# 幌延深地層研究センターの立坑における 掘削損傷領域の進展に関する検討

青柳 和平1\*·石井 英一1·藤田 朝雄1·本島 貴之2

<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番地2) <sup>2</sup>大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1) \*E-mail:aoyagi.kazuhei@jaea.go.jp

堆積軟岩を対象とする幌延深地層研究センターの深度350m以深の東立坑周辺に生じた掘削損傷領域の 拡がりとその破壊様式を推定することを目的として、透水試験、BTV観察、立坑周辺のボーリング孔内水 位の連続モニタリング、立坑壁面の観察を実施した。結果として、立坑壁面から2m以内で、透水係数が 約1~3オーダー増大したことが確認された。これは、BTV観察により捉えられた割れ目の分布に整合する 結果であった。また、立坑掘削深度がボーリング孔底深度に達した段階で水位の急激な低下が見られたこ とから、掘削時に瞬間的に割れ目が発達し、壁面へ連結したことが推定された。さらに、立坑掘削に伴っ て発生する割れ目は引張のメカニズムで発生しており、壁面を取り囲む形で分布することがわかった。

Key Words: excavation damaged zone, hydraulic conductivity, fracture, shaft sinking

#### 1. 諸言

高レベル放射性廃棄物の地層処分場などの地下施設の建設においては、立坑や水平坑道の掘削の影響により、坑道の周りに応力の再配分をきたし、掘削影響領域(Excavation disturbed Zone, EdZ)と呼ばれる領域が形成される。この掘削影響領域のうち、新たな割れ目の形成など岩盤の特性を大きく変化させ、透水性の増加につながる領域を、特に掘削損傷領域(Excavation Damaged Zone,以下EDZと記載)と区別しているり、地層処分研究においては、処分システムの安全評価の観点から、EDZの拡がりや透水性について調査することが重要である。

水平坑道に関するEDZの力学・水理特性に関する調査研究事例は、世界各国の地下研究所やトンネル等で多く報告されているが、立坑に関しては報告事例が少ないのが現状である。そこでは、立坑周辺の透水試験<sup>29</sup>、AE計測<sup>4</sup>、弾性波探査<sup>5</sup>、岩盤内のひずみ計測結果と数値解析結果の比較<sup>67</sup>等の検討により、力学的・水理的な岩盤性状の変化に関する研究が行われている。しかしながら、坑道掘削時に形成される割れ目の拡がりや産状(破壊様式)と、立坑周辺岩盤の透水性の変化の関係を論じた事例は見られない。

そこで、本研究では、珪質泥岩を対象に、幌延深地 層研究センターの東立坑を掘削した際のEDZの拡がりや、 破壊様式と透水性の増大の関係を検討することを目的として、立坑周辺岩盤で掘削前後に透水試験、BTV観察を行った。また、立坑掘削時に透水試験孔内の水位の連続モニタリングを行った。さらに、壁面に生じた割れ目の観察に基づき、掘削により生じる割れ目の産状や方向性を検討した。

#### 2. 東立坑の掘削

今回EDZの調査対象としたのは、幌延深地層研究センターの深度350m以深の東立坑である。東立坑の深度350m以深は、機械掘削により施工された。仕上がり内径は6.5mである。当該深度に分布する岩盤は、珪質泥岩であり、主要な物性値を表-1に示す。立坑の主要な支保部材は、設計巻き厚400mmの覆エコンクリート、鋼製支保工である。施工手順としては図-1(a)に示すように4つの段階からなる。初期状態は、図-1(a)に示す通り、底盤から高さ1mまで覆エコンクリートが打設された状態である。その状態から1m掘削した後、鋼製支保工を建込む(図-1(b))。同様にさらに1m掘削を行い、鋼製支保工を建込む(図-1(c))。深度350~380mでは、原位置試験との干渉を防ぐためにロックボルトの施工は原則として行っていないが、立坑壁面岩盤の崩落が比較的大きい

