

# 土被りの大きい脆弱地山における 切羽前方補強に関する検討

森本 真吾<sup>1</sup>・高橋 俊長<sup>2</sup>・大村 修一<sup>3</sup>・山田 浩幸<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社ケー・エフ・シー 技術部 トンネル技術室 (〒135-8073 東京都江東区青海2-45)  
E-mail: morimoto.shingo@kfc-net.co.jp

<sup>2</sup>東日本高速道路株式会社 千歳工事事務所 (〒066-0037 北海道千歳市新富1-2-14)

<sup>3</sup>鴻池・飛島特定建設工事共同企業体 徳別トンネル西工事事務所  
(〒054-0201 北海道勇払郡むかわ町徳別稲里418-5)

<sup>4</sup>正会員 株式会社鴻池組 土木技術部 (山岳トンネル担当) (〒530-8517 大阪府大阪市北区梅田3-4-5)

徳別トンネル西工事は土被りが大きくかつ非常に脆弱な地山であるため、多重支保工における従来のいなし工法と同時施工の中間的な意味合いの支保構造を構築する考え方、すなわち、一次支保工の支保機能を残したまま二次支保工を設置する“最善管理型二重支保構造”という考え方を導入し掘削を行っている。本研究は、最善管理型二重支保構造による工法を実現するために採用された鏡補強工に関する効果について三次元数値解析を実施した。また、既往の実績を反映した従来の先受け工の考え方に捉われない、より効果のある切羽前方補強の設計の考え方についても報告する。

**Key Words :** large overburden, serpentine rock, immediate ring closure, auxiliary method, 3D excavation analysis

## 1. はじめに

徳別トンネルは全長L=4 323mの高規格2車線道路トンネルであり、その内、西工事では西側の延長L=1 951mを山岳工法で掘進中である。トンネルの地質は、岩石種の異なる岩体（泥岩、緑色岩、蛇紋岩）が複雑に関係した付加体と呼ばれる地質構造を呈しており、硬軟も様々である。特に土被りが大きく（土被り250m以上）蛇紋岩が分布する区間では、調査坑を兼ねて先行して掘削された避難坑で大きな変位が生じていた。

避難坑での計測結果を考慮した二次元数値解析を行い本坑の合理的な支保構造を検討した結果では、支保構造の安定や坑内変位の抑制を図るには、下半、インバートまで含めた全断面早期閉合や二重支保構造の採用が必要と考えられた<sup>1)~3)</sup>。そのため、施工時の切羽の安定確保に長尺鏡補強工が必要と考えられ、同時に、先受け工に関しては、従来のアンブレラ工法の考え方に捉われないより効果的な切羽前方補強工が必要となった。

本研究は、三次元数値解析により坑内変位に着目した鏡補強工の効果を確認した。また、従来のアンブレラ工法の考え方と異なる既往の実績を取り入れた切羽前方地山補強の設計の考え方についても報告する。

表-1 工事概要

|      |                                                                                      |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 工事名称 | 北海道横断自動車道 徳別トンネル西工事                                                                  |
| 工事場所 | 北海道勇払郡むかわ町徳別長和                                                                       |
| 工期   | 平成18年3月～平成21年3月（その1）<br>平成21年3月～平成23年10月（その2）                                        |
| 発注者  | 東日本高速道路株式会社                                                                          |
| 施工者  | 鴻池・飛島特定建設工事共同企業体                                                                     |
| 工事内容 | 延長 L=1951m （道路土工L=12m含む）                                                             |
|      | 断面 掘削断面積A=85.0m <sup>2</sup> （DII）、130m <sup>2</sup> （EII）                           |
|      | 施工法 NATM                                                                             |
|      | 掘削方式 独頭工法                                                                            |
|      | 掘削工法 EII、EIIパターン（上半先進ベンチカット工法）<br>（EII：最善管理型二重支保構造）<br>CII、DII、DIIパターン（補助ベンチ付き全断面工法） |
| 補助工法 | 天端安定対策：長尺鋼管コアハイリング（杭口）<br>長尺リング補強工（EII）<br>注入式コアボーリング                                |
|      | 路面の安定対策：長尺鋼ボルト、枕返し、長尺鏡補強工（EII）                                                       |
|      | 脚部の安定対策：脚部補強ボルト、仮インバート                                                               |

