

アコースティック・エミッション法による長期岩盤計測

Continuous monitoring of rockslide by Acoustic Emission technique

北海道開発局開発土木研究所	正員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)
北海道開発局開発土木研究所	正員 中井 健司 (Kenji Nakai)
北海道開発局開発土木研究所	正員 日下部祐基 (Yuki Kusakabe)
飛島建設(株)技術研究所	正員 塩谷 智基 (Tomoki Shiotani)
飛島建設(株)技術研究所	正員 三輪 滋 (Shigeru Miwa)
(株)構研エンジニアリング	○正員 嶋倉 一路 (Kazumichi Shimakura)

1. はじめに

材料破壊にともなう弾性波は、破壊規模や形態、ならびに破壊過程を反映した“アコースティック・エミッション (AE)”と呼ばれ、材料の破壊監視や破壊予測技術の一助として期待されている。元来 AE 法は、金属材料などの室内実験を中心に適用・展開されてきた経緯があり、野外での長期計測は最終目標といえ、計測・評価に関わる一連のプロセスの早急な研究開発が望まれている。著者らは、長期岩盤 AE 計測および評価を適切に行うことを目的に、1) 遠隔操作可能な AE 計測システム¹⁾、2) AE センサ設置方法²⁾、3) AE 解析・評価方法³⁾などを研究・開発してきた。本論文では、北海道えりも町庶野「宇遠別第2覆道地区岩盤斜面」での AE 計測データに基づき開発した計測方法や解析手法の妥当性を検討した結果を報告する。

2. AE センサ設置方法とノイズ対策

岩盤斜面の AE 計測を行う場合、岩盤内部で発生した AE 波の捉え方が「岩盤内部の破壊挙動の推定と安定性評価」において重要となる。例えば、土砂斜面の計測に利用されてきたウェーブガイドによる AE 検出方法⁴⁾がある。このウェーブガイドは、鋼製、PVC、PVC+レジンなどから構成され、土塊の変形に追従した AE 波をウェーブガイド自身の破壊や土塊とウェーブガイドの摩擦による AE 波として検出するように考えられている。このようなウェーブガイドは、終局破壊に至るまで、ある程度の変形が予測される土砂斜面には効果的な方法であるが、脆性的挙動が予測される岩盤安定性監視には不向きといえる。また、AE 波動は限界状態に達したひずみエネルギーが解放されるとき、その一部が弾性波として放射される現象を示し、破壊情報は、換言すると「計測対象材料の限界ひずみ」に直接結びつけられる情報⁵⁾であると考えられる。つまり、対象材料の破壊に起因した AE 波を直接的に捉えてこそ、材料内部の破壊状態が推定でき、ひいては終局的な破壊の予測の一助となることが可能であると考えられる。そこで、多数のき裂を有し脆性的挙動を示す岩盤に適用でき、かつ岩盤内部の破壊を直接的に反映可能なウェーブガイド (WEAD: waveguide for AE waves due to rock deformation)を開発した。その概念を図-1に示す。WEAD では対象岩盤の物性を模したセメント材料および鉄筋の設置が基本とな

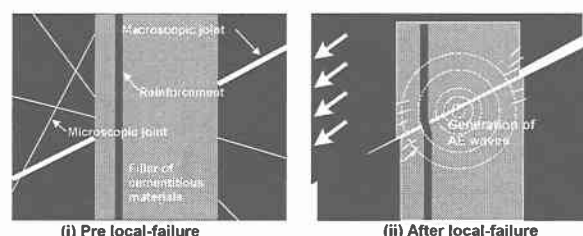


図-1 岩盤 AE 計測ウェーブガイド (WEAD) 概念

る。岩盤物性は、岩盤削孔時に採取された岩石コアの物性を参照して決定する。鉄筋は、AE センサの配置保持のほか、岩盤の最終破壊まで追従した AE 計測を可能にする重要な役割を果たしている。

WEAD による AE 計測を実施するとき、図-1 に示すように岩盤の変形にともない充填材料に同種・同形態の破壊が生じ AE 波が放射される。この時の AE 波を鉄筋に線上に配した複数の AE センサにより検出することで AE 源の一次元標定が可能となる。岩盤の破壊進展とともに、このような岩盤の破壊を直接的に反映した破壊が逐次 WEAD で生じ、最終的には周辺岩盤のき裂分布を反映した WEAD 性状となる。この場合、AE 伝播特性は著しく低下するが、局所破壊後に続いて生じる巨視的岩盤変形は「破壊形態・様式を直接的に反映していない AE 波」として、鉄筋を通じて検出可能となる。つまり、鉄筋は終局破壊まで追従した AE 波を得るために設置された AE 伝播補助材料といえる。



