

掘削時における多孔質地盤の挙動に関する研究

京都大学工学部 正会員 大西有三・堀田政國, 同大学院 学生会員 ○田中 誠

1. はじめに 従来のところ, 近似手法であるFEMによる解析の精度に関する議論は, 1次元圧密問題を中心として, 定性的なものは多数行われてきたものの, 複雑な境界条件を有し, 実用性のある, 定量的なものはほとんど見られなかった. 最近(1988)になって, DetournayとCheng¹⁾は, 2次元の無限に広がりをもった多孔質弾性地盤内の円形トンネルの掘削問題に対して, 自重が0, 初期応力が二軸状態, 初期間隙圧が一様分布という条件のもとで, 応力と浸透流を連成させた掘削問題の理論解を与えた. これによって, FEMによる解析の近似精度に関する考察に対して, 非常に有効な手がかりが与えられることになった. そこで, 本研究では, 掘削時における多孔質地盤の挙動をFEMにより解析し, 境界条件等を考慮しつつこれを理論解と比較し, FEMの精度上のチェックを行い, 現在行われているFEMによる解析の問題点について考察した.

2. FEMによる掘削問題の解析 本研究において行ったFEMによる解析は, 次のとおりである. 固相, 液相ともに自重をもつ2次元多孔質弾性地盤を考える. 初期状態は, 飽和状態で, 自重による応力および間隙圧のみが生じているものとする. そこに円形断面トンネルを瞬時に掘削した時の挙動を解析した. 掘削するトンネルの深さは, 比較的深いものと考えた. これは, 応力および間隙圧のトンネル上端および下端における値に差が少なく, 後に述べる理論解の条件にある程度近い状態が得られると考えられるからである. この問題設定に対して, 比較的粗い要素分割および比較的細かい要素分割 (Fig.1 の太線と細線) によるFEM解析を行った. 材料定数はいずれの場合についても, $E = 2.0 \times 10^3$ (tf/m²), $\nu = 0.33$, $\gamma = 1.63$ (tf/m³), $k = 1.0 \times 10^{-4}$ (m/sec) という値を使用した. いずれの解析モデルに対しても, 以下の条件を与えた.

- ・掘削面は間隙水を自由に通過させる.
- ・左右両側面は水平方向, 下端面は鉛直方向にそれぞれ拘束されている.
- ・右側面では水頭は固定, すなわち間隙水は無限に供給される.

また, 計算の都合上, 地表面をモデルに取り入れなかった. これは, 各要素に要素中心における自重による初期応力を与え, 各節点に初期間隙圧を与えることによって補った.

3. 理論解と解析結果の比較検討 解析結果と比較した理論解の条件としては, 初期の鉛直応力および間隙圧にはトンネル中心における値を用い, 水平応力には鉛直応力の半分の値を用いた. これは, 解析においては $K_0 = 0.5$ という値を用いたためである.

2つの問題設定に対して, FEMによる解析結果と, それぞれの場合に対応する理論解を図示したものがFig.2~Fig.4である. ただし, 解析結果

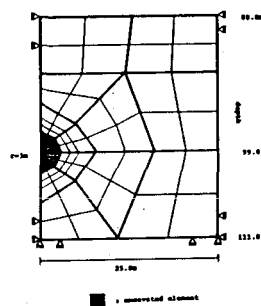


Fig. 1

注: Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4はいずれも上から順に

$t^* = 0.1, 2, 120, 5760$ における値を示す.

D 1: 分割の粗いモデル

D 2: 分割の細かいモデル

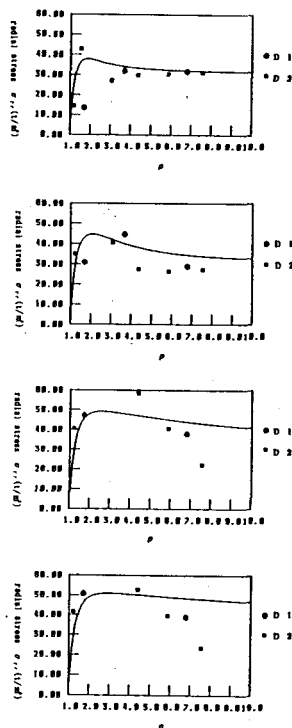


Fig. 2

は、圧力水頭はスプリングライン上の節点における値、応力はスプリングライン直下の要素中心における値のみを示し、理論解は $\theta = 0^\circ$ におけるもののみを示した。表示にあたっては時間 t および極座標 r をトンネル半径 a およびBiotの圧密係数 c を用いて規格化し、無次元パラメータ $t^* (= c t / a^2)$ および $\rho (= r / a)$ を用いた。このモデルに対しては、 $t^* = t / 30$ 、 $\rho = r / 3$ である。

