

(26) 掘削順序を考慮した有限要素法による支保

および岩盤解析の一方法と応用例

佐藤工業(株)中央技術研究所

加納 米二

〃

福島 晴夫

〃

金子 典由

1. ま え が き

近年、省資源・省エネルギーがさげられる中で地下構造物の掘削も例外なく、より合理的で敏速かつ安全な岩盤掘削・支保方法が望まれるようになって来た。これらの要求を現在最も満足する工法として脚光を浴びているのがNATM (New Austrian Tunneling Method) である。

NATMの特徴は一般に知られているようにトンネルを掘削直後に地山に密着したライニングを施工し、地山が本来有する支保能力を十分に利用するとともに、施工中に実施する支保挙動の詳細な計測結果を設計にフィードバックして常に適切な管理を行なっていくことにある。しかしながら我国のように複雑な地質状況下において支保メンバーの挙動を定量的に把握することはかなり困難なことである。そこで筆者等はトンネルの挙動に影響を与える力学的因子のいくつかに着目し、これらを考慮した解析が可能な有限要素法非線形プログラム (GATUC) を作成した。ここにGATUCの機能概要とNATMで施工したいくつかのトンネルの解析例を示す。

2. プログラム概要

2-1 プログラム概要

トンネルおよび地下空洞等の地盤・岩盤等の掘削時には地山の材料非線形特性や施工順序等を考慮して、実際の地山挙動に則した解析が必要である。この目的を満足するために表-1に示すような6段階に区分して有限要素法の2次元解析プログラムGATUC (Generalized Analysis of Tunnel and Underground Construction) を開発した。Phase I~Vは図-1に示すような岩石の挙動をモデル化したものである。なお、引張領域についてはNon-Tension 材料とした。

2-2 プログラム機能

1) 解析のためのモデル化

地盤・岩盤・支保メンバー (吹付コンクリート、ロックボルト、鋼製支保工)

は表-2に示すように各種要素によりモデル化が可能である。

2) 要素の削除と追加

施工に応じて各解析ステップごとに掘削 (要素の削除) と支保メンバーの施工 (要素の追加) に追従する解析形状の変更が可能である。

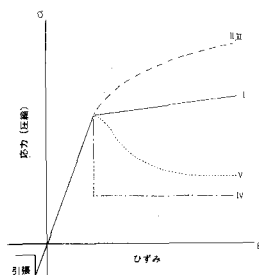


図-1 岩石の応力-ひずみ関係

表-1 GATUC の開発区分

Phase	開発内容			適用地盤
I	弾塑性を伴なうひずみ硬化を解析する	ドラッグーの降伏条件を用いる	$H = \text{一定}$	砂質土、粘性土等の土および軟弱岩
II			$H = \text{ひずみの関数}$	同上
III		塑性ポテンシャルの概念を導入する		同上
IV	解析	急激な強度劣化を伴なう弾塑性解析		割れ目の多い岩石・岩盤
V		ひずみ軟化を伴なう弾塑性解析		岩石・岩盤
VI	粘弾性解析			粘性挙動を示す地山

表-2 地盤・支保工のモデル化

要素	適用		モデルの対象
バネ要素	地山と構造物との力の伝達	地山と構造物間の直角方向の力のみ伝達	地山と鋼製支保工の接触状況
	または、両者の結合状態をモデル化する	地山と構造物の結合状態をモデル化する	地山と構造物との接触状況
要素	の結合状態をモデル化する	付着力を考慮した結合状態をモデル化する (付着力を超過するとすべる)	ロックボルトと地山の付着
トラス要素	軸力のみが作用する線材		ロックボルト
三角形要素	弾性体		覆工コンクリート 吹付コンクリート
	Phase I~VIに示す弾塑性体および粘弾性体		地盤 岩盤
ビーム要素	曲モーメント、せん断力、軸力が作用する線材		鋼製支保工

3) 物性値の入力データの変更

事前に施工等の影響により地山や支保メンバーの物性値が変化することが判明している場合、各施工段階に対応する解析ステップで物性値を変更することが可能である。

4) 支保の遅れを考慮した計算

支保メンバーは掘削後一定時間経過した後施工されるため支保の遅れが生じる。また、吹付コンクリートは徐々に硬化するため、十分な支保能力を発揮するまでは数時間を要する。この間に切羽が進行すると切羽の支保能力は減少し、トンネルにより大きな応力が作用するようになる。このように地山は、掘削後しばらく不十分な支保状態で放置されることが考えられる。この状態を2次元解析に入入れるため、掘削後掘削面に生じる掘削相当外力の何割かを作用させて計算した後、再度、掘削相当外力を算出して支保メンバー要素を加え解析を進める。この方法により支保の遅れを考慮した解析が可能となる。

