

AE による岩盤斜面の計測方法と安定性評価に関する研究

A study on monitoring and evaluation methods for rock slope stability by acoustic emission

北海道開発局 開発土木研究所

正員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)

正員 中井 健司 (Kenji Nakai)

正員 日下部 祐基 (Yuhki Kusakabe)

正員 蓮井 昭則 (Akinori Hasui)

○正員 寺田 道直 (Michinao Terada)

中田 文雄 (Fumio Nakada)

(株)間組 技術研究所

(株)奥村組 技術研究所

川崎地質(株) 環境防災事業部

1. まえがき

豊浜トンネル(1996年2月)や第2白糸トンネル(1997年8月)等の岩盤斜面の崩壊災害を契機に、不安定な岩盤斜面の計測方法や安定性の管理方法の研究が緊急の課題となっている。しかし、岩盤斜面の崩壊現象は、地すべり現象と異なり、崩壊速度が速いため、変位や傾斜などの静的計測ではその発生を事前に察知することが極めて難しい。このような背景のもとに、筆者らは、自然現象としての斜面の崩壊現象をいち早く感知し安定性を管理する手法の開発を目指して、1998年度よりAEを利用した「岩盤斜面の挙動計測とその安定性の分析・評価に基づいた管理方法に関する共同研究」を実施している¹⁾。

ここでは、国道229号沿線の雷電トンネル終点、刀掛覆道および刀掛トンネル終点の3箇所の岩盤斜面を対象に現在実施中の共同研究の成果として、2種類の方法を組み合わせた岩盤斜面のAE計測の考え方、通常AEと低周波AEそれぞれの計測方法および計測結果について刀掛覆道斜面の事例を中心に報告する。

2. 岩盤斜面のAE計測の考え方

AE(Acoustic Emission)とは岩石などの固体が破壊する際に解放される弾性ひずみエネルギーの一部が音や振動として放出される現象を言う。AEは転位の集積や結晶サイズの微視的破壊で発生するので変位などの静的計測に比して高感度であるが、岩盤斜面計測への応用には不明な点が多く未だ研究途上にある。

本研究では、原位置での岩盤測定で一般に用いられる周波数帯域($10^2 \sim 10^4 \text{Hz}$)を対象とした通常AEとこれより一桁小さい周波数帯域($10 \sim 10^3 \text{Hz}$)を対象とした低周波AEの2系統の測定方法を採用した。通常AEでは特定の亀裂に注目した局所空間の計測を、一方低周波AEでは斜面全体の挙動を対象にした広域空間の計測を行い、この両者を組み合わせることにより、岩盤斜面へのAE適用リスクの低減を図ることとした。なお、低周波AEでは、岩体の周波数特性の変化に着目して斜面の安定性評価を試みることも目的の一つとしている。

また、携帯電話を利用してAEヒット数やディスクの空き容量を遠隔地で常時監視できるシステムを構築し、斜面崩壊監視手段としての機能を試験中である。

3. 通常AE計測方法

通常AEの計測は雷電トンネル終点斜面と刀掛覆道終点斜面の2箇所で行った。

3.1 対象斜面の地形地質

雷電トンネル終点斜面および刀掛覆道斜面の地質は新第三紀の火山砕屑岩類からなり、火山角礫岩や凝灰角礫岩が層厚1~5mで互層状に堆積する。層理面はいずれの斜面も山側に緩く傾斜した受け盤構造となっている。両斜面とも道路面からの比高は約80mで急斜面を形成するが、特に、刀掛覆道は斜面上半部の岩体がオーバーハングを形成するため、防災工事としてワイヤーロープ掛工が施工されている。

