

風化地盤（花崗岩）における NATM の適用

THE APPLICATION OF NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD "NATM" IN COMPLETELY DECOMPOSED GRANITE

いそ 磯 うら 浦 かつ 克 とし 敏* くる 黒 べ 部 たけ 武 ひで 英**

1. ま え が き

近年、トンネルの新しい工法として、NATM（新オーストリア・トンネル工法）が脚光を浴び、施工実績も徐々に増加している。しかし、これまでの実績を見ると、わが国における NATM の施工例は、岩盤トンネル及び膨張性地山を対象としたものが多く、軟弱地質への適用例は、ほとんど見受けられない。

ここに述べる東北新幹線第1平石トンネル（ $L=255\text{m}$ ，施工 飛鳥建設KK），第2平石トンネル（ $L=245\text{m}$ ，施工 前田建設KK），第1栗須トンネル（ $L=190\text{m}$ ，施工 佐藤工業KK）の各トンネルは、土かぶりが浅く（ $H=2\sim 15\text{m}$ ），かつ軟弱な地質での施工例である。このうち第1平石トンネル，第2栗須トンネル（第2平石トンネルは現在施工中）について報告する。

2. 設 計

(1) 地 質

東北新幹線第1平石トンネル他2トンネルは、東北本線二本松駅の南西約3kmの丘陵地帯を南北に縦断している。地質は図-1のとおりで、基盤岩である阿武隈山系の古期花崗岩が、深層まで風化作用を受けてまさ化が進み、固結度は弱く粘土をはさむ目も発達している。計画に先立ち土質試験を行った結果（第1平石トンネル）は表-1のとおりで、3トンネルとも、単位体積重量を除きほぼ同様の物

表-1 まさ土の物性値

項目	試料採取又は試験位置	トンネル付近露頭	側壁導坑内	記 事
単位体積重量 γ (g/cm ³)		1.28~1.54	1.59~1.65	
含 水 比 (%)		18.5~22.8	15.7~19.0	
一面せん断	摩擦角 ϕ (°)	30	34	
	粘着力 c (t/m ²)	2.5	4.0	
透 水 係 数 k (cm/sec)		—	5.03×10^{-6}	
弾 性 係 数 E (平板載荷)		176~298		1軸繰返し 50kg/cm ²

*国鉄 仙台新幹線工事局 福島工事事務所 工事第1課長

**国鉄 仙台新幹線工事局 福島工事事務所 工事第1課

性値である。

(2) 設計条件

a) 物性値

設計に使用した物性値は土質試験の結果を使用した。ポアソン比は0.35と仮定した。

b) 掘削断面

当初の設計はサイロット工法を考えていたため、掘削断面は側壁部が直線となっている。しかしこれでは応力集中が生ずるので円形に近い形が望まれた。一方建築限界の関係で内空断面を変更することは難しいため、掘削断面は内空断面とほぼ同じ形の栗形とすることとした（図-2）。

c) ロックボルト

諸外国の例からみるとロックボルトの長さはトンネル直径の1/3~2/3である。これらの例の中でも最も悪い条件の山であると判断して6mとした。なお土かぶりが薄いため、頂設部はロックボルトの効果が期待できないと考えて省略することとした。

d) 吹付けコンクリートの厚さ

諸外国の実施例からみて最も厚い20~25cmとした。

e) 各材料の許容応力度

鉄筋

降伏点応力度 $\sigma_{sy} = 3500 \text{ kg/cm}^2$

許容引張り応力度 $\sigma_{sa} = 1800 \text{ //}$

吹付けコンクリート

設計基準強度 $\sigma_{ck} = 160 \text{ //}$

許容圧縮応力度 $\sigma_{ca} = 54 \text{ //}$

許容せん断応力度 $\tau_a = 7 \text{ //}$

ロックボルトの長さ、本数、吹付けコンクリートの厚さなどは、上記のようにあらかじめ与え、有限要素法により地山の変位、応力、支保部材の応力などについて安全性のチェックを行うこととした。

(3) 有限要素法による解析

有限要素法による解析の概要は、次のとおりである。

- ① 解析対象領域は図-3とする。
- ② 解析は各掘削段階ごととする。
- ③ 掘削と吹付けコンクリートとのタイムラグはゼロとし、実際上掘削から吹付けまでに応力解放が生ず

表-2 吹付けコンクリート配合表

	セメント (kg)	水 (kg)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)	水セメント比 (%)	急結利率 (%)
第1平石トンネル	360	151.2	1022	962	42.0	5
第1栗須トンネル	360	173	1177	644	48.0	3

