

岩盤斜面崩落後の不安定岩塊のAE計測

ACOUSTIC EMISSION MONITORING FOR AN UNSTABLE ROCK MASS LEFT AFTER ROCK BLOCK FAILURE

石田 毅*・師井 努**・田仲正弘***・塩谷智基****

Tsuyoshi ISHIDA, Tsutomu MOROI, Masahiro TANAKA, Tomoki SHIOTANI

Last August, in Yamaguchi prefecture, a rock slope of 3,300 m³ failed and covered a road along the slope. Since an unstable rock mass, measuring 20m high, 7m thick and 10m wide, was left on the slope, we started to monitor AE (acoustic emission) with sensors set on a surface of the rock mass. By distinguish AE signals from noises caused with rainfall and drilling holes for blasting, we found that AE activity increased after blasting close to the rock mass made it much unstable. The results indicate that AE monitoring is effective to predict rock block failure.

Key Words: acoustic emission, *in-situ* monitoring, rock slope, rock block failure, granite

1. はじめに

1.1 万m³の岩盤がコンクリートライニングを押しつぶしてトンネル内に崩落し20名の犠牲者を出した、1996年2月10日の北海道豊浜トンネルの事故例に見られるように、岩盤崩落の予測と監視手法の開発は、社会的要請の高い技術開発課題である。岩盤崩落の監視手法として、最近マイクロ波を用いた微小変位測定法¹⁾や落石検知法²⁾、タイムラズビデオを用いた視覚的な監視法³⁾、ケーブルセンサーによる振動測定法³⁾や光ファイバーによるひずみ測定法⁴⁾など各種の新たな測定法が提案されているが、それぞれ長所と問題点を有しており、測定実績の蓄積と現場に即した測定上の工夫が今後の課題と思われる。AE (Acoustic Emission, 岩盤の微小な破壊に伴う弾性波動の放射) 測定は、地下深部の岩盤破壊に関しては山はねなどの測定手法としてかなりの実績があり⁵⁾、岩盤崩落の測定手法としても有望と思われるが、斜面に対する測定実績は必ずしも十分ではなく、他の手法と同様、測定事例の蓄積と手法の改善が今後の研究課題と思われる。

1999年8月27日、山口県内の花崗岩採石場の跡地で幅40mにわたり約3,300m³の規模の岩盤崩落が発生し、崩落岩石が斜面下部の県道を28mにわたって閉塞する事故が発生した⁶⁾。この6日前の8月21日に小崩落があり、この直後に山口県の適切な判断により県道を通行止めとしたため、災害は未然に防止された。しかし、崩落後の斜面に不安定な岩塊が残り、復旧工事の安全確保のため、この岩塊の監視を行う必要が生じた。大崩落の前日の8月26日、小崩落後の斜面形状を測定していた技術者が岩盤の「きしむ音」を聞いて異常を感じ、作業を取りやめていたという事実があり、とくにこの現場の岩盤崩落の監視にはAEの測定が有効と思われた。そこで、工事に先立つ1999年12月27日から、不安定岩塊が発破で完全に除去される2日前の2000年5月16日までの約5ヶ月間にわたってAEの測定を行った。

* 正会員 工学博士 山口大学 工学部 社会建設工学科

** 山口県 土木建築部 道路整備課 防災安全係

*** 正会員 (株)日本パブリック 技術開発部

**** 正会員 博士(学術) 飛島建設(株) 技術研究所 地盤耐震研究室

2. AE測定の方法

写真-1は、測定対象とした高さ20m、厚さ7m、幅（紙面に垂直方向）10mの不安定岩塊であり、写真中央部に見える技術者の身長と比較すると岩塊の大きさが実感できる。AEセンサーは、この不安定岩塊下部の推定される主亀裂に沿い、この亀裂の直下1m以内の岩盤表面に設置した。3つの丸印の中心がAEセンサーの設置位置である。今回の測定では、不安定岩塊の崩落の監視を目的としているため、通常のAE測定で対象とする亀裂の進展に伴う微小な破壊音だけではなく、亀裂に沿ったすべりに伴うわずかな摩擦音も測定対象と考えた。写真-2はコンクリート・ブロックを用いて、AEセンサーの設置状態を示したものである。AEセンサーを容易に回収できるよう、まず鉄板をコンクリート・ポンドで岩盤に接着し、次に加速度型のAEセンサーを鉄板に接着している。

