

# 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１）

稲垣 大介<sup>1\*</sup>・津坂 仁和<sup>1</sup>・井尻 裕二<sup>2</sup>・小池 真史<sup>2</sup>・羽出山 吉裕<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2)

<sup>2</sup> 大成建設（株） 原子力本部(〒163-6009 東京都新宿区西新宿 6-8-1)

<sup>3</sup> 大成建設（株） 札幌支店(〒060-0061 北海道札幌市南一条西 1-4)

\*E-mail: inagaki.daisuke@jaea.go.jp

（独）日本原子力研究開発機構は、北海道幌延町において堆積岩を対象に地下研究施設を建設中である。立坑の施工では、ショートステップ工法を採用しており、掘削後すぐに覆工コンクリートを打設するサイクルを繰り返すため、立坑掘削に伴い周辺岩盤ならびに支保は、NATM 工法とは異なる挙動を示す。立坑掘削時に取得した周辺岩盤挙動ならびに支保部材応力の計測データの分析結果より、ロックボルトの挙動に着目し、支保の合理化を目的として、ロックボルトの作用効果を確認するための試験を実施した。さらに、その結果に基づき、後続の施工区間において、ロックボルトを省略することとした。

**Key Words :** shaft excavation, short step method, support design, rock bolt, rationalization

## 1. はじめに

（独）日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発の一環として、北海道幌延町において、堆積岩を対象とした地下研究施設を建設している。本施設は、三本の立坑（アクセス坑道、換気坑道）ならびに各立坑を連絡する複数深度の水平坑道（連絡坑道、周回試験坑道）からなり、最終的には深度 500m を目途に到達する計画である。坑道断面は、アクセス坑道（東、西立坑）が内径 6.5m の円形、換気坑道（換気立坑）が内径 4.5m の円形、水平坑道が内空幅 4.0m の三芯円馬蹄形である。

地下研究施設は、現在二本の立坑（東、換気立坑）の建設を進めており、平成22年9月末時点で、両立坑とも連絡坑道を設ける深度250.5mまで到達した。

幌延深地層研究計画における地下研究施設の設計においては、許容応力度設計法による支保の健全性照査、弾塑性解析で得られる塑性域の幅に対する許容値（施工可能なロックボルト長さ以内）の設定、という二つの基準を基に支保設計を行った<sup>1)</sup>。

立坑の施工では、ショートステップ工法を採用しているが、一般的なNATM工法による施工とは以下のような点で異なる。NATM工法による施工では、吹付コンクリート、鋼製支保工、ロックボルトを支保部材とし、周辺

岩盤の変形が収束した後に覆工コンクリートを打設することを標準としており、著しく周辺岩盤の地質が不良な場合等を除き、設計では覆工コンクリートに荷重は作用しないと考える。一方、ショートステップ工法による施工では、覆工コンクリートが主な支保部材であり、掘削後すぐに打設する<sup>2)</sup>ため、掘削に伴う周辺岩盤の変形により、覆工コンクリートに応力が発生する。

施工方法ならびに主な支保部材の違いから、ショートステップ工法による立坑掘削に伴う周辺岩盤ならびに支保の挙動は、取得した周辺岩盤挙動ならびに支保部材応力の計測データの分析結果を見ると、NATM工法による挙動とは異なる<sup>3)</sup>。

立坑掘削時に取得した計測データの分析結果より、ロックボルトの挙動に着目し、支保の合理化を目的として、作用効果を確認するための試験を東立坑において実施した。以下では、ショートステップ工法におけるロックボルトの作用効果の考察と、計測データ分析結果に基づく試験実施内容ならびにその結果について述べる。

## 2. 東立坑の施工概要と計測結果

### (1) 施工概要

地下研究施設周辺の岩盤は、新第三紀堆積岩（珪藻

質泥岩および珪質泥岩) からなり、事前調査のボーリングコアによる一軸圧縮試験結果より、一軸圧縮強さは5MPa～25MPaの範囲と推定される。なお、掘削時の切羽観察より、岩盤は割れ目の連続性が乏しく、概ね均質であるという結果が得られている。また、東立坑の標準支保パターンは図-1に示す通りであり、仕上がり内径は6.5m、覆工コンクリートの設計巻厚は40cmである。