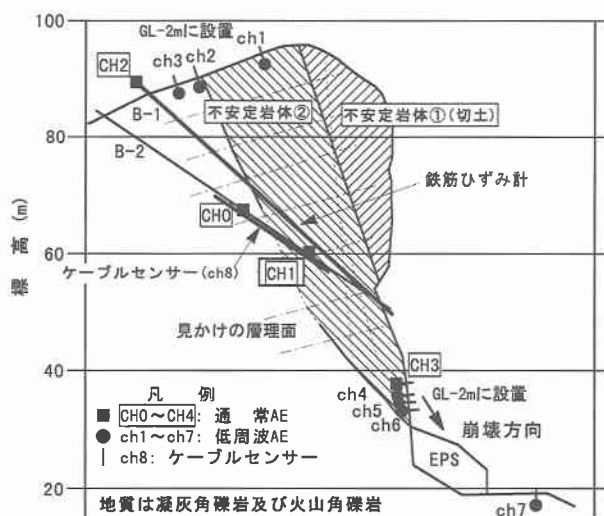


図-1 雷電トンネル終点斜面のAEセンサ配置状況(左:平面図、右:断面図)

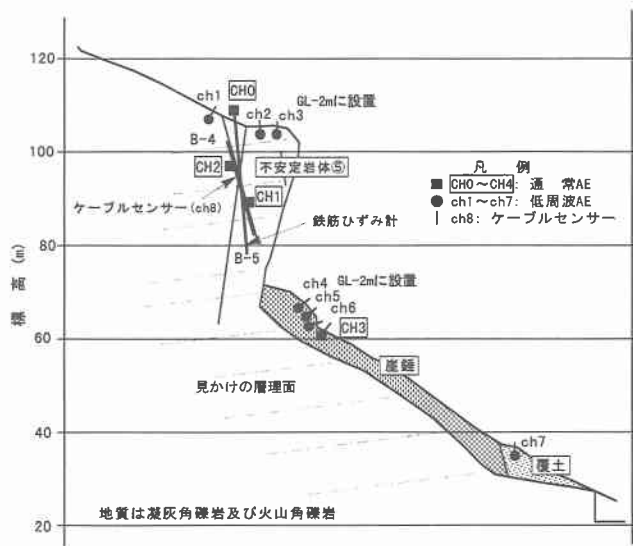
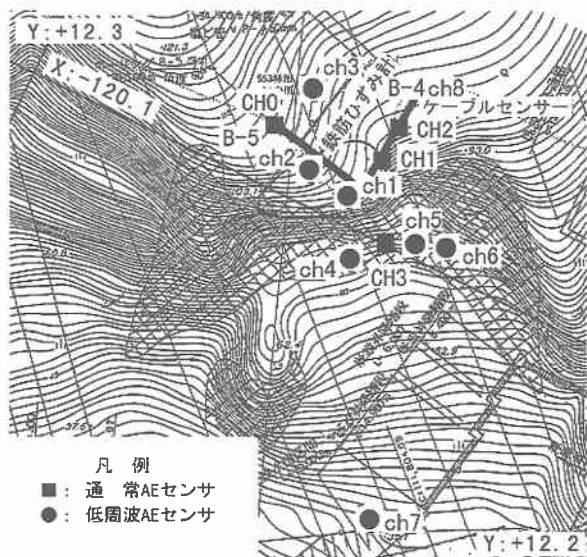


図-2 刀掛覆道斜面の AE センサ配置状況 (左：平面図、右：断面図)

3.2 通常 AE センサ配置

雷電トンネル終点斜面の通常 AE センサの配置を図-1 に示す。雷電トンネル終点では岩体②の背面に存在する高角度の流れ盤亀裂が卓越する。この亀裂に注目し、ボーリング孔 B-2 の亀裂を挟む位置に 2 点の AE センサを設置した。また、この亀裂を貫通する B-1 孔の鉄筋ひずみ計頭部と斜面下部岩盤内に各 1 点の AE センサを配置した。

