

(43) 核を残して掘削するトンネル周辺地山の二次元・三次元解析

フジタ工業(株)技術研究所

○門 田 俊 一

同 上

石 井 武 美

1. はじめに

トンネル工事を円滑に進行させるためには、切羽の安定が必須条件の一つである。最近採用されることの多い NATM 法は、切羽に近接した位置における収束を付けコンフリート・ロックボルト等の支保工を実施するために、在来工法に比べて切羽の安定が得られやすいものの、切羽面において塑性化による押し出しの可能性のある地山強度比の小さい地山や、切羽の自立が良好でない地山のトンネル掘削工事では、なお、慎重な施工管理が要求される。切羽の安定が得られない場合には、リングカットによる核残し、銃吹を付けコンフリート、銃ロックボルト、切羽の傾斜、薬液注入等の補助工法を用いるのが通例¹⁾であるが、地山の地質条件・施工条件の異なる、その効果も考慮した補助工法の選定が必要であれば、より合理的な施工管理が可能となる。

このため、ここでは、上述した補助工法のうち、在来工法・NATM 工法で採用される機会が多い核残し掘削工法を特に取り上げ、施工管理への適用を目的として、切羽安定効果の把握を解析的に検討したので報告する。なお、このように切羽の安定が問題となる地質条件のよくない地山におけるトンネル工事では、有限要素法等の数値解析から得られる情報に基き事前設計・施工管理を行なうのが一般的となりつつあるが、主として解析の経済性の問題から、二次元平面ひずみ状態を仮定した実用的な解析を実施する場合が多い。しかし、核残し掘削工法を含めたいづれの補助工法も、切羽付近の三次元的な応力の再配分を制御しようとするものであり、切羽安定に対する効果をも含めた地山挙動を予測するには三次元解析が当然であると考えらるが、常に三次元解析を実施するわけではない。そこで、二次元解析にて三次元挙動を予測することが不可能としても、この種の問題に対する二次元解析の適用限界を明らかにしておく、実用的な二次元解析から得られる情報をより有効に利用することが可能となろう。この点についても検討を加えたので合わせて報告する。

2. 二次元解析の適用限界について検討

まず、核を残して掘削するトンネルの三次元解析と、応力解放法に基き切羽の進行を考慮した二次元平面ひずみ解析とを実施し、両者の解析結果の差違を検討することによって、二次元解析の適用限界を明らかにした。

三次元解析では、モデルトンネルを直径 $D=10\text{m}$ の円筒トンネルと仮定し、核残し掘削が採用されるベンチカット工法での上半部掘削について解析した。解析モデルを図-1に示すが、三次元要素には解析の経済性を考慮して 20 節点

