

3次元逐次掘削プログラムによるトンネルの解析

THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF A TUNNEL
EXCAVATED STEP BY STEP WITH SUPPORTS USING FEM

箱石安彦*、安部吉生**、亀村勝美***

Yasuhiko HAKOISHI, Yoshio ABE and Katsumi KAMEMURA

In connection to the analysis of tunnels, one of the important points is to understand the three dimensional effects of excavations. But almost all the existing numerical methods in FEM assume plane strain conditions along the tunnel axis and hence they are 2D methods. Thereby, for engineers it is quite difficult to understand the 3D effects of excavations.

The present study simulates the actual NATM procedure by performing 3D FEM analysis and examines the 3D effects of an excavation.

Keywords : 3D FEM analysis , NATM

1. まえがき

トンネル掘削に伴う周辺地山の変形や、周辺構造物に与える影響を検討する場合の解析手法としては、簡易な理論式や経験式による方法と、有限要素法（FEM）等の数値解析法による方法とがある。

NATMがトンネル工法の主流となった現在、FEMはその解析的検討の主流となっている。NATMは現場の施工や計測の情報を、設計や解析にフィードバックしながら掘進する所に特徴がある。そして、FEMはその施工ステップや現場の地層構成、様々な支保部材などを考慮でき、次掘進に際し重要な情報を与えることができる。

トンネルの解析においては切羽近傍の3次元挙動の把握が重要であるが、これまでのトンネルにおけるFEM解析の殆どは、トンネル軸方向に平面ひずみ状態を仮定した2次元解析であり、何等かの方法で切羽の3次元的影響を考慮し対処している。

一方、NATMは都市近郊の土砂地盤においても実績を積み重ねてきているが、それは種々の補助工法に負う所が大きい。切羽における先受け工など2次元FEMではそのモデル化は苦心するところであるが、3次元FEMにおいては比較的容易に適切なモデル化ができる。この意味においても3次元解析が有役な結果を与えることが期待される。

本報告書は、スーパーコンピュータの導入など、トンネルの3次元逐次掘削解析が可能な環境の整備を受けて、まずは、NATM（吹付けコンクリートやロックボルト等によって支保される）トンネルの解析を行ない、その結果より得られた知見を幾つか報告するものである。

* 工修 大成建設株式会社 土木設計部
**正会員 工修 大成建設株式会社 北信越支店
***正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計部

2. 解析内容および手法

トンネル切羽近傍地盤の3次元的な挙動を把握するために、3次元弾性逐次掘削解析を実施した。

トンネルはNATM工法による施工を想定し、支保は吹付けコンクリート、ロックボルトおよび鋼製支保工とする。これら支保部材はそれぞれシェル要素、3次元ビーム要素でモデル化する。なお、周辺地盤は3次元ソリッド要素でモデル化する。また、トンネル掘削は、上部半断面および下部半断面の掘削・支保工を同時に行ないながら上半切羽（先進）と下半切羽が並進するベンチカット工法によるものとし、さらに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。

なお、周辺地盤は洪積砂層を想定し、土被りは約2D（D：トンネル径）、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 $\sigma_h = k \sigma_v$ とした。

