

有限要素法による NATM トンネルの挙動解析例

斎藤 二郎 山下 幸夫
藤原 紀夫

Examples of NATM-Tunnel Behavior Analysis by the Finite Element Method

Jiro Saito Yukio Yamashita
Toshio Fujiwara

Abstract

In this paper, the authors describe behaviors of lining and rock around an NATM tunnel analyzed by the finite element method. The main purpose of elasto-plastic analysis is to gain a grasp of the influence of the differences in lengths, numbers installed and modeling of rockbolts. Three kinds of rockbolts were modeled and comparisons were made of the analysis results in case of assuming full-face excavation. As a result, it was found that a rockbolt could be amply represented by a rod element. As for length, the effect is prominent up to about 4 m, but beyond that length, far more effect can be expected by increasing the number of rockbolts. Still more, the authors analyzed the behaviors of the tunnel by viscoelasticity analysis considering the process of excavation and compared them with measurements in the field.

概 要

NATM トンネルの覆工および周辺岩盤の挙動を有限要素法による弾塑性解析と粘弾性解析により解析した。

弾塑性解析はロックボルトの長さや打設本数、およびモデル化の違いが解析結果にどのような影響を与えるのかを把握することを主な目的として実施したものである。ロックボルトは3種類のモデル化を行ない、トンネルを全断面掘削と仮定した場合の解析結果をそれぞれ比較した。その結果、ロックボルトは棒要素によるモデルで十分表現しうることが明らかになった。また長さの効果は4m程度までは顕著に認められるが、それ以上になると打設本数を増やした方がはるかに大きな効果を期待できる。さらに粘弾性解析では実際の施工状況に近づけるため、掘削段階を考慮した解析を行なった。これらの結果は現場での実測値と対比し、検討を加えている。

1. まえがき

NATM はロックボルトと吹付コンクリートを主要な支保材としたトンネル工法で、その支保概念はトンネル周辺の地山が本来持っている支持力を、有効に利用しようとするものである。すなわち地山にある程度の変位を許すことにより、支保に作用する荷重を減少させ、薄肉での覆工が可能となる。

ここでは NATM トンネルの覆工および周辺岩盤の挙動を解析するため、ロックボルトのモデル化、および岩盤物性値の評価などを中心として、検討を加えることにする。解析方法は有限要素法による弾塑性解析と粘弾性解析で、これらの結果は現場での実測値とも対比させている。

2. 弾塑性解析

2.1. 解析方法

弾塑性解析方法についてはすでに報告されている¹⁾ので詳しい説明は避け、ここではロックボルトのモデル化、およびその取り扱い方法を中心として述べる。

ロックボルトは NATM における最も重要な支保材となるもので、トンネル周辺の地山にシステマティックに配置することにより縫合わせ効果が発揮され、周辺岩盤が一体化される。そのため岩盤アーチの形成により掘削断面の変形に対して有利となる。

有限要素法により NATM トンネルの挙動を解析する場合、このロックボルトをどのようにモデル化し、計算手法にとり入れて行くかが、とりわけ重要である。ただ

しロックボルトの機能を完全にモデル化することは不可能であり、ある程度近似的な取り扱いが行なわれている²⁾。ここでは次に示す3通りの方法でロックボルトをモデル化し、解析を行なうことにする。

(1) 棒要素によるモデル化 全面接着式ロックボルトに対して、これと相似の特性値をもった一次元の棒要素³⁾を考へることによりモデル化する。

(2) 一対の内力によるモデル化 ロックボルトの両端部分(地山内のアンカー部とトンネル壁面の固定部)に、一対の内力を荷重として作用させることにより近似する。

(3) 等価の岩盤によるモデル化 トンネル周辺の岩盤の剛性を増加させることにより、ロックボルト打設による効果を近似的に表現する。

図-1に弾塑性解析プログラムのフローチャートを示す。弾塑性解析については種々の方法があるが、ここではモール・クーロンの破壊基準を用いる直接反復法によった。なお、ロックボルトについては弾性挙動をするものと仮定した。

