

## 道路陥没発生メカニズムの推定

1. 大断面トンネルNo.103基掘削時における計測管理について .....	p.2
2. 道路陥没直前のトンネル挙動分析 .....	p.3
3. 道路陥没発生メカニズムと要因推定フロー .....	p.9
4. 道路陥没発生箇所周辺のD2層の状況 .....	p.10

大成・佐藤・森本・三軌・西光建設工事共同企業体

平成29年1月21日(土)

# 1. 大断面トンネルNo.103基掘削時における計測管理について

## 1) 大断面トンネルで実施した計測項目

■計測A（日常の施工管理のための計測）  
 地山および支保部材が異常な挙動をしていないか、安定しつつあるか等の判断を行うための情報を得ることを目的として、原則的にトンネル延長方向に一定の間隔で実施する。【トンネル標準示方書より】

表-1 大断面トンネルにおける計測A（特記仕様書による）

測定項目	試験・測定目的	測定・試験位置	計測・試験頻度
坑内観察調査	施工の安全管理 設計・施工の検討	切羽毎	切羽毎
内空変位測定	地山の安定性 施工の検討	先進導坑114,104,95基 水平1測線・斜め2測線 すりつけ区間113基 水平2測線・斜め2測線	0-2D 1回/日 2-5D 1回/2日
天端沈下測定	地山の安定性 施工管理	先進導坑114,104,95基 すりつけ区間113基	
地表面沈下測定	周辺地盤の挙動	縦断方向：1.0m間隔 横断方向：3断面	切羽前方2D～後方5D 1回/1日（⇒1回/10分）
地表面沈下測定【計測C】	設計の安全性・妥当性の検討		切羽前方2D～後方5D 1回/10分

■計測B（地山条件や周辺環境に応じ、追加して実施する計測）  
 計測Aによって得られるトンネルの挙動と地山内部や各支保部材の挙動との関係を把握し、現状の支保パターンの妥当性を判断すること等を目的として、代表的な断面を選んで実施する。【トンネル標準示方書より】

表-2 大断面トンネルにおける計測B（特記仕様書による）

測定項目	試験・測定目的	測定・試験位置	計測・試験頻度
鋼アーク支保工応力測定	設計の安全性・妥当性の検討	本坑支保工105基 上半5測点	自動計測 1回/1時間
吹付けコンクリート応力測定		本坑支保工105～106基間 上半5測点	
長尺先受鋼管応力測定		本坑支保工104基 ～切羽前方 6測点	

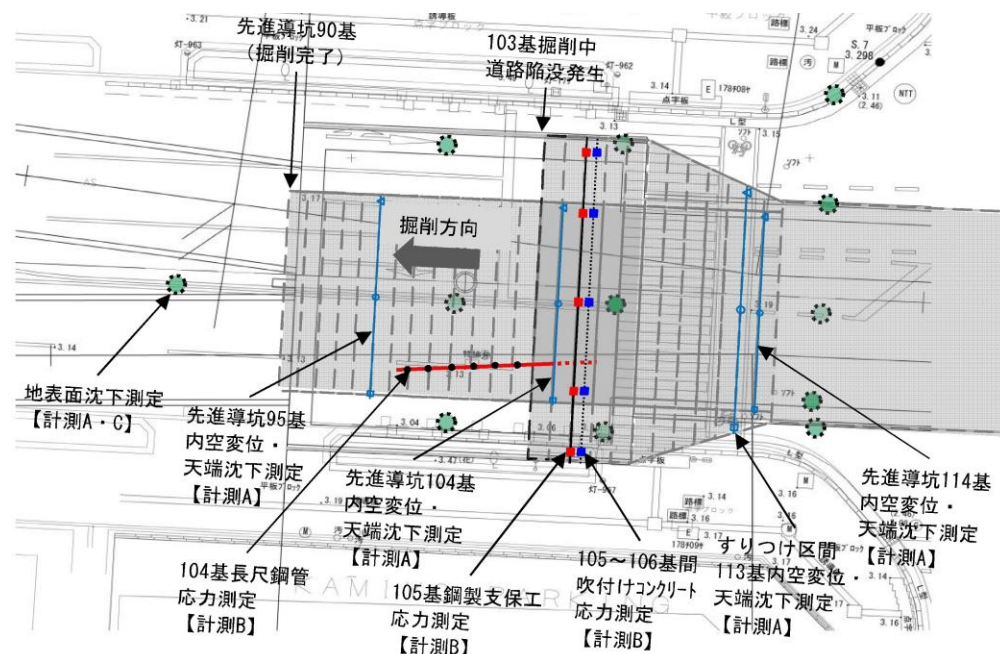
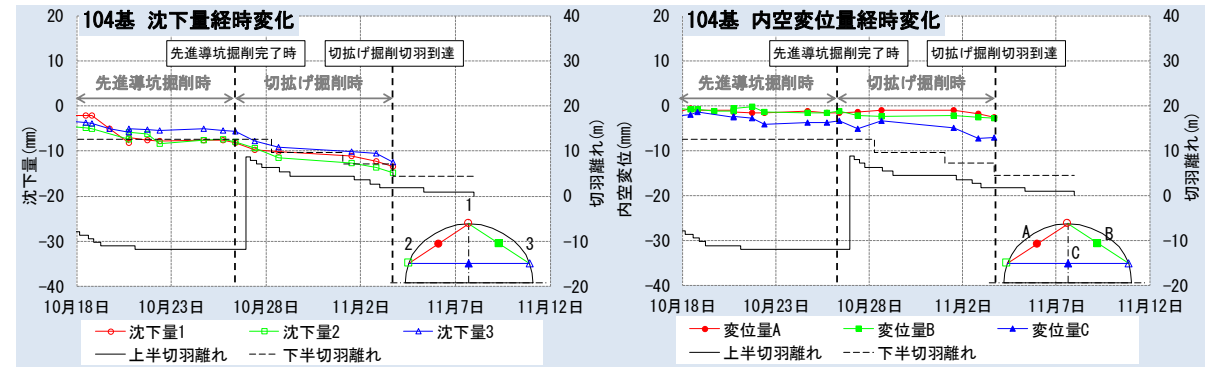


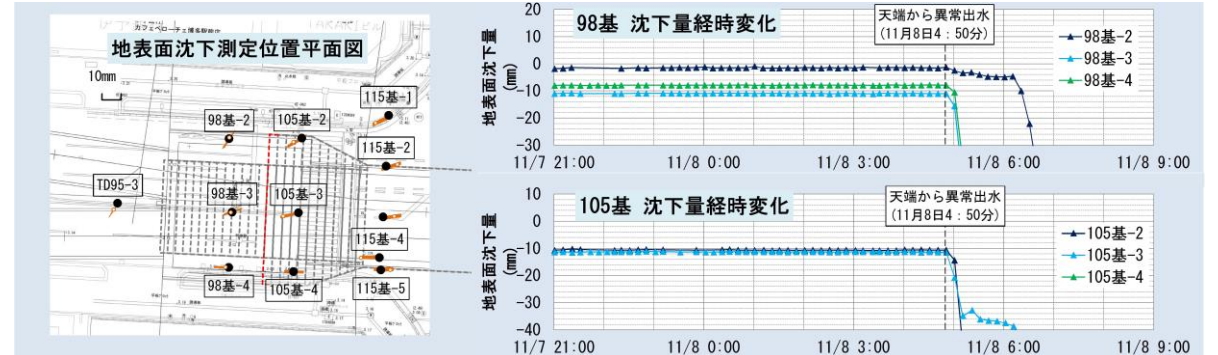
図-1 大断面トンネルにおける計測工配置

## 2) 計測結果

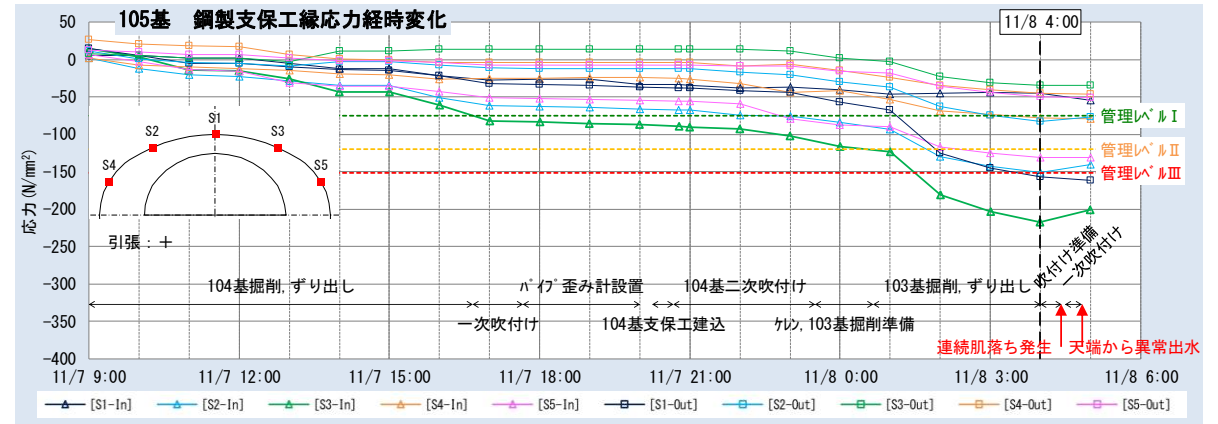
### ■先進導坑104基 沈下・内空変位経時変化【計測A】



### ■地表面沈下 経時変化【計測A・計測C】



### ■本坑支保工105基 鋼製支保工応力経時変化【計測B】



注) 図中の管理レベルは施工計画書で提出した値と異なる

表-3 管理基準値(施工計画書の一部を抜粋)

計測項目	管理基準値(1次)	管理基準値(2次)	管理基準値(3次)	備考
鋼製支保工応力	105N/mm <sup>2</sup>	157N/mm <sup>2</sup>	210N/mm <sup>2</sup>	SS400

大断面トンネルの先進導坑で実施した内空変位・天端沈下測定においては異常な挙動はみられなかった。また地表面沈下測定においても、道路陥没発生直前まで沈下量の増加はみられない。11月8日4:00時点で切羽監視により天端からの肌落ちを確認したため、仕上げ掘削を中止して吹付けコンクリートの準備を開始した。一方、105基で実施した鋼製支保工応力測定および吹付けコンクリート応力測定においては、11月8日1:00～2:00の間に顕著な応力増加がみられることから、この計測結果について詳細な分析を行い、道路陥没発生のメカニズムを推定する。

※委員会資料に一部誤記があったため、事実に基づき訂正した箇所を含む。

## 2. 道路陥没直前のトンネル挙動分析

### 大断面トンネル計測結果の整理

#### 【計測A】

- 先進導坑支保工114基, 104基, 95基断面のトンネル天端沈下・内空変位
- 地表面沈下(計測C)
- 地下水位

#### 【計測B】

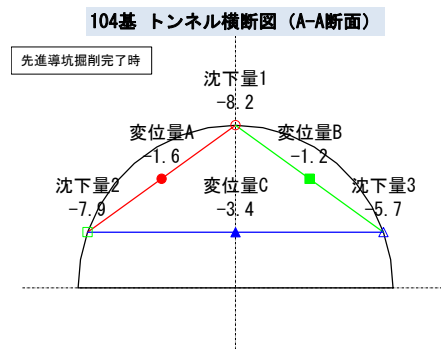
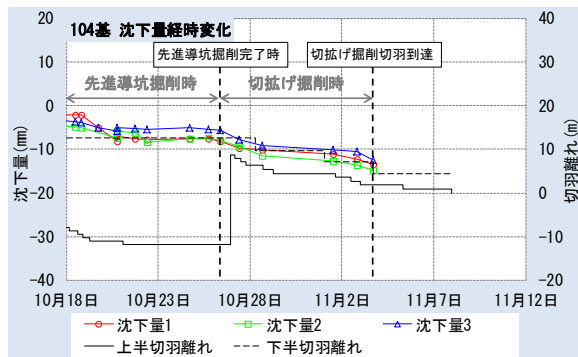
- 本坑支保工105基の鋼製支保工応力
- 本坑支保工105基の吹付けコンクリート応力
- 本坑支保工104基の長尺鋼管応力



