

(29) 3次元FEMによるトンネル切羽の3次元挙動と安定性の検討

大成建設(株) ○ 箱石安彦
大成建設(株) 正会員 安部吉生
大成建設(株) 正会員 亀村勝美

3D-FEM analysis on the 3D Behavior and Stability of Tunnel Face

Yasuhiko HAKOISHI, Taisei corp.
Yoshio ABE, Taisei corp.
Katsumi KAMEMURA, Taisei corp.

Abstract

For shallow over-burden and soil ground condition, tunnel engineers are greatly concerned about the supporting measures required to keep the stability of tunnel face. Hitherto a number of stability analyses of the ground near tunnel face has been done as a 2D problem instead of 3D, because of many difficulties on pre and post processing of large amounts of 3D data and numerical analysis itself. However, the stability of tunnel face is essentially a 3D problem, hence engineers should try the 3D analysis of tunnel excavation.

In this paper, 3D FEM step by step analysis of tunnel excavation by NATM has been carried out using a super computer. Displacement, stress and stability of the ground around tunnel face are presented and compared with 2D numerical results. The results show that supporting measures (shot-crete, rock-bolts and steel arched support) of NATM give a difference on the stability of tunnel face.

1. まえがき

土被りの浅い土砂地山におけるトンネル掘削では、トンネル切羽の安定を保つために様々な掘削法、補助工法が採られている。しかし、こうした工法の効果の定量的な把握は、切羽の安定が本質的に3次元の問題であるため非常に難しく、充分に検討されたとは言い難い。

著者らは、このような現状を念頭に、吹付けコンクリートやロックボルトの支保部材を考慮に入れたトンネルの3次元弾性逐次掘削解析を実施し、切羽近傍の周辺地盤の挙動について検討した¹⁾。その結果、支保部材を考慮した場合、素掘りとは異なった変形挙動が見られ、切羽近傍の支保が切羽前方にまで影響を及ぼしていることが明らかとなった。

本報では、3次元逐次掘削解析結果から切羽進行に伴う応力の履歴を追跡し、切羽近傍の3次元応力状態を明らかにすると共に、Mohr-Coulombの破壊規準に基づいた局所安全率分布を2次元FEM解析と比較し、切羽の安定性についても検討を加えた。

2. 3次元弾性逐次掘削解析

実施した解析は、NATMによるトンネルを想定し、支保として吹付けコンクリート、ロックボルトおよび鋼製支保工を考慮し、それぞれシェル要素、3次元ビーム要素でモデル化した。また、周辺地盤は3次元ソリッド要素でモデル化した。掘削はベンチカット工法によるものとし、上半においては核部分を残して掘削するリングカット工法をシミュレートした。解析ステップは、実際に近い施工ステップに従い、上半断面を先進させ約2D(D:トンネル径)掘進後に下半断面の掘削を開始し、その後上半断面切羽と下半断面切羽を並進させ、さらに約1Dだけ掘進させた。掘削・支保の1基は0.9m(=0.11D)とした。

なお、周辺地盤は洪積砂層を想定し、土被りは約2D、初期地圧は鉛直方向応力 σ_v を土被り圧とし、水平方向応力 σ_h は鉛直方向応力と側圧係数 $k(=0.43)$ から $\sigma_h=k \cdot \sigma_v$ とした。

解析モデル、解析手順などについては、文献1)を参照されたい。

3. 解析結果および考察

3.1 リングカット、核掘削による上半切羽近傍地盤への影響

トンネル周辺地盤は、切羽の接近、通過に伴い応力が解放(あるいは応力集中)され、その応力状態が逐次変化する。図-3.1に示す要素における、リングカット、核掘削による応力変化を図-3.2～図-3.5に示す。なお、直応力はその要素位置における初期鉛直応力(σ_{yo})で無次元化し、せん断応力は初期せん断強度($\tau_a=c+\sigma_n \cdot \tan \phi=\sigma_{yo} \cdot \tan \phi$)で無次元化した。(ここで、粘着力 $c=0 \text{ tf/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=35.2^\circ$ 。また、 $\sigma_n=\sigma_{yo}$ とした。)直応力増分の符号は、正が応力解放(引張)、負が圧縮応力の増大である。

