

# 山口市鳴滝地区岩盤崩落地点における 変位とAE測定による不安定岩塊の挙動監視

石田毅<sup>1</sup>・西川直志<sup>2</sup>・北村晴夫<sup>2</sup>・田仲正弘<sup>3</sup>・古屋憲二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

<sup>2</sup>正会員 ㈱東建ジオテック 山口出張所(〒753-0215 山口市大内矢田234-1)

<sup>3</sup>正会員 ㈱日本パブリック 技術開発部(〒270-1153 我孫子市緑1-1-3)

<sup>4</sup>正会員 山口県 土木建築部(〒753-8501 山口市滝町1-1)

山口市鳴滝の花崗岩採石場跡地で約3,300m<sup>3</sup>の岩盤崩落が発生し、崩落岩石が斜面下部の県道を閉塞した。復旧工事の安全のため、崩落後の斜面に残された不安定岩塊の挙動を、レーザー変位計とAEの測定で監視した。不安定岩塊が発破で除去されるまでの20日間に最大で約50mmの累積変位が測定されたが変位の急激な増大は見られず、AEの発生頻度も高くなかったため、測定時の岩塊は2次クリープの比較的安定した状態にあったと推測された。50mmという大きな変位が生じて崩落が生じなかったことから、精度的に期待のレベルより劣る測定手法であっても連続的な変位測定を行うことにより岩盤崩落の監視が可能であること、またAEの測定を併用することで崩落の危険性をよりの確に予測できることがわかった。

*Key Words: rock slope, in-situ monitoring, laser displacement measurement, acoustic emission*

## 1. はじめに

1.1万m<sup>3</sup>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課題である。しかしながら、岩盤崩落は地点毎に原因となる地質構造や崩落の形態が異なるため、現状ではケース・スタディの積み重ねが重要と思われる。1999年8月27日、山口市内の崖高60mの花崗岩採石場跡地で、幅40mにわたって崩壊高さ35m、崩壊土量約3,300m<sup>3</sup>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。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判断により県道を通行止めとしていたため、通行車両等の災害は未然に防止された。

復旧工事のためには斜面直下の崩壊土砂を取り除く必要があったが、崩落後の斜面には不安定な岩塊が残っていたため、作業の安全確保のためこの不安定岩塊を監視する必要が生じた。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(Acoustic Emission)

の測定を、またAE測定の最後の期間に対応する2000年4月28日から5月18日までの21日間には、AE測定とともにノンプリズム型レーザー測距測角器による変位測定を行った。これらの測定中に崩落は発生せず、従って測定データによる崩落メカニズムの直接的な検討を行うことはできなかったが、岩盤崩落の事例として、またこの種の問題に対する現場測定の事例として有用と思われるので報告する。

## 2. 岩盤崩落と地質の概要

### (1) 地質の概要

岩盤崩落の発生地点は、山口市大字小鯖鳴滝の主要県道山口徳山線山側斜面の採石場跡地である。地質は、中生代白亜紀の広島花崗岩に属する粗粒黒雲母花崗岩であり、4系統の節理が卓越する。このうち2系統は周辺のリニアメントとも一致するほぼ鉛直の造構的節理であり、残りの2系統はほぼ水平なシーティング節理と呼ばれる旧地形と現地形に平行な解放節理である。崩落地点の岩盤は、これらの節理のうち崖面を形成する造構的節理と現地形に平行な解放節理で多数のブロックに分離

されていた。崩落の直接のきっかけは、ほぼ鉛直の造構的節理で薄板状になった岩盤が剥離崩落を起こし、その上部の現地形に平行な解放節理上の岩盤の足下が不安定になって崩落したと思われた。

### (2) 岩盤崩落前後の状況

岩盤崩落前後の崖面の状態を写真-1、写真-2に示す。崩落発生崖面は、1980年頃まで稼行していた採石作業によってできたもので、50~60°の急な自然斜面を奥行き約30m程切り込み、崖高約60mとなったところで放置されていた。写真-1に示すように、ほぼ垂直に切り立った崖面の中央部に向かって右から左に落ちる流れ盤の節理があり、その右下はすでに岩盤がなく、この節理上部の岩塊は崩落発生前にすでにカプトガニの甲羅が崖面に張り付いたような不安定な形状となっていた。この岩塊の右側は岩盤が落ちて側面の節理が見えており、左側は採石で切り取られていた。この岩塊の左側の足下は、造構的節理沿いの薄板状岩塊で支えられた形である。採石場が稼行を止めてから今回の大崩落までの間に、造構的節理沿いの薄板状岩塊の一部が自然崩落していることが、1997年の道路防災点検時の写真に記録されていた。このように、崩落した岩塊は崩落前に極めて不安定な状態にあった。

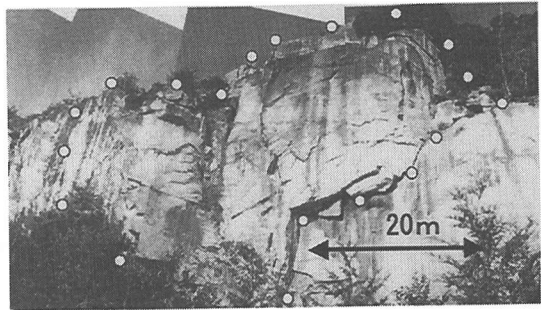


写真-1 崩落前の崖面。白丸で囲った範囲が崩落。



写真-2 崩落後。右側の白丸で囲った範囲が写真-1に対応。黒い楕円形が監視対象の不安定岩塊。

### (3) 前兆現象

今回の崩落に先立ち、次のような前兆現象が観察された。最初は、1999年8月21日早朝、住民が犬の散歩時に崩落音を聞き通報した。調査の結果、長径0.7m程度の落石があったことを確認した。この結果、斜面下の県道を通行止めとした。次に、8月22日に撮影した写真-3、写真-4と8月24日に撮影した写真-5を比較すると、長径1.0m程度の2個の落石がこの間に発生していたことを確認できる。すなわち、写真-3の口の中に重なってぶら下がっている2個の岩石のうち、上側の岩石が写真-5では抜け落ちている。また、写真-4の○の中の石が写真-5では抜け落ちてなくなっている。

