

VI-15

模擬岩盤斜面での岩盤変状と AE 計測

北海道開発局開発土木研究所 正会員 池田 憲二, 日下部祐基
 飛鳥建設株式会社技術研究所 正会員 ○ 塩谷 智基, 三輪 滋
 株式会社構研エンジニアリング 正会員 川瀬 良司, 塩野 康浩

1. はじめに

ひずみエネルギーの解放による材料の破壊にともない、弾性波が発生する現象は、広義には地震動として、そして狭義には、アコースティック・エミッション (AE) として知られる。AE は破壊レベルを反映した情報を有する信号として、微視的破壊レベルから巨視的破壊レベルに至るまで得ることができる。この AE の特徴を利用して、材料内部の破壊状態を推定し、終局破壊の予知予測の一助となるよう期待・研究されている分野の一つに地盤・岩盤がある。この分野への AE 適用は、鉱山を中心に 1940 年代に Obert らにより始められ、その後も多くの研究者により検討・報告されてきた。彼らにより報告された AE 現象は、アナログ信号処理速度の遅さや計測装置の煩雑さから、「発生数の大小」が議論の中心をなし、現在のデジタル信号処理技術に基づく計測装置により得られる AE 信号に対し完全に適用できる成果とはいえない。一方、実岩盤斜面における AE のセンシティブィティを岩盤挙動と比較した事例は少なく、例えば、「どの程度のひずみレベルに対応した、どの程度の AE 信号が得られるか」という問題に対し、即答できない現状がある。本論文では、最新のデジタル信号処理部 (DSP) からなる AE 計測装置を模擬岩盤斜面の破壊実験に適用し、得られる AE アクティビティと岩盤挙動を比較検討し、現在の AE 計測の適用性を検討する。

2. 計測器械の配置概要

模擬岩盤は図-1 に示すように、高さ 5m の橋脚を心材とし、その周辺に小岩塊 (ϕ 30~50 cm), 1:0.3 の勾配に積重ねた大岩塊 (ϕ 100 cm) から構成され、間隙が強度の小さいエアモルタルで充填されている。大岩塊の底盤は鋼製ステージを介して 6 組の油圧ジャッキにより支持される。ステージを降下することで、岩塊自重と岩塊せん断強度に依存した破壊面の進行が模擬可能となる。また、ステージを

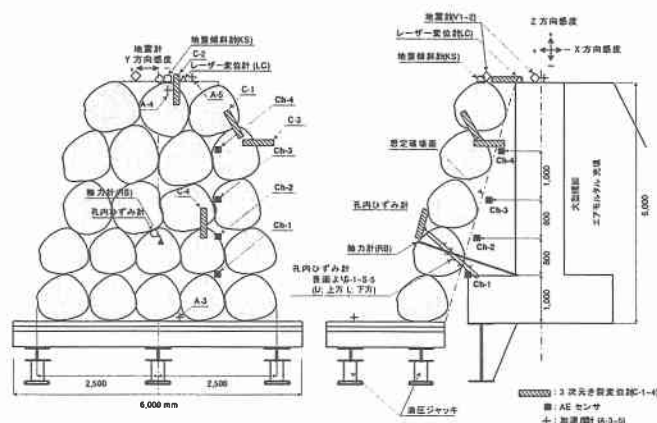


図-1 模擬岩盤の概要と計測器械配置図

上昇することで、岩塊に強制変位や荷重が与えられるときの破壊面の逐次進行が模擬できる。AE 計測は、破壊面が予め推定でき、破壊面形成過程で発生した AE と岩盤挙動とを直接的に関連づけられるように、一般的に行われるウエーブガイド³⁾は用いず、AE センサを不動岩塊に設置して行った。AE センサは、プリアンプ内蔵 (40 dB 利得) の 60 kHz 共振型を用い、図-1 に示すように 2, 3, 4 段目岩塊近傍で想定破壊面を挟み、15cm~20cm 不動岩塊側の位置に Ch-1~Ch-4 まで合計 4 個設置した。AE センサにより検出された

Acoustic Emission Activity with Slope Behavior on a Slope Model of Rock

by Shiotani, T., Miwa, S., Nakai, K., Ikeda, K., Shiono, Y. and Kawase, R.

