

大成建設(株) 正会員 ○ 大津 宏 康
正会員 亀村 勝 美

1. はじめに

近年、NATMや長大斜面などの掘削問題に対し、数値解析手法を用いた検討が数多くなされている。その多くは、土中水の存在を考慮しない全応力法に基づくものであり、掘削に伴う土中水の影響について考慮した例は数少ない。また、応力解析結果と現場計測結果に基づくモデル化手法の問題点の検討も応力・変形に着目して行なわれている。しかしながら、粘性地盤でのトンネルや斜面の掘削においては、土中水が地盤挙動の支配因子となっており、土中水を考慮した掘削問題の取り扱いが必要である。

本論文では、応力-浸透連成解析における掘削問題、特に掘削面の境界条件の取り扱いについて述べるとともに、簡単な解析モデルの理論解との比較により、理想的条件下での解析手法の妥当性について言及する。

2. 掘削過程の取り扱い

応力変形解析における掘削過程は、図-1に示すように掘削面上に作用していた応力を解放することでモデル化される。すなわち、掘削面は次の境界条件を満足する。

$$\hat{T}_i = \sigma_{ij} n_j = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\hat{T}_i$: 表面トラクション, n_j : 法線ベクトル
 σ_{ij} : 全応力

土中水の存在を考慮する場合には、境界上に作用している間隙水圧についても同様な取り扱いが必要である。すなわち、式(1)に有効応力の原理を適用することにより、掘削面の境界条件は次式となる。

$$\hat{T}_i = (\sigma'_{ij} + \delta_{ij} u) n_j = 0 \quad (2)$$

ここに、 σ'_{ij} : 有効応力, δ_{ij} : クロネッカーデルタ, u : 間隙水圧

一般に、圧密解析においては、理想的条件下の载荷が瞬時に行なわれるものとみなし、载荷過程を非排水条件の下に、その後の間隙水圧の再配分過程を排水条件の下に取扱う。このような手法を掘削問題に適用した場合の、応力-浸透連成解析における掘削面の境界条件を表-1に示す。つまり、非排水条件を満足する掘削面上の有効応力、間隙水圧をそれぞれ $\sigma'_{ij}(x)$, $u^*(x)$ とすると、排水条件では、間隙水圧を $u^*(x)$ から 0 へと変化させねばならない。従って、掘削面の膨潤(圧密)は排水の開始と共に瞬時に終了するものとみなされる。これより排水に伴う掘削面の応力増分は、 $\Delta \sigma'_{ij}(x) = u^*(x)$ となり間隙水圧を $u^*(x)$ となり、非排水過程から排水過程への移行は、掘削面に $\Delta \sigma'_{ij}(x) n_j$ の応力を作用させる事により評価される。

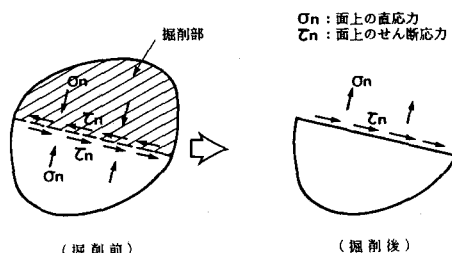


図-1 掘削過程の取り扱い

表-1 掘削面に関する境界条件

条件	分類	力学境界	水理境界
掘削時		$(\sigma'_{ij} + \delta_{ij} u) n_j = 0$	$\hat{Q}_i = 0$ Q : 流量
掘削後		$\sigma'_{ij} \cdot n_j = 0$	$u = 0$

3. 解析例および考察

解析例として、図-2に示す軸対称平面ひずみ場での掘削問題を取り挙げる。初期条件として静水圧状態($\sigma_r' = \sigma_\theta' = \sigma_z' = p_0$, $u = u_0$)を仮定し、非排水条件下で掘削を行うものとして過剰間隙水圧 Δu は、式(3)のように解かれる。

$$\Delta u = \frac{2(1+\nu)}{3} \cdot \frac{(a/b)^2}{1-(a/b)^2} (p_0 + u_0) = \frac{2 \times (1+0.5)}{3} \cdot \frac{(a/b)^2}{1-(a/b)^2} (p_0 + u_0) \quad (3)$$

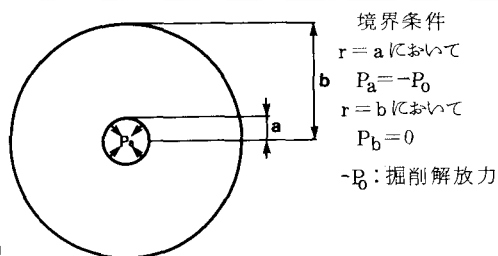


図-2 軸対称平面ひずみモデル

図-3は、この Δu と a/b との関係を示したものであるが、このような a が b に比べて十分大きい場合には過剰間隙水圧はほとんど発生しない。したがって、間隙水圧については近似的に、 $u=u_0$ の状態が維持される。その後の応力状態は排水過程で生じる浸透力をつり合い式に物体力として代入し、この結果算定される応力を掘削時の応力に重ね合わせることで算定される。以下に、掘削解放力として全応力、有効応力を作用させた場合および、浸透力を算定する際の境界条件を変化させた場合の定常状態での応力分布を示す。

