

AEモニタリング法を用いた亜炭廃坑空洞充填による充填効果の検証

坂本 昭夫^{1*}・杉浦 乾郎¹・山田 紀利²・和田 幸二郎¹・田野 久貴³・藍檀 オメル⁴

¹飛島建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0017愛知県名古屋市中区松原3-2-8)

²飛島建設株式会社 九州支店 (〒810-0022福岡県福岡市中央区薬院1-1-1)

³日本大学 工学部 土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

⁴琉球大学 工学部 環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

*E-mail:akio_sakamoto@tobishima.co.jp

岐阜県御嵩町の亜炭廃坑は採掘割合が高い残柱式で採掘されており、岩盤の劣化とクリープの進行で空洞が崩壊し、今日でも地表面に沈下や陥没が現れる事故が絶えない。ここでは、将来、南海トラフによる巨大地震が襲来した場合、残柱が連鎖的に崩壊し、広範囲に陥没等の被害が発生すると予想されている。特に災害時の避難所に指定されている共和中学校では、敷地のほぼ全域に廃坑が存在しているため、校舎等の基礎が支持を失って構造体が破壊するような重大事故が発生すると予測された。そのため、地盤の安定化を図る目的で空洞充填工事が行われた。著者らはボーリング孔内にAE装置を設置して充填前と充填後に空洞岩盤から発生するAEを計測し、充填効果（不安定状態からの改善）について検証した。

Key Words : *underground cavity, subsidence, cavity filling techniques , limited area filling method , acoustic emission*

1. はじめに

わが国には至る所に石炭廃坑、亜炭廃坑、地下採石場跡、戦時中の地下壕など様々な空洞が放置されている。空洞内部では、採掘で表面にさらされた天盤、柱（残柱）、壁を構成する地層や岩盤が、長い期間を経て劣化の進行やクリープの影響で強度が低下し、やがて空洞を崩壊させ、地上に陥没や沈下となって現れる。2011年3月の東北地方太平洋沖地震では岩手県、宮城県、福島県、茨城県の石炭廃坑、亜炭廃坑、地下採石場跡が崩壊した。2011年7月25日付け経産省ニュースリリース等によると300箇所以上で陥没等の被害が発生した¹⁾。

東海地方では明治時代初期から1970年代の約100年間にかけて亜炭が盛んに採掘されたが、幸いにも採掘跡の空洞の大部分は大きな地震に遭遇していないことから今日まで際立った地震被害は発生していない。しかし、将来、南海トラフ等による巨大地震が襲来した場合、地盤の揺れが増幅されて、地盤条件によっては、廃坑内の残柱が連鎖的に崩壊し、東北地方を上回る空洞被害が発生すると予想される。

なかでも岐阜県可児郡御嵩町の亜炭廃坑は採掘割合が高い残柱式採掘法で面的に広く採掘されている。特

に災害時の避難所に指定されている共和中学校では、敷地のほぼ全域に廃坑が存在するため、校舎等の基礎（直接基礎）が支持を失って構造体が破壊するような重大事故が発生すると想定された²⁾。そのため、避難所の機能維持と生徒および教職員の安全確保のために空洞充填工事が行われた。著者らはボーリング孔内にAE（Acoustic Emission）装置を設置して充填前と充填後に空洞岩盤から発生するAEを計測し、得られたデータの分析により充填効果（不安定状態からの改善）の検証を試みた。

2. 亜炭廃坑空洞の現状

(1) 東海地方の亜炭廃坑

東海地方で亜炭が採掘されたのは、岐阜県では可児市、御嵩町、多治見市、土岐市、瑞浪市、恵那市、中津川市にわたる丘陵地帯、愛知県では濃尾平野西部の丘陵地帯から知多半島中部丘陵地帯にかけての地域、三重県では北勢および中勢の伊勢平野西部丘陵地帯、伊賀上野周辺の丘陵地帯である。

