

ひずみ軟化を考慮したトンネル切羽近傍の変形解析

鳥取大学大学院(現株式会社勤務)

○三上 浩

鳥取大学大学院 学生 福田 毅

鳥取大学工学部 正 木山 英郎

正 西村 強

1. はじめに

地下空洞やトンネルを開削する際、切羽の存在により切羽近傍では変位が拘束され、逆に切羽から遠ざかるとともに変位が増大することが知られている。つまり、ここに切羽の持つ支保効果が存在している。そこで、本研究では、切羽近傍の応力・変位状態に着目し、運動方程式の陽形式時間差分解法⁽¹⁾を用いて検討を行う。まず、解析法の概略を述べた後、円孔周りの数値解析解と弾性・弾塑性理論解を比較検討する。ついで、切羽近傍の応力変形解析結果について示す。

2. 数値解析法の概要

本解析法では、運動方程式の差分解法を用いるので各節点の質量を算定する際に工夫が必要となる。そこで、図-1に示すように回転角 $d\theta$ が微小であると仮定し、回転半径を考慮して以下の式によって節点質量を算定した。

$$m_a = m_d = m_A \times \frac{1}{2} \times \frac{2r_i + r_j}{3(r_j + r_i)}, \quad m_b = m_c = m_A \times \frac{1}{2} \times \frac{2r_j + r_i}{3(r_j + r_i)}$$

ここに、 m_A は陰影部の要素質量を示す。

3. 2次元弾塑性性解

地盤は均質等方の弾塑性体で初期応力場 p_0 の静水圧状態とするモデルを考える(図-2)。降伏後の地盤の塑性状態における応力を規制する拘束条件式は、Mohr-Coulomb 式が成立すると仮定する。円孔周りには、壁面($r=a$)に作用する内圧 p_i ($p_0 \geq p_i \geq 0$) の大きさによって以下に示す 3 つの場合について応力・変形の解を誘導し、次章で述べる解析解との比較に用いる⁽²⁾。

(1)弾性領域($r \geq R_e$)のみが存在する場合

$$\text{変位: } u_e = -\frac{1+\nu}{E} \left(p_0 - \frac{2p_0 - \sigma_c}{\zeta + 1} \right) \frac{R_e^2}{r}$$

$$\text{応力: } \sigma_{re} = -(p_0 - p_i) \left(\frac{R_e}{r} \right)^2, \quad \sigma_{\theta e} = (p_0 - p_i) \left(\frac{R_e}{r} \right)^2$$

(2)弾性領域とひずみ軟化域($R_e \geq r \geq a$)が存在する場合

$$\text{変位: } u_s = \frac{2B_0 R_e}{1+h} \left\{ \frac{r}{2R_e} (1-h) - \left(\frac{R_e}{r} \right)^h \right\}$$

$$\text{応力: } \sigma_{rs} = \frac{(1+h)\sigma_c + 2B_0 M}{(1-\zeta)(1+h)} + \frac{2B_0 M}{(1+h)(\zeta+h)} \left(\frac{R_e}{r} \right)^{1+h} + N \left(\frac{R_e}{r} \right)^{f+1}, \quad \sigma_{\theta s} = \zeta \sigma_{rs} + \sigma_c^*$$

(3)弾性領域、ひずみ軟化領域($R_e \geq r \geq R_f$)及び塑性流動域($R_f \geq r \geq a$)が存在する場合

$$\text{変位: } u_f = r \left\{ \frac{2B_0 t^{-(1+h)}(h-f)}{(1+f)(1+h)} + \frac{1-h}{1+h} B_0 - \frac{2B_0}{1+f} t^{-(1+h)} \left(\frac{tR_e}{r} \right)^{f+1} \right\}$$

$$\text{応力: } \sigma_{rf} = \frac{\sigma_c^*}{1-\zeta} + \left\{ N t^{\zeta-1} + \frac{(1+h)(1-D)\sigma_c + 2B_0 M}{(1-\zeta)(\zeta+f)} \right\} \left(\frac{r}{tR_e} \right)^{\zeta-1}, \quad \sigma_{\theta f} = \xi \sigma_{rf} + \sigma_c^*$$

