

※本資料については、交通局から委員への  
道路陥没事故に関する報告を行うため  
の参考資料とする。

第7回七隈線建設技術専門委員会

(報告資料)

## 七隈線延伸工事に係る道路陥没事故報告

～福岡市地下鉄七隈線博多駅（仮称）工区建設工事～

平成29年5月12日

福岡市交通局

## 目 次

1. 工事概要	1
2. 事故概要	
(1) 発生日時, 場所及び事故内容	3
(2) 事故による影響	5
(3) 事故発生後の対応	7
3. 第三者による検討委員会について	
(1) 検討委員会設置の経緯	14
(2) 検討経過	14
4. 事故原因の推定	
(1) 検討委員会による検討結果	15
(2) 事故の要因に対する福岡市交通局としての受止め【参考】	23
5. 事故再発防止対策	
(1) 工事再開と今後の設計施工に向けて	25

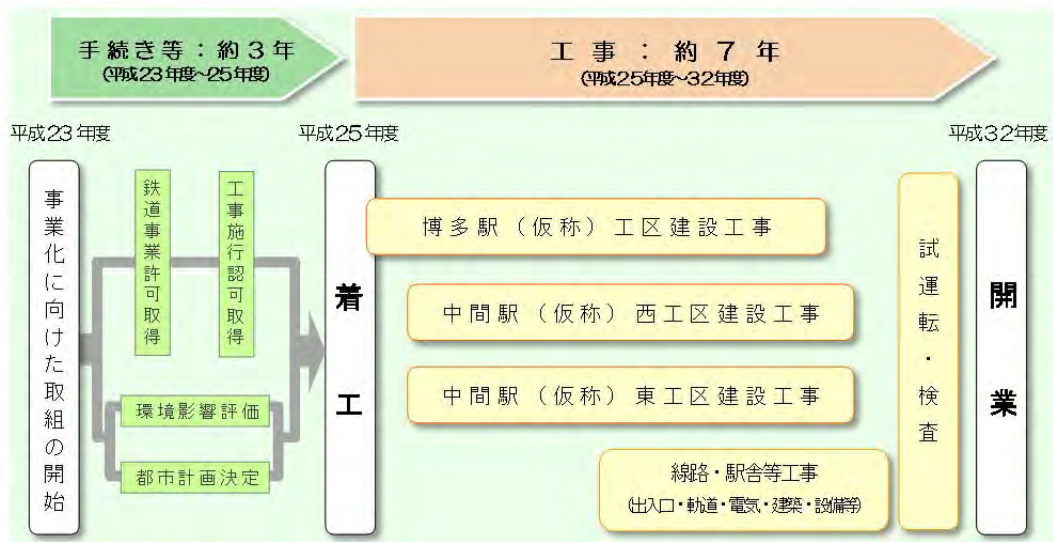
# 1. 工事概要



## 〔事業概要〕

- 延伸区間 天神南～博多
  - 建設キロ 約 1.4km (営業キロ 約 1.6km)
  - 建設費 約 450 億円
  - 開業予定 平成 32 年度
  - 工 法 全線地下式 (開削工法, シールド工法, ナトム工法, アンダーピニング工法)
  - 乗車人員 約 8.2 万人 (うち, 新規利用者数※1 は約 2.3 万人)
- ※1 マイカーなどから乗り換えて新たに地下鉄を利用される人数

## 〔事業スケジュール〕



(1) 工事名

福岡市地下鉄七隈線博多駅（仮称）工区建設工事

(2) 工事場所

福岡市博多区博多駅前二丁目地先～博多駅中央街地先

(3) 発注者

福岡市交通局

(4) 設計者

八千代エンジニアリング株式会社

(5) 施工者

大成・佐藤・森本・三軌・西光 建設工事共同企業体

(6) 工期

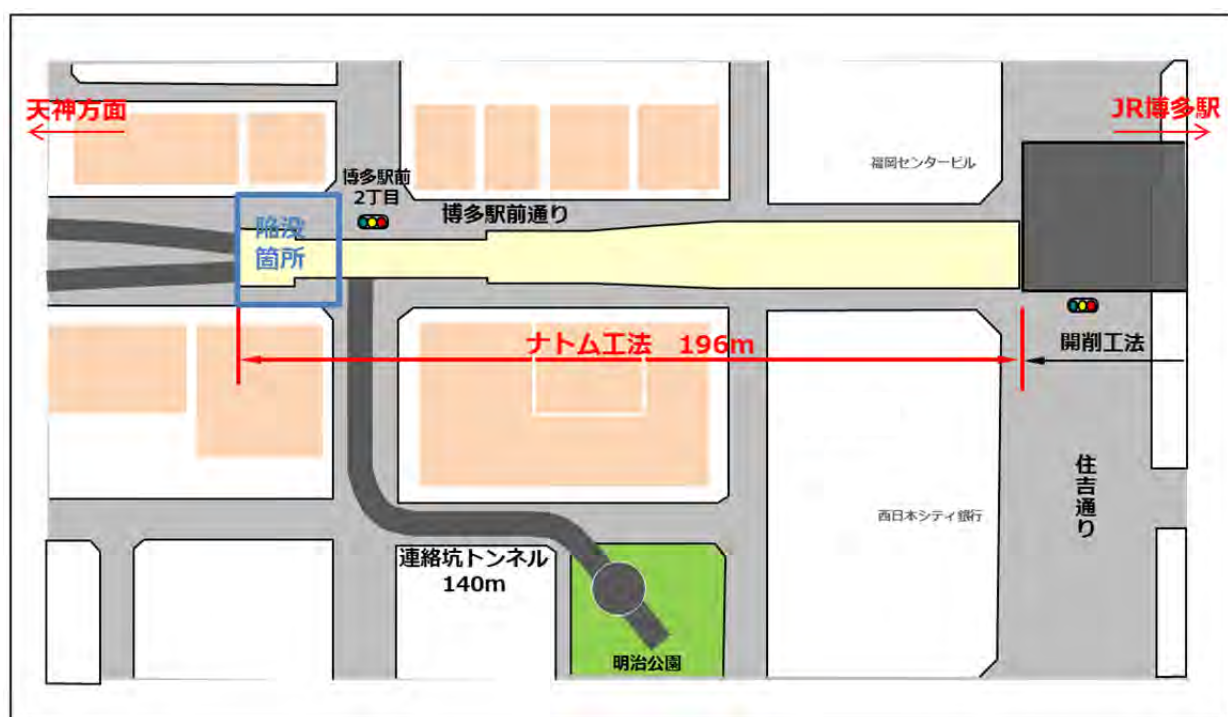
平成25年12月5日から平成31年3月15日まで

(7) 工事内容

駅のホームやホーム手前の車両折り返し設備が設置できるトンネル構造物をナトム工法で建設するとともに、JR地下街や空港線博多駅コンコース等の下では、駅のホーム、コンコース、空港線への乗換通路等の構造物を開削工法やアンダーピニング工法で建設する。

山岳トンネル工法（NATM） L = 195.6m

開削工法，アンダーピニング工法 L = 83.7m





## 2. 事故概要

### (1) 発生日時, 場所及び事故内容

#### 1) 発生日時

平成28年11月8日(火) 5時15分頃

#### 2) 場所

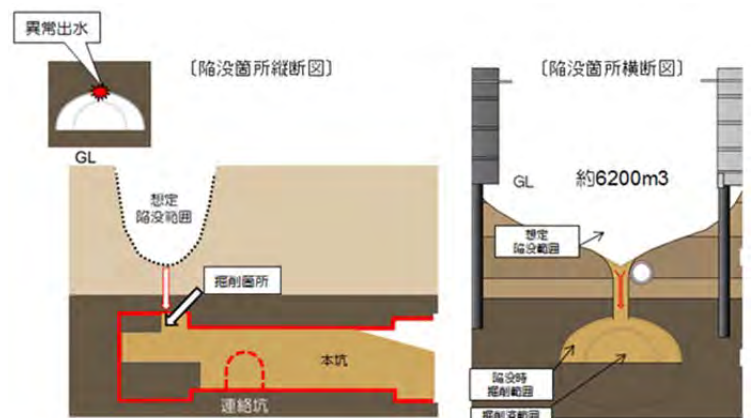
福岡市博多区博多駅前2, 3丁目(博多駅前2丁目交差点付近)



### 3) 事故内容

ナトム工法によるトンネル工事中に切羽上面が崩落したことにより, 地下水と土砂がトンネル内へ流出し, はかた駅前通り(博多駅前2丁目交差点付近)に幅約2.7m, 長さ約30m, 深さ約1.5mの規模で道路陥没が発生したものの。

陥没状況(上から望む)



〔陥没時のトンネル内状況写真〕



## 〔陥没事故発生経緯〕

### ■平成28年11月8日(火)

- 0:40 頃 No103 基掘削開始
- 4:25 頃 連続的な肌落ち, AGF 鋼管間の部分的な肌落ち
- 4:50 頃 切羽天端からの異常出水(最初は濁り水)  
0.25m<sup>3</sup>程度の黒色塊が落下, 水と砂が大量に押し寄せる  
重機を切羽後方へ, 退避指示
- 5:00 頃 全員(9名)地上へ退避完了
- 5:05 頃 車両等の進入禁止措置開始【5:10 頃 措置完了】
- 5:15 頃 舗装クラック発生【陥没事故発生】  
交通規制範囲の拡大(博多口交差点～博多区役所南口交差点)
- 5:20 頃 道路南側陥没
- 5:24 頃 JVから交通局へ連絡
- 5:28 頃 JVから警察へ連絡
- 5:30 頃 道路北側陥没
- 5:50 頃 警察による交通規制開始
- 6:00 頃 消防隊出動 現場本部設置
- 6:30 頃 「地下鉄七隈線建設工事に伴う事故対策要領」に基づき,  
交通局理事を本部長とする事故対策本部(C体制)※を設置
- 7:20 頃 道路中央陥没
- 9:20 頃 交通事業管理者を本部長とする運転事故復旧対策本部相当の対策本部を設置
- 14:00 頃 交通管理者による交通規制から道路管理者による交通規制へ移行

