

幌延深地層研究センターの立坑掘削損傷領域の 水理・力学的挙動に関する研究

青柳 和平^{1*}・櫻井 彰孝¹・棚井 憲治¹

¹国立研究開発法人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)

*E-mail: aoyagi.kazuhei@jaea.go.jp

本研究では、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以深の立坑掘削を対象として、掘削時に発達する掘削損傷領域の水理・力学特性について、原位置透水試験、AE測定と水理・力学連成解析の実施結果に基づいて論じた。原位置試験の結果、立坑壁面から約1.5mの範囲でAE震源が分布しており、それを内包する領域における透水係数は、割れ目の発達していない領域に比べて2~3オーダー高かった。一方、解析では、壁面から最大1.5m程度まで破壊が生じる結果となり、原位置試験により推定される幅に概ね整合する結果を得た。また、立坑掘進時に計測された壁面周辺における間隙水圧値の増大は、掘削による応力集中の影響によるものと推定された。

Key Words : shaft sinking, excavation damaged zone, hydro-mechanical coupling analysis,

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により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。

立坑掘削時のEDZの調査研究事例としては、これまでに各国の地下研究施設において、透水試験^{2,3)}、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^{6,7)}、地質観察による割れ目の統計処理⁸⁾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、EDZの評価が多く行われている水平坑道での調査と違って、立坑の場合、掘削方向が鉛直下向きであるため、原位置試験・計測の実施にあたっては、水平坑道から下向きのボーリング孔を掘削して計器を設置することが多い。また、立坑では試錐機の設置場所に制約が生じ、水平坑道と比較すると二次元的なEDZの広がりを取得するためのレイアウト設定が

難しいため、EDZの水理・力学特性の空間分布について検討した事例が少ないのが現状である。そこで、本研究では、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以深の東立坑掘削時に発達するEDZの概念図化、および水理・力学特性の検討を目的として、水理・力学連成解析、掘削前後に実施した透水試験、掘削中連続計測したAE震源の分布を統合した解釈を行った。

2. 原位置試験の概要

本研究の対象である、幌延深地層研究センターの地下施設のレイアウトの三次元図面を図-1に示す。現時点で、350m調査坑道の掘削が完了し、東立坑および換気立坑は深度380mまで、西立坑は365mまで掘削が完了している。今回EDZの調査対象としたのは、図-1の赤枠で示す、東立坑の深度350~380mである。東立坑の深度350m以深は、機械掘削方式により施工された。立坑の主要な支保部材は、設計巻き厚400mmの覆工コンクリート、鋼製支保工である。施工方法としては、ショートステップ工法を採用した。底盤から高さ1mまで覆工コンクリートが構築された状態を初期状態とすると、まず、初期状態から1m掘進し、鋼製支保工を建て込む。その後さらに1m掘進し、支保工建込み後、2mの打設長で覆工コンクリ

ートを構築する。この工程を繰り返すことにより立坑を掘進した⁷⁾。

東立坑の深度350～380mの掘削時の立坑周辺岩盤のEDZの水理・力学特性を検討するために、**図-2**に示すレイアウトで原位置試験を実施した。**図-2**に記載のボーリング孔S1～S3の深度368.5m、370m、372mに光ファイバ式のAEセンサを設置した⁹⁾。また、深度370mおよび372mに設置したセンサーの間にパッカーを設け、54cmの区間を区切り、光式間隙水圧センサおよび光式温度センサを設置した⁹⁾。

AE計測領域周辺のボーリング孔E～Hにおいて、**図-2(b)**に黒色で示す区間で透水試験を実施した⁷⁾。透水試験方法としては、立坑掘削前は岩盤の低透水性が予想されるため、パルス試験を基本とした。立坑掘削後は、低透水性が予想される壁面から十分離れたGおよびH孔ではパルス試験を、掘削後透水性の増大が予想される壁面近傍の区間（E孔およびF孔）では低圧ルジオン試験もしくは定流量注水試験を実施した。なお、本論文では、透水試験を実施した結果のうち、**図-2(b)**に示すAEおよび間隙水圧測定領域付近の結果のみを示すこととした。

