

5. 3連トンネル部の掘削計画について

- 1. 掘削検討フロー..... P1
- 2. 現在の状況..... P2～3
- 3. リスクの評価..... P4～6
- 4. 補助工法の検討..... P7～13

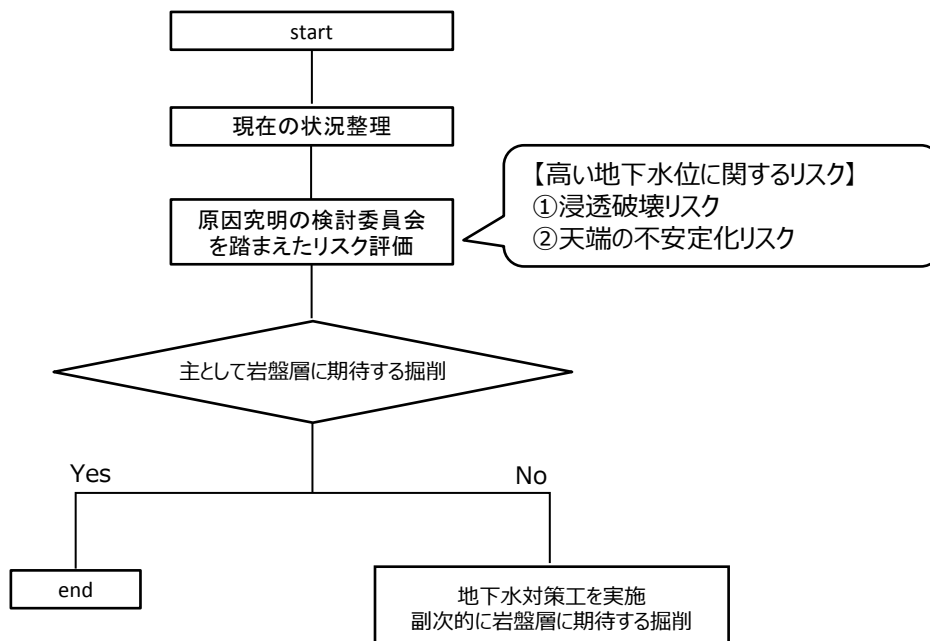
平成30年11月29日(木)

福岡市交通局

3連トンネル掘削計画

(1) 掘削検討フロー

技術専門員会での討議を踏まえ、3連トンネル掘削に向けた検討フローを見直した。



3連トンネル掘削計画

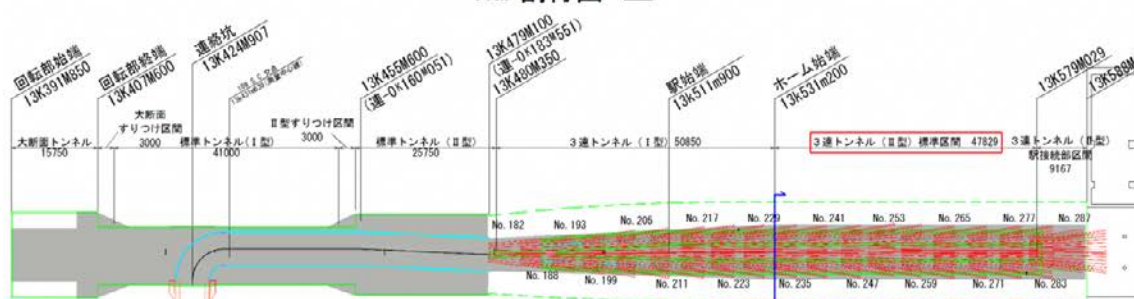
(2) 現在の状況①

3連トンネル掘削時のリスクを整理する上で、現在までの掘削状況等について整理した。

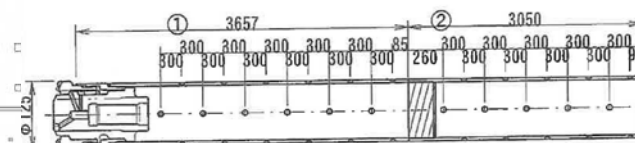
現在の構築状況

3連トンネル (Ⅱ型)

