

## 都市域山岳 NATM 施工時における軟弱地山に対する補助工法の採用事例

Adoption Example of the Tunnel Auxiliary Construction Method for Soft Unconsolidated Grounds  
in Urban Area Using the Mountain Tunneling Method, NATM

高橋啓介	Keisuke TAKAHASHI	(清水建設 (株))
光増朝久	Tomohisa MITSUMASU	(清水建設 (株))
吉本治憲	Harunori YOSHIMOTO	(宇都宮市)
大金隆宏	Takahiro OOGANE	(宇都宮市)
小松 満	Mitsuru KOMATSU	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)

近年、地下鉄建設など都市域での建設工事において NATM 工法を採用するケースが増えている。NATM 工法はシールド工法や開削工法に比べて地山条件等に見合った支保パターンを採用しながら断面を変化させる対応が可能であることも理由の一つである。その一方、湧水や地山の地質状況によっては、地表への影響を抑えるために補助工法を採用する場合があります。計画当初より工事費が増える懸念がある。また、掘削補助工法の分類における対象地盤については、硬岩・軟岩・土砂から構成されており、軟弱地盤を対象とした詳細な分類がないため、地質の状況等の事象に応じた補助工法のシステムを整理することで、トンネル施工を完了した事例を報告する。

キーワード：都市域、未固結、掘削補助工法、湧水 (IGC : H05, K14)

## 1. はじめに

都市域のトンネル工事において、未固結地盤を主とする地質の場合はシールド工法を適用するケースが多いが、近年、山岳工法である NATM 工法<sup>1) 2)</sup>を採用するケースが増えている<sup>3)</sup>。この理由として、補助工法の開発が進んだことで周辺地山への影響抑止や切羽対策への技術が向上し、それに伴って経済的な設計が出来る場合があること、さらに、シールド工法や開削工法に比べて断面を変化させる対応等が容易であることが挙げられる。その一方、湧水や地山の地質状況によっては、地表への影響を抑えるためにグレードの高い補助工法を採用する場合があります。計画当初の想定金額より工事費が増える懸念がある。また、掘削補助工法の分類における対象地盤は硬岩・軟岩・土砂から構成されており、軟弱地盤を対象とした詳細な分類がない。そのため、施工をしながらその都度、対策を検討する必要がある。場合によっては多大な労力と時間を費やすこととなる。

このような現状を踏まえると、結局、都市域のトンネル工事において、NATM 工法かシールド工法のどちらかを選択すべきかの二者択一の議論は、各技術者の経験を踏まえた上で、種々の要因により異なる<sup>4)</sup>。しかし、施工条件によっては、最初から NATM 工法を選択せざるを得ないケースもあり、土被りが小さいなど、厳しい施工条件によっては、シールド工法とは異なり、工事の進捗に伴って地表面への陥没等の影響を及ぼすことにもなりかねない<sup>5)</sup>。したがって、このような地表面への影響

のみならず、周辺環境に影響を及ぼすことなくトンネル工事を施工するためには、工学的なアプローチ<sup>6)</sup>に基づく補助工法の選択が必要である。そこで、本報では、地山状況に応じた補助工法のシステムを整理することで、都市域軟弱地盤のトンネル工事において、補助工法を迅速かつ経済的に選択し、地表に影響を与えることなく工事を完了した事例<sup>7)</sup>について報告する。

## 2. 工事概要

## 2.1 工事内容

都市基盤河川奈坪川改修工事(トンネル本体)は施工延長が 847.3m、掘削断面が 32.3m<sup>2</sup>、縦断勾配が 1%とほぼ水平に近いトンネル本体を都市域において施工する工事である。掘削工法は NATM 工法で機械掘削とし、立坑から掘削開始となるため、レー尔工法を採用した。事前の地質調査ではトンネル上部約 6m 付近まで透水性が低く固結度の高い凝灰質砂岩がほぼ一様に分布するとの結果が示されていたことから、山岳 NATM 工法を採用しても安定した施工となることが見込まれ、設計でのトンネル支保パターンは全区間 DI パターン(インバートストラットによる閉合)と計画された。

