

幌延深地層研究所における立坑掘削に伴う 周辺岩盤および支保の挙動分析（その2）

津坂 仁和^{1*}・稲垣 大介¹・小池 真史²・井尻 裕二²・羽出山 吉裕³

¹日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット
堆積岩工学技術開発グループ（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432番2号）

²大成建設株式会社 原子力本部 原燃サイクル部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿1丁目25番1号）

³大成建設株式会社 札幌支店（〒060-0061 札幌市中央区南1条西1丁目4番地）

*E-mail: tsusaka.kimikazu@jaea.go.jp

幌延深地層研究所の東立坑（内径6.5m）の深度220m付近を対象として、ショートステップ工法による立坑掘削に伴って生じる覆工コンクリート内の円周方向応力分布を、数値解析と現場計測によって分析した。数値解析では、施工手順を再現した立坑の三次元逐次掘削解析を実施した。現場計測では、覆工コンクリートの同一水平面内に応力計を配置する一般的な計測手法に対して、初期地圧の主応力方向の縦断面内に各5個の応力計を配置した。その結果、分析対象とした深度220mでは、厚さ60cm、高さ2mのリング形状の覆工コンクリート内の応力分布について、その最大値と最小値の生じる箇所や、その応力差が10MPa以上と顕著であることを明らかにした。

Key Words : shaft sinking, concrete lining stress, field measurement, three-dimensional analysis

1. 序論

原子力発電所で使われた燃料を再処理した際に生じる高レベル放射性廃棄物は、地下300 m以深に地層処分される。現在、公開されている地層処分場の概念図（内陸部）¹⁾においては、6本の立坑と1本の斜坑により、建設、操業、埋戻し時の人員や資材等の搬出入が想定されている。一般的に、地下深部の坑道掘削では、地上からの調査によって、対象深度の岩盤や地圧の性状を空間的に十分に把握することが困難である。そのため、情報化施工技術が積極的に活用される。すなわち、施工段階にて掘削に伴う岩盤の変形や支保部材に生じる応力を逐次計測し、その評価結果に基づいて、設計時の支保構造を、それらの挙動に合わせた最適な支保構造へと変更していく。6本の立坑を施工することを想定すると、施工時の計測結果を同一立坑だけでなく、後続の立坑の施工に逐次反映させていく必要がある。すなわち、地層処分場の建設全体を見据えた情報化施工技術が必要となると考える。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる堆積岩を対象とした調査技術の高度化のために、北海道幌延町にて地下研究施設を建設している。この施設は、3本の立坑と深度300 m以深の試験坑道などからなる。これまで

に堆積軟岩を対象とした大深度の立坑の情報化施工の実施例はほとんどみられない。このため、原子力機構は、地下研究施設を建設する前に、立坑の情報化施工プログラム²⁾を構築し、実際の施工を通して、同プログラムの運用を行い、立坑の施工管理のために、計測項目やその手法、評価フローなどを提示した情報化施工技術の開発を実施している。

幌延深地層研究所の立坑は、その標準工法の一つであるショートステップ工法³⁾によって施工している。幌延では、厚さ400 mmの覆工コンクリートを主たる支保部材として、掘削後ただちに覆工コンクリートによって岩盤を支保する。その一打込み長は2 mである。立坑の設計・施工管理は、一般的な手法⁴⁾に習って実施し、覆工コンクリートの中心部で生じる円周方向応力を用いて、その安定性を評価した。しかし、これまでに、ショートステップ工法によって構築される覆工コンクリート内の円周方向応力は、その上端から下端にかけて、ある程度の応力勾配が生じることが数値解析によって明らかにされてきた^{5), 6), 7)}。ただし、これまでに、数値解析に基づく知見と併せて現場計測により、その応力分布の幅や形態を実証した事例はない。このため、現状では、立坑の設計ならびに施工管理上、その安定性を計測・評価する箇所の明確な基準が定められていない。

本研究では、幌延深地層研究所の立坑の施工サイクルを再現した三次元逐次掘削解析を実施し、切羽の進行に伴う覆工コンクリート内の応力の変化を分析した。さらに、幌延深地層研究所の深度218～220 mの立坑の施工にて、覆工コンクリート内に計10個の応力計を配置し、立坑軸方向および半径方向の応力分布を計測した。ここでは、それらの結果をもとに、ショートステップ工法の立坑掘削に伴う覆工コンクリート内の応力分布とその変化について述べる。

