

# 堆積軟岩における大深度立坑掘削に伴う 壁面崩落現象

## SPALLING IN RESPONSE TO SHAFT SINKING AT GREAT DEPTH IN SOFT SEDIMENTARY ROCK

津坂 仁和<sup>1\*</sup>・稲垣 大介<sup>2</sup>・名合 牧人<sup>3</sup>・松原 誠<sup>4</sup>

Japan Atomic Energy Agency has been constructing an underground research laboratory in order to enhance the reliability of relevant disposal technologies of high-level radioactive waste in Horonobe, Hokkaido. A ventilation shaft (4.5 m in diameter) and two access shafts (6.5 m in diameter) are being excavated through the Neogene sedimentary rocks until the depth of 500 m. Based on the results of borehole investigation and pre-grouting operation in bedrock with high permeability from 250 m to 375 m in depth, the three dimensional fracture distribution map were built and the locations with high possibility of spalling in shaft wall in response to excavation were predicted prior to the shaft sinking from a depth of 250 m. Some amounts of spalling has occurred in several depths during shaft sinking from 250 m to 280 m in depth. The shape of each spalling was measured by means of three dimensional laser scanning system. As a result, spalling in shaft wall occurred along the faults predicted based on the three dimensional fracture distribution. In addition, spalling by brittle failure in shaft wall was also observed with a few extensile fractures which were expected to be induced by excavation. Based on the shape of spalling, it was confirmed that the applied shaft sinking procedure properly prevented a massive spalling.

**Key Words :** *soft sedimentary rock, shaft sinking, spalling, fracture distribution, three dimensional laser scanner*

### 1. 序論

(独) 日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構という) は、北海道天塩郡幌延町にて、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる深地層の調査技術や工学技術の信頼性向上を目的として、幌延深地層研究計画を実施している。同計画では、地下500mまでの3本の立坑(換気立坑、東立坑、西立坑)と、深度140m、250m、350mおよび500mの調査坑道からなる地下研究施設を建設する。幌延深地層研究所のレイアウトを図-1に示す。2011年10月末現在、換気立坑(内径4.5m)を深度295mまで、東立坑(内径6.5m)を深度255mまで、西立坑(内径6.5m)を深度21mまで掘削した。掘削対象となる岩盤は、新第三紀堆積岩であり、深度約250mまでが珪藻質泥岩からなる声間層、それ以深が珪質泥岩からなる稚内層である。

これらの岩石の一軸圧縮強さは25MPa以下であるとともに、声間層と稚内層の地質境界付近では、連続性の良い不連続面が多数分布する。このため、このような岩盤条件下で、深度500mまでの大深度立坑を複数施工するにあたっては、作業安全性の確保、掘削工程の遅延や支保部材の損傷等の抑制のために、先行する立坑の施工にて、立坑掘削に伴う岩盤壁面の崩落現象を分析し、その結果を後続の立坑の施工にフィードバックすることが重要となる。

大深度立坑の崩落形態について、櫻井ら<sup>1)</sup>は、これまでの工事報告書とそれらに携わった技術者への聞き取り調査に基づいて、経験的に言及されてきた「高抜け」は、立坑の掘削径以上の連続性を有する断層・破碎帯と立坑が交差する場合に、その断層破碎帯上部の岩塊が立坑内に崩落する現象であると分析した。また、黒崎ら<sup>2)</sup>は、

キーワード：堆積軟岩、立坑掘削、坑壁崩壊、三次元地質構造、三次元レーザースキャナー

<sup>1</sup>正会員 (独) 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 432-2), E-mail: tsusaka.kimikazu@jaea.go.jp

<sup>2</sup>非会員 (独) 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 432-2)

<sup>3</sup>正会員 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 大成札幌ビル)

<sup>4</sup>非会員 株式会社地層科学研究所 実験・計測グループ (〒242-0014 神奈川県大和市上和田 1794 番地 鳥海ビル 2F)

数値解析を用いて、ショートステップ工法による立坑掘削に伴う立坑周辺岩盤の応力状態の変化に着目し、未覆工部周辺の岩盤の塑性化に伴って、その上部にある岩盤の応力が平衡状態を保持できなくなり、その岩盤が未覆工部分へなだれ込むような大変状が発生し、壁面の崩壊へと至るとした。また、秋好ら<sup>3)</sup>は、原子力機構が岐阜県瑞浪市で建設中の瑞浪超深地層研究所における立坑掘削にて実施した壁面崩落の対策工に関する具体的な選定過程を示し、その効果を坑壁安定性や余掘量などの定量的なデータに基づいて報告した。このような事例分析や数値解析による検討に基づいて、これまで経験的に扱われてきた立坑掘削に伴う崩落現象やその発生機構に関する知見が体系化されてきた。しかしながら、立坑掘削前のボーリング調査結果と実際の立坑掘削での崩落現象の関係や、その原位置での三次元的な崩落形状を分析した事例はほとんどない。

