

第6回 東京外環トンネル施工等検討委員会 有識者委員会

陥没・空洞の推定メカニズム

令和 3年 2月 12日

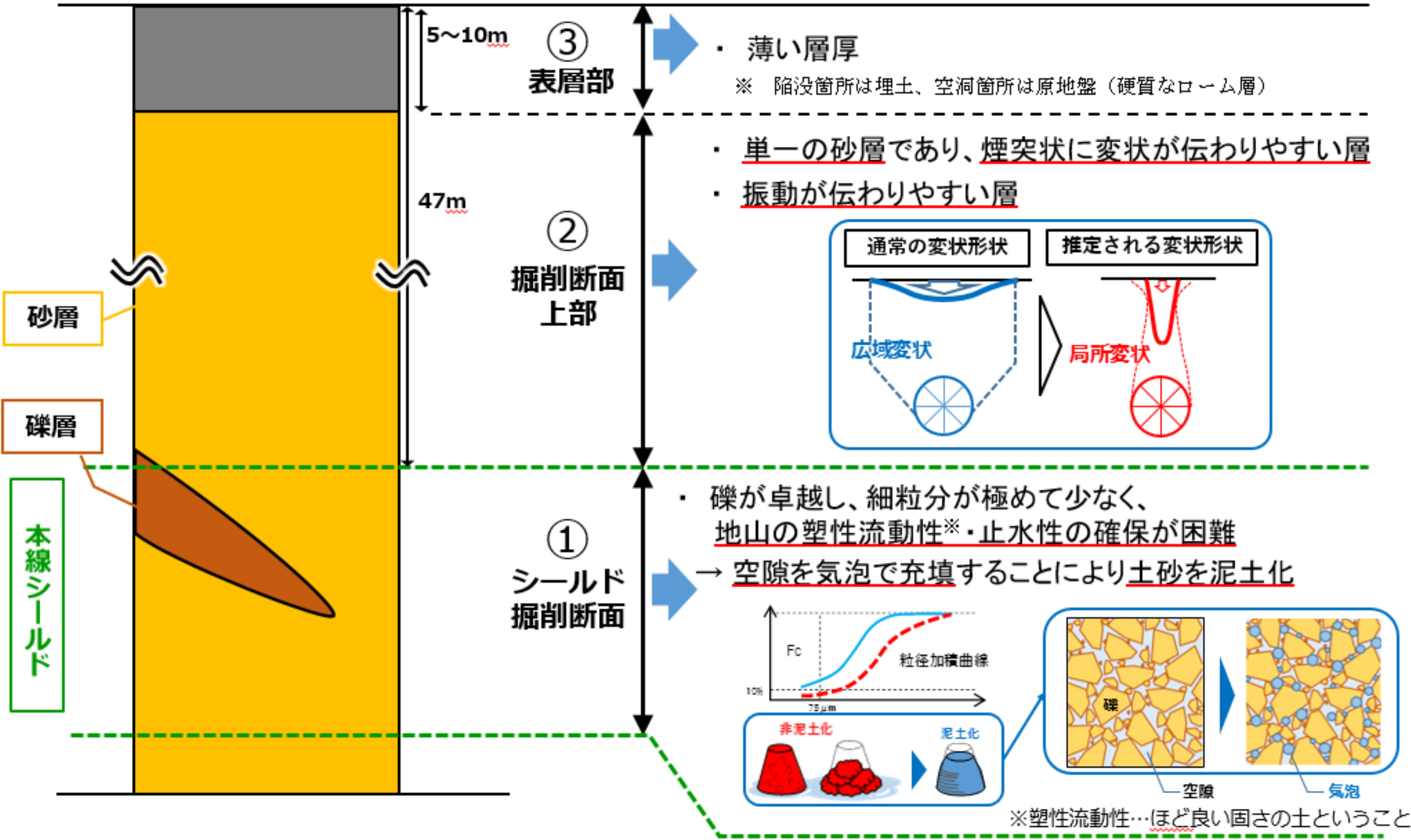
東日本高速道路株式会社関東支社東京外環工事事務所
鹿島・前田・三井住友・鉄建・西武特定建設工事共同企業体