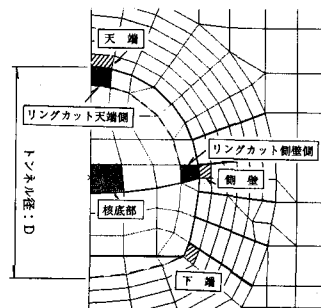


図-3.1 検討対象の要素群

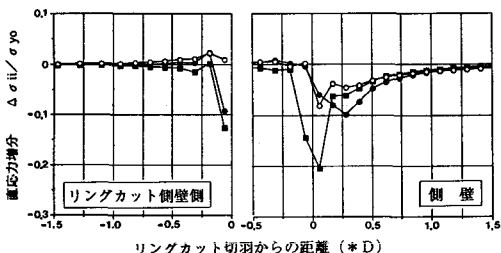
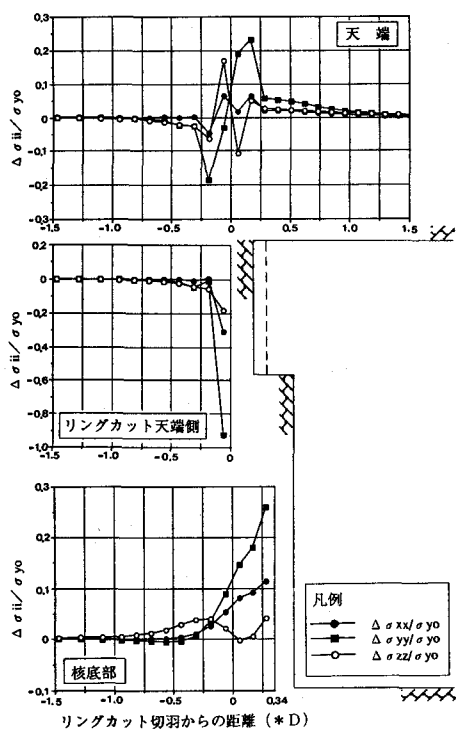


図-3.2 リングカットによる直応力の変化

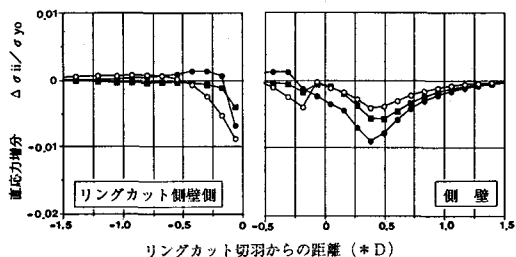
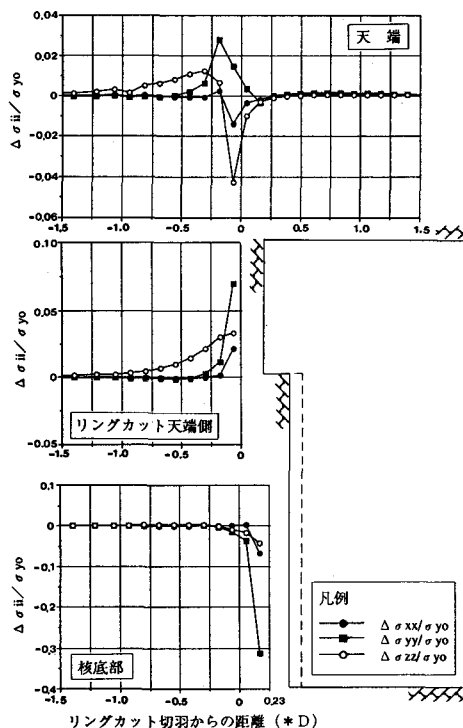