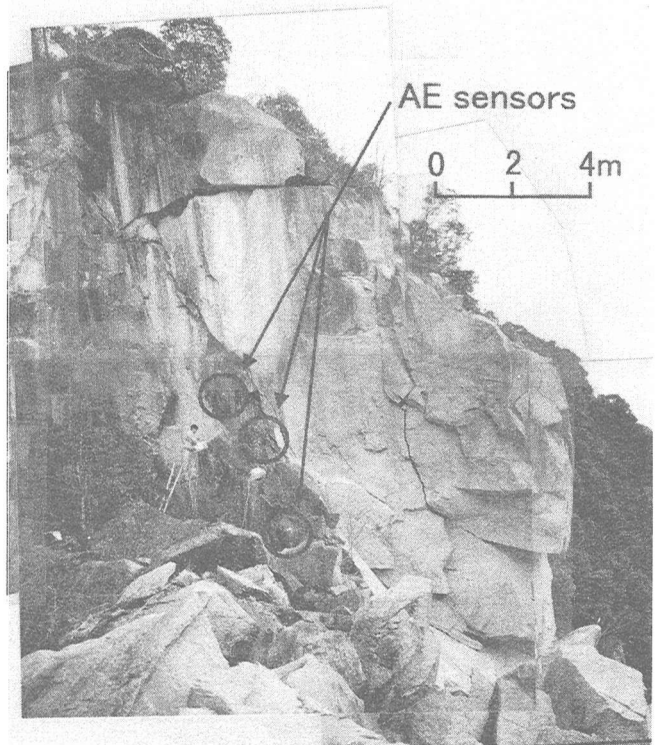


写真-1 測定対象の不安定岩塊とAEセンサーの設置位置

測定系統図を図-1に示す。センサーには固有周波数約30kHzのティアック電子計測(株)製SA

707IS 圧電型加速度計を使用した。共振型センサーとしては使用せず、特性が平坦な12kHz以下の周波数範囲を測定対象とした。プリアンプには、同社製SA-610/H型圧電型トランスデューサー用アンプを用いた。このセンサーとプリアンプの組み合わせにより、12kHz以下の周波数範囲で、1V/G±15%の感度が得られる。プリアンプをセンサーの近傍3m以内に設置し、プリアンプで増幅した信号を200mの長さのケーブルで斜面下の測定小屋まで導いた。

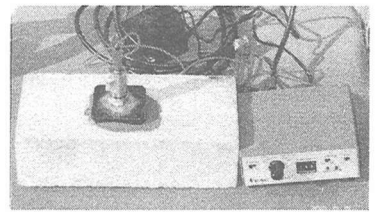


写真-2 AEセンサーとプリアンプ

測定小屋に導いた信号は、シグナル・コンディショナーで30dB増幅した後レートカウンタに導き、ディスクリベルを1Vに設定して、5分毎のAE発生数をリングダウン法でカウントした。また、シグナル・コンディショナーで増幅した信号を、チャンネル毎に電圧分解能8ビット、記録長2キロワードの能力を有する12チャンネルのA/D変換機を用いてサンプリング・タイム2μsでA/D変換して、波形データをパーソナル・コンピュータに収録した。測定小屋に設置したこれらの測定システムは、過去に報告した測定システム⁷⁾と基本的に同じである。

