

有効応力の概念に基づく掘削解析の問題点に関する一考察

大津宏康*・大西有三**・瀧治雄***・
亀村勝美****

本研究では、有効応力の概念に基づく掘削解析の問題点を明らかにするため、逐次的な切羽の進行を考慮した三次元解析および軸対象弾塑性解析を実施し、二次元解析結果との相違について検討を加えた。この結果として、掘削に伴う挙動を詳細に検討するためには、逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮することが不可欠な要因となることを明らかにした。さらに、これらの検討結果に基づき、地下空洞建設に伴う地盤・岩盤の安定性評価についての試案を示した。

Key Words: excavation, effective stress, three-dimensional analysis, face effect, elastic-plastic

1. 序 論

近年、国土の有効利用の観点から、地下を対象とした様々な施設が計画されつつある。例えば、ジオドーム構想¹⁾のように、都市部の地下 50 m～100 m レベルに大規模な地下空洞を構築する計画が検討されている。また、東京湾横断道路トンネルに代表されるように、内径が 10 m を越える大口径シールドトンネルの施工が検討されている。さらに、山岳トンネル工法でも、第二東名高速道路の計画に代表されるように、三車線の大断面トンネルの施工が検討されている。これらの計画に見られるように、今後の地下構造物の建設では、構造物の大規模化・大深度化が重要な検討課題となる。そして、これらの地下構造物のニーズの変化に対応するため、地下構造物の建設に関する設計および施工の両面からの検討が盛んになってきた。

この内、設計では、多様な地盤条件の下で大規模な空洞を構築するためには、掘削に伴う地盤・岩盤の安定性が保持されるか否かを評価することが、最も重要な検討項目となる。したがって、掘削の解析には、より高い精度で掘削に伴う地盤・岩盤挙動を評価できる解析技術を適用することが必要となる。このような状況の下で、掘削解析の傾向は、地盤・岩盤の応力-ひずみ関係をより厳密に評価するため、従来の弾性解析から非線形解析あるいは、弾塑性解析へと移行する傾向にある。しかし、このような掘削解析での解析手法自体の高度化を図る上で、その解析手法の改良が、掘削問題の物理的な意味に適応したものであるか否かの検討は充分とはいえない。

本来、掘削問題の境界値問題としての特徴は、逐次的な切羽の進行により構造系が変化し、これに伴い境界条件が変化することである。このため、厳密な意味での掘削解析は、逐次的な切羽の進行および切羽効果等の三次元的な要因を考慮した解析手法を適用する必要がある。

ここで、従来のトンネル掘削解析では、上記のトンネル掘削に伴う三次元的な地盤挙動を評価することの重要性は認識されていたが、計算機の容量および計算時間の制約から、主として二次元解析が適用されてきた。そして、こうした計算上の制約条件の下で、トンネル掘削に伴う三次元的影響を、簡便的に二次元場で表現するモデル化手法が数多く提案されてきた。例えば、全応力解析では、要素重積法²⁾・特性曲線法³⁾等がその代表的な手法として挙げられる。また、有効応力解析では、シールド掘削に伴う沈下の検討方法として、掘削解放力を切羽の進行に応じて低減させて作用させる手法⁴⁾および、テールボイドを強制変位により表現する手法⁵⁾等がその代表例として挙げられる。

しかし、これらのモデル化手法は、厳密な意味での掘削に伴う挙動評価を行う上で、以下のような欠点を有している。

- 1) 二次元場での土被り圧で定められる応力に基づく掘削解放力の割合を簡便的に変化させるだけであり、逐次的な切羽の進行に伴う応力の変化を的確に評価できない。
- 2) 切羽の進行に伴う三次元的な構造系の変化および、三次元的な構造系に解放力が作用する切羽効果についての的確に評価できない。
- 3) 有効応力解析の場合には、切羽の進行による三次元的な構造系の変化に伴う間隙水圧の変化挙動についての的確に評価できない。

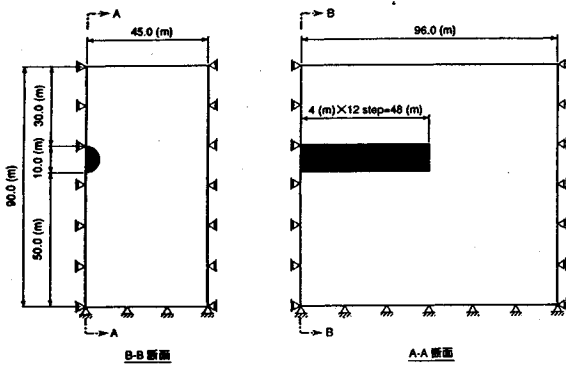
筆者ら⁶⁾は、このような問題点を明らかにするため、応力・浸透連成解析による大深度立坑掘削の解析結果よ

* 正会員 工博 大成建設(株) 土木設計部
(〒163 新宿区西新宿 1-25-1)

