

高速5号線シールドトンネル工事

第5回施工管理委員会

資 料

令和5年6月16日

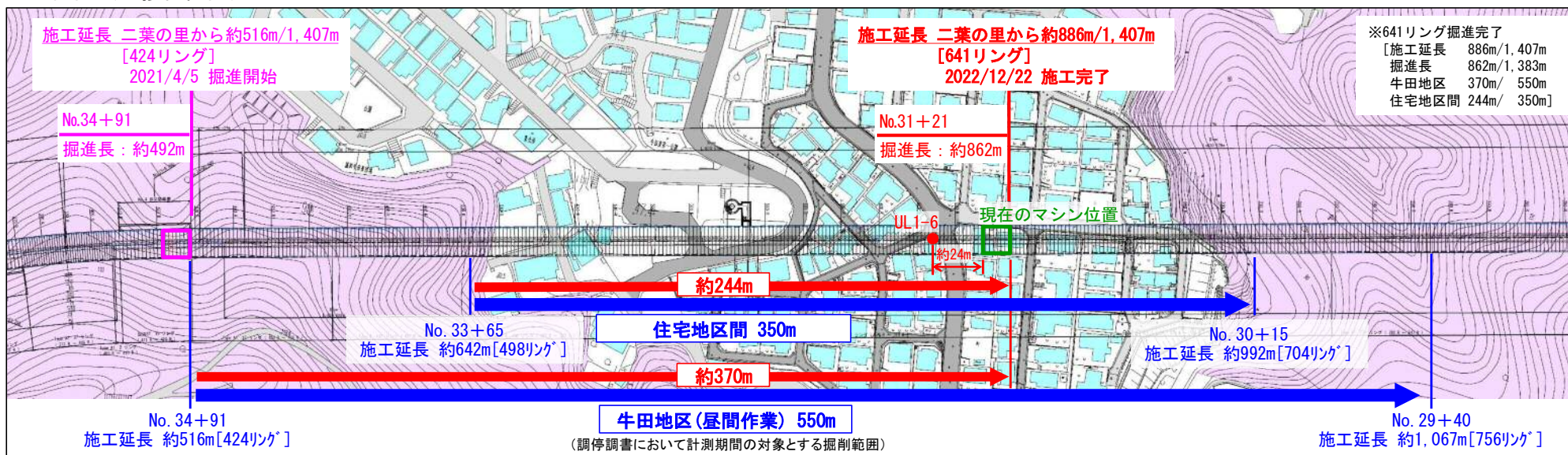
1	概要	1
1.1	目的	2
1.2	対応フロー	5
2	緊急家屋調査結果	6
3	変位要因の分析	10
3.1	隆起現象の原因の抽出	11
3.2	地表面変位の変動状況の検証	12
3.3	近傍の地盤状況との関連性	21
3.4	変位解析による検証	23
3.5	変位要因のまとめ	26
4	対策案の検討	27
4.1	変位解析による影響予測	28
4.2	掘進管理における対策案	30
4.3	計測管理における対策案	32
4.4	対策案のまとめ	33

1 概要

1 概要 1.1 目的

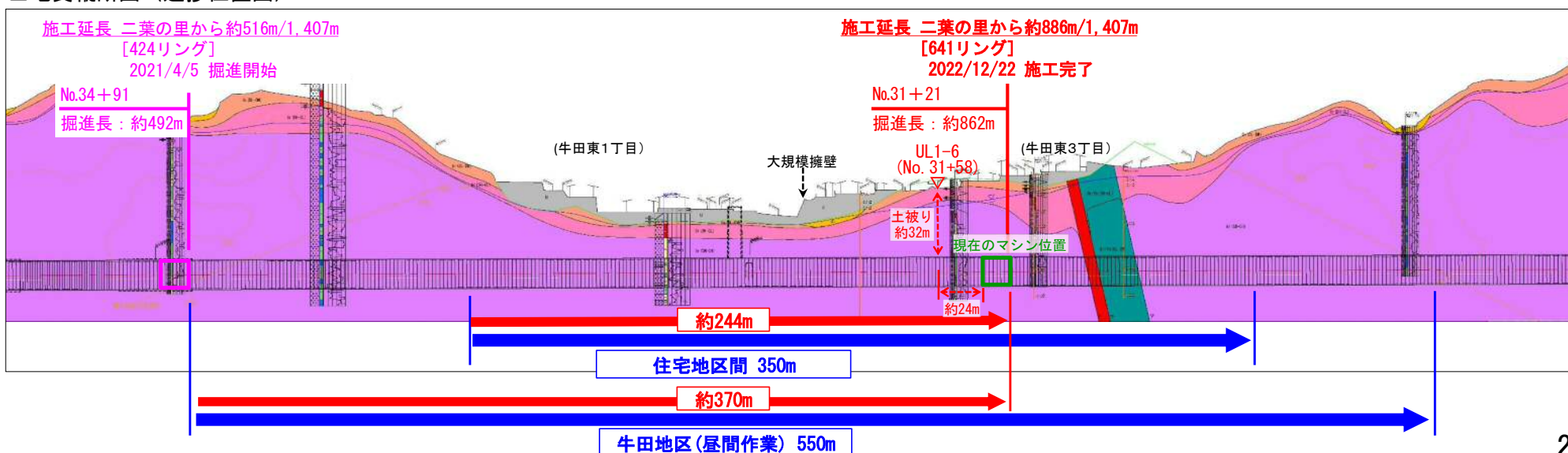
○2022年12月22日に、1級レベル計測点 UL1-6 の地表面変位（評価値）が +2.5mm（隆起）となり、二次管理値（+2.4mm）※に到達したため、トンネル掘削を一旦停止し、計測点周辺の緊急家屋調査をふまえ、要因分析および対策の検討等を行い、その内容について施工管理委員会に意見を伺うもの。 ※[地表面変位量の管理値] 一次管理値：1.3mm 二次管理値：2.4mm

■平面図（進捗位置図）



※広島高速5号線トンネル施工管理委員会資料（H28.12）をベースに、ゼンリン住宅地図（R2.3）に基づき一部修正

■地質縦断面図（進捗位置図）



1 概要 1.1 目的

○2022年12月22日に、1級レベル計測点 UL1-6 の地表面変位（評価値※）が+2.5mm（隆起）となり、二次管理値（+2.4mm）に到達したため、トンネル掘削を一旦停止。

※1級レベル計測点 UL1-6 の評価値：管理値と比較する数値（決定した補正方法と変動幅より基準線（上限・下限）を設定し、計測値と基準線（上限・下限）の差）

○掘削停止後、約5か月経過する中、現在の地表面変位（評価値）は掘進停止時と同程度である。

（評価値：[2022/12/22] +2.5mm ⇒ [2023/5/6] +2.7mm）

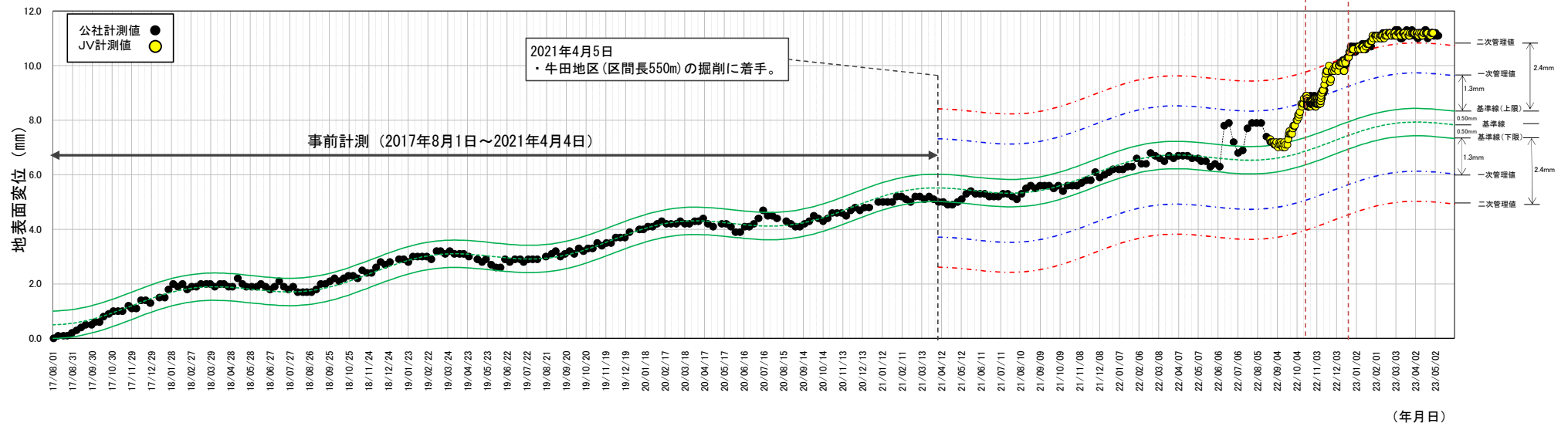
■ 1級レベル計測点UL1-6の地表面変位（2017年8月1日～2023年5月6日）

2022年12月22日

・地表面変位が+2.5mm（隆起）となり、二次管理値（+2.4mm）に到達したことから、掘削作業を一旦停止。
※牛田地区：370m/550m 施工延長：886m/1,407m [641リング施工完了]

2022年10月14日

・地表面変位が+1.4mm（隆起）となり、一次管理値（+1.3mm）に到達。一次管理値到達時の対応策として、計測頻度を1回/週から1回/日に強化し、計測管理を継続。
※牛田地区：346m/550m 施工延長：862m/1,407m [627リング掘削中]



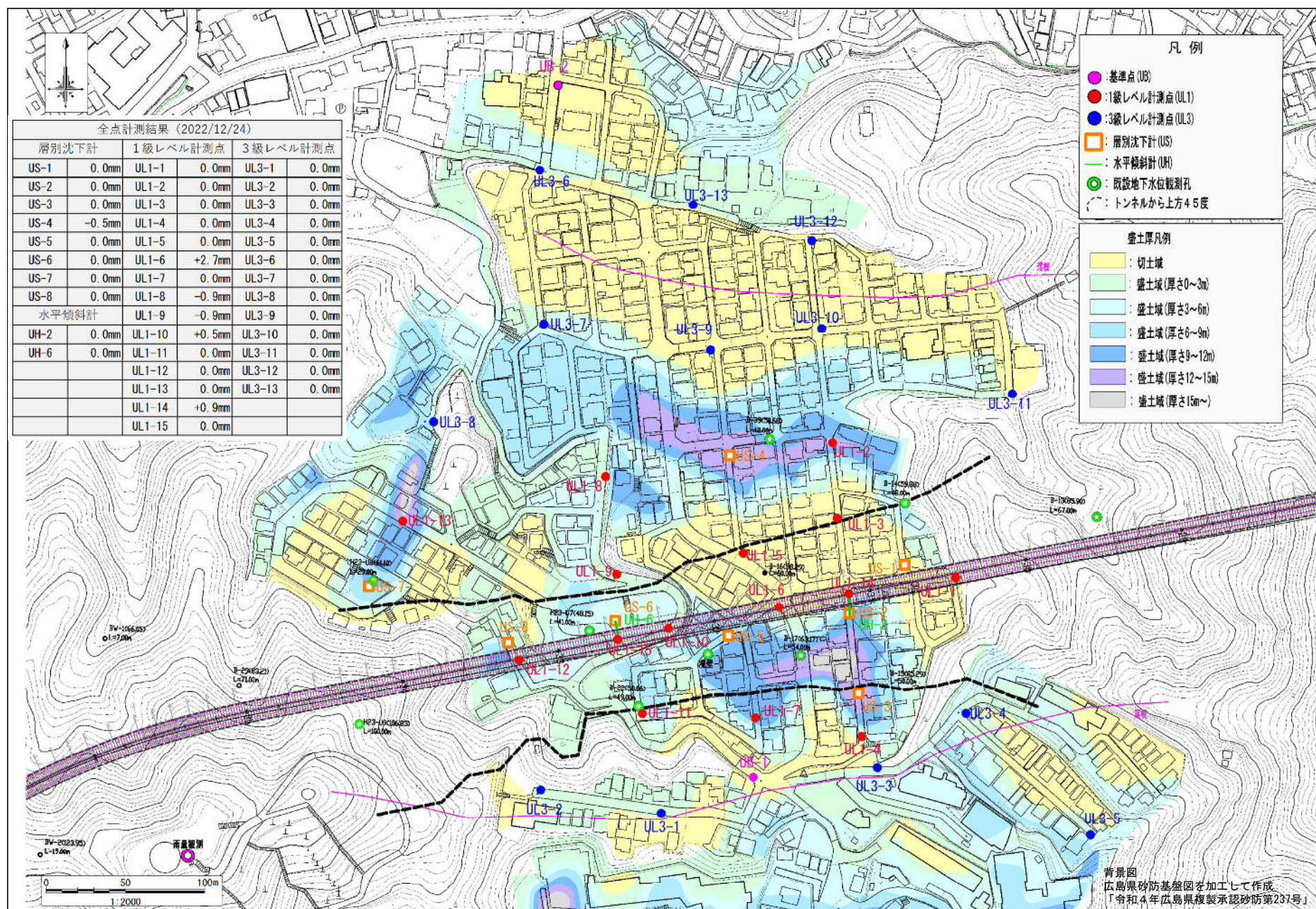
1 概要 1.1 目的

○ 1級レベル計測点 UL1-6が二次管理値に到達したことに伴い、牛田地区に配置している計測点全てを対象に計測※を実施。

結果は、全て一次管理値未満であった。

※2022年12月24日計測（UL1-6二次管理値到達の2日後）

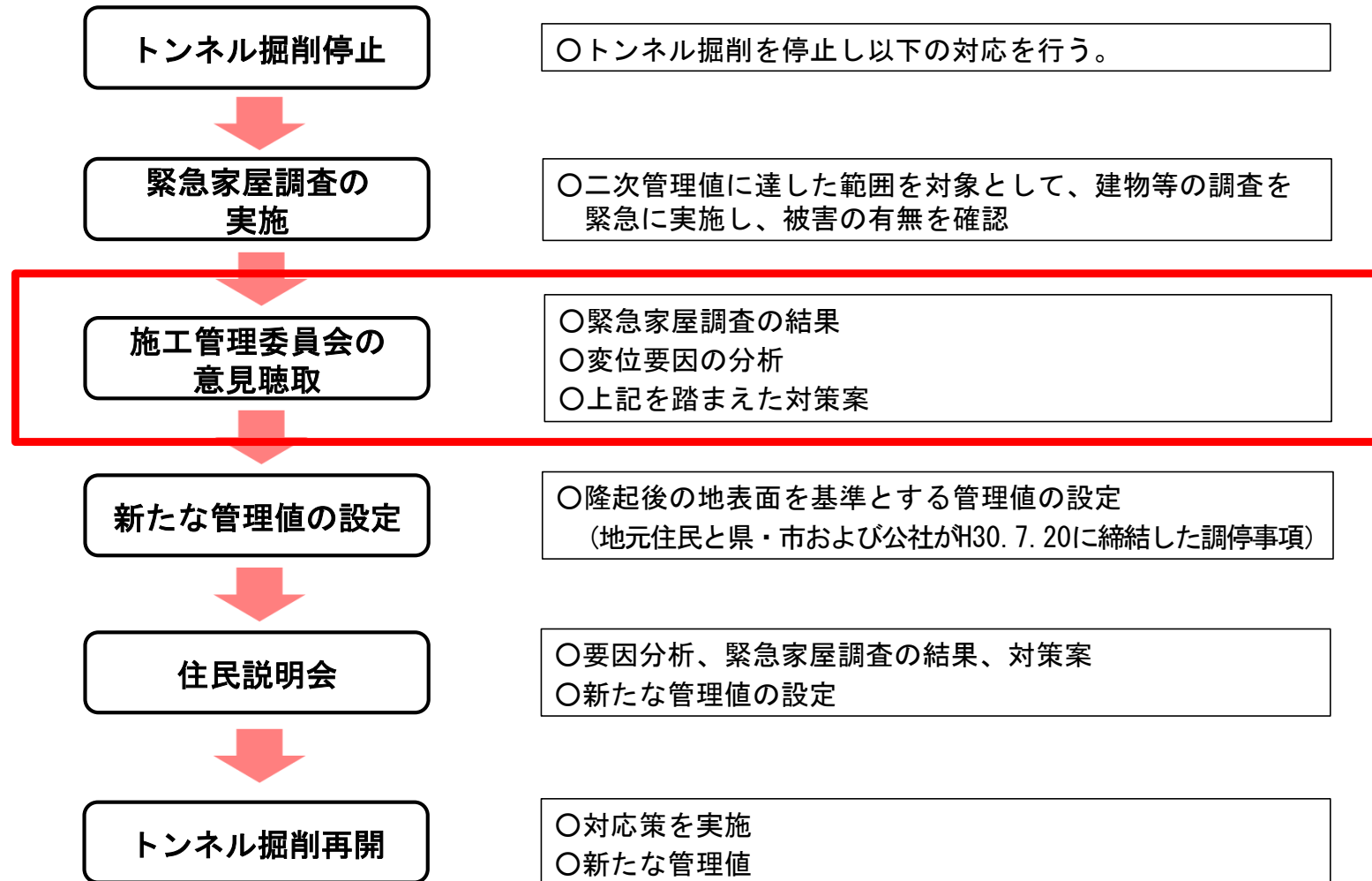
■ 地表面変位計測点配置図および計測値



1 概要 1.2 対応フロー

○地表面変位が二次管理値に達した場合の対応フローを示す。

【二次管理値に達した場合】



2 緊急家屋調査結果

2 緊急家屋調査結果

○2022年12月22日に、1級レベル計測点 UL1-6 の地表面変位（評価値）が+2.5mm（隆起）となり、二次管理値（+2.4mm）に到達したため、トンネル掘削を一旦停止し、緊急家屋調査を実施した。