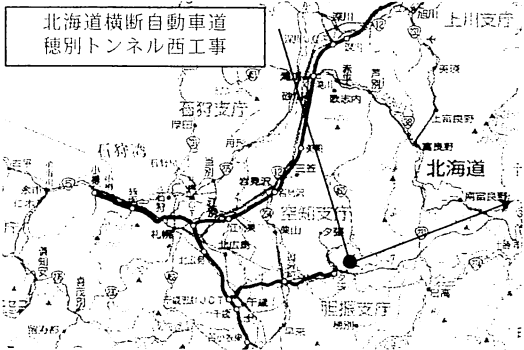


図-1 工事位置

## 2 支保構造

当トンネルにおける支保構造は、高土被り圧、かつ、蛇紋岩により坑内変位の増大を招く恐れが想定されたため、全断面掘削による早期閉合が必要とされ、さらに、トンネルの安定を図るために、二重支保構造の採用が必要とされた。

全断面早期閉合や多重支保工は実施工でもその効果が確認されている。以下に、それらの事例を紹介する。

### (1) 「全断面早期閉合」の事例<sup>4) ~10)</sup>

切羽からインバートまでの閉合距離が10m以下で早期に閉合された現場は8件程度報告されている。早期閉合の目的は、都市NATMやめがねトンネルといった低土被り部においては、地表面沈下抑制が求められており、また、山岳トンネルでは坑口部の地すべり地帯、付加体、破碎帯といった地山においてはトンネルそのものの安定対策が求められている。

また、ほぼ全ての現場で吹付けインバートにストラットが採用されている。ただし、高強度吹付けコンクリートや高規格支保工の採用については、初期変位の計測結果や変状の有無といったそれぞれの現場の状況によるところが大きいと言える。

補助工法に関しては、早期閉合時に大きな加背で掘削する必要があり、その切羽の自立が前提となるため、全ての現場で先受け工および鏡補強工が併用されていた。さらに変状が起きる（想定される）ような場合には、トンネル周辺地山へ補強領域を形成するために切羽からトンネル外周に向かって鋼管膨脹型斜めボルトの施工といった事例もみられる<sup>9)</sup>。

### (2) 「多重支保」工法の事例<sup>11) ~13)</sup>

#### a) いなし工法

従来のいなし工法をベースとする多重支保工法は、縫返し効果を計画的に利用する考え方、すなわち、掘削完了後、施工時期を遅らせて二次支保工を設置するというものである。

手戻り作業である縫返しと比べた利点を示すと、

- ・縫返しという再掘削行為が発生しないため、地山の新たな応力解放がなく支保工に作用する外圧は減少。

- ・掘削当初に設置された一次支保工は撤去しないため、多重に設置された支保工により三軸状態に拘束され、抗土圧部材として活用可能。

- ・縫返しはやむを得ず実施されるものであが、多重支保工は計画的に実施可能であるため、工程管理が容易。

しかし、同工法は、縫返し先取りともいえる工法であり、坑内変位をある程度許容するため、掘削断面積が

どうしても大きなものになってしまうという欠点がある。

また、いなし工法の考え方をベースとしているため、当初、二次支保の設置位置は切羽から3.5D（D：掘削径）以上離すのが効果的としていた<sup>12)</sup>が、地質条件の悪い地山では一次支保の変状が著しくなりトンネルの安定を確保する必要が生じたため、切羽から1～2D程度後方で二次支保を設置した事例もある<sup>13)</sup>。

#### b) 同時施工<sup>14)</sup>

一方、多重支保において同時に施工された事例としては、大規模地すべり脆弱部とトンネルが交差する区間においてトンネル掘削による地山の変位を極力抑制する必要が生じたため同時施工が実施されている。施工性を考慮して一次支保施工後、切羽から4～6サイクル（3.6～5.4m）後方で二次支保工および上半仮閉合（ストラット含む）の施工を行い、二重支保工全体の剛性によりトンネル変形抑止と上半脚部の沈下防止を図っている。地すべり区間以外での一次支保と比較しても、二重支保の変位抑制効果は高く、支保の変状もみられていない。

また、多重支保工においても一次支保は早期に閉合を行う必要があり全断面に近い状態で掘削を行うため、先に示した全断面早期閉合の事例と同様に、切羽安定対策として鏡補強工が採用されている。

### (3) 最善管理型二重支保構造

当トンネルにおいて採用した最善管理型二重支保構造とは、「二重支保の施工において、従来のいなし工法と同時施工の中間的な意味合いの支保構造で一次支保工の支保機能を残したうえで二次支保工を設置する。」<sup>3)</sup>という考え方である。そのため最善管理型二重支保構造は、一次支保の健全性が損なわれることを考慮している従来の「いなし工法」をベースとする「多重支保」工法と考え方が異なり、計測結果に基づく適切な二重支保の施工時期の設定を行い、一次支保工にも耐力を残した状態で二次支保を設置するというものである。

