

掘削損傷領域の評価への DAS 利用に関する研究

畑 浩二¹・丹生屋 純夫²・松井 裕哉³・宮良 信勝⁴

¹正会員 大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail: hata.koji.ro@obayashi.co.jp

²正会員 大林組 原子力本部 原子力環境技術部
(〒108-8502 東京都港区港南2-14-2 品川インターシティB棟)

E-mail: niunoya.sumio@obayashi.co.jp

³正会員 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: matsui.hiroya@jaea.go.jp

⁴正会員 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 (同上)

E-mail: miyara.nobukatsu@jaea.go.jp

北海道幌延町に位置する幌延深地層研究センターの東立坑深度 370m において、掘削損傷領域 (EDZ) の評価のための長期モニタリングを継続している。ここでは、光式 AE センサ (O-AE)、光式間隙水圧センサおよび光式温度センサを用いている。O-AE は、高感度であるとともに卓越周波数が高いため監視領域を広く取れない。そこで、OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) 技術を利用した DAS を活用し、監視領域を広げる可能性に関して現場実験的に調べた。その結果、当該堆積岩盤における AE 検知可能領域は O-AE の場合 5m 程度であるが、DAS (Distributed Acoustic Sensor) の場合 35m 程度に拡張でき、ハンマー打撃による疑似 AE 源を適切に受振できる事が判明した。

Key Words : excavation damaged zone, optical sensor, acoustic emission, DAS, long term monitoring

1. はじめに

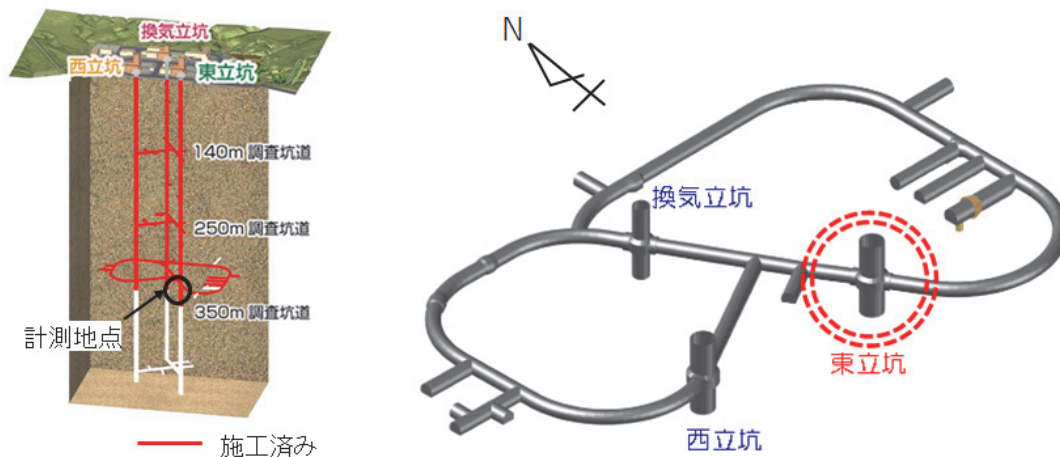
トンネルや地下空洞を掘削すると、空洞周辺には掘削によって損傷領域 (Excavation Damaged Zone, 以下 EDZ) が生じる¹⁾。この損傷により、坑道周辺岩盤中には、微小割れ目の発生や進展、さらには空洞深部方向に影響が伝播する可能性がある。高レベル放射性廃棄物 (High-level Radioactive Waste, 以下 HLW) の地層処分では、廃棄体埋設後の放射性物質移行経路を評価をする上で、掘削に伴う EDZ における透水性変化の程度や範囲を把握することが極めて重要である²⁾。また、山岳トンネルでは、EDZ の広がりや評価することで、最適なロックボルト長さやゆるみ荷重を選定することが可能になる。

EDZ 評価において、アコースティック・エミッション技術 (Acoustic emission, 以下 AE) が有効であることが国内外の研究で示されてきた^{例えば 3)-10)}。ただし、研究対象は結晶質岩のような硬岩系岩盤が主流であり、堆積軟岩を対象にした研究事例はほとんど見られない。その要因の一つに、AE や弾性波動の伝播における距離減衰問題が関わっている。もう一つの要因は、計測レイアウトで