図-2.1、図-2.2、図-2.3 および 図-2.4 に、それぞれに解析モデル図、支保のモデル化、トンネル断面図および境界条件を示す。

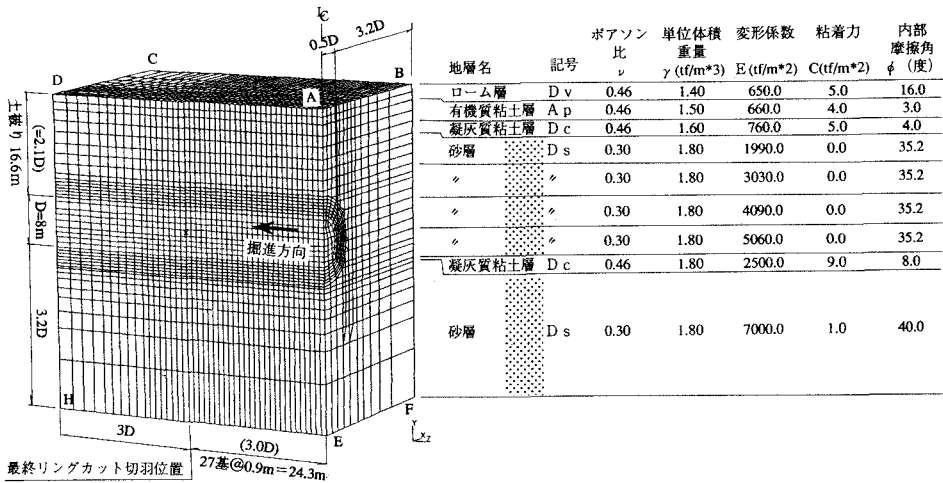


図-2.1 解析モデルおよび地盤物性値

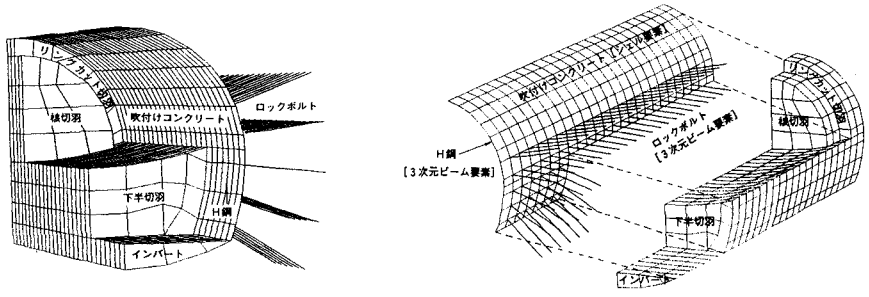


図-2.2 支保のモデル化

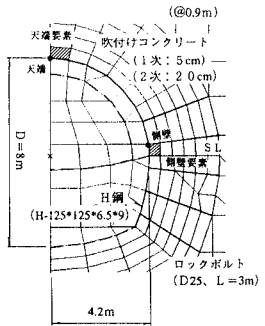


図-2.3 トンネル断面

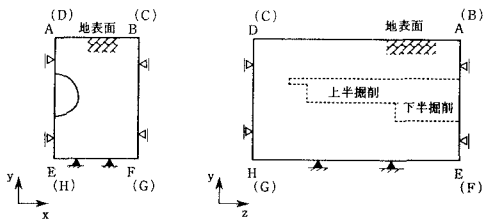


図-2.4 境界条件

3. 解析手順

解析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（ $\approx 0.11D$ ）とする。

総解析ステップ数は62ステージである。表-3.1 に解析手順を示す。

表-3.1 解析手順

		備考
	stage.1 初期応力	側圧係数 $K_0=0.43$
	}	
基本 サイ クル	stage.i-1 リングカット	D=8m
	stage.i 吹付けコンクリート 核掘削	
	stage.i+1 上半ロックボルト H鋼 上半ロックボルト 下半掘削	《材料変更》 上半吹付けコンクリート $E_c=3.4 \times 10^5 \text{ t/m}^2$
	stage.i+2 リングカット 下半吹付けコンクリート & H鋼 下半ロックボルト	《材料変更》 上半吹付けコンクリート $E_c=2.2 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ 下半吹付けコンクリート $E_c=2.2 \times 10^6 \text{ t/m}^2$
	}	
	stage.61 インバート掘削	インバートコンクリート $E_c=2.2 \times 10^6 \text{ t/m}^2$
	stage.62 リングカット インバートコンクリート打設	
	2D D	

4. 解析結果

4.1 各掘削段階におけるトンネル縦断方向変位増分

(a). リングカットによる変位増分

リングカットをする解析ステージにおける変位から、その直前の解析ステージの変位を差し引くと、リングカットだけによる変位増分が得られる。NATM 施工で掘進する場合の変位増分とするため、リングカット切羽が十分モデル境界から掘進した位置でその差分を取った。(境界より十分に掘進した位置が定常的なNATM 施工によるトンネルの変位増分となる。)