図-2 岩盤 AE 計測ウェーブガイド (WEAD) 概念

上述のように、WEAD は既知物性の材料から構成されているので、図-2 に示すように実験室での WEAD の種々の破壊試験を行い、破壊種別、破壊レベルによる AE 特性を検討することで、サイト毎の破壊規準が構築できる。さらに、サイトから得られる AE データと破壊規準を適用することでサイトの安定性が評価可能となる。

一方、岩盤の長期 AE 計測において回避困難なノイズ源に雨滴の影響がある。以下に著者らが使用している AE 計測システムを用いるときの雨滴による AE 波の特徴⑥)を列記する。

・「しきい値」を 40 dB とする場合、大粒の雨滴により影響を受ける AE 検出範囲は、圧縮強度が 10~30 N/mm²の材料で、岩盤表面から約 2.0~2.4 m (15 kHz), 1.5 m (60 kHz), 圧縮強度 50 N/mm²の材料で 3.0 m (15 kHz), 2.4 m (60 kHz), 「しきい値」を 50 dB とした場合、圧縮強度が 10~30 N/mm²の材料で約 1.5~1.7 m (15 kHz), 1.0 m (60 kHz), 圧縮強度 50 N/mm²の材料で 2.2 m (15 kHz), 1.5 m (60 kHz) である。ここで、各周波数 (kHz) は AE センサの共振周波数を表している。

・降雨により励起・検出される AE 波は、30 kHz 以下の周波数特性を有し、ハイパスフィルタを用いて除去可能である。しかし、このフィルタは、30 kHz 以下の有用な AE 波を見逃すこととなるため、岩盤表面や浅部での AE 計測において、周波数領域での降雨の除去は実務上困難といえ、「降雨の影響範囲が深で AE 計測すること」が肝要である。

上述のような降雨の特徴を用い、さらに、当該計測岩盤の一軸圧縮強度：約 50 N/mm²を参照して、当該岩盤 AE 計測の最小 AE センサ深度を岩盤表面から約 2.5 m とし、さらに、岩盤表面部 1 m を湿潤砂で置換し AE 計測孔への直接打撃によるノイズ混入の低減を図った。

3. AE パラメータによる破壊評価方法

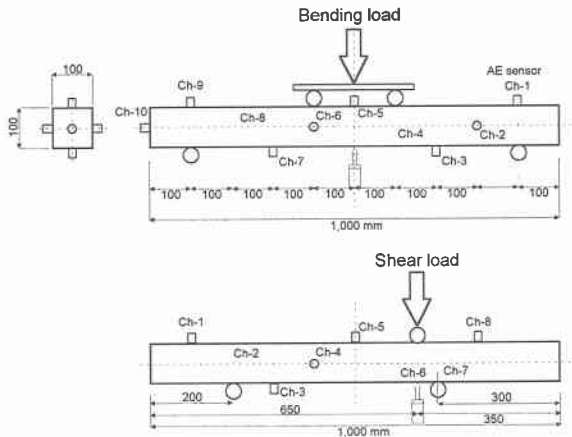


図-3 WEAD の室内曲げ・せん断実験概要

当該岩盤用に設計した WEAD の室内破壊実験を行った。曲げおよび、せん断破壊が再現できるよう図-3 に示すような 4 点曲げ載荷および、3 点曲げのパンチングシアを実施した。試験体は、角柱供試体 (10×10×100 cm) で中立軸上に鉄筋を配し、AE センサ (60 kHz 共振型、現場と同型) は AE 源の 3 次元位置標定と AE 波動の減衰特性が考慮できるよう曲げ試験で 10 ch, せん断試験で 8 ch 設置し、40 dB 以上の AE 信号の AE 特性パラメータと AE 波形を DSP ボードからなる AE 計測装置 (Mistras, PAC) に収録・解析した。

