

(114) 高い内圧を受ける貯蔵空洞周辺岩盤のA E測定について

室蘭工業大学	○ 板倉賢一
シンコ・コンサルタント (株)	相澤隆夫
三井建設 (株)	正会員 中田雅夫
三井建設 (株)	正会員 山地宏志

AE Monitoring to Evaluate the Stability of Rock Cavern in High Pressure

Ken-ichi ITAKURA,	Muroran Institute of Technology
Takao AIZAWA,	Suncoh Consultant Co., LTD.
Masao NAKATA,	Mitsui Construction Co., LTD.
Hiroshi YAMACHI,	Mitsui Construction Co., LTD.

Abstract

At the test site of CAES (compressed air energy storage) cavern in Kamioka mine in Gifu, Japan, AE (acoustic emission) was monitored to evaluate the stability of rock around the entry roadway, the cavern, and the concrete plug during high pressure water injection tests.

In order to monitor an extensive scope around the cavern and the plug, ten AE transducers (2 - 5 kHz) and four triaxial transducers were cemented at the bottom of the boreholes in the depth of 0.2 - 10 m drilled from the cavern wall and the roadway, before the cavern wall was improved in water proof. In this field test, the inner water pressure was increased up to 4.5 MPa.

Through this field test, most of AE events detected were small in magnitude in comparison with the shot signal hit the roadway wall with small hammer. Furthermore, in the cyclic pressure loading tests, few AE was detected until the pressure increased to the maximum value of previous cycle. That is, Kaiser effect was identified. Also, combining the data from other measurements such as plug displacement, water leakage and so on, it was confirmed that most of the AE were not originated from a new crack initiation of rock, but the existing cracks and the grouting mortar. Besides, the displacement of the concrete plug with the increase of water pressure induced the closure or the opening of the existing cracks with AE generation.

1、はじめに

近年、高圧の圧縮空気や天然ガス等を岩盤内に貯蔵する構造物が、注目を集めている[1]。このような構造物を岩盤内に構築する利点の一つは、岩盤が有する莫大な剛性によって、その貯蔵圧を支持することにある。しかしながら、岩盤や岩石は、元来引張荷重に対して脆弱な材料であり、高圧の貯蔵圧が作用した場合、貯蔵空洞周辺には引張き裂の発生や、潜在的に存在するき裂の滑動、開合などが懸念される。

このように高い内圧を受ける岩盤空洞の構造的な弱部や、地質要因に起因する弱部などを検討するとともに、A E計測による空洞周辺岩盤の安定性評価の可能性を追求するために[2]、神岡鉱山内における圧縮空気貯蔵(CAES: compressed air energy storage)実験時にA Eを計測した。

一般にCAES空洞においては、漏気対策のため空洞周辺の岩盤内に複数のボアホールを設け、全体を監視するA Eセンサの配置は難しい。本実験施設においても、当初はプラグ周辺のき裂に着目したき裂変位、漏水量調査等が同時に進行していたために、岩盤奥部にA Eセンサを設置できず、三成分A Eセンサをプラグ手前の坑

道壁面に浅く埋設した計測を行なっていた。この A E 計測により、素掘り空洞内の昇圧（最大 0.64 MPa）とモルタルライニングを施工した後の昇圧（最大 1.96 MPa）実験においても A E が発生することが確認された。そこで次のステップとして、今回は多層のゴムライニングを施工した空洞に対して、ライニング前に空洞内に 8 個、エントリ坑道より約 10 m のボアホールを削孔して 2 個の A E センサと 2 組の三成分 A E センサ、計 16 チャンネルを新たに埋設して計測システムを構築した。しかし、実験中に水圧等の影響で、6 個の A E センサが破損したため、最終的には 16 チャンネルで 4.5 MPa までの水圧上昇に伴う A E を計測した。本文では、その結果について報告する。