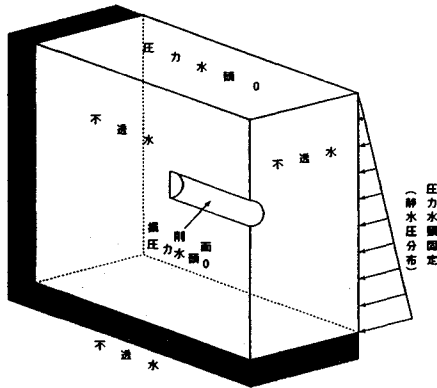
** 正会員 工博 Ph.D 京都大学助教授 工学研究科
環境地球工学専攻

*** 正会員 工修 大成建設(株) エネルギー部

**** 正会員 工修 (株) 篠塚研究所

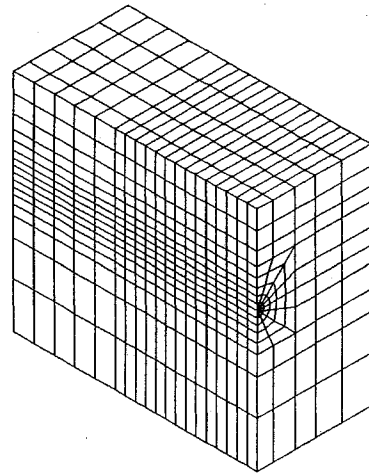


(a) 構造モデルおよび力学的境界条件

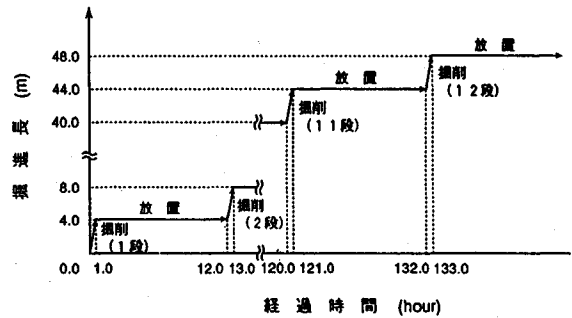


(b) 水理学的境界条件

図一 三次元逐次解析モデル及び境界条件



図二 三次元逐次解析メッシュ図



図三 逐次掘削のモデル化

表一 解析用物性値一覧

変形係数 E	5,000kgf/cm ²
ポアソン比 ν	0.33
透水係数 k	1.0×10^{-6} cm/sec
側方応力係数 K_0	0.8
単位体積重量 γ	2.0×10^{-3} kgf/cm ³

り、二次元解析結果での有効応力経路は、逐次的な切羽の進行を考慮した解析での有効応力経路と全く異なることを明らかにしてきた。そして、従来の二次元解析で、応力経路に依存する非線形的応力・ひずみ関係式を適用した場合には、有効応力経路の相違のために、本来の解析の目的である掘削に伴う有効応力の変化とは全く異なる結果を得る危険性があることを指摘してきた。

このような観点から、本研究では、有効応力の概念に基づく掘削解析の問題点を明らかにするために、トンネル掘削問題に応力・浸透連成解析手法を適用し、以下の項目について検討を加える。

- ① 二次元場と逐次的な掘削過程を考慮した三次元場での解析結果の比較
- ② 二次元場と逐次的な掘削過程を考慮した軸対称場での弾塑性解析結果の比較

なお、②の比較検討での弾塑性構成式は、応力-ひずみ関係に応力経路依存性のあるモデルとして、太田モデル⁷⁾(本質的には Cambridge Theory⁸⁾と等価)を適用する。

さらに、①、②の検討結果に基づき、有効応力解析による掘削に伴う地盤・岩盤の安定性について、簡易的に評価するための試案を提案する。

2. 二次元および三次元有効応力解析の比較

ここで、二次元平面ひずみ場での解析との比較検討を行うための、切羽の進行を考慮した三次元逐次掘削解析例として、図一および図二に示す $\phi 10$ m の円形断面のトンネル掘削問題を取り挙げる。

(1) 解析条件

本検討の目的は、切羽の進行に伴う間隙水圧および地盤の応力の推移について検討するものである。このため、議論を簡素化する上で、通常的设计検討で用いられるロックボルト、吹付コンクリート等の支保部材は考慮しない素掘状態での解析とする。なお、掘削過程のモデル化は、図三に示すように、一掘進長 4 m としその後 12 時間を排水放置期間と設定し、このサイクルを 12 回

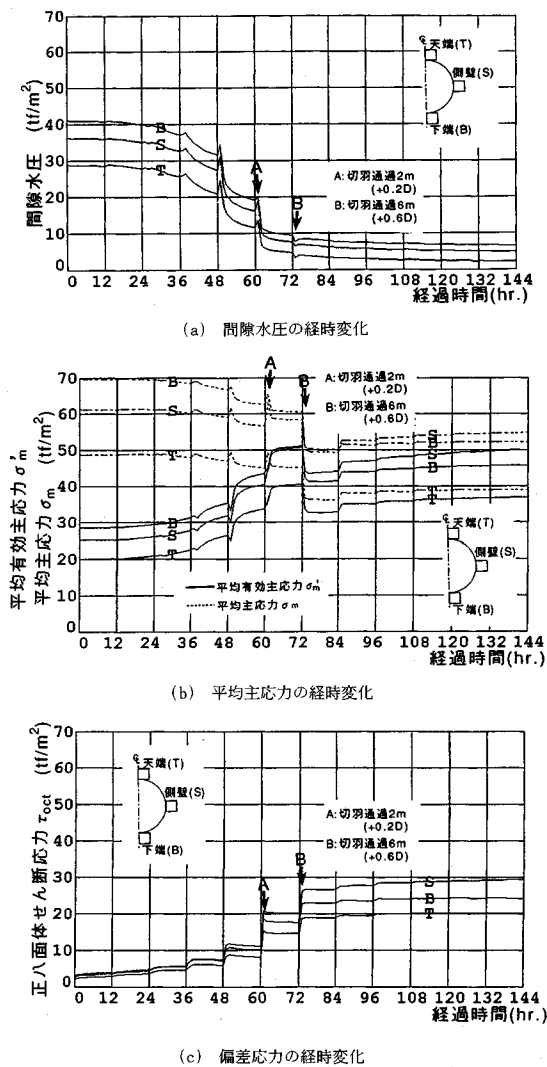


図-4 三次元逐次解析結果での間隙水圧及び応力の経時変化

繰り返すものとした。

また、解析用物性値は、電中研式の分類でC_Lクラスに相当する堆積軟岩を想定し、表-1に示す物性値を設定した。

初期応力分布について、鉛直方向の有効応力は地表面を原点とする有効土被り圧とし、二成分の水平方向の有効応力は鉛直有効応力に側方応力係数0.8を乗じた値に設定した。また、初期間隙水圧分布は、地表面を原点とする静水圧分布を仮定した。