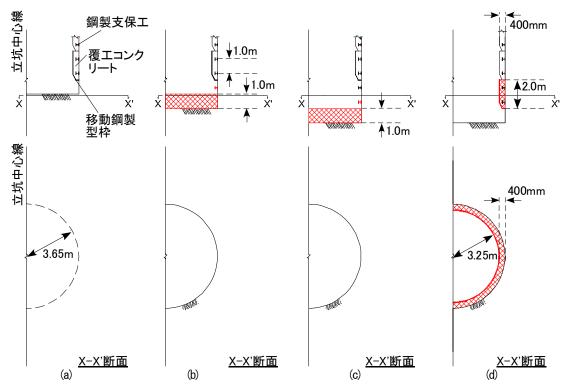


図-1 東立坑の施工手順. (a) 初期状態, (b) 第1掘削段階, (c) 第2掘削段階, (d) 覆エコンクリート打設

箇所では、施工の安全上、鋼製支保工建込み後にロックボルトを施工した。覆工コンクリート打設前に、約2~3時間かけて、底盤から2mの範囲で3Dレーザースキャンによる壁面形状の取得と、立坑壁面の割れ目観察を実施する。その後、底盤から1mを残して、型枠を設置し、設計厚さ400mmの覆工コンクリートを打設する(図-1(d))。これらのサイクルの繰り返しにより、1ステップ長を2mとするショートステップ工法による立坑の掘削が行われた。

### 3. 原位置試験概要

#### (1) 水理特性の検討

東立坑の壁面周辺の水理特性を検討するために、立 坑掘削前後に透水試験を実施した。図-2に透水試験レイ アウトを示す。図に示す通り、東連絡坑道の底盤から、 E-H孔の4本のボーリング孔を掘削した。試験区間は、 立坑壁面周辺のEおよびF孔で10区間、立坑壁面から離 れたGおよびH孔において4区間設定した。透水試験方法 としては、注水パルス試験を採用した。ただし、応答パルスが確認されないような高透水領域に対しては、代替 としてルジオン試験もしくは定流量注水試験を採用した。 立坑掘削中のボーリング孔の水位をモニタリングする ために、E-H孔に、水圧式の水位計(KW-30C)を設置 した。長期間の計測に耐えうるよう、耐食性に優れたステンレス鋼製のものを採用した。

表-1 珪質泥岩の物性値

岩盤物性		値	
一軸圧縮強さ(MPa)	10.92	-	18.98
引張強さ(MPa)	1.16	-	2.39
弹性係数(GPa)	1.37	-	2.36
ポアソン比	0.1	-	0.3
弹性波速度(km/s)	1.99	-	2.17
有効空隙率(%)	40.7	-	42.5
密度(g/cm³)	1.82	-	1.85

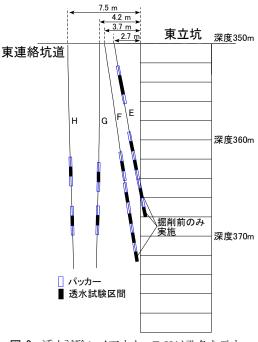


図-2 透水試験レイアウト. E-Hは孔名を示す.

なお、立坑掘削の影響で、E孔の孔底部が東立坑壁面に露出した。そのため、E孔の孔底付近の2区間では、立坑掘削後に透水試験を実施していない。F孔孔底区間についても、ボーリング孔の破壊により埋没したため、透水試験を実施していない。また、E孔の孔底露出に伴い、設置した水位計のケーブルが断線したため、E孔では孔底露出以降の連続的な孔内水位モニタリングが実施できなかった。

#### (2) 掘削により生じる割れ目の特徴の検討

立坑掘削時に壁面の割れ目観察を実施した。観察は、図-1(c)に示す底盤から高さ3m分壁面岩盤が露出した、覆エコンクリート打設前のタイミングで実施した。基本的に長さ50cm以上の割れ目を観察対象として、割れ目の産状、走向・傾斜、面の性状、充填物の有無と性状などを観察し、割れ目のスケッチを作成した。また、産状の分析では、割れ目面にスリッケンラインやスリッケンステップなどのせん断破壊の証拠や、断層岩類を伴うこともあるせん断割れ目と、割れ目面に引張応力下で形成される羽毛状構造が認められる引張割れ目に区別した。

