

(74) 超膨張性地山における導坑計測とその評価

日本鉄道建設公団 正会員 土居 則夫
正会員 服部 修一
正会員 ○鈴木 恒男

Tunnelling in Extra-Squeezing Grounds and Result of Measurements
in Advancing Drift

Norio DOI
Shuichi HATTORI
Tsuneo SUZUKI

Japan Railway Construction Public Corporation

Abstract

The excavation of the Nabetachiyama Tunnel encounters serious difficulties, which is to penetrate through extra-squeezing mudstones in the Neogene Period. To cope with frequent failures of the primary linings due to squeezing pressures, the tunnelling had to be converted from the short bench method to a central advancing drift.

This paper reports the design of supports, excavation method and some measurements of the behaviour in the central advancing drift. The paper also deals with the concept of a tunnel boring machine for the central drift, the manufacture of which is now under way.

1. はじめに

鍋立山トンネルは、上越線六日町より信越線犀潟へ至る北越北線のほぼ中央に位置する、延長9117mの単線鉄道トンネルである。このトンネルは、新第三紀の超膨張性を呈する軟弱泥岩帯を貫いており、さらに可燃性ガスが湧出するという条件も加わり、施工は極めて難渋している。本トンネルでは図-1に示すように、上半仮インバートにより一次閉合を行うショートベンチ工法および、地山の潜在応力の一部を開放することにより、支保に作用する応力を軽減することを目的とした導坑（外径3m）を上半に3～4m先進させる導坑

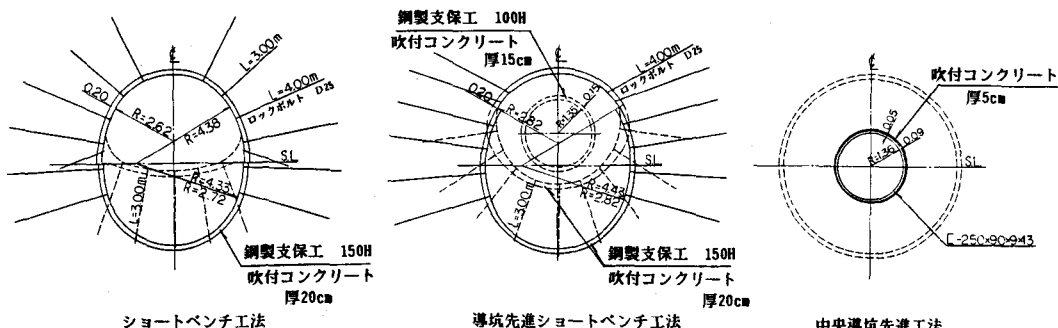


図-1 トンネル支保パターン (導坑人力掘さく)

- 367 -

コンベアを介して鋼車に積み込み坑外へ搬出する。掘さく後、直ちに鏡および側面に吹付コンクリートを施し、地山の肌落ち、ゆるみを防止した後、天端からの崩落防止、鏡の安定化を図るため先受工(L=3m FRP製)を一断面8本、鏡押えロックボルト(L=3m)を一断面4本それぞれ打設して1サイクル完了となる。(図-4)掘さくに伴う鏡の押出し量は、一サイクル25cm当たり、最大 300cm、通常で50~100cmである。

