

り生じる上部への膨出変形量は試験装置頂部に設置した外部変位計により計測しました。さらに、試験容器側面に設置した土圧計や底部に設置したロードセル（荷重センサー）により膨潤圧を計測するとともに、緩衝材と埋め戻し材の境界面にはリン青銅板やひずみゲージを設置して境界面付近の緩衝材の膨出挙動の把握を試みています。

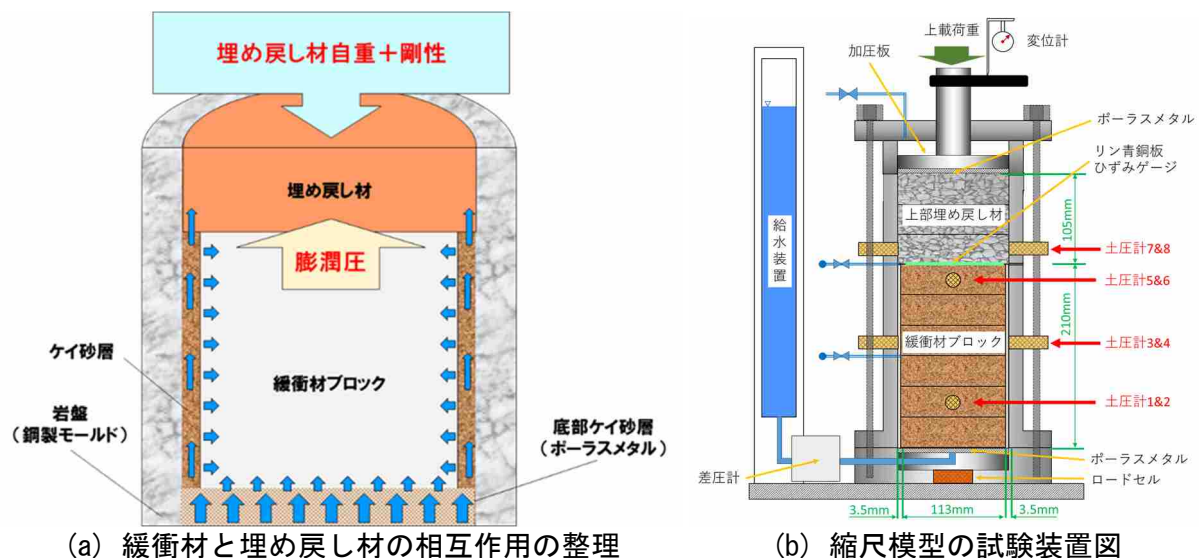


図 28 縮尺模型試験の概念図

(a)は人工バリア性能確認試験の状況と緩衝材と埋め戻し材の相互作用を整理した図、(b)は整理した相互作用を模した縮尺模型の試験装置図

令和2年度は、緩衝材と埋め戻し材の境界面に設置したひずみゲージとリン青銅板が膨潤挙動におよぼす影響を把握するために、ひずみゲージとリン青銅板を設置した条件（計測器有ケース）と設置しない条件（計測器無ケース）の2条件で試験を実施しました。外部変位計で計測した変形量は緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型全体の高さで除して、膨潤変形率として整理しました。図 29に膨潤変形率の経時変化を、図 30に注水量の経時変化を示します。試験開始後、注水量の増加に伴い膨潤変形率が増加しました。その後、20日を経過したころからその増加が緩やかになる傾向を示し、注水量が一定の値に収束した40日を経過したころから膨潤変形率も一定の値へと収束しました。膨潤変形率の最終値は計測器有ケースで3.36%、計測器無ケースで4.76%となり、境界面にひずみゲージとリン青銅板を設置していない計測器無ケースの方が上方への変位が大きい結果となりました。また、膨潤圧の計測例として、図 31に緩衝材の下段に設

置した土圧計1と2および上段に設置した土圧計5と6で計測した圧力の経時変化を示します。試験開始直後に急激に圧力が増加した後、1～2日を経過したころにピークを示し、減少傾向に転じました。15～20日を経過するころまでは減少傾向を示していましたが、その後緩やかな増加傾向に転じ、最終的に一定の値に収束する傾向を示しました。計測した圧力の最大値は、下段の土圧計1と2では圧力の最大値が1 MPa程度の値であるのに対して、上段の土圧計5と6では0.5～0.6 MPa程度とおおよそ半分ほどの大きさでした。計測器有ケースと計測器無ケースを比較すると、計測器無ケースの方が緩衝材下段において、ピークを迎えた後の圧力の減少が大きく、最終的な圧力の値も0.2 MPa程度低い値を示しました。

以上の結果から、境界面にひずみゲージとリン青銅板を設置している計測器有ケースでは、膨潤変形量が小さく、緩衝材の下段で圧力が高い値を示していることから境界面に設置したセンサーが緩衝材の膨潤変形に対する抵抗となっている可能性があることが分かりました。今後も、引き続き縮尺模型試験を実施し、埋め戻し材の緩衝材膨出抑制機能を評価するためのデータの拡充を図ります。