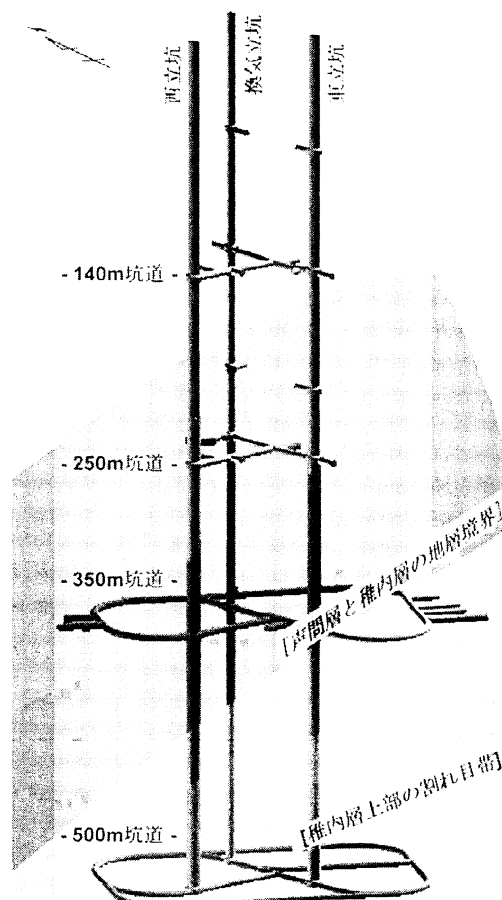
そこで、本研究では、幌延深地層研究所で掘削する3本の立坑のうち、先行する換気立坑の施工を対象として、立坑掘削に先立って実施したボーリング調査結果と湧水抑制対策工（以下、プレグラウト工という）の実績に基づいて、立坑周辺岩盤中の連続性のよい断層などの割れ目の分布を推定した。その結果から、立坑掘削に伴う崩

落危険区間を設定した。さらに、実際の換気立坑の掘削にて、3次元レーザースキャナー（以下、3D-LSと記す）を用いて、立坑壁面の形状を測定し、予測した区間における立坑壁面の崩落状態を定量的に把握し、岩盤性状との関係を分析した。

## 2. 幌延深地層研究所の換気立坑の掘削と湧水抑制対策工

### (1) 立坑の施工方法

幌延深地層研究所の換気立坑は、機械掘削によるショートステップ工法で施工し、主要な支保部材は、設計巻き厚400mmの覆工コンクリート、鋼製リング支保工（以下、鋼製支保工という）、長さ3~4m、径24mmの全面定着式ロックボルトである。覆工コンクリートは無筋コンクリートである。鋼製支保工は、円形に曲げ加工した4分割のH形鋼からなり、切羽に搬入して組み上げる。立坑の施工手順は、図-2に示す4つの段階からなる（各段階の工程を赤で示す）。初期状態を底盤から高さ約1mまで覆工コンクリートが構築された状態（図-2 (a)）として考えると、始めに、1m掘削した後、鋼製支保工を所定の位置に建て込み、ロックボルトを施工する（図-2 (b)）。次に、1m掘削して、同様の工程を繰り返す（図-2 (c)）。その後、底盤から1mを残して鋼製の移動型枠を設置し、覆工コンクリートを構築する（図-2 (d)）。覆工コンクリートを構築することによって2段分の鋼製支保工も支保として機能する。つまり、約3mを無支保に近い状態で掘削していることになる。



※深度350m以深の坑道のレイアウトは、今後の調査研究の結果によって変更される可能性がある

図-1 幌延深地層研究所のレイアウト

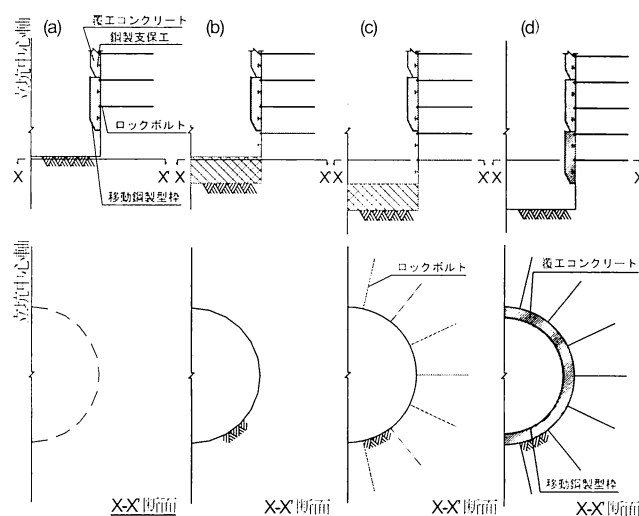


図-2 立坑の施工手順。(a) 初期状態、(b) 第1掘削段階、(c) 第2掘削段階、(d) 覆工コンクリートの構築。

(2) 湧水抑制対策工（プレグラウト工）

原子力機構は、平成18年1月に北るもい漁業協同組合と締結した「幌延深地層研究所の放流水に関する協定書」に基づいて、幌延深地層研究所からの1日あたりの排水量を750m<sup>3</sup>以下としている。これを踏まえて、換気立坑を深度140.5mまで掘削した時点にて、換気立坑近傍の地質構造や透水性等の地質環境特性を詳細に把握するために、換気立坑の中心から概ね北東方向に約17mの位置に、掘削長520mの深層ボーリング（換気立坑先行ボーリング（Pilot Boring of the Ventilation Shaft）といい、以下、PB-V01孔と記す）を掘削した。このボーリング調査結果から、換気立坑の深度250m以深に高透水性の破碎帯が確認され、協定書遵守のために、適切な湧水対策が必要であると判断した。このため、立坑掘削に伴う湧水量を抑制するために、深度250m以深の立坑の施工前に、深度250mの立坑底盤から、プレグラウト工を実施している。換気立坑のプレグラウト工のボーリング孔（孔径は全て46mm）の配置図と想定改良範囲を図-3に示す。想定改良範囲は、深度255.6m~306.2m（区間長は52.1m）と深度342.9m~374.5m（区間長は31.6m）の立坑周辺約3m

