

3. 3連トンネル部の掘削計画について

1. 検討フロー, リスク評価	P1～3
2. 断面形状の検討	P4～5
3. パイプルーフの成立性	P6～9
4. 地下水に対する抵抗性の評価	P10～15
5. 補助工法の検討	P16～18

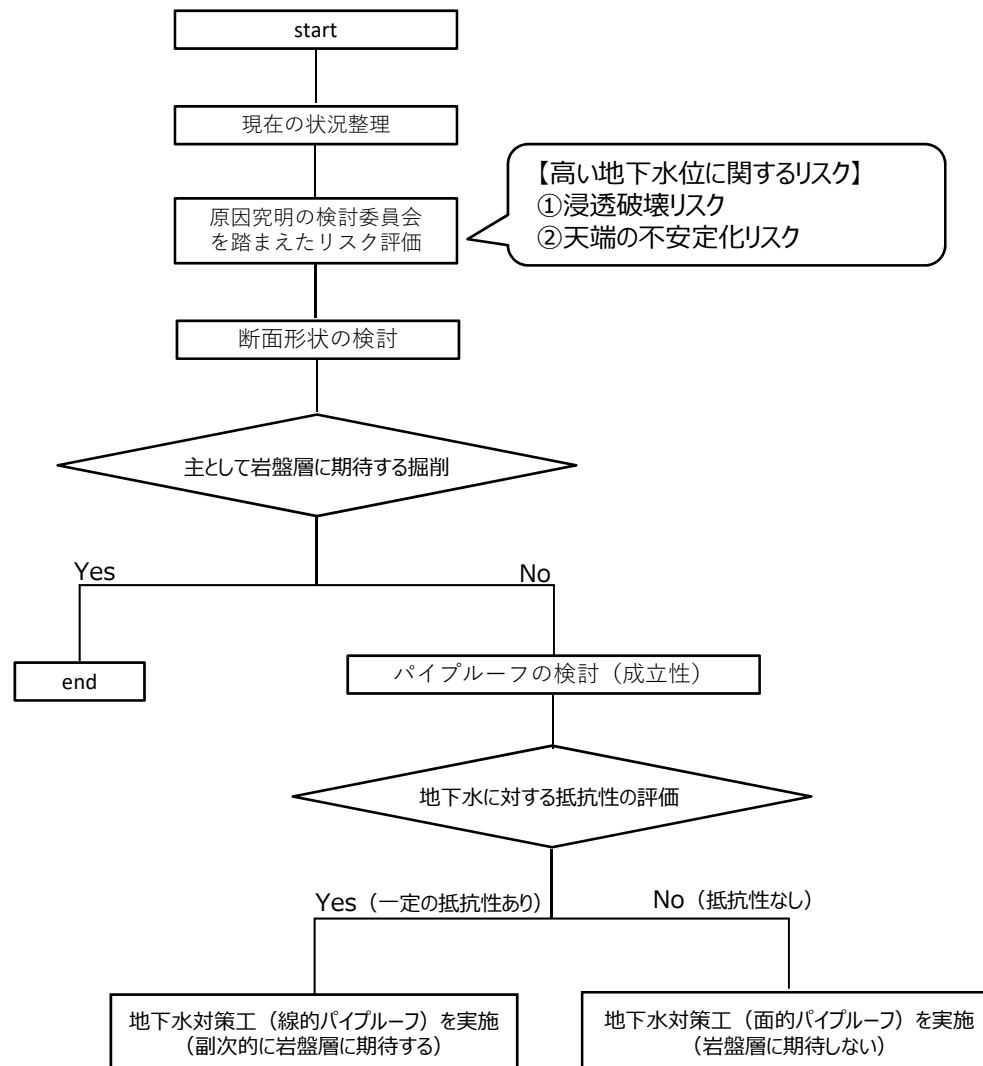
令和元年5月23日(木)

福岡市交通局

3連トンネル掘削計画

(1) 検討フロー, リスク評価

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示す。



3連トンネル掘削計画

(1) 検討フロー, リスク評価

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



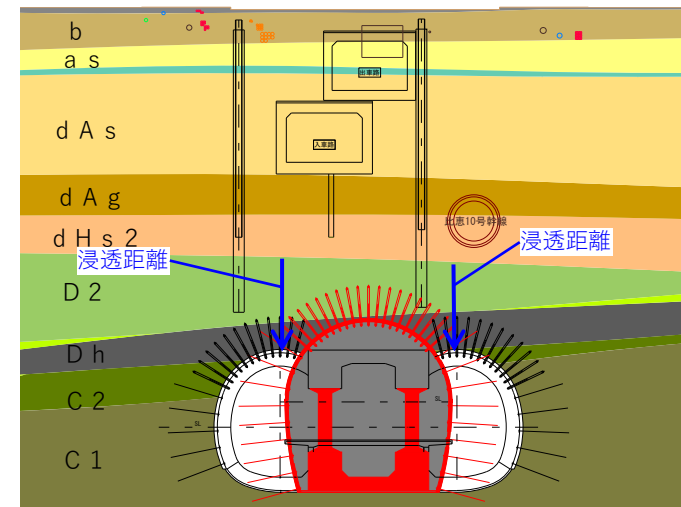
D2層、Dh層の局所的弱部等により
トンネル天端部が力学的に不安定化する可能性がある



