

浅い特殊大断面アーストンネルにおける縫地及び NATM による施工

住宅・都市整備公団 木村俊一 正会員

〃 〃 〇永井隆吉 正会員

熊谷組技術研究所 上野正高 正会員

応用地質調査事務所 近藤達敏 正会員

1. ま え が き

一般に、多くの難しい制約条件を抱えている都市部のトンネル建設において、工法選択の余地が少ない場合は、弾力的な対応を阻み、結果的には困難で不経済な工事を行なうことになりかねない。その意味で、僅か5ヶ年程の間に岩トンネルを中心に著しい成果を挙げ、最近では都市部の沖積層などに対しても適用範囲を拡げ始めた NATM は、トンネル工事にとどまらず広く都市土木全般に対する応用の可能性を広め、また現在の物量一辺倒の設計思想を振返る好機を与えらると思われる。

今回報告する工事内容は、大断面トンネルのY字型会合点、土被りは5m、更に将来は10m前後の高盛土といった、本来ならば開削工法による施工しか考えられないであろう施工条件に対し、NATMと縫地ボルト工法との組合わせによって成功したことで、いわば工法を選択肢を造り得たと思われる。本報告は、これらの既要と現場計測結果から得られたアーストンネルにおける地山の動向、及び将来盛土に対する安全確認のため行なった逆解析結果の一部を紹介するものである。他に、岩以外では我国で初めて施工した立坑 NATM も触れた。

2. 工 事 概 要

我国最大の新都市「多摩ニュータウン」の約1割を占める稲城地区(300ha)開発のための雨水処理策と、三沢川の治水対策を兼ねて、全長2670mの大規模トンネル河川「三沢川分水路」が建設中である。

今回の施工箇所は、ニュータウンの雨水を流集する2系統の下水道幹線的一方である尾根ルートが分水路に合流する、尾根ルート合流工である。本合流工は、40m³/sの雨水を高さ13m間一気に落下させて減勢する、深さ17mの円筒型立坑部と、分水路に連なる約30m長の支流部(48m²)、及び施工済区間にはさまれた34mの分水路本流部(84m²)から成り、流量変化点でもあって全体に変則的な形状を呈している。

当該区間全体の土被りは約5m(小川の交差部分では2.5m)と非常に薄いに、将来の造成計画上長大法面下に位置し、5~14mの盛土が予定されており、トンネル覆工はこれに対しても安全でなければならない。

3. 地 質 概 況

稲城市周辺は、新第3紀に属する層厚100m近い細砂層、稲城砂で大部分が構成されており、走向は水平に近い。

施工箇所は、関東平野にせり出した多摩丘陵の先端に近く、丘陵に刻まれた小さな谷部に位置しており、分水路の着工前は水田であった。地質は、地表から順に、①ヤード用埋土層(層厚2m)、②腐植土層(1.5m、N値5)、③沖積砂礫層(1.5m、N値15)

