

幌延の地下研を例とした放射性廃棄物地層処分技術と地盤工学

Disposal Technology of the Radioactive Waste in the Case of the Horonobe Underground
Research Laboratory and Geotechnical Engineering

杉 田 裕 (すぎた ゆたか)

(株)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 堆積岩工学技術開発グループ

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物（以下、高レベル廃棄物という）の地層処分は、その名の示すとおり、生活圏から高レベル廃棄物を隔離するために、地下深く（法律では300 m以深）に高レベル廃棄物を処分するものである¹⁾。この目的のためには、高レベル廃棄物を処分場の設置深度まで運ぶための坑道（立坑や斜坑）や、処分場の設置場所では高レベル廃棄物を処分するための多数の坑道（水平坑道）を掘削することとなる。一般的な事業で安全や合理化が求められるのと同様に、地層処分でも坑道の掘削や高レベル廃棄物の処分（運搬や埋設）が安全かつ合理的に行われる必要がある。また、地層処分では、放射性核種に対する地層そのものに閉じ込め機能も期待していることから、坑道を掘削する際にも地層（岩盤）に与えるさまざまな影響を低減させることが有効であり、岩盤状況を適切に把握することが重要となっている。

このように、高レベル廃棄物の地層処分においては、岩盤の状況を把握し、かつ岩盤への影響を極力小さくしながら坑道を掘削する技術が求められており、(株)日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）は、実際の地下施設を建設することによって、これら坑道の掘削と岩盤との関係に関する情報を取得する研究を行っている。

幌延深地層研究計画は、原子力機構が北海道幌延町で実施している深地層の研究開発を目的とした研究計画の

一つであり、岐阜県瑞浪市で実施している超深地層研究所計画が結晶質岩を研究対象としているのに対して、幌延は堆積岩を研究対象としている。地下研究施設のイメージおよび坑道の標準断面を図一1に示す。これまでに、幌延の特徴である地山強度比（一軸圧縮強度／土被り圧）が低い条件下における支保設計の考え方について、その概要²⁾を紹介したが、ここでは、幌延深地層研究計画で実施している立坑の掘削における情報化施工³⁾の例を紹介する。既報²⁾では、立坑の掘削深度は東立坑が45 m、換気立坑が76 mであったが、平成20年10月末時点で、東立坑は140 m、換気立坑は250 mに達している。

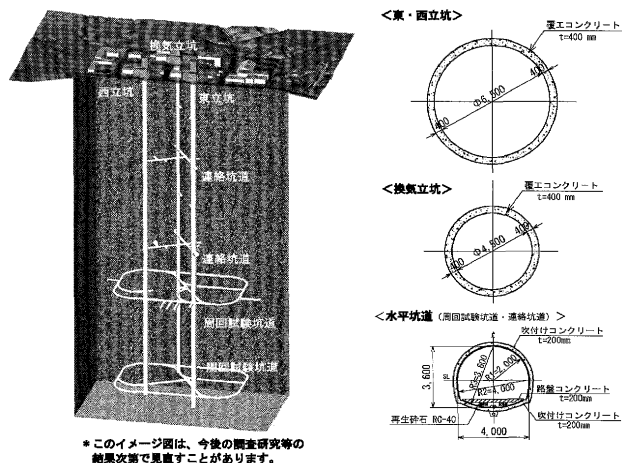
2. 幌延の地質概要

幌延町は、北緯45°の宗谷丘陵南西縁に位置し、西側にはサロベツ原野が広がるなだらかな山々に囲まれた丘陵地帯である。地下研究施設の周辺の地質は、主として新第三紀の堆積岩（上部が珪藻質泥岩（声間層）、下部が珪質泥岩（稚内層））である。地表から実施した深層ボーリング孔を利用した孔内水平載荷試験結果やそこから得られたボーリングコアを用いた室内試験結果（一軸圧縮試験など）から、岩盤の工学的特徴は軟岩であるが、割れ目やヘアークラック（乾燥や外的荷重により顕在化する潜在的な分離面）のような不連続面の存在が岩盤の力学特性に影響を与える可能性のあることが分かっている。このため、地下研究施設の設計においては、これらの割れ目やヘアークラックの影響を考慮し、表一1に示すように岩石の硬さ、割れ目の頻度、ヘアークラックの有無の三つを指標とした岩盤等級区分を設定した。