2. 幌延深地層研究所の立坑掘削

幌延深地層研究所では、2010年9月末現在、仕上がり内径4.5 mの換気立坑と、同内径6.5 mの1本のアクセス立坑（東立坑という）を深度250.5 mまで掘削した。換気立坑は機械掘削、東立坑は発破掘削によって施工している。これまでの掘削対象の岩盤は、珪藻質泥岩であった。主要な支保部材は、設計巻き厚400 mmの覆工コンクリート、鋼製支保工、長さ2～3 m、径24 mmの全面定着式ロックボルトである。立坑の施工手順は、図-1に示す4つの段階からなる。初期状態を底盤から高さ約1 mまで覆工コンクリートが構築された状態（図-1 (a)）として考えると、始めに、1 m掘削した後、鋼製支保工とロックボルトを施工する（図-1 (b)）。次に、同様に、1 m掘削して、これら2種類の支保部材を施工する（図-1 (c)）。その後、底盤から1 mを残して設計厚さ400 mmの覆工コンクリートを構築する（図-1 (d)）。この一連の施工手順において、覆工コンクリートが構築されるまでに建て込まれる鋼製支保工は、上部の同支保工から治具によって宙吊りの状態で、坑壁と接していない。したがって、約3 mを無支保に近い状態で掘削する。また、東立坑の深度42～140.5 mまでの施工実績に基づく、一連の施工手順に約2日を要している⁸⁾。

情報化施工プログラム²⁾による立坑の施工管理として、換気および東立坑の標準部での覆工コンクリートの応力計測を、それぞれ6深度にて実施してきた。その計測箇所は、東西南北を基準に8方向、コンクリートの中央部であった。これに対して、東立坑の深度218～220 mの覆工コンクリートの応力計測では、立坑の断面形状と初期地圧の方向を考慮して、最大初期地圧方向（東側断面）と最小初期地圧方向（南側断面）の2つの断面に、それぞれ5つの有効応力計（以下、応力計という）を設置し、コンクリート内の応力分布を計測した。応力計の設置箇所を図-2に示す。これらの応力計は、治具により鋼製支保工に固定した。覆工コンクリートの実際の厚さは一定ではなく550～600 mm程度であり、図-2では覆工コンクリート厚さを600 mmとした。同図に示すとおり、応力