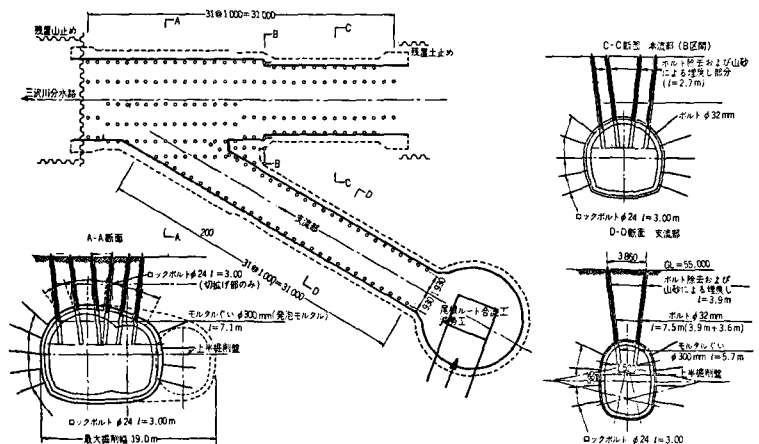


図-1 縫地ボルト工法、NATM概要図

③ 緩い砂層（3 m、N値20）、⑤ 締った砂層（以深、N値30～50）となっており、切羽は主に④、⑤となっている。

地下水位は地表付近にあったが、9本のディーブウェルによる群井で、④まで下げた。

4. 設計計画

基本的にはFEMによる弾塑性解析を行ない、2段ベンチカットの各段階毎に応力解放する形で算定した。地山物性値は、安全側に表-1の値を用いた。悪条件が重なっていることを考慮して、覆工計算に当ってはFEMの他に平面骨組構造解析（Winkler地盤モデル）によっても検討し、大きい値を示した後者の方で断面を算定した。地盤反力係数は、NATMによる地盤改良効果を考慮し、3倍近い15 Kg/cmとした。

なお、覆工計算に際しても、NATMを施工し得た時点で盛土がなければ安全率は1.0以上という観点から、吹付・支保工を複鉄筋断面の片側で分担させ、表-2の通り、本覆工は実質単鉄筋とした。

5. 縫地ボルト工法

土被りの少ない軟弱層で広幅の掘削をすることによる陥没等を防ぎ、変位量を小さくするため、アーチ部はロックボルトに換えて、予め地表から打設出来る縫地ボルト工法を採用した。本工法は、崖錐地帯の坑口部などにおいて、切羽安定の目的に地送り抑止効果も兼ねて、地表からボーリング削孔により網目状にボルトを打設する工法である。

今回は更にセリ持ち・支保効果を上げるため、7°の傾斜をつけたφ300のアースオーガーによってSL近くまで削孔し、貧配合モルタルを注入後、φ32ネジバーをアーチ部まで挿入した。拡幅部については補強のため底盤まで削孔し、H-150を挿入した。また、将来の高盛土による覆工への応力集中を避けるため、モルタル注入はすべて3m深付近までで残りは発生土埋戻しとし、ボルトも施工終了後はここで除去可能なように継手を設けた。分水路既施工部で在来工法で施工した緩い砂層の切羽は、非常に不安定であったが、縫地ボルトでは切羽の返りは見られず、効果は顕著であり、余掘量、沈下量の低減につながった。

6. 立坑 NATM

立坑部（減勢工）は、アーストンネルでは初めてNATMのみで施工した。すなわち、地表から1掘進長1.5m毎に20cm吹付後、4mのロックボルトを水平方向に2mピッチで打設し、切梁やプレートなど一切無しで16mの深さまで繰返したものである。

計測は内空変位のみであったが、変状やクラック等は全く認められず、極めて安定していた。本工法は、湧水に弱い点を除いては、変状が少なく安全で作業性良好、経済的、工期短縮可能など利点が多く、今後、都市土木で積極的に採用する価値ありと思われる。

7. 計測

計測は、図示の2断面で行なった。これらとは別に、覆工内面の歪と曲率変化を計ることで構造物にかかる外力等を

表-1 地山物性値一覧表

	表土	沖積粘性土	砂 礫	礫 砂層
単位体積重量 (t/m ³)	1.8	1.8	1.8	1.8
ポアソン比	0.4	0.4	0.35	0.3
引張強度 (Kg/cm ²)	0	0	0	0
弾性係数 (Kg/cm ²)	15	15	150	130
粘着力 (Kg/cm ²)	0.015	0.55	0.015	0.2
内部摩擦角 (度)	30	1	35	30

表-2 構造計算結果

	吹付厚	全体壁厚	主鉄筋	配力筋
本覆部	20cm	70cm	D16 etc 30cm	D13 etc 40cm
支保部	15cm	55cm	D16 etc 30cm	D13 etc 40cm
合流部	20cm	90cm	D22 etc 30cm	D16 etc 40cm

