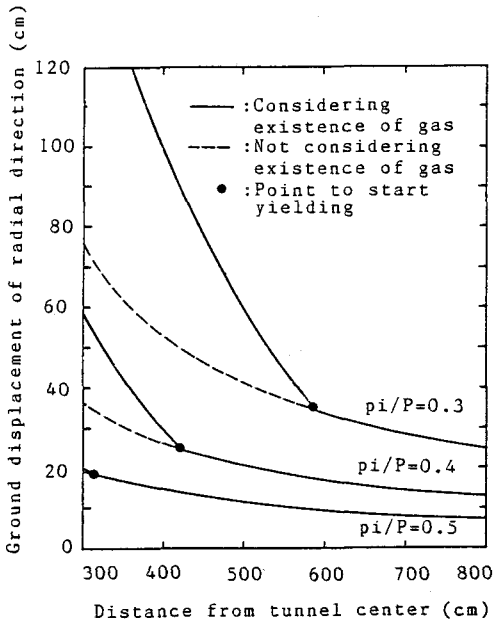


図-3 ガスの存在によるトンネル変位の違い

4. 結 論

地山に飽和、または不飽和状態で存在する油が、トンネル掘削に伴う平均主応力の減少によって気化・膨張するとして、トンネル挙動を解析した。内圧比、飽和度、間隙比などをパラメータとして解析したところ、ガス発生の特長に及ぼす影響は、トンネル周辺地山が降伏する場合において、無視できないとの結論を得た。今後、種々検討を要すると認められる。

参考文献 1) M. Hisatake, E. J. Cording, T. Ito, S. Sakurai and N. Phien-weja: Proc. Int. Symp. on Rock Mech. and Rock Physics at Great Depth, Vol. 2, pp. 553-560, 1989.

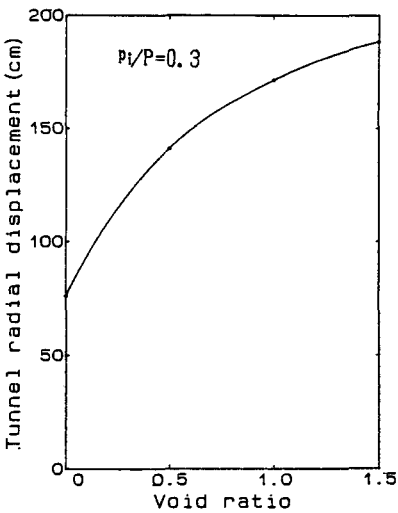


図-4 間隙比によるトンネル境界変位の違い

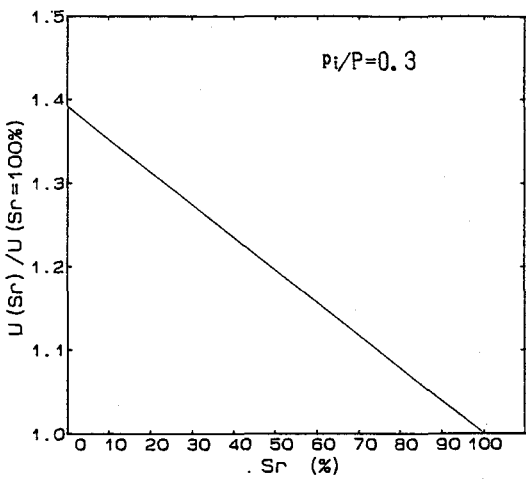


図-5 飽和度によるトンネル境界変位の違い