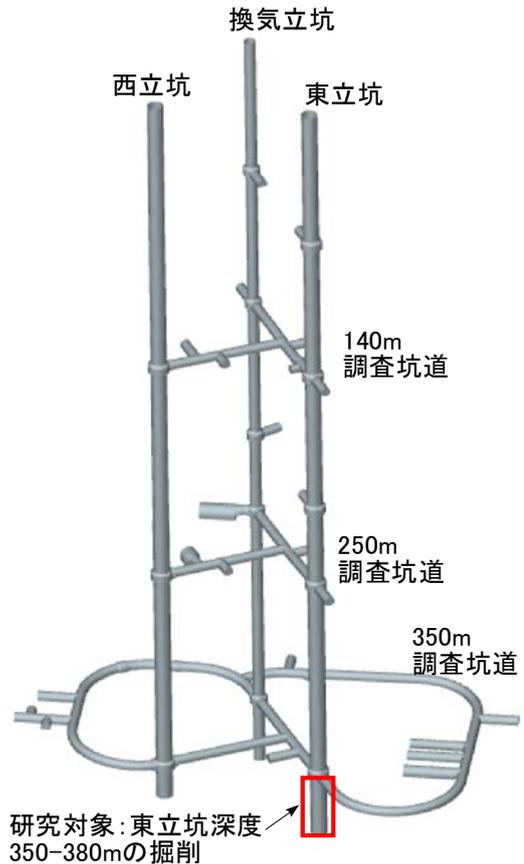


図-1 幌延深地層研究センター地下施設レイアウトと本研究における調査対象

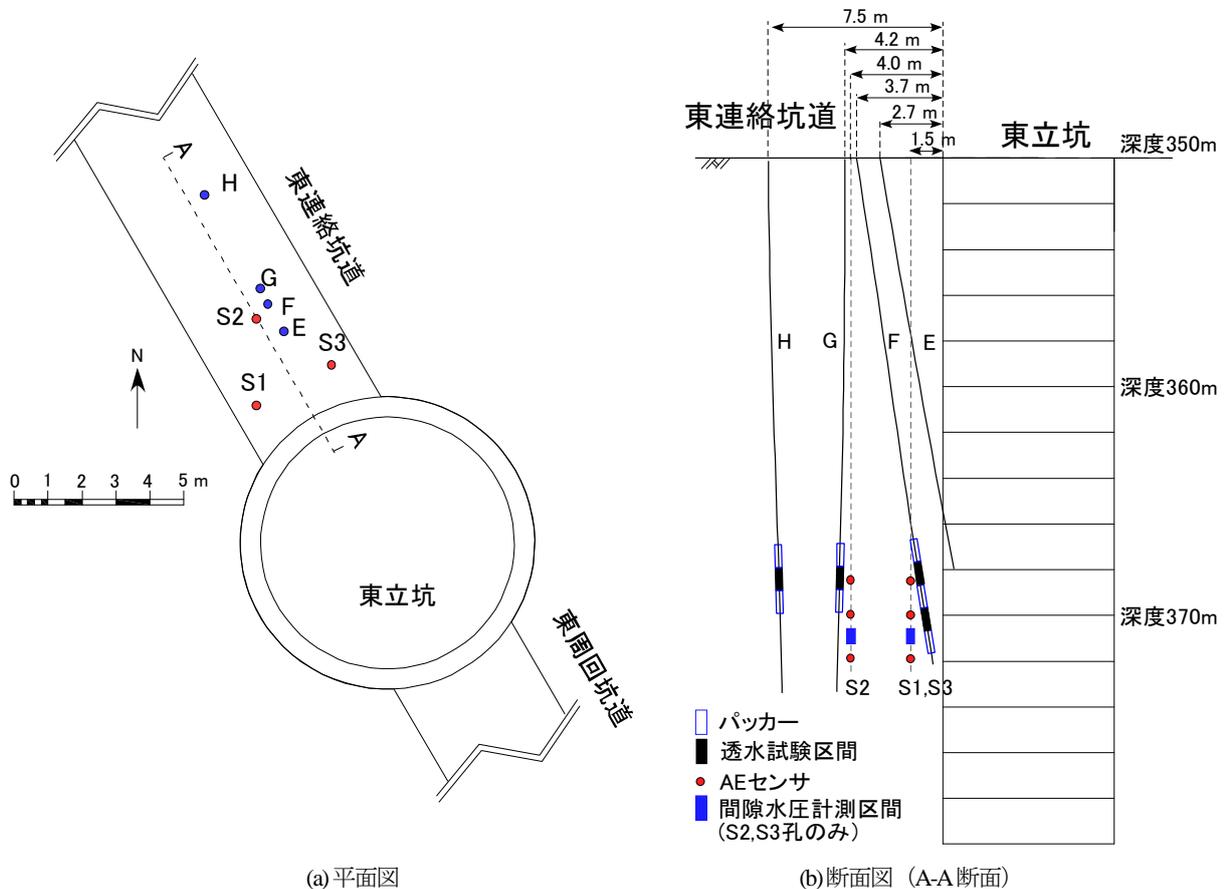


図-2 原位置試験レイアウト

3. 数値解析の概要

東立坑の深度350～380mの掘削を模擬した数値解析を実施した。解析には、商用コードFLAC3D ver 4.00.89を使用した¹⁰⁾。なお、本論文では、浸透流解析と力学解析を連成させることにより^{10,11)}、掘削時および掘削後の有効応力分布を基にEDZの範囲を評価した。

解析に当たり、図-3に示すような1/2断面の数値解析モデルを構築した。モデルはすべて六面体要素で構成されている。立坑周辺の応力状態を詳細に把握するために、立坑壁面周辺は10cm角でモデリングした。解析に使用した物性値は表-1¹²⁾に示すとおりである。境界条件として、モデル端部はローラー固定とした。また、端部の間隙水圧も固定条件とした。初期応力条件としては、地下施設掘削前のボーリング調査で実施した水圧破碎試験結果から推定した応力状態を採用した¹³⁾。なお、同調査では、密度検層で得られる岩盤の密度（表-1中の1840kg/m³）に深度を掛け合わせたものを鉛直応力と仮定しているため、本解析では、下記の式により鉛直応力の深度依存性を考慮した（単位はMPa）。

$$S_v = 5.63 + 0.0184 \times (z - 350) \quad (1)$$

また、ボーリング調査で実施された水圧破碎試験結果に基づき、鉛直応力を1.3倍したものが最大水平応力であり、方向は東西方向、鉛直応力を0.9倍したものが最小水平応力であり、方向は南北方向であると仮定し、地下施設の設計が行われた。