

大口径先行脚部改良による都市トンネルの設計と施工

The construction of the urban NATM by the foot reinforcements

大森 満¹⁾・横尾 敦²⁾・高橋晴景³⁾・大屋博史³⁾・有金正義⁴⁾

Mitsuru OMORI, Atsushi YOKOO,

Harukage TAKAHASHI, Hiroshi OYA, Masayoshi ARIGANE

The Mito tunnel constructed by the NATM is a national road tunnel, which drives through the center of Mito city. The tunnel of the large cross-section over 100 square meters is under the condition of the thin overburden from 6.6m to 11.8m, and is required the prudent controls of the surface settlement, as well as influences on buried lifelines and the surrounding building structures. Moreover, rational countermeasures for the ground water should be adopted to cope with a gravel aquifer in uncemented ground layers.

At the site of the urban NATM with strict regulations, foot reinforcements with large diameter, longer steel forepiling, and cutoff walls are introduced. This paper mainly describes the verification of the monitoring and construction results by practical supplementary methods.

Key Words: urban NATM, foot reinforcements, longer steel forepiling, cutoff walls

1. はじめに

近年、都市トンネルにおいて NATM を適用する事例が増加しており、周辺環境への影響を抑制する目的でアンブレラ工法のような様々な補助工法が採用されている。本工事は市街地の幹線道路直下における低土盛り、大断面の NATM による都市トンネル工事であり、工事概要に示すように極めて厳しい施工状況である。

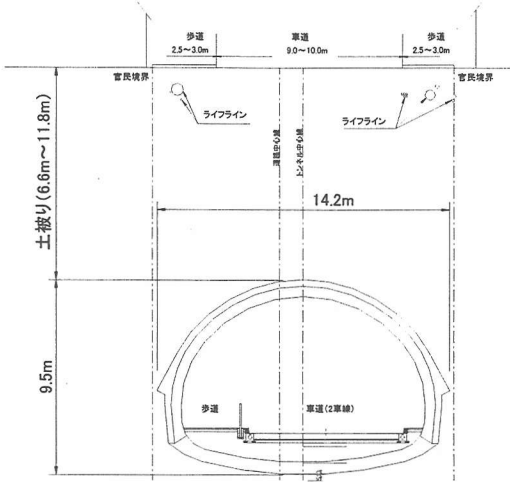
このため、トンネル掘削時の周辺構造物への影響抑制に対しては大口径先行脚部改良工法、長尺鋼管先受け工法などを実施し、切羽からの湧水対策としては遮水壁および坑内水抜きボーリング工法を補助工法として用いた。また、施工時には各種計測を行い、補助工法の有効性を確認するとともに、設計へのフィードバックを目的とした逆解析を実施した。ここでは補助工法選定の経緯およびその効果について報告する。

2. 工事概要

当トンネルは水戸市中心部の慢性的な渋滞の解消と共に、JR 常磐線により分断されている南北間連絡のバイパス道路を目的として計画されたものである。ここで、標準断面図(図-1)とトンネル平面図(図-2)に示すように、トンネル掘削断面は 100m² を超える大断面となっており、トンネルと官民境界の離隔は極めて小さい。土盛りは 6.6~11.8m と浅く、直上の道路にはライフラインや大型のマンホールが多数埋設されて

-
- 1) 非会員 茨城県 水戸土木事務所
 - 2) 正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部
 - 3) 正会員 鹿島建設(株) 関東支店
 - 4) 非会員 武藤建設(株)

