

AEによる斜面動態計測システムの研究動向

建設省土木研究所、(財)砂防・地すべり技術センター他民間10社共同研究

門間敬一*

はじめに

アコースティック・エミッション¹⁾ (Acoustic Emission: 以下AEと記す) は、直訳すると「音響的放射」であり、ガラスなどにひびが入るときの鋭い音をはじめとして、物が壊れるときに生じる音は日常よく経験するAEの例である。AEは、固体の微小な変形や破壊に伴い、放出される弾性波であり、斜面内部の破壊の進行など終局的な破壊に至る過程の情報が含まれていると考えられる。金属、岩石、コンクリート、セラミックス、木材、プラスチックなど様々な材料でAEが観測され、耳に聞こえるほど大きなAEはむしろ稀で、通常、AE波のエネルギーは微弱で、その検出には高感度の変換子や増幅器を必要とする。

一方、日本では平坦地が少なく、急な斜面の直下や直上部にも多くの人家などがあり、ひとたび斜面崩壊が発生すると、多くの犠牲者が出る危険性を内在している。現在の斜面崩壊発生予測システムは、地すべり地におけるモニタリングに代表される伸縮計・GPSなどを用いて、土塊の緩慢な動きを観測し、そのデータを解析して、崩壊発生を予測するものであり、比較的急激に発生する斜面崩壊現象には適さない部分がある。

そこで、時間的余裕をもって適切な避難を可能にするためには、早期のより精度の高い、またリアルタイムの斜面崩壊発生予測システム開発が必要である。また、岩盤崩壊のモニタリング技術については、平成8年2月に発生した豊浜トンネル坑口における岩盤崩落災害を契機に、その重要性が再認識され、AE法の適用が注目されるようになってきている。また、かけ崩れ災害の実態²⁾によると、斜面を構成する土質別に崩壊発生頻度を整理した結果では、崩壊した斜面の7割は土砂斜面であり、それらの多くは、急激な「表層すべり」により生じていることが認めら

れる。

AEにはその特質などから、減衰やノイズといった難しい問題が内在しているものの、外見上の崩壊に至る前の、内部構造の破壊が先行的に捕捉されうることから、斜面崩壊モニタリング技術の確立にAE法の適用³⁾⁴⁾⁵⁾が期待されている。

1. AEパラメタと解析手法

AE波のパラメタを図-1に示す。AEは電気信号に変換され、図に示すような波形として認識されている。その主なパラメタには、H: ヒット (AEの1信号)、D: 波長もしくは継続時間 (1ヒットの長さを時間で表す)、C: リングダウンカウント (波形信号がしきい値を切る回数)、S: しきい値 (AEを認識させるトリガ・レベル)、A: 最大振幅値 (一般にボルト (V) 表示される、振幅の最大値)、R: 立ち上がり時間 (波動が認識されてから最大振幅値に至る経過時間) などがある。

このほか、単位時間当たりのヒット数・リングダウンカウント数をそれぞれヒットレイト・カウントレイトと呼び、計算値としてエネルギー、m値 (振幅規模別頻度分布の微分型勾配)、b値 (同左積分型勾配) などがあり、解析手法として位置評定

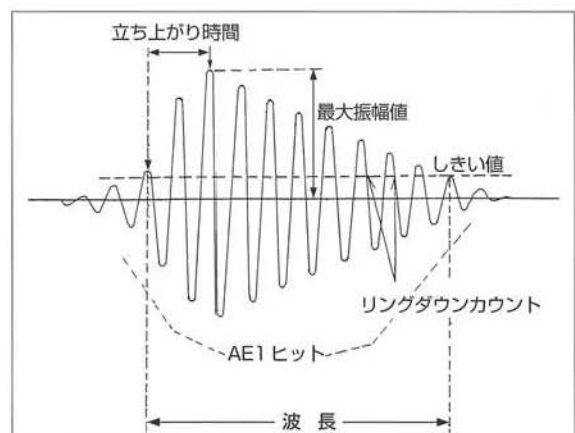


図-1 AEのパラメタ

*建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室長

(Location：AEの3次元発生位置を概ね5個のセンサにおける捕捉時間差により特定する)、レイトプロセス(AE発生の時系列分析により破壊時間を推定する)などがある。

2. 斜面崩壊動態計測への展開

(1) 斜面崩壊への適用経緯

AE法の斜面崩壊モニタリングへの適用は、当初地すべりを対象に検討され、1980年代に土塊のすべりを検知することが困難と認識された。一方、急傾斜地の崩壊については、その必要性から1993年頃に検討が開始され、多くの成果(各タイプのセンサの感度分析、ウェーブプロットの開発、土砂斜面におけるAEの意味・既往変形インデックスとの関係、室内崩壊試験及び減衰特性など)を得ている。最近では屋外実地斜面での崩壊実験も数回行われ、また近年の全国岩盤崩壊モニタリング(道路局所管)において、多様な計測システムを駆使した適用の試みがなされており、その成果が期待されている。

(2) しらすの崩壊実験

鹿児島県に広く分布するしらすの急崖では、従来から集中豪雨による土砂災害が発生し、しらす斜面の崩壊予知等をAE法の現地実験により検討したので、以下に概要を紹介する。



写真-1 整形された斜面

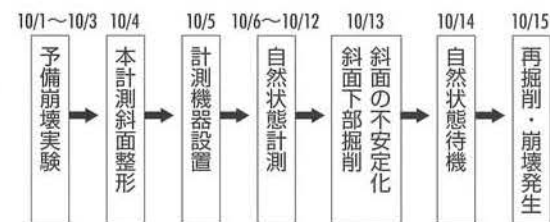


図-2 実験の手順

実験斜面として、採取場山際で風化の比較的進んでいない、自立する切土部を選び、バックホウにより慎重に整形した。人工的な崩壊を起こしやすいよう、斜面をほぼ垂直に整形するとともに、斜面の左右両端を深く掘り込み、側面からの拘束がない開放状態とし、斜面中央最下部も掘削・除去した。整形後の状況を写真-1に示す。

実験斜面の高さは約6m、幅は約5m、奥行きは約3mである。斜面下部は比較的新鮮な固いしらすで、上部表面から下部約1.5mまでは化学的風化のため褐色化した層が認められる。また、前面垂直方向の土壌硬度指数は斜面の下部で最も硬く25程度、中段で軟らかく19程度、上部で再び硬度が増し23程度であった。左側面の土壌硬度指数は31程度、右側面のそれは26程度であった。