### 計測結果の特徴・分析(評価)

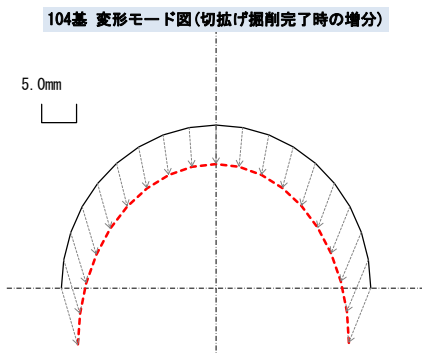
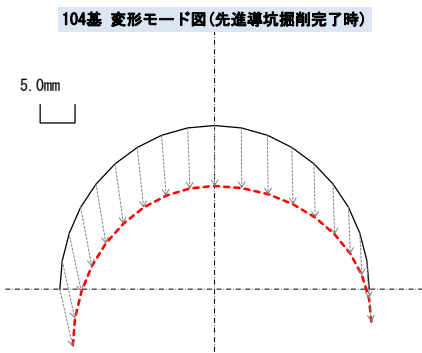
#### 【計測A】トンネル天端沈下・内空変位

- 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解析値と一致している。



⇒先進導坑掘削時までは**想定通りの挙動**を示している。

- 先進導坑掘削時は沈下卓越モードであるが、切詰め掘削時には沈下に対する内空変位の割合が上昇している。



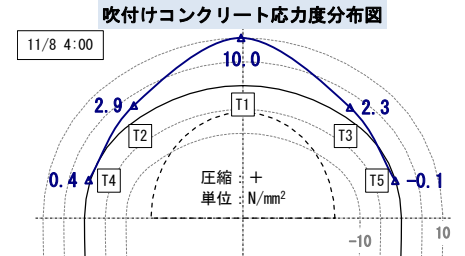
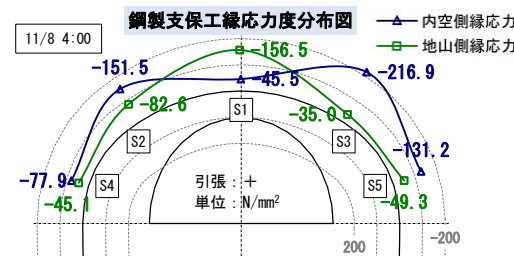
⇒切詰め掘削による横方向からの解放力による影響と考えられる。

#### 【計測A】地表面沈下・地下水位

- 道路陥没発生直前まで 地表面沈下・地下水位 に変化はみられない。  
(~11/8 AM4:50) (~11/8 AM5:00)

#### 【計測B】鋼製支保工応力・吹付けコンクリート応力・長尺鋼管応力

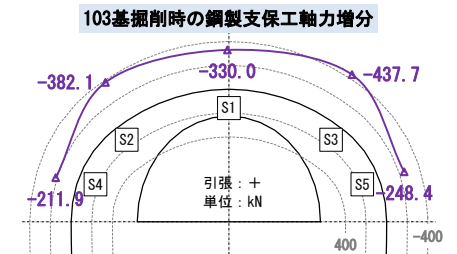
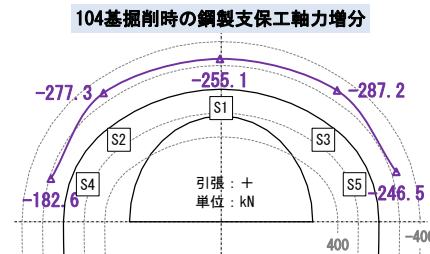
- 104基完了まで**本坑支保工105基の鋼製支保工・吹付けコンクリート応力**は管理レベルⅡ未満
- 本坑支保工103基切詰め掘削時の**本坑支保工105基の鋼製支保工応力**  
**216.9N/mm<sup>2</sup> > FEM解析予測値210N/mm<sup>2</sup> (上半切詰め完了ステップ)**
- 本坑支保工103基切詰め掘削時の**本坑支保工105基の吹付けコンクリート応力**  
**10.0N/mm<sup>2</sup> > FEM解析予測値4.6N/mm<sup>2</sup> (上半切詰め完了ステップ)**



⇒本坑支保工103基切詰め掘削時には**想定以上の荷重**が作用している

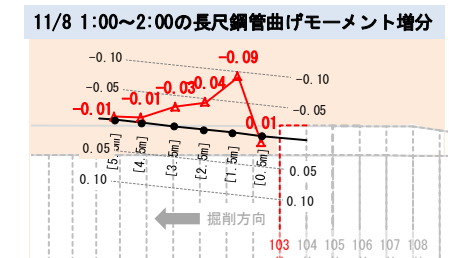
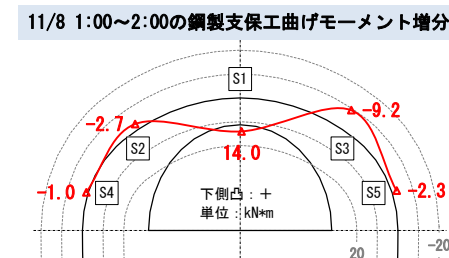
#### • 本坑支保工105基の鋼製支保工軸力:

本坑支保工104基切詰め掘削時の増分 < **本坑支保工103基切詰め掘削時の増分**



⇒切羽が進んでも2基後方の支保工に発生する**断面力増分が増加している**

- 本坑支保工103基切詰め掘削開始直後(11月8日1:00~2:00)に**本坑支保工105基の鋼製支保工天端に下側凸となる曲げモーメント**が顕著に発生している。また、これと同一のタイミングで、切羽前方1.5m位置の**長尺鋼管に上側凸となる曲げモーメント**が顕著に発生している。

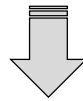


⇒本坑支保工103基切詰め掘削開始直後に、切羽近傍の地山と支保工に**鉛直下向き荷重**が作用した

→本坑支保工104基掘削完了までは想定範囲内の挙動であったが、**本坑支保工103基掘削時に急激な変化が生じた。**



## 2. 道路陥没直前のトンネル挙動分析

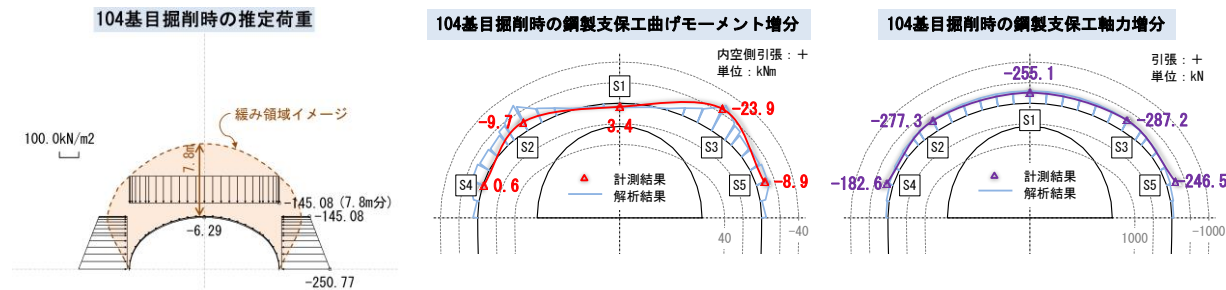


### フレーム解析による挙動の再現・検証

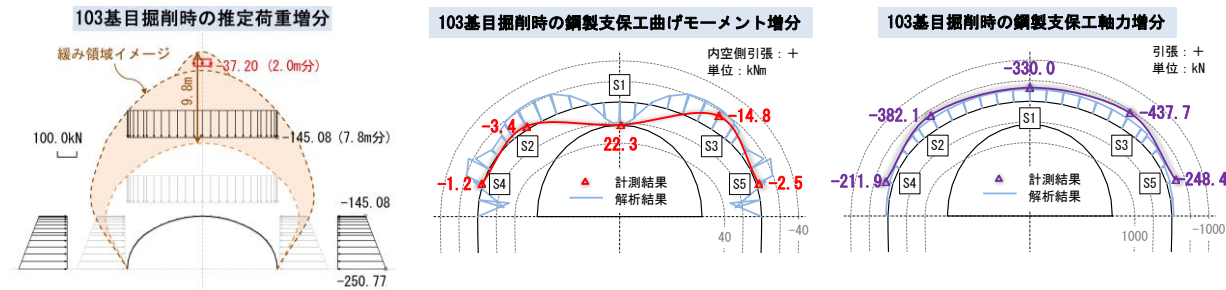
本坑支保工105基に発生する断面力をフレーム解析により再現し、道路陥没発生直前のトンネルに作用している荷重状態を推定した結果、

- 本坑支保工104基掘削時：高さ7.8m分の土圧が作用している。(支保設置後1基目)
- 本坑支保工103基掘削時：高さ7.8m分の土圧が増分として作用しさらに天端付近には局所的に高さ2m分の土圧が作用している。(支保設置後2基目)

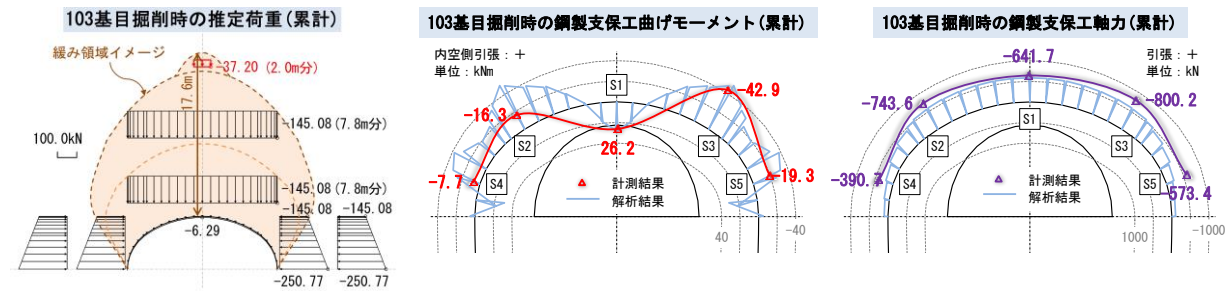
#### 【本坑支保工104基掘削時】



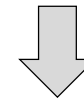
#### 【本坑支保工103基掘削時(増分)】



#### 【本坑支保工103基掘削時(累計)】



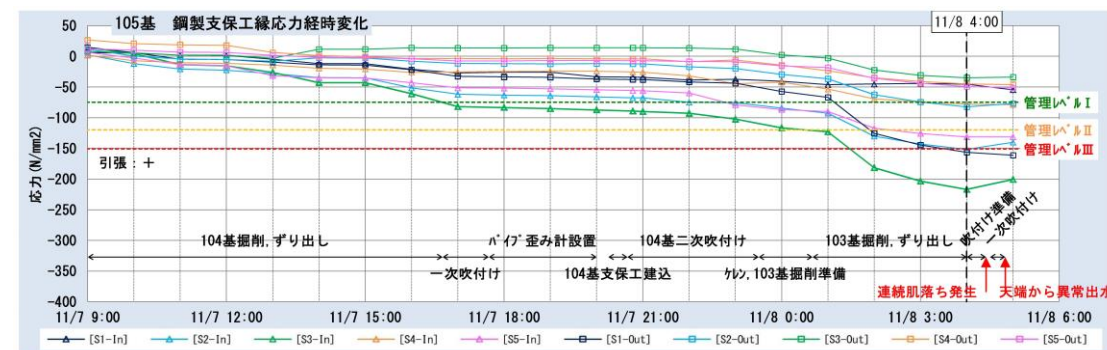
→本坑支保工105基に作用する荷重は、通常のNATMにおける掘削時挙動と異なり切羽が離れても作用荷重増分が減少せず、本坑支保工103基掘削時には全土被り厚(18.8m)相当の鉛直土圧(17.6m分)が作用している



