

名古屋大学 工学部 正 ○大塚 悟  
 名古屋大学 工学部 正 松尾 稔

1. はじめに

地盤を掘削する際に泥水による地盤安定液を用いると、安全にしかも深く掘削することが可能になる。しかし、現行の設計法は(1)瞬間掘削による非排水仮定を用いて、(2)極限平衡法により安定計算を行っており、部分吸排水状態の掘削地盤の安定性劣化や、基本的に三次元問題の解析を行なうことができない。したがって、地盤安定液による掘削壁安定のメカニズムも従来、安定液の液圧による掘削側壁の安定効果については議論されてきたが、経時的な安定性の劣化に及ぼす影響については全く考慮されていない。

有限要素法を用いた極限釣り合い解析を弾塑性圧密膨潤解析と共に掘削地盤に適用すると、部分吸排水時の掘削地盤の安定性の経時変化を評価することが可能になる(浅岡ら、1990)。この方法は境界問題が複雑であっても、三次元問題であっても容易に適用できる。数値解析を通して、地盤安定液の掘削地盤の安定化効果および、部分吸排水による安定性劣化に及ぼす影響について検討し、地盤安定液の掘削壁面の安定化メカニズムについて考察する。

2. 解析方法

上界定理を用いた地盤の安定解析は土の構成関係を用いることにより、不静定問題の解析を行なうことができる。有限要素法による解析は掘削地盤のように三次元の問題にも容易に適用できる。

2.1 極限釣り合い解析

上界定理による地盤の安定解析は得られた解が正解に対して小さくならないことを保証する。運動学的可容速度場に対して解の最小化を行なうと、汎関数の停留条件から次の支配方程式が得られる。

$$\int_V B^T s dv + L^T \kappa = \mu X \quad (1)$$

$$L \dot{U} = 0 \quad (2)$$

$$X^T \dot{U} = 1. \quad (3)$$

式(1)は極限状態における力の釣り合い式であり、 $s$ および $\kappa$ は各要素の偏差応力および平均応力ベクトルである(田村ら、1984)。 $X$ は物体力で、 $\mu X$ は物体力の増加によって土構造物を破壊させる際の極限状態における物体力を表す。上界定理はこれらの連立方程式を解いてこの $\mu$ を求めることに帰着し、 $\mu$ は物体力に対する地盤の安全率に対応している。他方、式(2)は各要素に関する体積一定条件を表しており、限界状態で土の体積膨張がない条件に対応し、式(3)は限界状態で不定となる土の変位速度に単位の速度を与えている。

2.2 構成式

式(1)~(3)の式は土の構成式を用いることにより、解くことができる。カムクレイモデルを用いると、降伏関数は次式で表される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + \frac{\lambda - \kappa}{M(1 + e_0)} \frac{q}{p'}, \quad (4)$$

ここに、

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (5)$$

である。 $q$ および $p'$ は偏差応力の2次の不変量および平均有効応力であり、 $M$ および $e_0$ は限界状態勾配および初期間隙比を表す。式(4)に流れ則を適用し、応力一定の下でひずみが不定となる条件を導く( $\dot{\epsilon}_{ij} \neq 0$ )と次の限界状態式が得られる。

$$M - \frac{q}{p'} = 0. \quad (6)$$

以上の諸式より、限界状態での土の応力~ひずみ速度関係が次式のように得られる。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\dot{\epsilon}}{M} \frac{s_{ij}}{p'}, \quad \dot{\epsilon}_v = 0, \quad (7)$$

ここに、

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}} \quad (8)$$

しかし、式(7)は破壊時の平均有効応力  $p'_f$  を含んでいて、依然としてこれらの諸式からでは境界値問題を解くことができない。したがって、この未知数を定めるために新たな場の方程式を導入する必要がある。

### 2. 3 連成式、非排水条件

土が非排水状態で挙動すると仮定すると、カムクレイモデルに基づいて次の応力条件が誘導される。

$$\epsilon_v = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{p'_f}{p'_c} + \frac{\lambda - \kappa}{M(1+e_0)} \frac{q}{p'_f} = 0 \quad (9)$$

上式の関係を図1に示す。パラメータ  $p'_c$  は土の強さや間隙比にあたる定数であるが、図1に示すように着目した有効応力状態 ( $\bar{\sigma}_{ij}$ ,  $\bar{p}'$ ) を式(9)に直接代入することにより定めることができる。したがって  $p'_c$  は着目した応力状態によって刻々と変化し、荷重履歴を反映する。

