

## 事故原因の推定に向けた議論 -メカニズムと要因分析-

1. メカニズムの想定と要因の抽出・・・・・・・・・・P1
2. 各要因に関する分析・・・・・・・・・・P3

平成29年1月21日(土)

# 1 メカニズムの想定と要因の抽出

## 1.1 メカニズムの想定

今回の事故について、考えられる陥没事故の発生メカニズムを以下に示す。

	想定メカニズム1	想定メカニズム2	想定メカニズム3
概念図			
概要	<p>トンネル天端部の難透水性風化岩が、その上部に存在する未固結帯水砂層からの水圧や土圧に耐え切れず、トンネル天端部に緩みや亀裂が発生し、そこから地下水が噴出するとともに上部未固結砂層が流出し、地表面陥没に至った。</p>	<p>トンネル天端部の難透水性風化岩が、<b>ブロック状に抜け落ち</b>たため、局所的に薄くなり、その上部に存在する未固結帯水砂層からの水圧や土圧に耐え切れず緩みや亀裂が発生し、そこから地下水が噴出するとともに上部未固結砂層が流出し、地表面陥没に至った。</p>	<p>トンネル天端部の難透水性風化岩に<b>潜在的な弱部</b>があり、そこに局所的な水圧が作用し、それが水みちとなることで地下水が噴出するとともに上部未固結砂層が流出し、地表面陥没に至った。</p>
要因 (赤字：特に関連性が高い要因)	<ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩の強度</li> <li>難透水性風化岩の厚さ</li> <li>高い地下水位による影響</li> <li>難透水性風化岩の耐力評価</li> <li>導坑施工による影響</li> <li>トンネル断面形状の影響</li> <li>トンネル支保工の安定性</li> <li>AGFの横断方向地山改良効果</li> <li>AGFの縦断方向地山改良効果</li> <li>計測管理や対策工の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩の強度</li> <li>難透水性風化岩の厚さ</li> <li>高い地下水位による影響</li> <li>難透水性風化岩の耐力評価</li> <li>導坑施工による影響</li> <li>トンネル断面形状の影響</li> <li>トンネル支保工の安定性</li> <li>AGFの横断方向地山改良効果</li> <li>AGFの縦断方向地山改良効果</li> <li>計測管理や対策工の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩の強度</li> <li>難透水性風化岩の厚さ</li> <li>高い地下水位による影響</li> <li>難透水性風化岩の耐力評価</li> <li>導坑施工による影響</li> <li>トンネル断面形状の影響</li> <li>トンネル支保工の安定性</li> <li>AGFの横断方向地山改良効果</li> <li>AGFの縦断方向地山改良効果</li> <li>計測管理や対策工の実施</li> </ul>

## 1.2 要因の抽出

今回の事故について、考えられる事故要因を以下に示す。

	地質・地下水に関する要因			設計・施工に関する要因	
	要因1	要因2	要因3	要因4	要因5
概念図					
要因	<p><b>難透水性風化岩の強度</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>物性値のバラツキの評価や潜在的な弱部の把握</li> </ul>	<p><b>難透水性風化岩の厚さ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩の上面位置、厚さや不陸の把握</li> </ul>	<p><b>高い地下水位による影響の有無</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩層に水圧が作用</li> <li>難透水性風化岩層の不陸により作用面が変動し局所的な荷重</li> <li>水みちによる局所的な荷重</li> </ul>	<p><b>難透水性風化岩の耐力不足の可能性の有無</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>上部帯水未固結砂層からの水圧に対する耐力不足の可能性の有無</li> <li>地盤改良等地下水対策の有無</li> </ul>	<p><b>導坑施工による影響の有無</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>先進導坑施工による緩みや亀裂の発生の可能性の有無</li> </ul>

	設計・施工に関する要因				
	要因6	要因7	要因8	要因9	要因10
概念図					—
要因	<p><b>トンネル断面形状の影響の有無</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>扁平断面による影響の有無</li> </ul>	<p><b>トンネル支保工の安定性</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>吹付けや鋼製支保工の耐力</li> <li>支保工脚部の支持力</li> </ul>	<p><b>AGFの横断方向地山改良効果</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>注入改良体の連続性</li> <li>注入材の地山への適合性</li> <li>鋼管の間隔や施工ずれの可能性の有無</li> <li>注入圧および量の管理</li> </ul>	<p><b>AGFの縦断方向地山改良効果</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>改良体のラップ長</li> <li>AGF拡幅方式の適合性</li> <li>鋼管の施工ずれの可能性の有無</li> <li>AGFによる水みち形成の可能性の有無</li> </ul>	<p><b>計測管理や対策工の実施</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>リスク想定と対応準備</li> <li>計測結果の把握と活用</li> <li>応急対策の選定と実施</li> </ul>

## 2 各要因に関する分析

### 2.1 要因1：D2層の強度

#### (1) D2層の物性値のバラツキの評価や潜在的な弱部の把握

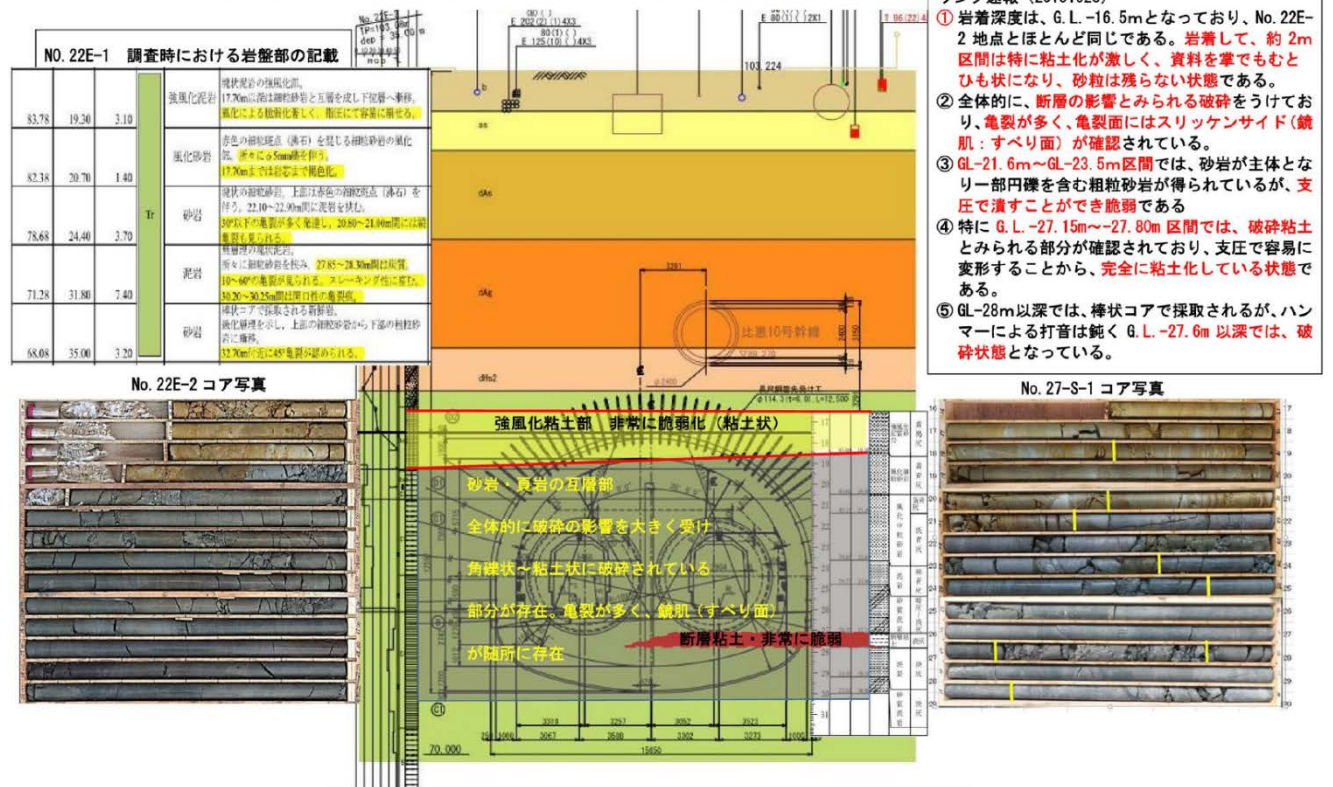
- 既往ボーリング等から、トンネル地山には脆弱な地層や断層、亀裂等が含まれ、かつトンネル天端付近はかつて地表となった履歴のある強風化層（D2層等）であることから、亀裂の分布・強度・透水性等の不均質性が確認された。
- D2層の内部自体も強度のバラツキが大きく、一部は岩盤とは言い難いほど軟弱であることがN値などからわかっていたが、局所的な弱部が及ぼすリスク評価は困難であったため、代表値によって安定性を評価した。
- 標準Ⅱ型部施工時の切羽観察や計測結果から逆解析等により地山物性値を再評価したが、不規則な弱層の分布等厳密な物性値の同定には限界があった。