本研究の解析では、式(1)の鉛直応力にそれらの係数を掛け合わせたものを東西および南北方向からモデルに载荷し、初期応力状態とした。間隙水圧は、S2およびS3孔で実施している間隙水圧の計測結果のうち、掘削前に計測された値を基に、深度350m地点において1.0MPaを初期値とした。なお、間隙水圧も水の密度に深度を掛け合わせることに伴う深度依存性を考慮している。

掘削手順としては、第2章に示す掘削サイクルに順じ、初期段階の状態から岩盤を2m掘削後（深度350mからの掘削時点では3m掘削後）、支保工を2m建て込むというショートステップ工法を再現した。なお、解析の単純化のため、鋼製支保工はモデリングしていない。立坑掘削時は、掘削した側壁面および切羽面は非排水条件とした。また、立坑掘削時の掘削日報を基に、立坑掘削後、支保工建込みまでの時間帯、および支保工建込み完了後から次のステップの掘削開始までの時間帯を算出した。なお、これらの時間帯は立坑側壁面および切羽先端を排水条件に設定し、間隙水圧の経時変化を再現した。深度380mまでの掘削完了後は、ある程度の時間が経過した後の間隙水圧分布を把握するために、約13日間側壁面および切

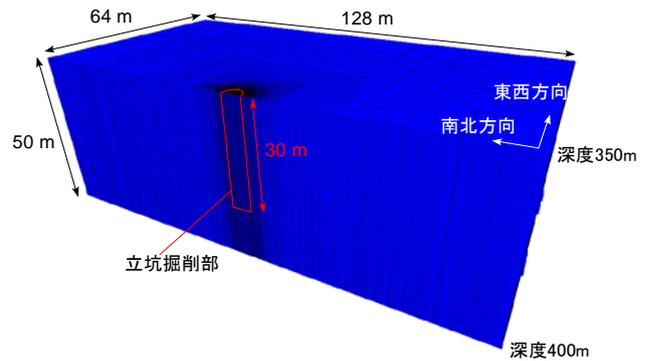


図-3 解析に用いたモデル

表-1 解析物性値¹²⁾

	岩盤	覆工コンクリート
弾性係数 (GPa)	2.62	20
ポアソン比	0.2	0.2
粘着力 (MPa)	2.37	-
内部摩擦角 (°)	17.5	-
ダイレイション角 (°)	3.0	-
引張強さ (MPa)	1.83	-
間隙率	0.4	-
密度 (kg/m ³)	1840	3150
Biot係数, <i>a</i>	0.92	-
Skempton係数, <i>B</i>	0.83	-
透水係数 (m/s)	1.0 × 10 ⁻¹¹	-