図-3.3 核掘削による直応力の変化

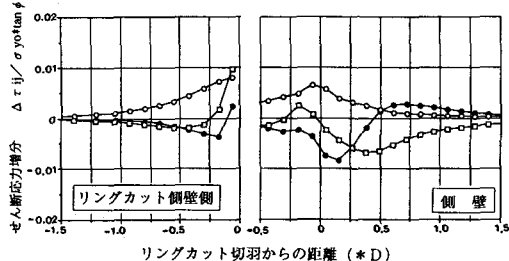
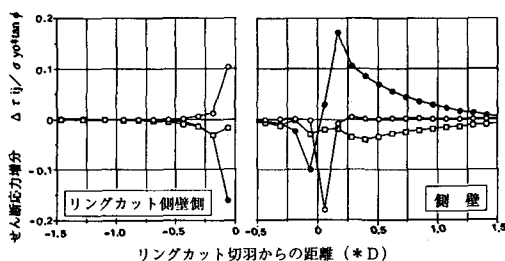
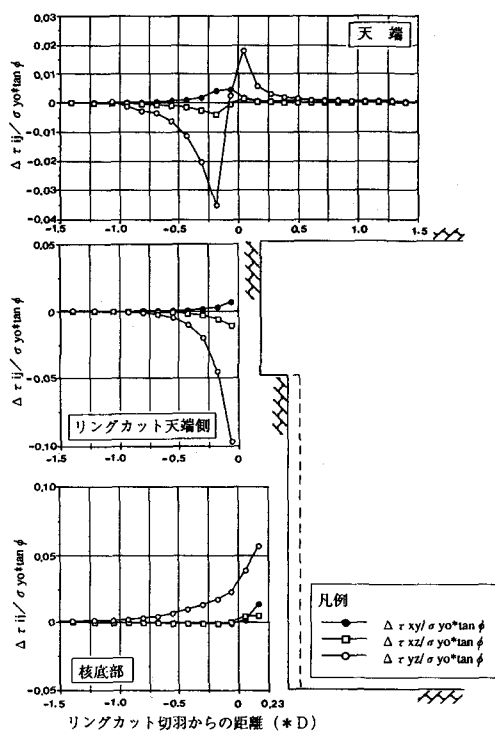
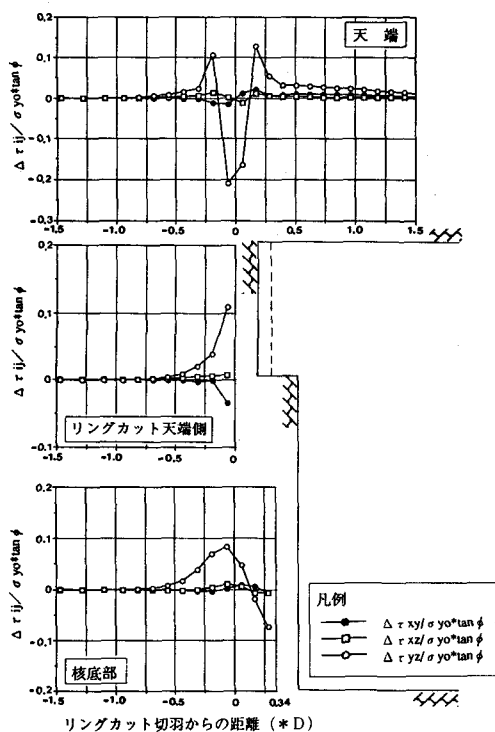


図-3.4 リングカットによるせん断応力の変化

図-3.5 核掘削によるせん断応力の変化

以上の結果から、直応力に関し以下の知見が得られる。

- 7). トンネル掘削により、応力の解放あるいは集中が起こる領域は、(トンネル縦方向には) 概ね切羽後方の支保との間の素掘り状態となる切羽後方領域と、切羽前方約0.5Dの領域である。そして、これら応力の変化の殆どがリングカット時に生じる。
- 4). リングカットにより、切羽前方の周辺地山においてほぼ各直応力成分が圧縮応力を増大するが、軸方向応力 σ_{zz} が天端付近において応力を解放する。これらリングカットによる応力の変化は、大きいところでは、応力集中で初期応力の約2倍、応力解放で初期応力の約40% ($=0.2 \div k$) となる。(図-3.2～図-3.5は σ_{yo} が無次元化の分母に入っているのもので、 σ_{zo} に対して考えるときは図から読み取れる値を k で除する。)
- 5). リングカットにより、切羽後方の支保との間の素掘り状態となる切羽後方領域において、天端要素は鉛直応力の解放(応力増分が引張)がみられ、側壁では切羽前面と同様に圧縮応力が増大する。その大きさはいずれも初期応力の鉛直成分 σ_{yo} の約20%である。