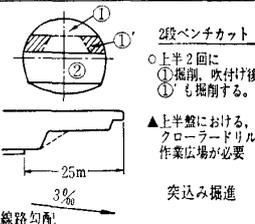
- ① まさ土に吹付けコンクリートは付着するか
 - ② 切羽の自立時間が短いため、1~2時間で1次吹付けが終了する必要があるが可能か
 - ③ ロックボルトの削孔時孔壁が自立するか、又、引抜き強度はあるか
- などである。

① 付着性については、のり面や側壁部では吹付けできる。しかしアーチ部ではラスを張らないと、3~5cm程度になると部分的にはく落して、全面的に吹き付けることができなかつた。このためアーチ部には、吹付けコンクリートの付着性をよくするためラスを張ることとした。

又、吹付けコンクリートの配合は、表-2とした。

② 吹付け機は、乾式とシアリバー260型又は、メナディエ(GM-76)を用いれば、目的は達成できる。しかし目による崩落を防止し、自立時間を長くするため、切羽前面アーチ部分に単管パイプ(φ48mm, l=1.5~2.0m)などを打ち込むことが有効であり、この方法を採用することとした。

表-3 NATM施工比較表

種別	第1平石トンネル	第1栗須トンネル
掘削	 <p>2段ベンチカット ○上半2面に ①掘削、吹付け後 ②も掘削する。 ▲上半盤における、 クローラードリル 作業広場が必要 突込み掘進 線路勾配 3%</p>	
金網(溶接)取付け	<p>上半(アーチ)部 ○地山に密着 φ3×50×50 ○吹付け前落防止用 ○2層目吹付け面に φ6×100×100 ○補強用</p>	<p>1段ベンチ(アーチ) ○1層目(中間)に φ6×100×100 ○2層目(中間)に φ3×50×50 ▲鉄矢木使用のため 地山側補強となる。 ▲支保工で分断</p>
吹付けコンクリート	<p>○(3層)厚=25cm ○アリバー 260 ○簡易パッチャー</p>	<p>○(2層)厚=20cm ○メナディエ GM76 ○コンクリート モービルCM200 ○粉塵、吹付け面が 良。 ○定期点検を要する。</p>
鋼H形支保工	<p>○125-H(上半のみ) 2ピース</p>	<p>○125-H(上下半) 6ピース</p>
補助工法	<p>○パイプルーフ φ48.6×2000 ○間隔≒0.60m</p>	<p>○鉄矢木 13.2×150×1400 ○ホアーボリング D29×4000 ○間隔≒0.60m ○間隔≒0.30m</p>
ロックボルト	<p>○ボルト φ6×6-8本 4m×2本 ○支保工中間に打込み ○プレート 6×150×150 ○ストレス導入 4~5h→5h/本</p>	<p>○ボルト 6m×10-12本 ○支保工に抱込み ○プレート 6×300×300 ○ストレス導入 2~3h→3h/本 10-12h→5h/本</p>

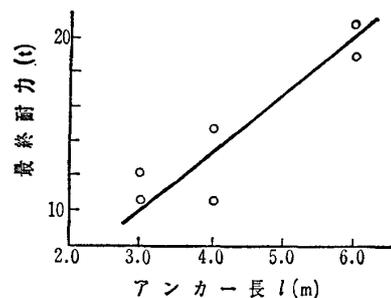


図-4 SN アンカー引抜き強度

③ 削孔は、レッグオーガー(AAL5型)を用い、オーガービット径42mm、ロッド径36mm、長さ1.5mのものを継いで削孔した。孔壁は自立したが、粘土分が多いとくり粉の出が悪くなり施工性がよくないことが判明した。このため、粘土分が多い第1平石トンネルでは、ドリフターを搭載したクローラードリルを使用することとした。

