

都市トンネルを半機械式オープンシールドとNATMで施工する
CONSTRUCTION OF URBAN TUNNEL BY OPEN TYPE SHIELD TUNNELLING AND NATM

大西 正利* ・笹野 俊一** ・河上 英二*** ・渡部 隆広***
Masatoshi OHNISHI, Shunichi SASANO, Eiji KAWAKAMI, Takahiro WATANABE

This paper introduces the application of NATM to urban area, which was launched diagonally from the completed shield tunnel and situated at the shallow depth of 5~7m and in soft ground of Kanto-loam.

In order to reduce the ground settlement, we adopted several devices in the designs and construction methods on temporary supporting system.

Monitoring on ground surface showed smaller ground settlements of NATM comparing with those of shield driving.

Keywords: NATM, shield, urban tunnel, Kanto-loam

1. まえがき

野川第二幹線工事は、東京都下水道局発注の雨水幹線を築造する工事であり、武蔵野市・三鷹市・小金井市で発生する浸水被害を防ぐこと、また、現在合流式である野川第一幹線を雨水・汚水の分流式に改善するために計画・施工された雨水幹線である。

当初は、全工事区間（延長600m）が、マシン外径 $\phi 5,240$ の半機械式オープンシールド工法で計画されていたが、用地の制約上、路線外より発進することが必要となり管路の一部分の、到達までの90m区間にNATMを採用し計画・施工を行った。

本稿では、都市NATMの採用にあたり検討した内容、ならびに施工成果・計測結果について報告するものである。

2. 土質条件および問題点

施工場所は、武蔵野段丘に位置し、第四紀洪積世に多摩川の巨大扇状地として形成された地層である。地質層序は、層厚0.3~0.7mの表土下にN値2~3、層厚6~10mの立川ローム層が分布し、その下位にはN値50以上の砂礫層が広く分布している。雨水幹線は、概ね上半はローム層、下半は砂礫層の層境

* (株) 青木建設香港支店広州地下鉄1号線作業所

** (株) 青木建設香港支店MTR501工区作業所

*** (株) 青木建設施工本部土木設計部

に布設される。

計画の変更により路線外の発進立坑から上流側510mを半機械式オープンシールド工法、下流側90mをシールドトンネル内からNATMを発進し、施工する仕上がり内径 $\phi 4,250$ のトンネルである。地下水位は、トンネルインバート付近であるが、土被りが5~7mと小さくかつ、不良地質の条件下で住宅地の道路下を掘削する典型的な都市トンネルであるため、NATM区間では、地表への影響を最小限に抑制する工法での計画・施工が求められる。

また、シールドトンネル内からNATMを発進する区間では、二度の掘削により地山が大きくゆるみ沈下発生の要因となること、完全に閉じたセグメントリングの一部を切断する危険な作業であること、発進部ではNATM掘進のための作業通路を確保することなどを考慮し計画を行う必要がある。

図-1に工事平面図を示す。なお、NATMはシールド工法による再発進に比して経済的であること、切羽の自立性が期待できるため補助工法の併用により沈下を抑制できること、工法に柔軟性があり発進部の施工が比較的容易であることなどから採用に至った。