### 再現解析に基づく支保工健全性の評価

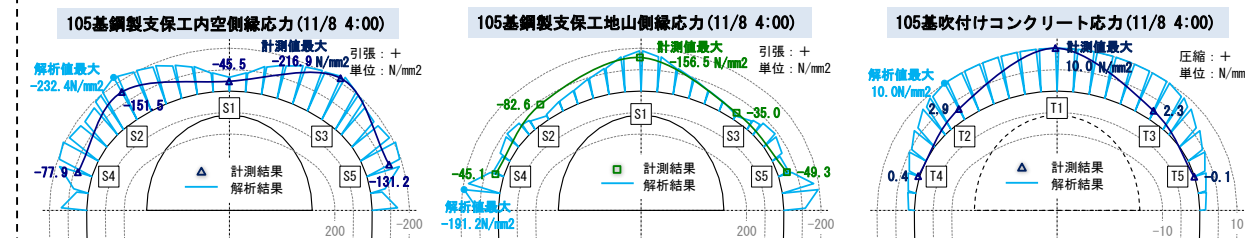
【計測Bの結果】

- 本坑支保工105基の鋼製支保工最大圧縮応力  $216.9\text{N/mm}^2 < \text{降伏強度}245\text{N/mm}^2$
- 本坑支保工105基の吹付けコンクリート最大圧縮応力  $10.0\text{N/mm}^2 \ll \text{推定発現強度}20\text{N/mm}^2$
- 鋼製支保工応力・吹付けコンクリートとも、最大圧縮応力が11月8日4:00にピークをむかえた後、11月8日5:00には崩落に伴う荷重の減少により応力が減少している。

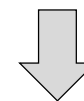


【フレーム解析の結果】

- フレーム解析における断面力から計測点以外の範囲の鋼製支保工・吹付けコンクリート応力を算出した結果、鋼製支保工の降伏強度以下、吹付けコンクリートの発現強度以下となることが確認できた。



→道路陥没発生時において支保部材は破壊していないと推定される



【推定】

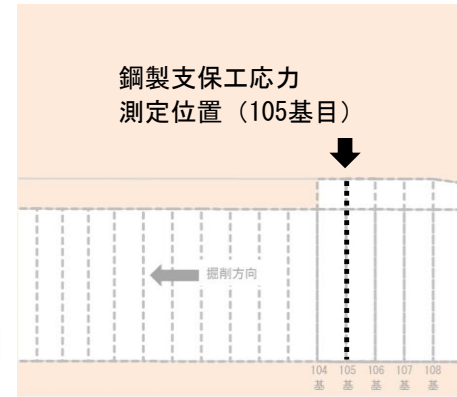
本坑支保工103基の切羽掘削時に、想定していなかった全土被り相当の荷重がトンネル(支保部材および周辺地山)に作用したが、陥没開始までは支保部材の健全性が保たれていたため、支保の破壊が引き金となって陥没が始まったとは考えにくい。また、想定以上の荷重が作用した原因としては、天端部に局所的な弱部(強度不足、層厚の違い)があり、トンネル周辺のグラウンドアーチを形成できなかった可能性が高く、緩み領域が上部土砂層まで達した。

## 2. 道路陥没直前のトンネル挙動分析

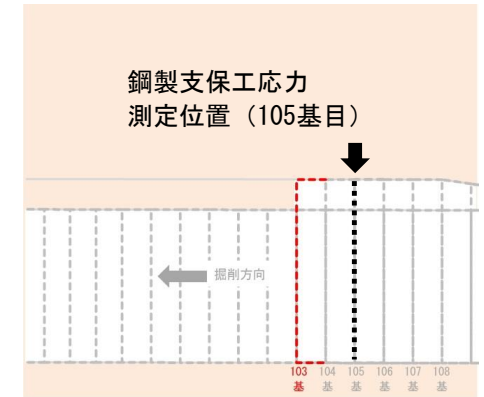
### 支保工断面力

#### 104基（1基目）と103基（2基目）の断面力比較 【鋼製支保工（105基目）曲げモーメント】

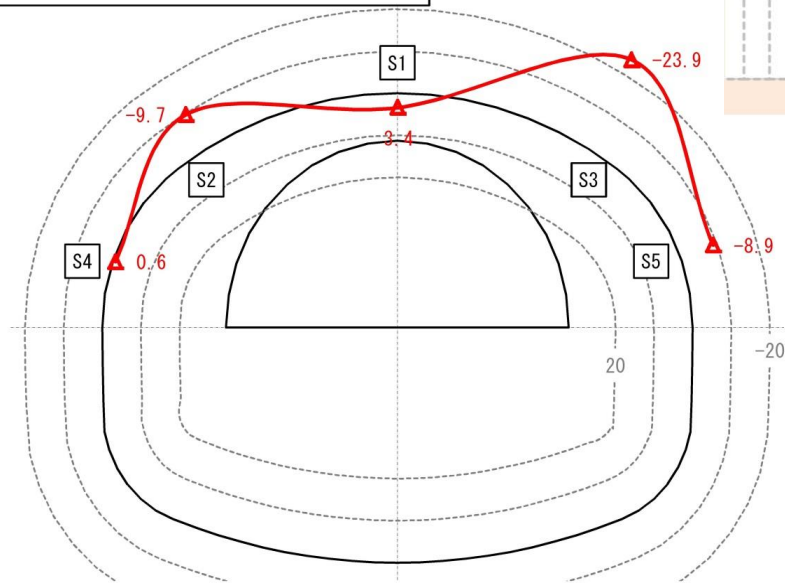
内空側引張：+  
単位：kNm



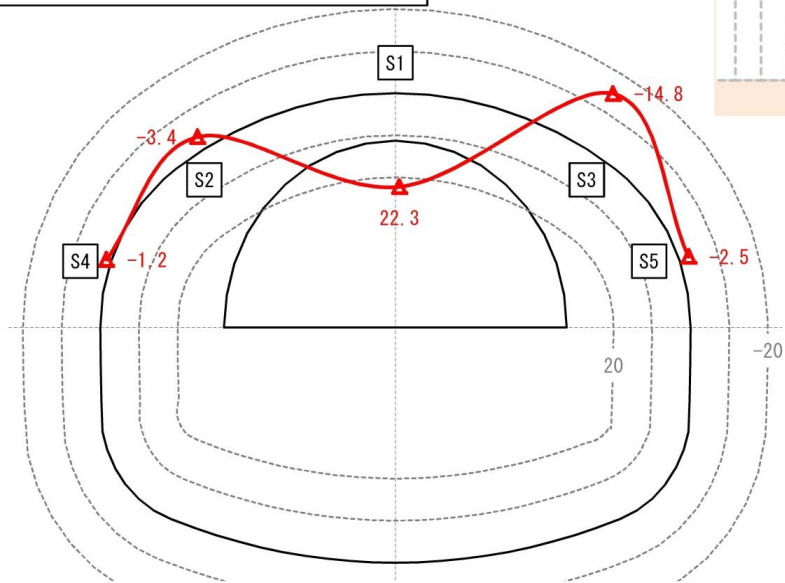
支保工103基目掘削時に天端の曲げモーメント増分が卓越している（104基目掘削時の6.6倍）  
⇒天端付近に局所的に鉛直下向きの荷重が作用したと考えられる



