円形トンネル周辺の塑性領域と地山特性曲線の考察

愛知県庁　○和久田　俊輔　　鳥取大学工学部　木山　英郎
鳥取大学工学部　藤村　尚　　鳥取大学工学部　西村　強

1.はじめに　トンネルを掘削すると，掘削解放力によってトンネル壁面は内空側へ変位する．この押出し変位と壁面に働く圧力（内圧）についての平衡状態の関係を与えるものが地山特性曲線と呼ばれるものである．一般的に，この曲線は，押出し変位の増加と共に地圧が単調に減少するか，更に極小値をとって増加に転ずるとされている．この典型的な例がNATMの基本概念とされるFenner−Pacher曲線である．本研究では，まず地山がMohr−Coulombの降伏規準に従うとした円形トンネル周りの弾塑性解析解を求める．そして，降伏後の地山物性が塑性ひずみε_pをパラメータとした関数として表わされると仮定して，内空変位－支保圧曲線を求める．このとき，塑性化した領域では重力が無視できないとした解析解も誘導して，曲線への影響も検討する．

2.円孔周辺の応力・変形の解　図-1のように，トンネル周辺の岩盤を，初期地山応力が静水圧的でその大きさがp_0であるような均質等方性の岩盤に，半径aの円形トンネルを開削したモデルを考える．

トンネル周辺の応力の釣合い方程式は，極座標(r,θ)表示で以下の通りである．

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=\begin{cases}0 & \text{（重力の影響を考慮しない場合）} \quad \cdots\cdots(1.1)\\ \gamma\cos\theta & \text{（重力の影響を考慮する場合）} \quad \cdots\cdots(1.2)\end{cases}$$

τをせん断応力，σを直応力とすれば，Mohr−Coulombの条件は次式となる．

$\tau=c+\sigma\tan\phi$　$\cdots(2)$　ここに，cは粘着力，ϕは内部摩擦角である．

また，最大主応力σ_1，最小主応力σ_3，一軸圧縮強度S_0を用いて表わすと，

$\sigma_1=S_0+\zeta\sigma_3$　$\cdots(3)$　ここに，ζは内部摩擦角の関数である．

なお，これらは以下のように関係付けられる．

$$S_0=\frac{2c\cos\phi}{1-\sin\phi}\quad\cdots\cdots(4)\qquad \zeta=\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\quad\cdots\cdots(5)$$

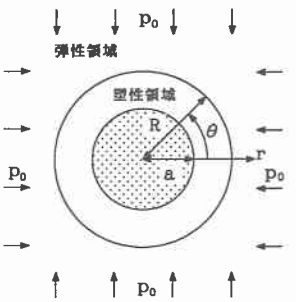


図-1　解析モデル

また，降伏後も式(2)が，応力を規制する条件式として降伏後のパラメータc'，ϕ' (S_0',ζ')に対して成立すると考える．1.にも述べたように，本研究では，これらが塑性ひずみの関数として与えられることになる．

今，円孔周りでは，σ_θが最大主応力，σ_rが最小主応力であると仮定すれば，式(3)を用いて，式(1)は次のように書き換えられる．

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r}+\frac{(1-\zeta')\sigma_r-S_0'}{r}=\begin{cases}0 & \cdots\cdots(6.1)\\ \gamma\cos\theta & \cdots\cdots(6.2)\end{cases}$$

壁面(r=a)では，$\sigma_r|_{r=a}=\sigma_{ra}$であるとすれば，重力を考慮する式(6.2)の$\sigma_r$に関する解は，

$$\sigma_r=\left(\sigma_{ra}+\frac{S_0'}{\zeta'-1}\right)\left(\frac{r}{a}\right)^{\zeta'-1}-\frac{S_0'}{\zeta'-1}+\frac{\gamma a\cos\theta}{\zeta'-2}\left\{r-a\left(\frac{r}{a}\right)^{\zeta'-1}\right\}\quad\cdots\cdots(7)$$

上式の右辺の第3項が重力に関する項であり，式(6.1)の解では無視される．

次に，弾塑性境界上の応力$\sigma_r|_{r=R}$をσ_{rR}と表記すれば，σ_{ra}は次式となる．

$$\sigma_{ra}=\left(\sigma_{rR}+\frac{S_0'}{\zeta'-1}\right)\left(\frac{R}{a}\right)^{1-\zeta'}-\frac{S_0'}{\zeta'-1}+\frac{\gamma a\cos\theta}{\zeta'-2}\left\{1-\left(\frac{R}{a}\right)^{2-\zeta'}\right\}\quad\cdots\cdots(8)$$

ここで，r=Rでは初期降伏条件式(2)あるいは式(3)が成立しているので，

$\sigma_{rR}=(2p_0-S_0)/(\zeta+1)$

と求められる．一方，壁面半径方向の変形量u_a/aは，掘削後の増分量として，次のようである．

$$\frac{u_a}{a} = \frac{1+\nu}{E}\left(p_0 - \sigma_{ra}\right)\left(\frac{R}{a}\right)^2 \qquad \cdots\cdots(9)$$