坑道壁面周辺の割れ目の進展を検討するために、東立坑の深度350m以深の掘削前後で、E~H孔のBTV観察を行った. 調査では、BIP-Vシステムと呼ばれる、高解像度のCCDカメラを内蔵したプローブをボーリング孔に挿入し、得られた孔壁展開画像から、ボーリング孔内で検出された割れ目の深度分布や方向性の情報を整理した.

# 4. 原位置試験結果

## (1) 透水試験結果

図-3に、立坑掘削前後の透水係数と立坑壁面からの距 離の関係を示す. グラフ中の網掛け部は、室内試験によ り得られた珪質泥岩の透水係数を示す8. 立坑壁面から 2mの範囲では、掘削後は透水係数が高く、注水パルス 試験による応答パルスが確認されなかったため、ルジオ ン試験もしくは定流量注水試験により透水係数を算出し た. 本図から,壁面から1m以内の範囲で,立坑掘削後 に透水係数が立坑掘削前に比べて約2~3オーダー増大し たことがわかる. また, 壁面から2m以内においても, F 孔の2区間において、立坑掘削後に透水係数が約1オーダ ー増大した.一方, E孔の壁面から約2mの区間は, 既存 割れ目を対象とした試験区間であるため、立坑掘削前の 透水係数がE孔の他区間およびF孔に比べると大きい. また、掘削後の結果との比較では1オーダー以内の変動 であった. 他孔と比べ, このように既存の割れ目の透水 係数が10°m/sオーダーと高いため、立坑掘削後、F孔の 壁面から約2m離れた区間で観察された10<sup>10</sup>m/sオーダー

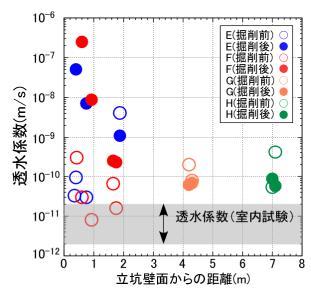


図-3 立坑掘削前後に実施した透水試験結果. 網掛け部は, 室内試験により得られた割れ目の無い岩石の透水係数を示す(Kurikami et al. 2008 より).

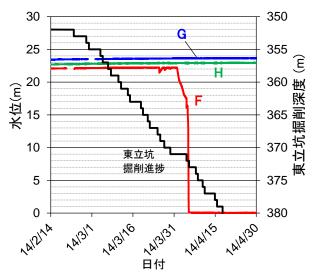


図-4 F~H 孔における孔内水位計測結果

の透水性増大の影響が見られない結果となった。また、 壁面から4m以上離れたGおよびH孔では、掘削に伴う透 水係数の変化は1オーダー未満であった。

#### (2) ボーリング孔内の水位計測結果

図-4に、立坑掘削中のボーリング孔内の水位の経時変化を示す。先述のとおり、掘削中のE孔孔底部の壁面への露出により水位計のケーブルが断線したため、E孔の水位変化は検討から除外した。図-4より、孔底が約深度372mの立坑壁面付近に存在するF孔における計測結果を見ると、孔底よりも1m浅い深度371mまで掘進したときに徐々に孔内水位が低下しはじめ、その後、掘削深度が372mに達した時点で孔内水位が0mまで急激に低下している。また、坑道壁面から4m以上離れたGおよびH孔で

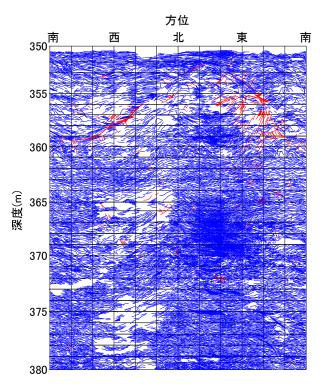


図-5 東立坑の深度 350-380m における壁面の割れ目スケッチ. 青色の直線は引張割れ目, 赤色の直線はせん 断割れ目を示している.