2、実験現場

CAES実験空洞は、神岡鉱山茂住坑 -520 m レベルに建設され、土被り高さは約 1000 m である。主に片麻岩類から成る硬質岩盤内に掘削されているが、空洞内および空洞手前のエントリ坑道部には幅約 1 m、南北方向に走向を有する傾斜60度程度のき裂群が確認されている[3]。

図-1は、実験施設の平面図と断面図である。鉄筋コンクリート製の閉塞プラグにより、容量約 204 m³ の空洞が形成されている。本計測の前には、空洞内部を吹き付けモルタルライニングおよびエポキシ樹脂による補修をした後、アスファルトエマルジョン系ゴム、ハルコートおよび A E コートによる三層のゴムライニング処理を施した。ただし、空洞内の A E センサは、このライニング処理の前に埋設した。

3、A E 計測システム

図-2に、本実験の A E 計測システムのブロックダイアグラムを示す。A E センサとしては、圧電型加速度計（TEAC製、707LF と 707IS、100mV/G、3 Hz・12 kHz）を単体あるいは3個を直交させて三成分センサとして用いた。図-2における黒丸が一成分の A E センサであり、黒い四角形が三成分 A E センサである。同図は、空洞内および坑道に対しておおよその配置を表している。図中の番号はセンサのチャンネル番号である。また、*印は、A E 波形の記録に際しトリガチャンネルとして使用したセンサである。各センサの出力は、エントリ坑道のプラグ手前に設置したプリアンプ（TEAC製、SA-16）で雑音レベルに合わせ 200 から 1000 倍に増幅し、図-1に示した計測室のウェーブメモリ（TEAC製、DR-F2a）に入力した。トリガチャンネルの内、出力が 200 mV を越えたチャンネルを検出したなら、全チャンネルのデータをサンプリング周波数 100 kHz、分解能 12 bit で 1 k word 毎にウェーブメモリのフロッピーディスクに記録した。この記録に要する 1 秒弱が、このシステムの不感時間である。

一方、トリガチャンネルの中から 6 チャンネルを分岐し、デュアルシグナルプロセッサ（Dunegan/Endevco 製、3000シリーズ）で 13 から 17 dB 増幅した後、デュアルカウンタ（Dunegan/Endevco 製、3000シリーズ）で、リングダウン・カウントを計数した[2]。その出力は、マルチベンレコーダ（横河 HP 製）とデータログ（TEAC製、DR-F1）へ送り空洞内圧力と共に記録した。データログでは、サンプリング周波数 2 Hz、分解能 12 bit でフロッピーディスクに収録した。また、図-2に見られるように、空洞内のプラグ近くの壁に 2 台のソレノイド型起振機（白丸）を設置し、適宜弾性波を岩盤内に入射した。

貯蔵空洞内での A E センサの埋設方法は、

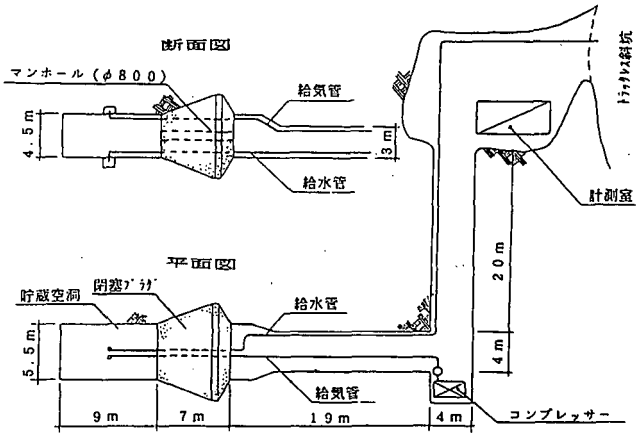


図-1 CAES実験施設概要図

加速度計を金属プレートに取付け、エポキシ樹脂で充填したものを深さ約 20 から 30 cm のボアホール底にセメントモルタルで固定した。また、エントリ坑道の 11、12、13、16、チャンネルは、矩形坑道の四隅から上下約 45 度で約 10 m 削孔したボアホールの底に、事前にモルタルでモールドした A E センサをセメントモルタルで埋設した。