このように複雑なD2層の物性値のバラツキや潜在的な弱部が、**要因となった可能性がある。**

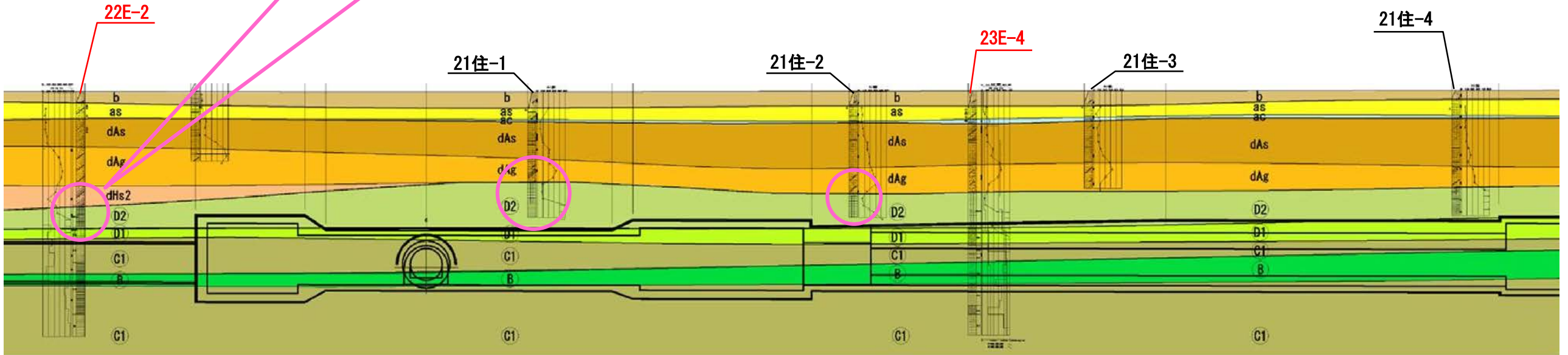
D2層内でも、上部でN値10程度、下部50以上とバラツキがみられる

#### No. 27-S-1 と No. 22E-1 調査結果の比較

- 岩着深度は、G.L. -16.5m となっており、No. 22E-2 地点とほとんど同じである。GL-16.5m から約 2m 区間は、特に粘土化が激しく、試料を掌でもむとひも状になり非常に脆弱であるが、その分不透水層としては機能できるものと考えられる。
- D2 層の下は砂岩・頁岩の互層であり、断層の影響により全体的に破碎を受けて亀裂が多く、また随所にすべり面が存在し、角礫～粘土状を呈する区間が散見される。さらに No. 27-S-1 では、インバート部深度に断層粘土が出現している。



- No. 27-S-1: 岩盤部地下水計測器設置用調査ボーリング速報 (20151028)
- 岩着深度は、G.L. -16.5m となっており、No. 22E-2 地点とほとんど同じである。岩着して、約 2m 区間は特に粘土化が激しく、資料を掌でもむとひも状になり、砂粒は残らない状態である。
  - 全体的に、断層の影響とみられる破碎を受けており、亀裂が多く、亀裂面にはスリッケンサイド(鏡肌: すべり面)が確認されている。
  - GL-21.6m~GL-23.5m 区間では、砂岩が主体となり一部円礫を含む粗粒砂岩が得られているが、支圧で潰すことができ脆弱である。
  - 特に G.L. -27.15m~-27.80m 区間では、破碎粘土とみられる部分が確認されており、支圧で容易に変形することから、完全に粘土化している状態である。
  - GL-28m 以深では、棒状コアで採取されるが、ハンマーによる打音は鈍く G.L. -27.6m 以深では、破碎状態となっている。



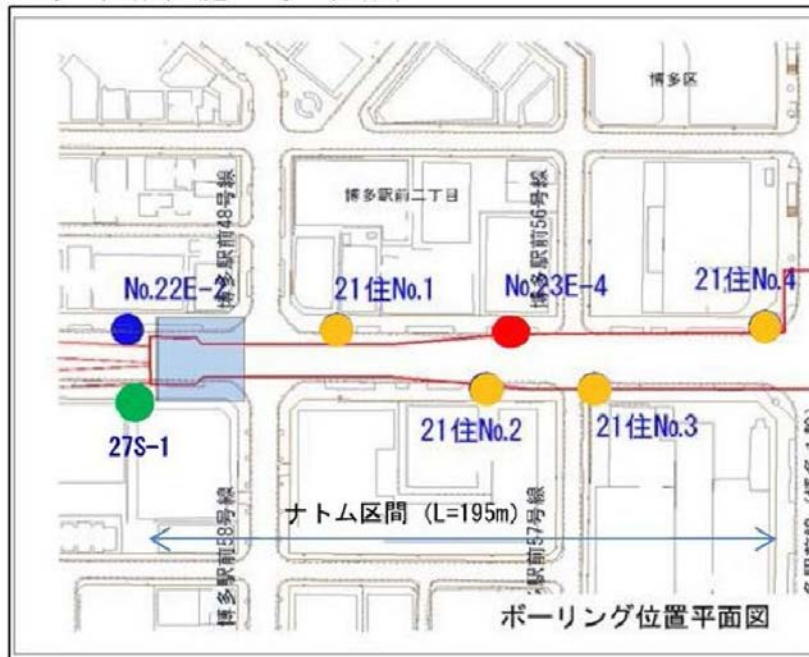
施工者提出資料より

## 2.2 要因2：D2層の厚さ

### (1) D2層の厚さ

ボーリング調査結果に基づく3次元地質モデルによる想定地質では、大断面トンネル天端からD2上面までの離隔は、一部を除き2.0mを下回ることが想定されることから、D2の厚さが想定より薄かったことが、**要因となった可能性がある**。

#### (1) 既存の地質調査



○既往：4箇所、設計時：2箇所、施工時：1箇所

年度	名称	調査内容
● H 2 1	地質調査成果品 (他事業)	柱状図
● H 2 2	地質調査成果品 (設計時)	柱状図, 孔内水平載荷試験
● H 2 3	地質調査成果品 (設計時)	柱状図, 孔内水平載荷試験
● H 2 7	地質調査成果品 (施工時)	柱状図, 孔内水平載荷試験