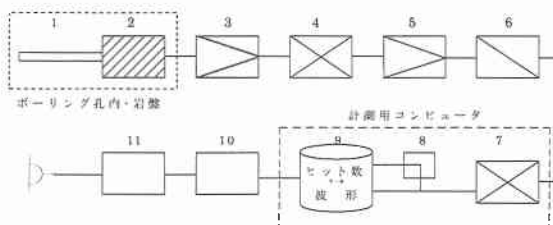
刀掛覆道斜面の通常 AE センサの配置を図-2 に示す。刀掛覆道では、卓越亀裂として岩体⑤の背面に高角度の受け盤(転倒)亀裂が認められる。この亀裂に注目し、ボーリング孔 B-4 の亀裂を挟む位置に 2 点の AE センサを設置した。また、この亀裂を貫通する B-5 孔の鉄筋ひずみ計頭部と斜面下部岩盤内に各 1 点の AE センサを配置した。

また、通常 AE センサを設置したボーリング孔内に長さ 20m のケーブルセンサを設置し、線状の AE センサとしての適用性の検討も併せて実施した。

3.3 通常 AE 計測方法

通常 AE の計測には、岩盤内の亀裂による波動の減衰や波長と伝播速度の関係を考慮して共振周波数 15kHz の加速度型センサを用い、周波数帯域 500~15000Hz の範囲で平坦な応答特性を有する計測系を採用した。

通常 AE 計測のブロックダイアグラムを図-3 に示す。AE センサへの入力を前置増幅器で 60dB 増幅し、20kHz



- 1: ウェーブガイド、2: AE センサ、3: 前置増幅器、4: ローパスフィルタ
5: 主増幅器、6: AD 変換器、7: デジタルフィルタ、8: 弁別器、9: ディスク
10: 無停電電源装置、11 定電圧装置

図-3 通常 AE 計測のブロックダイアグラム

のローパスフィルタを通した後、主増幅器で 1~20dB 増幅し、さらに AD 変換とデジタルフィルタによるノイズ処理を経て、AE のヒット数や生波形などをハードディスクに記録した。

4. 通常 AE 計測結果

通常 AE 計測は 1999 年 3 月より開始しノイズ対策、主増幅器の利得調整、トリガーレベル調整などのいろいろな初期調整を経て、1999 年 11 月より安定した計測が可能となった。この間に、集中豪雨に伴う挙動や有珠山の噴火に伴う挙動など幾つかの斜面挙動に伴う AE が計測されている。ここでは、有珠山の噴火に伴う AE について刀掛覆道の計測結果を述べる。

図-4 は 2000 年 3 月 28 日~3 月 31 日の間に刀掛覆道斜面で計測された通常 AE を一般計測の結果と対比して示した。有珠山噴火直前の 3 月 29 日に問題の亀裂を挟んだ 2 点と鉄筋計頭部 1 点の計 3 点で多数の AE が計測され、近くの雷電トンネル終点斜面でも多数の AE が計測されている。この時期の静的な一般計測に顕著な変化は認められないこと、有珠山の火山性地震が活発化する時期に対応して AE が発生していること、計測された AE は斜面上部から下部に伝播している(地震波の直接的影響によるものであれば下部から上部に伝播することか

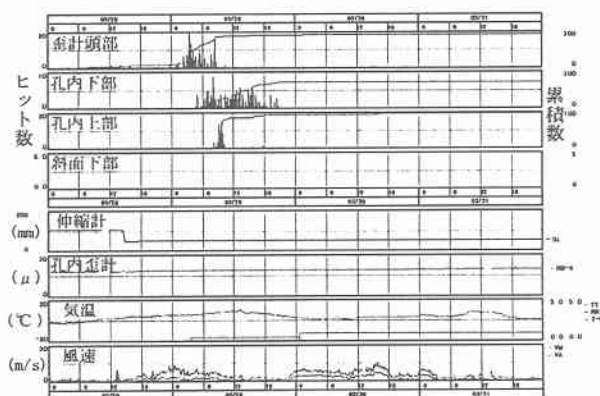


図-4 刀掛覆道通常 AE 計測結果(2000.3.28~3.31)