標準的な施工サイクルとしては3方で1サイクルであり、1mの掘削、鋼製支保工建込み、ロックボルト打設を1方ずつ2回行い、前スパンの型枠脱型、移動ならびに2mの覆工コンクリートの打設を1方で行っている。この施工手順において、掘削後すぐに逆巻きで打設される覆工コンクリートには、次サイクルの掘削による影響により、荷重が作用することになる。

## (2) 計測結果

立坑掘削時における周辺岩盤の挙動ならびに支保の応力を測定するため、特定断面に各計器を埋設した。東立坑深度120mにおける計測器配置図を図-2に示す。また、同断面における覆工コンクリート応力、北方向の地中相対変位（最奥深度6mを基点とした場合の相対変位）、同方向のロックボルト軸力の経時変化図を図-3～5に示す。立坑一般部では掘削から覆工コンクリート打設までのサイクルが短いため、ロックボルト軸力計の計測開始直後に覆工コンクリートが打設されることになる。覆工コンクリートは、図-3に示すように型枠脱型時に一時的に応力は低下するが、切羽の進行に伴い全方向で圧縮応力が発生していることが分かる。一方、周辺岩盤は、

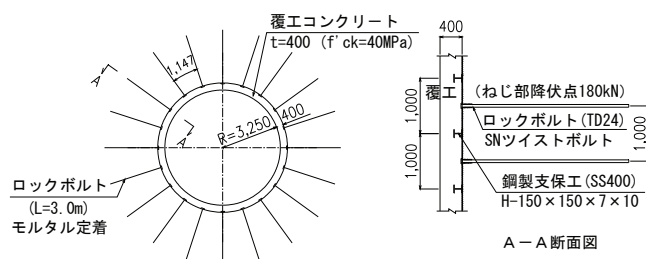


図-1 東立坑標準支保パターン図

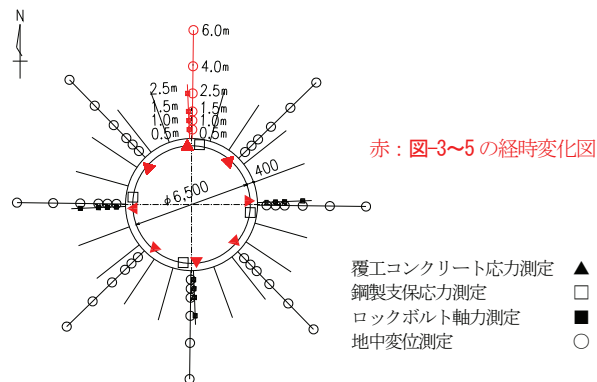


図-2 東立坑深度120m 計測器配置図

図-4に示すように立坑壁面周辺において、基点との距離が顕著に縮み側へ移行している。これは、掘削後すぐに剛性の高い覆工コンクリートを打設することから、内空側への変位が大幅に抑制されることが原因であると考えられる<sup>3)</sup>。なお、この挙動は全方向で同様に見られた。