また、メタンガスを主成分とする可燃性ガスを賦存し、地下水は高い塩分濃度を有しているということが特徴として挙げられる。

表一1 設定した岩盤等級区分

岩盤等級区分	割れ目	ヘアークラック	岩石コアの特徴
D			カッターの刃が2mm以上刺さる コアは角礫状～岩片状～粘土状を示す
CL	L	—	カッターの刃が1mm程度刺さる コアは角礫状～岩片状を示す
	M	有・無	カッターの刃が1mm程度刺さる コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする
	H	有・無	カッターの刃が1mm程度刺さる コアは概ね10cm以上の長柱状から棒状を主体とする
CM	L	—	カッターの刃で傷がつく程度 コアは角礫状～岩片状を示す
	M	有・無	カッターの刃で傷がつく程度 コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする
	H	有・無	カッターの刃で傷がつく程度 コアは概ね10cm以上の長柱状から棒状を主体とする



図一1 地下施設のイメージ図および坑道の標準断面図

3. 立坑の掘削

地下研究施設は、現在、東立坑と換気立坑の掘削を行っている。図-1に示したように、内径の仕上がり径は東立坑が6.5m、換気立坑が4.5mである。掘削はショートステップ工法とし、掘削方式は東立坑は発破方式、換気立坑は機械方式としている。つまり、図-2に示すように掘削は1mピッチで進められ、覆工コンクリートの下端より切羽が3m離れたところで、2m分の覆工コンクリートが切羽離れ1m地点まで打設される。主要な支保部材は、全周に等間隔で設置される全面接着のロックボルト、鋼製支保工（両者は互い違いに1m間隔で設置される）、および無筋の覆工コンクリートである。覆工コンクリートの設計巻厚は40cmである。

4. 情報化施工

地下施設の建設（立坑の掘削）に先立ち、取得される計測データを設計や施工に反映するための情報化施工プログラムを構築した。情報化施工プログラムは、日常管理計測とステップ管理計測に大別できる。日常管理計測とステップ管理計測の計測内容を計測結果の反映フローとして図-3に示す。日常管理計測は、現切羽の評価と支保パターンの選定および既設支保の健全性の監視と長期安定性の評価のために行う。一方、ステップ管理計測は、挙動予測解析モデルの検証および計測管理基準の更

新、後続施工箇所の設計・施工への反映のために行う。

具体的には、支保の選定と密接に関わる岩盤等級の評価は、壁面地質観察を行う断面での出現比率を考慮し、表-1に基づいて当該切羽の岩盤等級とする。既設支保の健全性の監視ならびに長期安定性の評価は、内空変位計測データおよびステップ管理計測データの経時変化を確認するとともに、日常の壁面視点検により行う。ここでは支保部材の許容応力などに対して、それぞれ管理基準値を設定し、支保部材に発生する応力の計測データの経時変化を分析する。また、地中変位計による岩盤内の区間ひずみの量やロックボルト軸力計による軸力の分布から立坑周辺に発生する塑性領域の幅を評価し、それがロックボルト打設範囲内に収まっていることを確認す