【第4回施工管理委員会 資料3 から抜粋】

3.1 計測計画（計測の目的及び管理値と対応策）



（1）計測の目的

- 地表面変位計測は、トンネル掘削の影響による地表面変位の把握を目的とする。
- 地表面変位の計測手法は、層別沈下計、水平傾斜計、1級レベル計測及び3級レベル計測である。

（2）管理値と対応策

- 一次管理値は1.3mm、二次管理値は2.4mmである。
- 管理値に達した場合、下表に示す対応策を実施する。

事前及び事中計測の目的の詳細は以下のとおりである。

【事前計測】

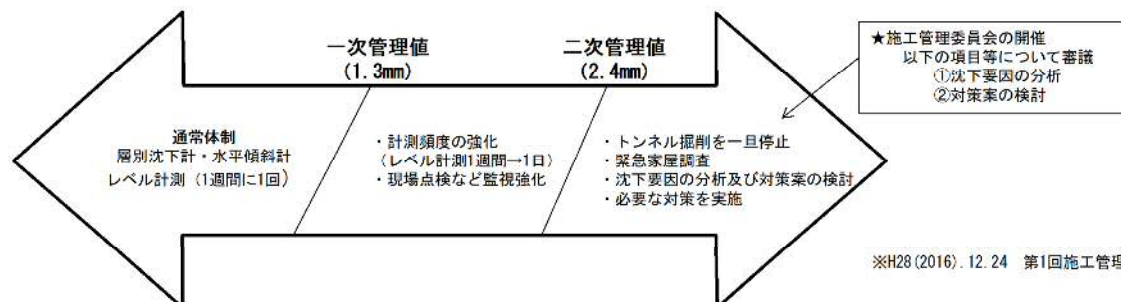
- 工事着手前の自然状態における現状の把握
- 季節変動の把握

【事中計測】

- トンネル掘削の影響による地表面変位の把握
- 二次管理値に達した場合の変位の要因分析
- トンネル掘削の施工管理へ適切に反映

管理値に対する対応策を次に示す。

項 目		二葉の里・牛田地区	対応策
地表面変位	一次管理値	1.3mm	・計測頻度の強化 （計測頻度 1週間→1日） ・現場点検など監視強化
	二次管理値	2.4mm	・家屋調査を緊急的に実施し、家屋被害の有無を確認 ・専門家の意見を聴きながら、変位要因の分析及び対策案の検討 ・県・市と協議し、地元説明を経て、必要な対策を実施 ・上記対応に際し、トンネル掘削を一旦停止



※H28(2016).12.24 第1回施工管理委員会より抜粋

2 緊急家屋調査結果

- 1 級レベル計測点UL1-6の二次管理値到達に伴い、UL1-6の周辺の家屋について、緊急的に家屋調査を実施した。また、(社)日本建築学会で示されている「木造建築物の不同沈下障害と変形角(傾斜)」について、調査・確認を行った。
- トンネル掘削着手前(2017年3月～2018年12月)に実施した事前家屋調査と、今回調査との比較・確認を行った結果、建物の4隅の計測で得られた変位(傾斜角)の事前調査からの増分は、最大で0.61/1000ラジアン(0.04度)であった。
- 調査の結果、UL1-6の地表面変位によって、「木造建築物の不同沈下障害と変形角(傾斜)」に示される第1期段階(基礎等にきれつが入り始めるしきい値: 3/1000ラジアン(0.17度))以上の傾斜角増加が見られた箇所はなかった。

■ 緊急家屋調査(建物の一体傾斜による不同沈下の確認)

調査方法	・ トンネル掘削前に実施した建物等の事前調査と今回調査の比較・確認 ・ 建物の4隅等をレベルにより計測
調査結果 (事前調査結果との比較)	・ 建物の4隅の計測変位(傾斜角)最大0.61/1000ラジアン(0.04度) ・ 第1期段階(3/1000ラジアン(0.17度))以上の傾斜角増加が見られた箇所はなかった。

■ 「木造建築物の不同沈下障害と変形角(傾斜)」

小規模建築物基礎設計の手引きより(社)日本建築学会)

表 6-1 木造建築物の不同沈下障害と変形角

段 階	不 同 沈 下 障 害 の 状 況	変形角(傾斜)の限度
初期段階	モルタル外壁・コンクリート犬走りにきれつが発生する。	1/1000 ^{*1}
第1期段階	つか立て床の不ろく(陸)を生じ、布基礎・土間コンクリートにきれつが入る	3/1000 ^{*2}
第2期段階	壁と柱の間にすきまが生じ、壁やタイルにきれつが入る。窓・額縁や出入口枠の接合部にすきまが生じ、犬走りやブロック塀など外部構造物に被害が生じる。	5/1000 ^{*2}
第3期段階	柱が傾き、建具の開閉が不良となる。床が傾斜して支障を生じる。	10/1000 ^{*2}
最終段階	柱の傾斜が著しく倒壊の危険がある。床の傾斜もひどく使用困難である。	15/1000 ^{*2}

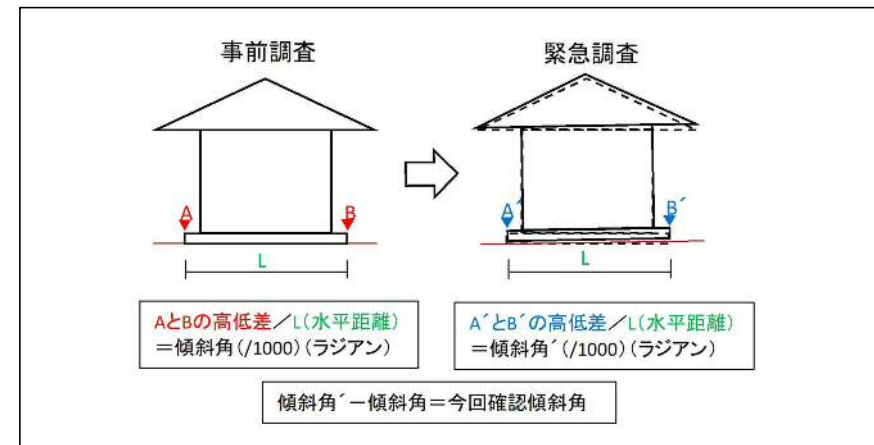
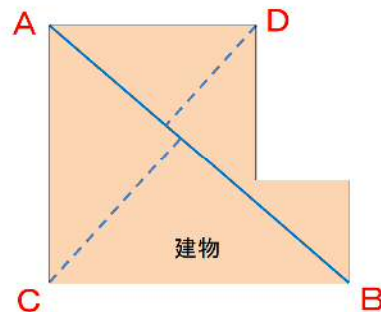
[注] *1 間片ほか：シールド掘削に伴う地盤沈下と家屋被害について；土と基礎，1980.6による。

*2 芳賀保夫：木造建物の不同沈下障害(その1)；日本建築学会大会学術講演梗概集，1987.

10

■ 緊急家屋調査(建物の一体傾斜における傾斜角の算出方法)

● 選定のイメージ図



2 緊急家屋調査結果

- 本工事では、騒音・振動についても管理値を定めている（調停調書にも記載）。
- 騒音・振動の計測結果は全て一次管理値未満であったが、掘削作業中、騒音・振動等に対する意見が住民から寄せられた。引き続き、住民生活への影響に留意しながら掘削を行う。
- 今回調査について、トンネル掘削着手前（2017年3月～2018年12月）に実施した事前調査との比較・確認を行った結果、建物の内部、外部における亀裂や損傷については、室内クロスの破れや屋外の土間部モルタルの亀裂の拡大等の変状を一部で確認した。工事による建物への影響については、対象住民から詳細な聞き取り等を行いながら個別に対応。
- また、トンネル掘削完了後地表面変位の収束を判断した後、事前調査を実施した全ての家屋を対象に事後調査を実施する。

■緊急家屋調査（建物等）

調査結果 (事前調査結果 との比較)	・室内クロス破れや屋外の土間部モルタルの亀裂の拡大等の変状が一部で確認 ・これらの変状については、対象住民から詳細な聞き取り等を行い個別に対応
--------------------------	--

調査方法（例：建物の状況調査）

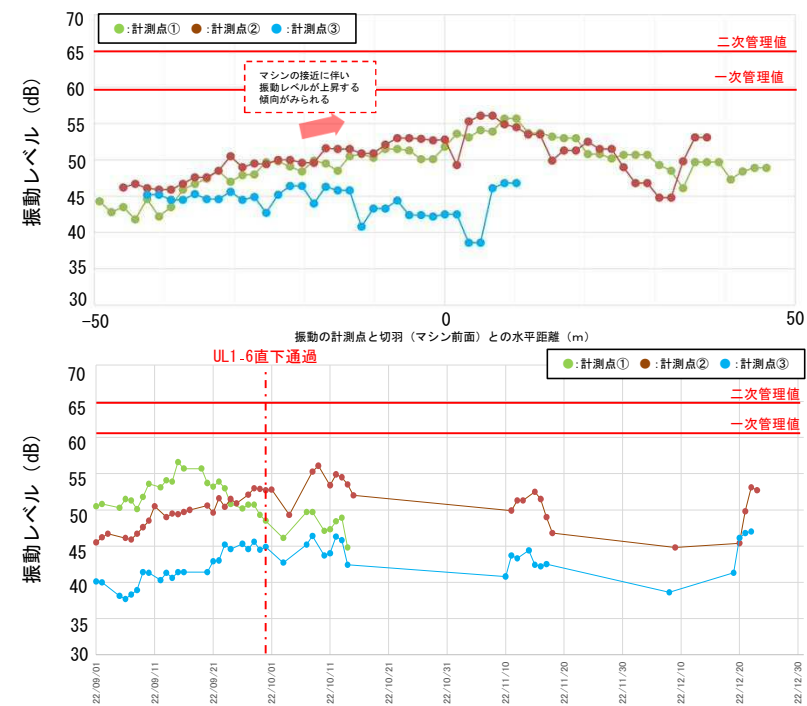
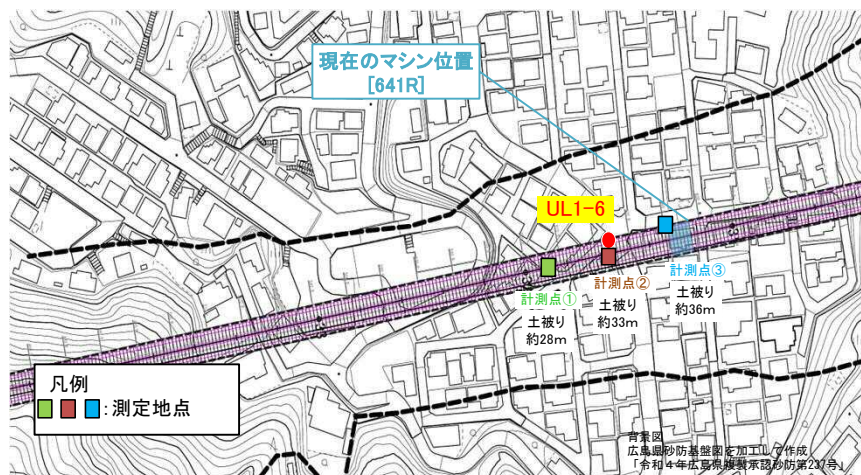
建物内部（例：壁）



建物内部（例：外壁面）



■UL1-6近傍の振動の計測結果



3 変位要因の分析

3 変位要因の分析 3.1 隆起現象の原因の抽出

○トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説に挙げられている「トンネル掘削に伴う地盤変位の原因と発生機構」に基づき、発生した隆起現象の原因と考えられる項目を抽出した。

(1) 切羽に作用する土水圧の不均衡

「泥水式シールドでは、掘進量と排土量に差が生じるなどの原因で、切羽土圧や水圧とチャンバー圧に不均衡が生じると、切羽が平衡状態を失い、地盤変位が生じる。切羽土圧や水圧に対しチャンバー圧が小さい場合は地盤沈下、大きい場合は地盤隆起を生じる。これらの現象は切羽における地山の応力解放、あるいは付加的な圧力等による弾塑性変形によって生じる。」

⇒ 関連する可能性が考えられる。掘進データや近傍の地盤状況との関連性について検証を実施する。

(2) 掘進時の地山の乱れ

「シールド掘進中は、シールドのスキンプレートと地山との摩擦や地山の乱れにもとづく地盤隆起や沈下を生じる。とくに、蛇行修正、曲線掘進に伴う余堀りは、地山を緩める原因となる。」

⇒ 硬質な花崗岩を掘削対象とした岩盤シールドであり、シールド外径に比べてカッター外径が大きいスキンプレートと地山との摩擦は要因とならない。地山の乱れとしては肌落ち等が考えられるが、地山を緩める可能性はあるものの隆起現象の要因とは考えられない。よって、関連性はない。

(3) テールボイドの発生と裏込め注入の過不足

「テールボイドの発生によりスキンプレートで支持されていた地山は、テールボイドに向かって変形し、地盤沈下を生じる。これは、応力解放に起因する弾塑性変形の影響である。地盤沈下の大小は、裏込め注入材の材質および注入時期、位置、圧力、量等に左右される。」

⇒ 地盤沈下の発生機構であるが、裏込め注入圧が大きい場合は(1)と同様に関連する可能性が考えられる。(1)とあわせて、掘進データや近傍の地盤状況との関連性について検証を実施する。

(4) 一次覆工の変形および変位

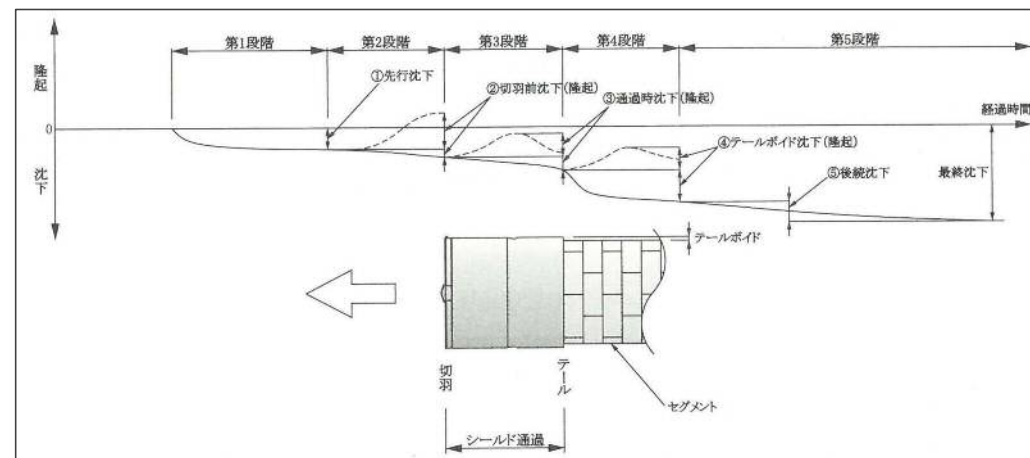
「継手ボルトの締付けが不十分だと、セグメントリングの真円度が悪化して変形しやすくなり、テールボイドが増大したり、テール脱出後に圧力が不均等に作用したりすることによりセグメントリングが変形あるいは変位し、地盤沈下が増大する原因となる。」

⇒ 地盤沈下の発生機構であり、隆起現象の要因とは考えられない。よって、関連性はない。

(5) 地下水位の低下

「切羽からの湧水や一次覆工からの漏水が生じると、地下水位が低下し地盤沈下の原因となる。この現象は、地盤の有効応力が増加したことによる圧密沈下である。」

⇒ 地盤沈下の発生機構であるが、(1)や(3)の影響で地下水位が上昇すると、逆に隆起現象の要因となる可能性がある。(1)、(3)を含めた変位解析による検証を実施する。