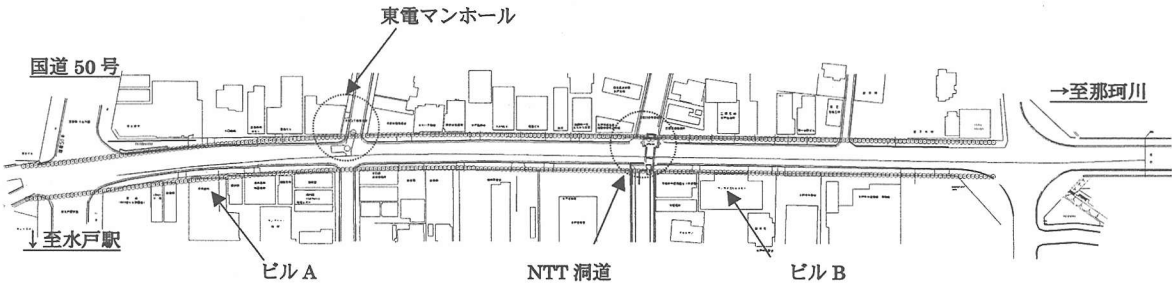
おり、周辺には民家や中高層のビルが立ち並んでおり、これらの周辺構造物はトンネル掘削による影響を受けやすい。また、地質縦断面図（図－３）と地山物性値（表－１）に示すように、施工箇所は未固結の第四期洪積世の洪積台地であり、下部粘性土層（Dc2）の上下には上部砂礫層（Dg1）、下部砂礫層（Dg2）がある。



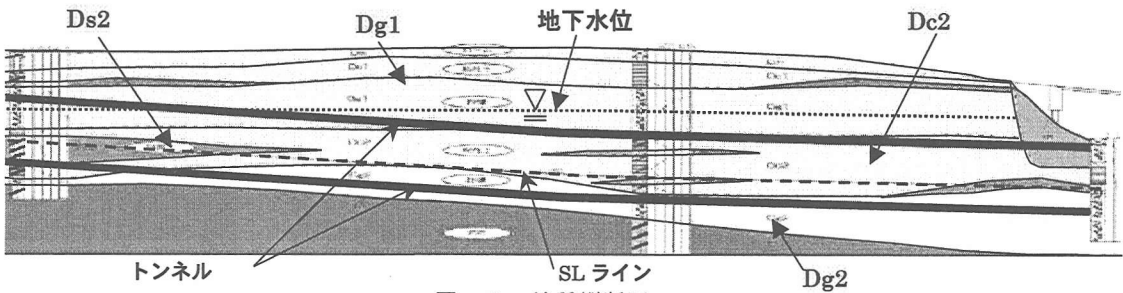
図－１ 標準断面図

表－１ 地山物性値

地層名	N 値 (平均値)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 cu (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	変形係数 E (kN/m ²)	透水係数 k (cm/s)
関東ローム層 (Lm)	2～6 (3)	13	38	0	15,000	—
上部粘性土層 (Dc1)	2～5 (4)	17	35	1.1	25,000	—
上部砂礫層 (Dg1)	16以上 (49)	20	10	43	77,000	7.5×10^{-4} $\sim 5.1 \times 10^{-3}$
下部粘性土層 (Dc2)	1～22 (8)	18	95	7.5	48,000	—
下部砂質土層 (Ds2)	3～36 (17)	18	10	31	36,000	7.0×10^{-6} $\sim 1.3 \times 10^{-4}$
下部砂礫層 (Dg2)	15以上 (50)	21	10	45	140,000	1.2×10^{-4} $\sim 6.5 \times 10^{-4}$
砂質泥岩層 (Tm)	50以上	16	500	10	140,000	—



図－２ トンネル平面図



図－３ 地質縦断面図

これらのことから具体的に以下の問題が考えられる。

- ①トンネル断面内に現れる Dc2 層の N 値が $\bar{N}=8$ と小さいため、掘削時の変形が大きくなり、地表面の沈下量増大が懸念される。(地山補強の必要性)
- ②掘削断面上部に位置する Dg1 層が帯水層であることから、湧水による掘削時の切羽の安定性が低下する。(湧水対策の必要性)

上記問題点を解決すべく、いくつかの有効な補助工法を採用した。

②天端部補強（先受け工）

当初設計において湧水量は比較的小さいと予測されたことから、高圧噴射攪拌系の先受け工を採用した。しかし後述するように Dg1 層は局所的な水みちからの湧水が多いため、噴射攪拌系のものでは均質な改良体の造成が困難となり、確実なアーチ連続体を形成することが期待できない。このような条件下でも施工可能なものとして、注入式長尺鋼管先受け工（ロジンチューブ）に変更した。このとき注入材は湧水に対して希釈・流出の少ないウレタン系を採用した。