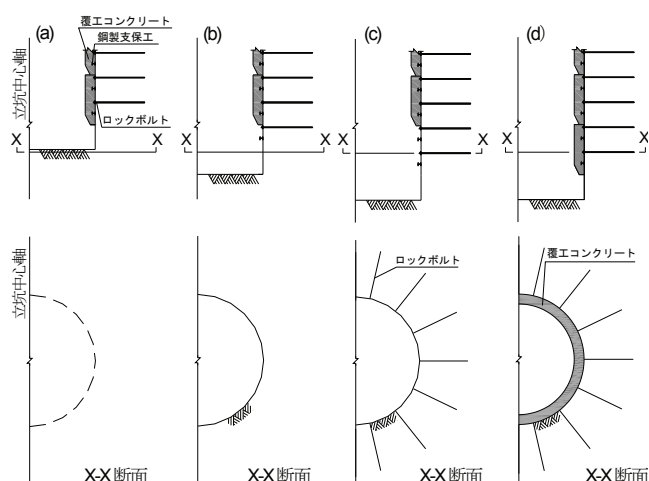


図-1 立坑の施工手順。(a) 初期状態、(b) 第1掘削段階、(c) 第2掘削段階、(d) 覆工コンクリートの構築。

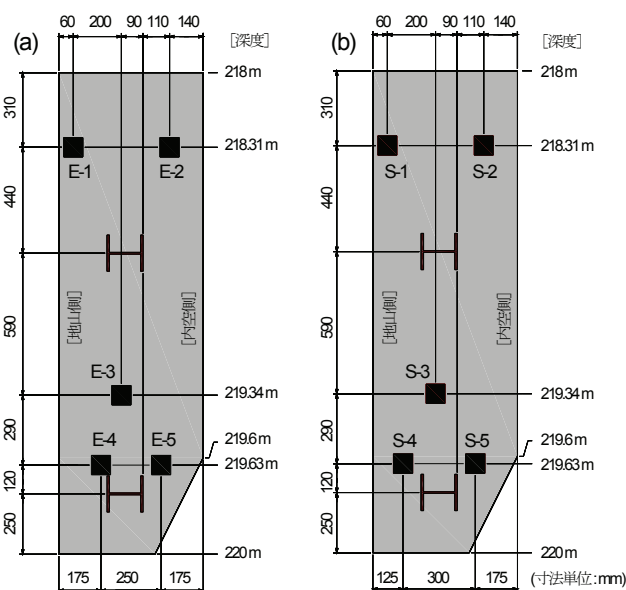


図-2 応力計の配置。(a) 東側断面、(b) 南側断面。

計は3つの深度に配置した。各設置深度の覆工コンクリート下端部からの距離は、上段（E-1およびE-2、S-1およびS-2）が約1.7 m、中段（E-3、S-3）が約0.7 m、下段（E-4およびE-5、S-4およびS-5）が約0.4 mである。これまでの応力計測では、中段の位置（E-3、S-3）に応力計を設置してきた。

3. 立坑の三次元逐次掘削解析

(1) 解析モデルと入力物性値

図-1に示した施工手順による立坑掘削に伴って生じる覆工コンクリートの円周方向の応力分布を数値解析により分析した。解析には、有限差分法解析コードFLAC3D (ver. 3.10)を用いた。解析領域として、水平面内を83 m x 83 m、鉛直方向を120 mとし、その中心部に立坑の掘削領域を設定した。東立坑の施工を想定し、掘

削部分は、設計内径 6.5 m に 0.4 m の覆工コンクリートと片側 0.2 m の余掘りを加えた直径 7.7 m とした。下端部の切欠部の形状も考慮して覆工コンクリートをソリッド要素で、鋼製支保工をビーム要素で、コンクリート用型枠をシェル要素でモデル化した。ただし、覆工コンクリートと岩盤の境界部分の滑りは考慮していない。境界条件については、側面の水平方向変位と、底面の鉛直方向変位を固定とした。鉛直方向の中心を深度 220 m とし、深度 160 m から 257 m までの掘削解析を実施した。実際

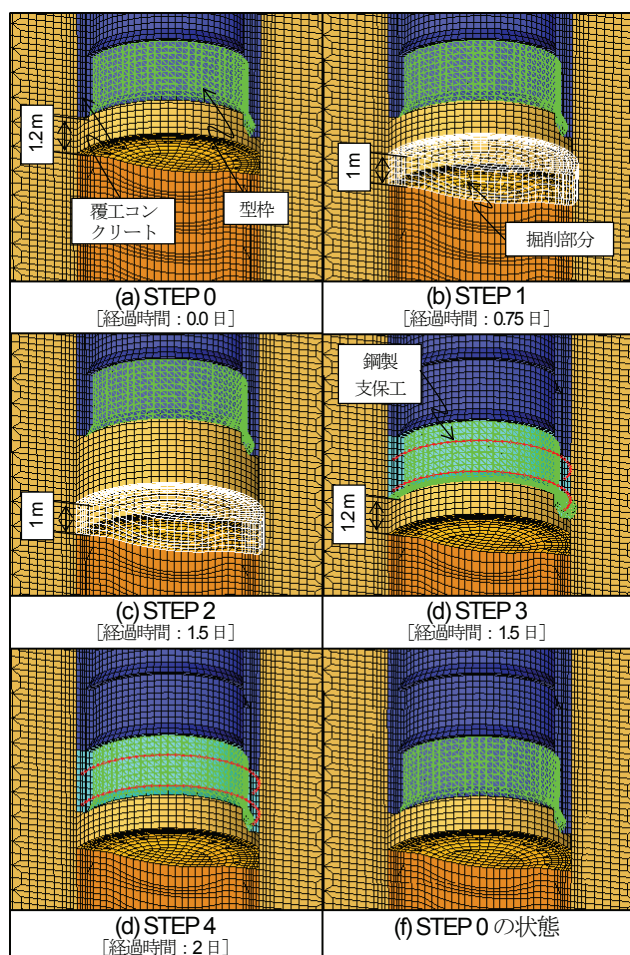


図-3 解析ステップ

表-1 入力物性値

岩盤 (CL-M (Hr.))	
単位体積重量 (kN/m ³)	15.1
弾性係数 (MPa)	450
粘着力 (MPa)	0.6
内部摩擦角 (deg.)	15
ダイレーション角 (deg.)	4
ポアソン比	0.164
引張強度 (MPa)	0.39
鋼製支保工 (H-150)	
ヤング率 (MPa)	200
断面積 (m ²)	3.97 × 10 ⁻³
断面二次モーメント (m ⁴)	1.62 × 10 ⁻⁵
断面係数 (m ³)	2.16 × 10 ⁻⁴
覆工コンクリート (設計基準強度 : 40MPa)	
ヤング率 (MPa)	経時変化を考慮 ¹⁾
ポアソン比	0.2