一方、1997年の道路防災点検時と1999年8月22日の写真比較で亀裂(写真-5参照)が拡大していることを確認していた。さらに大崩落の前日の8月26日、21日に発生した小崩落後の斜面形状を測量していた技術者が岩盤の「きしむ音」を聞いて異常を感じ、作業を取りやめて現場から避難していたという事実があった。

大崩落は、最初の顕著な前兆現象として現れた21日の小規模な岩石崩落から、6日後に発生したことになる。

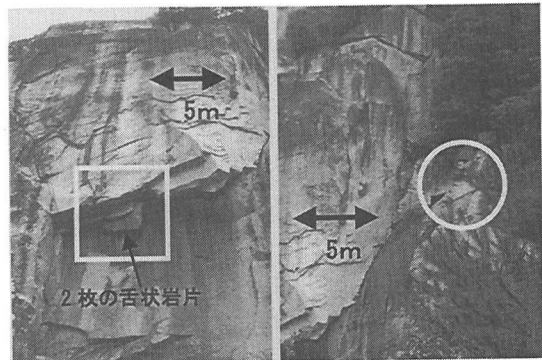


写真-3 口抜け落ち前

写真-4 ○抜け落ち前

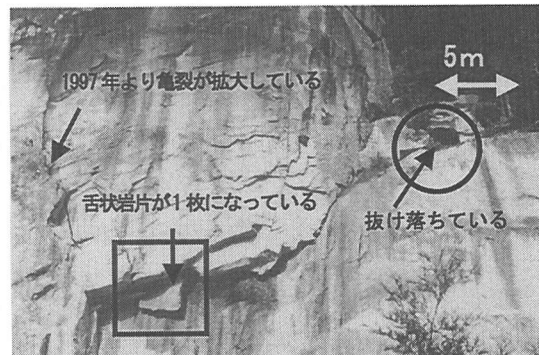


写真-5 岩塊が抜け落ちた後の状態

#### (4) 崩落後の斜面に残された不安定岩塊

道路を復旧させ安全な通行を確保するためには、まず写真-2に見える崖下の崩壊土砂を取り除いてポケットを設けた後、崩壊した斜面に残っている不安定な岩盤を発破で切り取ってこのポケットに落とし、所定の形状に仕上げて斜面を安定化させる必要があった。しかし、特に写真-2に黒い楕円形で囲んで示した岩塊は、オーバーハングしているうえに下部にすべり面になりうる流れ盤の開口亀裂がみられ崩落の恐れがあり、作業の安全確保のため挙動を監視する必要が生じた。すでに述べたように、亀裂の拡大や破壊音が前兆現象として観測されたため、この不安定岩塊の挙動の監視には変位とAEの測定を用いることにした。

### 3. ノンプリズム型レーザー測距角器による変位測定

#### (1) 測定器の特徴

岩盤斜面の変位測定には、伸縮計・地盤傾斜計・クラック変位計・光波測距法等の地表変位を測定する方法と、孔内傾斜計・パイプひずみ計等の岩体内部の変位を測定する方法とがある<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。地表変位測定の内、伸縮計・地盤傾斜計・クラック変位計はその精度が高く、崩落面となる亀裂等が明瞭で設置場所を特定できる場合には有効な手法と考えられる。ただし、岩盤崩落現場では急崖のため設置が困難なことが多く、亀裂等が不明確な場合も多い。一方、光波測距法は精度的には劣るが、遠隔から多点を測定できるため広い範囲をカバーしやすい利点がある。

光波測距法には、表-1に示すように反射鏡を使うプリズム型と反射鏡を必要としないノンプリズム型がある。プリズム型は、数kmの遠方からの測定が可能であり、精度も数mmと高く、いくつかの現場で採用されている<sup>5)</sup>。これに対し、ノンプリズム型はプリズム型に比べ測定距離が数100mに限定され精度も数10mmと低いためか、著者らの知る限りでは測定事例が報告されていない。しかし今回のような急崖では、測定に際して反射鏡を必要とせず、しかも測定点の設定の変更が容易であるという大きな利点を有している。また、ノンプリズム型はパルス測距方式を採用しているため、変調測距方式を用いているプリズム型より測定に要する時間が短く多点の測定に有利である。そこで今回の不安定岩塊の監視には、写真-6に示すパルス・レーザーを光源とするNEC製の距離測定部とソキア製の測角儀（セオド

表-1 ノンプリズム型とプリズム型の比較

	ノンプリズム型	プリズム型
反射鏡の設置	不要（急崖に適）	必要
測定距離	数100m	数km
測定精度	数10mm	数mm
測定方式	パルス測距方式（照射光と反射光の受信時間差から測定）	変調測距方式（照射光と反射光の位相差から測定）
測定時間	短い	長い
多点測定	有利	不利