## 2.2 工事位置

工事位置は図-1 中の赤線で示すように、栃木県宇都宮市の JR 宇都宮駅から東側約 1km の範囲である。施工



図-1 工事位置

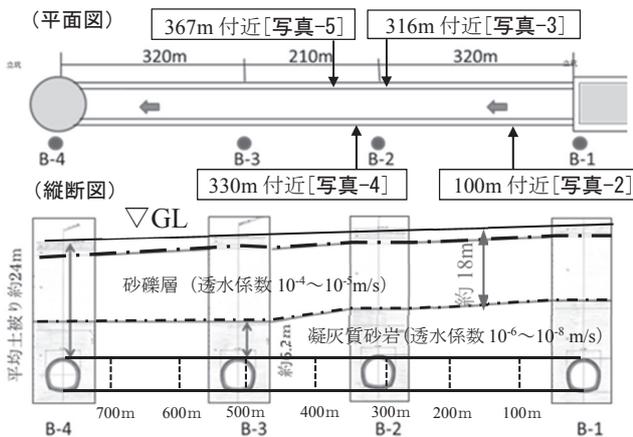


図-2 地質断面図



写真-1 掘削状況（固結度が高い）

箇所の直上は通行量の多い道路であり、周辺は商業施設やマンション等が密集しているため、これらの環境に影響を及ぼすことなく施工を完了させる必要があった。

2.3 地質状況（事前調査）

事前の4本のボーリングによる地質調査に基づいて推定された地質断面図を図-2に示す。施工範囲の地質状況は、地表面から深さ18m程度まで砂礫層（透水係数：約 $10^{-4}m/s \sim 10^{-5}m/s$ ）が確認され、それ以深については凝灰質砂岩（難透層、透水係数：約 $10^{-6}m/s \sim 10^{-8}m/s$ ）から構成される結果であった。そのため、砂礫



写真-2 切羽状況（100m付近）



写真-3 切羽状況（316m付近）



写真-4 切羽状況（330m付近）

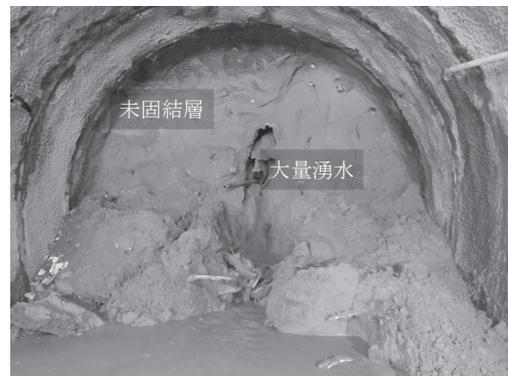


写真-5 切羽状況（367m付近）

層によるトンネル坑内への湧水の影響を考慮し、凝灰質砂岩内にトンネルの被りを確保するように掘削位置が計画された。

表-1 土質データ一覧表

項目	凝灰質砂岩 (100m 付近)	凝灰質砂岩 (320m 付近)	黄褐色未固結層 (350m 付近)
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.661	2.621	2.631
細粒分含有率 (%)	20.0	19.2	10.2
均等係数	18.0	12.06	3.65
一軸圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	9.92	—	—

表-2 地山の流動化を示す指標の例<sup>1)</sup>

項目	指標値
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	≤2.65
細粒分含有率 (%)	≤10
均等係数	≤5

表-3 坑内湧水状況

切羽位置 (m)	坑内湧水量 (トン/日)	摘要
220	約 0.1	-
326	約 250	流砂発生
388	約 500	大量湧水
800	約 300~約 400	-



写真-6 水抜きボーリング時の湧水状況 (380m 付近)

### 3. 切羽状況

#### 3.1 掘削開始～約 300m 区間

掘削開始から約 200m までは、地盤調査結果に基づく当初計画の通り凝灰質砂岩が出現し、固結度が高く透水性も非常に低い地質で、切羽は安定した状況であった。100m 付近の掘削状況を写真-1、切羽の状況を写真-2 に示す。これらから固結度の高い切羽である様子が分かる。一方、約 200m～300m の区間では切羽から地下水の滲(にじ)みが発生した。しかし、補助工法の採用までに至る事象はなかった。

#### 3.2 316m 付近

掘削開始 316m 付近からは、写真-3 に示すように、切羽上部に固結度の低い層が出現したが、大量の湧水等は

確認されず湿潤な状態であり、表面の剥離にとどまる程度であった。また切羽中央下部にかけては掘削後、徐々に地下水が滲み出す状況であった。

#### 3.3 326m 付近

掘削開始から 326m 付近においては、切羽上部は固結度の低い層となり、切羽からの剥離が発生した。また、写真-4 に示すように、黄褐色未固結層が出現し、掘削後すぐに湧水が発生する状況であった。さらに、右側部分では流砂が発生し、容易に空洞が出来やすい状況となった。切羽の下方部分については固結度が高い状況であるが、地下水の滲み出しが確認された。

#### 3.4 367m 付近

掘削開始から 367m 付近での切羽の状況を写真-5 に示す。切羽のほぼ全面が黄褐色未固結層となり、湧水の増加に伴う切羽の押し出しや、切羽からの剥離が多くなった。さらには切羽の中央部から大量の湧水が発生し、トンネル全体での出水量は約 380 トン/日となり、トンネル掘削の一時中断を余儀なくされた。

## 4. 土質状況

固結度の高い凝灰質砂岩 (100m 付近) と固結度の低下により掘削補助工法が必要となった凝灰質砂岩 (320m 付近) 及び湧水に伴い流砂が発生した黄褐色未固結層 (350m 付近) の土質データを表-1 に示す。