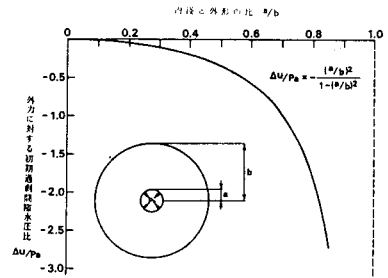


図-3 掘削に伴う過剰間隙水圧

- (i) case 1 (掘削解放力；全応力) (ii) case 2 (掘削解放力；有効応力) (iii) case 3 (掘削解放力；有効応力)
浸透力境界； $\Delta\sigma_r'(a)=0$ 浸透力境界； $\Delta\sigma_r'(a)=u_0$ 浸透力境界； $\Delta\sigma_r'(a)=0$

$$(\sigma_r)_1 = \frac{p_0'}{1-(a/b)^2} [1-(a/r)^2] + \frac{u_0}{1-(a/b)^2}$$

$$\left[(a/b)^2 - (a/r)^2 \right] + \frac{u_0}{2(1-\nu)} \left[\frac{b^2 \ln(b/r) + a^2 \ln(r/a)}{(b^2 - a^2) \ln(b/a)} - \frac{a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \right]$$

$$(\sigma_\theta) = \frac{p_0'}{1-(a/b)^2} [1+(a/r)^2] + \frac{u_0}{1-(a/b)^2} [(a/b)^2 + (a/r)^2]$$

$$+ \frac{u_0}{2(1-\nu)} \left[\frac{b^2 \ln(b/r) + a^2 \ln(r/a)}{(b^2 - a^2) \ln(b/a)} + \frac{a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} + \frac{1-2\nu}{\ln(b/a)} \right]$$

$$(\sigma_r)^* = (\sigma_r)_1 + \frac{a^2 (b^2 + r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} u_0$$

$$(\sigma_\theta)^* = (\sigma_\theta)_1 - \frac{a^2 (b^2 + r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} u_0$$

(5), (6)

式(5),(6)より case 2 と case 3 の結果は一致する。式(4)~(6)を応力-浸透連成解析結果と併せて図-4に示した。この結果以下の項目が明らかとなった。

- 掘削解放力として全応力を作用させ、これに浸透力を物体力としてつり合い式に代入した場合の応力分布は図-4の一点鎖線の分布となり、孔壁での全応力 $\sigma_r(a)=0$ の境界条件を満足しない。
- 排水過程で、孔壁での間隙水圧変化がすべて有効応力増分になるものとした場合、応力分布は図-4の点線の分布となり応力-浸透連成解析結果と一致する。
- 掘削解放力として有効応力を作用させ、浸透力に伴う応力増分 $\Delta\sigma_r(a)=0$ の境界条件での解を重ね合せた結果は case 2 および応力-浸透連成解析結果と一致する。

以上の結果は、掘削解放力がすべてせん断変形に受けもたれ間隙水圧変化が生じないせん断場での結果である。しかし、このような非排水条件での掘削過程をせん断場以外の問題に適用すると、たとえば図-5に示すような斜面掘削の例では、掘削面付近に広範囲にわたって負圧 ($u < u_{atm}$) が発生する。このために、掘削直後から排水過程に移行する際に、掘削面付近で急激に応力が変化することになり実際の現象とは異なる結果となる可能性がある。したがって、実際の問題にこの手法を適用するためには、逐次掘削あるいは掘削時の非排水条件等について十分に検討する必要がある。

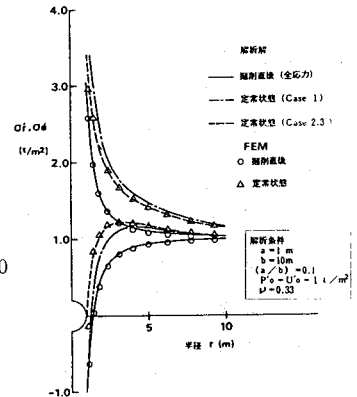


図-4 掘削による応力分布

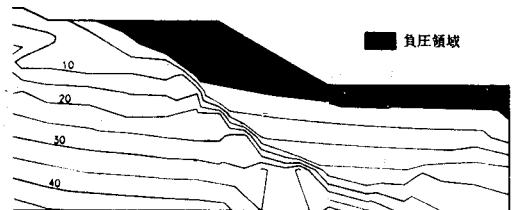


図-5 掘削直後の間隙水圧分布

4. 結 語
- せん断場での掘削問題に対しては、定常状態での応力分布は理論解と応力-浸透連成解析結果でよい近似性を示している。
 - せん断場以外の実問題にこの手法を適用するためには、今後境界条件の変更等の問題点がある。
- (参考文献) 1) Bernaix, J. (1969), "New Laboratory Methods of Studying Mechanical Properties of Rock," IJRM & MS, V6