の施工サイクルに基づいた解析ステップの 1 サイクルを図-3 に示す。切羽が覆工コンクリートの下面から 1.2 m にあり、型枠を覆工コンクリート表面にセットした状態を初期状態 (STEP 0) と考える。立坑中心部は実際の掘削形状を考慮して、0.2 m 先行掘削した状態とした。次に、1 m の掘削 (経過時間 0.75 日) を 2 回繰り返す (STEP 1 および 2)。既設の型枠を除去し、新たに覆工コンクリートと型枠、覆工コンクリート内に 1 m 間隔で 2 本の鋼製支保工を構築する (STEP 3)。この状態で 0.5 日経過させ、覆工コンクリート下面の型枠を除去する (STEP 4)。岩盤および支保部材の入力物性値を表-1 に示す。岩盤物性値は、地下施設建設のために構築した岩級区分⁹⁾のうちの CL-M (Hr.) 級の物性値を用い、Mohr-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体とした。覆工コンクリートのヤング率は、実施設計⁹⁾と同様に、コンクリート標準示方書「施工編」¹⁰⁾に準拠して、覆工コンクリートの材齢とヤング率の関係を求め、その構築後からの経過時間に応じた値を入力した。初期応力の比¹¹⁾は、土被り厚と単位体積重量の積から求まる鉛直応力を 1 とし、水平面内の最大主応力を 1.3、最小主応力を 0.9 とした。

(2) 解析結果

立坑を深度 257 m まで掘削した際の覆工コンクリート内の円周方向応力の分布を図-4 に示す。同図は、初期応力方向と立坑の形状の対称性を考慮して、その最大主応力方向から最小主応力方向へ反時計回りに 45 度の範囲の応力のコンター図である。円周方向応力の最大値は、最小初期応力方向の内空側下端部で生じ、その値は約 16 MPa である。一方、その最小値は、最大初期応力方向の内空側上端部で生じ、その値は約 1 MPa である。同図より、覆工コンクリート内の応力分布に最大で約 15 MPa の差異が生じていることがわかる。また、幌延深地層研究所の立坑の設計上、同深度の覆工コンクリートの設計許容応力度は 10 MPa であり、同図の橙から濃赤色のコンター部分はその値を超える範囲となる。次に、最大および最小初期応力方向の覆工コンクリートの断面 (東側断面と南側断面) に着目し、その 2 つの断面内の円周方向応力の分布を図-5 に示す。同図では、覆工コンクリート内の深度方向に深度 218.1 m から 20 cm ほどの半径方向の円周方向応力の変化を示す。東側断面では内空側から地山側に、南側断面では地山側から内空側に応力が増加する。その単位距離当たりの変化率は、東側断面が約 5 MPa / m、南側断面が約 7 MPa / m である。ただし、最下端部の深度 219.9 m では切欠部の影響により、東側断面では応力の変化はほとんどなく、一方、南側断面ではより大きな応力勾配 (約 14 MPa / m) が生じる。半径方向の応力勾配は、初期応力の異方性に伴う曲げモーメントの