1. 陥没・空洞事象に関して議論すべき要因の分析

① 今回発生した陥没・空洞箇所周辺の地盤の特性

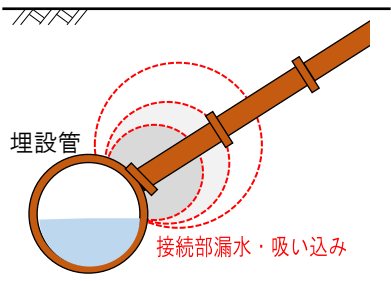
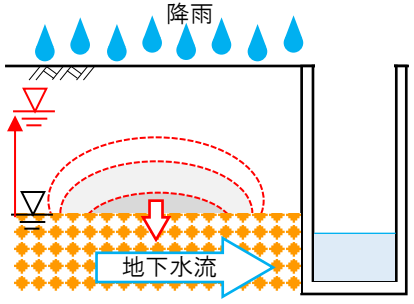
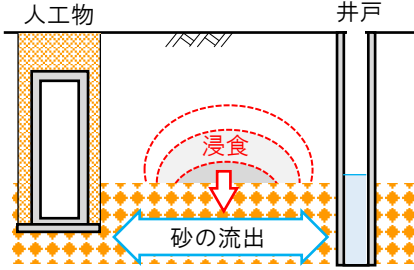
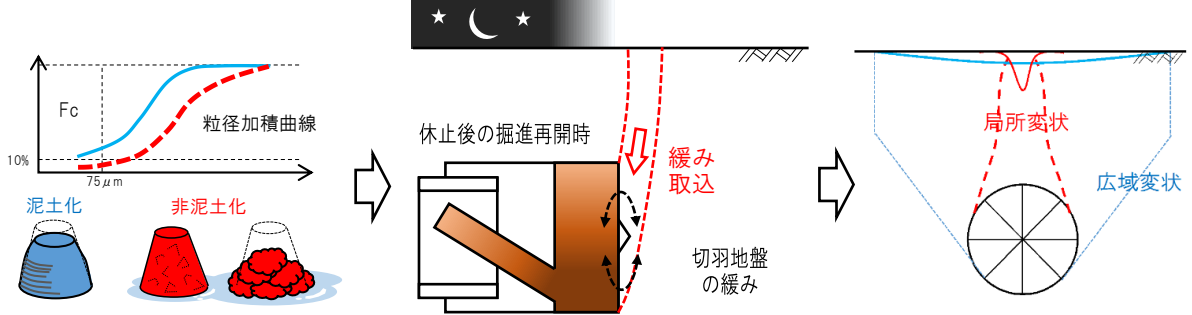
過年度実施している地質調査結果より、東京外環全線の中では陥没・空洞箇所周辺は、次の全てに該当する特殊な地盤条件であることをあらためて確認した（資料－２）。

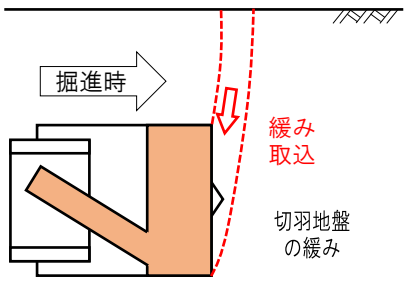
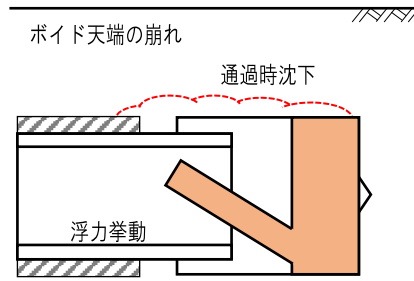
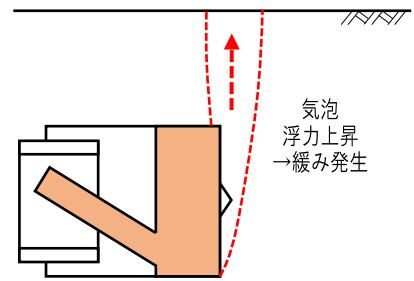
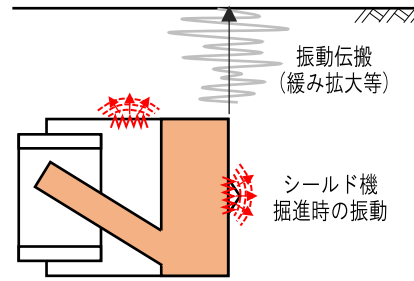
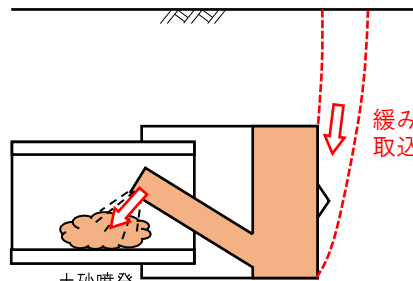
- ・掘削断面は、細粒分が少なく、均等係数が小さいため、自立性が乏しく、礫が卓越して介在することから、シールドトンネル施工における掘削土の塑性流動性の確保に留意すべき地盤であること。
- ・掘削断面上部は、単一の砂層である流動化しやすい層が地表面近くまで連続している地盤であること。
- ・表層部は他の区間と比較して薄い地盤であること。



