弾性波トモグラフィ調査の掘削影響領域 モニタリング技術への適用

杉田 裕^{1*} · 中村 隆浩² · 真田 祐幸³

¹(独)日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究ユニット(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)
²同上 現:戸田建設株式会社 東北支店(〒980-0811宮城県仙台市青葉区一番町3-3-6)
³(独)日本原子力研究開発機構 東濃地科学研究ユニット(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)
*E-mail: sugita.yutaka@jaea.go.jp

地下深部に坑道を掘削すると、坑道の周囲には掘削影響領域が発生する.この掘削影響領域 は、岩盤の力学的、水理的、地球化学的特性が変化することとなり、高レベル放射性廃棄物の 地層処分における放射性核種の移行経路を評価する上で、掘削影響領域の広がりや特性の変化 の度合い、それらの経時変化を把握することが重要となっている.筆者らは、幌延深地層研究 計画において、珪藻質泥岩に掘削した水平坑道を対象とした掘削影響試験において、坑道周囲 の岩盤の力学特性の変化を把握する目的で、弾性波トモグラフィ調査および孔内載荷試験を実 施し、弾性波トモグラフィ調査のモニタリング技術としての可能性を示した.

Key Words : EDZ, monitoring technology, seismic tomography survey, borehole expansion test, Horonobe URL Project

1. 緒言

高レベル放射性廃棄物の地層処分のように,地下深部 に坑道を掘削する場合,坑道の周囲には掘削影響領域が 発生することとなる.この掘削影響領域は,岩盤の力学 的,水理学的,地球化学的特性が変化することとなり, 高レベル放射性廃棄物の地層処分における放射性核種の 移行経路を評価する上で,掘削影響領域の広がりや特性 の変化の度合い,それらの経時変化を把握することが重 要となっている.

(独)日本原子力研究開発機構(以下,原子力機構)は, 北海道天塩郡幌延町において幌延深地層研究計画¹⁾を進 めている.その中で,深度140 mの調査坑道(図-1参 照)が展開する深度に分布する珪藻質泥岩(声問層)に おける水平坑道を対象とした掘削影響試験において,坑 道周囲の岩盤の力学特性の変化を把握する目的で,弾性 波トモグラフィ調査および孔内載荷試験を,水理的特性 の変化を把握する目的で透水試験,間隙水圧計測および 水分量計測を実施した.これまでに行われている掘削影 響試験においては,掘削前後に同じ地点において同じ調 査を行い,得られた結果の差から掘削影響領域を評価し ている⁹.しかしながら,ここでは掘削影響領域の発生



からその進展までを含めて詳細に評価するためのモニタ リング技術としての適用性を調査するため、坑道掘削前 に実施した調査試験結果を初期値として、坑道の掘削に 合わせて繰り返し同じ地点で、かつ同じ手法により調査 試験を、あるいは連続計測を行った. 本報告では、力学的挙動に着目し、珪藻質泥岩を対象 とした掘削影響領域のモニタリング技術としての弾性波 トモグラフィ調査および孔内載荷試験の適用性の調査結 果について報告する.

2. 幌延深地層研究計画における掘削影響試験

幌延深地層研究計画は、原子力機構が実施している堆 積岩を対象とした深地層の科学的研究および高レベル放 射性廃棄物の地層処分技術の高度化のための調査研究を 目的とした研究計画であり、「地上からの調査研究段階 (第1段階)」、「坑道掘削(地下施設建設時)の調査 研究段階(第2段階)」、「地下施設での調査研究段階 (第3段階)」の3段階で調査研究を行う.深度140 mの 調査坑道を対象とした掘削影響試験は、第2段階の調査 研究として実施した.図-1は地下施設の全体イメージで ある.地下施設には3本の立坑があり、複数の深度で水 平坑道によりこれらの立坑はつながる.

2010年9月末現在,赤色で示した部分となる換気立坑 と東立坑が250mまで掘削されている(西立坑は坑口の 止水壁工事に着工).また,立坑を結ぶ坑道に関しては, 140m調査坑道が完成し,250m調査坑道は東立坑と換気 立坑を結ぶ部分の掘削までが終了している.