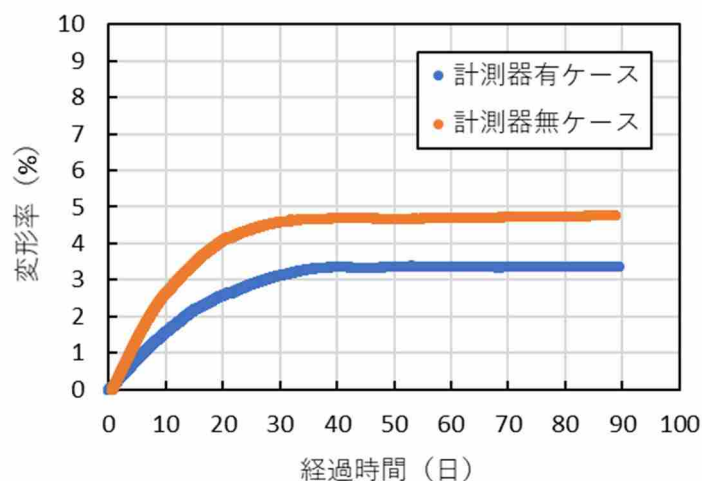


図 29 縮尺模型試験における膨潤変形率の経時変化

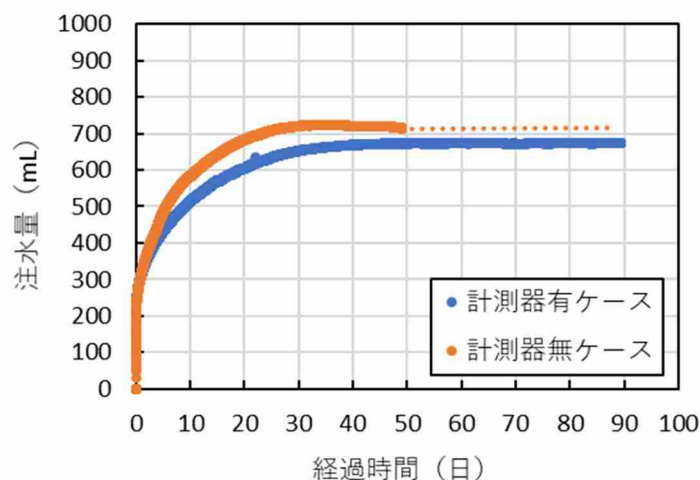
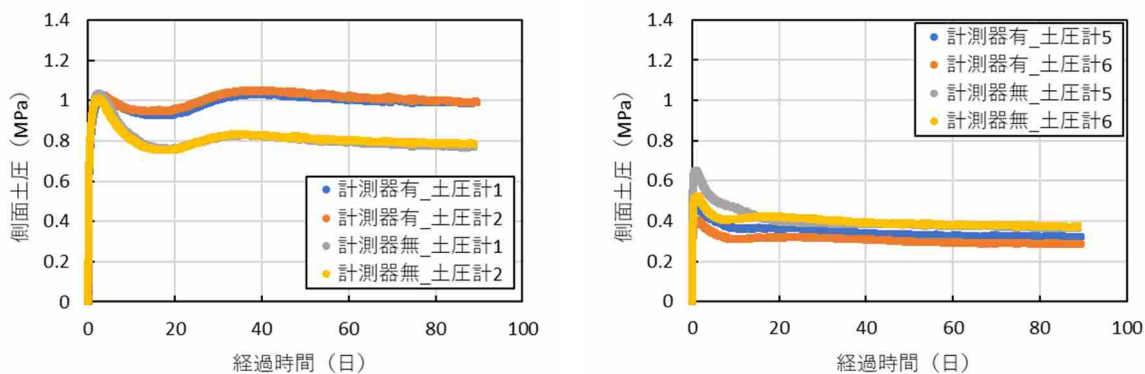


図 30 縮尺模型試験における注水量の経時変化

計測器無ケースでは、差圧計の不具合により50日以降の注水量のデータが欠測しています。



(a) 土圧計1、2

(b) 土圧計5、6

図 31 縮尺模型試験における膨潤圧力の経時変化

③ 掘削損傷領域を遮断するための施工技術の実証

坑道の掘削で生じた掘削損傷領域（EDZ）においては、割れ目の発達に伴い透水性が増大することにより卓越した物質の移行経路となることが想定されています。EDZの連続性を遮断し卓越した移行経路となることを回避するための手法として、低透水性の材料であるベントナイト系材料を用いた止水プラグを設置する考え方が国内外で示されています。ベントナイト系材料を用いた止水プラグがどの程度の地下水移行抑制機能を持つかについて、透水性を指標の一つとして評価することを目的として、EDZを遮る機能が期待される止水プラグの切欠き部分を縮小して模擬した粘土止水壁を試験坑道3に構築し、EDZシーリング試験を行っています。

令和2年度は、令和元年度に引き続き、止水プラグの切欠き部を模擬した粘土止水壁を対象とした透水試験を実施し、試験領域の透水係数が時間の経過とともにどのように変化するか調査しました。図 32に試験を実施した場所の概要を示します。試験坑道3の底盤から鉛直下向きにボーリング孔（以下、EDZ-1孔）を掘削しています。このEDZ-1孔を中心とした半径0.5 mの円周上に幅0.1 m、深さ2.0 mのスリットを掘削し、ベントナイトのペレットを充填することで粘土止水壁を構築しています。令和2年度の透水試験は、令和元年度の透水試験からおおよそ1年が経過した時点で実施しました。透水試験では、EDZの領域を含むように設定したEDZ-1孔の深度0.31 m～1.70 mの区間より注水し粘土止水壁で区切られた内側の領域を対象としました。令和元年度は、同じ注水区間において粘土止水壁の構築前後で透水試験を実施しており、構築前の透水係数は約 2×10^{-6} m/sの値を、構築後の透水係数は約 3×10^{-9} m/sの値を示し、粘土止水壁を構築することで試験領域内の透水性が低下することを確認しています。令和2年度の透水試験の結果、試験領域の透水係数は約 2×10^{-9} m/sの値を示しました。このことから、粘土止水壁を構築して1年が経過した時点においても構築直後と同程度の透水係数の値を示し、透水性を低下させる機能が維持されていることを確認しました。

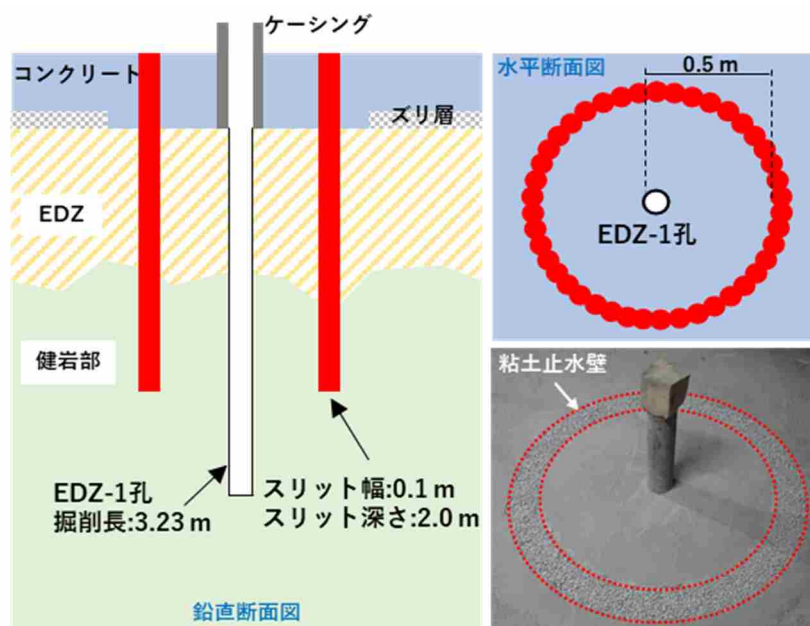


図 32 粘土止水壁周辺の概要図

また、止水プラグがEDZの連続性を遮断する構造物として成立するためには、要求する性能を発揮できる品質（例えば、乾燥密度など）を確保して施工できる方法が必要となります。例えば、締固め工法で施工する場合、坑道の側壁部や天端部の切欠き部では岩盤と止水プラグの境界面の近くは十分に締固められずに乾燥密度が低下する可能性があります。この止水プラグの切欠きのように坑道の上部に位置する狭隘な空間に対するベントナイト系材料の施工方法として、吹付け工法の適用性を検討しています。