は、孔内水位は一定値を示しており、立坑掘削に伴う変 化は確認されなかった.

### (3) 地質観察結果

立坑壁面の割れ目の観察結果として、深度350~380mの壁面展開図を図-5に示す。図中の青色の直線は引張割れ目を、赤色の直線はせん断割れ目を示している。本図より、壁面全体にわたり、引張割れ目の発達が顕著であることがわかる。また、せん断割れ目に関しては、深度353~360m付近に連続した割れ目が認められ、その周辺においても発達している様子が認められるが、深度360m以深では、顕著な発達は見られない。

図-6に、深度350-380mの東立坑壁面において走向・傾斜の測定を行ったせん断および引張割れ目の方向をステレオネットに下半球投影した図をそれぞれ示す. 本図から、図-6(a)に示すせん断割れ目は、東北東-西南西方向に卓越した走向を有し、高角な分布を示している一方で、図-6(b)に示す引張性の割れ目は立坑先端を取り囲む形で中角な分布を示すという特徴が見られた.

#### (4) BTV観察結果

BTV観察結果の例として、東立坑掘削前後のF孔およびG孔の孔底から1mまでのBTV画像を図-7に示す. 孔底が立坑壁面に近いF孔においては、図-7(a)に示す東立坑

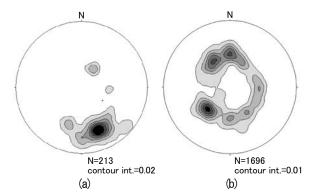


図-6 壁面で観察された割れ目の方向のステレオネット下 半球投影図. (a) せん断割れ目 (コンター間隔 2%), (b) 引張割れ目 (コンター間隔 1%).

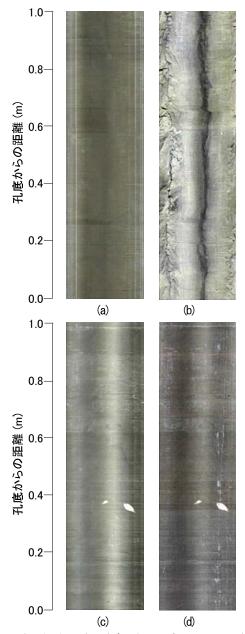


図-7 F 孔および G 孔の孔底から 1m までの BTV 画像. (a)は F 孔の立坑掘削前, (b)は F 孔の立坑掘削後, (c)は G 孔の立坑掘削前, (d)は G 孔の立坑掘削後の 孔壁展開画像を示す.

掘削前には、孔壁に割れ目が認められないが、図-7(b) に示す掘削後は、立坑掘削に伴う坑道壁面周辺の応力集中の影響により、孔壁の破壊が生じている様子が認められる。また、壁面周辺に発達した割れ目が集中している様子も認められる。これらの現象は、立坑壁面から約2mまでの範囲で認められた。孔底が壁面に近いE孔においても立坑壁面から約2mまでの範囲で同様の現象が見られた。

次に、ボーリング孔底が立坑壁面から4m程度離れたG 孔の立坑掘削前の画像を図-7(c)に、立坑掘削後の画像を図-7(d)に示す。本図から、壁面から4m程度離れた領域では、立坑掘削の影響を受けていないことがわかる。