(1) 試験位置(レイアウト)

図-2に深度140 mにおける掘削影響試験のレイアウト の全体像(全体平面図および拡大図)を示す. 掘削影響 試験は、深度140 mの調査坑道を対象とし、図-2に示す ように、東立坑と換気立坑を結ぶ水平坑道を試験対象領 域とした. この調査坑道は、東立坑側から換気立坑側に 向かって掘削した.調査坑道から両翼に伸ばした坑道を 利用して調査対象領域にボーリング孔を配置できるよう にした. 主に第1段階における地質環境調査結果を考慮 して坑道周囲の岩盤は一様であるとみなし、坑道の左右 両側に調査試験の領域を設定した. 坑道の右側には岩盤 に擾乱を与える調査試験(弾性波トモグラフィ調査、孔 内載荷試験、透水試験)を、坑道の左側には岩盤に擾乱 を与えない調査試験(間隙水圧計測、水分量計測)を、 それぞれ配置した. それぞれの調査領域が重ならないよ うにずらすことにより、調査試験同士の干渉を排除した. また、岩盤条件は一様と仮定することで、掘削切羽との 距離で調査試験結果を評価できるようにした.

弾性波トモグラフィ調査および孔内載荷試験は、調査 試験用のボーリング孔が開口したまま(孔口については、 調査試験時以外は閉塞)であることから、坑道の右側に 配置した.

図-2から、弾性波トモグラフィ調査断面は掘削基数1



(赤丸部分の拡大図) 図-2 深度140mにおける掘削影響試験のレイアウト

~3が, 孔内載荷試験は掘削基数4, 5がそれぞれ調査領 域に一致する配置となっている. なお, 図-2では弾性波 トモグラフィ調査を実施したボーリング孔と孔内載荷試 験を実施したボーリング孔が交錯しているように見える が,前述したように調査試験同士の干渉防止として, 両 者のボーリング孔の配置レベルの間隔は, 80cmを確保 した.

(2) 水平坑道の掘削

坑道の掘削は、図-2(全体平面図)の左下に示したように、まず坑道の上部部分を原則掘削長1mで順次掘削し、作業安全および坑道の安定性を確保するために掘削した部分については支保工を施工した.坑道の上部部分の掘削および支保工の施工が完了した後、坑道下部のイ

ンバート部分の掘削を行った.インバート部分の掘削は, ある区間(図-2(全体平面図)の右上の凡例で示す同色 の灰色部分)をまとめて掘削した.インバート部分の掘 削が完了した後,インバートの施工を行った.なお,左 下の図は,坑道掘削時の断面を示しており,この内側に 支保工が施工されることとなる.

(3) 調査試験の実施時期

調査坑道の掘削からの経過日数と弾性波トモグラフィ 調査および孔内載荷試験の実施時期の関係を表-1 に示 す.経過日数と併記したカッコ内の掘削基数は,図-2 に示した掘削の数字である.掘削は,ほぼ一日1基数の 進度で行った.掘削1を掘削する前の段階を初期値(経 過日数 0)とした.調査領域に相当する部分のインバー ト部分は,133 日後に掘削したが,前述したようにこの とき上部の支保工は完成している.

表-1 調査坑道の掘削と調査試験の実施時期の関係

掘削	からの経過日数	弹性波トモブ ラフィ調査	孔内載荷試験
	0(初期値)	0	0
1	(掘削基数1)	0	
2	(掘削基数2)	0	0
4	(掘削基数3)	0	
4	(掘削基数4)	0	
6	(掘削基数5)	0	0
7	(掘削基数6)	0	
9	(掘削基数7)	0	0
11	(掘削基数9)	0	0
15	(掘削基数11)	0	0
	69	0	0
	86	0	
	150	0	0

3. 調査試験内容

(1) 弾性波トモグラフィ調査

本試験で行った弾性波トモグラフィ調査³は、5本のボ ーリング孔(孔径86 mm)を用い、発振子と受振子を結 んだ測線がロの字型に配置できるようにした.調査領域 は4 m×4 m程度の水平面の一断面である.坑道壁面近傍 でのデータ取得が可能となるように、坑壁側のボーリン グ孔は坑道掘削断面を考慮し、坑道壁面の極近傍になる ように配置した.5本のボーリング孔のうち、中心側の3 本のボーリング孔を利用して設置した5つの受振子(図-20■)は埋め込み型とし、受振子間の空洞部分はウレ タンを装填し、受振子間におけるボーリング孔の破壊を 防止するとともに、掘削影響で生じる可能性のあるボー リング孔の変形は拘束せず、岩盤の変形に追随するよう にした.