3.支保圧－内空変位曲線の算出　西村[1)]は降伏後のパラメータc',ϕ'が,塑性領域の平均的な塑性ひずみ$\bar{\varepsilon}_p$の関数として定められるとして，$\sigma_{ra}-u_a/a$曲線の算出例を報告している．ここでは,その考え方を導入するとともに，併せて重力の影響も検討する．その算出手順を示すと以下のようになる．①まず，図-2のように，塑性状態におけるc,ϕの劣化過程をε_pに依存した形で設定する．この時，ε_pはR/a，S_0'，ζ'の3量の関数として表わされるため，ε_pが決まれば，塑性半径比R/aも求まることになる．②R/aが求められると，式(8)(9)よりσ_{ra}ならびにu_a/aが求められることになり，図-2の劣化パターンに対応する$\sigma_{ra}-u_a/a$曲線が決まる．

4.解析結果および考察　表-1に示すような物性をもつ地山に半径a(m)のトンネル掘削を考える.初期地山応力として，表中に示すように25～150kgf/cm²までの6段階を設定した．図-2のように，塑性ひずみの進展とともに，材料物性c,ϕが図のように劣化するモデルを仮定する．このとき,ε_pをパラメータとして、ε_p=0.0, 0.2,･･･2.0%のときの塑性状態の劣化した材料物性を拾い出すと表-2に示す通りである．また，図-2および表-2を参考にして，差応力～差ひずみ曲線を描くことも可能である．先に示した手順により,$\sigma_{ra}-u_a/a$曲線を求めると図-3のようになる．p_0=25,50kgf/cm²では，u_aの増大とともに，σ_{ra}は単調に減少しているのに対し，p_0>75kgf/cm²では，σ_{ra}は極小値を示した後，増加に転じていること，また,塑性領域のみに重力が作用するとした場合の影響は，p_0が小さいほど大きいものの，σ_{ra}/p_0の値そのものへの影響は総じて小さいことなどが同図よりわかる．一方，図-4には，完全弾塑性体地山($S_0'=S_0$,$\zeta'=\zeta$)のときの$\sigma_{ra}-u_a/a$曲線を示した．これらの比較より，σ_{ra}が極小値を経て,増加に転ずるいわゆるFenner－Pacher型となるかどうかは，降伏後の応力－ひずみ関係に依存することが推察される．

参考文献　1)西村 正夫：トンネル掘削に伴う周辺岩盤のゆるみ領域と安定性評価に関する研究,京都大学学位請求論文,pp.19～61,1991.

表-1　解析定数

初期地山応力	p_0=25～150kgf/cm²
ヤング率	E =15000kgf/cm²
ポアソン比	ν =0.2
粘着力	c =14.43kgf/cm²
内部摩擦角	ϕ =30°
一軸圧縮強度	S_0=50.0kgf/cm²
内部摩擦角関数	ζ =3

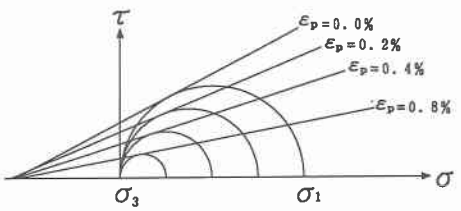
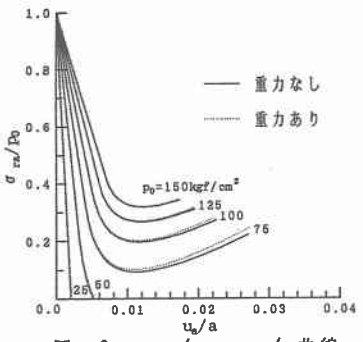


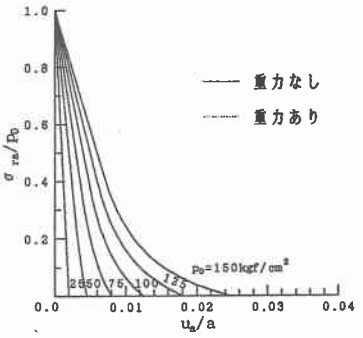
図-2　塑性ひずみε_pに対する降伏条件の変化

表-2　物性劣化例

パラメータ	岩盤物性			
ε_p (%)	c' (kgf/cm²)	S_0'	ϕ' (°)	ζ' (-)
0.0	14.43	50	30	3.000
0.4	11.55	37	26	2.561
0.8	8.66	26	22	2.198
1.2	5.77	16	18	1.894
1.6	2.88	7	14	1.638
2.0	0.00	0	10	1.420



図－3　$\sigma_{ra}/p_0-u_a/a$曲線



図－4　$\sigma_{ra}/p_0-u_a/a$曲線