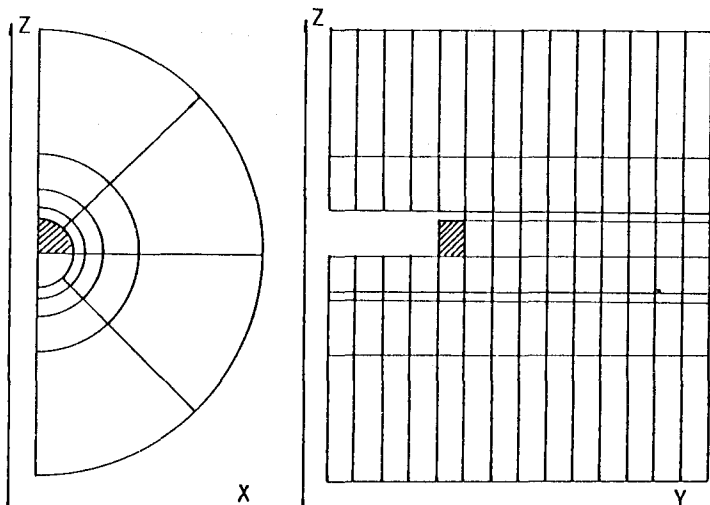


図 - 1 モデルトンネル

表 - 1

ヤング率	50000 t f / m ²
ポアソン比	0.3
内部摩擦角	35度
粘着力	100 t f / m ²
初期地圧	500 t f / m ²

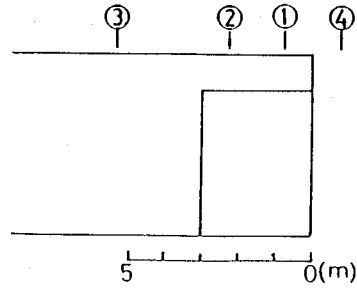


図 - 2 検討断面

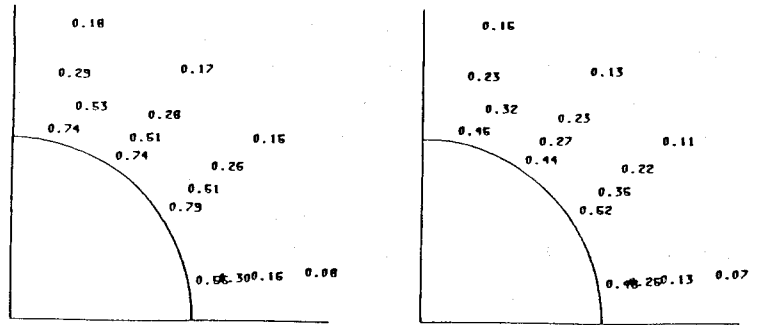
八面体要素を使用し、分割要素数は解の精度を確認した上で決定した。なお、核は図-1の斜線部を示すように、半径4m、長さ3mの半円柱状と仮定した。解析手順は、初期応力解析を実施した後、掘削に相当する要素を取り除く逐次掘削解析とした。

二次元平面ひずみ解析では、三次元解析と要素形状等の統一性を考慮して、図-1の三次元モデルで、上半部を一度に削除することにより平面ひずみ状態を擬似的に表現することとした。また、二次元解析における切羽進行解析は、ベンチカット工法上半部の三次元解析より求める特性曲線を使用して行った。

解析に使用した地山物性値を表-1に示すが、この解析では、変位を無視した弾性素振り状態に実施した。

図-2に示す切羽からの距離が異なる三断面内の応力の相違を調べるために、式(1)を用いて、 $\sigma_F = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2 \cos \phi + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \sin \phi}$