実験の手順を図-2に示した。本実験は平成9年10月1日から10月15日にかけて実施した。計器の配置とウェーブガイドの仕様など、詳細は「土木技術資料, vol.40, no.6」を参照。

高周波センサで計測されたデータについて、以下に述べる。

人工崩壊までの工程は、安全管理のため、好天の続いた10月13日に斜面下部を予備掘削し、不安定化させたのち放置した。その後、この掘り込みにより、斜面天端には幅約2cmのクラックが発生した。次に10月15日の早朝から天端のクラックへ注水を行うとともに(毎分5ℓ)、午後から斜面下部側部をバックホウにより、側方からアームを伸ばして逐次5回掘削し、AEの発生挙動から斜面が十分に不安定化していると判断された。

16:20から注水量を22ℓの最大限に増やし、多少の自然降雨があり、崩壊を待機したところ、掘削終了から約3時間後に崩壊した(写真-2参照)。



写真-2

掘削開始から崩壊に至る約6時間の代表的なAE発生と他の計器のデータを図-3に示す。掘削を重ねるごとに、AE発生数の低下・収束に要する時間は逐次増加している。また、5回目の掘削以降は、AE発生数が増加（以前の約2～3倍）した状態が続き、その後AE発生数が急激に多い「うねり」を2回繰り返し、崩壊発生を予感させたが、概ね18時45分から累乗的な増加が顕著となって、崩壊に至った。一方、伸縮計及び傾斜計についても、AE発生数とほぼ連動した様相で変化していることが認められる。

対象斜面は、下部に比較的固結度の高いしらすと、上部に少し風化したしらすが右下がりに厚く堆積した構造になっている。また、向かって左側の斜面が最終的に崩落せずに残存している。図-3の伸縮計の変化を詳細に見ると、5回目の掘削後、伸縮計-1と-2ともほぼ同様に増加する傾向にあるが、崩壊前約1時間（18：15頃）から伸縮計-2（右側）の開きが大きく増加し、伸縮計-1の変化が緩慢になっていく傾向が認められる。また、傾斜計の変化

は、16：00頃から上部に設置した傾斜計-3が前方へ傾動しており、18：00頃から中間部の傾斜計-2は後方への傾動が顕著に、下部の傾斜計-1は前方への傾動が顕著になって、そのまま崩壊に至っている。

これらの地質条件、崩壊後の形状、伸縮計等の動き及びビデオ画像に認められる状況を総合すると、全体としてはトップリング（転倒）に類似した崩壊であるが、中下部間ではバックリング（はらみ出し）の傾向も認められ、崩壊は右側から生じ、一部滑動状態での崩壊も含んだ複合的な崩壊形態を示している。

崩壊前に各センサが捕捉したAEヒットレイトを比較すると、全体的な傾向は同様であるものの、捕捉したAEヒットレイトには大きな差があり、理由としてセンサの設置方法・位置の相違が考えられる。設置したセンサのうち、斜面下部に設置したステンレス製ウェーブガイドセンサ（ch-3）で最も多数のAEが早い段階から捕捉され、次が土木研究所式ウェーブプロットセンサ（ch-1）であった。しかし、直接埋設型センサのAE総数は少なく、また斜面上部のセンサでも少ない傾向にあった。

これらAEヒットレイトの相違は、設置センサ周辺で開放される歪エネルギーの差によると考えられ、対象斜面の崩壊形態・機構の推定結果と一致している。すなわち、斜面の上部では、トップリング状態で崩壊し、変位量は大きい内部応力は小さいと考えられ、相対的な歪エネルギーは小さく、これに対して斜面の下部では、大きな内部応力の集中があり、変位そのものは小さくとも、歪エネルギーが大きくなり、下部に設置したセンサに多数のAEが捕捉されたと考えられる。

また、同じ下部に設置したセンサでも、ステンレス製で多くAEを捕捉する傾向にあり、これは結果的にステンレス製ウェーブガイドセンサが崩壊部に設置され崩壊し、土木研究所式ウェーブプロットセンサは非崩壊部に残存したためと考えられる。

図-4に、崩壊の約3時間前と約5分前のAE波形（ch-3）を示したが、5分前の波形は振幅・波長ともかなり大きくなっている。また、図-5に、崩壊前30分間のヒットレイトとカウントレイトを示したが、崩壊の約5分前に、カウントレイトが急激に増加し、逆にヒットレイトは急激に減少している。これは、短時間に膨大なAEが発生しているため、AE

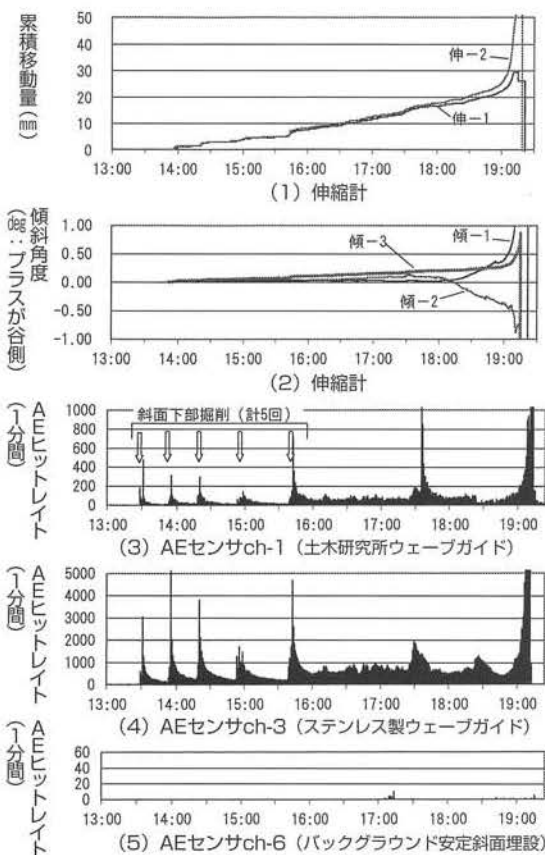


図-3 斜面下部等のAEヒット数と他のデータ

波形が重なり合って、カウントレイトは正確に計測されたものの、ヒットレイトはこの影響で識別困難となり、減少しているものと考えられる。

なお、この崩壊形態は、「転倒」と「すべり」の複合であり、硬いしらすの毛管的構造の破壊に伴うAEはもちろん、ウェーブガイドとの摩擦によるAEも多く含まれると考えられるので、注意を要する。これらの分別方法とAEパラメタの相違点分析が必要であり、ひいては崩壊予知の確実性にもつながることから、今後の重要研究テーマである。