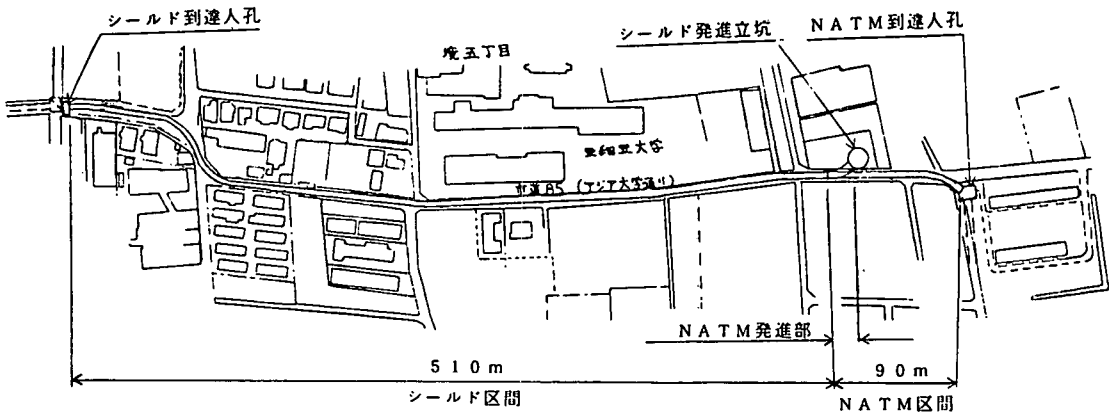


図-1 工事平面図

3. NATMの設計と施工

3.1 設計

当該工事の都市NATMでは、地質条件を考慮し沈下を極力抑制する工法で施工を行う必要があり、主な沈下の要因に対して以下の対策を講じた。図-2にNATM区間の標準断面図を示す。

(a) 切羽・天端のゆるみ

掘削に先立って長さ1.5mの鉄矢木を天端部に打設し先行地山の強化を図る。また、掘削はリングカット工法とし、鏡吹付けコンクリートにより切羽のゆるみを抑制する。

(b) トンネル支保工の変形

土被り荷重相当を支持できるよう吹付け厚15cmの剛性の高い支保構造とする。さらに支保工は、一般に使用されるH型钢では吹付け時に背面に空隙が残り易く、沈下の要因となることから鉄筋支保工を採用し、地山と密着した支保工構造を形成することにより地表面の沈下を抑制する。(図-3参照)

(c) 支持力不足

支持力を確保するため支保工にウイングリブを付け支持面積を拡大した。

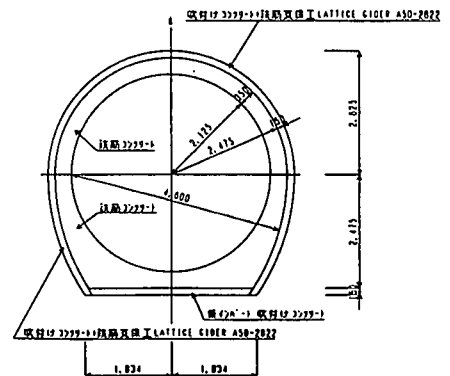


図-2 NATM区間標準断面図

(d) その他

二次覆工打設までの期間が長く、一次覆工に十分な安全率と剛性を必要とする。そのため、クラックの発生などによる支保力低下を考慮して、金網を内面と外面の2重に入れて補強する。