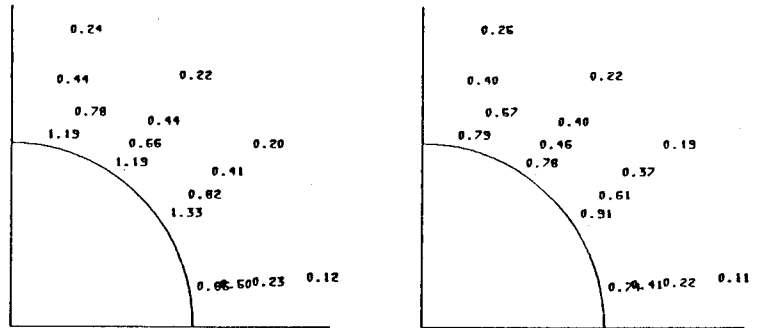
(ここに、 σ_1 、 σ_2 は、圧縮を正とした最大、および、最小



三次元解析

平面ひずみ解析

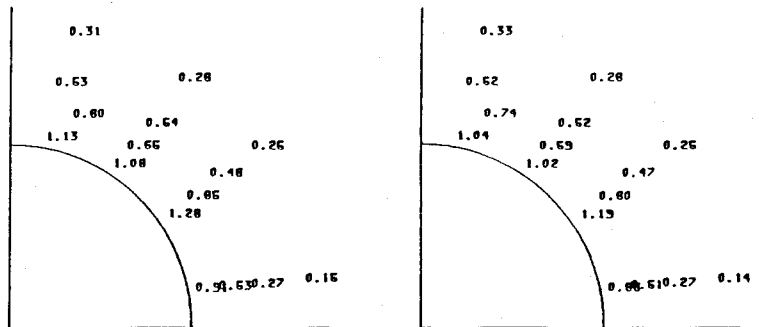
(a) 断面 - ①



三次元解析

平面ひずみ解析

(b) 断面 - ②



三次元解析

平面ひずみ解析

(c) 断面 - ③

図 - 3 安全率分布

主応力、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角)と算出される安全率分布を図-3-(a)~(c)に示したが、これらの図より、切羽から十分離れた断面では両者に顕著な相違が見られないものの、核の近傍ではかなり異なる応力状態であることがわかる。これは、平面いずみ解析では切羽近傍の応力集中や核の存在による応力の乱れ等を適切に表現し得ないためであると考えられ、図-2の断面④程度まで切羽に近接した場合には、三次元解析が是非必要であると結論できる。またこれらの図は、二次元平面いずみ解析が三次元解析結果と比較して危険側となることを示しているので、切羽近傍における二次元平面いずみ解析の適用には十分な注意が必要であると考えられる。なお、変位分布は、両解析で顕著な相違が見られなかったため、ここでの図示は省略することとした。

3. 三次元解析による切羽安定効果の検討

核を残して掘削することによる切羽の安定効果の把握を目的とした解析は、切羽に近接した位置における応力・変位の評価となるので、二次元解析では不可能であり、前章で検討したように、忠実に三次元解析を実施しなければならぬ。

切羽安定効果の把握は、図-1と同様なモデル・コンセルを仮定し、素掘り状態を仮定して、上半部に核を残して掘削する場合と、核を残さず掘削する場合の両者について解析し、その差異を検討することによった。使用した地山物性値は表-1と同様としたが、核を残して掘削する必要のある地質条件の悪い地山では塑性領域の発生が当然予想されるため、この解析は、モール・クーロンの破壊条件式に差なく初期応力法²⁾を用いた弾塑性

解析とした。なお、表-1の物性値によれば、地山強度比(一軸圧縮強度/土初り圧)は0.77となり、かなりの塑性化を生ずる可能性のある地山であると言える。

解析結果として、図-4は、三次元解析から得られる切羽前方地山、すなわち、図-2の④断面における主応力分布、切羽部変位、および、先端部の切羽進行に伴う変位のずれを、図-1に示すサ-

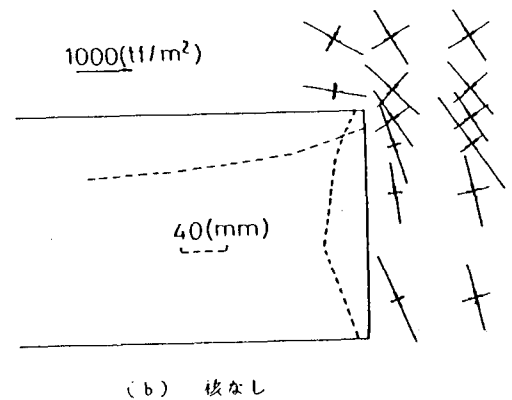
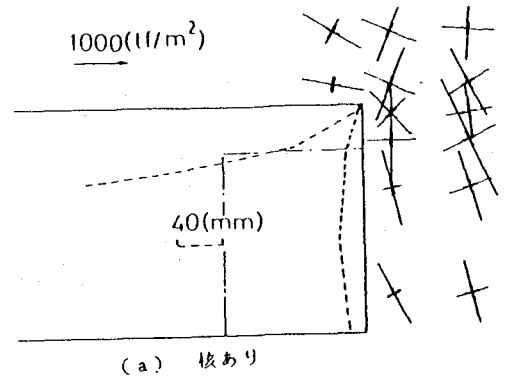