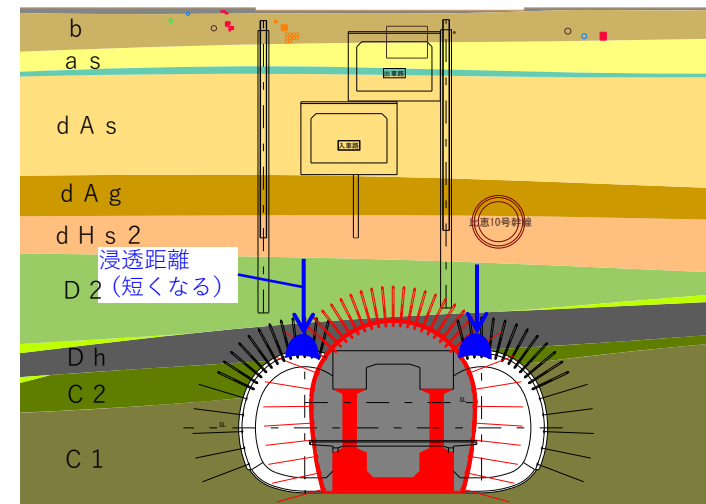
抜け落ち、地山の緩み等が発生し浸透距離が短くなる可能性がある



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



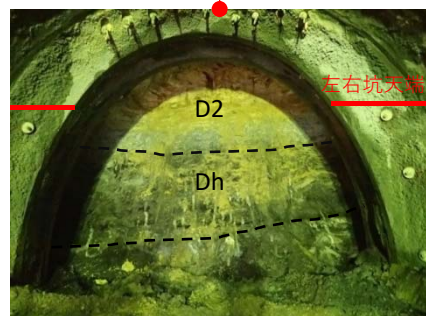
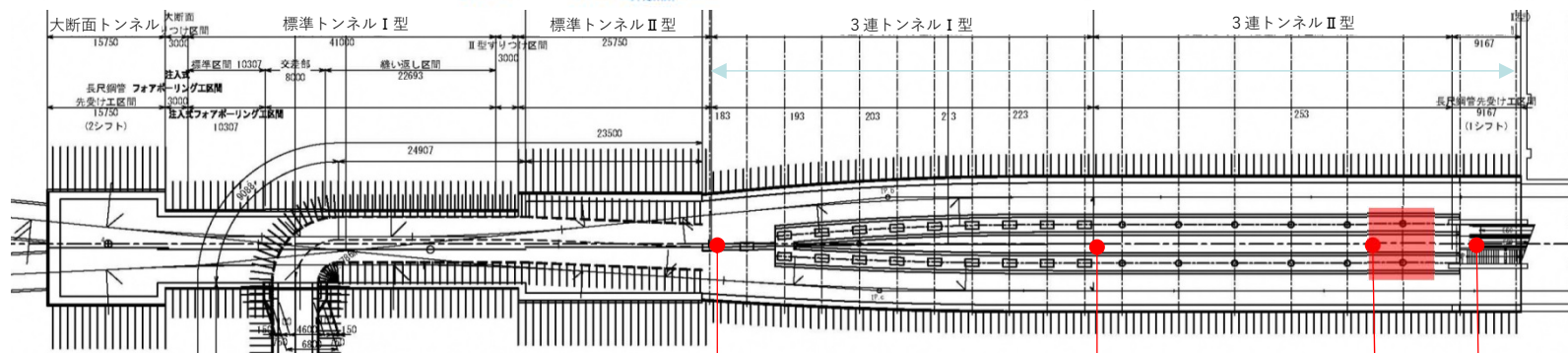
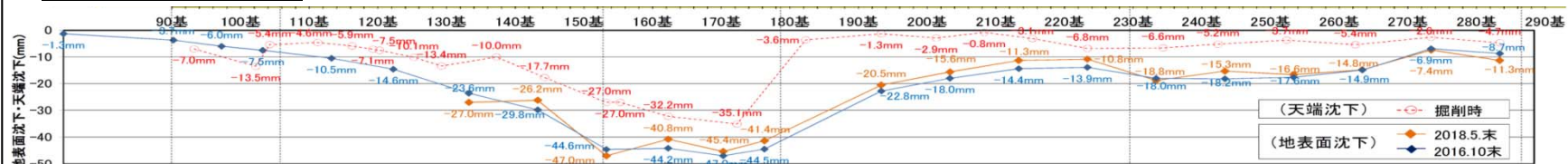
浸透距離が短くなるケース

3連トンネル掘削計画

(1) 検討フロー、リスク評価

中央坑掘削時の状況

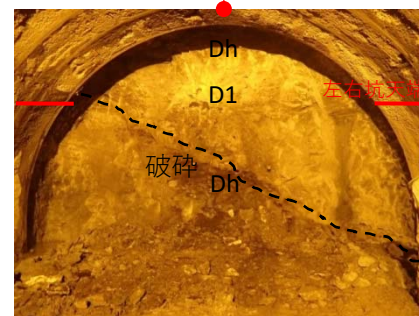
中央坑天端にはD 2層やDh層があり、一部破碎されている箇所も存在した。



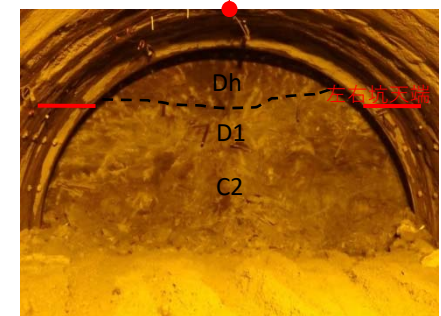
184基



235基



264基



278基

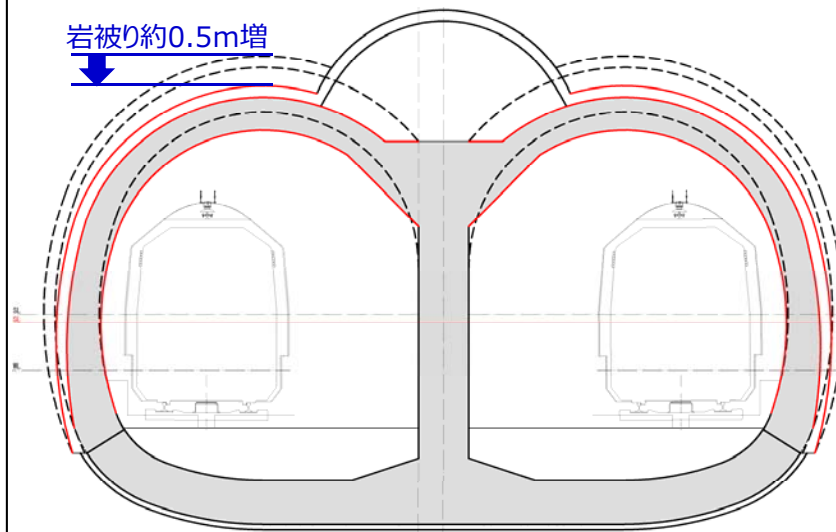
	3連トンネル I 型 (184基)	3連トンネル II 型 (235基)	3連トンネル II 型 (破碎部) (264基)	3連トンネル 駅接続部 (278基)
左右坑天端	D2	Dh	D1 (破碎)	Dh
切羽状況	極めて脆弱	脆弱	破碎, 切羽部分崩落	比較的安定
湧水	なし	なし	下半側壁から湧水 (150L/min)	なし
中央坑 補助工法	AGF 鏡吹付コンクリート	AGF 鏡吹付コンクリート	AGF, 水抜きボーリング 鏡吹付, 長尺鏡ボルト	AGF 鏡吹付コンクリート

3連トンネル掘削計画

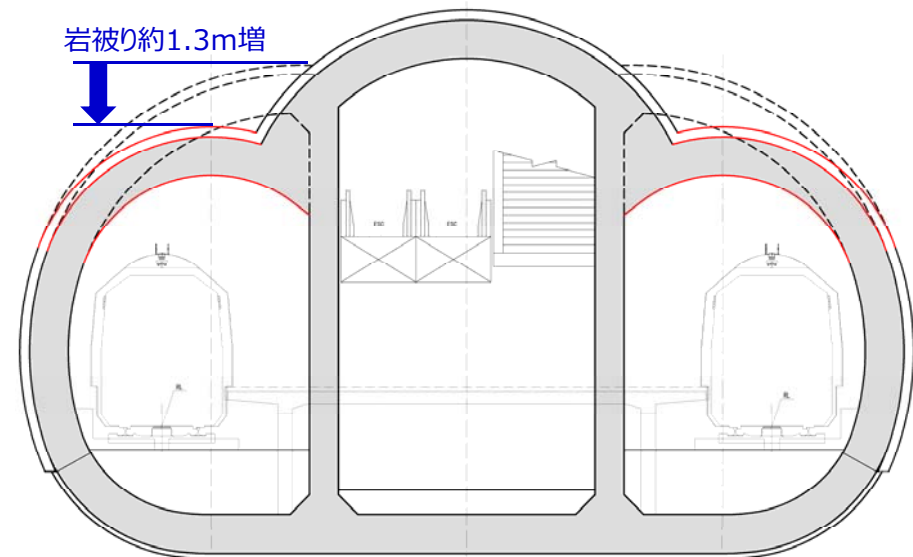
(2) 断面形状の検討

3連トンネルの断面形状については、これまでの実績を踏まえ標準的な仕様や構造で設計し決定しているが、原因究明の検討委員会報告書を踏まえて整理したリスクに対応するため、トンネル上部の岩盤をできるだけ厚く確保し、より安全に施工していけるよう、形状を工夫する検討を行った。

3連トンネルⅠ型



3連トンネルⅡ型（駅接続部）



検討の結果、左右坑の断面形状を工夫することにより、3連トンネルⅠ型では約0.5m、3連トンネルⅡ型（駅接続部）では、約1.3m岩被りを増加することが可能となる。※扁平率は同等もしくは安定する側への変更となる。