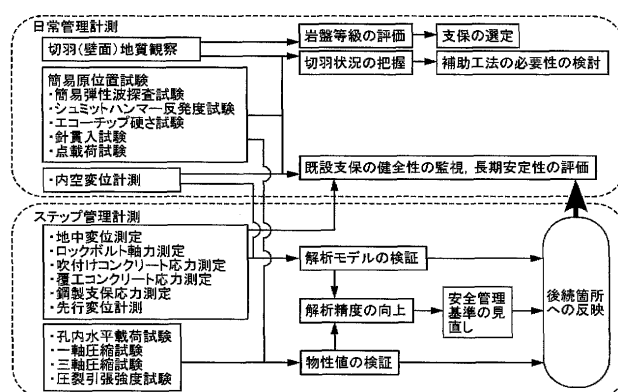


図-3 情報化施工の計測項目および計測結果の反映フロー図

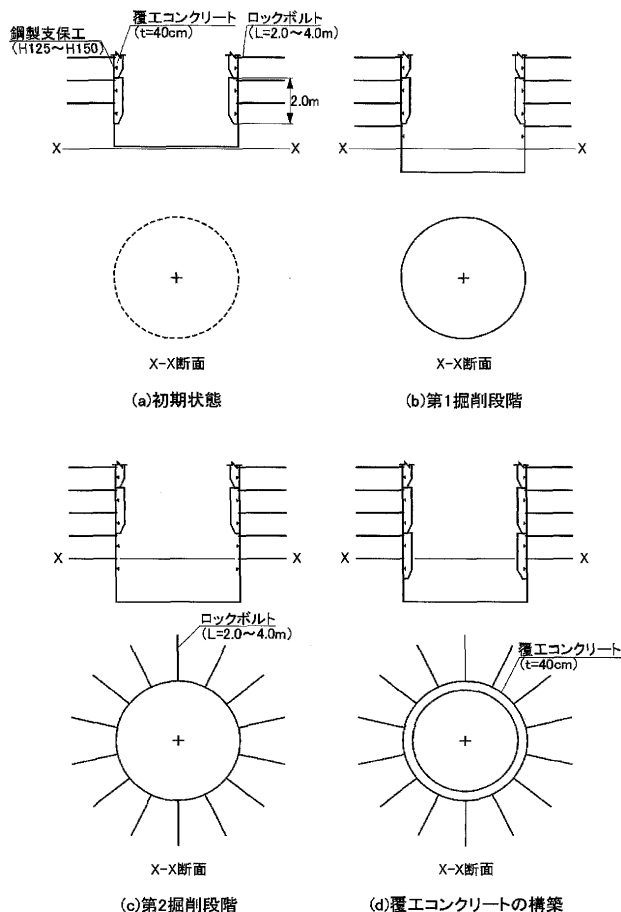


図-2 立坑の施工手順

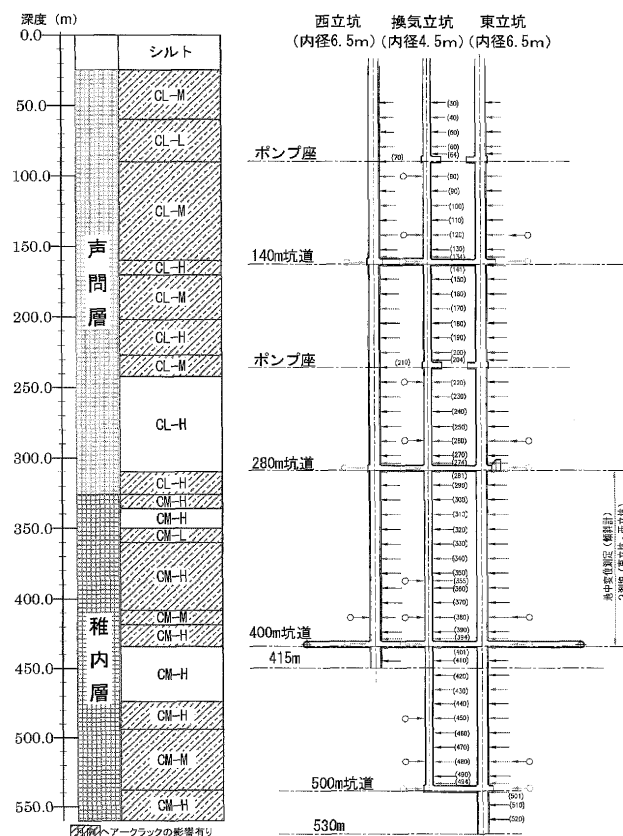


図-4 岩盤等級深度分布と計測断面の設置深度

報 告

る。挙動予測解析モデルの検証および計測管理基準値の更新は、計測断面における岩盤および支保の挙動分析により行う。そして、ステップ管理計測において蓄積されるすべての計測データに基づき、当該断面での支保設計の妥当性を検証した結果は、後続施工箇所の設計・施工へ計画的に反映される。