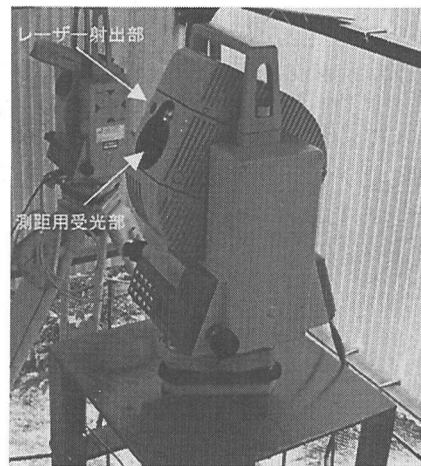


写真-6 レーザー変位計 (INT5000)

表-2 レーザー変位計 (INT5000) の仕様

レーザー波長	1.064μm	
レーザークラス (JIS)	クラス1/クラス3A切替	
測距範囲	5~1000m	
測距精度	~500m	±20mm以下
	500~1000m	±50mm以下
測距分解能	1mm	
ビーム広がり角	0.3mrad以下 (500m先で約15cm)	
走査測角範囲	鉛直	角度座標 (天頂を0°) 135° ⇔ 0° ⇔ 270°
	水平	無制限回転可能
測角精度	±5"	
回転角速度	最大8°/s	
照準望遠鏡倍率×視野	30倍×1°30'	
気象補正	気温変化	1ppm/°C (1°C当り1000mで1mmの変化)
	気圧	0.3ppm/hPa (1hPa当り1000mで0.3mmの変化)

ライト)を組み合わせたノンプリズム型レーザー測距測定角器 (NEC:INT5000) を用いた。

## (2) 測定器の仕様

測定器の仕様を表-2に示す。本器は、モータードライブを内蔵しているため、多点の自動測定が可能であり、測定は連続でも任意の時間間隔でも行える。ノンプリズム型測距器は、複数メーカーで製品化されており、測距範囲は100~200m程度のものが一般的である。またビーム広がり角は2~3mradであるため、ビーム径が200m先では20~30cm、500m先では100~150cmにもなり、どこを測っているのかわからなくなるという問題を抱えていた。この点本器はビーム広がり角も0.3mradと小さいため、ビーム径は500m先でも約15cmと実用レベルにある。また、岩盤崩落地の変位測定に光波測距器を適用する場合、一般に崖面に近づくことが危険なため、測定距離は数100mとなることが多い。本器は最大1000mまでの測定が可能であり、この点でも適用性が高い。

ノンプリズム型の難点はその精度で、メーカー仕様では500m以内の測定で±20mm、1000m以内では±50mmとなっている。また気象条件は測定値に影響を与えるため、気温と気圧の補正が必要である。なお、照射パルス光は、日照の影響が少ないため、昼夜の測定が可能であるが、濃霧や降雨の激しいときは、パルス光が乱反射して測定不能となる。

## (3) 測定方法

測定器は、対象斜面を遠望できる対岸の高台(標高125m)に設置した。写真-7に示すように、測定器から対象斜面までの斜距離は約130~150mで、比高差は約30~70mである。なお、レーザークラスは、クラス3Aを用いた。

2000年4月28日から測定を開始した。測定点を30点設定したが、写真-8にこの写真の範囲に位置する15点を示す。このうち斜面上部の3, 4, 7, 8, 9, 25, 27, 28の測定点が監視対象とした不安定岩塊の表面に位置する。この写真に示すように、測定中の5月10日に第1回発破が、5月18日に第2回発破が行われ、不安定岩塊が除去された。写真-9に2回の発破による不安定岩塊の除去の様子を示す。なお、第1回、第2回の破砕量はそれぞれ1,300m<sup>3</sup>、1,500m<sup>3</sup>であった。

測定は自動制御で1時間毎に行い、1測定点を10回連続測定して平均値を採用した。トラブルのため測定不能と表示されたデータが得られる場合があり、このような異常値は排除した。機能的には連続



写真-7 測定器と対象斜面

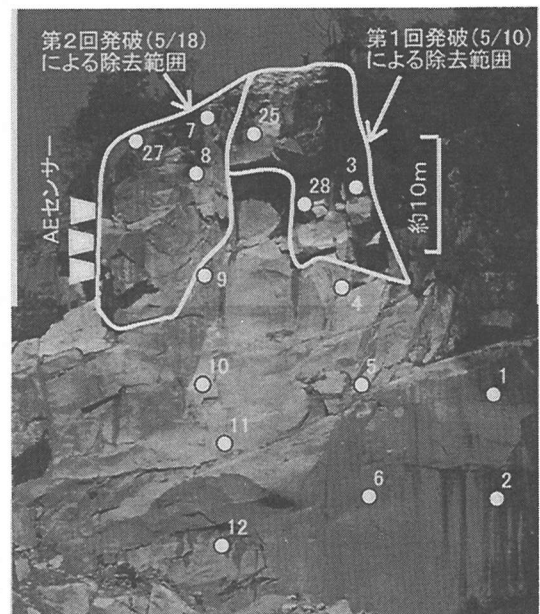
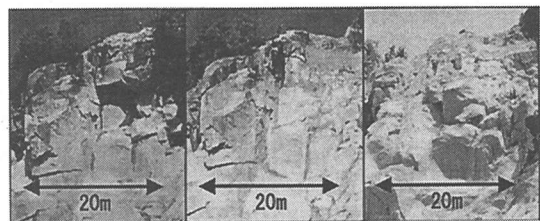


写真-8 変位計の測定点、AEセンサーの位置と発破範囲



(a) 発破前 (b) 第1回発破後 (c) 第2回発破後  
写真-9 2回の発破による不安定岩塊の除去の様子  
(スケールの矢印は同じ位置を示す)