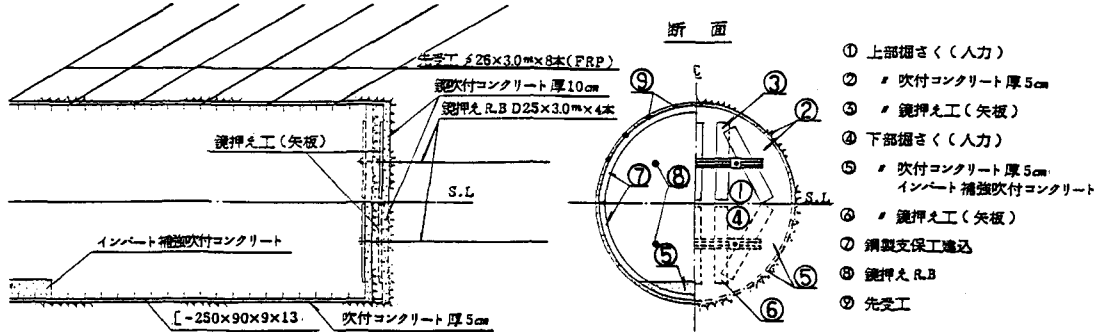


図-4 中央導坑施工順序

4. 計測

計測は施工の安全性を確保するために不可欠であるが、導坑施工段階においては支保材の機能把握に主眼を置き、内空変位測定を5m間隔で、支保への作用土圧および支保の応力測定を20~40m間隔でそれぞれ実施するように計画した。また、導坑掘さくによる周辺地山への影響を把握し、本坑切掘時の設計、施工法の検討資料とするために密度水分検層、地山中に賦存する可燃性ガス圧を把握し、膨圧との因果関係の調査および施工の安全性の確認を行うために、ガス湧出圧測定を実施している。

1) 内空変位測定

導坑の内空変位(図-5)は、支保材が比較的剛なため天端沈下量が最大15mm、SL水平コンバージェンス量で最大25mm程度と小さな値となっている。変位は概ね内空側への値が測定され約5日で収束に向かい、その時点の切羽の離れは1~1.5 D (D:掘さく径3m)である。

2) 背面土圧測定

支保背面に作用する土圧(図-6)は、25~30kgf/cm²であり、地山の単位体積重量より土被り厚さに換算すると130~160mに相当し、この位置での実際の土被り150mに匹敵する。すなわち、導坑支保に全土被り圧が作用していることになる。これは支保材が比較的剛で横断方向の変形を拘束していることと、地山自体の強度が地山の潜在応力に比べ、極めて小さいためと考えられる。土圧は支保工建込後急激に増加し、内空変位と同様に切羽からの離れが1.5D前後で収束に向かっている。

3) 支保工応力測定

図-7に支保工の断面力分布を示す。これは、支保工

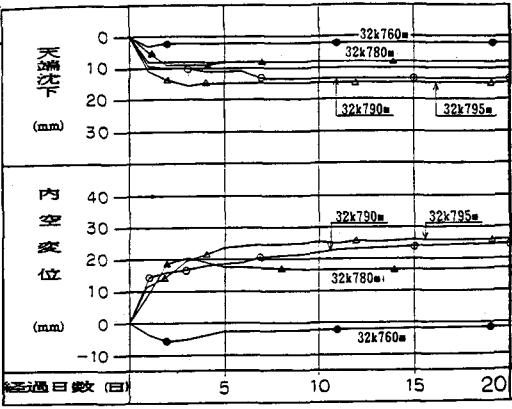


図-5 内空変位経時変化

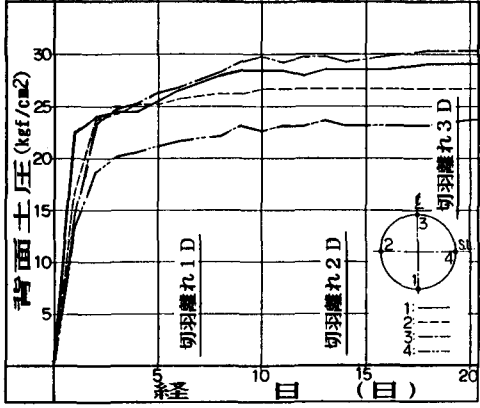


図-6 背面土圧経時変化

([-250]) のフランジおよびウェブに貼り付けられたひずみゲージにより応力を求め断面力を算出したものである。軸力は1リング25cm当たり50~100tfであるが、背面土圧測定結果より土圧を27kgf/cm²として軸力を計算すると90tf程度となり概ね一致する。曲げモーメントは-0.6~0.6tf・mであるが、この値は側圧係数(側方土圧/鉛直土圧) $K=0.95$ または1.05に相当するもので、ここでは極めて静水圧状態に近い土圧分布となっているものと推定される。

支保の安定性について計測結果に基づいて考察すれば、支保耐力の面からは図-3および図-6より支保材はほぼ降伏状態にあると考えられる。また、支保工応力の面からは、図-8に支保工の外縁と内縁の応力分布を示すが、この図から降伏応力を越えている箇所が一部存在することがわかり、これは支保耐力の検討結果と符合する。しかし、内空変位、外荷重共に収束状態にあり、かつ当該位置における支保の変状は見られないことから、支保の部分的な降伏は存在するが、支保全体としての安定は保たれているものと判断される。