図-4は、地下施設の実施設計において想定した地下施設の岩盤等級分布と内空変位計測深度およびステップ管理計測断面の設置深度を示したものである。内空変位計測深度は、深度10mごとに2測線、30mごとに4

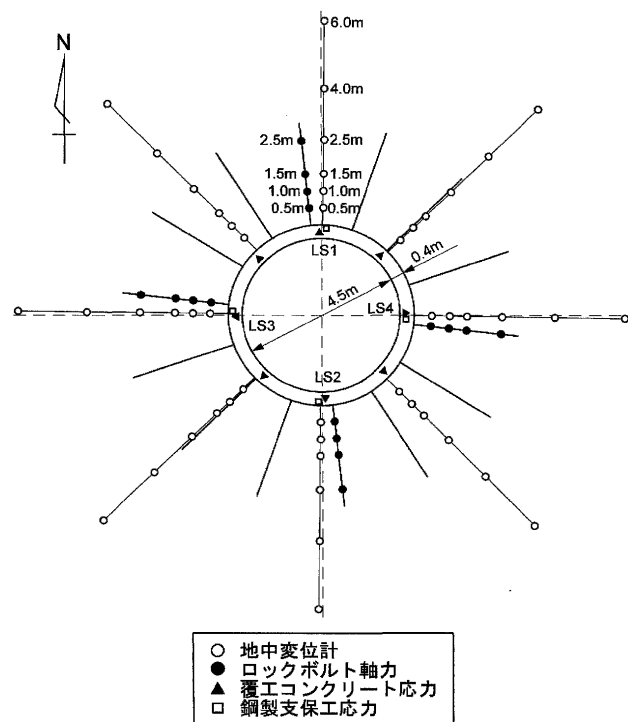


図-5 計測器配置の例（換気立坑深度121m）

測線とし、ステップ管理計測の設置深度は、後続の水平坑道の設計・施工への反映を考慮して立坑と水平坑道の接続部に近い位置および実施設計において想定した岩盤等級に対応する位置とした。ステップ管理計測断面の一例として、換気立坑の深度121mの計測器の配置を図-5に示す。

5. 計測事例

ここでは、情報化施工で実際に計測されたデータの一例として覆工応力の計測結果を示す。

5.1 覆工応力計測結果

覆工応力は、覆工コンクリート中の円周方向の軸力を計測している。換気立坑の深度121mにおけるコンクリート打設開始からの覆工応力の経時変化を図-6に示す。縦軸の+は圧縮、-は引張りを示す。

覆工コンクリートは、打設後、コンクリートの水和により温度が上昇し、覆工応力は圧縮となる。その後、コンクリートが硬化して温度が低下すると覆工応力は引張りとなる。そして、次の掘削では掘削解放力が作用するため圧縮となる。

換気立坑の深度121mでは、コンクリート打設後15時間で次の掘削を行ったことから、コンクリートの温度が打設前に戻る前に掘削解放力が作用した状態であった。このため、覆工の応力は圧縮側に変化し続けている。これは、掘削が進行することによる圧縮側の変化量がコンクリートの効果に伴う引張り側の変化量よりも大きいことを示している。

ここで、LS3（西：設置位置は図-5参照）とLS4（東）の覆工応力がLS1（北）とLS2（南）に比べて小さいのは、東西方向の初期地圧が卓越していることと関係している。また、掘削が進行すると応力の変化量は小さくなり、掘削径の（実績値5.7m）の3倍程度でほぼ

