

ダイレイタンシーを考慮した地山特性曲線の解析

鳥取大学 学会員 ○頃安 晴貴

鳥取大学 フェロー 西村 強

鳥取大学 正会員 河野 勝宣

1. 緒言

地山特性曲線 (Ground Reaction Curve, GRC) はトンネル切羽付近の応力と変形を掘削断面内の2次元問題として表現したものである。山岳工法における地山の荷重負担を表現するものとして示され¹⁾, 地山の支保力の極大値の再現を中心として多くの理論解析, 数値解析が報告されている。西村²⁾は, 地山材料の降伏後の強度劣化 (ひずみ軟化) に注目して地山特性曲線の解析を行っている。この解析では, 側圧の増加とともに破壊後のひずみ軟化の特性が大きくなる応力-ひずみ曲線を採用すれば極大値の表現が可能であったとしている。瀬崎ら³⁾は円孔周りの弾塑性解を基本に重力項を導入して極大値の再現を試みている。上述のように地山の強度定数 (c, ϕ), 弾性係数 E , ポアソン比 ν 等に加えて軟化特性などの特徴を導入する例は見られるものの, 降伏後の地山材料の体積変化の特徴が壁面変位や塑性域の進展に及ぼす影響をモデル化した例は少ないようである。本文ではダイレイタンシー角 ψ を計算パラメーターに加えた円孔周辺の応力と変形に関する計算例を報告する。

2. ダイレイタンシー角を導入した変形の解

内空圧 σ_{ra} と壁面変位 u_a の算出に円孔周りの応力に関する二次元弾塑性解を利用する。均質地盤, 等方応力状態を仮定し, 地盤材料はモール・クーロン規準に従う材料とする。地山材料には弾性係数 E , ポアソン比 ν , 強度定数 c, ϕ を用いる。半径 a のトンネルを掘削するとき, 円孔周辺に生じる応力, 変形の状態が平面ひずみ状態に従うものとし, 円孔の中心を原点とする極座標 (r, θ) を導入すると, 図-1 に示す微小領域に関して支配方程式は以下のように示される。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

弾塑性境界 $r=R$ における応力は, $\sigma_r|_{r=R}=\sigma_{rR}$, $\sigma_\theta|_{r=R}=2\sigma_0-\sigma_{rR}$ であり, 降伏条件を満足していることより弾塑性境界における半径方向応力は次式のように求まる。

$$\sigma_{rR} = \frac{2\sigma_0 - S_c}{\zeta + 1} \quad (2)$$

ここに, ζ と S_c は次のとおりである。なお, $\phi > 0$ とする。

$$\zeta = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) \quad (3)$$

$$S_c = 2c \cos \phi / (1 - \sin \phi) \quad (4)$$

$\zeta > 1$ に対して解くと塑性領域の応力は次式で求まる。

$$\sigma_r = \frac{S_c}{\zeta - 1} \left\{ \left(\frac{r}{a} \right)^{\zeta - 1} - 1 \right\} + \sigma_{ra} \left(\frac{r}{a} \right)^{\zeta - 1} \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{S_c}{\zeta - 1} \left\{ \zeta \left(\frac{r}{a} \right)^{\zeta - 1} - 1 \right\} + \zeta \sigma_{ra} \left(\frac{r}{a} \right)^{\zeta - 1} \quad (6)$$

弾塑性境界上の応力を求めるには, $r=R$ とすればよい。さらに, $r=R$ における σ_r の連続条件から次式が求まる。

$$\frac{R}{a} = \left\{ \frac{(\zeta - 1)\sigma_{rR} + S_c}{(\zeta - 1)\sigma_{ra} + S_c} \right\}^{\frac{1}{\zeta - 1}} \quad (7)$$

弾性領域 $r > R$ における変位は次式で求められる。

$$u_r = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E} \sigma_0 r + \frac{(1+\nu)}{E} (\sigma_0 - \sigma_{rR}) \cdot \frac{R^2}{r} \quad (8)$$