※C体制 工事占用区域外への影響が大きい事故等で, 通行人や沿道家屋等に大きな被害を与えた場合, または, 死者を出す等被害の規模が大きな場合  
⇒ 交通局の事故時体制としては最上位の体制を取った。

## (2) 事故による影響

### 1) 道路交通への影響

工事箇所の市道博多駅前線(はかた駅前通り)は、幅員約27mの4車線道路であり、11月8日5時15分頃の事故発生に伴い両側歩道を含む全4車線(博多駅方面行き、天神方面行き各2車線)が消失し、博多口交差点から博多区役所南口交差点までの約400mの区間が全線通行止めとなった。

その後、陥没箇所の埋め戻し、ライフラインの応急復旧、道路仮復旧を行い、11月15日5時に規制解除となった。

### 2) ライフラインへの影響

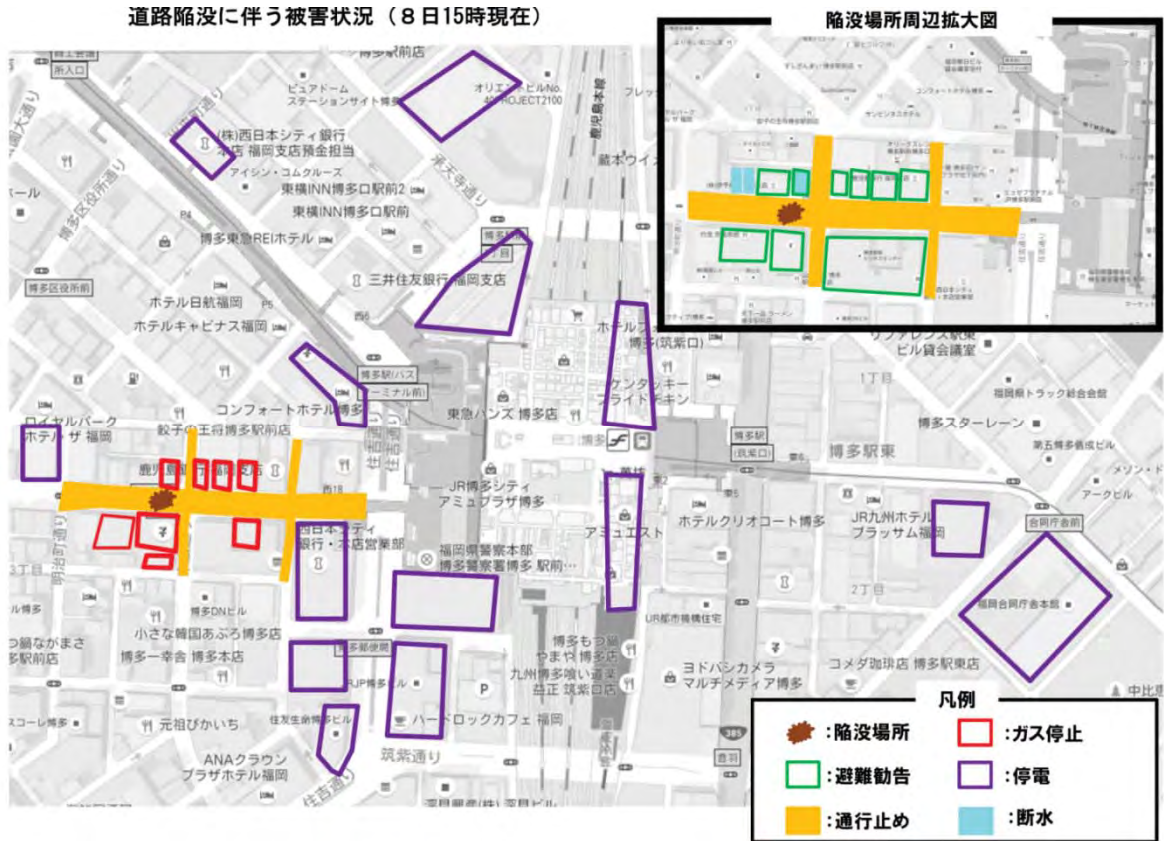
陥没範囲内に埋設されている電気、電話、ガス、上下水道等の各ライフラインがほぼ断裂し、事故発生箇所及び周辺供給箇所を含む広範囲にわたって影響を及ぼした。

#### ○被害状況及び復旧状況

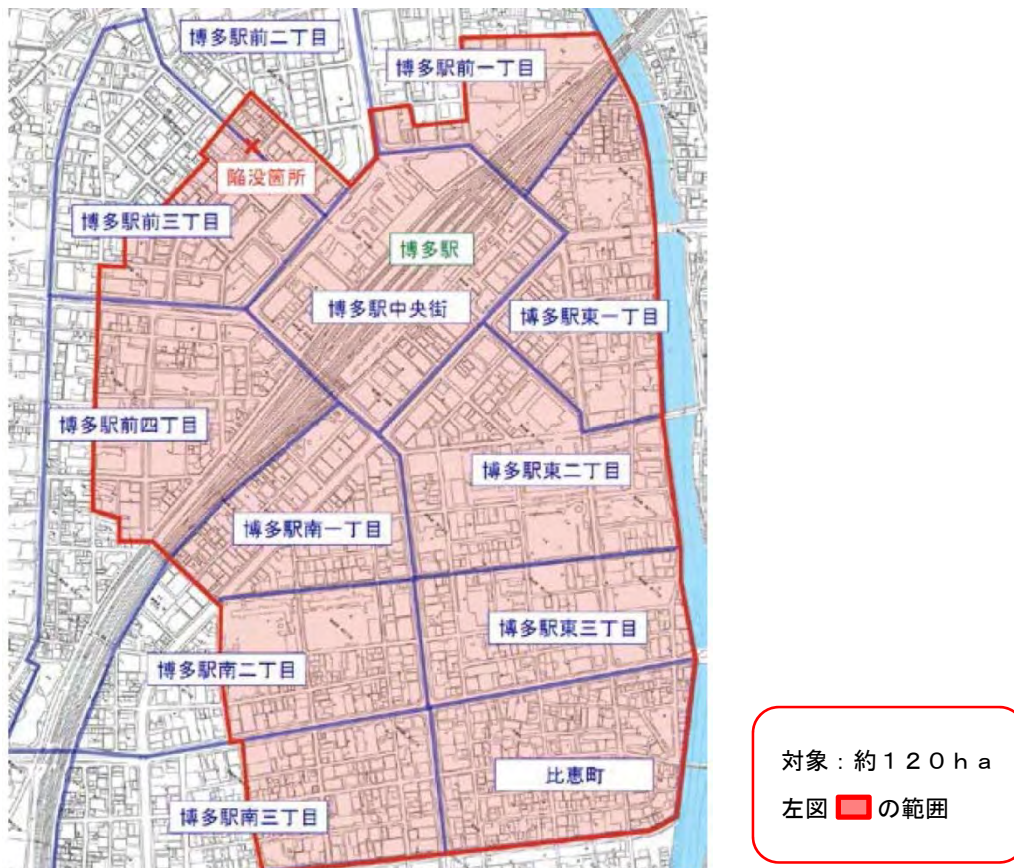
項目	被害状況	復旧状況
下水道	下水道管破断 ( <ul style="list-style-type: none"> <li>・合流幹線 比恵1号幹線(2,400×1,900)</li> <li>比恵4号幹線(φ1,500)</li> <li>・合流枝管 φ350</li> <li>・側溝 300×300 2条</li> <li>・再生水管 φ100 1条</li> </ul> ) 約120haを対象とした下水道 使用自粛のお願い	8日 11:30～ 下水道使用自粛要請 9日 20:00 使用自粛の全地域を解除
上水道	建物3棟断水 (博多駅前2丁目5街区一部)	8日 18:00～ 給水開始 2棟 11日 13:00 断水解消
電話・通信	最大約1,380回線 利用不可	13日 17:40 完全復旧
電気	特別高圧14件停電 最大約800戸停電	9日 9:04 完全復旧
ガス	ガス供給19戸停止	8日 供給再開 15戸 9日 供給再開 2戸 12日 14:00 完全復旧
近隣建築物	避難勧告 【博多区】堅粕工区10棟	8日 18:20 避難勧告解除 6棟 9日 12:10 避難勧告解除 1棟 15日 5:00 避難勧告全解除 ※8日 堅粕公民館 避難者 1名
空港	福岡空港ビルディング一部停電	9日 0:14 完全復旧
金融機関	オンラインシステム障害 ( <ul style="list-style-type: none"> <li>福岡銀行</li> <li>西日本シティ銀行</li> <li>熊本銀行</li> <li>親和銀行</li> </ul> )	9日 完全復旧



○被害範囲



○下水道使用自粛要請のお願い対象範囲





### (3) 事故発生後の対応

#### 1) 初動期の対応

5:15頃 道路陥没(舗装クラック発生)



8日 5:00

道路陥没

5:20頃 道路南側陥没



5:30頃 道路北側陥没



5:50

警察による交通規制開始

6:00

6:00~7:45

ライフライン等の関係者へ連絡

7:20頃 道路中央部陥没



8:00

埋戻し材の検討

初動期<二次災害の防止>

- ・建物への影響
- ・ガス管破損に伴う着火の危険性
- ・電力ケーブルの破断による放電発生
- ・水圧低下と濁水発生
- ・下水衛生面の問題 など

ライフライン関係

初動期における現場観察

- 〈安全確認のため注視していた項目〉
- ・陥没穴の観察(陥没部の水位が上がらない!!水が抜けている)
  - ・立坑の観察(水位変動)
  - ・地下水の覆水観察(陥没部及び立坑部の水位差の確認)