4. 2次元円孔問題

円孔周りの応力状態を解析するため図-3に示すような z 軸を回転軸とする軸対称体解析モ

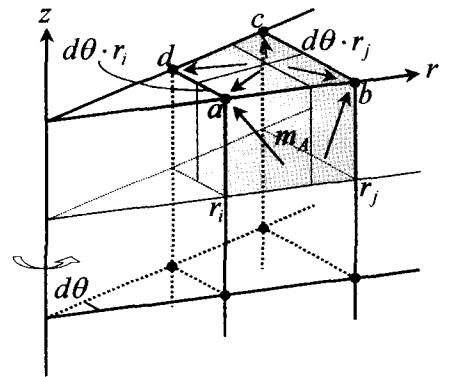


図-1 節点質量に関する説明図

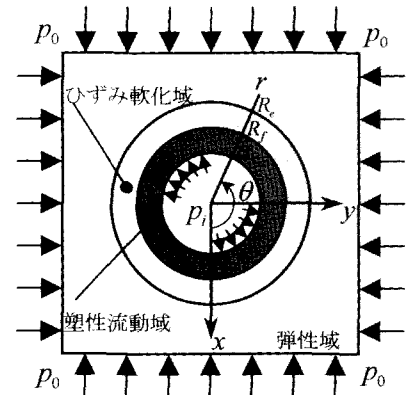


図-2 ひずみ軟化モデル

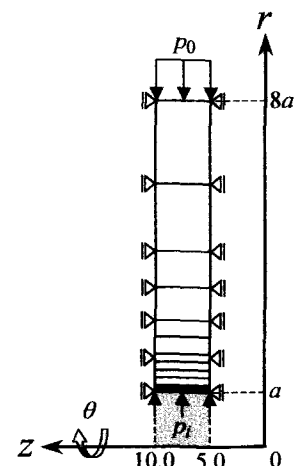


図-3 解析モデル

デルを設定する。解析モデルは、均質等方体かつ無限遠方から静水圧 p_0 を受ける円孔半径 $a=5.0(m)$ の 2 次元モデルを仮定する。地盤は、掘削前どの場所においても $\sigma_r = \sigma_\theta = p_0$ が成り立つことから、予め各要素に応力 p_0 を作用させ初期応力状態(初期地盤)を表現している。また、境界条件は、 z 軸方向に変位(ひずみ)が生じない平面ひずみ状態を仮定している。

地盤はヤング率: $E=20MPa$, ポアソン比: $\nu=0.25$, 粘着力: $c=87kPa$, 内部摩擦角: $\phi=30^\circ$, 初期地圧: $p_0=0.3MPa$ とした。また、解析では、トンネル掘削部に当る要素(陰影部)の応力を段階的に減衰させ、掘削過程を表現した。その支保圧に相当する p_i と壁面変位 u_r の関係に着目し、地山特性曲線として図-4 に理論解及び解析解の結果を示す。

図-5 に切羽を考慮した解析モデルを示す。 z 軸を回転軸、 r 軸を動径方向とする。また、トンネル半径を $a=5.0(m)$ とする。解析方法は、初期応力 p_0 を作用させ、掘削に相当する応力をトンネル壁面に対し段階的に外力として与えることで掘削過程を表現する。 z 方向には $\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) = 2\nu p_0$ となる平面ひずみ条件と一致するように与える。以上の条件で、 b/a を変化させる場合においては、 $\sigma_c/p_0 = 1.0$ (σ_c : 一軸圧縮強度)を対象に解析を行っている。

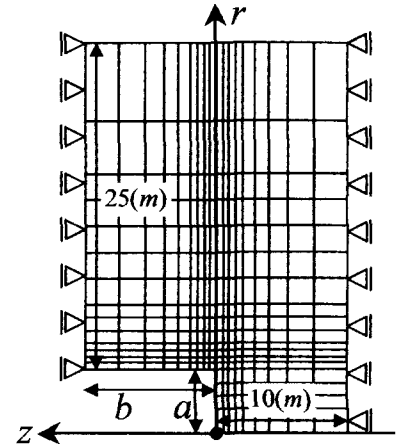


図-5 解析モデル(切羽考慮)