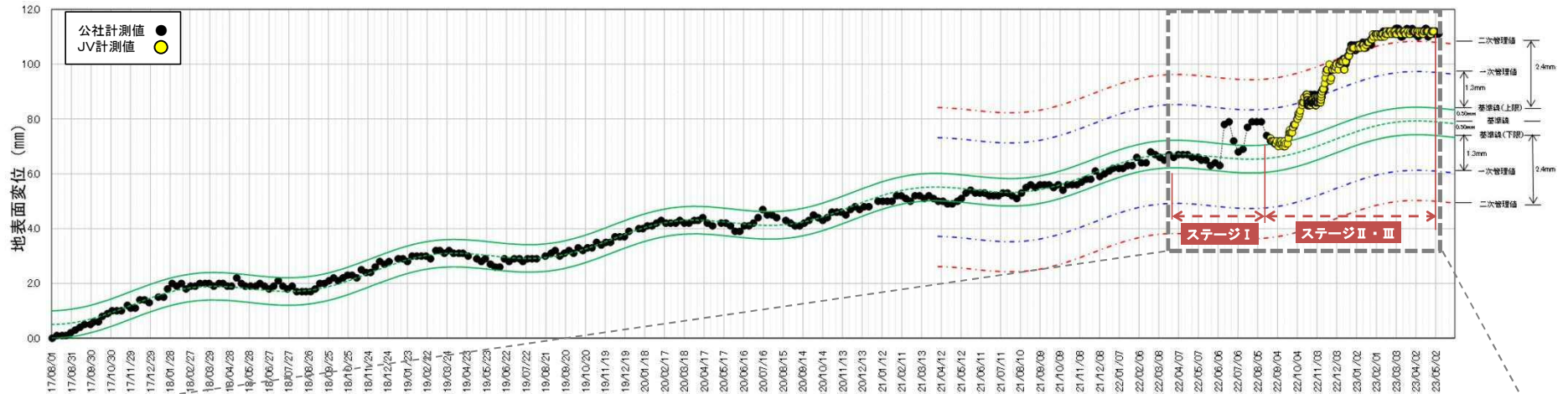
シールド掘進による地盤変位の分類※

※トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説 より引用

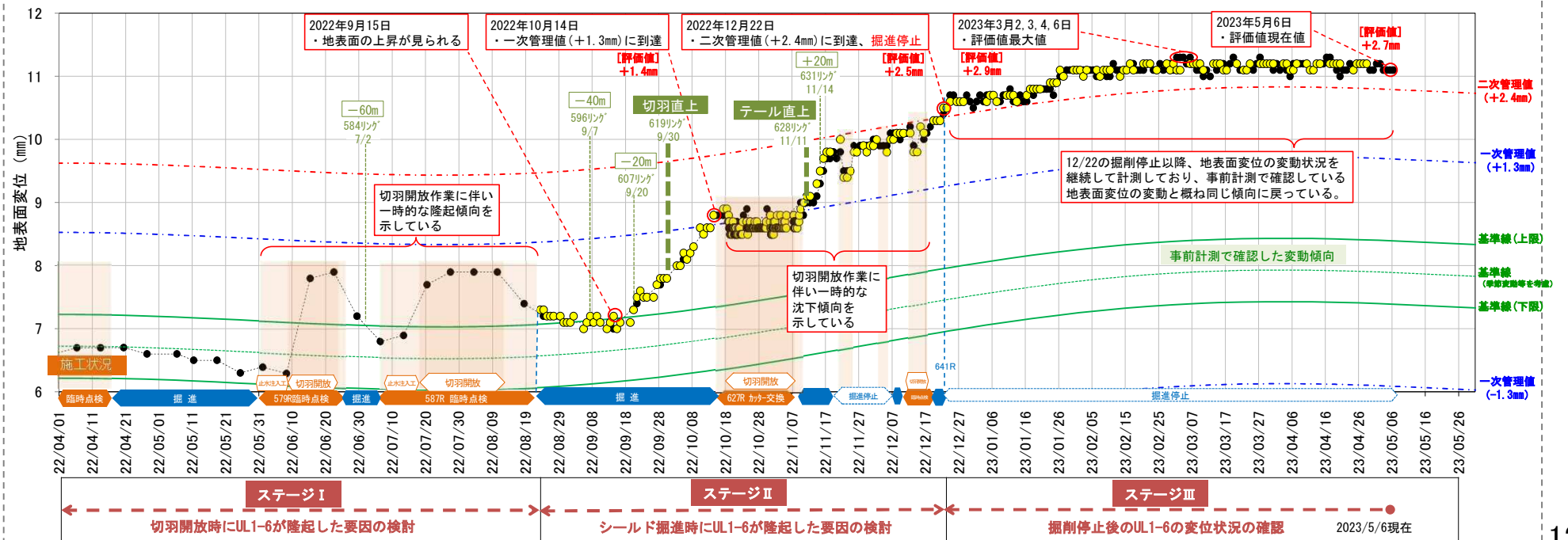
3 変位要因の分析 3.2 地表面変位の変動状況の検証

○ 1 級レベル計測点UL1-6の地表面変位について、変動状況から3つのステージに分類し、掘進データ等との相関や周辺計測点の地表面変位状況等を検討した。※検討事項：次頁参照

■ 1 級レベル計測点UL1-6の地表面変位（2017年8月1日～2023年5月6日）



計測点と切羽との位置関係および施工状況との比較（2022年4月1日～2023年5月6日）



3 変位要因の分析 3.2 地表面変位の変動状況の検証

■検討事項

①「切羽距離」から見た整理 ※掘進データとの関連性

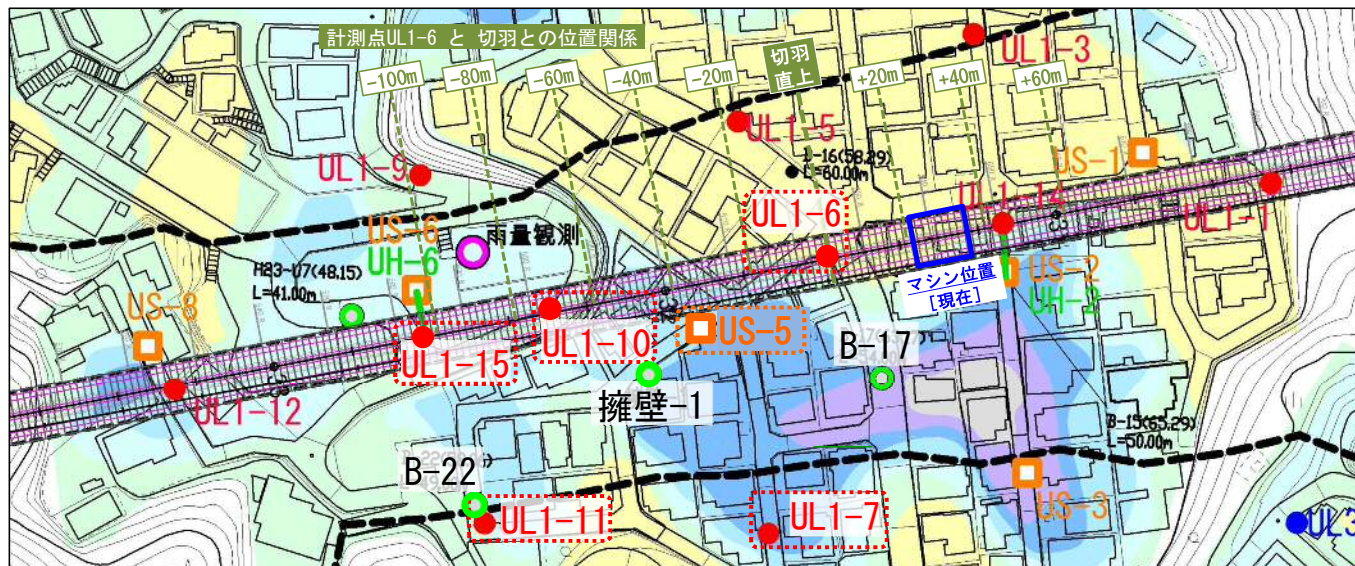
- 計測点UL1-6における
 - ・「地表面変位と切羽圧・裏込め注入圧」との関連性

②-1「時系列」から見た整理 ※掘進データとの関連性

- 計測点UL1-6における
 - ・「地表面変位と切羽圧・裏込め注入圧」との関連性
- 計測点UL1-6と同様にトンネル直上に位置する計測点 [UL1-10・UL1-15] における
 - ・「地表面変位と切羽圧・裏込め注入圧」との関連性
- 計測点UL1-6およびUL1-6と同様にUS-5を基準点とする計測点 [UL1-7・UL1-11] における
 - ・地表面変位の変動状況の確認

②-2「時系列」から見た整理 ※地下水位観測孔の標高水位・雨量・気温との関連性

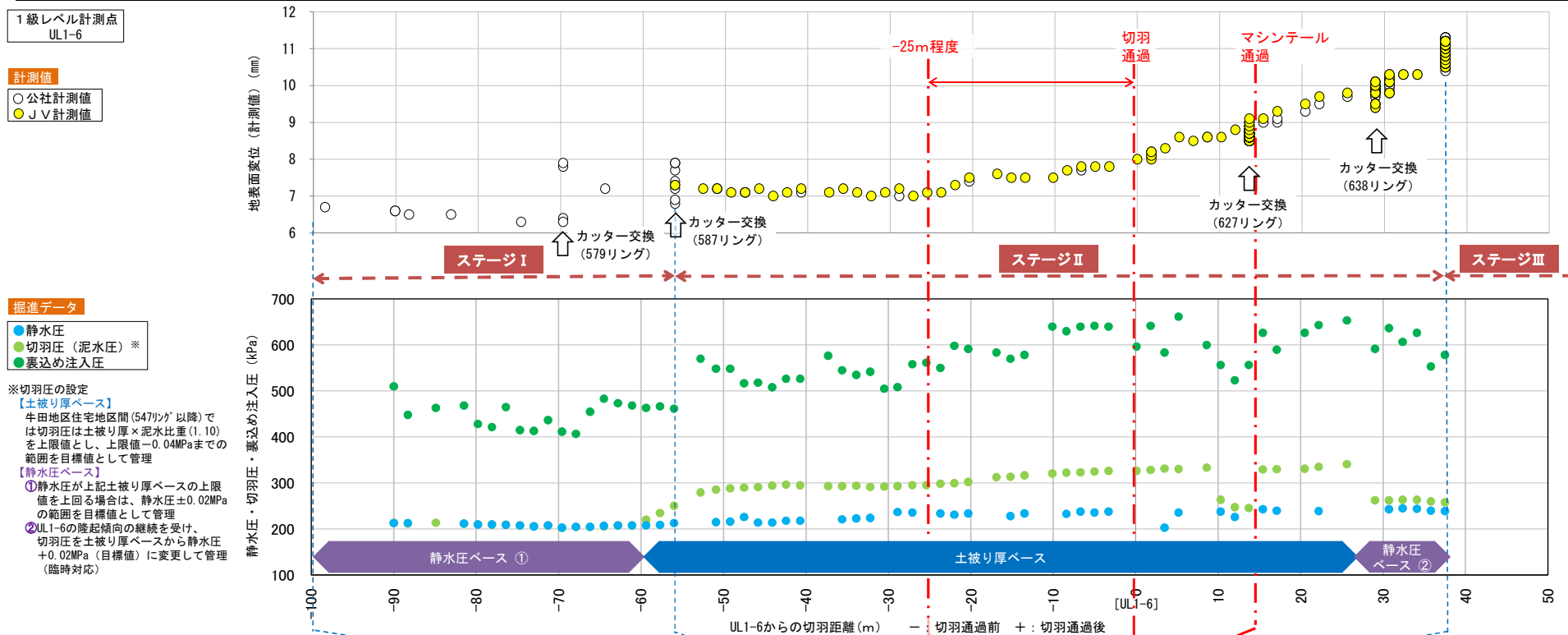
- 計測点UL1-6における
 - ・「地表面変位と地下水位観測孔の標高水位 [B-17・擁壁-1・B-22] 等」との関連性



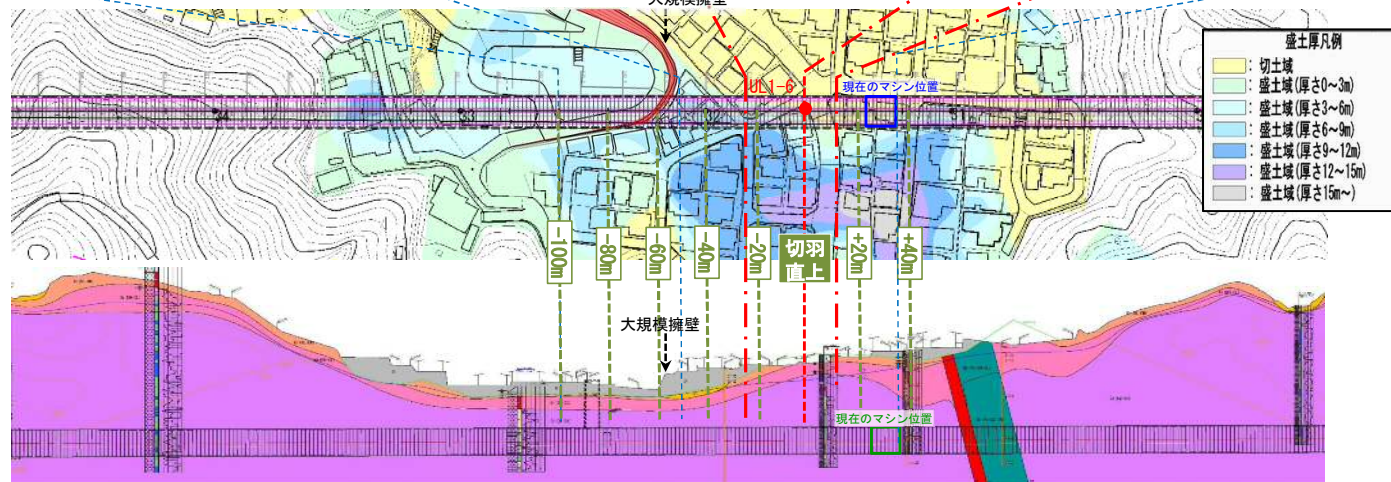
3 変位要因の分析 3.2 地表面変位の変動状況の検証

①「切羽距離」から見た整理 ※掘進データとの関連性 【計測点UL1-6における「地表面変位と切羽圧・裏込め注入圧」との関連性】

○計測点UL1-6を通過する前後の掘進データとして、切羽圧(泥水圧)は、住宅地区間での地表面沈下の抑制を考慮した施工計画にしたがい、静水圧よりも0.1MPa程度高い圧力で掘進管理していた。また、裏込め注入圧も施工計画にしたがい、切羽圧+0.2MPa程度(静水圧+0.3MPa程度)で掘進管理していた。
○UL1-6の変位(隆起)傾向は、切羽がUL1-6を通過する25m程度手前から見られており、マシンテールが通過した後あたりから更に大きくなっている。



平面図



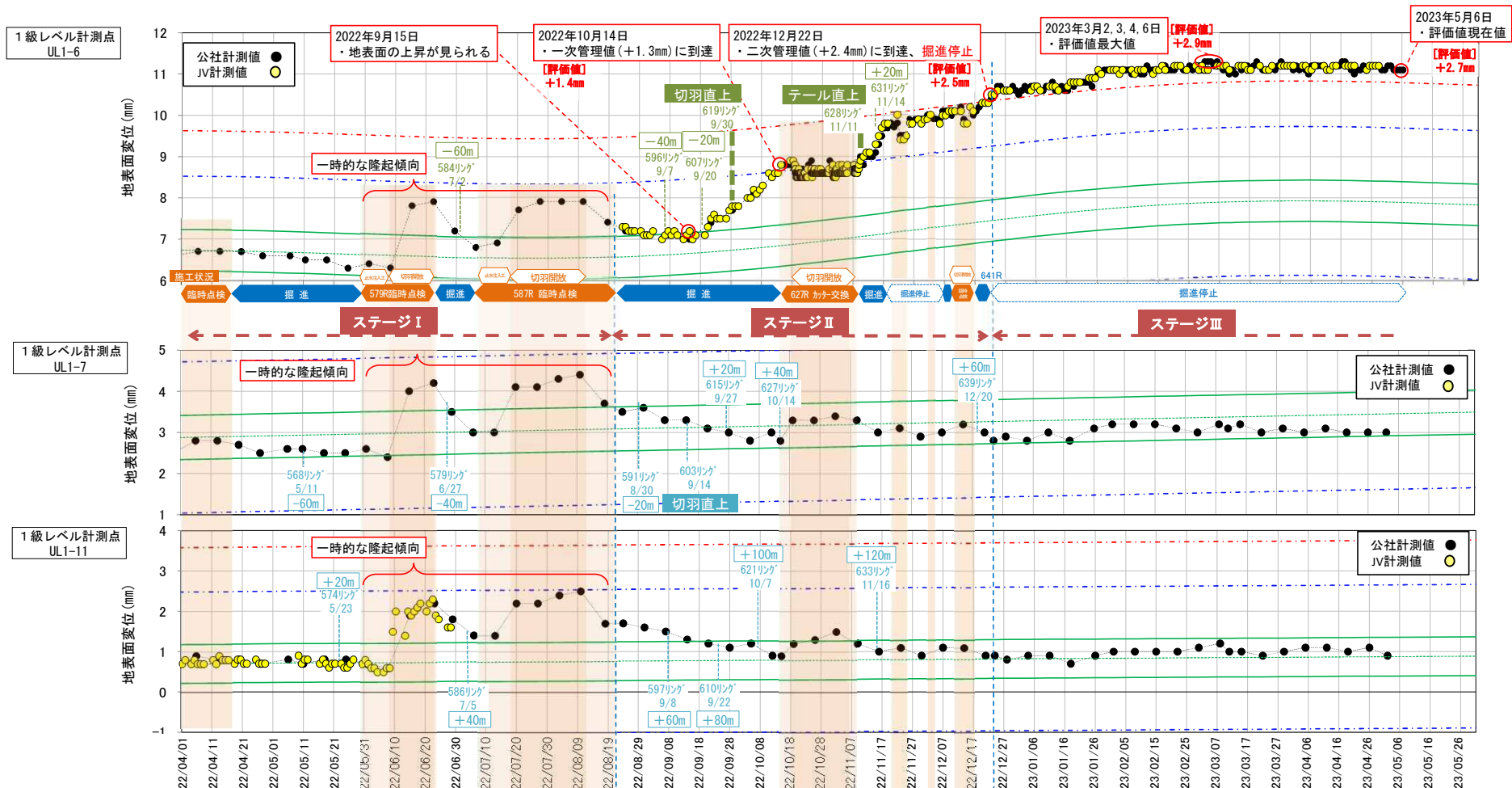
地質縦断面図
(土被り厚)