## 3. 数値解析による鏡補強工の評価

全断面早期閉合によるトンネル施工を実施するためには、鏡面の自立確保、切羽面の崩壊防止や先行ゆるみを抑制する目的で、補助工法、特に鏡補強工の採用が必要であると考えられた。そこで、鏡補強工の三次元的な挙動を把握するため三次元数値解析による検討を行った。

本解析は、各補助工法の切羽安定効果に関して、三次元有限差分数値解析（FLAC3Dコード）により評価したものである。また、鏡面の安定対策と先受け工法の併用効果についても検討を行った。

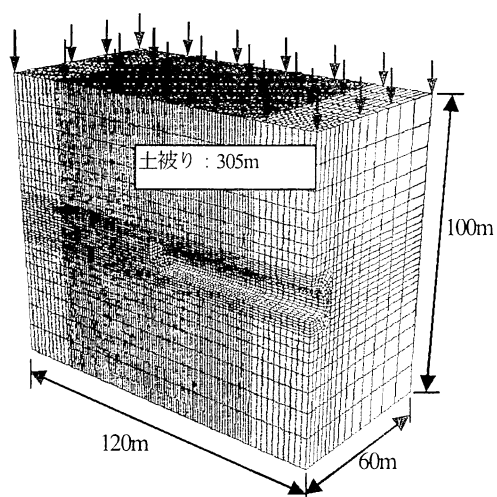


図-2 解析モデル

表-2 地山物性値

|        |            |                      |
|--------|------------|----------------------|
| 単位体積重量 | : $\gamma$ | 24 kN/m <sup>3</sup> |
| 弾性係数   | : E        | 150 MPa              |
| ポアソン比  | : $\nu$    | 0.34                 |
| 粘着力    | : c        | 0.2 MPa              |
| 内部摩擦角  | : $\phi$   | 30 °                 |
| 土被り    | : H        | 305 m                |

表-3 支保工・補助工法入力値

|            | 単位<br>体積重量                    | 弾性係数                           | ポアソン比 | 要素    | 備考                              |
|------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|---------------------------------|
|            | $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> ) | E (MPa) [kgf/cm <sup>2</sup> ] | $\nu$ |       |                                 |
| 合成支保工      | 2539                          | 9,235 [92,350]                 | 0.3   | Shell | 鋼製支保工 (H-200) +吹付けコンクリート (25cm) |
| 長尺鋼管先受け工   | 7800                          | 210,000 [2,100,000]            | 0.3   | Beam  | ボルト長12.5m, ピッチ : 450mm          |
|            | 2400                          | 300 [3,000]                    | 0.3   | solid | 改良領域                            |
| 長尺GFRP鏡補強工 | 1750                          | 20,000 [200,000]               | 0.3   | Beam  | ボルト長12.5m, ピッチ : 1500mm         |

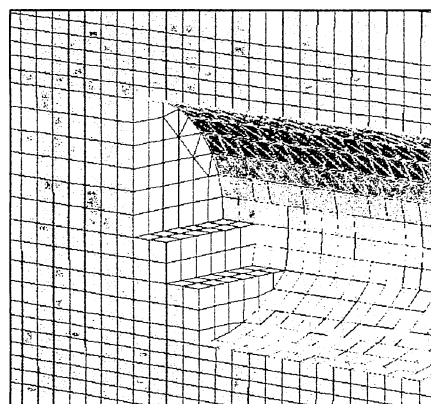
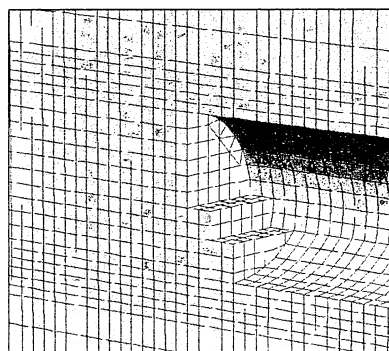
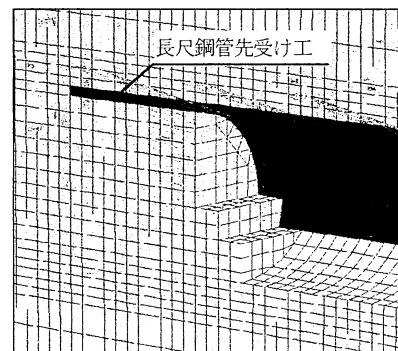