(2) 解析結果および考察

三次元掘削解析結果での、トンネル坑口から22mの位置のトンネルの天端、側壁および下端での間隙水圧および応力の経時変化図を図-4に示す。ここでの応力状態の推移は、せん断応力成分と等方応力成分とに分けて議論する。このため、せん断応力成分については正八面

体せん断応力 τ_{oct} 、等方応力成分についてはそれぞれ平均主応力 σ_m および平均有効主応力 σ'_m を代表値として表示した。なお、図-4中の点A, Bは、着目断面に対してそれぞれ切羽が2mおよび6m通過した位置を示す。

間隙水圧の経時変化は、切羽の接近に伴い低下し始め、切羽接近時の掘削直後には小刻みな間隙水圧上昇を繰り返す。その後、切羽通過直後に急激な低下を示し、切羽が遠ざかるに連れてゆるやかに低下して定常状態に達する。また、正八面体せん断応力 τ_{oct} は、切羽の接近に伴い徐々に増加し始め、切羽到達前後に急激な増加を示す。その後、切羽が離れるに連れ増分量は小さくなるが、全体的に微増する傾向を示す。

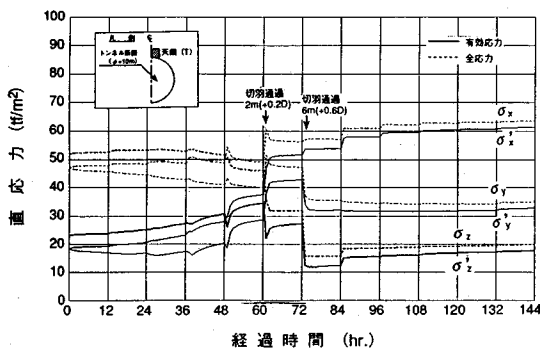
一方、平均主応力 σ_m は、切羽到達の直前までほとんど変化をせず、切羽の通過前後に急激な低下を示し、その後の変動はわずかでありほぼ一定値となる。これに対して、平均有効主応力 σ'_m は、切羽の接近に伴い急激に増加し切羽到達時に最大値になり、切羽通過後に急激に低下する。その後、切羽が離れるにつれて、平均主応力 σ_m がほぼ一定になるため、排水に伴う間隙水圧のわずかな低下量そのまま平均有効主応力 σ'_m の増加量となる。

この平均主応力 σ_m および平均有効主応力 σ'_m の変化傾向を明らかにするため、トンネルの天端を代表例として、その領域での全応力、有効応力の各直応力成分の経時変化を図-5に示す。

同図に示す各直応力成分の経時変化で、トンネル軸直角方向全応力 σ_x は、切羽が着目位置に到達した直後に一旦急激に増加する傾向を示すが、その他の掘削・排水過程での変動量自体はわずかである。鉛直方向全応力 σ_z は、切羽到達の直前までほとんど変化をせず、切羽が着目位置に到達した直後およびそれに引き続く掘削の直後に、それぞれ急激な減少傾向を示す。トンネル軸方向全応力 σ_y は、切羽の進行に伴いトンネル方向の除荷の影響により、徐々に減少する傾向を示すが、切羽通過直後（切羽通過2m）に一旦急激に増加する。これは、切羽到達時に着目している要素が切羽の隅角部となり、切羽効果によりトンネル軸方向の応力が増加するためである。そして、その後の排水過程での間隙水圧の低下および、切羽が通過することで切羽効果がなくなるため、再びトンネル軸方向全応力 σ_y は減少傾向を示してほぼ一定値となる。

したがって、トンネル壁面での法線方向の応力成分は、切羽が着目位置に到達した直後およびそれに引き続く掘削の直後に急激な応力値の減少を示す。また、トンネル壁面での接線方向の応力成分は切羽が着目位置に到達した直後に一旦急激に増加する傾向を示す。

以上の各全応力成分の経時変化より、図-4に示す切



図—5 トンネル天端の直応力成分の経時変化

切羽通過直後の平均主応力 σ_m の一時的な増加は、平均主応力 σ_m の3成分の中でトンネル壁面での法線方向の全応力の低下量を、その他の直応力成分の増加量が上回ることによる。ただし、その後の排水過程での平均主応力 σ_m は、間隙水圧の低下に伴い減少傾向となる。また、次の掘削段階である切羽通過6mの掘削直後の平均主応力 σ_m の急激な低下は、トンネル軸方向全応力 σ_y およびトンネル壁面での法線方向の全応力の低下量が卓越するためである。

次に、図—5に示すトンネルの天端での有効応力表示での各直応力成分の経時変化は、以下のような傾向にある。すなわち、トンネルの天端の各直応力成分は、切羽の接近に伴い間隙水圧が低下するため、全応力と比較して切羽が到達するかなり以前の段階から徐々に増加する傾向を示す。この各直応力成分の内、トンネル壁面の法線方向の直応力は、全応力の変化と同様に、切羽が着目位置に到達した直後およびそれに引き続く掘削直後に急激な減少傾向を示す。一方、トンネル壁面の法線方向の応力成分は、切羽が着目位置に到達した直後に急激に増加する傾向を示す。また、トンネル軸方向有効応力 σ'_y は、全応力変化と異なり切羽の接近に伴い間隙水圧が低下するため徐々に増加し、切羽通過直後（切羽通過2m）に切羽効果のため急激に増加する。その後、切羽が通過することで切羽効果がなくなるため、トンネル軸方向有効応力 σ'_y は一旦急激な減少傾向を示す。