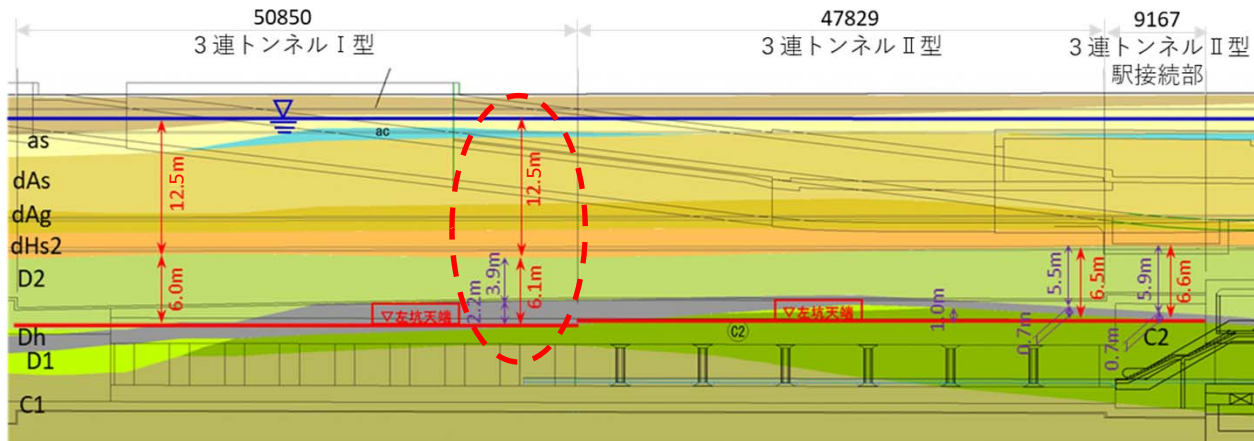
3連トンネル掘削計画

(2) 断面形状の検討

前頁までで整理した断面形状変更の検討結果を踏まえた縦断図を整理した。

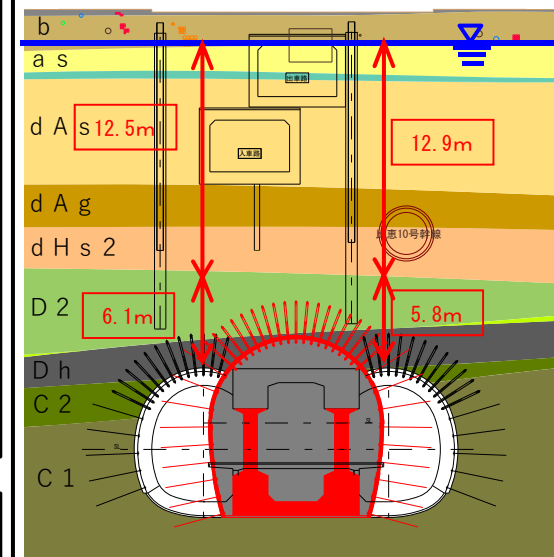
○ 3連トンネル左坑（縦断図）

3連トンネル左坑の岩かぶり厚は5.5～6.6mであるが、このうち、0～2.3mがDh（炭質頁岩層）である。



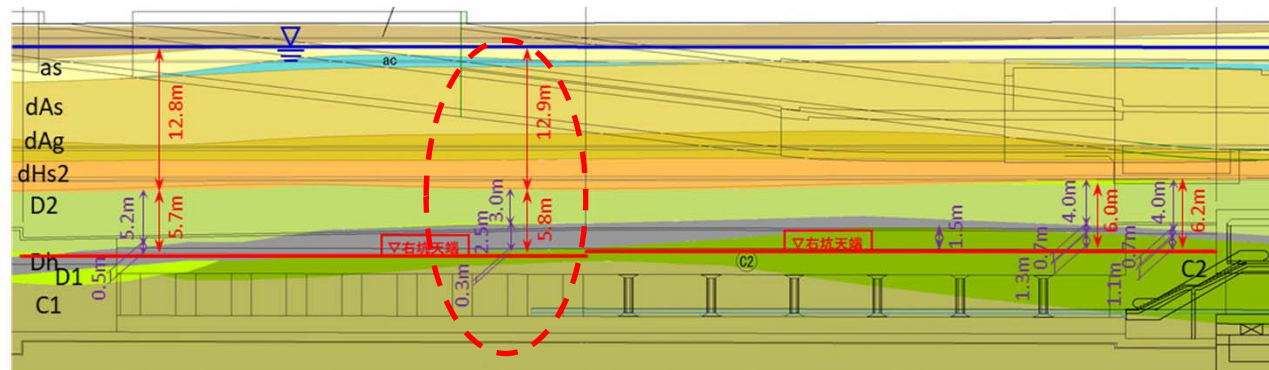
○ 3連トンネル左右坑（横断図）

3連左右坑縦断図（赤い点線）付近の横断図を示す。



○ 3連トンネル右坑（縦断図）

3連トンネル右坑の岩かぶり厚は5.3～6.2mであるが、このうち、0～2.5mがDh（炭質頁岩層）である。



左右坑のD2層厚さやC2層厚さを踏まえながら、必要な補助工法について次頁以降で検討した。

3連トンネル掘削計画

(3) パイプルーフの成立性

天端安定化や浸透破壊対策に有効なパイプルーフの成立性について検討した。

○パイプルーフの成立性を確認する照査項目

照査対象	照査項目	縦方向パイプルーフ		横方向パイプルーフ	
		横断方向FEM解析	骨組み解析	横断方向FEM解析	骨組み解析
①パイプルーフ材の安全性	・曲げ耐力の照査 ・せん断耐力の照査 ・たわみ量の照査	— — —	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
②切羽付近の安全性	・天端付近の地山安定照査 ・浸透破壊の照査	○ ○	— —	○ ○	— —
③トンネル周辺の安全性	・地表面の変位照査 ・近接構造物の変位照査	○ ○	— —	○ ○	— —

- ・縦方向パイプルーフは、設計施工実績も多く、一般的な設計手法である骨組み解析による照査で安全性を確認できる。
- ・横方向パイプルーフは、トンネル横断方向FEM解析及び骨組み解析にて照査し、安全側の結果を選択する。

※パイプルーフの施工においては、延長が長くなるほど施工誤差が大きくなるため、安全に掘削するにあたり、許容される隙間の量も把握する。

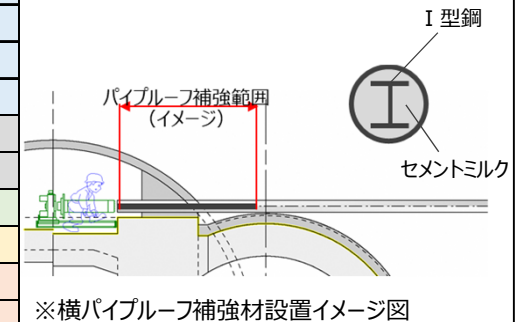
3連トンネル掘削計画

(3) パイプルーフの成立性 (①パイプルーフ材の安全性)

曲げ耐力の照査, せん断耐力の照査, たわみの照査を実施し, パイプルーフ材の安全性を確認した。
 なお, 地下水に対する抵抗性を有すると評価できる区間での施工として考えられる, 鋼管間の離隔を200mm程度空ける場合の検討も行った。

○横方向パイプルーフ工法の設計諸元

鋼管規格	STK-490	STK-490	STK-490	STK-490
鋼管外径 (mm)	216.3	216.3	318.5	318.5
鋼管厚さ (mm)	12.7	12.7	10.3	10.3
鋼管離隔 (mm)	0	200	0	200
補強鋼材規格	SS490	SS490	—	SS490
補強鋼材	H150x75x5.5x9.5	H150x75x5.5x9.5	—	I-250x250x10x19
中詰めモルタル (N/mm ²)	30	30	30	30
幅1m当り配置本数 (本)	4.62	2.40	3.00	2.00
曲げ安全率 < 1	1.185	2.152	0.990	0.910
せん断安全率 < 1	0.075	0.145	0.12	0.105
たわみ安全率 < 1			0.404	0.662
パイプルーフの成立性	NG	NG	OK	OK



- ・鋼管間の離隔が200mmの場合, $\phi 318.5$ の鋼管に補強材 I型鋼250x125x10x19を配置することで成立する。
- ・鋼管間の離隔がない場合, $\phi 318.5$ の鋼管を配置することで成立する。

○縦方向パイプルーフ工法の設計諸元

鋼管規格	STK-400	STK-400	STK-400	STK-400
鋼管外径 (mm)	216.3	216.3	318.5	318.5
鋼管厚さ (mm)	8.2	12.7	10.3	10.3
鋼管離隔 (mm)	0	200	0	200
中詰めモルタル (N/mm ²)	30	30	30	30
幅1m当り配置本数 (本)	4.62	2.40	3.00	1.93
曲げ安全率 < 1	0.758	0.988	0.381	0.569
せん断安全率 < 1	0.109	0.138	0.086	0.140
たわみ安全率 < 1	0.461	0.501	0.167	0.185
パイプルーフの成立性	OK	OK	OK	OK