令和2年度は、吹付けに用いるベントナイトの材料の種類や配合に応じた吹付け施工に係る特性データの取得のための予備試験を実施しました。予備試験の実施状況を図 33に示します。

ベントナイトは、粉末ベントナイト（クニゲルV1）と粒状ベントナイト（クニゲルGX）の2種類を用いました。吹付け材料は、ベントナイトとケイ砂を混合した材料である①クニゲルV1 70%+ケイ砂 30%（V1-70）、②クニゲルV1 50%+ケイ砂 50%（V1-50）、③クニゲルGX 100%（GX-100）、④クニゲルGX 70%+ケイ砂30%（GX-70）の4種類を検討しました。予備試験では、幅1 m、高さ50 cm、奥行き48 cmの木製型枠に対して吹付けを行いました。吹付けによる乾燥密度の目標値は、それぞれの材料で有効粘土密度^{*32}が1.2 Mg/m³を確保できる値に設定しました。

吹付けた後の材料からサンプリングを行い、含水比と乾燥密度の測定を行いました。図 34に、吹付けた後の材料の乾燥密度の目標値とサンプリング試料全体の平均値および最大値、最小値を示します。クニゲルGXの吹付け材は、平均値が目標値を上回っているのに対して、クニゲルV1の吹付け材では、乾燥密度のばらつきが大きい傾向にあり、平均値が目標値を下回りました。図 35に測定した含水比と乾燥密度の関係をサンプリングの位置ごとに上部、中部、下部と分けて整理した結果を示します。吹付けた後の材料は、型枠の下部で乾燥密度が低くなっていることが分かります。これは、型枠の下部では、吹付けの際にはね返りが発生し付着しなかった材料（リバウンド材）を巻き込んだことによるものと考えられます。V1-70では型枠の下部での乾燥密度の低下により平均値が目標値を下回