② 陥没・空洞事象に関して議論すべき要因の分析

今回発生した陥没・空洞事象に関し、想定されるメカニズムを網羅的に検討する。

	Ⅰ．掘削前の表層地盤の状況			Ⅱ．シールド施工の影響	
	想定されるメカニズム①	想定されるメカニズム②	想定されるメカニズム③	想定されるメカニズム④	
概要	 <p>埋設管 接続部漏水・吸い込み</p>	 <p>降雨 地下水流</p>	 <p>人工物 井戸 浸食 砂の流出</p>	 <p>★ ☆ ★ Fc 10% 75 μm 粒径加積曲線 泥土化 非泥土化 休止後の掘進再開時 緩み取込 切羽地盤の緩み 局所変状 広域変状</p>	
	地下埋設物からの漏出・吸い込み ・下水道接続部等の漏水 ・下水道接続部等の吸い込み	地下水流、地下水変動、大雨による浸食 ・自然浅層地下水による浸食	人工物の存在による影響や人工物の埋戻し部の浸食 ・井戸、排水桝、地下放水路等の人工物による影響 ・過去に存在した構造物の埋戻し砂の流出	閉塞及び閉塞解除作業の影響 ・細粒分が極めて少なく、かつ礫が卓越する特殊な地盤における掘削土の塑性流動性・止水性が低下し、夜間休止時間において土砂分離・沈降が生じるなどにより、掘進再開時にカッターが回転不能となる事象（閉塞）が発生 ・閉塞を解除するため、沈降した砂礫を排土しながら気泡材を注入する等の特別な作業を行ったことにより切羽の緩みを生じさせ、単一の砂層が掘削断面上部に厚く堆積する特殊な地盤において煙突状にゆるみ領域が上方に拡大	

	Ⅱ．シールド施工の影響				
	想定されるメカニズム⑤	想定されるメカニズム⑥	想定されるメカニズム⑦	想定されるメカニズム⑧	想定されるメカニズム⑨
概要	 <p>掘進時 緩み取込 切羽地盤の緩み</p>	 <p>ボイド天端の崩れ 通過時沈下 浮力挙動</p>	 <p>気泡 浮力上昇 →緩み発生</p>	 <p>振動伝搬 (緩み拡大等) シールド機掘進時の振動</p>	 <p>土砂噴発 緩み取込</p>
	掘進時の影響 ・チャンバー内の塑性流動性の不足による天端や切羽土圧の不安定化 ・掘削土砂の過大な取込み	掘進後のボイドによる影響 ・ボイド天端の崩れ	空気のかいの上昇による影響 ・気泡に用いる空気の顕著な浮力上昇 ・空気の上昇による緩み拡大	トンネル掘削の振動による締固め・局所的な液状化による影響 ・カッター付近の振動による締固め・局所的液状化	シールド施工時の土砂噴発等による影響 ・シールド機テール・スクリーコンベヤからの出水による土砂噴発 ・セグメント継手面からの出水 ・セグメントの損傷