ある。水平坑道での EDZ の評価は数多く行われてきたが、立坑に関してはほとんど見当たらない。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・計測では水平坑道から下向きのボーリング孔を用いて計器を設置する必要がある。そのため、試錐機設置場所の制約や、計器設置にかかる費用が膨大になることが挙げられる。

著者らは、堆積軟岩かつ立坑での EDZ 評価に取り組んでいる。対象は、日本原子力研究開発機構 (以下、JAEA) が HLW に関する研究開発を推進している幌延深地層研究センター¹¹⁾の地下施設である。研究目的は、立坑周辺に生じる EDZ の水理・力学的な挙動の可視化モデルを構築し、地層処分事業における施設設計の妥当性や処分坑道掘削等の対策工の効率的な立案に資するものである。EDZ 評価には、近年著しく進歩した光式センサである光式 AE センサ (Optical AE sensor, 以下 O-AE)、光式間隙水圧センサおよび光式温度センサを用いた。

本報告は、従来利用してきた O-AE の検知領域を拡張する施策として、計測のために配線した光ケーブル自体を微小振動計測用のセンサとして利用する技術を試行的に実施した結果である。



※このイメージ図は、今後の調査研究の結果次第で変わることがあります。

(a) 施設概要

(b) 調査坑道と調査位置

図-1 幌延深地層研究センター地下施設概要と深度 350m 調査坑道の状況¹¹⁾

2. 計測地点の概要と光計測による総括的成果

幌延深地層研究センターにおける地下施設の 3 次元レイアウトを図-1 に示す。現時点で、350m 調査坑道と、東立坑および換気立坑は深度 380m まで、西立坑は 365m まで施設整備が完了している。光計測による EDZ 評価は、現在も東立坑の深度 350~380m で実施継続中である。当該地点は、珪質泥岩主体の地質であり、一軸圧縮強さは 15.40MPa、引張り強さは 1.83MPa、Vp は 2.08km/s 程度¹²⁾である。また、地上からのボーリング調査¹³⁾、岩石試験¹⁴⁾および原位置試験¹⁵⁾から、既存の天然割れ目は比較的少なく、最大主応力は約 7.3MPa、最小主応力は約 5.1MPa で、最大主応力方向は東西方向であった。健岩部の透水係数は、 10^{-10} ~ 10^{-11} m/s 程度であった。350m 坑道全域での湧水量は、坑道掘削が完了した維持管理段階において約 70m³/日であった。さらに、可燃性ガスが地下水に溶存しており、掘削や削孔では脱ガスによってそれらが噴出する条件であった。

上記地点において、2014年から光計測を継続している。立坑掘削時~掘削直後の光計測結果に加え、立坑掘削前後に行われた透水試験結果、3次元弾塑性FEM解析による破壊領域をまとめたものが、図-2 に示す総括的 EDZ 概念モデルである。紙面の都合もあり、各光式センサを原位置に設置する工夫、計測結果や評価の詳細は参考文献 16)に譲る。図中 O-AE による AE 震源位置は、数値解析による破壊領域や掘削後に高透水場へ変化(透水係数が大きく変化)した領域と良い一致を示している。ただし、当該堆積岩の弾性波減衰特性により、O-AE の監視領域は局所的である。これは O-AE が高感度・高周波数領域を対象に開発¹⁷⁾し、実用化¹⁸⁾されたセンサ特性のためである。

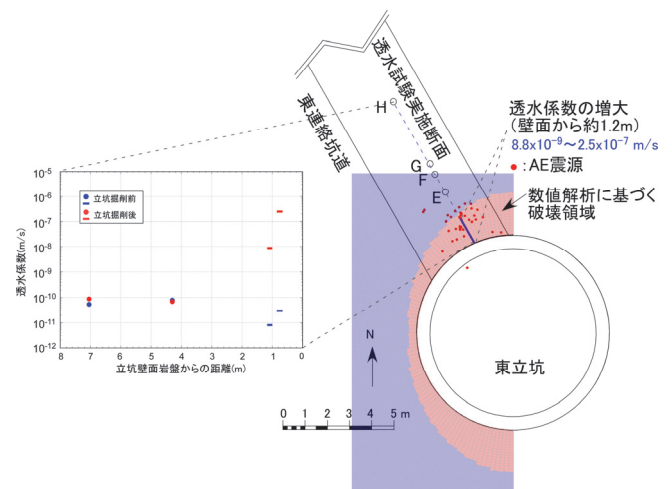


図-2 水理・力学的な EDZ 概念モデル¹⁶⁾

3. DAS の原理

O-AE は、比較的狭い領域を高感度に現象把握することには向いているが、広域の現象把握を計画する場合多数のセンサを配置する必要がある。計測線の取回しや費用を勘案すると、計測対象物が長大・広範囲に及ぶ場合に全領域で同等精度の計測を行うことは現実的でない。そこで、近年注目を集めている分布/分散型光ファイバー計測である DAS (Distributed Acoustic Sensor)^{19),20)}が有効と考えられる。