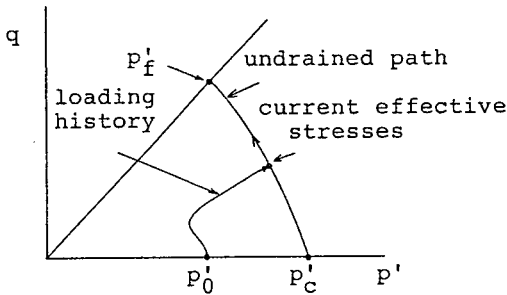


図1 荷重履歴と非排水条件式

式(6)、(9)より  $p'_f$  は次式(連成式)で与えられ、境界値問題を解くことができる。

$$p'_f = p'_c \exp(-\Lambda), \quad \Lambda = 1 - \frac{\lambda}{\kappa} \quad (10)$$

### 3. 掘削側壁の安定化効果

極限釣り合い解析を用いて非排水条件における掘削地盤の安定解析を行なう。この条件は地盤を瞬時に掘削する際の安定問題に相当する。

#### 3. 1 掘削地盤の安定性と3次元効果

極限平衡法による掘削地盤の安定性の評価は適用範囲が従来、2次元問題に限られてきた。しかし、掘削地盤の安定性は掘削形状による著しい3次元効果を表すことが良く知られており、また3次元問題の安定性を正しく評価することは実務的にも極めて重要である。そこで、本解析法

表1: 地盤の弾塑性パラメータ

$\lambda$	0.25	$\kappa$	0.1304
$M$	1.2	$\gamma_t$	16.3 kN/m <sup>3</sup>
$K_0$	1.0		

を用いて同じ掘削断面を有する地盤について、1) 平面ひずみ条件、2) 軸対称条件の下で安定解析を行ない、安全率に及ぼす3次元効果について調べるとともに極限釣り合い解析の適用性について照査する。簡単のために地盤は一様とし、初期応力状態は地盤内の至る点で  $\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$  の正規圧密地盤と仮定する。土質定数は表1に掲げた。図2、3に典型的な解析結果を示す。

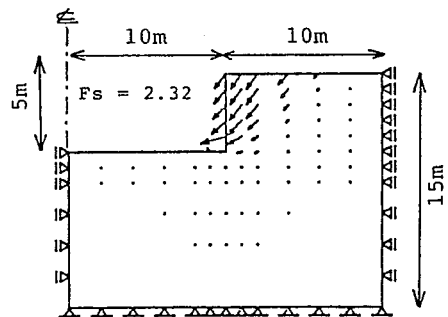


図2 非排水安定解析(平面ひずみ条件)

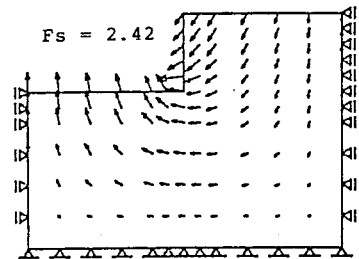


図3 非排水安定解析(軸対称条件)

両者は同じ掘削断面を有するものの、平面ひずみ条件の場合には掘削壁面がすべり落ちるように破壊しているのに対して、軸対称条件の場合には掘削底面が膨れ上がるように破壊している。安全率については若干軸対称条件の方が大きい結果となった。

図4、5は掘削深さ  $D$ 、掘削幅  $B$  を変化させた数値実験の結果であり、掘削断面の安全率に及ぼす影響を表わす。図から安全率が1となる際の限界掘削深さ  $H_c$  を求めると、平面ひずみ条件の場合には11mでほぼ一定であるのに対して、軸対称条件の場合には掘削幅が小さくなると、著しく安全率が大きくなるのが分かる(3次元効果)。しかし、掘削幅が十分に大きくなると、安全率は平

面ひずみ条件の安全率に漸近することが分かる。

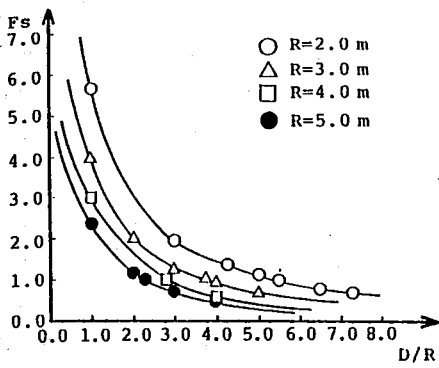


図4 安全率に及ぼす掘削形状の効果 (平面ひずみ条件)