2. 陥没・空洞形成における想定される要因のまとめ

＜各要因に関する考察＞

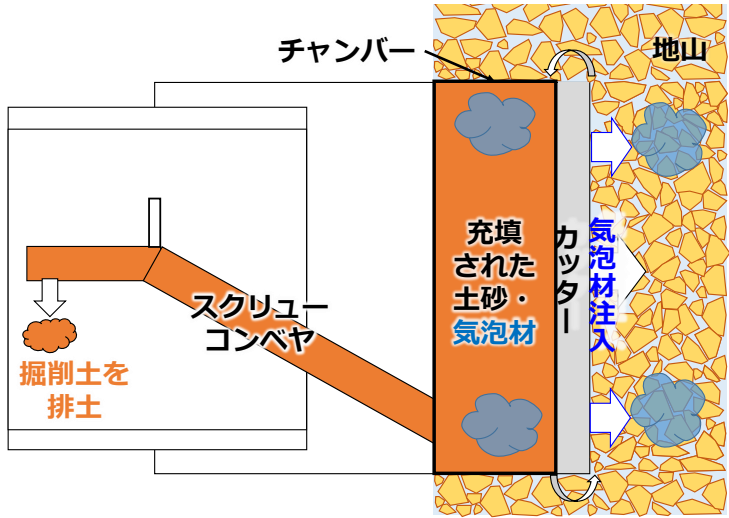
	メカニズム	調査・検討で確認された事項	考察
Ⅰ 掘削前の 表層地盤の 状況	①地下埋設物からの漏出・吸い込み	<ul style="list-style-type: none">・ 陥没箇所において下水管の損傷を確認。・ 陥没・空洞箇所における地下水から下水成分は検出されなかった。	地下水の成分調査により下水成分が確認されなかったことから、陥没・空洞の要因である可能性は低い。
	②地下水流、地下水変動、大雨による浸食	<ul style="list-style-type: none">・ 陥没、空洞箇所の断面において、水で洗われた部分を確認。・ 令和２年台風１４号（シールドが空洞①箇所を通過した後に接近）の影響により、近傍観測井戸の地下水位が約５０ｃｍ上昇していることから、空洞形成後に短期間で陥没・空洞箇所の表面が水で洗われた可能性があることを確認。・ 当該地域は入間川の西に浅く円弧状に入り込んだ谷地形であることを確認。・ 表層地下水の降雨時における流速の上昇や流向の変化は、入間川に武蔵野礫層の土砂を流出させるものではないことを確認。・ 空洞①箇所において採取した土砂と入間川護岸に堆積している土砂の成分が異なっていることを確認。	当該地域は緩やかな集水地形となっているが、空洞・陥没箇所の表層土砂が入間川に向かって流出している可能性は確認できておらず、陥没・空洞の要因である可能性は低い。
	③人工物の存在による影響や人工物の埋め戻し部の浸食	<ul style="list-style-type: none">・ 空洞①箇所において、用途不明のヒューム管を確認。	空洞①箇所内部に人工物の存在が確認されたものの、あらかじめ空洞形成されていたこととの因果関係は、現時点では特定できなかった。
Ⅱ シールド 施工の 影響	④閉塞及び閉塞解除作業の影響	<ul style="list-style-type: none">・ 陥没・空洞箇所の下部がトンネル方向に局所的に引き込まれている現象が調査によって確認されており、特殊な地盤条件下においてカッターが回転不能になる事象（閉塞）が生じていた。当該特殊な地盤条件では塑性流動性・止水性の確保が難しく、かつ、時間経過により土砂と気泡材が分離する傾向にあることを確認。・ 陥没・空洞箇所周辺では、特殊な地盤条件により施工時の振動が地上部に届きやすく、トンネル上部の住居から振動に関する問合せが増加したため、施工時間を段階的に短縮することにより夜間休止時間を延長したところ、閉塞が生じる頻度が増加。・ 掘進再開時に閉塞を解除するため、チャンバー内の圧力を保持しながら、沈降して締め固まった砂礫を排土しながら起泡溶液を注入するという特別な作業を行った。この過程で局所的にチャンバー内の圧力が低下したことが確認され、切羽部の緩みが生じ、土砂の取込みを発生させた可能性を確認。・ 陥没・空洞箇所直下付近では、閉塞解除作業が行われており、事後的に行った実験により、煙突状の緩み領域が生じうることを確認。・ チャンバー内の土圧勾配から推定される気泡土単位体積重量より施工時のチャンバー内土砂性状を評価したところ、細粒分・細砂分が著しく少ない特殊な地盤では塑性流動性が低下しており、閉塞解除作業が行われていた箇所付近から、添加した気泡材が全量回収できていなかった可能性を確認。・ 陥没・空洞箇所周辺では、トンネル上部の上方まで砂層が緩んでいることを確認。	夜間休止時間にチャンバー内の土砂が分離・沈降し、締固まってしまうことで掘進再開時に閉塞が生じ、その解除のために、沈降した土砂を排土しながら起泡溶液を注入する等の特別な作業を行う過程で、土圧の不均衡が生じて地山から土砂がチャンバー内に流入し、結果として地山に緩みが発生したことにより、緩み領域が煙突状に上方に進展し、陥没・空洞の要因となった可能性が考えられる。 また、陥没・空洞箇所周辺の掘進時において、掘削土の塑性流動性を保つため、通常より多くの気泡材を注入していたが、閉塞解除作業により生じた地山の緩みに気泡材が浸透することにより、塑性流動性・止水性が低下し、閉塞解除作業により生じた地山の緩みに対する切羽土圧の不均衡が生じていた可能性が考えられる。また、一部の気泡材は回収できず、掘削した地山重量は過少に評価され、土砂の取り込みが想定より過剰に生じていた可能性があることから、緩み領域が煙突状に上方に進展し、陥没・空洞の要因となった可能性が考えられる。
	⑤掘進時の影響		
	⑥掘進後のボイドによる影響	<ul style="list-style-type: none">・ 裏込め注入量や注入圧は管理値に適合していることを確認。・ 地山探査装置が突出できない事象が発生していたことを確認。	裏込め注入に係る施工データに異常値は確認されず、余堀幅はわずか（８ｃｍ程度）であること等から、陥没・空洞の要因である可能性は低い。
	⑦空気の塊の上昇による影響	<ul style="list-style-type: none">・ 空気の上昇により、掘削断面上部の緩みの進展が助長される可能性はあるが、上昇する空気の圧力は体積膨張とともに減圧するため、土粒子に与える影響は小さいと考えられる。	上昇する空気の圧力は体積膨張とともに減圧するため、土粒子に与える影響は小さいと考えられることから、陥没・空洞の要因である可能性は低い。
	⑧トンネル掘削の振動による締固め・局所的な液状化による影響	<ul style="list-style-type: none">・ トンネル施工に伴う振動は５５ｄＢ程度であり、振動エネルギーは地震動と比較して極めて小さいことを確認。・ 振動は、特殊な地盤条件により施工の振動が地上部に届きやすいことを確認。	トンネル施工に起因する振動エネルギーは地震動と比較して極めて小さく、液状化が発生したとは考えにくい。また、締固めへの影響は小さいものと考えられることから、陥没・空洞の要因である可能性は低い。
	⑨シールド施工時の土砂噴発等による影響	<ul style="list-style-type: none">・ セグメントの損傷等の変状、シールド機スクリーコンベヤからの土砂噴発やテールからの土砂噴出は生じていないことを確認。	土砂噴発やセグメントの損傷等はないことから、陥没・空洞の要因ではない。