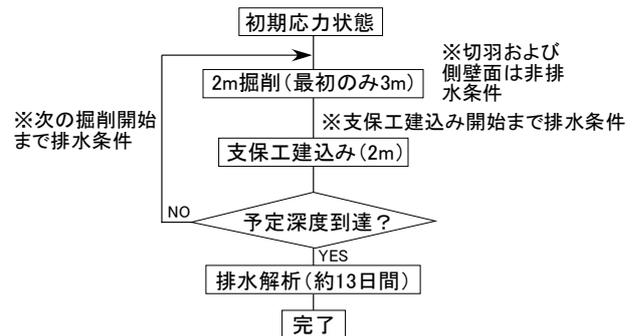


図-4 解析のフロー

羽面からの排水を再現した。図-4に解析のフローを示す。

破壊規準は、一軸および三軸圧縮試験で、供試体中にwing-crackが生じ始める応力状態（Crack initiation stress, CI）を基にMohr円を描画し、CIに相当するMohr-Coulombの破壊規準として設定した¹⁴⁾。このときの粘着力と内部摩擦角は、表-1に記載のとおりである。

実際のEDZでは、透水係数の増大が確認されているが、本解析では、解析の単純化のため、破壊後要素の透水係数は不変としている。また、破壊後要素は、非関連流れ則⁹⁾に基づく塑性変形挙動を示すこととした。