40 dB 以上の AE 信号は、DSP ボードを搭載する MISTRAS AE 計測システム（PAC 社製）で AE パラメータと AE 波形（1 MHz sampling, 2 kword データ長, 10 ms 休止時間）を収録した。ここで、測定回路の特徴として、リングダウncount、継続時間、立上り時間は、AE 信号検出のトリガーとして与える「しきい値」に依存した AE パラメータであり、エネルギー、最大振幅値は「しきい値」に依存しないパラメータである。AE 以外には、3 次元き裂変位計、傾斜計、孔内ひずみ計、温度計、地震計、加速度計などが同図に示す位置に設置されている。

3. 実験概要

実験は大きく 3 つに分けられる。1) 運動するであろう岩塊下部に設置したステージの降下・上昇により岩塊下部から破壊を促進させる実験（ステージ降下・上昇実験）、2) 岩塊周辺あるいは岩塊自身に振動機械（バイプロハンマー）を用いて加振させる実験（加振実験）、3) 完全に剥離した岩塊を除去し、その後、斜面上部にウエイトによる载荷と心材橋脚への加振を行う実験である。これらの実験の結果、局所破壊の進展は実験 1) を中心にもたらされ、2), 3)においては 1)で形成された潜在き裂面の摩擦、あるいはその拡大のみが推察されたことから、本論文では、1)について「岩盤内の局所破壊の進展と AE 挙動」、2)について「潜在き裂を有する岩盤の、加振された岩盤振動レベルと AE イニシエーション」について検討する。図-2 にステージ降下・上昇実験の概要を示す。初期破壊面（初期き裂）を与えるために、-13 mm のステージ降下を行った（図中、実験 1）。改めて、-70 mm までのステージ降下が実施され、休止時間を経て、連続的なステージ上昇が+15 mm まで与えられた（図中、実験 2）。加振実験は、最初に大型振動機械を用いて岩盤背面の地盤で行い、続いてステージ上での運動岩塊への直接的な加振が実施された。

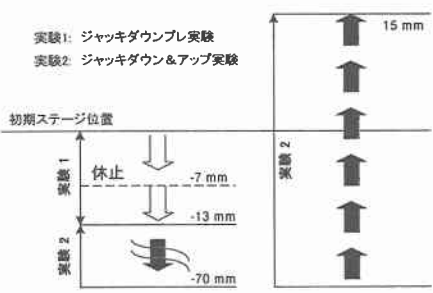


図-2 模擬岩盤の概要と計測器械配置図

4. 実験結果と考察

4.1 初期変状を与えるためのステージ降下実験

各 AE センサの累積 AE 発生数、沈下量（ジャッキ平均変位）、岩塊表面近傍に設置した孔内ひずみ計 S-1（U：上部，L：下部）の経時変化を図-3 に示す。ここで、ステージの降下は段階的に与えられている。図-3 より、初期のステージ降下に対応した AE 発生が 1 段階目と 2 段階目岩塊の間に設置した Ch-1 で認められる。その後、13 mm までの段階的ステージ降下が与えられたが、Ch-1 のみの AE 発生となった。一方、ひずみも AE と同様に初期のステージ降下にに応じて増加するが、明らかな急増点は AE に比べ遅れる傾向であった。これらのことから、岩塊下部の初期変状（き裂）は初期のステージ降下で生じた可能性が高く、13 mm までの降下が与えられたが、き裂は Ch-1 付近までの成長にとどまったものと考えられる。ここで、単純に得られた累積 AE 発生数とひずみ（S-L-1）を比較すると、「1 つの AE 発生は、0.1~0.2 μm のひずみに対応している」ことがわかる。ただし、AE の発生数、つまり検出感度は、しきい値、休止時間、1 波形の定義時間などに大きく影響されるので、上述の 1-AE に対応したひずみはあくまでも参考値である。図-4 に AE リングダ