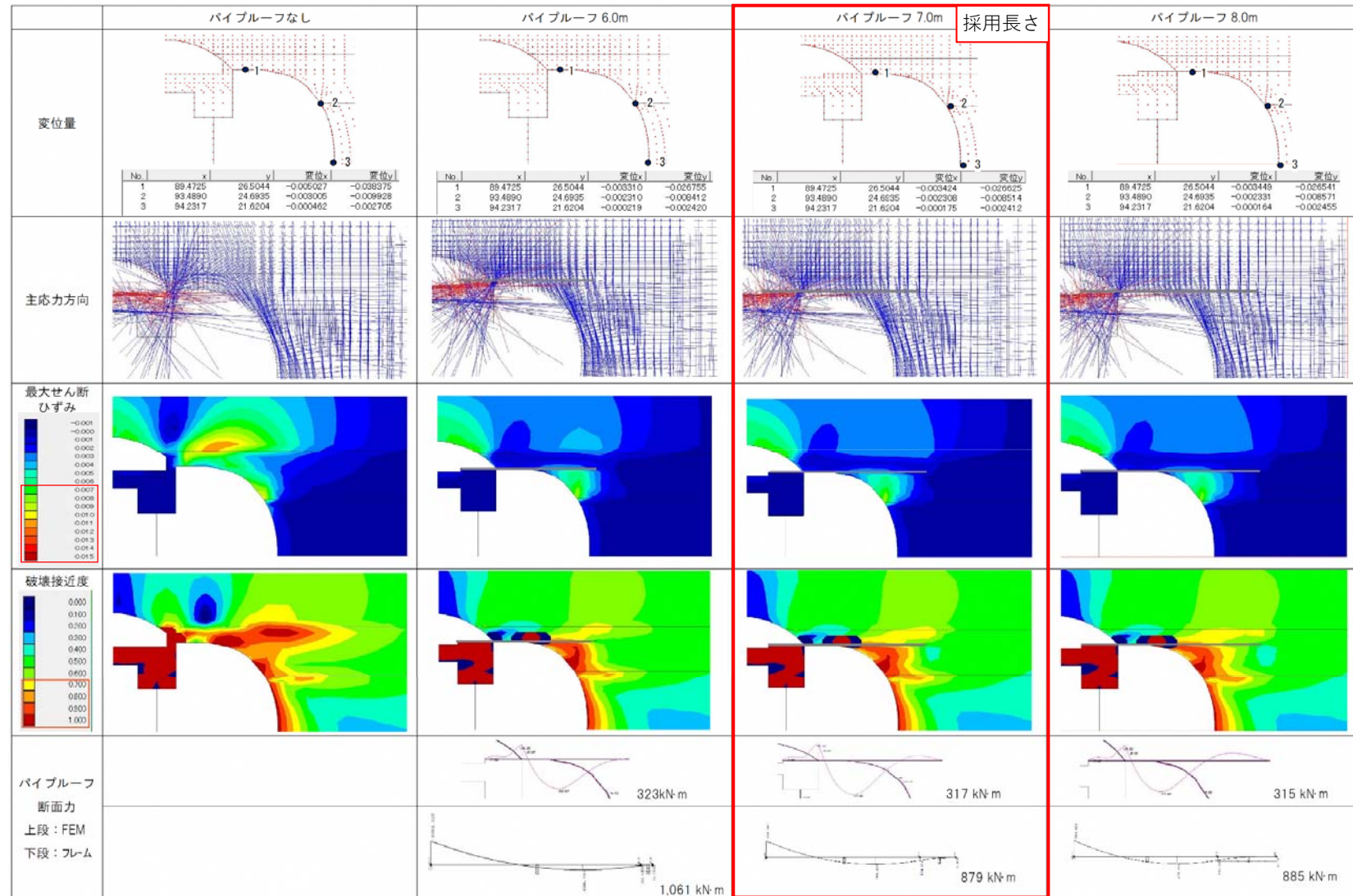
- ・鋼管間の離隔が200mm及び無い場合ともに, $\phi 216.3$ mmまたは $\phi 318.5$ mmの鋼管を配置することで成立する。

3連トンネル掘削計画

(3) パイプルーフの成立性 (①パイプルーフ材の安全性, ②切羽付近の安全性)

横断方向FEM解析, 骨組み解析を実施して, 横方向パイプルーフ材の安全性及び切羽付近の安全性の確認を行った。また, 併せてパイプルーフ長についても比較検討を行った。

- 解析条件
- 掘削時の解放率40%
 - 面的パイプルーフ



- パイプルーフ材及び切羽付近の安全性を確認できた。
- 6mの場合は片持ち梁のような挙動を示し断面力が增大するが, 7m以上の場合は大きな差異はないことが確認された。
- パイプルーフがアーチアクションの形成を阻害している傾向は見受けられない。

3連トンネル掘削計画

(3) パイプルーフの成立性 (③トンネル周辺の安全性)

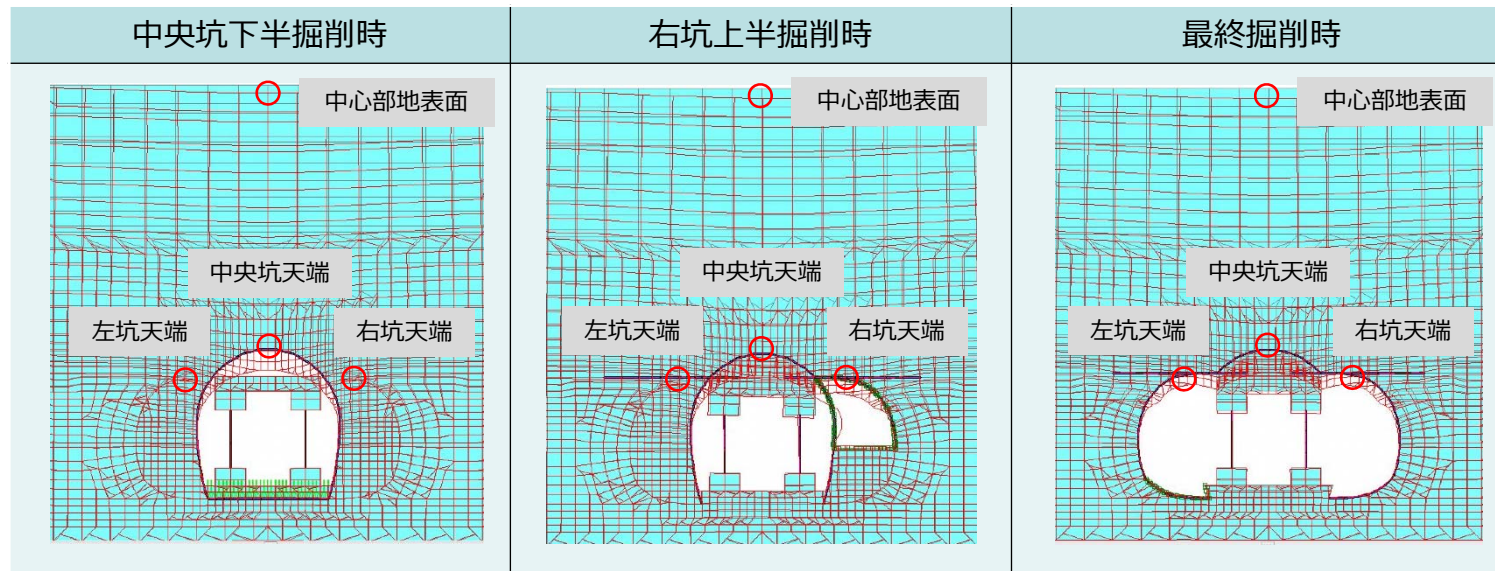
FEM解析を実施して、今後の掘削により発生するトンネル及び地表面沈下の予測変位量を算出することで、トンネル周辺の安全性を確認した。