今回の実験により以下のことが明らかになった。

① 計測システムについて

- 1) 垂直に近い土砂斜面の場合、AEセンサは内部応力の集中する斜面下部に、ウェーブガイドを用いて設置することが望ましい。
- 2) 土砂斜面で、60kHz程度の高周波AEセンサを用いた場合、数十cm埋設することにより、降雨などのノイズを除去できる。
- 3) 急傾斜地の崩壊のように、短時間に終結する現象に対して、AE計測システムは、リアルタイムで現象を捉え、情報量も多い利点がある。

② 崩壊予知について

- 1) しらす斜面の崩壊のように、砂質斜面の崩壊でも、短時間間隔で観察すれば、地すべりと類似したクリープ的な挙動を示す。
- 2) AEセンサは、的確に設置することにより、

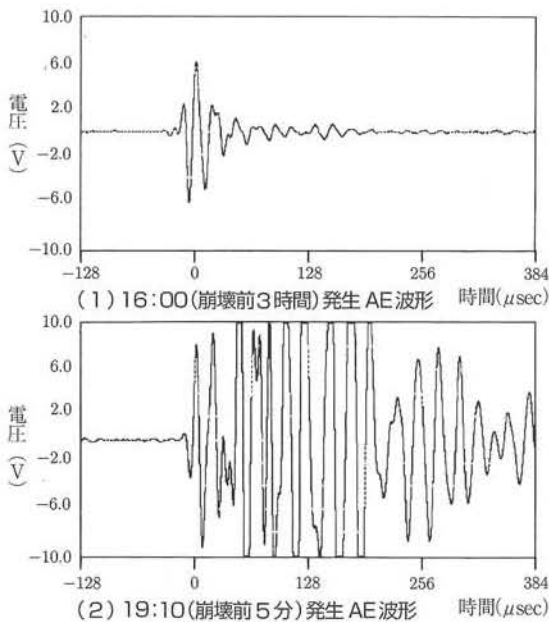


図-4 崩壊の約3時間前と約5分前のAE波形

斜面の崩壊に至る挙動を詳細にモニタリングでき、AE発生を解析することにより、崩壊発生時刻を予測することも可能である。

- 3) AEを大量に捕捉できた場合、AEパラメタの状況により崩壊の事前（ヒットレイト・波形）と直前（波形の重合等）の予知が可能である。

3. 共同研究

(1) 目的など

自然斜面の異常変動を早期に捉え、かつ崩壊時間等の予測手法として、AE計測技術の適用性を検討し、現地観測に適した計測システム開発を目的として、平成7年度から同10年度までの4年間、共同研究「AEによる斜面動態計測システムに関する研究」を、建設省土木研究所、指定機関（(財)砂防・地すべり技術センター）及び民間10社（(株)エヌエフ回路設計ブロック、川崎地質(株)、(株)興和、佐藤工業(株)、飛鳥建設(株)、西松建設(株)、日本工営(株)、日本フィジカルアコースティクス(株)、(株)間組、(株)フジタ）の共同で行った。

その成果の一端を以下に紹介するが、詳細は共同研究報告書第228号（印刷・公開されている）を参照されたい。

(2) 代表的な波形の例

AEは、それが可聴域の周波数（約10kHz以下）であれば、人間が音として認識でき、例えば岩の破壊音はピキパキ〜ビシバシ、土砂の摩擦音はジャリゴリ〜スズゴー、落石音は文字どおりカラコロン〜ガランゴロン、雨によるノイズはピチパチといった具合である。その識別に際し、経験を積めば、最

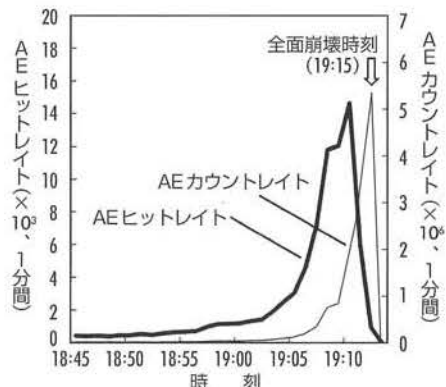


図-5 崩壊前30分間のヒットレイト及びカウントレイト比較

も正確である可能性が高い反面、他者への説得性に乏しい。

分別に波形のパターン認識がより定量的なため、代表的な波形を以下に例示する。

図-6の(a)は「砂の三軸せん断試験の80%荷重時」、(b)は「同すべり破壊時」、(c)は「砂岩の静的破碎時」、(d)は「岩盤ハンマー打撃時」、(e)は「雨滴によるノイズ」、(f)は「電源のノイズ」、(g)は「無線線のノイズ」、(h)は「落石による打撃音」である。

これらの波形は、横軸(時間)のスケールを縮小しているため、波形として認識しにくいものの、それぞれ特徴を持っている。しかし、波形からのヴィジュアル~定量的分別でも限界があり、「砂のせん断試験時」のものは「摩擦音」であって「岩の破碎音」とは異なるが、「岩の破碎音」が多数連続すると、識別不能に陥ること及びAEと「雨滴ノイズ」の識別が困難であることなどがわかる。

(3) 分析の例

① 木更津の崩壊実験：降雨時と非降雨時（降雨時のAEパラメータの特徴）

平成9年7月に、千葉県木更津市内の土砂採取場で、表層土砂崩壊の実地実験を行ったので、その成果の一部を紹介する。

この実験では、高周波AEセンサ（60kHz共振型）・低周波AEセンサ（省略）等と土研式WR・ステンレスWGの組み合わせによる、5種類のセンサ計11個を用い、対象斜面の上・中・下方に目的を持って配置した。これらいずれのAEセンサにおいても降雨と連動してAEを検出する傾向にあり、降雨時に計測されるAEの大部分は雨滴あるいは流水によって発生したAEがセンサまで伝播したものと考えられる。しかし、土砂斜面の崩壊は降雨時に斜面内部の間隙水圧が増加し土砂の

