

# AEによる岩盤斜面の観測と崩壊予測に関する研究

寺田道直\* 篠原 茂\* 塚本耕治\*

## 1. まえがき

豊浜トンネルの崩落事故(1996年2月)<sup>1)</sup>や第2白糸トンネルの大崩壊(1997年8月)<sup>2)</sup>などの岩盤斜面の崩壊災害を契機として、不安定な岩盤斜面の挙動を観測して道路交通の安全性を管理する技術の実用化が喫緊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大きいため、変位や傾斜などの静的な計測のみではその発生を事前に察知することが極めて難しい。

一方、AE(Acoustic Emission)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のことで、主破壊に先立つ微視的破壊の段階でAEが発生することから、崩壊予測への発展が期待されている。

このような背景のもとに、筆者らは北海道南西部の国道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地点における不安定な岩盤斜面を対象に周波数帯域の異なる2種類の計測方法で2年を越える長期のAE観測を行い、AEによる岩盤斜面の安全管理や崩壊予測の可能性について検討を行った。本文では、これらのうち雷電トンネル終点と刀掛覆道地点の岩盤斜面を対象に行ったAE観測の概要と観測によって得られた知見の幾つかを述べる。なお、本研究は、1998年3月～2001年3月にかけて、北海道開発局開発土木研究所、(株)奥村組、川崎地質(株)および(株)間組の官民共同研究<sup>3)~7)</sup>として実施したものである。

## 2. 岩盤斜面の概要とAE観測の考え方

### 2.1 岩盤斜面の概要

研究対象とした3地点の岩盤斜面の位置を図-1に示す。対象斜面は3地点とも、国道229号線が北海道岩内郡岩内町の雷電岬付近をトンネルや覆道で通過する地点の直上に位置する。このうち、雷電トンネル終

点斜面と刀掛覆道斜面は直線距離で約100mときわめて近接している。

雷電トンネル終点斜面および刀掛覆道斜面の全景を写真-1および写真-2に示す。両斜面の地質は新第三紀の火山碎屑岩類からなり、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。地層の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でオーバーハングを伴う急斜面を形成するが、特に刀掛覆道斜面では平成5年7月の北海道南西沖地震によって約1万m<sup>3</sup>の大岩体が不安定化し除去した経緯がある。

### 2.2 AE観測の考え方

AEは分子構造や結晶レベルの微視的破壊で発生することから、岩盤崩壊の予知予測への応用が早くから期待されてきた。しかし、岩盤斜面はその規模が大きく崩壊を引き起こす亀裂の特定が困難である、材料力学的に複雑かつ不均質であるなど、不明な点が多く、岩盤斜面への応用は未だ研究途上にある。

本研究では、原位置での岩盤計測で一般に用いられる周波数帯域(10<sup>2</sup>～10<sup>4</sup>Hz)を対象に加速度計をセンサに用いたAE観測(通常AEと呼ぶ)と、これより一桁小さい周波数帯域(10～10<sup>3</sup>Hz)を対象に速度計をセンサに用いたAE観測(低周波AEと呼ぶ)の2種類の観測方法を同じ岩盤斜面に適用した。

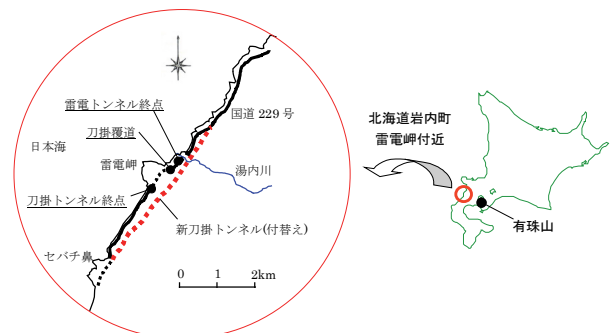


図-1 研究対象岩盤斜面の位置

\*技術研究所

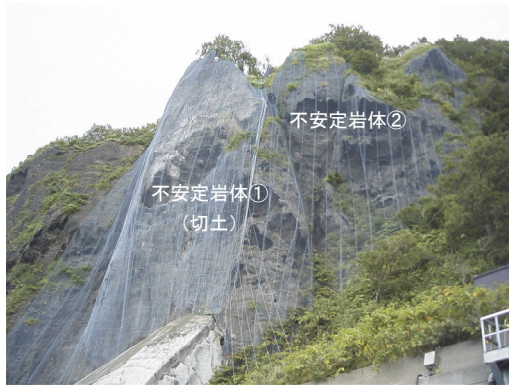


写真-1 雷電トンネル終点斜面の全景

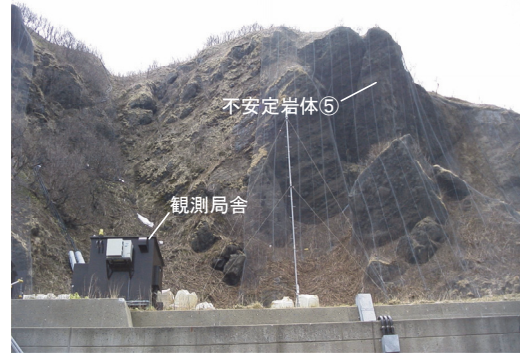


写真-2 刀掛覆道斜面の全景

通常 AE では斜面内部の特定の亀裂を含む局所空間で発生する AE を対象に、発生数と波形を観測した。一方、低周波 AE では斜面全体を含む広域空間で発生する AE を対象に、発生数と波形の観測に加え、発生位置の評定も行った。