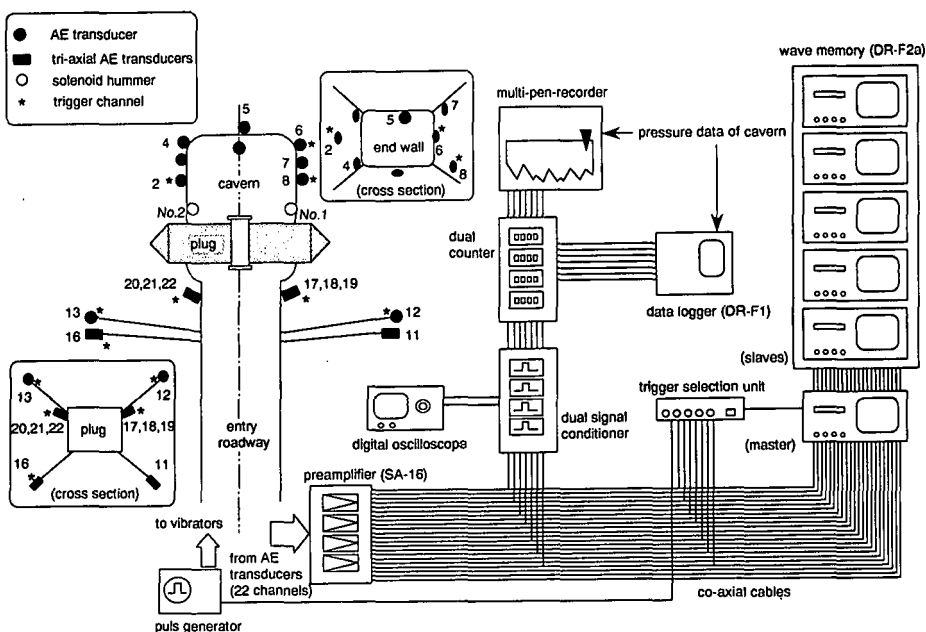


図-2 AE計測システム

4、実験結果および考察

4・1 起振機による疑似 A E 波

図-3 は、ソレノイド式の起振機による疑似 A E 波形の一例である。空洞内の水圧が約 3 MPa の場合である。空洞内に給水する前の実験結果では、波の到達しないセンサもあったが、満水状態になると全チャンネルに波が伝わるようになった。また、水圧が 0 と 3 MPa における疑似 A E 波形を拡大して観察した結果、空洞内のセンサが捉えた波形に違いは見られないものの、エントリ坑道の A E センサによる波形では、水圧の高いほうが約 70 μsec ほど遅れて波が到達していた。しかし、振幅値は水圧の高いほうが大きい結果となっていた。これは、空洞内の水圧上昇に伴い起振機近くのき裂が開口し、時間の遅れを生じたものと推察される。また、水圧が高いために伝播波のエネルギーロスが少なく、振幅値が高く現われたものと考えられる。

4・2 圧力上昇に伴う A E 活動

図-4 は、A E センサ No. 2 の近傍で発生した、比較的規模の大きな A E 波形の一例である。後続の周波数成分の高い波は、水中を伝わった反射波と考えられる。本計測で検出した A E 波の多くは規模が小さく、全てが図-3 に示した疑似 A E 波の最大振幅値よりも小さな波形であった。このことより、昇圧に伴い岩盤内で大規模な破壊は進行しなかったものと推察される。