- エ). リングカット切羽から3基 (=0.33D) 後方まで存在する核部には、応力解放が見られ鉛直方向応力の解放は σ_{yo} の約25%である。(リングカット時)

一方、せん断応力に関しては以下の知見が得られる。

- ア). リングカットにより、天端近傍は、 τ_{yz} の増分分布から切羽前方 $-0.2D$ から切羽後方 $+0.2D$ を支点とした連続梁のような挙動が生じると考えることができる。(注： $+0.11D$ 後方に支保が有る)
- イ). トンネル周辺(天端、側壁)で、リングカット時に生じる τ_{yz} は初期せん断強度 $\tau_a = \sigma_{zo} \cdot \tan \phi$ の約45%に相当する。また、トンネル内部(リングカット天端側、側壁側および核底部)の切羽前面における τ_{yz} の発生は、それより小さい。
- ウ). 核掘削によって生じるトンネル周辺のせん断応力増加はリングカット時に比べて小さく、 τ_{yz} の増分はリングカット時の増分の1/10程度である。しかし、リングカット天端側の切羽前面においては、 τ_{yz} はリングカット時とほぼ同じ増分(初期せん断強度の約25%)が生じる。

3. 2 切羽進行に伴う応力履歴

図-3.1に示すトンネル周辺要素において、平均応力(σ_m)と八面せん断応力(τ_{oct})の応力経路として求め、それぞれ図-3.6、図-3.7に示す。

なお、図中には3次元要素掘り解析の結果と Drucker-Prager の降伏曲面を合わせて示す。

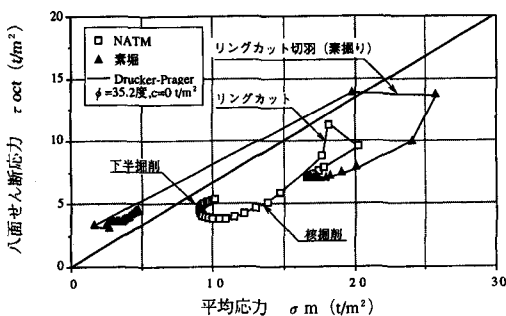


図-3.6 天端要素における応力経路

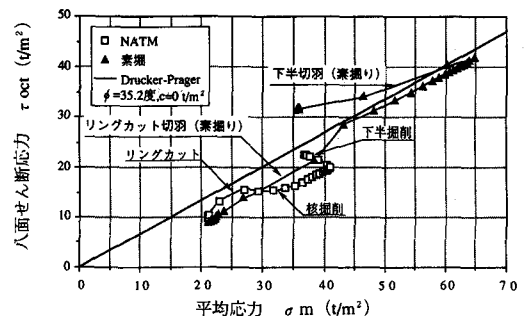


図-3.7 側壁要素における応力経路

上図より得られる知見を以下に列挙する。

- ア). 天端要素は、素掘りの場合、リングカット切羽が接近するに伴ってせん断応力、平均応力共に大きくなる(初期応力状態の約50%増)が、切羽通過により平均応力が解放され、せん断強度が小さくなるため降伏に至る。(NATMの場合は、降伏に至らない。)
- イ). 側壁要素は、素掘りの場合、下半切羽が接近するに伴ってせん断応力、平均応力共に極めて大きくなり(初期応力状態の約3~4倍)、下半切羽通過により平均応力、八面せん断応力共に解放し降伏に至る。(NATMの場合は、降伏に至らない。)

なお、下端要素については、リングカット切羽、下半切羽のいずれの切羽の影響も大きく受けず、切羽進行に伴って少しずつ σ_m は減少し、 τ_{oct} が増加する。応力経路としては降伏曲面に垂直に近づいて行く経路となる。

3. 3 Mohr-Coulombの破壊規準に基づいた局所安全率の分布

図-3.8~図-3.10に、Mohr-Coulombの破壊規準に基づいた局所安全率の分布を、2次元FEMと3次元要素掘り解析と比較して示す。なお、2次元FEMは応力解放法を用いて(文献4)、支保を考慮し3次元要素掘り解析と比較して示す。