通常 AE 観測と低周波 AE 観測の基本的な考え方を対比して表-1に示す。2つの方法を同じ岩盤斜面に適用することにより、上記の AE 適用上の問題点を幾らかでも緩和することとした。

交わる B-1 孔の鉄筋頭部と斜面下部岩盤内に各 1 点 (CH2、CH3) を配置した。低周波 AE は不安定岩体②の全体挙動を把握するため、岩体の上部と下部にそれぞれ 3 点 (ch1～ch6) を、また交通振動との区別や不安定岩体の周波数特性の変化を評価する参照点としてトンネル直上に 1 点 (ch7) を配置した。

なお、いずれの斜面とも通常 AE のセンサを設置したボーリング孔内に長さ 20 m のケーブルセンサ<sup>8)</sup>を埋設し、線状の AE センサとしてのケーブルセンサの適用性についても検討を行った。

### 3. AE 観測方法

#### 3.1 AE 観測点の配置

刀掛覆道斜面の AE 観測点の配置を図-2に示す。断面図は K-K 断面への投影図である。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亀裂が認められ、これに起因する転倒型の崩壊が予想された。通常 AE はこの亀裂を対象に、ボーリング B-4 孔の亀裂を挟む位置に 2 つの観測点 (CH1、CH2) を、この亀裂と交わる B-5 孔の鉄筋頭部と斜面下部岩盤内に各 1 点 (CH0、CH3) を配置した。低周波 AE は不安定岩体⑤の全体挙動を把握するため、岩体の上部と下部にそれぞれ 3 点 (ch1～ch6) を配置し、さらに交通振動と AE との区別や不安定岩体の周波数特性の変化を評価するための参照点として覆道の直上に 1 点 (ch7) を配置した。

雷電トンネル終点斜面の観測点の配置を図-3に示す。断面図は R-R 断面への投影図である。雷電トンネル終点斜面は、岩体②の背面に存在する高角度の流れ盤亀裂が卓越し、すべり型の崩壊が予想された。通常 AE はこの亀裂を対象に、ボーリング B-2 孔の亀裂を挟んだ位置に 2 つの観測点 (CH0、CH1) を、この亀裂と

表-1 AE 観測の基本的考え方

	通常 AE	低周波 AE
観測対象	特定亀裂で発生する AE	斜面全体で発生する AE
観測方法	特定亀裂近傍にセンサを設置	斜面全体を囲むようにセンサを設置
センサ種類	圧電型振動子(加速度計)	動線輪型振動子(速度計)
観測項目	①AE 波形 ②発生数	①AE 波形 ②発生数 ③発生位置

#### 3.2 AE 観測システム

通常 AE の観測では、斜面局部の微小な亀裂による波動の減衰を考慮して、共振周波数 15kHz のプリアンプ内蔵圧電型加速度計をセンサに用い、500Hz～15kHz の周波数帯域で平坦な応答特性を有する 4 ch の観測システムを構築した。観測開始当初には原因不明の電氣的ノイズが頻繁に混入したが、20kHz ローパスフィルタとデジタルフィルタ(波数 $\leq 3$  のデータはノイズとして除去)によるノイズ対策の実施後は問題なく AE を観測できるようになった。

一方、低周波 AE の観測では、斜面全体に分布する

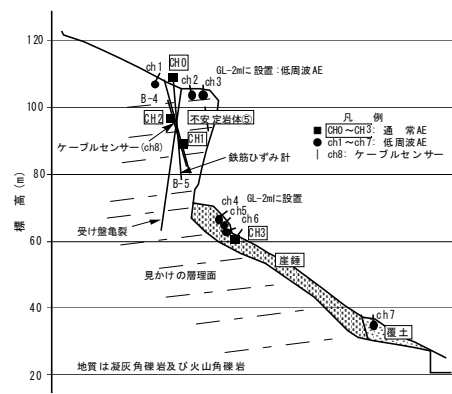
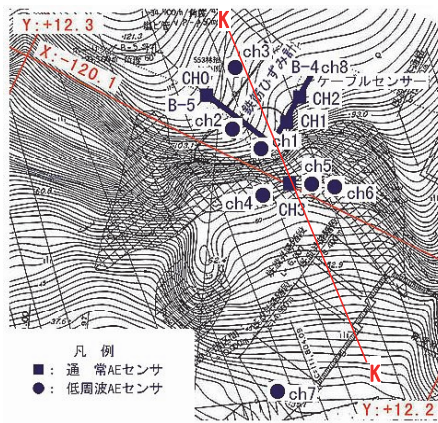