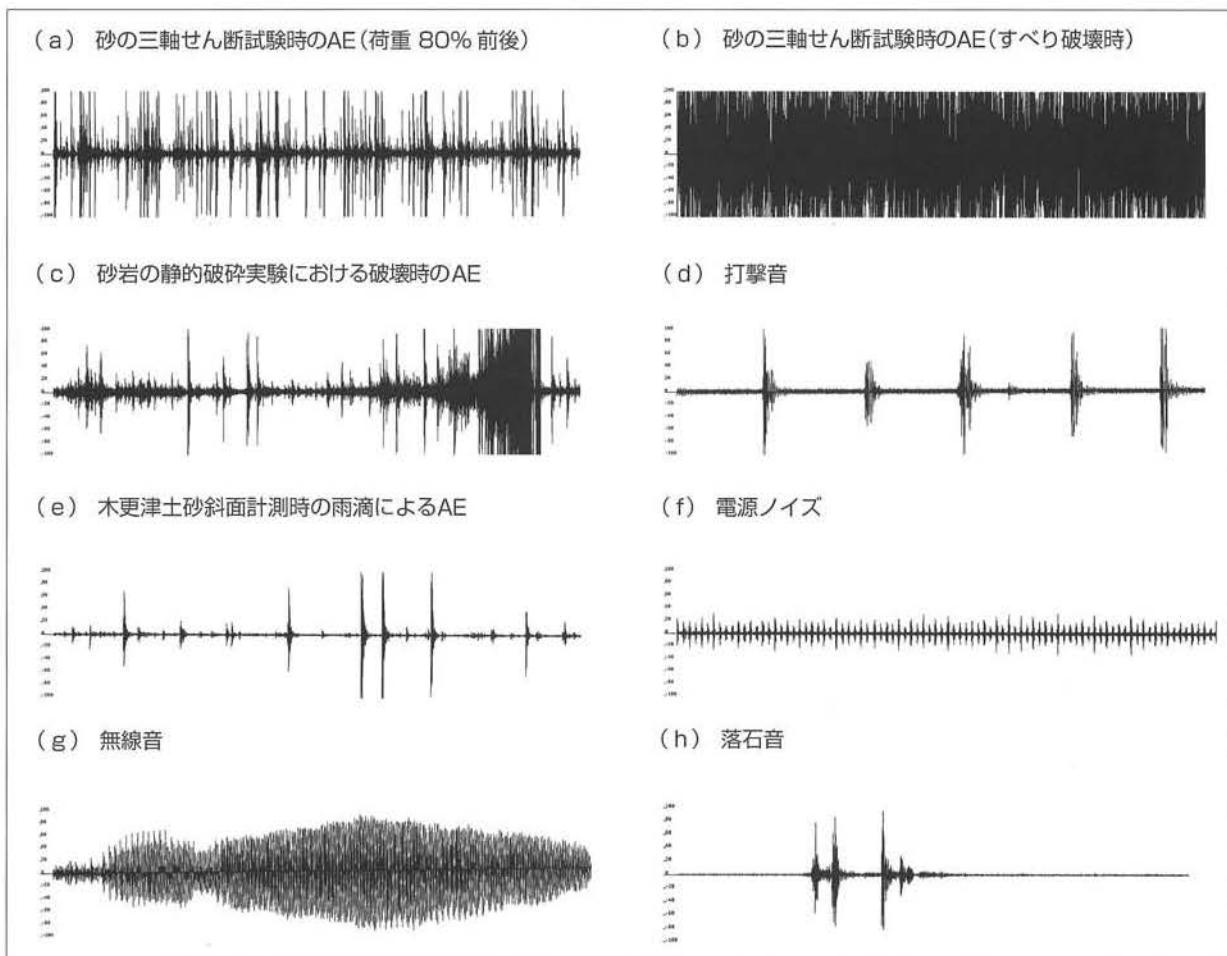


図-6 代表的な波形の例

強度が低下することによって発生するため、検出されたAEの中には斜面崩壊の前兆現象である土粒子の摩擦によって発生したAEも含まれている可能性が高い。

したがって、AE計測を用いて斜面の動態を監視するためには、計測された個々のAE信号と物理的な現象との対応を明確にし、発生要因別にAEの発生パターンを明らかにする必要がある。そこで、斜面の不安定化に起因するAEが多く発生している時間帯について、AEパラメタから降雨時のAE波形の特徴化を検討した。

なお、検討には降雨と小崩壊が発生している時間帯と小崩壊のみが発生している時間帯についての高周波AEセンサ（ステンレスWG）のデータを用い、これらの時間帯に発生したAEについて、振幅、波形長、カウントの各AEパラメタを分析した。相互のマトリックスでプロットした結果を図-7に示す。

図に示される時間帯①のデータに注目すると、ch-1と2及び3では、プロットされる範囲が異なっていることが確認できる。すなわちch-1では、2及び3と比較して、カウント及び波形長が小さく、振が大きなAEを多数検出している。とくに、ch-2及び3では、波形長が長く、カウントが大きくなっても、60dBを超える振幅を有するAEは発生していないという特徴がある。これは雨滴に起因するAEが低い周波数を持つことによるものと考えられる。また、時間帯②においては、多様な波形タイプを示すAEが発生しているものの、時間帯①におけるch-1で検出しているタイプのAE（振幅=大、波形長=短、カウント=少）も数多く発生している。

時間帯①中のch-1の高周波AEセンサは、斜面最下部に埋設されており、斜面下部付近の小規模崩壊に起因するAEを最も検出しやすい位置に設置されている。このことから、ch-1に特異なAE波形は小規模崩壊に起因するAEである可能性が高い。一方、雨滴に起因するAEは、振幅が小さく、波

形長が長く、また低周波という特徴を有しているものと考えられ、ch-2及び3で検出されているAEのパラメタの特徴と一致する。また、ch-2及び3で検出したAEの中にも、小規模崩壊に起因するAEが含まれるものと考えられるが、伝播の過程で波形が長く周波数が低くなった可能性もある。このことは、時間帯②で発生しているAEには多様なタイプがあることから裏付けられる。