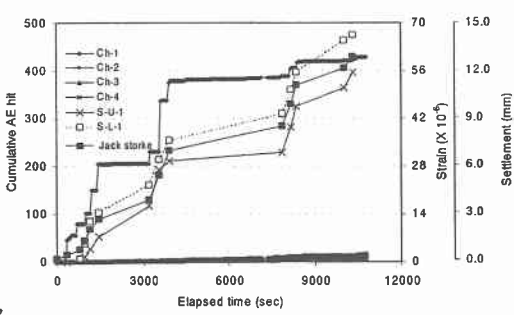


図-3 累積 AE 発生数とジャッキ平均変位・ひずみ

ウンカウント、AE エネルギーの 100 データ移動平均値を示す。両パラメータともに初期沈下に対応した著しい増加が認められ、最大値に至った 1400 秒に急激低下する。平均エネルギーが 300 を超過するような AE を励起させた破壊現象は、これまでの研究⁹⁾より、せん断破壊が主に生じる材料の限界状態といえる。よって、Ch-1 付近の材料は、エネルギーが最大値を示した時点で限界状態に達し、直後に大規模な局所破壊が生じた可能性が高いと考えられる。ここで、同様な破壊状態を示すリングダウンカウントは 40 以上であり、実験で得られた最大値 15 は極端に小さい。これは、リングダウンカウントがしきい値に依存したパラメータである影響とは考え難く、検出 AE 波の卓越周波数成分に起因するものと考えられる。同種の 60 kHz 共振型 AE センサを用いたこれまでの研究⁹⁾は、グラウト材や RC を試験体として実施されており、AE 波の周波数成分は、30～100 kHz 前後であった。この場合、試験体の P 波伝播速度は約 4000 m/s、AE 波の減衰特性も通常のコンクリート構造物と同様な傾向となる。一方、本実験対象のエアモルタルの P 波伝播速度は約 2000 m/s、ポーラスな構造であるため、RC 等に比べて著しい AE 波の減衰特性を有する。そのため、生じた AE (AE 源) が高周波数成分まで有しても、そのエアモルタル中の伝播過程で、急激に高周波成分を失い、結果的に低周波数成分が卓越した AE 波が検出されたと考えられる。そのため、同じ波形継続時間を有する RC 材料中を伝播した AE 波形に比べて振動回数が少ない、つまりリングダウンカウント数の小さい AE 波形が得られたものと考えられる。このとき、使用器械のエネルギーは、AE 波の包絡線検波波形の面積で定義されるため、卓越周波数の影響が小さく、破壊をその値として評価できたものと考えられる。紙面の都合上波形特性等の掲載は割愛するが、実際に本実験で得られた AE 波形は、9 kHz 前後が卓越していた。

4.2 大規模なステージ降下・上昇実験

図-5 に経時時間と沈下量 (平均ジャッキ変位)、AE 位置標定結果を示す。AE 位置標定結果は、白抜き円がゾーン標定結果、網掛け円が一次元位置標定結果である。円の直径は、ゾーン標定結果が第一到達 AE 波のリングダウンカウント値を反映し、一次元位置標定結果が第一到達と第二到達 AE 波の平均リングダウンカウント値を反映している。ここで、一次元位置標定は、AE 波が複数個の AE センサにより検出可能な場合に、AE 波の到達順序と到達時間差により発生源を算出する方法であり、ゾーン標定は単数の AE センサのみで得られた場合にも AE 発生源をその AE センサが分担する検出領域 (ゾーン) として同定する一次元位置標定を補完する方法である。図-5 より、ステージ降下では、ほとんど有意な AE 源が観察されなかった。約 1900 秒からのステージ上昇とともに最下部に設置した Ch-1 付近のゾーン 1 で AE 源が得られ、2200 秒からゾーン 1 での AE が数多く得られるようになる。2400 秒から 2500 秒にゾーン 2、そしてゾーン 3 への AE 源の移行が観察でき、局所破壊の進展が AE 源よ