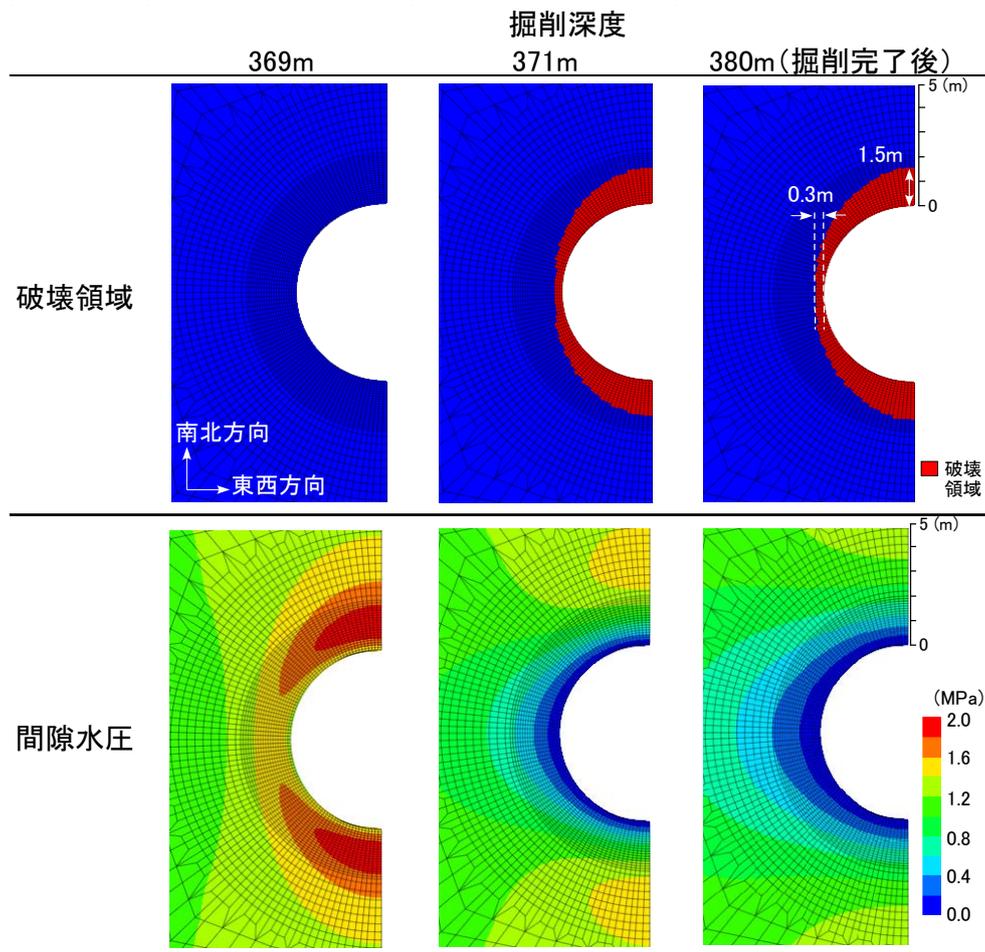


図-5 立坑掘削進展に伴う破壊領域と間隙水圧変化（深度370mにおける断面）

4. 数値解析結果

数値解析結果として、本報では、立坑掘削に伴う破壊領域と間隙水圧変化について示す。なお、原位置試験で対象とした深度370mを着目断面として結果を示すこととした。切羽進捗に伴う破壊領域と間隙水圧の分布について、着目断面における変化を図-5に示す。立坑周辺の変化についてわかりやすく示すため、立坑壁面から約5mの範囲を拡大して示した。立坑が369mまで掘削された時点では、着目断面において破壊領域は発生していないが、立坑周辺において間隙水圧の増大が発生している。また、着目断面を切羽が通過する時点、すなわち深度371mに達した時点では、急激に破壊領域が進展した。このとき、側壁面と切羽面において排水条件を課しているため、壁面周辺の水圧は深度369m到達時点と比較して低下している。その後、切羽が深度380mに到達し、立坑掘削が完了した時点では、着目断面付近の破壊領域は深度371m到達時点と比較してそれほど変化はなかった。このことから、切羽が着目断面を通過した時点で応力集中が顕著となるため、破壊が急激に進行したことがわかる。なお、掘削完了後の破壊領域は、東西方向で

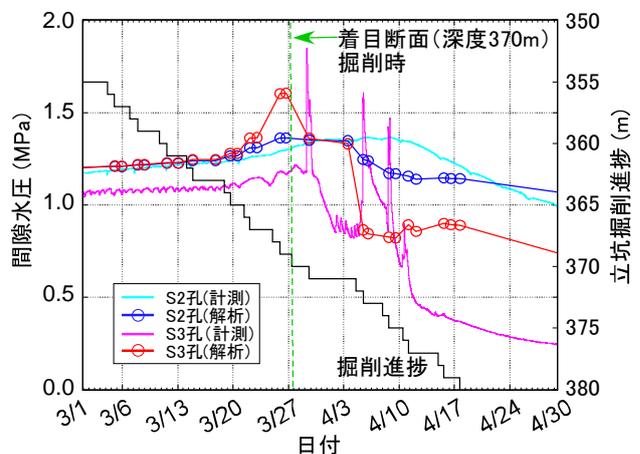


図-6 立坑掘削進捗に伴う間隙水圧変化の計測値と解析値の比較

0.3m, 南北方向で1.5mであった。また、壁面からの排水に伴う立坑周辺の間隙水圧の低下も確認できる。

次に、間隙水圧の経時変化について、S2およびS3孔における立坑掘削中の計測値と、解析で得られる間隙水圧センサ設置地点付近に相当する節点における値を比較したものを図-6に示す。光ファイバ式間隙水圧計による計測結果からは、壁面に近いS3孔では切羽がセンサ設置深

度を通過し、さらに掘進していく過程で急激な間隙水圧増大を複数回繰り返す。掘削完了後は0.24MPa程度まで低下した。数値解析では急激な間隙水圧増大は切羽が369m付近に到達したときに最大1.6MPa程度まで増大し、その後切羽が371mを通過した後は急激に低下し、最終的に約0.73MPaまで低下した。切羽が着目断面付近に到達したときの間隙水圧の増大に関しては、壁面付近の急激な応力集中が原因であることがわかる。また、岩盤材料の局所的な不均質性が影響することを勘案すると、水圧変動の推移挙動はおおむね再現できていると考えられる。一方、壁面から約4m離れたS2孔においては、解析により得られた間隙水圧の経時変化は、計測結果に概ね整合した。壁面から4m離れた領域においても、掘削による応力集中の影響が少なからず生じており、その結果、掘削中の間隙水圧の微増が確認されたものと思われる。

5. 考察

立坑掘削期間中の原位置AE測定、立坑掘削前後に行った透水試験結果、および解析により得られる破壊領域を図-7にまとめて示す。図中の立坑壁面周辺の赤色のプロットは、立坑掘削中に得られたAE波形の震源分布を示す。AE震源は、立坑壁面から約1.5m程度の範囲に分布していることがわかる。また、図-7の左側には、AE