図-5 は、A E センサ No. 6 による A E 活動と空洞内圧力の、経時変化を表した図である。それぞれ、(a) は最大圧

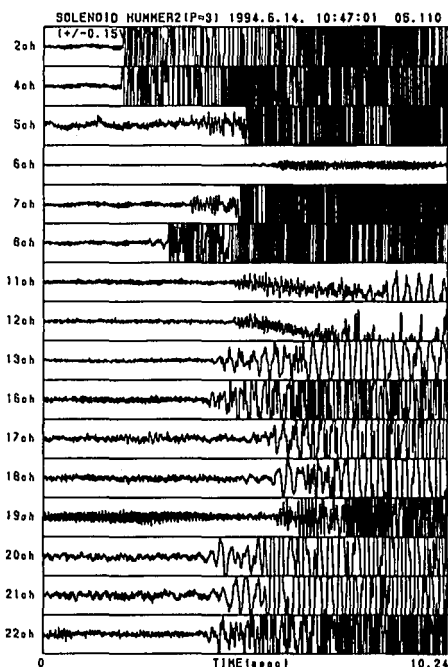


図-3 疑似 A E 波形の代表例

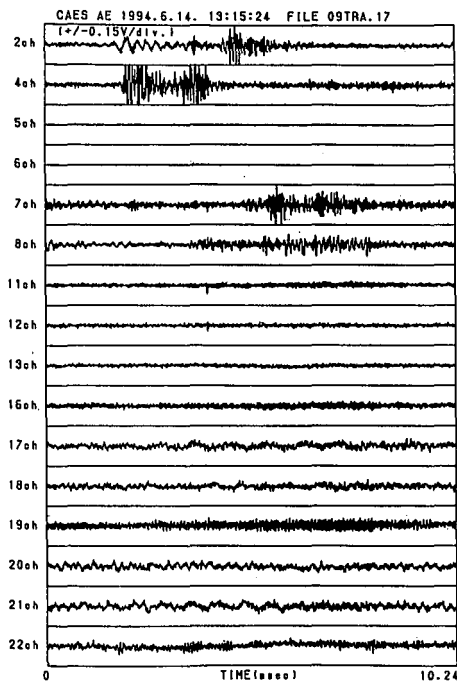


図-4 代表的な AE 波形

力が 3.2 MPa、(b) は 4.3 MPa、(c) は 4.5 MPa の結果である。いずれも実線が圧力変化を示し、破線は累積 AE カウント数、縦線は 10 秒当たりの AE カウントレートである。(a) では、比較的規模の小さな AE が発生している。(b) と (c) では、小さなものに加え大きな AE が増しているのがわかる。また、(b) においては約 3.2 MPa までほとんど AE の発生が見られず、(c) においては同様に内圧が約 4.3 MPa に達するまで AE が発生していない。こうした傾向は、他の AE センサによる結果でも同様であった。すなわち、ライニングも含め、空洞周辺岩盤から発生する AE のカイザー効果が確認された。

また、この空洞においては、本実験の前にも最大 2.9 MPa までの昇圧試験が行われており、その影響が図-5 (a) に現われていないことから、(a) で発生した AE は、ライニングのなじみによる規模の小さな AE と考えられる。

4・3 プラグ変位と AE 活動

本計測では AE 計測の他に、プラグと周辺岩盤との相対変位および絶対変位の計測も行なった。その結果、エントリ坑道から見て左側のプラグ周辺にき裂が卓越しているため、プラグの左側で最大 0.42 mm 程度の変位を生じた。図には示していないが、12 と 13 チャンネルの AE 活動の違いに、その結果が反映されていた。

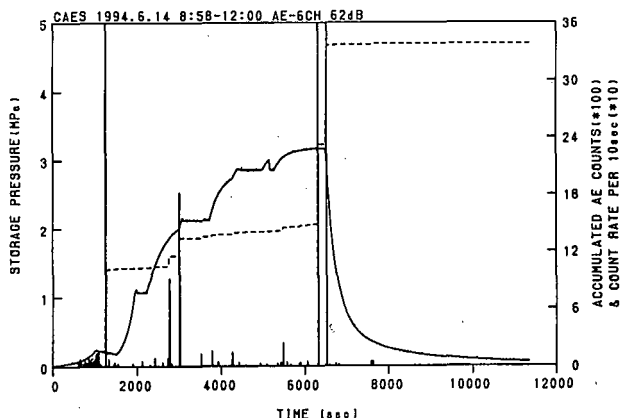


図-5 空洞内圧力と AE 活動の経時変化 (a)