2.2. 解析例

2.2.1. 解析モデル

図-2にトンネル掘削断面、およびロックボルトの基本的な配置パターンを示す。解析領域はトンネル中心より上方25m、下方20m、横方向は中心軸より片側25mである。またトンネル縦断方向の支保ピッチは1m、吹付コンク

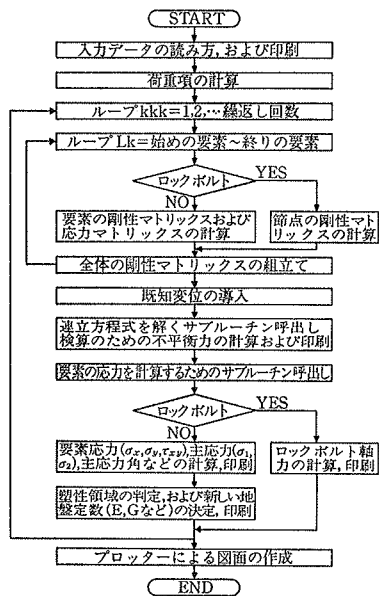


図-1 フローチャート (弾塑性解析)

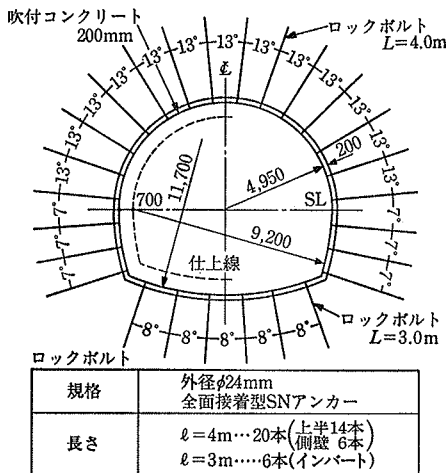


図-2 ロックボルト配置図

リート厚さは0.2mである。

2.2.2. 計算条件

この解析における計算条件は次の通りである。なお可縮支保工(MU-29)および溶接金鋼(100×100×φ5mm)については支保(ロックボルト+吹付コンクリート)を施すまでの補助的なものと考え、解析には取り入れない。

(1) 解析は平面ヒズミ問題とし、トンネル断面について二次元的に取り扱う。

(2) 境界拘束条件は、①左右両端は水平方向固定、垂直方向自由、②下端は水平、垂直方向とも固定、③上端は水平、垂直方向とも自由とする。

(3) 上載荷重は境界上端より上部の地山自重を、上端における節点力として与える。

(4) 掘削は全断面掘削とする。

(5) 岩盤はすべて等方、等質と仮定する。

2.2.3. 入力データ

表1に地山物性値を一覧表として示す。解析に用いる地山物性値は、室内試験から得られた岩石コアの物性値を、ある程度割引きして使用する必要がある。なぜなら実際の岩盤は断層、亀裂などを含んだ不連続体であるのに対して、岩石コアは比較的均質で、地盤中の良好な部分を代表していると考えられるからである。ここでは基準となった岩石コアの物性値とその割引率も参考までに記載した。また表-2に吹付コンクリートおよびロックボルトの物性値を示す。吹付コンクリートは十分な強度を発揮するまでの間に、ある程度の時間が必要であり、解析時の強度をどのように評価するか難しい問題となる。ここではその強度を一応100 kg/cm²程度と仮定し諸定数を決定した。

項目	物性値	解析に用いる地山の物性値①	岩石コアの物性値②	割引率③=①/②
弾性係数 E(t/m ²)	1.5×10 ⁴	4.2×10 ⁵	1/28倍	
ポアソン比 ν	0.35	0.28	1.25倍	
内部摩擦角 φ(度)	25	36	0.7倍	
粘着力 C(t/m ²)	90	187.5	0.5倍	
単位体積重量 γ _t (t/m ³)	1.93	1.93	—	
参考	岩石名:緑色凝灰岩(グリーンタフ) 土被り:261m(トンネル中心~地表) 一軸圧縮強度 平均91.4(kg/cm ²)			