図-2 刀掛覆道斜面の AE 観測点配置 (左: 平面図、右: 断面図)

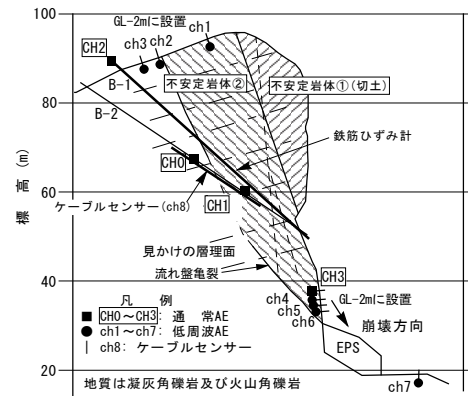


図-3 雷電トンネル終点斜面の AE 観測点配置 (左: 平面図、右: 断面図)

主要な亀裂による波動の減衰を考慮して、共振周波数 14Hz の MC 型速度地震計をセンサに用い、14Hz~1kHz の周波数帯域で平坦な応答特性を有する 7ch の観測システムを構築した。通常 AE と低周波 AE の観測システムを構成する主な機器を表-2 および表-3 に示す。

雷電トンネル終点と刀掛覆道のそれぞれについて、通常 AE : 4ch、低周波 AE : 8ch(ケーブルセンサ 1ch を含む) の発生数や波形データを観測基地内に設置した 4 台の計測専用コンピュータに取り込んだ。

なお、対象斜面が遠隔地に位置するため、携帯電話を利用して AE 発生数や記憶媒体の空き容量を遠くから常時監視できる観測システムを開発し、斜面の挙動監視やデータ回収の効率化を図っている。

観測結果を図-4 に示す。この期間には小規模な落石はみられたものの崩壊などの著変は認められず、AE にも異常な発生はみられない。しかし、図-4 からわかるように通常 AE、低周波 AE ともに春先の雪解け時期(3月下旬~4月頃)、台風や低気圧の通過に伴う集中豪雨の時期(7月~10月頃)、気温が氷点下に

表-2 通常 AE の主な計測機器

	機器名称	型式・仕様	メーカー
センサ	ブリアンプ内蔵 圧電型加速度計	ACS153WAIT 共振周波数 15kHz	NF 回路設計 ブロック
観測装置	AE 計測システム	7600/0712	
フィルタ	抵抗同調フィルタ	SR-4BL3 20kHz ローパス	
	フィルタソフト	波数 3 以下カット	

## 4. AE 観測結果

### 4.1 AE 観測結果の概要

AE 観測は、1998 年 3 月から約 1 年間の準備期間を経た後、1999 年 3 月から 2001 年 3 月までの約 2 年間連続して実施した。1 年間を通しての刀掛覆道斜面の

表-3 低周波 AE の主な計測機器

	機器名称	型式・仕様	メーカー
センサ	動線輪型速度地震計	SM-4/B-H 共振周波数 14Hz	広洋エレクト ロニクス
観測装置	トリガ監視装置	KTU-2000	
	波形データ記録装置	KDL-2000	
フィルタ		1kHz ローパス	

なって凍結が始まる時期（12月～1月頃）にはAE活動が活発化することが明らかになってきた。この傾向は、斜面を問わず、2年間を通して同様であった。

また、2000年3月末には当地から約55kmの距離にある有珠山の噴火直前の火山性地震が原因と考えられるAEが雷電トンネル終点および刀掛覆道の双方の斜面で同時に観測されている。以下に幾つかの代表的な観測結果とそれらから得られた知見を述べる。

#### 4.2 集中豪雨による挙動

集中豪雨時に観測された典型的な斜面挙動の一例を図-5に示す。この図は刀掛覆道斜面の、1999年7月末～8月初めの低気圧通過時の観測結果で、AEの発生状況と岩体頭部の亀裂に設置した伸縮計、亀裂中央部に設置した孔内ひずみ計、雨量などの計測データを対比した。7月31日未明の連続的な降雨から数時間遅れて通常AEとケーブルセンサに多数のAEが観測され、数は少ないが低周波AEでも観測されている。このAEにやや遅れて岩体頭部の伸縮計には約4mmの縮みが、一方、亀裂中央部の孔内ひずみ計には約13μmの伸びひずみが生じている。8月2日早朝の降雨時にもこれと全く同様な挙動が観測されている（図-5）。

このことから、地表に降った雨水が数時間後に地下に浸透し排水能力を超える過剰な地下水が供給された結果、岩体⑤背面の亀裂内の間隙水圧が速やかに上昇し、亀裂が押し広

げられて岩体頭部が山側に傾斜したと推察される。亀裂のひずみ挙動を精査すると、降雨から数時間後には亀裂が比較的急な速さで開くのに対し、降雨停止後は非常に緩やかな速度で亀裂が閉じていることから、豪雨時の斜面挙動には間隙水圧の比較的速い上昇過程と非常に緩やかな消散過程が関与して