#### (2) 追加調査概要

・陥没箇所周囲の地質調査および物性試験により、トンネル上部の陥没前の地質状況や物性を推定することで、陥没原因を考察する (全4箇所)。

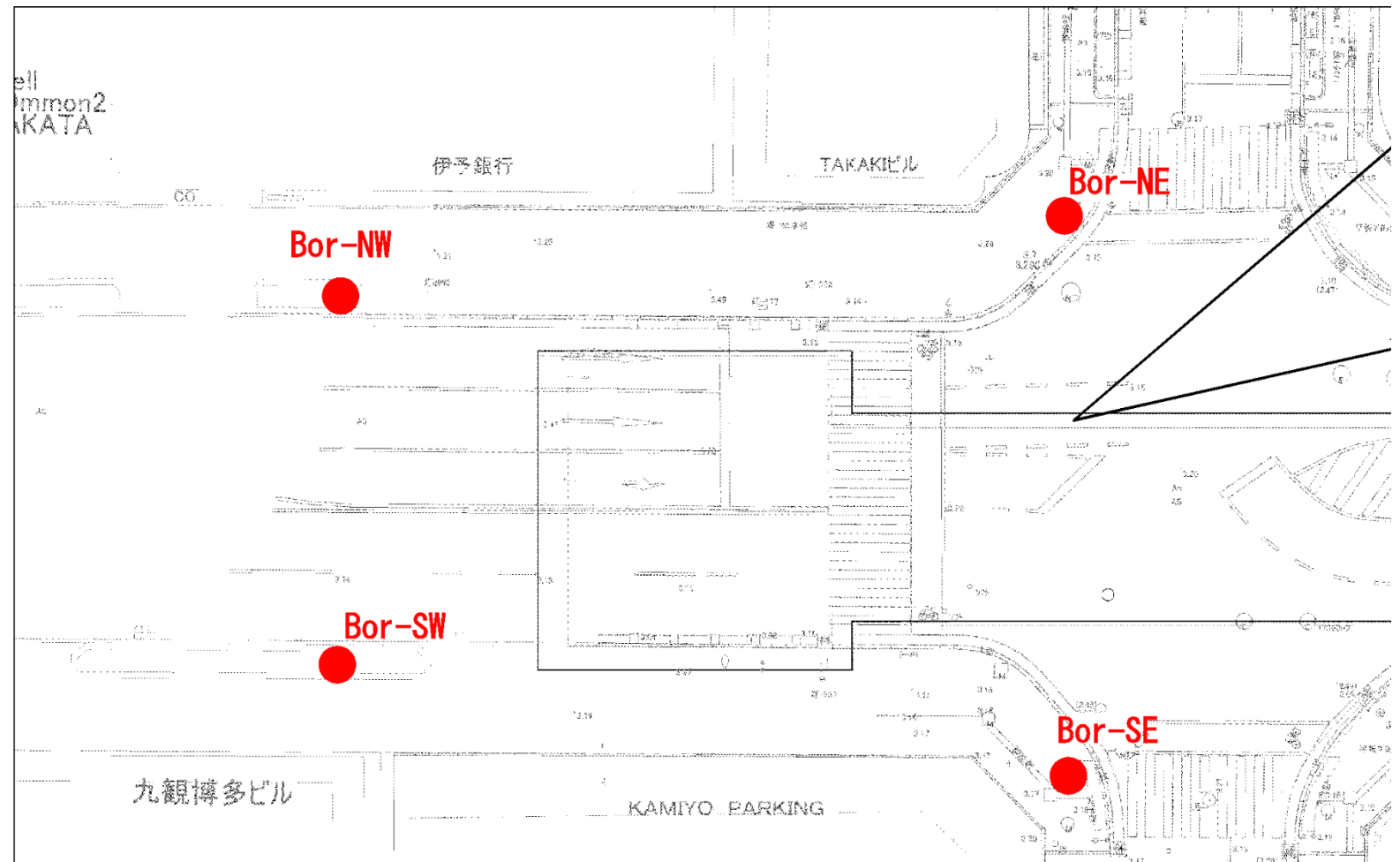
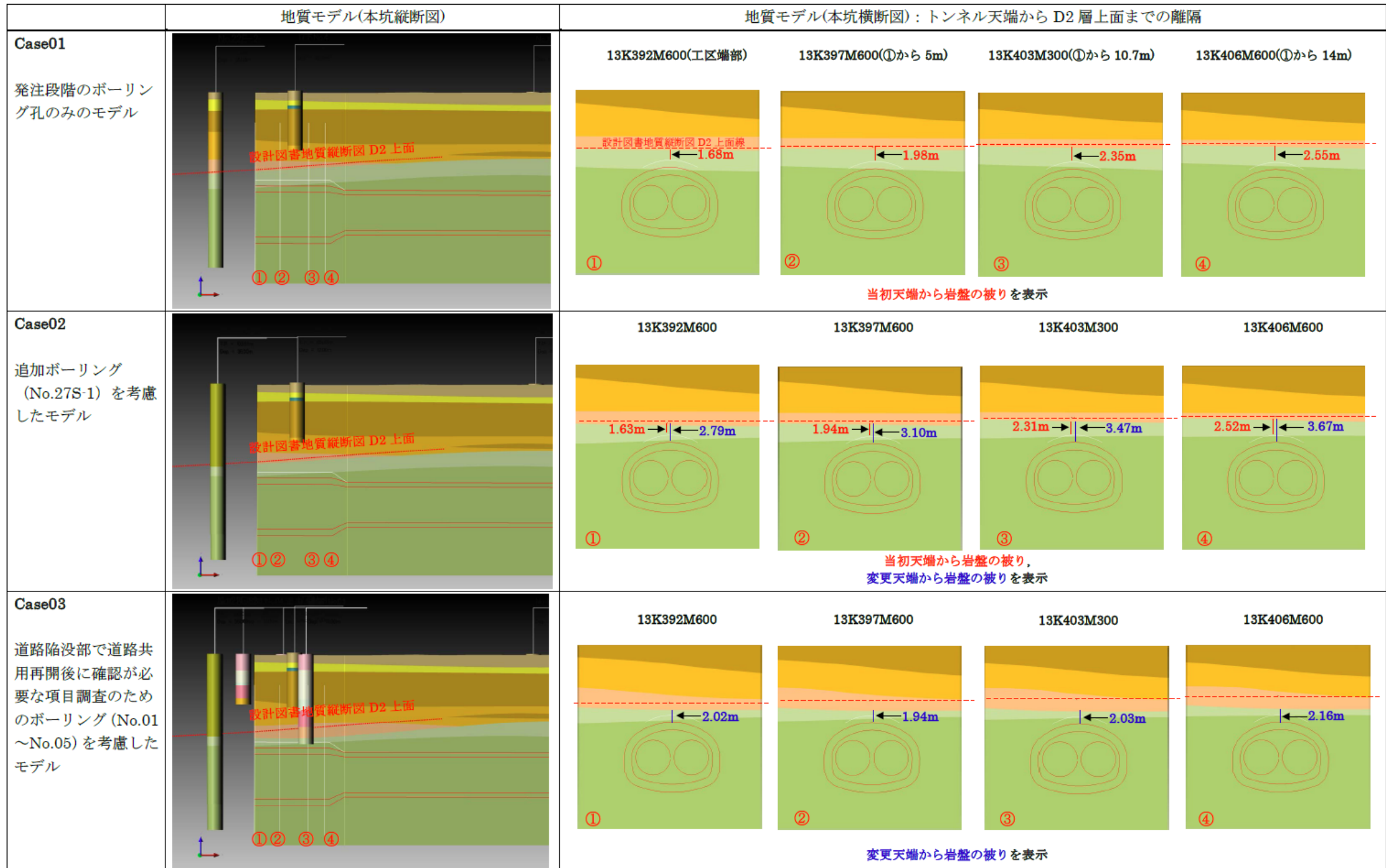


図2.2.1 施工者提出資料 資料1-P.2



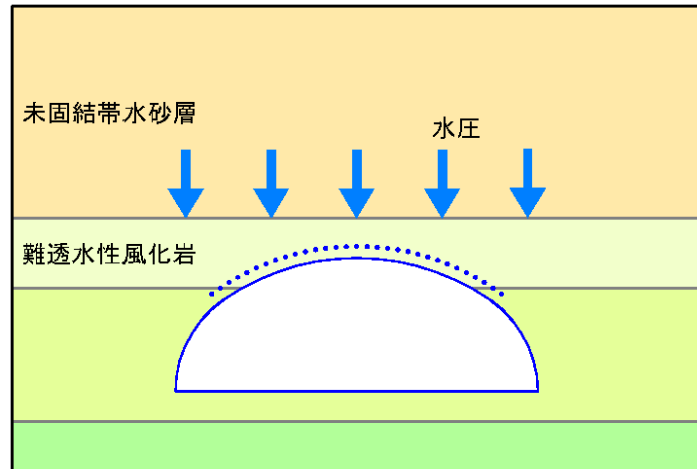
\* トンネル天端は設計の掘削線で描画

図2.2.2 施工業者提出資料 資料1-P.6

## 2.3 要因3：高い地下水位に対する影響の有無

### (1) D2層に作用する水圧の影響

当該区間の地下水位は地表面付近にあり、沖積・洪積の砂礫層内に帯水していることから、トンネル上部のD2層に高い水圧が作用する可能性やD2層の不陸により局所的な水圧がトンネルに作用する可能性が考えられる。このようにトンネル上部のD2層に水圧が作用したことが、**要因となった可能性がある。**



