大深度地下掘削時のAE計測における 波形分析手法に関する研究

丹生屋 純夫1*・畑 浩二2・鵜山 雅夫1・青柳 和平3・若杉 圭一郎3

 ¹株式会社大林組 原子力本部原子力環境技術部(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)
²株式会社大林組 技術研究所地盤技術研究部(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸6-640)
³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 北海道天塩郡幌延北進 432-2)

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

日本原子力研究開発機構と株式会社大林組は,幌延深地層研究センターの深度350m以深を対象に,長 期耐久性を期待して設置した光ファイバー式センサで立坑周辺岩盤の水理・力学的な挙動を,AE(アコ ースティック・エミッション:Acoustic Emission),間隙水圧及び温度を長期的に計測している. 当該計測データを共振特性を用いて整理した結果,5種類の波形パターンから岩盤AEをさらに精度良く 弁別することが課題となっていた.そこで,岩盤AEとそれ以外のAEと言うカテゴリーで弁別することを 主眼に「スペクトルピークの半値幅」という定量的な弁別条件を適用し,岩盤AEの抽出精度向上を試み た.その結果,判別が不明瞭な波形特性を呈した岩盤AEも適切に抽出することが可能となった.

Key Words : AE, optical sensor, long term monitoring, great depth excavation, analysis methodology

1. はじめに

固体材料に何らかの外力が作用すると、材料内部では 微小変形が生じるととともに微小き裂が生じ、逐次進展 の結果、最終的には巨視的破壊へ至ることになる.この 過程で、材料内部から微小破壊音である弾性波動が発生 する現象をAEと称しており、岩石や岩盤分野では、大 深度地下構造物の合理的な設計に繋がる地殻応力の推定、 掘削による岩盤損傷の程度や広がり、グラウトの注入管 理などへの実用化事例がある^{1)~3}.

幌延深地層研究センターでは、図-1に示す350m以深 の立坑を対象に、掘削前から掘削完了後の長期間にわた って立坑周辺に形成される掘削損傷領域(Excavation Damaged Zone,以下EDZ)の力学的挙動をAEで、水理 学的挙動を間隙水圧と温度で評価する目的で現在も計測 を継続実施し、種々の知見が得られている⁴⁵⁹.

このうち観測したAE信号波形には、掘削時の壁面周 辺岩盤の破壊に起因するもののみならず、地下水流動や 地下水に賦存しているメタンガスの遊離に起因するもの も含まれていると考えられる.掘削段階では非常に多く のAEイベントが記録されているが、EDZの発生に起因 する波形のみを明確に弁別する必要があった.著者らは、 波形形状を効率的に認識しPCで自動的に弁別するため に定性的な評価を行った.そのために、一部不明瞭な波 形の岩盤AE信号波形は完全に抽出されていない可能性 があった.



図-1 幌延深地層研究センター地下施設概要 5



図-2 マルチ光計測機器および配置位置イメージ



図-3 5種類のAE信号波形パターン

本報告では、AE計測によるEDZ評価に必要な基礎情報を整備し計測の精度を向上する目的で、地下水とガスが混在する岩盤中を掘削した際に観測されるAE信号波形の種類と特徴を整理し、定量的な弁別条件に基づいた分析手法を構築し、AE信号波形の再分析を試みた.

2. 従来のAE弁別方法

(1) AE信号波形パターンの分類

図-2のように配置した各センサーによって、計測開始 直後から多数のAE信号波形を観測した. 立坑掘削には 機械式掘削方式が採用されたこと、地下水に溶存してい たメタンガスの噴出が確認されていることから、掘削に 伴う岩盤から発生したAE以外に雑音が多く含まれると 考えられた. そこで、今回の計測データを確認すると、 図-3に示すように大別して5種類のAE信号波形パターン に分類することができた.