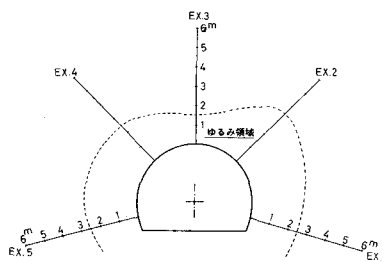


図-2 地中変位計によるゆるみ領域の推定

3. トンネルの挙動解析

トンネルの挙動を支配する因子として表-3に示すものが考えられるが、解析においては次の6項目を考慮して実施した。

- 1) トンネルの掘削順序
- 2) 切羽の進行に伴う地山の応力解放率（切羽の支保効果）
- 3) 支保メンバーの建込時期
- 4) 吹付コンクリートの若材令挙動
- 5) ロックボルトのすべりによる耐力の減少
- 6) 発破等、掘削によるゆるみ領域

3-1 土被りの深いトンネルの解析例

1) 概要

比較的堅硬だが非常に節理の発達した細粒凝灰岩中をNATMで施工した複線断面トンネルである。掘削方法は発破による2段ベンチカット方式で、支保メンバーとして鋼製支保工、吹付コンクリート、ロックボルトを使用している。地山の物性値は表-4に示すようである。

2) 解析方法および解析結果

解析は弾性計算とし、荷重は自重を用いた。地山の物性値は表-4のように高い値を示すが、実際の切羽では割目が多く肌落が著しいため、地中変位測定結果（図-2）から除荷・載荷ゾーンを考慮して、この範囲の物性値を低下させた。解析結果として ①トンネル壁面の内空変位の経時変化 ②支保工天端沈下の経時

表-3 トンネルの挙動を支配する因子

地 山 因 子	トンネル掘削に関する因子
1) 地山の初期応力状態	1) トンネルの掘削順序
2) 層理・節理・片理・亀裂等による異方性	2) 切羽の支保効果
3) 断層・褶曲等地質構造上の弱線	3) 支保メンバーの建込時期
4) 湧水等、水の影響	4) 発破等掘削によるゆるみ領域
	5) 吹付コンクリートの若材令挙動
	6) ロックボルトのすべりによる耐力の減少
	7) 導坑等の影響
	8) 併設トンネル等の影響

表-4 トンネル諸元
(土被りの深いトンネル)

延長 (m)	785
断面形状	複線型
土 破 り (m)	20 ~ 100
岩 質	細粒凝灰岩
S_c (Kg/cm ²)	44 ~ 166
S_t (Kg/cm ²)	12.6 ~ 21.2
E (Kg/cm ²)	2.55×10^4
ν	0.33
C (Kg/cm ²)	—
ϕ (°)	—
γ (t/m ³)	2.07

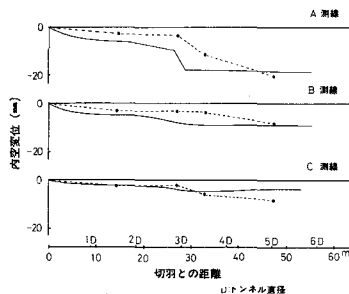


図-3 切羽との距離による断面変位の変化状況

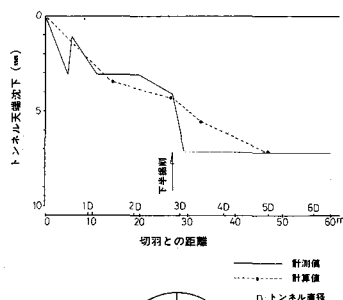


図-4 切羽との距離による天端沈下の変化状況

変化 ③吹付コンクリートの応力分布 について計測値と比較したものを図-3、4、5に示す。この結果から、計測値の経時変化と計算値とはかなりの一致が認められる。しかし、吹付コンクリートに作用する軸応力・境界応力とも傾向は類似しているが数値はかなりの差を生じている結果が得られた。

3-2 土被りの浅いトンネルの偏圧解析

1) 概要

土被りが平均10m程度で、一部に土被り約2.5mと非常に浅くかつ片勾配の地形を有する単線断面のトンネルである。地質は第四紀洪積世の砂層・粘土層および関東ローム層より構成されており、N値は平均30以上だがN=2~5程度の非常に軟弱な部分が夾在する。このトンネルをNATMで施工する際、片勾配の区間において偏圧が作用することが予想されたため、トンネルに対する影響を検討する目的で解析を実施した。なお、地山の物性値等は表-5に示す。

2) 解析方法と解析結果

解析には弾性計算を用い、普通区間と偏圧区間の比較を行なった。解析結果として地山の等セン断応力図を図-6に示す。この図から、普通区間・偏圧区間ともにトンネル周囲の応力分布状態、塑性領域の拡大状況にあまり差は認められないが、偏圧区間では斜面法尻から法肩へ弧状に応力線が流れており、法尻部に塑性領域が発達しているため斜面の滑動の可能性が考えられるという結果を得た。

