

有効応力解析に基づく逐次的な掘削に伴う切羽近傍での応力状態の推移に関する検討 A STUDY ON STRESS DISTRIBUTION NEAR FACE DUE TO TUNNEL EXCAVATION BASED ON THE CONCEPT OF EFFECTIVE STRESS

大津 安康*・瀧 治雄**・安達 哲也**
Hiroyasu OHTSU, Haruo TAKI and Tetsuya ADACHI

This paper described the stress distribution near face due to tunnel excavation based on the concept of effective stress. The investigation was carried out by means of both axi-symmetric analysis and three-dimensional analysis from a viewpoint of effective stress. The investigation made it clear that the applied method considering progress of face was very useful to predict reasonable geomechanical behavior near face during excavation. Finally, we proposed the effective measures to stabilize face and tunnels based on the numerical analysis results.

Keywords : axi-symmetric analysis, three-dimensional analysis, face effect, excavation

1. はじめに

近年、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50m～100m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、第二東名高速道路建設計画のように、三車線の大断面トンネルの建設が検討されている。さらに、対象とする地盤条件も都市部での大深度地下を想定した場合には、従来の軟弱地盤でのシールド工法そして岩盤での山岳工法のように平易には施工法を区分できない、土丹・軟岩等へと多様化することが予想される。すなわち、今後の地下構造物の建設に伴う新たな検討課題としては、構造物の大規模化・大深度化および、対象とする地盤条件の多様化を挙げることができる。

このため、上記の各課題に対して設計的に対応する上では、多様な地盤条件の下で大規模な地下構造物を構築する際の、掘削に伴う地盤の安定性についてより高い精度で評価できる解析技術を適用することが必要となる。さらに、その地盤挙動が間隙水の影響を受ける土丹・軟岩等を対象とする場合には、その挙動解析手法としては、従来の全応力解析から有効応力解析へと移行することが必要となる。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するため、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のような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。これに対して、従来のトンネル掘削解析では、上記のような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、このような計算上の制

* 正会員 工博 大成建設(株)土木設計部

**正会員 工修 大成建設(株)土木設計部

約条件の下で、トンネル掘削に伴う三次元的な影響を、簡便的に二次元場で表現するモデル化手法として、要素重積法²⁾・特性曲線法³⁾等が提案されてきた。ただし、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、以下のような問題点を有している。

- 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。

筆者ら⁴⁾は、このような制約が解析結果におぼす課題として、応力・浸透連成解析による解析結果での切羽近傍の領域での有効応力径路は、二次元解析結果と逐次的な切羽の進行を考慮した解析結果では全く異なることを明らかにしてきた。すなわち、トンネル孔壁の安定性について、二次元解析結果は、逐次的な切羽の進行を考慮した解析結果と比較して、過大評価となることを明らかにしてきた。

さらに、掘削問題で、二次元解析に代わり逐次的な切羽の進行を考慮した解析を適用する意義は、上述のトンネル孔壁の安定性に加えて、施工的に課題となる切羽面自体の安定性についても評価できることである。

このような観点から、本研究では、有効応力の概念に基づき、トンネル掘削問題に応力・浸透連成解析手法を適用し、切羽の進行を考慮した軸対称および三次元逐次掘削解析により、切羽近傍の孔壁および切羽面での応力状態の推移について検討を加える。

