

(4) FEM解析によるNATMトンネルでの支保効果の定量的把握

前田建設工業(株)土木設計部

石樽保則

1 はじめに

NATMによるトンネル工事では、周辺地山挙動を把握することが施工管理上、大変重要である。そのため、挙動予測解析・計測・逆解析という連の作業が盛んに行われている。しかしながら、NATMの主要支保材であるロックボルトと吹付コンクリートの支保効果については、支保部材のモデル化方法がいろいろ議論されているが、まだ確立されておらず、現在行なわれている数値解析(FEM)においてもその効果の定量的把握がなされていない様である。

そこで、簡単な解析モデルを用いて、FEM解析による支保材の支保効果を換算内圧あるいは等価弾性係数として定量的に評価しようとした。その結果を報告するものである。

2 解析条件

2.1 解析モデル

FEM解析において、地山物性、支保時期、支保条件等が支保材の支保効果におよぼす影響を把握するために地山の解析モデルは以下に示す様にする。

(1) 解析断面

トンネル形状は円形、解析半径は27.5mとし、全体系の1/4を図-1に示す様に要素分割する。

(2) 初期応力

解析領域内の初期応力は均一に分布しているものとし、

$$\sigma_x = \sigma_y = 200 \text{ t/cm}^2$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad \text{とする。}$$

(3) 地山物性

2.2項に示す様な岩盤等級D、CL、CHとする。地山物性の非線形さは、国鉄NATMFEMに従う。

(4) 支保モデル

吹付コンクリートとロックボルトは、ロッド要素とし

て表わす。ロッド要素は両端ヒンジの棒構造であり、モーメントは表わさず、軸力のみを考慮する。吹付コンクリート、ロッドボルトと地山とは、節点が完全に同一で一体化されているとする。

吹付コンクリートの弾性係数は $1 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ 、重量は 2.3 t/m^3 とし、

ロックボルトの弾性係数は $2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\phi 25 \text{ mm}$ ($A = 4.91 \text{ cm}^2$) とする。

(5) 切羽の進行

2次元ひずみ状態で切羽の進行を考慮するために、掘削相当外力を支保時期の前後に分けて作用させる。すなわち、素掘の状態掘削相当外力の α を作用させて解析を行った後、支保の設置を行ない、支保の設置後に残りの $(1-\alpha)$ を作用させて解析を行なう。

2.2 解析ケース

表1～4の地山物性、支保条件、支保時期、掘削外径をパラメーターとして、組み合わせる。

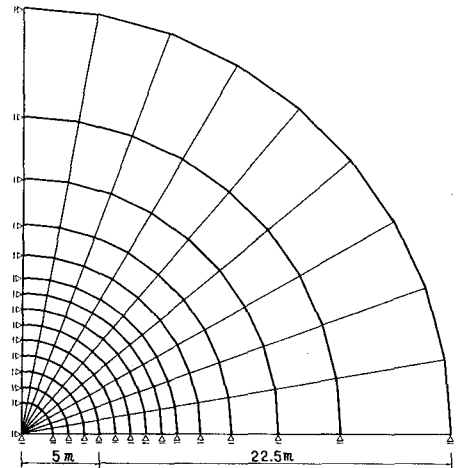


図-1 要素分割図

ケース	吹付コンクリート	ロックボルト
1	厚さ10cm	—
2	厚さ15cm	—
3	—	長さ3mで20°ごと
4	—	長さ3mで30°ごと
5	—	長さ2mで20°ごと
6	厚さ10cm	長さ3mで20°ごと

表-2 支保条件

岩盤等級	弾性係数 Kg/cm^2		C kg/cm^2	ϕ°	ポアソン比	
	掘削前	破壊後			掘削前	破壊後
D	3×10^3	3×10^2	4	30	0.3	0.45
Cl	8×10^3	—	10	38	0.3	—
CH	25×10^3	—	24	45	0.3	—

表-1 地山物性値

ケース	支保時期
1	4分の1
2	2分の1
3	4分の3
4	無支保

ケース	掘削外径m
1	4
2	6
3	8
4	10

表-3 支保時期

表-4 掘削外径

2. 3 支保効果の評価方法

2次元ひずみ状態にある無限弾性体での円孔周辺の変位は、次式で与えられる。

$$\mu r = P \times R^2 \times (1 + \nu) / E / r \dots (1)$$

ここで μr : r 地点での半径方向変位 (cm)

P : 初期応力 (Kg/cm^2)

R : 掘削半径 (cm)

ν : 地山のポアソン比

E : 地山の弾性係数 (Kg/cm^2)

r : 中心からの距離 (cm)

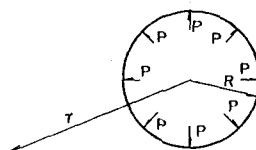


図-2 円孔に内圧が作用

(1) 内圧効果

支保材の内圧効果を換算内圧として、次式で計算する。

$$\Delta P = (\mu - \mu_1) \times E / R / (1 + \nu) \dots (2)$$

ここで ΔP : 換算内圧 (Kg/cm^2)