DASは、光ファイバ上に作用する振動を分布的に検出する技術である。これは、OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) と称する光ファイバの断線箇所を検出する技術の応用であり、振動分布検知にはC-OTDR (Coherent-OTDR) が利用されている。C-OTDRには光ファイバの振動によるレーリー散乱光の振幅変動(強度)

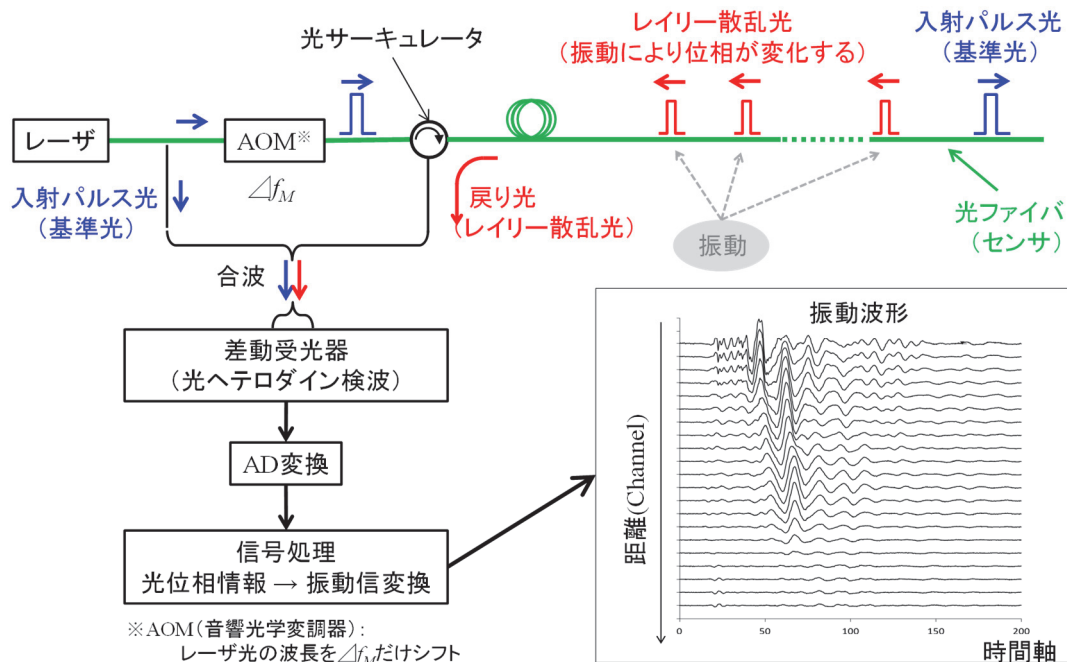


図-3 DAS技術の基本的な計測システム

を検知する方式とレイリー散乱光の位相変動を検知する方式があるが、DASは後者の位相変動検出方式を採用している。図-3にDASの計測原理を示す。発振されたレーザー(基準光)は2経路に分岐され、一方はAOM(音響光学変調器)で Δf_M だけ周波数変調し計測全線に発振する。何らかの振動が検知されるとレイリー散乱光が後方伝播する。この後方散乱光とレーザー基準光を合波し、ヘテロダイン検波²⁾から図中の振動波形を得ることができる。

4. 実験方法

図-4に示すように、現行のO-AEは3本のボーリングS1孔、S2孔およびS3孔内にそれぞれ3体設置している。3孔の空間的位置関係を図-5に示す。各孔最下層のO-AEに繋がっている計測ラインを一旦現行計測システムから取り外し、図-4赤線で示すように一筆書様に接続し直してDASシステムに接続する。したがって、DASシステムから発振されたレーザーは、S2孔→S3孔→S1孔と経由し伝播する。つまり、O-AEを包含する形でDAS計測が構成されることになる。なお、この実験期間中は現行のO-AE計測は9chから6chに減数した計測となるが、DAS計測と併用することにした。DASの計測仕様から、本実験のサンプル時間分解能を1kHzに設定し、空間距離分解能は0.4mとした。