浸透流解析モデル

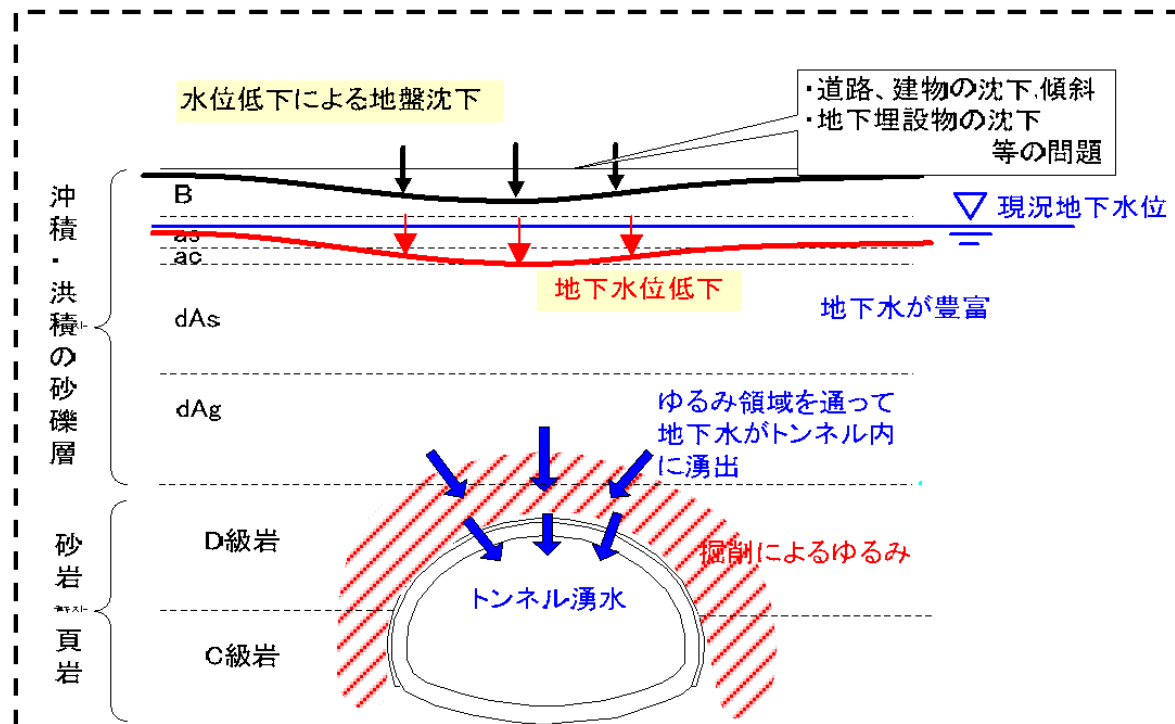


図2.3.1 福岡市提出資料P.19

### 薬液注入工（地上施工）

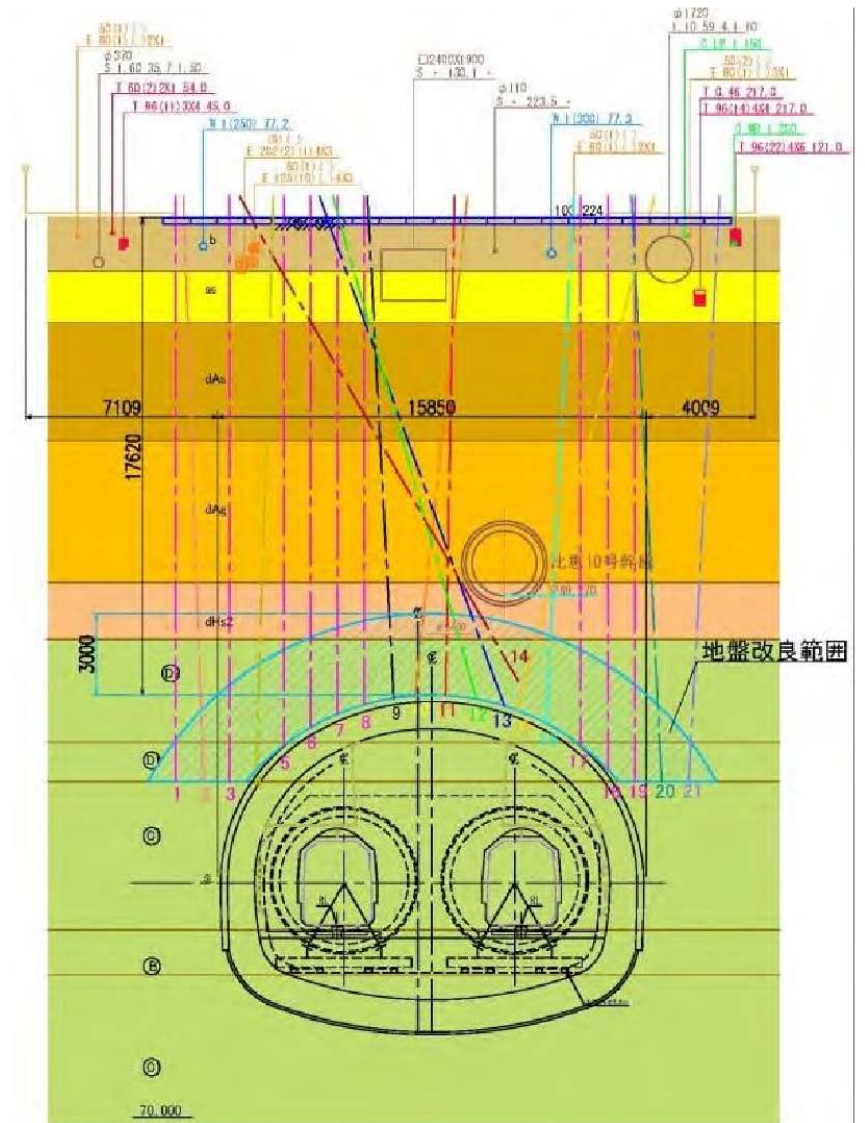
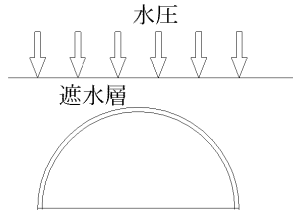


図2.3.1 福岡市提出資料P.20

## 2.4 要因4：D2層の耐力不足の可能性の有無

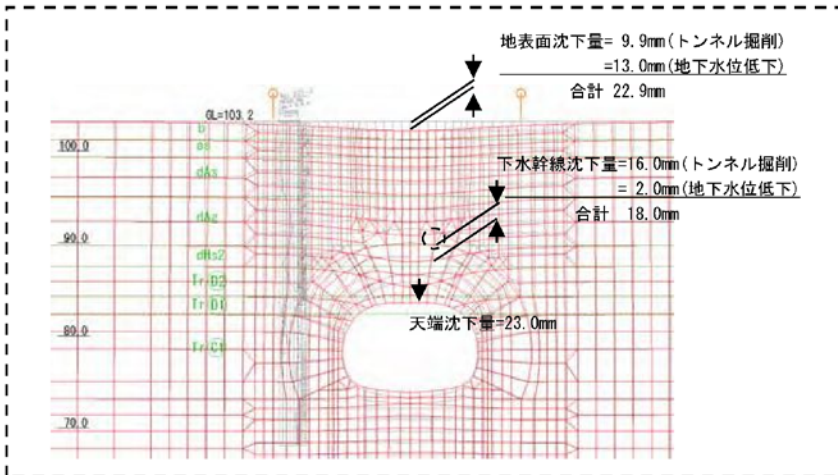
### (1) D2層の上部砂層水圧に対する耐力検討手法

FEM解析（全応力解析）により、地盤変位や部材の発生応力に着目した検討がなされ、トンネルの安定性を確認していた。難透水層に作用する水圧を考慮した解析手法が確立していないため水圧に対する安定性評価が困難であったことが、**要因となった可能性がある。**



遮水層評価モデルの例  
補助工法 (AGF, 薬液注入) あり解析結果

(掘削解放率：掘削解放時20%、支保工設置時80%)



地盤変位及び部材の発生応力

①地表面沈下	S <sub>max</sub>	S <sub>a</sub>	OK	(地下水位低下)		
	(mm)	(mm)		(m)	(m)	
	22.9	30	OK	3.2m		
②近接物変位	下水幹線		建築物			
	δY <sub>max</sub>	δYa	θ <sub>max</sub>	θ <sub>a</sub>		
	18.0	20	OK	0.32/1000	1.5/1000	
③支保工 応力	吹付コンクリート			鋼製支保工		
	照査項目	σ <sub>c</sub>	σ <sub>ca</sub>	σ <sub>s</sub>	σ <sub>sa</sub>	
		(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	
	M <sub>max</sub>	6.2	18	OK	77.8	245
	N <sub>max</sub>	6.4	18	OK	64.2	245
	N <sub>min</sub>	0.9	18	—	33.1	245
ロックボルト						
	N <sub>s</sub>	N <sub>sa</sub>				
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )				
	143.5	510	OK			

※①,②は、トンネル掘削応力解放による変位量+地下水位低下による変位量の合計

補助工法 (AGF, 薬液注入) の採用に伴い、沈下量、発生応力が許容値内となることを確認。

図2.4.1 福岡市提出資料P.20

### (2) 地盤改良等地下水対策

福岡市地下鉄他工区のNATMの施工実績では、主に砂層の止水や風化岩盤部の地山強化を目的として薬液注入工が実施されているが、標準Ⅱ型部掘削時の計測結果等をもとに実施したFEM解析により、トンネルの安定性を確認したため、本トンネルにおいては止水のための薬液注入を実施しなかったことが、**要因となった可能性がある。**

#### 1) 福岡市地下鉄のナトムによる施工実績一覧

路線名	工区 (トンネル名)	NATM 施工延長 (m)	断面形状	掘削幅 (m)	掘削 断面積 (m <sup>2</sup> )	平均 土被り (m)	最小 岩被り (m)	地質	地下水対策	薬液注入 目的		先受工	施工 着手年月	備考
										止水	地盤 強化			
空港線	中比恵西工区	240	複線	10.4~16.5	77	12.8	1.4	風化頁岩	ディーブウェル 薬液注入	●	●	先受ボルト ミニパイプ	S63.5	図1
	中比恵東工区	329	複線	10.4~11.0	77	12.5	2.0	風化頁岩	ディーブウェル 薬液注入	●	●	先受ボルト 先受パイプ	S63.5	図1
	空港工区	65	単・複線	5.6~12.5	77	7.9	1.6	風化花崗岩	ディーブウェル 薬液注入		●	パイプ	S63.2	-
七隈線	梅林工区	595	単線	5.6	29	17.7	8.8	風化花崗岩	水抜ボーリング 薬液注入	●	●	(坑口補強) フォアボーリング AGF	H11.3	図2
	別府工区	630	単・複線	5.6~9.0	27~91	8.1~10.2	2.1	風化頁岩 礫岩 砂岩	薬液注入 先進水抜き	●	●	パイプ	H10.1	-
	六本松工区	68	複線	9.5	63	7.7	0.0	風化頁岩 礫岩 砂岩	水抜ボーリング ディーブウェル 薬液注入	●	●	AGF	H9.2	図3
	桜坂工区	645	単・複線	5.2~12.4	25~105	9.0~11.4	3.0	風化頁岩 礫岩 砂岩	水抜ボーリング 薬液注入	●	●	AGF	H9.5	図4
	薬院西工区	837	単・複線	5.7~12.9	26~92	8.4~12.0	1.6	風化頁岩 礫岩 砂岩	水抜ボーリング 薬液注入		●	AGF PUIF	H8.12	-
	薬院工区	28	単線	5.2	16	8.8	0.0	洪積層砂礫 粘性土	ディーブウェル 薬液注入	●	●	パイプ	H9.10	-