*32：緩衝材や埋め戻し材中に含まれるケイ砂の体積を除いた、ベントナイトのみの乾燥密度を計算したものです。

っているのに対して、V1-50ではほぼ全ての場所において乾燥密度が目標値を下回っていることが分かりました。



(a) ベントナイト材料の吹付け状況

(b) サンプルングの実施状況

図 33 ベントナイトの吹付けによる施工方法の予備試験実施状況

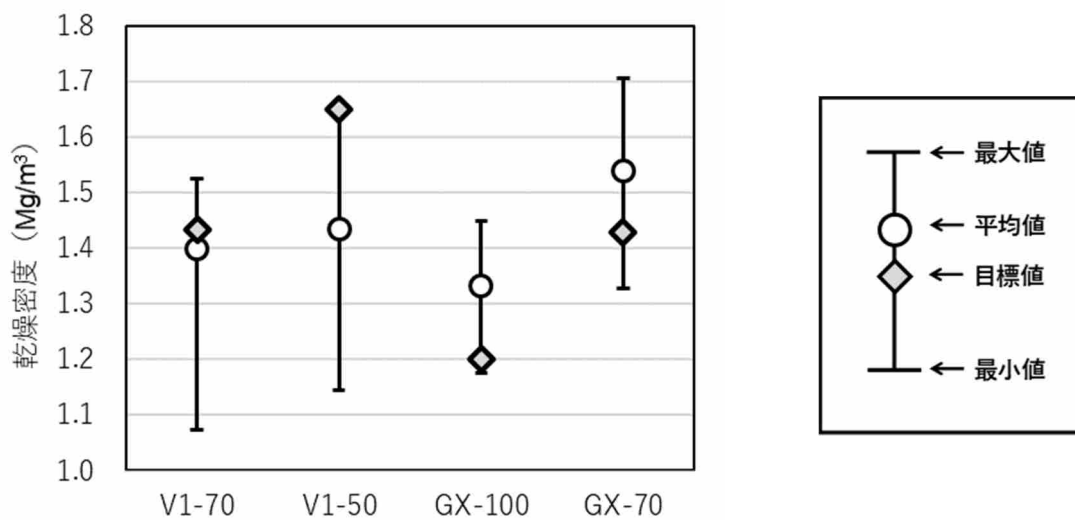


図 34 乾燥密度の平均値および最大値、最小値

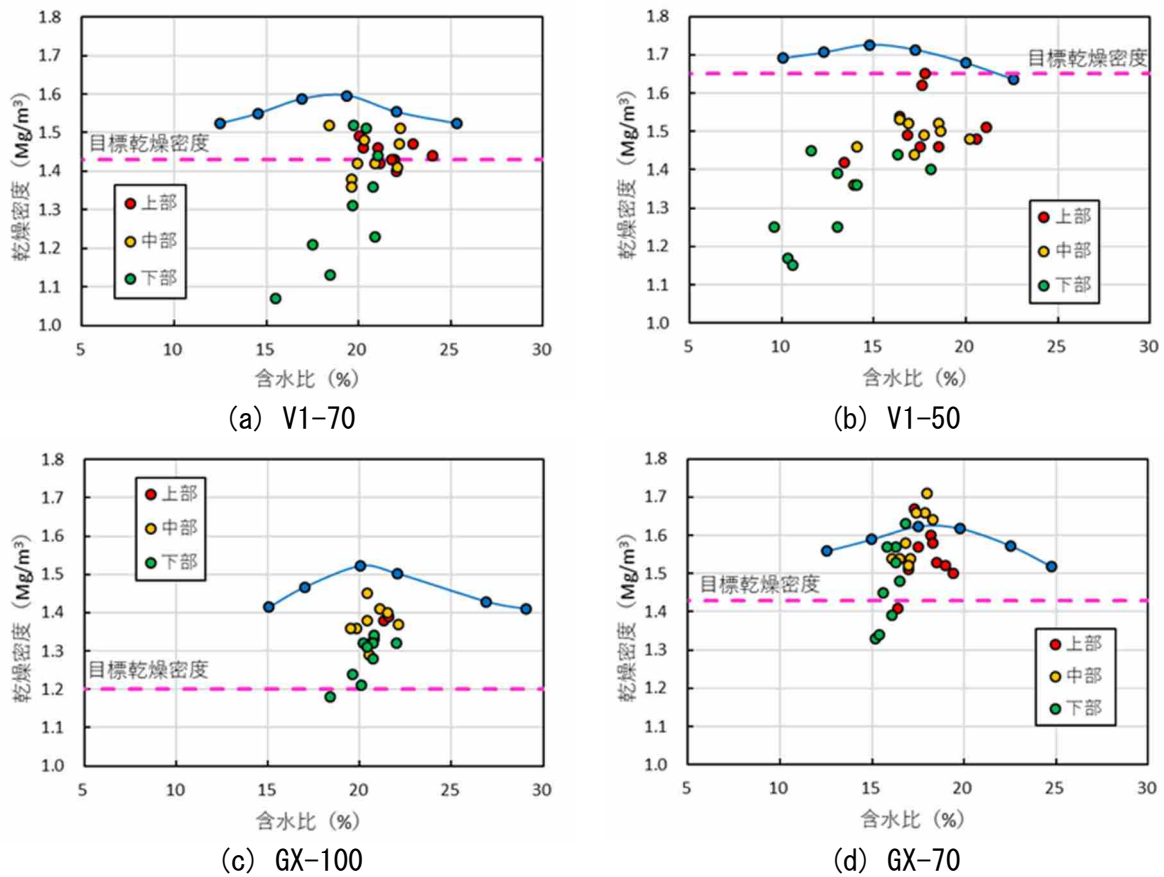


図 35 含水比と乾燥密度の関係

図中の青色の実線とプロットは、予備試験の実施前に最も乾燥密度が高くなる乾燥密度を求めるために実施した締固め試験の結果を示しています。

令和2年度はさらに、上部に位置する狭隘な空間への吹付け施工の適用性の確認を目的として、切欠き部の形状を模擬した型枠に対する吹付け試験を実施しました。

図 36の赤枠で示す坑道の側壁から天端にかかる範囲の形状を、鋼板を組み合わせた模擬型枠により再現しました。模擬型枠の寸法は、幅1 m、高さ3 m、奥行き1.3 mで、模擬型枠の背面の曲率は切欠き部の背面の曲率 ($R=3.0$ m) を再現しました。吹付け材料は、クニゲルV1では予備試験の結果よりV1-70を用いることとし、クニゲルGXではV1-70と材料の配合を揃えて結果を比較するためにGX-70を用いることとしました。吹付けによる乾燥密度の目標値は、それぞれの材料で有効粘土密度が 1.2 Mg/m^3 を確保できる 1.43 Mg/m^3 に設定しました。吹付け時の様子と吹付け後の出来形の様子を図 37に示します。模擬型枠の天端部では、ノズルを斜め上方や直上に向けて材料を吹付け、背面に吹付けられている材料と連続する

ように吹付けを形成することで、隙間なく施工することができました。吹付けた後の材料はサンプリングを行い、含水比と乾燥密度の測定を行いました。測定結果は、サンプリングした位置ごとに図 38に示す4つの領域で整理しました。

図 39に含水比と乾燥密度の関係を、図 40にサンプリング位置ごとの乾燥密度の平均値と最大値、最小値を示します。V1-70では、サンプリング試料全体の乾燥密度の平均値が 1.41 Mg/m^3 となり、目標値よりもわずかに低い値を示しました。乾燥密度の平均値は、サンプリング位置ごとの違いはほとんどありませんが、模擬型枠下部の底面の領域で乾燥密度が低下した領域が見られました。これは、吹付けの際に模擬型枠の下部に堆積したリバウンドを巻き込んだために、極端に乾燥密度が低下したと考えられます。一方、GX-70では、サンプリング試料全体の乾燥密度の平均値が 1.50 Mg/m^3 となり、目標乾燥密度を上回る値を示しました。乾燥密度の平均値はV1-70と同様に、サンプリング位置ごとの違いはほとんどありませんが、模擬型枠下部の底面の領域で乾燥密度が低下した領域が見られました。これらの結果より、ノズルを直上に向けた天端部や斜め上方に向けた背面上部においても水平に向けた場合と同等の乾燥密度で施工が可能なことを確認しました。

令和3年度は、地上での吹付け試験の結果を踏まえ、350m調査坑道において側壁部に切欠きを設け、ベントナイトの吹付けによる施工方法を検証する予定です。

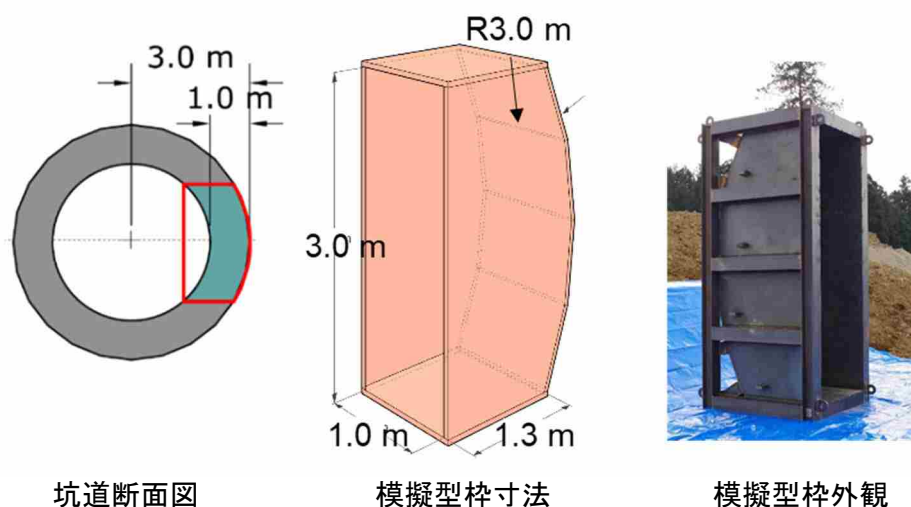
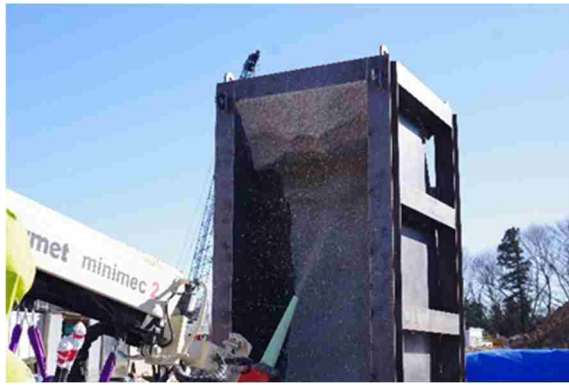