である。岩盤の改良目標値は0.1Lu以下であり、グラウト材料には、超微粒子セメント（日鐵セメントスーパーファイン）を使用している。注入方式は、ステージ方式（標準ステージ長は5m）を採用している。基本的な施工手順としては、パイロット孔（P孔）の後、A、B、Cリングの順で施工し、最後に、チェック孔（C2孔とC6孔）を施工する。各ボーリング孔の施工手順については、削孔、透水試験（パイロット孔とチェック孔のみ）または水押し試験（パイロット孔とチェック孔以外の孔）、グラウト材の注入、再削孔である。また、削孔中にガスや地下水の噴発が生じた場合は、直ちにパッカーをかけ、グラウト材の注入を行っている。対象岩盤は、その一軸圧縮強さが25MPa以下と低く、岩盤中のき裂は開口していない状態である。このため、注入圧力が高過ぎると孔壁崩壊を招くことから、注入圧力を水押し試験やルジオン試験で得られた限界圧力から+0.2MPa程度で管理して施工中である。

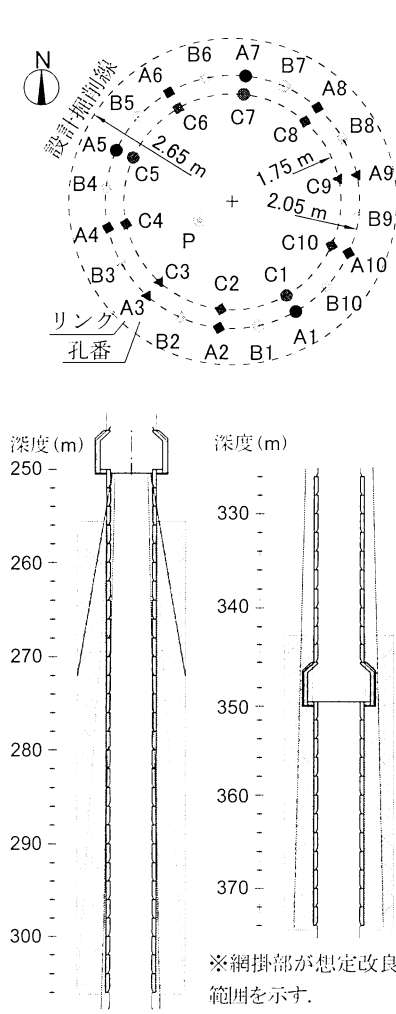


図-3 プレグラウト工のボーリング配置図と想定改良範囲

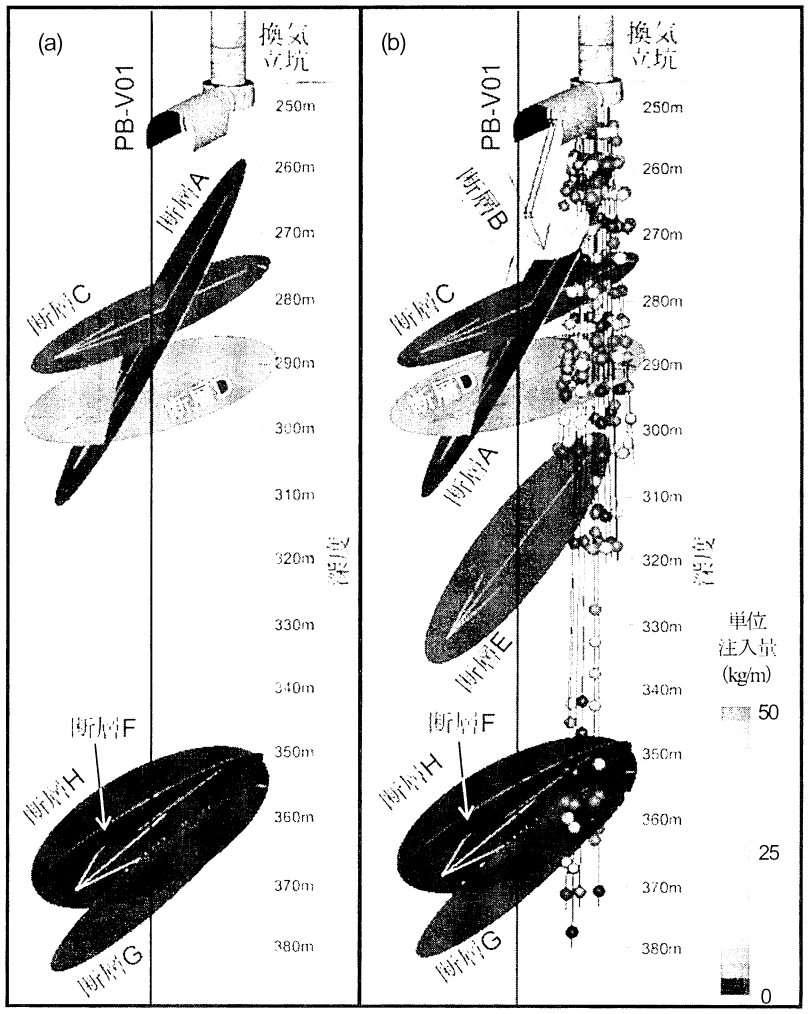


図-4 ボーリング調査およびプレグラウト工の結果に基づく割れ目の分布 (a) ボーリング調査結果, (b) グラウト注入量と割れ目の分布

3. 三次元地質構造モデルと崩落危険区間の推定

これまでの研究<sup>1),2)</sup>により、立坑の掘削においては、その掘削径以上の連続性を有する断層・破砕帯と立坑が交差する場合に、壁面の崩落現象が生じる可能性が高い。この知見を踏まえ、深度250m以深の換気立坑の掘削時に壁面の崩落が生じる区間を予測するために、PB-V01孔の調査結果とプレグラウト工の実績に基づいて、換気立坑の周辺岩盤に分布する主要な断層を抽出し、換気立坑との位置関係を分析した。

PB-V01孔の調査結果において、舟木ら<sup>4)</sup>は、ボーリングコア観察より、割れ目の成因（主として、断層岩を有するせん断性割れ目、断層岩を有しないせん断性割れ目、引張性割れ目、成因が不明な割れ目の4種類）や断層岩や充填物の性状（断層ガウジ、断層角礫、炭酸塩脈）を調査し、BHTV検層より、コアで認められた割れ目の位置、傾斜方位および傾斜角度を同定した。また、同定した割れ目のうち、断層ガウジと断層角礫を含む6本の断層（断層A、C、D、F、G、H）をプレグラウト工で注視する断層として抽出した。これらの断層と換気立坑との位置関係を図-4 (a)に示す。ただし、幌延地域に分布する断層の連続性については、その断層岩の幅と長さの関係を現在調査中であるため、同図においては、任意の大きさにて示した。

プレグラウト工の施工中、ボーリング孔の削孔時に、主要な断層に遭遇する毎に、溶存ガスや地下水、砂の噴出やロッドの締付等が生じた。この結果、上記6本の断層に2本（断層BとE）を注視すべき断層として追加した。断層BおよびEと換気立坑との位置関係とグラウト材の