いることが示唆される。

#### 4.3 有珠山の火山性地震による挙動

当地から南東方向に直線距離で約55km離れた活火山の有珠山で、2000年3月28日頃から火山性地震が頻発しはじめ、3月31日13時頃に噴火した。この間の雷電トンネル終点斜面と刀掛覆道斜面の通常AEの観測結果を図-6、図-7に示す。刀掛覆道斜面では、有珠山噴火2日前の3月29日の早朝から昼頃にかけて、岩体上部の空間（図-2の斜面上部CH0、亀裂下部CH1、亀裂上部CH2の3点）で多数のAEが観測されている（図-7）。刀掛覆道から直線距離で約100mの位置にある雷電トンネル終点斜面でも、これとほぼ同時期に発生数はやや少ないがやはり複数の観測点（図-3の亀裂上部CH0、斜面上部CH2、斜面下部CH3の3点）でAEが検出されている（図-6）。

一方、有珠山の火山性地震の影響は低周波AEでも観測されている。図-8はマグニチュードが2以上の火山性地震の累積数と雷電トンネル終点斜面および刀掛覆道斜面の低周波AEの累積数（岩体下部3観測点の合計数）を比較したものである。低周波AEは、3月28日～29日にかけては火山性地震の発生数の増加にほぼ比例して増加している。しかし、30日以降では、低周波AEの発生数の増加はわずかであり、通常AEでも同様な傾向が認められる。

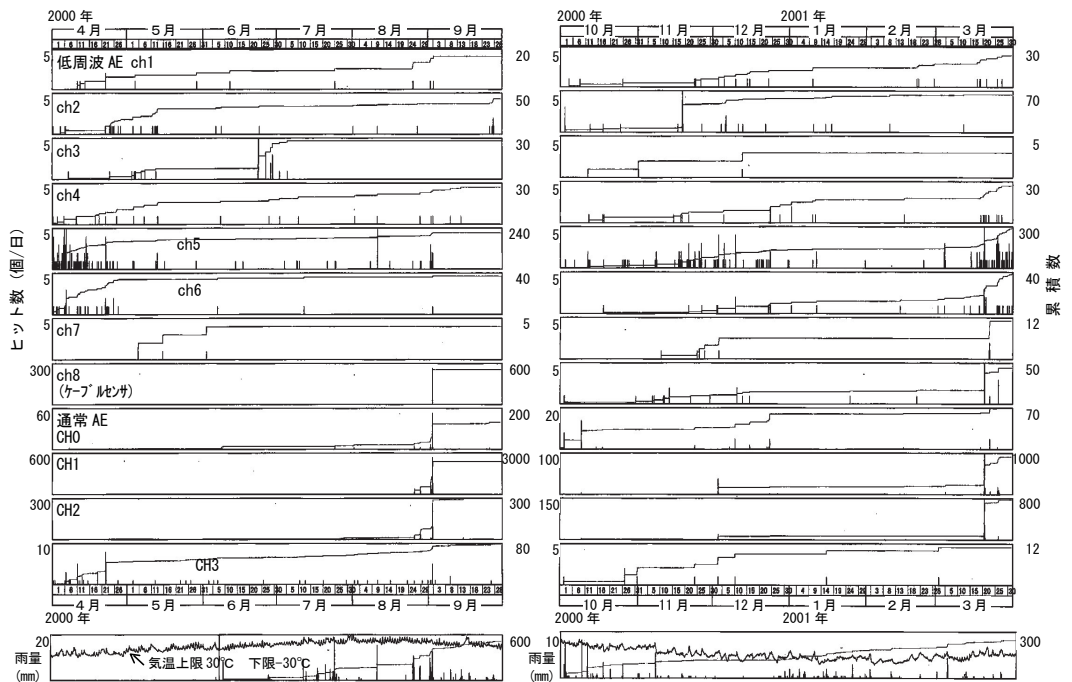


図-4 刀掛覆道斜面の一年間のAE観測結果(2000年4月～2001年3月)

有珠山の火山性地震が活発化する時期に対応して通常 AE と低周波 AE の活動が活発化していること、雷電トンネル終点と約 100m 離れた刀掛覆道の両方の斜面(比較的広域)ではほぼ同時期に AE が発生していること、AE 観測波形の周波数が地震波とは明らかに異なることなどから、これらは地震波の影響によって2次的に発生した AE を観測したものと考えられる。

#### 4.4 低周波 AE の発生位置標定

一つの AE を少なくとも座標が異なる3つの点で観測できれば、AE 発生位置の標定が可能である。低周波 AE の発生位置の標定方法には、3次元座標を用いるテーブルルックアップ法<sup>9)</sup>を採用し、発生位置の決定は平均残差が最も小さくなる座標とした。標定の対象空間は縦横各 60m、高さ 100m の直方体で、最小単位のセルは1辺が 1m の立方体とし、岩盤の異方性は考慮していない。