地盤条件の調査において、ボーリング等により得られた物性値は、ごく限られた情報であるため、実際の事象も勘案してトンネル掘削方法を判断する必要がある。また、未固結の砂質地盤は突発湧水により切羽の安定性を著しく低下させることや、切羽の崩壊の可能性についても十分検討する必要があるため、地山の流動化に対する検討が特に重要な項目となった。ここで、地山の流動化を示す指標を表-2 に示す。この指標は、未固結の砂地山を対象にした既往の事例等に基づく経験的な指標である<sup>1)</sup>。切羽状況と表-1 より、固結度の低下した地質及び表-2 に当てはまるような地盤の流動化を示す値を示した切羽においては、透水性が高く、地下水が流入しやすい状況であることが判明した。地下水が流入し切羽が脆弱になると、流砂が発生しやすくなることが明らかである。以上から、湧水および流砂の発生による地上への影響、特に地上の陥没や井戸の枯渇などのリスクが工事進捗の際の懸念材料となった。

## 5. 湧水状況

坑内湧水状況を表-3 にまとめる。立坑周辺からの湧

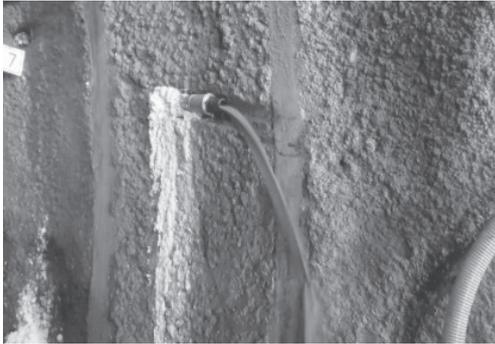


写真-7 水平水抜きボーリング実施状況

水はあるものの、トンネル切羽については掘削開始から220m付近までトンネル坑内からの湧水量は約0.1トン/日であった。しかし、220m付近から326m付近については徐々に切羽から湧水が発生し、326mの切羽では小規模な流砂が発生したことにより、トンネル坑内の湧水量は約250トン/日となった。さらにトンネル坑内の湧水量が増え続け、388m付近の大量湧水発生時には約500トン/日の湧水量となった。そのため、写真-6に示すように、水平水抜きボーリングを採用しながら施工する事により、切羽の位置が800m付近における湧水量は約300~400トン/日となった。

## 6. 掘削補助工法

### 6.1 掘削補助工法の採用

トンネル掘削方法は、前述した通り、小断面のレール工法である。一般的なNATM工法のトンネルと大きく異なる点は、断面が小さいこととレール工法であるため、機械の離合に時間を費やすことが挙げられる。したがって、急な段取り替えなどの対応が困難であることから、切羽の崩落等の異常時に効果的な対応策である吹付コンクリートの準備に時間を要する。そこで、本工事では、地山の強度が低下した場合や、湧水発生時への確実な対策が必要とされた。トンネルの補助工法として、切羽からの湧水を少なくすることを目的とした水抜きボーリングなどの湧水対策や、切羽の肌落ちや切羽の崩落を抑制することを目的としたボルトと注入材を併用する切羽安定対策、さらに、切羽の先行的な緩みを抑制することで地表面の沈下を抑えることを目的とした長尺ボルトと注入材を併用する地表面沈下対策などがある。また、対象地山の分類分けとして主に土砂・軟岩・硬岩のみであるため、本工事において当初予期していなかった地質が出現したが、トンネル内空変位の計測値が全て許容範囲であった事からトンネル支保パターン変更の必要性は無かった。したがって、対策として土砂を対象とした補助工法の分類を適用し、事象に合わせた経済的な補助工法を採用した。