亜炭とは炭化の程度が低く、発熱量の小さい石炭の一種である。しかし、エネルギー革命による石炭や亜炭か

ら石油への依存割合の転換と海外からの安い石炭の輸入増により、わが国の亜炭産業は急速に衰退し、その結果、採掘跡は手当を施されないままの空洞が残された。亜炭廃坑が残存する地域では、採掘を終えて数十年が経つ今日においても、地表の陥没や構造物の沈下・傾斜などの被害（鉱業法でいう鉱害）が毎年各所で発生している。東海地方では亜炭廃坑の総面積は約 3,000 ヘクタール、採掘量は昭和に入ってからだけでも約 1,800 万トン、容積にすると約 1,500 万 m³にも及ぶとされる^{3),4)}。写真-1 に地下水の浸入がない現在の廃坑内部の状況を、写真-2 に残柱を、写真-3 に残柱にみられる亀裂や剥離の発生状況を示す。なお、残柱式採掘法とは、空洞の天盤を支える柱状の亜炭を一定間隔に残しながら面的に広く採掘する方法である。

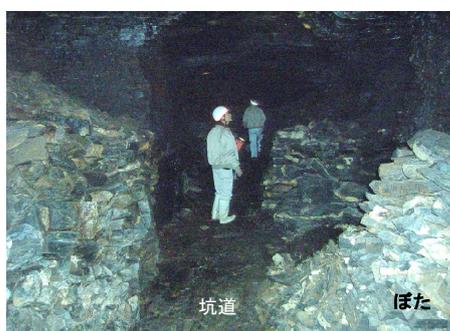


写真-1 亜炭廃坑内部（坑道とぼた）



写真-2 残柱

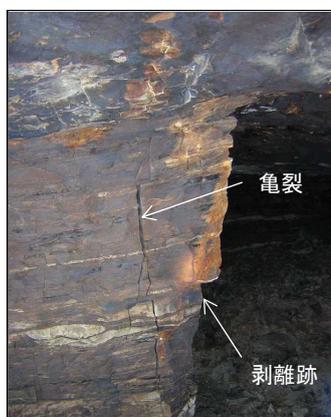


写真-3 残柱にみられる亀裂と剥離跡

(2) 当地の亜炭廃坑

御嵩町は東海地方のなかでも最も大規模かつ広範囲に亜炭が採掘された地域で、現在では市街地の直下にまで亜炭廃坑が広く分布する。東海地方の亜炭生産の最盛期は 1940 年代～1950 年代で、全国比でみれば約 43%³⁾、そのうち御嵩町は約 40%を生産⁵⁾していた一大生産地であった。この地域の廃坑の採掘深度は、町内各所で行われた過去のボーリング調査から、浅いところで数 m、深いところでは 100m 近くにまで達し、地下水位より深い廃坑の内部はほとんどが水没していることがわかっている。

共和中学校で事前に行われた調査ボーリングにより、廃坑の平均高さは約 1m で、そのうち下部にはボタや土砂などが堆積し、立地箇所がやや高台にあるため、廃坑内部に地下水の侵入はほぼないことが判明した。また、廃坑は敷地の北東から南西側に向かって GL-5m～GL-25m の深さで緩く傾斜しており、その分布は敷地全体に広がっていると想定された。

3. 空洞充填工法と充填工事の概要

(1) 空洞充填工法

共和中学校における廃坑空洞の充填は東海地方の亜炭廃坑を中心に多数の実績がある空洞充填工法により行われた。空洞充填工法は、それぞれ砂利工場および珪砂工場で発生した粘土キラ、砂キラとよぶ副産物の細粒土に固化材と水を練り混ぜて製造した充填材スラリーを、ボーリング孔（充填孔）から空洞内に注入し、固化させて地盤の安定を図る技術である。高い流動性で空洞内を隅々まで充填できることおよび材料に副産物を利用することから経済的であることが大きな特徴である。

一方、空洞充填工法のなかでも、その応用技術として限定充填工法がある。限定充填工法は広い空洞の一区画を充填することを目的に開発された技術で、最初に流動性を制御した端部充填材とよぶ充填材で対象範囲の境界線上に隔壁を形成し、その後、内側に流動性の高い中詰充填材とよぶ充填材を注入する。端部充填材は前記配合材料にさらに水ガラスを添加したもので、そのゲル化作用で流動性を制御するものである。図-1 に限定充填工法の施工概念図を示す。