1999 年 4 月～2000 年 3 月の一年間に刀掛覆道斜面で観測された低周波 AE から求めた AE 発生位置の分布を図-9に示す。低周波 AE の発生位置は、岩体上部と下部の2つのグループに区分され、中間部分での発生は比較的少ない。このように発生位置が上下に分かれた要因としては観測点の設置が上下に偏ったため、中間部で発生した AE を捉えられなかったことも考えられる。しかし、低周波 AE の観測によって発生位置の追跡が基本的に可能であることがわかる。なお、AE 発生位置の決定において残差が最小となる弾性波速度は 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察される。

### 5. AE 発生メカニズムの考察

#### 5.1 地下水による AE 発生メカニズム

長期の AE 観測によって、台風や低気圧による集中豪雨の時期(7月～10月頃)の他に、春先の雪解け時期(3月下旬～4月頃)や気温が氷点下になって凍結が始まる時期(12月～1月頃)にも AE が多発することがわかってきた。雪解け時期の AE は、雪解けによる大量の地下水が斜面内部の亀裂に供給されて間隙水圧が上昇し、亀裂が開口・進展することによって発生すると考えられる。

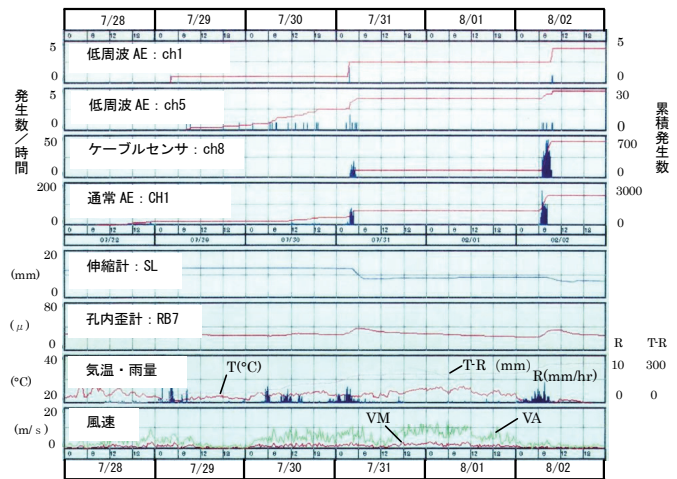


図-5 集中豪雨時の刀掛覆道斜面の挙動 (1999年7月28日～8月2日)

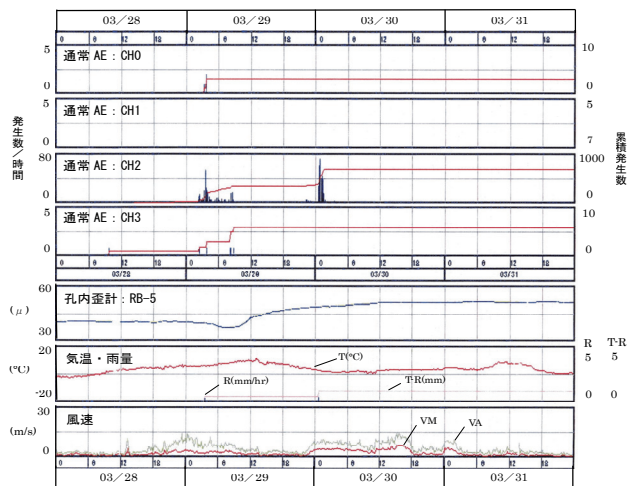


図-6 有珠山噴火直前における雷電トンネル終点斜面の通常 AE 観測結果 (2000年)

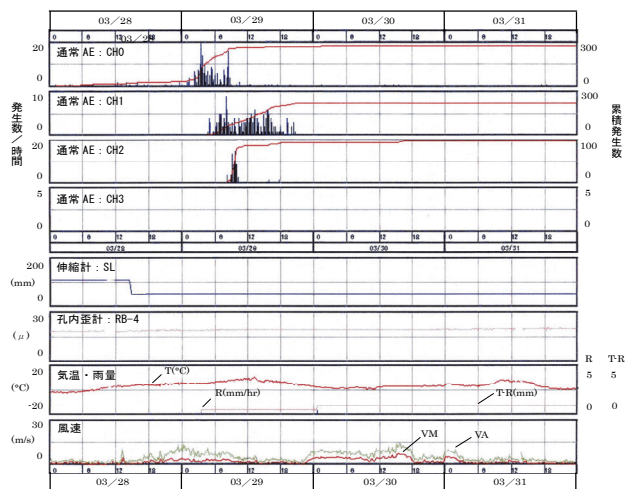


図-7 有珠山噴火直前における刀掛覆道斜面の通常 AE 観測結果 (2000年)