以上の各有効応力成分の経時変化より、図—4に示す切羽通過直後の平均有効主応力 σ'_m の増加は、平均有効主応力 σ'_m の3成分の中でトンネル壁面での法線方向の有効応力の低下量を、その他の直応力成分の増加量が上回ることによる。その後の排水過程での平均有効主応力 σ'_m は、平均主応力 σ_m の低下量を間隙水圧の低下量が上回るためにわずかに増加する傾向となる。また、次の掘削段階である切羽通過6m時の掘削直後の平均主有効応力 σ'_m の急激な低下は、トンネル軸方向有効応力 σ'_y およびトンネル壁面での法線方向の有効応力の低下量が卓越するためである。

なお、ここでの議論の対象は、トンネル極く近傍の応力に限定している。このため、図—4および図—5に示した応力状態の推移は、トンネル坑壁と近接しているため、擬似的排水条件での最も顕著な変動特性を表している。これに対して、トンネル坑壁から離れるに連れて、その応力状態の推移は、坑壁との排水距離の関係および三次元的な応力の伝播特性から、図—4に示した結果に比べ、時間遅れを伴う緩やかで微小な変動となる。

次に、二次元平面ひずみ場での掘削解析の問題点を明確にするため、トンネル坑口から22mの距離のトンネルの天端および側壁での、二次元平面ひずみ場と三次元場の解析結果での有効応力径路の比較を図—6に示す。同図に示すように、二次元場と三次元場での有効応力径路は全く異なる結果となる。図—6に示すそれぞれの有効応力径路を、この応力平面上でMohr-Coulomb等の破壊包絡線と照らし合わせた場合、以下のような相違が明らかになる。すなわち、二次元平面ひずみ場の結果では、掘削直後が最も厳しい応力状態となるのに対して、三次元場の結果では、掘削後の最終定常状態が最も厳しい応力状態となる。つまり、二次元平面ひずみ場の解析結果は、三次元場の逐次掘削過程を評価した結果と比較すると、掘削直後の正八面体せん断応力 τ_{oct} を過大評価し、実現象とは全く異なる応力径路を算定している。

なお、図—6に示す二次元解析結果では、切羽の進行の影響を近似的に表現する手法は適用していない。このため、通常の二次元掘削解析で用いられる特性曲線法を適用した場合の有効応力径路を、図—6に示した二次元解析結果に基づき推定する。特性曲線法を用いた二次元解析は、事前に設定される初期応力を、二次元のトンネル形状に対して何回かに分割して作用させる方法であり、その分割して作用させる各応力成分の比率は一定である。このため、図—7の模式図に示すように、特性曲線法を適用することで、有効応力径路での段階関数的な正八面体せん断応力 τ_{oct} および平均有効主応力 σ'_m の増加は表現可能である。そして、図—6に示した二次元解析結果と三次元解析結果での有効応力径路の相違を小さくすることは可能である。ただし、特性曲線法で用いられる分割された掘削解放力は切羽が到達するまでの逐次掘削に伴う排水過程を含む応力状態の変化を評価したものではない。また、この方法は、着目断面に対して切羽到達から通過するまでの三次元的な切羽効果を考慮したものではない。これらの要因から、図—7の模式図に示すように、特性曲線法を用いた二次元解析では、三次元解析結果での、有効応力径路が急激に破壊規準に接近する危険側の左上方向へと移動する傾向を表現することはできない。このため、二次元有効応力解析で特性曲線法を用いた場合には、三次元の解析結果に対する近似度を高めることはできるが、図—7の模式図に示すように、

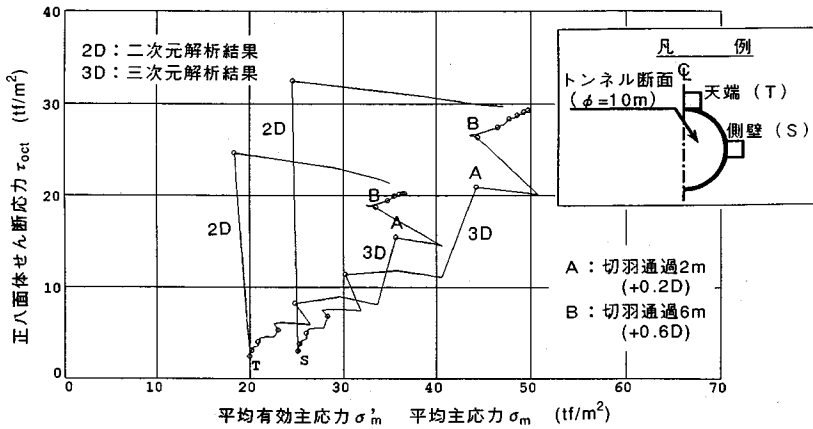


図-6 掘削に伴う有効応力径路の比較 (透水係数 $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/sec)

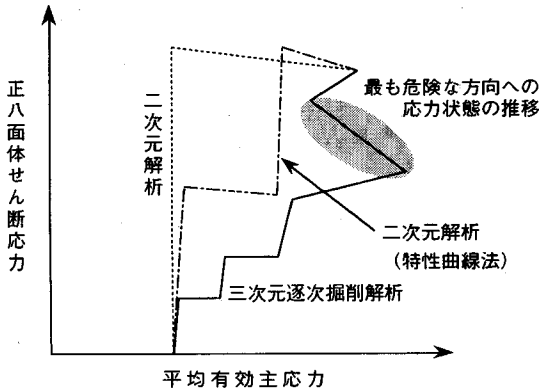


図-7 掘削に伴う有効応力径路の比較 (模式図)