AGF割付図



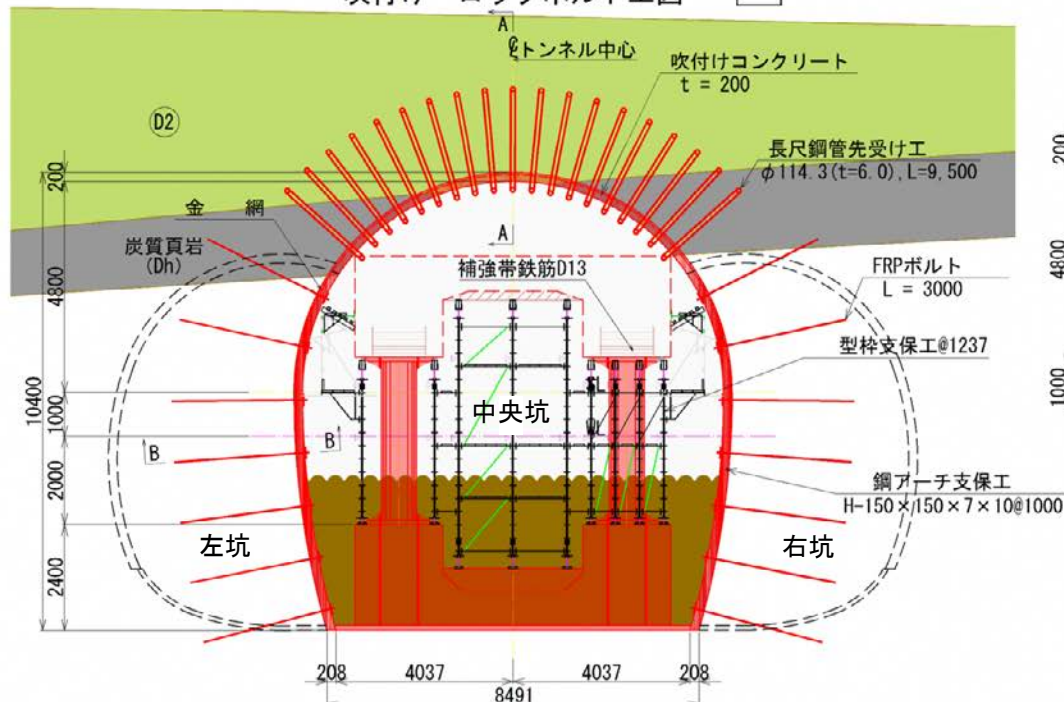
パイプ打込み状態



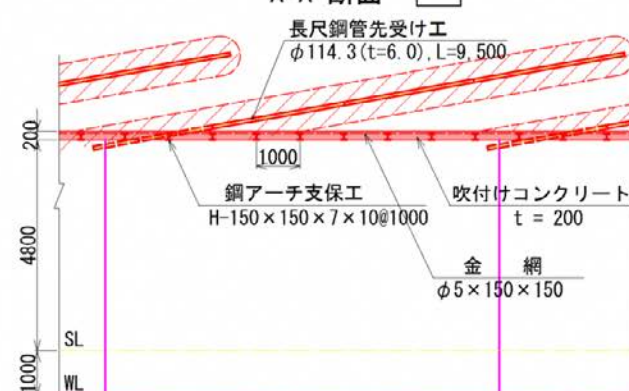
※注入孔は300ピッチ

※3連Ⅰ～Ⅱ型のAGFのみを表示

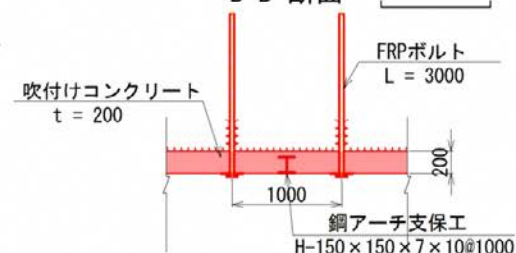
吹付け・ロックボルト工図



A-A 断面



B-B 断面

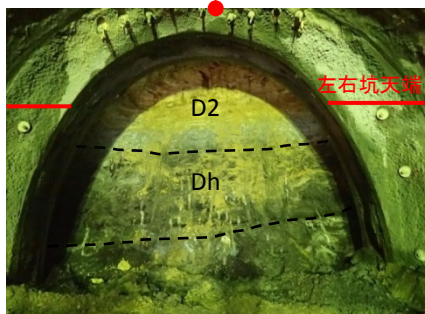
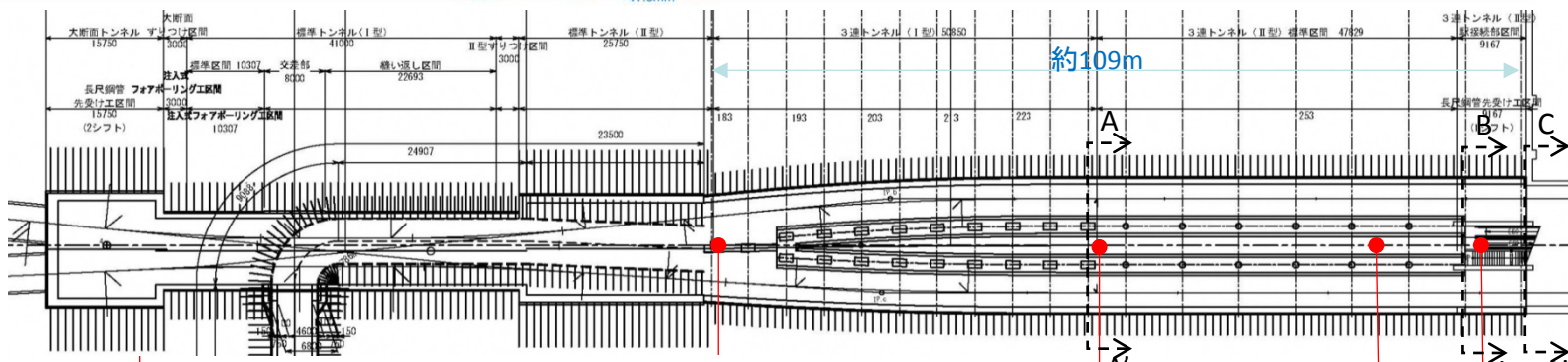
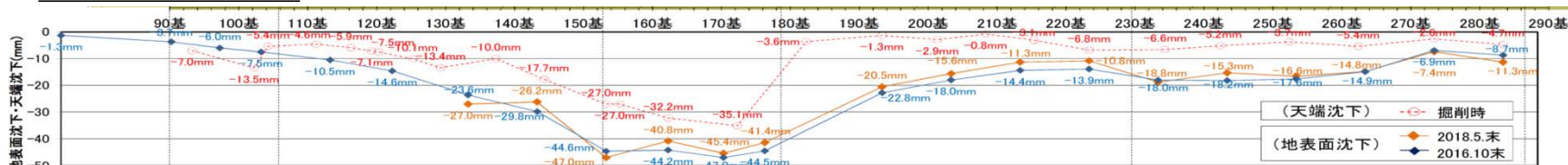