○トンネル周辺の鉛直方向沈下量

	横方向パイプルーフ								縦方向パイプルーフ				【参考】 パイプルーフなし			
	面的				線の				解析上は面的・線的ともに 同モデル							
	中心部 地表面 変位量	中央坑 天端 変位量	右坑 天端 変位量	左坑 天端 変位量	中心部 地表面 変位量	中央坑 天端 変位量	右坑 天端 変位量	左坑 天端 変位量	中心部 地表面 変位量	中央坑 天端 変位量	右坑 天端 変位量	左坑 天端 変位量	中心部 地表面 変位量	中央坑 天端 変位量	右坑 天端 変位量	左坑 天端 変位量
右坑上半掘削時	3.3	3.1	10.1	0	3.8	2.5	15.8	-0.1	4.4 (2.5)	1.7 (1.2)	34.7 (14.9)	0.1 (0.1)	6	2.1	43.8	1
最終掘削時	6.3	5.9	9.9	9.4	6.5	4.4	15.7	13	9.1 (10.1)	3.9 (4.6)	34.7 (31.9)	34.7 (32.3)	12.3	4.3	45.6	46.1

※縦方向パイプルーフについては、パイプルーフの施工方向が解析断面の面外方向となるため、応力解放率を低減した場合の解析結果を上段に記載し、隣り合うパイプルーフ及び掘削済の支保工によって得られると考えられる剛性を与えた場合の解析結果を下段の()に記載した。

○トンネル周辺の沈下量算出箇所及び解析ステップ



現状からの変位量を踏まえると、トンネル周辺に与える影響は小さいと考えられる。

(4) 地下水に対する抵抗性の評価

パイプルーフによる地下水対策工については、D2層やC2層の被りが一定以上ある場合、副次的に岩盤層の止水性に期待した掘削が可能と考えられることから、地下水に対する抵抗性の評価を行う。

○地下水に対する抵抗性の評価(D2層)

・地下水に対する抵抗性があると評価できるD2層被りについて検討する

検討①

難透水性が維持されるD2層範囲に対する浸透破壊安全率

⇒FEM解析により難透水性が不安定となる領域を想定し、
限界動水勾配より必要なD2層厚を算出する。

検討②

水圧に対する押し抜きせん断抵抗

⇒D2層の押し抜きに対する概略照査(原因究明の検討委員会)
の検討方法に倣い、左右坑天端が水圧に対して必要な安全率
を確保できるD2層厚を算出する。

○地下水に対する抵抗性の評価(C2層)

・地下水に対する抵抗性があると評価できるC2層被りについて検討する

検討③

曲げ抵抗・せん断抵抗

⇒パイプルーフの離隔に対して層厚が比較的小さいことから、地山をパイプルーフに支持された梁と考えた場合、
曲げ破壊的な挙動を示すことが想定されることを踏まえて曲げ抵抗・せん断抵抗の観点から算出する。

3連トンネル掘削計画

(4) 地下水に対する抵抗性の評価 (検討① D2層)

D2層の難透水性が不安定となる領域について、FEM解析により想定する。

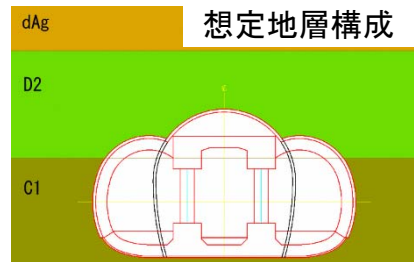
掘削時における難透水性の維持(D2層)



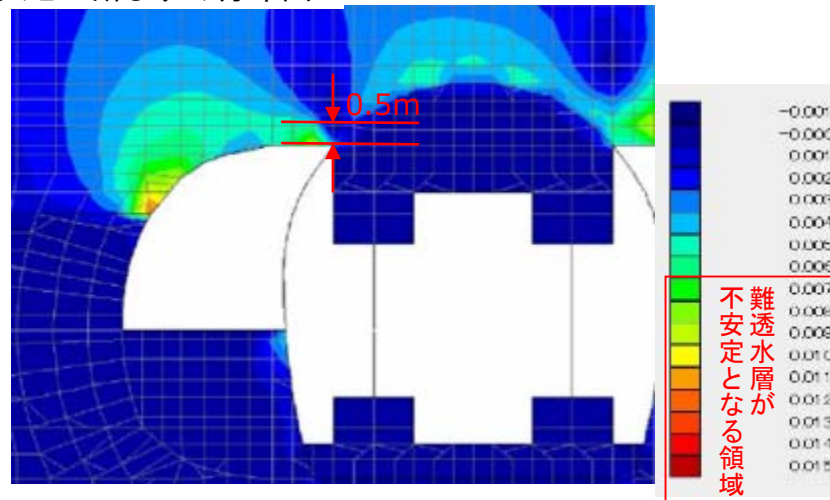
既往文献等を参考とし、FEM解析により得られるせん断ひずみが0.7%以下の範囲と考える(参考資料参照)

○縦方向パイプルーフにおける解析

- ・パイプルーフはモデル化せず、応力解放率を20%とすることで評価した。
- ・Dh層はより変形係数が小さなD2層として安全側の解析を実施した。

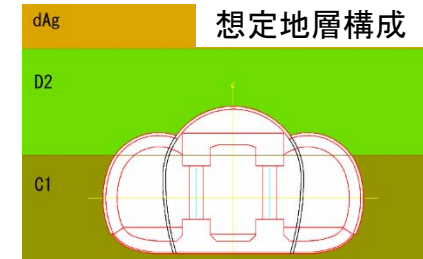


最大せん断ひずみ分布図

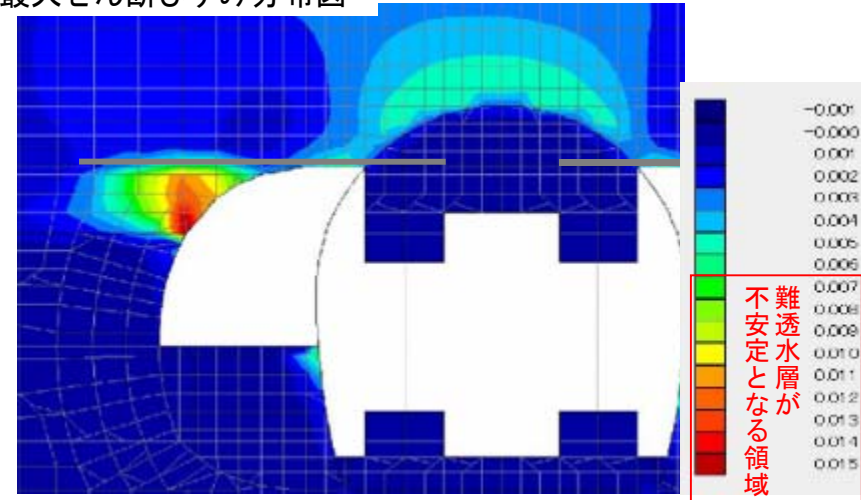


○横方向パイプルーフにおける解析

- ・パイプルーフは梁部材としてモデル化し、応力解放率を40%とした。
- ・Dh層はより変形係数が小さなD2層として安全側の解析を実施した。



最大せん断ひずみ分布図



天端上方で難透水性が不安定となる領域は、縦方向パイプルーフでは約0.5m、横方向パイプルーフでは生じない結果が得られた。

3連トンネル掘削計画

(4) 地下水に対する抵抗性の評価(検討① D2層)

前頁で設定したD2層の難透水性が不安定となる領域を踏まえて、地下水に対する抵抗性を有すると判断できるD2層被りを検討した。

○基本検討

難透水性が不安定となる領域：

約0.5m又は0m

+

限界動水勾配より算出したD2層厚：

約2.0m※

必要D2層被りは約2.5m又は約2.0mとなる

緑文字：縦方向パイプルーフ
青文字：横方向パイプルーフ

○パラメトリックスタディ

・限界動水勾配を最小値

難透水性が不安定となる領域：

約0.5m又は0m

+

限界動水勾配より算出したD2層厚：

約3.5m※

必要D2層被り： 約4.0m又は約3.5mとなる

・変形係数を1/2に低減

約2.0m又は約0.3m

+

約2.0m※

必要D2層被り： 約4.0m又は約2.3mとなる

・限界動水勾配を最小値、
変形係数を1/2に低減

約2.0m又は約0.3m

+

約3.5m※

必要D2層被り： 約5.5m又は約3.8mとなる

※ 安全率(Fs)は、ボーリング・パイピングに対する安全率を参考にFs=2.0と設定
参考文献「各種基準類における地盤浸透破壊に対する安全率算定方法と考え方」
(田中、永井、廣瀬、三木：神戸大学都市安全研究センター研究報告、第19号、
平成27年3月)