切羽の進行を忠実に考慮した解析結果に比べて、破壊規準に接近した側から最終状態に至る有効応力径路を追跡することになる。

ただし、図-4 に示した応力状態の推移で言及したように、坑壁との排水距離の関係および三次元的な応力の伝播特性から、応力変化はトンネル坑壁の近傍では顕著な変動となるのに対して、トンネル坑壁から離れるに連れて緩やかで微小な変動となる。このため、図-7 の模式図に示した三次元解析結果での、有効応力径路が急激に破壊規準に接近する危険側へ移動する傾向は、トンネル坑壁に接近した領域では顕著に現れるが、トンネル坑壁から離れるに連れて、応力変化が微小になるため、明確ではなくなる。

しかし、この有効応力径路が急激に破壊規準に接近する危険側へ移動する傾向は、切羽通過後に平均有効主応力 σ_m が急激に減少することに起因するため、トンネル坑壁近傍に限定すれば、切羽通過直後には一般的に生じる傾向である。また、この変動は切羽近傍では、土被りに関わらず生じるものと推定される。そして、この有効応力径路が急激に破壊規準に接近する危険側へ移動する

傾向は、トンネル坑壁の安定性を評価する上で重要な検討課題である。

さらに、有効応力解析で特性曲線法を適用するためには、従来の変形に基づく特性曲線に加えて、切羽の進行に伴う間隙水圧の特性曲線法をも考慮する必要がある。なぜならば、有効応力解析での掘削解放力は、掘削される要素の変形状態に関連する有効応力と間隙水圧を重ね合わせた全応力に基づき算定されるものである。このため、切羽の進行を模式的に表現する掘削解放力の分割率を評価する上での、変形と間隙水圧の特性曲線が一致するか否かについて検討する必要がある。

ここで、切羽到達前までの間隙水圧および有効応力の初期状態からの変化は、岩盤の透水性に依存することを明らかにするために、図-8 に二次元および三次元応力・浸透連成解析で、前述の解析に比べて透水係数を20倍に設定した場合の応力径路を示した。同図に示す応力径路を図-6の結果と比較すると、三次元解析結果での切羽到達前での間隙水圧および有効応力の変動が、逐次掘削の初期の段階から明瞭に現れる結果となり、二次元解析結果での有効応力径路との相違が一層顕著になる。この比較結果より、切羽到達前での間隙水圧および有効応力の変化は、岩盤の透水性および施工の速度（掘進速度）により大きく変化する。

この傾向を明確にするために、透水係数を変化させた2ケースのトンネル坑口から22mの位置での、内空変位と間隙水圧の特性曲線を図-9に示した。同図に示すように、透水性が高くなるにつれて、変位と間隙水圧の特性曲線の相違が大きくなる。特に、透水性が高い場合には、間隙水圧の特性曲線での切羽面が到達するまでの変動量が卓越する。

以上の結果より、二次元有効応力解析で、切羽の進行を近似的に表現するためには、有効応力と間隙水圧について別々の特性曲線を設定する必要がある。しかし、間

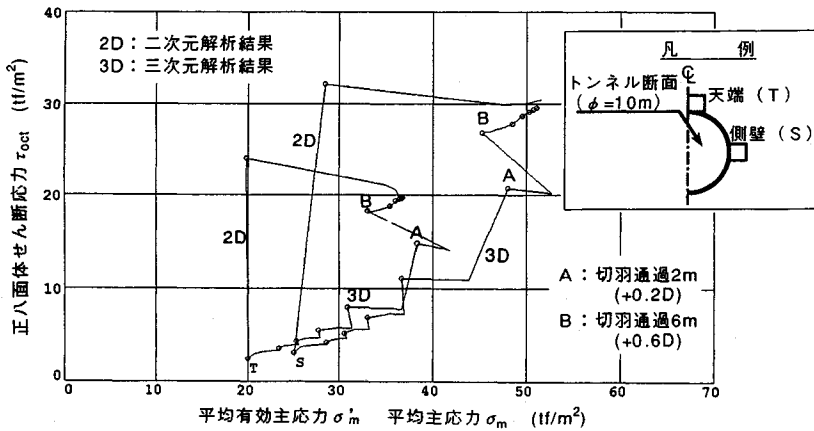
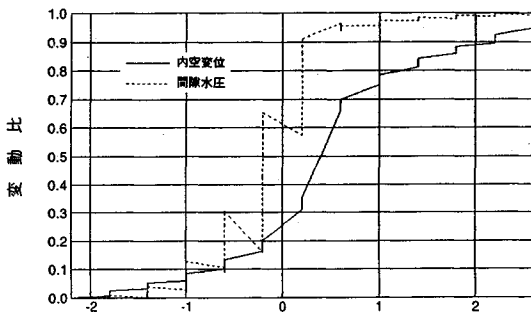
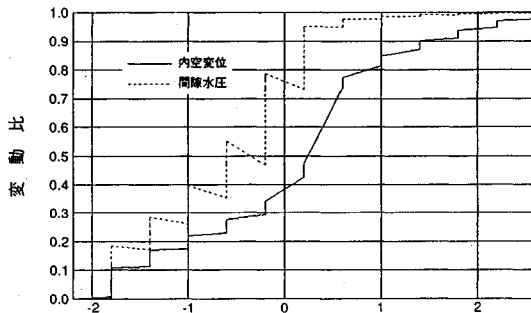


図-8 掘削に伴う有効応力径路の比較 (透水係数 $k=2.0 \times 10^{-5}$ cm/sec)



(a) 透水係数 $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/sec



(b) 透水係数 $k=2.0 \times 10^{-5}$ cm/sec

図-9 内空変位と間隙水圧の特性曲線の比較

隙水圧の特性曲線を用いる場合には、分割した掘削解放力としての間隙水圧を作用させるとしても、切羽が着目断面に到達するまでのトンネル坑壁での排水条件をどのように設定するかに課題がある。

