

### 3. 3連トンネル部の掘削計画について

- 1. 前回委員会からの検討深度化…………… P1～2
- 2. 深度化詳細内容…………… P3～9
- 3. 検討結果のまとめ…………… P10～11

令和元年11月7日(木)

福岡市交通局

# 1. 前回委員会からの検討深度化

## 1. 前回委員会からの検討深度化

### (1) 追加視点の整理

前回（第13回）の技術専門委員会では、地下水に対する抵抗性等を評価し面的パイプルーフと線的パイプルーフの基本配置を確認した。

今回は、より安全に施工するために、新たな視点等も加え詳細に検討を進めた。

#### ○地下水に対する抵抗性評価に必要な追加視点

	項目		
	掘削時の鋼管隙間部の緩み	浸透破壊の照査（FEM解析）	破砕範囲の設定
第13回委員会時	-	D2層のせん断ひずみが0.7%以下の範囲が難透水性が維持できる範囲と想定し照査を実施。	中央坑施工時の状況から破砕範囲を設定。
今回委員会	パイプルーフ鋼管の隙間に生じる緩み高さを考慮し、緩んでいない範囲で必要D2層厚を確保する。	D2層のピークの2/3強度未満の範囲が難透水性が維持できる範囲と想定し照査を実施。	中央坑施工時の状況をより詳細に確認し破砕範囲を設定。

#### ○パイプルーフ長の設定

面的横方向パイプルーフの範囲では、地山部分の鋼管長さに1 m程度差をつけた千鳥配置とすることで、鋼管と岩盤の定着表面積の拡大等による一体性の向上が期待できることから、より安全に施工することを目的とした見直しを検討する。

より安全に施工するために、新たな視点等を加えて検討を行い、面的パイプルーフと線的パイプルーフの使用範囲を設定した。

## 2. 深度化詳細内容

## 2. 深度化詳細内容

### (1) 鋼管隙間部の緩み

より安全に施工するために、新たな視点として横パイプルーフにおける鋼管の隙間に生じる緩み高さを考慮し、必要D2層厚を確保する。  
 ※縦方向パイプルーフでは、中央坑掘削時の状況から逆解析を実施しており、隙間に生じる緩み高さを考慮済となっている。

#### ゆるみ高の計算

ゆるみ土圧の計算には、種々の理論式が提唱されているが、一般には、次のテルツァギーの式が用いられる。

$$h_0 = \frac{B_1}{K \cdot \tan \phi} (1 - e^{-\frac{c \cdot \tan \phi}{B_1} H})$$

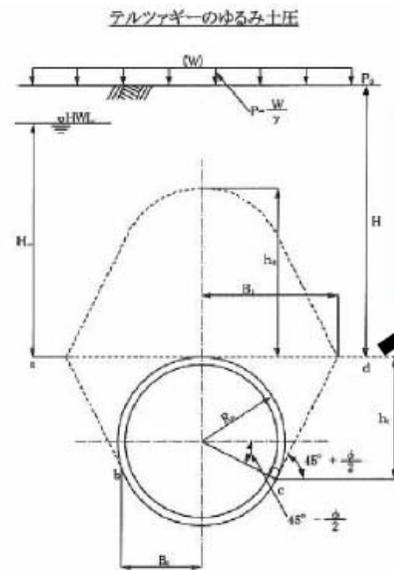
ここに

- |  |  |
|--|--|
| $B_1$ : $B_0 + h_1 \times \tan(45^\circ - \phi/2)$ (m) | $c$ : 土の粘着力 (KN/m <sup>2</sup> )         |
| $B_0$ : $R_0 \times \cos(45^\circ - \phi/2)$ (m)       | $\gamma$ : 土の単位体積重量 (KN/m <sup>3</sup> ) |
| $h_1$ : $R_0 \{1 + \sin(45^\circ - \phi/2)\}$ (m)      | $R_0$ : トンネルの掘削半径 (m)                    |
| $K$ : 土圧係数 一般に $K=1$ を採用                               | $\phi$ : 土の内部摩擦角 (°)                     |
| $H$ : 土被り (m)  | $P$ : 鉛直荷重 (KN/m <sup>2</sup> )          |
|  | $W$ : 路面荷重 (KN/m <sup>2</sup> )          |
|  | $h_0$ : ゆるみ高さ (m)                        |

