

第2回広島市下水道工事事故調査検討委員会 議事要旨

1 名称

広島市下水道工事事故調査検討委員会

2 開催日時

令和7年3月28日（金）14時30分～16時30分

3 開催場所

広島市下水道局千田庁舎3階会議室

4 出席委員氏名

(1) 委員（7名）

奥田晃久委員、金子治委員、小泉淳委員（座長）、杉本光隆委員、
畠俊郎委員、真下英人委員、藪雅行委員

5 議事

- (1) 追加の土質調査（圧密試験）等について
- (2) 地盤沈下の状況について
- (3) シールドマシン内部の調査方法について

6 公開・非公開の別

公開

7 傍聴人の人数

- (1) 一般傍聴者 22名
- (2) 報道機関 19名（13社）

8 検討委員会資料名

- ・第2回広島市下水道工事事故調査検討委員会 次第
- ・第2回広島市下水道工事事故調査検討委員会 配席図
- ・委員名簿
- ・第2回広島市下水道工事事故調査検討委員会 説明資料

9 出席者の発言の要旨

【開会挨拶】

（下水道局長）

- ・下水道局長の小松でございます。

第2回広島市下水道工事事務事故調査検討委員会の開催に当たり、一言ご挨拶申し上げます。本日、年度末の開催となりましたが、委員の皆様方におかれましては、ご多忙の中、委員会にご出席いただきまして、ありがとうございます。

- ・昨年11月に開催した第1回検討委員会では、陥没箇所の土質を確認するため、追加の土質調査を行うこと、事故原因の究明にはシールドマシン内部を確認する必要があるため、その方法を検討すること等といったご意見をいただきました。本日の検討委員会では土質調査結果を報告するとともに、シールドマシン内部の調査方法についてご説明をさせていただきます。
- ・また、事故現場の中心部においては現在も地盤沈下が収まっていないことから、その状況と対策についても併せてご説明させていただきます。委員の皆様にはそれぞれの専門的見地から忌憚のないご意見をいただきますよう、どうぞよろしくお願いいたします。
- ・最後になりますが、本市発注の下水道工事による道路陥没事故の発生から6か月が経過いたしました。本市としては少しでも早く地域の皆様が安心して元の生活に戻っていただけるよう、現地の復旧を進めるとともに、事故原因の究明を行い、再発防止策を講じたうえで、工事を再開し、当地区の浸水対策の効果を早期に発現させたいと考えております。引き続き委員の皆様のお力添えを賜りますようお願い申し上げます。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【議事(1) 追加の土質調査（圧密試験）等について】

（事務局）

- ・それでは、追加の土質調査、圧密試験等についてご説明いたします。
- ・1ページをご覧ください。
- ・表1.1に事故位置で実施した土質調査の項目を整理しています。今回の土質調査の目的は、地盤変化の確認、地層の乱れ状況の確認、緩み範囲の詳細確認、地中物の確認といったもので、それぞれの目的に応じた調査を行っています。
- ・まず、「地盤変化の確認」についてです。第1回委員会でご提示したボーリング調査による地層構成図について、陥没部周辺の各層の変化点を密に確認するため、エンパソルという調査を実施しました。
- ・図1.1に「エンパソルの概要」を示していますが、エンパソルとは、削孔機に取り付けたセンサーを用いて削孔時にデータを収集し、地盤の硬軟を連続的に判定するものです。
- ・右側、図1.2に「地層構成図の見直し例」を示していますが、今回は、このエン

パソルによってボーリング調査の結果を補完し、前回の委員会でご提示した地層構成図の見直しを行いました。

- ・ 2 ページをご覧ください。
- ・ 左上に調査位置の平面図を示しています。赤色が、前回までの地層構成図を作成するために実施したボーリング調査の位置で、水色が今回のエンパソル調査の位置を示しています。今回のエンパソル調査は、シールドマシン前面部のボーリング No. 4 を中心として、1m ピッチで縦断方向に 1 列、横断方向に 2 列、実施しました。
- ・ 平面図下の A-A 断面、それから右側の B-B 断面、C-C 断面にその結果を示しています。今回のエンパソル調査の結果を用いて、シールドマシン周辺の土質の層境を赤色の点線から赤色の実線に見直しました。
- ・ その結果、シールドマシンの周辺は、前回までの想定よりも、もっと急激に地層が落ち込んでいるということが判明いたしました。
- ・ 3 ページをご覧ください。
- ・ 続いて、地層の乱れ状況を確認するために実施した、室内土質試験の結果について、ご報告します。
- ・ まず「①粒度試験の結果」についてです。粘性土層内の粒度組成、主に砂分と細粒分の割合を確認するため、粒度試験を行いました。その結果を表 1.2 に示しています。
- ・ 試験結果から、沖積上部粘性土は、細粒分含有率が 75% 以上、沖積下部粘性土についても細粒分含有率が約 85%以上で砂分が少ないということが分かりました。
- ・ 次に「②N 値の変化」についてです。
- ・ 図 1.5 に標準貫入試験の結果を示していますが、こちらは陥没部中心からの距離に応じて、データを分類したものであり、左側が最陥没部 No.4 の試験結果、真ん中が少し離れた No.5、6 の試験結果、右側がさらに離れた周辺部の試験結果となっています。
- ・ この赤く丸をしている範囲の緑色と濃い青色の点が沖積粘性土層を示しており、薄い青色の点が沖積基底層を示しています。
- ・ この部分に着目していただきますと、右側、陥没部周辺から左側、陥没部中心に向かって次第に N 値が低下しており、最陥没部 No. 4、一番左側の図では N 値がほぼゼロという結果となっています。
- ・ 以上のことから、陥没の影響により N 値が低下傾向を示しているということ確認しました。
- ・ 4 ページをご覧ください。
- ・ 続いて、「③圧密定数の変化」についてです。表 1.3 に圧密試験から得られた圧密降状応力と過圧密比 OCR を示しています。
- ・ 赤枠で囲っているボーリング No. 1 の Ac1-1 の層、それから下側、Ac1-2 の層に着目すると、有効土被り応力 σ' に対して、圧密降状応力が小さくなっており、OCR

が1を下回っていました。

- また、図 1.6 にボーリングナンバーごとの有効土被り応力、黒の実線で示したものと、圧密降伏応力、こちらは緑の四角と青の丸で示したものとなりますが、これらの深度方向の比較を示しています。
- シールドマシン前面であるボーリング No. 1 のグラフ以外は有効土被り応力よりも圧密降伏応力が右側に来ていることから、No. 1 以外はいずれも過圧密の傾向を示しており、No. 1 のみが深度方向に圧密降伏応力が低下しているという特異な状況が確認されました。
- 以上より、最陥没部では、粘性土が大きく乱されており、強度が低下しているものと判断しました。土の構造が破壊されることで圧密降伏応力が低下したものと考えています。
- 5 ページをご覧ください。
- 続いて、「C14 年代測定」についてです。こちらの調査は、ボーリングの際に採取した有機物の年代を測定し、堆積年代の順序に乱れがあるかを確認するもので、シールドマシン前面に位置するボーリング No. 4 と、陥没の影響範囲外に位置するボーリング No. 3 の試料を用いて調査を行いました。
- 表 1.4 に測定結果の一覧を、図 1.7 に測定結果と柱状図を重ね合わせたものを示しています。
- 左側、No. 3 の柱状図と右側、No. 4 の柱状図のどちらにもピンク色で示した火山灰が含まれており、この火山灰は 7253 年±23 年前という想定がされています。
- 左側、No. 3 の柱状図では、この火山灰から深度が深くなるにつれて、堆積年代が古くなる傾向が確認されています。
- 一方、No. 4 の柱状図では、沖積基底層の 32.9m から 33m の区間が約 12700 年前であるのに対し、その下の 33.5m から 33.68m の区間が約 8000 年前となっており、堆積年代の順序が大きく異なっていることが判明しました。
- 以上のことから、シールドマシン前面部では、地層の乱れがあった可能性が高いというふうに判断しています。
- 続いてページ右側、「繰返し一面せん断試験」についてです。変形したと推定される下部粘性土層の残留強度を確認するため、繰返し一面せん断試験を行った結果、表 1.5 に示すとおり、現状の残留強度は、粘着力 c が 0kN/m^2 、せん断抵抗角 ϕ が約 26° という値が確認されました。
- 続いて下側、「繰返し土を用いた一軸圧縮試験」についてです。現地の土の強度がどれだけ低下しやすいかを評価するため、陥没の影響範囲外に位置するボーリング No. 3 の粘性土の一軸圧縮強さと、シールドマシンの前面に位置するボーリング No. 1 の繰返した粘性土の一軸圧縮強さを算定し、両者の比から鋭敏比を求めました。
- その結果、一般的な粘性土よりも大きな値、鋭敏比 9 という値が得られたことから、現地の粘性土は鋭敏な粘土であり、変形によって強度が低下しやすい性状を