3. 測定結果と雨との関係

図-2は、工事が着手される以前の2000年2月2日～10日の9日間に、写真-1の最上部のセンサーで測定された1時間毎のAE発生数であり、縦軸は対数で示している。図-3は現場から約8km離れた山口県庁近傍の観測点で測定されたアメダスの雨量データである。図-

2と図-3を比較すると、2月8日のAEの発生と降雨は対応しているように思われる。雨滴が岩盤表面をたたく振動は深さ2～3mまで達し、AE測定に対するノイズとなることが指摘されている⁸⁾。また、今回のセンサーの設置個

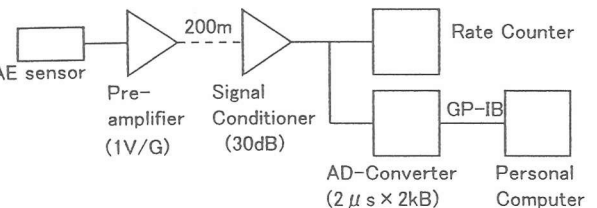


図-1 AE測定系統図

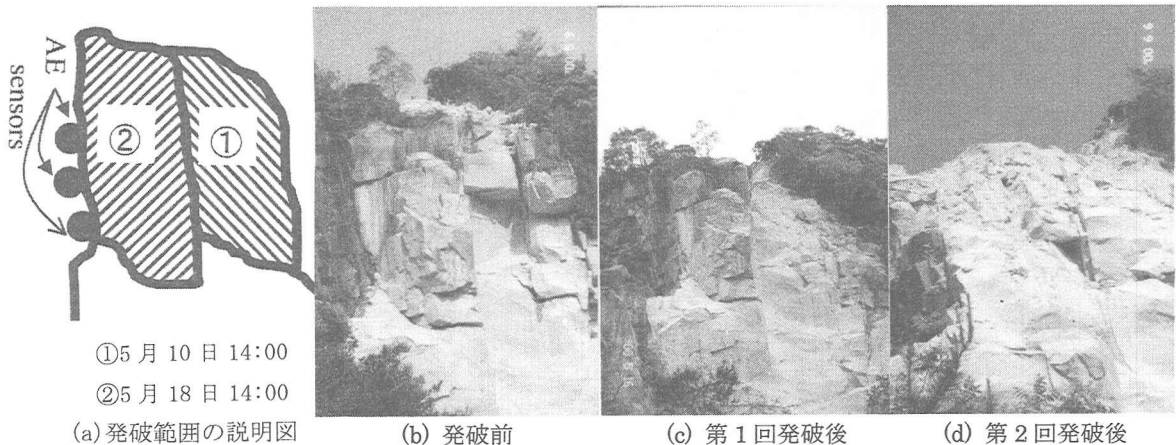


写真-3 2回の発破による不安定岩塊の除去とセンサー位置

所には植生があり、降雨後の周辺の草木からの雨だれの音などもノイズ源となる可能性がある。従って、2月8日に測定されたAEの発生は、雨によるこのようなノイズと思われる。一方、2月10日のAEの発生は、雨量データと対応していないことから、岩盤の変位に起因したAEである可能性が高い。また、2月6日には、雨が降っているのにAEの発生が見られない。センサーは北側に面したほぼ鉛直な壁面に設置しており、降雨時に北風が強いと雨滴が岩盤をたたきAEのノイズとなるが、南風だと岩の陰で雨の影響を受けない可能性がある。そこで、アメダス・データで2月6日と8日の降雨時の風向・風速を調べたが、両者に顕著な相違は認められなかった。AEの測定位置はアメダスの観測点から約8km離れていること、さらに山間部のため場所によって風向きが複雑に変化することが、この降雨時の風速・風向でAEデータを説明できない原因と考えられる。