10:00

<埋戻し材の決定>

二次災害防止と陥没箇所を安定させる目的で流動化処理土の使用について大成JVから提案を受け、交通局と大成JVで協議を行い埋戻し材を流動化処理土に決定  
※地下埋設物などの落下物の残置について道路管理者と協議

<ライフライン調整会議の開催を決定>

ライフラインを早期に復旧するために、各ライフライン事業者を一堂に集めることを決定

11:00

12:00

8日 14:30頃

流動化処理土投入開始

8日 15:00頃

ライフライン調整会議(第1回)

## 2) 二次災害防止



### 道路陥没

#### 【想定された二次災害】

- ・建物への影響
- ・ガス管破損に伴う火災の危険性
- ・電力ケーブル破断によるガスへの引火
- ・上水道の水圧低下と濁水発生
- ・下水衛生面の問題
- ・井戸水の濁り

#### 【道路・交通関係】

- 道路管理者〔道路下水道局・博多区役所〕  
道路陥没部における、信号機等落下の対応
  - ・落下物の把握
  - ・緊急措置としての落下物残置について道路管理者と協議  
⇒後日、環境局と協議  
(不法投棄のような不適正処理には当たらないことを確認)
  - ・道路仮復旧に向けた協議
- 交通管理者〔福岡県警察・博多警察署〕
  - ・交通規制を行い、陥没部への一般車両等の通行を規制
  - ・ガス漏えいのため、火気使用禁止の呼びかけ
- バス・タクシー
  - ・道路陥没に伴い迂回を要請

#### 【ライフライン関係等の対応】

- ガス管〔西部ガス〕  
(中圧ガス管, 低圧ガス管)
  - ・ガスの漏えいを防ぐため、バルブ閉止及びガス管の切断を実施
- 電力ケーブル〔九州電力〕
  - ・電力ケーブルの破断による放電発生の恐れがあったため、系統を切替え、ケーブルの切断を実施
- 通信ケーブル〔NTT〕
  - ・道路陥没箇所を迂回する経路を選定し、仮設の新たな通信ケーブルを設置し回線の切替工事を実施
- 上水道〔水道局〕
  - ・濁水解消のため洗管を実施し水質確認
  - ・止水後、土砂等混入防止のため栓止め
- 下水道〔道路下水道局〕
  - ・陥没部への下水の流入を防ぐため、下水道の使用自粛要請
  - ・使用自粛期間を最小限に食い止めるために迂回排水を実施
  - ・陥没箇所における衛生面の対応として、陥没箇所内の流入水及び滞留水に塩素系消毒剤(固形・液体)を適宜投入
  - ・再生水については、上水道と併せて止水後、供給停止施設は上水道からの切り替え運用により供給
- 井戸水〔保健福祉局〕
  - ・陥没現場周辺地区の井戸水検査を実施

#### 【建物関係】

- 建物
  - ・近接する建物の基礎図面を確認
  - ・市民局による避難勧告発令(11/15 道路仮復旧に合わせて解除)
  - ・被災建築物応急危険度判定士(市職員8名)による周辺建築物の確認
  - ・福岡市設計測量業協会による建築物測量(沈下, 傾き)  
11/8~11/17の期間において測量を実施



### 3) 道路仮復旧の施工手順

#### ■ STEP-1 流動化処理土埋戻し (11月8日~9日)

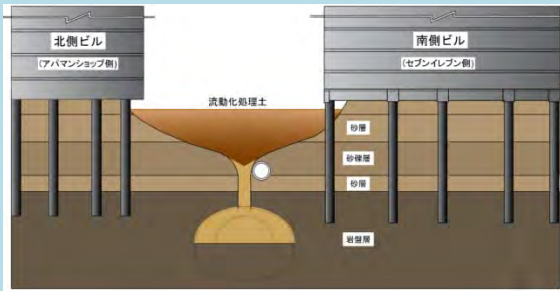
##### 【条件】

- ・陥没した隙間を細部まで充填する
- ・ライフラインの早期復旧を行う
- ・地盤の強度が必要である
- ・トンネル内部に流入させないように安定させる



流動化処理土で埋戻し

[埋戻しイメージ]

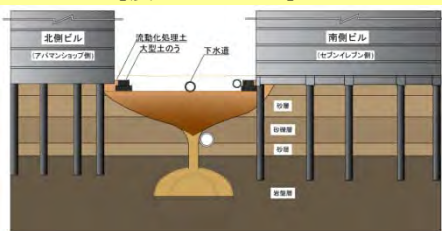


[打設状況]



#### ■ STEP-2 ライフライン復旧と近接ビル基礎周辺の充填開始 (11月10日~13日)

[復旧イメージ]



[ライフラインの復旧]



[近隣ビル基礎周辺の充填]



#### ■ STEP-3 砕石埋戻し・道路舗装 (11月11日~14日)

[砕石埋戻し・路盤工]

[復旧イメージ]



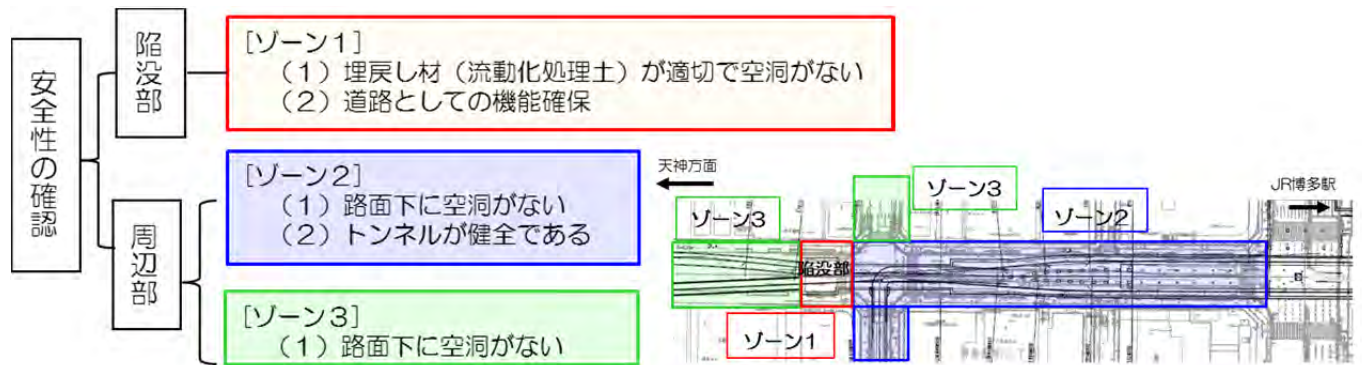
[道路仮復旧の完了]  
11月15日(火)午前5時





#### 4) 道路仮復旧の安全性の確認

[確認の手法]



[確認結果]

##### ゾーン1

(1) 埋戻し材（流動化処理土）が適切で空洞がない

① 小さな隙間，空洞が充填されていること



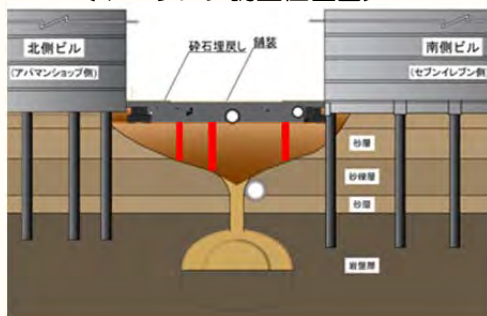
##### ●流動化処理土の特徴

流動化処理土は、土砂に大量の水を含む泥水（もしくは通常の水）と固化材を加えて混練することにより、流動化させた湿式土質安定処理土で、土工による締固めが難しい狭隘な空間などに、流し込み施工で隙間を充填し、固化後に発揮される強度と高い密度により品質を確保する土工材料である。

『流動化処理土利用技術マニュアル』（現：国立研究開発法人 土木研究所）

② 十分な強度を有していること

[ボーリング調査位置図]