持つということが分かりました。

- ・ 6 ページをご覧ください。
- ・ ここから陥没部およびその周辺の地盤の緩みを確認するために実施した、物理探査の結果について、ご報告します。
- ・ まず、「(1)S 波検層」についてです。表 1.6 に各ボーリング孔で実施した地層ごとの S 波速度の結果を示しています。
- ・ ボーリング No. 12 および No. 13 のハッチング部分、沖積上部粘性土層と沖積下部粘性土層において、周辺よりも若干の速度低下が確認されました。
- ・ また、ボーリング No. 4 では沖積上部粘性土層、沖積下部粘性層、沖積基底層のいずれも測定不能という結果となりました。
- ・ このことから、ボーリング No. 4 の N 値 0 の範囲は空洞ではないものの、非常に緩い状態であることが想定されます。
- ・ 続いて、「(2)音響トモグラフィ探査」についてです。こちらは、音響波、P 波の伝播速度と振幅減衰を算出し、計測断面における地盤の情報を可視化するものです。
- ・ 図 1.10 にその結果を示していますが、この図は、シールドの縦断方向を示したもので真ん中に位置するボーリング No. 4 がシールドマシンの前面にあたります。
- ・ P 波速度の低速度域、青色の部分と沖積粘性土層の分布域が概ね一致していることや、低速度域が陥没部、No.4 に向かって下方に傾斜していること、また、陥没部、No.4 の周囲では、低速度域が深部にまで及んでいることから、ボーリング調査結果の地層構成図と概ね一致する結果が得られたと考えています。
- ・ なお、この試験において、空洞等の特筆すべき特徴は確認されていません。
- ・ 7 ページをご覧ください。
- ・ 続いて「(3)微動アレイ探査」についてです。この試験は、常時微動と呼ばれる微小な振動を観測し、そのデータを解析することで S 波速度構造を推定するものです。
- ・ 図 1.11 がその結果で $V_s=220\text{m/s}$ の等速度の分布を表したものとなります。
- ・ この図の B、E、D のラインの交点が陥没部で、ここから北北西側に 10m 前後の場所を中心として半径 10～15m の範囲で周囲に比べて若干ですが S 波速度が低下する低速度域を確認しています。
- ・ それがこの緑の部分ですが、これは等速度面が落ち込んでいるということを表しています。
- ・ こちらの試験についても概ねボーリング調査結果の地層構成図と一致するという結果が得られたと考えています。
- ・ 次に、「(4)表面波探査」についてです。こちらは、深度 10～15m 程度までの地盤の S 波速度を求めたものになります。
- ・ 図 1.12 に代表的な結果を示しておりますが、こちらの試験でも陥没部周辺において地盤の緩みが確認されており、概ねボーリング調査結果の地層構成図と一致する結果が得られています。

- ・ 8 ページをご覧ください。
- ・ 8 ページは「地中物の確認」についてです。ウォーターホールズ工法および試掘により陥没部周辺の地中物の確認を行いました。
- ・ 図 1. 13 にウォーターホールズ工法の結果を、図 1. 14 に試掘の結果を示しています。どちらの調査でも、10m以浅でコンクリートガラや石、ごみ等、多くのものが確認されましたが、全体としては、今回の事故に影響するような地中物といったものは確認されておりません。
- ・ 9 ページをご覧ください。
- ・ ここからは、陥没が拡大した要因について、検討した結果をご報告します。はじめは、シールド掘削による影響、地盤の乱れについて、先ほどの物理探査の結果から、考察した内容です。
- ・ まず、ボーリング、S 波検層、音響トモグラフィ、3 次元微動アレイといった試験で共通した点として、N 値が小さい領域や、P 波、S 波速度の低速度域が陥没部に向かって落ち込むように傾斜している様子が認められました。
- ・ 次に、音響トモグラフィで得られた P 波速度についてですが、この試験では、図 1. 15 の一番上の図にあるとおり、シールド通過済みの断面において、一部低速度域が確認されました。
- ・ 一方、S 波検層、微動アレイで得られた S 波速度についてですが、こちらの試験では、図 1. 15 の下の 2 つの図にあるとおり、特段シールド通過の有無による速度値の違いは確認されませんでした。
- ・ P 波、S 波速度ともに地盤の強さの指標として用いられますが、地下水位以下の地盤の場合は、S 波速度の方がより詳細に地盤の状況を反映できるものと考えられます。
- ・ 以上より、P 波速度では若干の違いが見られるものの、シールド通過による沖積基底層および洪積砂礫層上部の状態の変化は認められないと判断しています。
- ・ 10 ページをご覧ください。
- ・ 10 ページでは、「シールド掘削による液状化発生の可能性」について確認しています。
- ・ はじめに、現場での振動がどの程度発生していたか、ということで図 1. 16 に 2024 年 9 月、事故が発生した月の振動・騒音・粉塵の計測値を掲載しています。
- ・ こちらは、発進立坑西側の官民境界で観測したものとなりますが、この図の薄い青色が振動の計測値を示しており、この値から 2024 年 9 月の振動の計測値は最大で 53 デシベルであったことが分かります。
- ・ 次に、振動レベルと地震力の関係について、先ほどの振動の計測値 53 デシベルを JIS 掲載の換算式から地震加速度に換算すると、約 1gal となり、さらにこの地震加速度 1gal を図 1. 17 に示す気象庁の参考図を用いて震度階に換算すると震度 1 相当と非常に小さいものとなります。
- ・ 次に、ページ右側「周辺地盤の液状化強度試験結果」についてです。陥没中心と

周辺地盤において、繰り返し三軸試験を実施し、液状化強度を算出しました。その結果、陥没中心部の液状化強度比が 0.115 なのに対し、周辺地盤の液状化強度比は 0.115～0.209 であり、特段大きな差はないということが判明しました。