#### D2層の物性値

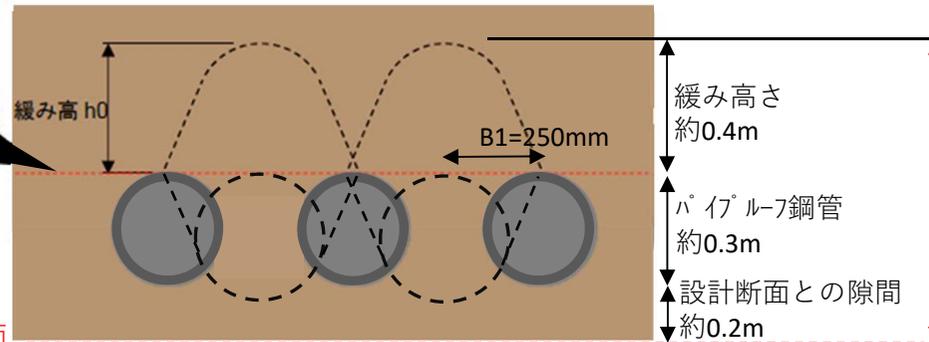
$\gamma = 18.3 \text{ kN/m}^3$   
 $c = 13.3 \text{ kN/m}^2$   
 $\phi = 35.2^\circ$   
 $H = 5.0 \text{ m}$   
 $B_1 = 0.25 \text{ m}$   
 $K = 1$

を入力すると、緩み高さは 0.35m となる。



一般的な円形トンネルに対する緩み高さの算定式を鋼管離隔部の緩み範囲の算出に準用するものとし、トンネル天端の緩み幅  $B_1$  を右図のように仮定する

設計掘削断面



緩み高さ  
約0.4m

パイプルーフ鋼管  
約0.3m

設計断面との隙間  
約0.2m

設計掘削断面  
からの緩み高さ  
約0.9m

パイプルーフ鋼管の隙間に生じる緩み高さは、約0.9mという結果が得られた。

## 2. 深度化詳細内容

### (2) 浸透破壊の照査

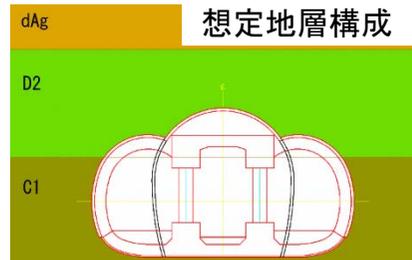
浸透破壊の照査について、D2層のピークの2/3強度以下の範囲が難透水性が維持できる範囲と想定し実施した。

掘削時における難透水性の維持(D2層)

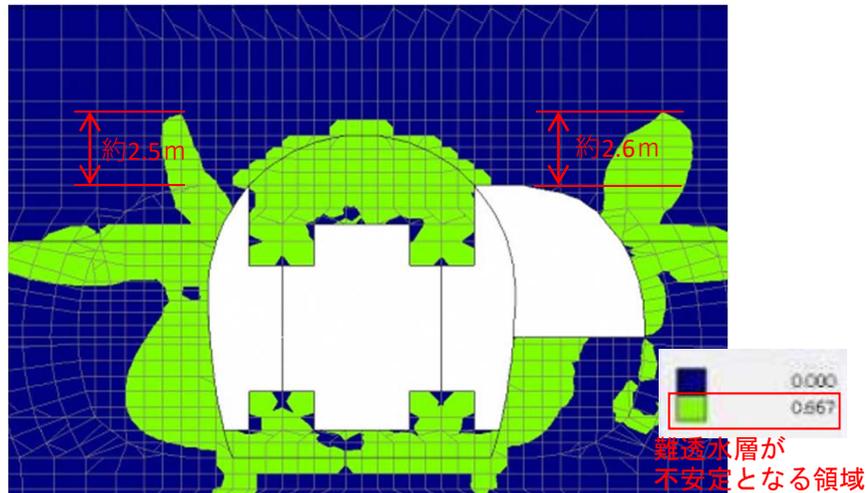
せん断ひずみが0.7%以下の範囲ではなく、D2層の2/3強度未満の範囲が難透水性が維持できる範囲と想定し照査を実施。