また、ウレタン系注入材は材料費が高価であることから、湧水量に応じてウレタン系とセメント系の注入材を使い分け、コストダウンを図った。鋼管を打設後、管からの湧水量を 1 本毎に測定し、湧水量が 10 lit/min 以下の場合にはセメント系注入材、10 lit/min を超える場合にはウレタン系注入材というように各々の管において注入材を変更した。注入式長尺鋼管先受け工の仕様を表-5 に示す。

表-5 長尺鋼管先受け工仕様

鋼管の仕様	鋼管外径:139.8mm, 肉厚: 6.6mm 鋼管長:12.5m
打設仕様	打設ピッチ:45cm, 1断面あたり23~39本 施工シフト長:9m, ラップ長:3.5m
削孔方式	トップハンマー方式
設計注入量	(鋼管からの湧水量が10 l/minを超える場合) ウレタン系注入材: 1本あたり333 kg
	(鋼管からの湧水量が10 l/min以下の場合) セメント系注入材: 1本あたり 854 l

他にも切羽の滑りや剥落防止の目的で、高圧噴射攪拌のロジンジェット（φ400mm、n=9 本）を鏡面補強として適用した。このとき切羽は Dc2 層が主体であり、湧水による問題点もなく、良好な改良体を造成することができた。

（2）地下水対策

①上部砂礫層（Dg1 層）の特性

トンネル上部に存在する Dg1 層は、地下水位が層下端から 2~4m 上の位置にある。水理特性を把握するために事前に実施した揚水試験結果では、Dg1 層の透水係数は $k = 5.1 \times 10^{-5} \sim 3.851 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ となり、井戸理論式から求められた切羽からの予測湧水量は最大でも 30 lit/min 以下であった。

しかし、施工開始後、地上からの脚部補強工における追加注入材の逸走や、坑内からの先受け工の削孔時大量湧水（最大 300 lit/min）の発生など、Dg1 層の水理特性は事前調査の評価と異なっていた。事前調査と施工時の地下水状況を総合的に検討すると、以下のことがわかった。

- ・ Dg1 層中には局所的な水みちが存在し、数十~数百 lit/min の湧水が発生する可能性がある。
- ・ Dg1 層中の水みちは広範囲に分布するが、その平面位置の特定は極めて困難である。

②湧水対策工（遮水壁および水抜きボーリング）

湧水対策としては、まず先行脚部補強工の天端を Dg1 層の境界よりも 1 m 上まで造成して遮水壁を構築する。これは地下水がトンネル切羽に対して概ね右から左へと流れていることが事前調査からわかっているためであり、上流側である右側のみ遮水壁を構築した。さらに水抜きボーリングを遮水壁の内側に打設することで、切羽内に流入する湧水量の低減を図った。

水抜きボーリングの構造は図-7 に示すように、先受け工と同じ鋼管を外管として打設し、その中に先端部 3.5m をストレーナ加工した VP 管を内管として挿入する二重管構造とした。さらに、地山と鋼管、鋼管と VP 管の間の空隙部には、速硬化性のセメント系硬化材を充填し、空隙部からの地下水湧出を防止することとした。

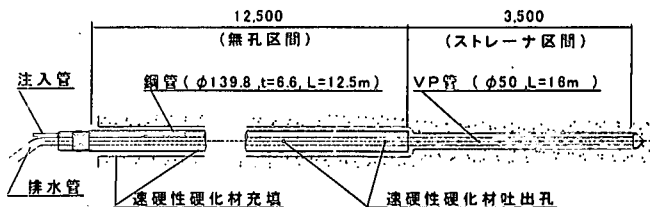


図-7 水抜きボーリング工

4. 補助工法の効果

このように、当トンネルでは様々な補助工法を適用している。図-8に支保パターン図を示す。これらの効果を各種計測により確認するとともに、逆解析により支保構造の妥当性を評価している。