図 36 模擬型枠の形状



(a) 斜め上方への吹付け



(b) 直上への吹付け



(c) V1-70の吹付け出来形



(d) GX-70の吹付け出来形

図 37 吹付け試験の試験状況と出来形の様子

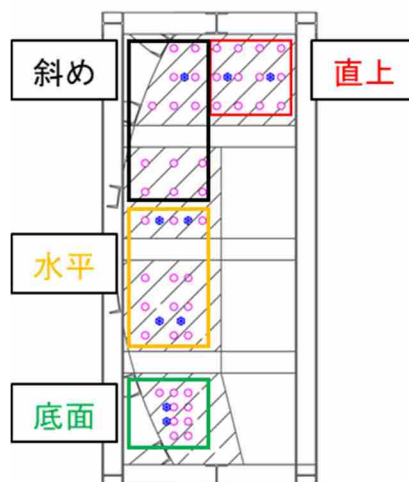


図 38 吹付け試験のサンプリング位置

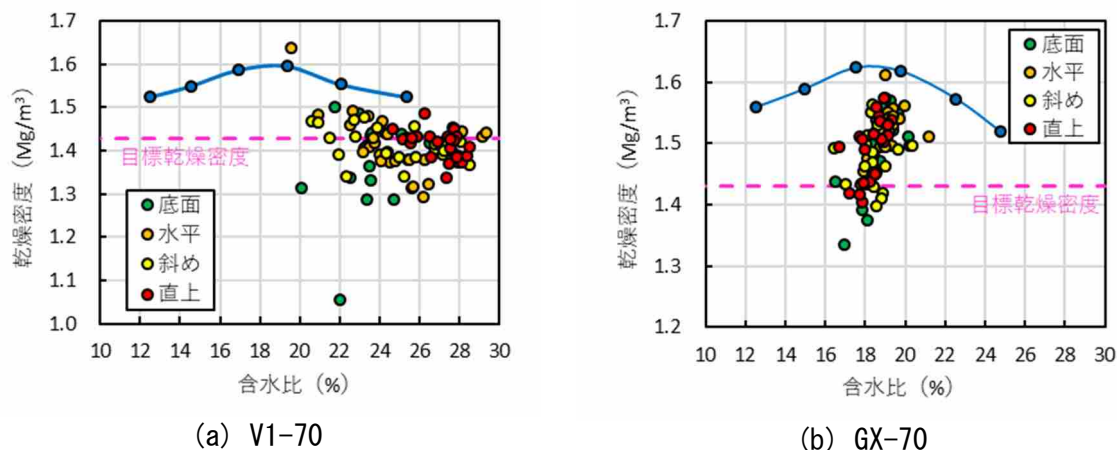


図 39 含水比と乾燥密度の関係

図中の青色の実線とプロットは、予備試験の実施前に最も乾燥密度が高くなる乾燥密度を求めるために実施した室内試験の結果を示しています。

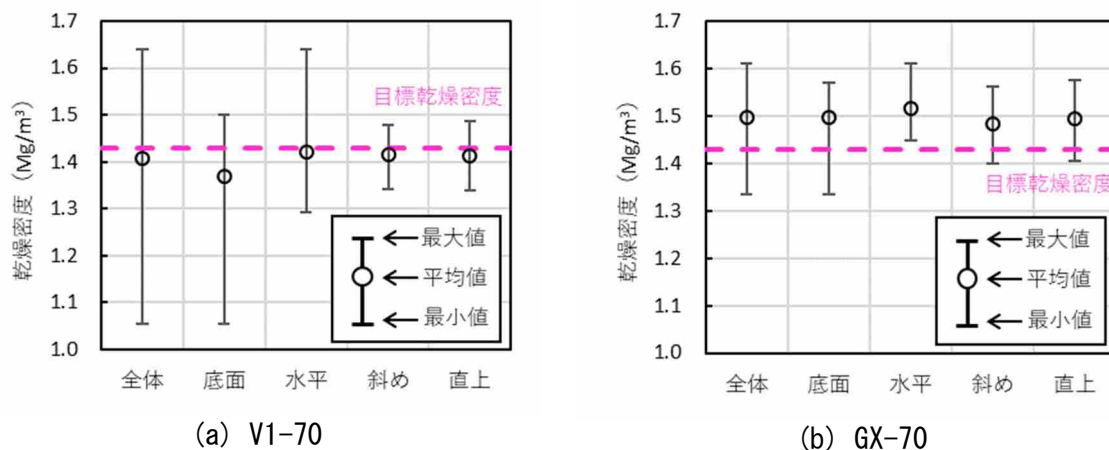


図 40 乾燥密度の平均値および最大値、最小値

④ 掘削損傷領域調査技術の高度化

処分場の閉鎖後に坑道や掘削損傷領域（EDZ）が水みちとなることを防止するためのプラグや埋め戻しといった坑道シーリング技術開発においては、実際の処分場での設計や安全性評価の基盤情報となるEDZの特性およびその空間的連続性などに係る調査技術が重要となります。

令和2年度は、EDZの物性や連続性を高精度に探査する技術の構築のため、超音波探査試験装置（Mini-seismic装置）⁽⁵⁾のプロトタイプを製作し、250m調査坑道の堆積岩へ適用しました。また、水理調査・物理探査、地質調査を同一の領域で実施し、EDZの範囲や損傷状態、地質性状を空間的に高精度に把握する三次元トモグラフィの結果と比較検討しました。

試験装置は、EDZの割れ目位置を特定し、損傷状態、性状を空間的に評価するために、超音波（周波数の高い弾性振動波）を地震探査の手法に適用して、岩石中の物性変化をセンチメートルオーダーの高い空間解像度で測定することを目的に開発しました。試験の概念を図 41に示します。

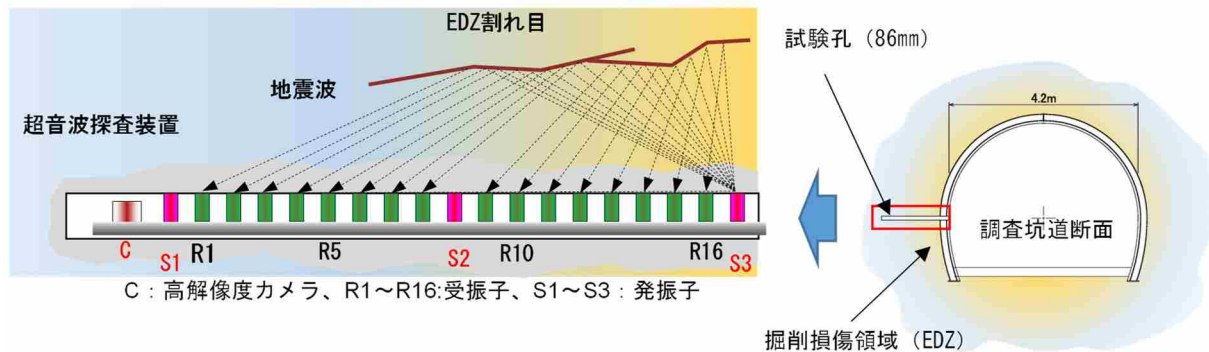


図 41 試験の概念図

試験装置の発振子（S1～S3）から放出される地震波は、試験孔の壁に沿って異なる深さの屈折波として受振子に伝わり、これらの深さは、坑道壁周りの EDZ 割れ目・微小割れ目の程度に依存します。