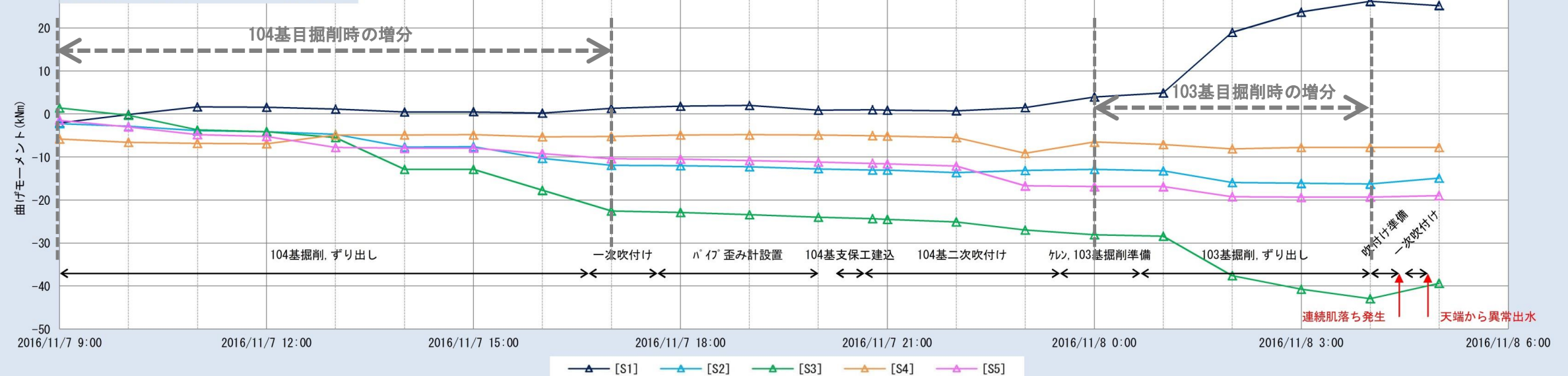
104基目掘削時の曲げモーメント増分



103基目掘削時の曲げモーメント増分



鋼製支保工曲げモーメント経時変化



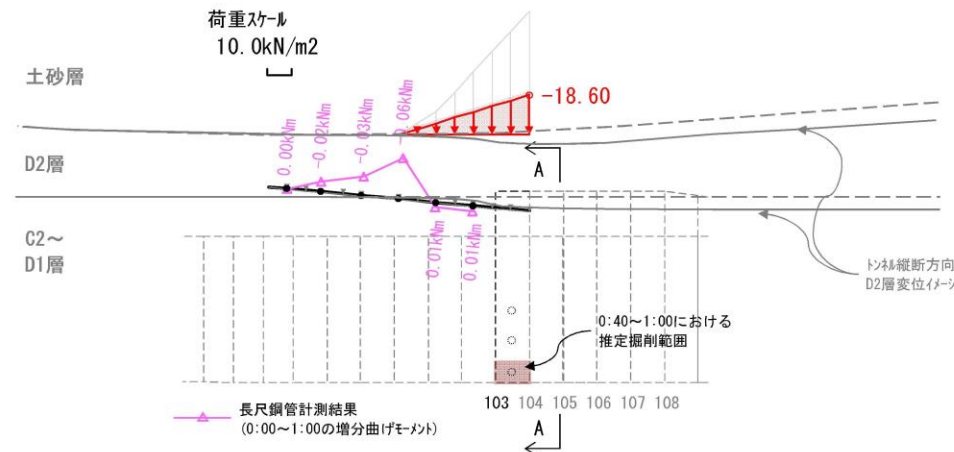


## 2. 道路陥没直前のトンネル挙動分析

### 長尺鋼管 (104基) 応力測定結果より推定したトンネル縦断方向の地山内における荷重分布

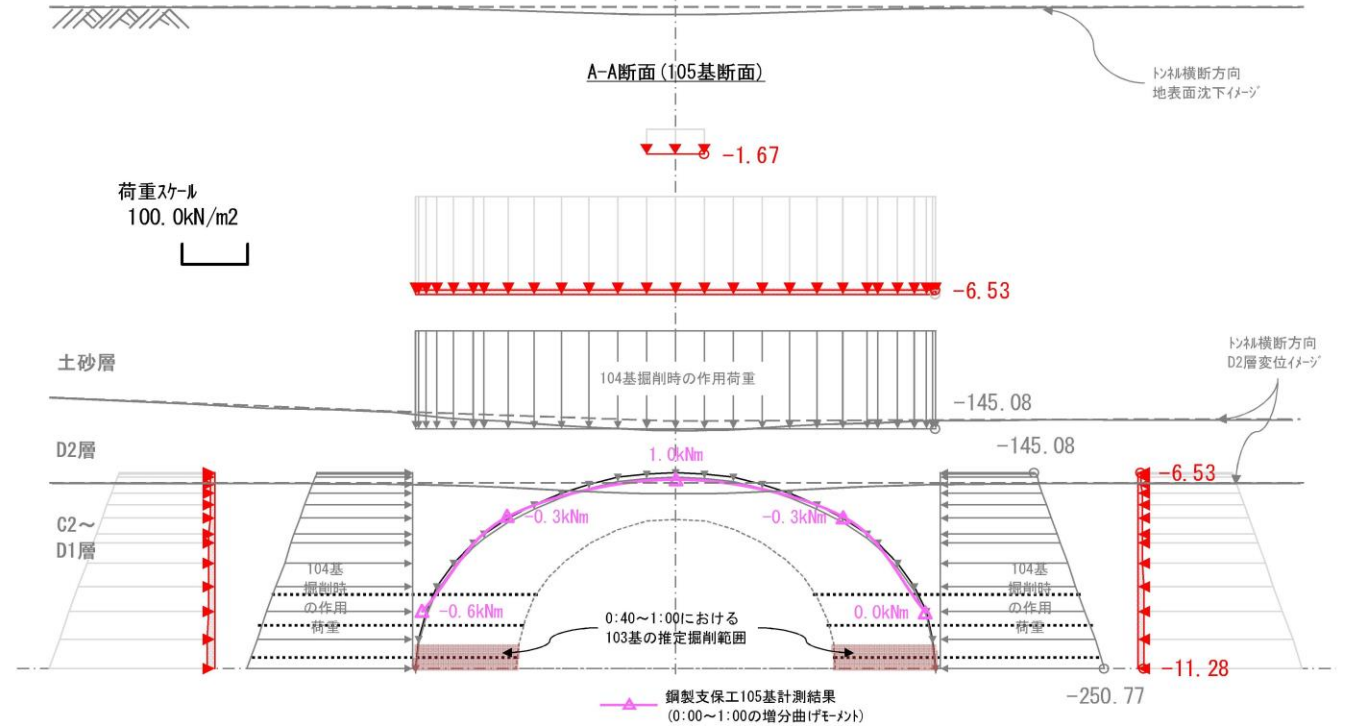
・縦断方向の各時間の推定増分荷重は、1時間毎の長尺鋼管計測結果の曲げモーメント分布を再現できる荷重をフルム計算で求めることにより算出

各時間の掘削範囲は、103基掘削に要した時間(0:40~4:00)における単位時間当りの掘削体積一定と仮定して算出

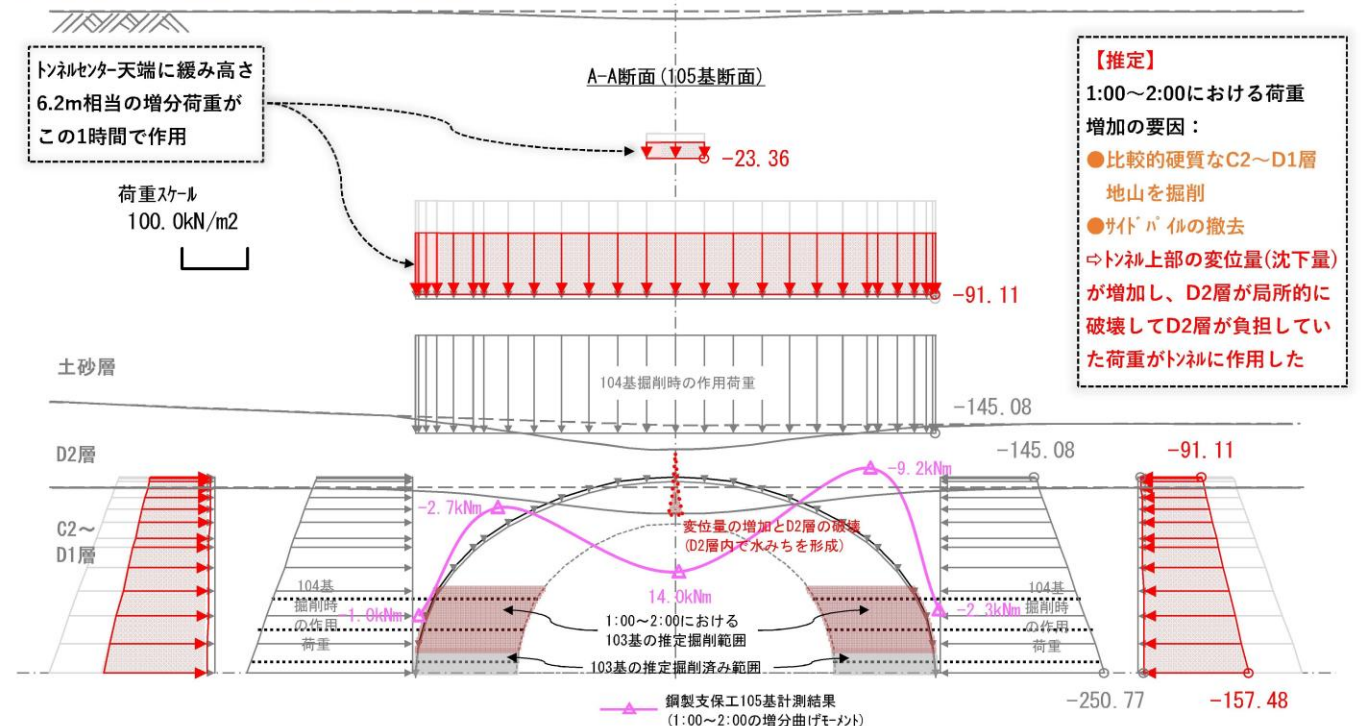
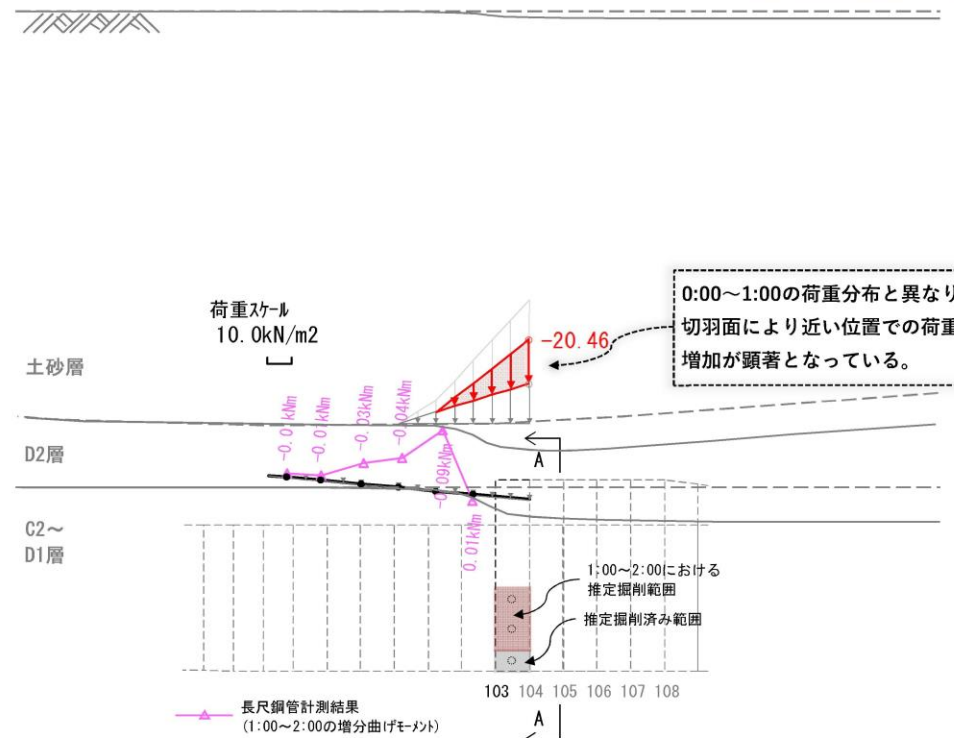


### 鋼製支保工・吹付けコンクリート (105基) 応力測定結果より推定したトンネル横断方向の掘削壁面における荷重分布

・横断方向の各時間の推定増分荷重は、0:00~4:00の105基支保工計測結果の曲げモーメント・軸力分布を再現できる荷重をフルム計算で求め、これを1時間毎の鋼製支保工天端の曲げモーメントの値で按分して算出



### 本坑支保工103基掘削時【2016/11/8 1:00~2:00】の推定増分荷重



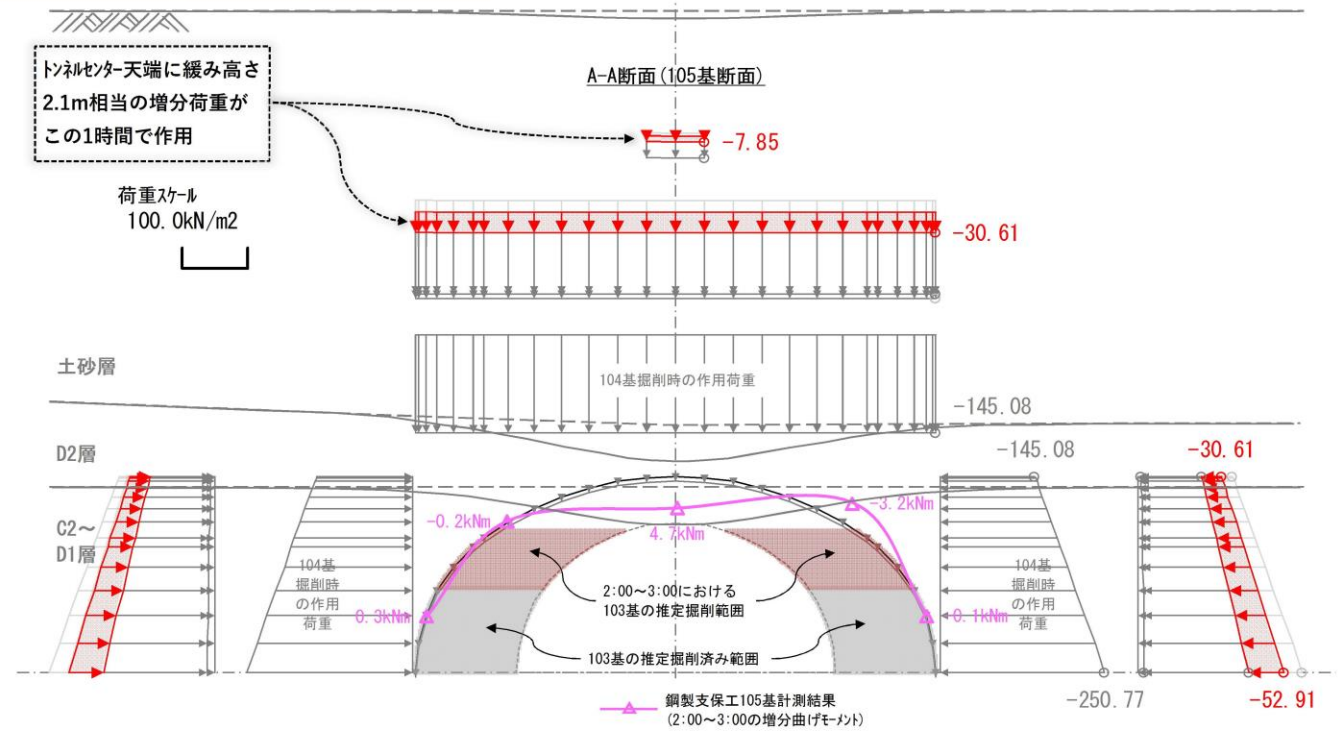
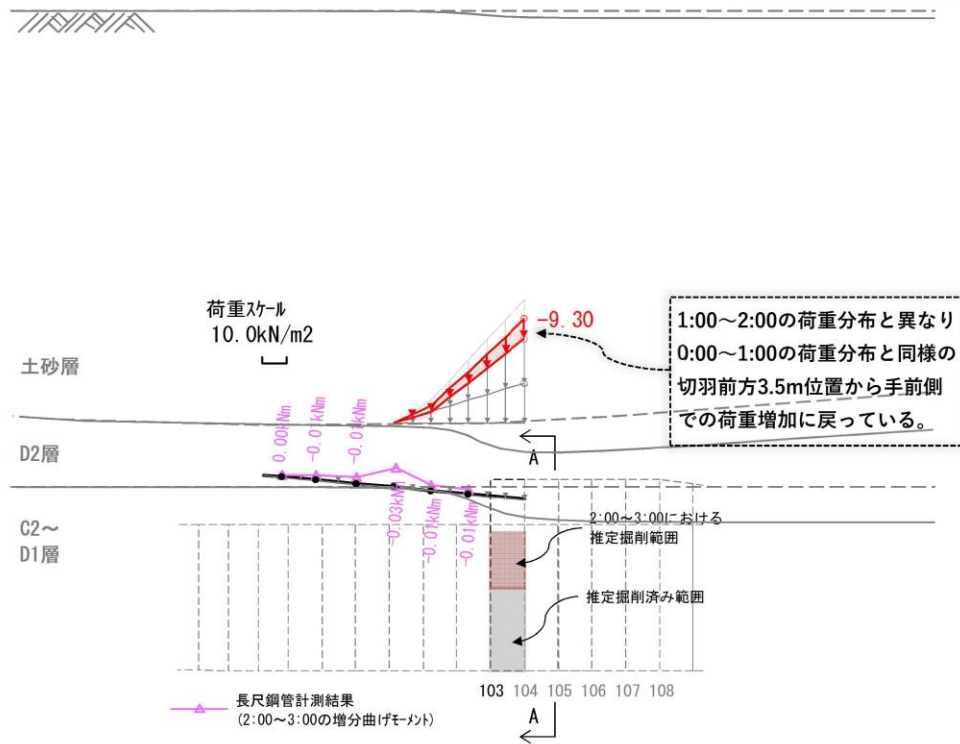