測定も可能だが、長時間(数日)におよぶと距離測定部が加熱し、機器の信頼性が低下する傾向があるため、今回の測定では1時間毎の測定が10分程度で完

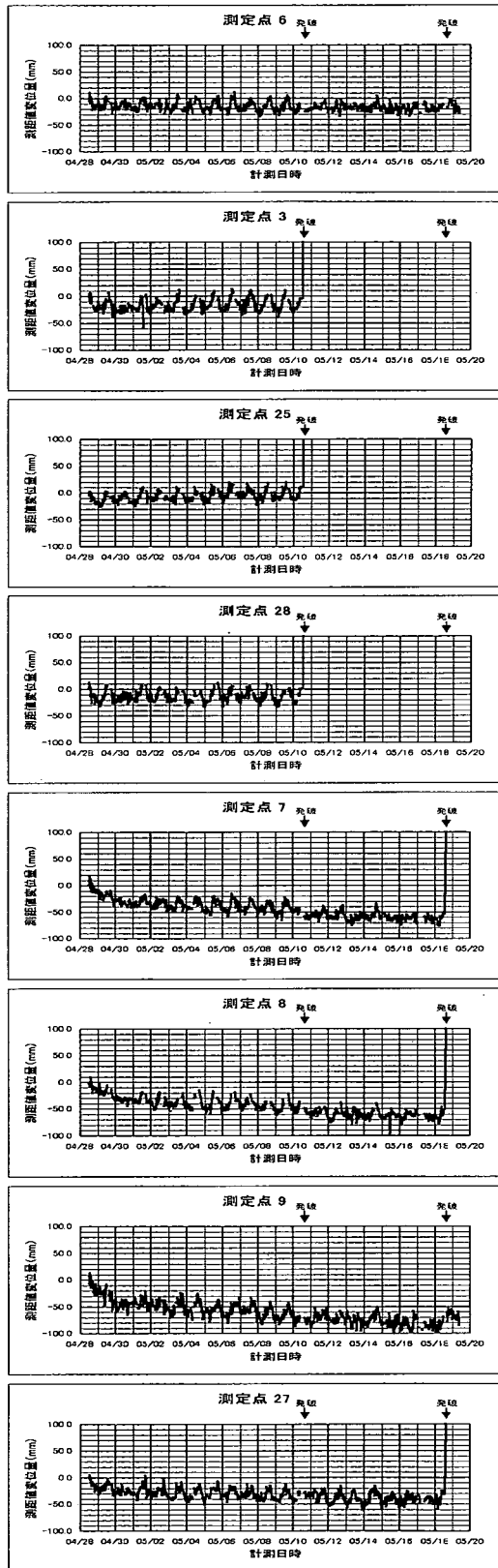


図-1 変位測定値

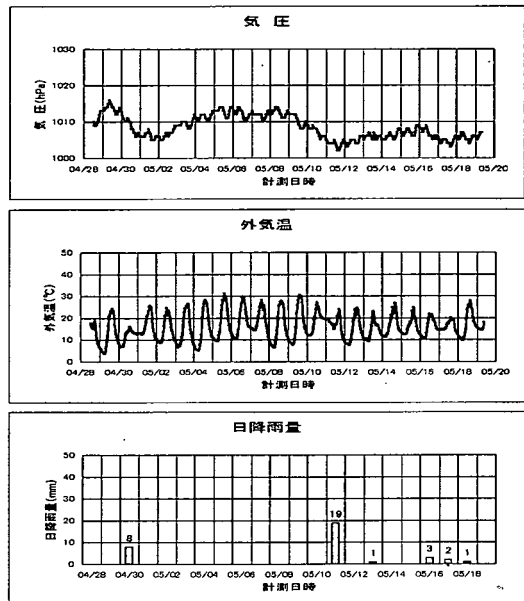


図-2 気象データ

了するよう測定点を30点に絞った。測定データは通信線を通じて約100m離れた斜面下の観測小屋の制御用パソコンに転送した。観測小屋では、気温・気圧・雨量・風速・風向を測定しており、このうち気温と気圧の測定値を用いて、測距値を自動的に補正した。

観測小屋からは電話回線を通じて、Eメールでデータを送信した。Eメールの利用には次の利点があった。(a)1時間毎に送信されてくるデータをグラフ化して表示することにより、遠隔地の事務所でもほぼリアルタイムで岩盤挙動を監視できた。(b)インターネットを利用できる環境であれば、出張などで事務所を離れていてもデータを見ることができた。(c)データの再送信が可能のため、複数箇所での監視に容易に対応できた。

#### (4)測定結果

5月18日の第2回の発破後、斜面形状の変化にとまない測定点を変更したため、同じ測定点について継続的な測定を行ったのは4月28日から5月19日までである。この間の代表的な8測定点の変位測定値を図-1に示す。図の横軸は日付で、月日の日の方の真上のひと目盛がその日のデータを示している。例えば左端の測定開始点は、4月28日12:35に対応する。写真-8に示したように、測定点6は写真下部中央の安定した岩盤上に設定しているが、他の7つの測定点は不安定岩塊上に設定している。図-2は斜面下の観測小屋の戸外で測定した、気圧、気温、日降雨量