著者らのこれまでの計測実績に基づくと、①の波形は 応力再配分に伴い岩盤から発生したものである.また、 ②の重複波形は施工サイクルにおける掘削機械類の稼働 と照らし合わせると機械雑音であることがわかった.一 方、③~⑤については、①、②以外の事象に起因する AE信号波形と考えられ、当該地点では地下水、可燃性 ガス突出に依存したものと推測されるが、現段階ではそ の特定には至っていない.

したがって、まず岩盤AEとそれ以外のAEというカテ ゴリーで弁別することを考え、掘削期間だけでも2,700 万個ある波形データから効率的に岩盤から発せられた AEを抽出する必要がある.

(2) 従来のAE弁別方法による計測データの分析

当初,計測された全てのAE信号波形データから岩盤 から発せられたAEのみを抽出するため,AE信号波形の ピーク周波数,波形形状特性および共振特性に着目し, 図-4および図-5に示すような種々の解析処理行い,弁別 条件を設定し,自動弁別を行った^{6,7}.

図-4中,波形形状の数値化として,DT(Duration Time) をPA(Peak Amplitude)で除した値をAE信号波形の形状を 表わす指標(波形形状指数)として定義した.DTは, 波形がトリガーレベルを超える継続時間[msec],PAは最 大振幅[mV]を表わす.また,共振性の数値化として, 「スペクトルピーク/最大振幅」を指標とし,過去の実 績から図-5に示す共振性の程度について,以下に示す特 徴付けを行った.

- ●共振性が強い:周波数スペクトルは、単一の周波数 性成分に集中するため、波形の最大振幅に対し、 スペクトルのピーク強度の割合が比較的大きい.
 ⇒「岩盤以外から発生したAE」と見なす
- ●共振性が低い:周波数スペクトルは、さまざまな周 波数成分に分散するため、波形の最大振幅に対し、 スペクトルのピーク強度の割合が比較的小さい.
 ⇒「岩盤から発生したAE」と見なす

以上の共振特性を主に用いた弁別の結果,2,700万個 のAE信号波形から波形パターン①の岩盤から発生した 突発的なAE波動と思われる波形を約145万個抽出した. しかしながら,ガス類噴出時の計測実績が無いこと,前 述の共振特性条件は定性的な特徴付けであることから, 分類した5種類の波形パターンの中から当該現場特有の 地下水,可燃性ガス突出に依存した波形を明確に弁別し, 岩盤AEのみを精度よく抽出するためには,定量的な条 件による弁別方法の改良が必要であると考えられた.



PA(Peak Amplitude):最大振幅[mV]





3. スペクトル半値幅に着目したAE弁別方法

(1) スペクトル半値幅

前章にて述べた従来型の弁別方法における課題を克 服するため、定量的な指標であるスペクトル半値幅に着 目し、弁別方法の改善を試みた.

スペクトル半値幅は、図-6に示すように、ピークの 50%強度値における両端を結んだ幅であり、スペクトル の単色性・共振性の鋭さを示す指標である。半値幅は光 学の分野や材料物性の分野などにおいて、機器の性能や 材料の物性の評価指標などで広く活用されている⁸⁹.



表-1 弁別指針別による流体から発生する AE 波形

条件	流体AEデータが全計測データ に占める割合	
波形勾配>0.5	95%~98%	
共振性指数>0.15	95%~98%	
半値幅<25kHz	95%~99%	

表-2 弁別条件比較

手 法	バラメータ	岩盤AEの抽出条件	目的
改良型	ピーク周波数	[>25kHz] の波形を抽出	削孔振動の除去
	波形形状指数(DT/PA)	[<0.5]の波形を抽出	流体AEの除去
	スペクトル半値幅	[>25kHz]の波形を抽出	
従来型	ビーク周波数	[>25kHz]の波形を抽出	削孔振動の除去
	波形形状指数(DT/PA)	[<0.5]の波形を抽出	流体AEの除去
	共振性指数 (スペクトルピーク/PA)	[<0.15] の波形を抽出	

(2) AE弁別方法の改良

室内試験において,流体によって発生したAE信号波 形を,波形勾配,共振性指数,および半値幅のパラメー タで整理した結果を表-1に示す.表中の「スペクトル半 値幅」は改良型の弁別手法で用いる条件を,「共振性指 数」は従来型の弁別手法で用いた条件を示している.