## 2. 道路陥没直前のトンネル挙動分析

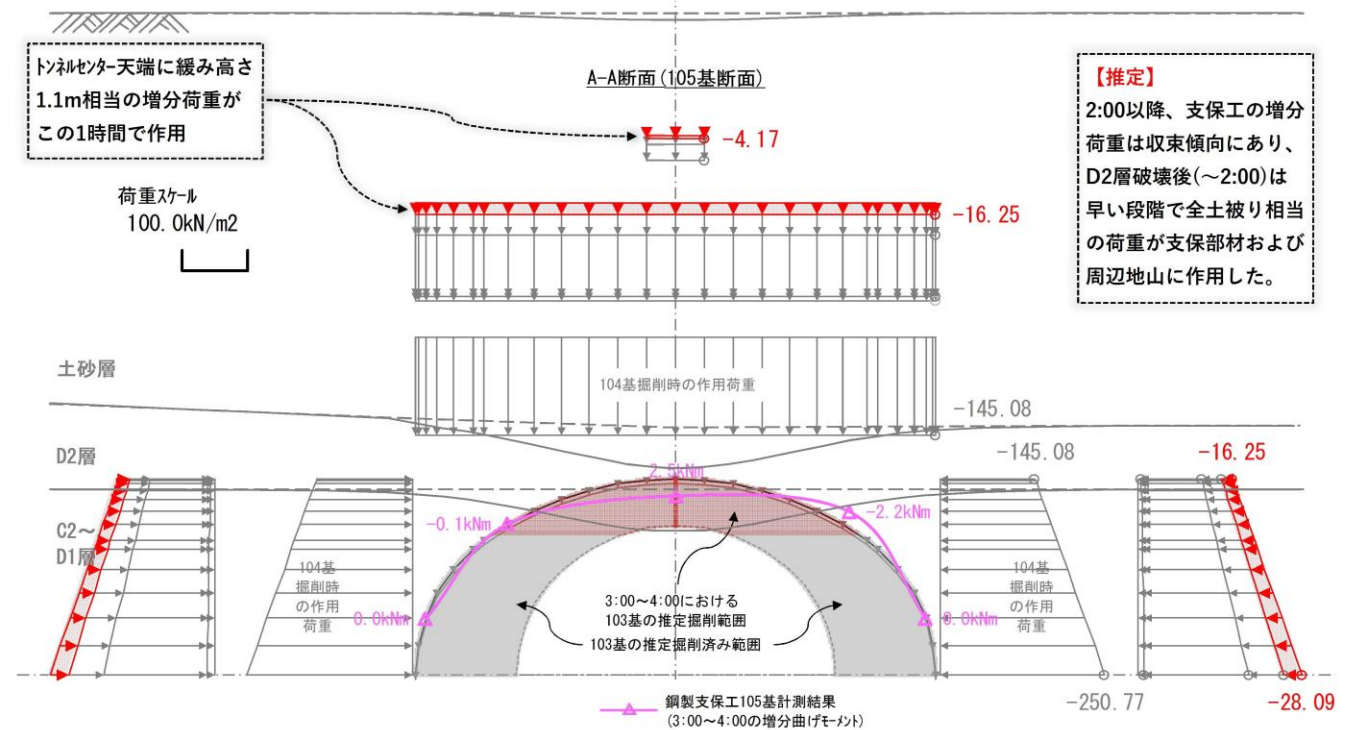
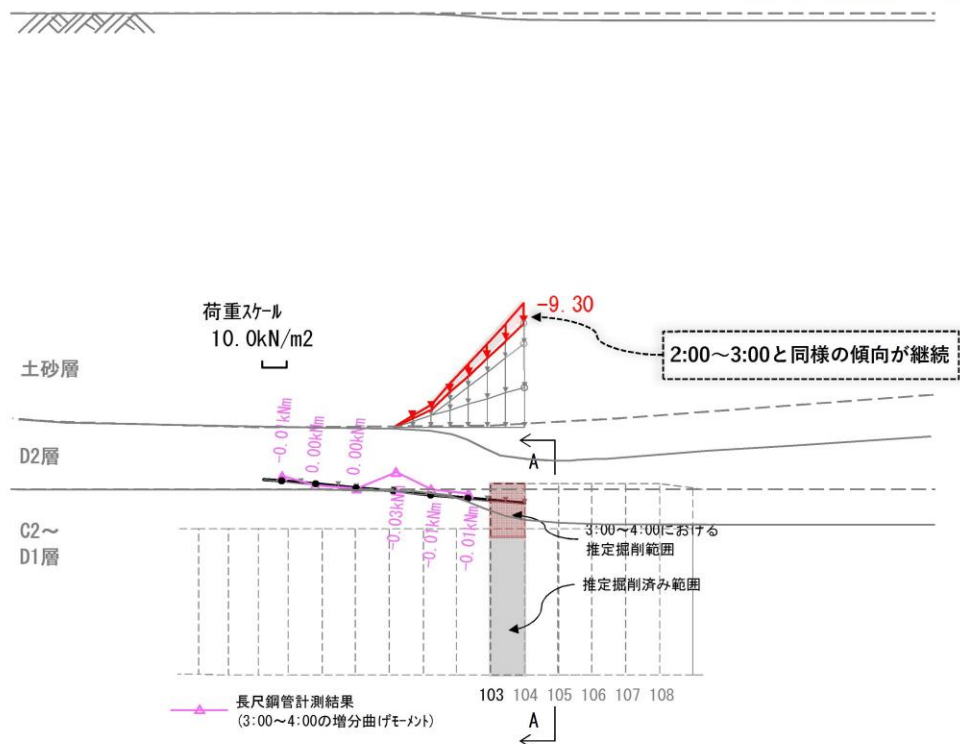
長尺鋼管(104基)応力測定結果より推定したトンネル縦断方向の地山内における荷重分布

鋼製支保工・吹付けコンクリート(105基)応力測定結果より推定したトンネル横断方向の掘削壁面における荷重分布

本坑支保工103基掘削時【2016/11/8 2:00~3:00】の推定増分荷重



本坑支保工103基掘削時【2016/11/8 3:00~4:00】の推定増分荷重

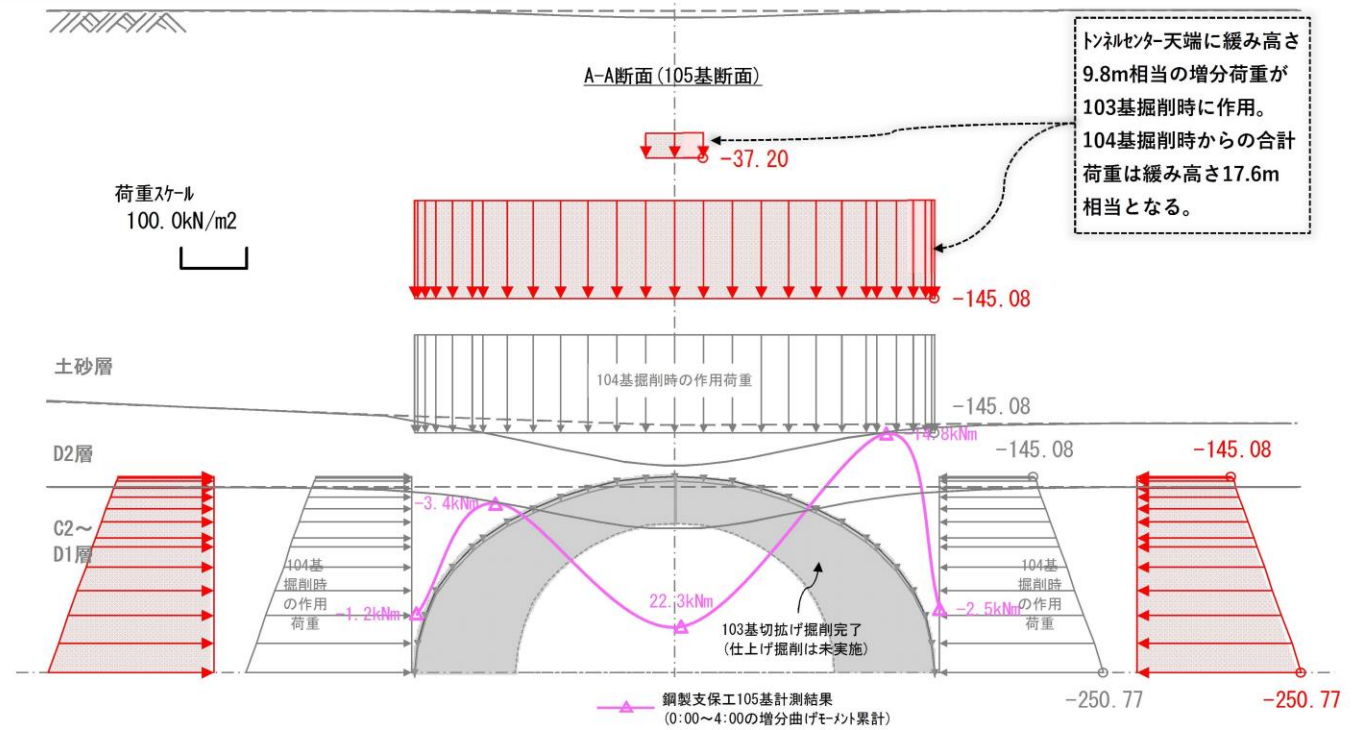
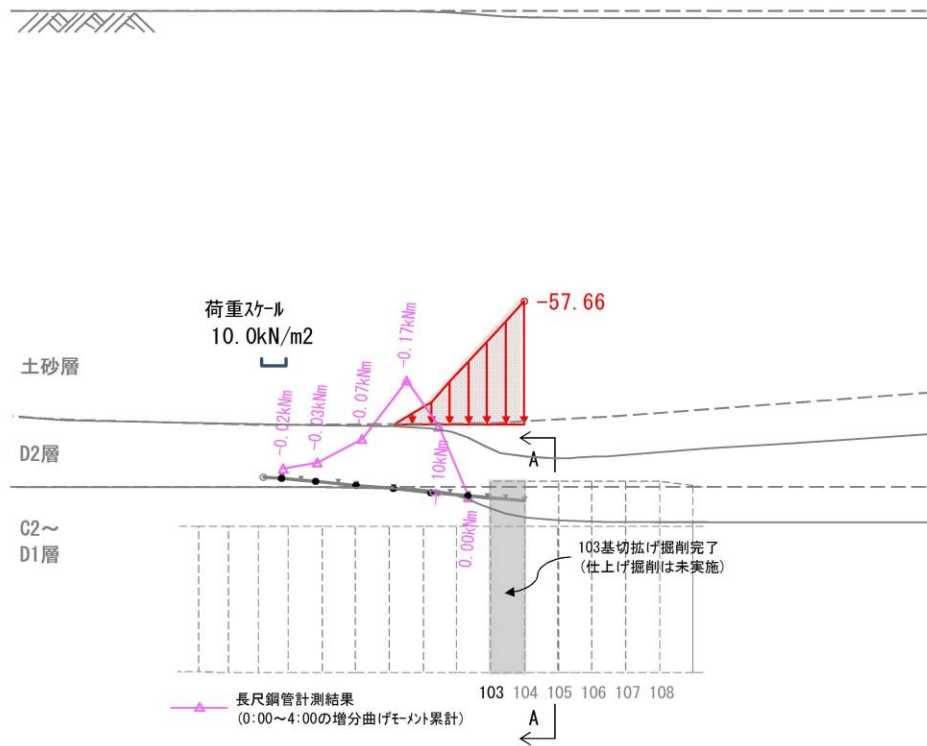