- ・次に「シールド掘進に伴う振動液状化判定」について、道路橋示方書における FL 法から液状化安全率を算出した結果、沖積砂質土層の中心部において FL 値は 10.5 と算出され、1 より十分に大きいことから、液状化は生じない判定となりました。
- ・以上、シールド掘削に伴う振動レベルは震度 1 程度であり、微弱であること、液状化強度に関しても、陥没箇所が特に液状化しやすい地盤とはいえないこと、液状化判定の結果、FL 値が 1 よりも十分に大きいことから、シールド掘削による液状化発生の可能性はないものと考えています。
- ・11 ページをご覧ください。
- ・続いて、「水道管損傷の影響」について、道路陥没に伴い発生した水道管破断による漏水がトンネル内に流入した可能性について検証しています。
- ・このページは、ライフラインの損傷状況を整理したもので、ページ中段左側、そして左下に破断した水道管の事故発生当日の漏水状況を示しています。
- ・事故発生当日は、右上の図で言いますと、交差点の上側の地点で水道管の 300 mm が破断し、交差点の左側の地点でも別の水道管 100 mm が破断しました。
- ・この影響で漏水した水が地上に吹き出し、陥没部を水没させた状況を撮影したものが右下の写真となります。また、水道管と下水道管の位置関係は、ページ中段右側の図に示すとおりです。
- ・12 ページをご覧ください
- ・表 1.10 に、事故発生当日の状況、左から地上部の周辺状況、地下のシールド工事の状況、下水道の状況、そして上水道の状況を時系列で整理しています。
- ・こちら下水道の状況は、下流に位置するポンプ場の流入量を、上水道の状況は、このエリアの給水を受け持つ、配水池の配水流量を整理したものととなります。
- ・事故発生当日は、このポンプ場の流入量と配水池の配水流量の両方が、通常時の流量よりも増加していることから、この状況をグラフ化し、両者の相関を確認しました。
- ・それが、13 ページの図 1.20 になります。
- ・13 ページ、図 1.20 は、8 時 45 分にシールド内で異常出水が発生してからの上水道、下水道の流量をグラフ化したものとなります。
- ・横軸が時刻で縦軸の左側が流量、この流量は、通常時の流量を基準値とした場合の流量の増減を示しています。
- ・また、縦軸の右側が流量を集計した積算量を示しています。
- ・このグラフの、青丸の上水道の積算量と、オレンジ色の丸の下水道の積算量を比較すると、合計値と傾きがほぼ同じであることがわかります。
- ・このことから、水道管からの漏水は、時間ロスを伴って下水道に流れ込んだとい

うことが想定され、トンネル内に流入した可能性は低いと判断しています。

- ・ 14 ページをご覧ください。
- ・ ここからは、「陥没メカニズムの推定」についてです。はじめに、「陥没部の地層の落ち込み」について、考察を行っています。
- ・ 表 1.11 は、陥没のほぼ中心となるボーリングNo.4 と影響範囲外にあるボーリングNo.2 の各層の出現深度から陥没部の地層の落ち込み量を算出したものです。
- ・ この表から、陥没部では、粘性土層が約 3.6mから 5.5m、沖積基底層が約 9.6 m、洪積砂礫層が約 7.4m落ち込んでいることが分かります。
- ・ また、図 1.21 に地層の落ち込み状況を示していますが、この図の上下の粘性土層に挟まれたピンク色のライン、こちらが火山灰土層となります。
- ・ この火山灰土層は、南九州にある鬼界カルデラの噴火に起因するもので、もともとは起伏がなく、紫の破線のように水平に堆積していたものと想定しています。
- ・ さらに沖積基底層では、図 1.22 に示すような、有機質粘土の塊が混入した跡や粘性土と砂が攪乱された状態など、地層の乱れが確認されており、これらは自然の堆積現象によるものとは考えにくいと思われます。
- ・ こうした状況やさきほどご説明させていただいた粘性土の圧密降伏応力の低下、さらには C14 年代測定の結果から明らかになった堆積年代の順序の乱れなどを総合的に勘案すると、陥没箇所の地盤は、今回の事故によって地盤が大きく攪乱され、成層構造が破壊されたものと推定されます。
- ・ 15 ページをご覧ください。
- ・ さきほどの考察を踏まえ、陥没が発生したメカニズムを 7 ステップに分けて推定しました。
- ・ ステップ①8 時 45 分、何らかの原因によりシールドマシンに出水が発生して土砂が流入し、マシン前面に空洞が発生。
- ・ ステップ②シールドマシン内部に地下水及び土砂が流れ込み、砂礫層を削りながら空洞が拡大。砂礫層の空洞が拡大することで、上位に堆積している沖積基底層も支えを失い、シールドマシン内部に流出。
- ・ ステップ③沖積粘性土層は、その下位に存在していた沖積基底層が流動化したため支えを失う形となる。沖積基底層の流出が進行し、沖積粘性土層下部の空洞が大きくなり、破壊強度に至った瞬間、鋭敏な沖積粘性土が一気に変形。
- ・ ステップ④沖積粘性土層の上面の沈下が進行することで、上位の沖積砂質土層や盛土層の沈下も進行し、地表面に陥没が発生。地表面に陥没が発生し、運送会社の建物が動き始めたのが 8 時 48 分頃なので、ここまでが約 3 分間の出来事だと推定しています。
- ・ ステップ⑤陥没により破断した水道管からの漏水が道路表面を流れて陥没部に溜まり、損傷した下水道管に流入。
- ・ ステップ⑥シールドマシン内外の圧力が均衡し、急速な変形は停止。一方で、過圧密状態だった粘性土が引き伸ばされて、圧密未了状態となり、陥没中心部に残

留。こちらが、立坑の注水が完了した 18 時 15 分頃と推定しています。

- ・最後にステップ⑦圧密未了領域に向かって引き込まれるように変形が進行し、地表面沈下が継続。こちらが現在の状況と考えられます。
- ・16 ページをご覧ください。
- ・ここからは、先ほどの陥没メカニズムをシミュレーション解析によって検証した内容となります。説明は、解析を実施した工事受注者の方からさせていただきますのでよろしくお願いします。

(工事受注者)

- ・それでは「(1)検討の概要」でございます。数値解析を用いて先ほどの陥没メカニズムのうち①から⑤までを検証いたします。地盤条件および地盤定数については図 1.23、表 1.14 のとおりでございます。シミュレーション解析は表 1.15 に示す 3 つの手法を用いて行いました。
- ・ページ右側に移っていただき浸透流解析ですが、陥没メカニズムのステップ①および②の検証を目的としています。本解析は、軸対象モデルで図 1.24 に示す解析モデルで実施しています。
- ・図左側に示している空隙位置を大気圧境界に設定し、この部分から水が流れ出るという計算条件です。
- ・表 1.16 に解析結果を示します。左の湧水流量のグラフをご覧ください。縦軸が湧水流量、横軸が経過時間で紫点線が実測値ですが、緑の計算結果は実測値よりも小さい値を示しています。これは今回の透水係数が単孔式の透水試験結果を用いていますので、この値がやや小さかったためと考えられます。そのため、洪積砂礫層の透水係数を 20 倍と仮定して計算した結果を表 1.17 に示します。
- ・先ほどと同じ左のグラフをご覧くださいと、紫の実測と解析の緑のラインがほぼ同程度を示していることがわかります。
- ・17 ページをご覧ください。FEM 弾塑性解析では陥没メカニズムについてはステップ③から⑤の検証を目的としています。
- ・解析は陥没位置を中心とした軸対象モデルとして実施しています。陥没位置を中心として半径 100m、深さ 100m を図 1.26 のようにモデル化し、主働崩壊線の内側の沖積基底層と洪積砂礫層が崩壊すると仮定してその領域を応力開放していきます。
- ・沖積粘性土は非線形性を考慮し、モール・クーロンの破壊規準を適用しています。鋭敏粘土であることからひずみの進展に伴う強度低下を考慮しています。
- ・解析結果を図 1.27～図 1.30 に示します。図 1.27 では沖積粘性土層が塑性化し、地表面沈下の最大値が 1.03m という大きな変位が発生しました。また、その塑性化の範囲は図 1.28 でほぼ主働崩壊線に近い範囲で発生していることがわかります。図 1.29 は横軸に陥没中心からの距離、縦軸に沈下量を示したもので沈下量の実測と解析結果を比較したグラフです。実測は約 2m の沈下が発生しましたが FEM 弾塑性解析では 1.03m です。これは大変形領