これらの知見より、二次元平面ひずみ場での掘削解析結果での有効応力径路は、設計的には安全側の結果を与えるものであるが、実現象とは異なるものとなる。このため、掘削問題に応力・浸透連成解析を適用し、さらに応力-ひずみ関係式として非線形構成則を採用する場合

には、軸対称場ないし三次元場での逐次掘削過程を考慮した解析を実施する必要がある。

ただし、図-6および図-8に示す有効応力径路の比較で、掘削後の最終定常状態での応力状態は、二次元平面ひずみ場と三次元場の結果はほぼ一致する。しかも、三次元場での逐次掘削過程を考慮した解析結果で、掘削後の最終定常状態での応力状態が、前述のように既往の破壊規準から判断して最も厳しい応力状態となる。この傾向は、土被りが大きくなるに連れて平均主応力の変動量は小さくなるが、その一方で掘削に伴い正八面体せん断応力が増加するため、一般的に成り立つものと推定される。したがって、有効応力径路に関する比較検討より、地下構造物の安定性を検討する上で、岩盤の構造骨格を線形弾性体と仮定した場合には、掘削後の最終定常状態に関してのみ評価することで簡易的な設計は可能である。

3. 弾塑性解析での有効応力径路の比較

2.の検討より、三次元解析結果での有効応力径路は、筆者ら⁹⁾が既に示してきた軸対称場での大深度立坑掘削の解析結果と同様な径路となり、二次元解析結果とは全く異なることを明らかにした。このため、本検討では、2.で述べた掘削解析に非線形構成式を適用上での問題点を明らかにするため、立坑掘削問題を解析例として、弾塑性構成式を適用した二次元解析と逐次掘削過程を考慮した軸対称解析での有効応力径路の相違について検討する。

(1) 解析条件

二次元平面ひずみ場と逐次掘削過程を考慮した軸対称場での解析結果の有効応力径路を比較する例題として、図-10に示す立坑 ($\phi 2\text{m} \times 20\text{m}$) の掘削問題を取り挙げ、それぞれの場のモデルに対して、応力・浸透連成解析を適用する。ここでは、議論を簡素化するために、支

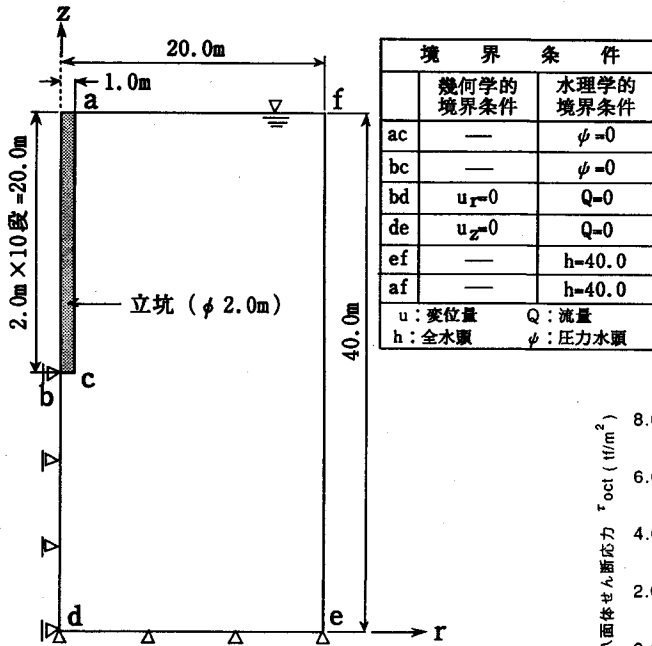


図-10 解析モデルおよび境界条件

表-2 解析用物性値一覧表

圧縮指数 λ	0.25
膨潤指数 κ	0.03
ポアソン比 ν	0.33
単位体積重量 γ	2.0×10^{-3} kgf/cm ³
ダイレイタンス係数 μ	0.194
過圧密比 O.C.R	1.1
初期間隙比 e_0	1.0
側方応力係数 K_0	1.0
透水係数 k	1.0×10^{-6} cm/sec

保部材は考慮せず、素掘状態での解析とする。なお、二次元平面ひずみ場の解析モデルとして、立坑深度 9.5 m レベルの水平断面を選定した。なお、この解析での掘削過程は、1 サイクルでの掘進長を 2 m とし、掘削を 1 日その後の排水放置期間を 11 日と設定した。このサイクルを 10 回繰り返し、立坑深度 20 m レベルを最終切羽位置とした。

また、解析の対象とする地盤は、均質な粘性土地盤を想定し、地盤の応力-ひずみ関係についての弾塑性構成式としては、粘性土地盤の非線形挙動およびダイレイタンス特性を評価できる太田モデル⁷⁾を適用した。このモデルに対する地盤物性値を表-2 に示す。

(2) 解析結果

図-11 に、二次元平面ひずみ場の解析で、弾塑性モデルを適用した場合の立坑深度 9.5 m の坑壁要素での有効応力径路を示す。図-11 に示すように、弾塑性構成モデルを掘削問題に適用した場合、その有効応力径路は、図-6 に示した線形弾性モデルでの有効応力径路と全く異なる径路となる。すなわち、弾塑性モデルでの有効応力径路は、掘削過程では、負のダイレイタンス特性を示し、初期降伏曲面に沿い平均有効主応力 σ'_m が減少し正八面体せん断応力 τ_{oct} が増加する径路となる。そして、掘削後の排水放置期間での有効応力径路は、降伏曲面上で正八面体せん断応力 τ_{oct} が減少し平均有効主応力 σ'_m が増加する径路となる。この結果より、二次元平面ひずみ場の解析結果では、掘削直後が最も厳しい応力状態となる。