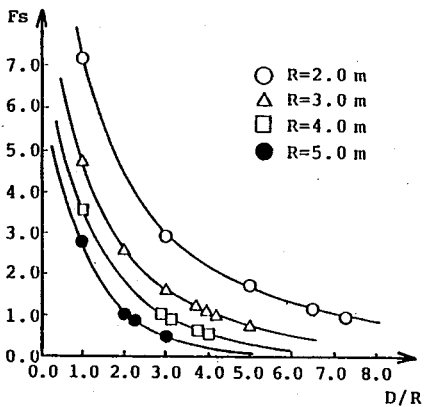


図5 安全率に及ぼす掘削形状の効果 (軸対称条件)

### 3. 2 泥水による掘削地盤の安定化

慣用解析と同様に、地盤を非排水条件に仮定して掘削壁面に安定液による水圧を作用させ、安定液の注入によってどの程度掘削地盤の安定性が改良されるのかを検討する。はじめに、深さ方向に初期有効応力が変化する正規圧密地盤を取り上げて非排水条件の解析を行なう。掘削深さは7mとし、掘削幅は1mおよび3mについて解析した。表2はその解析結果である。表でASは軸対称条件、PSは平面ひずみ条件を示し、各条件における安全率を掲げた。前節で述べたように、全般的に軸対称条件の方が平面ひずみ条件に対して安全率が大きく、しかも掘削幅に応じて3

表2: 掘削側壁の安定化効果

解析条件	掘削幅 R(m)	素掘り掘削	水張り掘削	泥水掘削
AS	1.0	0.67	1.09	1.18
AS	3.0	0.58	0.87	0.96
PS	1.0	0.37	0.97	1.09
PS	3.0	0.36	0.95	1.06

次元効果が見られる。図6は素掘りの際の破壊時における塑性流れを示す。深さ方向に強度が大きくなる場合には、軸対称条件であっても図3に見られるような掘削底面の膨れ出し破壊は見られない。

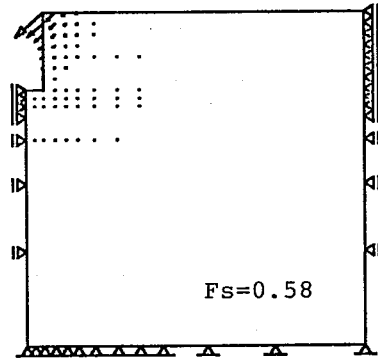


図6 深さ方向に強度が増加する地盤の破壊時塑性流れ (軸対称条件)

表2には図6と同じ地盤について泥水および水を注入しながら掘削する際の安全率についても併記している。表では泥水の比重が一般に最大1.2程度であることを考慮して、水(比重1.0)および泥水(比重1.2)の場合について解析を行なった。解析結果は表2に示している。表より、水もしくは泥水を用いると著しく掘削地盤の安定性が増して素掘りでは掘削できない地盤に対しても掘削が可能となることが分かり、泥水等による掘削側壁の安定化効果を確認できる。しかし、泥水の比重が高々1.2程度であることを考慮すると、水を用いた場合に対して泥水の効果はそれ程ではない。

### 4. 泥水による掘削壁の造壁性

慣用解析では瞬間掘削とそれに伴う非排水条件を仮定した。しかし、実際には掘削による応力開放により、地盤は吸水膨張し、時間の経過に伴いその安定性は劣化する。本節では部分吸排水状態での掘削地盤の安定解析手法について述べ、泥水による掘削壁表面における不透水性膜の効果について考察する。

#### 4. 1 部分吸排水による安定性の経時的変化

地盤の掘削過程および掘削後の吸水膨張過程を弾塑性圧密膨潤解析によりシミュレートすると、刻々の地盤内有効応力分布の変化を知ることができる。この有効応力分布を用いて非排水極限釣り合い解析を行なうと、掘削地盤の安定性(安全率:  $F_s$ )の経時的変化を求めることができる。安全率の経時的な劣化過程を追跡すると、 $F_s \sim$

時間  $t$  関係の同定から  $F_s = 1$  となる際の時刻を予測することもできる。

図7に解析で用いる地盤の応力分布および境界条件を示す。地盤は地表面で  $60\text{kN/m}^2$  の荷重が载荷した履歴を有する過圧密地盤とし、はじめに掘削と同時に水を張るものとして、その安定性の変化を調べる。簡単のために掘削壁面および地盤地表面を排水条件とし、他の境界は非排水条件とした。平面ひずみ条件で解析した結果を図8に示す。