引抜き試験は、SNアンカー(全面接着型)3m、4m、6mについて、モルタル注入後24時間経過で行った。最終耐力は、長さにはほぼ比例し図-4の値を得た。

3. 施工

地質などは、各トンネルともほぼ同一条件であるが、今後の参考資料を得ること、又、各社の創意工夫を生かす意味で、表-3に示すように異なった施工法を採用した。

ここでは、第1平石トンネルの施工例について述べる。

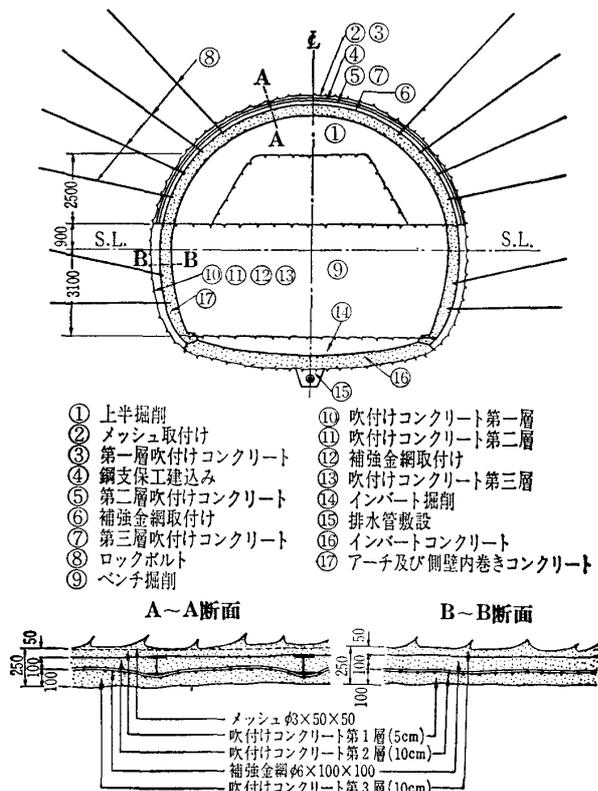


図-5 施工順序図

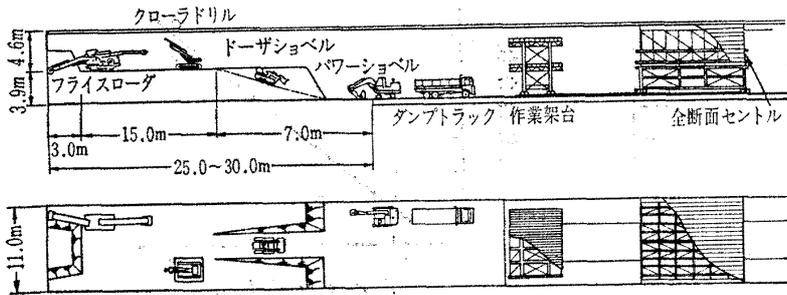


図-6 施工図

(1) 施工順序

施工順序は、図-5及び図-6のとおりである。掘削は、2段ベンチカット方式とし、SLより90cm上りを上半断面とし、リングカットにより約20m程前進させ、下半中央に斜路（勾配約1/2.5）を設け、土平部を1スパン約2mとして併進させた後、インバートを施工し全面閉合した。又、インバートの1スパンは、作業工程及び側壁部の押出しを考慮し4~6mとした。上半掘削後全断面閉合までの期間は、20~25日程度であった。

(2) 施工機械

掘削は、安全性と掘削の促進を図るため機械掘りとし、上半断面はフライスローダ（能力20~30m³/h）を用い、掘削土は、1.4m³のドーザショベル及びダンプトラックにより搬出した。吹付けコンクリートは、アリバー260型を用い乾式により3層に分けて吹き付けた。下部断面は、中央斜路及び左右土平部ともバックホウ（バケット0.3m³）を使用した。

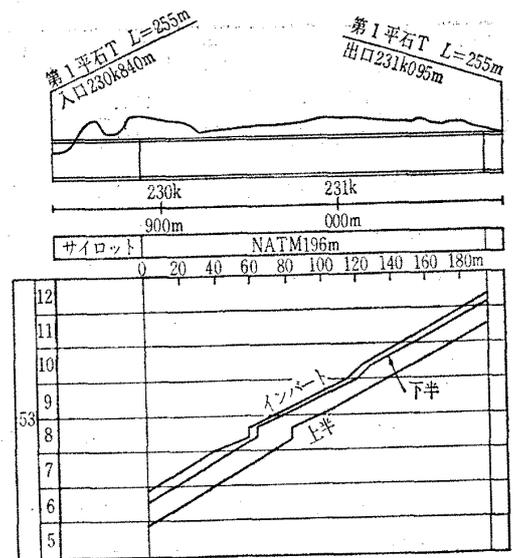


図-7 NATM区間実績

(3) 施工実績

施工実績は、図-7のとおりで、初めての施工ということもあり月進約30mであった。なおロックボルトについては、下半部の押出し（約50mm）が起こったため、左右2本ずつ増加した。