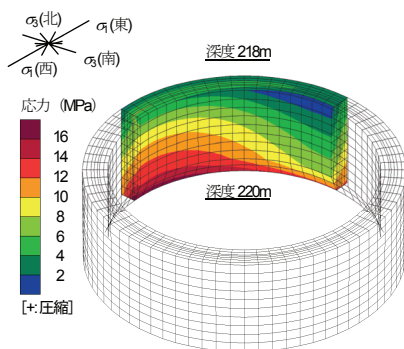


図-4 覆工コンクリート内の円周方向応力の分布

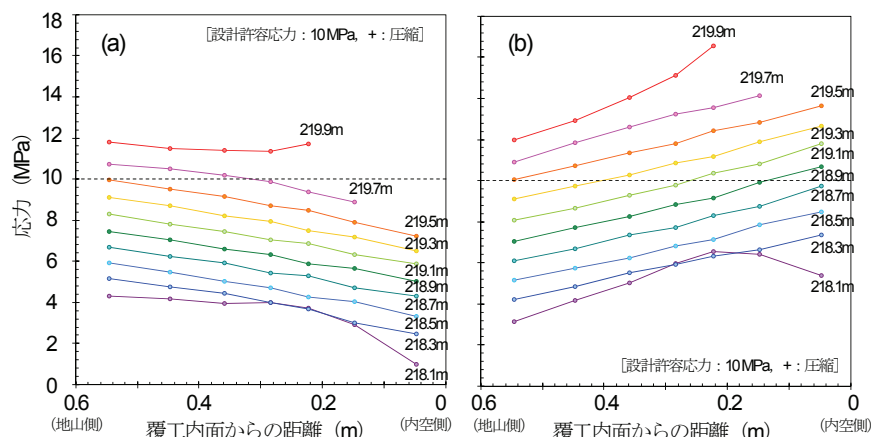


図-5 東および南側断面の円周方向応力の分布. (a) 東側断面, (b) 南側断面.

影響と、一方、深度方向の応力勾配は、覆工コンクリートの構築時の切羽からの距離（以下、切羽距離という）の影響、すなわち、覆工コンクリートの深度方向の掘削解放力の違いの影響と考えられる。

図-2に示した覆工コンクリートの東側断面と南側断面のそれぞれ5つの応力計を設置した箇所を対象として解析で得られた円周方向応力の切羽の進行に対する変化を図-6 (a)と (b) に示す。覆工コンクリートの型枠が撤去されるまでの応力の増加率に着目すると、下段の計器（E-4とE-5, S-4とS-5）が最も大きく、上段（E-1とE-2, S-1とS-2）が最も小さい。これは、それぞれの計器が設置された時点の応力再配分の程度の差によって生じたと考えられる。また、切羽と計器設置深度との相対距離（以下、切羽距離という）において、東側断面では8 m程度（掘削径とほぼ同距離）、南側断面では4.5 m程度（掘削径の半分程度の距離）にて、初期応力の異方性に伴う曲げモーメントの影響が顕著に生じ始め、同一深度の内側と外側の応力値に差が現れる。特に、東側断面の内空側の計器（E-2とE-5）と南側断面の地山側の計器（S-1とS-4）では、応力が減少、もしくは一定値で推移し始める。さらに、各値は、切羽が深度240 m程度（掘削径の2.5倍程度）に到達すると収束に至る。

4. 原位置応力計測の結果と考察

幌延深地層研究所の東立坑の深度218～220 mの覆工コンクリートの東および南側断面にて計測した円周方向応力の切羽の進行に対する変化を図-6 (c)と (d) に示す。応力の最大値は、東側断面では下部地山側（E-4）に、南側断面では下部内空側（S-5）に生じ、また、その最小値は、東側断面では上部内空側（E-2）に、南側断面では上部地山側（S-1）に生じた。東側断面では内空側の、南側断面では地山側のそれぞれ2箇所の応力値（E-2とE-5, S-1とS-4）が切羽の進行に伴って減少した。また、

切羽が深度245 mに到達するまでに応力値は概ね収束した。これらの結果は、数値解析結果と同様の傾向にある。したがって、初期地圧の異方性や覆工コンクリートの深度方向に対する掘削解放率の違いによって、覆工コンクリート内に顕著な応力勾配が生じたと考えられる。

覆工コンクリート内の応力が一定となった時点での南側断面と東側断面における半径方向、深度方向、対角方向の応力差を表-2に示す。同表にて、半径方向では、深度218.31 mのE-1とE-2, S-1とS-2, 深度219.63 mのE-4とE-5, S-4とS-5の、深度方向では、内空側のE-2とE-5, S-2とS-5, 地山側のE-1とE-4, S-1とS-4の、対角方向では、E-1とE-5, S-1とS-5, E-2とE-4, S-2とS-4の各応力の差を示した。南側断面では、上部地山側（S-1）と下部内空側（S-5）の間で、最も大きな約16 MPaの応力差が生じた。その相対距離が約1.37 mであるから、その応力勾配は約11.7 MPa/mである。また、同断面では、半径方向の応力差が10～12 MPa程度、応力勾配は深度218.31mで約26.5 MPa/m, 深度219.63mで約40.3 MPa/mとなった。