元逐次解析と対応させた。なお、リングカット時の応力解放率は $\beta=72\%$ とした。図はリングカット切羽通過後の分布図である。

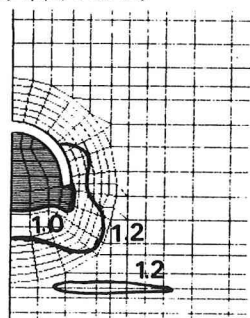


図-3.8 安全率分布図
(3D-FEM, NATM)

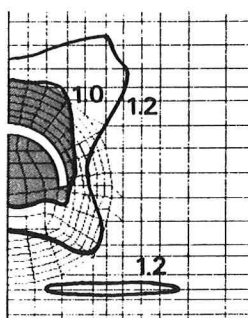


図-3.9 安全率分布図
(3D-FEM, 素掘り)

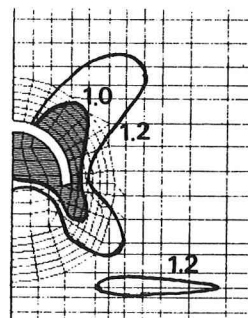


図-3.10 安全率分布図
(2D-FEM, NATM)

2次元解析結果は、3次元解析に比べて安全率が1以下の領域が大きく、やや3次元素掘り解析に似た安全率分布である。このことから、以下の知見が得られる。

7). 切羽近傍においては、特性曲線から設定する応力解放率 $\beta^{4)}$ は、解析結果にあまり良い近似を与えない。(これは、切羽の3次元的影響の他に、掘削形状の影響も考えられる。)

1). 横断面内では、上半周辺地山において、2次元解析結果は安全側の設計となる。

また、3次元解析において図-3.8～図-3.10に示した安全率分布は、切羽前方における分布とほぼ同じで(図は省略したが)、リングカットによりその切羽後方の安全率分布に与える影響は小さい。

3. 4 切羽近傍における τ_{yz} の分布

3.1において、トンネル掘削によって切羽近傍にせん断応力 τ_{yz} が生じることを述べた。トンネル解析の多くはトンネル軸方向に関して平面ひずみ状態を仮定した2次元解析であり、このせん断応力は $\tau_{yz}=0$ と仮定する。図-3.11は、リングカット切羽通過後の切羽近傍における τ_{yz} の分布である。ここで、天端近傍の初期せん断強度は計算すると約7tf/m²となるが、 σ_{zz} の初期応力状態からの低減を考慮するとせん断強度はさらに小さく、約4tf/m²を超える領域はせん断強度を超える危険性がある。

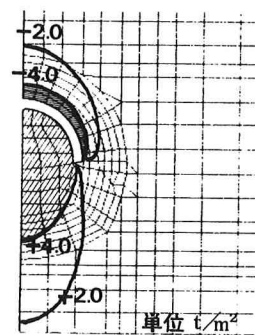


図-3.11 τ_{yz} 分布図
(3D-FEM, NATM)

4. あとがき

本3次元FEM解析は、切羽の自立性に乏しい地山でのトンネル掘削における、切羽前方への先受け工の合理的な設計手法の確立へ向けた研究の第一歩として実施したものである。3次元解析は、膨大な計算時間を必要とするが、その膨大な量の計算結果の処理にも多くの労力を必要とする。本報に示した結果も一部であり、検討すべき項目はまだ多く残されている。解析ケースの追加を含め、さらに研究を継続したい。

(参考文献)

- 1) 箱石、安部、亀村：3次元逐次掘削プログラムによるトンネルの解析、第1回トンネル工学研究発表会(1991.12)
- 2) 木嶋、青木、竹林、西地：市街地の成田砂層をNATMで掘る 国分川分水路トンネル・中間立孔上流工区、トンネルと地下 vol.20 (1989.7)
- 3) 門田、石井：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、第16回岩盤シボ・シウム(1984.2)
- 4) 亀村、平野、竹田、里：切羽進行を考慮したトンネルの解析と実際、第27回土質工学会シボ・シウム(1982)