を示す。

気圧は1002~1016hPaの範囲で、外気温は4~32℃の範囲で変化している。変位の測定値は、これらの気圧と外気温の変化を自動補正した結果を示しているが、変位と測定値の日変化は外気温の日変化に対応しているように思われる。設置箇所の制約からコンクリートなどで堅牢な固定台を造ることができず、写真-6に見られるように測定器は金属製の台の上に固定している。このため、温度変化によりこの設置台自体が変形していることも考えられ、日変化の原因については今後検討する必要があると考えている。しかしこの変位の日変化の幅は、メーカーの示す測距精度の20mm以内にほぼ収まっており、この測定手法の精度上の限界である可能性が高い。

図-1で、安定した岩盤部に設定した測定点6の変位の測定結果を見ると、測定点6は、日変動があるもののほぼ一定の値を示していることがわかる。測定点3, 25, 28の結果をみると、これらの測定点はほぼ一定の値を示すが、5月10日の14時の第1回発破により、測定箇所の岩塊が除去されたため、プラス側(奥側)へ急激に値が変化していることがわかる。これに対して、測定点7, 8, 9及び27ではマイナス側(手前側)への累積変位の発生が明瞭である。なおすべての測定点で、4月28日の測定開始直後半日ほどの間に10~20mm程度マイナス側へ値が移動し、特に測定点6, 3, 25, 28ではその後この値を中心に日変化を示しながらほぼ一定値を保っている。この変位は測定初期の不安定なデータと思われるので、実変位量を算定する場合にはこの値を差し引く必要がある。

マイナス側への累積傾向が認められたのは、写真-8の上部左側の不安定岩塊部に設定した測定点7, 8, 9及び27に限定されている。この岩塊は側部に明瞭な流れ盤の開口亀裂(傾斜約60°)があり、最も不安定な岩塊で変位の発生が予想されていた。5月10日の発破時には、測定点7及び測定点8で測定値に不連続な段差が認められ、5月18日の発破時には、この発破後にも除去されず残った岩盤上の測定点9で微小ながらプラス側への戻りが認められる。このように発破に伴う不連続な変位もとらえていることから、測定点7, 8, 9及び27で測定された累積的な変位は測定誤差ではなく、変位の発生が予想された最も不安定な岩塊が、実際に変位を生じたものと思われる。

変位の認められた測定点の変位量を測定点別にみると、この間に測定点7, 8, 9では約50mm、測定点27では約20mmの変位が認められる。これを平均日変化に換算すると、1.0~2.5mmの変位になる。この

50mmと20mmという変位量は、測定開始直後の不安定なデータと思われる先に述べた10~20mmの初期変位量を除去したおおよその値である。

ここに示した変位量は、測定器からの斜距離の差であること、測定点が測角儀の水平角度及び高度角度のみで制御されるため、測定物が移動した場合はそれに伴って測定点も移動することから、厳密な意味では真の変位量ではない。しかしながら測定結果から見る限り、50mm程度の大きな変位が生じたのは間違いなく、かつこのような大きな変位が生じたにもかかわらず不安定岩塊は崩落しなかった。著者らは当初数mmの変位が生じれば崩落するのではないかと考え、この変位測定の実用性を危惧していたが、この測定結果は大きな変位が生じても岩盤崩落が生じない場合があること、逆にいえば精度的に期待のレベルより劣る測定手法であっても、連続的な測定を行うことにより岩盤崩落の監視が可能であることを示唆している。

## 4. AE測定

### (1) 測定方法

AE測定は、変位測定を行った不安定岩塊の表面にセンサーを設置して行った。AEセンサーの設置位置は、すでに写真-8に示したように、20~50mmの累積変位を示した測定点7, 8, 9及び27の左側に位置する。写真-10は不安定岩塊を左側から見たところであり、3つの丸印の中心がAEセンサーの設置位置である。写真中央部に見える技術者の身長と比較すると大きさが実感できるが、測定対象とした不安定岩塊は高さ20m、厚さ7m、幅(紙面に垂直方向)10mである。AEセンサーは、この不安定岩塊下部に存在する、最もすべりによる崩壊の可能性が高いと思われる流れ盤の開口亀裂に沿い、この開口亀裂から1m以内の岩盤表面に設置した。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測定で対象とする岩盤内部の亀裂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-11はコンクリート・ブロックを岩盤の替わりにして、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・ボ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。

測定系統図を図-3に、センサーとプリアンプ、AD変換機の仕様を表-3に示す。このセンサーとプリアンプの組み合わせにより、周波数特性が平坦な12



kHz以下の周波数で、1 V/G±15%の感度が得られるが、今回の測定では測定周波数範囲を12kHz以下に限定せずセンサーの固有周波数30kHz付近の周波数も測定対象とした。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。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、ディスクリレベルを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、AD変換機に導き、サンプリング・タイム $2\mu s$ でAD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<sup>6)</sup>と基本的に同じである。測定されたAE波形の例を図-4に示す。この例のように、AEはひとつのセンサーだけで測定されることが多く、複数チャンネルで初動の到達時間差を持って観測される、すなわち多数のセンサーで観測した場合震源を決定できると思われる波形はほとんど観測されなかった。

## (2) 測定結果と雨との関係

図-5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-10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。雨滴が岩盤表面をたたき振動はAE測定ノイズになることが指摘されており<sup>7)</sup>、周辺の草木からの雨だれの音などもノイズとなる。そこでこの期間のAE発生数の記録を雨量データと比較することにした。斜面下の観測小屋の戸外で測定した気象データをすでに図-2に示したが、図-5のAE発生数を測定した時点では、現地にまだこの気象データ測定システムを設置していなかった。このため、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を図-6に示す。図-5と図-6を比較すると、2月8日のAEの発生と降雨は対応しており、降雨を原因とするならかなりのノイズを拾っている可能性が高い。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、岩盤の亀裂進展や変位に起因した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