2. 逐次掘削過程を考慮した解析条件

本検討の目的は、切羽の進行に伴う切羽周辺で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。

以下に、それぞれ逐次掘削過程を考慮した軸対称解析および三次元掘削解析の解析条件について要約する。

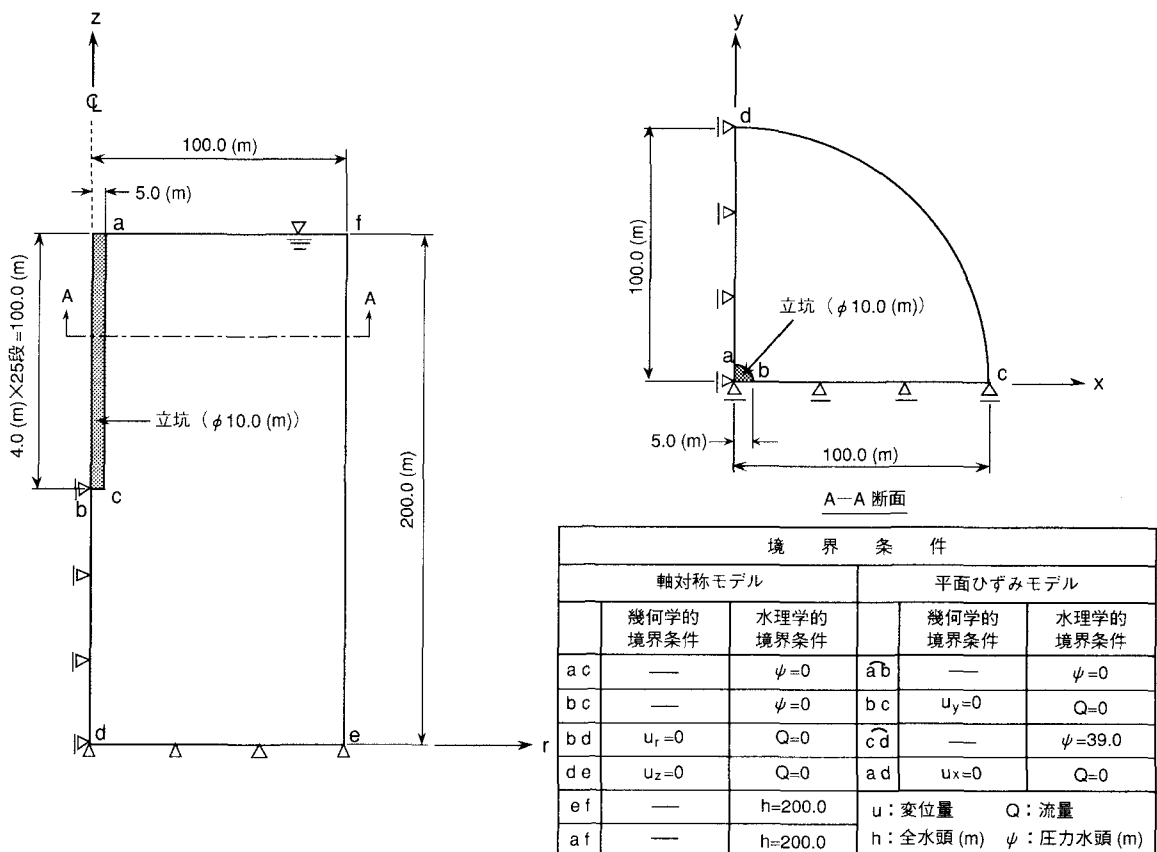
(1) 軸対称モデル

軸対称場での解析モデルとして、図-1に示す大深度立坑($\phi 10\text{m} \times 100\text{m}$)の掘削問題を取り挙げる。そして、この立坑掘削問題での境界条件を図-1に併せて示した。なお、この解析での掘削過程のモデル化は、図-2に示すように、一回の掘削サイクルを掘進長4mでその後11時間を排水放置期間と設定し、このサイクルを25回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C₁クラスに相当する堆積軟岩を想定し、表-1に示すように設定した。なお、近年地盤材料の透水特性の応力依存性が注目されているが、本検討の目的は、逐次的な掘削に伴う地盤と地下水との相互作用について検討を加える上での第一ステップの研究と位置付けられるものである。このため、本検討では、透水特性の応力依存性については考慮しないものとする。

次に、初期応力分布は、地表面を原点とする有効土被り圧による等方応力状態を仮定した。また、初期間隙水圧分布は、地表面を原点とする静水圧状態を仮定した。

(2) 三次元モデル

三次元場での解析モデルとして、図-3に示す $\phi 10\text{m}$ の円形断面のトンネル掘削問題を取り挙げる。そして、この掘削問題での境界条件を図-3に併せて示した。なお、掘削過程のモデル化は、図-4に示すように、一掘進長4m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回繰り返すものとした。ま