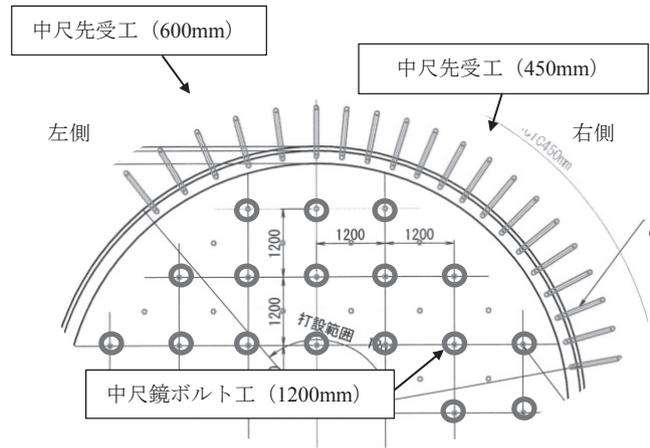


図-3 中尺先受工・中尺鏡補強工配置断面図



写真-8 止水注入工範囲

### 6.2 補助工法採用の流れ

以下に補助工法採用の流れを列挙する。

- (1) 掘削開始から約300m付近において、凝灰質砂岩の固結度が下がり、透水性が高くなった。そのため、切羽からの湧水量が増え、切羽の小崩落が発生した。そこで、掘削補助工法として、写真-7に示すような、トンネル坑内からの水平水抜きボーリングを採用し、切羽からの湧水を低減させた。
- (2) 掘削開始から約316m付近において、切羽からの湧水量がさらに増加したこと、また、一部砂層が出現し天端からの抜け落ちが発生したこと、湧水対策に合わせ天端安定対策を採用した。天端安定対策について、自立できる砂質土地山を想定し、注入式フォアボーリング（ボルト長L=3m、シリカレジン注入）及び水平水抜きボーリングを採用した。
- (3) 掘削開始から約333m付近において、帯水している黄褐色未固結層が広がり、湧水による流砂で空洞が発生した。ここで地盤が未固結となったため、地表面への影響を防ぐために、トンネル周辺の緩みを抑制する必要があった。天端部に対しては中尺先受工（鋼管径φ76.3mm、鋼管長約6m、鋼管間隔600mm、シリカレジン注入）を標準としたが、非常に脆い地山状況の場合は、鋼管と鋼管の間の抜け落ちを抑制するため、鋼管間隔が狭い450mmを採用した<sup>8)</sup>。切羽（鏡）には中尺鏡ボルト工（鋼管径φ76.3mm、

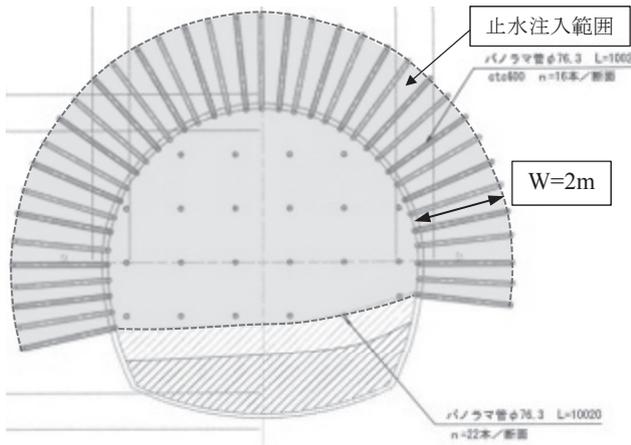


図-4 止水注入工範囲

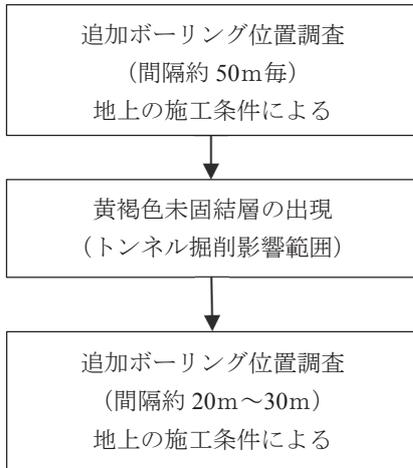


図-5 追加調査ボーリングフロー

鋼管長約 9m, 鋼管間隔 1200mm, シリカレジン注入)を採用し, さらに水平水抜きボーリングと鏡吹付を併用した. 中尺先受工及び中尺鏡ボルト工の配置断面図を図-3 に示す. 中尺先受工において, 切羽天端部右側は脆弱なため鋼管間隔 450mm を採用し, 切羽左側は右側より固結度が高いため, 鋼管間隔 600mm を採用した. 中尺鏡ボルト工は鋼管間隔 1200mm とした.

- (4) 掘削開始から約 367m 付近において, 切羽中央部からの集中湧水により発生した流砂を起因として約 30m<sup>3</sup> の空洞が発生した. 湧水が多く中尺先受工及び中尺鏡ボルト工と水平水抜きボーリングだけでは掘削が不可能になった. さらに空洞が大きくなることにより, 地表面への甚大な影響が懸念された. そこで, 写真-8 に示すように切羽中央部分の集中湧水箇所周辺に止水注入工を採用し, その他の部分においては, 中尺先受工及び中尺鏡ボルト工を採用した. 止水注入工とは, 水ガラスを未固結地山など透水性の高い地山に高圧で浸透注入することにより, 土粒子間の水を, 水ガラスに置き換え透水性を下げ, さらには地盤に粘着力を付与し掘削を可能にすることを目的とした工法である.
- (5) 掘削開始から約 388m 付近からは切羽全体がほぼ

黄褐色未固結層となったことから, 流砂と大量湧水が発生し, トンネル上部に存在する透水性の高い砂礫層に影響を与える懸念が生じ, トンネルの水没と地表面への影響懸念がさらに高まったことから, 全面止水注入工を採用した. 注入範囲は図-4 に示すように, トンネル切羽の周囲について切羽から 2m 程度外側の範囲を注入ゾーンと設定した. また, 切羽の下半部にある凝灰質砂岩部については, 止水注入範囲外とした.