4) 密度水分検層

ラジオアイソトープ(RI)を利用した密度計および水分計を用いて、予め設置しておいたケーシングパイプ内より深度25cm毎に検層を行った。図-9に検層結果の一例を示す。導坑近傍では乾燥密度、湿潤密度が小さく、含水比が高い分布を示している。これらの分布より導坑掘さくが地山の物性に影響を与えた範囲は2.5~3.0mと推定される。

5) ガス湧出圧測定

図-10に導坑内で実施したガス湧出圧経時変化を示す。測定は先端50cmがストレーナー管となっているガス収拾管(ガス管15A、 $L=3.0$ m)を導坑壁面より半径方向にさっ孔されたボーリング孔に挿入、クーキング後圧力ゲージで行った。ガス圧は40~70日で平衡状態となり、その最大圧力は16kgf/cm²に達し、静水圧15kgf/cm²と同程度の高圧のガス圧が地山中に胚胎していることが確認された。

図-11に本坑で実施したガス湧出圧測定結果を示す。これは本坑壁面より16m, 13m, 10m, 7m, 4mのボーリングを行い、導坑と同様な方法で測定したものである。ガス圧はトンネル壁面より深くなるにつれ増大する傾向にある。地山に胚胎するガス圧が静水圧と同程度であると考えれば、トンネル掘さくによりガス圧が影響を受けた範囲は、トンネル壁面より15~20m(トンネル径の2.5~3.0倍)

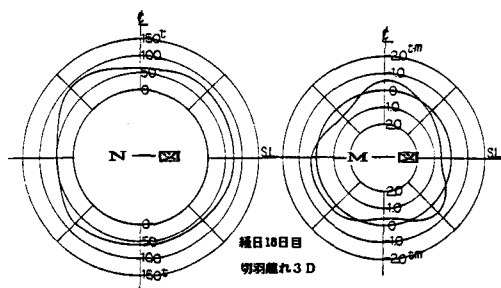


図-7 断面力分布

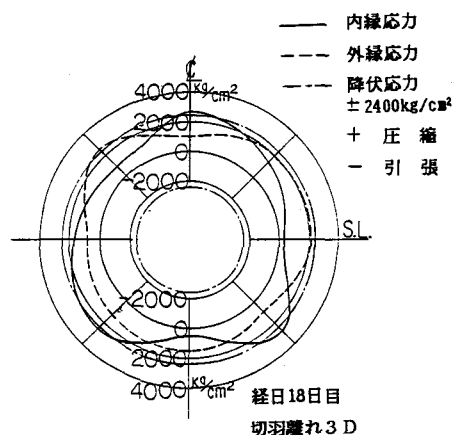


図-8 縁応力分布

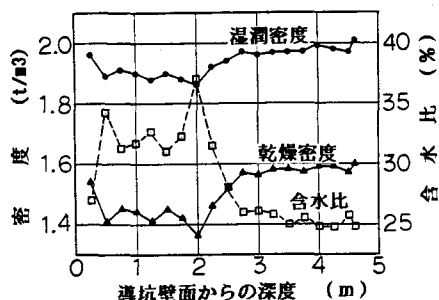


図-9 密度水分検層結果

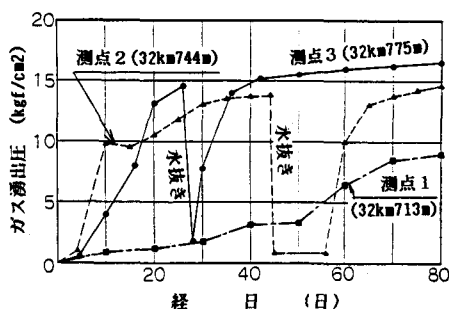


図-10 ガス湧出圧経時変化(導坑)

と考えられる。

6) 導坑補強鉄筋ひずみ測定

現在、中央導坑掘さくを中止しミニベンチ工法（ベンチ長1.5～2.0m）による本坑切掘げ掘さくを行っているが、これに先立ち本坑切羽押し出しに伴う導坑縦断方向の引張力に対する抵抗を高めるため、鉄筋コンクリート（厚70cm, D32-100本）による導坑補強を行った。図-12は補強鉄筋のひずみ測定より導坑に作用している引張力を算出したものであるが、切掘げ掘さくに伴う引張力は2800tfに達し、導坑施工の主目的である本坑切羽安定保持としてのアンカー機能を十分に果たしているものと考えられる。