3 変位要因の分析 3.2 地表面変位の変動状況の検証

②-1「時系列」から見た整理

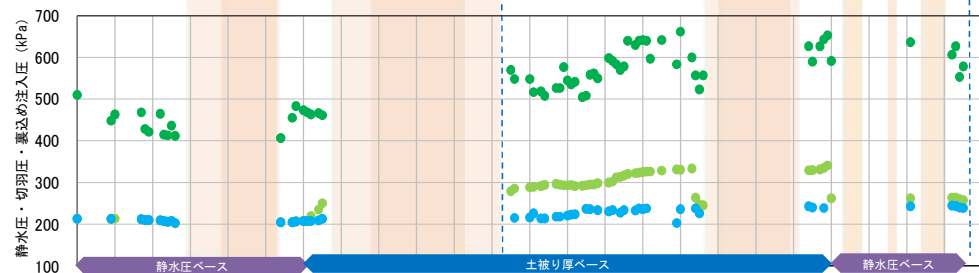
【UL1-6および周辺計測点UL1-7・UL1-11 (UL1-6と同様にUS-5を基準点とする計測点)における地表面変位の変動状況の確認】

○579・587リングの切羽開放時は、3点とも同様の一時的な隆起傾向が見られる。(587リングの復水後は、UL1-6は基準線の変動幅上限線程度まで戻っており、UL1-7・UL1-11は復水した2か月後(10月中旬)に基準線と同程度まで戻っている。) [ステージⅠ]
○掘削時に、UL1-6に隆起(627・638リングの切羽開放時は沈下)が見られた際、UL1-7・UL1-11に大きな変動は見られない [ステージⅡ]。



掘進データ

- 静水圧
- 切羽圧 (泥水圧)
- 裏込め注入圧

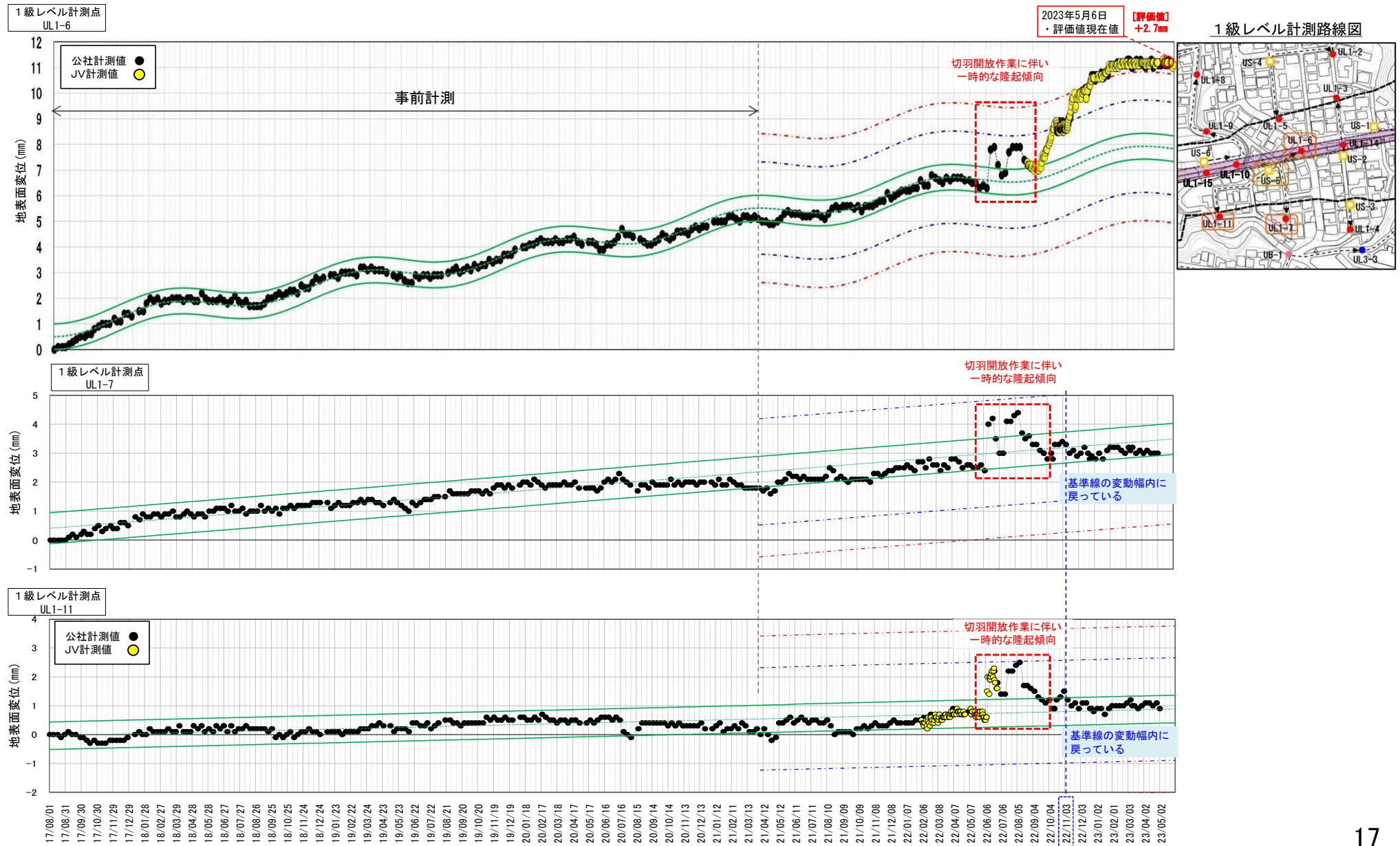


3 変位要因の分析 3.2 地表面変位の変動状況の検証

②-1「時系列」から見た整理

【UL1-6および周辺計測点UL1-7・UL1-11 (UL1-6と同様にUS-5を基準点とする計測点)における地表面変位の変動状況の確認】

- 1級レベル計測点UL1-6・UL1-7・UL1-11の事前計測開始時(2017/8/1)からの計測結果を示す。
- 事前計測開始時から現在までの長期的な変動状況において、579・587リングの切羽開放時におけるUL1-7・UL1-11の隆起傾向は、一時的な変動であり、2022年11月以降、基準線の変動幅内に戻っている。



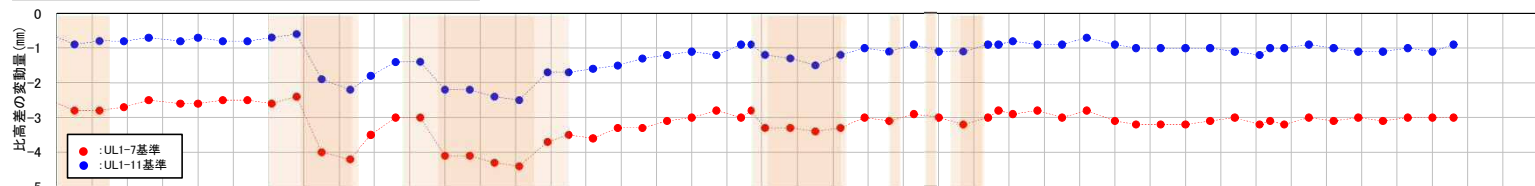
3 変位要因の分析 3.2 地表面変位の変動状況の検証

②-1「時系列」から見た整理 【UL1-6および周辺計測点UL1-7・UL1-11 (UL1-6と同様にUS-5を基準点とする計測点)における地表面変位の変動状況の確認】

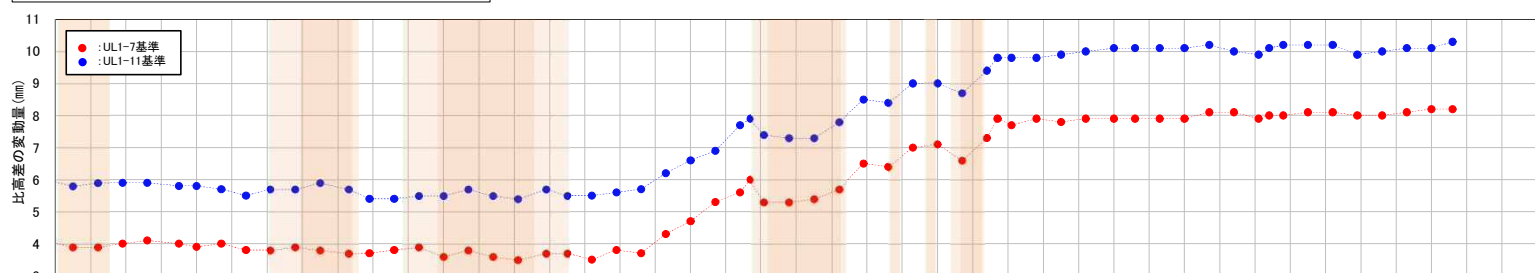
○計測点UL1-7・UL1-11はトンネル掘削影響範囲の45度線の外に位置しているため、不動点と仮定し、それを基準としたUL1-6・US-5の比高差の変動について整理を行った。

- ・US-5については、579・587リングでの切羽開放時に一時的な沈下傾向が見られる。(層別沈下計の計測結果と傾向が異なる。)[ステージⅠ]
- ・UL1-6については、579・587リングでの切羽開放時にはほぼ変位が見られない。(US-5を基準とした計測結果と傾向が異なる。)[ステージⅠ]
- ・UL1-6の隆起傾向については、2022年9月15日頃から上昇が見られており、掘進停止(2022年12月22日)までの傾向はUS-5を基準とした計測結果と概ね一致している。[ステージⅡ] また、掘進停止以降の傾向も、概ね一致している。[ステージⅢ]

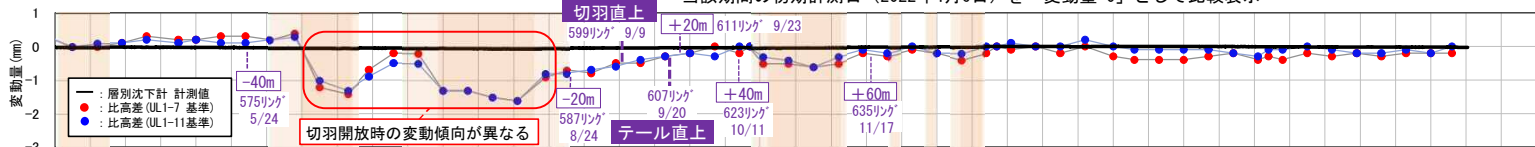
US-5の比高差の変動※1 (UL1-7基準・UL1-11基準) ※1 事前計測開始時(2017年8月1日)を初期値とした変動量



UL1-6の比高差の変動※1 (UL1-7基準・UL1-11基準)



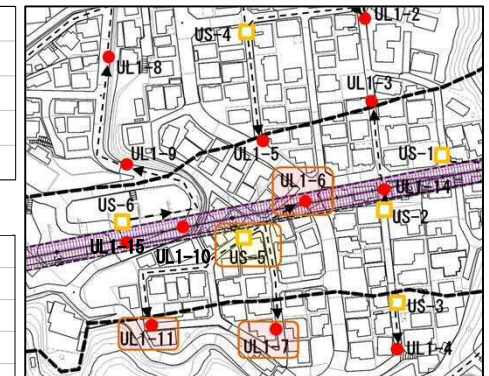
US-5の比高差 と 層別沈下計US-5計測値 の変動傾向の比較※2 ※2 傾向を比較するため、トンネル掘削影響が及ばない切羽通過前のタイミングである当該期間の初期計測日(2022年4月6日)を「変動量 0」として比較表示



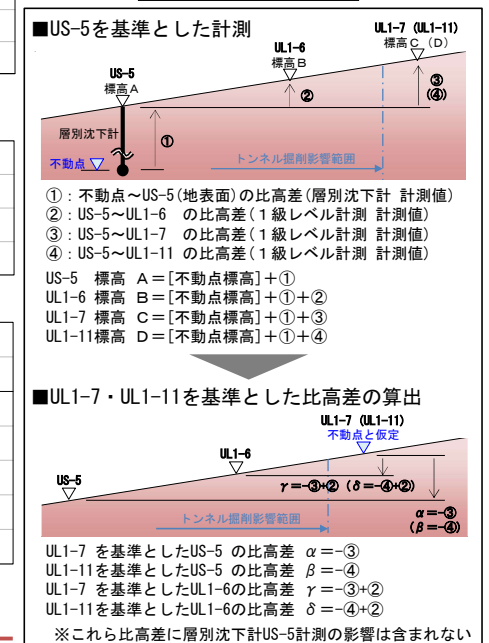
UL1-6の比高差 と US-5を基準としたUL1-6計測値 の変動傾向の比較※2



1級レベル計測路線図



比高差の算出イメージ



②-2「時系列」から見た整理 【UL1-6における「地表面変位と地下水位観測孔の標高水位等」との関連性】

1 級レベル計測点
UL1-6

● 公社計測値
● JV計測値

2022年9月15日
・地表面の上昇が見られる

2022年10月14日
・一次管理値(+1.3mm)に到達

2022年12月22日
・二次管理値(+2.4mm)に到達、掘進停止

2023年3月2, 3, 4, 6日
・評価値最大値

2023年5月6日
・評価値現在値

地表面変位 (mm)

層別沈下計
US-5

目盛幅1mm

地表面
アンカー① (GL-4.7m)
アンカー② (GL-12.6m)
アンカー③ (GL-17.6m)
アンカー④ (GL-34.4m)
不動点 (GL-47.0m)

地下水位観測孔
B-17・B-22・擁壁-1

標高水位 (0Lm)

気温・日平均気温
時間雨量

気温 (°C)

時間雨量 (mm)

時間 (時)



3 変位要因の分析 3.2 地表面変位の変動状況の検証

【まとめ】

①「切羽距離」から見た整理 ※掘進データとの関連性

- 計測点UL1-6における
 - ・「地表面変位と切羽圧・裏込め注入圧」との関連性

②-1「時系列」から見た整理 ※掘進データとの関連性

- 計測点UL1-6における
 - ・「地表面変位と切羽圧・裏込め注入圧」との関連性
- 計測点UL1-6と同様にトンネル直上に位置する計測点[UL1-10・1-15]における
 - ・「地表面変位と切羽圧・裏込め注入圧」との関連性
- 計測点UL1-6およびUL1-6と同様にUS-5を基準点とする計測点[UL1-7・1-11]における
 - ・地表面変位の変動状況の確認

②-2「時系列」から見た整理 ※地下水位観測孔の標高水位・雨量・気温との関連性

- 計測点UL1-6における
 - ・「地表面変位と地下水位観測孔の標高水位等」との関連性

【ステージⅠ】

※切羽開放時に
UL1-6が隆起した
要因の検討

- ・UL1-6およびUL1-6同様にUS-5を基準点とするUL1-7・UL1-11では、579・587リングの切羽開放時に3点とも同様の一時的な隆起傾向が見られる。
(587リングの復水後は、UL1-6は基準線の変動幅上限線程度まで戻っており、UL1-7・UL1-11は復水した2か月後(10月中旬)に基準線と同程度まで戻っている。)【②-1】
- ・UL1-7・UL1-11を不動点と仮定し、それを基準としたUS-5・UL1-6の比高差の変動傾向は、層別沈下計やUS-5を基準とした計測結果と異なっている。【②-1】
- ・UL1-6の基準点であるUS-5では、579・587リングの切羽開放時に(切羽から約20～30mの距離で)地表面の変動は見られていないが、アンカー③が579リングの切羽開放後に隆起している。【②-1】

【ステージⅡ】

※シールド掘進時に
UL1-6が隆起
した要因の検討

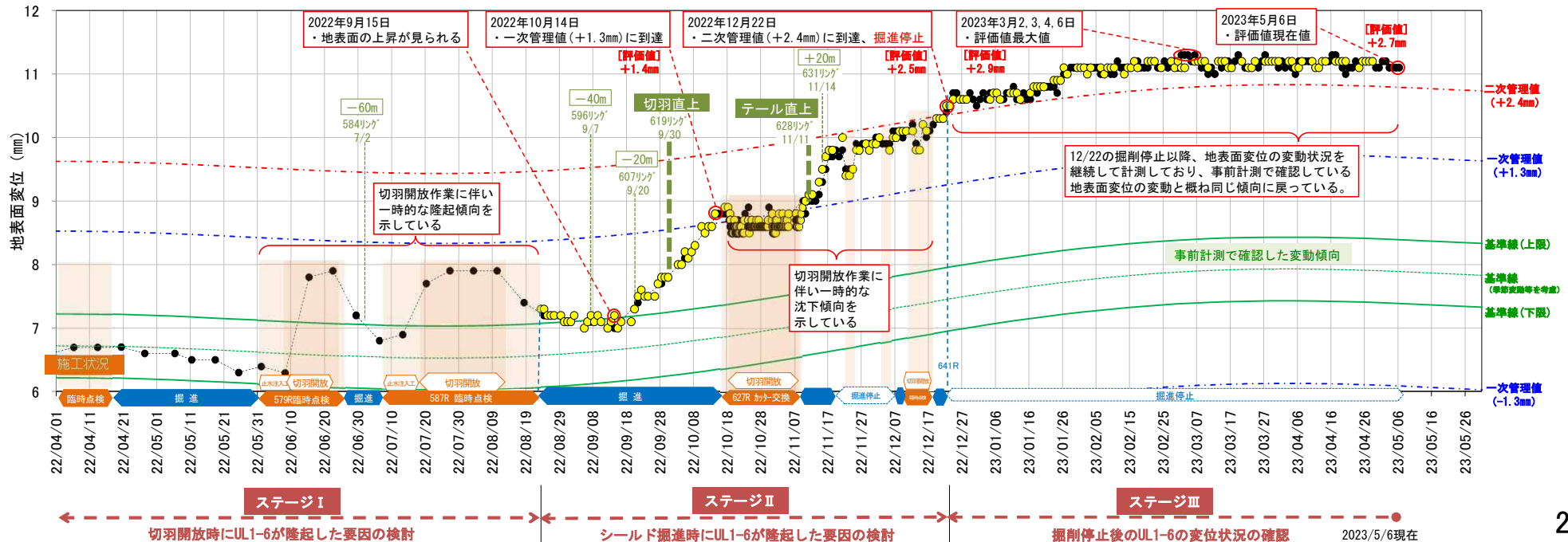
- ・UL1-6の変位(隆起)傾向は、切羽がUL1-6を通過する25m程度手前から見られており、マシンテールが通過した後あたりから更に大きくなっている。
切羽がUL1-6を40m程度通過した現在のマシン位置まで、切羽圧・裏込め注入圧の増加にあわせて地表面変位に隆起が見られる。【①】【②-1】
- ※UL1-6の70m程度手前にある計測点UL1-10においても同様に、切羽がUL1-10を通過する25m程度手前から通過後40m程度まで隆起が見られる。【②-1】
- ・UL1-7・UL1-11を基準としたUL1-6の比高差の変動は、2022年9月15日頃から上昇が見られており、US-5を基準とした計測結果と概ね一致している。【②-1】
- ・掘削時に、UL1-6の周辺に位置するB-17において、細かな地下水位変動(上昇)が見られる。【②-2】