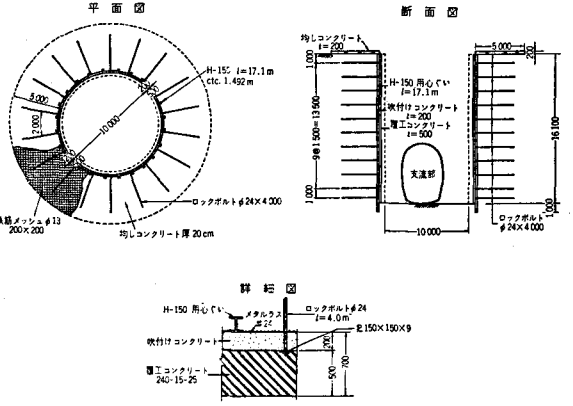


図-2 立坑 NATM 施工図

厳密に把握可能な、カーボメータ、デフォメータ、デフォメータによる計測も現在進めており、近く行なう2m厚の試験盛土の値によって、高盛土時の安全性を確認する予定である。

(1) 地表面沈下

図-3に例示の通り、切羽到達による変位量は、概ね最終値の10~20%と、軟弱層にもかかわらず理論値を大巾に下回ったことは、縫地ボルトの効果によるものであろう。なお、施工手順上、NATMの鉄則であるインバートの早期閉合をしなかったが沈下が進んでいない。これは、被りが少なく下半部が塑性化しなかったことと適切な施工法により、下半掘削時で既に地山が安定していたためであろう。

また、先行トンネルのグランドアーチが後行掘削によって消滅すると報告されているため小幅な支部部を先行したが、その影響が沈下極の支部部寄り、支部部沈下量の大きさなどに現われている。

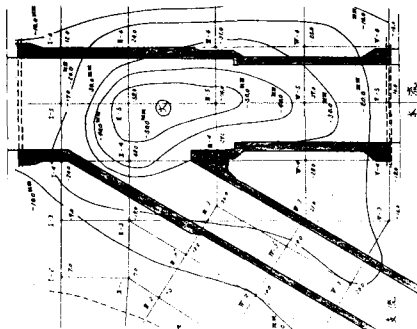


図-5 等値線図

(2) 縫地ボルト軸力測定

今回の特殊性として、切羽到達前後の挙動と近接掘削の影響をつかめた事である。各切羽到達直前に著しい圧縮を受け、通過直後に反転して圧縮力が解放されている。これは、切羽前方が三軸応力状態であるのに対し、後方は次第に二次元的応力状態に移行すること、垂直応力は切羽が近づくにつれ増加し、特に切羽面先端付近で著しく圧縮されるという、丹羽ら³⁾の三次元的挙動に合致している。

この点からも、縫地ボルト工法は、理想に近い効率的な支保であると云えよう。

(3) 地中変位

FEMによるトンネル上部の平均歪が約1%に対し、実測地中変位から求めた歪は0.1%と極めて小さかったことは、上部層の沈下、FEM物性値の過小評価が原因と考えられ、実際、破壊歪には達していないであろう。

