

トンネル掘削に伴う切羽近傍の間隙水圧の解析

鳥取大学大学院 学生会員 ○福田 毅

鳥取大学工学部 正会員 西村 強 木山 英郎

1. はじめに

浸透性の低い地盤では、トンネル空洞周辺のゆるみ領域に負の間隙水圧が発生することが考えられる。そこで、間隙水を考慮したこれまでの研究報告例をみると、有限要素メッシュに連続条件式を適用させ、間隙水の消散モデルを作成した弾塑性解析例、あるいは、Giraud の等価原理⁽¹⁾を基に地盤を飽和多孔質体と仮定し、非排水弾塑性構成式による数値解析例等が報告されている。そこで、本研究では既報の弾塑性構成式に比較的容易に導入できる後者の原理に基づき、簡易な2次元有限要素メッシュを用いた切羽を有するトンネルモデルにより弾塑性解析を試みる。そして、緩みが卓越すると考えられる切羽近傍における間隙水圧の発生状況および有効応力・変位等について検討を行う。以下、本解析で用いる非排水弾塑性構成式の導入および切羽を有するトンネルモデルの設定について述べるとともに、得られた成果を示す。

2. 非排水弾塑性構成式の導入⁽¹⁾

本解析では、地盤を非排水条件・等方完全弾塑性飽和多孔質体を仮定している。この時、有効応力増分 $d\sigma$ 及び間隙水圧増分 dp は以下のように書ける。

$$d\sigma = (K - \frac{2G}{3})(d\varepsilon_v - d\varepsilon_v^p)1 + 2G(d\varepsilon - d\varepsilon^p) + bMd\phi^p 1 \quad (1)$$

$$dp = -M(b(d\varepsilon_v - d\varepsilon_v^p) + d\phi^p) \quad (2)$$

ここに、 p : 間隙水圧, ε : 全ひずみ, ε^p : 塑性ひずみ, ε_v : 全体積ひずみ, ϕ^p : 塑性間隙率, K : 非排水体積弾性係数, G : せん断係数, b : Biot の定数, M : Biot の係数

次に、式(1)、式(2)に含まれる塑性ひずみテンソル ε^p 、塑性間隙率 ϕ^p の導入について述べる。本解析では、弾塑性飽和多孔質体の降伏関数 f と塑性ポテンシャル g は等しいとする関連流れ則に準ずるものとし、以下のように表わせる。

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma}, \quad d\phi^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial p} \quad (3)$$

ここに、 $d\lambda$: 塑性係数

3. 解析モデルの設定

図-1 に、簡易な2次元有限要素メッシュを用いた切羽を有するトンネルモデルを示す。動径方向を r 軸、トンネル軸方向を z 軸、そして回転方向を θ 軸とする極座標系に設定する。境界条件では、平面ひずみの仮定を用いて z 軸方向を固定とする。

本解析では、掘削解放応力に相当する応力をトンネル壁面・切羽に等分布荷重として載荷することで、トンネル掘削を表現する。また、掘削は瞬時に行われるものとし、時間経過による間隙水圧の消散等については今回検討していない。

本解析に用いる材料定数は、biot の定数 $b=1.0$, biot の係数 $M=2.0(\text{MPa})$, ヤング率 $E=397(\text{MPa})$, ポアソン比 $\nu=0.49$, 内部摩擦角 $\phi=0.59(\text{deg})$, 粘着力 $c=0.943(\text{MPa})$ としている。これは、軟岩に相当する試料の非排水3軸試験の実験結果⁽¹⁾を参照している。また、初期地盤の応力状態に関しては、初期有効応力 $\sigma_r = -5.0(\text{MPa})$, $\sigma_\theta = -5.0(\text{MPa})$, $\sigma_z = -5.0(\text{MPa})$ 、また、初期間隙水圧 $p=2.5(\text{MPa})$ として与えている。これらの値は、深度約250(m)に相当する応力・間隙水圧を想定して設定している。

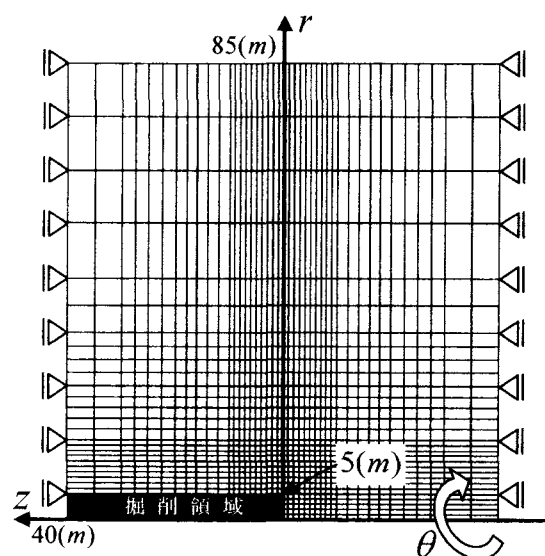


図-1 切羽を考慮したトンネルモデル

4. 解析結果及び考察

図-2 には、空洞を構築した際その周辺に発生した塑性領域(■陰影部分)分布を示している。切羽前方には、約9(m)に及ぶ領域が塑性化している。また、切羽後方へ向かって12~16(m)と塑性域が拡大している様子もうかがえる。図-3 には、切羽前方の間隙水圧・有効応力・変位分布等の力学的変動に着目し、飽和多孔質地盤を仮定した弾性・弾塑性解析結果及び間隙水を考慮しない地盤(単質地盤)での弾塑性解析結果を示している。各分布図の横軸は、切羽から前方への距離 z をトンネル半径 a で相対化している。また、 $z/a=1.8$ には塑性域と弾性域の境界を示した。まず、間隙水圧分布図をみると塑性化した領域において間隙水圧が大きく低下し、負圧が発生している。また、有効応力分布図から塑性領域において有効応力が単質地盤の解析結果に比べて増大している。これは、間隙水圧の急激な低下による有効応力の見かけ上の増大によるものである。また、解析結果からわかるように大きな負の間隙水圧が発生しているが、このような現象を取り扱う際には、直接間隙水圧に影響を与えるダイレイタンシー角や Biot の係数等といったパラメータの取り扱いに注意を払う必要があると考えている。