域の変形がうまく表現できていない可能性があります。一方で、図 1.30 で正規化して実測値と解析結果の沈下量を比較しますと、ほぼ同様の分布となっており、中心から 30m に沈下が広がっている変形モードが良く表現できていることがわかります。

- ・ 18 ページをご覧ください。
- ・ 粒子法解析は、陥没メカニズム③から⑤のステップを検証するために実施しております。特に、シールド内への出水から地表での変位発生が早かったことと FEM 弾塑性解析ではなかなか表現が難しい塑性化後の大変形を表現することを目的としております。
- ・ 解析は陥没位置を中心とした軸対象モデルとして図 1.32 のようにモデル化し、左下に示す応力開放領域から粒子が抜けていく境界条件としています。各土層については非線形性を考慮し、強度低下するようなモデルとしています。表 1.18 の変形図と変形コンターをご覧ください。10:00 の時点で地表面では 0.7m の沈下が発生しています。さらに、ページ右側の図 1.34 は、横軸が時刻で縦軸が地表面沈下量を示していますが、解析開始直後の 9:00 前に地表面で沈下が発生していることがわかります。図 1.35 は FEM 弾塑性解析と同様に、陥没中心からの距離と沈下量の関係を示しています。こちらは正規化しておりませんが、粒子法では地表面沈下量を比較的良好に表現することができています。
- ・ 以上、3 つの解析検討結果のまとめです。浸透流解析では、何らかの原因によりシールドマシン内への出水が確認された際には、観測された湧水流量程度が流れ込むことが確認され、陥没メカニズム①から②の事象は起こりえるということが確認できました。
- ・ FEM 弾塑性解析結果では、シールドマシン内への流入が発生した場合に、沖積粘性土層の塑性化が引き起こされ地表面に大きな沈下が発生すること、その範囲が 30m 程度であることが確認され、陥没メカニズムの③～⑤の事象が起こりうるということが確認できました。
- ・ 粒子法解析では、解析開始からものの数分で地表面に沈下が発生することと、大変形が発生することが確認され、陥没メカニズム③～⑤が起こりうるということが確認できました。
- ・ 以上でシミュレーション解析の説明を終わります。

(座長)

- ・ ありがとうございます。ご意見、ご質問、コメント等ございましたらお願いしたい。

(委員)

- ・ 陥没の拡大、原因の検討の中で、11 ページから水道管の損傷の影響ということについて整理をいただいている。これは、上部に水道管があり、それが破裂し、その漏水等がトンネル内への流入や、この陥没に影響しているのではないかとということで整理をされたということだが、今回このデータを見ると、上水道の漏水の

上限の量と下水道への流入量の増減が均衡しているということ、傾きが一緒だということなので可能性が低いのではないかとということ。確認ですが、水道の損傷 1、2 以外に、水の供給源が無かったのかどうか、現地で確認した結果等を教えてほしい。

(事務局)

- ・水を供給するような施設があったかということで、破損した水道管 100 mm と 300 mm 以外に水を供給するような埋設物、インフラといった物はありません。

(座長)

- ・13 ページの漏水量と下水道の排水量が一致している。両者の全体量が一致している。それから上水道の方は、離れた地点の流量がすぐわかるが、下水道は流量の把握に時間がかかる。タイムラグがある。流れてくるトータルの量はまったく同じになり、傾きもまったく同じになっている。これから考えると水道管が壊れて流出した水は全部下の下水へ流れ込んでいる。したがって、トンネルへは流れ込んでいないという結論が得られると思う。

(委員)

- ・エンパソルや、追加でボーリング等、陥没の状況を調べられたということで、比較的、陥没の状況がよくわかり、追加調査の成果かと思っております。
- ・マシンの中に土が引き込まれたというのは当然あるが、それによって周りの地盤も緩んでるところを心配していた。4 ページに示されているNo.1 地点のように、本来であれば、堆積して上に新しい土砂が積もって行って、安定していくはずのものが、マシンのトラブルによって逆転するような状況になっている。やっぱり地盤自体の元々持っていた力が失われて、それが沈下等に影響を与えてるというのは妥当というか、ある意味現象をちゃんと検証したのかなという印象を持った。

(座長)

- ・エンパソル等の結果を見ると、シールドの中に土砂が流入した状況がよくわかる。陥没地点の直上の地層はだいぶ緩んでいる。想像どおりの落ち込みの形がわかる。

(委員)

- ・液状化について、10 ページ目の結論は、シールドの振動では液状化しないというところは、間違いないと思いますが、途中で出てくる、液状化強さは、震度 5 とか 6 とかいう地震に対する強さの話だから、小さいという表現が必ずしも正しいのかどうか、地震と機械の振動との違いみたいなものをもう少しコメントされると、よりわかりやすい。結論は変わらないが、この辺をもう少し的確に言っていたくと、よりわかりやすい。

(座長)

- ・基本的に言えば、地震による液状化は地盤全部ひっくるめて揺らすような大きな加速度により生じる。それに対して、シールドは一生懸命頑張っても、震度 1 くらいであり、よほど敏感な人が、「あれ、地震かな」と思うくらいということ。シ

ールドによって液状化が起こるということはなさそうだという結論だと思う。

- ・エンパソルやボーリングの試験、また、弾性波、S波、大体こんなイメージで陥没したのだろうという印象を受ける。それから、解析をした結果、これをみると、大体そういう形になるねといったことがわかると思う。これらのことから今回の陥没の原因は置いておいても、どういう現象が生じたかというところまでは、大体とらえられたのではないかと感じている。

－委員意見なし－

(座長)

- ・他に意見がなければ議事(2)地盤沈下の状況についてにうつる。説明をお願いしたい。

【議事(2) 地盤沈下の状況等について】

(事務局)

- ・それでは「地盤沈下の状況」についてご説明いたします。19ページをご覧ください。
- ・プライバシーの関係で測点の具体的な位置は伏せさせていただいておりますが、こちらは、現在、計測を行っている複数の測点の中から、代表的な4つの測点を抽出したものととなります。
- ・こちらを見ていただきますと、陥没中心から50mよりも外側では沈下が収束しており、50mの内側では、わずかながらですが沈下が継続している状況となっています。
- ・こうしたことから、現在の沈下の状況を分析するのに適した、対数近似を用いて、今後発生する沈下の予測を行いました。その結果が図2.3と表2.1になります。
- ・表2.1から、半径10m地点の沈下は、現在196mmであるものが1年後の2026年3月には、244mmとなり、約50mm沈下することが予想されます。また、2年後の2027年3月には267mmとなり、1年後の想定値からさらに約20mm沈下するものと想定されます。
- ・同様に、半径30m地点の沈下は、現在92mmであるものが1年後に116mmとなり、2年後には、127mmになると想定しています。
- ・20ページをご覧ください。
- ・さきほど予測した沈下を抑制するため、「地盤沈下対策」について、検討を行いました。
- ・地盤沈下対策としては、陥没メカニズムのところでご説明した圧密未了領域を解消させることが有効であると考えており、図2.5に示している地盤の落ち込み点、この内側を地盤改良すれば、圧密未了領域を解消することができると考えています。
- ・次に、地盤改良の工法についてですが、表2.2において、深層混合処理工法、高圧噴射攪拌工法、薬液注入工法の3つの工法の比較検討を行った結果、現場条件

に適合し、圧密未了状態となっている粘性土の置き換えが可能な工法として、高圧噴射攪拌工法が最も適していると判断しています。

- ・ 21 ページをご覧ください。
- ・ 図 2.6 に「地盤改良対策の計画図」を示しております。
- ・ まず、平面的な範囲についてですが、地層構成図の精度を踏まえ、先ほど、20 ページでお示した地盤の落ち込み点から、若干の余裕をもった範囲設定としております。
- ・ 次に、深度方向の範囲についてですが、上端は粘性土層の上端、下端は、高圧噴射攪拌工法を施工する際のセメントミルクや排泥がシールドマシン内部に流入するのを防ぐため、シールドマシンの上端から施工余裕をとった範囲までとしています。
- ・ 簡単ですが以上で、「地盤沈下の状況について」説明を終わります。