* μ : 無支保時における掘削面の半径方向変位 (cm)

* μ_1 : 支保時における掘削面の半径方向変位 (cm)

* : ただし、ロックボルトを用いた場合は、ロックボルトのある節点とない節点の変位の平均値とする。

(2) 地山改良効果

支保材の地山改良効果を等価弾性係数比として、次式で計算する。

$$E' / E = \mu / \mu_1 \dots (3)$$

ここで E' : 等価弾性係数 (Kg/cm^2)

なお、上記の換算内圧と等価弾性係数比の関係は次の様になる。

$$E' / E = P / (P - \Delta P)$$

3 解析結果

3. 1 地山物性、支保時期による影響

図-3に内圧効果-地山弾性係数、図-4に等価弾性係数比-地山弾性係数、図-5に内圧効果-支保時期、図-6に等価弾性係数比-支保時期の関係を示す。

内圧効果 (ΔP)、地山弾性係数比 (E' / E)とも地山弾性係数が大きくなるのに従い小さい。その割合も地山弾性係数が大きくなるのに従い小さくなっている。内圧効果、地山弾性係数比は、当然ながら支保時期が遅くなるのに従い小さくなっている。このことは、地山が悪いほど支保時期の影響が大きく、また支保時期が遅いと

どんな地山に対してもその効果はあまり期待できない。具体的には同じ支保効果を得るのにD級 ($E=3 \times 10^4 \text{ t/m}^2$) では、支保時期3/4で良いのにCH級 ($E=25 \times 10^4 \text{ t/m}^2$) では支保時期0と実際には不可能な時期となっている。

ロックボルト (長さ3m 20° ピッチ) の支保は吹付コンクリート (厚さ10cm) の支保に比べて支保効果が1/10程度となっている。このことは、ロックボルトの支保効果がこの解析では表われていないからと思われる。

3.2 掘削外径による影響

図-7に内圧効果-掘削外径、図-8に等価弾性係数比-掘削外径の関係を示す。

吹付コンクリートの支保効果は、内圧効果 (ΔP)、等価弾性係数比 (E'/E) とともに掘削外径が増加するのに従い小さく、その割合は掘削外径の増加に従い小さくなっている。掘削外径の影響は、支保時期が早いほど大きくなっている。例えば、掘削外径10m、支保時期1/2での支保効果は、掘削外径4m、支保時期5/8と同じ程度である。

ロックボルトの支保効果は、掘削外径の影響は少なく、支保時期の如何によらず小さくなっている。

3.3 支保量による影響

図-9に内圧効果-吹付コンクリート厚、図-10に等価弾性係数比-吹付コンクリート厚の関係を示す。

内圧効果 (ΔP)、等価弾性係数比 (E'/E) とともに当然のことながら、吹付コンクリート厚が増加するのに従い増加するが、その割合は吹付コンクリート厚の増加に従い小さくなっている。このことは吹付コンクリートは早く施工すればするほど薄くしても効果が大き