典型的な試験結果を図-4 に示す。図-4 は平均エネルギーと荷重レベルの関係を表し、平均値は、全 ch で得ら

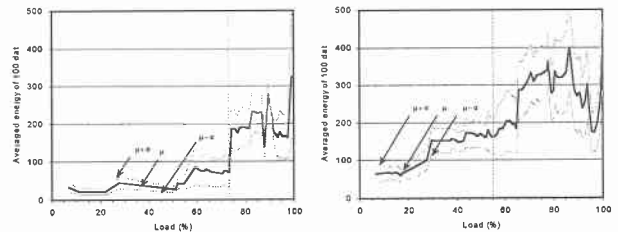


図-4 平均エネルギーと荷重レベル
(左：曲げ試験, 右：せん断試験)

れた値に基づき算出し、標準偏差を付記している。ここで、エネルギーは、AE 波形の包絡線面積で与えられ、AE 検出条件となるしきい値に左右されない AE 源のエネルギーに密接に関連したパラメータである。図-4 左図の曲げ試験の結果から、曲げにおいて初期の破壊レベルを与えるエネルギー値は、50 以下であり、この段階で供試体内部でモルタルクラックの主的発生が推察される。エネルギー値は、モルタルクラックの合体、進展が推測される中期破壊レベルで 50-100 を示し、さらに、曲げの終局的な段階を与えるエネルギー値は 100-200 程度となる。この値は、せん断初期の中期レベルまでのエネルギー値に相当する。最終的に、巨視的な破壊が推察されるせん断面に沿う破壊時に、エネルギー値は 300 以上を示す。同様な検討をリングダウンカウント、改良 *b* 値^{⑧)} (*b* 値は、地震学において、マグニチュード規模別頻度分布の負勾配として知られ、改良 *b* 値はその算出法を AE 最大振幅の頻度分布の負勾配とし、算出法を改めたパラメータ)、Grade^{⑨)} (AE 波形の初期勾配を示し、引張破壊で大きな値、せん断破壊で小さな値を示す) などで行うことで、例えば表-1 に示す AE パラメータによる破壊規準が構築可能となる。

表-1 AE パラメータによる破壊規準例

AE parameters				Fracture levels estimated	Fracture conditions & patterns expected
Count	Energy	<i>Ib</i> -value	Grade		
-40	-50	increase up to 0.06	10-	I	Early stage in bending
		decrease down to 0.04		II	Intermediate stage in bending
	50-100	increase up to 0.06	5-10	III	Final stage in bending
		decrease down to 0.04		IV	Final stage in bending & early stage in shear
40-	100-200	increase up to 0.06	0-5	V	Intermediate stage in shear
		decrease down to 0.04		VI	Final stage in shear
	200-300	increase up to 0.06	0-5	V	Intermediate stage in shear
		decrease down to 0.04		VI	Final stage in shear

4. 宇遠別第 2 覆道地区岩盤斜面計測の概要

図-5 に宇遠別第 2 覆道地区岩盤の AE 計測概要を示す。岩盤斜面はホルンフェルスからなり、約 80° の急崖面に 50° の受け盤き裂が数条にあり、このき裂に直交する流れ盤き裂が多数生じ、ブロック化が進行していた。不安定岩塊の除去後、岩盤内部のき裂性状の把握と各計器を設置するためにボーリングが施工された。ボーリングより採取されたコアの物性試験より、WEAD の充填材を決定し、最深部のき裂面を貫通するように削孔した約 10 m

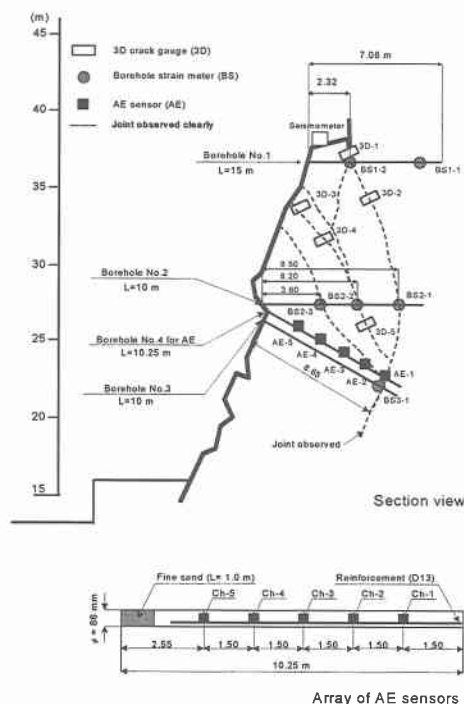


図-5 宇遠別第2覆道岩盤のセンサ配置

の計測孔に孔底より約 1.5 m 間隔で岩盤表面より約 2.5 m まで合計 5ch の AE センサ（プリアンプ内蔵 60 kHz 共振型）を設置し、40dB 以上の AE 信号を MISTRAS 遠隔 AE 計測装置（PAC 社製）によりデータを収録した。また、背景雑音の確認を目的に AE 計測小屋内部にも同種の AE センサを設置し、岩盤に設置した AE センサと同条件で計測した。ここで、既述の通り 1 m 深度までを湿潤砂で充填するとともに、最上部の AE-5 (ch-5) と斜面表面までの距離を約 2.5 m とした。本計測現場では、AE センサ以外にも地震計、3 次元き裂計、孔内ひずみ計などが図-5 のように設置されている。

