

◆ 特集：道路斜面崩壊のリスクマネジメント技術 ◆

AE 波形解析の岩盤モニタリングへの適用に関する検討

千田容嗣* 門間敬一** 浅井健一***

1. はじめに

平成8年2月に北海道豊浜トンネル坑口で発生した岩盤斜面の崩壊事故以来、岩盤斜面のモニタリングについて関心が高まっている。岩盤崩壊は地すべりと異なり、岩盤の変状等の前兆現象が現れてから崩壊に至るまでの時間が短いため、伸縮計や傾斜計を用いた岩盤斜面の変状の計測のみでは、岩盤崩壊が生じる危険性が迫っていることを必ずしも的確に察知することが難しい。

岩盤が破壊（崩壊）する際に弾性波動（Acoustic Emission (AE)）が生じることが知られていることから、岩盤崩壊が生じる前に、この岩盤の破壊に伴う AE を捉えられれば、岩盤崩壊が生じる危険性が迫っていることを的確に察知できる可能性が出てくると考えられる。このような背景から、岩盤崩壊に伴う前兆現象を早期に検出する手法として、AE センサーによる斜面動態の計測システム（以下「AE 計測システム」と呼ぶ）の開発が期待される。

これまでの AE 計測システムの開発に関する研究としては、土砂斜面において、AE 波形の解析・評価手法を確立するために、地盤変位量と AE パラメータ（AE 最大振幅値、AE ヒットレイト等）の経時変化との関係に関する研究^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}が行われている。また、AE センサーの構造や設置方法を開発するために、AE ウェーブガイドの構造^{1), 5)}や設置深度⁴⁾等に関する研究が行われている。

しかしながら、岩盤斜面で AE を計測した事例は極めて少なく、上記研究で得られた知見により岩盤斜面で AE 計測を行い岩盤崩壊が生じる危険性を察知するには、不明な点が多く不十分である。このため、現地に適用するには、土砂斜面と同様に岩盤斜面が崩壊する時に発生する AE 波形の解析・評価手法を確立するための研究、AE センサー

の構造や設置方法などを開発するための研究が必要である。

本研究では、上記土砂斜面における研究で得られた知見を参考にして岩盤斜面に AE センサーを設置して計測を行い、AE の発生要因別の波形の特徴及びノイズの分離方法の検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 観測及び使用データ

AE 計測を行った岩盤斜面は、全国岩盤崩壊モニタリングの1現場である逢坂地区（表-1）である。AE 計測に使用したシステムの構成を図-1に示す。計測には、共振周波数 25kHz の加速度型低周波 AE センサーを使用し、計測領域を 0.1 ~ 16kHz に設定した。

AE 波形の検討に使用したデータは、1997 年 4

表-1 逢坂地区の岩盤斜面の概要

斜面高さ	想定崩壊形態	岩種	地質年代	地形条件	AE センサ深度
約 40m	すべり	火山礫 凝灰岩	中新世	海食崖	最浅 700mm

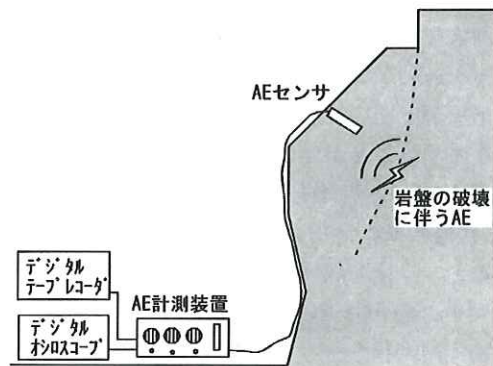


図-1 AE 計測システムの構成

月～1999年12月に計測されたものである。

3. データ整理

3.1 データの分類

計測データを AE の発生要因である岩盤変状（亀

裂：主に引張力によってひび割れが生じる現象、
 破碎：せん断力によってせん断面の摩擦や圧砕が生じる現象、小崩壊：数 m^3 の崩壊）及びノイズ（電気ノイズ及び降雨、足場作業、削孔、打音等の外的な要因によるノイズ）に分類し、月別に発生回数を集計した。