掘削以後の変位として, 第2項を採用して,

$$u_r = \frac{(1+\nu)}{E} (\sigma_0 - \sigma_{rR}) \cdot \frac{R^2}{r} \quad (9)$$

次に塑性領域 $a \leq r \leq R$ の変位の算出について述べる。降伏時までは弾性ひずみ ε^e のみが, 降伏時以降は塑性ひずみ ε^p のみが生じているとし, 次のように分離して表示できるとする。ここに, 添え字 e と p はそれぞれ弾性成分および塑性成分を示す。

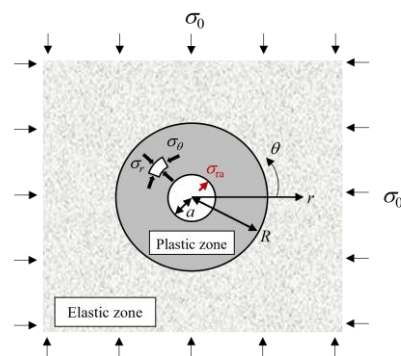


図-1 等方応力下の円形トンネル

キーワード NATM 地山特性曲線 ダイレイタンシー

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101 鳥取大学 TEL0857-31-5297

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p \quad (10)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^p \quad (11)$$

塑性域内では弾性ひずみは塑性化時点のまま一定である。塑性ひずみは塑性ポテンシャル $G(\sigma_r, \sigma_\theta)=0$ を用いて求められる。

$$G(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi} \sigma_r \quad (12)$$

ここに、 ψ はダイレイタンシー角であり、 $\psi=\phi$ のとき、関連流れ則である。塑性ひずみ増分は次式で与えられる。

$$d\varepsilon_r^p = d\lambda \left(\frac{\partial G}{\partial \sigma_r} \right), \quad d\varepsilon_\theta^p = d\lambda \left(\frac{\partial G}{\partial \sigma_\theta} \right) \quad (13)$$

ここに、 $d\lambda$ は正の比例定数である。式(12), (13)より

$$\frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi} \varepsilon_\theta^p + \varepsilon_r^p = 0 \quad (14)$$

を得る。図-1 は軸対称問題であるので、周方向変位成分の勾配はゼロである。上式を変位の関数として書き換えると次式を得る。

$$\frac{\partial u_r^p}{\partial r} + N_\psi \frac{u_r^p}{r} = 0 \quad (15)$$

ここに、 $N_\psi = (1+\sin\psi)/(1-\sin\psi)$ 。これを解くと、

$$u_r^p r^{N_\psi} = C \quad (16)$$

ここに、 C は定数。塑性円内の半径方向変位は、

$$u_r = u_r^e + u_r^p = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 - \sigma_{rR}) \frac{a^2}{r} + \frac{C}{r^{N_\psi}} \quad (17)$$

$r=R$ では u_r は式(9)の結果と一致する必要があることを利用し、そして、 $r=a$ とすれば、

$$\frac{u_a}{a} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 - \sigma_{rR}) \left\{ 1 + \left(\frac{R}{a} \right)^{N_\psi-1} \left\{ \left(\frac{R}{a} \right)^2 - 1 \right\} \right\} \quad (18)$$

