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

 ¹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)
²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¹⁾.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²³⁾、AE 計測⁴⁾、弾性波探査⁵⁾、岩盤内のひずみ計測結果と数値解 析結果の比較⁶⁷⁰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.

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



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.

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
弾性係数(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/cm ³)	1.82	-	1.85

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.



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[®]. 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10⁹m/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10¹⁰m/sオーダー



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).





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⁹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-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.

- 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^{III)}.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 Fl(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.
- 加浩二,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.