## 7. 追加ボーリング

### 7.1 地上追加ボーリングの実施

工事計画に対し, 想定外の地質が出現したことにより, 地表面へのリスク回避はもとより, 確実な構造物の構築と工事への安全性を配慮し, 切羽の地質状況と湧水等の事象に合わせた補助工法を組み合わせながら工事を進捗させた. しかし, 補助工法は種類も多く, 仕様によってはコストと工期に大きな影響を与える. また, 未掘削範囲の地質状況についても想定外の地質が出現する可能性が否定できないことから, 完成までの工事費及び工期を把握することが困難となった. この時点で掘削を進めながら補助工法を選定することは多大な時間を費やすこととなるが, その一方で, 事業を進める上では費用と工期を適切に把握する必要もある. そこで, 約 450m 以降の区間についての地質状況を把握することを目的に, 追加ボーリングを実施した.

### 7.2 地上追加ボーリング施工位置

地上追加ボーリングは, 止水注入工の範囲を把握すること. すなわち, 止水注入工を採用した地質である黄褐色未固結層の分布を把握する目的で実施した. その施工位置は, ボーリング孔により砂礫層の地下水が切羽に影響を与える懸念及び道路規制等の地上の状況を考慮し, トンネル掘削断面範囲外をとることにした.

地上の支障物など現場条件を考慮し, 当初ボーリング調査区間 (間隔約 200m~約 300m 毎) に対し, 約 50m 間隔を目途に追加ボーリングを実施した. さらに, トンネル掘削の影響範囲に黄褐色未固結層が出現した区間については間隔を狭め, 約 20m~30m の間隔で追加ボーリングを実施し, 最終的に約 20 カ所の追加ボーリングを実施した.

図-5 に追加調査ボーリングフローを示す. 調査時点の切羽状況は, ほぼ全面黄褐色未固結層が出現していたことから, 切羽から約 20m 程度離れた TBr-1 を調査開始位置と選定し, 到達側に向かって順次調査を進めた. TBr-3 および TBr-4 の調査結果より黄褐色未固結層がトンネル掘削範囲に存在する区間は, 切羽の位置から TBr-3 および TBr-4 の区間までと推定出来たことから, TBr-1 と TBr-3 の区間において, 更なる追加ボーリング調査を実施した.