表-1 ボーリング調査結果とグラウト工実績に基づく主要な割れ目と立坑での出現予測深度

| 抽出した断層 | 走向・傾斜       | 断層岩の厚さ<br>(mm) | 立坑での出現予測深度*<br>(m)           |
|--------|-------------|----------------|------------------------------|
| A      | N69°E, 61°N | 122            | 261.3 ~ 271.3<br>(南南東) (北北西) |
| B      | N47°W, 40°S | 数 cm           | 265.9 ~ 270.5<br>(北東) (南西)   |
| C      | N65°E, 24°N | 20             | 279.0 ~ 281.4<br>(南南東) (北北西) |
| D      | N40°E, 17°W | 40             | 294.5 ~ 296.1<br>(南東) (北西)   |
| E      | N58°E, 52°N | 開口数mm          | 311.5 ~ 318.7<br>(南東) (北西)   |
| F      | N78°E, 36°W | 102            | 349.5 ~ 353.5<br>(南南東) (北北西) |
| G      | N83°W, 47°N | 20             | 353.0 ~ 359.0<br>(南南西) (北北東) |
| H      | N35°E, 31°W | 100            | 360.3 ~ 363.7<br>(南東) (北西)   |

\* 断層が出現する上端および下端の深度を上段に示し、それぞれの方位を下段に示す。

単位注入量の分布を図-4 (b)に示す。PB-V01孔の調査段階では、断層Bについては、採取された岩片の表面に鏡肌等が確認できたものの、2~3mにわたってRQDがほぼ0%であったため、BHTV検層によってその走向と傾斜を同定することはできなかった。また、断層Eは、ボーリングコアの観察において、断層ガウジ等の有意な充填物を確認できなかったために、断層として抽出できていなかった。また、図-4 (b)に示すとおり、グラウト材の単位注入量の分布は、抽出した断層周辺にて注入量が増加する傾向を示した。

深度250m以深の換気立坑の掘削前に実施したPB-V01孔の調査結果とプレグラウト工の実績に基づいて、抽出した8本の断層の方向性とその断層岩の厚さ、さらに、それらの断層が換気立坑に出現する区間（上端および下端の深度とそれぞれの方角）を表-1に整理した。約17m程度離れたPB-V01孔とプレグラウト工のボーリング孔の観察結果から断層が同定されていることとグラウト材の注入量や削孔時の噴發現象から、抽出した8本の断層の連続性は換気立坑の掘削径以上であることが予想される。したがって、これらの断層が換気立坑に出現する区間にて、掘削に伴って壁面の崩落が生じる可能性が大きいと考えられる。