3連トンネル掘削計画

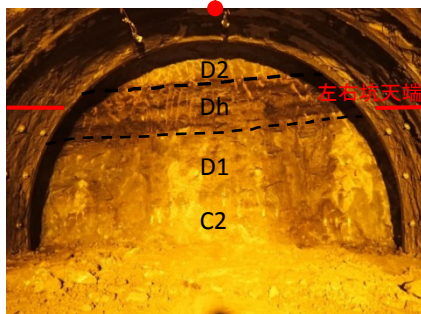
(2) 現在の状況②

中央坑天端は脆弱な地山であり、一部破砕されている箇所も存在した。

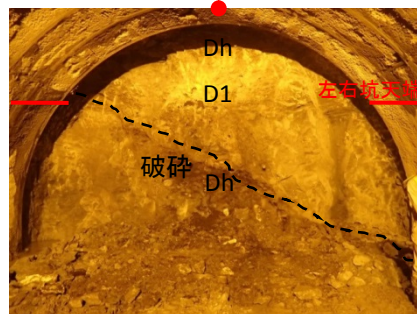
中央坑掘削時の状況



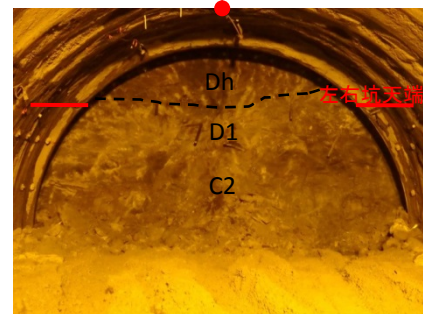
184基



235基



264基



278基

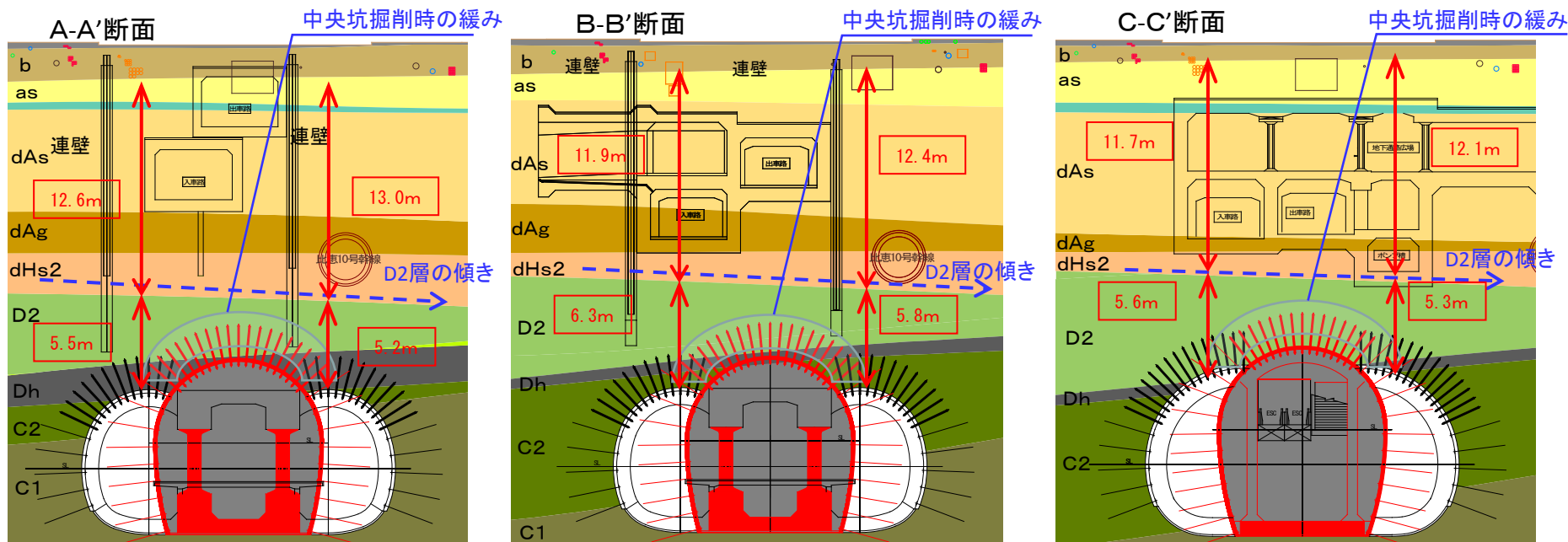
	3連トンネル I 型 (184基)	3連トンネル II 型 (235基)	3連トンネル II 型(破砕部) (264基)	3連トンネル駅接続部 (278基)
左右坑天端	D2	Dh	D1(破砕)	Dh
切羽状況	極めて脆弱	脆弱	破砕, 切羽部分崩落	比較的安定
湧水	なし	なし	下半側壁から湧水(150L/min)	なし
中央坑補助工法	AGF 鏡吹付コンクリート	AGF 鏡吹付コンクリート	AGF, 水抜きボーリング 鏡吹付, 長尺鏡ボルト	AGF 鏡吹付コンクリート