□：基本検討
□：変更条件

基本検討における必要D2層被りは縦方向パイプルーフの場合、約2.5mであり、横方向パイプルーフの場合約2.0mであるが、より安全側の検討となるようにパラメトリックスタディを実施した結果も踏まえ、縦方向パイプルーフの場合は約5.5m、横方向パイプルーフの場合は約3.8m以上確保できる範囲を一定程度の地下水に対する抵抗性を有している区間と評価する。

3連トンネル掘削計画

(4) 地下水に対する抵抗性の評価（検討② D2層）

水圧に対する押し抜きせん断抵抗の観点から、地下水に対する抵抗性を有すると判断できるD2層被りを検討した。

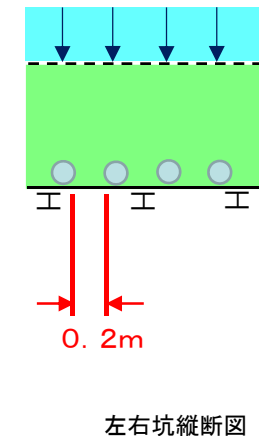
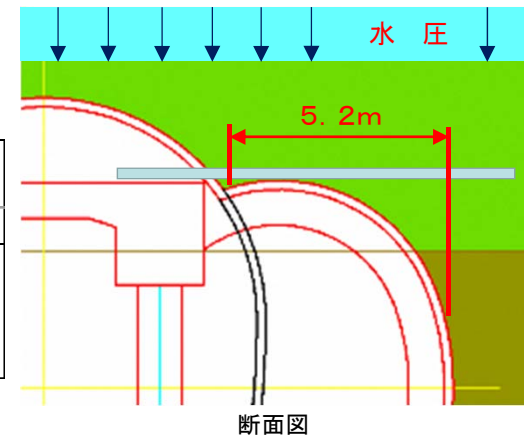
D2層の安定性の検討

- ・パイプルーフの離隔に対して層厚が十分に大きいことから、地山をパイプルーフに支持された梁と考えた場合、曲げ破壊的な挙動にはならず、押し抜きせん断破壊のような現象が想定される。
- ・パイプルーフ上方地盤としてD2層、C2層を想定（Dh層は塑性化すると脆いことから、強度を期待しない）
- ・パイプルーフ間の離隔を200mmと仮定した場合の地山の安定を照査する。

横方向パイプルーフエを離隔200mmとした場合

- ・押し抜きせん断断面は、幅5.2m、奥行き0.2mとして検討する。

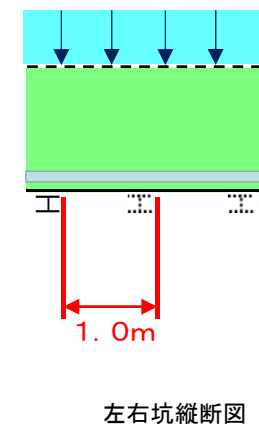
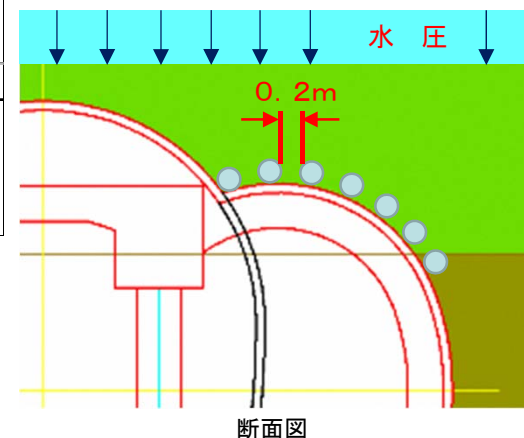
せん断応力							せん断強さ			安全率
幅	奥行き	土被り	地盤単重	水位		せん断応力	側方土圧	側方土圧	せん断強さ	
m	m	m	kN/m ³	m		kN/m ²	係数	kN/m ²	kN/m ²	F<3：N
5.2	0.2	20	18	18		21.27	0.40	72.00	64.09	3.01
		土水压	荷重	D2層厚	せん断面積		D2層 C'	D2層 ϕ'		
		kN/m ²	kN	m	m ²		kN/m ²	°		
		360	374.4	1.630	17.604		13.3	35.2		



縦方向パイプルーフエを離隔200mmとした場合

- ・押し抜きせん断断面は、幅0.2m、奥行き1.0mとして検討する。

せん断応力							せん断強さ			安全率F
幅	奥行き	土被り	地盤単重	水位		せん断応力	側方土圧	側方土圧	せん断強さ	
m	m	m	kN/m ³	m		kN/m ²	係数	kN/m ²	kN/m ²	F<3: NG
0.2	1.0	20	18	18		21.28	0.40	72.00	64.09	3.01
		土水圧	荷重	D2層厚	せん断面積		D2層 C'	D2層 φ'		
		kN/m ²	kN	m	m ²		kN/m ²	°		
		360	72	1.410	3.384		13.3	35.2		



- ・横方向パイプルーフの場合、パイプルーフ上方のD2層被りが1.7m以上あれば押し抜きせん断破壊は生じないと考えられる。
- ・縦方向パイプルーフの場合、パイプルーフ上方のD2層被りが1.5m以上あれば押し抜きせん断破壊は生じないと考えられる。

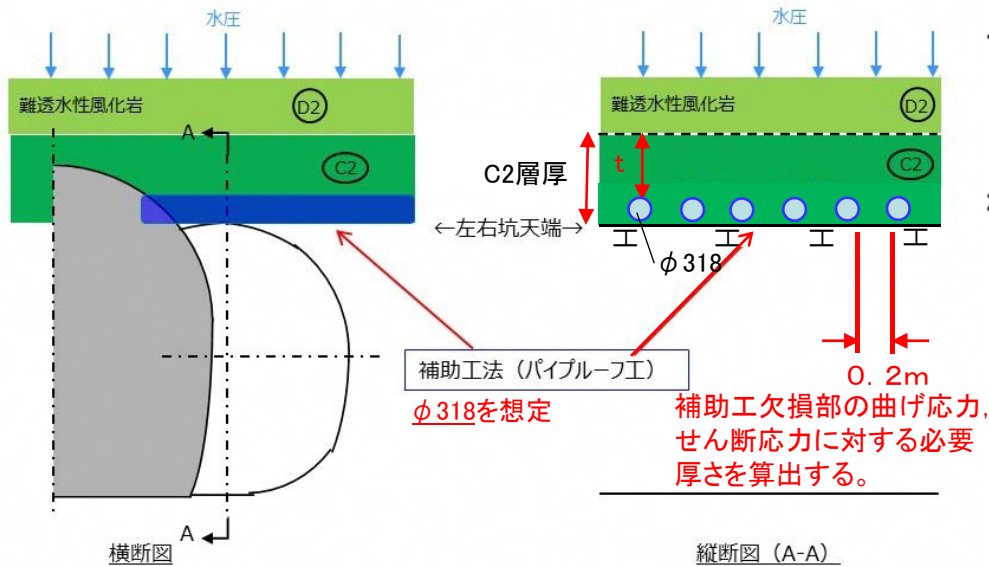
3連トンネル掘削計画

(4) 地下水に対する抵抗性の評価 (検討③ C2層)