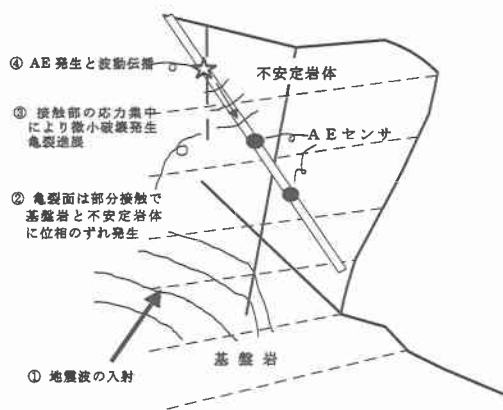


図-5 地震波入射による AE 発生メカニズム

ら、図-5 に示すように有珠山の火山性地震波の入射に伴って基盤岩と不安定岩体との境界部(亀裂面近傍)に生じた応力集中に伴う AE を検出したものと考えられる。

5. 低周波 AE 計測方法

低周波 AE の計測は雷電トンネル終点斜面と刀掛覆道終点斜面、及び刀掛トンネル終点斜面の 3 箇所で行ったが、刀掛トンネル終点斜面については紙面の都合上、別の機会に報告することにしたい。

5.1 低周波 AE センサ配置

雷電トンネル終点斜面の低周波 AE センサの配置を図-1 に、刀掛覆道斜面の低周波 AE センサの配置を図-2 に併記した。

雷電トンネル終点と刀掛覆道の両斜面に対しては、全岩体の挙動をカバーする目的で、岩体の上部と下部にそれぞれ 3 点の低周波 AE センサを配置した。この場合、低周波 AE 発生源の標定計算が可能のように配置すると共に、設置位置の測量を実施した。いずれのセンサも設置費用の低減のために、穿孔機を使用して GL-2m に設置した。なお、岩体全体の振動伝播特性を検出するための参照点を 1 点設置した。

また、通常 AE センサを設置したボーリング孔内のケーブルセンサについては、その周波数帯が接近しているために、低周波 AE 計測系で計測した。

5.2 低周波 AE 計測方法

低周波 AE の計測は、岩盤全体の波動減衰と伝播速度の関係を考慮して共振周波数 14Hz の MC 型速度地震計を用い、周波数帯域 14Hz～1kHz の範囲で平坦な応答特性を有する計測システムを採用した。

低周波 AE 計測のブロックダイアグラムを図-6 に示す。AE センサからの電気信号を AE 計測ユニットの増幅器

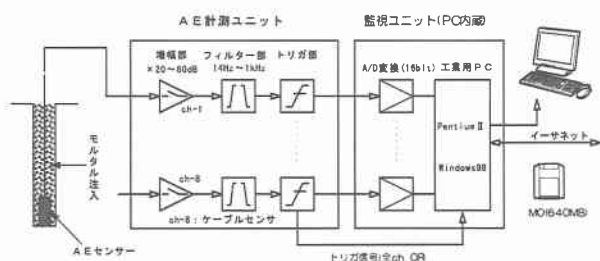


図-6 低周波 AE 計測のブロックダイアグラム

で 80dB 増幅し、1kHz のローパスフィルタを通した後、トリガ部を経由して監視ユニットへ導き、内蔵された AD 変換器によりデジタル波形に変換して、ハードディスクに記録・保存した。監視ユニットは、イーサネットを経由してデータサーバに接続されており、遠隔地制御などのデジタル処理が必要な場合には対応できるようになっている。

6. 低周波 AE 計測結果

低周波 AE 計測システムは 1999 年 3 月に設置し、翌 4 月からほぼ安定した計測を行うことができた。

6.1 波形例

本研究でいう低周波 AE の場合、計測できる周波数帯を可聴音域の低い部分に設定した関係で、亀裂から発生する AE と小岩体が斜面に衝突する際に発生する微小振動のいずれも計測することができる。

図-7 は、刀掛覆道で検出された波形例である。斜面の上部で微小岩体が剥離した時の AE、斜面の表面を転がった時と自由落下して斜面へ衝突した時の振動である。自由落下した時間は約 2.2 秒と考えられ、この時間差から落下高を計算すると約 23m となった。