現場から採取した試料による圧縮強度試験より、流動化処理土の平均圧縮強度は

10,176kN/m<sup>2</sup>で、

原地盤の推定強度 380kN/m<sup>2</sup>よりも堅固である。

③ 路床，路体として，これまで十分な使用実績があることを確認

(2) 道路としての機能確保

路床，路盤の品質管理として，以下の試験を実施し，十分な強度を有することを確認

① 現場密度の測定：必要な支持力を確認するため，締固めによる密度を確認

② プルーフローリング試験：仕上り後の不良箇所の有無を確認するため，タイヤローラーを走行させ，目視によって不均一なたわみが発生していないことを確認



## ゾーン2・ゾーン3

(1) 路面直下に空洞がない

空洞調査（地中レーダー探査）により確認

⇒路面陥没に至るような空洞は見られなかった

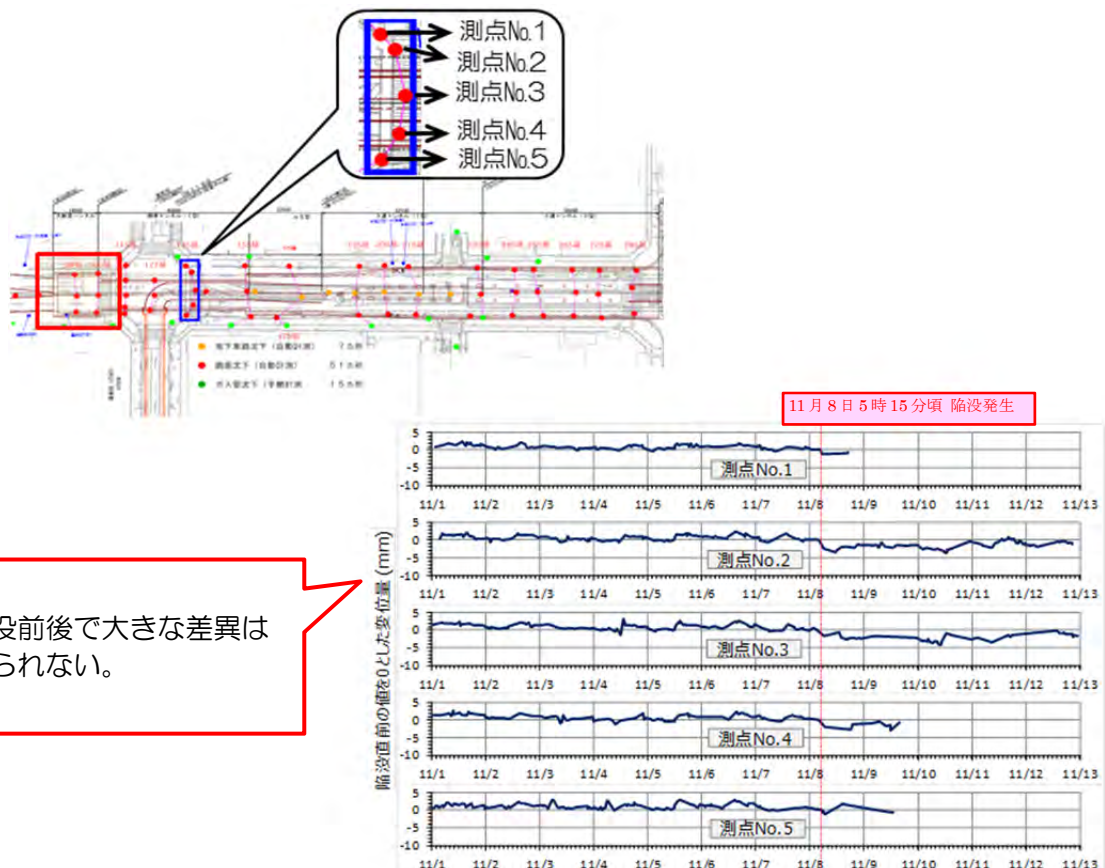


(2) トンネルには大きな異常がないと考えられる

・陥没前後の路面沈下に大きな変化がないことから、トンネルも大きな変化がないと考えられる。

・陥没後水中カメラロボットで連絡坑から土砂堆積部まで確認した結果、**連絡坑側壁部には大きな異常は見られなかった。**

〔路面沈下計測ポイントと計測結果〕



## 5) 道路仮復旧後の対応

11/15

### ① 道路管理者・交通管理者による安全確認を受けて道路の供用再開（午前5時）

埋戻し箇所ではボーリング調査を行い、十分な強度が確保されていることを確認。  
（原地盤強度よりも堅固であることを確認）

流動化処理土下部の緩んだ可能性のある砂層とそれ以外の健全な地盤で埋戻し土の支持力を計算。

11月14日に専門技術者等による「はかた駅前通り仮復旧道路の安全性を確認するための『専門技術者による会議』」において仮設構造物としての安全性が確認された。その際、ある程度の路面沈下はありうるという意見や仮設構造物の前提となる流動化処理土下の地盤の強度についてチェックボーリングを出来るだけ早く実施する必要があるとの意見があった。  
また、道路開放後も安全性を確認するため、継続してモニタリングを実施することを報告した。

#### 《モニタリング》

##### ●実施事項

###### 【現場状況確認】

路面施設：目視による点検  
保安施設：目視による点検  
地表面沈下：自動計測

##### ●地表面沈下管理値

- ・ 1次管理値：10mm（監視人数の増加）
- ・ 2次管理値：15mm（関係者対応協議）
- ・ 3次管理値：24mm（通行止め）

##### ●地表面沈下観測 10分に1回（自動計測）

##### ●路面測定及び保安施設の点検

- ・ 11月15日～21日 : 1時間に1回（交通局職員とJV職員による確認）
- ・ 11月22日～25日 : 3時間に1回（JV職員による確認）
- ・ 11月26日～1月14日 : 1時間に1回（JV職員による確認）
- ・ 1月15日～ : 3時間に1回（JV職員による確認）

※但し、沈下後の11月26日～12月28日まで、JV職員による24時間監視を行った。

11/18

### ② チェックボーリングの開始（午後9時）

- ・ 目的：下部地盤の性状確認⇒**緩い砂層が確認された。**
- ・ 調査箇所：5ヶ所
- ・ 期間：11/18～12/2

11/26

### ③ 平均 38mm（最大 70mm）の路面沈下発生

##### ●原因

流動化処理土下部の緩み箇所が道路開放後に圧縮されたことによる沈下と推測。

##### ●時系列

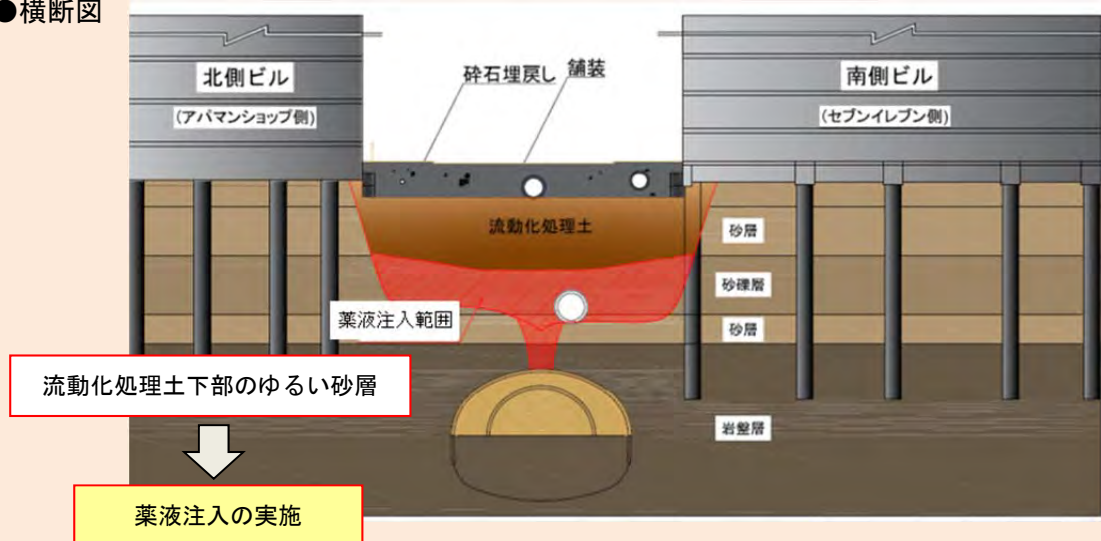
- 0 : 30 最大 15mm路面沈下を計測
- 1 : 23 地表面沈下が最大で 24mmを超える
- 1 : 45 交通規制開始（博多区役所南口交差点～博多口交差点）
- 2 : 40 最大 70mmの路面沈下を計測（以降変化なし）
- 3 : 40 交通規制縮小
- 5 : 30 交通規制解除**

- 11/26 5:30 交通規制解除と判断した根拠（安全性の確認）
1. 沈下量が予測（当初 80mm程度）の範囲内であること  
（路面沈下後、大成JVより交通局へ報告）
  2. 午前2時40分以降沈下が進行していないこと
  3. 路面の状況に大きな段差等もなく、一般車の通行走行に支障がないことが確認できたこと
  4. 地下埋設物に異常がないことが確認できたこと  
（各埋設管理者による現地確認及び西部ガスと消防局によるガス漏えい点検）
  5. 立坑内の状況に変化がないこと

④ 薬液注入の開始（午後9時）

- チェックボーリングの結果や、路面沈下の事象が発生したこと、「専門技術者による会議」の議論を踏まえ、  
長期的により高い安全性を確保するため、地盤改良工事を実施。
- ・目的：流動化処理土下部の地盤改良
  - ・期間：12/2～12/28

●横断図



●予測沈下量（大成建設による試算）

地盤改良前 (11/26)	地盤改良前 (12/2)	地盤改良後 (12/27)
80mm程度	86mm	26mm
4本のボーリング により算出	5本のボーリング により算出	3本のボーリング により算出

### 3. 第3者による検討委員会について

#### (1) 検討委員会設置の経緯

地下鉄七隈線延伸工事における道路陥没事故の原因究明については、国土交通省からの助言を受け、国立研究開発法人土木研究所に検討を依頼した。同研究所は「福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会」（以下、検討委員会と呼ぶ）を設置し、事故の原因究明と再発防止策について検討した。

#### (2) 検討経過

検討委員会の開催日

平成 28 年 11 月 29 日（火）第 1 回検討委員会

平成 29 年 1 月 21 日（土）第 2 回検討委員会

平成 29 年 3 月 30 日（木）第 3 回検討委員会（とりまとめ）

#### (参考) 検討委員会のメンバー（敬称略・五十音順）

砂金 伸治 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ 上席研究員

石原 康弘 国土交通省 大臣官房 技術調査課長

江口 秀二 国土交通省 鉄道局 施設課長

小島 芳之 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主管研究員

佐々木 靖人 国立研究開発法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ 上席研究員

佐藤 研一 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 教授

\*西村 和夫 首都大学東京副学長 都市環境学部 教授

野焼 計史 東京地下鉄株式会社 取締役

真下 英人 （一社）日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 所長

間瀬 利明 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 構造・基礎研究室長

丸山 修 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部 設計技術部 設計技術第二課長

三谷 泰浩 九州大学 工学研究院 附属アジア防災研究センター 教授

\*委員長



## 4. 事故原因の推定

### (1) 検討委員会による検討結果（検討委員会報告書より）

#### 1. 事故原因の推定

事故原因の究明に際しては、福岡市および施工会社(大成・佐藤・森本・三軌・西光建設工事共同企業体)ならびに設計会社(八千代エンジニアリング株式会社, 日本シビックコンサルタント株式会社)より資料を提出して頂き、また、陥没事故発生後に当委員会の依頼に基づく追加ボーリング調査を実施して頂いた。さらに、本委員会では計3回の討議を行ったほか、委員相互での討議に多くの時間を費やした。