<総括>

- 地下埋設物や地下水による影響により空洞があらかじめあった可能性は低い。
- 陥没・空洞箇所下部がトンネル方向に局所的に引き込まれている現象が調査によって確認されており、特殊な地盤条件下においてカッターが回転不能になる事象（閉塞）を解除するために行った特別な作業に起因するシールドトンネルの施工が陥没・空洞事象の要因である可能性が高いことを確認した。また、陥没・空洞形成の要因となったメカニズムについては次のとおり推定される。

(1) 昼間（掘進中）

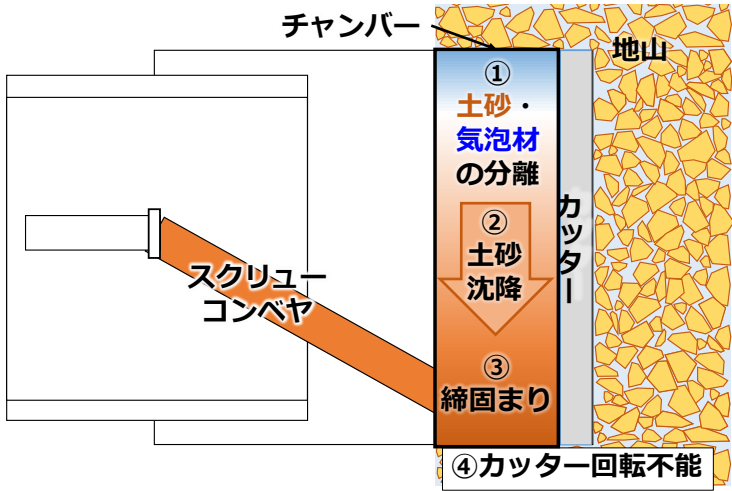
- チャンバー内土圧と地山からの圧力の均衡が取れている状態
- 細粒分・細砂分の減少、礫の介在してくる中で、気泡材の種別変更及び添加量の調整、掘進速度の調整を行いながら掘進を実施