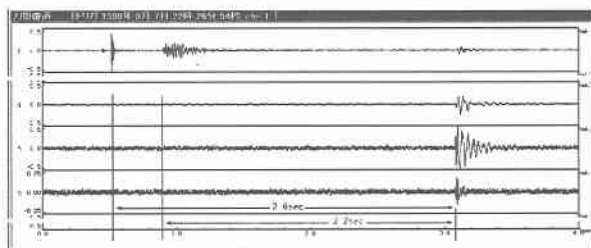


図-7 低周波 AE の波形例

6.2 集中豪雨時の挙動

図-8 は 2000 年 7 月 28 日～8 月 2 日に、刀掛覆道斜面で計測された低周波 AE の Hit(ヒット)を、一般計測と対比した結果の一部である。なお、比較のために通常 AE とケーブルセンサのデータも併記した。

7 月 31 日の早朝と 8 月 2 日の午前中に発生した集中豪雨時には、下部岩体に設置した低周波 AE センサ、ボーリング B-4 孔内の通常 AE センサ、さらに同孔のケーブルセンサが揃って多量の AE を検出した。上部岩体の

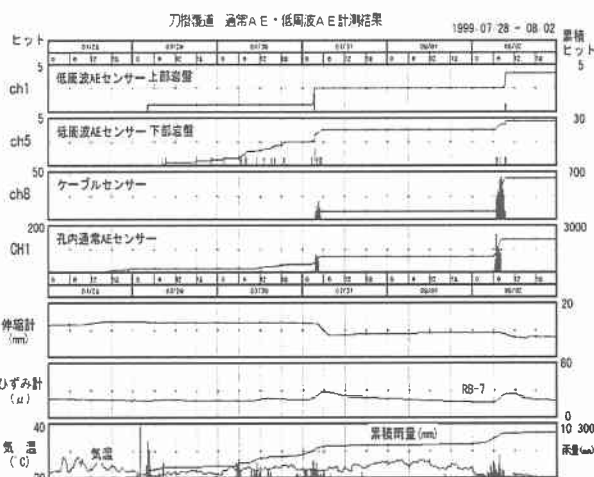


図-8 豪雨時の低周波 AE の挙動(刀掛覆道)

低周波 AE センサでも、時間差はあるが多少の AE が検出されている。ほぼ同時刻に岩体に設置した伸縮計とボーリング B-5 孔内の鉄筋ひずみ計(亀裂近傍のみ)でも変動が検出されていることから、岩体⑤に豪雨によって応力集中が発生した可能性が考えられる。

岩体の下部に設置した低周波 AE センサは、7 月 29 日に降雨が始まった直後からほぼ継続的に AE を検出したが、岩体に発生する応力バランスの変化を一般計測より早期に検出した可能性がある。

6.3 有珠火山による地震時の挙動

通常 AE の発生と同様に、低周波 AE の場合も有珠火山による影響が検出された。

図-9 は有珠山の火山性地震でマグニチュード 2 以上の 1 時間あたりの発生数(Hit)と、雷電トンネル斜面及び刀掛覆道斜面の岩体下部(ch4、ch5、ch6 の合計)の低周波 AE の Hit を比較した結果である。

3 月 28 日～29 日では、火山性地震の発生数の増加にほぼ比例して低周波 AE も発生しているが、30 日以降では、低周波 AE の発生数の増加はわずかとなった。この傾向は通常 AE でもみられる。火山性地震の到達によって岩体内部の亀裂面近傍に応力集中(ひずみ)が発生したが、AE の発生によりこのひずみが初期の段階で開放された可能性が考えられる。なお、地震波形と低周波 AE の区分は、波形(周波数)や位置標定により比較的容易であった。