以下に事故原因の推定を示すが、崩落したトンネル現場に立入ることができないこと、また、委員会設置から4ヶ月という短い期間のとりまとめであったことから、関係者から提供頂いた資料に基づいて可能性の高い事故原因について推定したものとなっている。

#### 1.1. 福岡市地下鉄七隈線延伸工事との因果関係

一般的に、道路陥没の原因としては、地下埋設物によるもの、年月をかけて形成された地下空洞によるものなどが想定されるが、今回の道路陥没については、施工会社の社員がトンネル天端からの崩落を目撃し、トンネル坑内に流入した土砂の写真が存在すること、また、福岡市地下鉄七隈線延伸工事以外に原因となる地下埋設物関連工事を行っていなかったため、当該工事が道路陥没の原因となったと推定される。

#### 1.2. 道路陥没事故発生のメカニズム

事故発生のメカニズムについては、以下のように推定される。

- ① 元来、堆積環境やその後の風化度合いにより強度や厚さにバラツキがある難透水性風化岩層の下部にトンネルが掘削された。トンネル天端から、当該地層とその上部の未固結帯水砂層との境界までは、約2mとなっていた。
- ② トンネルを掘削、又は断面を拡幅するにつれて、未固結帯水砂層からの高い水圧の影響も加わり、難透水性風化岩に緩みや亀裂が発生し、徐々に破壊し始めた、或いは、難透水性風化岩に潜在的弱部が存在して、いわゆる「水みち」が形成された。
- ③ 上記②によって、トンネル天端部が連続的に剥落、或いは漏水を伴いながら、破壊が進行し、遂に、未固結帯水砂層と地下水がトンネル内に流入し、またこれによって破壊が加速度的に進行し、最終的には大規模な道路陥没を発生させるに至った。

#### 1.3. 事故の原因

本委員会では、事故の原因について考えられる10の項目を抽出し、それらが要因となるか否かの可能性について評価を行った。要因は必ずしも1つではなく、様々な要因が複合的に作用し陥没に至ったと考えられるが、その中でも以下の2つの要因（A-①、②）については、可能性が高いものと推定した。

しかしながら、これらの要因を推定するに至った当該地層の状況等については、事故後の調査等により明らかになったものであり、当該工事の設計時点における地質調査の頻度等は通常の都市NATM 工事と比較して少ないとまでは言えないことから、事故前に正確に把握することは困難であったものとする。

また、事故後の調査は、陥没後における地層の状況を調べたものであり、事故前の状況とは必ずしも同じではない可能性もあるが、事故前の調査資料が少ないことから、当該調査等の結果も含めて推定したものである。

#### A-① 難透水性風化岩層の強度や厚さ

難透水性風化岩層の強度や厚さについては、過去に当該岩盤層が地上にあった影響等により強風化の弱部が各所に存在し、また、地層の上部に凹凸があるなど、不規則で複雑な地質構造となっており、上部に強度の低い層が存在していたことが事故後に実施した追加の地質調査等により明らかとなった。例えば大断面トンネル部において、当該地層の厚さを約2.79～3.67m 確保できると見込んでいたが、その後の調査の結果、厚さは約1.90～2.28m しか確保できず、強風化が進んだ強度の低い上部の層が支配的になっていた可能性があることが分かった。

局所的に強度や厚さが不足する難透水性風化岩層について、当該工事の設計及び施工にあたっては強度や厚さを均質であると捉え、例えば安定解析に用いた変形係数（力を加えたときの変形しにくさを表す指標。変形係数が高い方が変形しにくい）については、（約14,000kN/m<sup>2</sup> から約700,000kN/m<sup>2</sup> のバラツキがあるところを）最終的には代表値として87,000kN/m<sup>2</sup> の値を用いるなど、バラツキの考慮が不十分なまま設計及び施工が行われ、結果的に地山の強度を実際よりも高く評価した設計となっていた。

#### A-② 地下水圧の影響

未固結帯水砂層の地下水位は地表から約-2.5m の位置にあり、未固結帯水砂層から難透水性風化岩層の境界部に、水頭にして約10m(約1 気圧に相当)以上の高い水圧が作用していた。上述のようにトンネル上部の難透水性風化岩層は不規則で複雑な構造であったが、設計及び施工にあたっては、その遮水性や水圧に対する耐力を十分であるとしていた。しかしながら事故後に追加した地質調査等によると、難透水性風化岩層の内部には、小断層や剥離面、多くの節理や亀裂が存在していたと考えられ、結果的に地下水圧に対する安全性が十分ではなかった。

また、上記のような不規則で複雑な地質や高い地下水圧の条件下で施工する際には、施工時の地山の安定性を含めトンネル構造の安定性を極力損なわないよう慎重な設計、施工を行う必要があったが、施工中における以下の2つの変更（B-①，②）は通常の地質状況では要因となる可能性は低いものの、上記のA-①，②のような厳しい地質条件下においては、その影響度合いを強めることとなり、結果的に事故発生の副次的な要因となった可能性が高いものと推定した。

### B-① トンネル断面形状の変更


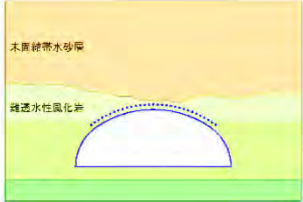
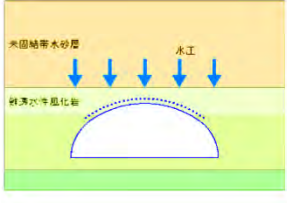
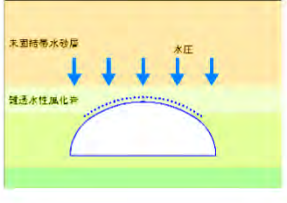
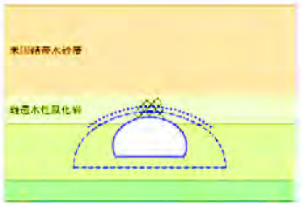
難透水性風化岩のトンネル上部の層厚を確保するためにトンネル天端を約1.2m下げたことで、扁平率(内空高さ÷内空幅)が0.625 から0.532 となった。それに対し、安全性は確保されるものとの解析結果を得ていたが、アーチアクションによる効果(※)が減少することとなり、結果的にトンネル構造の安定性を低下させることとなった。

※ 石のブロックをアーチ状に組むとブロック相互に圧縮力が働き、ブロック同士を接着していなくても梁の構造を保つことができる。アーチ形状が寝てくると圧縮力が弱まり、やがて梁の構造を保てなくなる。トンネルは石のブロックを組んで作るわけではないが、掘削による場合も同様の効果が期待できる。

### B-② すりつけ区間における補助工法の施工方法の変更

当該工事区間は、標準断面トンネル(I型)の13K413M700 (No.115 付近) 地点から大断面トンネルの13K407M700 (No.108) 地点へのすりつけ区間(延長6m)であり、断面を拡幅(高さ約2.5m, 幅約5m)する区間であった。補助工法としては注入式長尺鋼管先受工法(AGF工法)が採用されていたが、すりつけ区間においては、鋼管の打設位置の制約と難透水性風化岩層を突き抜けないように挿入角を小さくする必要から、長尺鋼管の完全二重化が困難となる部分が存在することとなり、さらに支保工を設置するため、鋼管の根本部を切断しなければならなかった。その結果、鋼管の縦断的なラップ長(重なり合う長さ)が短く、或いはラップしていない状態となり、当該補助工法に期待する効果が十分発揮されなかった。また、鋼管からの注入は岩盤の亀裂への注入であり、十分な地山改良効果が発揮されなかった可能性があった。

要因分析のまとめ

項目	要因となる可能性の評価	
	説明図	調査・設計・施工の経緯
1		<p><b>難透水性風化岩(D2層)の強度</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>D2層は風化の程度や潜在的亀裂、弱層が分布するため物性値のバラツキが大きかった(N値が5から50以上)。また、上部層との境界面近くは強風化傾向にあった。</li> <li>FEM解析等の設計では、2本のボーリング調査結果から得られた地山物性値の平均値により均質な地層としてモデル化していた。</li> <li>標準Ⅱ型部の施工時の計測結果から逆解析等により地山物性値を再評価しており、大断面部では危険側の設計となった。</li> </ul>
2		<p><b>難透水性風化岩(D2層)の厚さ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>大断面トンネル部において、D2層の厚さを約2.79～3.67m確保できると見込んでいたが、その後の調査の結果、厚さは約1.90～2.28m*しか確保できず、強風化が進んだ強度の低い上部の層が支配的になっていた可能性があることが分かった。 *注分析に用いられたボーリングデータには、埋め戻し後に陥没箇所でも実施されたものも含まれており、陥没事故による攪乱の影響を受けている可能性も否定できない。なお、福岡市公表の「追加地質調査結果について」(福岡市交通局,H28.3)では、陥没箇所でも実施されたものを除き、2.39～2.45mの結果が示されている</li> <li>D2層の上部境界面は、追加ボーリングの結果、比較的大きな傾斜角を持っていることから不規則な凹凸を有すると推定される</li> </ul>
3		<p><b>高い地下水位による影響</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩層に水圧が作用した。</li> <li>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、設計では地上からの薬液注入工が計画されていた。</li> </ul>
4		<p><b>難透水性風化岩(D2層)の耐力不足の可能性</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>土水一体のFEM解析により、トンネル掘削時の周辺地盤の変位、支保工、補助工法の評価を実施し、安定性を照査した。</li> <li>福岡市地下鉄他工区におけるNATMの施工実績では、主に砂層の地下水位低下工法、遮水や地山補強を目的とした薬液注入工が実施されている。</li> <li>標準Ⅱ型部の導坑、本坑掘削時の計測結果から同定した地山物性値をもとに大断面掘削の予測解析を実施し、注入式長尺鋼管先受け工、サイドパイプ、高強度吹付けにより補強をすることでD2層の安定を確保するとしていた。</li> </ul>
5		<p><b>導坑施工による影響</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>導坑施工時の計測結果は、予測値に近い変位が発生していた。</li> <li>先進導坑掘削時の支保工104基の天端沈下量は8mmで予測FEM解析値と一致しており、先進導坑掘削時までは想定どおりの挙動を示していた。</li> </ul>