データの分類は、磁気テープに収録されたデータを再生し、耳で聞いたAE（音）の特徴をもとに気象データ、現地での点検結果、作業日誌を参照しながら行った。なお、AE（音）の特徴については、岩盤の破碎実験等の結果から、表-2の知見が得られている。

3.2 集計結果

月別、発生要因別のAEの発生回数を表-3に示す。今回得られたデータの特徴は、下記のとおりである。

表-2 発生要因と耳で聞いた時のAE（音）の定性的な特徴

種類	発生要因	耳で聞いたAE（音）の特徴
岩盤変状	亀裂	ピチッ、ピシッ、パチといった単発の小さな高い破裂音
	破碎	バシッ、バシーンといった単発の大きな高い破裂音
	崩落	ガラガラ、ゴロゴロといった破裂音が重なったやや低い音
ノイズ	電気ノイズ	ジージー、ブーンブーンといった連続音
	足場作業	ガチャーン、カキンカキンといった曇った調子の金属音
	削孔	ダッダッ、トットツといった一定間隔の継続音
	打音	コンコン、トントンといった曇った調子の音
	転石	打音に似るが、徐々に遠ざかる音（コロコロ、トン、コーン）
	雨	跳ねる調子のピチャピチャといった低い、小さな音

- (1) 岩盤斜面のAEの計測で得られたデータの特徴は、自然環境ノイズ（降雨、雷）、電気ノイズ、保守点検作業に伴うノイズ（削孔、打音等）が全体データの約18%含まれている。
- (2) 岩盤の変状によるAEの発生回数をみると、10月～4月にかけてAEが多く発生している。

4. AE波形の解析

岩盤の変状に伴うAE以外のデータ（ノイズ）

が比較的多く占めており、計測の精度を高めるには、これらのノイズの除去方法を検討する必要がある。ノイズの除去方法としては、次の方法が考えられる。

- (1) AEセンサーがノイズを拾わない位置及び構造でAEセンサーを設置する方法
- (2) AEセンサーがノイズを計測しないようにAE検出の基準となる振幅値（しきい値）を設けてデータをポスト処理する方法
- (3) AE波形の特徴によりノイズを判断し除去する方法

ここでは、(3)の基礎データを得るため、各発生要因のAE波形の特徴を検討する。

表-3 月別、発生要因別のAEの発生回数

年 月	岩盤変状によるAE			ノイズ						
	亀裂	破碎	小崩壊	電源	降雨、雷	削孔	打音	足場作業	転石	
1997年4月	6									
5月	2	1		2						
6月	2			16				2		
7月	1	3	1	2	1					
8月	4				1		1		1	
9月	3				3		4			
10月	16	3	14		1		1		5	
11月	24	1	10				1		1	
12月	2	2	25					5		
1998年1月	15	2	4		1					
2月	5									
3月	8									
4月	4					10	2			
5月	3									
6月	2									
7月							1			
8月	1				1					
9月			3		1		1			
10月	3		1							
11月	7	3	9							
12月	4		5		1					
1999年1月	10		8							
2月	5	1								
3月	16									
4月	15									
5月	3		3							
6月	3		1			1				
7月	1									
8月			1							
9月	1		1							
10月										
11月	4	1	4							
12月	5	2	12							
合 計	175	19	102	20	10	11	11	7	7	

4.1 検討方法

発生要因別の代表的なAEの信号波形（時刻歴波形図）及び波形解析によって得られた周波数分布図（周波数とパワースペクトルとの関係）を用いて、岩盤変状及び電気、降雨に起因するノイズのAE波形の特徴について比較検討した。

4.2 解析結果

各要因の時刻歴波形及び周波数特性は、(1)～(6)のとおりである。

(1) 岩盤の亀裂の発生に伴うAE波形

亀裂の発生に伴うAE波形を図-2に示す。

時刻歴波形をみると、信号の立ち上がりが鋭く、その持続時間が非常に短く、個々が独立して発生するという特徴がみられる。周波数分布をみると、11kHz付近にピーク周波数があり、大部分の成分が10～13kHzの周波数帯域に含まれている。