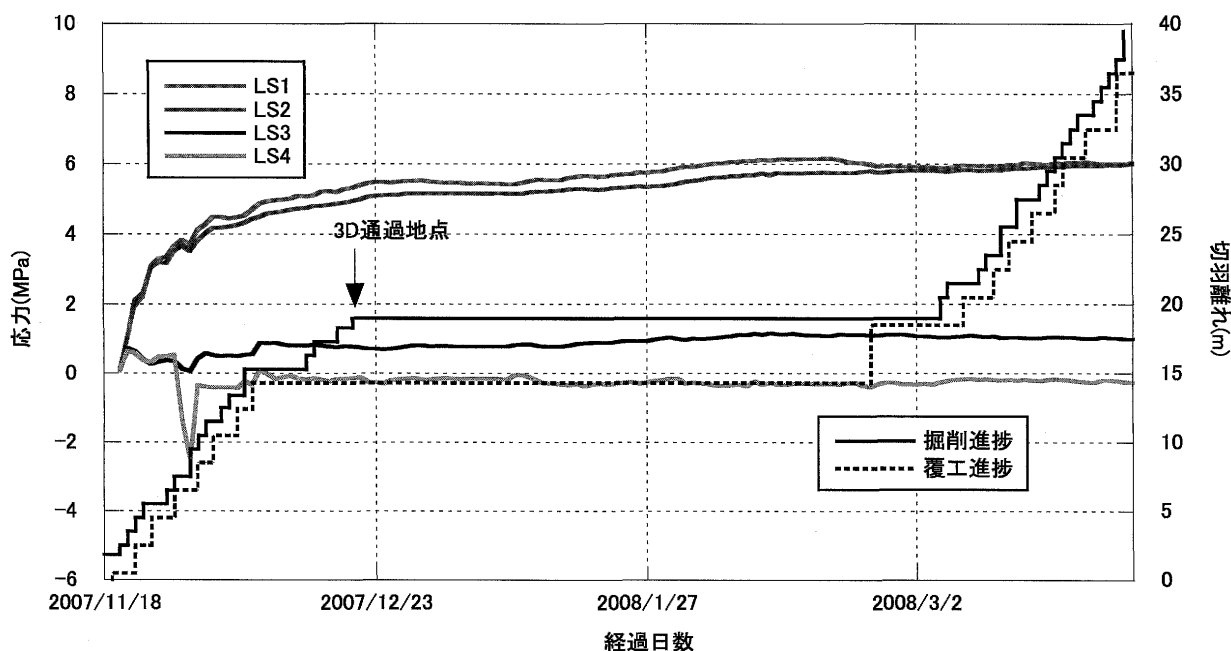


図-6 覆工応力経時変化（換気立坑深度121m）

安定する。覆工応力の収束値は最大 5.4 MPa であり、許容応力度 (6 MPa) 以内であった。挙動予測解析の結果は 4.7 MPa であったことから、計測値はこれよりも大きい値である。これは、覆工応力計の設置位置が立坑掘削の余掘りの関係で中立軸 (覆工表面から 20 cm の位置) より内側になったため、覆工応力は円周方向の軸力に加えて曲げの影響も計測しているためと考えられる。

5.2 計測データの評価

挙動予測解析値と計測値との差およびその原因について検討するため、立坑掘削の余掘りを考慮した 3 次元の弾性解析を実施した。解析用の物性値は、孔内水平載荷試験の結果から割れ目の影響を、ボーリングコアを用いた一軸圧縮試験の結果からヘアークラックの影響をそれぞれ低減係数として評価したものを岩盤等級に対応した岩盤物性値として設定した^{4),5)}。初期地圧は、深層ボーリングにおいて実施した水圧破砕法による結果⁶⁾から東西方向が最大主応力方向であることがわかっていることから、鉛直応力を 1 とした場合、水平面内最大主応力：水平面内最小主応力：鉛直応力 = 1.3 : 0.9 : 1 とした^{4),5)}。コンクリートのヤング係数は設計基準強度 24 N/mm² の時の値 25 kN/mm² とした。

解析結果は、覆工表面から半径方向の位置と応力変化率の関係を図-7 に示すように整理した。横軸を覆工表面から半径方向の位置 L_i の覆工巻厚 L に対する比率 α とし、縦軸をその位置での覆工応力 σ_i について設計巻厚の時の中立軸での覆工応力 σ_0 に対する応力変化率 R とし示す。