項目	要因となる可能性の評価		要因 推定
	考察	評価	
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>通常の条件であれば当初設計時点での調査頻度が少ないとまでは言えないが、今回のような特殊条件下においては、調査頻度が少なかったため、地山強度等の物性値や地層厚さを適正に評価することができなかった可能性がある。</li> <li>当該資料のみでは不規則に分布する潜在的亀裂や弱層を設計目的に合わせて適切に評価することは技術的に困難が伴った（水圧に対する遮水層の安定性を評価する場合亀裂や弱層など局所的に物性が低い箇所の影響が大きいと想定される）</li> <li>難透水性風化岩は、物性値にバラツキがあったにもかかわらず、一つの均質な層として、物性値を代表値によって評価したことが適切でなかった可能性がある。</li> </ul>	◎	A-① 難透水性風化岩層の強度や厚さ
2			
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩層の上面の不陸および内部の小断層や剥離面、多くの節理や亀裂が存在し、これが水みちとなり、局所的に水圧作用面がトンネル掘削面に近かった可能性がある。</li> </ul>	◎	A-② 地下水圧の影響
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>難透水性風化岩層に高い水圧が作用する中での施工となるが、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、設計及び施工にあたっては、その遮水性や水圧に対する耐力が十分あるものとしてトンネルの安定性を確認していた。現場に即した解析手法の検討や、解析の限界を認識した上で安全側の設計となるような工学的判断が不足していたことが要因となった可能性がある。</li> <li>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、本トンネルでは、未固結滞水砂層に対して止水のための薬液注入を実施せずAGFに期待したことが、要因となった可能性がある。</li> </ul>	◎	
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>天端沈下、内空変位、AGF鋼管の変位は解析値に近い値が計測されており、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。</li> </ul>	△	

要因推定の凡例 ◎：主要因(直接的な要因)であると考えられるもの ○：副要因(間接的な要因)による影響が強めたと考えられるもの △：要因の可能性が低いもの

項目	要因となる可能性の推定	
	説明図	調査・設計・施工の経緯
6		<p>トンネル断面形状の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>遮水層の厚さを確保するため、扁平な断面を採用し、FEM解析で支保の妥当性を確認していた。</li> </ul>
7		<p>トンネル支保工の安定性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>吹付けや鋼製支保工の耐力超過はなかった。</li> <li>支保工脚部の支持力不足はなかった。</li> <li>計測Bの結果より、105基の鋼製支保工の最大応力は耐力 <math>245 \text{ N/mm}^2</math> を超えていない。</li> </ul>
8		<p>注入式長尺鋼管先受工の横断方向の地山改良効果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>D2層の地山に対して亀裂注入となっていた。</li> <li>注入材は、いずれの地山にも適用範囲が広いウレタン系が選定されている。</li> <li>注入式長尺鋼管先受工の注入管理方法は、技術資料に記載されている注入圧および注入量で管理されている。ただし、注入圧については、技術資料に記載されている「初期圧+2.5MPa」とすれば、遮水機能を期待するD2層を破ること、未固結帯水砂層へのリーク、および近接構造物への影響が懸念されたため、立坑発進部で「初期圧+1.0MPa」として試験施工を行い、先受効果を確認したのち、それ以降の注入式長尺鋼管先受工についても「初期圧+1.0MPa」を上限として施工している。注入量については、注入式長尺鋼管先受工削孔時に湧水が無い場合は <math>10 \text{ kg/m}</math> (<math>95 \text{ kg/本}</math>)、湧水がある場合は <math>12 \text{ kg/m}</math> として施工を行っている。</li> </ul>
9		<p>注入式長尺鋼管先受工の縦断方向の地山改良効果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>陥没箇所は幅部のラップ形状の影響を受ける区間であり、他の部分と比べてラップ長が短く、さらに根元が切断された。</li> <li>鋼管の打設位置のずれや広がりは認められないが、天端部のAGFをガイドセルの干渉により <math>0.1 \sim 0.2 \text{ m}</math> 下げたことで鋼管を一部切断している。</li> </ul>
10		<p>計測管理や対策工の実施</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>導坑の切り羽押出計測では102基で約 <math>9 \text{ mm}</math> の切り羽前方への変位が計測された。</li> <li>地表面沈下、天端沈下、支保工応力等の経時変化を計測していた。</li> <li>管理基準値を超えた場合の対策として増し吹付けや注入式ロックボルトを計画していた。</li> <li>施工者は支保工応力のひとつの計測点が管理基準値(I)を超えたことを把握したが、発注者への報告はなかった。その後、管理基準値(II)、管理基準値(III)を超えるが、リアルタイムで把握することができなかった。</li> </ul>



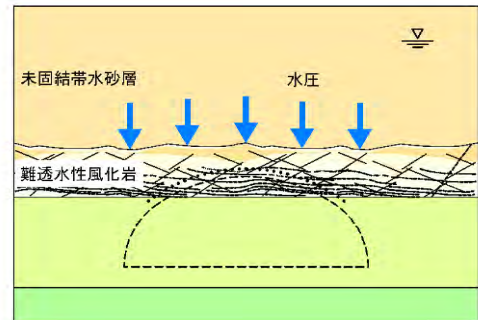
項目	要因となる可能性の推定		要因推定
	考察	評価	
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>高い地下水圧が作用しかつ脆弱な地質条件においては、扁平な断面形状が、厳しい地質条件下で影響度合いを強め、トンネル天端の安定性の低下を助長した可能性がある。</li> </ul>	○	B-① トンネル断面形状の変更
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹付けや鋼製支保工の耐力の超過はなかったため、直接の要因ではないと推定される。</li> <li>計測Bの結果より、天端から異常出水が発生するまで、応力計測結果から支保工は健全であると推定され、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。</li> <li>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。</li> </ul>	△	
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>地山条件、湧水条件に対しては注入圧や量の管理を適切に行っており、直接原因となった可能性は低い。</li> <li>ただし、潜在的亀裂は初期地山状態ではほとんど空隙がないため、十分な地山改良効果が発揮されず、掘削時に緩みが生じた可能性がある。</li> <li>ラップ部においても注入による十分な地山改良効果が発揮されず、さらに鋼管切断により周辺地山の改良部分の一部が欠損し、必要なラップ長が不足、或いはラップしていない状態となり、当該補助工法に期待する効果が十分発揮されなかった可能性がある。</li> </ul>	○	B-② すりつけ区間における補助工法の施工方法の変更
9			
10	<ul style="list-style-type: none"> <li>支保工等の計測状況の把握に遅れが生じていたが、状況変化は急速であり、その時点で陥没事故自体を防げたとは言い難く、要因となった可能性は低い。なお、福岡市からは、「事故を防止する何らかの措置がとれた可能性がある。」との意見があった。</li> <li>支保工応力のひとつの計測点が管理基準値(I)を超えた時点では、その他の計測点や計測項目で異常値を示しておらず、その時点で今回の大規模な陥没事故までを予見することは困難だったと考えられる。その後、管理基準値(II)、管理基準値(III)を超えるが、加速度的に生じる現象の中で陥没に至った状況を踏まえると、陥没事故を防ぐ対策は想定し難い。</li> </ul>	△	

要因推定の凡例 ○: 主要な直接的な要因であると考えられるもの ○: 副要因的・間接的な要因による影響を強めたと考えられるもの △: 要因の可能性が低いもの

## ■ 要因分析を踏まえた道路陥没事故の発生メカニズム

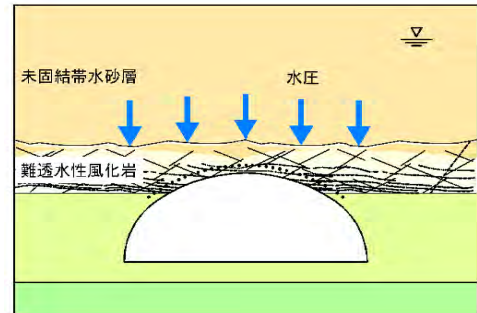
①

- ・ 難透水性風化岩の上部が強風化，低強度となっている。
- ・ 未固結帯水砂層からは水圧が作用している。



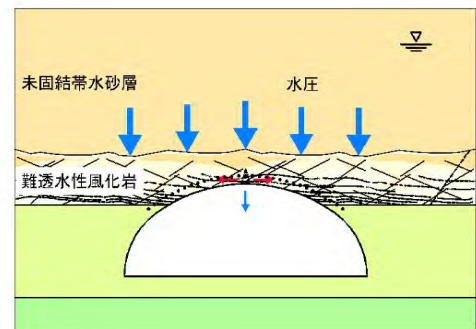
②

- ・ 上部の強風化，低強度部を薄く残し，トンネルが掘削される。



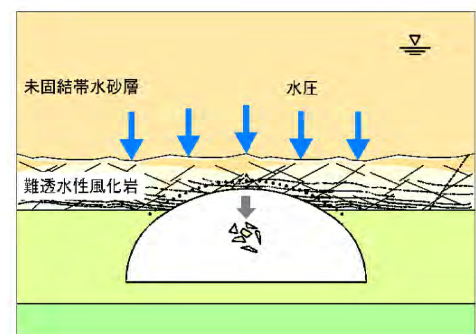
③

- ・ 残った薄い強風化，低強度部に水圧が作用し，難透水性風化岩に緩みや亀裂が進展し始める。または，潜在的弱部に水みちが形成される。



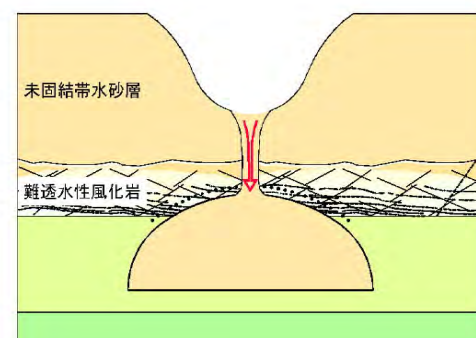
④

- ・ 連続的な剥落，漏水を伴いながら，難透水性風化岩の破壊が進行する。



⑤

- ・ 未固結帯水砂層が地下水とともにトンネルに流入し，道路陥没に至る。





## (2) 事故の要因に対する福岡市交通局としての受止め

検討委員会においてとりまとめられた事故の要因について、福岡市交通局としての考えを次のとおり整理した。

検討委員会において議論された事故の原因として考えられる10項目のうち、トンネルを施工する地盤の強度や厚さが局所的に不足する難透水性風化岩であることに加えて、高い地下水圧が作用する厳しい条件においてトンネル施工の安全性が実際より高く評価されたことが要因であるとされており、これを自然的要因と整理した。また、こうした厳しい条件下における設計変更が結果的にトンネル構造の安定性を低下させる副次的な要因については、人為的要因として整理し、これらの要因が複合的に作用することで陥没に至ったものと受止めている。