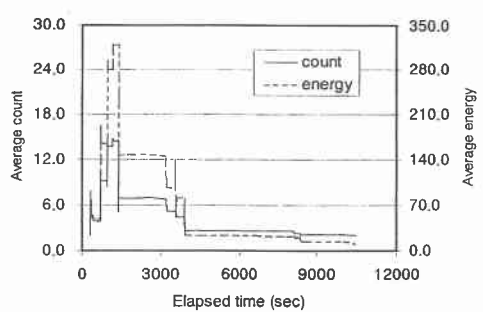


図-4 AE リングダウンカウントとエネルギーの移動平均

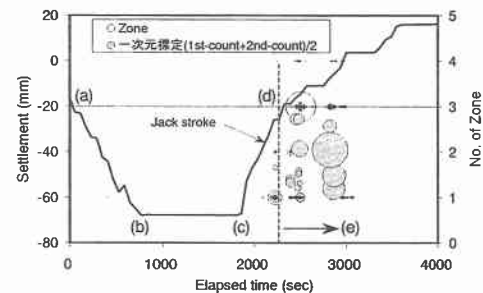


図-5 ジャッキ平均変位と AE 位置標定結果

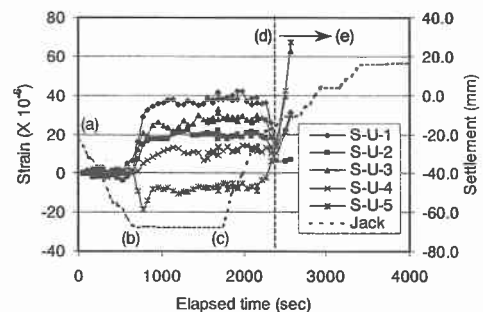


図-6 ひずみ・平均ジャッキ変位

り推察される。ここで、ゾーン標定結果が主に観察される段階から一次元位置標定結果が観察され始める段階を示す“2400 秒”は、両者の標定方法の特徴から、ミクロ破壊からマクロ破壊への“境界時間”としても認識できることから、この時間に大規模な局所破壊が高さ 3 m までに生じた可能性が高いと考えられる。さらに、2800 秒付近で、大規模な AE 源がゾーン 1～ゾーン 3 に連続的に認められることから、2800 秒までに形成された破壊面に沿い 2 段階までの岩塊が連続的に変形した可能性が高いと考えられる。

図-6 に 2 段階目岩塊に設置した孔内ひずみ計の経時変化を示し、図-7 にひずみ計および岩盤変位計より推定されたステージ降下・上昇による一連の岩盤挙動を(a)～(e)に示す。図-6 のひずみ計測結果から、(a)～(b)に至るステージの降下により不動土塊に設置した S-U-5 でマイナス（圧縮）のひずみが得られ、運動土塊中にある S-U-1～S-U-4 でプラス（引張）が得られる。この傾向は岩塊が斜め下方に変形したことを示し図-7(b)の状態が予測される。ステージを上昇させる(c)～(d)で、(a)～(b)で得られたひずみとは反対の傾向を示し、最終段階(e)に至る。(e)到達後も、不動岩塊に設置した S-U-5 は、安定増加傾向となるが、それ以外の S-U-1～S-U-4 は、傾向が反転し、引張を示すプラスのひずみ増加が得られる。これらの傾向から、岩塊が上方に運動している図-7(e)の状態が予測される。残念ながら、ひずみ計測では、2580 秒でケーブルが切断し、以降のひずみ変動は不明である。2580 秒以降の岩盤変形は 3 次元き裂変位計の測定結果に基づき、次節で検討する。ひずみの傾向から、得られた岩盤挙動(a)～(e)を AE 位置標定結果である図-5 に付記する。AE 位置標定結果から判断される破壊の進行との調和が明らかである。さらに、破壊の局所的逐次進行と AE との関係性を明らかにするために改良 b 値解析を行った。改良 b 値⁹⁾は、AE 波最大振幅値の積分型頻度分布の負勾配として知られ、改良 b 値⁷⁾は、AE によるリアルタイム破壊評価が可能のように、算出範囲に統計値を用いて、また、母数を一定数として求めたものである。改良 b 値の増加過程は、小規模破壊が大規模破壊に比べ卓越する破壊現象を示し、改良 b 値の減少過程は、大規模破壊が小規模破壊に比べ卓越する破壊現象を表している。注目すべきは、改良 b 値の 0.15 以上の急激な上昇および、0.05 以下への下降であり、この傾向が局所破壊の発生を示唆するものと考えている⁹⁾。