曲げ抵抗・せん断抵抗の観点から、地下水に対する抵抗性を有すると判断できるC2層被りを検討した。

C2層の安定性の検討

- パイプルーフの離隔に対して層厚が比較的小さいことから、地山をパイプルーフに支持された梁と考えた場合、曲げ破壊的な挙動を示すことが想定される。



1) せん断応力からの検討

$$t_1 = F_s \frac{w \cdot l}{2 \cdot c}$$

2) 曲げ応力からの検討

$$t_2 = F_s \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot w \cdot l^2}{4 \cdot \sigma_t}}$$

計算結果

t1	0.48m
t2	0.66m

ここに,

F_s : 安全率で2.0とする
 w : 上載荷重 (土水一体とし, 360kN/m²)
 l : 欠損部スパン = 0.20m
 c : 粘着力 (C2層の場合150kN/m²)
 σ_t : 曲げ引張強度 = 2/3・c

パイプルーフを含めてC2層被りが約1.0mあれば地下水に対する抵抗性を有している区間と評価する。

3連トンネル掘削計画

(4) 地下水に対する抵抗性の評価 (まとめ)

前頁までの検討から、地下水に対する抵抗性を有する区間を評価した。

○地下水に対する抵抗性の評価

A 十分なD2層被り・・・ $hD2 \geq 3.8m$ 又は $hD2 \geq 5.5m$
 ⇒「検討①浸透破壊安全率」, 「検討②押し抜きせん断」
 より十分なD2層厚さを設定

B 十分なC2層被り・・・ $hC2 \geq 1.0m$ (パイプルーフ含む)

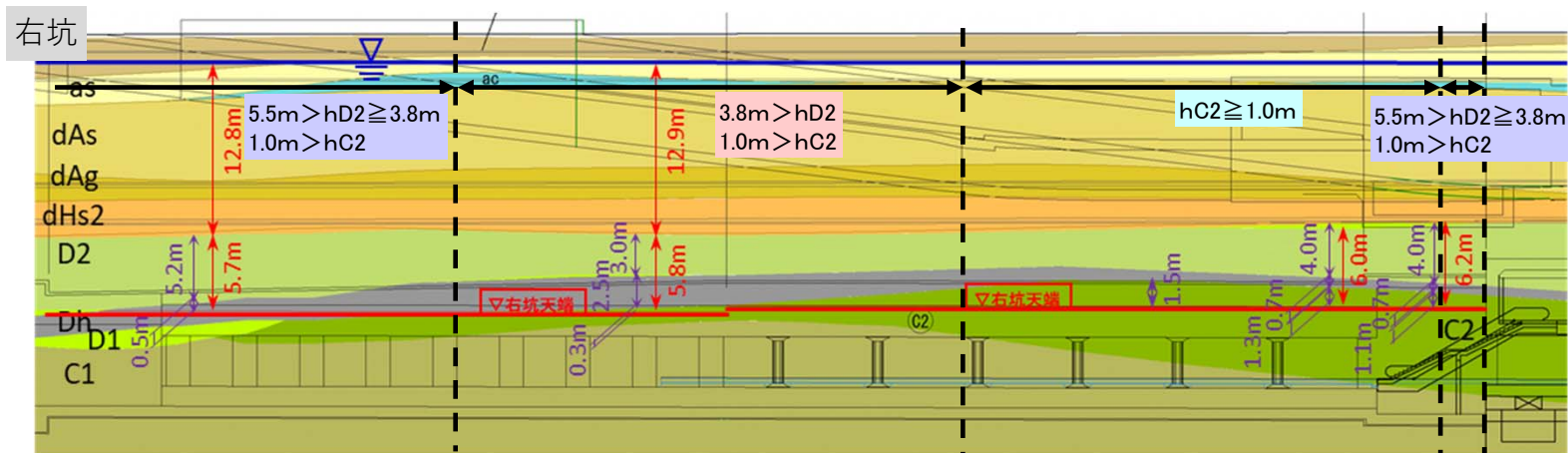
⇒「検討③曲げ抵抗・せん断抵抗」により十分なC2層厚さを設定

AまたはBを満たす範囲については一定程度の地下水に対する抵抗性を有している区間と評価できる。

○必要な補助工法の範囲

・上記評価を踏まえて、「横方向・縦方向パイプルーフ」及び「面的・線的パイプルーフ」の組み合わせにより、右坑を代表して必要な補助工法の範囲を整理した。

		D2層被り		
		$hD2 \geq 5.5m$	$5.5m > hD2 \geq 3.8m$	$3.8m > hD2$
C2層被り	$hC2 \geq 1.0m$	線的 横・縦方向パイプルーフ	線的 横・縦方向パイプルーフ	線的 横・縦方向パイプルーフ
	$1.0m > hC2$	線的 横・縦方向パイプルーフ	線的横方向パイプルーフ 面的縦方向パイプルーフ	面的 横・縦方向パイプルーフ



3連トンネル掘削計画

(5) 補助工法の検討

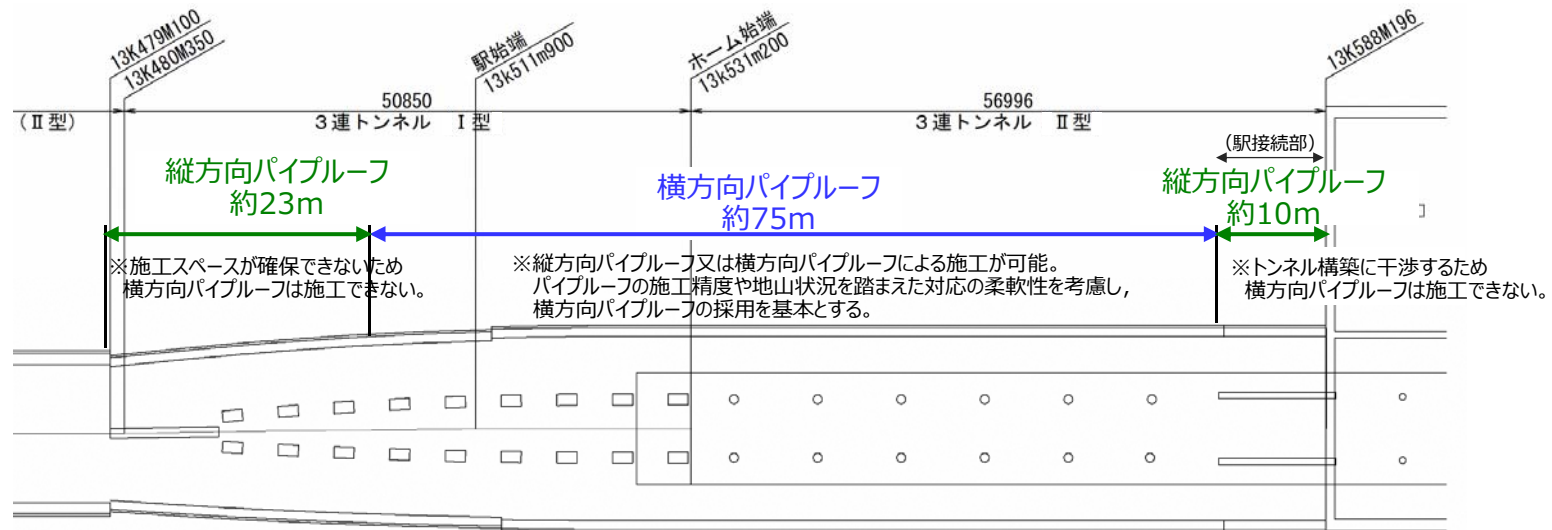
補助工法については、トンネル上部にパイプルーフ（鋼管）を打設する方法を採用する。
現場条件（施工空間、施工精度）から横方向パイプルーフまたは縦方向パイプルーフを使い分けた施工とする。
岩被りや地盤の強度等を踏まえ、線的または面的な補助工法を採用する。

	線的補助工法		面的補助工法 (より安全に施工すべき区間)	
	1. 横方向パイプルーフ工法(線的)	2. 縦方向パイプルーフ工法(線的)	3. 横方向パイプルーフ工法(面的)	4. 縦方向パイプルーフ工法(面的)
補助工法イメージ				
概要	中央坑上部から横方向（軌道直角方向）に間隔を開けてパイプルーフを施工する方法。	開削部や標準Ⅱ型部から縦方向（軌道方向）に間隔を開けてパイプルーフを施工する方法。	中央坑上部から横方向（軌道直角方向）に連続してパイプルーフを施工する方法。	開削部や標準Ⅱ型部から縦方向（軌道方向）に連続してパイプルーフを施工する方法。