(1) 計測結果

当トンネルは先述の通り、掘削の影響が極めて大きいトンネルであるため、入念な計測管理を実施している。地表面沈下および内空変位は5m毎に測点を設置し、掘削影響範囲に応じた切羽周辺の変位測定を行っている。また、トンネル上部の重要構造物には計器を設置し、構造物の変状を常時自動計測している。

①地表面沈下

地表面沈下の縦断分布図および切羽離れ図を図-9、図-10にそれぞれ示す。この図から、先行変位は切羽通過の約20m手前から発生し、切羽到達時の沈下量は7mm程度で設計値の9mmより小さい値となっている。また、切羽通過後約25mで収束し、最終沈下量は20～22mm程度で設計値の17mmよりやや大きめの値となっているが、概ね設計値と同程度の沈下量であると評価できる。

②構造物傾斜角

構造物傾斜量の切羽離れ図を図-11に示す。切羽進行に伴い構造物の傾斜角は増加するが、切羽が20m～40mを過ぎる頃には収束する。なお、構造物傾斜角はビルAで0.74/1,000rad、ビルBで0.48/1,000radというように、許容値である1.00/1,000rad以下に留まっている。このように、重要構造物に対しても大口径先行脚部補強工の効果は十分に発揮されていることがわかる。

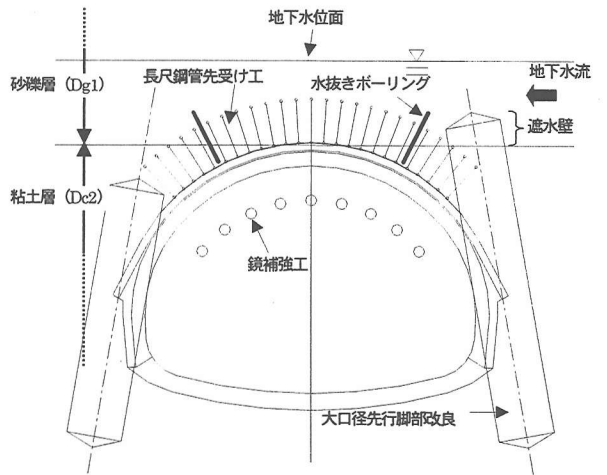


図-8 支保パターン図

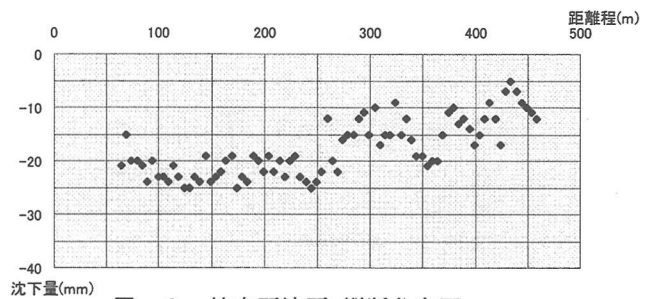


図-9 地表面沈下 縦断分布図

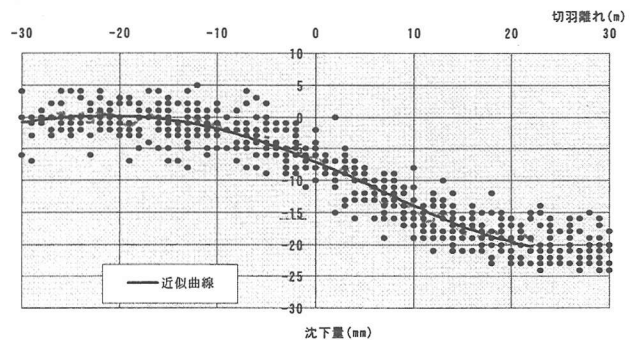


図-10 地表面沈下 切羽離れ図

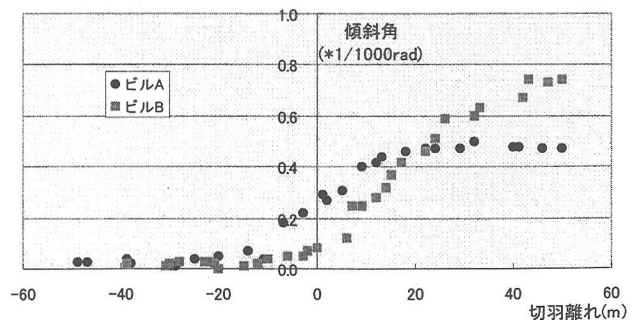


図-11 構造物傾斜角 切羽離れ

③地下水

歩道等に観測井を約 20m 間隔で設置し、Dg1 層の地下水位を観測した。観測井は遮水壁の効果を確認するため遮水壁の内側と外側に設置している。図-12 に代表的な観測井における地下水位の変化を示す。