(4) グランドアーチの推定

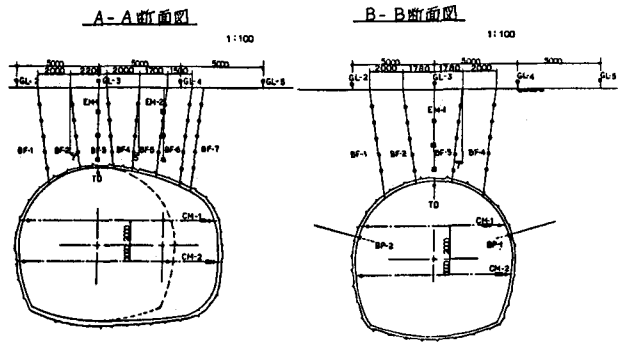


図-3 計測計画図

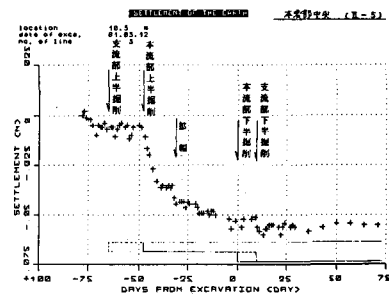


図-4 沈下計測結果例

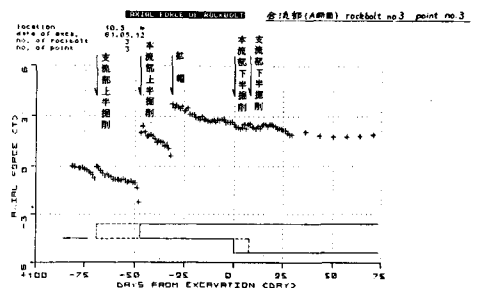


図-6 軸力計測結果例

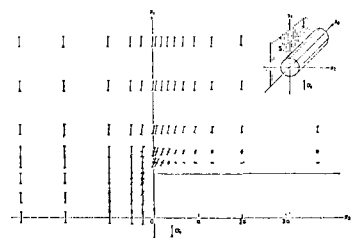


図-7 円孔まわりの応力分布
(面内応力成分の流れ)

軸力データの施工前と最終値をプロットし、地中変位による歪分布を参考に、引張側解放の最大点を包絡して求めたグランドアーチ推定線を、合流部で代表して図-7に示す。本流部はこれより約1m低かった。悪条件下にもかかわらず、地表面に達しないグランドアーチが形成出来た。

8. 逆解析

各計測データの純粋性を検討の結果、天端沈下量を逆解析の主対象とし、A断面で行なった。沈下量Sを経過日数Dの指数関数で近似的すると、 $S = 35.19 \times (1 - e^{-0.0609D})$ mm

これから、計測開始前の初期沈下量は、 $S_0 = 12.54$ 、全沈下量は、 $S_T = S_0 + S = 47.73$ mmとなる。

覆工のモデルとしては、1次、2次吹付コンクリート（厚20cm）はビーム要素で、増し吹き（20cm）、覆工（50cm厚）は四辺形平面要素で取扱い、支保工は増吹きコンクリートの剛性に加算した。

施工段階のモデルは、切羽到達時と掘削終了時を別々に内部応力を等価節点力に換算して、厳密に解析した。物性値は、砂層のみを妥当と思われるケースで変化させ、緩い砂と締った砂とに別けてFEM計算を行なった。結果は、ポアソン比 $\nu = 0.30$ 弾性係数Eは緩い砂で 300 kg/cm^2 、締った砂で 500 kg/cm^2 とするのが最も実測値に近く、妥当と思われる。

9. 盛土に対する安全性について

三軸試験結果に基づき、側圧のない場合の稲城砂の破壊歪を求めるに $\epsilon_1 = 1.0\%$ となり、最小主歪 ϵ_2 がこれを上回ると地山破壊を生ずる。

10mの盛土を施工した場合のFEM計算による地山歪図を示したが3ヶ所でそれも僅かであり、問題とならない。他に、覆工コンクリート応力に対しても、今回のFEMによる再計算を行なってある。

10. あとがき

軟弱地盤において、開削トンネル工法以外では不可能視されていた難かしい施工条件に対し、綿密な検討のもとに進めた設計と、慎重過ぎる位の施工に依り、成功を治めることが出来た。この度の浅い経験で強く感じた事は、現在の土質工学中心の都市土木の分野において、岩盤力学的発想が非常に大切であり、いわゆる地山の力をもっと積極的に活用する弾力的な考えを取り入れることが必要であるということである。今回得られたデータ関係と新しい施工法は、この意味で今後の都市土木に多少は貢献し得ると思われ、特に普通土で我国で初めて試みた立坑NATMについては長所が多く、理にも適っており、今後立坑のみならず地下タンクなどへの適用は充分可能で有利であると思われる。また、縫地ボルト工法についても薬液注入工法よりもはるかに効果的で安価であり、応用は広い。さらに、データ等も貴重な結果として得ることができた。