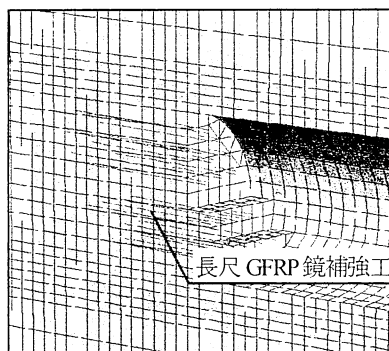
図-3 早期閉合モデル



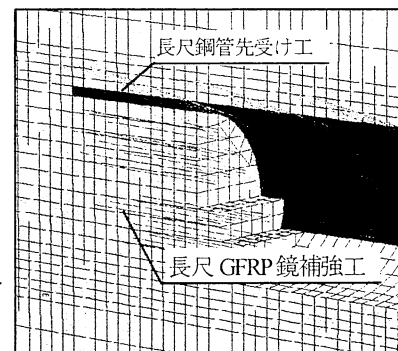
1) 補助工法なし



2) 長尺先受け工



3) 長尺鏡補強工



4) 長尺先受け工+長尺鏡補強工

図-4 検討ケース

解析条件としては、図-2に示す三次元モデルを用いて弾塑性解析による検討を実施した。なお、地山物性値

は表-2に示すように、トンネル支保構造の検討において実施した予測解析<sup>3)</sup>と同様のものを採用した。また、

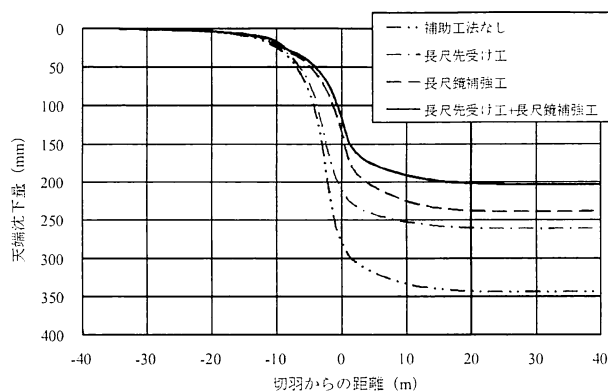


図-5 天端沈下量

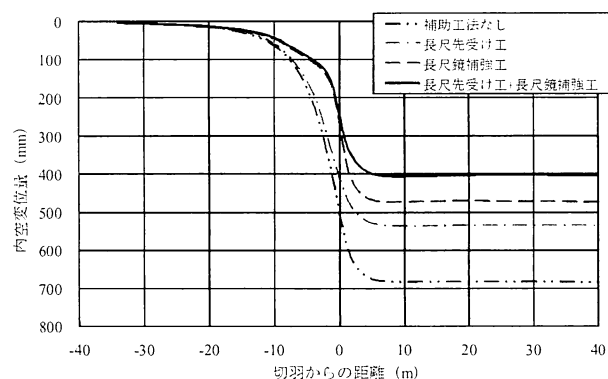


図-6 内空変位量

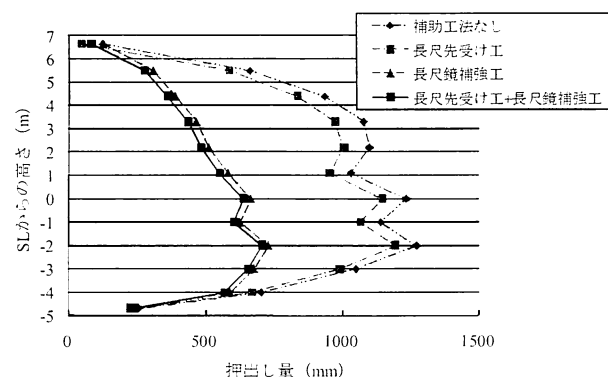


図-7 鏡面押出し量

支保工・補助工法の入力値を表-3に示す。二重支保については三次元の数値解析で実施された事例が少なく、支保工設置のタイミングや吹付けコンクリートの強度などモデル化の入力が煩雑になるため、今回はモデル化を行わないものとする。また、全断面掘削（早期閉合）の施工を考慮して図-3に示す早期閉合モデルを用いた。検討ケースは図-4に示すように4ケースとした。

ケース 1) 補助工法なし

ケース 2) 長尺鋼管先受け工

ケース 3) 長尺 GFRP 鏡補強工

ケース 4) 長尺鋼管先受け工+長尺 GFRP 鏡補強工

図-5および図-6に天端変位量と内空変位量を示す。補助工法なしの場合には、全変位量（先行変位含む）で天端沈下量が340mm程度の大きな沈下となり、内空変位に関しても680mmといった大きな変位が発生する結果となった。