(座長)

- ・ 図 2.2 と図 2.3、ここの状況に降雨量は関係ないかということで、降雨量を調べていただいたが、いかがだろうか。どうも沈下と降雨量とは関係がなさそうな感じがする。

(事務局)

- ・ これまで沈下の計測を続けてきて、例えば降雨時だったり、降雨終了後だったり、特に沈下の値が増加したというようなことはございませんので、現在の沈下の状況と降雨量に相関はないというふうに考えている。

(座長)

- ・ 私もそのように思う。

(委員)

- ・ 21 ページの図 2.6 の上の図に、今回実施する地盤改良の範囲が平面的に示されているが、19 ページの図 2.1 を見ると、地表面沈下は、先ほどの図 2.6 の地盤改良の対象範囲よりもさらに外側でも発生している。この改良範囲の外側で生じている沈下についても、今回提示されている範囲の地盤改良を行えば、収まると考えておられるのか、もし考えておられるのであれば、どういうメカニズム、理由でそのように考えておられるのか、教えてほしい。

(事務局)

- ・ 改良範囲の外側については、基本的には過圧密の状態にあって、本来は沈下しないはずのものが、中心部の圧密未了領域の沈下の影響を受けて、そこに引っ張られるような形で沈下が続いているものと考えてる。そのため、原因となっている中心部の圧密未了領域を地盤改良で置き換えて、水の流れを止めてやれば、過圧密状態にあるであろう周囲の沈下も収まると考えている。

(座長)

- ・ 粘土はその上におもりが乗っかっていると、水を吐きながらだんだん沈下していく。これを圧密沈下と言うが、ここの粘土は過圧密状態で、圧密はすでに終わっ

ているという地盤だった。その粘土層の下がすくわれたような形になり、粘土層が落ち込んだので、粘土は緩んでしまい、まだ圧密されていない状態になってしまったようだ。それが時間の経過とともに水を吐きながら沈下していく。陥没位置の真上だけ下がっていくわけではなく、周辺からも水を引き抜いてゆく。陥没位置から離れれば離れるほどその影響は少なくなはなるが、沈下は継続しているということだと思う。そういうことであれば、落ち込んだところを固めてしまえということで、そこに柱や壁のような改良体をつくり、周辺からは粘土が移動しない、しかも圧密しないような改良体を造ってしまえば、地盤沈下は止まるのではないか。そういう考えでよいか。

(事務局)

・はい。

(委員)

・今回、地盤沈下対策を行われるということだが、対策の効果というのをしっかり把握しておく必要があるというふうに思うので、施工後のモニタリング、こういったものもしっかり検討していただければと思う。

(座長)

・高圧噴射攪拌工法は、土とセメントを混ぜて杭を造り地盤を置き換えてしまう工法。21 ページにあるように改良できれば、とりあえずは、水が抜ける場所がないので、また、雨も関係ないということなので、これで沈下は止まるだろうという考えです。いかがでしょうか。

ー委員意見なしー

(座長)

・それでは、議事(3)にうつる前にその他の調査および検討の結果を先に、説明をお願いしたい。

【その他の調査及び検討の結果について】

(事務局)

- ・それでは「その他の調査及び検討の結果について」ご説明いたします。
- ・26 ページをご覧ください
- ・26 ページは今回のシールドマシンの概要を示しております。
- ・こちらは、前回の委員会でご提示したものと同じものですが、本日は、この後、シールドマシンの品質管理状況について、ご報告させていただきたいと考えております。
- ・続きまして、27 ページをご覧ください
- ・シールドマシンの出水原因を推定するために行った調査や検討を、表 4.1 に示しております。これらの結果について、順次ご説明してまいりたいと思います。
- ・まず、27 ページの右側に示しております、トンネル内に流入した水の水質についてご説明いたします。

- ・表 4.2 に、停止しているシールドマシンの近傍のボーリングで採取した地下水と、発進立坑の坑口付近で採取した水の、試験結果を示しております。
- ・さきほど、水道管からの漏水は、下水道管に流入したと考えられる、と説明させていただきましたが、この試験のピンク色で着色した、電気伝導率の値、それから、その下の、塩化物イオンから換算した塩分濃度の値、この2つの値からも、トンネル内に流入した水は、水道水ではなく、交差点部の地下水であると推定されます。
- ・28 ページをご覧ください
- ・トンネル内への異常出水について再検討した結果を示しております。
- ・図 4.1 に示しておりますとおり、第 1 回検討委員会ではトンネル内への最大出水量を 48.6m³ 毎分、これに対する開口換算直径を 38.3cm と想定しておりましたが、図 4.2 に示しております、出水時に撮影した別のデータから、最大出水量を 56.9m³ 毎分、開口換算直径を 41.5cm と、最大の値を更新しております。
- ・結果として、最大出水量、開口換算直径ともに、もう少し大きな値だったのではないかと想定しております。
- ・なお、テール部等から追加の出水があった可能性については、確認できるデータが残っておりませんでしたので、この検証は難しいという風に考えております。
- ・続きまして 29 ページをご覧ください。
- ・水中ドローンによるシールドマシン内部の調査結果についてご説明いたします。
- ・前回の委員会では調査結果をお示しできませんでしたが、昨年 11 月に水中ドローン調査を計 2 回実施し、トンネル内に流れ込んだ土砂の状況を確認しております。
- ・30 ページをご覧ください。
- ・30 ページ図 4.7 に、トンネル内で土砂の堆積高さを確認した 3 地点のうち、最もシールドマシンの先端に近い位置、坑口から 165m 地点の調査映像を示しております。
- ・この地点では、トンネル直径の 2/3 程度まで、土砂が堆積していることを確認しました。
- ・なお、ドローンカメラの調査可能な延長に制約があることや坑内設備等が支障となることから、この地点より切羽側の調査は困難と判断し、調査を終了しております。
- ・続いて、31 ページから 32 ページに、トンネル内の土砂の堆積量を推定した根拠について示しております。
- ・31 ページ表 4.3 をご覧ください。水中ドローンで定点的に確認した堆積土砂の高さから土砂の堆積量を推定し、この値をフケ率で割り戻すことで、地山土量に換算しております。
- ・換算の結果、トンネル内に流入した土砂は、1741～1820m³ 程度と推定されます。第 1 回検討委員会でお示しした地表面の陥没量の推定が約 2000m³ となります。