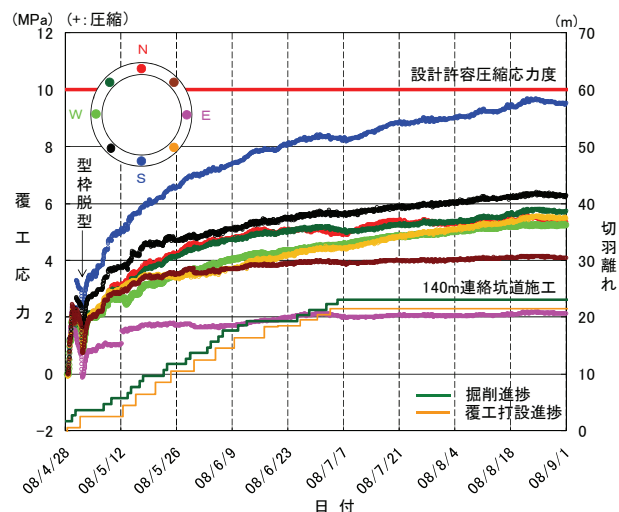


図-3 覆工コンクリート応力 経時変化図

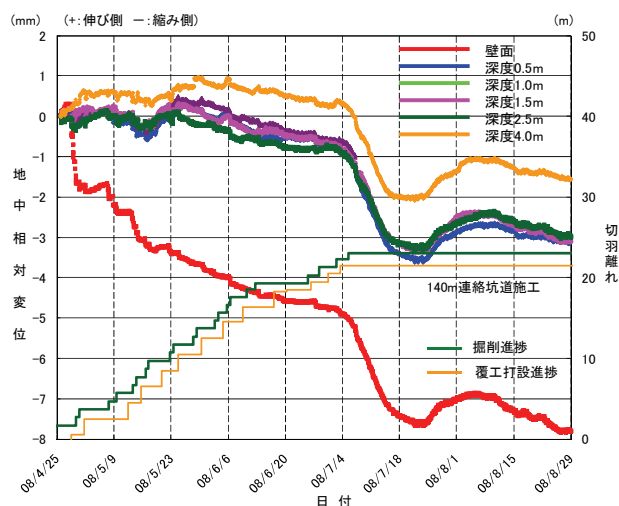


図-4 地中相対変位 経時変化図

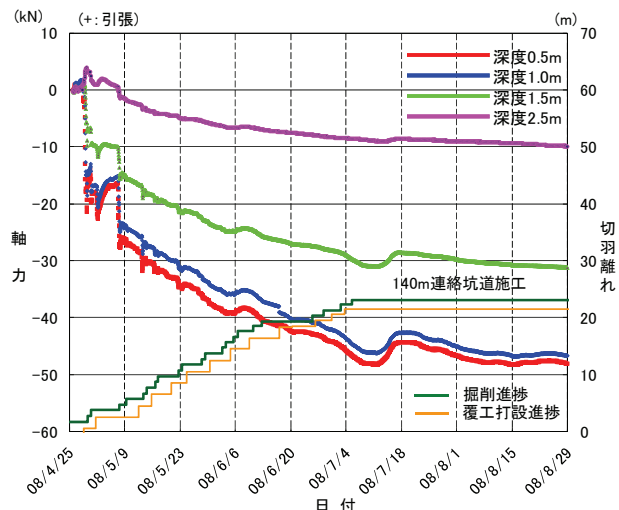


図-5 ロックボルト軸力 経時変化図

また、図-5に示すように、ロックボルトは初期に5kN以下の引張側の軸力が発生したが、切羽の進行に伴い、同様に圧縮側の軸力が卓越してくることが分かる。なお、この挙動は全方向で同様に見られた。

### (3) 考察

ロックボルトの一般的な機能および作用効果の概念<sup>2)</sup>は図-6に示す通りであるが、当地下研究施設の支保設計において構造体として地圧を支持するものは、覆工コンクリート（一次支保工の吹付コンクリートと鋼製支保工を含む）であり、ロックボルトは地圧を支持する支保部材として考慮せず、安定解析にはモデル化していない。ロックボルトには、割れ目によって区切られた不安定な岩塊を深部の地山と一体化させる吊下げ効果、縫付け効果等が期待されるが、それぞれの効果は抽象的であるため、これらの支保効果を期待して設計に取り込むことは、危険側の評価となることから、安定解析にはロックボルトを考慮しないこととした。ただし、ロックボルトをパターン化して打設することにより、地山の局所的な崩壊やキープロックの抜け出し等、地山の連続性を損なうような現象を予防することは可能であるため、ロックボルトの役割は、「予防的な役割として、局所的な変形防止を目的とした地山の均一化（連続性の確保）」とする地山改良効果と考えた。

また、有限要素法による安定解析では、地山の連続性を前提としており、ロックボルトを用いることで、地山の連続性を確保し、設計の前提条件を満足させることとした。なお、地山の局所的な変形については、塑性ひずみが大きくなる壁面近傍で懸念されるが、安全のためにロックボルトは塑性域の最大幅以上まで打設することとした。ただし、本設計での吊下げ効果等は、支保効果として考慮せずに安定性を評価するため、定着長は考慮していない。