図-3 弾性波トモグラフィ調査システム図

し,振動軸を考慮して1地点あたり直交座標の3成分(x 軸,y軸,z軸)の波が受信できるように3つのジオフォ ンを軸に合うようにケース内に固定し,シリコン充填に より防水処置した.

発振子は、ボーリング孔内で簡易に弾性波を発振できるエアーハンマー式の発振装置を開発し、アルミ製の角ロッドの先端に据え付け、方向および深度を精度よく再現して所定の位置(図-2の□で示した21点)で弾性波を発振させるようにした.これにより、繰り返し行う調査では、毎回同じ地点、同じ方向に波を発生させることが可能となった.

全ての波形は、100倍の増幅器を備えたアンプを経由 してメモリハイコーダ(日置電気(株)8841)に収録した. 計測では、ノイズを低減するため、繰り返しハンマー を打撃することにより複数回の波を重ね合わせて処理で きるようにした.計測システムの模式図を図-3に示す.

この計測システムでは、調査の準備から終了までを約 3時間程度で行うことが可能となり、掘削工事の工程に 影響を与えずに調査を行うことが出来た.

発振装置に取り付けたトリガー信号の波と受振子の受 振波の時間差を到達時間とし,波は直線で到達するもの と仮定して弾性波速度を求めた.

(2) 孔内載荷試験

孔内載荷試験は等変位載荷法とし、6本のジャッキ (総支持荷重は26.4 ton)を備えた孔内載荷試験装置⁴⁾で 行った.ボーリング孔径は86 mmで,坑道壁面からの距 離が3深度になるように3本のボーリング孔(図-2に示す ように坑道壁面側よりM01, M02, M03の配置)を配置 した. 孔壁の円弧を考慮して均等に孔壁を載荷できるよ うな載荷盤表面形状(載荷盤の大きさは幅30 mm,長さ 201 mm) とした. ボーリング孔の掘削後に実施したボ アホールテレビ観察結果から、明瞭な亀裂が観察された 部分は排除し、健岩部と考えられる地点を計測地点とし て選定した.計測地点は3本のボーリング孔に対してそ れぞれ3箇所(図-2の●で示した部分)である.ジャッ キ方式であることから, 載荷方向は鉛直方向に加えて, 左右60度(R:右60度,L:左60度)に傾斜させた2方向 を加えた3方向とした. 孔内載荷試験装置は, 鉄製パイ プの先端に据え付けて試験用ボーリング孔内に挿入し、



図-4 孔内載荷試験における応力経路(イメージ)

試験深度,載荷方向を常に同じに出来るようにした.
ジャッキによる載荷速度は,実施試験点数,掘削工事の合間として許容された試験時間,土木学会の示している値(0.1~1.0 MPa/min,軟岩に対しては0.1~0.5 MPa/min)⁵を参考にし,0.6~0.8 MPa/minとした.載荷パターンは,予め現地において確認した降伏応力に対して,図−4に示すように36%,45%,52%,59%と4段階で載荷応力を増加させ,59%での載荷は3回繰り返した.得られた載荷応力-変位曲線から変形係数(D)および弾性係数(E)を取得した.

4. 調査試験結果

(1) 弾性波トモグラフィ調査

図-5にP波速度の分析による弾性波トモグラフィ調査 結果を示す.弾性波トモグラフィ調査は、図-5に示すピ ンク色着色部分の断面が調査領域であるが、調査領域の 手前側は既存坑道との位置関係により力学特性の変化が 複雑であると考えられることから、赤色の破線で示した 部分について初期値の弾性波速度からの速度変化率で整 理したコンター図を示した.図から、坑道を掘削するこ とにより坑道壁面から岩盤内部に向かって弾性波速度が 低下する領域が発生することが分かった.坑壁近傍ほど その低下率は10%以上と大きく、岩盤内部に向かって変 化率は小さくなっており、坑道壁面で掘削影響と考えら れる弾性波速度の変化(低下量)が大きいことが分かる.

速度変化率の発現と坑道掘削の時期との関連で見ると、 坑道が掘削された後に速度低下部分が遅れて発現してい ることが分かった.