各補助工法を採用することで天端変位、内空変位ともに抑制されるが、長尺鋼管先受け工+長尺 GFRP 鏡補強工による効果（天端沈下 200mm 程度、内空変位 400mm 程度）が最も期待できることが分かった。なお、長尺鋼管先受け工のみを採用した場合には、長尺 GFRP 鏡補強工を併用した場合と比べ切羽周辺地山を拘束する効果は小さいため、先行変位量が早期に発生し始め、先行変位量自体も大きくなっている。図-7に鏡面の押し出し量の比較を示す。

補助工法を採用しない場合や長尺鋼管先受け工のみの場合には1000mmを越える押し出しが発生している。

天端沈下量および内空変位量と同様、長尺 GFRP 鏡補強工の採用により切羽押し出し量が大幅に改善されることが分かった。

長尺 GFRP 鏡補強工の採用により切羽押し出し量を抑制することで切羽面付近が三軸状態となり、先行変位、および、先行ゆるみの抑制効果が発揮されていると考えられる。

#### 4. 前方地山補強工の考え方

本坑施工時の支保構造の検討を行った結果、最善管理型二重支保構造による施工のみ一次支保工、二次支保ともに許容値内に収まる結果となっている<sup>3)</sup>。しかし、非常に土被りが大きいため、トンネルの支保構造の安定にとっては、支保工に作用する荷重をいかに少なくできるかが重要となった。

従来のアンブレラ工法は、剛性の高い部材により、先行変位の抑制、地山のゆるみ防止などが主な目的となっており、対策の主眼が上半切羽接近、到達からアーチ支保設置までの先行変位の抑制に重点を置いているため、沈下が懸念されるような場合には脚部補強工が併用されるケースもみられる。当トンネルのように土被りが大きく脆弱な地山では、切羽近傍での早期閉合時に応力解放に伴う大きな荷重が支保工に作用する懸念が高いと考えられた。

そこで、前方地山補強を比較的高角度（20°程度）に打設して周辺地山を一体化するリング補強工という考え方を既往の実績より取り入れた。以下に、長尺鋼管先受け工（AGF工法）とリング補強工法（FIT工法）の作用効果の概念について述べる。

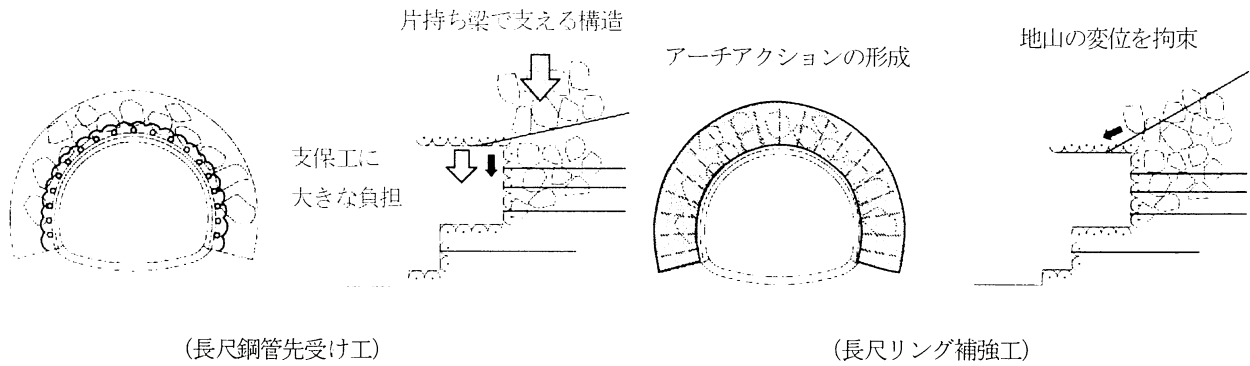


図-9 作用効果の模式図

## (1) 先受け工とリング補強工の作用効果概念

### a) 長尺鋼管先受け工（AGF工法）

図-9に長尺鋼管先受け工の作用効果模式図を示す。長尺鋼管先受け工は剛性の高い鋼管による先受け工を採用することで、先行変位を抑制し切羽の安定を向上させる工法である。

模式図に示すように、長尺鋼管先受け工は前方の未固結な岩塊を剛性の高い長尺鋼管により支保工を支点として、比較的低角度（10°程度）の片持ち梁でゆるみ荷重を支えることとなる。当該区間においては、大土被り（250m以上）であるため、十分に支えられない懸念があった。

### b) 長尺リング補強工（FIT工法）

図-9に長尺リング補強工の作用効果の概念図を示す。長尺リング補強工は前方地山を長尺のFIT管の打設によって縫い付け周辺地山を拘束し、管のもつ引張強度により地山の一体化を図る工法である。図に示すように比較的高角度（20°程度）に打設することで、広い範囲の補強効果を図り、管の軸力により地山の変位を拘束する。