(2) 小崩壊に伴うAE波形

小崩壊に伴うAE波形を図-3に示す。

時刻歴波形をみると、瞬時に多数のAEが発生する特徴がみられる。周波数分布をみると、11kHz付近にピーク周波数があり、大部分の成分が10kHz～13kHzに含まれている。なお、2kHz～5kHz付近にも周波数成分がみられる。

(3) 電気ノイズに伴うAE波形

電気ノイズに伴うAE波形を図-4に示す。時刻歴波形をみると、周期的に発生する特徴がみられ

る。周波数分布をみると、4kHz付近にピーク周波数がみられ、大部分の成分が3～5kHzの周波数帯域に含まれている。

(4) 降雨に伴うAE波形

降雨に伴うAE波形を図-5に示す。

時刻歴波形をみると、振幅が小さく連続して発

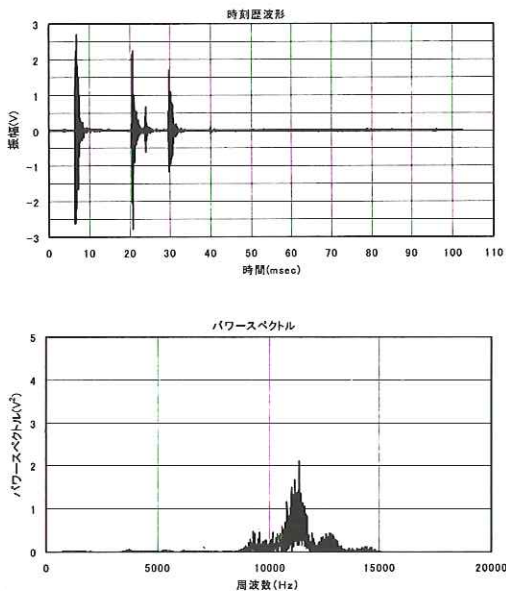


図-2 岩盤の亀裂の発生に伴うAE波形

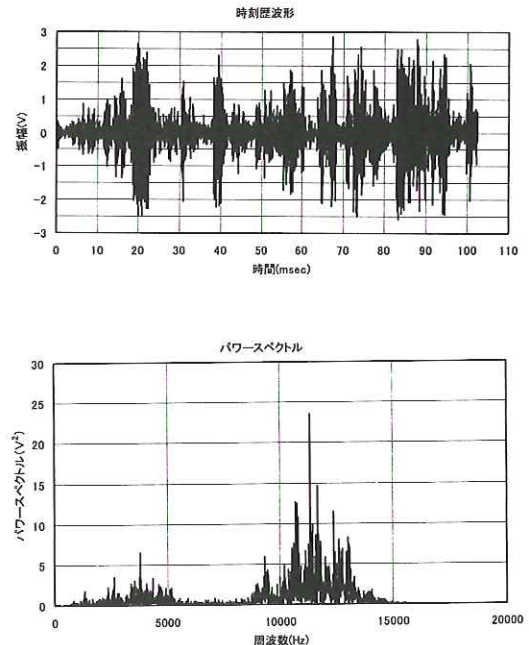


図-3 小崩壊に伴うAE波形

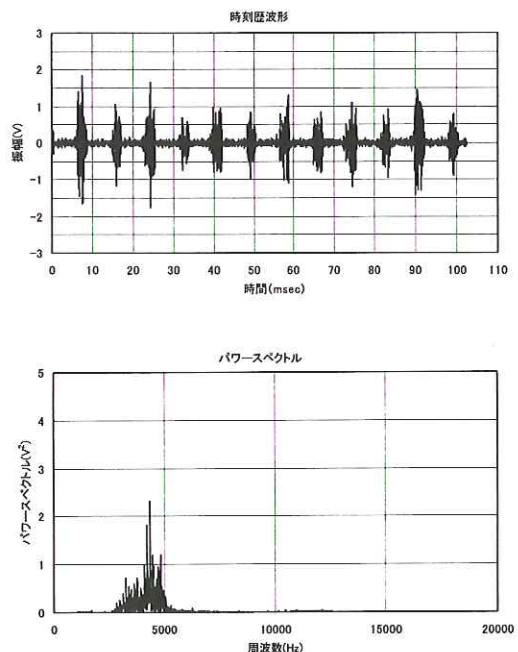


図-4 電気ノイズに伴うAE波形

生する特徴がみられる。周波数分布をみると、大部分の成分が1～2KHz、4kHzに周波数帯域に含まれている。なお、ピーク周波数は、不明瞭である。

(5) 足場作業に伴うAE波形

足場作業に伴うAE波形を図-6に示す。時刻歴波形をみると、瞬時に多数のAEが発生する特徴がみられる。周波数分布をみると、ピーク周波数が2kHz付近にみられ、大部分の成分が1～3kHzの周波数帯域に含まれている。