空洞充填工法は東海地方の亜炭廃坑問題を解決するために、1974 年に通商産業省名古屋通商産業局（現在の経済産業省中部経済産業局）に開設された技術委員会で検討・開発され、現在は限定充填工法も含めて一般社団法人充填技術協会が技術指導する空洞対策の総合技術である。

表-1 充填材の配合^{6),7)}

| 材 料 | (1m ³ あたり) | |
|-------------|-----------------------|-------|
| | 端部充填材 | 中詰充填材 |
| 粘土キヲ(kg) | 360 | 360 |
| 砂キヲ(kg) | 120 | 120 |
| 特殊土用固化材(kg) | 90 | 60 |
| 特殊水ガラス(kg) | 48.8 | — |
| 遅延剤(kg) | 0.27 | 0.18 |

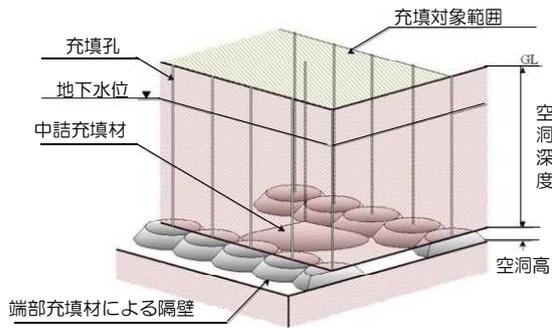


図-1 限定充填工法の施工概念図

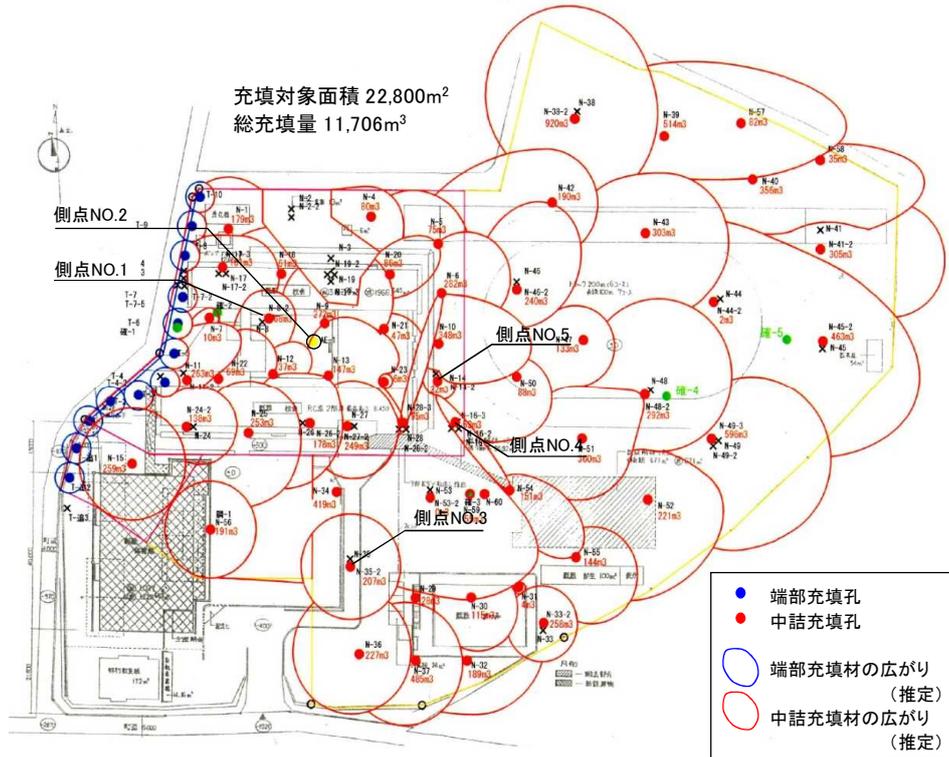


図-2 充填状況平面図^{6),7)}

(2) 充填工事の概要

当地は空洞が中学校の敷地を超えて分布し、また亜炭層に沿って傾斜していることから、敷地の外側空洞に大量に充填材が流出するロスの発生が想定されたため、限定充填工法を採用してこれを防止することとされた。表-1 にその配合表を示す^{6),7)}。