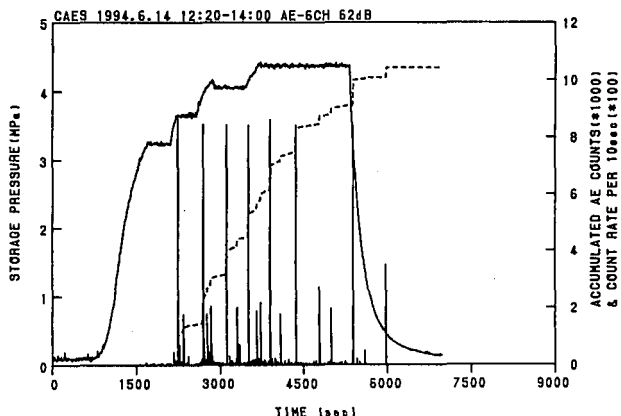


図-5 空洞内圧力と AE 活動の経時変化 (b)

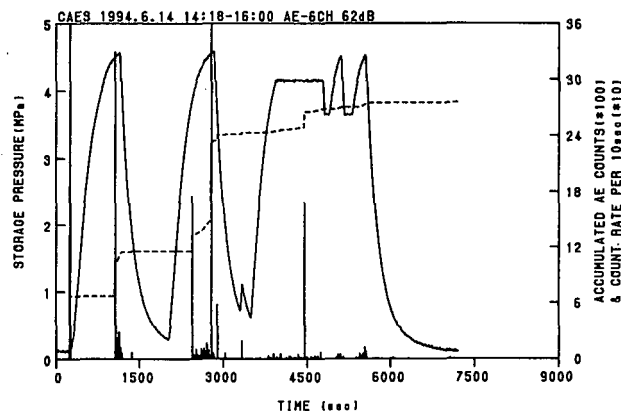


図-5 空洞内圧力と AE 活動の経時変化 (c)

すなわち、12チャンネルでは小さな規模のAEが多く、13チャンネルに比べて総カウント数も少なかった。これらのチャンネルで検出したAEの多くは、プラグとその周辺岩盤の挙動に対応しているものと推察される。

5、まとめ

本計測で得られたAEの規模は比較的小さく、空洞内圧力が低い場合には、その多くがライニングと岩盤との「なじみ」の過程で発生したものと推察される。また、ライニングを含む空洞周辺岩盤からのAEには、カイザー効果が見られた。このことより、空洞内圧力が繰り返し負荷されるような場合には、AE発生頻度を計測することにより岩盤あるいはプラグの安定性を評価できるものと考ええる。以上の結果より、AEの高精度な震源標定には問題があるものの、複数のAEセンサを空洞内に配置することにより、空洞周辺岩盤の安定性をAE計測で評価できる見通しを得た。今後は、AE波の波線追跡や水中伝播の過程を利用したAE震源標定法の開発を進める必要があろう。

最後に、CAESプロジェクトの共同研究者である(財)電力中央研究所、神岡鉱山(株)ならびに三井金属資源開発(株)の関係各位に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Crotagino, F. and P. Quast : Compressed-air storage caverns at Huntorf, Int. Symp. on Subsurface Space, pp.593-600, 1980
- [2] 板倉賢一、中島 巖、渡邊慶輝：着炭ぎわの立入掘進におけるAE活動の計測ーガス突出に伴うAE活動に関する研究(第1報)ー、日本鉱業会誌、104, 1206, pp.495-503, 1988
- [3] 中田雅夫、山地宏志、木山 保、山田文孝：閉塞プラグの繰り返し載荷時の挙動について、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.707-712, 1994