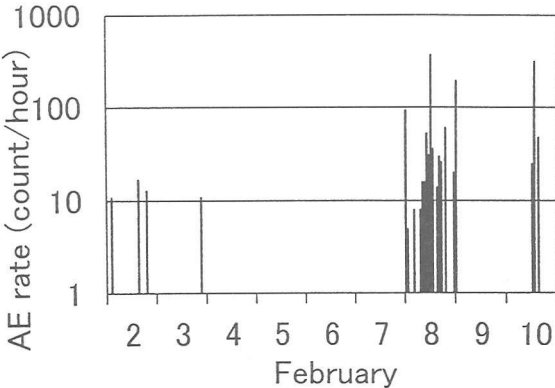


図-2 2月上旬(工事開始前)のAE発生頻度

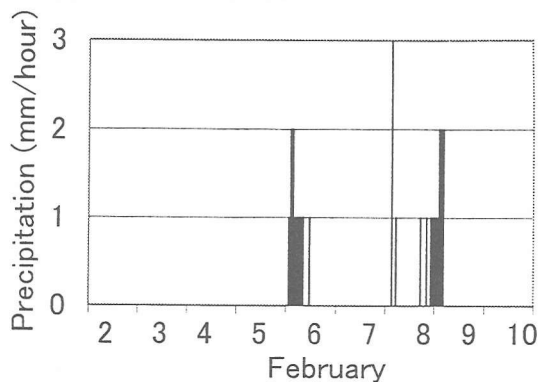


図-3 2月上旬(工事開始前)の降水量

4. 発破後のAE発生状況

写真-3に示すように、測定対象としていた不安定岩塊は、5月10日14時の第1回の発破によって、センサー設置面から遠い方の半分が除去された。また、5月18日14時にはセンサー設置面を含む残りの半分が、第2回の発破により除去された。AE測定は、第2回の発破で岩塊が完全に除去される2日前の5月16日まで継続して行った。第1回、第2回の破砕量はそれぞれ1,300m³、1,500m³である。

図-4は、4月26日～5月15日の20日間の5分間毎のAE発生数であり、縦軸は対数で示している。図より、第1回の発破以後AEの発生が多くなっており、一見観測対象としていた岩塊が発破によって不安定になった結果と見受けられる。つまり、5月10日水曜日の発破直後の高い発生頻度は、発破に伴う岩盤の変形に起因したAEと思われる。一方5月11日以降は、第1回の発破で残った岩塊を第2回の発破で除去するため、センサー近傍の岩盤にパーカッ

ションで発破孔が穿孔され、その振動が測定された結果と考えられ、第1回の発破以前も同様の作業ノイズが測定されている可能性がある。

例えば図-5は、5月15日月曜日の1日間のAE発生頻度を示しているが、作業時間に対応する8時から17時までに多くの「AE」が発生していることがわかる。また昼休みの12時になると「AE」の発生が停止しているのも特徴的である。作業内容の時刻を追った詳細な記録は残されていないため推測するしかないが、13時から14時半の間は、何らかの事情で、穿孔が行われなかったものと思われる。

ここでもう一度図-4を見ると、14日だけは、1日の左端つまり早朝には岩盤からのAEと思われる発生頻度の記録がみられるが、昼間には発生がみられない。これは、14日が日曜日で穿孔作業が行われなかったためである。これに対し、14日を除く11日木曜日～15日土曜日までは、グラフの1日の中央、つまり作業の行われる昼間に「AE」の発生がみられることがわかる。これは、14日日曜日を除くこれらの期間、毎日、発破孔の穿孔作業が行われたことで説明できる。

そこでこの発破孔穿孔による作業ノイズを除去するため、8時から20時までのデータをすべて削除して整理した結果を図-6に示す。この図では、1日のグラフで朝の7時55分～8時00分の5分間の発生数を示す棒グラフの隣に、夜の20時00分～20時05分の5分間の発生数が示されることになり、この点注意を要するが、この図をみると、第1回の発破以降、AEの発生頻度の増大傾向が認められる。