また、これらの応力差については、解析値とのかい離が大きく、例えば、解析結果の南側断面の半径方向の応力差は約2 MPaである（表-2）。これは、解析結果と比べ、計測結果でのE-2とE-5, S-1とS-4の応力の顕著な低下のためであり、東側断面の上部内空側（E-2）と、南側断面の上部地山側（S-1）には、引張応力を計測した。

筆者ら¹²⁾は、ショートステップ工法の岩盤挙動について、東立坑に先行して掘削した換気立坑での地中変位計の計測結果とそのボーリングコアの観察結果から、覆工コンクリートの構築前の約3 m掘削する間に、岩盤実質部の内空側への変形だけでなく、立坑周辺の約1mの範囲にて、岩盤に内在する割れ目の開口・伸展が顕著に生じ、その後、覆工コンクリートを構築して掘削を進めると、覆工コンクリートによって岩盤の内空側への変形が抑制され、それまでに一度開口・伸展した割れ目が再び閉口すると論じた。幌延の初期地圧の条件下においては、覆工コンクリートは相対的に東西方向から押され、わず

かに南北軸を長軸とする楕円形となる変形モードを呈す。よって、掘削に伴う割れ目の開口・伸展を十分に考慮していない解析結果に比べて、覆工コンクリートが岩盤を押し返す現象が原位置の南側断面では相対的に大きく生じ、その顕著な応力の低下が生じたと考えられる。ただし、この点については、同深度で実施した地中変位計測と岩盤調査の結果に基づいて、現在、考察中である。

また、深度218～220 mのコンクリートの型枠を切羽深度223 mにて撤去した後、深度224 mまで掘削されるまでに、両方の計測断面のいくつかの計器にて応力の低下が生じた（図-6 (c) と (d)）。覆工コンクリート応力の計測開始から約5日間、切羽深度が221～225 mの2サイクルにおける各応力値の経時変化を図-7に示す。同図には、施工サイクルにおける主なイベントとして、掘削（EX）、発破（BL）、コンクリート型枠の撤去（RF）と設置（SF）、コンクリートの打設（CC）を明記した。同図より、深度223～225 mの掘削までに、東側断面ではE-1、E-2、E-3にて、南側断面ではS-5以外にて、応力の

減少が生じている。その応力低下の最大値は、E-3とS-3にて計測した約2 MPaである。この応力の低下は、掘削に伴う岩盤の応力再配分が生じていないこととコンクリートが若材齢であることを考えると、剛性の高いコンクリートの型枠の撤去による覆工コンクリートの内空側への変形、コンクリートの表面からの冷却、さらに、コン

表-2 覆工コンクリート内の応力差

比較箇所		東側断面 (最大初期地圧方向)	南側断面 (最小初期地圧方向)
半径 方向	深度218.31m	4.6 (1.9)	10.6 (2.4)
	深度219.63m	2.1 (1.5)	12.1 (2.1)
深度 方向	内空側	5.8 (5.3)	5.1 (5.8)
	地山側	3.8 (4.9)	3.6 (7.1)
対角 方向	上部地山側と 下部内空側	1.2 (3.4)	15.7 (9.2)
	上部内空側と 下部地山側	7.9 (6.8)	7.0 (4.7)