表-1 地山の物性値

変位のゆるみ率は、ロックボルトを棒要素によりモデル化する際に定数として使用するもので、ロックボルトが打設されるまでに生じる先行変位、および岩盤との間に起こる滑りの影響などを控除し、実測軸力と計算値とを対比できるようにしたも

項目	物性値
吹付コンクリート	
弾性係数 E(t/m ²)	5.0×10 ⁴
ポアソン比 ν	0.20
内部摩擦角 φ(度)	40
粘着力 C(t/m ²)	233.0
単位体積重量 γ _t (t/m ³)	2.3
ロックボルト	
弾性係数 E(t/m ²)	2.1×10 ⁷
断面積 A(m ²)	4.52×10 ⁻⁴
モデル化	
変位のゆるみ率 K	0.2
一対の内力 (t)	25.0
等価の岩盤	地山のE,Cを1.6倍

表-2 吹付コンクリート、ロックボルトの物性値

のである。

等価の岩盤によるモデル化ではロックボルト打設位置の岩盤を、ロックボルトと地山の複合地盤と考え、両者の剛性 ($E \times A$) が等しくなるようにした。ここではトンネル壁面での剛性計算から、地山の弾性係数および粘着力を1.6倍にした。

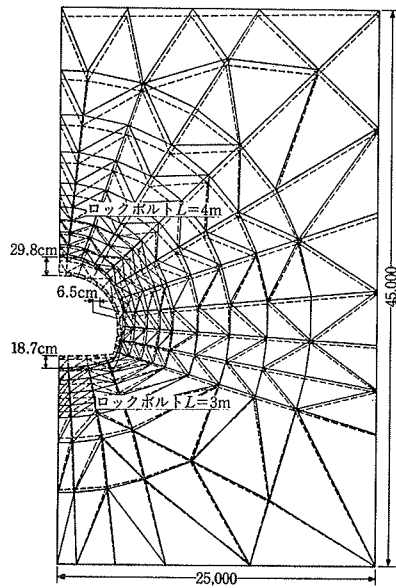
2.2.4. 解析結果

(1) ロックボルトのモデル化の違い 表一3にロックボルトのモデル化の違いによる解析結果を示す。ここで実測値は、壁面の絶対変位量が測定されていないため、周囲の状況から推定により求めたものである。一对の内力によるモデル化 (CASE-2) は壁面の変形量も大きく、後述する CASE-9 との比較でも明らかなようにロックボルトの効果はあまり認められない。またロックボルトの両端に作用させる締付力を当初から仮定することには矛盾もあり、モデル化としてはあまりよい方法ではない。一方、棒要素によるモデル化 (CASE-1) は理論的にも節点の剛性を高め、岩盤の縫い合わせ効果などをよく説明している。図一3に棒要素によりモデル化した場合の地盤内変位図を示す。等価の岩盤によるモデル化 (CASE-3) は他の解析ケースに比べて壁面変形量が最も少ない。ただしモデル化した岩盤の剛性をトンネル壁面で計算しているため、物性値としては幾分か大きめに評価していることになる。

(2) ロックボルトの長さおよび打設本数の影響 表一4にロックボルトの長さおよび施工本数を変化させた場合の解析結果を示す。ロックボルトはすべて棒要素によりモデル化した。なお比較のためロックボルトを打設しない場合 (素掘り、吹付コンクリートのみ施工) についても解析している。

その結果、ロックボルトが長くなるほど壁面変形量は小さくなり、その効果が認められた。ただし長さが4m以上になると、それ以上ロックボルトを延長しても、それほど顕著な効果は期待できないようである。

一方、ロック



図一3 地盤内変位図 (CASE-1)

解析ケース	支保タイプ		壁面変形量 (cm)		
	ロックボルト	吹付コンクリート	天端	側壁	インバート
CASE-1	棒要素によるモデル化	0.2m	29.8	6.5	18.7
CASE-2	一对の内力によるモデル化	0.2m	33.7	8.5	19.5
CASE-3	等価の岩盤によるモデル化	0.2m	24.9	5.9	17.0
実測値	4m-20本, 3m-6本 6m-8本(増打)	0.2m	26.0	12.0	—