4. 計 測

(1) 計測概要

計測は、施工中における日常管理の指標とするとともに、

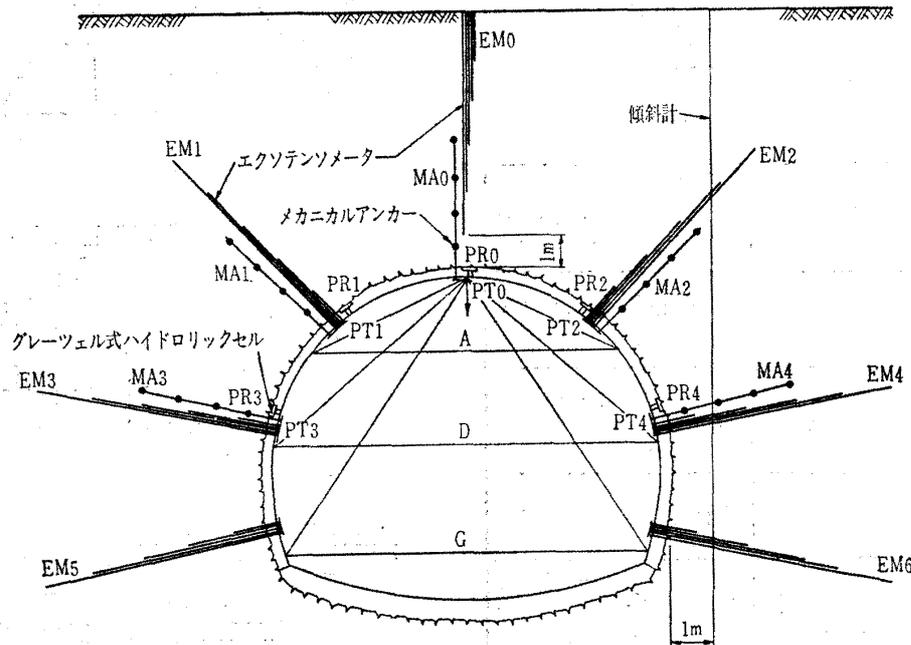


図-8 計 測 配 置

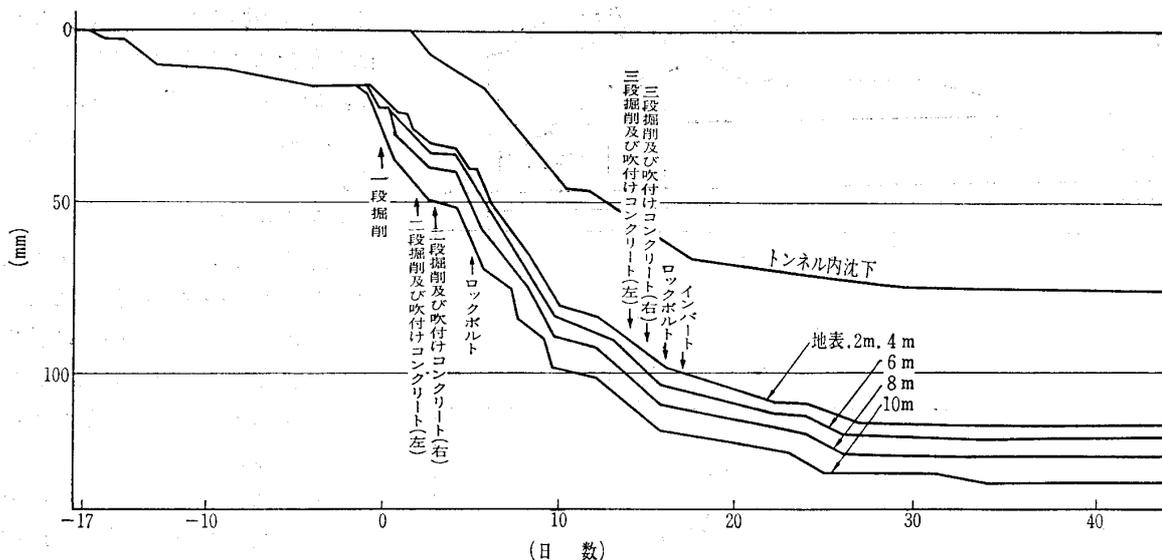


図-9 地山及びトンネル内沈下 (第1 栗須トンネル)

表-4 計測項目

計測項目	計測器	主測点	補助測点	配置	頻度
		1箇所	10~20Mごと		
地山沈下測定	レベル	○	○	1点	1回/日
	エクソテンソメータ	○		1本	同上
トンネル内沈下測定	レベル	○	○	1点	同上
トンネル壁面の内空変位測定	コンパージュエンスメジャー	○	○	9測線	同上
地山変位測定	エクソテンソメータ	○		6本	同上
	傾斜計	○		1本	同上
地山荷重測定	クレーツェル式	○		5点	同上
	ハイドロリックセル	○			
吹付けコンクリートの応力測定	同上	○		同上	同上
ロックボルトの軸力測定	メカニカルアンカー	○		7本 1本4点	同上