### 1. 自然的要因 (地質・地下水位に関する要因)

① 風化岩層の強度	② 風化岩層の厚さ	③ 高い地下水位による影響
<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂や弱層が不規則に存在</li> <li>均質な地層として評価していたが、局所的に物性が低い箇所があった</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不規則な凸凹が存在</li> <li>層厚が想定より薄かった</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高い水圧を受ける面が局所的で、掘削面に近かった可能性がある</li> </ul>

### 2. 人為的要因 (設計・施工に関する要因)

① 高い水圧に対する安定性	② トンネル断面形状	③ 補助工法 (長尺鋼管先受工 : AGF)
<ul style="list-style-type: none"> <li>現場に即した解析や、解析の限界を認識した上でより安全性を確保する検討が不足していた</li> <li>止水のための薬液注入を実施しなかった</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>扁平な断面形状に変更したことで、安定性の低下を助長した可能性がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼管の切断により、十分な地山改良効果が発揮できなかった可能性がある</li> </ul>
		<p>横断方向</p> <p>縦断方向</p>

#### ◆ 自然的要因 (地質・地下水位に関する要因) について

このうち、自然的要因 (地質・地下水位) については、委員会において、事故の要因として可能性が高いとされている。

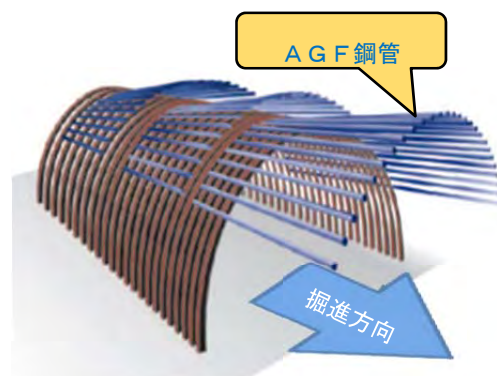
風化岩層の地質及び地下水については、設計段階の交通局による地質調査に加え、施工業者による追加の地質調査を実施するなど、通常よりも多くのデータ収集を実施し、可能な限り性状の把握に努め、風化岩層の強度や厚さの不均一性が認められていたと

ころであり、事故後に実施した追加の地質調査結果からも同様の傾向が確認されている。

今後は、より安全な施工を行っていく観点から、詳細な状況把握に努めていく。

#### ◆人為的要因（設計・施工に関する要因）について

- ① 高い水圧に対する安定性について、当初設計においてもリスクが高いことは認識しており、AGF工法（※1）に加え、薬液注入により対応することとしていたが、施工者による施工計画検討の結果、現地の地下埋設物が支障となり地上からの薬液注入による十分な効果があがらない可能性があることなどから、薬液注入の代替として、AGF工法の施工数を増やす対策等を行う提案があり、それらを採用した経緯がある。



※1 AGF工法：トンネル切羽から鋼管を打設し、地盤条件に適合する改良体を形成させ、鋼管と地盤を一体化させる工法。一般的にAGF（All Ground Fastening）と呼ばれている。

- ② トンネル掘削断面の形状について、施工者が追加で実施したボーリング調査結果から、当初の想定よりも土砂層が厚く、岩被りが薄いことが判明したことから、より安全に施工するために断面形状を変更したものである。
- ③ 補助工法（長尺鋼管先受工：AGF）について、鋼管の根元部分が施工上やむを得ず切断され、周辺地山の改良部分の一部が欠損していたことは、当該工法に期待される十分な地山改良効果が発揮されなかった可能性があるものと考えられる。

これらの要因が発生した背後には、3者（発注者、設計者、受注者）の間での意思疎通や認識に齟齬があったことが遠因となっていると考えており、以下に、反省すべき点として整理する。

- ・ 業者の提案に基づき、設計の変更や補助工法の変更を行う場合には、業者との間でより踏み込んだ深い協議を行い、課題を見極めること
- ・ 工事の監督にあたっては、施工計画書に従った現場作業が行われているかどうか、きめ細かく確認を行うこと
- ・ 重要な計測管理にあたっては、計測の確認頻度や手法等について、業者との間でよりきめ細かく協議し、認識の共有を図ること

## 5. 事故再発防止対策

### (1) 工事再開と今後の設計施工に向けて

原因究明の検討委員会から示された、事故再発防止対策の留意点（四角囲み箇所）に対して、工事再開にあたっては次のとおり対応していく。

: 検討委員会報告書記載内容

: 交通局としての対応事項

#### 1 工事再開に関する主な留意点

本委員会での事故原因の推定を踏まえ、福岡市が地下鉄工事を再開するにあたっては、主に以下の項目について留意し、必要な調査等を行う必要がある。

##### ① 地質、地下水の状況把握

- 難透水性風化岩層の強度や厚さについては、過去の風化の影響等により強風化の弱部が各所に存在し、また、地層の不整合面に凹凸があるなど、不規則で複雑な地質構造となっていたことが事故後の調査で明らかとなった。このため、事故後に実施されたボーリング調査の結果や、過去において周辺部で実施された地質調査の結果等も踏まえるとともに、陥没箇所について埋め戻した流動化処理土、薬液注入された周辺地盤等、事故後の措置も考慮しつつ、再度、地質、地下水の状況を把握する必要がある。

- ・難透水性風化岩の強度や厚さを確認するため、地質調査データ等を収集する(事故後実施、過去実施)。
- ・追加の地質調査を実施し、地質、地下水位等の状況を詳細に把握する。

##### ② トンネル坑内の水抜き及び土砂撤去に関するもの

- 現存するトンネル坑内の水抜きや土砂撤去にあたっては、現在は安定していると推測される力学的な均衡が再び変化し、トンネル部や周辺地盤の崩壊に至る恐れがあるため、地下水位等の計測することで力学的安定性について観測、評価しつつ、周辺へ影響が生じないように慎重に行う必要がある。
- 崩壊部と健全部を分離する位置、地盤改良(固結)や埋め戻しが必要となる場合の区間・範囲の検討(土砂をどこまで存置させるのかの前提も含む)、事前の地盤改良(固結)や埋め戻しなどの方法を検討する必要がある。
- 坑内地下水と上部未固結帯水砂層内地下水との不連続性について把握するため、現在の地下水位が、岩盤部のものか土砂部のものかなど水頭変動の要因の確認が必要である。
- 崩落部地盤およびその周辺地盤の改良により、すでに施工されている支保工を含むトンネル本体に影響を与えないことの検討が必要である。

- ・トンネル部や周辺地盤の力学的安定性を確認するため、各地層の沈下や地下水位等の計測を行い、周辺地盤や支保工の安定性の観測・評価を行う。
- ・崩壊部と健全部を分離する位置や地盤改良範囲の検討を行う。
- ・観測井を設置し、坑内・岩盤部・土砂部それぞれの地下水位を確認することや、排水後に土砂部と岩盤部の水質を確認することで、地下水の不連続性を把握し、土砂層からの水みちが形成されていないことを確認する。
- ・支保工を含むトンネル本体に与える影響が小さい周辺地盤の改良工法の採用と注入圧力等の管理方法を検討する。

### ③ 再掘削工法の選定に関するもの

- 工法選定については、都市NATMの他に、シールド工法等の他の工法や新技術の活用も含め、安全面を重視する必要がある。
- 周辺の地下水位をあらかじめ低下させる可能性も含め検討する必要がある。
- 埋め戻し流動化処理土、薬液注入された周辺地盤、既設支保工等の状況を確認し、現在の地質状況を踏まえ、施工時リスクの評価する必要がある。
- 再掘削を開削工法にて行う場合には、
  - ・ 埋設物の存在を考慮しつつ、土留め支保工が設置できない箇所への対策を含めた土留め支保工の安全性の確認する必要がある。
  - ・ 開削時に、既存トンネルの支保工の撤去等を行う場合には、その安全性について検討する必要がある。また、既設構造物(下水管等)の切り回しや防護等を行う場合には、その可否や埋設物の安定性について検討する必要がある。
  - ・ 周辺建築物へ影響を与える恐れがあることから、土留め支保工の剛性を高める等の事前の対策や地表面の変位計測など、安全面を考慮した対策を講じる必要がある。
- また、再掘削を非開削工法にて行う場合には、
  - ・ 地下水の影響や周辺地山、残置支保工の状況の把握、汚水流入による有毒ガス発生の可能性、再掘削の加背割、支保工、補助工法等について、安全面を考慮した対策を講じる必要がある。
  - ・ 陥没箇所に残置されることになる信号機等の埋設物は、状況に応じて適切に処理する必要がある。

#### <工法選定>

- ・ 工法選定については、都市ナトム工法以外の他の工法や新技術の活用も含め、安全面を重視し、幅広く検討を行う。
- ・ 地下水位低下工法の課題を詳細に抽出し、採用について検討を行う。
- ・ 事故後の対策(埋め戻し流動化処理土、薬液注入)や、最新の地質調査結果、既設支保工の状況等を踏まえ、想定される施工時のリスク評価を行う。