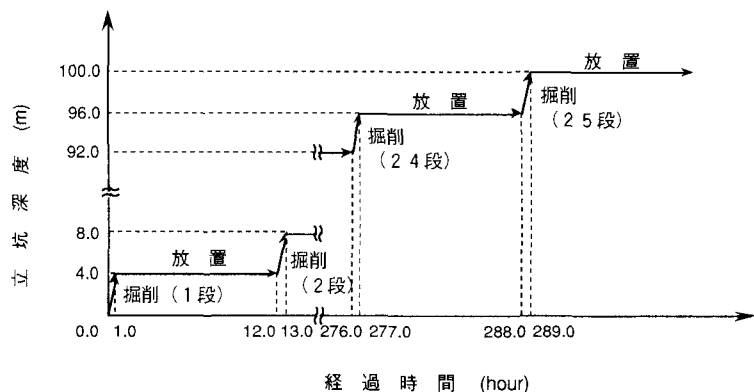


図－１ 大深度立坑掘削モデルおよび境界条件

た、解析用物性値は、電中研式の種類でC₁クラスに相当する堆積軟岩を想定し、表－２に示す物性値を設定した。なお、軸対象モデルと同様に、透水特性の応力依存性については考慮しないものとする。

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、２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状態を仮定した。

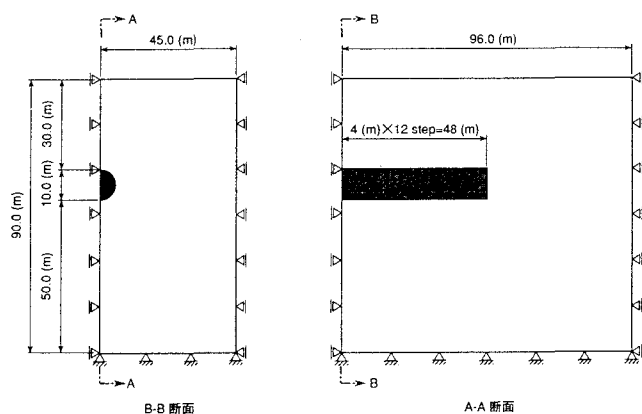
３．解析結果および考察



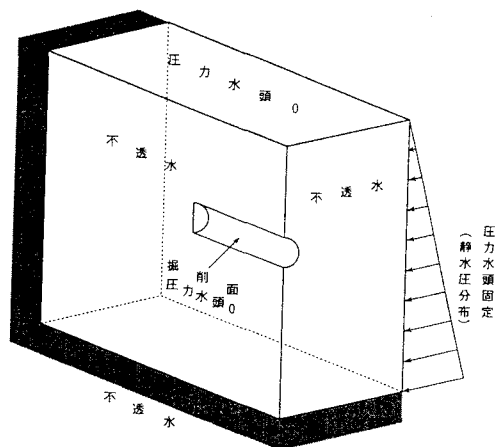
図－２ 逐次掘削のモデル化

表－１ 解析用物性値一覧表

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^{-8} cm/sec
側方応力係数 K_0	1.0
単位体積重量 γ	2.0×10^{-3} kgf/cm ³



(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-3 三次元逐次掘削解析モデルおよび境界条件

2. に示した解析条件での解析結果について、切羽近傍のそれぞれトンネル孔壁および切羽面での応力状態の推移について検討を加える。

(1) トンネル孔壁での応力状態の推移

逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮した軸対称解析結果として、深度39mの立坑孔壁での有効応力径路を図-5

に示す。なお、同図には比較のために、二次元平面ひずみ場での解析結果の有効応力径路も併記した。同図に示すように、切羽の進行の影響を評価しない二次元平面ひずみ場の解析と軸対称場の解析での有効応力径路は全く異なる結果となる。