3連トンネル掘削計画

(3) リスク評価（中央坑掘削時との違い）

原因究明の検討委員会における提言を踏まえて、左右坑掘削時の中央坑掘削時との違いを整理した。

3連トンネル（横断面）



- ①左右坑の掘削断面積は約 33m^2 であり、中央坑の掘削断面積(91m^2)の約 $1/3$ である。
- ②左右坑の天端は中央坑よりも約 1.9m 低いが、右坑の上部には下水管（比恵10号幹線）が近接している。
- ③中央坑掘削に伴う緩みが発生している状態で、左右坑の掘削を行う。
- ④中央坑掘削時は地下車路の縦断剛性が抵抗しており、沈下量が少なくなった可能性がある。
- ⑤D2層上端面が北から南に傾いており、右坑掘削においては、中央坑掘削時よりもD2層の岩被りが薄くなる箇所がある。
- ⑥中央坑掘削時にDh層の存在が確認されたことに加え、追加地質調査の結果から、左右坑掘削時もトンネル天端やその上部にDh層が存在する可能性が高い。

左右坑天端は中央坑天端より低い位置であるが、左右坑の掘削についても慎重に進める必要がある。

(3) リスクの評価（掘削に向けた現状と課題）

3連トンネルの中央坑については安全に掘削が完了しているが、今後、左右坑を掘削していくにあたり、より安全に施工するため、リスクについて整理する。

①地下水対策の必要性について

トンネル上部の地層は、土砂層、D2層、Dh層で構成されている



D2層、Dh層とトンネルが接する箇所への**地下水対策**（浸透破壊対策）
について検討が必要



②天端安定化対策の必要性について

3連トンネル左右坑をNATMで掘削する



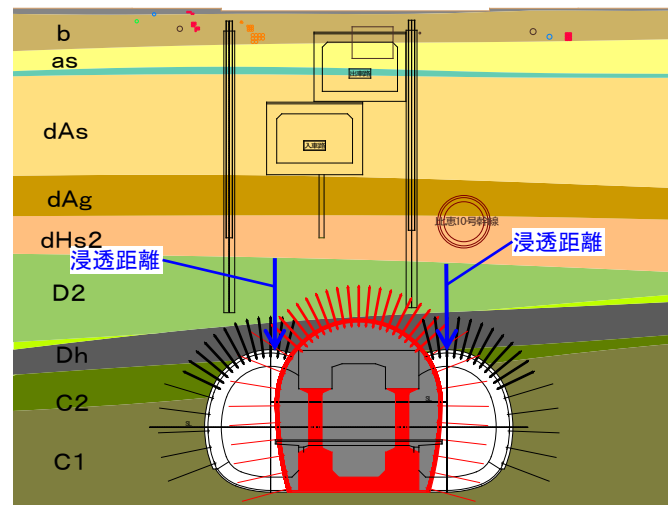
D2層、Dh層の局所的弱部等により
トンネル天端部が力学的に不安定化する可能性がある