※単位はMPa。カッコ内は解析値。

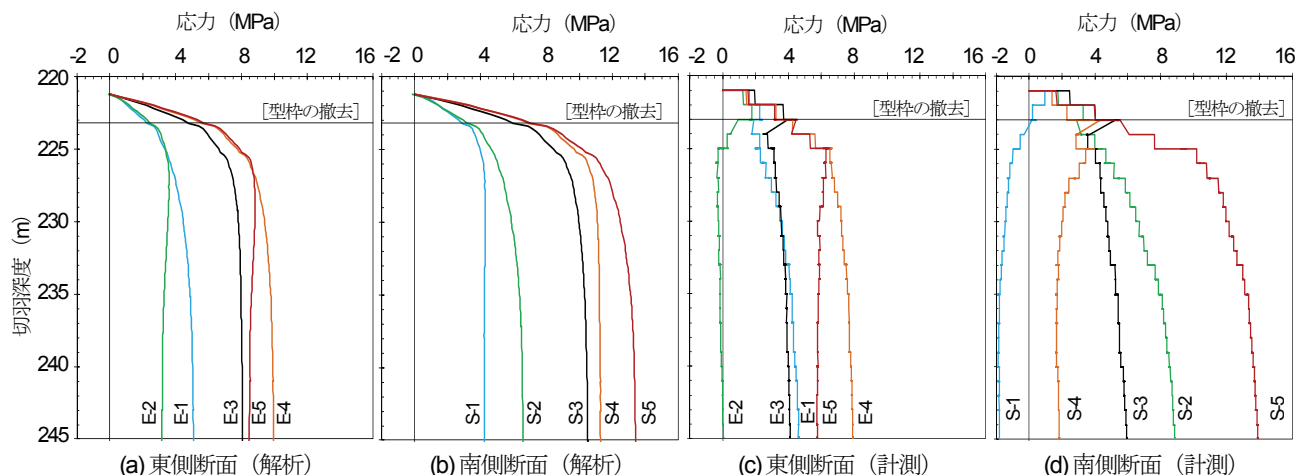


図-6 深度218～220mにおける覆工コンクリートの円周方向応力の解析結果と計測結果（+：圧縮，-：引張）

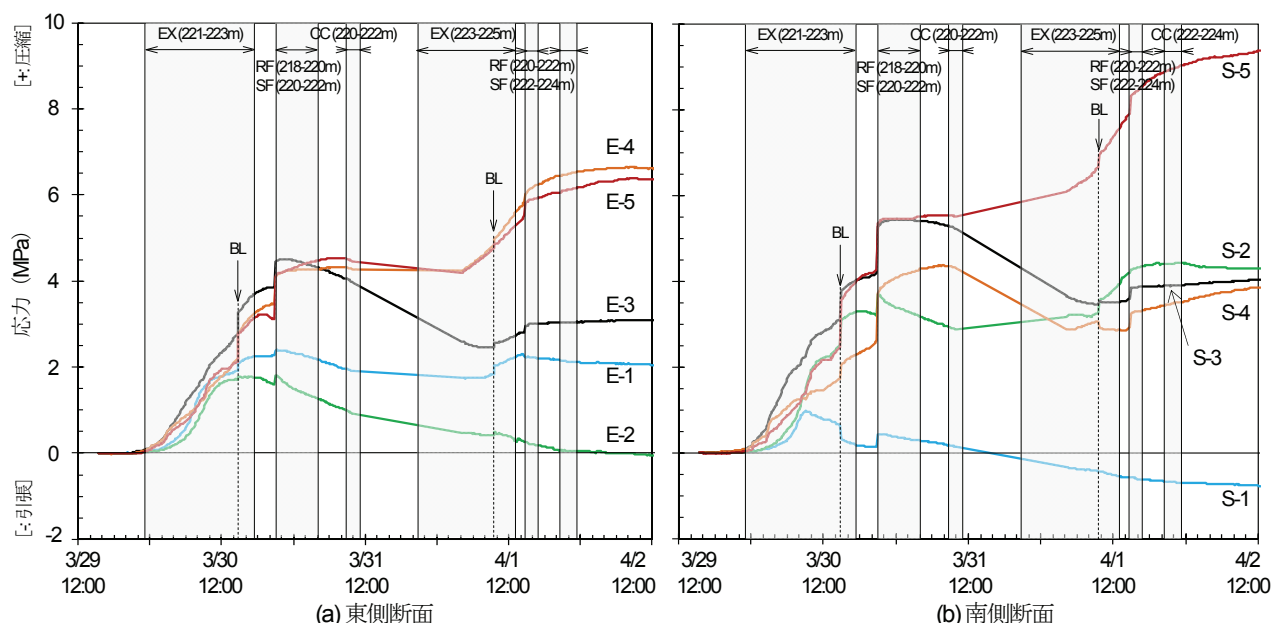


図-7 覆工コンクリートの円周方向応力の経時変化（EX: 掘削，BL: 発破，RF: 型枠撤去，SF: 型枠設置，CC: コンクリート打設）

クリートの乾燥に伴う収縮のためと考えられる。

今回の計測結果から、従来の覆工コンクリートの応力計測箇所（E-3またはS-3）に対して、東側断面では約2倍、南側断面では約3倍の応力が生じていることが明らかとなった。現在のところ、今回の対象深度付近で検査したコンクリートの圧縮強度は、標準養生¹³⁾にて、7日目で51.1 MPa、28日目で63.9 MPaであり、立坑の安定性に問題はない。この結果より、立坑の施工管理の観点からは、覆工コンクリートの応力計測箇所（深度）を、計測断面の方向によって最も大きな圧縮応力が生じる箇所に変更する必要があると考えられる。