長尺鋼管先受け工との相違点は、長尺鋼管先受け工が支保工を支点として片持ち梁のようにゆるみ荷重を支えることで先行変位の抑制を図るのに対して、長尺リング補強工では補強材により地山を縫い込み、地山の一体化を図ることによってアーチアクションの形成を促し、先行変位の抑制を図る点にある。

地山との付着強度の高いFIT管は最もこのリング補強工の考え方に適していると言える。なお、長尺鏡補強工（FIT工法）を併用することで、さらに切羽前方地山を拘束し、同時に先受け間から抜け落ちも防止する。

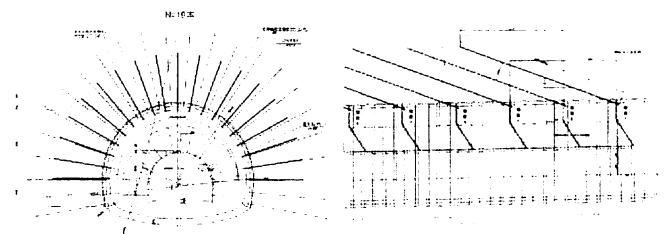
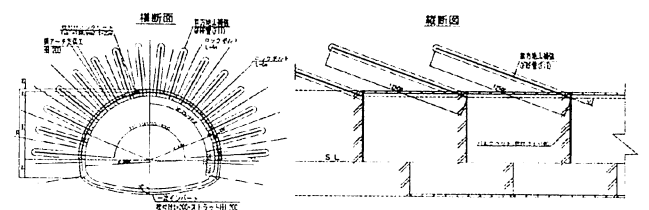
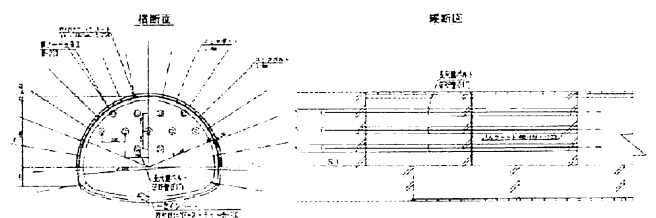


図-10 補助工法パターン図例 1<sup>15)</sup>  
(一部加筆修正)



(前方地山補強工)



(長尺鏡補強工)

図-11 補助工法パターン図例 2<sup>16)</sup>

## (2) 「リング補強工」の事例

2章で示した事例は、切羽前方地山補強工として、長尺先受け工および長尺鏡補強工を併用した事例がほとんどであったが、ここでは、長尺補強工を切羽から斜め前方外周に20°程度の高角度で打設したリング補強工についての事例を示す。図-10に示す例では、引張耐力が大きく軽量で多様な打設角度の施工を容易に行える長尺GFRP管が前方地山補強工に用いられており、トンネル