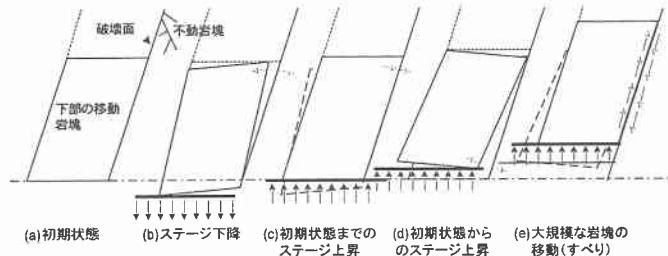


図-7 ひずみ計測より推定されるステージ降下・上昇による岩塊挙動

図-8 (i)～(iv)に各 AE センサで得られた改良 b 値および変化が著しい 3 次元き裂変位計 C-1～C-4 の Z（鉛直）方向変位の経時変化を示す。なお、図中には前節で推定された(d)に至る「局所破壊の逐次進行」を示す時間が波線で示されている。図-8 (i)より、2250 秒で改良 b 値低下が認められ、この時点で局所破壊が Ch-1 近傍で生じた可能性が高い。しかし、4.1 で検討した「初期変状を与えるための実験」により、すでに Ch-1 付近には局所破壊が生じていた可能性も考えられる。図-8 (ii), (iii)の改良 b 値の傾向から、Ch-2 近傍で 2420 秒に、Ch-3 近傍で 2520 秒に局所破壊が生じた可能性が高い。ただし、図-8 (iv)の Ch-4 については、改良 b 値の 0.15 を越える急激な上昇は観察されたが、0.05 以下への低下は認められなかった。したがって、同 (iv) の改良 b 値の変化傾向は、Ch-4 近傍よりも、Ch-3 近傍の AE 源規模および破壊規模を反映した可能性が高いと考えられる。また、き裂計の連続的な変化が、改良 b 値の 0.15 を越え、0.05 以下に低下する「繰返し変動」と対応しているので、この範囲の改良 b 値の繰返し変動は、岩盤表面で測定される連続的な変形過程、換言すると、すべりの進行を示唆するものと考えられる。以上より、改良 b 値より判断された局所破壊の逐次進行は、前節で考察した(d)～の区間にあること、また、AE 源の推移より推定された破壊の進行様式と合致していることから、改良 b 値の特異な変化傾向は局所破壊の進行を示唆したものと考えられる。また、き裂計の著しい変動が、AE・ひずみより推定された局所破壊の進展以降となることから、大規模破壊の前兆現

象を与える局所破壊の進展過程を岩盤表面に設置したき裂計により判断するのは容易ではないものと考えられる。

4.3 振動機械による加振実験

図-9 にステージ上で実施されたパイプロハンマー加振により得られた加速度波形 (A-3: ステージ上設置, 斜面前後方向) と各 AE 発生率を示す。ここで、図に示す加速度波形は、3 方向成分の内、最も振幅が卓越した方向である。AE の発生は、Ch-1~Ch-3 のみであった。図-9 より、AE は加振位置に近い Ch-1 で数多く発生し、Ch-2、Ch-3 は少ないことから、1 段目岩塊背面の潜在き裂面の摩擦による AE が主であったと考えられる。また、Ch-1 の AE 発生率より、その変動は加振力 (加振振幅値) を反映していることがわかる。図-10 に AE リングダウンカウント値と斜面法層に設置した A-4 加速度計の初動波形を示す。図-10 より、5.2 秒からの AE 発生が認められ、それ以降連続した AE が観察されている。5.2 秒の加速度は、49 gal にあたることから、潜在き裂面の摩擦による AE は、50 gal 前後の起振力がその発生下限値と考えることができる。図-11 に Ch-1 で得られた AE のリングダウンカウントとエネルギーの 100 データ移動平均値をステージ上で得られた加速度波形とともに示す。各平均値ともに、特徴的な周期性が認められた。大規模な潜在き裂に沿う岩塊の非定常的な運動を反映している可能性が高く、今後、他の計測データと比較検討する予定である。図-11 より、潜在き裂面に沿う摩擦により発揮される AE は、エネルギーが 400~1000 の範囲に、リングダウンカウントが 20~40 の範囲にあることがわかる。図-4 の局所破壊より得られた同パラメータレベルと比較すると、大規模な潜在き裂に沿う岩塊運動より得られる AE は、局所破壊に比べて 3 倍以上のエネルギー、2.5 倍以上のリングダウンカウントレベルまで示すことがわかった。ただし、4.1 で考察したようにリングダウンカウントレベルは、本実験材料特有の値を示している可能性が高く、一般的には「400 以上のエネルギーを有する AE 発生」が終局状態のイニシエーションを与える規準と考えることができる。