しかしながら、前述した低周波AEセンサを用い、異なる時間帯の人間の経験的な聴覚から識別したデータのパワースペクトル分析（多数の波形を連続的周波数帯の大きさの分布比較）などによると、上記と相反する結果を得ていることから、結論の信憑性には注意を要し、さらなる分析が必要であり、今後の研究進展が望まれる。

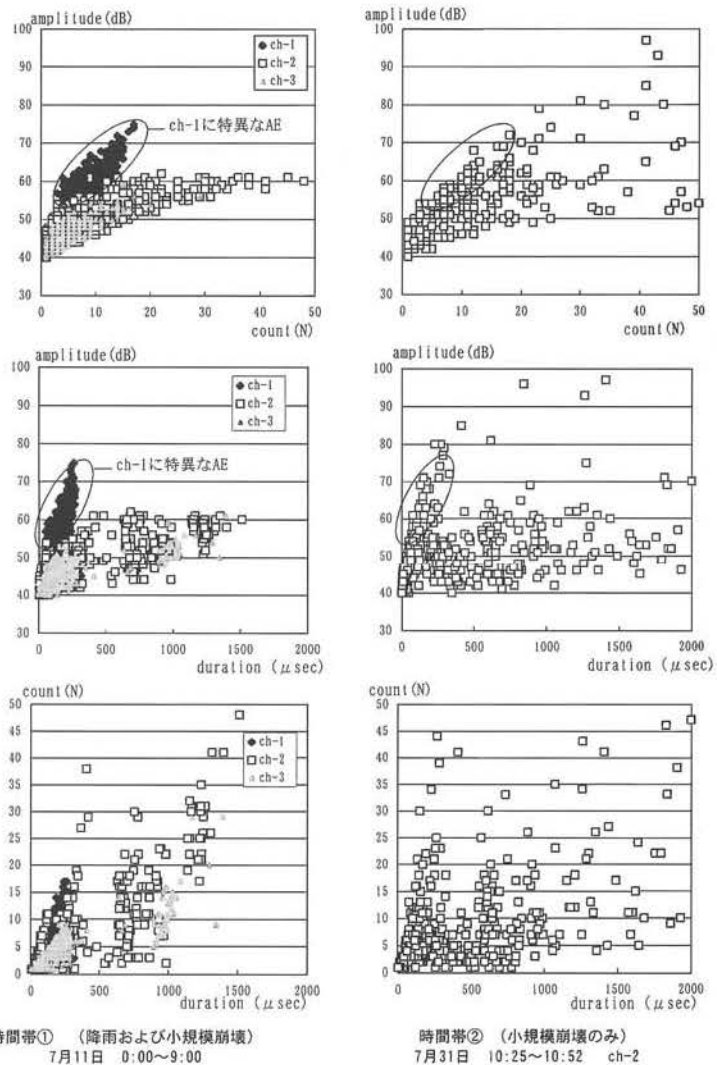


図-7 振幅、波形長、カウントのマトリックス分析

② 日光の岩盤崩壊実験：改良b値による破壊の分析

1) 改良b値について

既往研究より報告されるb値ならびにm値は、ほとんどの場合に単位時間当たりの振幅頻度により算出されており、算出に用いた振幅値の母数や振幅範囲が不明確である。また、AEの最大振幅値に与える影響因子として、AEセンサの取り付け方法、媒体によるAE波伝播減衰の違いなどが挙げられ、さらにはAE源がいつも同一場所に発生するとは限らないので、その発生源により振幅値の広がりが大きくなることもある。したがって、地震学での成果は、そのままAE法に適用するのは困難であると考えられる。AEが対象とする破壊現象は、地震に比べ極めて短時間に集中することから、計測時間とともに刻々得られるAEデータに基づきb値を算出し、破壊の定量化を行うことが不可欠となる。

以上のことから、AE計測に基づく振幅頻度分布よりb値ならびにm値を算出する場合、算出振幅母数と算出振幅範囲をある程度普遍化させる必要があり、振幅分布の統計諸量に着目した改良b値が提案されている^{6) 7)}。改良b値の算出方法は算出に用いる振幅個数を常に直近の一定個： β とし、振幅分布の平均値と標準偏差に基づき算出振幅範囲を定めている。この算出方法により求められるb値は改良b値：“Improved b-value”とされ、以下のように定義される。

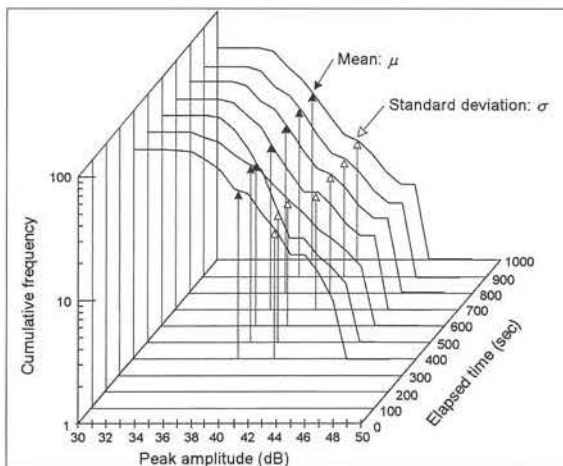


図-8 計測時間400秒から100秒ごとに1000秒までのAE振幅分布 (模型砂斜面の載荷実験のAEデータ)

いま、振幅値が $\mu - a_2 \cdot \sigma$ 以上のAE累積数を $N(w_1)$ 、 $\mu + a_1 \cdot \sigma$ 以上のAE累積数を $N(w_2)$ とすると、

$$N(w_1) = N(\mu - a_2 \sigma) = \int_{\mu - a_2 \sigma}^{\infty} n(a) da \quad (4.1)$$

$$N(w_2) = N(\mu + a_1 \sigma) = \int_{-\infty}^{\mu + a_1 \sigma} n(a) da \quad (4.2)$$

となる。このとき振幅の範囲は、 $(a_1 + a_2) \sigma$ となるので、Ib値は、

$$Ib = \frac{\log_{10} N(w_1) - \log_{10} N(w_2)}{(a_1 + a_2)} \quad (4.3)$$

で与えられる。

図-8に模型砂斜面の載荷実験により得られたAEデータに基づき、計測時間400秒から100秒ごとに1000秒までのAE振幅分布を示す。ここで各分布の母数(β)は100個であり、平均値 μ と標準偏差 σ も併せて記している。図より、振幅値 $\mu \sim \mu + \sigma$ の範囲におけるAE累積頻度がほぼ1つの直線で近似できる範囲内にあることがわかる。