すなわち、切羽の進行の影響を評価しない二次元平面ひずみ場の解析結果では、

Mohr-Coulomb等の破壊規準を想定した場合には、掘削直後が最も厳しい応力状態となる。しかし、この有効応力径路は、逐次掘削過程を考慮していないため、掘削直後の正八面体せん断応力 τ_{oct} を過大評価し、実現象とは異なる径路を追跡していることに留意しなければならない。

一方、軸対称場の解析結果では、逐次的な切羽の接近に伴い、階段関数的な正八面体せん断応力 τ_{oct} お

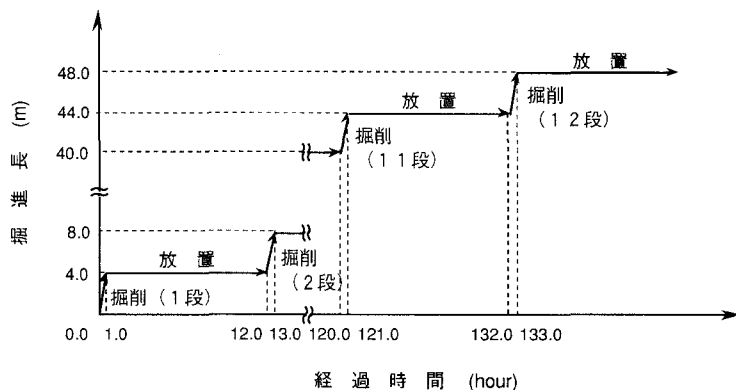


図-4 逐次掘削のモデル化

表-2 解析用物性値一覧表

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^{-8} 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

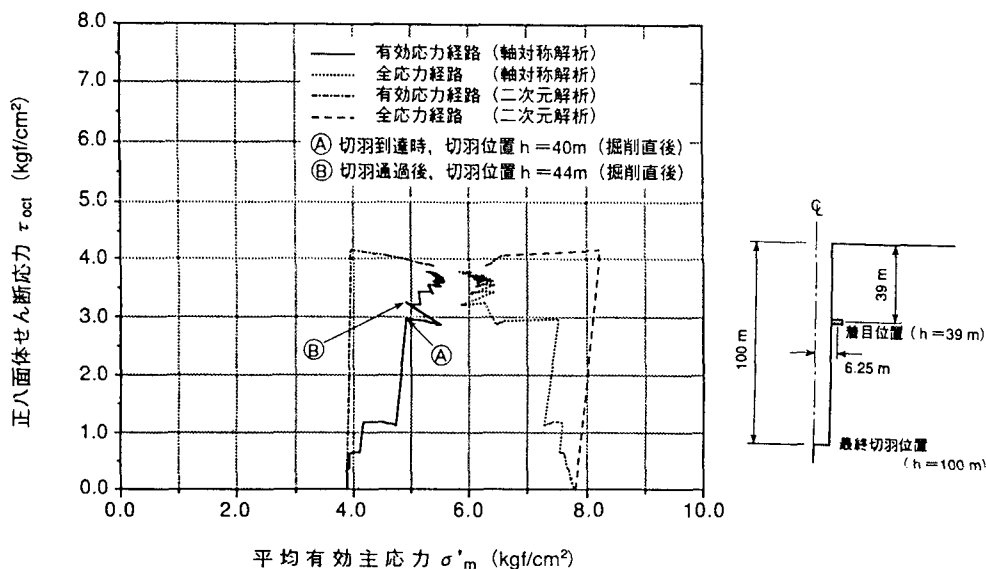


図-5 立坑孔壁での有効応力経路

よび平均有効主応力 σ'_m の増加が次第に顕著になる。そして、有効応力経路は、図-5に示すように切羽通過直後に、急激に応力平面上で破壊規準に接近する左上方向へと移動する。