## 2. 道路陥没直前のトンネル挙動分析

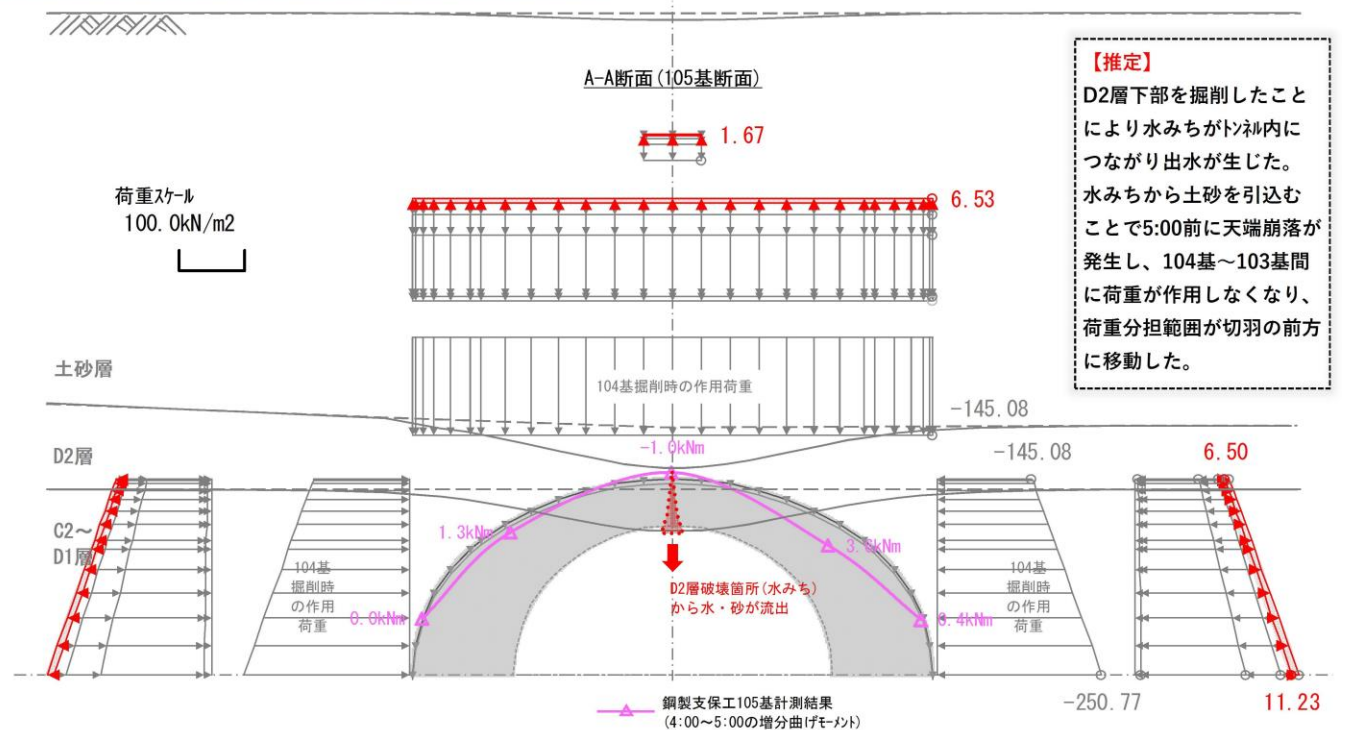
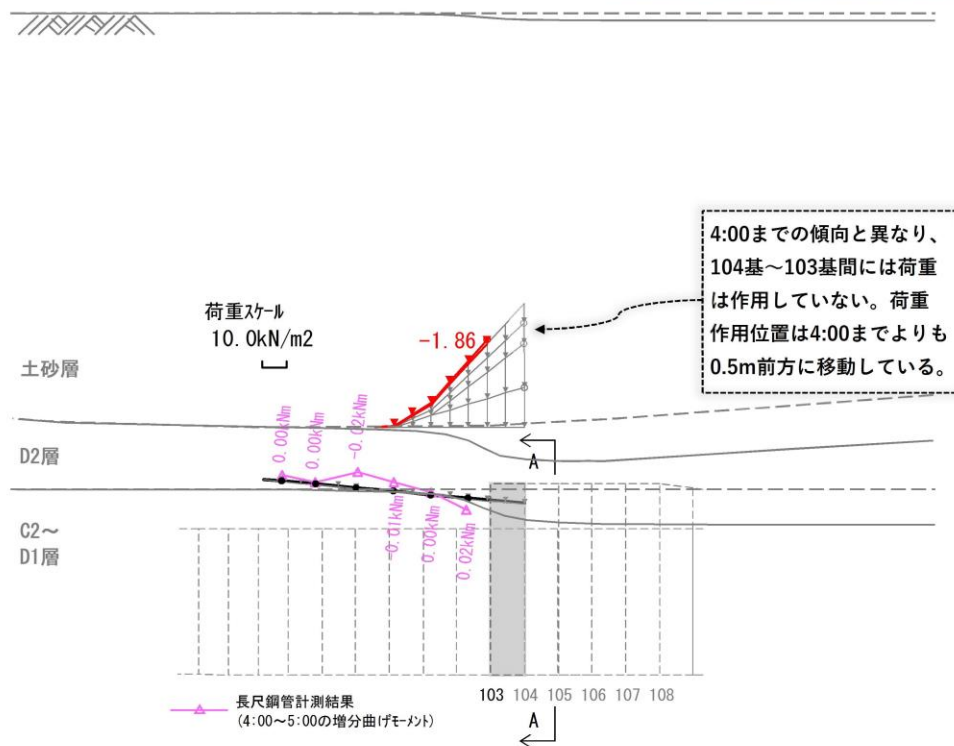
長尺鋼管(104基)応力測定結果より推定したトンネル縦断方向の地山内における荷重分布

鋼製支保工・吹付けコンクリート(105基)応力測定結果より推定したトンネル横断方向の掘削壁面における荷重分布

本坑支保工103基掘削時【2016/11/8 0:00~4:00累計】の推定増分荷重



本坑支保工103基吹付け準備~一次吹付け時【2016/11/8 4:00~5:00】の推定増分荷重





### 3. 道路陥没発生メカニズムと要因推定フロー

#### 発生メカニズムと要因推定フロー

計測データの分析

データ取得間隔(1時間)毎の増分値算出

時間毎のイベントの整理

トンネル103基切羽付近で生じた事象と道路陥没発生メカニズムの推定

道路陥没発生要因の推定

#### 明らかとなった事実

- 105基支保工応力と104基長尺鋼管応力は103基掘削開始後の早い段階から、道路陥没発生までの間、**特徴的な挙動**を示している。
- 地表面沈下、地下水位挙動には道路陥没発生まで特徴的な挙動はみられない。

- 2016年11月8日1:00~2:00の間、**105基支保工応力が急増**している。曲げモーメント分布もこの時間で**変化(天端の内空側凸の曲げが顕著に発生)**している。
- 同一時間において、**104基長尺鋼管応力の曲げモーメント分布が変化(切羽に近い側に上側凸のピークが移動)**している。
- 2016年11月8日4:00~5:00の間、**105基支保工応力が減少**している。
- 同一時間において、**104基長尺鋼管の曲げモーメント分布が変化**している。

- 道路陥没が発生した当該切羽(本坑支保工103基掘削)では、天端付近の素掘り状態での開放時間を極力短時間とするために脚部から天端に向かって掘削を行っている。
- 当該切羽では、先進導坑から施工した**サイドパイルを撤去**しながら掘削を行っている。
- 当該切羽では106基から施工したAGFを撤去しながら掘削を行っている。

#### 推定される事象

- 2016年11月8日1:00~2:00の間、**105基支保工に作用する荷重が急増**している(この1時間で緩み高さ6.2m相当の土圧が作用)。最終的には**全土被り相当の土圧が作用**した。
- 同一時間において、トンネル縦断方向では**切羽近傍の鉛直荷重が急増**している。このことから、当該1時間において掘削に伴う変位により、切羽近傍で局所的に**D2層の破壊が生じ**、D2層が負担していた荷重がトンネルに直接作用したと推定される。
- 2016年11月8日4:00~5:00の間、**104基~103基間の地山には荷重が作用しなくなり**、切羽後方の支保工に作用する荷重も**減少**している。このことから、**104基~103基間でD2層~土砂層の崩壊が生じた**と推定される。

- 切羽近傍に作用する荷重が急増した2016年11月8日1:00~2:00の間は、脚部付近の比較的硬質な**C2~D1層部の掘削**を行っており、先進導坑から施工した**サイドパイルの撤去**を行っていた。この時点で先進導坑上部の変位量(沈下量)が増加し**D2層が局所的に破壊**した。

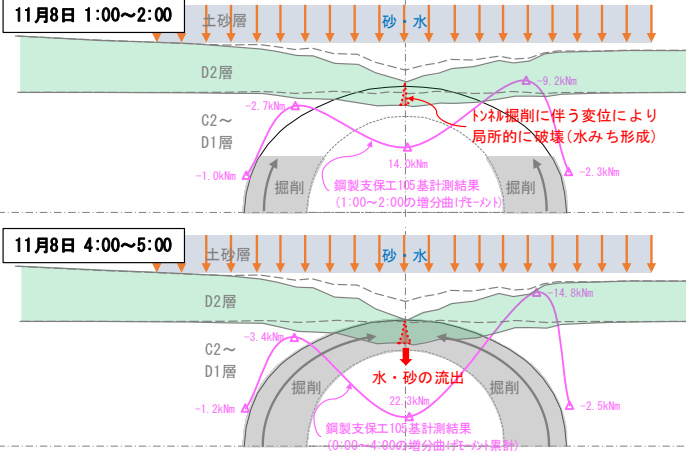
- 切羽掘削は脚部から天端に向かい実施しており、脚部付近の比較的硬質な**C2~D1層部の掘削時にD2層の変形が増加**した。
- 先進導坑から施工した**サイドパイルを撤去**した時点で先進導坑が沈下し、掘削断面天端付近のD2層の変形がさらに増加した。
- 上記により、103基切羽掘削開始後、早い段階で変位量が増加して**D2層が局所的に破壊**し、上部土砂層の**全土被り相当の荷重がトンネルに作用**した。
- 103基の掘削が天端まで進行すると、**破壊箇所のD2層を水みちとして出水が生じ**、次第に水みちが大きくなり、**上部の土砂を引き込んで崩壊が生じた**。

- 104基掘削までは崩壊が生じていない**ことから、崩壊~道路陥没の発生要因は、**D2層上端の起伏により局所的に層厚が薄い箇所が存在したこと**、あるいは**D2層の強度が小さい箇所が存在したこと**により、103基切羽上部のD2層が上部土砂層の土水圧に耐えられず、トンネル掘削に伴う変形により**局所的に破壊**したと推定される。