#### ○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35%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。
- ・パイプルーフ鋼管φ200mm
- ・鋼管離隔200mm

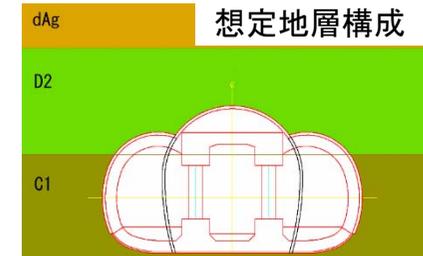


#### 破壊接近度

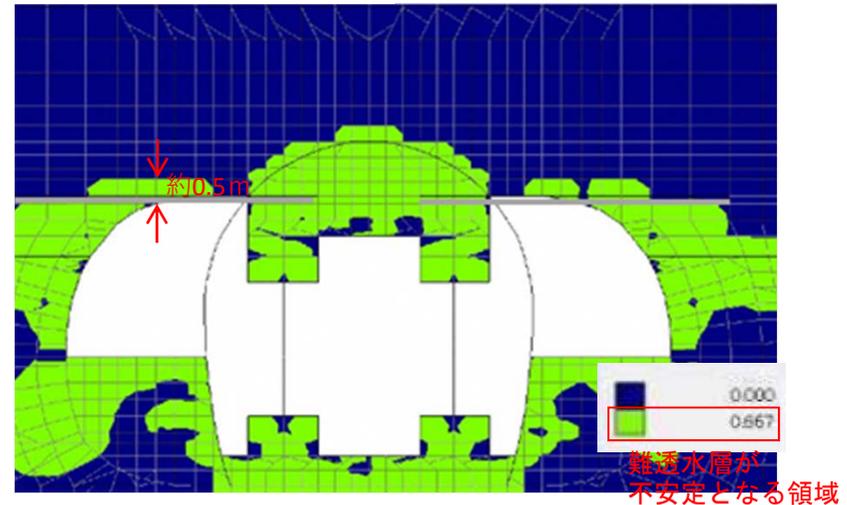


#### ○横方向パイプルーフにおける解析

- ・パイプルーフは梁部材としてモデル化し、応力解放率を100%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。
- ・パイプルーフ鋼管φ300mm
- ・鋼管離隔200mm



#### 破壊接近度



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2.6m、横方向パイプルーフでは約0.5mという結果が得られた。横方向パイプルーフについては、前頁の解析結果(約0.9m)と比較し、より安全となる値(約0.9m)を採用する。この結果、難透水性が不安定となる領域を、縦方向パイプルーフでは約2.6m、横方向パイプルーフでは約0.9mと設定する。

## 2. 深度化詳細内容

### (3) 抵抗性の評価

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2.6m又は約0.9m

+

限界動水勾配より算出したD2層厚:

約2.0m<sup>※</sup>

必要D2層被りは約4.6m又は約2.9m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



※ 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

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、最もD2層被りが必要になる、「限界動水勾配を最小値」とした場合の値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。