【ステージⅢ】

※掘削停止後の
UL1-6の変位状況
の確認

- ・2022年12月22日の掘削停止以降、地表面変位の変動状況を継続して計測しており、事前計測で確認している地表面変位の変動と概ね同じ傾向に戻っている。UL1-7・UL1-11を基準としたUL1-6の比高差の変動も、US-5を基準とした計測結果と概ね一致している。【②-1】

■計測点と切羽との位置関係および施工状況との比較 (2022年4月1日～2023年5月6日)

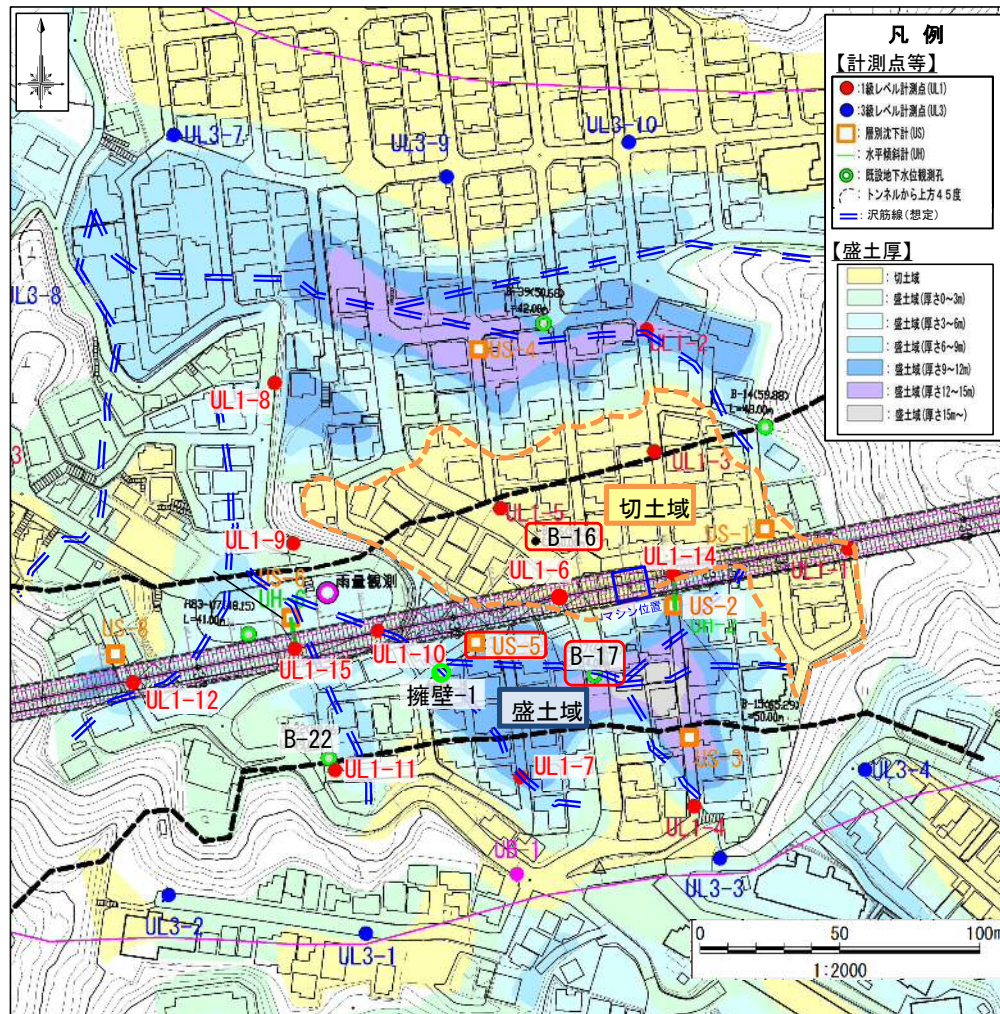


3 変位要因の分析 3.3 近傍の地盤状況との関連性

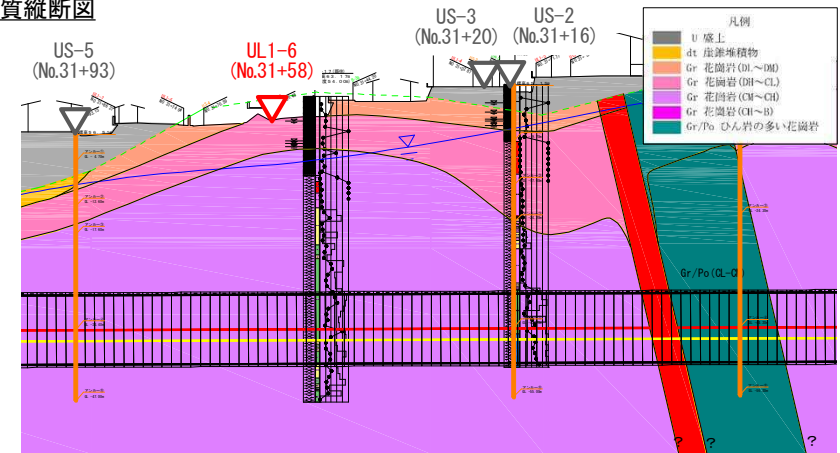
○隆起傾向が確認された計測点UL1-6近傍の地盤状況について検討を行った。

- ①【旧地形】・トンネル直上付近の地表面の状況は、牛田地区住宅地区間の前半は概ね盛土域、UL1-6付近以降は切土域で切土・盛土の境界付近に位置している。
 - ・近傍の盛土域では、複数の沢筋が合流しており、水の集まりやすい状況である。
 - ・UL1-6の地表付近にはDH～DL級の風化花崗岩が露頭している。
- ②【ボーリング調査結果】・UL1-6近傍のB-16から、トンネル掘削深さ上部には、亀裂の存在が確認できる。

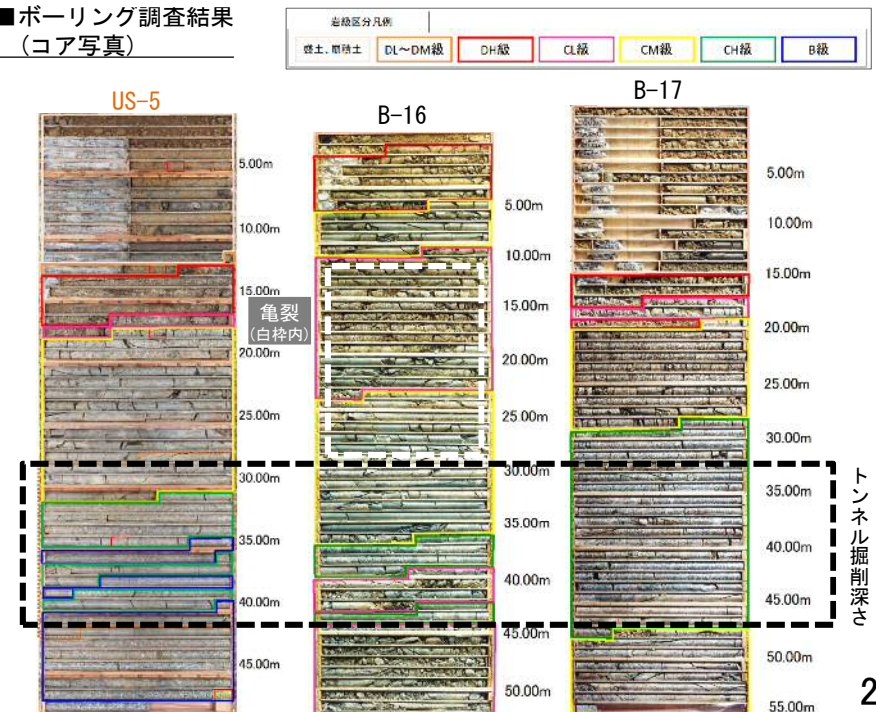
■平面図



■地質縦断面図



■ボーリング調査結果 (コア写真)



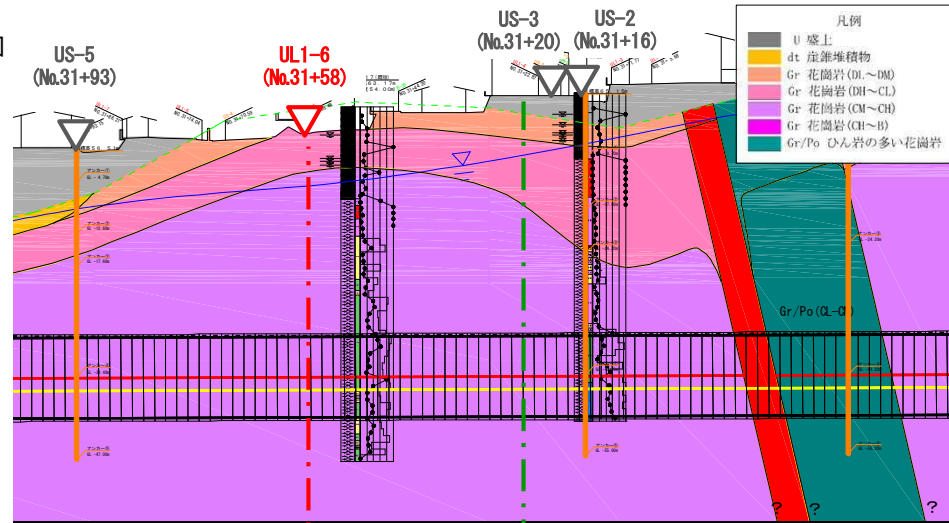
3 変位要因の分析 3.3 近傍の地盤状況との関連性

○隆起傾向が確認された計測点UL1-6近傍の地盤状況について検討を行った。

③【前方探査結果】・UL1-6の変位(隆起)の傾向が大きくなったマシンテール通過以降では、エネルギー指標値が小さくなっており、これまでの施工区間と比べて軟質な岩盤と判定される。

○UL1-6付近の地盤状況は、①～③のことから、周辺地盤と比べて泥水の過度な浸透により亀裂や土粒子間隙に泥水の細粒分が浸入しやすく、地下水位の一時的な変動(上昇)に伴う地盤変状の影響を受けやすいことが推察される。

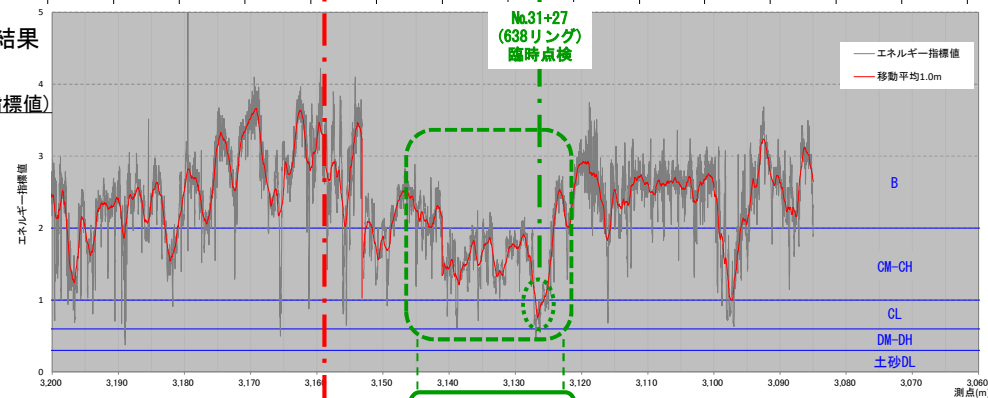
■地質縦断面図



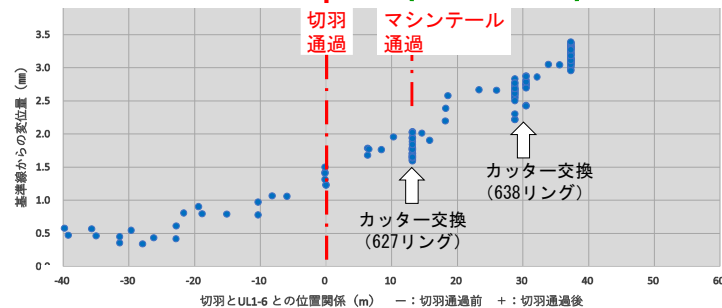
■前方探査結果

前方探査結果

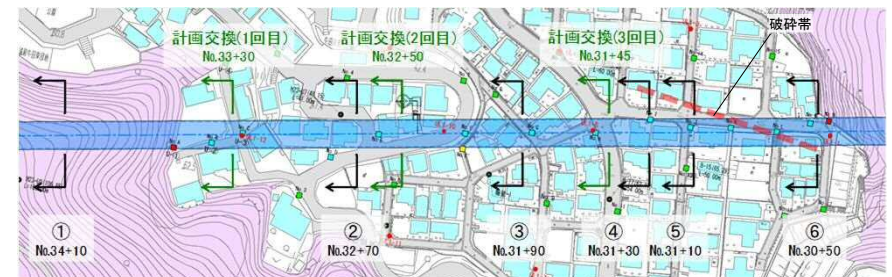
(エネルギー指標値)



UL1-6
地表面変位

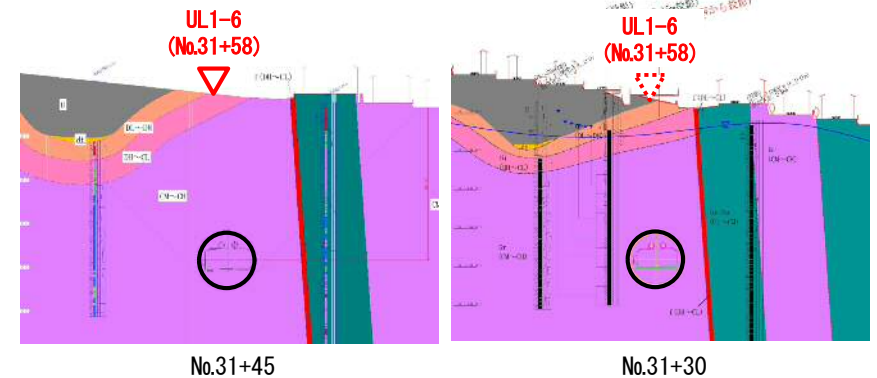


■平面図



※ノンコア前方探査結果を反映

■横断面図



■切羽開放作業時の切羽点検結果

No.31+27 (638リング) 臨時点検時

[切羽開放直後]

- ・切羽面は不陸が多く、ディスクカッターの通過跡(筋状)が付いている部分が少ない。
- ・左上部および右下部に肌落ちあり(奥行き最大620mm)。
- ・点検作業中に新たに肌落ちが発生。中央部を中心に肌落ちが進行(奥行き最大920mm)。

⇒亀裂・節理が比較的多い



3 変位要因の分析 3.4 変位解析による検証

○掘進時の実際の切羽圧および裏込め注入圧による地表面 UL1-6 への影響について、地下水位変動の影響を踏まえた変位解析により検証した。解析は、第4回施工管理委員会における切羽開放を想定した変位解析と同じ手法および地盤条件とし、実際の施工時を反映した圧力条件およびステップとした。