表-2 3D-LSの計測仕様

|                 |               |                                                          |
|-----------------|---------------|----------------------------------------------------------|
| 一般仕様<br>(カタログ値) | 測距            | 4 mm(s) (1 ~ 150 m)                                      |
|                 | 単点測定精度        | 水平角度 0.0016° (= 6")<br>鉛直角度 0.0016° (= 6")               |
|                 | 最小設定角度        | 水平角度 0.0029°<br>鉛直角度 0.0029°                             |
|                 | 測距範囲          | 距離 反射強度90%: 330 m, 同18%: 150 m<br>水平方向 360°<br>鉛直方向 ±35° |
|                 | 測距速度          | 30,000点/秒                                                |
|                 | レーザー光線スポット径   | ≦ 6 mm (1 ~ 40 m (1/e2))                                 |
|                 | 本体寸法          | 奥行240 x 幅240 x 高さ566 mm                                  |
|                 | 本体重量          | 16kg (バッテリー、基盤除く)                                        |
|                 | 耐環境性          | IP52 (JIS C0920:2003に準拠、防塵カテゴリー2)                        |
|                 | 立坑における計測仕様    |                                                          |
| 立坑における計測仕様      | 立坑掘削半径 (設計半径) | 2,650 mm                                                 |
|                 | 測距離           | 16,650 mm                                                |
|                 | 測距角度          | 360°                                                     |
|                 | 設定角度          | 0.22°                                                    |
|                 | 分解能           | 10 mm                                                    |
|                 | 測距点数          | 1,665                                                    |
|                 | 測距離           | 約3,000 mm                                                |
|                 | 測距角度          | 上方35° ~ 下方35°                                            |
|                 | 設定角度          | 最大0.22°                                                  |
|                 | 分解能           | 10 mm                                                    |
|                 | 測距点数          | 318                                                      |
| 合計              | 測距点数          | 約570,000                                                 |
|                 | 測距速度          | 1,000点/秒                                                 |
|                 | 実測時間          | 約10分                                                     |

4. 立坑掘削に伴う壁面崩落現象の計測と考察

換気立坑の掘削に伴って生じる壁面崩落の位置や形状と岩盤に分布する主要な断層の関係を分析するために、図-2に示した換気立坑の施工手順の中で、第2掘削段階の後、底盤から高さ2mの範囲の壁面を対象にして、岩盤観察と3D-LS (TOPCON社製 GLS-1500) を用いた壁面の形状計測を実施した。同測定器の計測仕様を表-2に示す。機器の選定には、瑞浪超深地層研究所の立坑の施工中に実施した計測事例<sup>9)</sup>を参考にした。3D-LSによる測定は、岩盤観察と並行して行った。立坑の掘削工程上、岩盤観察は概ね2時間としており、その時間内に、搬入・設置・計測・撤去・搬出に要する時間を考慮しなければならない。工程上の制約条件下にて、壁面の凹凸量を適切に測定するために、測点の間隔を概ね10mmとした。一方、岩盤観察では、割れ目の成因 (PB-V01孔の調査

内容に加えて、掘削による応力再配分に伴う引張性割れ目を区別)、走向と傾斜、開口量、割れ目の充填物、湧水量を調査した。

深度252~281mまでの3D-LSによる壁面形状の立体図を図-5に示す。同図より、北側から北東側壁面の深度265~267m (以下、崩落-I)、南側から南西側壁面の深度270~272m (以下、崩落-II)、南および北側壁面の深度275~277m (以下、崩落-IIIおよびIV) にて、周辺部に比べて立坑壁面に顕著な凸形状が認められる。この測定データに基づいて、立坑中心からの設計掘削半径 (= 2.650mm) を基準とする立坑の岩盤壁面の凹凸量と、深度250~280mの立坑壁面の岩盤観察の結果を図-6に示す。同図は、北側を基準に立坑壁面を展開した図である。また、岩盤観察の結果より、立坑壁面には、長さが1~2mのせん断性割れ目と応力再配分に伴う引張性割れ目が多数分布した。その中で、深度257~268mにほぼ同一の方