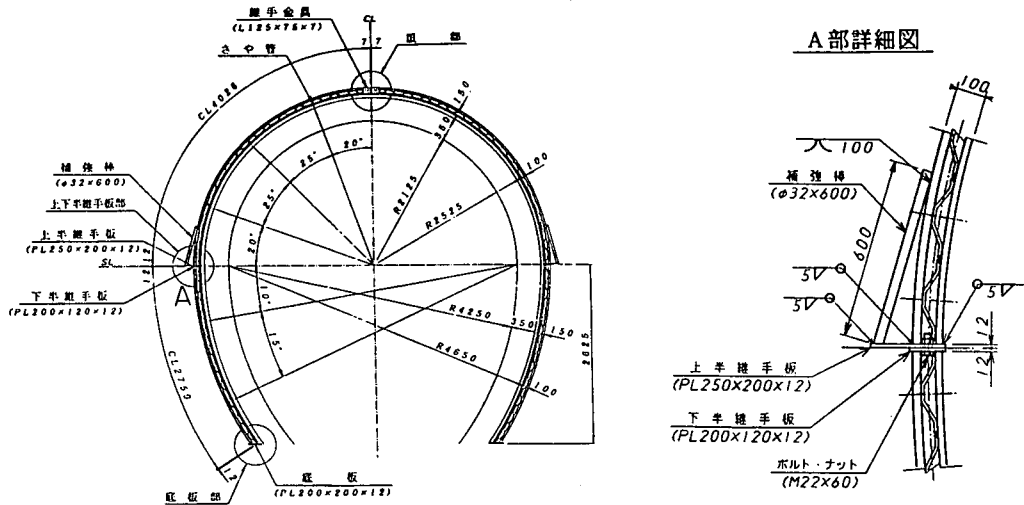


圖-3 鉄筋支保工図

3.2 施工

機械掘削方式にて上半ミニベンチで施工し、状況に応じて鏡、または仮インバートを吹付け掘削面の補強を行いながら80cmピッチにて掘進を行った。(図-4参照)

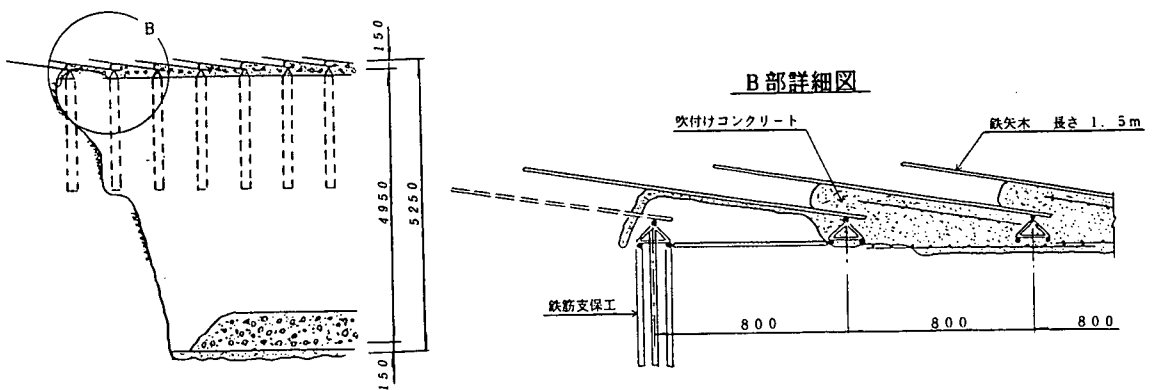


图-4 NATM施工图

3.3 計測結果および考察

情報化施工を目的として表-1の計測を実施した。

表-1 計測項目

工 法	坑内変位	鉄筋支保工 応力	吹付け 応力	地中変位	地 圧	地表沈下
NATM	○	○	○	○	○	○
シールド	—	—	—	○	—	○

図-9は、NATMおよびシールドトンネルセンターで計測した地中変位量と切羽の進行の関係をプロットしたものである。最終沈下量とトンネル掘削までに生じる沈下量の比を先行変位比率とよぶが、NATMで約30%、シールドで約40%とシールドの方が大きい。また、発生時期や量も大きく切羽をオープンにして掘削する条件としては同じであるが、NATMでは採用した鉄矢木の先受け効果やリングカット工法、鏡吹付けなどの補助工法による先行地山のゆるみ抑制効果が発揮されたためと考えられる。

最大地中変位量は、NATMで8.5mmに対してシールドは21.7mmと大きい。これは、NATMは掘削後早期に吹付けコンクリートにて断面を閉合できるが、シールドの場合にはセグメントが設置されるまでの時間が長くそれまでにゆるみや変形が大きくなることが考えられる。最大地中変位が生じる位置が、NATMではトンネル近傍の計測点であるのに対して、シールドの場合には地表に近い計測点である。これは、NATMでは早期に支保工で変形が拘束され地表にまでゆるみや変形が達しないのに対して、シールドでは変形が大きく地表までゆるみ、トンネル近傍の変形がセグメントや裏込め材で拘束されてもその上部は沈下が急速に進行するものと考えられる。また、シールドの場合掘削直後、各測点ではほぼ同じ量の沈下が発生していることなどからもうかがえる。