リングカットによる変位増分を図-4.1 および 図-4.2 に示す。

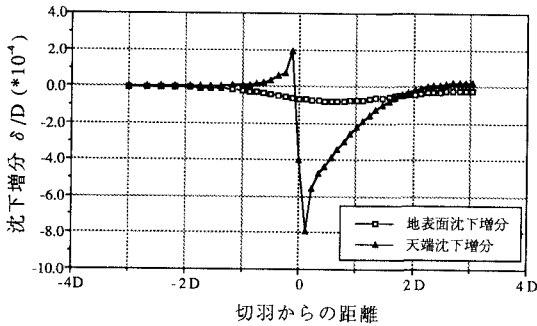


図-4.1 リングカットによる天端沈下増分および地表面沈下増分

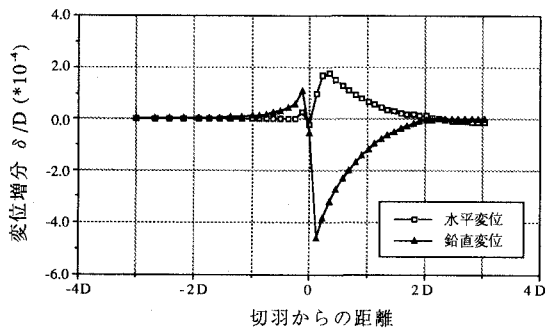


図-4.2 リングカットによる側壁変位増分

(b). 核掘削による変位増分

(a)と同様に核掘削による変位増分を求め、図-4.3 および 図-4.4 に示す。

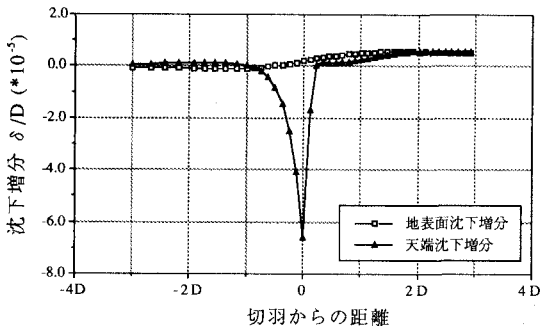


図-4.3 核掘削による天端沈下増分および地表面沈下増分

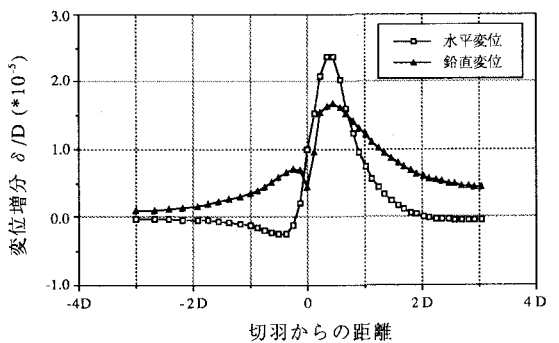


図-4.4 核掘削による側壁変位増分

(c). 下半掘削による変位増分

(a)と同様に下半掘削による変位増分を求め、図-4.5 および 図-4.6 に示す。

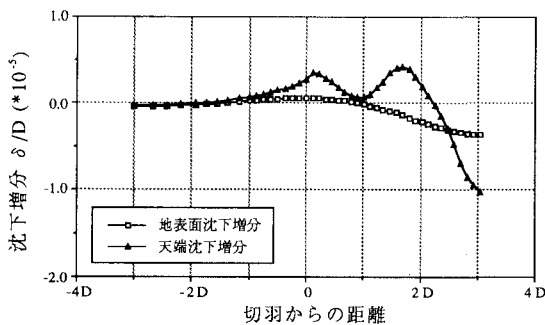


図-4.5 下半掘削による天端沈下増分および地表面沈下増分

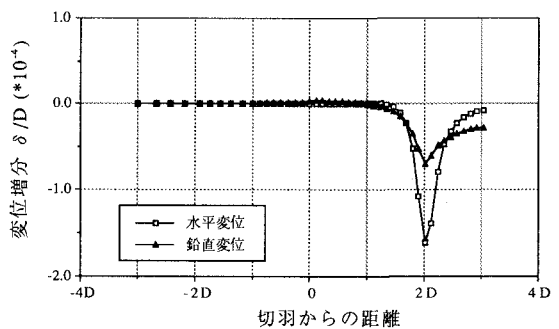


図-4.6 下半掘削による側壁変位増分

4.2 変位のトンネル縦断方向分布

4.1 で求めた各掘削段階における変位増分は、各切羽が一掘進するときの増分である。切羽が進行するときの変位は一掘進長ずつ移動した変位増分図を重ね合わせることで求めることができる。図-4.7 から 図-4.10 にその結果を示す。比較のため、素掘り掘削による3次元解析も実施し、図中にはその結果を合わせて示した。