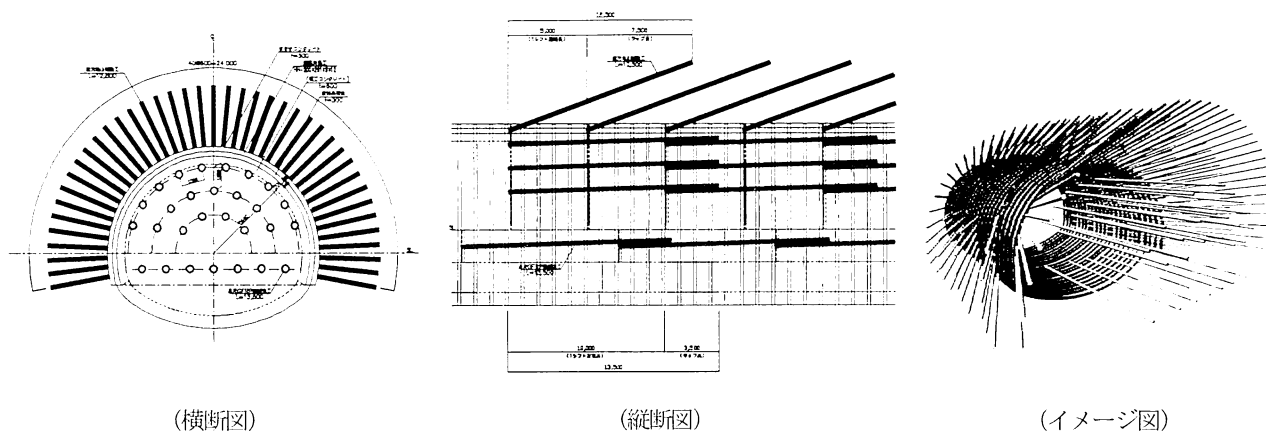


図-12 切羽前方地山補強打設パターン

外周のゆるみ範囲に相当する領域を事前に補強することで地山改良効果を発揮するとともに、掘削後にもトンネル外周部に残置する部材がトンネル内空側に変位する地山を拘束するロックボルト（斜めボルト）の機能を併せ持つことを期待している。施工の結果として、掘削後に微増する変位を抑えるなど地山を安定化させる効果が確認されている<sup>15)</sup>。なお、このトンネルは補助坑（避難坑）の本工拡幅掘削のため鏡補強工は使用されていない。

また、同様のパターンにて施工された別の事例（図-11）では、長尺補強部材を前方地山補強工に用いた区間と長尺鏡補強工に用いた区間とで比較も行われており、前方地山補強工（リング補強工）の区間では、鏡面の安定効果に不安定要因を残す結果にはなったものの、長尺鏡補強工のみを施工した区間に比べ、切羽の安定性は若干劣るが、坑内の変位抑制効果および支保工の応力抑制効果が確認されている<sup>16)</sup>。

以上のように、リング補強工を実施することで、坑内変位の抑制だけでなく、斜めボルトの機能によりトンネル掘削面外周の周辺地山を安定化させると同時に、支保工の応力抑制効果も期待できることが分かる。

## 5. 補助工法施工パターンの提案

当該区間においては、三次元数値解析の結果や既往の実績を参考に鏡補強工にリング補強工を併用した施工が必要であると考えられた。そこで、図-12に示すような切羽前方地山補強打設パターンの提案を行った。補助工法のシフト長については、施工性を考慮し、図-12に示すように長尺リング補強工および長尺鏡補強工を同一切羽で施工できるようにシフト長の設定を行った。

また、FIT管の横断面の打設ピッチについては、①従来の実績、②リング形状を考慮、③塊状蛇紋岩の規模

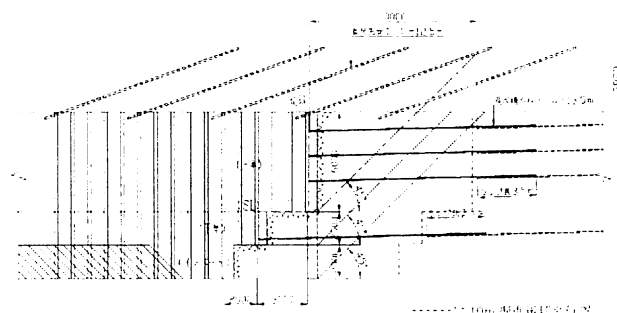


図-13 ラップ長の考え方

（1m超）などをふまえ、トンネル外周面から4m程度の範囲をカバーし補強できるように打設ピッチを0.6mに設定した。

実際のトンネル施工においては図-13に示すように上半、下半、インバートの施工には若干の切羽離れが生じてしまう。設計の方針としては、長尺リング補強工および長尺鏡補強工により地山を一体化することで、突発的な崩落を防止することが目的であるが、長尺リング補強工に関しては上半掘削時に前方ゆるみ領域外まで打設することが重要となる。なお、リング補強工のラップ長は5mおきに打設を行うため7.5mである。また、長尺鏡補強工に関しても、十分なラップ長を確保することが重要となる。図-13に示すように全断面でゆるんだ際にも、既往の実績より勘案される最低ラップ長：3.5mを確保できるように長尺鏡補強工の打設長を13.5mとした。

なお、施工時の地山状況や計測結果をふまえ、補助工法の追加や低減を図ることを考慮し、縦断方向の打設ピッチを延長（または短縮）したり、横断方向の打設ピッチを広げる（または縮める）ことが考えられる。

## 6. まとめ

土被りが250mを超える蛇紋岩での施工というこれまで実績のない特殊条件におけるトンネル工事の補助工法の選定に関して、効果的な対策工となるように検討を行った。

鏡補強工に関しては、三次元数値解析により、坑内発生変位量の低減や、鏡押し出し量の抑制効果の確認を行った。また、先受け工に関しては、既往の研究より、先受け工を比較的高角度（20°程度）に打設するリング補強工という考え方を導入し、変位の抑制効果だけでなく、支保工に発生する応力の抑制効果も期待した設計とした。