この整理結果より改良型として用いる条件の一つとして、「25kHzよりも大きいスペクトル半値幅を示すAE信号波形は岩盤AEと見なし抽出する」と規定し、弁別を行うこととした. 表-2 にて、従来型と改良型においてAEを弁別するための条件の比較結果を示す.

室内試験で計測したAE信号波形データの2例を用いて, 共振性指数と半値幅の両設定条件を用いた抽出判定を検 証した. その結果を以下に示す.

【例1 (図-7 参照)】 従来型:共振性指数0.11⇒弁別判定「岩盤AE」

改良型:半值幅43kHz ⇒弁別判定「岩盤AE」









【例2(図-8 参照)】

従来型: 共振性指数 0.55 ⇒ 弁別判定「岩盤AE以外」 改良型: 半値幅 15kHz ⇒ 弁別判定「岩盤AE以外」

以上の2例のように従来型と改良型共に同じ弁別判定 を下すケースもある一方で、従来型では「岩盤AE以 外」と判定されていたものを改良型の条件に当てはめて みると、「岩盤AE」という判定結果となるケースが 多々あることもわかった.これより、改良型で弁別した 判定結果は、定性的な従来型による判別では岩盤AEの 特徴に似てはいるが共振性の低い特性を持つ地下水やガ スなどの流体から発生したAEなど、異なる特性の波形 も定量的に評価できる可能性が示唆された.

4. 改良型AE弁別方法による計測データの再分析

(1) 改良型による再分析

前章において新たに設定したスペクトル半値幅をはじ めとした改良型AE弁別方法により,立坑掘削期間中 (平成26年3月10日~4月19日)のAE信号波形データを再 度弁別した.そのうち,S1孔の上,中,下段センサーに よって計測されたデータの弁別結果をそれぞれ図-9~11 に示す.各センサー図において,従来型の条件で弁別し た結果も併記し,目視的に比較した.各図中,黒の棒グ ラフがAEの発生数,赤点の散布が周波数を表わしてい る.また,図中に示した茶色の点線は立坑掘削底面が当 該センサーの設置深度を通過した時期を差し示している.

(2) 従来型との比較

図-9~11において、上中下段の弁別結果とも改良型に よって抽出された岩盤AE発生数および周波数とも、そ のデータ数量は格段に多くなっていることがわかった. 掘削期間のうち、特に中段センサーでAEの発生が最頻 であった、平成26年4月9日0時~11時における計測デー タの弁別抽出結果について、従来型と改良型の手法別に 図-12のグラフにて整理した、グラフ中のデータは、当 該期間中の1時間当たりに計測された全AE信号波形の数 量に対して、従来型および改良型の両方においてそれぞ れ抽出された岩盤AE信号波形数の割合を表わしている. これより、改良型によって得られた岩盤AE抽出数量割 合の経時変化は、従来型による抽出数量割合の推移挙動 とほぼ同様の傾向を示しているとともに、抽出割合は約 5倍増となった.ただし、図中赤枠で示した4月9日6時~ 9時までの3時間において、従来型と改良型におけるAE 推移の傾向が異なることが示された.