図-9に振幅個数による相関係数の変化を示す。図の横軸は振幅個数、縦軸が直線近似したときに得られた相関係数である。b値算出に用いる振幅個数を40個以上とすれば概ね良い相関が得られることがわかる。さらに、振幅値の累積評価によるb値の収束と併せて振幅個数を検討すれば、50~100個程度が妥当な振幅母数であると判断できる。

2) 日光岩盤斜面AE計測での分析例

① 気象起因によるAEのb値解析

例えば、降雨が岩盤を直撃するときその岩盤への打撃がAE源となり、近傍に設置したAEセンサが降雨により発生した弾性波を検出する場合がある。太陽光が岩盤を照射するとき、岩盤の体積膨張あるいは収縮に伴うマイクロクラックの発生などにより、日射の影響を受ける岩盤計測範囲でAEが発生する場合がある。これらの気象条件に起因するAEは、その発生要因がある程度限定されることから、b値に特徴的な事項が認められる可能性がある。以下に表面設置、及び表面削孔に設置したAEセンサで得られたデータ (小雨、大雨、日射) よりb値を算出し、その特徴を検討する。

図-10に降雨 (小雨、大雨)、日射により発生したと考えられるAE振幅値100個に基づき算出

したb値を示す。個々で、各項目のb値は100データ度で得た値の平均値を棒グラフとして表し、併せて標準偏差が示されている。各項目は順にAE発生起因/AEセンサ種別/AEセンサ設置方法を示し、例えば「大雨低表」は、「大雨により発生したAEを低周波AEセンサを用い、岩盤表面に設置して検出した結果」である。

同図から、次の事項が推察される。降雨によるAE特徴として、異なる計測装置でも同位置(表面・孔内)に設置したAEセンサにより得られたb値は、ほぼ同じ値と考えられる。b値は、小雨、AEセンサ表面設置で約0.07、大雨、AEセンサ表面設置で約0.08、大雨・AEセンサ孔内設置で約0.11である。また、日射によるb値は製造会社ごとに若干異なるが、高々、0.08程度である。これらの事項とデータ誤差を考慮すると、0.05~0.11のb値は、気象条件に起因するb値であり、この範囲に含まれないb値を検討することで、気象条件に影響しないその他の要因、例えば破壊現象などの追跡監視ができる可能性がある。

② ウエッジラムによる岩盤破壊に伴う改良b値解析結果

a) 高周波AEセンサによる結果

図-11に、日光岩盤斜面のウエッジラム試験時、破壊岩体近傍に設置した高周波AEセンサ(ch-5)で得られたAE累積発生数と改良b値解析結果を示す。ウエッジラムの加圧は、第1回が、13:15:00~13:43:32まで50kgf/cm²ごとに340kgf/cm²まで7ステージに分け実施された。崩壊は、14:27:47であった。

ほぼ载荷開始と同時にAEの急増、改良b値の激増が認められ、改良b値は、13:15:15で最初の最大値約0.16をむかえ、直後激減する。その後も载荷に連動した増減を示して、13:35:31に最大値0.18に至り、直後に0.05まで低下する。13:35:30頃は450~500kgf/cm²の圧

力値に相当し、この時刻以降も引き続き加圧された。岩盤崩落が認められず、最初の加圧試験により終局崩壊に至っていないと考えられた岩体は、14:15:00から次の加圧試験が行われた。

改良b値は、加圧ステップに連動し変動するものの、その変動範囲は小さく、0.04~0.08程度である。14:21:00から14:23:09までの150kgf/cm²から250kgf/cm²の加圧により、改良b値は急増し、最初の試験で得られた最大値(0.18)付近まで上昇の後、崩壊直前に再度急増するが、圧力が350kgf/cm²に至った直後の14:27:47に崩壊に至った。最終崩壊は、同図上での最後の改良b値低下時刻に合致している。

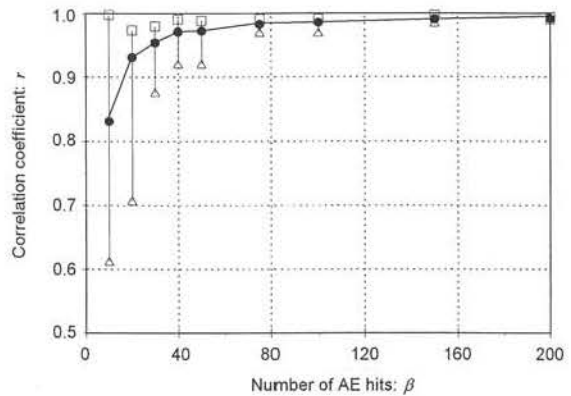


図-9 振幅個数による相関係数の変化(横軸は振幅個数、縦軸が直線近似した相関係数)

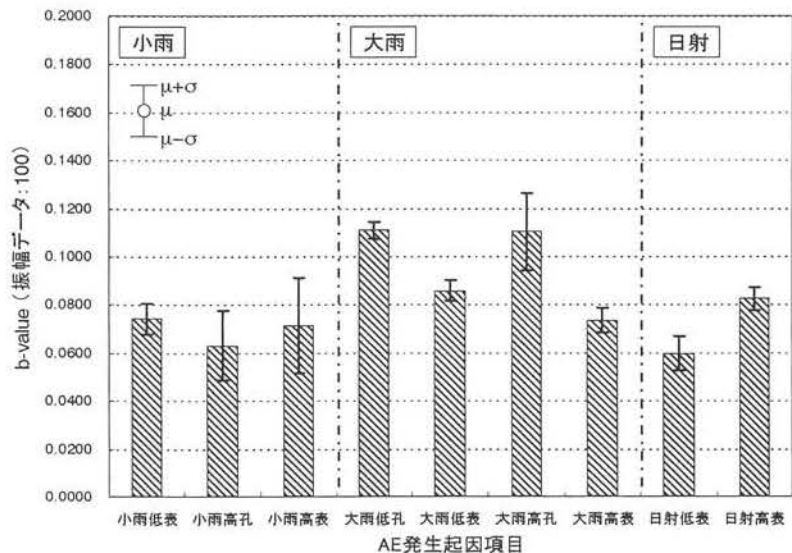


図-10 降雨(小雨、大雨)、日射により発生したと考えられるAEの振幅値100個に基づき算出したb値

ウェッジラムの加圧により以下の現象が岩盤内部に生じたことが推察される。対象岩盤内部での破壊は、初期加圧時(50kgf/cm²)に既に生じ、以降の加圧レベルでは「初期加圧時に生じたクラックが進展する」のみである。