#### 5. EDZの発達と破壊様式について

立坑掘削前後に実施した透水試験により、立坑壁面か ら1mまでは、透水係数が掘削前と比較して2~3オーダー 増大したことから、壁面から1m以内において顕著な割 れ目の発達が推察される. また, 壁面から1~2mまでは 透水係数が1オーダー増大したことから、壁面から1m以 内ほど割れ目の発達は見られないが、割れ目が最大でも 壁面から2mまで発達したと推察される. これは、BTV 調査により、孔内で割れ目の発達およびそれに伴うブレ イクアウト現象が2m程度まで発達していたことにも整 合する結果である. ただし, ボーリング孔配置の都合上, 壁面から2mより先の連続した透水係数や割れ目の情報 が得られないため、力学・水理的な物性変化が生じた領 域は、壁面から少なくとも2mの範囲であると推定され る. 水位計測結果では、坑道壁面近傍のボーリング孔で は、立坑掘削深度が孔底深度に達した時点で急激に水位 低下している. このことから, 立坑掘削に伴う応力再配 分により壁面周辺に生じた割れ目が発達し、立坑壁面か ら岩盤内部へ連結したと推定される.

立坑掘削時の壁面観察では、壁面全体に引張割れ目が顕著に発達していた、幌延深地層研究センターでの過去のボーリング調査%においても、珪質泥岩の岩石コアの観察により、立坑壁面と同様に、せん断割れ目と引張割れ目が観察された。せん断割れ目の卓越走向は東西方向であったのに対し、東立坑の深度350~380mで確認された割れ目も、図-6(a)に示す通り、ほぼ同様の東北東ー西南西方向に卓越していた。このことから、せん断割れ目の多くは、立坑掘削前から存在していた既存の割れ目であると考えられる。一方、引張割れ目に関しては、過去のボーリング調査では、卓越方向が東西方向であり、高角~中角に傾斜しているものがほとんどであったが、東立坑の深度350~380mでは、図-6(b)に示す通り、壁面を取り囲む形で卓越方向がいくつか存在していた。した

がって、立坑壁面に顕著に発達した引張割れ目は、掘削により形成されたものであると判断できる.

以上から、東立坑周辺のEDZの拡がり、破壊様式および透水係数の変化については、立坑壁面から約2mまでの範囲において、引張割れ目が瞬間的に壁面から岩盤内部へ発達したことにより、透水係数が立坑掘削前に比べて1~3オーダー増大したと推定される.

幌延深地層研究センターの周辺のボーリング調査では、初期地圧状態は東西方向と南北方向の比率がそれぞれ1.3.0.9であることが報告されている10. したがって、線形弾性論によると、最もEDZが拡がる方位は南北方向であり、なおかつEDZの拡がりは方位で異なると予想される. 方位別のEDZの拡がりと割れ目の発達・方向性に関しては、今後、立坑壁面の割れ目の方向や密度等の分析を進め、東立坑の他深度や換気立坑で分析した結果も含めて総合的に検討していく必要がある.

## 6. 結言

本研究では、幌延深地層研究センターの東立坑の深度 350m以深を掘削した際のEDZの拡がり、破壊様式と透 水性の増大の関係を検討することを目的として、透水試 験、BTV観察、ボーリング孔内の水位計測、壁面観察を 実施し、立坑周辺の力学・水理的な物性の変化について 論じた、得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 透水試験から、割れ目の発達に伴い、立坑壁面から 2mの範囲で、掘削前に比べて透水係数が1~3オーダー程度増大したことを確認した.これは、BTV観察結果により、壁面から約2mの範囲で割れ目が顕著に発達していたことに整合する結果であった.本試験では、ボーリング配置の都合上、壁面から2mより先の連続した透水係数や割れ目の情報が得られないものの、これらの試験結果から、壁面から少なくとも2mの範囲で力学・水理的な物性変化が生じたと推定される.
- 2) 立坑壁面周辺に掘削されたボーリング孔内の水位は,ボーリング孔底と同深度まで立坑の掘削が進展したときに急激に低下した.このことから,立坑掘削に伴う応力再配分により壁面周辺に生じた割れ目が発達し,立坑壁面から岩盤内部へ連結したと推定される.
- 3) 立坑壁面に分布するせん断・引張割れ目の方位を既存のボーリング調査結果と比較した結果、立坑壁面周辺に顕著に発達した引張割れ目は、立坑掘削により形成されたと判断された。また、それらの引張割れ目は立坑壁面を取り囲む形で中角に分布することがわかった。本論文に記載した調査領域近傍では、光ファイバ式センサによる立坑掘削に伴う割れ目発生時の微小振動