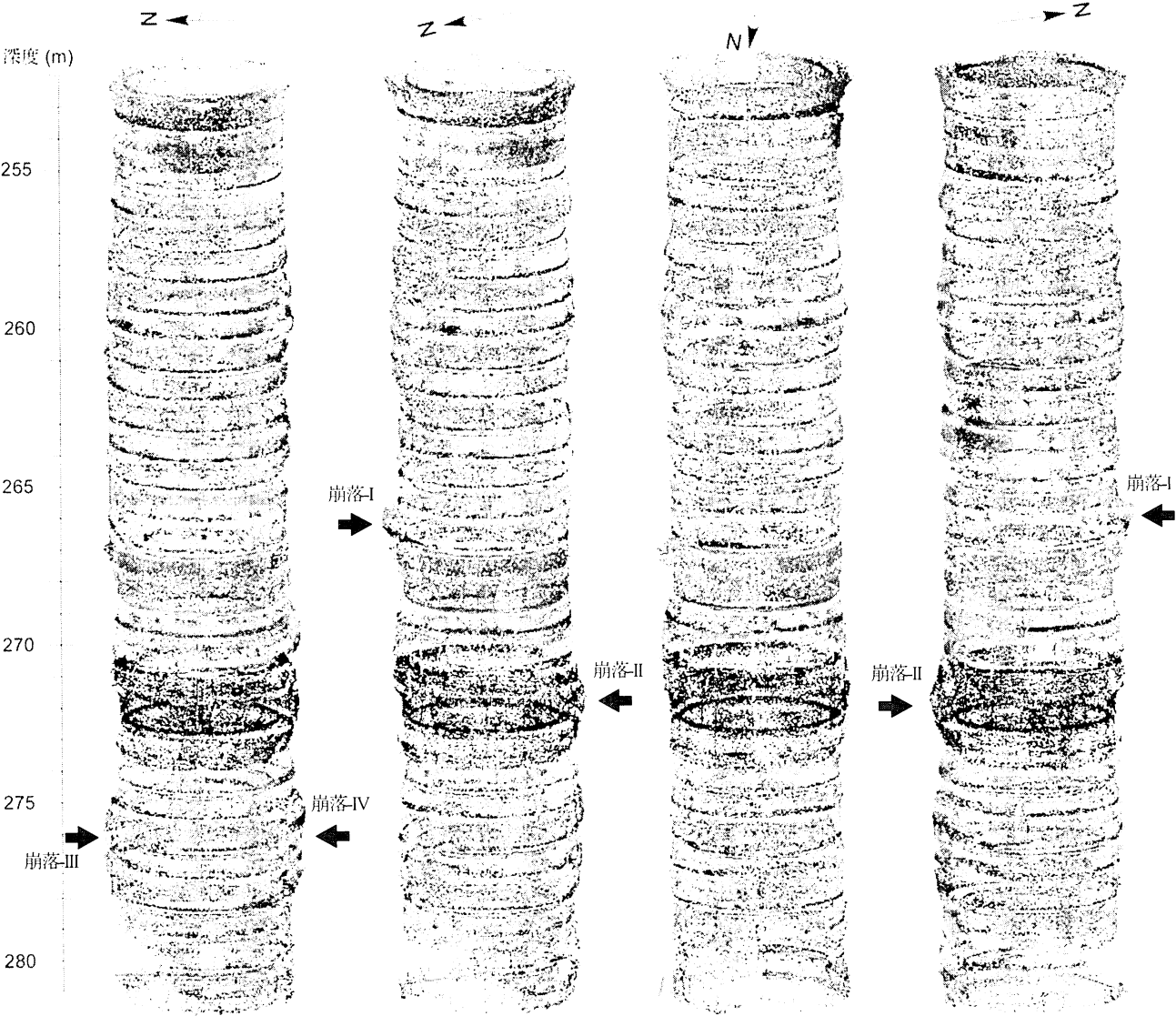


図-5 3D-LSによる立坑壁面形状の測定結果 (深度250~280m) (赤矢印は顕著な崩落箇所を示す)

向性を有する小規模な断層群（図-6にて代表的な方向性を黒破線で示す）と深度265~270mに連続性のよい断層が認められた。これらの方向性は、前者はN88°E、62°Nであり、後者はN45°W、39°Sであった。表-1にまとめた8本の断層のうち、出現想定深度に4m程度の差があるものの、その方向性から前者が断層Aに、後者が断層Bに相当し、立坑における抽出した断層の出現予測深度は概ね妥当であると考えられる。また、これらの断層や割れ目沿いに顕著な湧水量はなく、わずかな湧水箇所（0.1L/min程度）が散見される程度であった。さらに、図-6に示す岩盤壁面の凹凸量のコンター図より、崩落-IからIVの崩落の程度は、最大で設計掘削半径より90cm程度であった。

既往の研究に基づく立坑掘削において想定される崩壊形態としては、立坑の掘削径以上の拡がりを持つ断層の上部の崩落（高抜け）、同様の断層の下部での崩落、そして、初期地圧の分布と立坑掘削に伴う応力再配分による応力集中によって生じる崩落（以下、ブレイクアウト現象という）の3つが考えられる。断層下部での崩落については、黒崎ら<sup>2</sup>が数値計算によりその可能性を示唆している。ブレイクアウト現象については、小川ら<sup>7</sup>が幌延地域の初期地圧分布と岩盤の深度分布を考慮して、立坑の3次元逐次掘削解析を実施し、稚内層上部において、水平面内の最小主応力方向（南北方向）に塑性領域が発達することを示している。

これらの知見と岩盤観察結果に基づくと、崩落-Iは、断層Bの上端部に位置し、その破砕物の崩落（小規模な「高抜け」現象）であったと考えられる。崩落-IIでは、断層Bの下端部に位置し、崩落部周辺には、掘削による応力再配分に伴う割れ目は認められず、流れ目となるせん断性割れ目（北西走向・高角北傾斜で、開口幅が3~5mm）と刺し目となるせん断性割れ目（北北西走向・中高角南傾斜で、開口幅が1~3mm）が分布した。これらの割れ目の長さは1~2m程度であった。これらの小規模な断層と断層B、立坑壁面によって形成された岩塊が崩落したと推察される。また、図-6に示した立坑壁面の凹

ト現象という）の3つが考えられる。断層下部での崩落については、黒崎ら<sup>2</sup>が数値計算によりその可能性を示唆している。ブレイクアウト現象については、小川ら<sup>7</sup>が幌延地域の初期地圧分布と岩盤の深度分布を考慮して、立坑の3次元逐次掘削解析を実施し、稚内層上部において、水平面内の最小主応力方向（南北方向）に塑性領域が発達することを示している。