- ・縦方向パイプルーフ: 約6.2m
- ・横方向パイプルーフ: 約4.5m

## 2. 深度化詳細内容

### (3) 抵抗性の評価

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

横方向パイプルーフ 縦方向パイプルーフ

**A 十分なD2層被り・・・ $hD2 \geq 4.5m$  又は  $hD2 \geq 6.2m$**

⇒「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

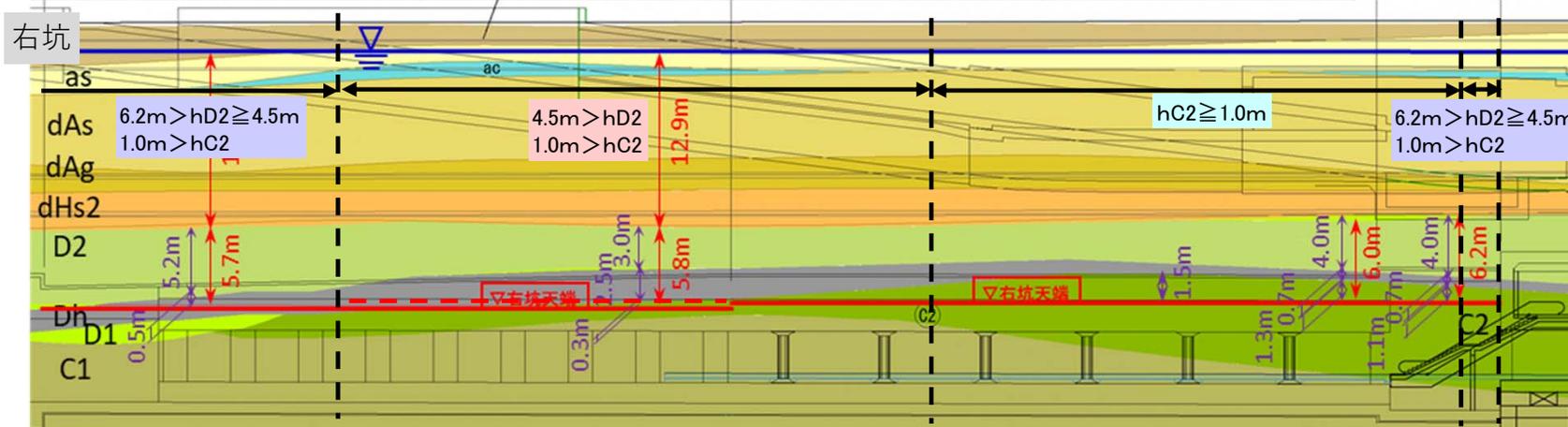
**AまたはBを満たす範囲については一定程度の地下水に対する抵抗性を有している区間と評価できる。**

#### ○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		
		$hD2 \geq 6.2m$	$6.2m > hD2 \geq 4.5m$	$4.5m > hD2$
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

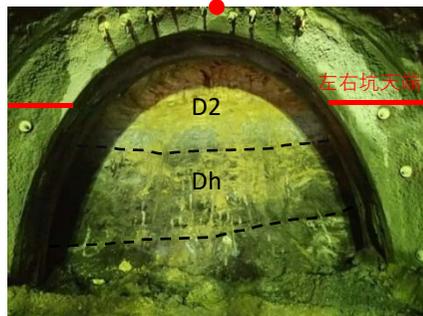
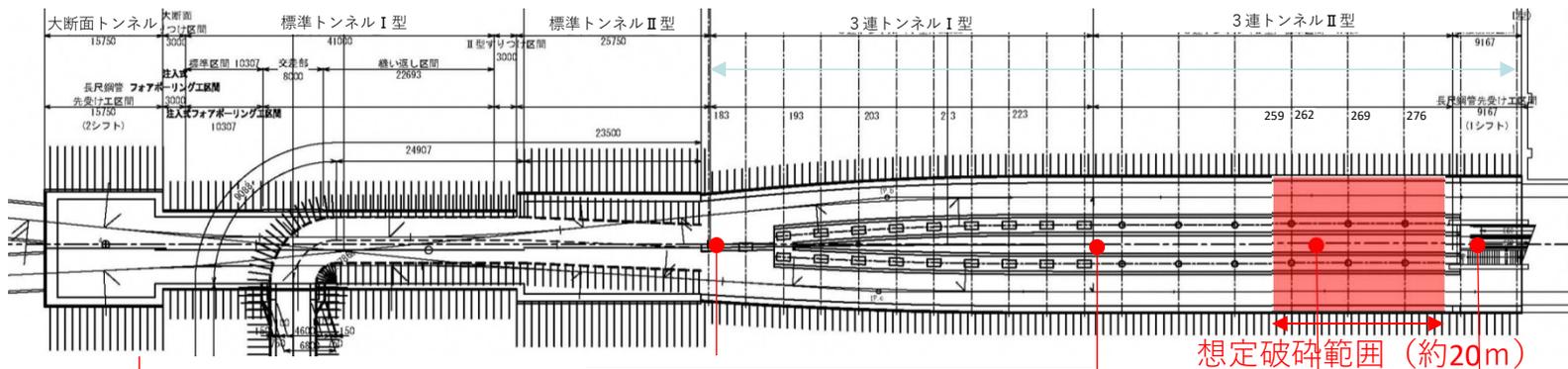
※炭質頁岩層の厚さを  
除いて評価している。