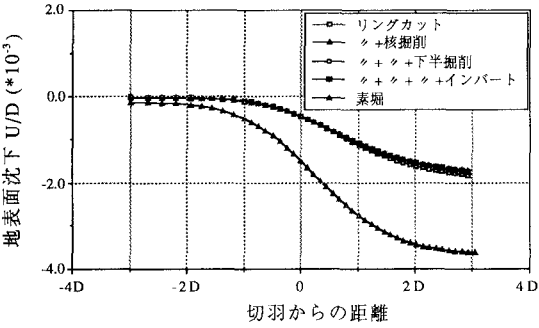


図-4.7 地表面沈下

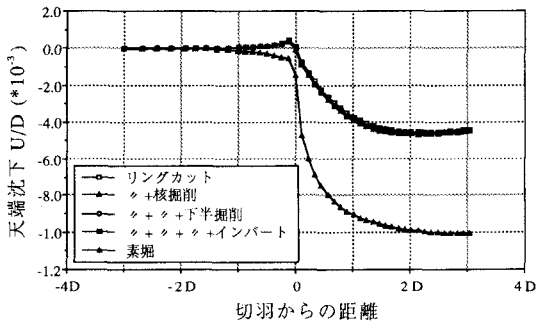


図-4.8 天端沈下

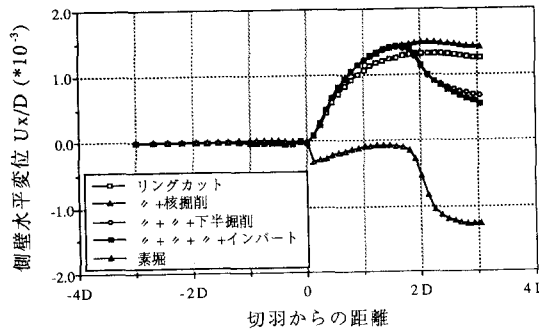


図-4.9 側壁水平変位

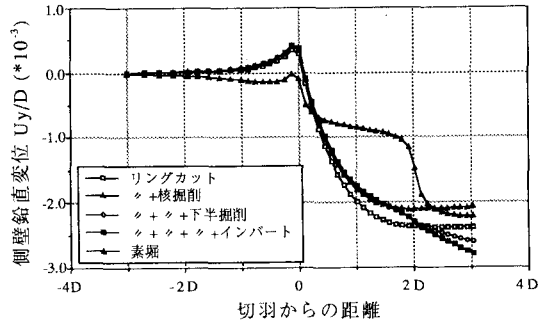


図-4.10 側壁鉛直変位

4.3 各掘削段階におけるトンネル軸方向ひずみ増分

トンネル軸方向ひずみ(ϵ_{zz})について、4.1 と同様に NATM 施工での各掘削段階における増分を求め、図-4.11 および 図-4.12 に示す。このひずみは2次元解析では $\epsilon_{zz}=0$ と仮定するひずみである。(ただし、図-4.11～図-4.14において、-は圧縮、+は引張を表す。)