#### 薬液注入について

主に砂層の止水や風化岩部の地盤強化を目的として、必要な範囲において薬液注入工を実施している。

図2.4.2 福岡市提出資料P.29



中比恵西・東工区

止水を目的とした薬液注入工

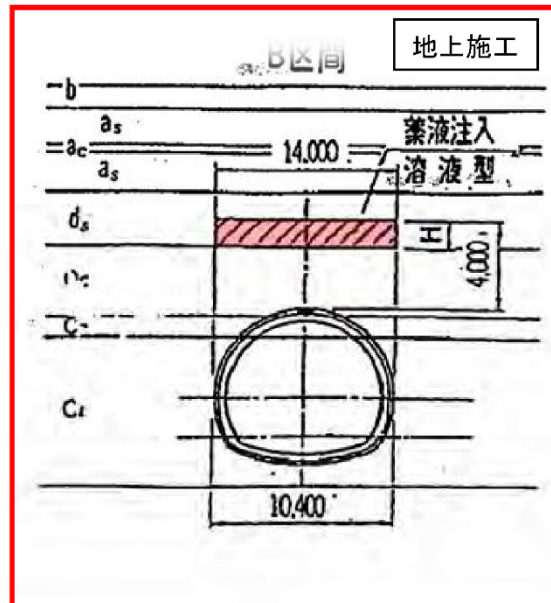


図2.4.3 福岡市提出資料P.30

桜坂工区

止水を目的とした薬液注入工及びAGFの併用

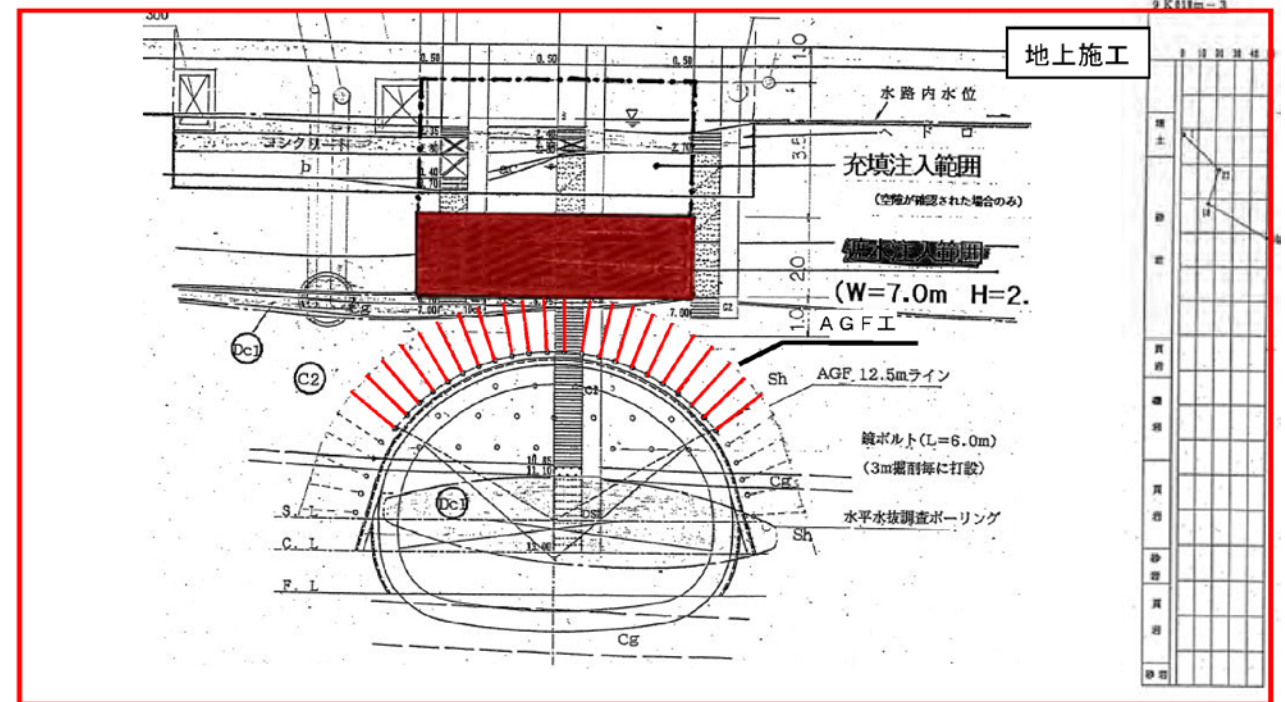


図2.4.5 福岡市提出資料P.34

中比恵西・東工区

地盤強化を目的とした薬液注入工

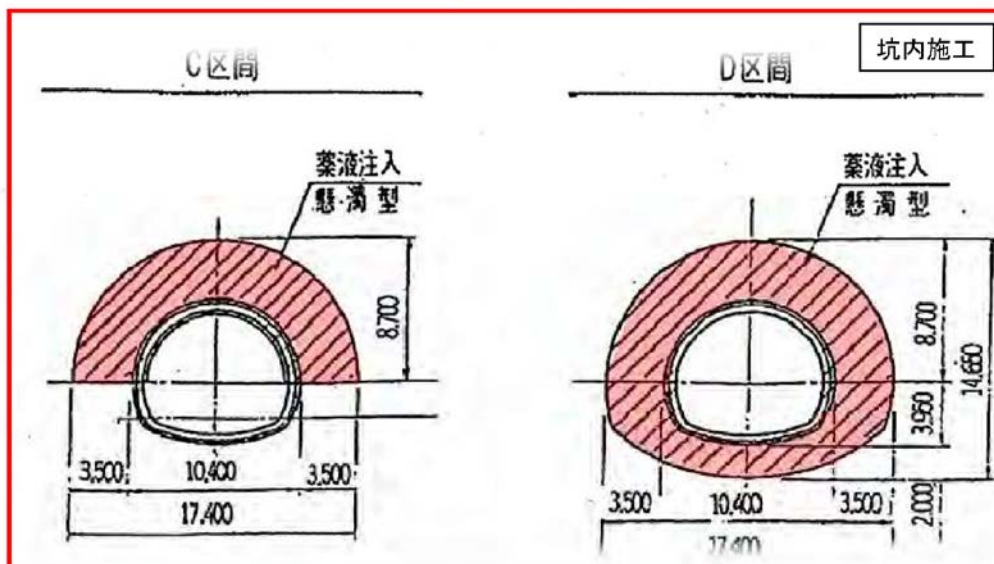


図2.4.4 福岡市提出資料P.30

(3) 他工法、掘削工法、補助工法の採用検討について

- AGF工法での注入は地質によって必ずしも十分な改良が進まない場合があること、また、力学性は改良できても、遮水性については、局所的に改良できていない場所が少しでもあればそこから破壊に至る場合がある
- 変形に対する認識は強いが「抜け落ち」に対する認識には乏しかったことが考えられる。

これらの考えが、**要因となった可能性がある。**  
 ただし、抜け落ちによりD2層が耐力不足となり破壊したのか、耐力不足であり破壊している過程で抜け落ちたのかは不明である。

## 2.5 要因5：導坑施工による影響の有無

### (1) 先進導坑施工による影響

先進導坑の計測データにより特に問題はないため、**要因となった可能性は低い。**

### (2) 先進導坑の計画

先進導坑の掘削においてもAGF等の補助工法が施工されているため、D2層の緩みや亀裂が発生した可能性は小さいと想定されることから、**要因となった可能性は低い。**

### (3) 先進導坑からの地山補強

先進導坑からの地山補強は、先進坑自身の掘削に対するものは検討されており、先進導坑から本坑に対する地山補強は計画されていないが、このことが、**要因となった可能性は低い。**

## 2.6 要因6：トンネル断面形状の影響の有無

### (1) 岩被りを確保するための断面扁平化

天端付近の岩被りを確保するために、内空断面の扁平率を0.625から0.532としたため、大断面で概ね0.57以上とされる扁平率よりも小さくなったことが、**要因となった可能性がある。**