立坑一般部では、吹付コンクリートは実施せずにロックボルトが打設され、掘削から覆工までのサイクルが短い。計測結果より、覆工コンクリート打設後は、ロックボルトに圧縮軸力が作用していることから、ロックボルトの引張軸力による吊下げ効果等は作用していないと考えられる。従って、ロックボルトの作用効果は、予防的な役割のみとなり、覆工コンクリートが地圧に対して十分な支保能力を有していることを踏まえれば、設計の合理化が可能であると考えられる。ただし、当地下研究施設の支保設計において期待している地山改良効果については、全く機能していないとは定量的に断言できないこと、またロックボルトの圧縮応力負担による覆工コンクリート圧縮応力の軽減分についても定量的に不明確なこと、さらに深度が比較的浅い段階で確認しておいた方がローリスクであることが考えられる。そこで、ロックボ

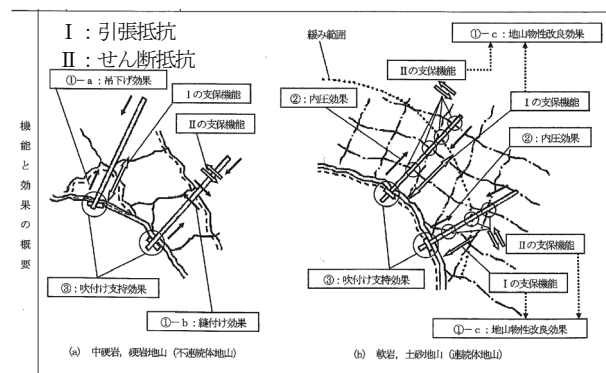


図-6 ロックボルトの機能と効果の概念図<sup>2)</sup>

ルトを打設しない区間を試験的に設定し、地山の挙動ならびに覆工コンクリート応力を計測することにより、ロックボルトの作用効果を確認した上で、最終的にロックボルトの必要性について判断することとした。

## 3. ロックボルトの作用効果確認試験

### (1) 試験概要

試験区間：東立坑深度150m～170m（20m区間：掘削径の約2倍相当）

確認方法：深度160m付近で実施する計測のデータと、既往の計測データとの比較・分析評価

対象ロックボルト本数：400本（1断面20本（L=3m）、軸方向1mピッチ）

ただし、壁面観察や計測結果により壁面崩落の可能性がある場合には、速やかに吹付コンクリートならびにロックボルトを施工し、試験を取り止めることとした。

### (2) 計測概要

計測は試験区間中央の深度160m付近を対象とし、A計測としてコンバージェンスメジャーによる内空変位測定（深度160.5m）、B計測として図-7に示すようにコンクリート覆工応力測定（深度159.3m）、鋼製支保工応力測定（深度159.8m）、地中変位測定（深度159.3m）を10分間隔の自動計測で行った。

なお、内空変位の計測点については、覆工コンクリート打設時に箱抜きをを残し、吊足場（スcaffolding）通過時まで計測できるようにしてある。また、内空変位測線については、南北方向から45°間隔を基本とするが、測線上で障害となる吊足場（スcaffolding）上の仮設備を避けて設定した。