(2) 夜間
休止

(3) 翌朝（掘進休止後）

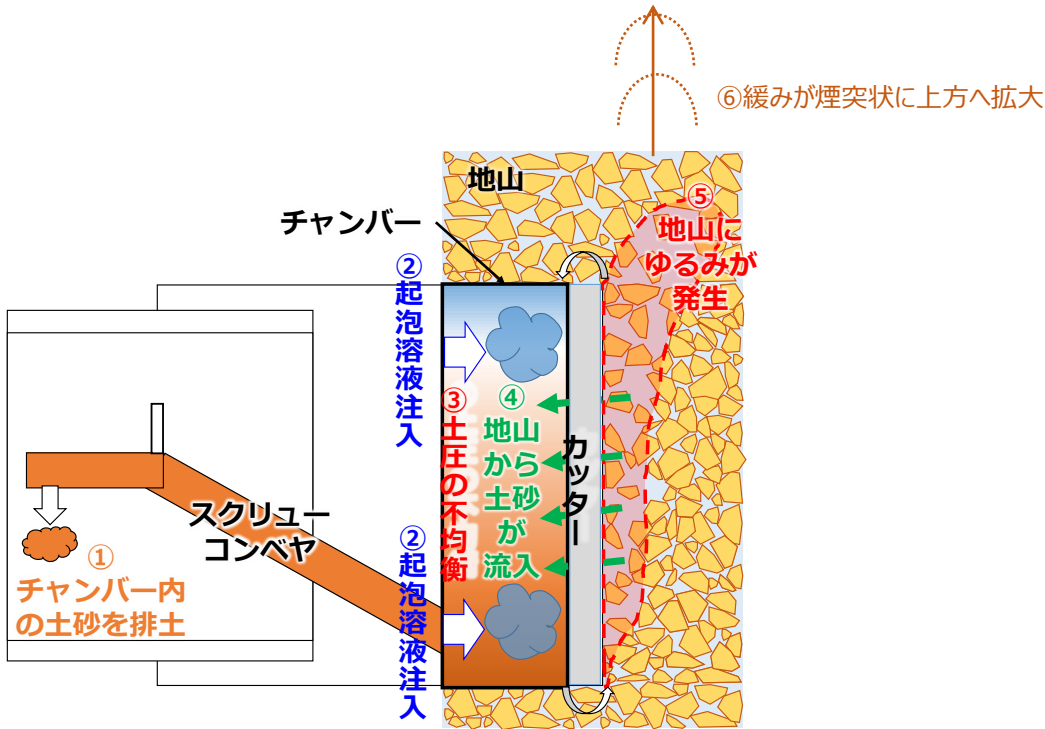
- チャンバー内の①土砂・気泡材が分離、②土砂沈降及び③締固まりが発生
⇒ ④カッター回転不能（閉塞）が発生



※振動に関する問合せを受け、
作業休止時間を拡大

(4) 閉塞解除作業

- カッターを再回転するため、①チャンバー内の締め固まった土砂を一部排出
- 排出によるチャンバー内圧力の低下を防止するため、②直ちに排出土砂分の起泡溶液と置き換える必要がある
⇒ この際、③土圧の均衡がとれず、④地山から土砂がチャンバー内に流入することで、結果として、⑤地山に緩みが発生し、⑥煙突状に上方へ拡大



掘進
再開

(5) 掘進再開後

- 特殊な地盤下で塑性流動性を保つため、通常より多くの気泡材を地山に注入し、掘進を再開
- 掘進を再開後、①気泡材が(4)閉塞解除作業で緩んだ地山に過度に浸透
⇒ 塑性流動性・止水性が低下し、閉塞解除作業で緩んだ地山に対する切羽土圧の不均衡
⇒ 一部の気泡材は回収できず、掘削した地山重量を過少に評価し、②土砂の取り込みが想定より過剰に発生
⇒ 繰り返し行われた閉塞解除作業により生じた地山の緩みを掘進時にさらに助長し、③地山の緩みが進行方向に拡大し、地表面付近に硬質のロームをアーチとする空洞が地中に形成
⇒ 硬質ロームが欠如している箇所で陥没に至った