詳細を検討するために、計測時間を7時~8時に限定し、 発生したAE信号波形を抽出し、検証した.当該時間中 は掘削作業は行われておらず、掘削機械による雑音は発 生していないことがわかっている.改良型によって岩盤 AEとして抽出された数は7,815個となっており、このう ち、従来型でも岩盤AEと識別されたケースは451個であ った.改良型で岩盤AEと識別されたが、従来型では識 別されなかったケースと、両方式で岩盤AEと識別され たケースについて、AEの振幅に着目して比較してみた

(図-13,図-14 参照). その結果,振幅が600mV程度 以上の信号波形では従来型,改良型共に岩盤AEと判断 するケースが多いものの,振幅がそれより小さい信号波 形になると両者における岩盤AEの判別数に大きな乖離 が認められる.小振幅の場合,従来型においては周波数 解析結果の誤差が内在しているが,半値幅にはその誤差 が小さくなることに起因していると考えられる.



5. おわりに

本報告では、PCで大量の計測データを共振性を考慮 して容易に自動弁別できる従来型の弁別手法からさらに 岩盤AEの抽出精度の向上を目指すために、改良型とし て新たにスペクトルピーク半値幅に着目したAE弁別方 式を適用し、計測されたAE信号波形を再度弁別した. その結果、従来型によって得られたAE信号波形を落と すことなく、新たに不明瞭な波形特性を呈した岩盤AE も適切に抽出することが可能となった.

今回は岩盤AEとそれ以外のAEというカテゴリーで弁別することに注力したが、5種類のAE信号波形パターン



の発生源がそれぞれ明確に特定されれば、岩盤AEの抽 出はさらに精度が向上すると共に、その他の抽出目的に も対応可能となる.したがって、室内要素試験などによ り、種々のAEの発生源特定が今後の課題となる.

謝辞:本業務全体に関して,株式会社レーザック 藤井 宏和氏に多大なるご協力をいただいた.ここに記して感 謝の意を表す.



参考文献

- 尾上守夫、山口楠雄、仲佐博裕、佐野謙一、磯野英二、 渡辺哲夫共著:アコースティック・エミッションの基 礎と応用、コロナ社、1976年
- 2)畑浩二,宮崎裕光,田仲正弘,布谷勝彦,斉藤義弘, 藤井宏和: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 集,講演番号20,2011年1月
- 3) 畑浩二:光式 AE を利用した地下空洞における長期モニタリング技術の開発と適用,大林組技術研究所報, No.79, 2015
- 4)畑浩二,丹生屋純夫,青柳和平:光計測を用いた幌延 深地層研究センターの立坑周囲岩盤における長期挙動 評価,第14回岩の力学シンポジウム講演集,講演番 号011,2017年1月
- 5) 畑浩二,丹生屋純夫,津坂仁和,青柳和平:幌延深地 層研究所におけるマルチ光計測プローブを用いた立坑 掘削影響領域の長期モニタリング計画,土木学会第69 回年次学術講演会,平成26年9月
- 6)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,講演番号57,2016年1月
- 7)畑浩二,丹生屋純夫,青柳和平,藤田朝雄:幌延深地 層研究センターの立坑掘削時における力学的・水理学 的影響評価,土木学会第70回年次学術講演会,平成 27年9月
- 8) X 線回折スペクトルの半値幅を用いた金属の硬度の評価, あいち産業科学技術総合センターニュース,2014年3月号
- ラマンスペクトルの半値幅を用いたダイヤモンドの 結晶度の評価,表面技術Vol.42, Nol2, 1991

STUDY ON ANALYSIS METHODOLOGY OF AE SIGNAL WAVE AT GREAT DEPTH EXCAVATION

Sumio NIUNOYA, Koji HATA, Masao UYAMA, Kazuhei AOYAGI and Keiichiro WAKASUGI

The objective of this research is to investigate the long-term hydro-mechanical behavior of rock mass around the shaft in the Horonobe Underground Research Laboratory(URL). The long-term monitoring has been carried out by optical AE sensors, optical water pressure sensors, and optical temperature sensors below 350m depth of the shaft in the horonobe URL.

From the first analytical results, we saw it was too hard to discriminate the uncleared AE wave by using the resonant characteristic. So at this time, we tried to re-analysis by using the half width of spectrum, we could discriminate it correctly as AE from the breaking of rock.