図-10は地中変位測定によって観測された沈下量の等しい位置を結んだ推定等沈下線図である。これより、シールドの場合には、9mの深さでも15mm以上の沈下が発生しており、沈下は地表まで達し共下がりしているが、NATMではトンネルの沈下が地表までは達しておらず、アーチを形成していることが推測される。

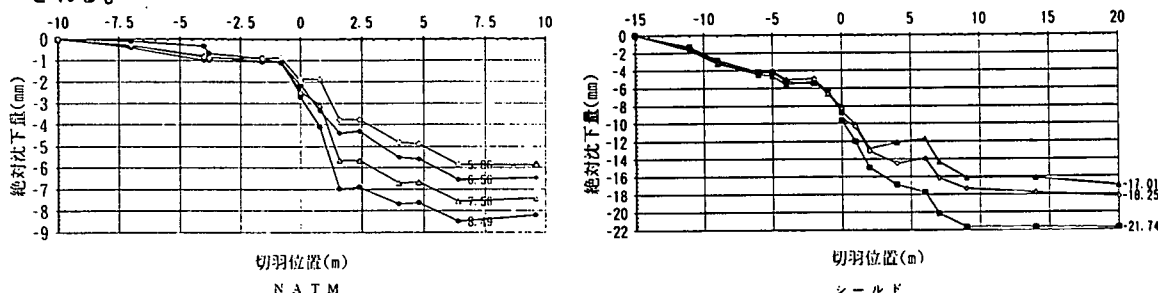


図-9 地中変位計測結果

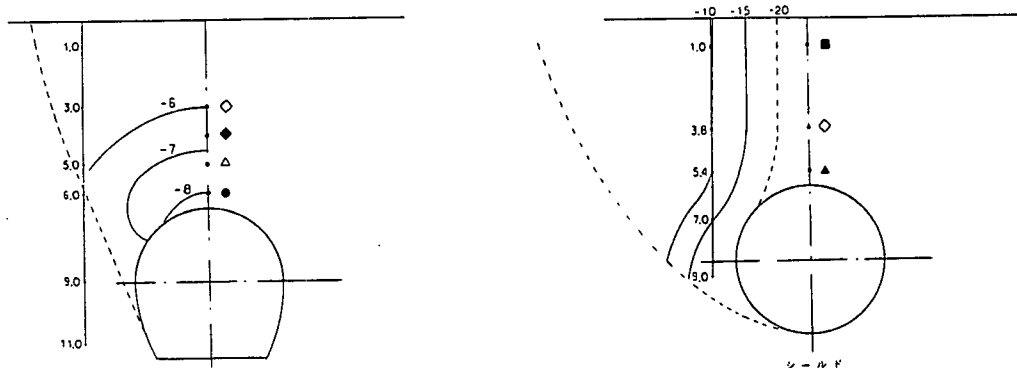


図-10 推定等沈下線図

4. NATM発進部の設計と施工

4.1 設計

図-11にNATM発進部の概要図を示す。NATMの坑内発進部は、セグメントを切断・撤去し、切り抜けてゆくこととなる。そのため、シールド掘削によってゆるんだ部分の掘削となり、また閉合されたリングを取り壊すため、地山の崩壊や過大な変形などの発生が懸念された。そこで、発進に先立って影響範囲を

(a) 坑内変位

変位計測結果を表-2に示す。天端沈下量は最大で2mm、内空変位は7mmと非常に小さい値に収まっている。

表-2 内空変位・天端沈下一覧

計測断面	NO.15	NO.25	NO.35	NO.45	NO.68
測定項目					
左斜L	0.34	0.92	-1.23	-1.91	-1.90
右斜R	-0.84	-0.24	-0.85	-1.28	-1.57
内空変位(㎜)					
上半水平U	-0.68 (0.014)	-0.76 (0.015)	-2.30 (0.015)	-1.38 (0.028)	-2.75 (0.055)
下半水平D	-0.31 (0.006)	-0.18 (0.004)	-3.56 (0.071)	-4.86 (0.097)	-7.24 (0.145)
天端沈下T(㎜)	-2 (0.08)	-2 (0.08)	-2 (0.08)	-2 (0.08)	-2 (0.08)