#### 【開削工法の検討】

- ・ 開削工法による検討においては、土留め支保工や土留め欠損防護について、安全な施工方法の検討を実施する。
- ・ 既設地下埋設物の防護対策の検討を行う。
- ・ 計測及び観測体制の充実を図る。

#### 【非開削工法の検討】

- ・ 非開削工法による検討においては、調査ボーリングによる地盤強度の確認や安全性確保を最優先とした掘削方法の検討を実施する。
- ・ 計測及び観測体制の充実を図る。(トンネル坑内の有毒ガス発生時の対応を含む)
- ・ 残置埋設物について、状況に応じて適切に対応するため道路管理者等と協議を行う。



## 2 類似する条件下での都市NATM及び地下空間での工事における留意点

今回の事故は、トンネルを施工する地盤の強度や厚さが局所的に不足する難透水性風化岩であることに加えて、高い地下水圧が作用する厳しい条件においてトンネル施工の安全性が実際より高く評価されたことが要因であると推定した。また、こうした厳しい条件下における設計変更が結果的にトンネル構造の安定性を低下させる副次的な要因となったものと推定した。これらのことから、都市NATMの工法選定そのものが誤っていたということではなく、また、直接的に都市NATMそのものの信頼性が損なわれるものではない。さらに、これまでの技術的な基準等の見直しに直接的に繋がる事項はない。

しかしながら、今回の事故の教訓を活かし、二度とこのような事故を発生させないよう、類似した条件下において都市NATMによるトンネルを計画・施工する場合など地下空間での工事について、留意すべき点は以下の通りである。

### 2.1 計画・調査、設計について

#### ① 計画・調査

- ボーリング等の地質に関するデータは地下空間の限定的な情報であり、たとえ多くの調査を実施しても地下空間を詳らかに把握することには限界があることから、施工の安全性を事前に完璧に確保することには自ずと限界がある。しかしながら、今回の事故の規模や影響を鑑みると、地下空間の安全な利活用を図るためには、地下空間に関する情報を出来るだけ収集するとともに、その時々最新の技術を用いて、リスクを可能な限り低減させた、より安全性を確保した設計・施工に努めるべきである。そのため、地下空間に関する調査については地質の成り立ちや不均質性等を踏まえ段階的かつ効果的・効率的に行うとともに、その目的に照らして必要かつ十分なものでなければならない。加えて、過去において周辺部で実施された地質調査等を官民間問わず情報収集し、利活用できるようにする必要がある。
- 土被りが確保されていても未固結層とその下部にある岩盤との境界では、風化により地山強度にばらつきがみられたり、岩盤の侵食等による起伏により不均一な層厚となっている場合があるため、地質調査を十分に行う必要がある。
- 都市NATMは、断面自由度や経済性などの利点があるが、地山条件や周辺環境状況によっては、リスクが高くなることを十分鑑み、リスク対策に必要な調査、想定されるリスクに対する適切な対応等についても検討する必要がある。

#### ② 設計

##### (解析に用いる地山のモデル化)

- 地下工事の安全性を確保するためには、地質の持つ不均質性を適切に捉え、危険側とならないような物性値の採用や地層厚の検討や、物性値を変化させた複数の計算を行って結果を評価すること(パラメトリックスタディ)の採用を検討するなどの取り組みを設計及び施工に反映させるとともに、今回のような不規則で複雑な地質構造や高い地下水位などの安全性に対するリスクを可能な限り把握し低減するよう努める必要がある。また、数値解析によって得られる結果は必ずしも万能ではないとの認識に立ち、十分な知見・経験等も加えて総合的な工学的判断を行うことが重要である。

### **(トンネル断面形状)**

- 採用するトンネル断面形状が扁平となる場合には、周辺地山や支保工の安定性について入念に検討する必要がある。特にトンネル天端の地盤に遮水性を期待する設計を行う場合は、扁平断面の天端部近傍の地山はアーチアクションの効果が減少することから、地山の安定性に加え遮水機能が十分に確保できるよう検討する必要がある。

### **(施工法の検討)**

- 地下水位が高い場合には、水圧による影響をあらかじめ最小化できるよう、工法の選定、水位の低下や地盤改良等の必要な措置について十分に検討する必要がある。
- 地下水位低下が困難な場合、水圧や土圧に耐える遮水層の厚さや遮水のための薬液注入等補助工法の施工範囲を検討し、遮水層の安定性を確保する必要がある。

### **(注入式長尺鋼管先受工の設計)**

- 注入式長尺鋼管先受工法は、トンネル周辺地山の掘削時の緩みを抑制する工法であり、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を踏まえる必要がある。
- 注入式長尺鋼管先受工法のラップ長の設定においては、切羽・天端の安定性を十分に確保できるように設定し、その際、周辺地山への注入材の注入状態(浸透注入、亀裂注入)、改良効果、設計上必要な最小ラップ長の要求性能を試験施工にて確認する必要がある。

## 2.2 施工について

### ① 設計照査と追加調査、施工法変更の提案

- 近接構造物等の施工上の制約、地上への影響などについて照査を行い、必要に応じて設計の変更・施工に必要な調査等を行う必要がある。
- 設計変更が必要な場合は、設計の考え方を十分把握し、現場条件を踏まえて有効な変更案を作成する必要がある。
- 都市NATMの施工段階において、地山および地下水の状況を把握して照査を行い安全性の確認する必要がある。
- 掘削断面の分割については、周辺環境、近接構造物への影響に配慮し、適切な補助工法との組合せ及び断面の早期閉合や施工機械の組合せについて検討する必要がある。

### ② 補助工法の施工と管理

- 設計上の補助工法に期待している要求性能について、対象地盤に対して十分に満足していることを試験施工で確認する必要がある。また、試験施工により要求性能を満足するための適切な管理目標値を設定し、施工管理において適切に管理する必要がある。
- 注入式長尺鋼管先受工法は、トンネル施工時における切羽・天端の安定性を確保するための補助工法であり、遮水性については別途対策を検討する必要がある。

### ③ モニタリング

- 変状の発生を敏感に捉え、非常時を想定した詳細なモニタリング計画を作成するなど、体制を充実させる必要がある。

- ・追加の地質調査や地下水位調査を実施し、設計変更や施工に活用する。
- ・設計の変更や補助工法の変更を行う場合には、業者との間でより踏み込んだ深い協議を行い、課題を見極めたうえで、変更案を作成する。
- ・施工段階においては、地質、地下水位等状況を詳細に把握し、安全性の確認を行う。
- ・掘削断面の分割方法について、最新の地質情報及び各計測状況を踏まえ、必要に応じて見直しを行う。
- ・補助工法の特性を十分に理解し、試験施工による改良効果などの確認方法を検討する。
- ・計測及び観測体制の強化として、層別沈下計の設置など変状の発生を敏感に捉える計測方法や管理基準値超過時のアラーム機能の採用について検討する。

### 3 設計・施工等以外の配慮すべき事項について

トンネル工事の設計・施工にあたっては、以下の事項にも配慮する必要がある。

#### ① 設計・施工における意思疎通

- 調査、設計、施工にあたっては、関係者は、最終的にどのように使用されるかも含めてその目的を十分に踏まえるとともに、必要に応じて追加調査や設計変更を行い、リスクの低減に努める必要がある。
- 調査、設計、施工の各段階で得られた情報や知見については記録に残し、関係者間で十分共有するとともに、調査から設計、設計から施工と言った次の段階に適切に引き継ぐ必要がある。設計思想を発注者や施工者へ確実に伝達するため、3者(発注者、設計者、施工者)協議の実施が重要である。
- 特に、トンネル工事においては、地下空間の情報が限定的であることから不確定要素が多いため、発注者、設計者、施工者等の関係者が協力し、互いに知恵を出し合いながら困難を乗り越えていくべきであり、調査、設計、施工の各段階で得られた情報や知見については関係者間で十分共有するとともに、適切に調査から設計、設計から施工といった次の段階に引き継ぐことが重要である。
- 難易度が高くリスクを多く包含する工事においては総合的な判断も求められることから、日頃の関係する技術者の技術力向上はもとより、工事中においても然るべき場を設け、関係者間における現場状況の共有と真摯な技術的議論、その結果のフィードバックにより、高度な技術的知見を設計・施工に反映させるとともに、地質・地盤条件が複雑な我が国においては、関連する知見等を全国的に収集・活用できるしくみが必要である。


・調査、設計、施工の各段階で得られた情報や知見を記録に残し、各種会議\*の活用により関係者間で十分に共有することで、設計、施工方法の検討に関する議論の充実化を図り、リスクの低減に努める。 (※三者協議会、週間工程会議、現場立会、変更協議等)

・当該現場で得られた専門的な知見を広く世の中に共有できるよう、学会発表など情報発信に努める。



## ② 技術的検討の場の活用

- 技術的検討の場については、設計・施工に関する課題の抽出等、初期の段階からその活用を検討する必要がある。
- 技術的検討の場の活用には、専門家からの具体的な指摘に対し、詳細に対応を検討し、その対応状況を説明を行うことで双方向のやりとりとすることで、技術的な示唆を設計・施工に活用していくことが重要である。
- 発注者、調査者、設計者、施工者の各者が技術レベルの向上に努めることが重要である。

- 
- ・技術専門委員会等での議論を踏まえた報告及びPDCAサイクルの確立。
  - ・資格取得励行, 積極的な各種講習会, 研修会への参加, 建設現場での研修, 技術継承。

## ③ 地下構造物の建設に対する信頼性向上

- 今回のような事故は、地下構造物の建設に対する信頼を失うことに繋がりがねないものであり、本検討委員会で提言された留意点を踏まえつつ、同様の事故の発生を未然に防ぐことが重要である。