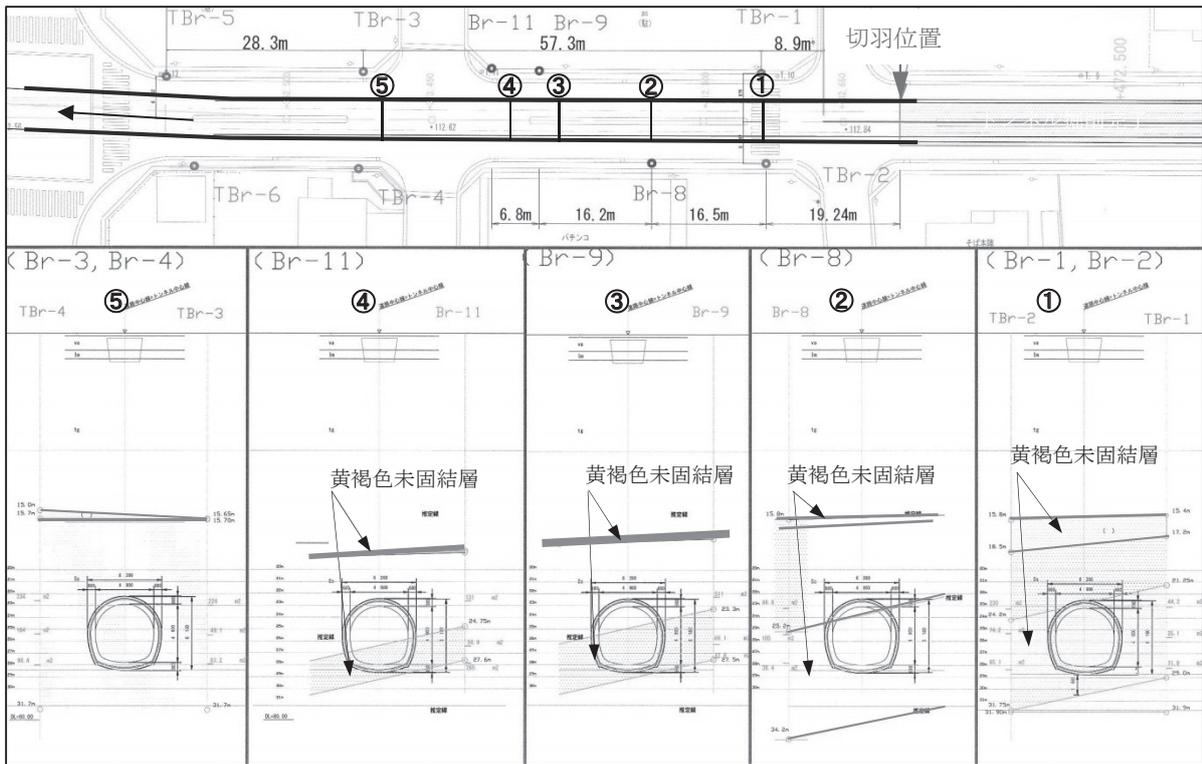


図-6 追加ボーリング調査による推定地質断面図(その1)

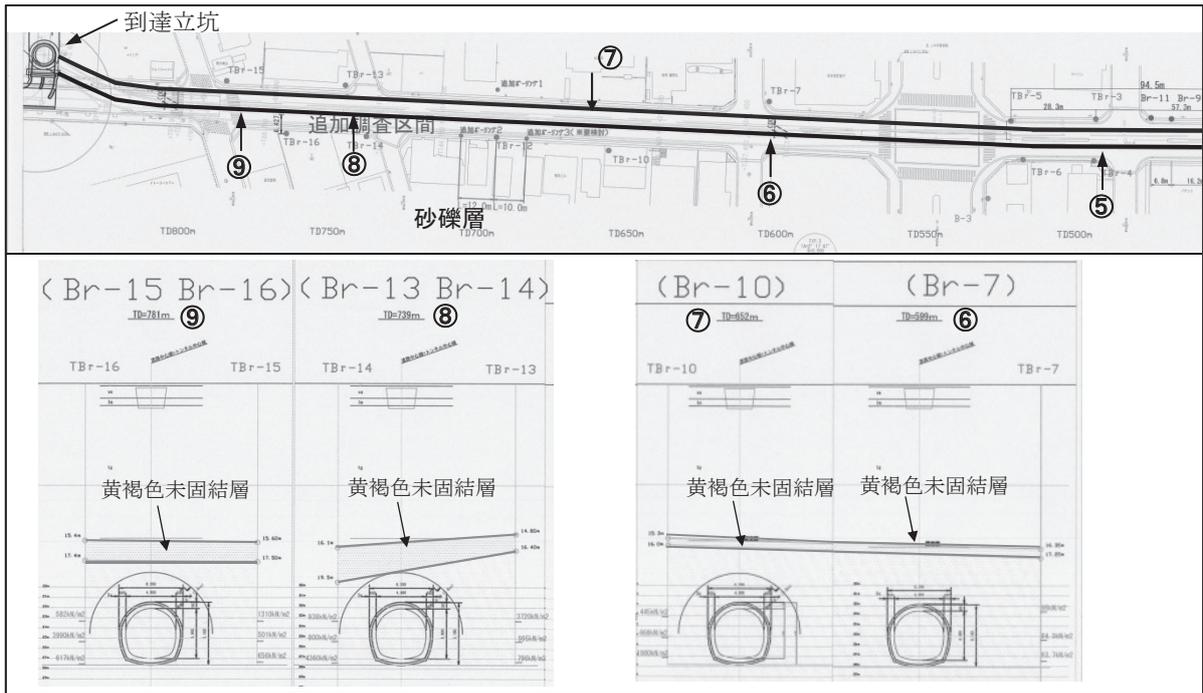


図-7 追加ボーリング調査による推定地質断面図(その2)

