

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

畑 浩二^{1*}・宮崎 裕光²・小笠原 光雅²・前島 俊雄³・青木謙治⁴

¹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四丁目640）

²株式会社大林組 波方ブタンJV（〒799-2104 愛媛県今治市波方町宮崎甲147）

³独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310）

⁴京都大学大学院工学研究科（〒615-8540京都市西京区京都大学桂Cクラスター（C1-2号棟））

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

液化石油ガス（LPG）の安定供給を確保するため、愛媛県波方に450,000tの地下岩盤貯蔵方式基地を建設中である。基地は、ブタン/プロパン兼用貯槽150,000t、プロパン貯槽300,000tを地下150m以深に構築し、常温高压のLPGを地下水圧で封じ込める水封貯蔵方式を採用している。

本研究は、幅26m、高さ30、長さ430mのブタン/プロパン兼用貯槽掘削に際して、空洞周辺に生じる掘削損傷領域をAE法で評価したものである。AE計測には、①発生規模を考慮した震源同定法と②発生頻度、m値および重心周波数に着目した2つの方法を採用した。両測定結果から、非弾性領域を生じさせるようなゆるみは発生せず、適切に施工できたものと判断された。

Key Words : acoustic emission, underground cavern, AE-location, m-value, pre-dominant frequency

1. はじめに

日本列島は環太平洋造山帯に含まれることから、急峻な地形形状とともに非常に複雑な地質構造を有している。したがって、大局的にも局所的にも大陸の安定した地質と比較してきわめて不連続性の強い地盤となっていることが多い。このような地質構造の中に、トンネルをはじめとする地下空洞を掘削すると、発破や掘削後の応力再配分によって「ゆるみ」が生じるといわれている。空洞規模の大小に関わらず、ゆるみの範囲（以下、ゆるみ域と称する）を定量的に把握することは、空洞の安定性評価や支保規模の選定に際して必要不可欠な事項となる。そのため、従来から種々な計測法^(例えば①,②)でゆるみ域の推定が試行されてきた。

従来から用いられてきたひずみ計や変位計は、岩盤内の任意の1点に着目した1次元的な評価にならざるをえない。また、トモグラフィ的手法では2次元もしくは3次元の評価が可能であるが、精度向上のためには計測対象領域を囲むように受信センサを配置する必要があるため計測の制約条件が厳しい。このような現況からAE技術に着目したゆるみ域調査が地下発電所をはじめとして利用されている。その中で、石田ら^③は地下発電所におけるアーチおよびベンチ掘削時でAE計測を行い、ゆる

み域評価の可能性を示唆した。畑ら^{④,⑤}は、神岡鉱山と釜石鉱山の2箇所でも掘削に伴い発生するAEを計測し、モーメントテンソル解析^⑥からゆるみ現象の定量化を試みるとともに、発破薬量の違いによる岩盤損傷度合いの違いを明らかにした。一方、前島ら^⑦はAE発生頻度における規模別頻度分布の勾配（m値^⑧）と、観測波形の周波数解析結果からゆるみを評価できることを示した。

現在、液化石油ガス（以下LPGと略す）の安定供給確保も目指し、年間輸入量の約30日分に相当する1,500,000tを国家備蓄する計画にある。その内、愛媛県波方基地では地下岩盤タンク方式を採用し、450,000tの備蓄が可能な地下備蓄基地を鋭意建設中である。本研究では、従来のAE研究成果を踏まえつつ、新たに検討したAE発生規模を考慮した震源分布、m値および重心周波数の推移の観点から、貯槽掘削時におけるゆるみ調査状況を述べる。

2. 波方LPGプロジェクトの概要と地質構造

LPG地下備蓄は、北欧やアメリカ、韓国、中国等に多数存在するが、日本では初めての工事である。現在操業中の最大貯槽規模は、韓国仁川基地の350,000m³で（幅26m×高さ16m）である。一方、波方基地の断面は幅