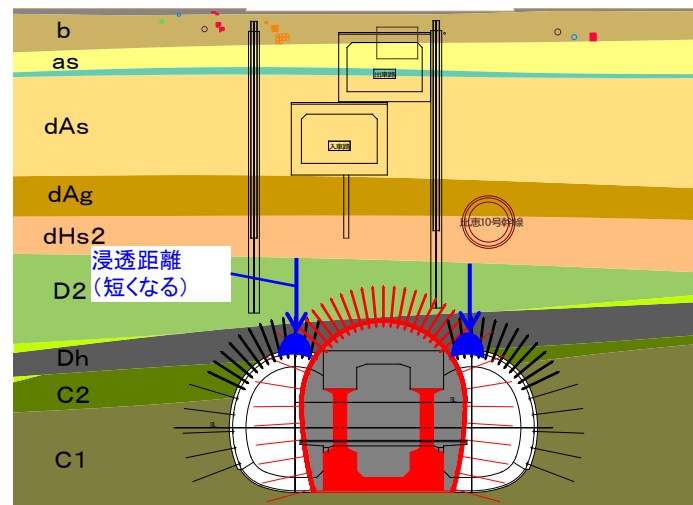
抜け落ち、地山の緩み等が発生し浸透距離が短くなる可能性がある



天端安定化対策（力学的安定化対策）について検討が必要



浸透経路図



浸透距離が短くなるケース

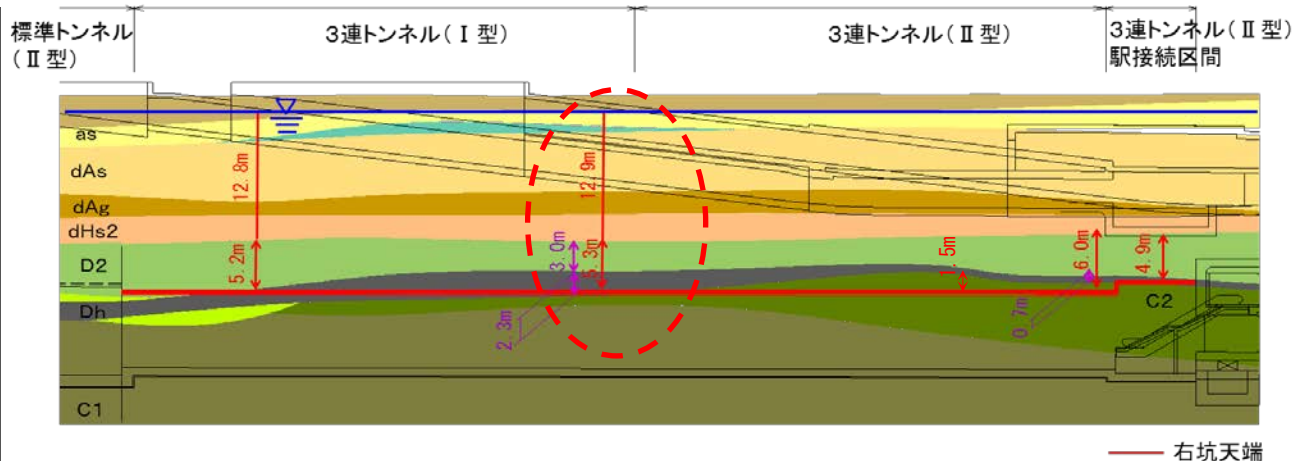
3連トンネル掘削計画

(3) リスク評価 (浸透破壊に対する安全性)

3連トンネル左右坑上部の遮水層 (D2層, C2層) の層厚を整理する。

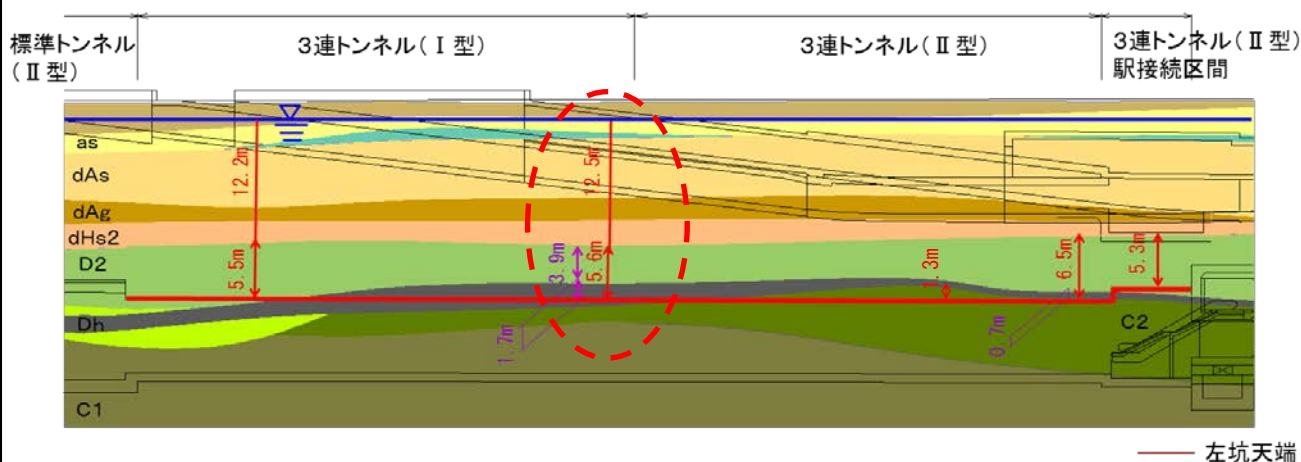
○ 3連トンネル右坑 (縦断面図)