(6) 落石に伴うAE波形

落石に伴うAE波形を図-7に示す。時刻歴波形をみると、個々が独立して発生する特徴がみられる。周波数分布をみると、2KHz付近にピークがみられ、大部分の成分が1KHz～3KHzの周波数帯域に含まれている。

なお、破碎に伴うAE波形は、亀裂の発生に伴うAE波形と周波数分布が類似していること、削孔、打音に伴うAE波形は、足場作業に伴うAE波形と周波数分布が類似していることから、これらのAE波形の記述を省略した。また、最大振幅値の特徴を検討したが、ばらつきが大きく、特徴がみられなかった。これは、亀裂の規模や到達距離の影響が関係していると考えられる。

4.3 AE波形解析のまとめ

上記解析で得られた発生要因別のAE波形の特徴を一覧表にまとめた(表-4)。岩盤の変状に伴うAE波形とそれ以外のAE波形の周波数特性を比較すると、岩盤の変状に伴うAE波形は、10～

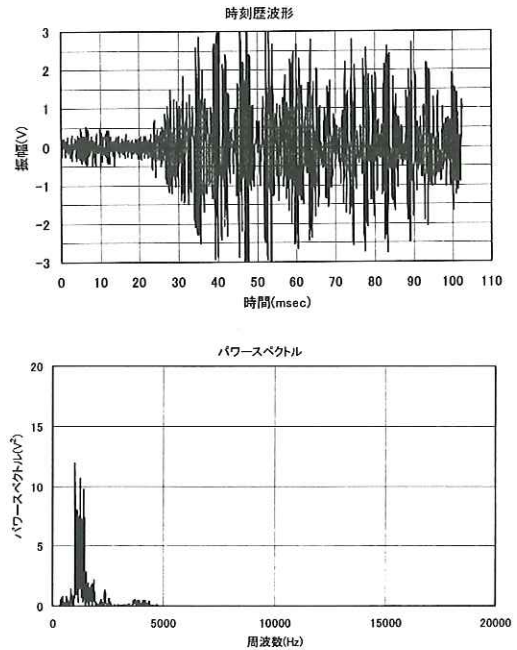


図-6 足場作業に伴うAE波形

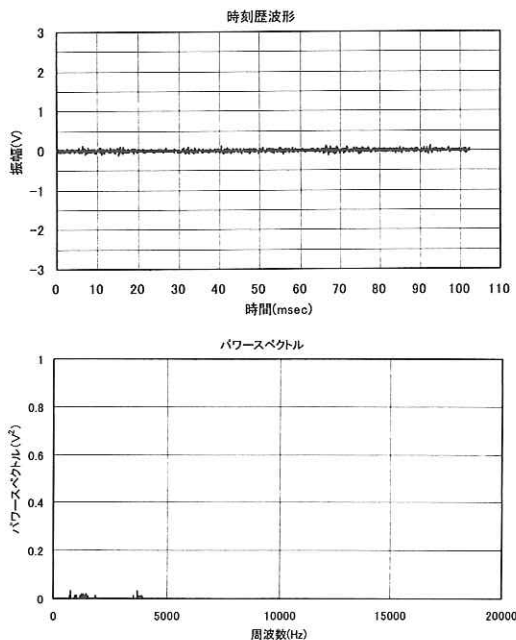


図-5 降雨に伴うAE波形

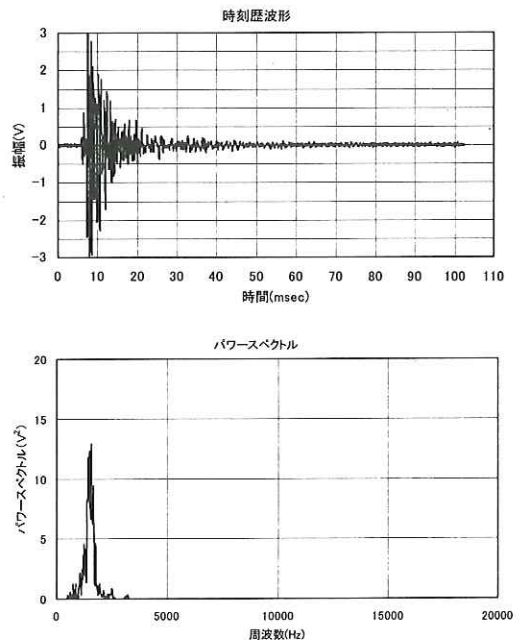


図-7 落石に伴うAE波形

表-4 各発生要因のAE波形の特徴

種 類	発生要因	時系列波形の特性	周波数特性	
			ピーク	周波数帯域
岩盤の変状	亀裂	・立ち上がりが鋭い ・継続時間が短い ・個々が独立して発生	11kHz	10～13kHz
	小崩壊	・瞬時に多数のAEが発生	11kHz	10～13kHz (2～5kHz)
ノイズ	電気	・周期的に発生	4kHz	3～5kHz
	降雨	・連続して発生	不明瞭	1～2kHz, 4kHz
	足場作業	・瞬時に多数のAE波形が発生	2kHz	1～3kHz
	落石	・個々が独立して発生	2kHz	1～3kHz