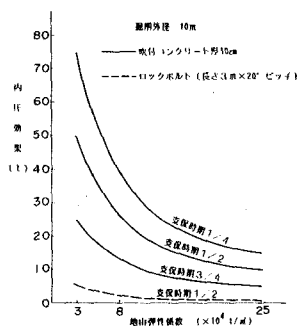


図-3 内圧効果-地山弾性係数

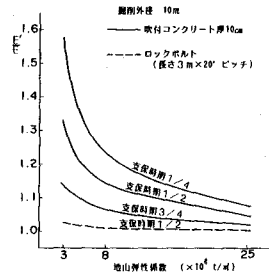


図-4 係数比-地山弾性係数

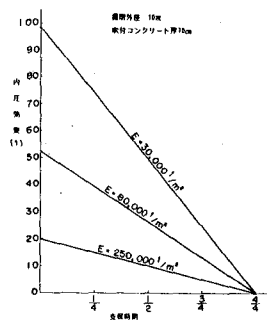


図-5 内圧効果-支保時期

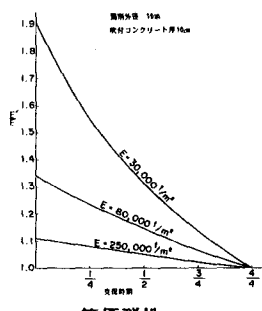


図-6 係数比-支保時期

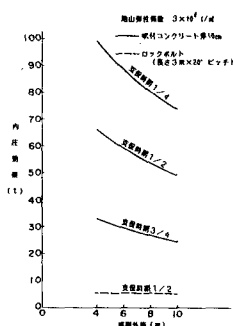


図-7 内圧効果-掘削外径

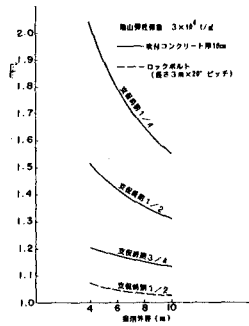


図-8 係数比-掘削外径

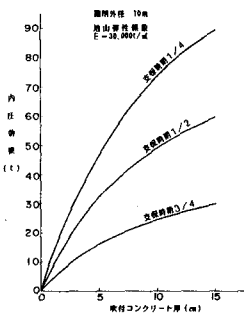


図-9 内圧効果-吹付コンクリート厚

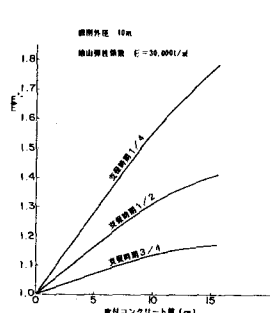
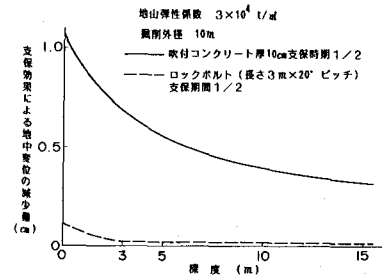


図-10 係数比-吹付コンクリート厚

さくなる。例えば厚さ15cmの吹付コンクリートの支保時期3/4の支保効果は、厚さ5cmの吹付コンクリートの支保時期1/2と同じ程度である。

3.4 地中変位量の深度による影響

図-11に支保効果による地中変位の減少量-深度の関係を示す。
吹付コンクリートの支保は、深度が深くなるに従い地中変位量が小さくなり、その割合は深度の増加に従い小さくなっている。ロックボルトの支保は、ロックボルトの長さまでは深度が深くなるに従い地中変位量が小さくなるが、それ以降は変化が少なくなる。このことより、吹付コンクリートの支保は地中深部まで影響をおよぼすが、ロックボルトの支保はロックボルトの長さまでしか影響をおよぼさないとと思われる。



地中変位
図-11 の減少量-深度

3.5 非線形による算定

内圧効果 (ΔP) は弾性解析での値の小さい方が非線形で算定すると値が大きくなる割合が大きい。等価弾性係数比 (E'/E) は弾性解析での値の大きい方が非線形で算定すると値が大きくなる割合が大きい。従って、こ

	弾性解析		非線形解析		$\frac{\Delta P E'}{\Delta P n}$	$\frac{E' n}{E}$
	$\Delta P E' / \text{mm}$	E' / E	$\Delta P n / \text{mm}$	$E' n / E$		
吹付コンクリート20cm	49.20	1.311	78.51	1.469	1.596	1.121
ロックボルト φ=3mm 20° ピッチ	5.17	1.025	15.42	1.067	2.063	1.042
吹付コンクリート10cm + ロックボルト φ=3mm 20° ピッチ	50.83	1.322	80.77	1.490	1.595	1.127

表-5 解析結果

れらのことを考慮すると今までに述べてきた弾性解析での支保効果の性状は、非線形解析をしてもおおよそあてはまると思われる。

4 まとめ

以上のように、FEM解析による支保材の支保効果を地山物性、支保時期、支保条件等をパラメーターとして、換算内圧あるいは等価弾性係数比によって評価した。その結果、次の様なことが言える。

- ① 掘削外径10mでの吹付コンクリート厚さ10cmの支保材は、同じ支保効果を得るのにD級 ($E = 3 \times 10^4 \text{ t/mm}$) では支保時期3/4で良いのにCH級 ($E = 25 \times 10^4 \text{ t/mm}$) では支保時期0と実際には不可能な時期となる。
- ② 岩盤等級D級での吹付コンクリート厚さ10cmの支保材の支保効果は、掘削外径10m、支保時期1/2と掘削外径4m、支保時期5/8とが同じ様になる。
- ③ 掘削外径10m、地盤等級D級での吹付コンクリート厚さ5cm、支保時期1/2での支保効果は、吹付コンクリート厚さ15cm、支保時期3/4と同じ様になる。
- ④ ロックボルトの支保効果はこの算定では表われてこなかった。このようなモデルでの弾性連続体解析では、ロックボルトの評価を行なうのは危険であると思われる。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道：NATM設計施工指針（案）
- 2) 土木学会：ロックボルト・吹付コンクリートトンネル工法（NATM）の手引書
- 3) 高山 昭監修：NATMの理論と実際
- 4) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針
- 5) トンネル協会：トンネル掘削によるゆりみ領域の調査報告書

(4) Quantitative Grasp for Effect of Tunnel Support
in New Austrian Tunnel Method by using F.E.M. Analysis

by Yasunori Ishigure
Maeda Construction Co., Ltd.

Summary

In the construction of tunnel by New Austrian Tunnel Method, it is very important to secure a field measurement for practical construction. For that reason, we take a lot of series work such as forecast analysis of movement, measurement, back analysis. But, we cannot establish a method of support model even if we try it and we cannot quantify a effect of tunnel support by main support such as Rockbolt and Spray Concrete by using F.E.M. analysis.

In this paper, we have tried to calculate at Simple Model by using F. E. M. analysis and estimate a effect of tunnel support as Conversion Inner Pressure and Equal Young's Modulus.