また、凍結が始まる時期には、地下水の滲出点が凍結することによって亀裂内の地下水位が上昇し、亀裂が開口・進展することによって AE が発生すると考えられる。

このように、AE の発生は、降雨と直接的に関係するのではなく、降雨や雪解けあるいは凍結などの気象現象と岩盤斜面ならびにその後背山地の水理特性(透水係数など)との相対関係によって、亀裂内の間隙水圧が上昇して亀裂が開口・進展する一種のハイドロリックフラクチャリング<sup>10)</sup>によって発生すると推察される。この考えを検証するため、S トンネル西坑口斜面の不安定岩体を対象に間隙水圧の測定を行った。その結果を図-10 に示す。2002 年 7 月 10 日早朝に時間雨量 69 mm の強い降雨があり、それから数時間遅れて岩体下部(深度 50 m 地点)の地下水位が約 12 m 上昇するとともに亀裂が押し広げられて岩体の頭部が山側に傾斜する動きがみられ、水位上昇過程にやや先行して多数の AE が観測されている。また、降雨の停止後には非常に緩やかな速度で地下水位が低下している。これらの結果は、4.2 節の豪雨時期の観測結果とそれに基づく推察を支持しており、AE 発生メカニズムへの間隙水圧の関与を立証するものである。

## 5.2 地震波による AE 発生メカニズム

有珠山の火山性地震発生時に刀掛覆道斜面で観測された通常 AE の代表的な波形とそのフーリエ解析の結果を図-11 に示す。これは不安定岩体⑤の亀裂を挟んだ上下の観測点 CH2 と CH1(離隔 2m)で同時に測定されたもので、第 1 波は上の CH2 に先に到達してから約 0.5ms の時間差で下の CH1 に到達している。また、上の CH2 で卓越していた 1250Hz 付近の高い周波数成分が下の CH1 では 850Hz 付近の低い周波数成分にシフトしている。この AE が問題の亀裂面上で発生したものであれば、周波数成分は CH2 と CH1 で類似するはずであり、CH2 から CH1 のわずか 2m の間で卓越周波数が著しく低い側にシフトしていることから、第 1 波は問題の亀裂面上で発生したものでなく、CH2 より上方の斜面上部付近で発生し、問題の亀裂を透過して下方の CH1 に到達した可能性がきわめて強い。また、第 2 波は周波数成分がさらに低いことから、第 1 波よりもさらに遠くで発生した可能性が強い。さらに、地震時の雷電トンネル終点斜面および刀掛覆道斜面の問題の亀裂変位(孔内ひずみ計や傾斜計)に豪雨時のような明瞭

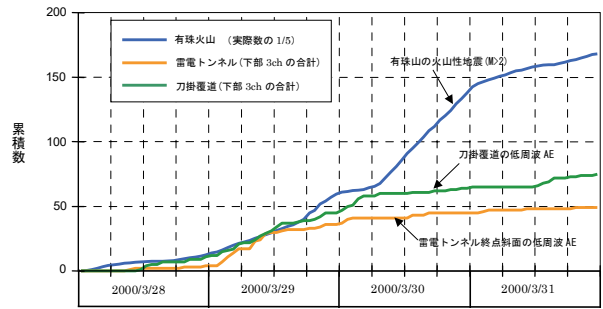


図-8 有珠火山性地震と低周波 AE の累積発生数

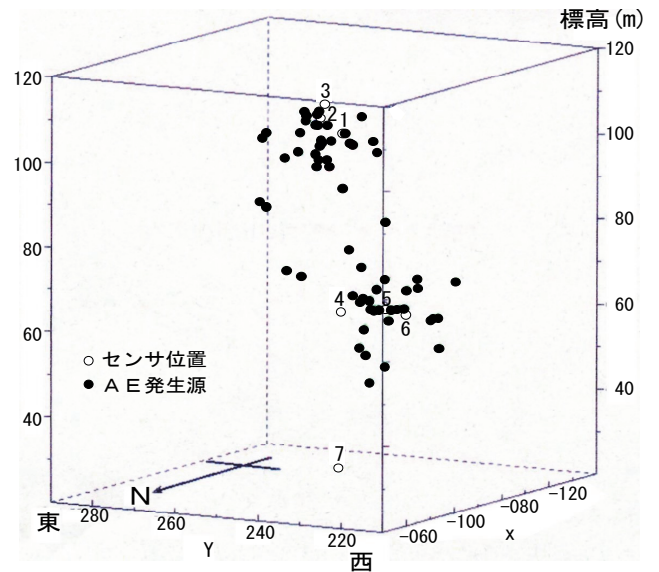


図-9 低周波 AE による AE 発生位置標定 (刀掛覆道斜面: 1999 年 4 月~2000 年 3 月)