13kHzの周波数帯域に含まれている（低周波数帯域の成分がほとんど含まれていない）のに対して、ノイズは、1～5kHzの周波数帯域に含まれている。

5. 主成分分析によるノイズの分離方法の検討

上記の検討結果から、岩盤の変状に伴うAE波形とノイズのAE波形を判別するには、周波数分布に注目すればよいことがわかった。このことから、周波数特性に注目して主成分分析による岩盤の変状に伴うAE波形とノイズのAE波形との分離方法を検討した。

5.1 分析方法

下記の手順で主成分分析による周波数成分の検討を行った。

- ①発生要因別に分類したAE波形に対して、40kHzの速度でサンプリングし、約100msecの固定長の信号データを取り込む。
- ②信号データに対してFFT法による周波数解析を行い、パワースペクトルを求める。
- ③0～20kHzの周波数帯域を40等分割し、各帯域のパワーを累積して40個のパワースペクトルで代表させる。
- ④上記の40個のパワースペクトルを変数として主成分分析を行う。
- ⑤因子負荷量（各主成分と各変数（ここでは分割した各周波数帯域）との相関係数）と周波数の特徴を検討する。
- ⑥主成分空間において発生要因別のパターン分類について検討する。

5.2 主成分分析結果

第一主成分と第二主成分について、因子負荷量

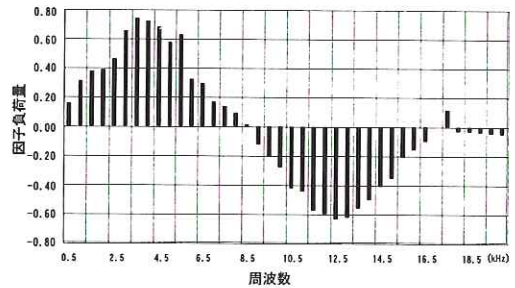


図-8 第1主成分における因子負荷量

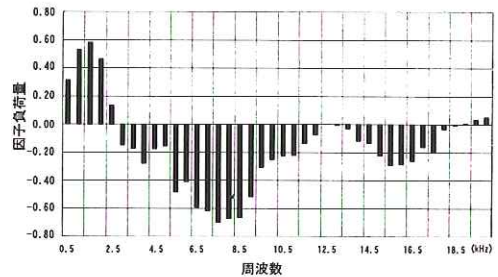


図-9 第2主成分における因子負荷量

と周波数との関係を図-8及び9に示す。

第1主成分では、8.5kHz付近を境に符号が逆転している。第1主成分は岩盤の亀裂発生などにより発生する高周波数成分が多く含まれると負の値になり、ノイズ成分のように低周波成分が多く含まれると正の値となる。このことから、第1主成分は、検出した信号が岩盤の亀裂発生などの高周波数成分かノイズなどの低周波数成分かを判別するのに有効であると考えられる。