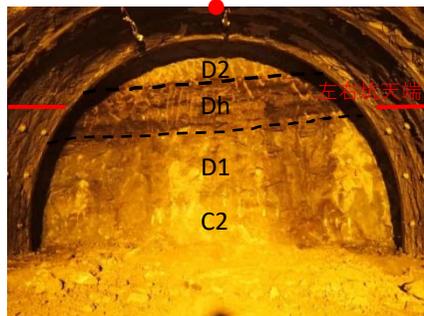
## 2. 深度化詳細内容

### (4) 施工実績による破砕範囲の設定

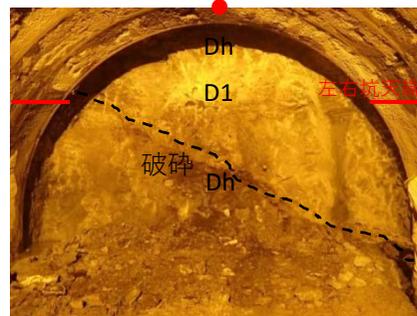
中央坑掘削時の切羽状況をより詳細に確認し破砕範囲を設定した。



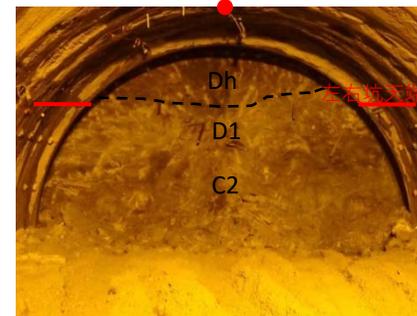
184基



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

※トンネル坑内の水抜き前後で沈下量が増加した箇所については、より慎重な施工を行っていく。

破砕範囲を3連トンネル II 型の約20mと設定し、面的パイプルーフを配置する。

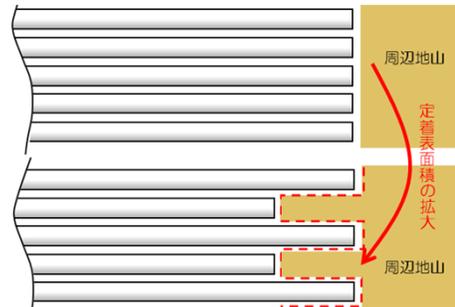
## 2. 深度化詳細内容

### (5) パイプルーフ長の設定

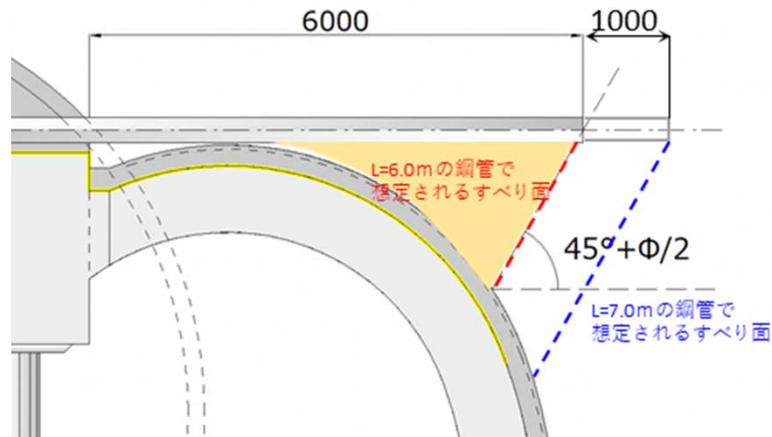
パイプルーフ鋼管の配置を工夫することによる岩盤との一体性向上について検討した。

#### ○千鳥配置の有効性

- 鋼管先端と岩盤の定着表面積の拡大による一体性の向上



平面図

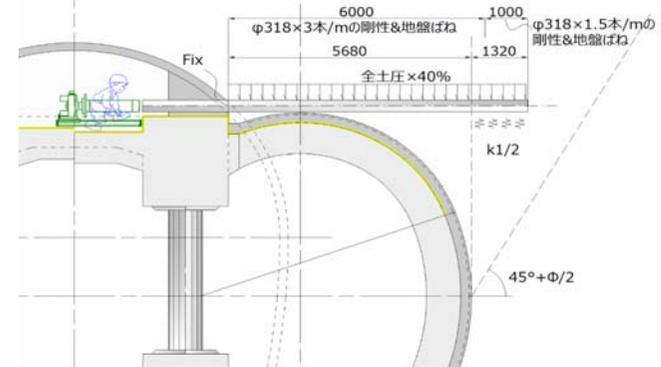