3. 地山特性曲線の計算例と今後の応用

2.に記述した解析解による GRC の計算例を示す。円孔半径 $a=5\text{m}$ 、地山の条件は、弾性係数 $E=500\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.495$ 、粘着力成分 $c=400(\text{kPa})$ 、せん断抵抗角 $\phi=30^\circ$ である。 $\sigma_{ra}-u_a$ 関係 (GRC) を図-2 に示す。 ψ が大きくなれば、内空変位量が大きくなることがわかる。図-3 にダイレイタンシー角と塑性半径比 R/a の結果を示す。式(7)に示す通り、 R/a は ψ によらず一定である。本文で記載した方法により GRC を描いたのちに、支保の荷重変位関係との交点を求めれば、図上では負担割合を算定できることになる。図-4 は、 C^{in} を支保設置点として交点 B^{st} が地山と支保の均衡点とする模式図である。しかしながら、ロックボルト、吹付コンクリートそして鋼製支保工の 3 つの支保材の効果を等価な剛性で表現できたとしても、掘削により生じた解放応力を地山と支保材が一体となって負担する状況表現するためには、GRC 上の B^{in} より分岐して C^{st} に至るモデル化が必要と考えられる。その際には、地山の支保能力の極大値を表現する GRC のモデル化の必要ないと判断される。今後は、ロックボルトなどの効果を考慮した $\sigma_{ra}-u_a$ 関係の表現に研究を進める予定である。

参考文献

- 1) Rabcewicz, L.V.: Stability of tunnels under rock load (Part I), Water Power, 226 (June 1969).
- 2) 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, 京都大学博士学位請求論文, 19(1992).
- 3) 瀬崎満弘・OmerAYDAN・川本跳万: 特性曲線法に関する考察, 土木学会論文集 499, III-28, 77(1994).

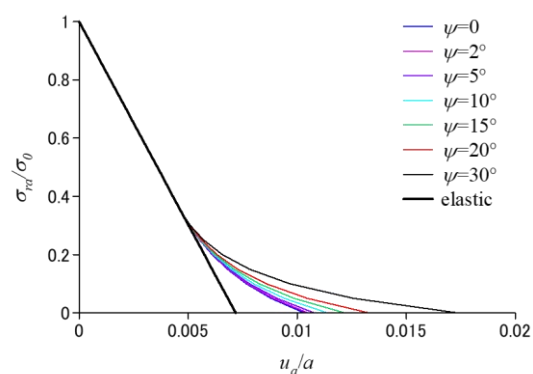


図-2 ダイレイタンシー角を考慮した地山特性曲線

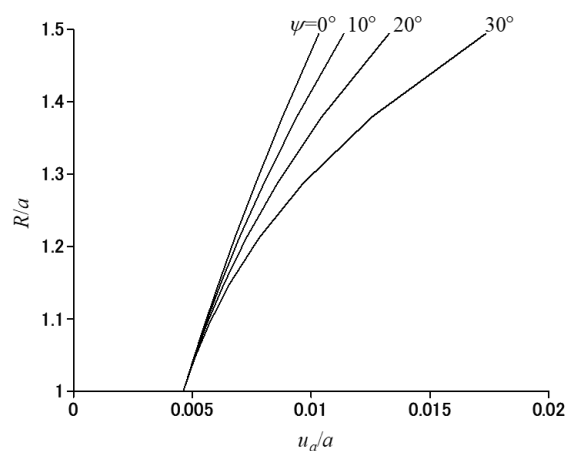


図-3 ダイレイタンシー角と塑性半径比 R/a

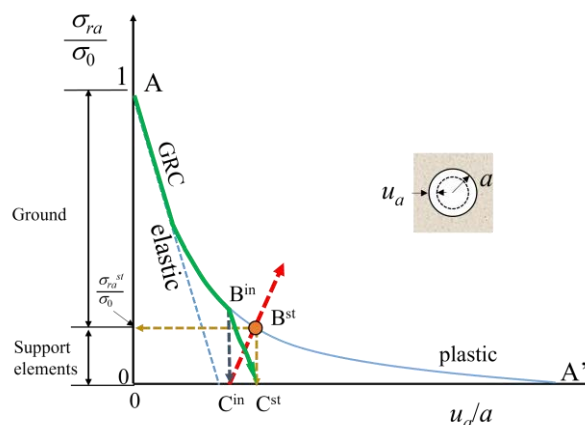


図-4 地山と支保の連動を考慮した $\sigma_{ra}-u_a$ 関係