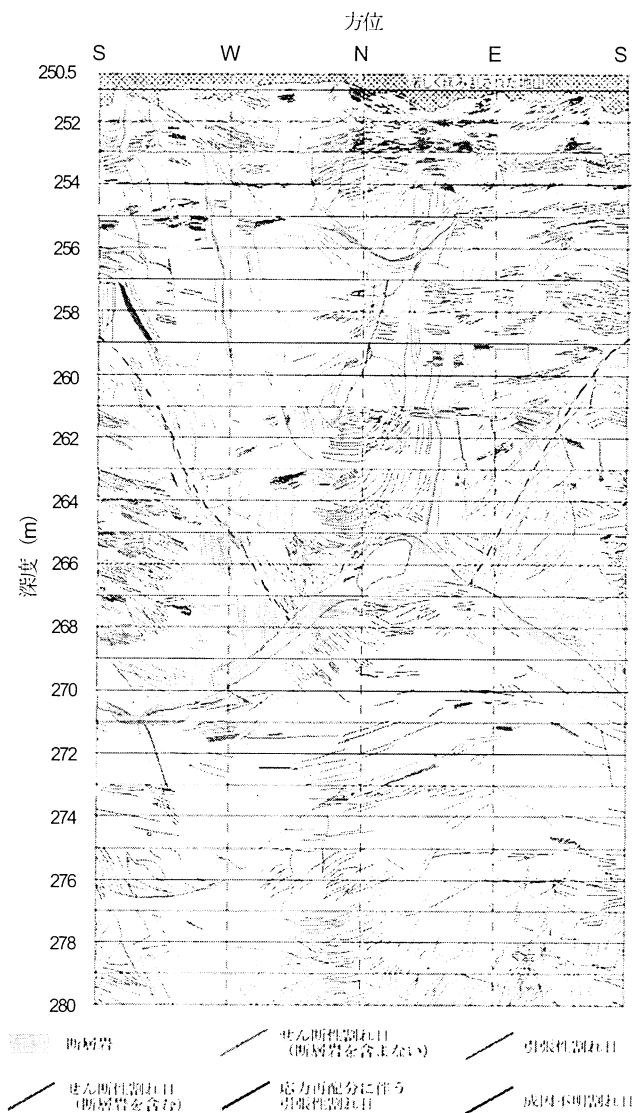
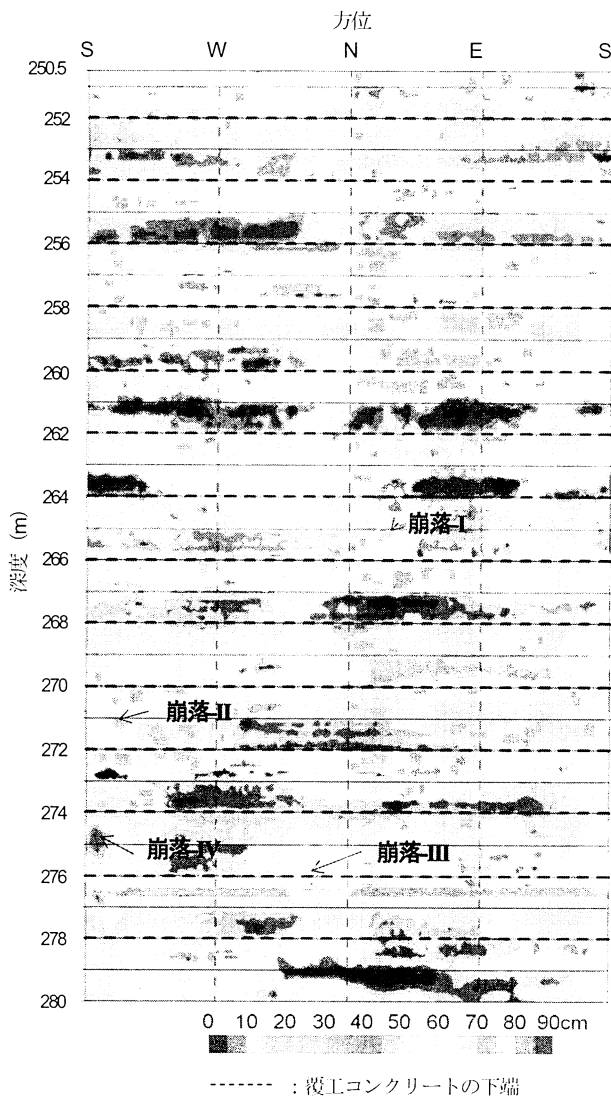


図-6 立坑壁面の凹凸量と割れ目観察結果（深度250~280m）

凸量のコンター図より、これらの崩落IとIIは、覆工コンクリートの下端までしか伸展しておらず、オーバーハング形状を呈した。すなわち、ショートステップ工法は、立坑の掘削径以上の拡がりを持つ断層部の「高抜け」現象やその下端の崩落現象を適切に抑制していると考えられる。