今後、報告した結果などを参考に土被りの大きい脆弱地山において、より合理的なトンネル施工が行われれば幸いである。

謝辞：本工事の施工にあたっては、北海道支社管内トンネル施工技術検討委員会において、委員長である北海道大学工学部三上教授はじめ、各委員の方々の貴重な助言を頂いた。最後に紙面を借りて厚く感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 山田浩幸, 加藤吉文, 大村修一, 久保田聡: 変位の大きい脆弱地山における補助工法の設計と施工に関する一考察, トンネル工学報告集, 第17巻, pp.51-85, 2007.
- 2) 福田毅, 山田浩幸, 藤澤勉, 大村修一, 村上章: 逆解析を用いた情報化施工高度化に関する一考察, トンネル工学報告集, 第17巻, pp.59-65, 2007.
- 3) 山田浩幸, 佐々木正博, 大村修一, 高田篤: 土被りの大きい脆弱地山（蛇紋岩）におけるトンネル設計と施工に関する一考察, トンネル技術研究発表会論文集, pp.81-92, 2009.
- 4) 臼田芳彦, 田中一, 神澤幸治, 平野宏幸: 付加体脆弱地質を切羽補強工で克服, トンネルと地下, vol.38, no.3, pp.23-32, 2007.
- 5) 照屋正史, 高良哲治, 駒谷恒雄, 森崎泰隆: 民家直下で超近接トンネルを全断面早期閉合により施工, トンネルと地下, pp.17-24, vol.38, no.7, 2007.
- 6) 御手洗良夫, 森崎泰隆, 今田徹: 全断面早期閉合による施工法の考え方とその実例, トンネルと地下, vol.38, no.9, pp.51-61, 2007.
- 7) 寺山徹, 津野和宏, 内海貴志, 蛭川愛志: 補助ベンチ付き全断面掘削・早期閉合で都市トンネルを掘る, トンネルと地下, vol.39, no.5, pp.7-17, 2008.
- 8) 松本章, 真弓英大, 岡山徹: 地すべり直下を大規模押さえ盛土と早期閉合で施工, トンネルと地下, vol.40, no.3, pp.37-47, 2009.
- 9) 竹下卓宏, 森山安夫, 伊藤典彦, 益子篤史: 付加体の破碎質粘板岩層を早期閉合で施工, トンネルと地下, vol.40, no.6, pp.17-24, 2009.
- 10) 石井重好, 河原正儀, 田村佳丈, 高野浩司: 坑口部のまさ地山を早期閉合により克服, トンネルと地下, vol.40, no.8, pp.29-37, 2009.
- 11) 北川修三, 梶原雄三, 鈴木恒男, 川原一則: 二重支保工法で膨張性地山を克服, トンネルと地下, vol.31, no.11, pp.7-16, 2000.
- 12) 竹津英二, 小島隆, 森田隆三郎: 膨張性地山を多重支保工法で克服: トンネルと地下, vol.34, no.8, pp.7-13, 2003.
- 13) 中村敦, 玉井達毅, 松原外喜雄, 森田隆三郎: 異常な膨張現象が発生する擾乱帯を多重支保方式で突破, トンネルと地下, vol.36, no.7, pp.7-17, 2005.
- 14) 川村俊一, 島豊, 河田孝志, 金岡幹: 大規模地すべり脆弱部を2重支保で突破, トンネルと地下, vol.37, no.12, pp.7-15, 2006.
- 15) 牛田猛, 戸田一生, 村松富士登, 尾花敬治: 注入式中空長尺 GFRP 管による大土被りトンネルの変位抑制, 第54回施工体験発表会（山岳）, pp.65-72, 2004.
- 16) 大津敏郎, 広瀬雅明, 澤田和也, 徳留修: 衝上断層の影響を受けた押出し性地山における切羽対策, トンネルと地下, vol.38, no.4, pp.19-27, 2007.

## STUDY ON THE AUXILIARY METHOD OF THE TUNNEL FACE FORWARD IN SEPENTINE ROCK WITH LARGE OVERBURDEN

Shingo MORIMOTO, Toshinaga TAKAHASHI, Syuichi OMURA  
and Hiroyuki YAMADA

The Hobetsu tunnel has a total length of 4 323m and now is under construction by using NATM. The tunnel is located in complex rock masses, which are called *mélange* (compound of mudstone, green rock, and serpentine rock), among which, large deformation was confirmed in the section composed of serpentine rock with large overburden (over 300m). The adoption of auxiliary method in the tunnel construction was considered necessary to ensure the stability of the tunnel face and support structure.

The present study executes a 3D numerical analysis about the effect of the reinforcement the tunnel face forward, and reports on the idea of the design of reinforcement the tunnel face forward that reflects results in the numerical analysis and the past.