5. まとめ

- ・ 簡易な 2 次元有限要素メッシュにより、切羽周辺の間隙水圧分布を表現することができた。
- ・ 塑性化による顕著な力学的変動(間隙水圧・有効応力・変位等)を確認できた。
- ・ 非排水地盤にみられる過剰間隙水圧による有効応力の変動を数値解析により確認できた。

参考文献

(1) A. Giraud, F. Homand, V. Labious: Explicit solutions for the instantaneous undrained contraction of hollow cylinders and spheres in porous elastoplastic medium,2001.9.

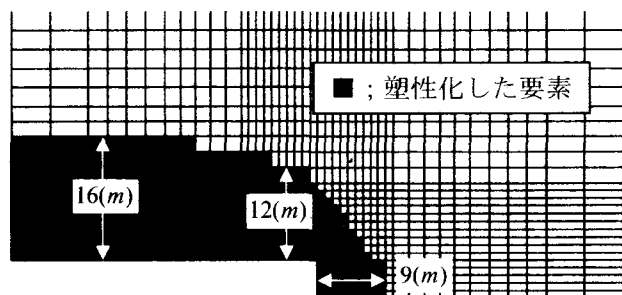


図-2 空洞周辺の塑性領域分布

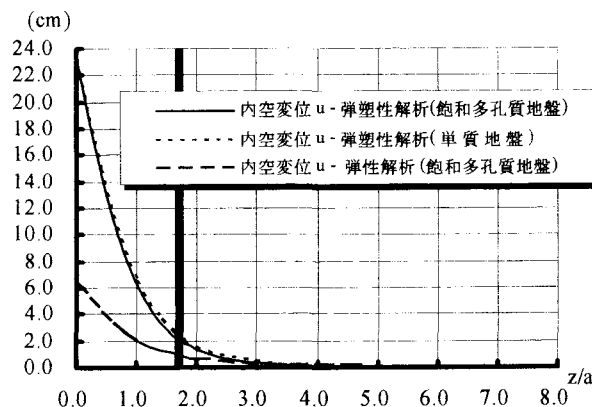
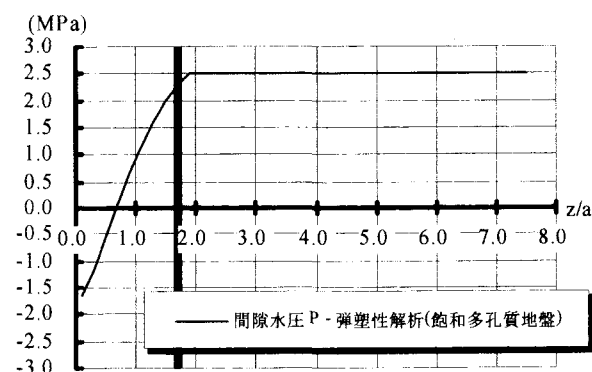
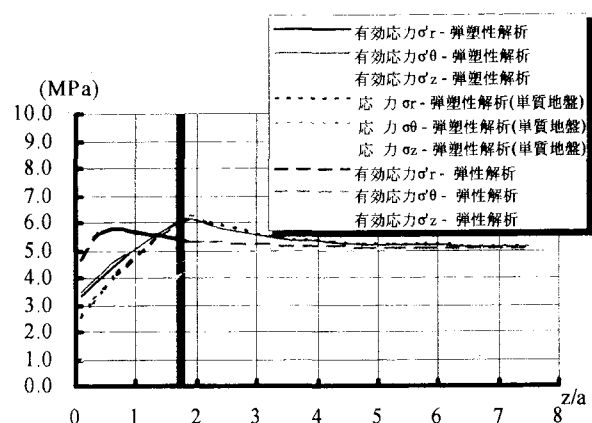
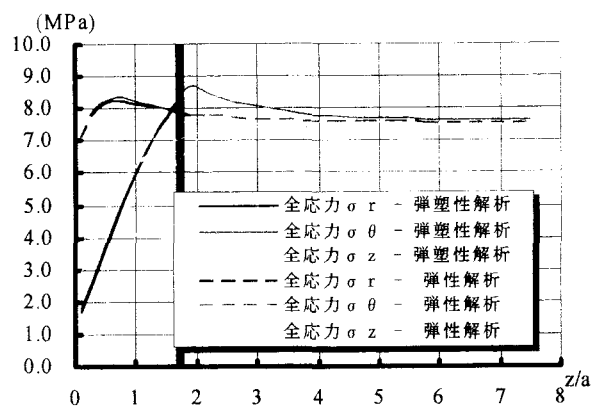


図-3 トンネル切羽前方の各分布図
(全応力・有効応力・間隙水圧・内空変位)