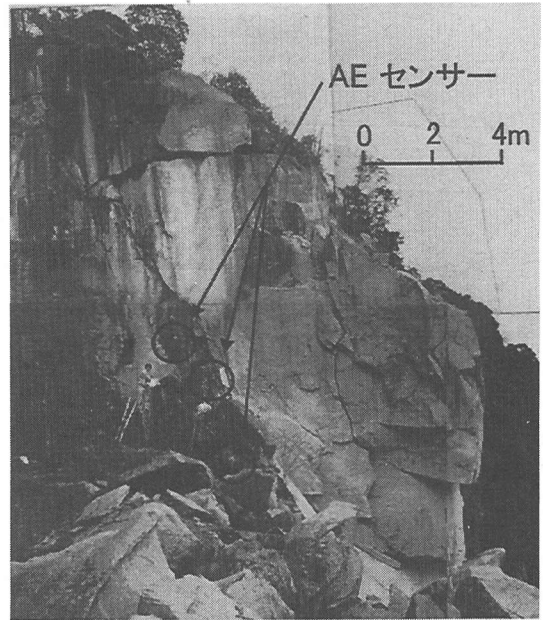


写真-10 測定対象の不安定岩塊とAEセンサーの位置

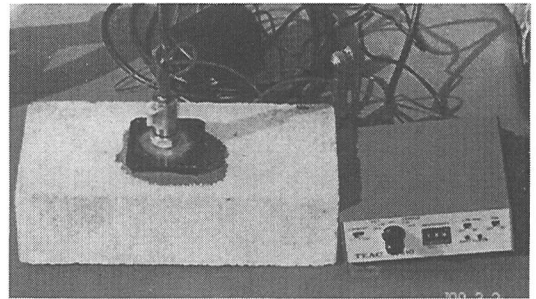


写真-11 AEセンサーとプリアンプ

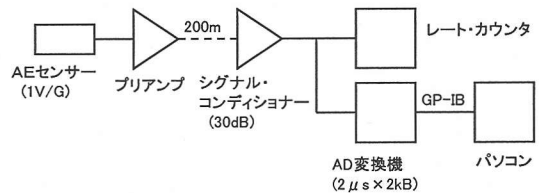


図-3 AE測定系統図

表-3 AE測定機器の仕様

AEセンサー	ティアック電子計測(株)製SA707IS圧電型加速度計。固有周波数約30kHz。
プリアンプ	ティアック電子計測(株)製SA-610/H型圧電型トランスデューサー用アンプ。
AD変換機	応用地質(株)製McSEIS1600LF-AE(特注品)12チャンネル。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。