次に、逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮した三次元解析結果として、

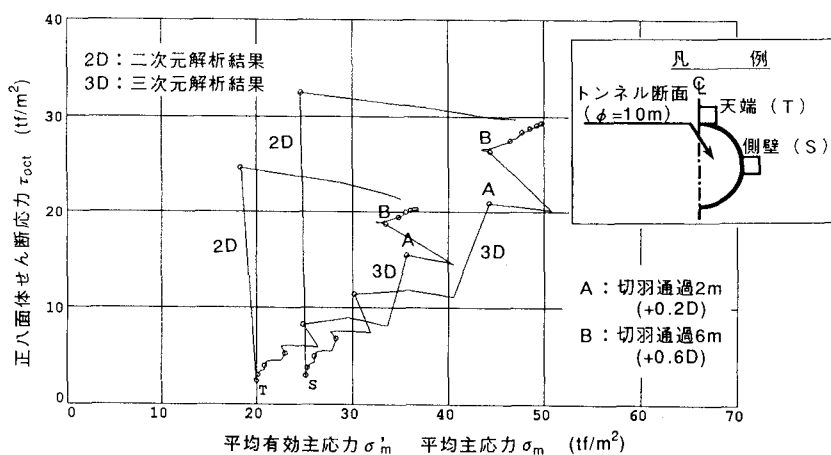


図-6 トンネル孔壁での有効応力経路

トンネル孔口から22mの位置でのトンネルの天端および側壁での有効応力経路を図-6に示す。なお、同図には比較のために、二次元平面ひずみ場の解析結果での有効応力経路を併記した。同図に示すように、切羽の進行の影響を考慮するか否かによる有効応力経路の相違は、上記の軸対称解析結果に関する議論と全く同様な結果となる。

すなわち、切羽の進行の影響を評価した三次元場の解析結果では、逐次的な切羽の接近に伴い、階段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 の増加が次第に顕著になる。そして、有効応力経路は、図-5に示すように切羽通過直後に、急激に応力平面上で破壊規準に接近する左上方向へと移動す

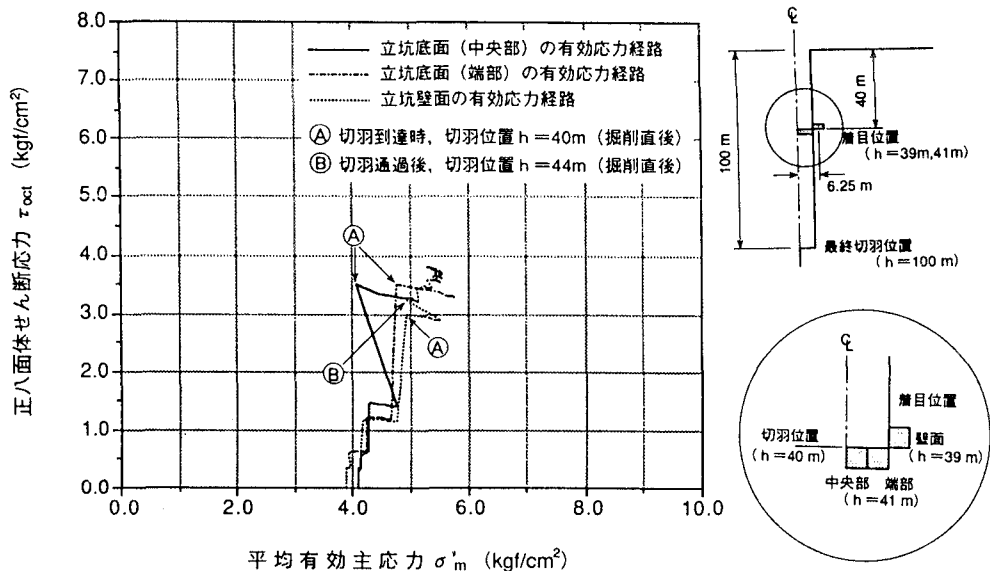
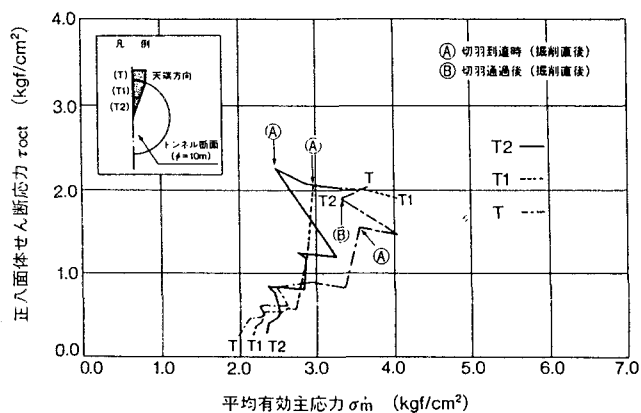