試験的な意味も含めて実施した。計測項目は、各トンネルにより、いくぶん異なるが、おおむね、図-8、表-4のとおりである。

(2) 計測結果

a) 地表及びトンネル内沈下

地表の先行沈下 (図-9) は切羽前方約5m, $[H \times \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2}) : H = \text{かぶり}]$ より発生しインバート施工後約10日で沈下は終息する。第1 栗須トンネルの縦断方向の最終沈下 (図-10. B) はおおむね50~100mm

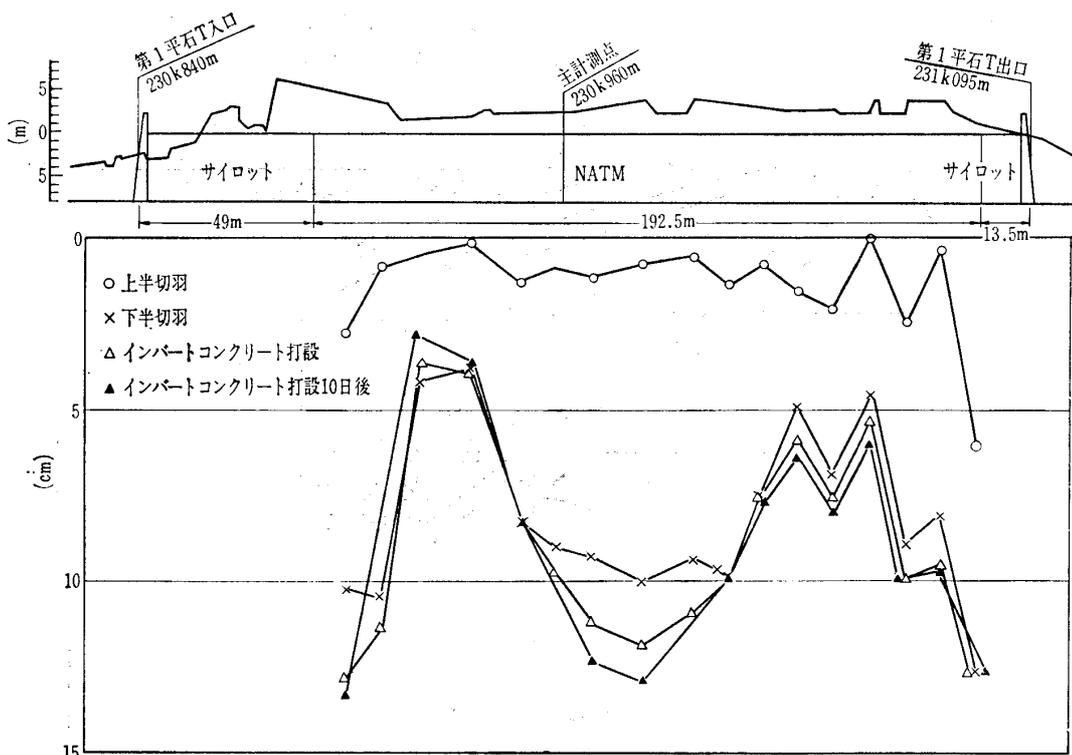


図-10.A 地表面縦断沈下

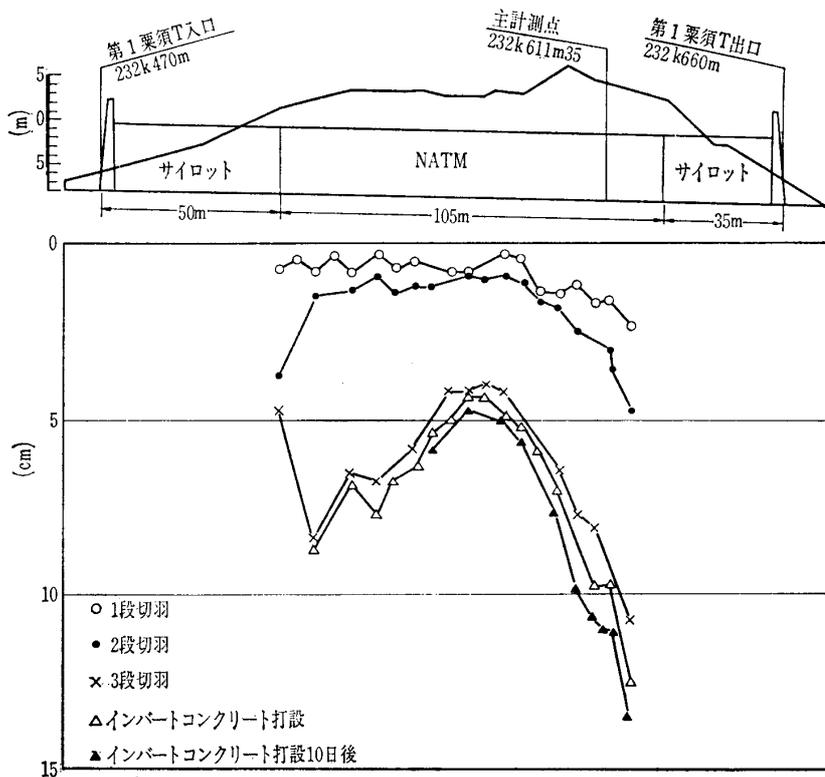


図-10. B 地表面縦断沈下

程度となっているが、これは目の多少、補助工法（アーチ部に鉄筋を打ち込む）の有無などによるものと考えられる。又、第1平石トンネルの沈下量の変動（図-10. A）は、目（まさ土中のうすい粘土層）の多少の影響も受けるが、土かぶりとほぼ比例している。横断方向の沈下（図-11）は、地形の傾きのため左右非対称となっているが、影響範囲は約20mでテルツァーギのゆるみ領域範囲とほぼ合っている。