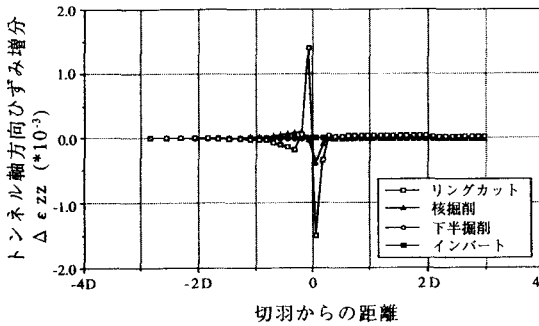


図-4.11 天端要素における軸方向ひずみ ϵ_{zz} の増分

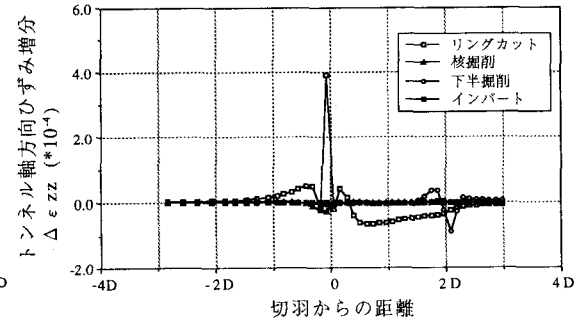


図-4.12 側壁要素における軸方向ひずみ ϵ_{zz} の増分

4.4 トンネル軸方向ひずみ分布

ひずみ ϵ_{zz} についても変位曲線と同様に4.3より、トンネル軸方向分布曲線を求めると図-4.13および図-4.14のようになる。図中には、素掘り解析結果を合わせて示す。

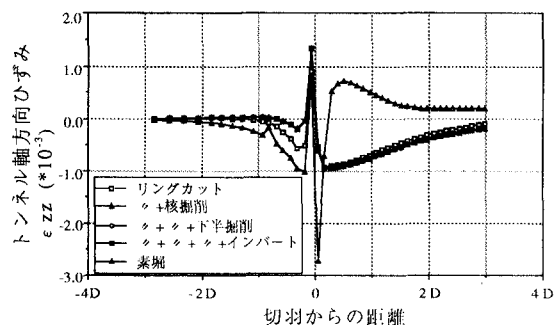


図-4.13 トンネル軸方向ひずみ ϵ_{zz} [天端]

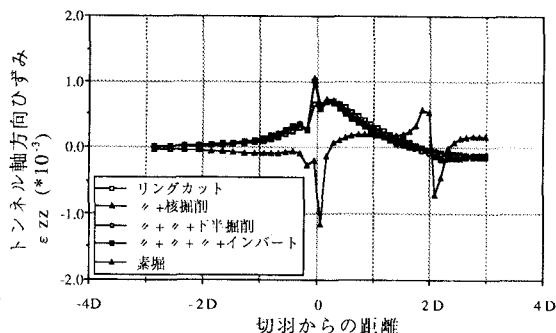


図-4.14 トンネル軸方向ひずみ ϵ_{zz} [側壁]

5. 考察

解析結果より得られた知見を以下に列挙する。

a) 変位のトンネル縦断方向分布について

- ・天端沈下において切羽前方で隆起が見られるが、これは素掘り解析（3次元解析）では現れなかった挙動であり、支保の3次元的效果によるものと考えることができる。また、この隆起はリングカット時に生じたものである。（図-4.8、図-4.1参照）
- ・側壁鉛直変位は、天端沈下と同様の傾向が見られ上半切羽約2D後方で収束する（が、下半切羽の到達で再び沈下し始める）。これに対し、素掘りの場合、切羽約1D後方で収束し（収束沈下量はNATMの場合の約1/2）、天端沈下とは独立したような挙動を示す。
- ・側壁水平変位は、NATMや素掘り掘削に関係無く、切羽前方での変位は見られない。切羽通過後、NATMでは内空より外に、素掘りでは内空側に変位する。初期応力状態が同じ側圧係数の場合でも、NATMと素掘りでは内空変形モードが異なることになる。

b) トンネル軸方向ひずみについて

- ・加背割りの内リングカットによって、切羽近傍の地盤が2次元平面ひずみ状態を保持できなくなる。
- ・切羽前方におけるトンネル軸方向ひずみは、天端近傍では、切羽の接近と共に圧縮ひずみとなり、切羽通過の前・後で引張・圧縮と逆転する。その後切羽進行により、NATMの場合圧縮ひずみのままであるが、素掘りの場合再び引張に逆転する。

本論文においてはトンネル周辺地盤の変状について幾つかの知見を述べたが、この他2次元解析では取り扱うことのできない様々な問題に対して有意義な知見を得ることができた。これらより、都市NATMにおける複雑な加背割り、切羽前方への先受け工などの効果については、3次元解析による検討が必要であることが明らかとなった。

謝辞 本解析を行なうに際してスーパーコンピュータの使用にあたっては富士通(株)の御協力を得て計算を実行することができた。ここに感謝の意を表する。