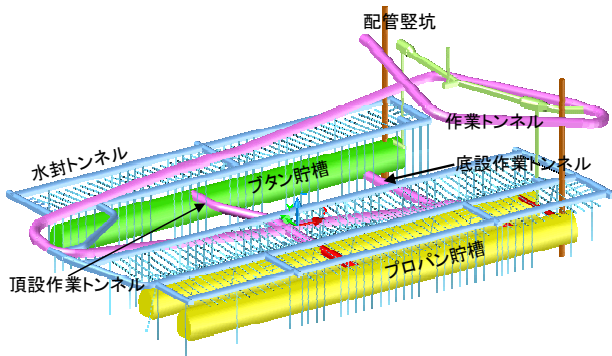


図-1 貯槽レイアウト

26m×高さ30mあり、650m²の卵形形状をしている。この内、ブタン/プロパン兼用貯槽は長さ430m（以下、ブタン貯槽と略す）、プロパン貯槽は長さ480mであり、世界でも最大規模の燃料地下貯蔵施設となっている。図-1に貯槽をはじめとする水封坑道、竖坑および作業坑道のレイアウトを示す。

貯槽の設置深度は、貯槽天端位置でEL-150m、貯槽底盤でEL-180mであり、貯蔵するLPGの貯蔵圧力と水封水圧の関係から十分な気密性・液密性が確保できる深度に設置している。また、貯槽天端から25m 上部（EL-125m）に貯槽を取り囲むように水封トンネルを設置し、水平および鉛直の水封ボーリングから地下水を加圧供給している。大規模岩盤空洞建設にあたっては、人工的に地下水圧をかけた状態での掘削となる。このような大規模空洞では、地質や初期地圧など様々な不確実性が伴うことから、掘削に際して、岩盤の挙動を計測し、設計・施工にフィードバックする情報化施工が必要不可欠である。この情報化施工では、空洞の安定を確保しつつ、いかに合理的な空洞を建設するかが大きな課題となっている。そのため、外力変化に対して材料内部で生じる微小破壊現象をリアルタイムに検知できるAE計測技術は、情報化施工ツールとして大いに期待されている。

波方基地は愛媛県北部の高縄半島先端部から西方に伸びる東西約3km、南北0.8kmの岬に位置している。ブタン貯槽はこの岬をほぼ横断する北東-南西方向に位置し、長さ430mのうち北東側約130mは海域下（現在は埋め立て地）にある。土被りは最大220m、最小143m（埋め土を含めると150m）である。図-2に示すように基地の南側約290m区間に波方花崗岩（普通の白っぽい花崗岩で粗粒）、北側約140m区間に高縄花崗閃緑岩（やや黒っぽく、黒雲母が多く石英が少ない花崗岩で細粒状態）と呼ばれる花崗岩類が分布している。両者の岩種境界は完全に密着し、不規則な形態を示している。また、岩級分布は、波方花崗岩が分布する南側区間では大部分Hv級（亀裂間隔40cm以上）であるが、北側の高縄花崗閃緑岩が分布する区間では南側に比べH級（亀裂間隔40～20cm）が多くなる。さらに、北端部30m区間ではH級主

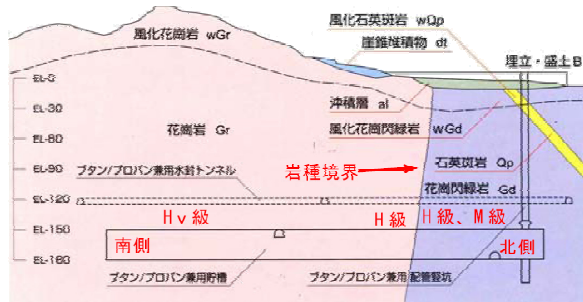


図-2 貯槽周辺の岩盤

体となりM級（亀裂間隔20～5cm）が1/3程度の面積を占めている。

3. AEセンサ設置位置および計測対象領域

AEセンサ設置位置は、図-1に示す貯槽レイアウトにおいてブタン貯槽と頂設作業トンネルとの交点を基点に鉛直下部のボーリング孔内である。計測レイアウトの詳細を図-3に示す。

今回実施したAE計測法は2種類である。一つは、発生規模を考慮した震源分布の評価（以下、AE震源位置評定法と称す）であり、他方は、m値および卓越周波数の推移による評価（以下、AE発生頻度評定法と称す）である。いずれも、AEセンサは頂設作業トンネル底盤から下方に試錐したボーリング孔内に設置した。図中、AE震源位置評定法では、赤丸で示したように1本のボーリング孔に上下2個のAEセンサを合計4個配置した。AE発生頻度評定法では、青丸で示したように1本のボーリング孔下端に、かつ空洞壁面から放射直線になるようにAEセンサを配置した。センサ設置周辺にはき裂が確認されたが全て開口幅0mmの密着型であった。