計測実施位置付近で実施した透水試験結果を示す。壁面近傍の結果は、図-2(b)に示すように斜め下向きボーリングによる透水試験の実施であるため、壁面からの区間で透水試験結果を示している。グラフより、掘削後は壁面から約1.2mの範囲で透水係数が $8.8 \times 10^{-9} \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ となっており、掘削前の透水係数 ($8.1 \times 10^{-12} \sim 7.9 \times 10^{-11} \text{ m/s}$) と比較して、2-4オーダー程度増大することを確認した。次に、解析により評価された破壊領域をこれらの試験結果に重ね合わせたところ、AE震源分布および透水係数が増大した領域に概ね整合する結果となった。以上の結果を統合し、立坑掘削時に形成されるEDZの水理・力学特性を示す概念モデルを図-7のように構築した。

初期地圧が異方性を有していることから、図-5や図-7に示すようにEDZの発達形状も異方性を有していることが想定されるが、坑道レイアウトと岩盤初期地圧を考慮し、面内最小主応力方向に着目した計測計画とした。面内最大主応力方向の情報は得られていないが、損傷領域評価に関しては概念モデルを構築するに不可欠な情報が得られた。本研究に記載した試験以外にも、立坑の深度370m付近において、東西、南北、北西-南東、北東-南西の4方向にボーリング孔を掘削し、コアの観察と地中変位計測を実施している。今後はその結果を分析し、EDZの異方性について検討を進め、図-7に示すEDZの概念モデルを更新していく予定にしている。