3連トンネル右坑の岩かぶり厚は4.9~6.0mであるが、このうち、0.4~2.3mがDh (炭質頁岩層) である。



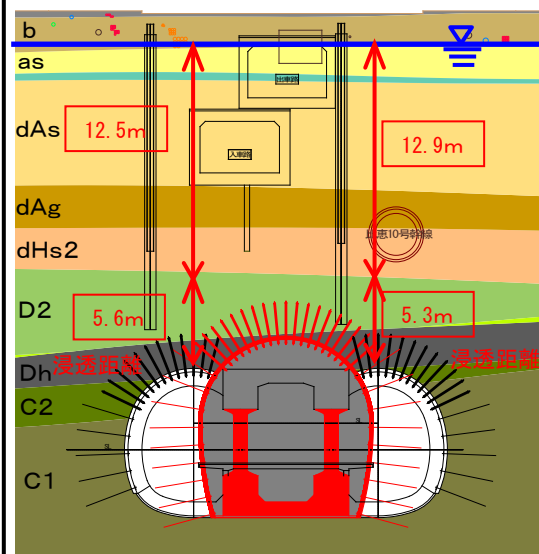
○ 3連トンネル左坑 (縦断面図)

3連トンネル左坑の岩かぶり厚は5.3~6.5mであるが、このうち、0.5~1.7mがDh (炭質頁岩層) である。



○ 3連トンネル左右坑 (横断面図)

3連左右坑縦断面図 (○) 付近の横断面図を示す。



中央坑よりもD2層が薄くなる箇所があることや、Dh層が天端付近に出現すること、D2層及びDh層の不陸や不均質性等を踏まえ、掘削計画を策定する必要がある。

(4) 補助工法の検討（止水対策）

前頁の評価を踏まえ、補助工法による止水対策に関する検討を行った。

	止水対策(遮水層の機能強化)	排水対策(地下水位低下工法)
地上から 施工	<u>× 採用不可</u> 交通規制が困難 (地下車路があり, 通行止めが生じる)	<u>× 採用不可</u> - 地下水位低下に伴う周辺地盤の沈下 (半径650mの範囲に影響し, 最大の場合10cmを超える沈下) - 大量地下水の排出先確保が困難(7,300m³/日の排水) - 止水壁構築の不確実性, 交通規制困難
坑内から 施工	<u>○要検討</u> - 遮水層の厚さを増す ・・dHs2層またはDh層を対象とした坑内からの地盤改良 - 遮水層の機能を補強する構造体 ・・AGF, パイプルーフ	<u>× 採用不可</u> - 上記に同じ - D2層を貫通するボーリングによる土砂部水位低下は流砂による陥没リスクが高い

	工法	止水に対する効果	課題
遮水層の厚さを増す	薬液注入工法	対象層に薬材が浸透し, 遮水性が得られる場合, <u>止水に対する一定の防止効果が期待できる。</u> 改良範囲を広げるほど浸透距離が長くなる。	・dHs2層には薬材が浸透しない ・Dh層に対する薬液注入工効果について確認した(次頁)
遮水層の機能を補強する	AGF工法(ウレタン)	「大きな水圧が作用する地盤の遮水効果は期待できない」ことから, <u>止水に対する防止効果は期待できない。</u>	
	パイプルーフ工法	パイプルーフにジョイントがない場合は隙間からの湧水が発生する可能性があるが, 隙間が僅かである場合, 管周りのグラウト等を適切に実施することで <u>止水に対する防止効果が期待できる。</u>	・中央坑の鋼製支保工を切断する場合, 荷重を安全に受替える必要がある

止水対策としては, パイプルーフ工法が有効な対策であると考えられる。

(4) 補助工法の検討 (D h層に対する薬液注入効果)

炭質頁岩層の強度, 止水性について薬液注入効果を整理する。

○炭質頁岩に対する薬液注入試験 (連絡通路部)

(1) 試験概要

炭質頁岩に対する薬液注入の効果を確認するため, 溶液型及び懸濁型の注入材料による試験を実施。

注入圧力は初期圧+1.0MPa, 注入率は13.5%を目安とした。

(2) 試験結果

1) 薬剤の浸透性

溶液型/懸濁型ともに所定の圧力以下で規定量を注入できたが, ボーリングコアを採取したところ, 薬材の逸走が確認された。

2) 透水係数: $1.56 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$

原地盤 ($1.9 \times 10^{-4} \text{cm/s}$) に比べ, 透水性の顕著な改善は見られない。 但し, 原地盤の透水係数が薬液注入の適用下限に近い。

3) 限界圧力: 0.16MPa~0.32MPa

トンネル掘削時には天端で約0.2MPaの水圧が作用することを鑑みると, 水圧に対して十分な抵抗力を有するとは評価できない。

4) 換算一軸圧縮強度: $1.2 \sim 7.8 \text{MN/m}^2$ (強度計測が不可能な箇所あり)