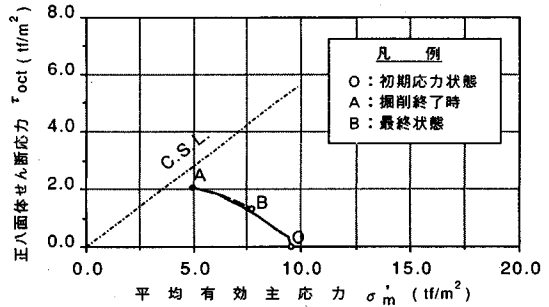


図-11 立坑坑壁の有効応力径路 (二次元解析結果)

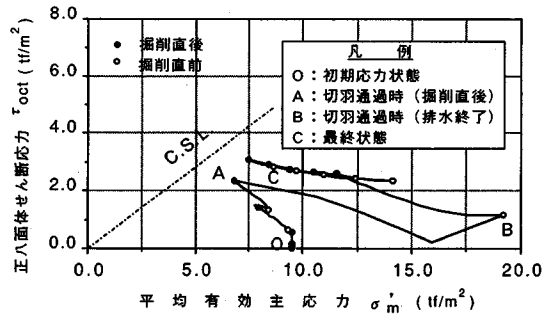


図-12 立坑坑壁の有効応力径路 (軸対称逐次解析結果)

次に、逐次掘削過程を考慮した軸対称場の解析で、弾塑性モデルを適用した場合の立坑深度 9.5 m の坑壁要素での有効応力径路を図-12 に示す。同図に示す逐次掘削過程を考慮した軸対称場の解析での有効応力径路は、図-11 に示す二次元解析結果と大きく異なる。すなわち、図-12 に示す結果で、切羽到達前までの有効応力径路は、二次元平面ひずみ場の解析結果と同様に、初期降伏曲面にほぼ沿う径路となる。しかし、図-12 に示す A 点から B 点へと移行する切羽通過後の排水放置期間では、二次元平面ひずみ場の解析結果に比べて、平均有効主応力 σ'_m の増加が顕著になるその後の逐次掘削過程での有効応力径路は、切羽の進行に伴う掘削および排水放置により、平均有効主応力 σ'_m が増減を繰り返し、定常状態に到達する径路となる。

この有効応力径路は、二次元平面ひずみ場の解析結果と同様に、逐次掘削過程を考慮した場合も、図-12のA点に示す切羽通過直後が最も厳しい応力状態となる。

ただし、図-12のB点に示す切羽通過後の排水放置期間終了時から最終定常状態に到る有効応力径路は、B点の応力状態より定まる降伏曲面の内側へと応力状態が推移するため、解析上は、弾塑性領域から弾性領域への移行となり、非線形弾性体の挙動を示すこととなる。したがって、有効応力径路が再び降伏曲面に到達し、限界状態に接近しない限り、破壊は生じないことになるため、この解析結果より得られる最終状態についての破壊の議論をすることはできない。この弾塑性領域から弾性領域への移行は、太田モデル⁷⁾のような等方硬化型の弾塑性構成式を、掘削問題のような作用外力が除荷側に作用する問題に適用したことによる。

本来、等方硬化型の弾塑性構成式は、盛土あるいは支持力問題のように、作用外力が載荷側に作用する場合にのみ有用性が保証されるものである。このため、掘削問題に対する、太田モデルのような等方硬化型の弾塑性構成式の適用性については、その構成式の物理的な特性に基づき再検討する余地がある。そして、この課題は、太田モデルと本質的に等価な Cam-clay モデル⁸⁾および、その発展形である関口-太田モデル⁹⁾をトンネル掘削のような除荷の問題に適用する場合に共通するものである。

以上の二次元場と逐次掘削過程を考慮した軸対称場のトンネル掘削問題に対して、弾塑性構成式の適用を試みた結果、二次元場と軸対称場では、その有効応力径路に有意な相違が生じることを明らかにした。このため、実務的な設定では、掘削問題に二次元解析が適用されることが多いが、弾塑性構成式を適用した場合に、二次元解析より得られる有効応力径路は、実現象とは異なる応力径路を追跡することになる危険性がある。

したがって、有効応力に基づき掘削解析を行う場合には、対象とする現象の支配因子を正しく把握し、適切なモデル化、構成式を選択を行うことが肝要である。

4. 掘削解析の簡易的検討フロー

2.のトンネル掘削を解析例とした、二次元平面ひずみ場と三次元場での比較結果より、二次元場および三次元場の解析での有効応力径路の掘削終了後の最終定常状態は、線形弾性体の仮定の下では、いずれの解析結果でもほぼ一致することを示した。そして、この三次元解析結果による掘削後の最終定常状態が、既往の破壊規準から判断して最も厳しい応力状態となることを明らかにした。

この知見に基づき、地下構造物の安定性についての簡易的な評価方法として、図-13に示す設計方法を提案

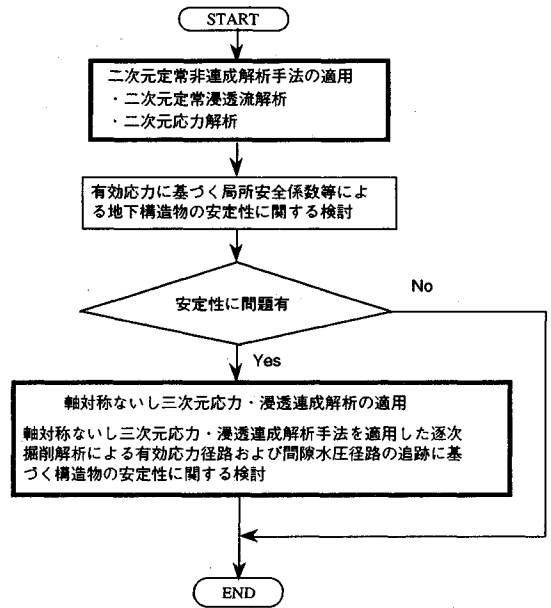


図-13 掘削問題の簡易的な設計検討フロー

する。この設計方法の基本概念は、掘削時の非定常的な挙動については検討せず、簡易的に最も厳しい状態となる最終定常状態での応力状態についてののみ着目することである。このため、解析的なフローとしては、定常浸透流解析結果より算定される浸透力を物体力として、釣合式に代入するものである。この解析結果より、地下構造物の安定性について、有効応力に基づき検討する。