### (3) 地質状況

立坑掘削時における側壁部の地質観察結果より、地質は新第三紀堆積岩の珪藻質泥岩（声間層）であり、北東

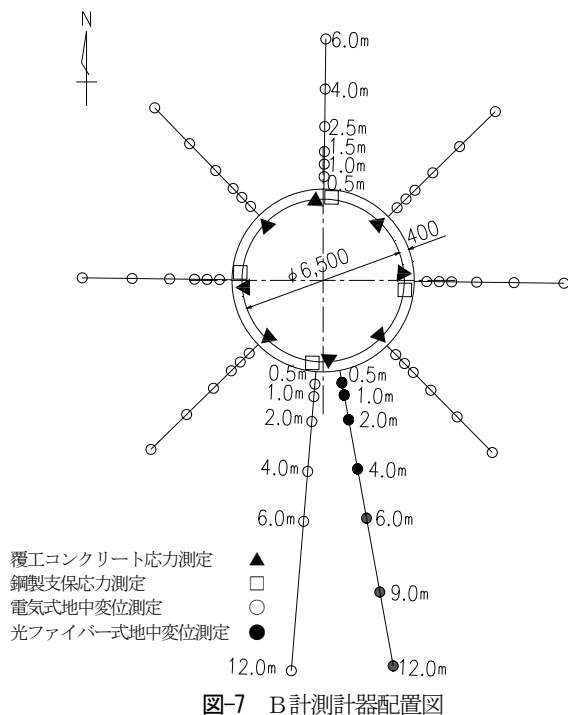


図-7 B計測計器配置図

一南西走向の北西傾斜（高角度，低角度）または北西一南東走向の北東傾斜（低角度）の割れ目が卓越していたが，連続性は乏しい．岩片同士を叩くと割ることが出来る程度の強度であり，割れ目は密着し，割れ目間隔は概ね20cm以下であった．また，全体の岩級は「CL-H，Hr有」を主体とし，部分的に割れ目間隔が10cm未満の「CL-M，Hr有」が分布しており，全体面積の約30%を占めた．なお，岩級評価については，母岩の硬さ・割れ目頻度・ヘアークラック（Hr）の有無の三つの指標を用い，表-1に示す区分に基づき行った<sup>4)</sup>．ここで，割れ目とは目視で確認出来る既存の分離面を指し，ヘアークラックとはコアでは柱状の岩石であるが，乾燥や外的荷重によって顕在化する潜在的な弱面と定義した．

また，北，西，南東において各々幅1cm程度の高角度の断層角礫部が見られたが，連続性に乏しく最長でも2m程度であり，変形に与える影響は小さいと判断した．

試験区間の地質状況については，顕著な壁面の崩落・湧水等の発生もなく，既施工区間において出現した地質状況と概ね同等と判断した．

#### (4) 支保パターン

支保については，壁面観察や計測結果により壁面の崩落の可能性が無いと判断し，図-1に示す支保パターンでロックボルト（長さ3m：1mピッチ）を打設しないこととした．

#### (5) 内空変位

図-8に変形モード概念図，図-9に深度160.5mの内空変位の経時変化図を示す．東一西～東北東一西南西方向か

らの最大主応力の影響により，東一西方向②において最大の内空変位が発生した．計測ピンを設置して初期値を測定し，B計測用の計器設置後，掘削を再開するまでに3.0mm，最終的に23.4mm変位（切羽からの離隔16.5m：掘削径の約2倍相当）した．計測断面の型枠脱型までに，1回毎の掘削進捗で約4mmづつ内空側へ変位したが，その後はコンクリートの硬化と切羽からの離隔に伴い収束した．一方，南一北方向④においては，計測断面の型枠脱型前までは他の測線の挙動と同等であったが，その後

表-1 岩級評価区分

| D  | 岩石は軟質で，カッターの刃が2mm以上刺さる<br>コアは，角礫状～岩片状～粘土状を示す |                                                        |     |
|----|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----|
| CL | L                                            | 岩石は，カッターの刃が1mm以上刺さる硬さを有する<br>コアは，角礫状～岩片状を示す            | Hr有 |
|    | M                                            | 岩石は，カッターの刃が1mm以上刺さる硬さを有する<br>コアは，概ね10cm未満の短柱状を主体とする    |     |
|    | H                                            | 岩石は，カッターの刃が1mm以上刺さる硬さを有する<br>コアは，概ね10cm以上の長柱状～棒状を主体とする | Hr無 |
| CM | L                                            | 岩石は，カッターの刃で傷が付く程度の硬さを有する<br>コアは，角礫状～岩片状を示す             | Hr有 |
|    | M                                            | 岩石は，カッターの刃で傷が付く程度の硬さを有する<br>コアは，概ね10cm未満の短柱状を主体とする     |     |
|    | H                                            | 岩石は，カッターの刃で傷が付く程度の硬さを有する<br>コアは，概ね10cm以上の長柱状～棒状を主体とする  | Hr無 |