両計測システムにおいて、ハンマー打撃により疑似AE振動を発生させ、同時計測した。ハンマー打撃位置は図-5に示すように350m水平坑道底盤はS孔の幾何学

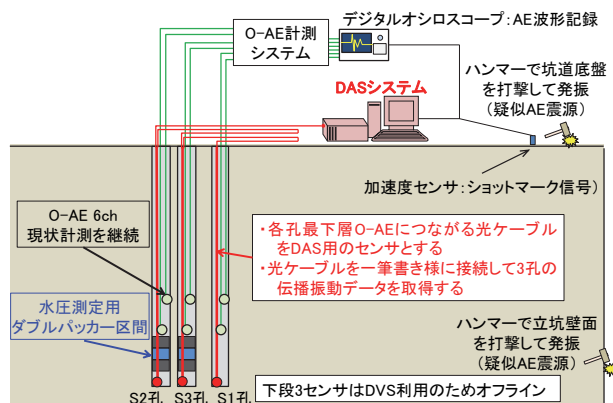


図-4 DAS計測とO-AE計測の関係

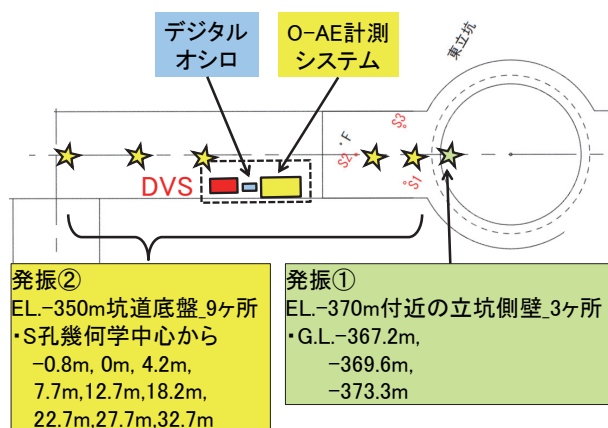
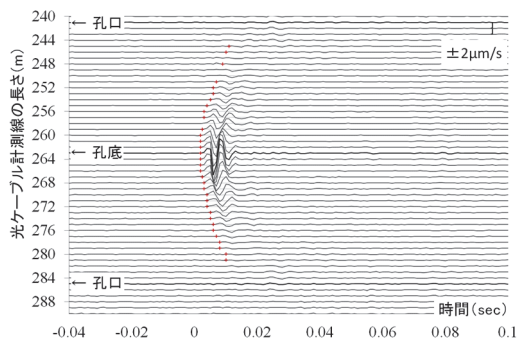
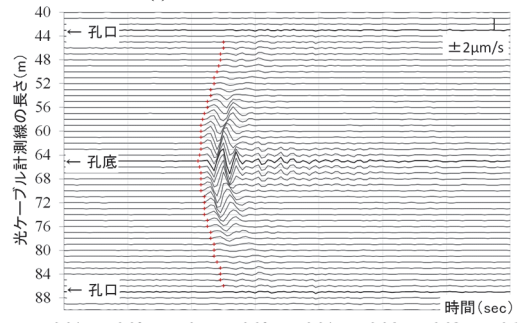


図-5 ハンマー打撃位置

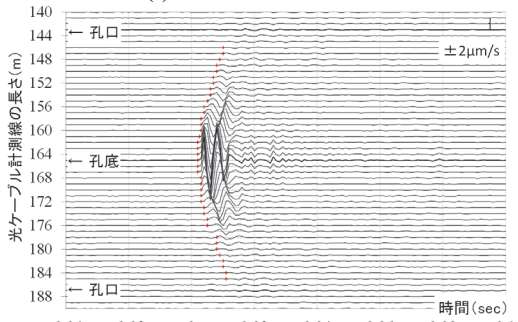
中心から-0.8m, 0m, 4.2m, 7.7m, 12.7m, 18.2m, 22.7m, 27.7m, 32.7mの9ヶ所、立坑壁面はG.L.-367.2m, -369.6m, -373.3mの3ヶ所である。