EDZが発生していると想定される箇所に試験孔を削孔し、製作した装置を使用して取得した波形の解析を行い、P波とS波の振幅の評価により、EDZ内の割れ目が見られる区間は相対的に振幅が小さい領域として検知できる可能性があることが分かりました。比抵抗測定の結果と合わせて図 42に示します。今後は、割れ目による微小な速度の差異を判別するために、測定箇所や測定手法の違うデータをさらに蓄積し、より詳細な解析を実施して原位置の物理特性を定量的に把握する必要があります。

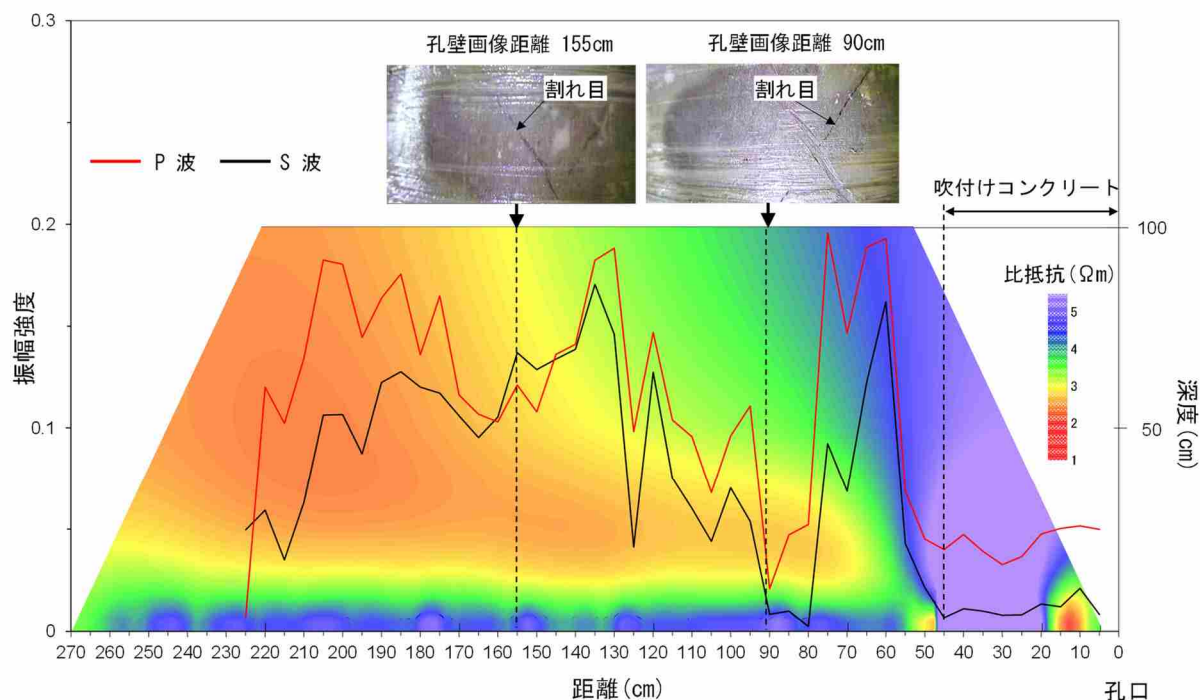


図 42 弾性波の振幅評価と比抵抗分布図

原位置の岩盤を広範囲に非破壊で調査する手法として物理探査技術があります。従来の物理探査結果で示されるものは、平均的な弾性波速度や比抵抗の分布であり、EDZのような坑道周辺の局所的な領域の力学的・水理学的物性値と定量的に結びつける総合的な調査技術として整備するためには、物理探査自体の高度化が重要と考えられます。また、弾性波速度や比抵抗は、割れ目の形成や温度などといった様々な要因に伴い時空間的に変化することから、そのような経時変化を定量的に評価するためには、概ね同じ箇所、同じ時点における温度や飽和度、割れ目の分布や形成などに関する情報が存在する箇所で物理探査を行うことが重要となります(6)、(7)。

そこで、EDZの範囲や損傷状態、性状を空間的に評価する技術の高度化を図ることを目的として、350m調査坑道の同一領域で水理・地質調査と物理探査（三次元トモグラフィ調査）を実施しました。

トモグラフィ調査は、対象領域の周囲に0.5 m間隔で起振点および発受振点、電極点を配置して、領域内を伝播する弾性波や電位を観測して領域内の弾性波の伝播特性や電位を測定しました。弾性波および比抵抗トモグラフィ調査の測点（発受振・電極点の間隔0.5 m）を図 43に示します。