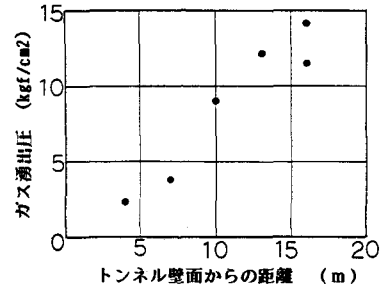


図-11 ガス湧出圧分布（本坑）

5. 導坑用トンネル掘進機の開発

人力による掘さくでは、その掘進スピードには自ずと限界があり、鏡の押し出し速度が早い場合には支保工を建込む空間の確保が困難となる。また、支保工は建込直後から大きな土圧を受けるため、導坑の真円保持、方向制御が難しい。そこで、掘さく効率を向上し正確に支保を建込む必要性から、導坑用トンネル掘進機（TBM）の開発を行うこととなった。（図-13）本トンネルにおけるTBMの特徴としては、導坑計測結果および地山性状を考慮し、次のようなものが挙げられる。

- ① 鏡の異常押し出し等不測の事態に備え、シェルと掘進部は分離構造となっており、掘進部は後方へ退避できる。
- ② シェルおよびセグメントは300tf/m²の土圧（全土被り圧）を設計荷重としている。
- ③ 強大な土圧によるシェルと地山の摩擦抵抗に対処するためシェル長が短く（L/D=0.56）、推力が3500tfと単線シールド並みである。

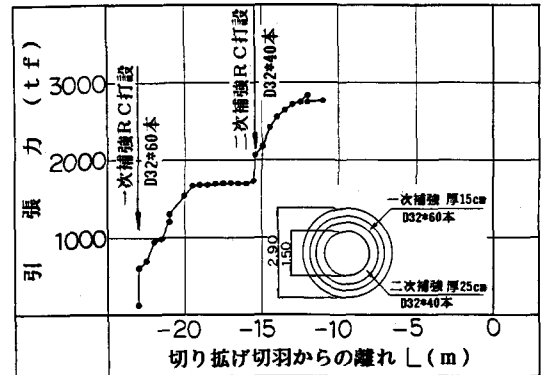


図-12 導坑縦断方向引張力

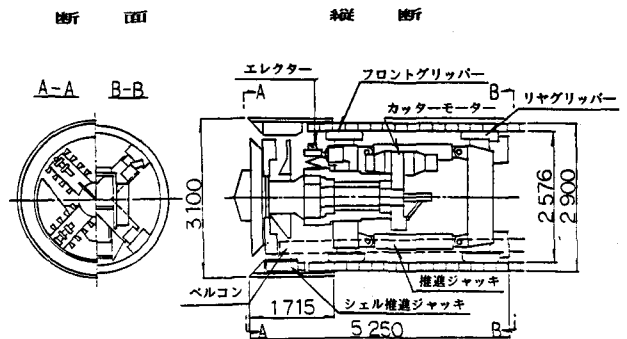


図-13 導坑用トンネル掘進機

6. ま と め

鍋立山トンネルにおける導坑計測により次のような結果を得た。

- ① 導坑支保には全土被り圧150mに相当する300tf/m²の土圧が作用している。
- ② 支保工応力は土圧測定結果を基に計算した値と概ね一致する。また、支保工には降伏応力を越えている箇所が一部存在していたが、内空変位、土圧等の収束状態から支保全体としての安定は保たれている。
- ③ 密度水分検層結果より、導坑掘さくによって地山物性が影響を受けた範囲は2.5～3.0mと推定される。
- ④ 地山に胚胎する可燃性ガス圧は、静水圧にはほぼ相当する16kgf/cm²の高圧であることが確認された。
- ⑤ 本坑切掘げ掘さくに伴う導坑縦断方向の引張力は2800tfに達し、アンカー機能を十分に発揮している。

本トンネルのような膨張性を有する地山でのTBMの導入は前例が無く、その設計、施工に当たっては未知の部分が多い。今後も安全で合理的な設計、施工法を見出すべく努力を重ねたいと考えている。