図から遮水壁の内部では地下水位が切羽到達までに 1.5~2.0m 程度低下しており、水抜きボーリングの効果が見られることがわかる。しかし遮水壁の外側の観測井 (W214) では切羽の通過にかかわらず、地下水位の低下は顕著ではない。つまり遮水壁があることで地下水の流入を抑制するという効果は十分に発揮されたことがわかる。

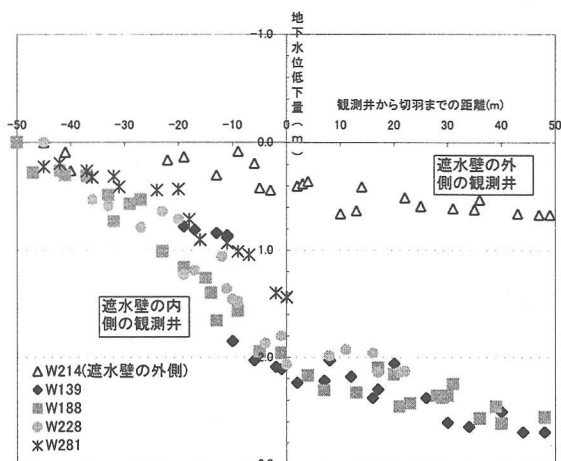


図-12 地下水低下 切羽離れ図

④逆解析

逆解析は、計測結果を基に事前解析と同様の 2 次元 FEM 解析モデルを用いて行った。主なパラメータは、地山変形係数と切羽到達時の掘削解放率である。

その結果、地山の变形係数 E は孔内水平載荷試験の約 1.6~2.0 倍となり、 $E = \alpha \cdot 7N$ に換算すると $\alpha = 1.6 \sim 2.0$ であった。また、切羽到達時の掘削解放率は 23~25% (設計時 40%) となり、一般的に用いられる 30~50% に比べ小さな解放率であった。これらのことから、トンネル両側の大口径先行脚部改良工法の効果だけでなく、鋼管長尺先受け工法との組合せが有効であったと言える。

5. まとめ

今回の施工によって以下に示す知見を得ることができた。

- ①大口径先行脚部改良工は、地表面沈下量で 15~25mm、構造物傾斜角では最大値でも 0.8/1,000rad 程度であり、地山変形の抑制に対して有効に機能した。
- ②長尺鋼管先受け工は、地下水の存在下でも十分な先受け機能を保持し、切羽の安定に効果的であった。
- ③逆解析から得られた切羽到達時の掘削開放率は一般的な値よりも小さい値であったことから、大口径先行脚部改良工と長尺鋼管先受け工との組合せは、地山変形抑制効果が高いことを裏付けている。
- ④分布予測が困難な局所的「水みち」からの湧水に対しても、遮水壁は十分な効果を発揮し、切羽への湧水量を抑制することができた。

トンネル掘削工事は平成 11 年 11 月に掘削を開始し平成 13 年 6 月末に無事貫通することができた。地表面変位や構造物傾斜角も概ね設計の予測値を大きく上回ることはなかった。これも適切な補助工法の採用、迅速な追加対策工の成果と言える。

都市トンネルにおける NATM は、補助工法の追加を考慮しても、当トンネルのような短いトンネルにおいてはシールド工法と比較して安価である。本工法は、特に土被りの小さい軟弱地盤におけるトンネル施工に有効であり、これによって多くの都市トンネルの建設が可能になると考えられる。今後の同種工事において本報告の設計および施工法が参考となれば幸いである。