同図より、比率 α が小さくなると応力変化率が大きくなる。これは、覆工応力計が、覆工巻厚の中立軸より内側にあるため、覆工応力は円周方向の軸力に加え曲げの影響も計測しているためと考える。深度 121 m における覆工巻厚の断面計測分布から覆工巻厚の計測値は 60 cm (平均値、設計は 40 cm) であり、覆工応力計の設置は覆工表面から 20 cm であることを考えると、比率 α は 0.33 (= 20 cm / 60 cm) となり、図から応力変化率は 1.2 となる。つまり、実施設計で用いた中立軸の位置での覆工応力の 1.2 倍の応力となることを示しており、計測された最大値 5.4 MPa の覆工応力は 4.5 MPa であることが推定され、挙動予測解析値と整合する。

以上のことから、補正された覆工応力の計測値 (4.5 MPa) は、挙動予測解析値 (4.7 MPa) に近い値であり、実施設計時に行った挙動予測解析が正しいことを示している。このように、あらかじめ定めた許容値と実際の計測値がほぼ一致することで、設計の妥当性が確認される。

設計では、掘削で生じる立坑周囲の掘削影響領域の広がりも考慮しており、覆工応力や内空変位などの計測結果から、この掘削影響領域の広がりが適切な範囲に収まっていることを確認できる。掘削影響領域では、岩盤が

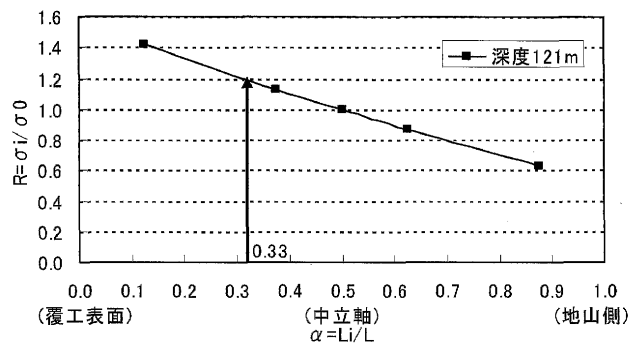


図-7 覆工表面から半径方向の位置と応力変化率の関係

破壊することにより亀裂が発生し、その結果として透水性が増大するなど、地層そのものの放射性核種に対する閉じ込め機能に影響を与えることから、情報化施工によりその範囲を適切に制御できることを示すことが重要となる。

6. おわりに

以上、幌延の深地層研究計画で実施している地下施設の建設における情報化施工の事例を覆工応力の計測結果を交えて簡単に紹介した。

高レベル廃棄物の地層処分場は、数 km 四方の規模が考えられており、地質環境条件が複雑な日本においては均一な岩盤に処分場を建設することは考えにくい。このため、坑道の掘削においては岩盤の状況を逐次把握し、適切な施工を行う必要がある。情報化施工はこれに対応する有効な技術であると考えられるが、幌延という場においてこのような技術を検証しておくことによって、処分場が建設される際にはこの技術が活かされるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 2) 尾留川剛・松井裕哉・操上広志・舟木泰智・森岡宏之：幌延深地層研究計画における地下施設建設時の課題と対応策, 土と基礎, Vol. 56, No. 1, pp. 32~35, 2008.
- 3) 山崎雅直・森岡宏之・羽出山吉裕・津坂仁和：幌延深地層研究計画における立坑掘削の情報化施工と挙動計測, 第12回岩の力学国内シンポジウム, pp. 305~310, 2008.
- 4) 森岡宏之・尾留川剛・村上史朗・菅原健太郎・小林隆志：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の支保設計, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 69~74, 2006.
- 5) 尾留川剛・森岡宏之・山上光憲・村上史朗：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の概要と支保設計, 電力土木, 平成18年7月号, pp. 82~86, 2006.
- 6) 山本卓也・下茂道人・藤原 靖・服部弘通・名合牧人・田所照夫・中垣真一：幌延深地層研究計画における試験調査 (HDB6, 7, 8 孔), JNC TJ5400 2005-004, 2005.

(原稿受理 2008.10.24)