計測対象領域は、AEセンサ設置位置と空洞周辺再配分応力の複雑さを勘案し、頂設作業トンネルと本体貯槽との取合い付近、ならびに最下層までの掘削範囲とした。

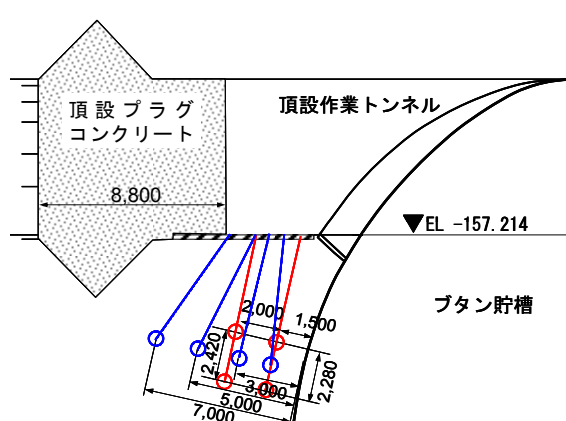


図-3 AE計測レイアウト

4. AE計測装置の仕様

2種類の試験法共に、 piezo式 AE センサを使用した。同センサは、多くの室内 AE 試験や屋外 AE 試験で使用されている実績がある。ただし、室内試験に比べてより広い範囲の計測が必要であること、また岩盤中の水封水圧の影響を受けることから、比較的低周波数対応でかつ防水機能を有したものとした。

AE 震源位置評定法では、神岡鉱山と釜石鉱山で使用実績が有る共振周波数 30kHz の AE センサとプリアンプを防水型の金属筐体 (図-4 参照) に格納し、ボーリング孔内の所定の位置に固定して使用した。すなわち、1本のボーリング孔内に、この金属筐体を上下2個設置したものである。この装置は、設置、撤去が簡単に行えるため、何らかの計測トラブルへの対応や、センサ類の再利用が可能な特徴を有する。

一方、AE 発生頻度評定法では、地下発電所空洞での計測実績がある共振周波数 30kHz の専用 AE センサとプリアンプである。これらを事前にモルタルで固化 (図-5 参照) し、ボーリング孔内の所定の位置に設置した後さらにモルタル注入固化したものである。すなわち前者は回収型であり、後者は埋設型と言える。



図-4 AE震源位置評定法におけるAEセンサおよび設置筐体



図-5 AE発生頻度評定法におけるAEセンサおよび設置モルタル固化体

5. AE計測方法およびゆりみ評価方法

上述したように、本研究では2種類の AE 計測・評価法を採用した。主たる目的は、空洞掘削におけるゆりみの評価であるが、異なる2方法を試行することで AE 法を適用する場合の適用性を確認すると共に、運用中における維持管理段階で AE 法が利用できるか否か、できるとしたらどのような評価法が適するのかを検討することも狙いとしてある。以下、これら2方法による計測方法の特徴および評価方法について述べる。

(1) AE震源位置評定法

図-3 に示すように、4個の AE センサ (図中赤丸) の中心点を基準に半径 2~3m を監視領域と考える。本方法では、地震の震源位置決定と同様に4個の AE センサへの到達時間差を計測することで、AE の発生位置を同定する。この場合、監視領域周辺岩盤における弾性波伝播速度は等方的であると仮定する。当該地点の岩盤弾性波速度は、図-3 に示す AE 発生頻度評定法センサ設置位置 (青丸参照) の空洞壁面最近接および最深部に弾性波受信センサを併設しており、得られた弾性波速度を震源位置評定に利用した。