で、トンネル内に流入した土砂の量と地表面の陥没量は概ね一致しているということが分かりました。

- ・続いて 33 ページには、その他、調査映像の静止画を示しております。
- ・34 ページをご覧ください。
- ・「シールドマシンの姿勢」についてご説明いたします。
- ・表 4.4 にこれまでにを行ったシールドマシンの姿勢調査の結果を示しております。
- ・まず、掘進管理システムから、出水直後にシールドマシンのピッチングが 53.9 パーミルまで上昇したことを確認しております。
- ・また、今回新たに、追加で実施した直接探査ボーリングの結果を示しております。
- ・図 4.12 に示しておりますとおり、シールドマシンの中心と左右の線上の各 5 測点、計 15 測点の天端の深度をボーリングにより直接探査し、その結果から、現状のシールドマシンのピッチングは 20.5 パーミルであると推定しております。
- ・34 ページ右側に、ピッチングが 20.5 パーミルの状況で再発進した場合に予想される事象を示しております。
- ・一番下の図にあるとおり、中折れを下向きに修正した場合でも、700mm 掘進すると、セグメントとスキンプレートの内側が干渉するため、現状のピッチングから変化がなければ、再発進時には何らかの方法で、シールドマシンの姿勢を修正する必要があるというふうに考えています。この点については、引き続き、検討を進めてまいりたいと考えております。
- ・続きまして 35 ページをご覧ください。
- ・シールド事故の事例について調査した結果をご報告いたします。
- ・シールドマシンが水没した事故の事例を対象に、マシンメーカーへヒアリングした結果について、表 4.5 に示しております。
- ・今回調査した事例だけで申しますと、ピンクで着色した本工事の事例を含め、今までシールドマシンが水没した事例は全部で 9 例あります。
- ・本工事を除く 8 例は、豪雨時の雨水や発進立坑の鏡切を行った際に地下水が流入し、水没したといった事例であり、本工事のように、掘進中のマシン内に土砂が流入したという事例は、今回が初めてというふうに聞き取っております。
- ・また、水没したシールドマシンの補修について、電気機器に関しては、交換可能なものを現場で交換し、駆動部・ジャッキ類といった大規模な設備に関しては、現場で整備をかけているといったことを確認しております。
- ・続きまして、36 ページをご覧ください。
- ・事故時の住民ヒアリング調査についてご説明いたします。
- ・事故発生の数日前から事故発生までの間に、陥没箇所周辺の住民の方がお気づきになられた、主に振動や音に関する異変について、A～J までヒアリングを実施し、シールドマシンの掘進状況との相関を確認しました。
- ・右下の表に示しております、ヒアリング内容とシールドマシンの掘進状況を合わせてご覧いただきますと、D と F を除き、掘進停止中の事象であったことが分か

ります。

- ・ D と F については、シールドマシンが硬質な地盤を掘進する場合、実際に振動に関するご意見をいただくことはありますので、工事の影響によるものと思われるが、事故に直結するものではないというふうに考えております。
- ・ 37 ページ以降は施工管理に関する内容になりますので、工事受注者からご説明いたします。

(工事受注者)

- ・ 37 ページです。掘進データの分析を示しております。まず注目したのがカッタートルクの値です。
- ・ 本工事では、掘進開始時からトルクは高いままだったのですが図 4.15 の赤い点は空回しの時です。空回しはシールドジャッキを押していない、スピードが出ていないときのカッタートルクになります。
- ・ 図 4.15 をみると本掘進の最後の方でだんだんと空転時に計画最大値を超過する頻度が増加するという傾向が見られました。
- ・ 図 4.16 が本掘進の全線です。計画最大値で想定しているのが完全に礫が面板に食い込んで回した時、装備トルクの 40%程度となるように計画値を設定しています。これは考え得る最悪な条件で仮定しています。それに対して9月3日ぐらいから徐々に赤い点が多くなっていることが読み取れます。
- ・ 38 ページです。
- ・ おなじく事故の瞬間を切り取った1秒解析データです。
- ・ ⑥の10箇所計測している切羽土圧が8時45分34秒に一気に下がっています。この瞬間に事故発生が発生したと推定しております。その時にあるいは、この前後に何が起きていたのかをデータとしてまとめてあります。
- ・ まず上の方から説明しますと、①のシールドジャッキ推力がその瞬間に約20%低下しています。②のシールドジャッキストロークがこの瞬間、それまでの十倍の速度で伸びました。③ピッチングが0.08%上昇しています。④中折ジャッキの油圧が低下しています。⑤カッタートルクは5%増加しています。
- ・ ⑥切羽土圧一斉に低下してから、その2秒後に土圧が下がったことを検知して自動的にシールドマシンは停止しております。それが⑦の掘進速度と⑧のスクリーコンベヤー油圧で読み取れます。ここで特徴的なのが8秒ぐらい前から⑥の全切羽土圧のデータが上昇傾向にありました。また、同様に8秒前から⑧の一次スクリー、二次スクリーともに油圧、つまり負荷が上昇傾向にありました。また⑨の礫取り箱の土圧です。礫取り箱の上部についている土圧計になります。こちらは34秒の瞬間に一気に下がっている。ただし、他と同じように8秒前から徐々に増加しているということが読み取れます。これより前に関しては0.4MPa程度で一定の値でした。⑩がカッター回転の位置を示します。360度で1回転であり本機は1分間に1回転します。このグラフはカッター位置を表しています。
- ・ 8時45分34秒には真ん中の写真で示していますが、ちょうど12時方向の位置

に攪拌翼がいて 120 度刻みで攪拌翼がいるような位置関係になります。それに対してデータとして読み取れたのが 8 時 45 分 23 秒ごろです。こちらに関しては 2 秒程度カッターが回らなかったという状況が読み取れます。この位置関係として、ちょうど攪拌翼がスクリーコンベヤーの取り込み口を通過しつつあるところでした。

- 39 ページです。
- もう少し広めに 293R の 23 分間の掘進データでこれも 1 秒データになります。特異性があるのが先ほども説明しましたが④のカッタートルクです。これが出水の 9 分ほど前から緩やかに下降している傾向にあります。
- それからその下⑤が切羽土圧になります。計測値が 9 分ぐらい前から上部の土圧になるが、かなりの瞬間的な変動を示している状況になります。しかも小さく赤丸で示していますが定期的な周期で値が大きくなっているというのが読み取れます。
- それから⑦スクリーコンベヤーの油圧になります。通常、負荷に関して一次スクリーは大きく、二次スクリーは少し小さくなるが、出水の少し前から一次スクリーと二次スクリーの負荷が同等になってしまっているというところが特徴的なところと考えます。
- それから⑨先ほど説明しましたカッターの位置関係になります。このひと山が 1 分毎です。1 分で 0 度から 360 度回るのがですが、赤丸で囲った部分で若干抵抗が見られる。先ほど 2 秒止まったというふうに説明しましたがけれども、やはり抵抗を感じているのか回転が滞っている部分がある。そのような傾向が約 9 分前から増えてきているのが読みとれます。1 秒データ解析については以上です。
- 40 ページです。
- 前回の委員会で礫取り箱の圧力が最後増加したことによる影響という話がありましたので、そちらの検証を行っています。
- 図 4.19 が圧力の経時変化です。礫取り箱内の土圧が最後 0.73MPa まで上昇して瞬間的に低下しております。圧力の 0.73MPa がどのような影響を与えるのかを一次スクリーコンベヤーの解析を行い検証しました。計算モデルは、二次元のフレーム計算により照査を行っております。右図 4.20 に示すようにスクリーコンベヤーを断面性能が場所により変化する梁として計算しました。
- 41 ページがその解析のモデル、荷重条件等をどのように考えたということを示しています。土水圧が礫取り箱内に作用して 0.73MPa まで増加すると②のスクリーコンベヤーに反力として軸力が作用すると仮定を荷重条件としています。それが図 4.24 のフレーム計算の解析モデルになります。
- 42 ページです。図 4.25 が発生断面力図で曲げモーメント、軸力、せん断力になります。それぞれの断面において応力照査を行なっています。結論が右表 4.7 です。許容値に対して、いずれも発生応力は下回っているということで 0.73MPa によってスクリーコンベアが破壊に至ることはないと考えおります。