○その結果、UL1-6地点で隆起が生じることを確認した。（地表面変位の解析値：+0.3~0.5mm程度、最大変位部：+0.4~0.9mm程度）

1) 解析方法（圧力条件およびステップ以外は、第4回施工管理委員会での地下水位低下影響の解析検証と同様）

解析手法：三次元非定常浸透流解析〔プログラム名 AC-UNSAF3D-C〕

位置：第4回施工管理委員会での検証断面のうち、「計画交換(3回目)」(No.31+45)※

モデル：牛田地区全域を網羅した三次元モデル

※ UL1-6の直近に位置する解析断面

圧力条件：case-1 切羽およびマシン外周に泥水圧（静水圧+0.1MPa）を作用

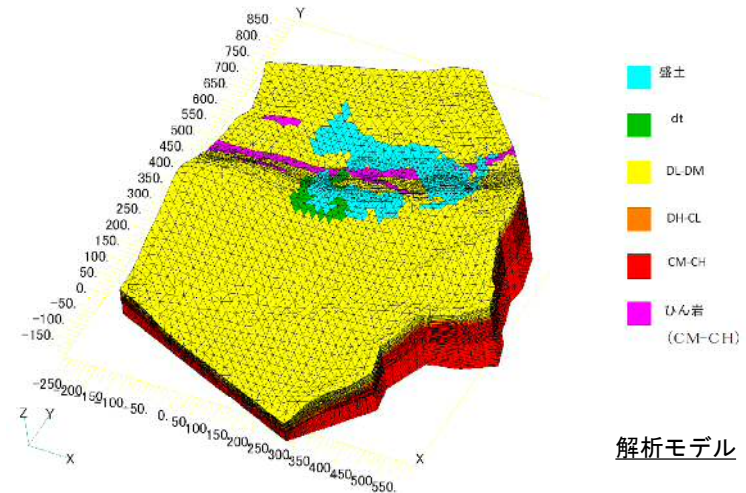
case-2 切羽およびマシン外周に泥水圧（静水圧+0.1MPa）を、
マシン外周テール部（1メッシュ分、L=3.25m）に
裏込め注入圧（静水圧+0.3MPa）を作用

ステップ：初期定常状態 → 上記圧力を3日間作用 → 初期水頭まで即復旧

物性値等：降雨条件…平成元年～令和元年の降雨データのうち、年間降雨量が最も少ない
平成6年のデータより平均降雨量を設定

水理条件…既往の地質調査結果に基づき設定

水理定数の設定に地盤物性値を用いる場合、埋土層（U）を除く
地盤について初期掘進実績データに基づく想定岩強度比を反映



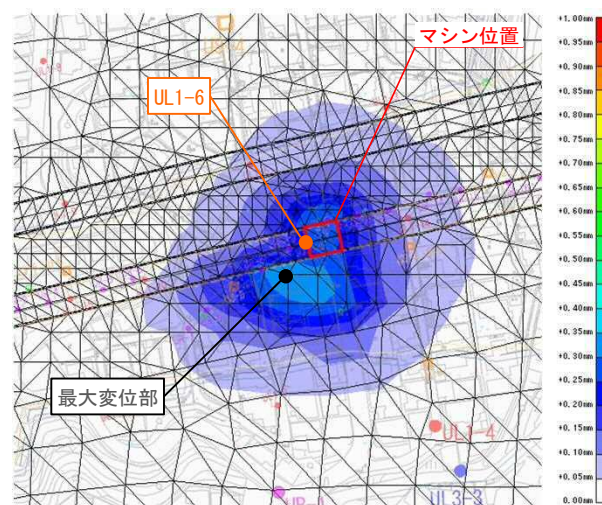
解析モデル

2) 解析結果

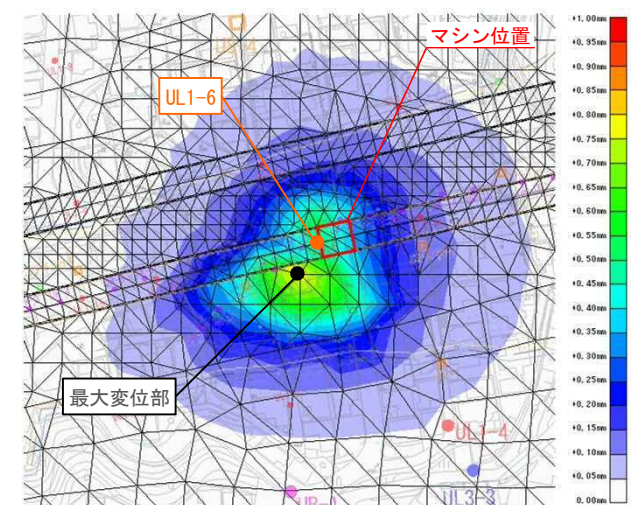
解析結果一覧

解析ケース	地点	地表面 変位量※	地下水位 変動量※
case-1 (泥水圧)	UL1-6	+0.26mm	+0.17m
	最大変位部	+0.39mm	+0.17m
case-2 (泥水圧 +裏込め注入圧)	UL1-6	+0.51mm	+0.34m
	最大変位部	+0.88mm	+0.36m

※ 圧力作用3日後



地表面変位コンター（case-1）

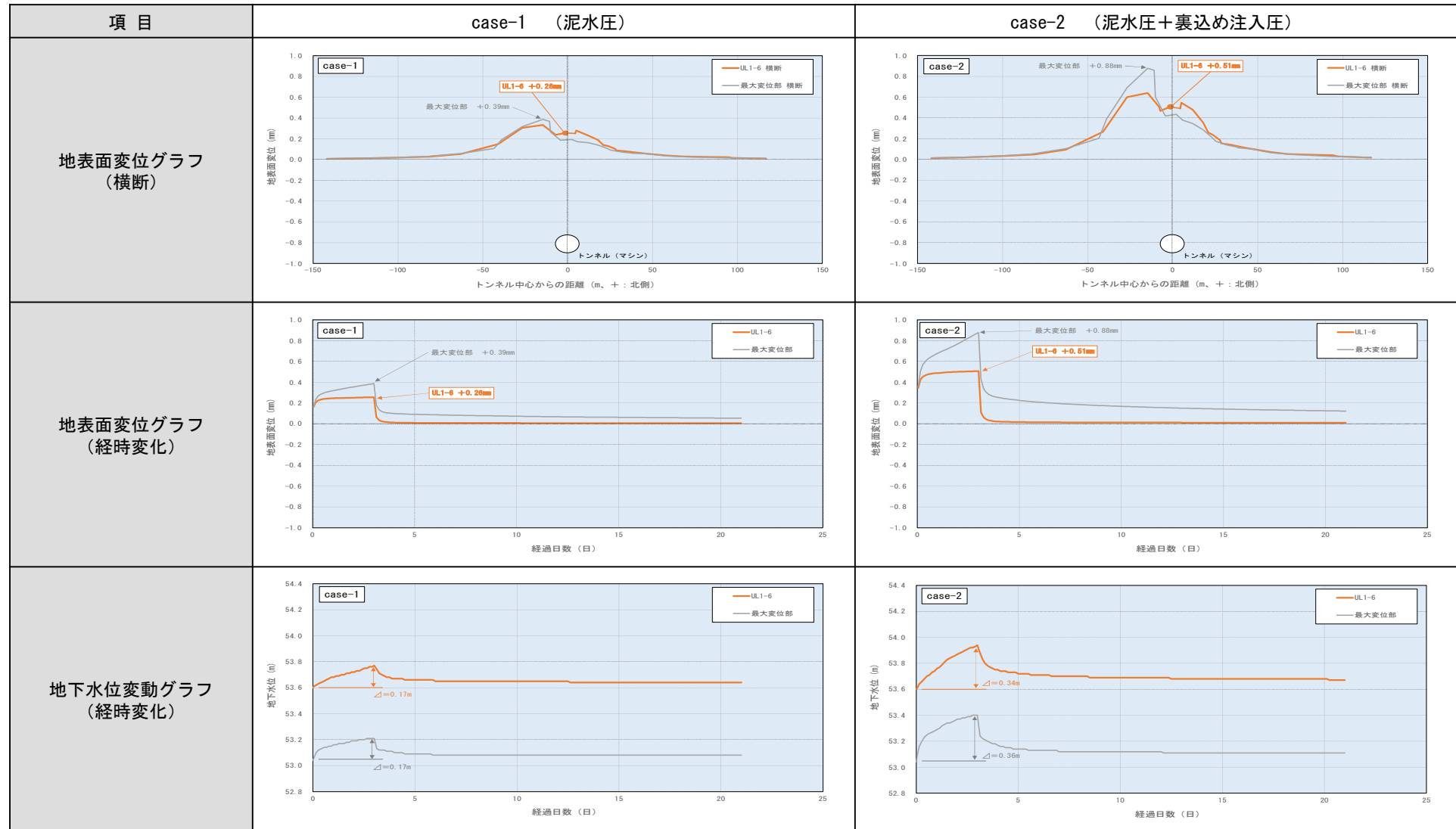


地表面変位コンター（case-2）

3 変位要因の分析 3.4 変位解析による検証

○変位解析において、UL1-6地点で生じた隆起については、作用圧力を静水圧（初期水頭）に戻した後は、変位は比較的早期に沈下回復する傾向（弾性変形）を示している。※当該解析では、作用圧力の残存影響やシールドの移動に伴う影響の累積については再現できない。

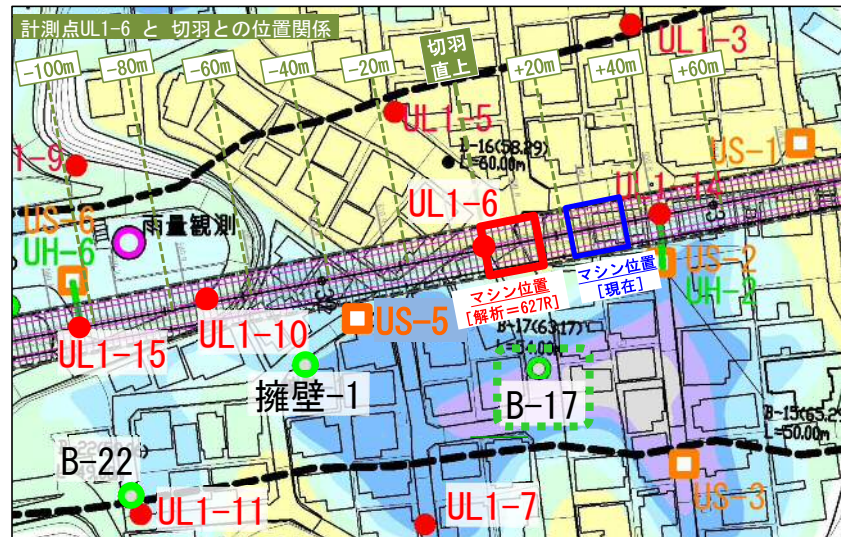
2) 解析結果



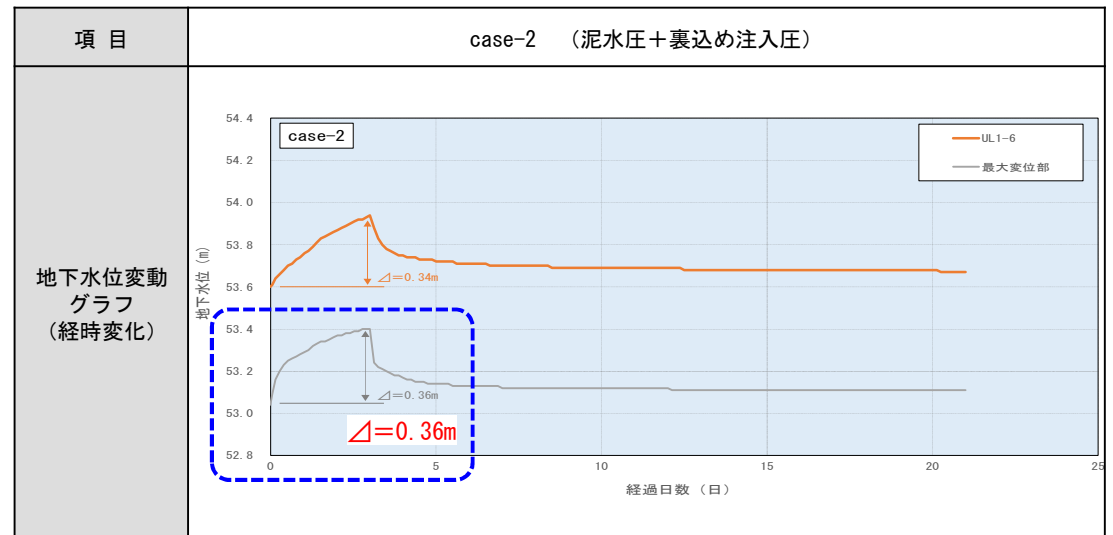
3 変位要因の分析 3.4 変位解析による検証

○変位解析の再現性の検証として、変位解析における地下水位変動量の解析値と、周辺に位置する地下水位観測孔 [B-17] の実測値との比較を行った結果、実測値 (0.31~0.35m程度) は解析値 (0.36m) と概ね一致している。