(1-4) 標準断面図と支保パターン

標準断面図

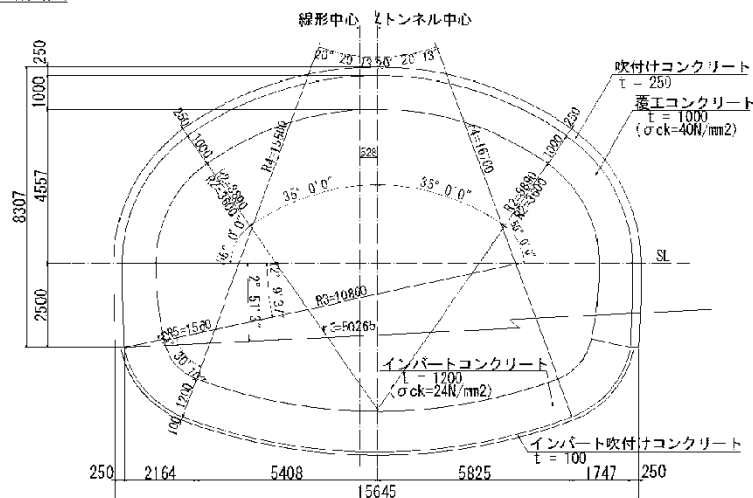
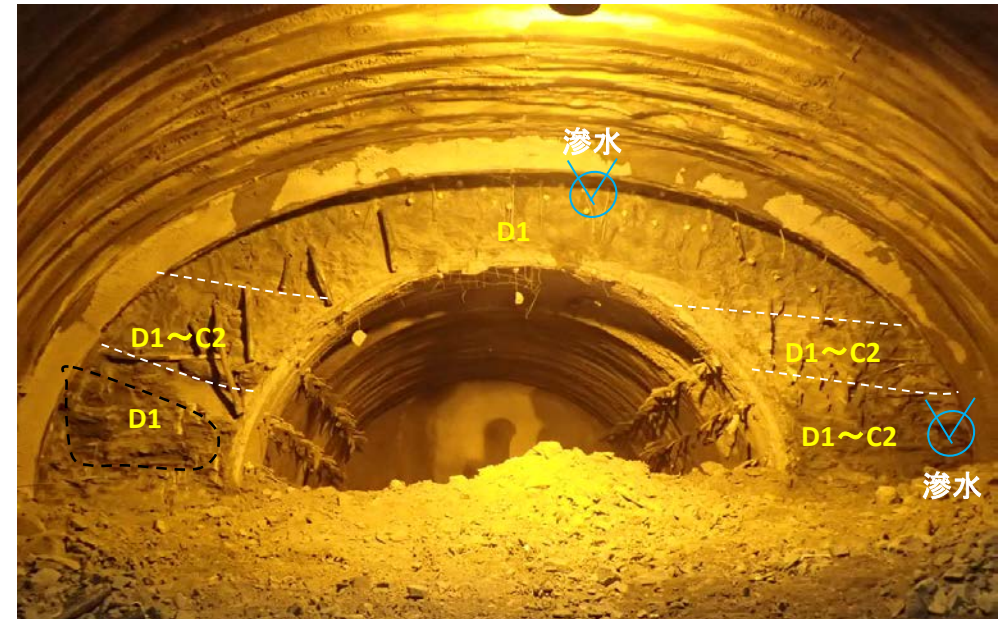


図2.5.1 施工業者提出資料

## 2.7 要因7：トンネル支保工の安定性

### (1) 吹付けや鋼製支保工の耐力

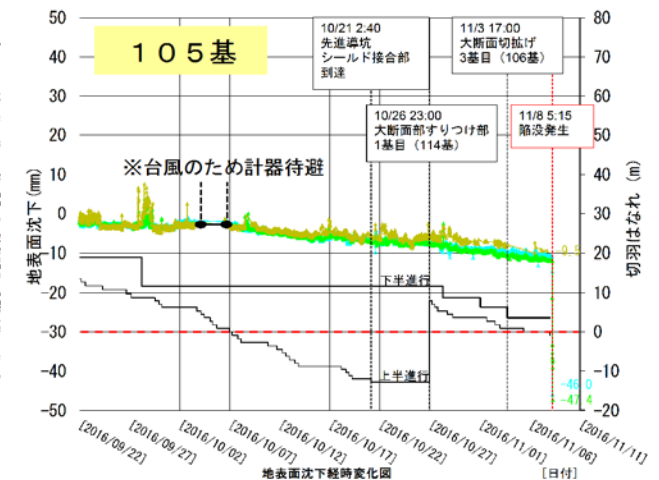
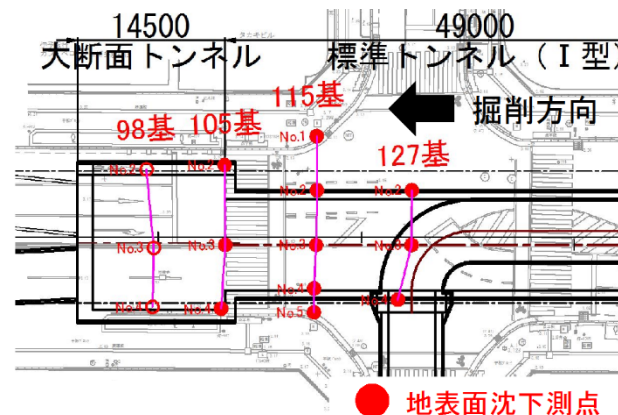
104基を含め、陥没までの支保工は健全であり、耐力が不足したとは認められず、**要因となった可能性は低い。**



104基 (11/7 昼勤)  
第1回委員会資料 資料4-2 (参考) p.6より

### (2) 支保工の支持力、脚部沈下

地表面沈下も顕著な増加が認められず、支保工の支持力、脚部沈下も認められないため、**要因となった可能性は低い。**



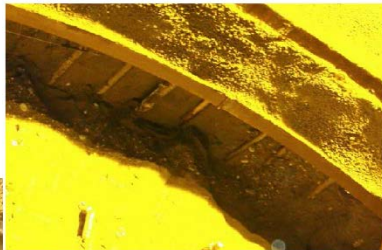
第1回委員会資料 資料4-2 (参考) p.19より

## 2.8 要因8：AGF横断方向の地山改良効果

### (1) AGFの注入改良体の連続性

D2層の地山に対して、亀裂注入となっており、改良体が連続とはなっていない状況が確認されるため、**要因となった可能性はある。**

【参考】砂礫地盤での注入状況



■注入状況（3連トンネルI型中央坑 No.229断面部）



施工者提出資料より

### (2) AGF注入材の地山への適合性

ウレタン系が選定されており、注入材の選定自体が**要因となった可能性は低い。**

■注入材の選定・注入量の設定

	粘性土	砂質土	礫質土	風化岩	風化岩に準拠 (博多駅)
土被り比	0~2.3	0.2~1.7	0~1.3	0.1~7.0	-
Vp (km/sec)	0.8~1.0	0.4~1.3	0.2~2.0	0.4~2.4	-
qu (kN/m <sup>2</sup> )	50~100	30	20	10~5000	-
N値	2~46	15~20	6~50	10~50	-
注入材	セメント系 ウレタン系	ウレタン系 水ガラス系	ウレタン系 水ガラス系	セメント系 ウレタン系	ウレタン系
注入方式	ステップ 同時 バルブ	ステップ 同時 バルブ ダブルパッカー	ステップ 同時 ダブルパッカー	ステップ 同時 バルブ	同時
注入量 (kg/m)	12.0	13.4	11.9	10.0	当初設計5.76 → 10.0に変更

注1) 風化岩の注入材は、亀裂が開裂している場合はセメント系、開口幅が小さい場合や粘性土を介在する場合はウレタン系とする。  
注2) 風化岩の注入方式は、注入材に対応してセメント系がバルブ注入方式、ウレタン系がステップ注入方式または同時注入方式とする。  
注3) 注入量は、注入材がウレタン系で、打設ピッチが45cmの場合の標準値。

※「ジオフロンテ研究会 AGF WG：注入式長尺先受工法（AGF工法）技術指針，2012年3月15日」中の表に加筆

施工者提出資料より

注入材種別	効果・特性
ウレタン系	<ul style="list-style-type: none"> <li>セメント系注入材に比べ岩片間を結合させる接着力が大きい。</li> <li>靱性に優れているので、切羽天端崩落を確実に防止できる。</li> <li>確実な限定注入ができる。</li> <li>ゲルタイムが短いため、湧水の影響を受けにくい。</li> <li>リークに対してはインターバル注入で容易に対応できる。</li> <li>比較的高価である。</li> </ul>
セメント系	<ul style="list-style-type: none"> <li>ウレタン系注入材に比べ岩片間を結合させる接着力が小さい。</li> <li>靱性は小さいが、注入された部分の圧縮強度と変形係数は大きい。</li> <li>ゲルタイムの調整等、コントロールが難しい。</li> <li>リークへの対応が難しい。</li> <li>湧水に対しては注入材の希釈や流出等の可能性がある。</li> <li>比較的低価である。</li> </ul>
水ガラス系	<ul style="list-style-type: none"> <li>非常に浸透性が高く、土砂粒子の間にも浸透する。</li> <li>ゲルタイムが長い場合は湧水によって流出や強度低下が生じやすい。</li> <li>ホモゲル強度が小さい。</li> <li>リークへの対応が難しい。</li> <li>締った砂質地盤などで、その他の薬液では十分な改良効果が期待できない場合に採用される。</li> <li>比較的高価である。</li> </ul>