#### 推定の根拠

- 105基支保工応力および104基長尺鋼管応力の計測結果
- 105基支保工に発生している曲げモーメントおよび軸力を再現したフレーム解析による荷重の推定結果
- 104基長尺鋼管に発生している曲げモーメントを再現したフレーム解析による荷重の推定結果

- 103基掘削に要した時間(0:40~4:00)において、単位時間当たりの掘削体積を一定と仮定して1時間ごとの掘削範囲を算出。その結果2016年11月8日1:00~2:00の間に**サイドパイル施工部分を掘削**していたと推定される。
- 先進導坑変位計測の結果(切羽掘削時には先進導坑掘削時と比較して水平変位の割合が大きく、また天端沈下と同程度の脚部沈下が発生している。)

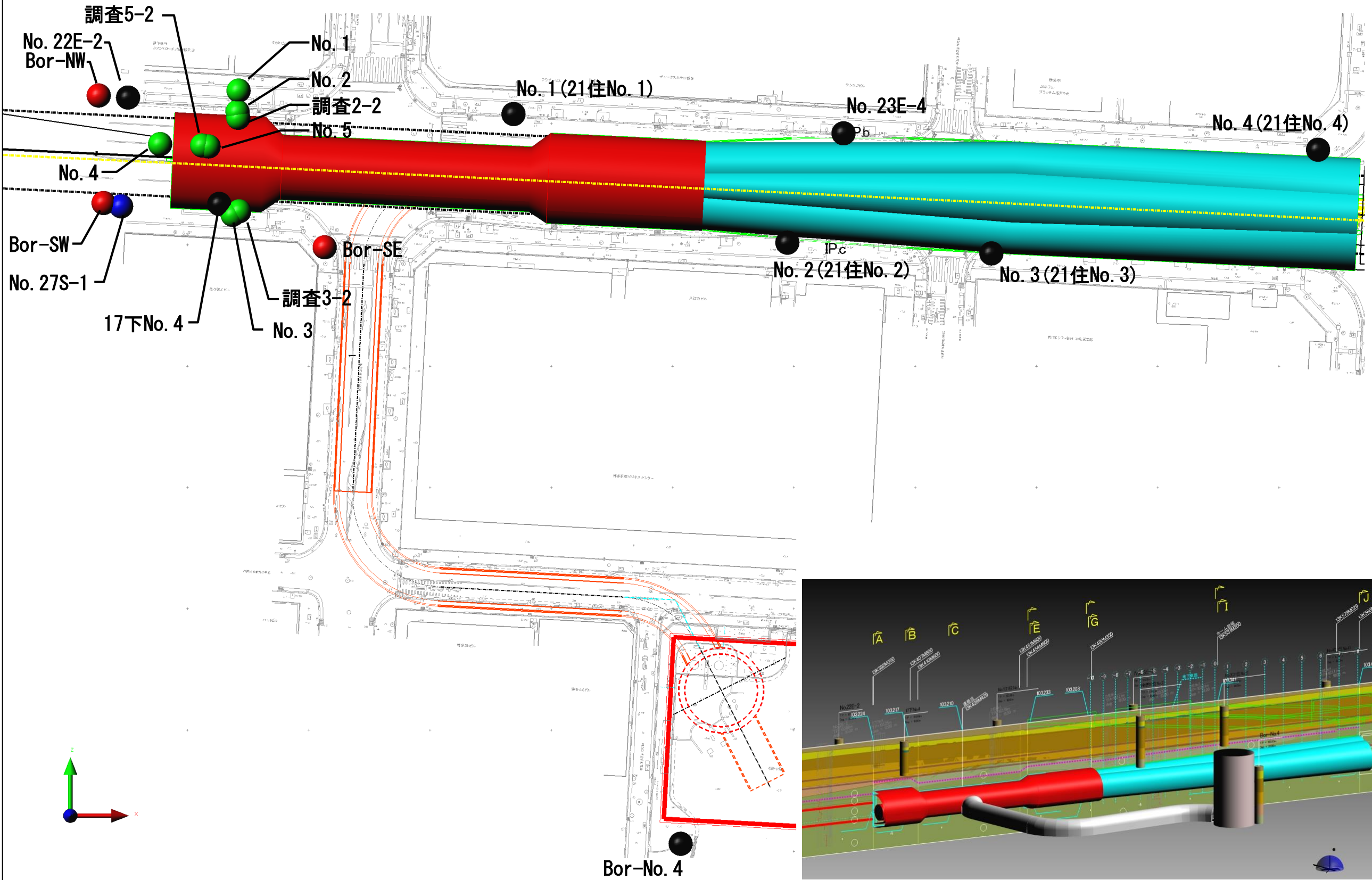


- No. 22E-2(平成22年実施)と今回実施したNW孔は離隔5mであるが、D2層上端面標高で70cm、層厚で1.6mの差がある。
- 道路陥没発生後に実施したボーリング結果を加味した3次元地質モデルによれば、道路陥没発生箇所では当初想定よりもトンネル上部の岩被りが薄く、トンネル切羽進行方向に徐々にD2層上端面が下がっていくのではなく、大断面トンネル間に凹地形の部分が存在する。
- 今回実施したボーリングコアの三軸圧縮試験の結果によればD級岩盤(D2層)の強度は、設計採用値( $\phi=20^\circ$   $C=35kN/m^2$ )とほぼ同等の値となっている。

※委員会資料に一部誤記があったため、事実に基づき訂正した箇所を含む。

# (4) 課題ほか

## 1) 平面分布とボーリング位置



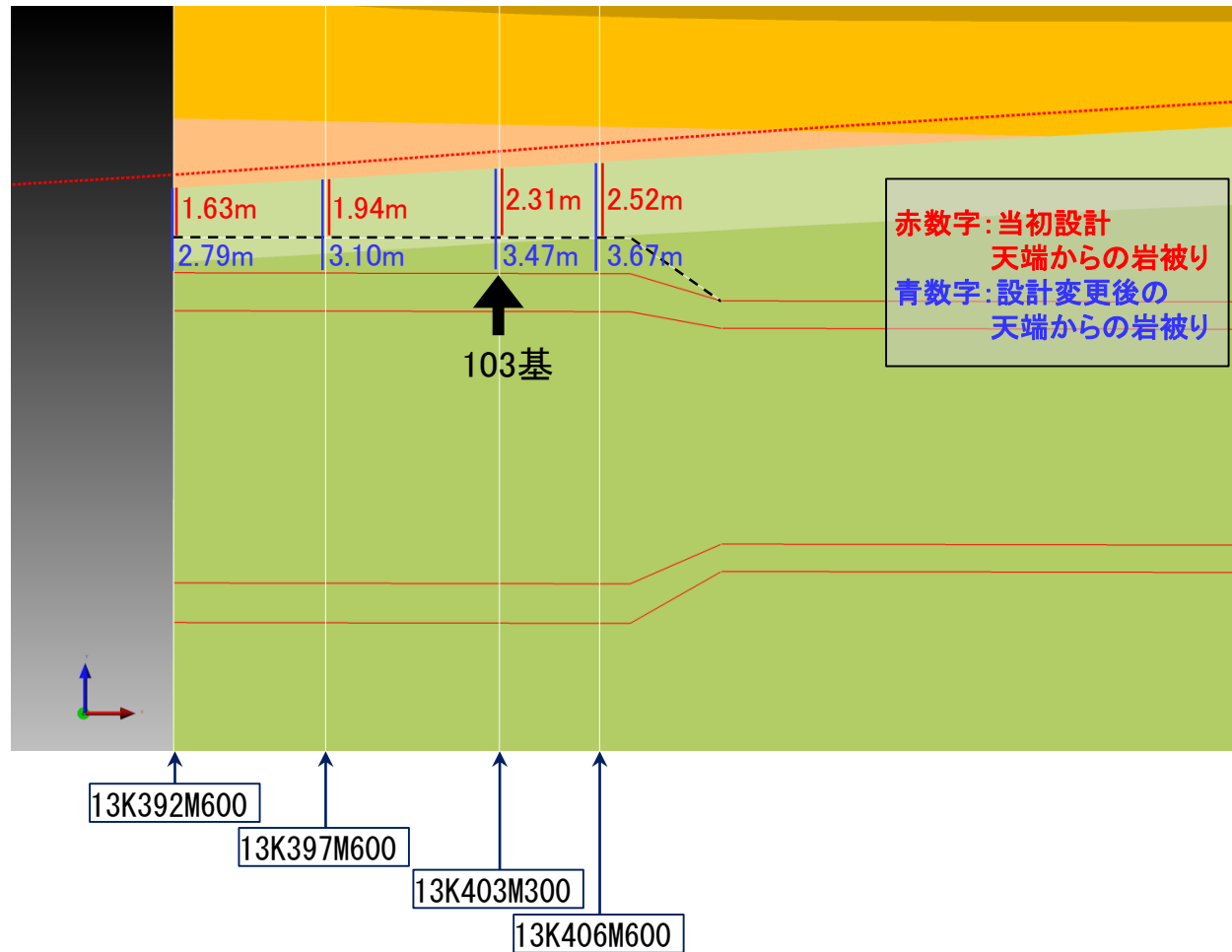
※委員会資料に一部誤記があったため、事実に基づき訂正した箇所を含む。



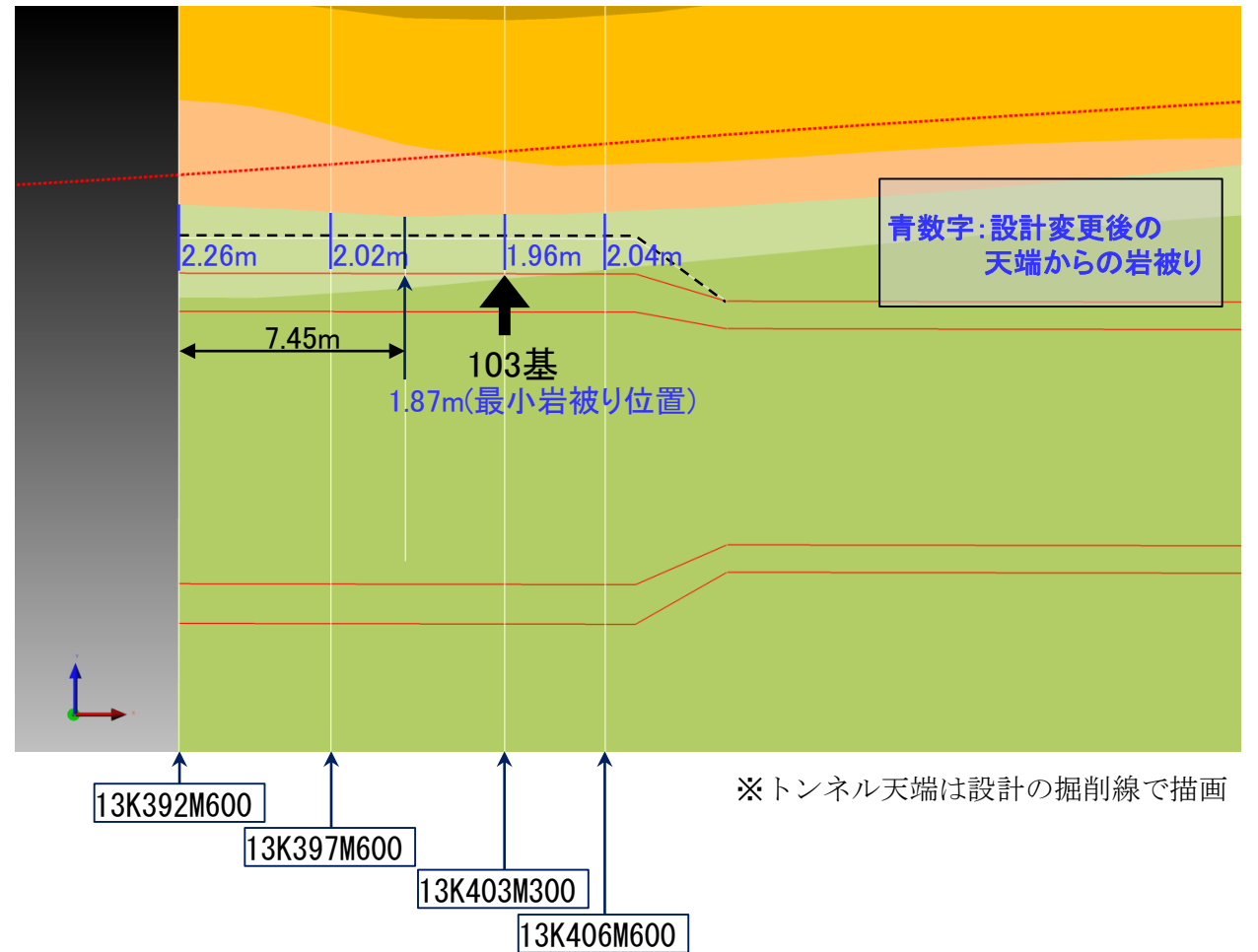
(4) 課題ほか

2) 地質モデル (縦断図)