- ・では、次 43 ページに行きます。
- ・43 ページです。シールドマシンには先端ゲート、スクリュゲートがついておりまして、それらの説明を改めてさせていただきます。まず図 4.26 でゲート位置を示しています。このうち①の先端ゲートは技術提案で提案したものになります。
- ・こちらに関しては一次スクリュ先端に大きめ礫が引っかかって、正転も逆転もできなかったという時にこのゲートを締めて、止水性を担保してから点検蓋を外して削岩機で破碎するというためのものがこの先端ゲートになります。緊急時に閉めるものではなく、手順を踏んで閉めるようなものになります。
- ・次に右側に②一次スクリュゲート、③二次スクリュゲートを示しています。動画で映っていたのはこの二次スクリュゲートの出口になります。これは通常の掘進時に使うものになります。
- ・44 ページになります。シールドマシン本体の品質管理についてです。
- ・溶接に関しては外観検査、のど厚の測定等を実施しております。それから抜き取りでカラーチェックを行っております。図 4.30 は開口部の周りの部材を溶接しているが、そこに関しては全箇所カラーチェックを行っております。
- ・それからボルト関係の管理状況も合わせて記載しています。使っているインパクトレンチも実際、工場を確認しております。セットして回してボルトが完全に回らなくなるまで行っている。例えば M24 であれば 5 秒、M36 であれば 10 秒程度回して完全に締まったことを確認する。締まったチェックマークをつけるということを行っております。
- ・45 ページです。品質確認の帳票です。
- ・ここでは多くの帳票の中の一部の例として示しています。それぞれ工場検査の時と現地組立完了時の検査において品質の状況を確認しています。
- ・46 ページは図 4.34 です。その状況写真を示しています。
- ・47 ページです。セグメント品質管理になります。
- ・こちらに関しても通常の一般的な管理を行ってまして、まず月報等により製作状況を確認して、その時の品質を確認しています。その後、現場で製品の組み立てを行いまして、寸法等の確認を行っております。
- ・次 48 ページです。
- ・セグメントに関しては、坑内で組み立てを行いますので、その組み立ての状況、どの部品がどの位置についているか、欠けとかひび割れがないかということを確認しています。
- ・4 章の説明は以上でございます。

(座長)

- ・シールドマシンが、今現在どういう状況なのかという調査。また、シールドマシンの中に入ってきた水は、どの水か。さらに、水中ドローンによって、どのくらい土が溜まっているか、それが陥没した土とどう関係しているか、といった話。

それから、前回シールドマシンの姿勢がぐっと持ち上がったという話があった。持ち上がったままかどうか、再度調べると下がってきている。これ以上下がるかどうかかわからないが、その話。

- ・それから、シールドの事故は今までないわけではなく、このクラスのシールドを調べてみると、いくつかあるが、いずれの事例もシールドマシンは水に安全には浸かってはいない。水が若干入ったという程度が多い。マシンが完全に水に浸かってしまえば、電気機器類はまず全部だめ。それから、駆動部、ジャッキや油圧機器関係は大丈夫だろうと思う。これらは、整備すれば何とかなる。問題は電気機器類。これが水に浸かると、まず復旧はむずかしいと思う。
- ・それから、住民の方から事故の時のヒアリングをお願いした。また、施工データをかなり綿密に調べていただいた。その結果として、スクリーコンベアが引き抜けたりするような状況ではなく、施工データからも、例えばカッターのトルクがガクガクとなるようなことはなかったように思われる。シールド機が礫地盤を掘っているときには、礫がシールド機のスポークの間に挟まったり、攪拌翼に当たったりすると、カッタートルクの施工データにこういう記録が残るので、そういう点からみると、施工の方には問題がなかったような気がする。

(委員)

- ・35 ページのシールド事故事例調査のところで、1 者に聞き取りをしていただいたと。先ほど説明の中で、土砂が入った例がないということだったと思いますが、ここまで大規模に機内に土砂が流入した事例というのは確かに生じていないのかなという気はしている。そういう意味では、参考となる例はないんじゃないかなと、非常に珍しいパターンだなというふうに思う。ぜひとも、事故の原因を検証して、事故のメカニズムをしっかり解明していただけたらというのは、意見でもあり、シールド関係をやっている者としてのお願いでもある。

(座長)

- ・シールド機の前胴部分が浮き上がることで、後ろの方のセグメントが押し下げられ、セグメントが壊れている可能性はないかとのことのご意見が前回あった。
- ・セグメントはどこで製作されたものか。

(工事受注者)

- ・国内メーカーの国内工場で製作している。

(座長)

- ・半径方向挿入型になった理由はあるか。

(工事受注者)

- ・本工事では最小曲線半径 25m の急曲線が複数箇所ありまして、可能な限り機長を縮めたいという点から半径方向挿入を採用している。

(座長)

- ・セグメントの搬入時や取り扱い時に欠けたり割れたりということはなかったか。

(工事受注者)

- ・取り扱い時に割れたものに関しては手順に則って補修しまして、そういった確認は必ず行っています。

(座長)

- ・セグメントに関しては、良さそうだ。
- ・住民の方のヒアリングですが、基本的には掘進しているときにシールドに近いところでは何かしらの音とか振動とかを受けるということで、住民の方が感じられることはあると思うが、回答された方は掘削地点からかなり離れている。また、マシンが動いていない時のご指摘もある。一般に礫地盤なんか掘進しているときには、シールド機に近いDとFのところでは振動はある程度起こるし、騒音も起こる。でも、それとこの事故とは、どうもこれ関係なさそうだ。今回の事故と、住民の皆様方からヒアリングした内容とは直接関係はなさそうだなというような結論に至るような気がする。
- ・他には何か住民の皆様からそういう苦情はなかったか。

(事務局)

- ・苦情の方はございませんでした。

(座長)

- ・シールド機の前方向の下の方から水が出てきているというのは確かである。考えられることは、スクリーコンベアが抜けたりずれたりということだろうと思う。それについて、きっちりと計算をしていただいた 40、41 ページ、そして 42 ページの結論をみると、許容値に対して、発生する応力がかなり小さいということである。スクリーコンベアが壊れたとか、また、引き抜かれたというようなことは考えにくいというようなことだろうと思う。

(委員)

- ・表 4.7 のところについて、この表が成立する場合、発生応力と許容値の関係ですが、発生応力の方は、一応 40、41 ページの方で説明があり、こういった外力がかかっているという状態で行くと、こういう発生応力が出ますよということだが、静的に考えるとそういうふうな値になっているのかもしれないが、場合によっては、硬い層を掘っているんで、硬いものを噛みこんでしまい、衝撃的に力が大きくかかるという可能性もあるかなと思う。そうするとまずいと。それから、もう一つは、許容値というものがあるが、許容値というのは、要するに、設計どおりのものができているというのが大前提で、そのところが、そうではないとなると、この許容値自体の信頼性がどのくらいあるかという話になる。これは要するに、物の話と、外力の話、この両方ともがセットになって、両方とも OK だったら OK なんだけどという状態だと思っている。その辺のところを詰めないといけないかなと思うので、最終的には、マシンを見てみないと何ともわからないという気がする。

(座長)

- ・ 実にそのとおりです。許容応力度、所定のとおりの物ができていれば壊れないということ。原因を明らかにするためにはどうしても切羽まで行ってみるという必要がある。
- ・ 調査の結果を踏まえ、シールドマシンの内部をどのように調べるか。(3)シールドマシン内部の調査方法について説明をお願いしたい。

【議事(3) シールドマシン内部の調査方法について】

(事務局)