経過日数で見ると,掘削基数11基(掘削から15日後) から69日後にかけて速度低下の生じた領域が拡大してい る.その後,86日後,150日後とその領域が微増してい る.



図-5 弾性波トモグラフィ調査結果 (速度変化率のコンター図)

(2) 孔内載荷試験

図-6に孔内載荷試験結果の一例として図-4に示した弾 性係数E3, E4, E5の平均値と掘削からの経過日数との 関係を示す.ここでは鉛直方向の結果のみを示す.図に は、図-2に示す試験用ボーリング孔M01, M02, M03の



最深部に位置する●の試験位置(それぞれ,ボーリング 孔口より8.2 m, 8.1 m, 8.1 mである.) での結果を示す. この位置での試験位置と坑道掘削の時期との関係では, 赤線で示した掘削からの経過日数6日(掘削基数5)の時に, 掘削切羽が試験位置となる領域を通過している.図では, 全ての試験時期で試験を行った鉛直方向の結果のみ示し ている.

坑道掘削前の弾性係数の初期値は、ほぼ180 MPaで坑 道壁面からの距離によらず一様であった.坑道掘削に伴 う値の変化で見ると、図から分かるように、値にばらつ きは見られるものの、その変化に傾向は認められなかっ た.インバート掘削の前後となる69日後と150日後を比 較してもばらつきは見られるものの変化に傾向は認めら れない.

次に、変形係数(図-4に示したD2)と掘削からの経 過日数との関係を図-7に示す.ここでも鉛直方向の結果 のみを示す.グラフの横軸は図-6と同様である.変形係 数の初期値は、ほぼ100MPaであった.変形係数も、弾 性係数の場合と同様、坑道の掘削に伴う変化の傾向は認 められず、値のばらつきは認められるものの、ほぼ初期 値と同じ100MPaで推移した.

5. 考察

(1) 掘削影響領域の範囲

弾性波トモグラフィ調査では、坑道壁面の極近傍から 岩盤内部にかけた部分を調査対象領域に設定できたこと から、掘削影響とみられる弾性波速度の変化を良好に捉 えることが出来た. また, 簡易な計測システムにより坑 道の進捗に合わせて繰り返し調査を行うことで、その経 時変化についても良好に捉える事が出来た。弾性波トモ グラフィ調査の結果から, 坑道の掘削により影響を受け たと考えられる領域(ここでは、10%以上の速度変化率 と考えた)は、坑道壁面より1m程度であった.これに 対して、孔内載荷試験の結果は、坑道掘削によっても顕 著な変化は生じなかった. 孔内載荷試験用ボーリング孔 の配置の設定においては、孔内載荷試験を繰り返し行う ために、孔の崩壊が生じるような部分は避けて坑道壁面 から1m程度の距離に最も坑道壁面に近くなるボーリン グ孔(M01)を配置し、そこからM02、M03と離れるよ うに3つの坑道壁面からの距離を設定した.弾性波トモ グラフィ調査結果からも明らかになった様に、掘削影響 領域は、坑道壁面より1m程度までにとどまっていると 考えられる. このため, 孔内載荷試験の結果に顕著な傾 向(値の変化)は認められず、岩盤は初期の状態を維持 したものと考えられる、言い換えれば、孔内載荷試験の 結果が変化していないことと弾性波トモグラフィ調査結

果で速度変化率があまり現れなかったこととが整合する 結果であった.

(2) 坑道内空変位との関連性

弾性波トモグラフィ調査結果から、切羽通過後にも弾 性波速度の低下が進行することが明らかとなったが、こ の調査領域と同じ断面となる図-2に示すT.D.+18.25m(拡 大図の赤点線で示した断面)における坑道内空変位との 関連について考察した.

断面T.D.+18.25mは,地下施設の建設で採用している 情報化施工プログラムの中で施工管理のための計測を行 っている断面である.坑道掘削後にマーカーとなるピン を設置し,内空変位の計測を坑道の掘削の進捗に合わせ て行った.