b) トンネル内空変位

図-12は、S L付近の内空変位を示している。下半掘削

（又は3段掘削）の4~5日前から斜路掘削の影響により急速に内空へ変位が増大する。最終変位は、第1平石トンネルで22mm、第1栗須トンネルでは50mmである。

c) 地中変位

地中変位は第1栗須トンネルにおいてエクソテンソメータと傾斜計により計測を行った。エクソテンソメータの計測結果は図-13である。ゆるみ性状はトンネル壁面より4mを越えると層別の差が比較的大きくなっている。

傾斜計による地中変位の一例を図-14に示す。掘削前の先行変位は2段ベンチ付近では5~10mm、3段ベンチ付近では10~40mmとなり、内空変位測定開始後の変位は内空変位と同じ経過をたどっているようである。

d) 地山荷重及び吹付けコンクリートの応力

主計測点における地山との境界応力、及び吹付けコンクリートの軸力を図-15. A（第1平石トンネル）図-15. B（第1栗須トンネル）に示す。

境界圧力、吹付けコンクリートの応力とも、ばらつきが大きく、又、両トンネルにかなりの差がある。これは、掘削後の支保状態など、施工条件により異なっていると思われる。いずれにしても、境界圧力1.5kg/cm²以下、吹付けコンクリートの応力は10kg/cm²以下であり、計算値と比較して、はるかに小さい値を示している。