(a) S1 孔での測定結果

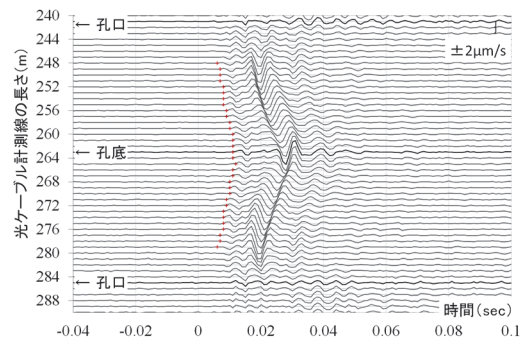


(b) S2 孔での測定結果

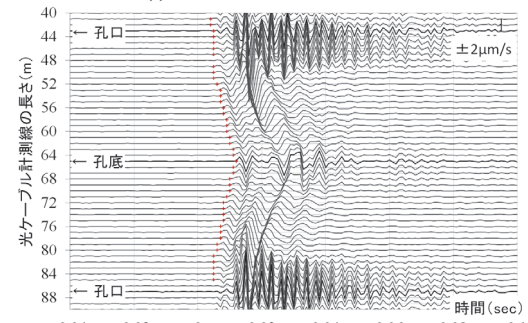


(c) S3 孔での測定結果

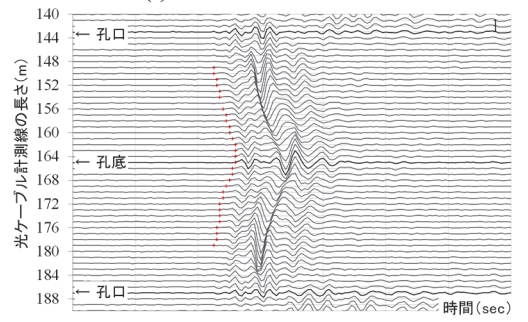
図-6 立坑側面GL-373.3mでのハンマー打撃による測定結果



(a) S1 孔での測定結果



(b) S2 孔での測定結果



(c) S3 孔での測定結果

図-7 水平坑道底盤 12.7mでのハンマー打撃による測定結果

5. 実験結果と考察

一度のハンマー打撃で、S1 孔～S3 孔の区間における弾性波波動を取得できる。図-6に立坑側面GL-373.3mをハンマー打撃した場合に得られた弾性波波動を、図-7に水平坑道底盤 12.7mをハンマー打撃した場合に得られた弾性波波動をそれぞれ示した。計測全線において、欠損なく波動が得られた。その形状から、岩盤を伝播する振動形状が確認できるとともに、周波数は異なるものの、突発的に発生する微小振動（AE 信号波）を検知できていることが確認できた。全振動波形を確認し、疑似 AE の検知可否を表-1に示した。その結果、DASは全測点での打撃振動を検知できた。一方、O-AE は立坑壁面の 2ヶ所でのハンマー打撃検知に留まった。図-6、図-7 中赤点で示す初動から計測地点の弾性波速度を計算し、深度分布として図-8に示した。計測線の往路と復路で若干のバラツキはあるものの、当該地盤の V_p は 2.0～2.4km/s 程

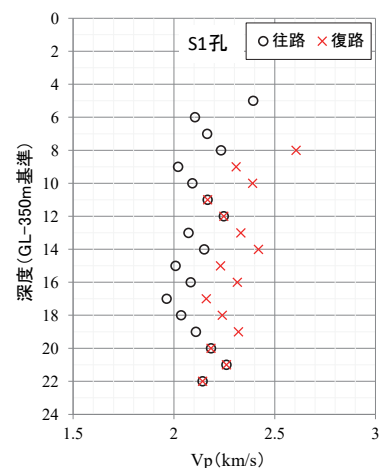


図-8 ハンマー打撃 12.7mにおける V_p 算定結果

度と評価した。近接である図-2に示した F 孔で実施した原位置弾性波試験結果²⁾では 2.26km/s であり、良い一致を得た。

表-1 DAS と O-AE の検知能力比較

ハンマー打撃位置		DASでのAE 信号波検知 可否	O-AE での AE 信号波検 知可否
	GL-373.3 m	○	×
	GL-369.6 m	○	○
	GL-367.2 m	○	○
	GL-350 m 水平距離-0.8 m	○	×
	水平距離 0 m	○	×
	水平距離 4.2 m	○	×
	水平距離 7.7 m	○	×
	水平距離 12.7 m	○	×
	水平距離 18.2 m	○	×
	水平距離 22.7 m	○	×
	水平距離 27.7 m	○	×
	水平距離 32.7 m	○	×