3-3 クラックの挙動解析

1) 概要

NATMで計画された延長約5Kmの単線断面トンネルである。地質は中生代~第三紀の砂岩、頁岩互層より成るが、著しい構造運動の影響を受けて

表-6 トンネル諸元
(クラック解析)

延長(m)	5,084	
断面形状	単線型	
土被り(m)	30 ~ 200	
地質 (解析断面)	岩質	砂岩・頁岩互層
	Sc (Kg/cm ²)	143 ~ 370
	St (Kg/cm ²)	29.5 ~ 43.3
	E (Kg/cm ²)	95,600
	ν	0.35
	C (Kg/cm ²)	35
	φ (Kg/cm ²)	45
γ (t/m ³)	2.68	

表-5 トンネル諸元
(土被りの浅いトンネル)

延長(m)	1 380				
断面形状	単線型				
土被り(m)	2.5 ~ 10				
地質 (解析断面)	土質	砂		粘土	ローム層
		上部	下部		
	Sc (Kg/cm ²)	—	—	0.7 ~ 1.3	0.7 ~ 1.5
	St (Kg/cm ²)	—	—	—	—
	E (Kg/cm ²)	120	400	290	50
	ν	0.5	0.3	0.4	0.45
	Q (Kg/cm ²)	0.15	0.3	1.4	0.7
	φ (°)	30	35	10	1.8
	γ (t/m ³)	1.5	1.85	1.8	1.3

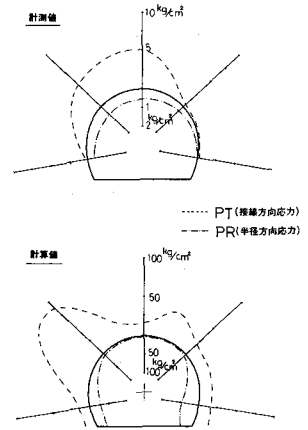


図-5 吹付コンクリートの応力分布

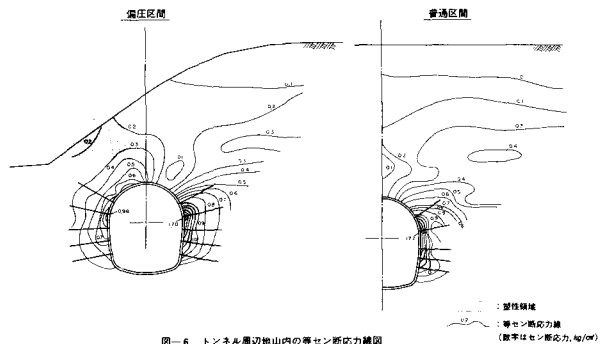


図-6 トンネル周辺地山内の等セン断応力線図

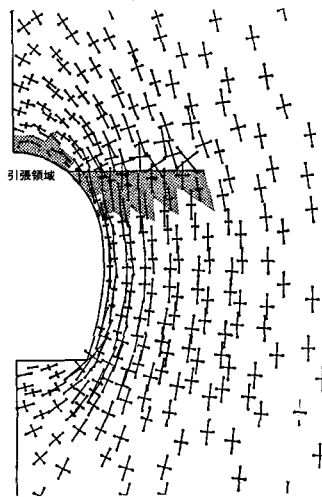


図-7 無支保時の応力分布

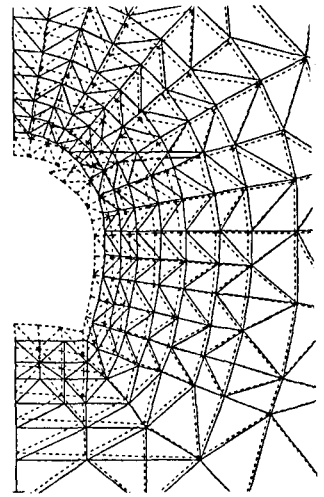


図-8 無支保時の変位

破碎しており、特に頁岩層に剝離性が顕著でコア採取後放置するとスレーキングで破壊するほど弱くなっている。しかし、岩石試験の結果得られた物性値は表-6に示すように比較的良好で、施工中の地山挙動を十分に反映していないため、岩盤内のクラックが吹付コンクリート・ロックボルトに及ぼす影響について検討を行なった。

2) 解析方法と解析結果

解析モデルはトンネルアーチ肩部に水平なクラックが生じている場合を考え、①無支保 ②吹付コンクリート施工 ③吹付コンクリート・システムロックボルト施工の3ケースについて計算を行なった。(図-7、8、9、10、11、12)。