AEから判断される対象岩体の終局破壊強度は、改良b値が最大を示し直後に激減した450~500kgf/cm²であって、最大圧力700kgf/cm²は、加圧により岩盤が不動岩塊に向けて回転していたことから、不動岩塊により発揮された見かけの耐圧と考えられる。

したがって、岩盤内部には最初の加圧試験で既に破壊が生じていたことから、次の加圧試験では最初の最大圧力の半分程度の圧力350kgf/cm²で岩体が崩落したものと考えられる。また、前節の気象条件に起因するAEより算出した改良b値が0.11以下であったことを考慮すると、改良b値の0.1以上の上昇は、岩盤内部のクリティカルな破壊状態を示す指標といえる。

b) 低周波AEセンサによる結果
 図-12に日光岩盤斜面のウェッジラム試験時、破壊岩体近傍に設置した低周波AEセンサ(ch

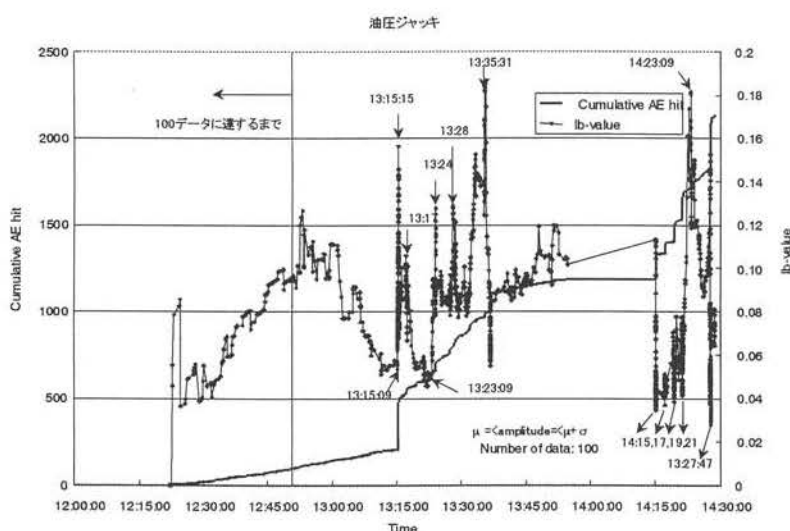


図-11 破壊岩体近傍に設置した高周波AEセンサ(ch-5)で得られたAE累積発生数と改良b値解析結果

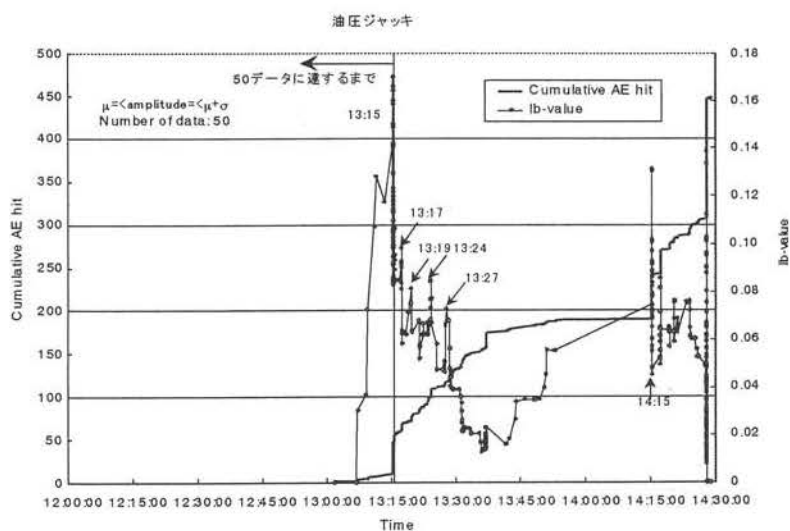


図-12 破壊岩体近傍に設置した低周波AEセンサ(ch-5)で得られたAE累積発生数と改良b値解析結果

-5)で得られたAE累積発生数と改良b値解析結果を示す。なお、同センサは前節で考察した高周波AEセンサの直近に設置されており、センサの周波数特性の違いによるAE特性を検討するために配置されている。ここで、高周波のAEセンサは、60kHzを採用している。また改良b値算出時の振幅個数βは「データ数が高周波AEセンサでの計測結果に比べて少なく、βを100とした場合、13:23以降が定量的値を与える改良b値となり加圧初期の挙動を検討できない」ことから50とした。

同図から計測装置、共振周波数は異なるが、低周波AEセンサで得られた改良b値の変化は、概ね高周波AEセンサの変化の傾向と同様であると考えられる。加圧初期に改良b値の0.13程度までの増加はみられるが、その後の圧力増で顕著な変化傾向は崩壊まで得られない。岩盤内部の破壊を示す改良b値も高周波センサでの検討結果と同様0.1を超過する加圧初期といえる。

c) 破壊に無関係な位置の高周波AEセンサによる結果

前節a)、b)で得た改良b値の変化傾向の妥当性を異なる岩体に設置したAEセンサによる検出結果と比較する。本説で検討するAEセンサは、破壊対象岩体と明瞭な多くの亀裂を挟み約7cm離れて配置されて

いる。図-13に高周波AEセンサで得られた結果を示す。加圧は、13：15から開始されたが、AEは加圧に無関係に上昇している。また、これらのAEデータより得られる改良b値は高々0.11程度であり岩盤の破裂に起因する有意なAEではないと考えられる。さらに、試験時に試験サイトが雨（時間降雨量2.5mm程度）であったことから、得られた改良b値0.07～0.11は、別途検討した降雨によるAEによるb値結果を反映した値といえる。