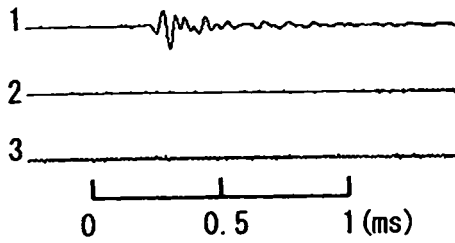


図-4 AE波形例

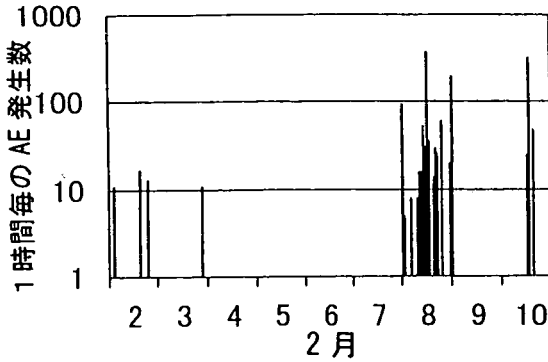


図-5 2月上旬(工事開始前)のAE発生頻度

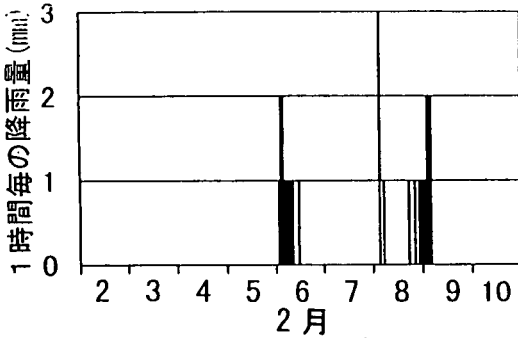


図-6 2月上旬(工事開始前)の降雨量

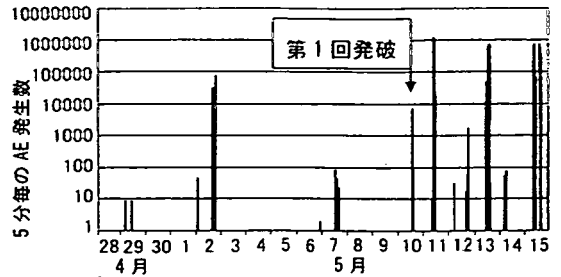


図-7 第1回発破前後20日間のAE発生頻度

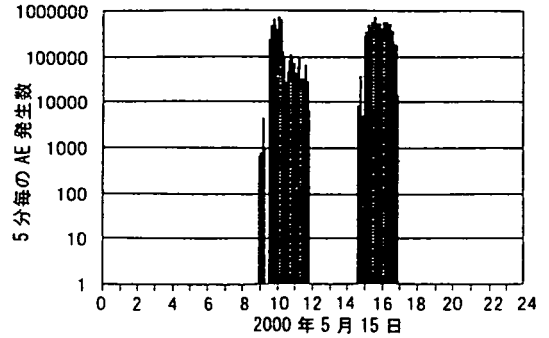


図-8 5月15日月曜日1日間のAE発生頻度

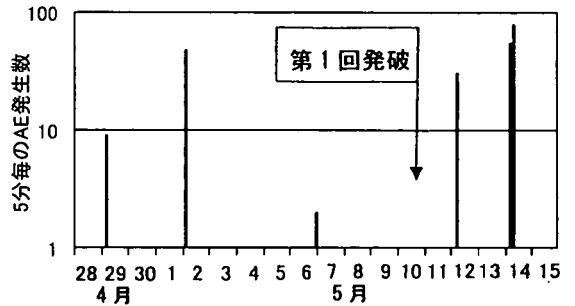


図-9 8:00~20:00の間の頻度を0としたAE発生頻度

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。

### (3) 発破前後のAE発生状況

すでに写真-8と写真-9に示したように、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。

図-7は、4月28日～5月15日の18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、少なくとも5月10日の発破直後の高い発生頻度は、発破に伴う不安定化に起因するAEと思われる。発破翌日の5月11日以降もそれまでに比べて発生頻度が高くなっており、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。しかし5月11日以降は、第1回の発破で残したAEの測定対象としている岩塊を第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-8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-7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日月曜日までは、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と対応する。

そこで、8時から20時までのデータをすべて発破孔穿孔による作業ノイズと考えて削除し、この間のAE発生頻度を0として表示したグラフを図-9に示す。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顕著ではないが認められる。

この期間の降雨量をすでに示した図-2で確認すると、降雨が記録されているのは4月30日、5月11、13日の3日間だけであり、これらの日には図-9にAEの発生が認められない。つまりAEの発生が記録されたのは、いずれも降雨のない日であり、降雨によるノイズの影響を受けていないことがわかる。従って、図-9に見られるAEの発生は、岩盤の亀裂進展や変位に基づくものである可能性がある。また、第1回の発破以降AEの発生頻度がやや増大する傾向が認められるが、これは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考えると合理的に説明できる。

## 5. 考察

崩落が懸念された不安定岩塊の挙動に関し、2000年4月28日から5月15日の18日間については、変位とAEの測定結果を比較することができる。AEセンサーは、写真-8に示したように不安定岩塊の向かって左端に設置したので、センサー設置位置に近い測定点7, 8, 9及び27の変位測定値とAEの発生を比較検討する。

図-1でこれらの測定点の経時変化を見ると、すでに述べたように、測定点7, 8, 9及び27ではマイナス側(手前側)への累積変位の発生が明瞭である。測定を開始した4月28日の測定開始直後半日程の変位は、安定した岩盤上に設定した測定点6や他の測定点3, 25, 28でも10～20mm程度マイナス側へ値が移動しているの、測定開始時の不安定なデータである可能性が高い。しかし29日以降はセンサー設置位置に近い測定点7, 8, 9, 27だけで累積的な変位の発生が見られ、特に29日と30日の変位の発生は、それ以降に比べて1日当りの変位量が大きい。図-9を見ると、29日にはAEの発生があり、この変位の発生となんらかの関係があるように思われる。

測定点7, 8, 9及び27では、5月1日以降も1日当たり平均1.0～2.5mmの変位が生じている。図-9を見ると、5月1日から10日までの間、AEは2日と6日に観測されているが、必ずしも活発に発生しているとはいえない。斜面<sup>9)</sup>やトンネル切羽<sup>9), 10)</sup>の変位測定結果を見ると、変位速度が減少する段階では安定に向かっているといえるが、変位速度が一定となっている場合には、その後急激な変位の増大を示して崩壊に至る可能性がある。測定を開始した4月28日の測定開始直後半日程のデータの信頼性に問題があるため、図-1ではいずれの傾向か判断し難い面があるが、どちらかといえば、4月28日から30日にかけて発生したやや大きな変位が収束し、安定化する傾向にあったのではないかとと思われる。5月10日の隣接箇所が発破で測定対象の不安定な岩塊は大きな振動を受けた。このためか、図-9を見ると5月10日以降それまでに比べてややAEの発生が活発である。しかし図-1を見ると、測定点7, 8, 9及び27の平均日変位の大きさはそれまでと大きな違いはない。このことも発破以前の状態が、崩落に至る不安定な状態ではなく、安定化する傾向にあったことを示唆している。

崩落が1～2日後に発生するような不安定状態に至れば、AEは劇的な発生数の増大を示すと思われる。従ってAEの測定は、変位とは独立した内部亀裂進展を反映するデータとして、不安定岩塊の安定性に関する評価指標を与える。今回の測定では、変位速度の急激な増大が見られず、またAEの顕著な発生がなかった。このことから、不安定岩塊をそのまま放置した場合に崩落に至ったか否かの判断は難しいが、少なくとも測定をしていたこの時点では、崩落は間近には迫っていなかったと思われる。

## 6. まとめ

山口市内の花崗岩採石場跡地で崩壊土量約3,300m<sup>3</sup>の岩盤崩落が発生し、崩落後の斜面に残された不安定な岩塊の挙動を、レーザー変位計とAEの測定で監視した。本研究の結果をまとめると以下の通りである。

(1)地質調査の結果、ほぼ鉛直の2系統の造構的節理と、ほぼ水平な旧地形と現地形に平行な解放節理が卓越し、これら4系統の節理でブロック状になった岩盤が崩落したことがわかった。崩落の直接のきっかけは、ほぼ鉛直の造構的節理で薄板状になった岩盤が剥離崩落を起こし、その上部の現地形に平行な解放節理上の岩盤の足下が不安定になって崩落したと思われた。