(Acoustic Emission, AE) ,間隙水圧,温度を計測している。これらのセンサを1本のボーリング孔に設置するために開発したマルチ光計測プローブを設置し,立坑掘削中および掘削後長期間にわたる力学・水理的なEDZの調査を実施している<sup>11)</sup>. 今後は,AEおよび間隙水圧計測結果と本研究の成果を統合し,立坑周辺に発生するEDZの概念的なモデルの構築を進めていく。

謝辞:透水試験の実施に当たっては、株式会社ダイヤコンサルタントの若濱洋氏に、BTV観察に際しては、株式会社レアックスの喜多淳滋氏に、立坑壁面の観察に際しては、株式会社地層科学研究所の松原誠氏をはじめとする諸氏にご尽力いただいた。ここに謝意を表する.

#### 参考文献

- Tsang, C., Bernier, F. and Davies, C.: Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays in the context of radioactive waste disposal, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.42, pp.109-125, 2005.
- Sanada, H., Nakamura, T. and Sugita, Y.: Mine-by Experiment in a deep shaft in Neogene sedimentary rocks at Horonobe, Japan, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.56, pp.127-135, 2012.
- 3) 杉原弘造, 吉岡尚也, 松井裕哉, 佐藤稔紀, 山本卓也: 堆積 軟岩での立坑掘削に伴う岩盤物性変化の現場計測による検

- 討, Journal of MMIJ, Vol.116, pp.821-830, 2000.
- Talebi, S., Young, R. P.: Microseismic Monitoring in Highly Stressed Granite: Relation Between Shaft-wall Cracking and In Situ Stress, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.29, pp.25-34, 1992.
- Balland, C., Morel, J., Armand, G. and Pettit, W.: Ultrasonic velocity survey in Calloco-Oxfordian argillaceous rock during shaft excavation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.46, pp.69-79, 2009.
- 6) 吉岡尚也, 杉原弘造, 木梨秀雄, 畑浩二, 丸山誠: 堆積岩地 山での立坑掘削に伴うひずみの原位置計測とその数値解析, 材料, Vol.42, pp.324-328, 1993.
- 7) 津坂仁和, 常盤哲也, 稲垣大介, 羽出山吉裕, 小池真史, 井尻祐二: 幌延深地層研究所におけるショートステップ工 法による立坑掘削に伴う岩盤の力学挙動に関する研究, 土木 学会論文集 FI (トンネル工学), Vol.68, pp.40-54, 2012.
- Kurikami, H., Takeuchi, R. and Yabuuchi, S.: Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, *Phys. Chem. Earth*, Vol.33, pp.537-544, 2008.
- 9) 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, Vol.50, pp.238-247, 2009
- 10) 太田久仁雄ほか: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究打開(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」,JAEA-Research 2007-044, 2007.
- 11) 畑浩二, 丹生屋純夫, 青柳和平, 藤田朝雄: 幌延深地層研究所の立坑掘削時における力学的・水理学的影響評価, 第70回土木学会年次学術講演会概要集, CS12-003, pp.5-6, 2015.

# Investigation of an Excavation Damaged Zone in the East Access Shaft at the Horonobe Underground Research Laboratory

### Kazuhei AOYAGI, Eiichi ISHII, Tomoo FUJITA and Takayuki MOTOSHIMA

The objective of this research is to investigate the extent and failure mechanism of an Excavation Damaged Zone (EDZ) induced around the East Access Shaft in the Horonobe Underground Research Laboratory. As a result of hydraulic tests, hydraulic conductivity within 2 m from the shaft wall was increased by 1 to 3 orders of magnitude. This result is consistent with the extent of the development of fractures detected by borehole televiewer survey. Furthermore, the dominant failure mechanism of the fractures around the shaft wall was almost tensile; also these fractures were caused by the short-term excavation-induced unloading.