図-2 は充填工事の平面図で、空洞内での充填材の広がり様子を充填工事施工中に未充填の充填孔から空洞内に挿入したセンサー等の観測結果等に基づいて推定し、描かれたものである^{6),7)}。

4. AEの計測と装置の設置

(1) 空洞の周辺岩盤から発生するAE

岩盤にAEが発生する要因として、荷重の変化や乾湿の繰り返し、クリープによる亀裂の発生、粒子間のすべり、空洞内の水の流れの影響および機械や

地震による振動などが考えられる。空洞を充填すると、固化した充填材で残柱が拘束されてその支持力が増すとともに、残柱の偏差応力が減少するため、カイザー効果を考えるとAEの発生が抑制される。また、充填で劣化しやすい亜炭は周辺の気象環境から遮断されるため劣化しにくくなる。さらに充填前の空洞水の流れは停止するかまたは速度が極端に遅くなる。充填が確実に行われれば、これらの要因によるAEの発生は充填前後で大きく異なることになる。したがって、廃坑空洞の近傍で充填前にAEの発生数を計測し、充填後のそれと比較することで不安定状態から改善された充填効果を検証することができる。

一方、AE現象は個々の波動が高速かつエネルギーが微小であるため、記録システムは一般に高価なものになる。また、感度を高く設定するためにノイズの影響を受けやすい。そこでこの問題を低減するために、あるしきい値を超えたAE波の数に比例し

たパルスが発生させ、その数で AE 活動度を評価する「AE・AD法」が開発されており^{8),9)}、これを適用した。この方法は AE 波を記録するための感度を低く抑えることができ、乾電池を電源として、いわばプリアンプ程度の増幅器と組み合わせることで安価にした簡易なものである。図-3 にしきい値を超えた AE 波の数に比例したパルスへの変換の概念図を、図-4 にここで用いた AE カウントに限定したシステムの系統図を示す。

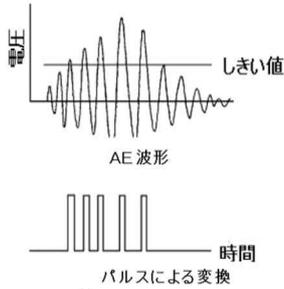


図-3 AE 波のパルス変換の概念図^{6),7)}

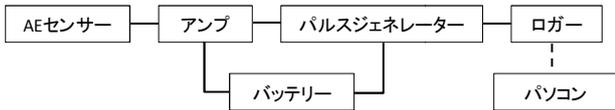


図-4 AE カウントに限定したシステム^{6),7)}

(2) AE 装置の製作と設置

写真-4 は開発した小型 AE センサーを市販の AE センサーと比較したものである。写真-5 はセンサーをパンタグラフに取り付けた装置、写真-6 はさらにこれをロッドに取り付けた AE 装置全体と装置を挿入するボーリング孔口の写真である。図-5 はこの装置を孔内に挿入し、パンタグラフを開いてセンサーを孔壁に密着させて設置した状態の概念図である。装置を設置したボーリング孔は、ボーリングが空洞に的中して空洞と直結になった孔が 2 箇所、ボーリングが残柱に入ったため空洞と非直結となった孔の 3 箇所、合計 5 箇所 (5 側点) である。図-6 に AE 装置の設置概念図を示した。また、各測点の位置は図-2 に示されている。1 つの装置には 2 つのアクティブとノイズ除去のために 1 つのダミーのセンサーを取り付けた。2 アクティブ・1 ダミーとしたのは、周囲の電気的環境によるノイズ、設置作業や工事等の作業によるノイズ、結露等によるアンプの不安定化等に対処するためである。たとえばアクティブとダミーの 3 つのセンサーに同時にカウントされた場合はノイズと判断し、原則としてそのときのデータはすべて削除した。それは 1~2 カウント程度のものがほとんどであった。