また、解析についても、今回は簡単な解析の実施によ

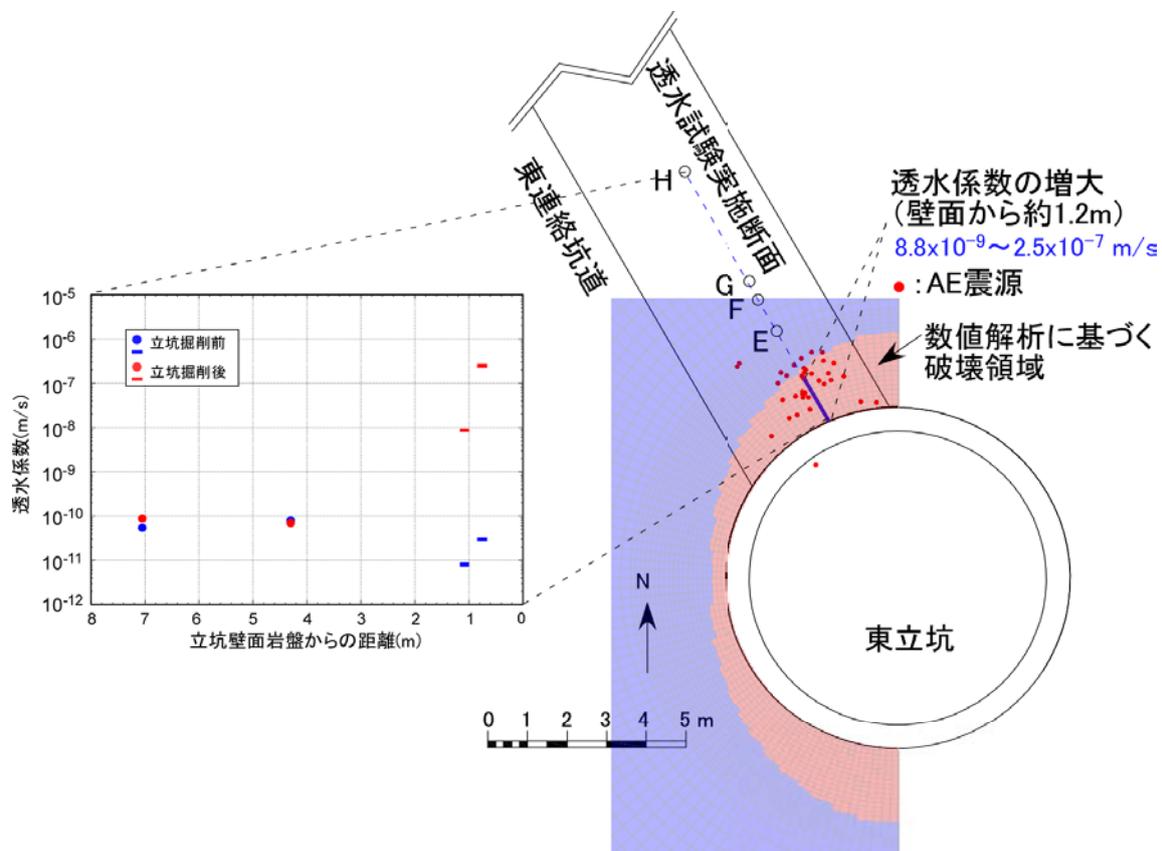


図-7 AE計測、透水試験、数値解析の結果に基づく東立坑掘削時に形成されるEDZの概念モデル

るEDZの水理・力学挙動の解明が目的であったため、EDZ形成時の透水係数変化を考慮していない。しかしながら実際は図-7のグラフに示したとおり、EDZにおいて透水係数の増大が確認されている。そのため、今後はEDZ内外の透水係数の変化を再現した解析を実施することにより、詳細なEDZの水理・力学挙動の理解につなげていきたいと考えている。

6. 結言

本研究では、幌延深地層研究センターの深度350m以深を対象とした透水試験、AE測定結果、および掘削を再現した水理・力学連成解析の実施により、立坑掘削による損傷領域、および透水係数の増大領域の空間分布の概念化を図った。立坑掘削時に切羽が着目断面を通過する際に最も応力集中が大きいため、坑道周辺岩盤の間隙水圧の増大や顕著な損傷の進展が生じることを、水理・力学連成解析により理論的に示すとともに、原位置試験結果との整合性の確認により妥当性を検証した。さらに、原位置試験と数値解析結果を基に、立坑周辺のEDZの概念モデルを構築した。今後は、解析により得られたEDZの異方性に関する原位置のデータに基づく検討や、EDZの透水係数を変化させる条件での解析の実施により、掘削中の間隙水圧挙動についてより詳細な把握を行う予定にしている。

謝辞：本原稿に掲載した透水試験の計画立案や監督にあたっては、大成・大林・三井住友建設特定建設工事共同企業体の本島貴之氏にご助力いただいた。ここに謝意を表するものである。

参考文献

1) 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.

- 2) 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.
- 4) 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.
- 5) 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) 青柳和平, 石井英一, 藤田朝雄, 本島貴之: 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, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.313-318, 2016.
- 8) Tokiwa, T., Tsuska, K., Aoyagi, K.: Fracture characterization and rock mass damage induced by different excavation methods in the Horonobe URL of Japan, *Int. J. Civ. Eng.*, Vol.16, pp.371-381, 2018.
- 9) 畑浩二, 丹生屋純夫, 青柳和平, 藤田朝雄: マルチ光計測プローブを用いた幌延深地層研究センターの立坑掘削損傷評価, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.319-324, 2016.
- 10) Itasca Consulting Group Inc.: FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions User's Guide, Itasca Consulting Group Inc., USA, 2009.
- 11) Wang, H. F.: Theory of Linear Poroelectricity, Princeton University Press, US, 1997.
- 12) Aoyagi, K., Ishii, E.: A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, *Rock Mech Rock Eng*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1577-z>.
- 13) 近藤桂二, 津坂仁和, 稲垣大介, 杉田裕, 加藤春實, 丹生屋純夫: 幌延深地層研究所における珪藻質泥岩を対象とした水圧破砕法による初期地圧の測定, 第13回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.583-588, 2013.
- 14) 青柳和平, 石井英一, 石田毅: 幌延深地層研究センターの350m 調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討, *Journal of MMIJ*, Vol. 133, pp.25-33, 2017.

A Study on the hydro-mechanical behavior in the excavation damaged zone in shaft sinking at the Horonobe Underground Research Laboratory

Kazuhei AOYAGI, Akitaka SAKURAI and Kenji TANAI

This research presents the hydro-mechanical behavior of EDZ in shaft sinking in the Horonobe underground Research Laboratory on the basis of the results of in situ hydraulic tests, acoustic emission (AE) measurements, and hydro-mechanical coupling numerical analysis. The AE sources were distributed within 1.5 m into the shaft wall; and hydraulic conductivity in the EDZ is 2 to 4 orders of magnitudes higher than that in no fractured area. On the other hand, on the basis of the result of numerical analysis, the maximum extent of the EDZ is 1.5 m into the gallery wall. This result is almost consistent with the trend of acoustic emission measurement and hydraulic test.