改良後のコアによれば, 性状, 換算一軸圧縮強度ともにバラツキがあり, 改良効果は限定的。

(3) 試験結果の評価

地下水圧に対する抵抗性が小さく注入効果は限定的。

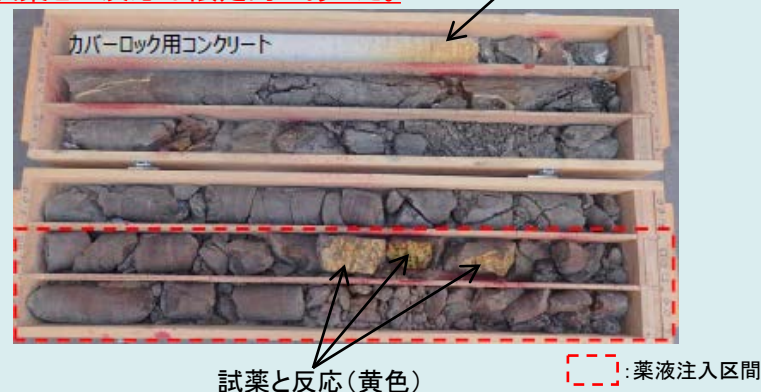
○ボーリングコアの状況

(1) 溶液型

試薬を塗布し, 薬材との反応を確認した。

⇒ 試薬との反応は限定的であった。

試薬反応(黄色)
※コンクリート部でテスト

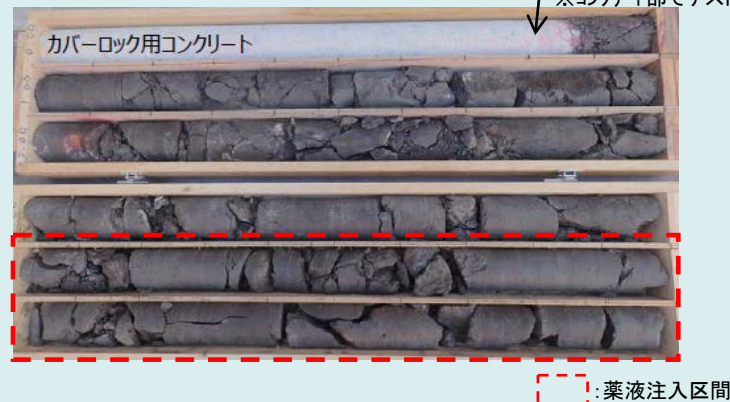


(2) 懸濁型

フェノールフタレインを塗布し, 薬材との反応を確認した。

⇒ 試薬との明確な反応は見られなかった。

試薬反応(赤色)
※コンクリート部でテスト



主たる地下水対策や天端安定対策として炭質頁岩層に対する薬液注入工は積極的な採用は難しい。

(4) 補助工法の検討（止水対策）

天端の安定対策として有効な先受工について、トンネル標準示方書に記載されている補助工法を比較する。

補助工法比較表

工法	工法概要	本現場への適用性	
フォアポーリング	切羽より斜め前方の地山に5m程度以下の長さのボルトやパイプ等を打設すると同時に超急結性のセメントミルクや薬液等を圧力注入し、切羽前方アーチ部の安定性を高める工法。	特に問題なし	○
長尺フォアパイルング(AGF)	地山のアーチ作用が期待できない不安定な地山を補強し、先行変位を抑制するとともに切羽の安定化を図る工法。鋼管の周囲の地山にセメントミルクや薬液等を圧力注入し鋼管と注入材が一体となった改良体を造成することにより地山の補強を図る。	特に問題なし	○
パイプルーフ	掘削断面外側に鋼管を一定間隔で挿入設置し、鋼管内よりセメントミルクまたはモルタルを注入充填しパイプ外周の地山のせん断強度を増すとともにパイプと地山を一体化してトンネル掘削面の外側に完全な防護を形成する工法。	3連トンネルの中央坑または開削部からパイプルーフを施工することが可能である。なお、中央坑の鋼製支保工を切断する場合は荷重を安全に受替える必要がある。	○
水平ジェットグラウト	切羽前方のトンネル外周部に長さ10m程度のパイル状改良体をアーチ上に造成する工法。	対象地山が未固結地山であり、 <u>本現場においては適用できない。</u>	×
スリットコンクリート	切羽前方地山で掘削予定部分の外周部に、アーチシェル状の薄肉覆工をあらかじめ施工して、掘削時の切羽安定、地表面沈下抑制を図る工法。	対象地山が未固結地山であり、 <u>本現場においては適用できない。</u>	×

比較表より、本現場で適用可能な先受工はフォアポーリングとAGF、パイプルーフであるが、天端の安定だけではなく、地表面や地下埋設物等に対する対策としても有効であるAGFまたはパイプルーフを採用することで、より安全に施工できると考えている。

なお、AGFの注入材を検討するうえでは、試験施工を実施して最も有効な注入材を選定することとする。

(4) 補助工法の検討 (まとめ)

地下水対策及び天端安定化対策を踏まえて、3連トンネル左右坑を掘削するために必要な補助工法について整理する。

①地下水対策に有効な補助工法

I. 止水対策(遮水層の機能強化)

⇒地上からの対策では、通行止めが生じる等、周辺環境に悪影響を与えるため適用できない。

⇒地下からの施工は可能。

II. 排水対策(地下水位低下工法)

⇒地上、地下からの対策では、地下水位低下に伴い周辺地盤が沈下する予測となっており適用できない。

地下からの止水対策を実施する

案1:薬液注入工

⇒試験施工を実施したが、不確実性があることから積極的な採用はできない。

案2:AGF工

⇒遮水効果が期待できないことから、適用できない。

案3:パイプルーフ工

⇒遮水対策が期待できる。

地下水対策としてはパイプルーフ工が有効と考えられる

②天端安定化対策に有効な補助工法

案1:フォアポーリング

⇒適用性は問題ないが、AGF工に劣る。

案2:長尺フォアパイリング(AGF工)