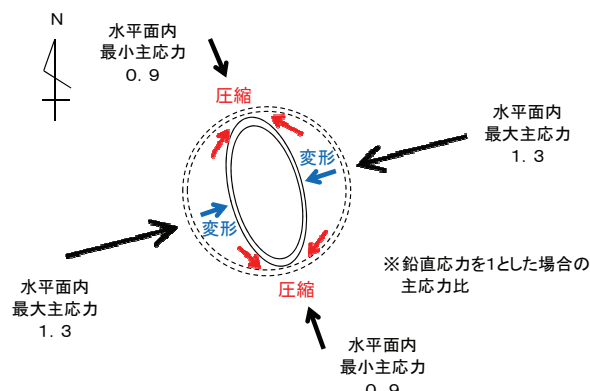


図-8 変形モード概念図

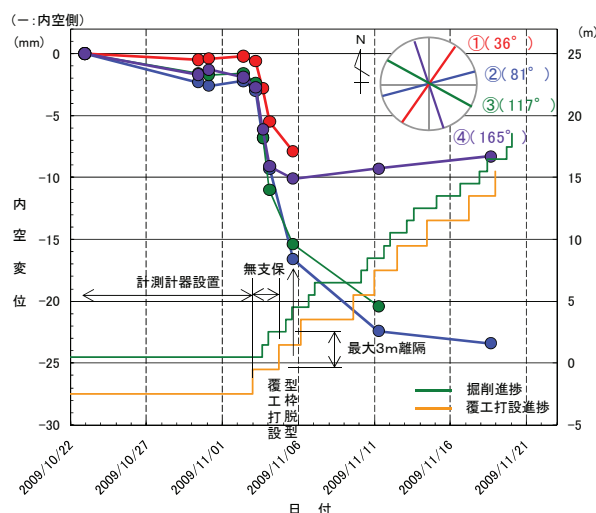


図-9 内空変位 経時変化図



は急激に変位が収束し、最終的には東－西方向②の変位の1/3程度であった。よって、計測断面の覆工コンクリート打設まで（切羽からの離隔2.0m）は切羽の離隔に伴う応力解放の影響が強く、型枠脱型以降は偏圧の影響が卓越してくることが分かる。

## (6) 覆工コンクリート応力

図-10 に深度 159.3m の覆工コンクリート応力の経時変化図を示す。同様に最大主応力方向の影響により、北－南～北西－南東方向において、相対的に高い応力が発生した。計測を開始後、覆工コンクリート打設ならびに掘削に伴って北東方向において最大約 4.0MPa まで急上昇したが、型枠脱型により一時的に下降後、更なる切羽の進行に伴い、ほぼ全方向とも概ね一定の割合で緩やかに上昇を続け、収束した。また、南方向において、最大約 6.0MPa（切羽からの離隔 51.2m：掘削径の約 6.6 倍相当）発生したが、コンクリートの設計許容圧縮応力度は 10.0MPa であるため、約 6割相当となる。

## (7) 地中変位

図-11 に深度 159.3m の地中相対変位（再奥深度 6m（南側のみ 12m）を基点とした場合の相対変位）の経時分布図を示す。同様に最大主応力方向の影響により、東－西方向における壁面では、壁面から 0.5m～2.5m 奥で内空側（伸び側）へ最大 2mm 程度の相対変位が発生した。一方、北－南方向における壁面では、両方向とも地山側（縮み側）へ最大 5mm 程度の顕著な相対変位が発生した。さらに、南西を除いた全方向の壁面では、0.5m 奥に比べて地山側（縮み側）への相対変位が増大していることが分かる。また、収束については、支保の応力に比べて相対的に早い段階で見られた。

## (8) 考察

内空変位測定結果については、試験区間の深度160.5m前後の測定結果と比較を行ったが、同様な挙動で収束した。また、覆工コンクリート打設までは、地山の内空側への変形によりロックボルトに引張方向の軸力が作用し、縫付け効果等が作用するが、試験区間前後の4断面（深度 150.5m, 160.5m, 170.5m, 182.5m（ロックボルト有り））における覆工コンクリート打設までに発生した東西方向②の内空変位を見ると、各々-9.3mm, -9.3mm, -11.2mm, -9.6mmであった。その時点までに休工、計測計器設置があった計測断面もあるため単純には比較できないが、深度170.5mにおいて-2mm程度変位が大きいもののロックボルトの作用効果は顕著には表れていないと考えられる。