大断面トンネル施工時の地質モデル  
(既往ボーリング+No. 27S-1 計9本)

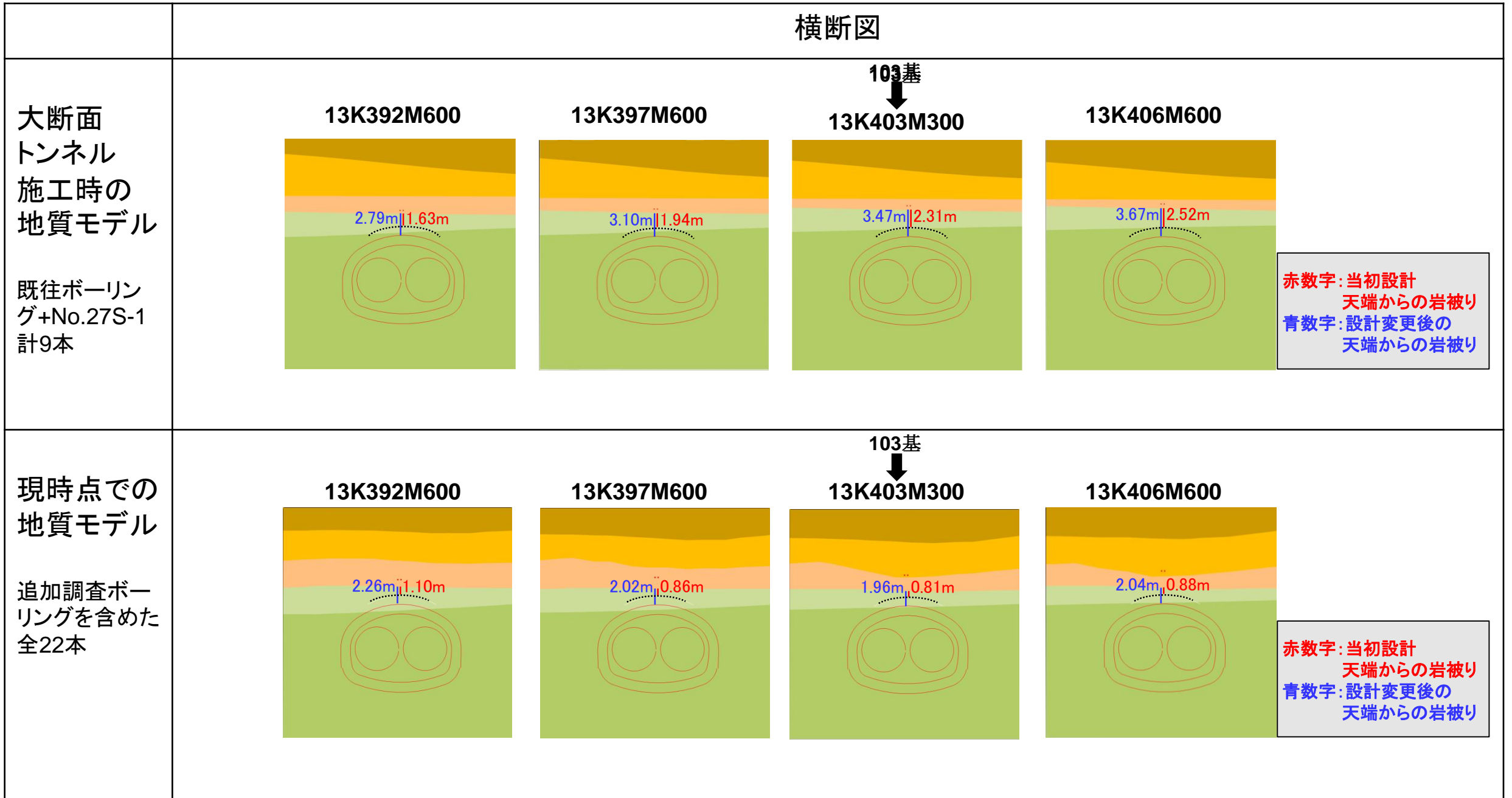


現時点での地質モデル  
(追加調査ボーリングを含めた全22本)



(4) 課題ほか

2) 地質モデル (横断図)



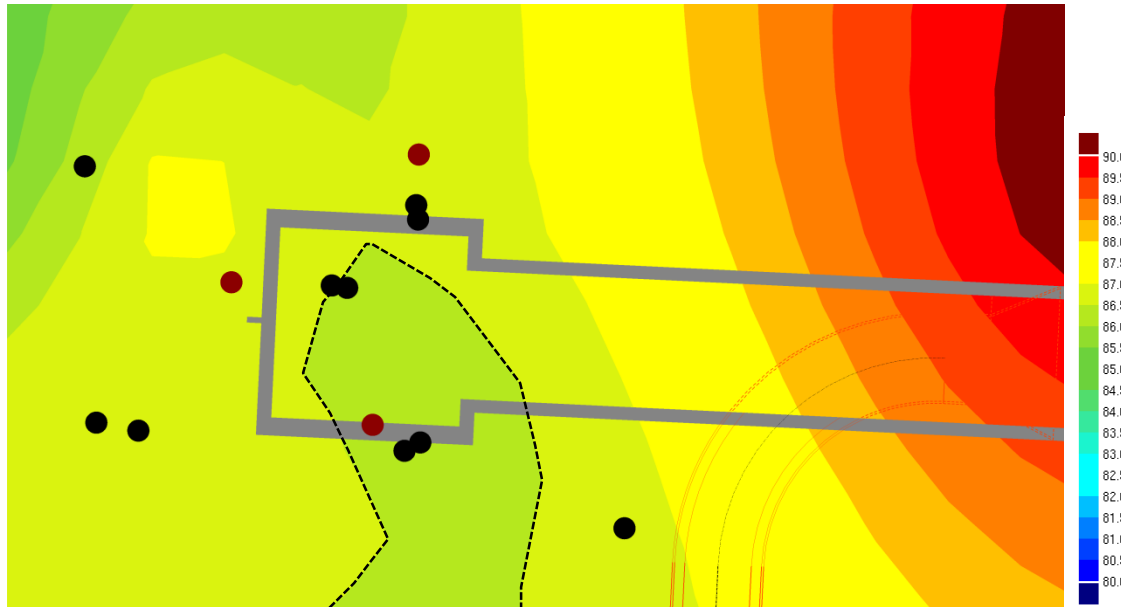
※トンネル天端は設計の掘削線で描画



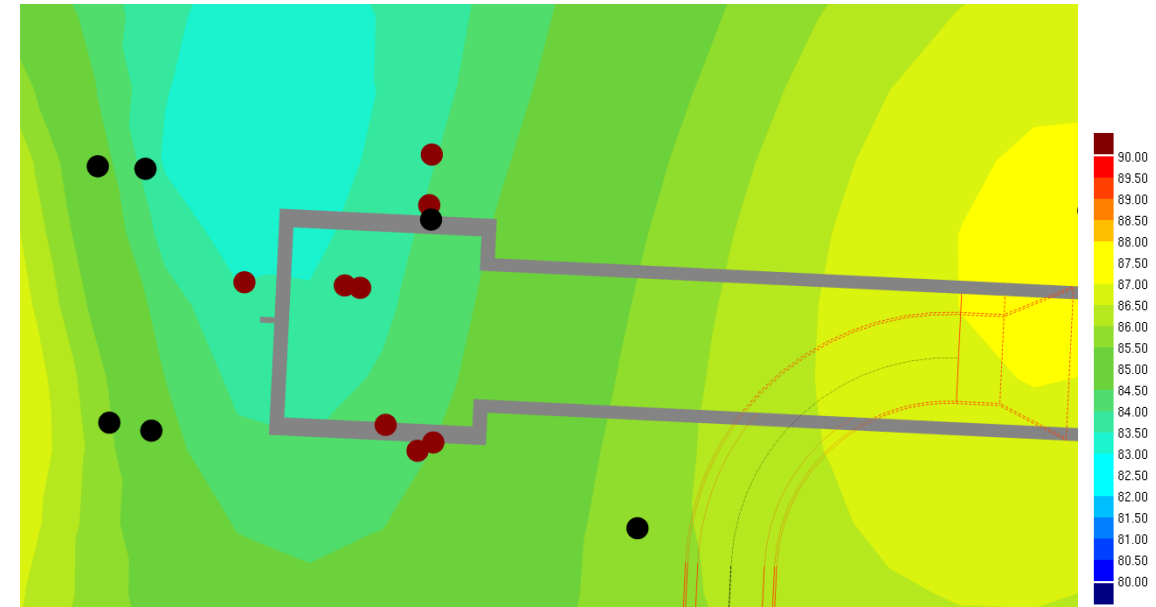
(4) 課題ほか

2) 地質モデル (D2層上端面・下端面・層厚のコンター図)

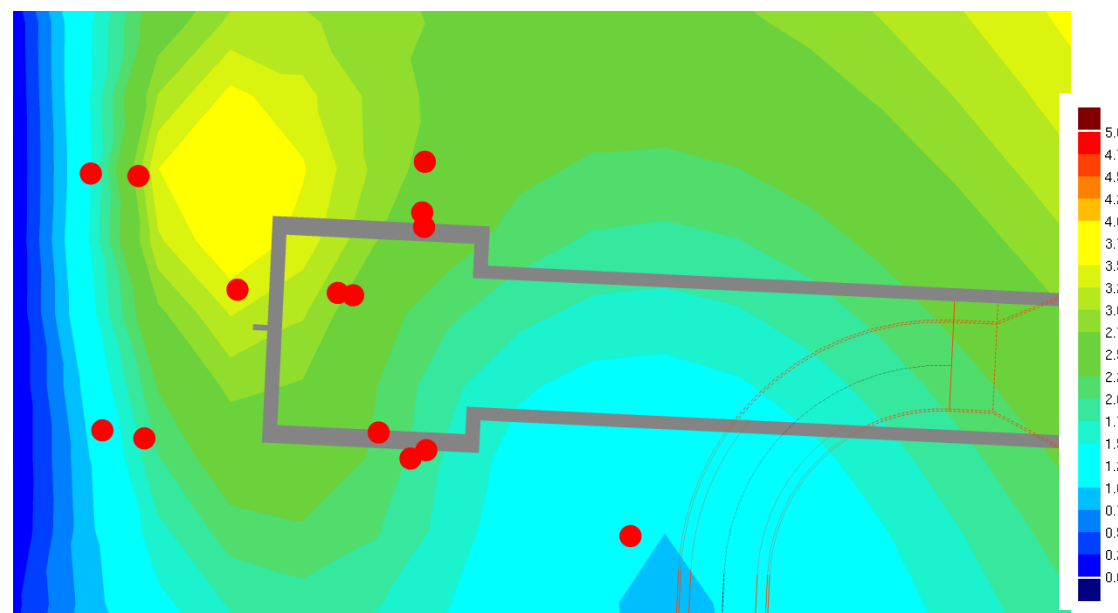
D2層上端面の標高コンター図



D2層下端面の標高コンター図



D2層の層厚コンター図



D2層上端面の  
凹地形部分

●: 深度データが存在するボーリング  
●: 深度データが存在しないボーリング

●: 全対象ボーリング