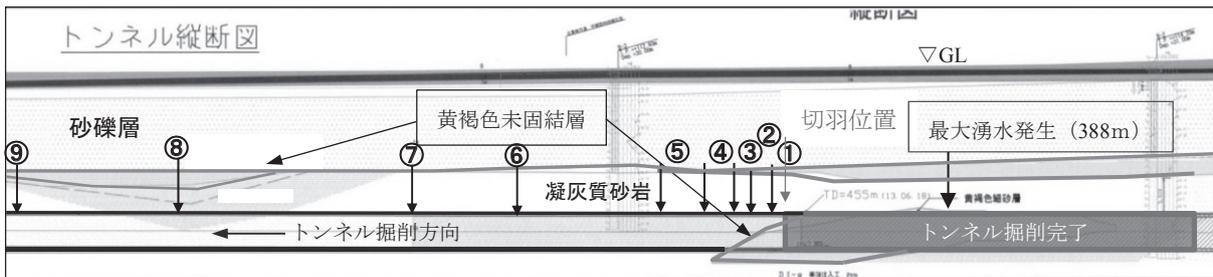


図-8 追加ボーリング調査による推定地質縦断面図

表-4 具体的な現象（地質の状況）に応じた補助工法システム

補助工法名	施工箇所	注入材	現象	ステップ					
				1	2	3	4	5	6
止水注入	全断面	水ガラス系 注入材 (浸透注入)	全面湧水・流砂	-	-	-	-	-	●
止水注入 (局所)	切羽局所		局所湧水・流砂	-	-	-	-	●	-
中尺先受工	天端	シリカレジン (割裂注入)	天端崩落・湧水	-	-	-	●	●	-
中尺鏡ボルト工	切羽		鏡崩落・湧水	-	-	-	●	●	-
注入式フォアポーリング	天端		天端崩落	-	●	●	-	-	-
GRP 鏡ボルト	切羽		鏡崩落	-	-	●	-	-	-
水抜きポーリング	掘削断面図外	-	切羽湧水	●	●	●	●	●	-
鏡吹付	切羽	-	鏡の小崩落	●	●	●	●	●	●
補助工法採用の流れ(6.2節での(1)~(5))				(1)	(2)	-	(3)	(4)	(5)

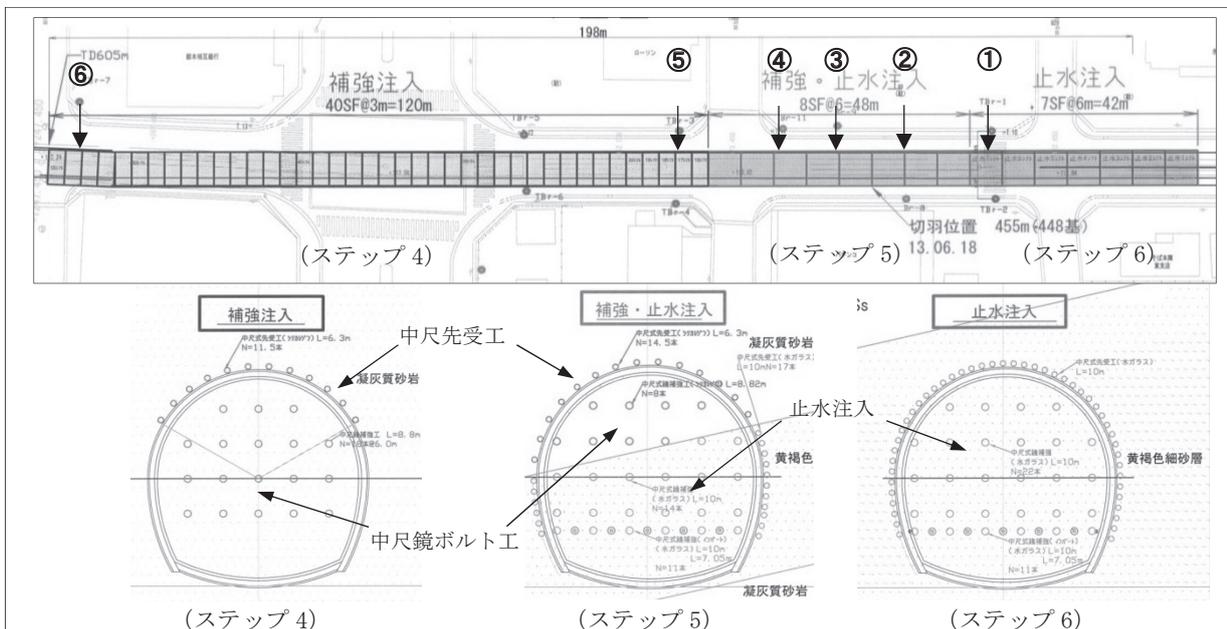


図-9 掘削補助工法計画図

### 7.3 地上追加ボーリング調査結果

追加ボーリングの調査位置及び調査結果から推定した黄褐色未固結地山付近の地質断面図を図-6に、以降のトンネル掘削範囲の地質断面図を図-7示す。この地質断面図および図-8に示した地質縦断面図から推定された事項を以下に列挙する。

- (1) 断面①は、全面が黄褐色未固結層である。
- (2) 断面②は、黄褐色未固結層が支配するが、トンネル天端付近では凝灰質砂岩が出現する。しかし、凝灰質砂岩の一軸圧縮強度は  $86.8\text{kN/m}^2$  であり、脆弱である。
- (3) 断面③は、トンネル断面内における黄褐色未固結層の割合が小さくなっており減少傾向にある。
- (4) 断面④は、黄褐色未固結層の層厚が薄くなりトンネル断面の下方に位置してきている。
- (5) 断面⑤は、トンネル断面では黄褐色未固結層の存在は無く、ほぼ凝灰質砂岩である。
- (6) 図-7に示した通り、到達立坑までの断面⑥~⑨は、