また、計測される AE 規模はセンサへの入力値であるため発生規模とは異なる。そこで、図-6 に示す当該岩盤における弾性波速度の減衰特性からセンサ入力値を補

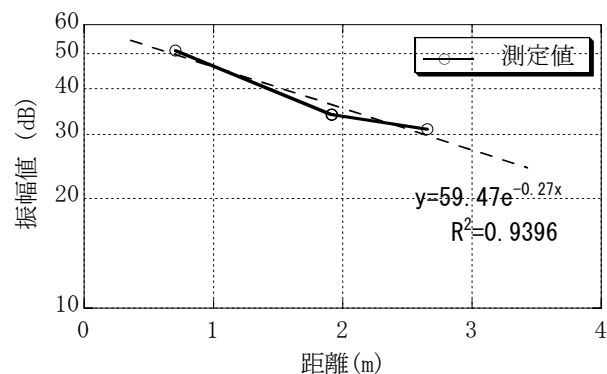


図-6 弾性波速度減衰特性の一例

正して発生源での AE 規模を予測する。さらに、予想された AE 規模が当該岩盤にどのような影響を及ぼすのかを AE センサ埋設位置から採取した岩石を用いた AE 試験 (図-7 参照) から判断し、振幅値が 80dB を超えると非弾性挙動が明確になることから、震源同定された AE 波動のゆりみ評価に繋げることにした。

本来、震源位置の規模を同定する場合、計測系および伝播経路での波動減衰に加えモード変換が考慮されるべ

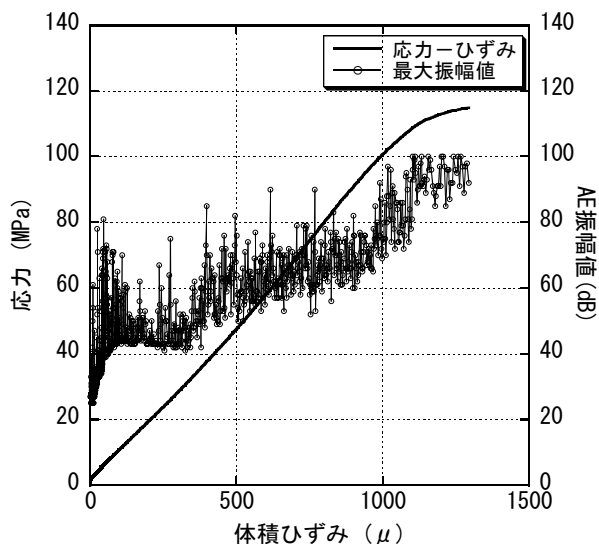


図-7 岩石AE試験結果（応力-ひずみ-振幅）

きであるが、原位置での計測では複雑かつ煩雑になるため、ここでは単純に、推定した震源位置からAEセンサまでの波動伝播は直線とし、振幅の距離減衰のみに着目した。

(2) AE発生頻度評定法

図-3に示すように、AEセンサを4個直列状に配置し（図中青丸）、それぞれのセンサで受振したAEの個数、振幅値および波形（周波数）から亀裂の集中発生する領域を把握し、ゆるみ域を特定する。

本評価法によるゆるみの判定には、試験坑道および地下水観測井から採取した岩石を用いて行った花崗岩の三軸圧縮破壊過程におけるm値および周波数の変動特性（図-8参照）を利用する。具体的には、原位置で計測されたAEをm値と周波数で整理し、以下の基準によりゆるみを判断する。

- ① m値が1.5を下回る。
- ② 平均周波数が低下する。

6. AE計測結果とゆるみ評価

得られたAE計測データから、以下に示す2方法について解析を実施し、得られた結果を以下に示す。

(1) AE震源位置評定法

図-7に示す岩石試験時のAE発生特性から、発生するAEが80dBを連続して越えると体積ひずみは直線からはずれ、かつAE発生頻度は急増することがわかった。したがって、ゆるみを「ダイラタンシーの発現に伴うせん断抵抗の変化」と仮定すると、ゆるみが卓越する領域では80dBを超えるAE発生が顕著になるものと考えられる。