以上の検討手順で、地下構造物の安定性に問題がない場合には、設計検討は終了となる。これに対して、定常状態で構造物の安定性について問題がある場合には、対策工を立案するため、軸対称場ないし三次元場での応力・浸透連成解析手法を適用した逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮した解析により検討を実施する必要がある。

また、近年地下構造物の安定性評価に非線形の構成式を適用する事例が増加しつつあるが、このような解析では、適正な有効応力径路を追跡するため、軸対称場ないし三次元場での応力・浸透連成解析手法を適用した逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮した解析手法を適用する必要がある。そして、この場合には、3.の検討に示したように、適用する非線形の構成式の特性的によっては、掘削問題への適用性に限界があることに留意する必要がある。

5. 結 論

本研究では、有効応力の概念に基づき掘削解析を実施する上での問題点について検討を加えた。この検討結果より得られた結論は、以下のように要約される。

- 1) 三次元的な逐次掘削過程を考慮した場合には、切羽到達までに、間隙水圧および有効応力は初期状態から既に変動が生じているため、二次元平面ひずみ場と三次元場の解析結果での有効応力径路は異なる結果となる。*そして、二次元有効応力解析で特性曲線法を用いた場合でも、三次元の解析結果に対する近似度を高めることは可能であるが、逐次的な掘削に伴う有効応力径路を詳細に追跡することはできない。
- 2) 切羽到達までの間隙水圧および有効応力の初期状態からの変動は、岩盤の透水性および施工の速度（掘進速度）により大きく変化するため、通常の応力解析で用いられる特性曲線は、間隙水圧と変形で異なる曲線となる。この要因により、有効応力解析では、全応力解析で適用される特性曲線は、一意的に定められない。したがって、有効応力解析により掘削に伴う地盤・岩盤挙動を詳細に検討するためには、逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮することが不可欠な要因となる。
- 3) ただし、二次元および三次元解析結果での有効応力径路の掘削後の定常状態は、透水性の相違に依らず、線形弾性体のモデル化の仮定の下でいずれの結果でもほぼ一致し、この掘削後の最終定常状態が、既往の破壊規準から判断して最も厳しい応力状態となる。このため、簡易的な地下構造物の安定性に関する設計手法として、最終定常状態での応力状態についてのみ着目し、定常浸透流解析結果より算定される浸透力を物体力として、釣合式に代入する非連成定常解析手法を提案した。
- 4) 地下構造物の安定性に関する解析手法として、非線形の構成式を適用する事例が増加しつつあるが、地下構造物の安定性について有効応力に基づき検討を加える場合には、軸対称場ないし三次元場での応力・浸透連成解析手法を適用した逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮した解析手法を適用するべきである。そし

て、この場合には、3.で検討示したように、適用する非線形の構成式の特性によっては、掘削問題への適用性に限界があることに留意しなければならない。

最後に、本研究を進めるにあたり、終始温かい御指導と御助言を賜った京都大学工学部 足立紀尚教授に心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 朝倉堅五：ジオフロント構想で東京圏はこう変わる，HBJ出版局，pp.181~183, 1990.
- 2) 大西有三・岸本英明：トンネル切羽進行の影響を近似的に考慮した2次元有限要素解析，トンネルと地下，Vol.11, No.12, pp.7~12, 1980.
- 3) 亀村勝美・平野逸雄・竹田直樹・里優：切羽進行を考慮したトンネルの解析と実際，第27回土質工学シンポジウム講演集，pp.55~60, 1982.
- 4) 橋本 正，他：シールド掘進条件を考慮した地盤変形解析，第43回土木学会年次講演会講演集，PSⅢ-19, pp.38~39, 1988.
- 5) 伊藤雅夫・勝又正治・松井幹男：シールド掘進時に裏込め注入を考慮した地盤のFEM解析，第21回土質工学研究発表会講演集，H-5-661, pp.1729~1732, 1986.
- 6) 大津宏康・瀧治雄・亀村勝美：堆積軟岩における空洞掘削に伴う地下水流動特性評価に関する検討，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.76~80, 1992.
- 7) Ohta, H. and S. Hata : A theoretical study of the stress-strain relations for clays, *Soils and Foundations*, Vol.11, No.3, pp.65~90, 1971.
- 8) Schofield, A.N. and C.P. Wroth : *Critical state soil mechanics*, London, McGraw-Hill, 1968.
- 9) Ohta, H. and H. Sekiguti : *Constitutive Equations Considering Anisotropy and Stress Reorientation in Clay*, Proc. 3rd. Int. Conf. on Numerical methods in Geomechanics, Aachen, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.475~478, 1979.

(1992. 12. 16 受付)

A STUDY ON PROBLEMS OF EXCAVATION ANALYSIS BASED ON THE CONCEPT OF EFFECTIVE STRESS

Hiroyasu OHTSU, Yuzo OHNISHI, Haruo TAKI and Katsumi KAMEMURA

This paper described the difference of the estimation of geomechanical behavior between two-dimensional analysis and three-dimensional analysis from a viewpoint of effective stress. And this investigation made it clear that the application of methods considering progress of face for excavation analysis is inevitable in order to estimate reasonable stress path due to excavation based on the concept of effective stress.