一般的に、亀裂性岩盤や層状岩盤に対しては、ロックボルトの作用効果が十分に発揮されるが、当地点のよ

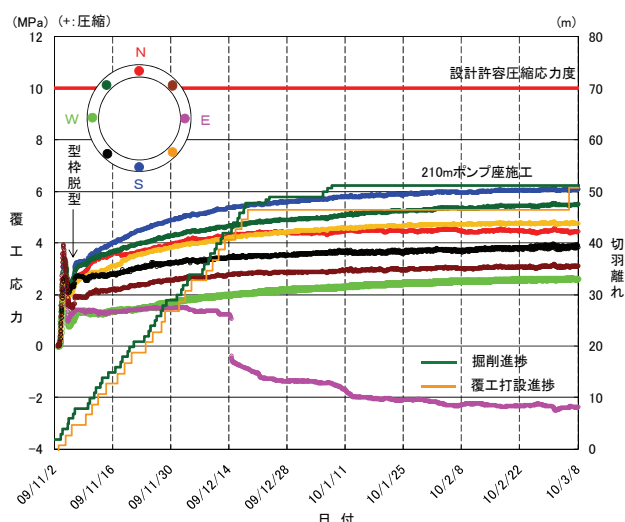


図-10 覆工コンクリート応力 経時変化図

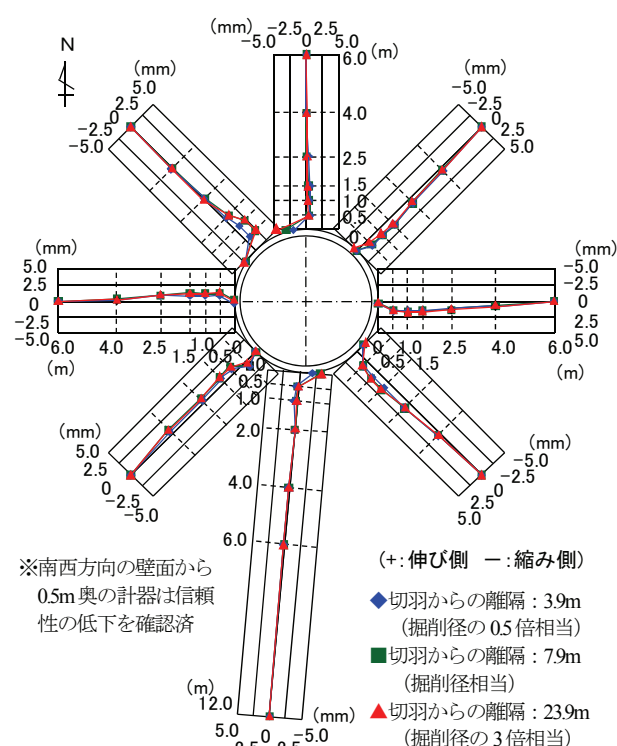


図-11 地中相対変位 経時分布図

うな割れ目の連続性が乏しく、比較的均質な岩盤に対しては、作用効果が十分に発揮されないと考えられる。加えて、吹付コンクリートを施工しない場合には、ロックボルトはプレート面しか壁面に接触しないため、応力の伝達範囲が狭く、同様に作用効果が十分に発揮されないと考えられる。

また、覆工コンクリート打設までは、当該スパンの打設までに前回の打設棲から切羽まで最大3mの無支保状態の直壁となることから、壁面の崩落等が懸念されたが、当地点のような地質状況であれば、そのような事象は発生しないことを確認できた。

次に、図-12 に試験区間後の深度 181.3m の覆工コンクリート応力の経時変化図を示す。なお、試験区間前後の

地質状況については、試験区間において出現した地質状況と概ね同等であり、図-1 に示す支保パターンで施工した。試験区間の方が相対的に低い応力値となっている（切羽からの離隔 15m（掘削径の約 2 倍相当）の段階で比較すると、南方向で約 6 割）が、この原因としては、切羽を止めてからコンクリート応力計設置までの期間が長く、掘削に伴う応力解放がより進んでから計測を開始したことが考えられる。また、発生した応力の収束については、同様に計測開始から約 3 カ月前後となっており、ほぼ同等であった。