第2主成分では、2.5kHz付近で符号が反転している。ノイズ成分のうち、電気ノイズは、4kHz付近を中心に分布するが、雨などの外的要因によるノイズは、2.5kHz以下の周波数成分のみを有している。このことから、第2主成分は、ノイズ成分の種類を判別するのに有効であると考えられる。

5.3 主成分空間における分析

第1主成分と第2主成分からなる2次元平面にデータをプロットしたものを図-10に示す。図-10から、各信号は岩盤の変状のグループ、電氣的ノイズのグループ、その他の外的要因からなるノイズのグループの3種類に分類できることがわかる。これらのうち、電気ノイズは比較的集中していることから、電気ノイズの各信号の周波数特性は類似しているものと考えられる。

また、岩盤の変状のグループを詳細にみると、

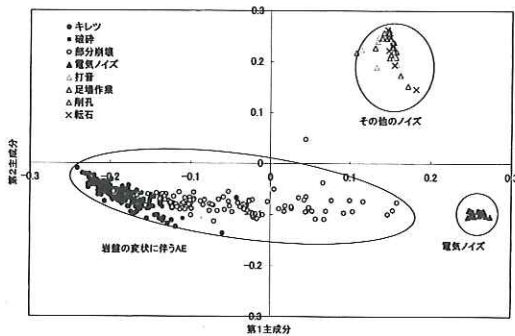


図-10 主成分空間におけるノイズの分離

亀裂の発生、破碎、小崩壊での分布が異なっており、破碎現象の進展を把握できる可能性がある。

6. まとめ

逢坂地区の岩盤斜面でAEの計測を行い、発生要因別にAE波形の特徴を検討した結果、下記の知見が得られた。

- (1) 岩盤の変状に伴うAEとノイズとでは周波数帯域に相違がみられた。
- (2) 主成分空間にデータをプロットした結果、岩盤の変状に伴うAE波形、電気ノイズに伴うAE波形、その他ノイズのAE波形の3種類に分離できた。

7. 今後の課題

異なる地質などでAE波形の時刻歴波形や周波数の特性などについて同様の検討を行うとともに、より詳細な波形の分析を行うことなどにより、ノイズの分離手法等を確立することが必要である。

参考文献

- 1) 福地伸一、石橋晃睦、岸野敬行、笹原克夫、海老原和重：斜面崩壊発生予知へのAE法の適用についての研究，第10回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集，pp37-42，1995.11
- 2) 門間敬一、海老原和重、吉松弘行：AEを用いたしらす斜面の崩壊予知，土木技術資料40-6，pp20-25，1998.6
- 3) 海老原和重、門間敬一：AEによる斜面動態計測システムに関する研究，土木技術資料41-2，pp44-49，1999.2
- 4) 海老原和重、門間敬一、石橋晃睦、藤原鉄朗：AEを用いた斜面動態観測におけるノイズ除去に関する検討，第37回地すべり学会研究発表講演集，pp237-240，1998.8
- 5) 門間敬一、海老原和重、金本康宏、藤原鉄朗：AE法によるしらす斜面の崩壊発生時刻の予測，第37回地すべり学会研究発表講演集，pp241-244，1998.8
- 6) 急傾斜地崩壊研究室，(財)砂防・地すべり技術センター，その他10社：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N0.228，1999.6
- 7) 門間敬一、千田容嗣、金本康宏、藤原鉄朗：AE法による表層崩壊監視に関する研究，第39回日本地すべり学会研究発表講演集，pp181-184，2000.8

千田容嗣*



独立行政法人土木研究所技術推進本部主任研究員
Yoji Chida

門間敬一**



東亜グラウト工業(株)
(元 国土交通省土木研究所
砂防部砂防技術総括研究官)
Keiichi Monma

浅井健一***



独立行政法人土木研究所土砂管理グループ地すべりチーム主任研究員
Ken-ichi Asai