内空変位 -縮小 +拡大, 天端沈下 -沈下 +隆起, ()内は壁面ひずみ%

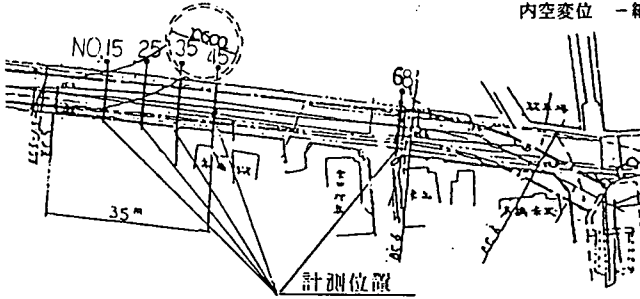


図-5 計測調査位置図

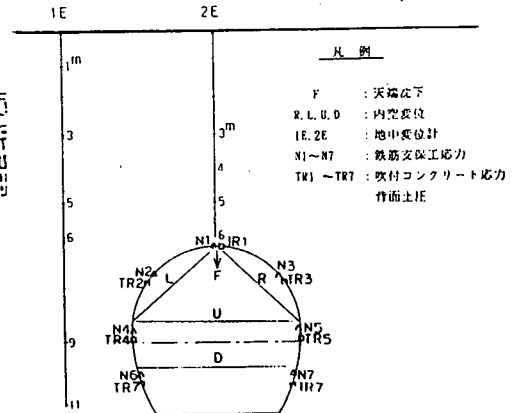


図-6 計器配置図

(b) 支保工応力

・鉄筋支保工応力(図-7参照)

脚部で軸力が抜ける傾向にあるが、全体的に均等な軸力分布を示しており、十分な支保効果を発揮していることが推測される。また、曲げモーメントも十分に小さく、鋼アーチ支保工を使用した際に見られる局部的な曲げも発生せず、空隙の少ない吹付けと一体化した支保構造が得られていると考えられる。

・吹付けコンクリート応力(図-8参照)

土圧分布および応力分布からやや偏圧傾向が見られ、背面土圧としては、 10 t/m^2 以内と推定される。単位奥行き当たりで考えると、鉄筋支保工の軸力が、約12.5t、吹付けコンクリートの軸力が約8tとなり全体で20.5t、土圧に換算すると 8.0 t/m^2 、緩み高さにして5.7m程度と推定される。

支保工応力から推定される土圧と背面土圧測定で観測された土圧は、ほぼ近い値と考えられ、土被りに近い土圧が作用しているものと考えられる。

支保工の荷重分担率は、鉄筋支保工が60%、吹付けコンクリートが40%となり、鉄筋支保工の軸力分担がやや大きくなっている。

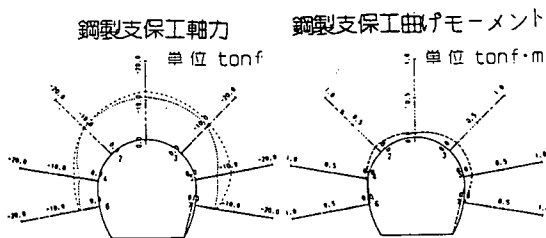


図-7 鉄筋支保工計測結果

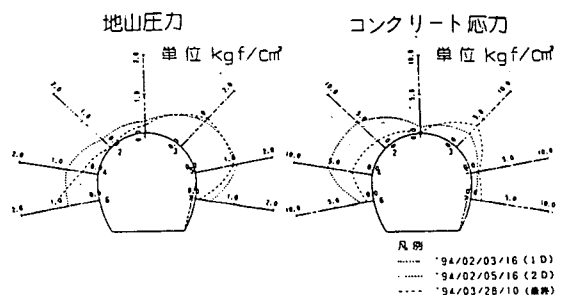


図-8 吹付けコンクリート応力・背面土圧測定結果

(c) 地中変位測定

ジェットグラウト工法により門型に地盤改良を行った。

また、RC構造の補強コンクリートを設置し、地盤改良の中間支点とすることで改良厚を軽減するとともに、NATM発進時のセグメントの切断に対するセグメントリング補強とした。加えて、補強コンクリートは、NATMの施工によるズリ搬出や材料搬入の作業空間を確保するよう計画を行った。