5. 結論

幌延深地層研究所の東立坑深度220m付近を対象として、ショートステップ工法による立坑掘削に伴って生じる覆工コンクリート内の応力分布を、三次元逐次掘削解析と現場計測によって分析した。その結果、深度220mでは、厚さ600 mm、高さ2mのリング形状の覆工コンクリート内には、初期地圧の最小主応力方向の断面内では、内空側下端部に最大応力が、地山側上端部に最小応力が生じ、一方、その最大主応力方向の断面内では、地山側下端部に最大応力が、内空側上端部に最小応力が生じることと、覆工コンクリート全体での応力差は10 MPa以上であることが明らかとなった。ただし、数値解析結果に比べ、現場計測結果では、部分的な引張応力とより大きな応力勾配を計測した。そのため、今後は、立坑周辺岩盤の割れ目の挙動と併せて、その原因を考察していく。大深度立坑の情報化施工の観点からは、今回の結果により、筆者らは、これまで覆工コンクリートの中心部で実施してきた応力計測の箇所を、より大きな応力が生じる箇所（例えば、初期地圧の最小主応力方向の内空側下部）へ変更するなどして、既存の計測計画を実際の岩盤や支保部材の挙動に合わせた計画に見直すことを検討中

である。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構：放射性廃棄物の地層処分について 分冊-1 処分場の概要, pp.13, 2009.
- 2) 森岡宏之, 山口雄大, 舟木泰智, 尾留川剛：幌延深地層研究計画における立坑掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム, JAEA-Research 2007-050, 2007.
- 3) 土木学会トンネル工学委員会, トンネル標準示方書 山岳工法・同解説（2006 年制定）, pp.301-314, 2006.
- 4) 土木学会：トンネル・ライブラリー 第 7 号 山岳トンネルの立坑と斜坑, pp.25-45, 1994.
- 5) Laurence, S. C., and Stephen J. B. : Preliminary analysis of the excavation investigation experiments proposed for the exploratory shaft at Yucca Mountain, Nevada test site, SAND87-1575, pp.7-36, 1988.
- 6) 木ノ村幸士, 小川豊和, 青木智幸, 山本卓也, 松井裕哉, 真田祐幸：堆積軟岩地山のひずみ軟化挙動を考慮した立坑の掘削時安定評価, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.307-312, 2008.
- 7) 坂井一雄, 小池真史, 青木智幸, 山本卓也, 稲垣大介, 山崎雅直：三次元解析による立坑掘削時の覆工および周辺岩盤の挙動分析, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.381-386, 2010.
- 8) 山崎雅直, 関谷美智, 藤川大輔, 北川義人：幌延深地層研究計画における立坑工事の施工実績とサイクルタイム分析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 14 巻, pp.191-196, 2008.
- 9) 森岡宏之, 尾留川剛, 村川史朗, 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.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」（2007 年度制定）, pp.340-343, 2007.
- 11) 丹生屋純夫, 松井裕哉：原位置と室内試験に基づいた第三紀珪質岩盤の力学モデル構築, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.177-182, 2006.
- 12) 津坂仁和, 常盤哲也, 稲垣大介：幌延深地層研究所の立坑掘削に伴う岩盤挙動, 第 65 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.821-828, 2010.
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」（2007 年度制定）, pp.23, 2007.

A STUDY ON THE BEHAVIOUR OF CONCRETE LINING AND ROCK MASS DURING SHAFT EXCAVATION AT THE HORONOBÉ URL PROJECT (PART II)

Kimikazu TSUSAKA, Daisuke INAGAKI, Masashi KOIKE,
Yuji IJIRI and Yoshihiro HATSUYAMA

The authors investigated concrete lining stress caused by excavation of a 6.5 m diameter access shaft at the Horonobe Underground Research Laboratory. They analyzed lining stress distribution by three-dimensional analysis. The stress distribution was also measured with ten stress meters installed in each section in the direction of maximum and minimum initial stresses. As a result, it was clarified that the maximum and minimum lining stresses occurred in the inner bottom in the direction of the minimum initial stress and in the inner top in the direction of the maximum initial stress, respectively, and the more than 10 MPa stress inclination between them occurred in 60 cm thick and 2 m high concrete lining.