図-8に掘削からの経過日数と水平方向の坑道内空変位 との関係を示す.この断面での計測は,表-1との関係で は掘削から3日後が初期値となる.図から,坑道の進捗 が進むことにより,内空変位が発生していることが分か る.図では,マイナス表示が坑道断面が縮む方向である. 掘削開始初期段階における掘削基数と坑道内空変位の関 係を図-9に示す.両図より,坑道の掘削が進捗すること



により坑道の内空が10mmほど(支保工施工時の設計坑 道断面幅は4.0m)縮んでいることが分かる.この変位は、 計測断面近傍の掘削の際に大きく、掘削が数基進んだ時 点でその変位は収束に向かい、計測断面からの掘削基数 が10基に達すると変位はほぼ一定となる.その後、時間 の経過に伴い変位は微増するが、その幅は数mmである. この計測断面では、133日後にインバートの掘削が行わ れたが、図-8からも明らかなようにそれによる変位の変 動は認められなかった.

この坑道の内空変位と弾性波トモグラフィ調査結果から、以下のような挙動が整理できる.

- (1)弾性波トモグラフィ調査による弾性波速度が坑道の 掘削と連動して変化(低下)する挙動は、坑道の内 空変位の変化と整合する.
- (2) 内空変位は,経時変化に伴い微増しており,弾性波 速度が低下した領域の拡大にも内空変位が影響して いるものと考えられる.しかしながら,インバート 部分の掘削による坑道内空変位は生じないことから, これによる弾性波速度の変化はないものと考えられ る.
- (3) 掘削影響領域と考えられる弾性波の速度低下率は10% 以上と大きく、坑道径に対する内空変位の割合が 0.3 %未満であることと比較しても変化が大きいこと から、内空変位のみならず、岩盤内においても弾性 波の速度特性に影響を与える変化が生じていると考 えられる.

6. 結言

水平坑道を対象として,坑道掘削による掘削影響領域 の広がりや特性の変化の度合い,その経時変化を捉える ために,弾性波トモグラフィ調査と孔内載荷試験のモニ タリング技術としての適用性について調査した.調査試 験の結果,以下のことが明らかとなった.

- (1) 坑道掘削の工事工程に影響を与えない簡易な調査試 験システムにより,弾性波トモグラフィ調査および 孔内載荷試験を実施することが出来た.
- (2) 簡易な弾性波トモグラフィ調査システムは、坑道掘 削に伴う掘削影響で生じる岩盤の弾性波速度の変化 (領域の広がりやその経時変化)を画像として捉え る事ができ、モニタリング技術として適用できる可 能性を示すことが出来たと考えられる.

今後,同じ領域において調査を行った水理特性のデー タを考慮した総合評価により,掘削影響領域のメカニズ ムの解明を進めていく.

謝辞:弾性波トモグラフィ調査の実施においては、サン コーコンサルタント株式会社の相澤隆生氏、伊東俊一郎 氏、孔内載荷試験の実施においては、北海道大学の藤井 義明教授、菅原隆之技術専門職員、株式会社ドーコンの 熊倉聡氏にご協力をいただいた.ここに記して、感謝の 意を表します.

参考文献

- 1) 太田ほか:幌延深地層研究計画における地上からの調 査研究段階(第1段階)研究成果報告書分冊「深地層 の科学的研究」, JAEA-Research2007-044, 2007.
- 2) Sato, T. et al. : *Engineering Geology*, Vol. 56, p.97-108, 2000.
- Sugita, Y. et al. : Seismic tomography investigation in 140m Gallery in the Horonobe URL project. *Matererials Research Society Symposium Proceedings*. Vol. 1265, AA06-03, 2010.
- 4) 出口剛太:岩盤応力の計測に関する研究,北海道大学 修士論文, 1978.
- 5) 土木学会:原位置岩盤試験法の指針,2000.

APPLICATION OF SEISMIC TOMOGRAPHY SURVEY FOR MONITORING EDZ DEVELOPMENT

Yutaka SUGITA, Takahiro NAKAMURA and Hiroyuki SANADA

The mechanical, hydraulic and geochemical properties of the rock mass will change as an excavation disturbed zone (EDZ) develops. Estimation of the extent, variation in properties and their evolution in the EDZ area is important for assessing critical migration pathways of radionuclides in the disposal of high level radioactive waste. The authors examined the applicability of seismic tomography and borehole expansion tests for monitoring the changes in mechanical properties of an EDZ using a Mine-by Experiment (horizontal drift, diatomaceous mudstone) in the Horonobe Underground Research Laboratory project. Simple seismic tomography surveys may be used for monitoring the EDZ.