- ・ ページを戻っていただきまして、22 ページをご覧ください。
- ・ 第1回検討委員会においてご意見をいただいたとおり、明確な原因究明を行うためには、シールドマシン周囲の地盤を止水し、坑内を排水、流入土砂を撤去することで、シールドマシン内部を直接目視・調査する必要があると考えております。
- ・ これにより、出水箇所の特定や、シールドマシンの損傷箇所の確認を行うことが可能となることから、シールドマシン周囲の地盤を止水するための工法について検討を行いました。
- ・ まず、「シールドマシンの止水工法の選定」についてです。
- ・ 結論から申しますと、現在、シールドマシンは高水压下・大深度の玉石砂礫層で停止しており、このような条件下において高い止水性を確保できる、「凍結工法」が本調査の止水方法に最適であると考えております。
- ・ この結論に至った背景等について、ご説明をさせていただきます。
- ・ まず、止水工法の検討において、凍結工法の施工可否を確認するため、陥没箇所周辺の地下水の塩分濃度と流速を調査しました。
- ・ その結果を表 3.1 および表 3.2 にお示ししています。
- ・ 表 3.1 のとおり、塩分濃度に関してましては、0.32～1.17%という結果が得られました。
- ・ この結果に関しては、塩分濃度 2.5%での施工実績という評価指標がありますが、今回の調査結果は、塩分濃度 2.5%を下回っており、凍結工法の適用は十分可能であると考えております。
- ・ 次に、表 3.2 の流速に関しては、平均流速が 1 日あたり 1.123～1.435mという結果が得られました。
- ・ 一般的に、地下水の流速は 1 日あたり 2m程度が凍土造成の限界とされていますが、今回調査した流速は 1 日あたり 2mを下回っており、凍結工法の適用は十分可能であると考えております。
- ・ よって、塩分濃度・流速の調査結果から、シールドマシン周辺の地盤は凍結工法の適用範囲内にあると判断しております。
- ・ 続いて、ページ右側の「(2)止水工法比較検討結果」についてご説明いたします。

- ・表 3.3 に、高水压下・大深度の砂礫層における 3 つの止水工法に関する比較検討結果をお示しています。
- ・表の一番左側の薬液注入工法は、地盤中に薬液を注入して固化させる工法でございます。大深度・高水压下においてトンネル内部に人が入るということを踏まえると、止水の信頼性が低く適切ではないと評価しております。
- ・次に表の真ん中の高圧噴射攪拌工法は、地盤中にセメント系固化材と水を練り合わせたセメントスラリーを高圧で噴射し、土砂を攪拌混合して改良体を造成する工法です。玉石砂礫層では玉石背面に高圧噴射が届かず、未改良部が発生する可能性が高く、止水に必要な均一な改良体の造成が困難であると評価しております。
- ・最後に、表の右側の凍結工法は、地盤強度と止水性を確保することを目的として、シールドマシン周囲の地盤中に含まれる間隙水を凍結し、凍土を造成する工法です。先ほどご説明しましたように、塩分濃度や流速の問題はなく、今回の条件下においては、凍結工法が最適であると評価しております。
- ・続いて 23 ページをご覧ください。
- ・先ほどご説明いたしました、塩分濃度及び流向・流速の測定結果の詳細についてです。
- ・ページの左側に塩分濃度の測定位置や測定状況をお示ししています。今回、陥没箇所近傍の赤マル位置の 5 か所で塩分濃度を測定しています。
- ・次に、ページの右側に、流向・流速の測定位置や測定状況をお示ししています。今回、陥没箇所近傍の赤マル位置の計 3 か所で流向・流速を測定しています。
- ・続いて 24 ページをご覧ください。
- ・シールドマシンの止水領域についてです。
- ・現在、シールドマシンは高水压下・大深度で停止しており、止水の対象となる地盤は、ボーリング調査等の結果から周辺と比較して複雑な構成となっております。
- ・ページの左側に、これらの状況を整理した表と概念図をお示ししています。
- ・概念図には、止水範囲として、水色の領域①、緑色の領域②という 2 つの領域をお示しております。
- ・領域①は、シールドマシン前面付近の乱された地盤、領域②はシールドマシン側方から後方付近の沖積基底層や洪積砂礫層でございます。
- ・この止水領域を①のみとするか、①と②の両方とするか検討を行いました。
- ・ページ右側をご覧ください。
- ・先ほど事務局よりご説明しましたシールドマシンの姿勢調査結果のとおり、シールドマシンは 1 度上向きに 53 パーミリまでピッチングの変化が発生し、現在は 20.5 パーミリにピッチングが変化しているものと推察されます。
- ・このことから、シールドマシンとセグメントは干渉しており、損傷している可能性が高く、領域②は止水性が確保できていない可能性が高いと考えてございます。
- ・よって、領域①と②ともに凍結する手法を採用したいと考えております。
- ・25 ページをご覧ください。

- ・最後に、「シールドマシン内部の調査方法」についてご説明いたします。
- ・図 3.5 にシールドマシン内部の調査計画図案をお示ししております。
- ・先ほどご説明したとおり、シールドマシン内部の調査方法は、領域①と領域②の全体を凍結する、シールドマシン全体凍結案としております。
- ・平面図および各断面図において、水色で網掛した範囲を凍結するよう検討しており、シールドマシン内部調査の止水の考え方についてご説明いたします。
- ・ページ右上をご覧ください。
- ・まず、地下水流速についてですが、陥没事故後に行った地下水流速結果の最大値は 1 日あたり 1.435m であり、凍土造成目安の 1 日あたり 2m を下回るため、凍土造成可能と判断しております。
- ・次に、凍土範囲設定方法についてですが、塩分濃度は凍土強度に大きく影響することから、今後、塩分濃度を精査したうえで、改めて凍結範囲を検討することとしております。
- ・以上で「シールドマシン内部の調査方法について」の説明を終わります。

(委員)

- ・24 ページの図 3.4 ですが、領域②は、1 度マシンが 53.9 パーミル程度までピッチングが出てるので、マシンとセグメントのところで干渉している可能性が高いと思います。具体的に 53.9 パーミル程度ピッチングが出ると、どれくらい干渉するか具体的な数値はあるか。

(工事受注者)

- ・CAD 上でのシミュレーションになりますが、50 mm を超えるくらいの接触があると考えております。

(座長)

- ・50 mm を超えるとすると、シールドのテールが痛んでいるか、セグメントがやられているか、どちらかになりそう。そうすると、領域①の青いところだけ凍らせても、水が入ってきたら調べることができないので、それで領域②までやりたいということ。
- ・25 ページの図の赤い点で描いた部分は今後続く地盤沈下を止めるための範囲。水色でハッチングされた部分は凍結工法を行う範囲。赤い部分は高圧噴射攪拌工法、ここは礫地盤は入っていない。凍結工法の部分、ここは砂礫層なので、高圧噴射攪拌工法でやったらとてもじゃないけど止められない。一番確実な凍結工法をやりたい。凍結工法は前の方の領域①だけでなく、セグメントまたはスキンプレートが壊れている可能性があるため、領域②までやりたい。そういう結果だろうと思う。
- ・いかがでしょうか。
ー委員意見なしー

【総括】

（座長）

- ・本日の議事をまとめると、まず土質調査がおこなわれ、その結果から判断すると、陥没箇所の土質、これは陥没によって、シールド機の中に土砂が引き込まれたことによって大きく変化しているということがわかった。その形もいろいろな調査の結果、また解析の結果から今回示されたような形になっているということがわかった。
- ・地盤沈下について、結論的に申し上げると、高圧噴射攪拌工法を、ちょっと範囲は広がるが、実施すれば地盤沈下は止まるだろうということであった。ただし、ほんとに止まったかどうかというのはきちんとモニタリングをお願いする。
- ・シールド機の内部の調査方法については、水圧が卓越するため、コストはかかるが、地盤改良工法の中でもっとも確実性の高い凍結工法を採用するということになる。コストがかかるので領域①だけでいけばいいが、シールド機の先端部分が 53.9 パーミル持ち上がっているので、テール部とセグメントとが干渉して、どちらかが壊れている可能性がある。凍結が完了した後に水を抜いても、水位が下がらなければ、どこからか水が供給されているということになり、これを止めるために、もう 1 回また凍結することになる。工期も工費も高くなるので、一挙にその範囲を凍結してしまうということで、25 ページにあるような範囲を凍結する。
- ・このような結論が得られたということですが、いかがでしょうか。特にコメントや異論などないでしょうか。
ー委員意見なしー