解析結果を図-6、図-7、図-8 に示す。図-6 は、横軸に切羽位置を基準にトンネル軸長さ z 、縦軸にはそれぞれ b/a を変化した場合の壁面変位量 u_r を示す。トンネル長さ b の増大に伴い壁面変位が収束していることが分かる。また、図-7 では図-6 と同じ軸をとり、 σ_c/p_0 を変化した場合の結果を示した。ここで、 σ_c/p_0 が小さくなるに伴い壁面変位が大きく、最終変位(収束状態)に至るには、切羽からの距離が長くなる傾向が分かる。図-8 は、図-7 と図-4 を照らし合わせることで作成している。図より、切羽近傍では支保能力が多く残存していることが確認できる。つまり、切羽の支保効果がトンネル壁面変位に大きく影響を及ぼすことが理解できる。

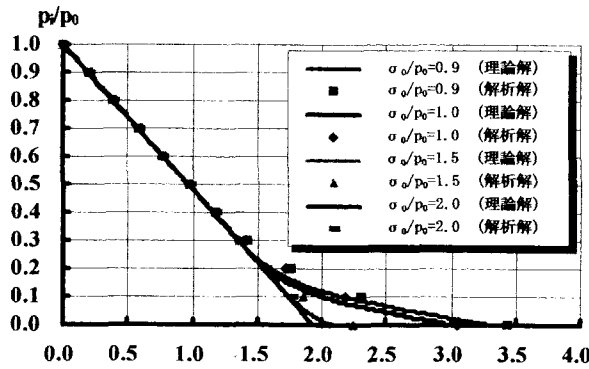


図-4 地山特性曲線

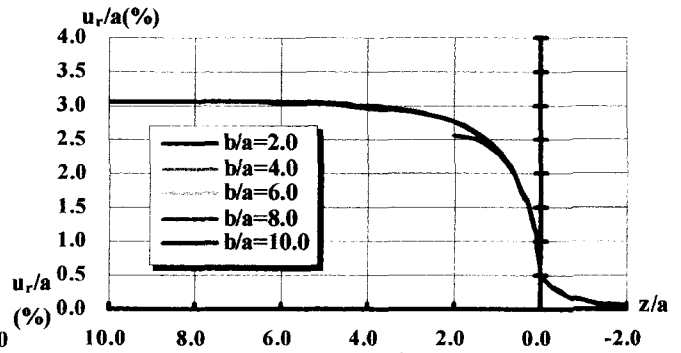


図-6 トンネル壁面変位 (b/a 変化)

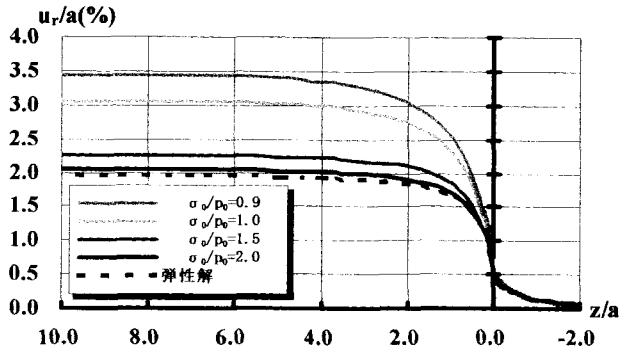


図-7 トンネル壁面変位 (σ_c/p_0 変化)

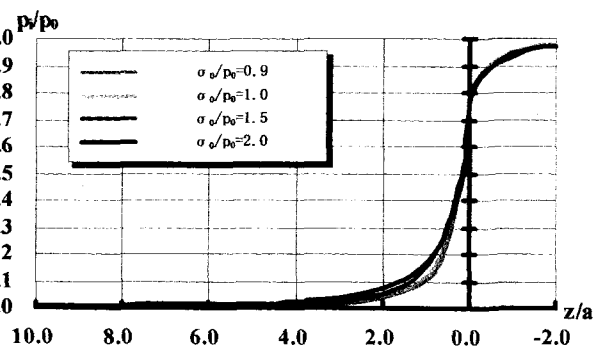


図-8 トンネル壁面支保圧

参考文献

- (1) 木山英郎 他;土木学会論文集, NO.439/Ⅲ-17,1991.
- (2) 古川耕平;鳥取大学卒業論文, 2003.