e) ロックボルトの軸力

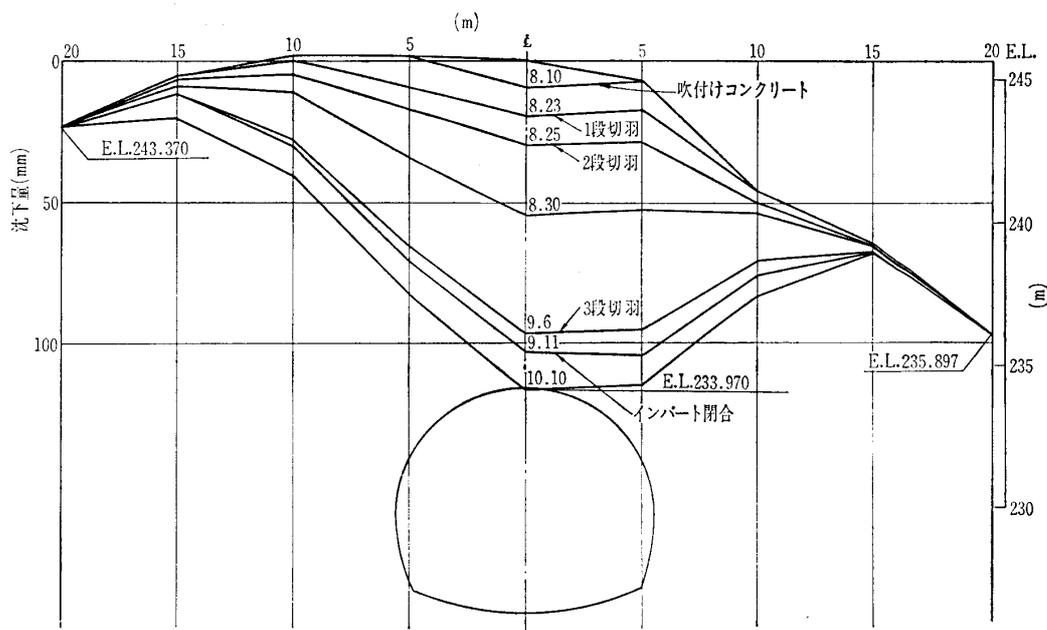


図-11 地表横断沈下（第1栗須トンネル）

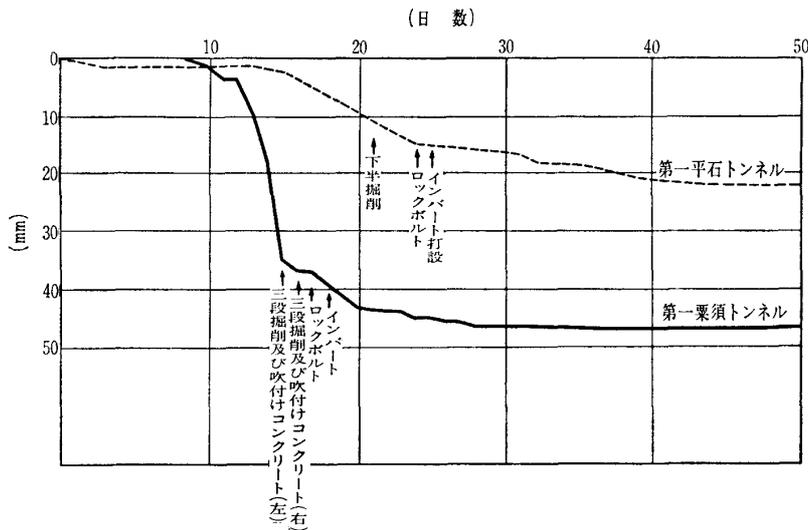


図-12 トンネル壁面内空変位

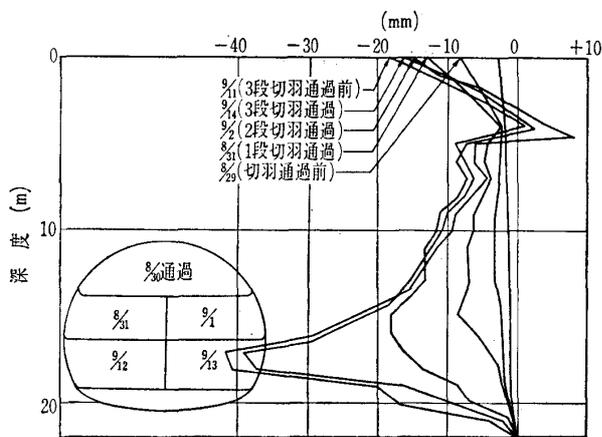


図-14 地山変位 (傾斜計)

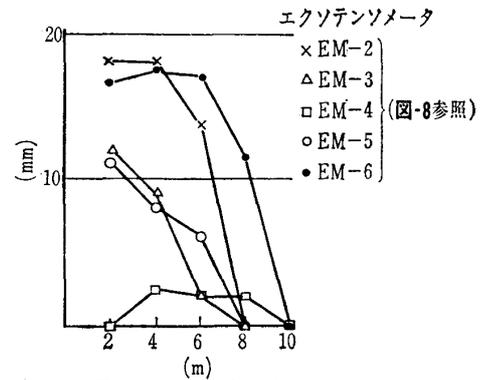


図-13 地中変位

ロックボルトの軸力分布は、第1栗須トンネルにおいて、メカニカルアンカーにより計測した。

図-16に掘削段階別の応力分布を示しており、計器の取付けは上半施工後行った。

下半切羽が接近すると斜路の影響のため、ほぼ3日前から軸力は増加し、3段掘削時に最大となる。MA₁、MA₂は下半施工後軸力はほとんど消滅するが、MA₃、MA₄はインバート施工後も軸力は残り有効に働いている。