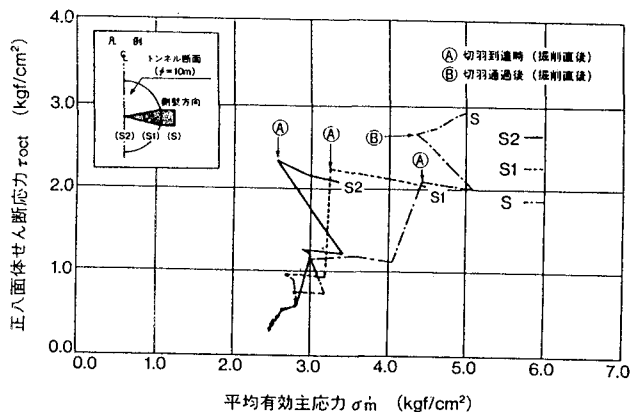
図-7 立坑底面の有効応力経路

る。そして、この三次元解析結果での切羽通過直後の有効応力経路の変動傾向を実際の施工状況と照らし合わせると、トンネル切羽直後で支保工を建て込む際に、天端付近で地山崩壊が生じた事例が多いことと対応しているものと推定される。

以上の結果より、切羽近傍のトンネル孔壁は、切羽通過直後の急激な応力状態の変動に伴い破壊線に接近する傾向を示すことが、逐次掘削過程を考慮した軸対称および三次元のいずれの場の解析結果からも確認された。そして、この応力変動の傾向が、実施工でのトンネル切羽直後の地山崩壊と対応していると仮定した場合、孔壁の安定性を改善する補助工法としては、いわゆる先受け工法が有効であると推定される。すなわち、切羽前方にフォアパイリングあるいは、近年使用されているAGF工法あるいはアンブレラ工法での長尺先受けパイプを打設することで、掘削に伴う地山の負担が先受け工に



(a) トンネル天端方向



(b) トンネル側壁方向

図-8 トンネル切羽面の有効応力経路

よって軽減されるため、次の掘進に伴う本検討で議論した切羽通過直後の破壊線に接近する急激な応力変動を抑制できるものと推定される。また、定性的な議論ではあるが、その先受け工の効果については、既往の切羽近傍での破壊事例から推定して、天端付近での地山の安定性の改善効果が大きいものと推定される。

(2) 切羽面での応力状態の推移

軸対称場での解析結果に基づき、切羽面となる立坑底面での応力状態の推移について検討を加えるため、ここでは切羽面が深度40mに到達した際に切羽面となる要素の掘削されるまでの有効応力径路を図-7に示した。なお、同図には比較のために、深度39mのトンネル壁面の要素の有効応力径路を併せて示した。

図-7に示すように、切羽面となる立坑底面での有効応力径路は、いずれも切羽到達直後に、Mohr-Coulomb等の破壊規準を想定した場合には最も厳しい応力状態となる。そして、この応力状態は、深度39mのトンネル壁面の要素での切羽到達時よりも破壊規準に接近した状態となる。この結果より、切羽面となる立坑底面は、その近傍のトンネル壁面よりも早い段階に応力的に厳しい状態となる。特に、立坑底面の中央部の有効応力径路は、切羽到達時に鉛直有効応力 σ_z 'の減少量が卓越するため、正八面体せん断応力 τ_{oct} が増加するとともに平均有効主応力 σ_m 'が減少し、応力平面で左上方向の破壊規準に接近する方向へと移動する。このため、立坑底面の切羽面は、その近傍のトンネル壁面よりも早い段階に破壊規準に接近し応力的に厳しい状態となる。中でも、立坑底面の中央部付近が、最も危険な応力状態の発生する領域となる。