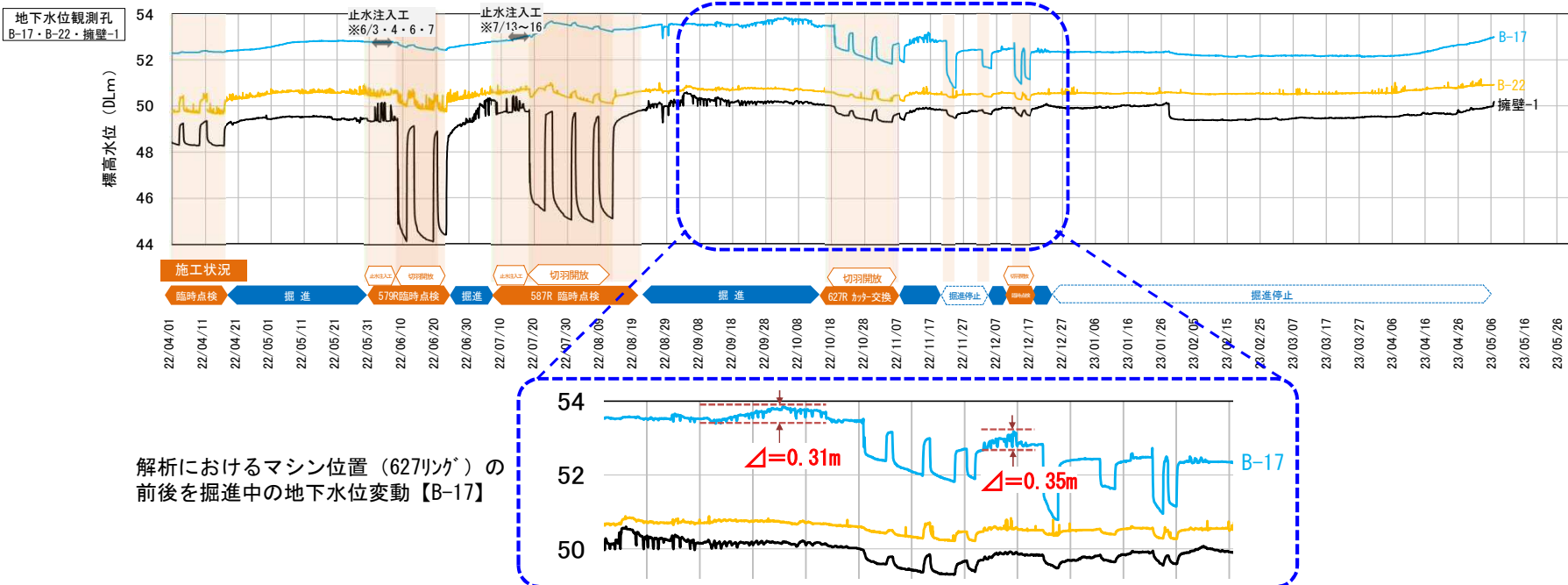
■平面図 ※変位解析時のマシン位置・地下水位観測孔位置図



■変位解析結果



■地下水位観測孔の水位変動状況【B-17】

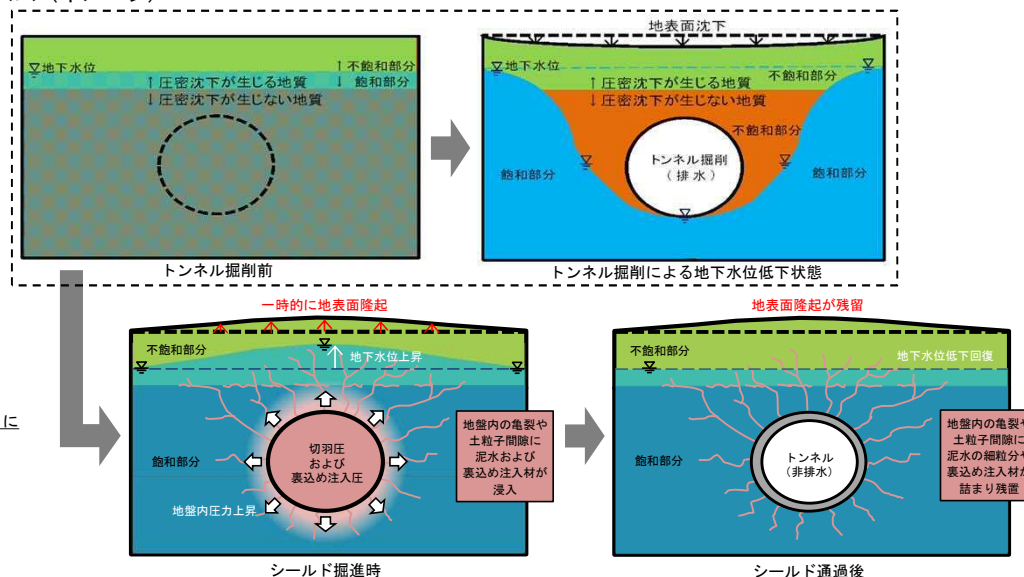


3 変位要因の分析 3.5 変位要因のまとめ

分析項目	確認された事項	変位要因
地表面変位の 変動状況 の検証	(ステージⅠ) ・ UL1-6およびUL1-6同様にUS-5を基準点とするUL1-7・UL1-11では、579・587リングの切羽開放時に3点とも同様の一時的な隆起傾向が見られる。(587リングの復水後は、UL1-6は基準線の変動幅上限線程度まで戻っており、UL1-7・UL1-11は復水した2か月後に基準線と同程度まで戻っている。) ・ UL1-7・UL1-11を不動点と仮定し、それを基準としたUS-5・UL1-6の比高差の変動傾向は、層別沈下計やUS-5を基準とした計測結果と異なっている。 ・ UL1-6の基準点であるUS-5では、579・587リングの切羽開放時に(切羽から約20～30mの距離で)地表面の変動は見られていないが、アンカー③が579リングの切羽開放後に隆起している。	・ 2022年6～8月のUL1-6の隆起は、約60m手前での切羽開放時であることから、当時UL1-6よりも切羽に近くUL1-6計測の基準点である層別沈下計US-5が、一時的な沈下に追随していない可能性もある。しかしながら、US-5が沈下していた場合においても、これまで公表しているUL1-6の評価値を上回ることはない。このため、引き続き計測データ等を蓄積し、UL1-6への影響を含め精査・検証ができた段階で報告する。
	(ステージⅡ) ・ UL1-6の変位(隆起)傾向は、切羽がUL1-6を通過する25m程度手前から見られており、マシンテールが通過した後あたりから更に大きくなっている。切羽がUL1-6を40m程度通過した現在のマシン位置まで、切羽圧・裏込め注入圧の増加にあわせて地表面変位に隆起が見られる。 ※UL1-6の70m程度手前にある計測点UL1-10においても同様に、切羽がUL1-10を通過する25m程度手前から通過後40m程度まで隆起が見られる。 ・ UL1-7・UL1-11を基準としたUL1-6の比高差の変動傾向は、US-5を基準とした計測結果と概ね一致している。 ・ 掘削時に、UL1-6の周辺に位置するB-17において、細かな地下水位変動(上昇)が見られる。	[切羽圧(泥水圧)の影響] ・ 掘進時の切羽圧(泥水圧)および裏込め注入圧によって、シールド周辺の地盤内圧力が上昇するとともに、地下水位の変動(上昇)に伴って地盤の飽和領域が拡大し、地表面が隆起した。
	(ステージⅢ) ・ 掘削停止以降、地表面変位の変動状況を継続して計測しており、事前計測で確認している地表面変位の変動と概ね同じ傾向に戻っている。UL1-7・UL1-11を基準としたUL1-6の比高差の変動も、US-5を基準とした計測結果と概ね一致している。	[亀裂状況や泥水性状の影響] ・ これまでの施工区間と比べ軟質で節理や亀裂を有する地盤において、飽和領域地盤内の亀裂や土粒子間隙に泥水の細粒分や裏込め注入材が浸入して詰まり、シールドが通過して地下水位が回復した後も地表面隆起がそのまま残留した。また、シールドの掘進(移動)に伴い、その影響が累積された。
近傍の地盤状況との 関連性	UL1-6付近の地盤状況は、以下のことから、周辺地盤と比べて、泥水の過度な浸透により亀裂や土粒子間隙に泥水の細粒分が浸入しやすく、地下水位の一時的な変動(上昇)に伴う地盤変状の影響を受けやすいことが推察される。 ・ トンネル直上付近の地表面の状況は、住宅地区間の前半は概ね盛土域、UL1-6付近以降は切土域で切土・盛土の境界付近に位置しており、地表付近にはDH～DL級の風化花崗岩が露頭している。 ・ トンネル掘削深さ上部には、亀裂の存在が確認できる。 ・ 旧地形としては、近傍の盛土域では複数の沢筋が合流しており、水の集まりやすい状況である。	※下図「シールド掘進による地盤変位の分類」における経時的な②～④の過程を経るなかで、地表面隆起が残留し、シールドの掘進(移動)に伴い、その影響が累積されたものと推定。
変位解析 による検証	切羽圧および裏込め注入圧を考慮した変位解析検討において、掘進中の切羽圧および裏込め注入圧による地下水位変動に伴い、UL1-6地点で隆起が生じることを確認した(地表面変位 解析値: 最大+0.9mm程度)。	

■地表面隆起のメカニズム (イメージ)

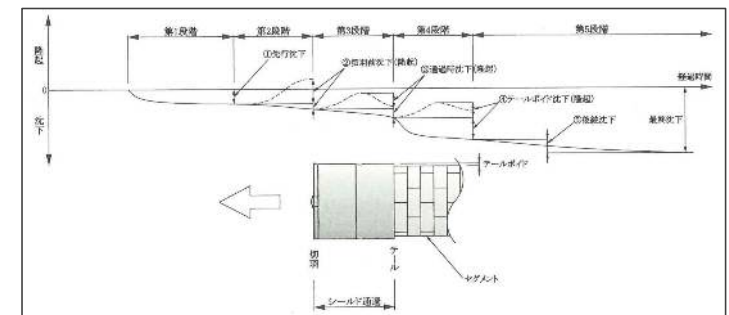
【参考】
NATM工法(排水トンネル)
における地表面沈下
(第5回広島高速5号線
トンネル安全検討委員会
資料より引用)



シールド工法(非排水トンネル)に
おける地表面隆起(今回)

■シールド掘進による地盤変位の分類※

※トンネル標準工事書「シールド工法編」・同解説より引用



4 対策案の検討

4 対策案の検討 4.1 変位解析による影響予測

○今後の牛田地区住宅地区間における掘進時の切羽圧および裏込め注入圧の影響による地下水位変動に伴う地表面変位量を、今後掘削を行う区間の計測点であるUL1-14 及び UL1-1 について、UL1-6と同様の解析手法により予測した。解析は、切羽圧を A) 静水圧ベース（「静水圧+0.02MPa」を目標値）で管理する場合、B) 土被り厚ベース（「土被り厚×泥水比重1.10」を上限値）で管理する場合の2ケースで検討した。

1) 解析方法（位置および圧力条件以外は、UL1-6での解析検証と同様）

解析手法： 三次元非定常浸透流解析 [プログラム名 AC-UNSAF3D-C]

位置： 第4回施工管理委員会での検討断面を含む次の4断面
No.31+30、No.31+10、No.30+90、No.30+50

モデル： 牛田地区全域を網羅した三次元モデル

圧力条件： Case-A 切羽およびマシン外周に泥水圧を作用

泥水圧： 静水圧+0.02MPa

マシン外周テール部（1メッシュ分、L=3.25m）に裏込め注入圧を作用

裏込め注入圧： 泥水圧+0.30MPa（静水圧+0.32MPa）

Case-B 切羽およびマシン外周に泥水圧を作用

泥水圧： 土被り厚×泥水比重（1.10）

マシン外周テール部（1メッシュ分、L=3.25m）に裏込め注入圧を作用

裏込め注入圧： 泥水圧+0.30MPa

ステップ： 初期定常状態 → 上記圧力を3日間作用 → 初期水頭まで即復旧

物性値等： 降雨条件…平成元年～令和元年の降雨データのうち、年間降雨量が最も少ない平成6年のデータより平均降雨量を設定

水理条件…既往の地質調査結果に基づき設定

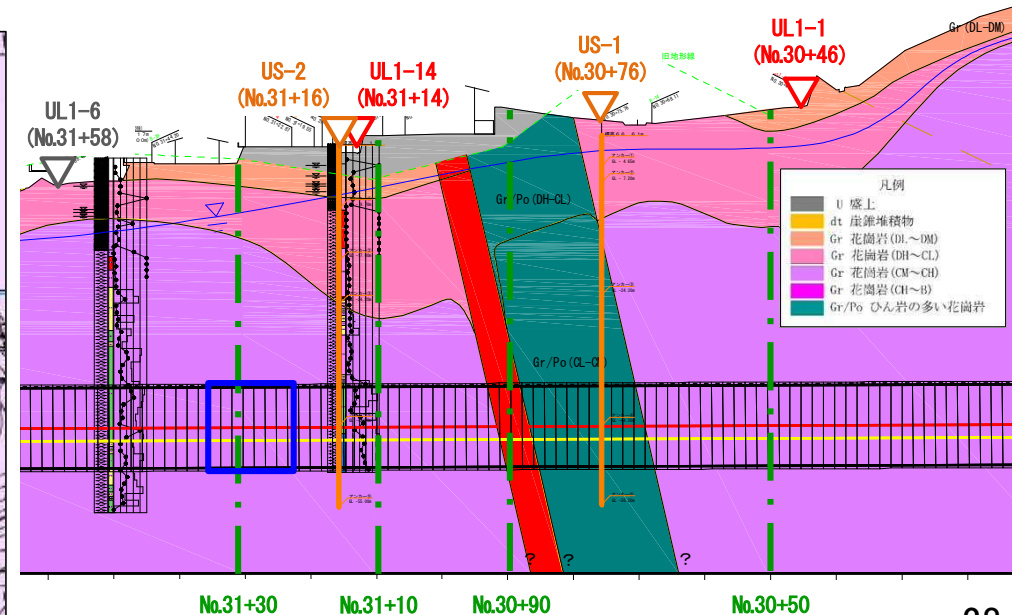
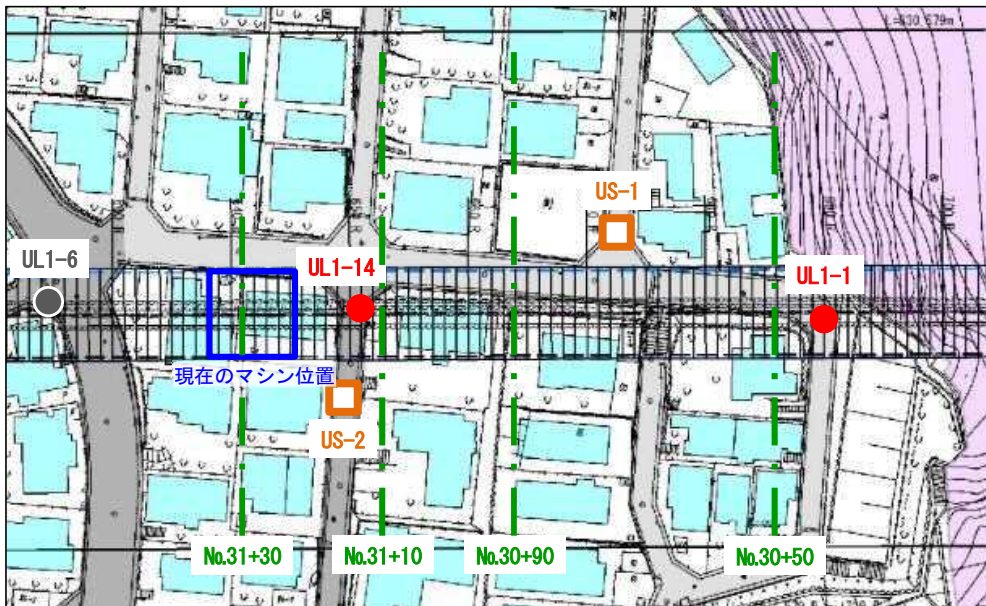
水理定数の設定に地盤物性値を用いる場合、埋土層（U）を除く

地盤について初期掘進実績データに基づく想定岩強度比を反映

検討ケースおよび圧力条件

解析ケース	検討位置	圧力条件（静水圧との関係）
		泥水圧
Case-A 泥水圧+裏込め注入圧 静水圧ベース	No.31+30	静水圧+0.02MPa
	No.31+10	
	No.30+90	
	No.30+50	
Case-B 泥水圧+裏込め注入圧 土被り厚ベース	No.31+30	静水圧+0.07MPa
	No.31+10	静水圧+0.05MPa
	No.30+90	静水圧+0.04MPa
	No.30+50	静水圧+0.05MPa

※裏込め注入圧： 泥水圧+0.30MPa



4 対策案の検討 4.1 変位解析による影響予測

○今後の牛田地区住宅地区間における掘進時の切羽圧および裏込め注入圧の影響による地下水位変動に伴う地表面変位量を、UL1-6と同様の解析手法により予測した。解析は、切羽圧を A) 静水圧ベース（「静水圧+0.02MPa」を目標値）で管理する場合、B) 土被り厚ベース（「土被り厚×泥水比重1.10」を上限値）で管理する場合 の2ケースで検討した際の解析結果を示す。

○ケースA) 静水圧ベースで管理することにより、二次管理値に到達したUL1-6での解析結果（最大変位部での地表面変位量）の2/3程度に地表面の隆起が抑制される結果となる。

2) 解析結果

解析結果一覧

解析ケース	検討位置	地 点	地表面変位量	UL1-6の最大変位部での解析結果(+0.88mm)との比率
			解析値※1	
Case-A 静水圧ベース	No.31+30	最大変位部	+0.59mm	0.67 ⇒約2/3
	No.31+10	最大変位部	+0.55mm	0.63
	No.30+90	最大変位部	+0.55mm	0.63
	No.30+50	最大変位部	+0.57mm	0.65

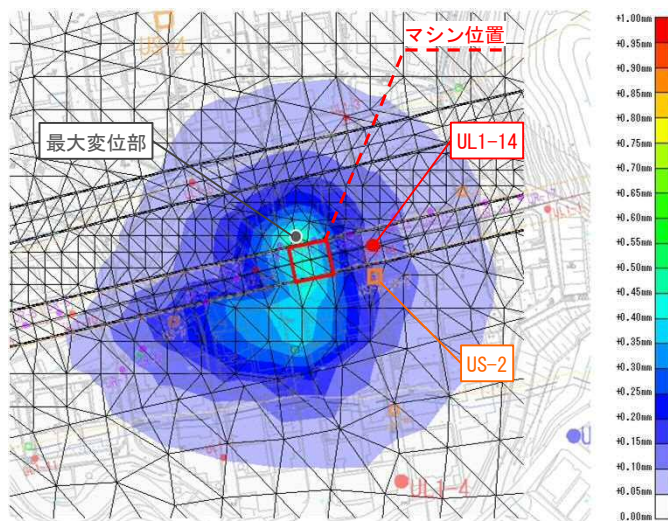
解析ケース	検討位置	地 点	地表面変位量	UL1-6の最大変位部での解析結果(+0.88mm)との比率
			解析値※1	
Case-B 土被り厚ベース	No.31+30	最大変位部	+0.74mm	0.84
	No.31+10	最大変位部	+0.63mm	0.72
	No.30+90	最大変位部	+0.60mm	0.68
	No.30+50	最大変位部	+0.65mm	0.74

最大の変位が生じる断面においても、UL1-6の最大変位量の2/3程度

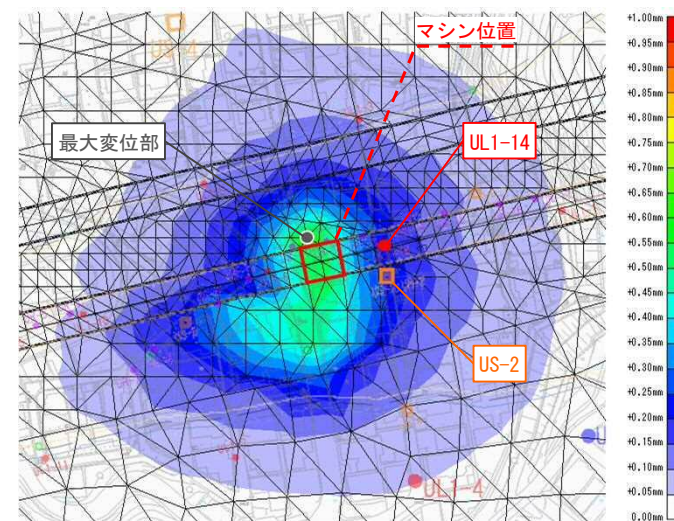
※1 圧力作用3日後

地表面変位コンター

※No. 31+30



Case-A



Case-B

4 対策案の検討 4.2 掘進管理における対策案

○今後の牛田地区住宅地区間掘削にあたり、切羽圧（泥水圧）および泥水品質を次のように見直す。

[今後の牛田地区住宅地区間（破碎帯区間を除く）]

- ・切羽圧を、静水圧ベース（「静水圧+0.02MPa」を目標値）に下げて掘進管理することにより、二次管理値に到達したUL1-6での解析結果（最大変位部での地表面変位量）の2/3程度に地表面隆起の抑制を図る。
- ・泥水の品質を、破碎帯部と同様に比重・粘性を高める（いわゆる「濃い」性状とする）ことにより、泥水の亀裂・間隙への過度な浸透を低減させ、地盤内の圧力の上昇範囲の抑制や地下水位の一時的な変動（上昇）に伴う地盤の飽和領域拡大の抑制を図る。また、亀裂等への細粒分の浸入を減少させることで変位の抑制を図る。なお、地表面変位の計測結果を注視しながら、掘削の進行に伴う変位傾向をふまえ、品質調整を行う。

[破碎帯区間]

- ・切羽圧は応力解放の影響による地表面沈下が懸念されるため、従来計画どおり土被り厚ベース（「土被り厚×泥水比重」を上限値）で管理することを基本とし、地表面変位の計測結果を注視しながら隆起傾向が見られた場合には静水圧ベースに切り替える。