最後に、今般、適切な御指導を賜った分水路工法委員会の福岡委員長はじめ委員各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 松田・池田・永井；三沢川分水路建設工事，土木施工，Vo.122，No.11，1981
- 2) 桜井春輔；計測の意義と実際，'81トンネル技術講演会テキスト，1981
- 3) 丹羽，小林，福井；積分方程式による空洞周辺の三次元解析，土木学会論文報告集，第266号，1977
- 4) K. Kovari 他；トンネルに作用する岩盤圧力推定のための統一的計測技術，1977国際シンポジウム
- 5) Dr. Müller；Berechnungen modellversuche und in-situ-messungen bei einem bergnännischen vortrieb in toigem underground

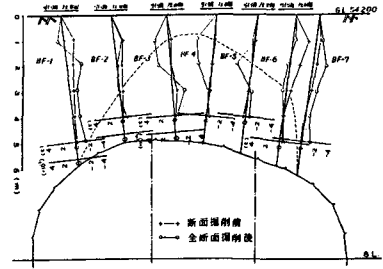


図-8 ロックボルト軸力図および歪図

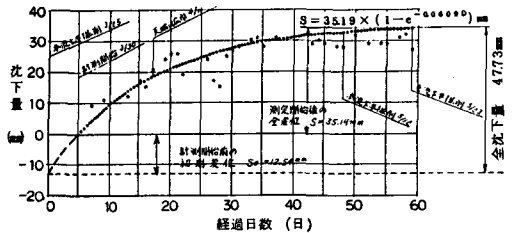


図-9 A断面本流部天端の実測沈下量（II-5測点）

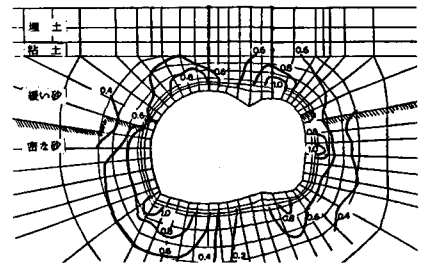


図-10 最小主ひずみ(ε2%)図(10m盛土時)

Large and Peculiar Shape Earth Tunnel Construction in Shallow Depth
by the Vertical Anchor Method and NATM

S. KIMURA
T. NAGAI
Housing and Urban Development Corporation
M. UENO
Kumagai Gumi Co., Ltd.
T. KONDOH
OYO Corporation

1. Vertical Anchor Method (VAM) and NATM

These methods were adopted to the special works where two different section of large scale river tunnel in Tama New Town met each other at an angle of 30 degrees.

Conditions of this construction are following:

- 1) Cross section of tunnel excavation; $84\text{m}^2 + 48\text{m}^2$, max. 160m^2
- 2) Geology; 5m thick from the surface of the ground, and to the crown is alluvial deposit. The upper surface of tunnel excavation is loose sand formation, and the lower is firm.
- 3) Filling plan over about 10m thick is determined for New Town Development.

According to many difficult conditions, VAM was to be employed to prevent deformation and subsidence. Before the NATM excavation, numerous holes are bored reticulately until S.L. in vertical from ground surface, and poor mortar is poured into each hole, and then, single steel bar is inserted.

It has proved to be very effective for stability of tunnel face and decrease of deformation by regarding the actual results of measurements.

Especially the result about axial force of anchor bolts is interesting by reason that gauges of pre-set bolts indicates before excavation. The result of turning over from compression before arrival of surface to tension side immediately after passing in every date of axial force, it is possible to consider transition of three dimensional stress around a cavity.

2. NATM in Shaft

NATM in Shaft is adopted for the first time in Japan for earth tunnel adjacent to shaft, 16m in depth, 11m in diameter. This method has many advantages of stability, economy, safety, goodness of working, and shortening of period.