次に、三次元解析結果での、切羽面の安定性について検討を加えるため、切羽面がトンネル坑口から24mに到達した際に切羽面となる要素の掘削されるまでの有効応力径路を図-8に示した。なお、同図には比較のために、切羽面がトンネル坑口から22mのトンネル壁面の要素の有効応力径路を併せて示した。

同図に示すように、切羽面となる要素での有効応力径路の傾向は、前述の軸対称解析結果での議論と全く同様になる。すなわち、切羽面は、その近傍のトンネル壁面よりも早い段階に応力的に厳しい状態となる。特に、切羽面の中央部の有効応力径路は、切羽到達時にトンネル軸方向有効応力 σ_y 'の減少量が卓越するため、正八面体せん断応力 τ_{oct} が増加するとともに平均有効主応力 σ_m 'が減少し、応力平面で左上方向の破壊規準に接近する方向へと移動する。

以上の結果より、切羽面は、その近傍のトンネル壁面よりも早い段階に破壊規準に接近する応力的に厳しい状態となる。そして、定性的な議論ではあるが、切羽面の中央部付近が、最も危険な応力状態の発生する領域となることが、逐次掘削過程を考慮した軸対称および三次元のいずれの場の解析結果からも確認された。ただし、この切羽面の中央部がより危険になる傾向は、本検討のような数値解析では解析メッシュのサイズに大きく依存する。このため、切羽面で最も危険な領域を明確に限定するためには、今後より詳細な検討が必要であると推定される。

しかし、ここで注目すべきことは、切羽面はその近傍のトンネル壁面よりも早い段階に破壊規準に接近する応力的に厳しい状態となることである。そして、この応力変動の傾向を、実施工と照らし合わせた場合、切羽面近傍での応力変動を極力抑制し自立性を高める補助工法を適用することが有効であると推定される。こうした補助工法の一方法として、切羽面に対する鏡打ちロックボルトあるいは、グラウト等の先行注入が有効であると推定される。

4. まとめ

本検討での、切羽の進行を考慮した逐次掘削解析により、切羽近傍の孔壁および切羽面での応力状態の推移についての検討結果より得られた知見は、以下のように要約される。

- 1) 切羽近傍のトンネル孔壁は、切羽通過直後の急激な応力状態の変動に伴い破壊線に接近する傾向を示すが、逐次掘削過程を考慮した軸対称および三次元のいずれの場の解析結果からも確認され

た。

- 2) 1) の応力変動の傾向が、実施工でのトンネル切羽直後の地山崩壊と対応していると仮定した場合、その孔壁の中でも天端付近での応力変動を抑制するためには、フォアパイリング工法あるいは、近年使用されている A G F 工法あるいはアンブレラ工法での長尺先受け工法が有効であると推定される。
- 3) 切羽面は、その近傍のトンネル壁面よりも早い段階に破壊規準に接近する応力的に厳しい状態となり、解析メッシュサイズに依存するが、本解析結果では切羽面の中央部付近が、最も危険な応力状態の発生する領域となることから、逐次掘削過程を考慮した軸対称および三次元のいずれの場の解析結果からも確認された。
- 4) 3) の応力変動の傾向を実施工と照らし合わせた場合、切羽面近傍での応力変動を極力抑制し自立性を高める補助工法としては、定性的な議論ではあるが、切羽面に対する鏡打ちロックボルトあるいは、グラウト等の先行注入等が有効であると推定される。

5. 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) 大津宏康・大西有三・瀧治雄・亀村勝美：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，土木学会論文報告集第3部門No. 481／Ⅲ-25，pp. 77-85，1993.