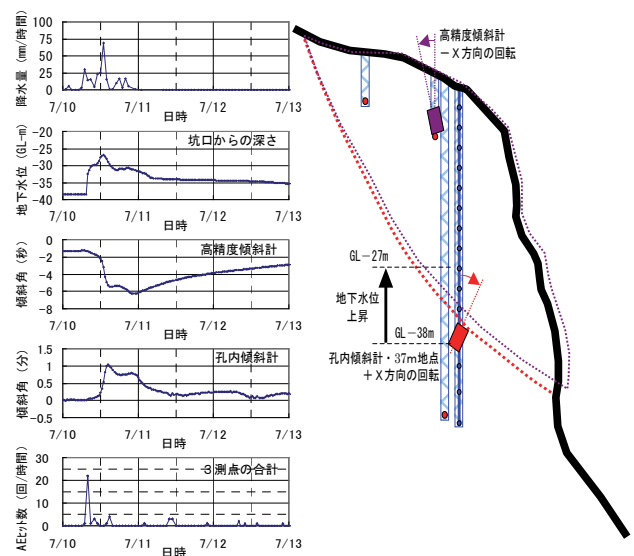


図-10 S トンネル西坑口斜面の不安定岩体の集中豪雨時における挙動測定結果

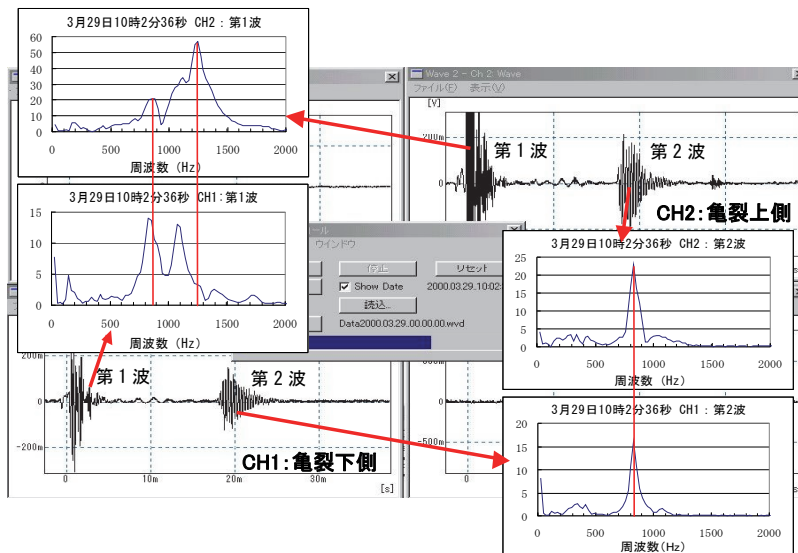


図-11 有珠火山性地震時に刀掛覆道斜面で観測された通常 AE の波形解析結果

かつ特徴的な動きはみられないことも上記の分析結果に整合する(図-6および図-7)。

これらのことから、地震波による AE 発生メカニズムは、図-12 に示すように、基盤岩を伝わって斜面下方から入射した地震波が上方に伝播し、斜面上部の境界面で反射して増幅された結果、この付近の亀裂近傍に応力集中が起こり、2次的に AE が発生したと考えられる<sup>11)</sup>。図-13 は前述の S トンネル掘削時の発破振動を岩盤内と地表付近の観測点で測定したものである。この図から発破振動の振幅は振源に近い岩盤内の観測点よりも地表部の観測点の方が数倍に増幅されていることから、同様に地震波も斜面上部での反射によって大きく増幅された結果(地質条件や周波数が異なるので増幅率は当然異なるが)、亀裂周辺に応力が集中して AE が発生したことが示唆される。

## 6. AE による崩壊予測の可能性

2年を越える長期観測によって、通常 AE では特定の亀裂の活動を高感度に監視でき、一方、低周波 AE では感度は劣るものの斜面全体の活動を効率的に監視できることがわかった。また、低周波 AE では発生源を実用的精度で推定でき、そこから得られる発生源の分布は安全管理の指標の一つと考えられる。しかし、AE の発生数、波形や発生位置の情報は、岩盤斜面の個別条件や採用する観測システムでかなり異なってくることから、絶対数や振幅(あるいはエネルギー)による

定量的な崩壊予測は現時点では困難である。

一方、亀裂の力学計測や水文気象の計測結果と AE 観測結果を総合して解析することにより、岩盤斜面を不安定化させる外的要因(雪解け、降雨、凍結、地震など)と AE 発生との因果関係がかなりの部分明らかになってきた。また、後日の追加測定によって、雪解け・降雨・凍結などによる AE 発生メカニズムを亀裂内の間隙水圧の上昇で統一的に説明できることがわかってきた。したがって、支配的な亀裂の変位や亀裂内の地下水位の計測と AE 観測を併せて行い、対象岩体の力学挙動を正確にある程度長期間把握することができれば、その挙動のトレンドから崩壊の予知はでき