この結果、吹付コンクリートを施工するとクラック周辺の引張領域が著しく減少するが、吹付コンクリートとシステムロックボルトを施工しても吹付コンクリートのみの場合と大差がないことが判明した。この原因として考えられることは、

- ①吹付コンクリートが過大にモデル化されている。
- ②ロックボルトのモデル化が不十分である。
- ③この解析が正しいとすると実際にボルトが作用していない。

等であり、現在これについては検討中である。

4. 結 言

トンネル掘削に影響する多くの因子の中で、そのいくつかを考慮した解析が可能な有限要素法非線形プログラムを作成し、現在施工中のトンネルについて解析を行なった。この結果、計測結果をある程度反映した解析結果が得られた。またクラック等の地質条件を加味した解析については今後十分に検討する必要があると考えられる。

最後にプログラム開発の御指導をお願いした中央大学土木工学科の川原助教授とロックボルトの評価法について有意義な意見をいただいた鉄道技術研究所構造物研究室の土屋主任研究員に深く感謝する次第であります。

参 考 文 献

- 1) O. C. ツィエンキーヴィッツ著：マトリックス有限要素法、培風館
- 2) M. Baudendistel：Zum Entwurf von Tunneln mit groβen Ausbruchquerschnitt, Rock Mech. 1979

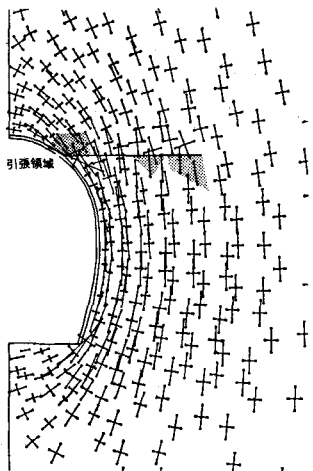


図-9 吹付コンクリート施工時の応力分布

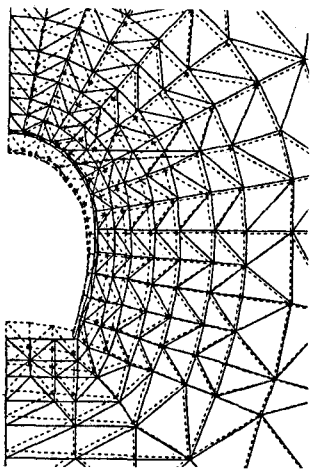


図-10 吹付コンクリート施工時の変位

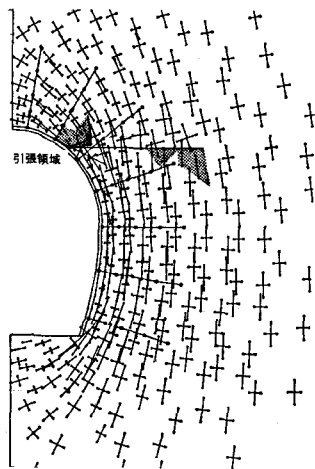


図-11 吹付コンクリート・システムロックボルト 施工時の応力分布

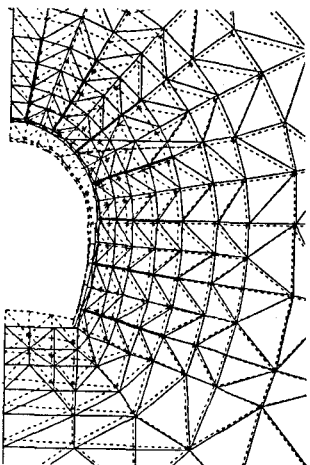


図-12 吹付コンクリート・システムボルト施工時の変位

APPROACH FOR F.E.M. ANALYSIS CONSIDERING
PROCESS OF TUNNEL EXCAVATION

By Yonezi Kano, Haruo Fukushima,
Noriyoshi Kaneko

Abstract

On the excavation of underground structures (ex. tunnel), the safety and the economy obey the correct evaluation of "Lining" and "Ground" around the tunnel.

To evaluate the behaviours correctly, F.E.M. non-linear program was developed under the several factors which make influence to the behaviours. The factors are

- A) Arrangement of excavation
- B) Stress release ratio varied by tunnel advance (support effect of the face)
- C) Installation timing of support system
- D) Behaviours of young shotcrete
- E) Reduction of loading capacity of rockbolts by slip
- F) Damage zone by blasting, etc.

Three tunnel examples were calculated about the following items under variable loading of excavation,

- 1) Tunnel convergence
- 2) Settlement of tunnel crown
- 3) Stress distribution of lining
- 4) Crack condition

The former three items are considered satisfactory in comparison with the measured value. In case of the analysis of "Crack condition", however, the estimation of tunnel lining model (ex. shotcrete, rockbolt) must be studied still more.