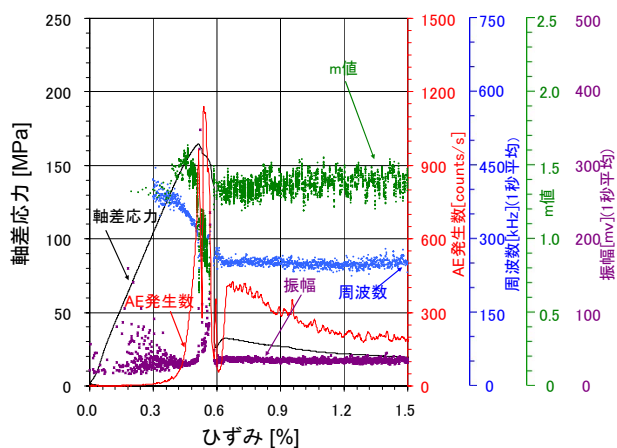


図-8 岩石AE試験結果（応力-ひずみ-m値、周波数）

そこで、各掘削段階で震源位置評定した結果に、図-6に示す距離減衰による補正を加え震源位置のAE規模を算定した。位置評定ならびに規模を示したのが図-9である。図中、80dB未滿を「○」で、80dB以上を「○」で示した。その結果、いずれの掘削段階においても80dBを越えるAEは数点しか感知されず、かつ監視領域内で連続した発生領域となっていないことが判明した。したがって、ダイラタンシーの発現に伴うせん断抵抗変化に起因したAE発生は認められないことから、空洞周辺岩盤は弾性範囲内の挙動であり、ゆるみ（掘削による岩盤損傷）は生じていないものと推察された。

(2) AE発生頻度評定法

各掘削段階において、計測されたAEの累積数を図-10に示す。同図には、上述のAE震源位置評定法で計測した諸量も合わせて記載した。便宜上、壁面から岩盤深部に向かってAEセンサ番号をP3、P4、P5、P6とする。また、参考値として震源位置評定用AEセンサの番号をP1-1、P1-2、P2-1、P2-2とする。

P3~P6において、特に第2ベンチ土平掘削時におけるP5のAE発生頻度が壁面に近いP3、P4より大きくなる特徴が明らかになった。P5データの内、AE発生頻度が急上昇するのは「第2ベンチ土下半内側」掘削時の時であった。その前後の掘削段階でAE発生頻度は多くないことから、潜在亀裂面が動くような現象が生じたとは考え難く、応力集中による微小亀裂の発生が起因しているものと推察される。一方、P1、P2では、わずかながら壁面に近い方がAE発生頻度も大きいことから、P3、P4のAE発生挙動と整合している。

発生頻度評価法から、いずれの掘削段階でもm値は2より大きくなった。また、平均周波数（重心周波数全データの平均値）はいずれの範囲においても60kHzより大きくなり低下する傾向は得られなかった。したがって、ゆるみ（掘削による岩盤損傷）は生じていないものと推