図-7は、この期間のアメダスの雨量データである。このグラフは、朝8時から夕方20時まで作業時間も含む全日の1時間毎の雨量データである。さて、図-6のグラフ左端の26日に9個のAEの発生が記録された時刻を調べると朝7時48～53分の5分間であり、これは図7で1時間当りの最大雨量7mmを記録した26日朝7時～8時に一致する。しかし、図-7でこれ以外の降雨が記録された27日、30日、11日、13日には、図-6にAEの発生が認められない。つまり26日以外は、降雨のない日にAEの発生が記録されており、図-6に見られる第1回の発破以降AEの発生頻度が増大する傾向は、降雨によるノイズの影響を受けていないことがわかる。

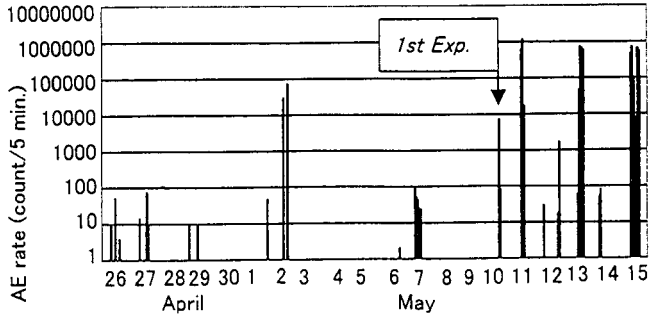


図-4 第1回発破前後20日間のAE発生頻度

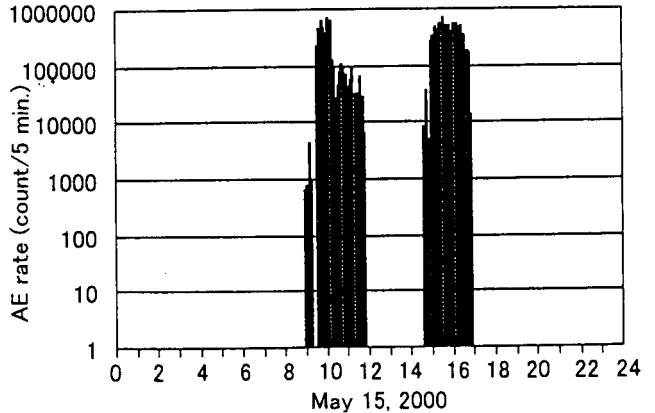


図-5 5月15日月曜日1日間のAE発生頻度

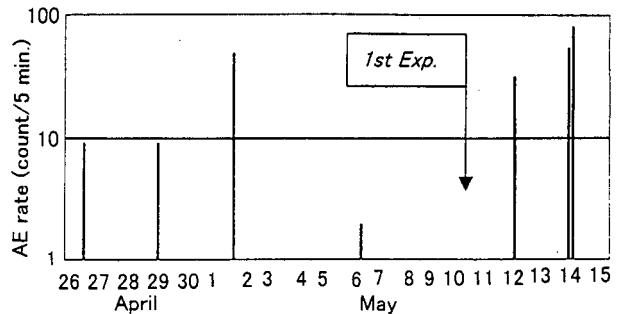


図-6 20:00～8:00だけのデータで整理したAE発生頻度

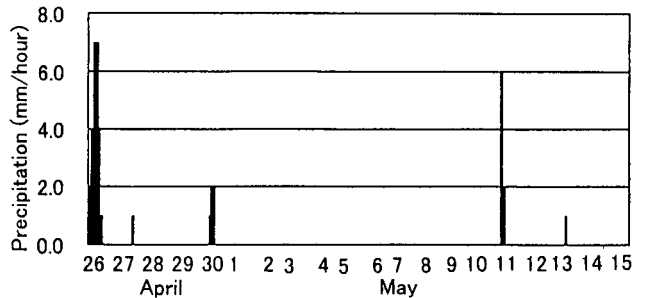


図-7 第1回発破前後20日間の降水量

5. 考察とまとめ

(1) 今回の測定では予算的な制約から、センサーを岩盤表面に設置して AE 測定を行った。岩盤表面での測定は、センサー設置用のボーリング孔を必要とせず、センサーが容易に設置できかつ回収でき経済的である。しかし、岩盤表面にセンサーを設置した AE 測定では、雨がノイズ源となり、データの分析を行う上で支障を生じることがわかった。