表一3 トンネル壁面の変形量

解析ケース	支保タイプ		壁面変形量 (cm)		
	ロックボルト	吹付コンクリート	天端	側壁	インバート
CASE-4	L=1m (上半, 側壁1m インバート1m)	なし	34.9	9.2	20.0
CASE-5	L=4m (上半, 側壁4m インバート3m)	なし	32.7	7.8	19.8
CASE-6	L=6m (上半, 側壁6m インバート4m)	なし	32.1	7.6	19.8
CASE-7	L=4m (本数はCASE-5の半分)	なし	37.0	9.3	20.5
CASE-8	ロックボルトなし (素掘り)	なし	43.2	13.5	22.1
CASE-9	ロックボルトなし (吹付コンクリートのみ)	0.2m	35.8	9.6	20.1

表一4 トンネル壁面の変形量

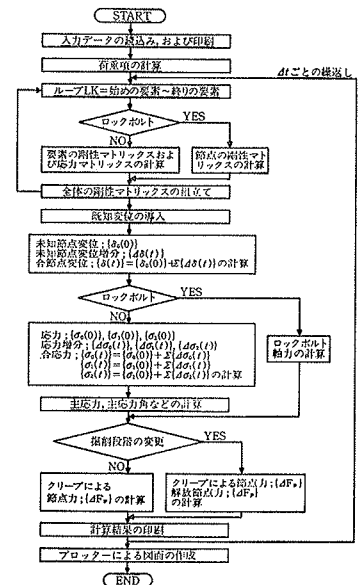
ボルトの打設本数は CASE-5 と CASE-7 の比較からも明らかなように、壁面変形量に大きな影響を与える。したがって必要以上にロックボルトを延長するよりも、打設本数を増やした方が壁面の変形に対してはるかに有利である。

なお、支保の効果として見た場合、吹付コンクリートの影響が非常に大きいことが分かる。解析に使用する吹付コンクリートの物性値を、どのように評価するかについては十分な配慮が必要である。

3. 粘弾性解析

3.1. 解析方法

図一4に粘弾性解析プログラムのフローチャートを示す。地山および吹付コンクリートの粘弾性挙動は一般化されたマックスウェルモデル (5要素まで) にしたがうものと仮定する⁴⁾。またロックボルトについては弾性挙動するものと仮定し、軸力の算定などは弾塑性解析の場合と同様に取り扱う。



図一4 フローチャート (粘弾性解析)

3.2. 解析例

3.2.1. 計算条件 解析モデルは弾塑性解析の場合と同様である。また計算条件もほとんど同じであるが、異なる点のみを示すと次のようになる。

(1) トンネル掘削は施工順序を考慮して、3段階（上半掘削、中段掘削、インバート掘削）に区分する。このときトンネルの掘削効果は、掘削位置における解放節点力として与える。

(2) ロックボルトは棒要素によりモデル化する。

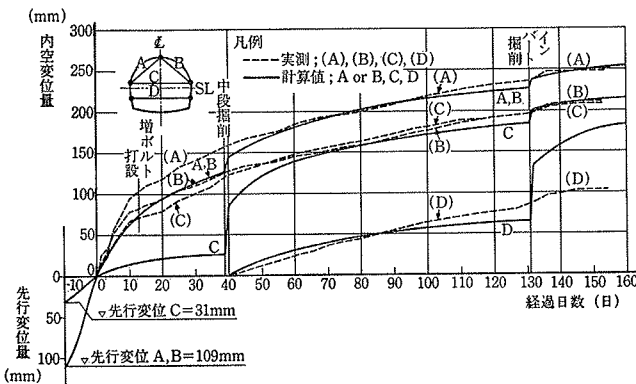
3.2.2. 入力データ 地山の粘弾性定数については現地で採取した岩石コアにより一軸クリープ試験が実施されているのでその結果から決定した。

表一五に解析に用いる地山の粘弾性定数と一軸クリープ試験の結果、およびその割引率を示す。緩和時間は一軸クリープ試験が短時間（約5日）であることなどを考慮して、得られた結果より幾分か大きめの値を使用し、 $T_2=20$ 日、 $T_1=(T_2/10)=2$ 日とした。バネ定数(E_0, E_1, E_2)は岩石コアと地盤との性状の違いなどを考慮して、一律に1/7とした。