写真-4 開発した小型センサー (左)と市販のセンサー(右)⁷⁾



写真-5 AE 装置のパンタ部^{6),7)}



写真-6 ロッドを取り付けた AE 装置と孔口⁶⁾

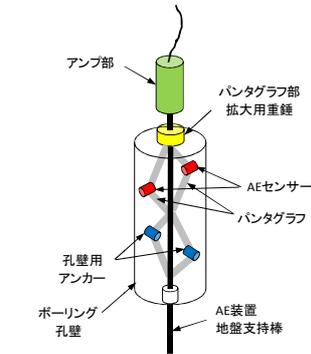


図-5 AE 装置の概念図⁶⁾

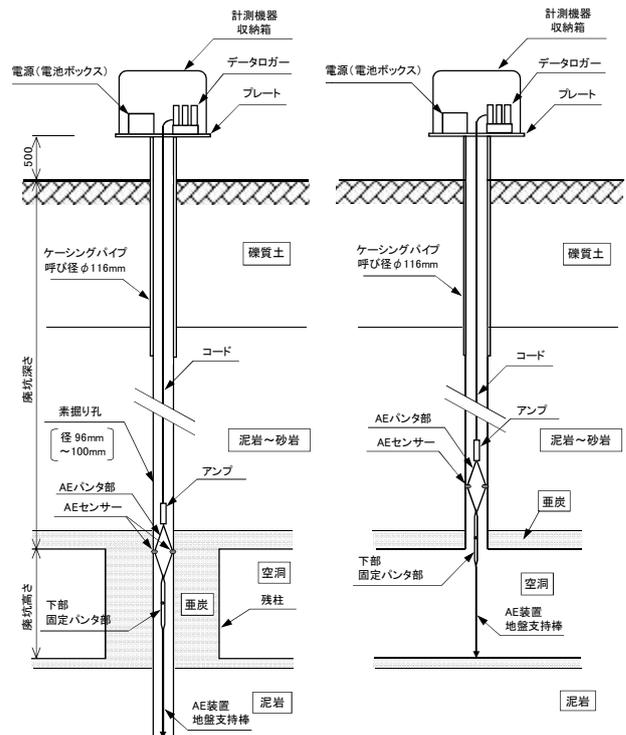


図-6 AE 装置の設置概念図⁷⁾

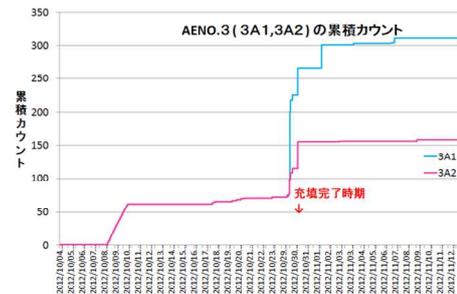
5. AE計測結果とその考察

2012年8月下旬に最初の測点にAE装置を設置して充填前の計測を開始した。そして、同年10月初旬から下旬にかけて各測点付近の充填が行われ、その後続く充填後の計測を終えたのは同年12月末である。図-7はNO.1~NO.5のそれぞれの側点の2つのアクティブのAEカウントを累積で表したものである。なお、表示期間は、上記計測期間の中から充填の前後の比較的短い期間を抜き出したものである。

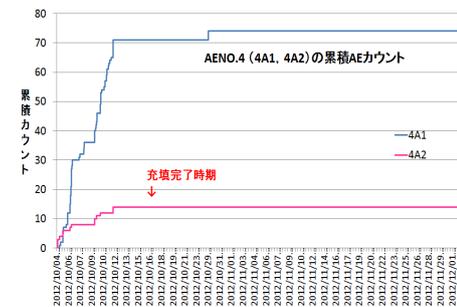
これらのうち、測点NO.2を例としてみると、充填完了時期（当該測点付近を充填し終わった時期）までの期間に数回のAE発生の急増点があり、2つのアクティブとも発生の傾向や累積カウントが類似して増加しているが、その後の充填後のAEは減少したことがわかる。他の測点においても同様で、NO.5のうちの1つのアクティブである5A1を除いては、充填前のAE発生の累積カウントはほぼ一定かまたは不定期かのパターンの違いはあるものの、増加するのは共通した傾向であり、いずれも充填前の空洞内の岩盤にAEが発生する不安定状態にあったと推察できる。これに対して、同じく5A1を除き、充填後はほぼAEが増加しない傾向が認められた。すなわち、充填効果が現れたものと考えられる。

表-2はこれらのAE発生カウントを整理したものであり、ここで“AEカウント減少率”を充填前のカウントに対する充填後のカウント減数の比率として表した。表より、充填完了後は大きなAEカウント減少率となった。