トンネル上部に黄褐色未固層があるものの、トンネル掘削範囲については、黄褐色未固結層の存在は確認されなかった

## 8. 掘削補助工法システム

### 8.1 掘削補助工法システム

今回のトンネル工事において、地質条件および湧水等の事象に適応した掘削補助工法の施工箇所、注入材、現象を基にしたシステムを整理した結果を表-4に示す。このシステムは、切羽の崩落や湧水の状況に適応した補助工法の組み合わせを6段階のステップに分けている。例えば、切羽に小崩落及び切羽湧水などの現象が発生した場合、補助工法として、鏡吹付と水抜きポーリングを採用するステップ1となる。また、現象として、局所湧水と流砂および天端崩落が発生した場合については、補助工法として、局所止水注入および中尺先受

工、さらには中尺鏡ボルト工を採用するステップ5となる。したがって、切羽の状況が不安定になるほどステップが大きくなる。このシステムを利用する利点を以下に列挙する。

- (1) 未掘削区間について、追加地質調査から想定した推定地質（図-6、図-7、図-8 参照）により未施工区間の掘削補助工法の計画ができる。
- (2) 工事再開後、施工中の切羽に予期せぬ突発的事象が発生した場合に、迅速な掘削補助工法の採用判断基準として使用できる。

## 8.2 掘削補助工法の計画

追加ボーリングから想定した地質に基づき、提案したシステムを使って、掘削補助工法の詳細な計画を行った。止水注入工については、特に経済性と工期に大きな影響を与えることから、トンネル断面内の地質を考慮し、適した掘削補助工法を組み合わせることにより、経済的かつ効果的な計画を実施した。ただし、追加ボーリング調査を多く実施したものの、ボーリングによる情報は点での情報であるため、実際の切羽における地質状況や湧水状況、さらには固結度などの状況を確認し、掘削補助工法の妥当性を検証することを前提とした。掘削補助工法の計画の一部を図-9 に示す。この図は最終的に追加調査により推定した地質をもとに、ステップ4～ステップ6に分けて補助工法を計画したものである。

## 9. まとめ

都市域地下開発工事における山岳 NATM 工法による軟弱地盤の施工に関して、本工事の初期段階で実際に未固結地盤において発生した事象に応じて、補助工法のシステムを整理した。そして、途中段階からこのシステムの利用と地質を把握するために実施した地上追加ボーリングにより、詳細な補助工法の計画を実施した。補助工法のシステムを活用することにより、迅速かつ効果的に計画した補助工法の妥当性および、切羽の事象に基づいた補助工法の軽微な変更が実施できた。一部、システムに基づいた補助工法の仕様変更が発生したものの、概ね計画通りの補助工法で対応した。その結果、陥没や井戸の枯渇など地表面及び周辺環境に影響を与えることなく工事を完成させた。

トンネル工事においては、地質状況や湧水の状況など同一の施工条件とはならないため、補助工法を選定するにあたり、過去のトンネル工事の成功事例を参考に対応をする必要もあり、現場技術者の経験や熟練度に左右

される場合もある。したがって、設計時や施工時に補助工法の採用が必要となった場合、地山の流動化を示す均等係数や透水係数などの地下水の透水性等を表-4 に反映させ、数値的根拠も整理した補助工法システムを確立することにより設計と施工の大きな乖離を回避するために必要である。今後は、これらの課題に取り組むことで、都市域地下開発工事における山岳 NATM 工法による軟弱地盤の施工に大きく貢献できると考える。

## 謝辞

本工事を無事完成するにあたり、御指導を頂きました宇都宮市建設部の皆様、宇都宮大学社会基盤デザイン学科 清木隆文准教授に対しまして、ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, pp.42-45, 2016.
- 2) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 24, 山岳トンネル工法の調査・設計から施工まで, pp.35-36, 2018.
- 3) 例えば、後藤広治, 五十嵐央, 磯島磨, 柴田勝央, 大浦道哉, 伊藤憲男, 加藤直樹：都市部河川直下における NATM による接続トンネル施工, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, VI-051, pp.101-102, 2012.
- 4) 結城則行, 清水則一, 古川浩平, 中川浩二：都市トンネルにおける NATM とシールド工法の比較に関するアンケート調査, 土木学会論文集, No.516/VI-27, pp.63-73, 1995.
- 5) 日経 BP 社：日経コンストラクション, 第 659 号, pp.32-49, 2007.
- 6) 中川浩二：山岳トンネル建設における臨床トンネル工学的アプローチ, 地盤と建設, Vol.24, No.1, pp.1-10, 2006.
- 7) 吉本治憲, 大金隆宏, 光増朝久, 高橋啓介：都市域山岳 NATM における軟弱地山の施工について～都市基盤河川奈坪川改修工事（トンネル本体）～, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, VI-054, pp.107-108, 2014.
- 8) ジェオフロンテ研究会, アンブレラ工法分科会, AGF-WG：小口径注入式長尺先受工法実態調査に基づく設計パターン（案）－工法の概説と施工実態調査結果－, 2006年12月6日, p.10, 2006.

(2018年6月18日 受付)