施工者提出資料より

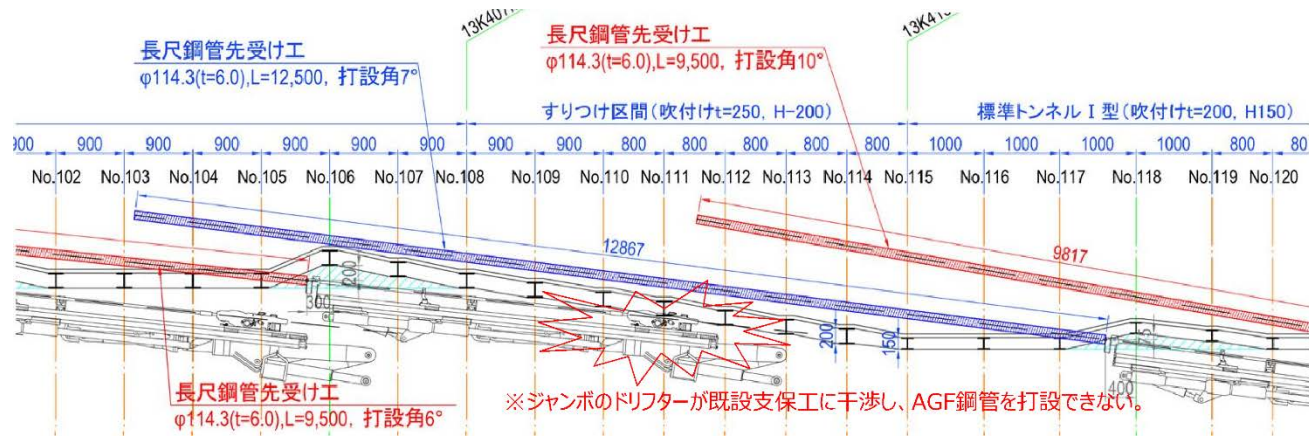
### (3) AGF鋼管の間隔や施工ずれ

ガイドセルと支保工の干渉により、標準と異なり本来は望ましくはないものの天端付近のAGF打設位置を10~20cm程度下げているが、大きなずれや鋼管間の間隔の広がりや認められず、**要因となった可能性は低い。**



施工者提出資料より

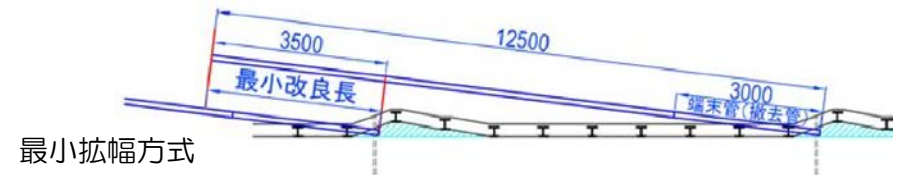
## 2.9 要因9：AGF縦断方向の地山改良効果



施工者提出資料より

### (1) AGF改良体のラップ長

AGFは、根元を切断し改良長がラップすると考える最小拡幅方式が採用されているが、D2層の地山に対して、亀裂注入となっており、ラップ部の改良が連続とはなっていないことが想定され、このことは、**要因となった可能性がある。**

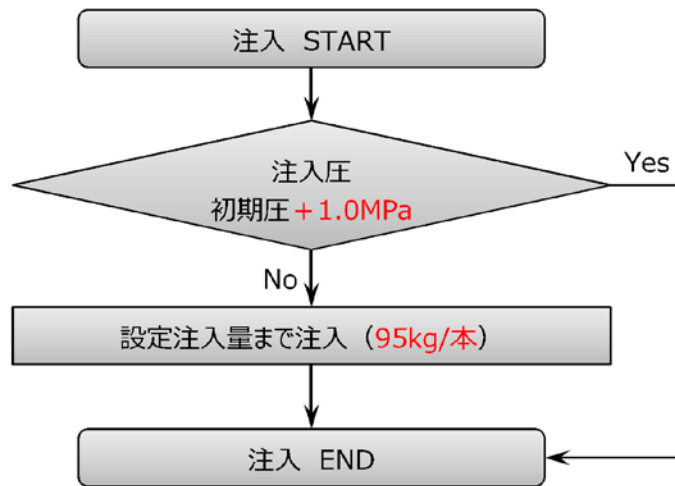


施工者提出資料より

### (4) AGFの注入圧および量の管理

AGF区割りでの管理を行っていないが、注入圧および注入量での管理を行っており、**要因となった可能性は低い。**

#### ■ 注入管理手法

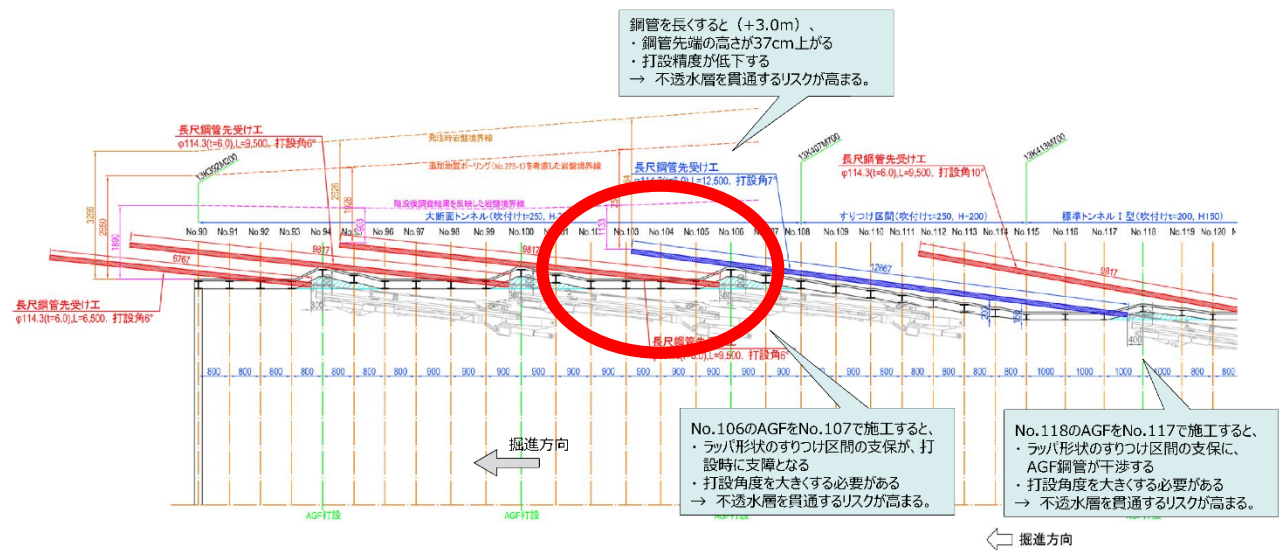


※ AGFの注入は、3台の注入ポンプ（1～3号機）を使用し、鋼管内に挿入した長さの異なる3本の注入ホース（L=3m, 6m, 9m）から同時にシリカゲルを注入していた（パッカーによって隔壁を設けて、注入区間割りを行うステップ注入はしていない）。

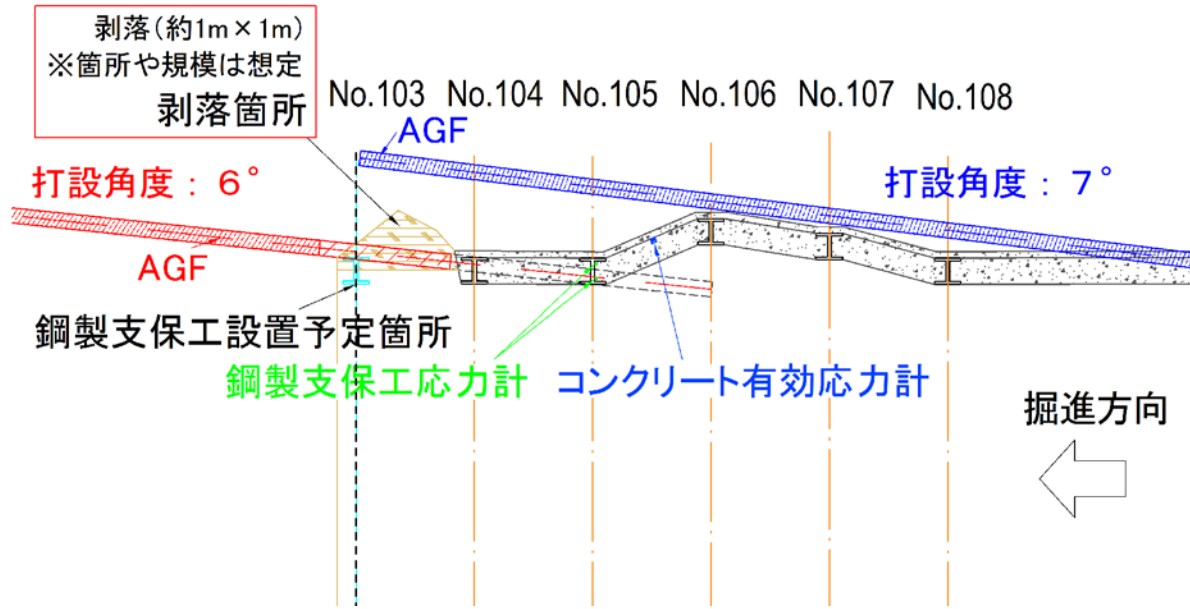
施工者提出資料より

### (2) AGF拡幅方式の適合性

陥没箇所は、拡幅部のラップ形状のすりつけ区間となり、他の部分と比べてラップ長が短く、さらに、根元切断される箇所でもあった。D2層の地山に対して、亀裂注入となっており、ラップ部の改良が連続とはなっていないことも想定され、このことは、**要因となった可能性がある。**