■切羽圧（泥水圧）管理

今後の牛田地区住宅地区間（破碎帯区間を除く）
・「静水圧+0.02MPa」を目標値とし、$\pm 0.02\text{MPa}$を許容範囲として管理する（下限：静水圧、上限：静水圧+0.04MPa）。 ※従来の山間部での管理と同様であり、地表面の隆起および沈下のリスクを考慮した最低限の圧力とする。

破碎帯区間
・「土被り厚×泥水比重（1.10）を上限値とし、上限値-0.04MPa～上限値の範囲を目標値として管理」に加え、静水圧が当該上限値を上回る場合は「静水圧$\pm 0.02\text{MPa}$の範囲を目標値として管理」を行う。 ※従来の牛田地区住宅地区間での管理と同様。

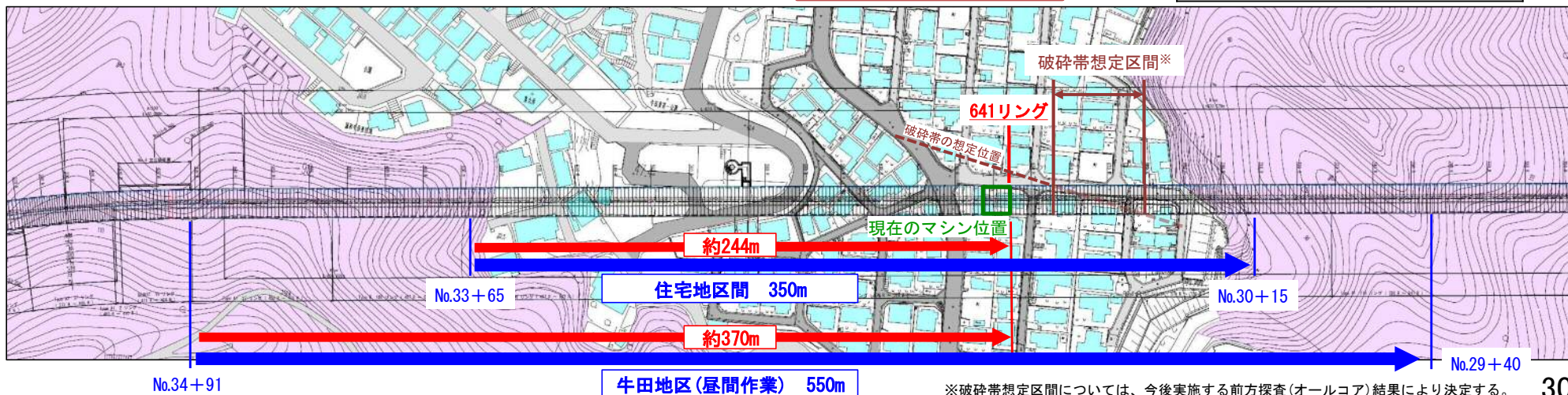
■泥水品質（比重、粘性等）

従来計画

区 間	山間部	牛田地区（住宅地区間）	破碎帯部
泥水品質	比 重：1.25以下 粘 性：19～25秒 濾 水：管理値なし	比 重：1.25以下 粘 性：25秒以上 濾 水：10mL以下	比 重：1.20～1.25 粘 性：30秒以上 濾 水：8mL以下

変更

今後の牛田地区住宅地区間
比 重：1.20～1.25 粘 性：30秒以上 濾 水：8mL以下 ※従来計画の破碎帯部と同様。 ※変位計測結果に応じて調整。



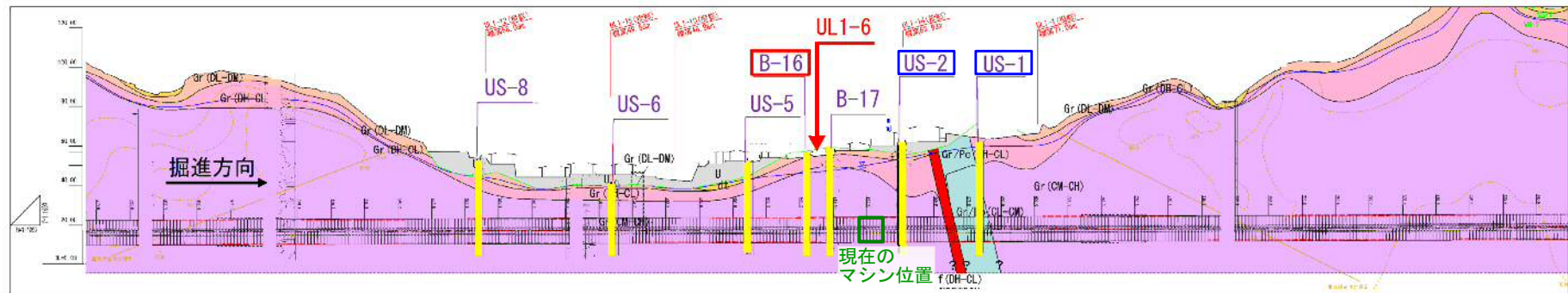
※破碎帯想定区間については、今後実施する前方探査（オールコア）結果により決定する。

4 対策案の検討 4.2 掘進管理における対策案

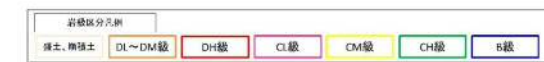
○今後の掘進区間における地盤状況（ボーリング結果）

- ・ UL1-6近傍のB-16と比べて、当該区間に位置するUS-2やUS-1ではトンネル掘削深さ上部に位置するCL～CM級岩盤のRQDが多少大きく、亀裂の存在が比較的減少する状況にあると考えられる。よって、今後の掘進区間では、泥水の過度な浸透に起因する地表面の隆起は、UL1-6周辺と比較して生じにくいと推察する。

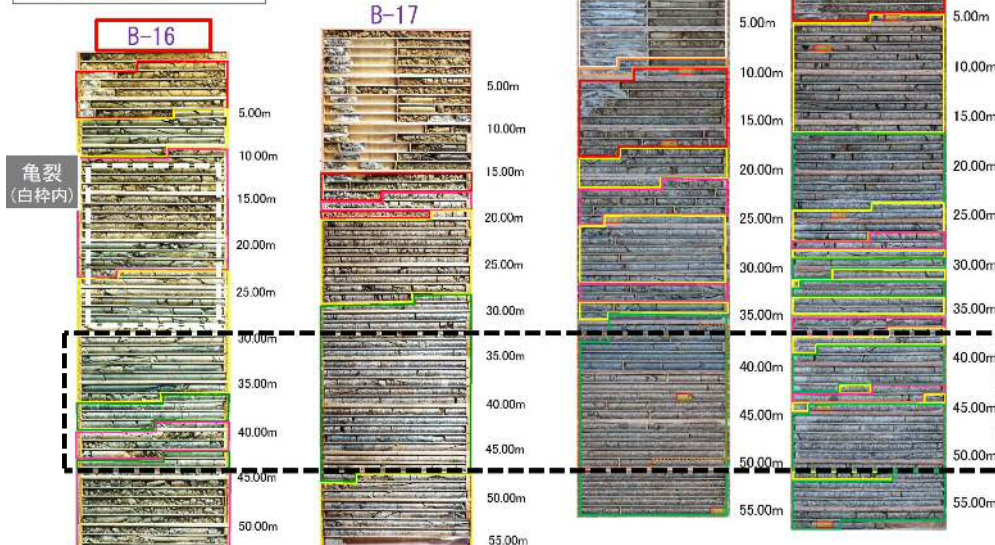
■地質縦断面図



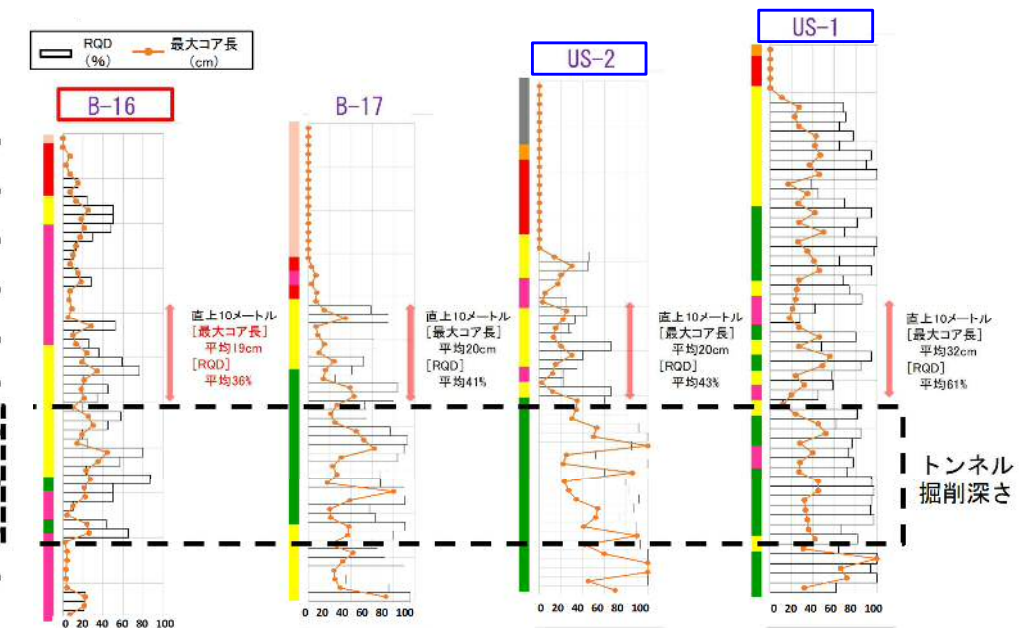
■ボーリングコア写真



層別深下計(US-○)における
アンカー設置位置



■ボーリング柱状図



4 対策案の検討 4.3 計測管理における対策案

○今後の住宅地区間での掘削においては破碎帯部の通過を想定しており、地表面変位に特に留意する必要があることから、UB-1（トンネル掘削影響範囲の45度線の外）を基準とした1級レベル計測を加え、従来計測を補完する。

〔対象〕 US-1、US-2、US-3、UL1-1、UL1-3、UL1-14（6点）

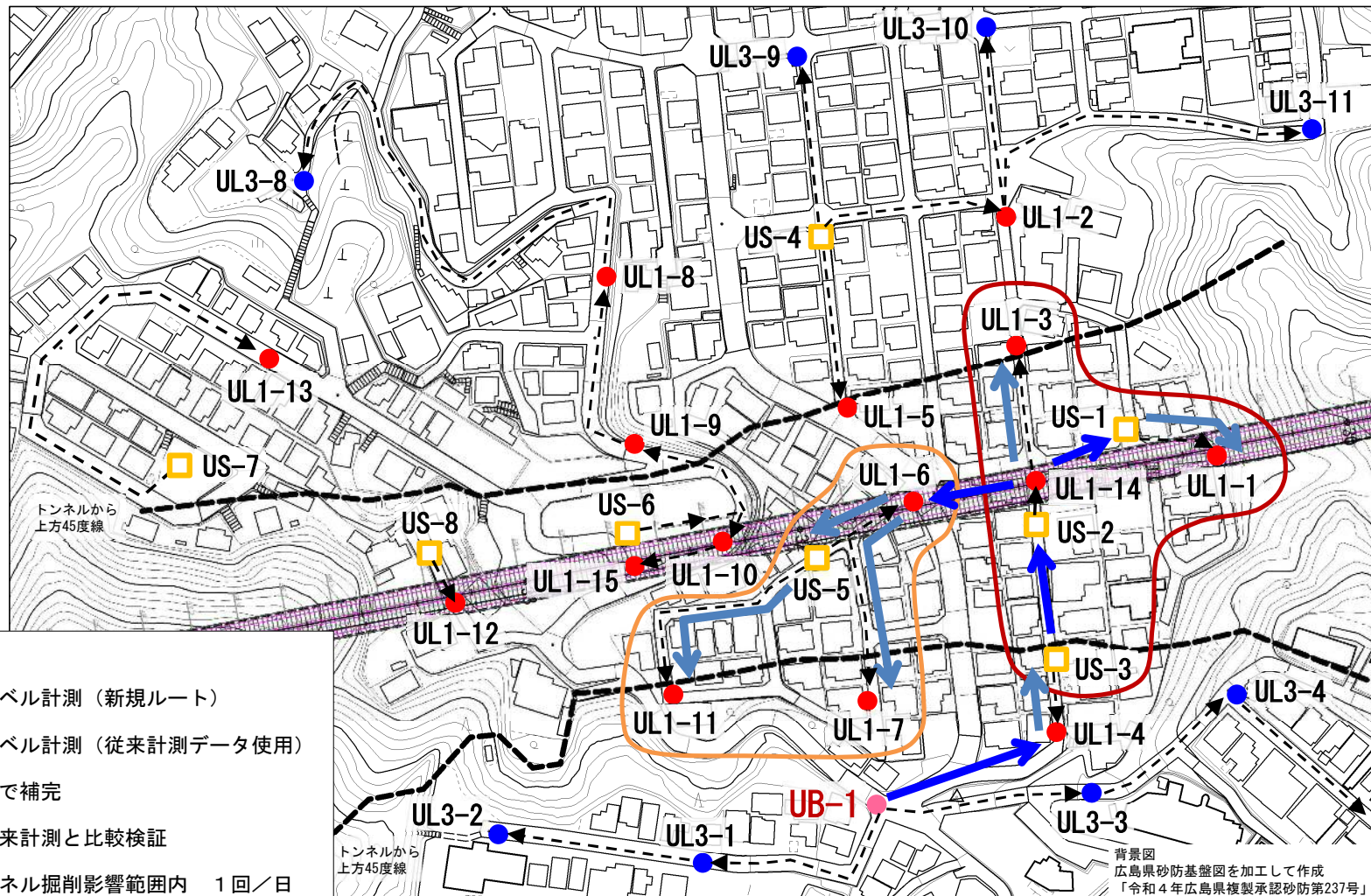
○1級レベル計測の基準となるUB-1については、定期的に標高確認測量を行い、変動の有無を確認する。

〔頻度〕 BM3、BM4を基準とした標高確認測量：1回／2か月、一等水準点を基準とした標高確認測量：1回／年

○UL1-6、UL1-7、UL1-11および基準としているUS-5については、上記と同様のUB-1を基準とした1級レベル計測を主体に行い、従来計測（層別沈下計およびUS-5基準の計測）と比較検証しながら、その変位を引き続き注視していく。



牛田地区 1級水準測量 基準点



- ← - - - 1級レベル計測（従来）
- ← UB-1を基準とした1級レベル計測（新規ルート）
- ← UB-1を基準とした1級レベル計測（従来計測データ使用）
- 従来計測をUB-1基準計測で補完
- UB-1基準計測が主体、従来計測と比較検証

UB-1基準の計測頻度：トンネル掘削影響範囲内 1回／日
トンネル掘削影響範囲外 1回／週

背景図
広島県砂防基盤図を加工して作成
「令和4年広島県複製承認砂防第237号」

4 対策案の検討 4.4 対策案まとめ

変位要因	対策案
[切羽圧(泥水圧)の影響] - 掘進時の切羽圧(泥水圧)および裏込め注入圧によって、シールド周辺の地盤内圧力が上昇するとともに、地下水位の変動(上昇)に伴って地盤の飽和領域が拡大し、地表面が隆起した。 [亀裂状況や泥水性状の影響] - これまでの施工区間と比べ軟質で節理や亀裂を有する地盤において、飽和領域地盤内の亀裂や土粒子間隙に泥水の細粒分や裏込め注入材が浸入して詰まり、シールドが通過して地下水位が回復した後も地表面隆起がそのまま残留した。また、シールドの掘進(移動)に伴い、その影響が累積された。	■切羽圧(泥水圧)の低減 - 牛田地区住宅区間(破碎帯区間を除く)では、切羽圧を、静水圧ベース(「静水圧+0.02MPa」を目標値とし、±0.02MPaを許容範囲として管理)に下げて掘進管理することにより、二次管理値に到達したUL1-6での解析結果(最大変位部での地表面変位量)の2/3程度に地表面隆起の抑制を図る。 - なお、従来の土被り厚ベースから切羽圧を下げることで、静水圧+0.02MPa(下限値:静水圧)で管理を行うことから、地下水位の低下および水位低下による地表面沈下を招くことはない。また、応力解放による地表面沈下については、当該静水圧ベースにて事前解析を行い二次管理値を超過しないことを確認している※。 ※第4回施工管理委員会資料 - 掘進にあたっては、地表面変位の計測データとあわせて、周辺観測孔の地下水位データや排土量データ等も注視しながら、引き続き入念に管理を行って地表面変位の抑制に努める。 ■泥水性状の変更 - 泥水の品質を、破碎帯部と同様に比重・粘性を高める(いわゆる「濃い」性状とする)ことにより、泥水の亀裂・間隙への過度な浸透を低減させ、地盤内圧力の上昇範囲の抑制や地下水位の一時的な変動(上昇)に伴う地盤の飽和領域拡大の抑制を図る。また、亀裂等への細粒分の浸入を減少させることで変位の抑制を図る。なお、地表面変位の計測結果を注視しながら、掘削の進行に伴う変位傾向をふまえ、品質調整を行う。 ■計測と効果の確認 - 今後の住宅区間での掘削においては破碎帯部の通過を想定しており、地表面変位に特に留意する必要があることから、UB-1基準からの計測(1級レベル計測)を行う。 - 上記の対策を講じたうえでUL1-6およびトンネル直上付近の計測点(US-1・2・3およびUL1-1・3・14)の変位傾向に注視し、対策工の効果を確認しながら掘削を行う。