断面図

千鳥配置とすることで荷重が集中せず、すべり面が分散することで安定すると考えられる。

#### ○千鳥配置の成立性

鋼管先端根入れを千鳥配置としたフレーム解析モデル



- 曲げモーメント図

948.6kN・m



- せん断力図

623.6kN・m



#### ○断面照査

- 曲げモーメントおよび応力度
- せん断力および応力度

Md	948.6	kN・m
$\sigma d$	285.6	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma a$	300	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma d / \sigma a$	0.952	

Sd	623.6	kN・m
$\tau d$	20.8	N/mm <sup>2</sup>
$\tau a$	172.5	N/mm <sup>2</sup>
$\tau d / \tau a$	0.121	

許容値以内であるため、千鳥配置でも成立することが確認された。

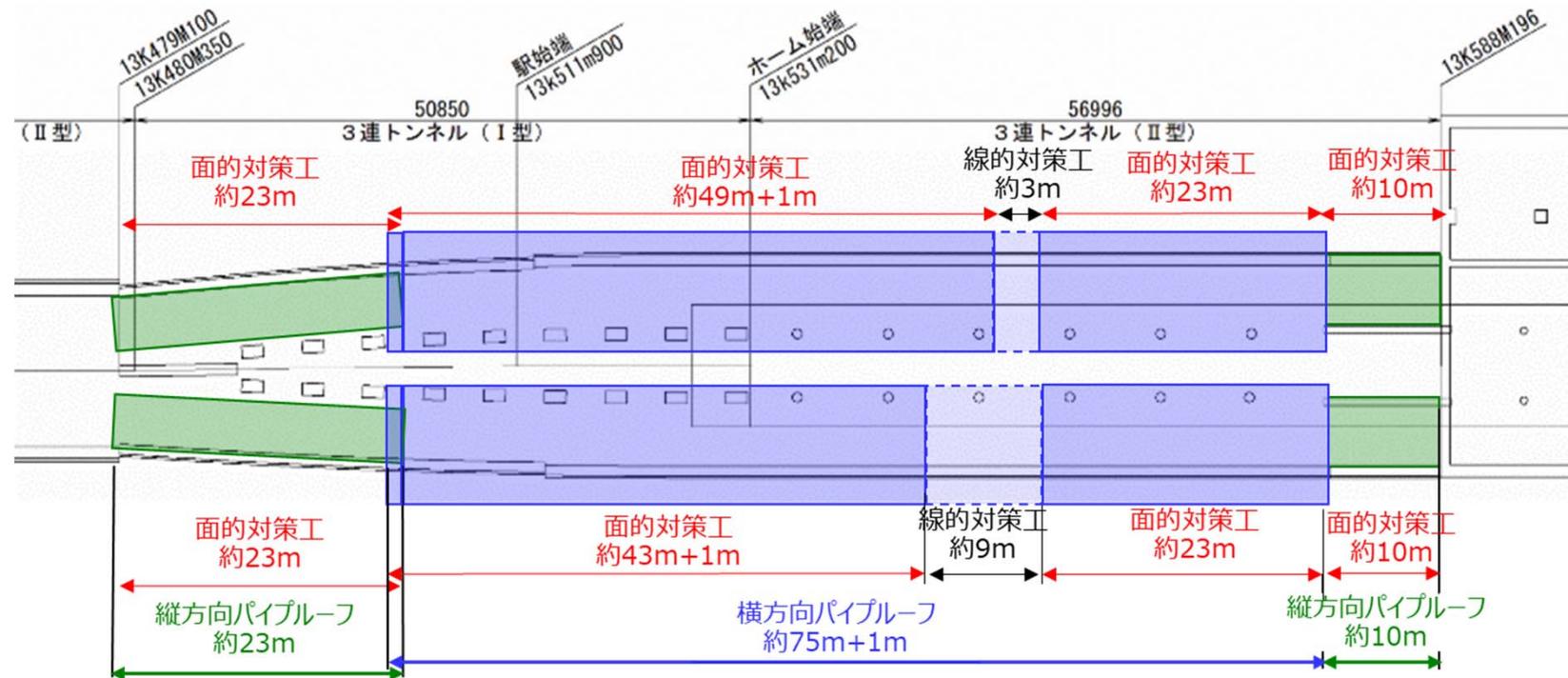
面的横方向パイプルーフの範囲において、地山部分の鋼管長さを6mと7mの千鳥配置にすることで、より安全な施工が可能と考えられる。