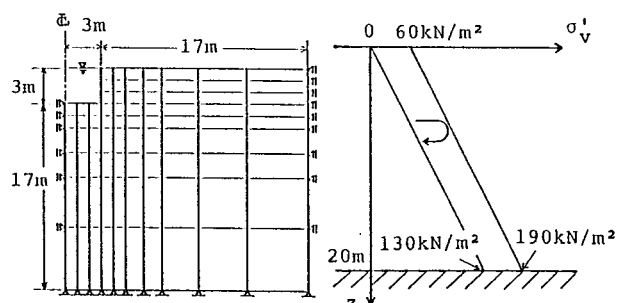


図7 境界条件と地盤内応力分布

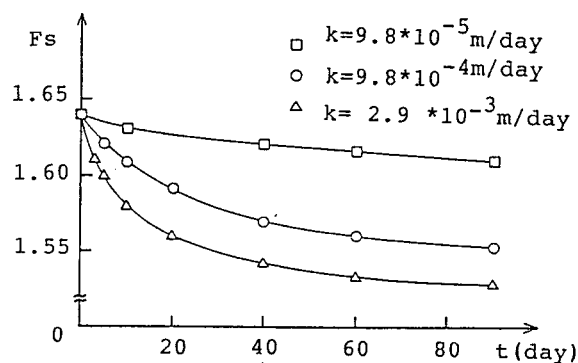


図8 安全率の劣化(水張り掘削)

図8では透水係数を操作して安全率の劣化過程に及ぼす影響について解析した。透水係数が小さい場合には安全率が殆ど劣化せず、長期間に亘り安全であるのに対して、透水係数が大きい場合には掘削後直ちに安全率が劣化する様子がよく分かる。瞬間掘削とそれに伴う非排水仮定を用いた解析は粘土地盤のように比較的透水係数が小さい場合にはその適用性を期待することもできるが、やはり砂質地盤のように透水係数が大きくなると本質的に吸水に伴う地盤の安定性の劣化を考慮する必要がある。泥水を用いた場合にも、掘削壁面から地盤が吸水膨張を起こすと時間の経過と共に地盤の安定性が劣化する傾向は同様である。

#### 4. 2 泥水による不透水膜の効果

一般に泥水等の地盤安定液を用いると掘削壁面で不透水性の膜を作成することがよく知られている。この作用が掘削地盤の安定性に大きく作用していると考えられているものの、解析的には全く評価することができなかった。ここでは掘削壁面に掘削と同時に不透水性の膜が形成されるものとし、掘削壁面を非排水条件に仮定する場合の安定性について図7の地盤について解析を行なった。泥水の比重は1.2とした。図9はその解析結果である。図には掘削壁面での遮水性を考慮した解析と排水条件での解析を示している。透水係数によって安全率の劣化の程度は左右されるが、遮水性を考慮すると掘削地盤の安定性は長期間に亘り安全率が大きく維持されることが分る。遮水性を考慮した場合にも掘削地盤の安全率が劣化するのは掘削地盤内部で吸排水が行なわれることによる。

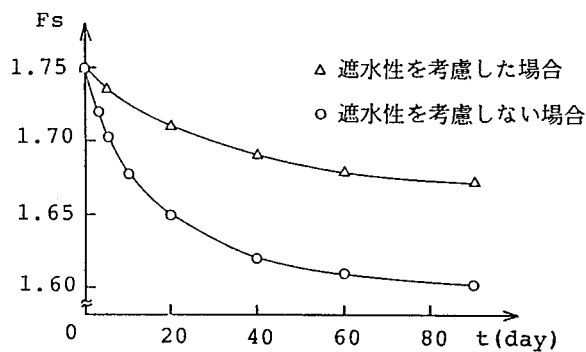


図9 安全率の劣化(泥水掘削)

#### 5. 結論

泥水による掘削地盤の安定化効果は泥水の液圧による掘削壁の安定化とともに、掘削壁に遮水性の膜を形成する造壁性が重要であり、そのために単なる水ではなく泥水を用いなければならない理由が明らかになった。

#### 謝辞

有益なご助言を戴きました名古屋大学浅岡顕教授に感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) Asaoka, A. Ohtsuka, S. and Matsuo, M.(1990):  
"Coupling equilibrium state for normally consolidated and lightly consolidated soils," Soils and Foundations, Vol.30, No.3, pp.109-123.
- (2) Tamura, T. Kobayashi, S. and Sumi, T.(1984):  
"Limit analysis of soil structure by rigid plastic element method," Soils and Foundations, Vol.24, No.1, pp.34-42.