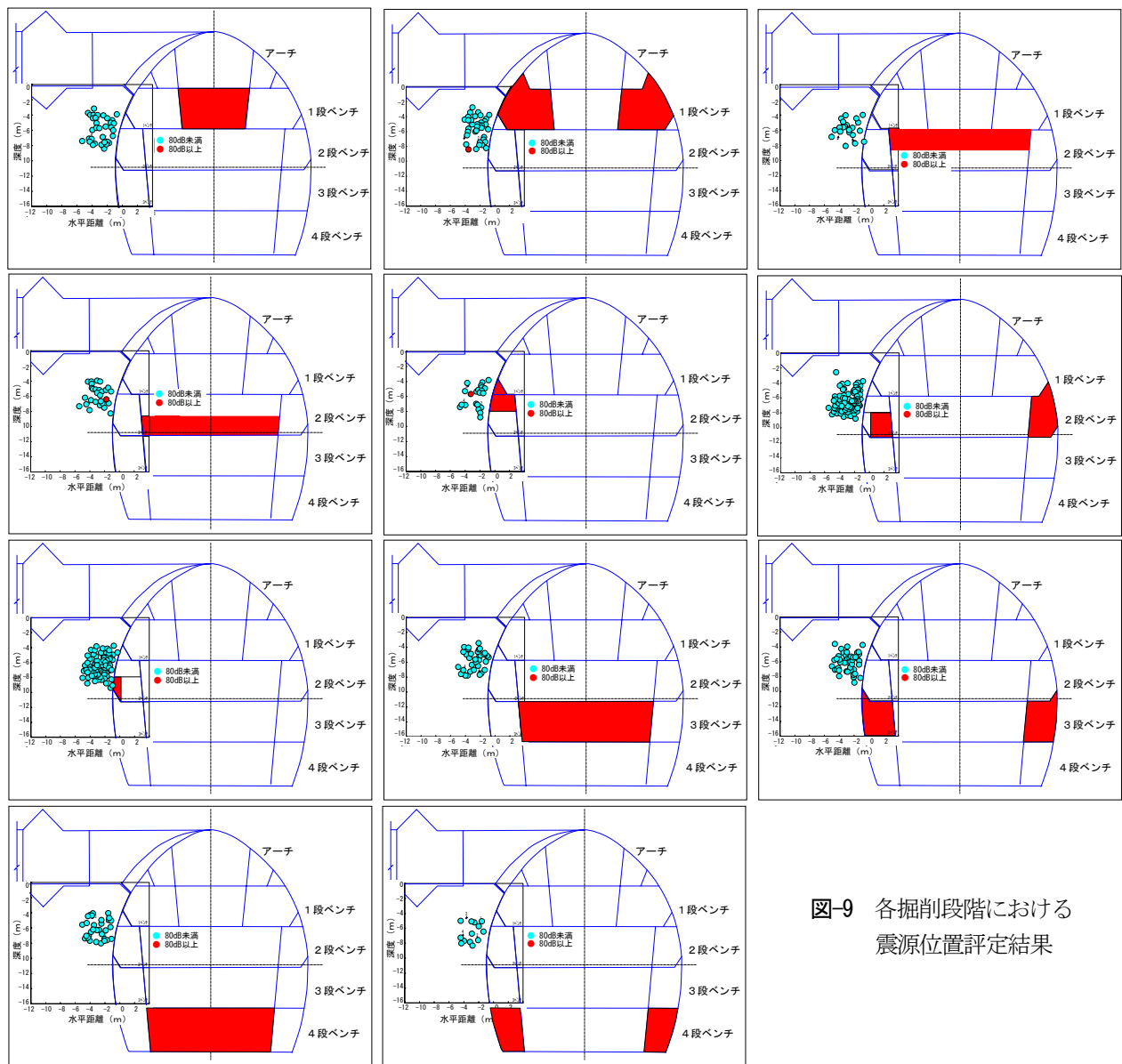


図-9 各掘削段階における震源位置評定結果

察される。ただし、AE発生頻度における $P3(P1) > P4(P2) < P5 > P6$ なる特徴を得たが、特に、壁面から離れた $P5$ で AE発生頻度が大きくなる特徴の原因を解明するには至っていない。

以上の結果は、上述の震源位置評定法による評価と調和的である。2種類の異なる計測評価で、当該地点の掘削により周辺地山には大きな損傷は及ぼされなかったと結論付けられた。

7. まとめ

掘削損傷を定量的に評価し施工管理に役立たせることを目的にAE計測を行った結果、AEは多数発生するもののほとんど弾性挙動範囲内の規模と考えられること、m

値および重心周波数は低下しないことが判明した。したがって、異なる2種類のAE計測法ともにゆるみは生じさせていないという同様の結論に至った。大空洞であるブタン貯槽掘削に際して、空洞損傷を起こさないように最善の注意を払い施工を行ったが、AEの観点から施工の妥当性が検討できたものと考えられる。

それぞれの方法には一長一短がある。震源同定のためには監視を目指す領域を囲むようにAEセンサを配置する必要があるため、センサ数は発生頻度評定法に比べて多くなる可能性がある。しかし、発生頻度評定法ではゆるみの空間的位置を明確に評定することは難しく、震源位置評定に比べて大雑把な評価になるものと考えられる。したがって、計測・評価の目的を明確にすることで、適切な計測・評価方法を提案することが可能になるものと期待できる。