### 3. 検討結果のまとめ

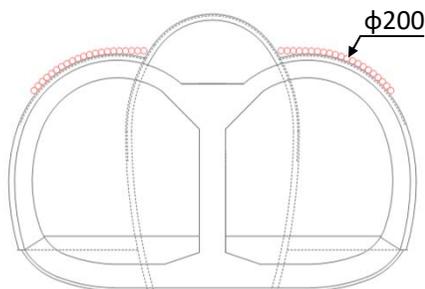
### 3. 検討結果のまとめ

前回(第13回)の技術専門委員会では、面的パイプルーフと線的パイプルーフの基本配置を確認していたが、より安全に施工するため、地下水に対する抵抗性の評価を深め、面的対策工と線的対策工の使用範囲を下記のとおりとする。

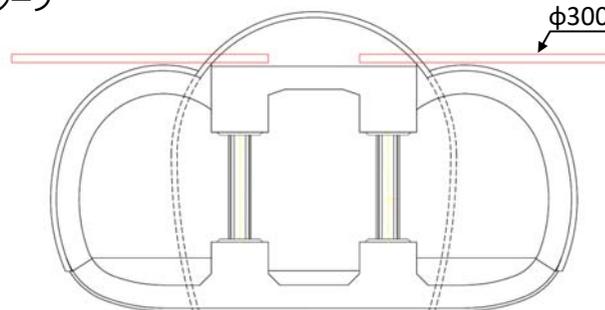
※ 施工段階では地盤等の状況を確認しながら、状況に応じて配置の見直しや追加の補助工法を実施する。



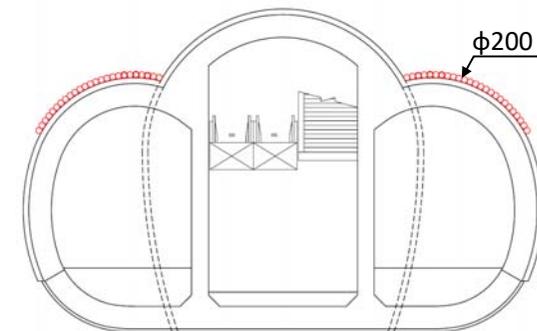
(凡例) 面的 線的 横方向パイプルーフ  
 面的 線的 縦方向パイプルーフ



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)