5. まとめ

以上、東北新幹線第1平石トンネル、第1栗須トンネルの設計、施工などについて紹介した。

施工区間が短く、しかも計測についてのデータも少ないため、風化地盤への適用については、断定することは問題があるが、この山の場合有効であったと考える。

なお、設計、施工にあたっては、飛島建設KK、佐藤工業KK、J. Golser 博士、L. Muller 博士はじめ、関係者

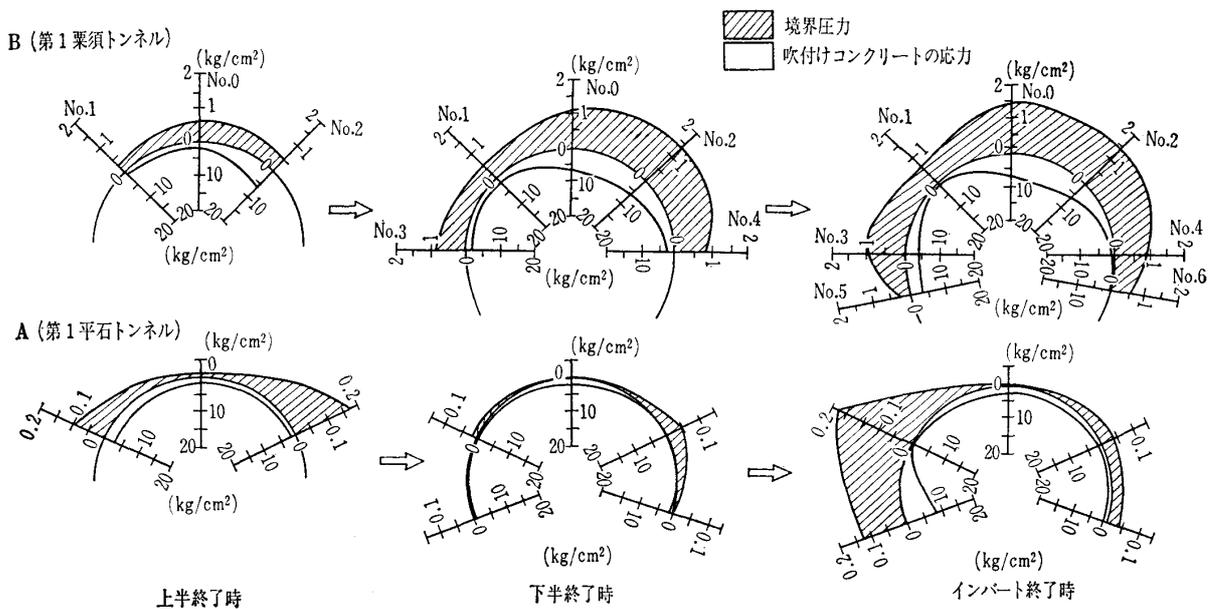


図-15 境界圧力及び吹付けコンクリートの応力

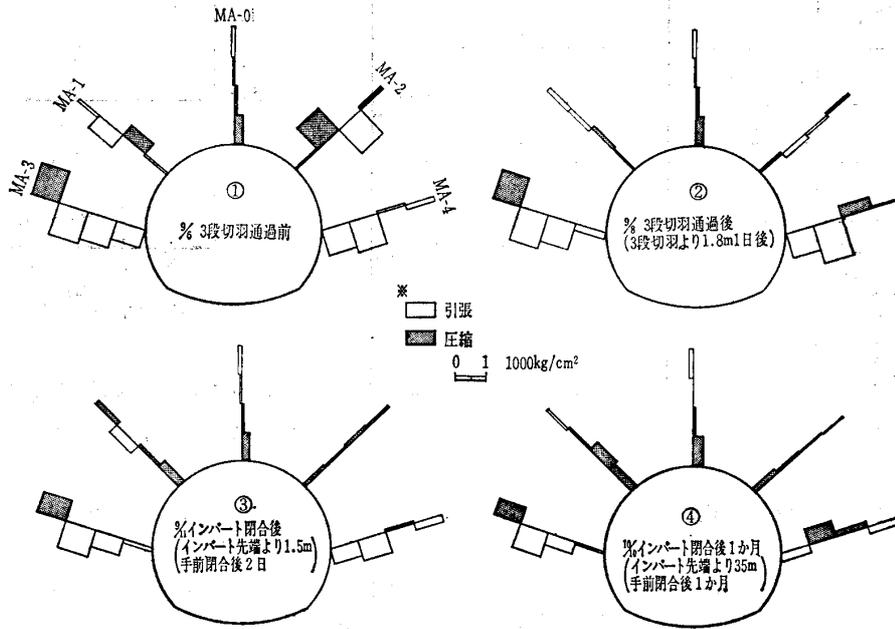


図-16 ロックボルトの軸力 (メカニカルアンカー)

各位の絶大な協力を得たことに感謝する次第である。

(原稿受理 1979. 5.19)

学会発行図書案内

入門シリーズ2

土質・基礎工学へのコンピュータ利用入門

B 6 判 277ページ

定価 2,500円 会員特価 2,000円

発行：土質工学会

東京都千代田区神田淡路町2-23(菅山ビル4階)
〒101 電話 03-251-7661(代)