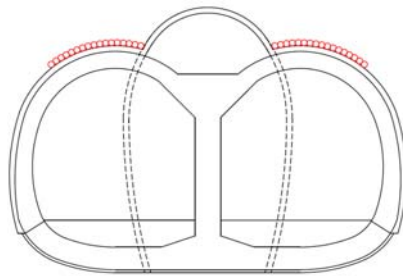
3連トンネル掘削計画

(5) 補助工法の検討 (パイプルーフの適用範囲)

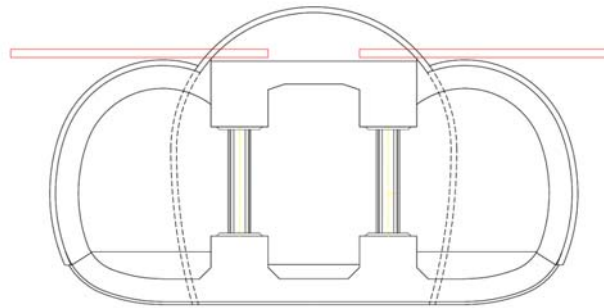
縦方向パイプルーフと横方向パイプルーフの適用範囲については、施工精度・施工空間等の条件を踏まえ検討する。



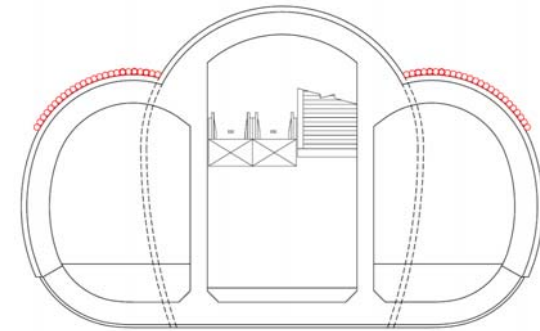
3連トンネル I 型 (RC中壁式)



3連トンネル II 型 (標準部)



3連トンネル II 型 (駅接続部)



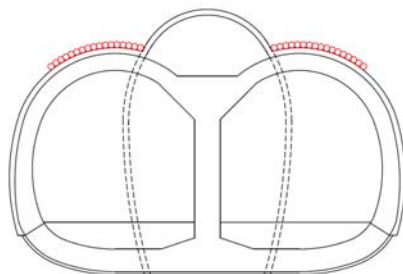
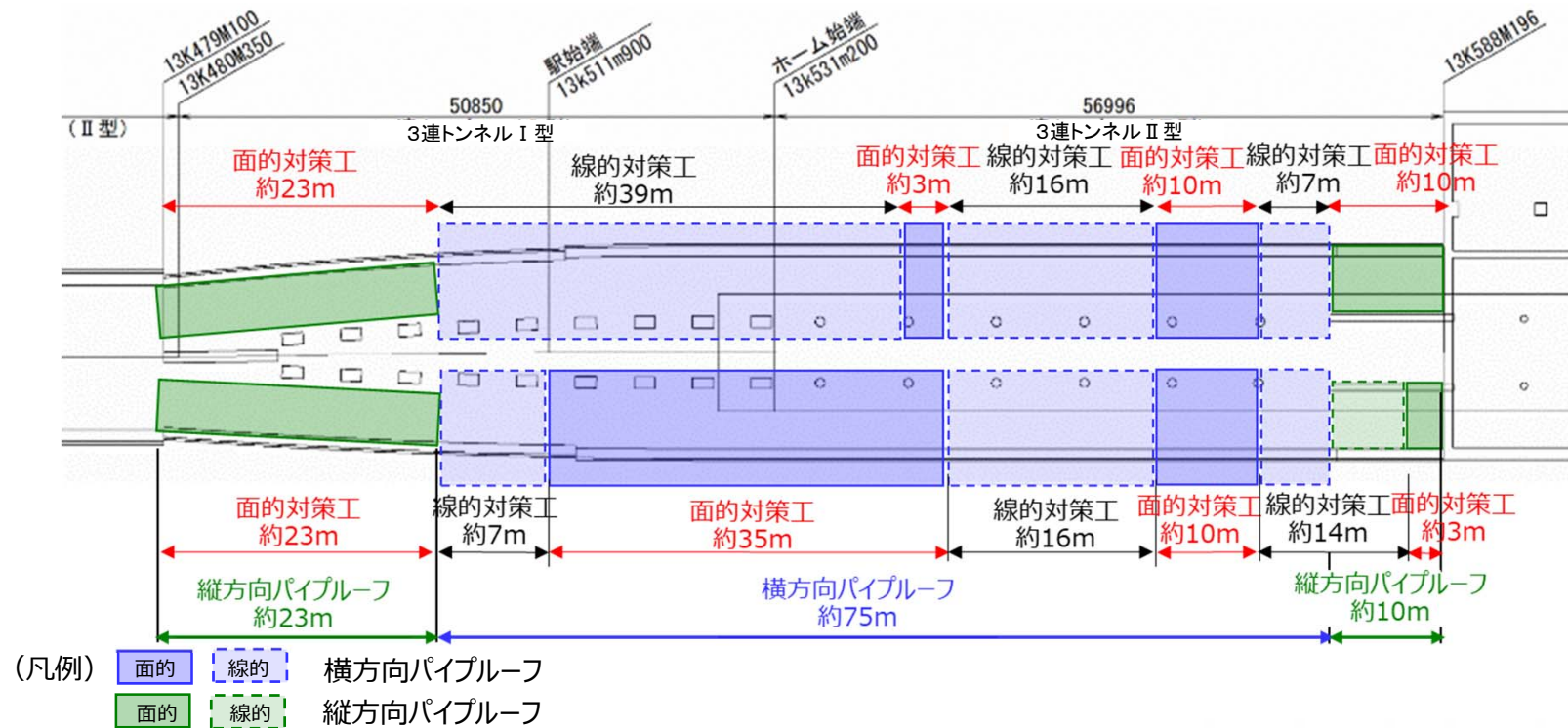
3連トンネル掘削計画

(5) 補助工法の検討（検討結果のまとめ）

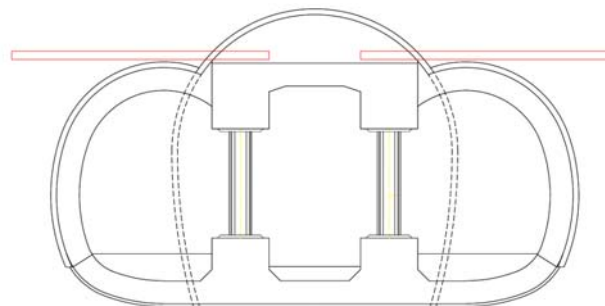
岩被りや地盤の強度等から、面的対策工と線的対策工の使用範囲は下記を基本とする。

また、施工空間や施工精度等の現場条件を踏まえ、パイプルーフの施工方向は下記を基本とする。

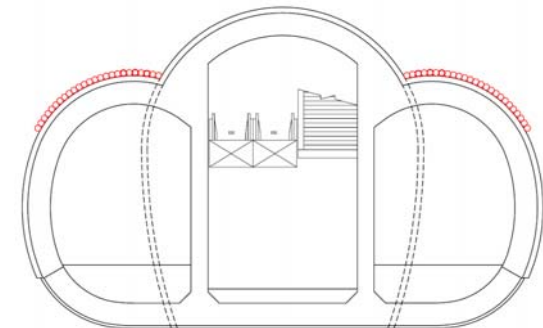
※ 施工段階では地盤等の状況を確認しながら、状況に応じて配置の見直しや追加の補助工法を実施する。



3連トンネル始点側(縦方向パイプルーフ)



3連トンネル(横方向パイプルーフ)



3連トンネル終点側(縦方向パイプルーフ)