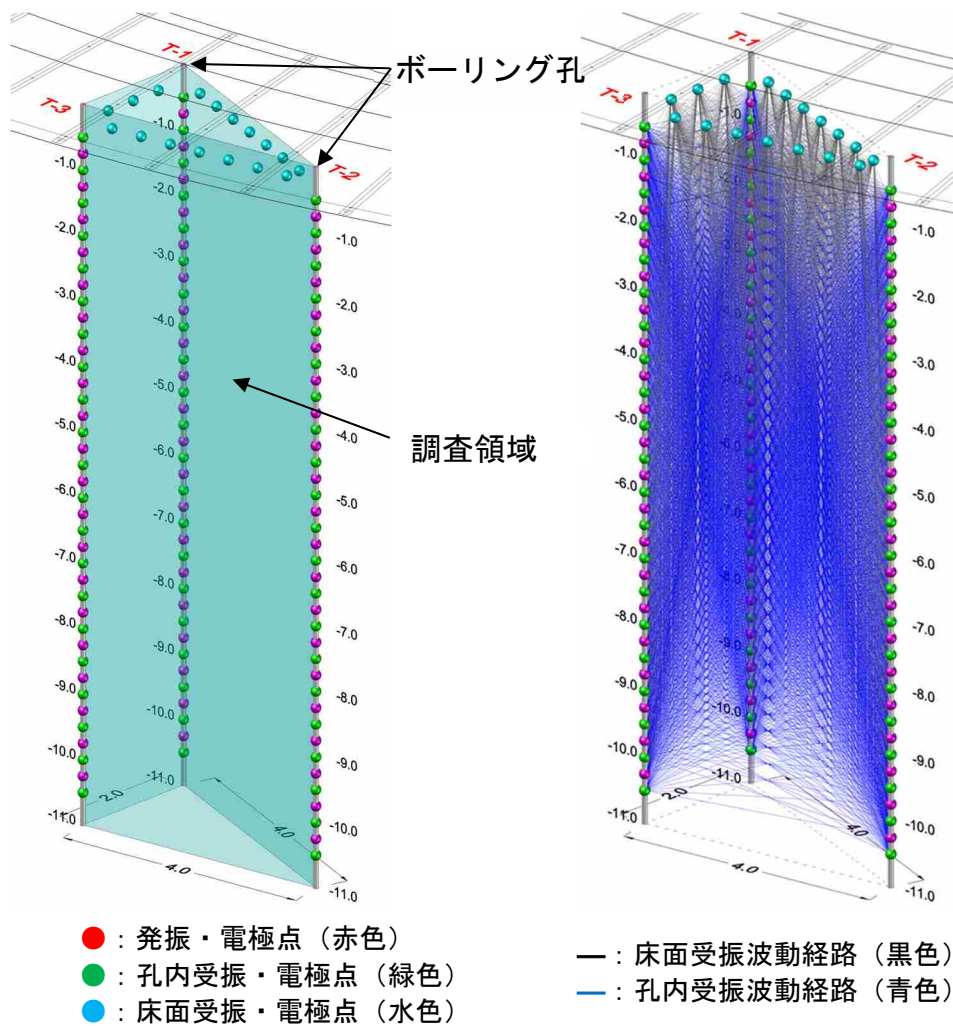


図 43 トモグラフィ調査の測点図

弾性波や比抵抗の空間分布を高分解能で可視化するために、弾性波は、0.25 m間隔の三次元メッシュ、比抵抗は0.25 m間隔の二次元メッシュで解析を行いました。図 44に弾性波および比抵抗トモグラフィ結果の3Dモデルを示し、図 45に弾性波速度分布を深度方向にスライスした断面を示します。調査の結果、一般的なトモグラフィの平均的な速度分布に比べP波およびS波ともに低速度の変化の領域を詳細に表し、コア観察およびボアホールテレビ観察で判明した速度変化の要因となる孔内の割れ目の位置や比抵抗分布とも整合しています。