⇒適用性は問題なく、天端の安定だけではなく、地表面や地下埋設物等に対する対策としても有効。

案3:パイプルーフ

⇒適用性は問題なく、天端の安定だけではなく、地表面や地下埋設物等に対する対策としても有効。

案4:水平ジェットグラウト

⇒対象地山が未固結地山であり、本現場において適用できない。

案5:スリットコンクリート

⇒対象地山が未固結地山であり、本現場において適用できない。

天端安定化対策としては、

AGF工またはパイプルーフ工が有効と考えられる

「①地下水対策」及び「②天端安定化対策」がともに必要な範囲においてはパイプルーフ工を採用することで、3連トンネル左右坑を安全に掘削することができると考えられる。

C岩等の強固な層での掘削においては、地下水対策については考慮する必要が無い場合、AGF工またはパイプルーフ工を採用することで、3連トンネル左右坑を安全に掘削することができると考えられる。

(4) 補助工法の検討(対策案まとめ)

「①地下水対策」及び「②天端安定化対策」が必要な区間に対して実施する補助工法と
「②天端安定化対策」が必要な区間に対して実施する補助工法を整理する。

	地下水対策と天端安定化対策が必要な区間(面的補助工法)		天端安定化対策が必要な区間(線的補助工法)	
	横パイプルーフ工法	縦パイプルーフ工法	横パイプルーフ工法	AGF工法
補助工法イメージ				
概要	中央坑上部から横向(軌道直角方向)にパイプルーフを施工する方法。 鋼管を回転させて施工する工法を採用するため、鋼管は連結せず、鋼管端部を中央坑の桁で支持する。 地下水対策及びトンネル天端の安定性向上が目的であり、面的にパイプルーフを打設する。	開削部や標準Ⅱ型部から縦向(軌道方向)にパイプルーフを施工する方法。 施工方法によっては、隣接する鋼管を繋ぐジョイントがないタイプのパイプルーフとなる。 地下水対策及びトンネル天端の安定性向上が目的であり、面的にパイプルーフを打設する。	中央坑上部から横向(軌道直角方向)にパイプルーフを施工する方法。 鋼管を回転させて施工する工法を採用するため、鋼管は連結せず、鋼管端部を中央坑の桁で支持する。 トンネル天端の安定性向上が目的であり、線的にパイプルーフを打設する。	左右坑トンネル切羽付近から前向(軌道方向)にAGFを施工する方法。 孔を開けた鋼製支保工を使用し、AGF鋼管根元部の支持効果が得られる構造とする。 トンネル天端の安定性向上が目的であり、線的にAGFを打設する。
安全性	地下水	土砂層の高い地下水圧に対応できる。	土砂層の高い地下水圧に対応できる。	—
	力学	トンネル天端の安定性向上が期待できる。	トンネル天端の安定性向上が期待できる。	トンネル天端の安定性向上が期待できる。
課題	鋼製支保工を切断する際に、荷重を安全に受替える必要がある。		区間によって断面形状が異なるため、適用区間が限られる。 (駅接続区間及び3連Ⅰ型の一部に適用可能)	
			パイプルーフとAGF鋼管が干渉する箇所では、採用できない。	

※中央坑掘削時の切羽状況を踏まえ、鏡吹付コンクリートや長尺鏡ボルト等、切羽を安定させるための補助工法も必要に応じて実施する。

面的なパイプルーフ工法を基本とし、地下水対策が不要な区間については、線的なパイプルーフ工法を採用する。

(4) 補助工法の検討(検討結果)

補助工法については、トンネル上部からパイプルーフ(鋼管)を打設する方法を採用する。
面的な横パイプルーフを基本とし、現場条件※1により面的な縦パイプルーフ、線的な横パイプルーフ※2を採用する。

※1 横パイプルーフが施工不可能な箇所や地下水対策が不要となる区間。

※2 線的な横パイプルーフの代わりにAGF工法を使用する案については、AGF工法の前後区間でパイプルーフと干渉するため採用できない。

	地下水対策と天端安定化対策が必要な区間		天端安定化対策が必要な区間
	1. 横パイプルーフ工法(面的)	2. 縦パイプルーフ工法(面的)	3. 横パイプルーフ工法(線的)
補助工法イメージ			
概要	中央坑上部から横向(軌道直角方向)にパイプルーフを施工する方法。	開削部や標準Ⅱ型部から縦向(軌道方向)にパイプルーフを施工する方法。	中央坑上部から横向(軌道直角方向)にパイプルーフを施工する方法。

※中央坑掘削時の切羽状況を踏まえ、鏡吹付コンクリートや長尺鏡ボルト等、切羽を安定させるための補助工法も必要に応じて実施する。

[illegible]