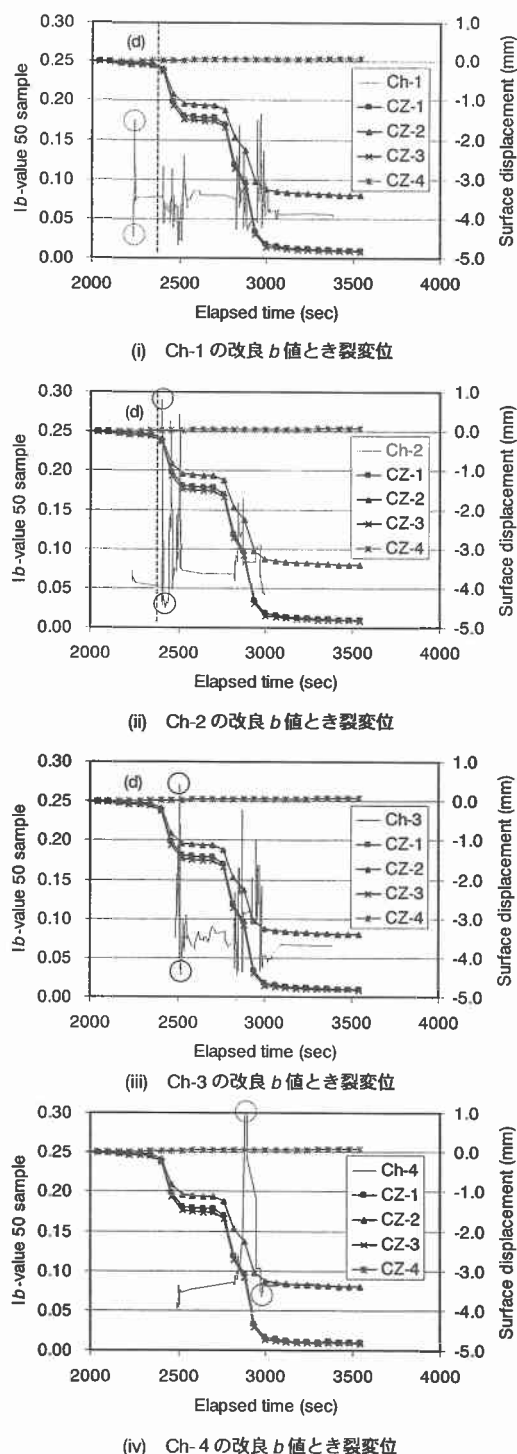


図-8 各 AE センサの改良 b 値解析結果と 3 次元き裂変位

5. 結論

最新のデジタル信号処理部 (DSP) からなる AE 計測装置を模擬岩盤斜面の破壊実験に適用し、「岩盤内の局所破壊の進展と AE 挙動」、「潜在き裂を有する岩盤の、加振された岩盤振動レベルと AE イニシエーション」について検討し以下の結論を得た。1) 岩盤初期変状より得られる一つの AE 波形は、“ $0.1 \sim 0.2 \mu$ ” のひずみに対応していた。2) AE 平均エネルギーより、初期のステージ降下で対象岩塊下部に局所破壊の発生が推定された。リングダウンカウント値によるエアモルタルの材料評価は困難であった。3) ひずみ計測より推定された岩塊破壊挙動と AE 発生源の推移より判断された破壊挙動は合致していた。4) 改良 b 値より判断された局所破壊の逐次進行は、3) の結果と調和していた。したがって、改良 b 値の特異な変化傾向は局所破壊の進行を示唆したものと考えられる。5) き裂計の著しい変動は、AE・ひずみより推定された局所破壊の進展以降となり、大規模破壊の前兆現象を与える局所破壊の進展過程を岩盤表面に設置したき裂計により判断するのは容易でないと考えられる。6) 潜在き裂面の摩擦による AE は、50 gal 前後の起振力がその発生下限値と考えることができる。7) 大規模な潜在き裂に沿う岩塊運動より得られる AE エネルギーは 400 以上となり、局所破壊に比べて 3 倍以上の値を有する。これらのエネルギーを有する AE の発生が終局状態のイニシエーションを与える規準と考えることができる。

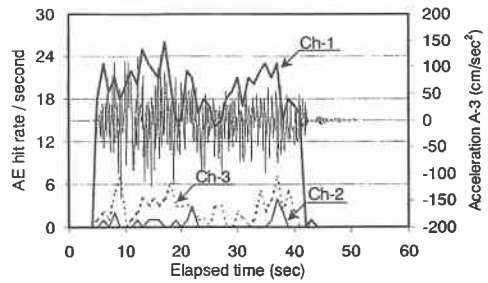


図-9 加速度波形と各 AE 発生率

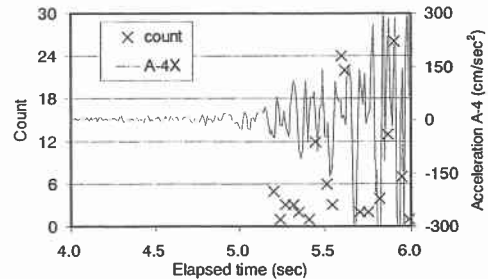


図-10 リングダウンカウント値と加速度初動波形

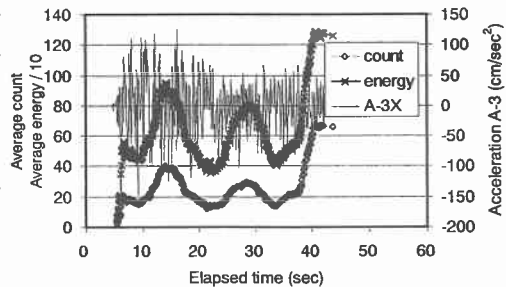


図-11 平均リングダウンカウントと平均エネルギー

参考文献

- 1) Obert, L., "Use of Subaudible Noises for Prediction of Rock Burst," *Report Invoice 3555*, United States Bureau of Mines, 1941.