表一六に吹付コンクリートの粘弾性定数を示す。緩和時間は地山と同様とし、弾性係数およびポアソン比は弾塑性解析の場合と同程度とした。またロックボルトについても弾塑性解析の場合と同様とした。

3.2.3. 解析結果

(1) 壁面変形の経時変化 図一五に内空変位（トン



図一五 内空変位の経時変化

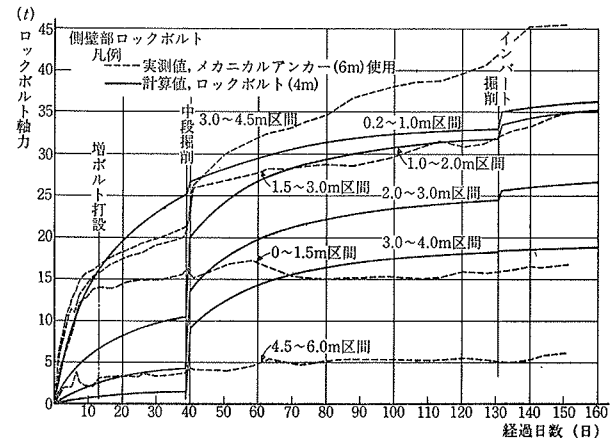
ネル壁面上の2点間の相対変位)の実測値と計算値の経時変化を示す。上半掘削において内空変位Cの実測値が計算値よりも大きくなっているが、これは切羽の進行に伴う三次元的な影響も原因となっているものと思われる。

またインバート掘削以降の内空変位Dでは、逆に実測値の方が小さくなっている。これはインバート掘削までに、中段部およびインバート部の地山が、実際には相当ゆるんでいることを示すものである。

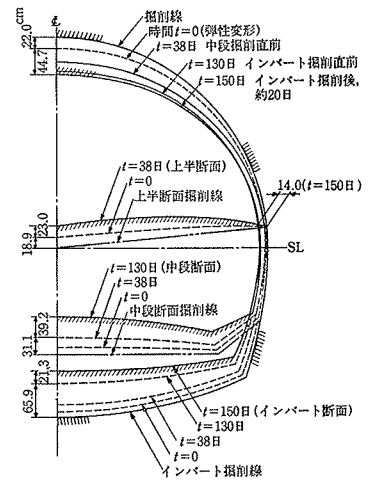
トンネルの掘削に伴って、周辺地山は切羽到達までに地山内部で先行変位を生ずる。等方・等質の弾性地山では、この先行変位は切羽のD~2D (Dはトンネルの直径) 前方より開始すると言われている⁹⁾。この解析では一応 2D (約 20 m) 前方より先行変位が起こるものと仮定した。これは支保の建込みを1日当たり2サイクルとして10日間の掘進工程に相当する。なお計算値を実測値と比較する場合、両者が合致するような計測基準線を設ける必要がある。この計測基準線は本来ならトンネルの掘削が終了し、変位の計測が開始される時点を選ぶべきであるが、ここでは近似的に切羽が到達した時点を選んだ。また先行変位量は計算により求められた弾性変形量とした。

図一六にトンネル壁面の絶対変位を示す。ここでは各掘削段階ごとの変位の状況を表わしている。

(2) ロックボルト軸力の経時変化 図一七にロック



図一七 ロックボルト軸力の経時変化



図一六 トンネル壁面の絶対変位

ボルト軸力の経時変化を示す。実測値は6mのメカニカルアンカーにより、1.5mごとに測定されているため、計算値と完全に對比することは困難である。ただし掘削段階が移行する際に、計算値に見られるような軸力の段階的な上昇は、一部の实測値でも認められる。