(2) 測定対象とした不安定岩塊を除去するための発破孔の穿孔が大きなノイズ源となった。このため、作業のない夜のデータだけを分析したところ、第1回の発破以降 AE の発生頻度が増大する傾向が認められた。このことは、発破振動による岩塊の不安定化を示していると思われた。

(3) 第1回の発破前後の20日間には、レーザー測距器による測定でこの岩塊に50~60mmの変位の発生が記録されている¹⁰⁾。AEの発生はこの変位の記録と顕著な対応は認められないが、調和的である。

(4) AE波形の測定については、発破孔の穿孔ノイズにより波形記録用のハードディスクが満杯となり、気づかないうちに測定が停止していることが頻繁に生じた。これについては、遠隔監視によりデータの収録状態を監視する方法を確立するとともに、AE波形とノイズをソフトで自動識別して不要データを棄却する方法⁹⁾を用いることでかなり改善されると思われるので、今後これらの方法を取り入れていきたいと考えている。

(5) この不安定岩塊の除去後、さらに斜面上部の脆弱箇所を切り取る工事が進められた。この工事に際しては、本論文に示した測定結果の反省に基づき、AEセンサーをボーリング孔内に埋設して雨などによるノイズの減少をはかり、良質なデータの取得を行っている。また、センサーの近傍に埋設した発振子を利用して一定期間ごとにセンサーの動作確認を行うとともに、1時間に1度の通信を行って遠隔でのデータ監視を行い、工事の安全管理と道路の安全監視に実務的に利用している。この結果については、次の機会に報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 三宅克行・中田正弘・玉木茂・市川商二郎：マイクロ波を利用した岩盤斜面危険予知システムの検証，第30回土木学会岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 193-197，2000。
- 2) 石田毅，西川直志，北村晴夫：最近のトピック，斜面の崩落監視の新技术（「見る」と「聞く」の機械化・データ化），資源・素材学会誌，第116巻，第7号，pp. 642-643，2000。
- 3) 小川健太・氏平増之・鈴木新吾・細谷昭悟・石井文明・血田滋：振動検出用ケーブルセンサーの出力特性と応用に関する研究，応用地質，第39巻，第4号，pp. 380-390，1998。
- 4) 堀口常雄・倉嶋利雄・立田光廣：ブリルアン分光による光ファイバのひずみ分布測定，電子情報通信学会論文誌，B1，Vol. J73-B-1，No. 2，pp. 144-152，1990。
- 5) 石田毅：岩盤破壊音の科学，近未来社，1999，p. 213。
- 6) 北村晴夫，西川直志，石田毅，古屋憲二：山口市鳴滝地区岩盤崩落の地質構造と発生機構の検討，第31回土木学会岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集（印刷中）
- 7) 石田毅・北野晃一・木下直人・若林成樹：AE測定による原位置花崗岩加熱時挙動の観測，土木学会論文集，第424号/Ⅲ-14，pp. 187-196，1990。
- 8) 塩谷智基，門間敬一，境野典夫，海老原和重：岩盤を模したコンクリートの雨滴によるAE伝播特性，土木学会第53回年次学術講演会（Ⅲ部門），pp. 844-845，1998。
- 9) 南部茂義・小山俊博・森孝之・中田正弘：地下空洞掘削時の安定監視のためのAE自動計測システムの開発，第30回土木学会岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 228-232，2000。
- 10) 西川直志，北村晴夫，石田毅，田中政芳：ノンプリズム型レーザー測距器による岩盤斜面の変位測定，第31回土木学会岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集（印刷中）