(4) 分析結果のまとめ

- ① 降雨によるAEの特徴として、異なる計測装置でも同位置（表面・孔内）に設置したAEセンサにより得られたb値は、ほぼ同じ値と考えられる。b値は、小雨・大雨AEセンサ表面設置で約0.07、大雨・AEセンサ表面設置で約0.08程度である。これらの事項とデータ誤差を考慮すると、0.05～0.11のb値は、気象条件に起因するb値であり、この範囲に含まれないb値を検討することで、気象条件に影響しないその他の要因、例えば破壊現象などの追跡監視ができる可能性がある。
- ② 岩体内部の破壊は、改良b値の変動により追跡可能であり、計測器に依存せず、破壊に起因する改良b値は、気象条件による改良b値0.11を大きく超過し0.18程度まで上昇することから、改良b値0.11以上の上昇は、岩盤内部のクリティカルな破壊状態を示す指標となる可能性がある。
- ③ 岩体の破壊に無関係な位置で計測・算出された改良b値の結果から、破壊の特徴的な変化傾向は認められなかった。しかし、改良b値は計測サイトの気象条件である降雨を反映した値0.07～0.11であり、改良b値の破壊状態評価への有用性が示唆された。

なお、以上のb値及び改良b値の検討は、「改良b値は、AE一定個数ごとの、振幅値に基づき算出した値」であることから議論できたことが多く、「AE母数が異なる、一定時間ごとの、振幅値に基づくb値」での「値そのものの議論」は、先に述

べた理由から困難であること、b値及び改良b値はデシベル単位を基に計算されていることを付記するとともに、今回は横軸に経過時間をとって対比しているが、今後さらに、変形量等を用いるなど、工夫を加えて現象との比較を試み、改良b値による分析を進展させることにより、AE法の発展を望む。

4. まとめ

(1) 多くの課題

今後の課題として以下の事項が挙げられる。

- ① 土砂斜面：何処に設置すべきか、WGで捕捉できるか、深層崩壊に適用可能か
 - ・岩盤斜面：同上、亀裂の多い場合と大規模斜面への適用は可能か
- ② ノイズ対策
 - ：電気的ノイズ；電源・配線・地電流・違法無線
 - ：環境的ノイズ；雨・太陽光・振動
 - ・これらの物理的排除（フィルターなど）と分析的排除（AEパラメタなど）
- ③ 規格化
 - ：データの互換性（有する意味）；センサの種類、しきい値の設定
 - ：設置方法、WGの品質・長さ
- ④ 耐久性
 - ：長期計測に対応可能、短期計測においてもデータ取得の確実性
- ⑤ 分析方法
 - ：手法、パラメタの特定、現象との対比（説明

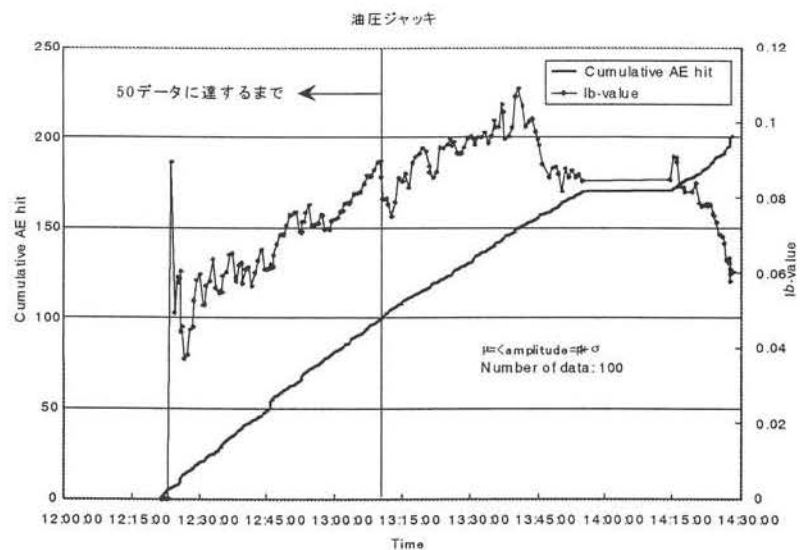


図-13 破壊に関係しない高周波AEセンサで得られた結果

変数)

⑥ 低コスト

- ：パラメタの特定などによる計測装置のスリム化
- ：汎用性・施工性の向上
- ・分析方法の進展等により、1センサ・1パラメタの安価な計測システム

(2) 今後の展望

前述した課題の多くは、その解決に向けて様々な研究が行われており、同朋の熱意によって幾つかの光明を見出しつつある。その一例として、ノイズ対策における「電氣的ノイズ」については、計測後のパラメタ処理などにより、除去できる可能性があり、「環境的ノイズ」のうち降雨によるものは、AEセンサをある程度深く埋めることにより、拾わずに済むことなどがわかっている。長期の計測に不可欠な「耐久性」についても、今回の共同研究成果としてAEセンサの改良を行うなど、多くの進展も認められる。「規格化」などについては、早急に標準化を図る必要があるものの、これまでAE法が先行的に発展した過程・研究成果のヴァリエーションを、一気に斜面崩壊モニタリングに凝集することは困難であり、岩盤崩壊モニタリングにおいて標準化(AE計測要領の作成など)を試みる予定である。今後の解析方法の研究によりAE法の進展に期待すると

もに、計測事例の増加を図り、関係データの集積・分析を行う努力を続けたいと考えている。

参考文献

- 1) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論，森北出版(株)
- 2) 門間敬一， 武士俊也：がけ崩れ災害の実態，土木研究所資料第3484号，1997.3
- 3) 秩父顕美，城和裕，香川和夫，鎌田正孝：AEによる斜面の動態観測について，第42回年次学術講演会概要集，第6部，p.p.140～141，1987.9
- 4) 岡崎健治，鈴木哲也：AE法による地すべり調査，土質工学研究発表会講演集，Vol.29，No.2-1，pp141～142，1994
- 5) 笹原克夫，海老原和重，門間敬一，石橋晃睦：斜面の変形・破壊挙動のAEパラメーターによる評価，地すべり，Vol.33，No.2，pp.17～24，1996.9
- 6) Shiotani, T., K.Fujii, T. Aoki and K. Amou, "Evaluation of Progressive Failure using AE Sources and Improved b-value on Slope Model Tests," JSNDI, Progress in Acoustic Emission VII, p.p.529-534, 1994.1
- 7) 塩谷智基，藤井清司：AE振幅分布より得られるb値の改良とその斜面崩壊監視パラメータへの適用性に関する研究，土木構造材料論文集第10号，九州橋量構造工学研究会・土木学会西部支部，p.p.45～50，1994.11