今回、AE 疑似信号としてハンマー打撃による振動を利用した。掘削時における計測^{19,22)}から、O-AE では最大振幅 1500mV 以上の AE 信号波から 3 次元位置標定が可能であった。今回の同時計測において検知した振動レベルを比較した一例を図-9 に示す。この例では、800mV 程度の O-AE 信号レベルを DAS でも検知できていることから、岩盤 EDZ の計測に DAS も利用可能であると考えられる。

6. おわりに

本事案では、O-AE 計測の適用性拡大を目指し、DAS による AE 信号波計測の可否を検討した。既存の O-AE 計測線を DAS とみなし、立坑底盤と壁面でハンマー打撃による疑似 AE 信号を発生し、DAS と O-AE を同時計測した。その結果、以下のことが判明した。

- (1) 5 m 程度の監視領域である O-AE 計測に比較し、DAS は格段に広い 35 m を超えて AE を検知できた。
- (2) DAS 結果から算出した V_p は 2.0 ~ 2.4 km/s となり、近接で実施した原位置試験結果 $V_p=2.26$ km/s と整合した。
- (3) 現在計測を継続している O-AE の取得 AE 振幅値を勘案すると、同程度の振幅レベルの AE 信号波を DAS で計測可能である。

本技術を実際の原位置 EDZ 計測に組み込むためには、O-AE とのハイブリッド対応、使用計測線の最適化、岩盤との固定など、今後詳細を検討することが重要である。

謝辞：本 DAS 計測に関して、O-AE システム利用や結線、データ取得および整理に関して株式会社レーザックの藤井宏和氏にご助力いただいた。ここに深く謝意を表す。