図 - 4 主応力分布 および 変位分布

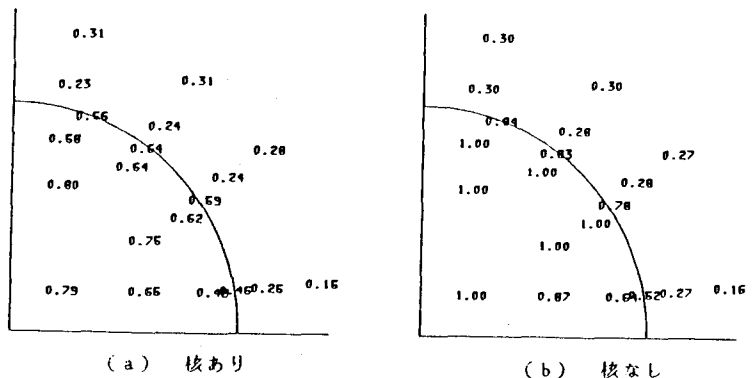


図 - 5 安全率分布

と平面に示したものである。図-5は、これらの主応力分布から安全率分布と前章の式に従って求めたものである。

図-4の主応力分布、図-5の安全率分布から、今回解析に用いた解析モデル、地質条件の範囲内において、核を残す掘削する場合に切羽近接地山の塑性化が著しく生ずるのに対し、核を残した場合には当然のことながら応力状態は相当に改良され、地山は塑性化せず弾性状態を保持している。これは、核を残すことが切羽前方地山に拘束効果を与え、 σ - τ 平面内に生ずる最小主応力が、核を残さない場合に比較して増加するためであると考えられる。この拘束効果は、図-4-10、(b)の σ 方向変位について、核を残す場合、核を残さない場合の約半分となることからよく理解できる。

また、図-4-10、(b)の切羽進行に伴う先端部における変位は、核の後方において両者の差が小さいものの、核近傍では、核を残した場合に変化が減少する傾向が見られる。これは、核の拘束効果の影響が切羽前方のみならず、切羽後方にも及んでいるためであると考えられる。

4. おわりに

本報告は、切羽の安定のために実施する補助工法のうち、核を残して掘削する工法について、その効果の把握を目的とした解析を行った。以下に、今後の課題を挙げて総括する。

- 1) 二次元解析による切羽近傍の応力状態は、三次元解析のそれと比べてかなり異なることも、危険例の評価となるので、切羽近傍における二次元解析結果の実際への適用には十分注意が必要である。
- 2) 三次元弾塑性解析によると、今回用いた解析対象・地質条件において、核を残して掘削する場合に、切羽面への核による拘束効果により切羽前方地山の応力状態は相当に改良されるが、この拘束効果は、切羽に近接した後方地山に対しても影響を与える。
- 3) さらに、地山の地質条件が劣悪な場合や、核の長さの短い場合がどのようなものかについて検討することが、施工管理上重要な課題となる。

(参考文献)

- 1) 高山 昭監修、NATMの理論と実際、土木工学社、pp181~182。
- 2) O.R.J. OWEN & E. HINTON; Finite elements in Plasticity; PINERIDGE PRESS

(43) TWO AND THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF ROCK

APPLIED TO TUNNEL EXCAVATION

USING RING-CUT METHOD

by Shunichi Kadota

Takemi Ishii

Fujita Technical Research Laboratory

Fujita Corporation

The stability of tunnel face is one of the important for tunnel excavation management. To obtain the stability of tunnel face, there are a lot of sub-construction methods, and suitable collections of these construction methods are available for the tunnel excavation management.

In this paper, the effect of sub-construction methods, especially ring-cut method, for the stability of tunnel face is discussed using two and three dimensional finite element analysis.

The results obtained are summarized as follows.

- 1) Practical two dimensional analysis is not available for the behaviour near tunnel face.
- 2) From three dimensional analysis, ring-cut method gives powerfull effect for the stability of tunnel face.