覆工コンクリート打設後については、覆工コンクリートならびに鋼製支保工の応力状態と地中変位を見ると、全方向とも偏圧の影響を受けてはいるが、支保部材とその周辺岩盤は圧縮状態であり、局所的にも突出していないことから、岩盤の塑性による局所的な押し出しで抜け出した岩塊の自重が支保部材に作用していないと考えられる。さらに、支保部材への圧縮応力負担の増大が懸念されたが、定量的には不明であるものの設計許容圧縮応力度に対しては、十分な裕度がある。

以上のロックボルトの作用効果確認試験結果より、東立坑においては、安全に留意して深度 210m～250m の一般部のロックボルトを省略して施工した。また、今後着手する西立坑における深度 250m までの一般部のロックボルトを同様に省略する設計とした。

#### 4. まとめ

立坑建設時に取得した地中相対変位の計測データの分析結果より、覆工コンクリート打設後は、地山奥から内空側へ向かうに連れて内空側（伸び側）への相対変位が大きくなるが、0.5m 奥から壁面の間では反対に地山側（縮み側）への相対変位が顕著となることから、ロックボルトには圧縮方向の軸力が発生するため、引張方向の軸力による吊下げ効果等を発揮していないと考えられた。そこで、ロックボルトを打設しない区間を試験的に設定し、地山の挙動ならびに覆工コンクリート応力を計

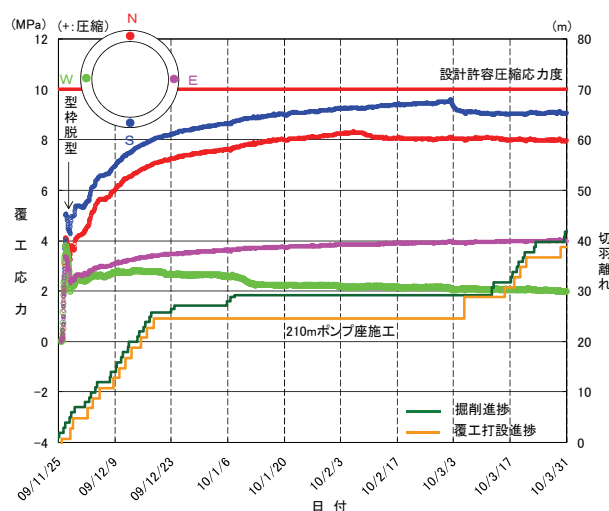


図-12 覆工コンクリート応力 経時変化図

測することにより、ロックボルトの作用効果を確認した上で、最終的にロックボルトの必要性について判断することとした。その結果、懸念された壁面の崩落等の事象も発生しないことを確認できたことから、後続施工区間のロックボルトを省略することとした。

今後は、深度 250m 以深における計測データを蓄積し、地圧、地山性状等との関係を明確にした上で、同様にシヨートステップ工法による立坑建設時における支保の合理化について検討していく。

#### 参考文献

- 1) 森岡宏之，山崎雅直，松井裕哉，尾留川剛，山口雄大：幌延深地層研究計画における地下施設の支保設計（実施設計），pp. 12-16，JAEA-Research2008-009，2008.
- 2) 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，土木学会，pp. 80，303，2006.
- 3) 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.
- 4) 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，pp. 4，JAEA-Research2007-050，2007.

## STUDY ON THE BEHAVIOR OF CONCRETE LINING AND ROCK MASS DURING SHAFT EXCAVATION IN THE HORONOBÉ URL PROJECT (PART I)

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

JAEA (Japan Atomic Energy Agency) has been constructed the Underground Research Laboratory in Hokkaido. In the shaft excavation, the short step method is adopted. The examination was carried out to confirm action effect of rock bolt for rationalization of support. As a result, rational support was carried out in later steps. In this report, action effect of rock bolt and result of examination are discussed.