(2)崩落の直前に次のような前兆現象があった。6日前に崩落斜面下方の道路で犬を散歩させていた住民から崩落音を聞いたとの通報があり、調査したところ長径0.7m程度の落石を確認した。前日には、この小崩落後の斜面形状を測量していた技術者が岩盤の「きしむ音」を聞いて異常を感じ、作業を取りやめて現場から避難していた。

(3)崩落の3年前の道路防災点検時に撮影した写真と上記の小崩落の直後(大崩落の5日前)に撮影した写真を比較したところ、岩盤の亀裂が拡大していることがわかった。また大崩落の5日前と3日前の写真を比較すると、この間に長径1.0m程度の2個が岩盤から抜け落ちて落石が発生していたことがわかった。

(4)復旧工事のためには斜面直下の崩壊土砂を取り除く作業が必要であり、この作業の安全確保のため、崩落後の斜面に残った不安定な岩塊の挙動をノンプリズム型レーザー測距測角器による変位測定とAEの測定を行って監視した。

(5)変位の測定点は崩落後の斜面の表面に30点設定したが、側部に明瞭な流れ盤の開口亀裂が見られ変位の発生が予想されていた最も不安定な岩塊の上に設定した3点の測定点で、20日の測定期間の間に約50mmの累積変位が見られた。このような大きな変位が生じて岩塊の崩落が発生しなかったことは、精度的に期待のレベルより劣る測定手法であっても、連続的な測定を行うことにより岩盤崩落の監視が可能であることを示唆している。

(6)AE測定は、50mmの累積変位を示した不安定岩塊の向かって左側の側面の岩盤表面に、AEセンサーを設置して行った。降雨と発破孔の穿孔が大きなノイズとなったが、これらのノイズを除去してAEの発生数を検討したところ、隣接する岩盤を除去した第1

回の発破以降AEの発生頻度がやや増大する傾向が見られた。これは観測対象としていた岩塊が発破によって大きな振動を受け不安定になった結果と思われた。

(7)斜面やトンネル切羽の変位測定結果をみると、崩壊する場合には急激な変位の増大を示した後崩壊に至っている。今回の測定では、1日当たり平均1.0~2.5mmの変位が生じているが変位の増加割合はほぼ一定で安定していたこと、またAEの発生も必ずしも活発ではなかったことから、不安定岩塊をそのまま放置した場合に崩壊に至ったか否かの判断は難しいが、少なくとも測定をしていたこの時点では、崩壊は間近には迫っていなかったと思われた。

(8)AEの発生頻度は内部亀裂の進展を反映するため、変位とは独立した安定性評価指標となる。従って、変位の測定にAEの測定を併用することにより崩壊の危険性をよりの確に予測できるといえる。今後、変位やAEの測定手法の改善をはかるとともに、岩盤崩落監視のための新たな測定手法の開発と適用をはかり、斜面崩壊の直前予知実現のために、微力ながら力を尽くしたいと考えている。

謝辞：現場測定に際しては、日特建設(株)山口営業所鳴滝作業所所長(現 広島支店工事部長)古賀和敏氏、山口営業所所長原田博氏、施工本部法面部長平田文氏、施工本部副部長(現 東北支店支店長)荒井民雄氏にご協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表するものである。

## 参考文献

- 1) (財)道路保全技術センター：トンネル坑口部等の岩盤崩落対策の考え方，p. 25, 1996.
- 2) 日本応用地質学会：応用地質計測—手法と解釈・評価—，p. 183, 1998.
- 3) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策，p. 376, 1999.
- 4) 日本応用地質学会：斜面地質学—その研究動向と今後の展望—，p. 294, 1999.
- 5) 加藤洋介，大久保伸介：光波測距法を用いた岩盤切土法面の動態観測事例，全地連技術フォーラム2000講演集，pp. 167-168, 2000.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 斉藤迪孝：土質力学におけるレオロジー(7-2斜面崩壊予測)，土と基礎，Vol. 29, No. 5, pp. 77-82, 1981.
- 9) 川上純，池田宏，大里祥生：安全管理のためのトンネル切羽の変位計測，トンネル工学研究論文・報告

書, 第6巻, pp. 257-262, 1996.  
10) 田中一雄, 川上純, 池田宏, 怡土一美: 切羽変位計  
測による切羽予測の一試み (東北新幹線岩手トンネ

ル女鹿工区), トンネルと地下, 第27巻, pp. 499-  
504, 1996.

(2001. 3. 27 受付)

DISPLACEMENT AND ACOUSTIC EMISSION MONITORING  
FOR AN UNSTABLE ROCK MASS LEFT AFTER ROCK BLOCK FAILURE  
AT NAKUTAKI AREA IN YAMAGUCHI CITY

Tsuyoshi ISHIDA, Tadashi NISHIKAWA, Haruo KITAMURA,  
Masahiro TANAKA and Kenji FURUYA

A laser displacement measurement and AE monitoring were employed to monitor an unstable rock mass left after rock block failure, to secure repair works under it. Accumulated displacements around 50 mm were measured for 20 days. However, since neither rapid increase of the displacements nor active AE occurrence was observed, it was considered that the rock mass was stable and a failure would not occur soon. The fact that the rock mass did not failed down in spite of such a large displacement of 50 mm suggests that various kinds of displacement measuring techniques having not so high accuracy are applicable if continuous measurements are conducted. The results also indicate that AE data are very helpful to judge risk of rock mass failure.