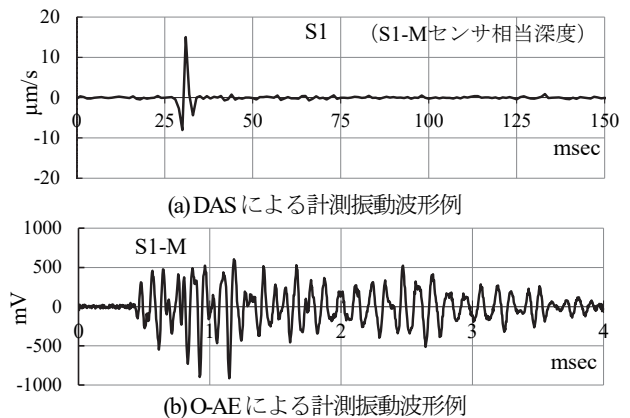


図-9 DAS と O-AE の同時計測振動レベルの比較

参考文献

- 1) Tsang, C. F., Bernier, F. and Davies, C.: Geohydro-mechanical processes in the excavation damage 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.08.003>
- 2) Japan Nuclear Cycle Development Institute (2000) H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan—report 3 safety assessment of the geological disposal system, *Technical report. JNC TN1410 2000-004*, Tokai-mura, Japan, 2000.
- 3) Aoki, K., Toida, M. and Koshizuka, K.: In situ investigation of loosened zone around deep underground openings by acoustic emission monitoring technique, *Proceedings of ISRM-SPE International Symposium, Rock at Great Depth*, pp.313-319, 1989.
- 4) 石田 毅, 金川 忠, 土山茂希, 百瀬洋一: 高周波 AE 測定による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の観測, 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.311-315, 1992.
- 5) Talebi, S. and 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.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91042-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91042-4)
- 6) 稲葉武史, 志水俊仁, 戸井田 克, 青木謙治: AE 計測による岩盤空洞周辺のゆるみ域の評価, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.181-185, 1993.
 - 7) 畑 浩二, 吉岡尚也, 木梨秀雄: 原位置 AE 計測に基づいた岩盤ゆるみ域の評価, 材料, 第 47 巻, 第 5 号, pp.489-494, 1998. <https://doi.org/10.2472/jsms.47.489>
 - 8) 畑 浩二, 松井裕哉, 木山英郎, 木梨秀雄: AE 法を利用した地下空洞掘削影響領域評価に関する研究, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.251-262, 2002. https://doi.org/10.2208/jscej.2002.715_251
 - 9) Read, R. S.: 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.41, pp.1251-1275, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.012>
 - 10) 畑 浩二, 宮崎裕光, 小笠原光雅, 前島俊雄, 青木謙治: AE 法を用いた波方 LPG 岩盤貯槽掘削におけるゆるみ域評価, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.139-144, 2010. <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00019/2010/39-0139.pdf>
 - 11) 中山 雅, 雑賀 敦, 木村 駿, 望月陽人, 青柳和平, 大野宏和, 宮川和也, 武田匡樹, 早野 明, 松岡稔幸, 櫻井彰孝, 宮良信勝, 石井英一, 杉田 裕, 笹本 広, 棚井憲治, 佐藤稔紀, 大澤英昭, 北山彩水, 谷口直樹: 幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階 (第 3 段階: 必須の課題 2015-2019 年度), 日本原子力研究開発機構, JAEA Research, 2019-013, 2020. <https://doi.org/10.11484/jaea-research-2019-013>
 - 12) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, *Rock Mech. Rock Eng.*, pp.385-401, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1577-z>
 - 13) 青柳和平, 櫻井彰孝, 棚井憲治: 幌延深地層研究センターの立坑掘削影響領域の水利・力学的挙動に関する研究, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.142-147, 2019.
 - 14) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱 克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (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.
 - 15) 丹生屋純夫, 青柳和平, 藤田朝雄, 白瀬光泰: 幌延深地層研究センターにおける原位置岩盤の強度・変形物性の検討, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.336-341, 2016.
 - 16) 畑 浩二, 丹生屋純夫, 青柳和平, 宮良信勝: 幌延深地層研究センターの東立坑における掘削損傷領域の評価, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.77, No.2 (特集号), I_29 ~ I_43, 2021. https://doi.org/10.2208/jscejte.77.2_I_29
 - 17) 畑 浩二, 宮崎裕光, 田仲正弘, 藤井宏和, 斉藤義弘, 布谷勝彦: 光ファイバーを利用した原位置 AE センサの開発, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.109-114, 2011.
 - 18) 畑 浩二, 二島 建, 大久保秀一: 光式 AE センサによる波方国家石油ガス備蓄基地での岩盤健全性評価, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演概要集 第 VI 部門, pp.381-382, 2013.
 - 19) Maria R. F-R, Luis C. and Hugo F. M.: Distributed Acoustic Sensing Using Chirped-Pulse Phase-Sensitive OTDR Technology, *Sensors*, 19(20), 4368, 2019, <https://doi.org/10.3390/s19204368>.
 - 20) Lu, P., Lalam, N., Badar, M., Chorpening B.T, Michael P. Buric, M.P. and Ohodnicki, P. R.: Distributed optical fiber sensing: Review and perspective, *Applied Physics Reviews* 6, 041302, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5113955>.
 - 21) 藤井陽一: 光ヘテロダイン検出方法, 生産研究, 33, 巻 4 号, pp.1-4, 1981.
 - 22) 畑 浩二, 丹生屋純夫, 鶴山雅夫, 中岡健一, 深谷正明, 青柳和平, 櫻井彰孝, 棚井憲治: マルチ光計測プローブを用いた立坑周辺岩盤の掘削影響領域の長期モニタリングとその評価 (共同研究), JAEA-Research 2020-010, 2020, <https://doi.org/10.11484/jaea-research-2020-010>

(2022. 8. 26 受付)

RESEARCH ON THE USE OF DAS FOR EVALUATION OF EXCAVATION DAMAGED ZONE

Koji HATA, Sumio NIUNOYA, Hiroya MATSUI and Nobukatsu MIYARA

The Horonobe Underground Research Center (URL) is being constructed in Horonobe, Hokkaido, Japan, for research into the geological disposal of High-level Radioactive Waste (HLW). In-situ monitoring for the Excavation Damaged Zone (EDZ) is ongoing at the depth of 370 m in the east shaft of this facility. Optical measurement methods are being tested for long-term monitoring of HLW geological disposal. The sensors used are Acoustic emission, pore pressure and temperature. The optical acoustic emission sensor (O-AE) has high sensitivity and high dominant frequency, which inevitably results in a narrow monitoring area. Therefore, a distributed acoustic sensor (DAS) based on optical time domain reflectometer technology was used in a field experiment to investigate the possibility of expanding the monitoring area. As a result, it was found that the area where AE can be detected in the sedimentary rock mass is about 5 m in the case of O-AE, but can be extended to about 35 m in the case of DAS. It was also found that DAS can properly receive AE sources caused by hammering blows.