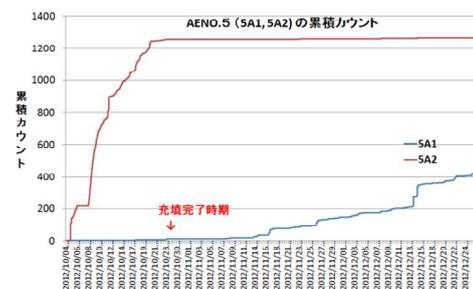
なお、5A1のセンサーは、他のセンサーとは逆に充填後にAEが増加したが、これはNO.5のみ周辺の充填直前に一旦孔内から引き上げて充填後に浅い位置に再設置するという充填施工にともなう例外的な処置をしたため、計測が不安定になったことが原因と考えられる。



(c) NO.3



(d) NO.4



(e) NO.5

図-7 AE計測結果

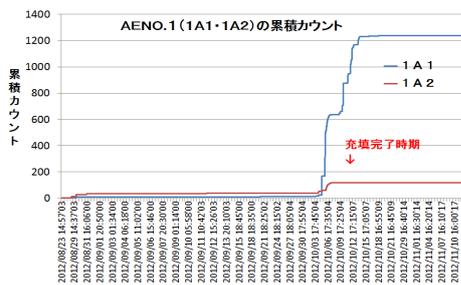
表-2 AE計測結果の数値化^{6),7)}

| 側点NO. | センサーNO. | AE発生カウント | | | | AEカウント減少率(%) =(A-B)/A |
|-----------------|---------|----------|-------------|--------|-------------|--------------------------|
| | | 充填前 | | 充填後 | | |
| | | カウント総数 | 日平均カウント数(A) | カウント総数 | 日平均カウント数(B) | |
| NO.1 (空洞と直結) | 1A1 | 951 | 19.8 | 142 | 4.3 | 78.3 |
| | 1A2 | 117 | 2.4 | 0 | 0 | 100.0 |
| NO.2 (空洞と非直) | 2A1 | 538 | 13.2 | 0 | 0 | 100.0 |
| | 2A2 | 639 | 15.6 | 32 | 0.97 | 93.8 |
| NO.3 (空洞と非直) | 3A1 | 266 | 9.9 | 55 | 3.7 | 62.6 |
| | 3A2 | 155 | 5.7 | 3 | 0.2 | 96.5 |
| NO.4 (空洞と非直) | 4A1 | 71 | 5.5 | 3 | 0.005 | 99.9 |
| | 4A2 | 14 | 1.1 | 0 | 0 | 100.0 |
| NO.5 (空洞と直結) | 5A1 | 12 | 0.57 | 410 | 6.5 | — |
| | 5A2 | 1256 | 59.8 | 11 | 0.17 | 99.7 |

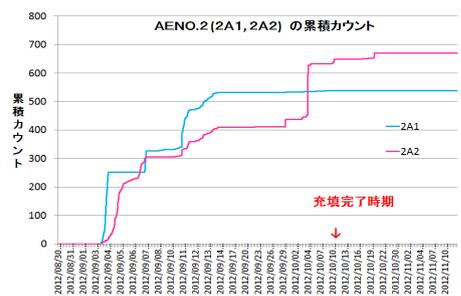
6. 空洞水がある場合のAE計測事例

現状でのAEセンサー、AEアンプおよびコードなどの装置には防水性がない。このため、廃坑空洞に空洞水がない共和中学校では、直接、AEセンサーを空洞周辺の孔壁に設置する方法とすることができたが、空洞水がある場合にはこの方法は使えない。

図-12は東海地方の他の地域における充填工事の際に行った孔内AE装置の設置事例である。システムは共和中学校の場合と同じ「AE・AD法」による



(a) NO.1



(b) NO.2

ものである。ここでの廃坑空洞は堆積土砂や水が充満している状態にあったことから、ボーリング孔内を通して空洞底盤にロッドを打ち込み、ロッドを伝わる AE を頭部に設置した AE センサーで計測したものである。ただし、この場合はロッドを伝達する AE の精度の問題、地表における周辺の漏電や雷などによるノイズの影響の問題があるため、設置方法としきい値の設定にあたっては十分注意する必要がある。