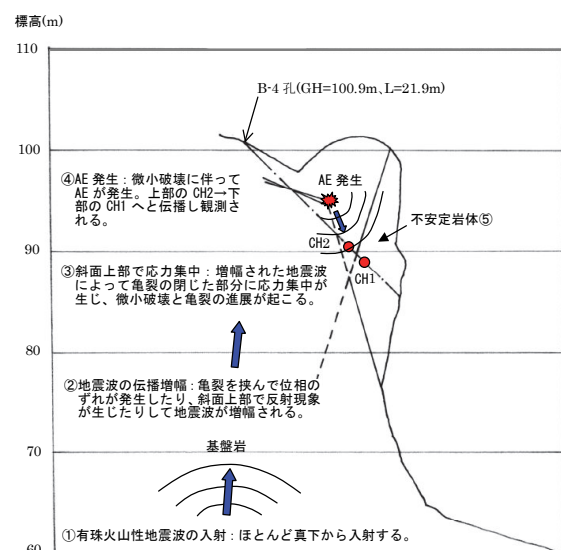


図-12 地震波による岩盤斜面の AE 発生メカニズム

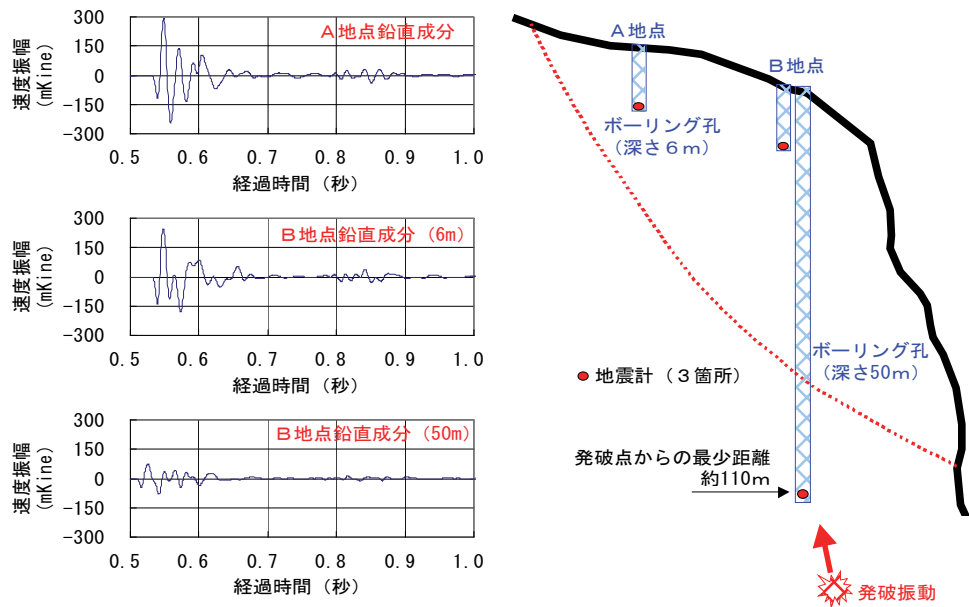


図-13 Sトンネル西坑口岩盤斜面の発破振動伝播状況

ないまでも予測は十分可能であると考えられる。

## 7. あとがき

北海道南西部の国道229号沿線の岩盤斜面を対象に2種類の計測方法で長期のAE観測を行った。気象条件などの自然環境が厳しく、観測システムが正常に機能するまでには多くの手戻りが生じたが、その反面多くの貴重な知見を得ることができた。ここでは観測結果の一部を述べるに留まったが、機会があれば別途報告したいと考えている。

最後に、共同研究を進めるにあたり、種々のご支援ご協力を頂いた北海道開発局小樽開発建設部、㈱ダイヤコンサルタントならびに㈱構研エンジニアリングの皆様にご心より謝意を表したい。

### 【参考文献】

- 1) 渡辺暉夫、「豊浜トンネル事故—地質学への課題—」、月刊地球、Vol. 18、No. 9、pp. 557～562、1996
- 2) 高橋 学、羽坂俊一、「豊浜トンネルおよび第2白糸トンネルの岩盤崩落について!」、地質ニュース、No. 520、pp. 5～15、1997
- 3) 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論文報告集、第55号、1999
- 4) 池田憲二、中井健司、日下部祐基、蓮井昭則、寺

田道直、中田文雄、「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」、土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文報告集、第57号、pp. 580～583、2001

- 5) 蓮井昭則、池田憲二、日下部祐基、中井健司、寺田道直、大井豊樹、「AEによる岩盤斜面の挙動モニタリング(その1)」、土木学会第56回年次学術講演会、III-A176、2001
- 6) 篠原 茂、池田憲二、日下部祐基、中井健司、笠博義、中田文雄、「AEによる岩盤斜面の挙動モニタリング(その2)」、土木学会第56回年次学術講演会、III-A177、2001
- 7) 蓮井昭則、渡邊一悟、寺田道直、中田文雄、「AEを用いた岩盤斜面の挙動計測と崩壊予測に関する研究」、電力土木、No. 309、pp. 38～42、2004
- 8) 氏平増之、鈴木新吾、駒崎征明、平間和夫、「ケーブルセンサの測定原理について」、資源・素材学会春季大会講演概要集、1103、1998
- 9) 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
- 10) 土質工学会、「土質工学用語辞典」、pp. 164～165、1985
- 11) 寺田道直、池田憲二、蓮井昭則、中田文雄、「有珠山火山性地震に伴う遠隔地岩盤斜面のAE挙動について」、日本地震学会講演予稿集、2001年度秋季大会、A19、2001