施工者提出資料より



第1回委員会資料 資料4-2 (参考) p.15

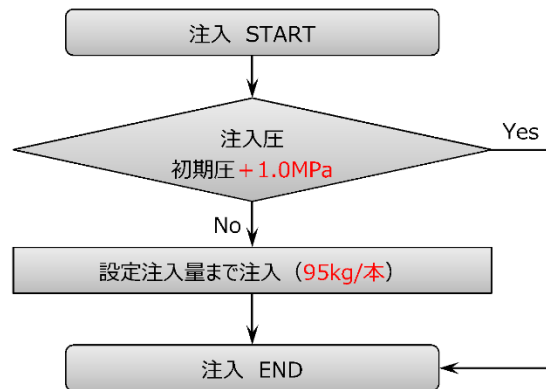
(3) AGF鋼管の施工ずれ

大きなずれや鋼管間の間隔の広がりには認められず、**要因となった可能性は低い。**

(4) AGFの注入圧および量の管理

AGF区割りでの管理を行っていないが、注入圧および注入量での管理を行っており、**要因となった可能性は低い。**

■注入管理手法

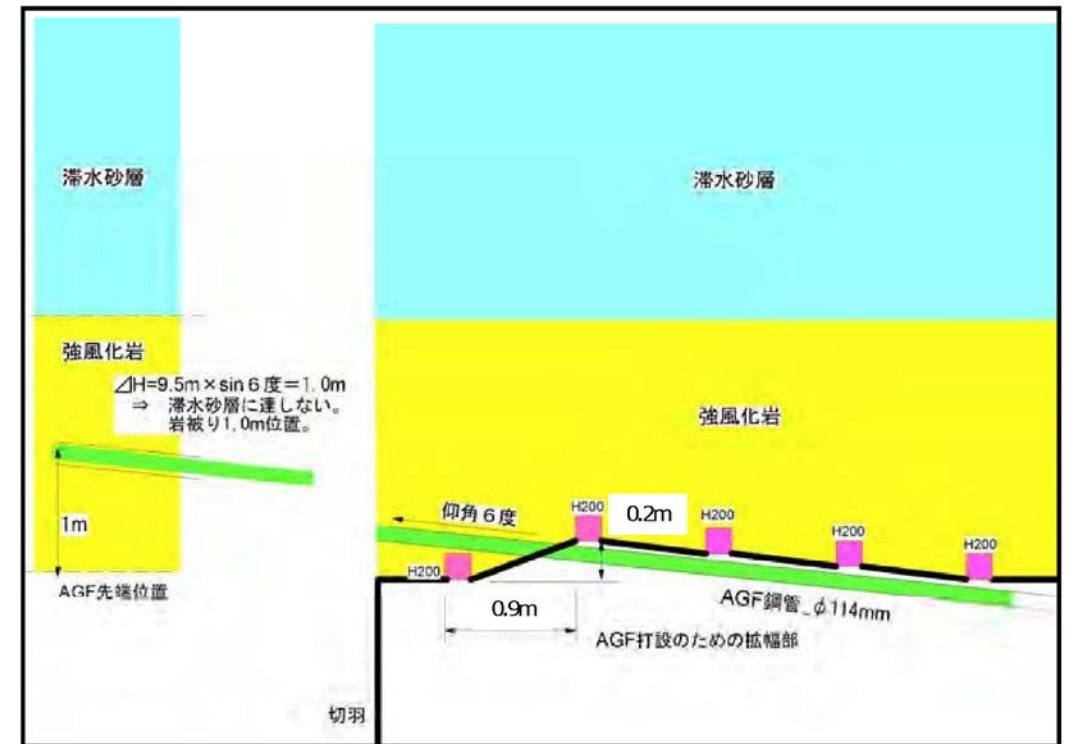


※ AGFの注入は、3台の注入ポンプ (1~3号機) を使用し、鋼管内に挿入した長さの異なる3本の注入ホース (L=3m, 6m, 9m) から同時にシリカレジン注入していた (パッカーによって隔壁を設けて、注入区間割りを行わずステップ注入はしていない)。

施工者提出資料より

(5) AGFによる水みちの形成

AGFは仰角6° で打設することにより、D2層下端から約1mにAGF先端が位置すること、施工時におけるAGFの削孔水状況等により、AGF施工時にはD2層を貫通していないと考えられる。よって、**要因となった可能性は低い。**



施工計画書より

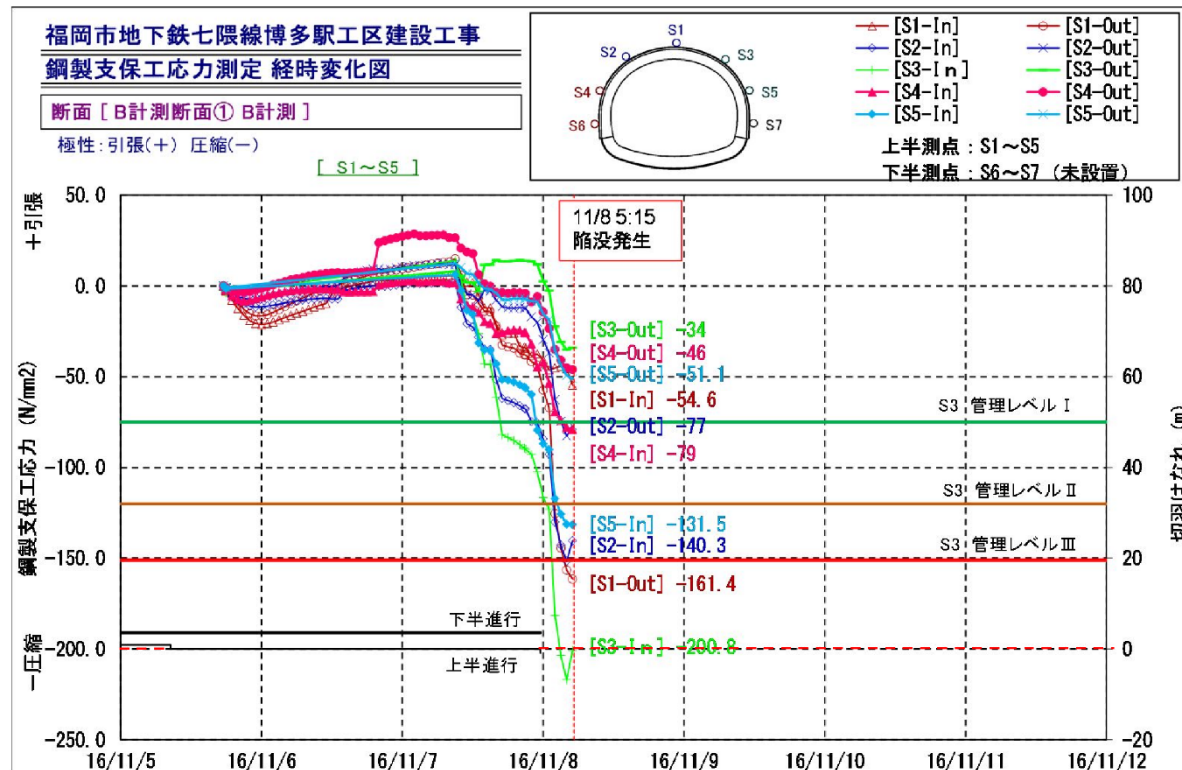
## 2.10 要因10：計測管理や対策工の実施

### (1) 支保工応力増大に対する対応

105基の支保工応力は、事故直前には増大していたが、その把握は十分になされず、対策に遅れが生じた可能性がある。事故の**要因となる可能性は低い**が、**何らかの対応がとれた可能性がある**。

#### 鋼製支保工応力

(測点：105基)



### (2) AGF注入量・圧・範囲の確認 (事前・施工中)

AGF注入圧および注入量での管理は行っていたが、試験施工を行っておらず、注入効果が十分に発揮される状況にあったかは疑問がある。**要因となる可能性は低い**が、**何らかの対応がとれた可能性がある**。