- 2) Obert, L. and Duvall, W. I., "Microseismic Method of Prediction Rock Failure in Underground Mining: Part I and Part II," *Report Invoice 3797 and 3803*, United States Bureau of Mines, 1946.
- 3) 塩谷智基・青木朋也・藤井清司・天羽恵子: AE 斜面崩壊予測におけるウェーブガイド設置方法, 第 29 回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 1817-1818, 1994.
- 4) Shiotani, T. and Ohtsu, M., "Prediction of Slope Failure Based on AE Activity," *ASTM, Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353*, S. J. Vahaviolos, Ed., pp. 156-172, 1999.
- 5) Shiotani, T., Miwa, S. and Ohtsu, M., "Detection and Evaluation of Acoustic Emission due to Rock Slope Failure," *An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng 2000)*, submitted.
- 6) Gutenberg, B. and Richter, C. R., "Seismicity of the Earth," *Princeton University Press*, 1949.
- 7) Shiotani, T., Fujii, K., Aoki, T. and Amou, K., "Evaluation of Progressive Slope Failure Using AE Sources and Improved b -value on Slope Model Tests," *JSNDI, Progress in Acoustic Emission VII*, pp. 529-534, 1994.
- 8) 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, *KABSE, 土木構造物材料論文集第 10 号*, pp. 45-50, 1994.