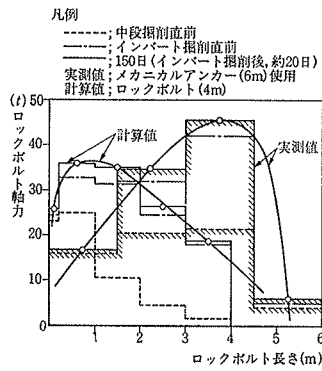


図-8 ロックボルト軸力の分布

図-8にロックボルト軸力の分布を示す。計算により求めたロックボルト軸力は、実測値と同様にピークが現われており、棒要素によりかなりよくモデル化されていることが分かる。ただしピークの位置は両者で大きく異なっている。すなわち計算値ではピーク位置が壁面に近く、ロックボルトがよく効いている状態を示しているのに対して、実測値では壁面から離れた位置にピークがある。これは実際の変形がロックボルト打設範囲よりもさらに深部から起きており、その結果ロックボルトの支保効果が低下したためと考えられる。

(3) 地中変位
図-9に地中変位の实測値と計算値の比較を示す。地中変位はエクステンソメータ(6m地点用)により相対的な変形量とし

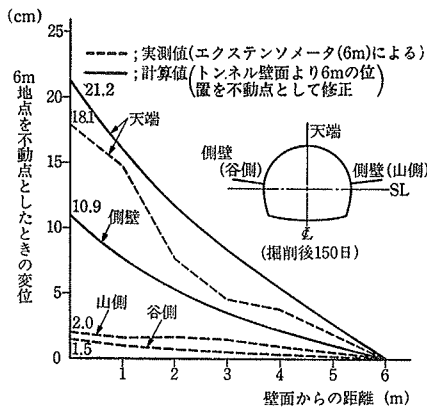


図-9 地中変位

て測定される。そのため計算値も6m地点を不動点として修正している。トンネル天端では実測値と計算値はほぼ等しいが、側壁部では実測値の方がはるかに小さい。この側壁部での実測値(掘削後150日、山側と谷側変位の和3.5cm)を内空変位C(21.0cm)と比較すると、約17%に相当する。これは6m地点が不動点でないことを示すもので、かなり多くの変形が6m地点よりも深部で起きていることになる。したがって側壁部では、4mのロックボルトでは長さ不足であると判断される。

4. むすび

NATM トンネルを対象とした弾塑性解析および粘弾性解析を実施した結果、次のことが明らかになった。

(1) ロックボルトは棒要素によるモデル化で、十分表現することができる。

(2) ロックボルトは長くなるほど、また打設本数を増加するほど支保としての効果は高くなる。ただし長さが4m以上になると、それ以上に延長してもそれほど顕著な効果は期待できない。現場での施工性および打設効果などを考慮した場合、ロックボルトを必要以上に長くするよりも、打設本数を増やした方が壁面の変形に対してはるかに有利である。

(3) 吹付コンクリートは解析結果に大きな影響を与える。したがって解析に使用する物性値をどのように評価するかについては十分な配慮が必要である。

(4) 掘削段階を考慮した粘弾性解析では、現場の実測値とも比較的よい一致を見た。ただしこの結果はNATMトンネルの一解析例を示すものであり、入力データとした粘弾性定数などについては、さらに多くの解析を通じて検討を加えて行かなければならない。

今後はズレ要素、四角形要素などの追加、岩盤の破壊基準の検討などを含めて、各種の実測値とも比較しながら、より解析精度の高いプログラムを開発して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 斎藤, 内藤, 藤原: 有限要素法によるシールド外周地盤の挙動解析(弾塑性), 大林組技術研究所報, No. 8, (1974)
- 2) 膨張性地山における鉄道トンネルのNATMの適応性に関する文献資料の調査研究報告書, (社)日本トンネル技術協会
- 3) 吉識監訳, O. C. ツィエンキーヴィッツ/Y. K. チューン共著: マトリックス有限要素法, 培風館
- 4) 斎藤, 内藤, 藤原, 吉岡: 有限要素法による地盤の粘弾性解析, 大林組技術研究所報, No. 11, (1975)
- 5) 川本: アーストンネルにおける土圧の諸問題, 土と基礎, (1979, 7)
- 6) T. J. Freeman: The behaviour of fully-bonded rockbolts in the Kielder Experimental tunnel, Tunnels & Tunnelling, (Jun. 1978)