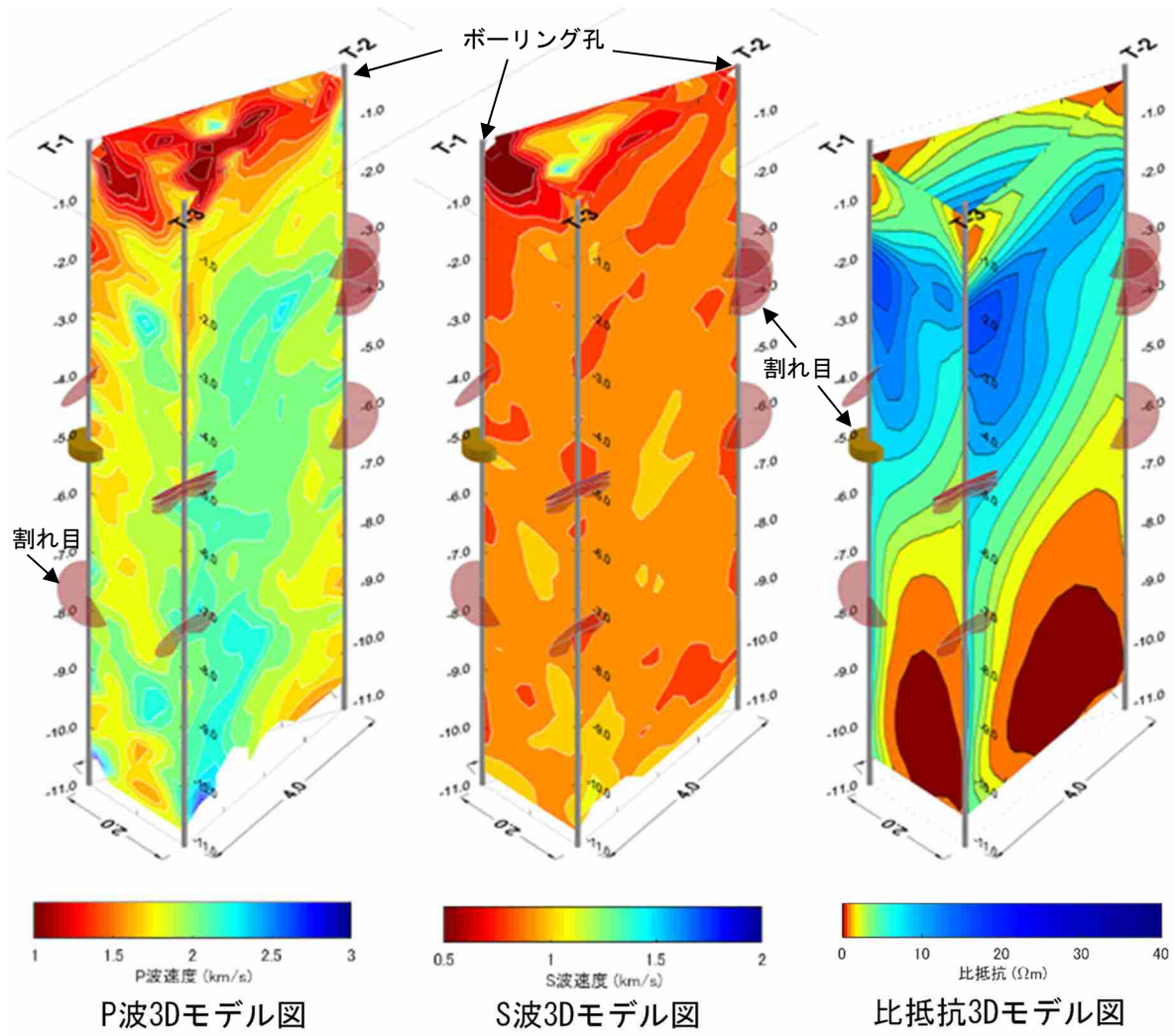


図 44 トモグラフィ結果図

坑道床面下から深度約-1.0 mまではEDZを示します。ボーリング孔の円盤は、割れ目の位置と走行傾斜の方向を表しています。

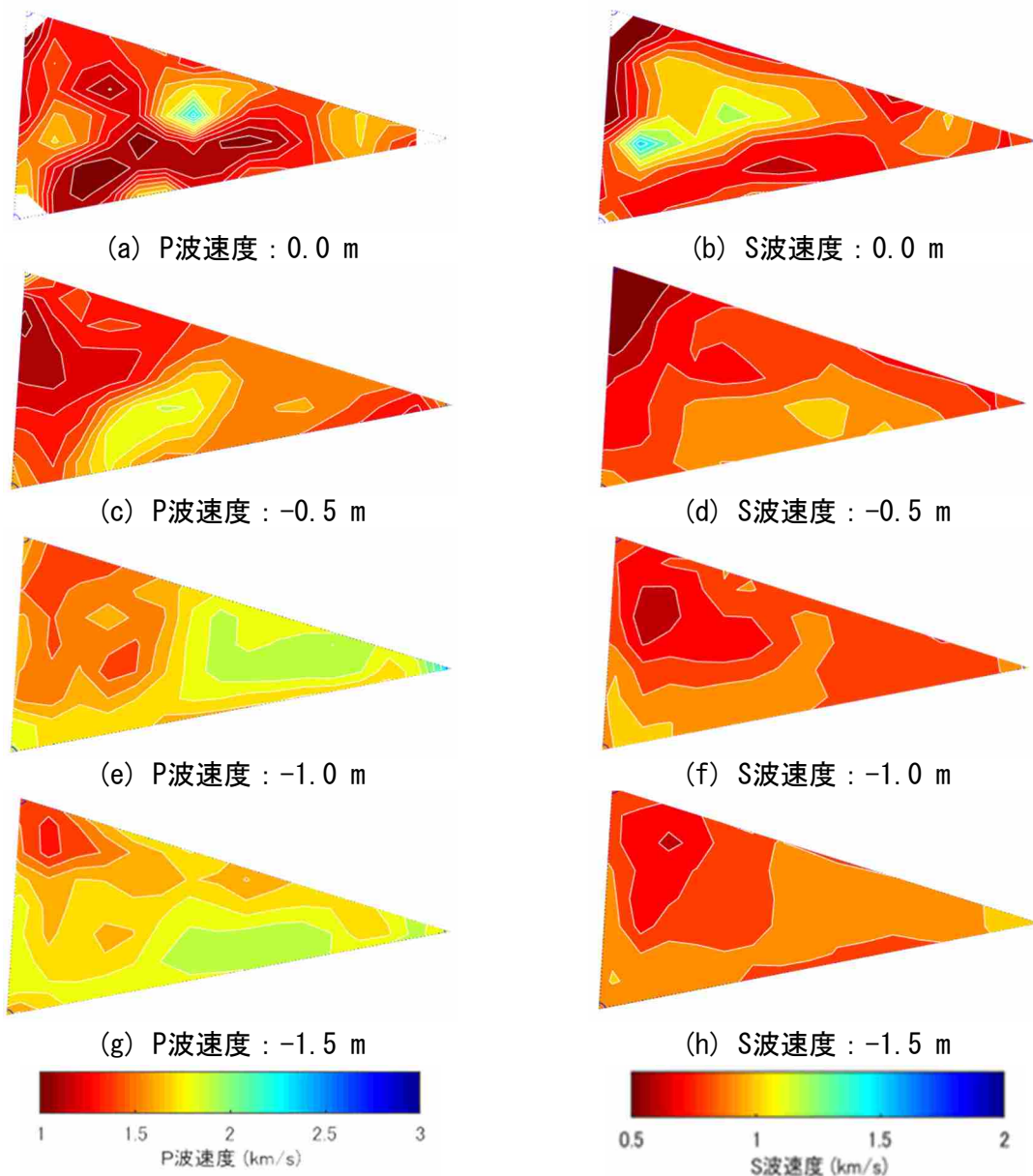


図 45 弾性波速度分布の深度スライス断面図

坑道の掘削により、坑道周辺の岩盤の損傷などによる掘削損傷領域 (EDZ) が生じたり、溶存ガスの発生などによる不飽和領域の形成といった掘削擾乱領域が生じ、そこでは、岩盤の透水性の増大や、地下水の水質変化といった地層が有する放射性核種の移行を遅延させる機能に影響を与えることが考えられます。EDZや掘削擾乱領域をまとめて掘削影響領域 (Excavation disturbed Zone : 以下、EdZ) と呼びます。閉鎖技術の実証の技術開発の一環として、EdZの経時変化の調査を実施しています。EdZは、坑道の掘削直後に坑道壁面周辺の岩盤への亀裂により発生しますが、そ

のEdZが経時変化により拡大していないことを確認するための調査を実施しました。

令和2年度は、これまで物理探査を繰り返し実施している250m調査坑道で弾性波トモグラフィを、350m調査坑道で弾性波および比抵抗トモグラフィを実施し、物理探査によるEdZの経時変化を把握するためのデータを蓄積しました。また、取得されたデータを精密に調査するために、数値シミュレーションにより坑道壁面に施工された吹付けコンクリートが弾性波トモグラフィ調査の精度に与える影響や、EdZの範囲やEdZ内の物性値が変化した場合に弾性波トモグラフィの調査で取得されるデータがどの程度変化するのかを見積もり、これまで蓄積されてきたデータを分析するための手法を検討しました。

数値計算により、吹付けコンクリートが弾性波トモグラフィ調査結果に与える影響を調べたところ、吹付けコンクリートは岩盤よりも弾性波が速く伝達するために弾性波は選択的に吹付けコンクリートを通過しており、弾性波トモグラフィ調査においてレンズのような役割を果たしている可能性があることが分かりました（図 46）。図 47はシミュレーションにより予測された弾性波の到達時間と350m調査坑道における調査で実際に計測された時間を比較したグラフで、各々吹付けコンクリートの影響を考慮した場合と考慮しない場合の結果の比較になります。吹付けコンクリートの影響を考慮した場合の方が、実測値と近い値が推定され斜線付近にデータが集中しており、この結果より実際の現場において取得されたデータは吹付けコンクリートの影響を受けていることが分かりました。この結果は、坑道周辺で実施した弾性波トモグラフィ調査の結果を解析する際に吹付けコンクリートの影響を考慮して解析することにより高精度に可視化できることを意味し、物理探査の調査結果の解析技術の向上に役立ちます。数値シミュレーションによる結果に基づき、試験坑道2においてこれまでに取得した弾性波トモグラフィの調査結果を解析したところ、坑道掘削の約1年後から現在に至るまで、弾性波トモグラフィ調査のノイズレベルを超える有意な変化は認められませんでした。