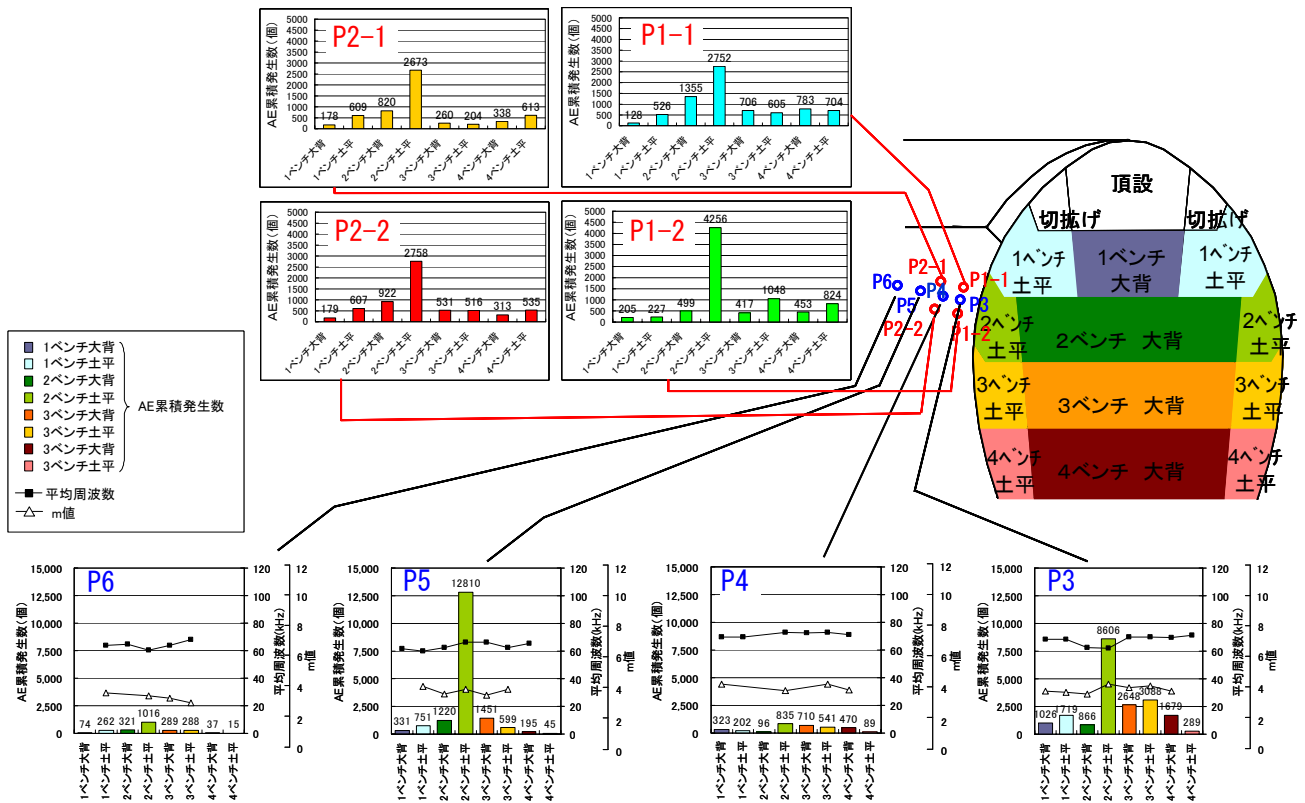


図-10 各掘削段階における発生頻度評価結果

参考文献

- 1) 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, No.474, pp.324~328, 1993.
- 2) 金田義行, 桑原 徹: 減衰トモグラフィの応用実験 — トンネル掘削における緩み域の検知 —, 物理探査学会第 91 回学術講演会講演論文集, pp.96~99, 1994.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, N0.715/III-60, pp.251~262, 2002.
- 6) Ohtsu, M.: Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of Acoustic Emission Source: Application to in Situ Hydrofracturing Test, Journal of Geophysical Research, Vol.96, No.B4, pp.6211~6221, 1991.
- 7) 前島俊雄, 森岡宏之, 森 孝之, 青木謙治: 神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価, 第 31 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.256~260, 2001.
- 8) 石本巳四雄, 飯田波事: 微動計による地震観測 (一), 震研彙報, Vol.17, pp.443~478, 1938.

EVALUATION OF EXCAVATED DAMAGE ZONE IN THE NAMIKATA LPG UNDERGROUND STORAGE CAVERN BY AE METHOD

Koji HATA, Hiromitsu MIYAZAKI, Mitsumasa OGASAWARA, Toshio MAEJIMA and Kenji AOKI

The underground bedrock base of the size of 450,000t is under construction in the Ehime Prefecture Namikata because it supplies liquefied natural gas (LPG) with stability it. The size of the butane/propane cavern is 150,000t, and propane cavern is 300,000t.

This study is to evaluate of excavated damage zone(EDZ) by the AE method while excavating. Two methods were adopted in the AE measurement. One is source location and the other is m-value and frequency analysis. As a result of the AE measurement, It was possible to excavate appropriately without EDZ.