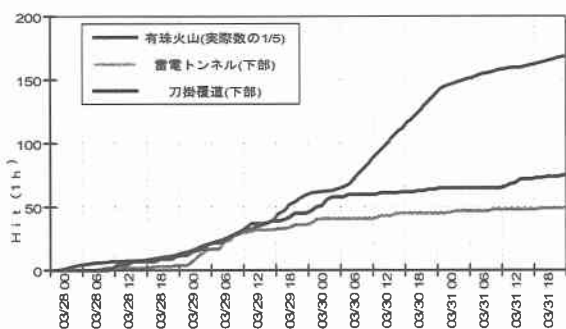


図-9 有珠火山による地震と低周波 AE の挙動

6.4 低周波 AE の発生位置(AE 源)

最低 3 箇所のセンサで同一の AE を検出することにより、AE 源の評定が可能なように計測システムを設計した。標定計算方法として 3 次元座標を使用するテーブルックアップ法²⁾を採用し、位置の決定は平均残差が最も少ない座標とした。計算上の立体ブロックは 1 辺の長さが 30m でメッシュの間隔は 1m である。

いずれの対象斜面でも、人工震動源の使用が困難であったため、岩体の弾性波速度を直接求めることはできていない。弾性波速度値を未知数として計算することで対処しているが、最も残差が小さくなる速度値は 1.4km/s 前後が多く、この速度値からみて対象岩体には亀裂が多いことが推定される。なお、亀裂による岩体の速度値上の異方性は考慮していない。

図-10 は、図-7 に示した ch1 の近傍で剥離落下した小

岩体が斜面に衝突した位置を標定計算した結果である。落下時間から推定した落下高さ(約 23m)と、標定計算から求めた位置(図-10: 黒丸)はほぼ一致しており、計算上の誤差は比較的小さいようである。

今後は、岩体内部で発生した低周波 AE の発生位置を詳細に検討し、応力が集中している場所(亀裂)の位置を特定する目的で利用していきたいと考えている。

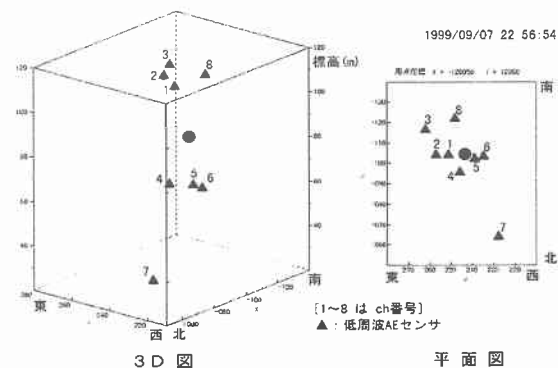


図-10 低周波 AE 源の標定例

7. あとがき

国道 229 号沿線の雷電トンネル終点など 3 箇所の岩盤斜面で 1999 年 4 月より実施した AE 計測の結果(原稿執筆段階継続中)、累積雨量が 300mm に近い集中豪雨時の挙動や、有珠山の噴火に伴う挙動を AE として検出することができた。

特に、ボーリング孔により岩体内部の亀裂面近傍に設置した通常 AE センサと、孔内鉄筋ひずみ計の頂部に設置した通常 AE センサは、これらの挙動を S/N 比の良いバースト(突発)状に検出することができ、対象亀裂に応力集中が発生したことを捉えたものと考えている。

一方、低周波 AE センサの場合は、岩体全体の挙動を検出する目的でセンサ配置を考えているため、この亀裂から発生した AE をバースト状には検出していないが、別の亀裂が起源と思われる AE を含めると、岩体に発生した応力集中に伴う AE をかなりの初期段階から検出したことが判明した。

今後は、AE パラメータによる斜面の安定性評価を行う一方、斜面の管理指標の作成を目的として、既に計測された AE データや現在計測中の AE データをより詳細に分析・評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 池田憲二、日下部祐基、中井健司、塩野康浩：岩盤斜面の AE 計測手法、土木学会北海道支部年次技術研究発表会、1999
- 2) 建設省土木研究所：AE による斜面動態計測システムに関する共同研究報告書、No.228、1999 年