解析条件と理論解の前提条件との食い違いの影響を考える。両者の相違は、自重の有無および変位境界の存在である。このモデルでは、掘削によって解放される応力および間隙圧のトンネル上端と下端における値の比は、 $(99-3)/(99+3) \approx 0.941$ である。このことによって、かなり軸対称に近い状態を現出することができた。したがって、モデルの解析結果を理論解と比較することによって、FEMの手法自体の精度をある程度チェックすることができる。以下、応力場、間隙圧場のそれぞれについて、検討を加えることにする。

a) r 方向応力場 (Fig. 2) 時間の経過と共に間隙圧の減少・有効応力の増加が遠方に伝わり、それにとまって変位がトンネルの向きに起こり、それが無限時間経過後にはついに無限遠点までも伝わる。解析モデルには変位境界が存在するため、圧密が遠方へ伝わっていき、変位境界に達したとき、拘束条件のために、そこにある土粒子はトンネルから遠ざかろうとするので、図のような時間挙動が起こるものと考えられる。加えて、解析モデルのトンネル壁面周囲の要素分割が、実際の多孔質弾性地盤内に発生する応力の勾配に比べて粗い場合、応力を十分に記述できないことになる。このことは時間に依存する問題である。

b) θ 方向応力場 (Fig. 3) r 方向応力場と異なり、 θ 方向応力場は、トンネル壁面や変位境界の影響を大きく受けないことが予想される。しかし、自重をもつモデル地盤においては、上方の地盤の圧密の進行に伴う有効応力の増加の影響が大きい。自重をもたない地盤においては、上方の地盤の重さが間隙圧から有効応力へと次第に受け渡されるということはないので、 θ 方向の有効応力は自重の影響を反映することが期待される。

c) 間隙圧場 (Fig. 4) いずれの解析モデルも、モデルの右側面で水頭固定すなわち間隙水が無限に供給されるとしている。理論解を与える無限に広がりをもつ2次元多孔質弾性地盤では、圧密はトンネル周囲から無限遠方に向かって進行するので、十分な時間が経過した後は、この間隙水供給の影響が大きくなっていく。この影響を取り払うことができないということは、現在までFEMの手法の限界として指摘されてきたことである。

なお、地盤の自重の影響がはっきりと現れる、浅いトンネルのモデルの解析も行ったが、ここでは割愛する。

参考文献

- 1) Detournay, E. & Cheng, A.H-D.: Poroelastic Response of a Borehole in a Non-hydrostatic Stress Field, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 25, No. 3, pp.171-182, 1988.

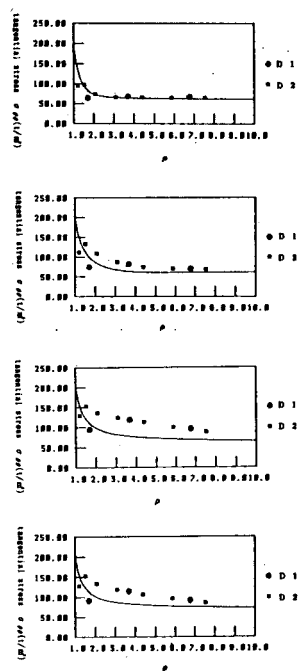


Fig. 3

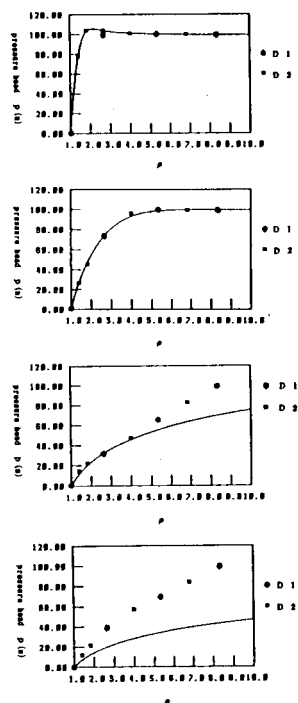


Fig. 4