次に、崩落-IIIとIVの断面図を図-7に示す。崩落-IIIでは、せん断性割れ目に加えて、掘削による応力再配分に伴う引張性割れ目によって崩落面が形成された。せん断性割れ目の方向性は、北西走向・高角南傾斜であり、掘削による応力再配分に伴う引張性割れ目の方向性は、せん断性割れ目と同様のものと、北東方向・高角北傾斜であった。壁面から剥離したような板状の岩塊が発生しており、図-7に示すように、崩落部はこれらの割れ目により形作られる幅の広いV字型であった。同様に、崩落-IVにおいても、崩落-IIIと同様の方向性を有するせん断性割れ目と掘削による応力再配分に伴う引張性割れ目が認められた。それらの割れ目の方向性は、図-7に示す崩落形状と整合するように、せん断性割れ目は、北東走向・高角北傾斜であり、掘削による応力再配分に伴う引張性割れ目の方向性は、北西走向・高角北傾斜であった。よって、崩落-IIIとIVは、主として、ブレイクアウト現象に伴う崩落であったと考えられる。ただし、既存の割れ目がない岩盤状態を想定すると、ブレイクアウト現象は、立坑中心に対して対称に崩落現象が生じると考えられる。しかし、崩落-IIIとIVは、図-7に示すとおり、立坑中心に対して非対称の形状を呈しており、その形状は、既存の小規模なせん断性割れ目に影響を受けていると考えられ、その発生機構については現在調査中である。

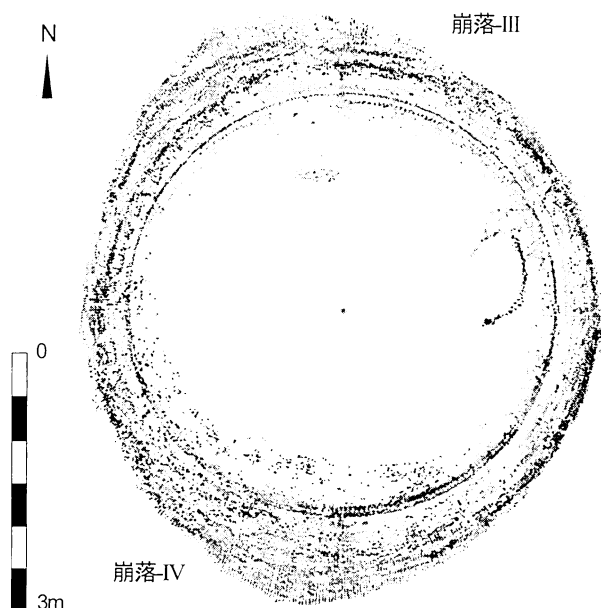


図-7 崩落-IIIとIVの断面形状

## 5. 結論

本研究では、幌延深地層研究所の換気立坑の施工において、立坑掘削時に詳細な岩盤観察と3D-LSを用いた壁面形状の計測を実施し、掘削に伴う立坑壁面の崩落現象を分析した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 立坑掘削前に実施したボーリング調査の結果とブレイクアウト工の実績に基づいて、立坑周辺岩盤中の断層の分布を推定した。今回対象とした深度250~280mまでの区間において、立坑掘削時の岩盤観察結果より、推定された断層は概ね予測した方向と深度に出現した。

(2) 換気立坑の掘削に伴って、その掘削径以上の連続性を有する断層の上端部と下端部での崩落と、初期地圧の分布と立坑掘削に伴う応力再配分による応力集中によって生じる崩落（ブレイクアウト現象）の3つの形態の崩落が観察された。

(3) 断層上端部で生じた崩落（小規模な「高抜け」現象）や断層下端部で生じた崩落は、崩落箇所上部に構築した覆工コンクリートの背面までは伸展しておらず、崩落部はオーバーハング形状を呈していた。つまり、ショートステップ工法によって、立坑掘削に伴う大規模な崩落現象を適切に抑制できたと考えられる。

**謝辞：**本研究にあたり、立坑底部の狭い作業環境下での岩盤観察と3次元レーザースキャナーによる測定には本島貴之氏（大成建設株式会社）、石川泰己氏（三菱マテリアルテクノ株式会社）、小川大介氏（株式会社地層科学研究所）、高橋昭博氏（株式会社エーティック）、中島敦史氏（株式会社ダイヤコンサルタント）、政枝宏氏（株式会社ダイヤコンサルタント）、松尾重明氏（三菱マテリアルテクノ株式会社）に多大なご尽力をいただいた。ここに謝意を記します。

## 参考文献

- 1) 櫻井春輔, 清水則一, 芥川真一, 吉田秀典, 佐藤稔紀, 山地宏志: 国内超大深度立坑工事の地山崩壊形態から見た崩壊発生機構に関する考察, 土木学会論文集F, Vol.62, No.4, pp.662-673, 2006.
- 2) 黒崎幸夫, 山地宏志, 松井裕哉: 超大深度立坑における高抜け崩落機構に関する調査・解析（委託研究）, JAEA-Research, 2008-066, pp.41-75, 2008.
- 3) 秋好賢治, 見掛信一郎, 金田勉, 野田正利: 超大深度立坑における不良地山掘削時の坑壁崩落対策, トンネル工学報告集, 第17巻, pp.105-111, 2007.
- 4) 舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也: 新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?, 応用地質, 第50巻, 第4号, pp.238-247, 2009.
- 5) 持田裕之, 天野健治, 鶴田忠彦: 3D レーザースキャナーの受光強度画像を用いた画像処理による岩相区分の試み - 瑞浪超深地層研究所に分布する瑞浪層群での適用事例 -, 応用地質, 第48巻, 第3号,

- pp.126-131, 2007.
- 6) 小川豊和, 木ノ村幸士, 青木智幸, 山本卓也, 真田祐幸, 松井裕哉: 物性の深度依存性を考慮した堆積軟岩中の大深度立坑逐次掘削解析, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.933-940, 2008.
- 7) 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の構築, 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.