4.2 施工

発進部交差部の施工では、セグメントの一部撤去、掘削、支保工の設置、吹付けと狭い坑内で煩雑な作業が繰り返され、沈下を抑制するためにはこれらの一連の作業を迅速に行い、トンネルを早期に閉合することが重要である。このため、補強コンクリートのNATM側には、支保工を簡単に支持できるよう鉄筋支保工受けを設け施工性の改善を図った。

また、狭い坑内では、鉄筋支保工は軽量であり作業性が向上し、安全性・信頼性を高めた。

4.3 施工及び計測結果

事前に地盤改良を行ったため、セグメント撤去時、拡幅掘削時の自立性は良く、ゆるみや地山の崩壊による押し出し等も発生せずほとんど地表に影響を及ぼすことなく施工できた。

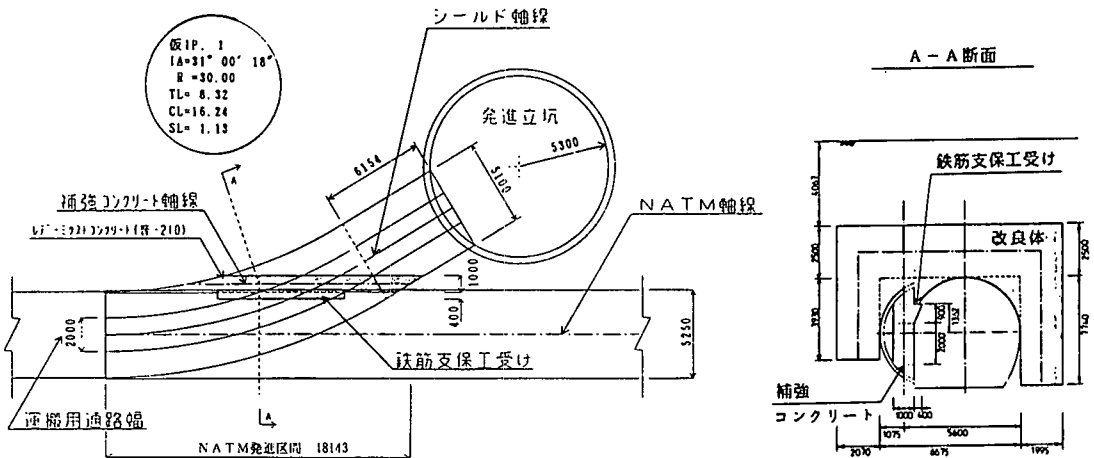


図-11 NATM発進部概要図

5. おわりに

開放型のシールドに比べてNATMの沈下抑制効果は、はるかに高く当該工事のような比較的自立性の良い地山条件下では、適切な補助工法を併用することによってNATMは有効な都市トンネルの工法となることを確認することができた。

また、シールドトンネル内からのNATM発進部では、補強コンクリートを設計・施工することにより、従来のトンネル交差部で複雑に支保工を配置するのに比べ、施工性が改善されるとともに、作業通路の確保も容易になり、狭い空間内での作業の安全性が高まった。

今後は、特に都市部を中心に様々な制約条件から、今回のような工事の増加が予想され、地質条件によってはNATMの利点を活かした合理的な施工が可能になると考えられる。

最後に、当工事の設計・施工にあたり、ご指導・ご協力いただいた東京都下水道局流域下水道本部の皆様深く感謝の意を表す次第である。

6. 参考文献

- 1) 桜井春輔・足立紀尚：都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版，1988．
- 2) 高山 昭（監修）：NATMの理論と実際，土木工学社．