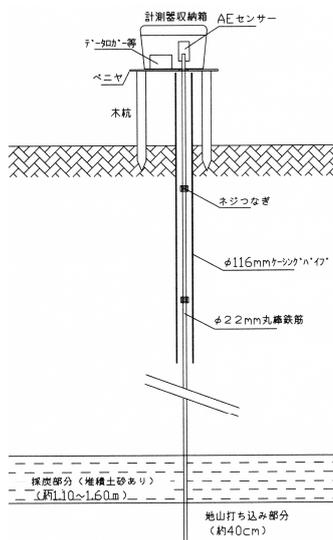


図-8 空洞水がある場合の AE 装置の事例

7. おわりに

共和中学校における AE 法による計測結果と成果をまとめると次のようになる。

- 1) 充填前に比べて充填後は大部分の測点で AE の発生が減少した。
- 2) これは充填効果、すなわち充填による空洞安定化の改善傾向を間接的にとらえたものと考えられ、AE 法は充填効果を確認する一つの指標になりうる。
- 3) ここで用いたパンタグラフ方式の装置を空洞周辺のボーリング孔壁に設置する方法は、空洞水がない場合の AE 計測として有効である。課題として、装置の防湿やノイズ除去のさらなる

工夫が必要である。また、空洞状況や AE 装置の設置状況の確認のためのボアホールテレビなどの開発も必要と考える。将来展望として、本手法は空洞の安定度を評価するための調査法にも有効に活用できる可能性が考えられるため、機会をとらえて検証したい。

謝辞：共和中学校の AE 計測にあたっては、可児市・御嵩町中学校組合、共和中学校、御嵩町および一般社団法人充填技術協会、名古屋大学名誉教授 川本眺万先生、早稲田大学名誉教授 濱田政則先生および玉野総合コンサルタント（株）をはじめ関係各位に多大なるご指導やご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) <http://www.meti.go.jp/press/2011/07/20110725003/20110725003.pdf>
- 2) 共和中学校における 亜炭廃坑危険度調査報告書，早稲田大学理工学術院総合研究所，2012.6
- 3) 林 良総：最近の亜炭鉱害について，充てん，第 11 号，pp.1-6，1985.
- 4) 一般社団法人充填技術協会編集，新版 空洞充填調査施工マニュアル，一般社団法人充填技術協会，pp.3，2010.
- 5) 御嵩町史編さん室，御嵩町史 通史編下，pp.432，御嵩町，1990.
- 6) 柳井真則，杉浦乾郎，山田紀利，坂本昭夫，和田幸二郎，田野久貴，藍檀オメル：AE モニタリング法を用いた充填空洞安定化の推定，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，III-341，2013.
- 7) 和田幸二郎，杉浦乾郎，山田紀利，坂本昭夫，柳井真則，田野久貴，藍檀オメル：AE 法による空洞充填効果の確認，第 48 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2003-2004，2013.
- 8) 田野久貴，渡辺英彦：簡易的 AE カウント装置の実用化と地盤モニタリングへの応用に関する研究，文部科学省科学研究費補助金基盤研究 C (NO.16560436) 成果報告書，2006.
- 9) 藍檀オメル，渡嘉敷直彦，田野久貴：具志川城址周辺地盤の充填前後における岩盤のモニタリング成果報告書，名古屋産業科学研究所，2011.

CONFIRMATION OF THE EFFECT OF CAVITY-FILLING IN AN ABANDONED LIGNITE MINE USING AE MONITORING METHOD

Akio SAKAMOTO, Kenrou SUGIURA, Noritoshi YAMADA, Koujirou WADA, Hisataka TANO and Ömer AYDAN

Collapse and/or subsidence frequently due to cavity collapse caused by the deterioration and creep of surrounding rock in the area of abandoned lignite mines in Mitake town. It was anticipated that the school building of Kyowa junior high school above abandoned lignite mine would collapse if a major earthquake hit the town. Therefore, the cavity-filling construction was implemented for the stabilization of the ground. The authors installed an AE system installed a drill-hole and measured AE response of rock mass and confirmed the stabilization effect of the cavity filling counter-measure.