5. 降雨と AE アクティビティー

図-6 に 1999 年 4 月から 2000 年 2 月までに得られた全チャンネルでの AE 発生率と降水量との関係を示す。同図より、100 mm 以上の降水量が記録された(a)～(d)においても AE アクティビティーは降水量に無関係であることが明らかとなった。つまり、得られた AE データは、斜面表面から打撃される降雨による AE に直接的に起因していないものと考えられ、本サイトで実施した降雨による AE 低減対策が効果的であったことが認められた。

6. AE 源位置標定

一次元に配置された AE センサと、物性が既知の充填材料からなる WEAD を用いることで、AE 計測孔上での一次元位置標定が可能となる。図-7 に AE 源の一次元標定結果の経時変化を示す。なお、同図中の円面積はリングダウンカウンターの平均値（第 1 到達波と第 2 到達波の平均値）を反映している。同図より、12 月初旬に計測孔底面より 4 m ～ 5 m (AE センサ ch-3 付近) に AE 源の集中が認められた。

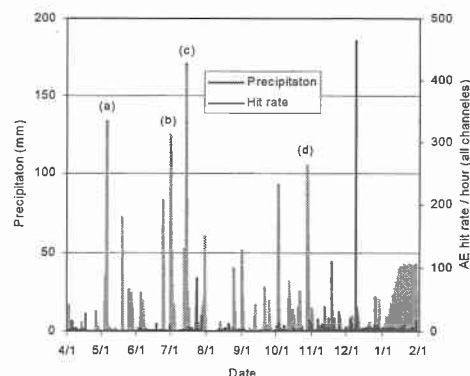


図-6 降水量と AE アクティビティー

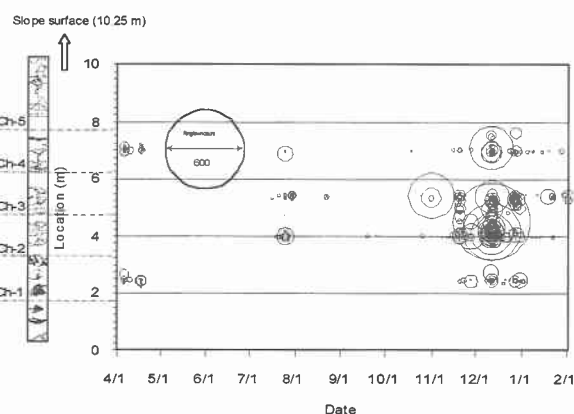


図-7 AE 源の一次元位置標定

7. AE パラメータと孔内ひずみの経時変化

図-8 に典型的な結果を示す ch-1 と図-7 の AE 源集中位置に設置されている ch-3 の Grade 結果を示す。ch-1 の Grade 経時変化より、12 月初旬に急激な低下が得られるものの、その値は 10 以上となり、表-1 の破壊規準より曲げ破壊程度の破壊形態が予測された。一方、ch-3 の Grade 変化より、11 月末頃と 12 月初旬に急激な 10 以下への低下が認められ、特に 12 月初旬の値は 5 程度となる。表-1 より、5 以下の Grade 低下はせん断破壊に対応していることから、この時期に瞬間的なせん断変形が岩盤内の局所(ch-3 付近)に生じた可能性が高いと考えられる。

ここで、AE 計測孔の直上に位置し、最深部のき裂付近より斜面表面に向い設置された孔内ひずみ計の経時変化に着目する。図-9 に最深部に設置されたひずみ計：BS2-1 と AE 源集中位置近傍に設置したひずみ計：BS2-3 の経時変化を示す。ここで、ひずみは、岩盤内温度変動のひずみへの影響を考慮し、AE 活動度と密接な関係を示す増分率⁹⁾とし表している。同図より、AE アクティビティーに対応した最深部のひずみ変動は認められず、それは BS2-3 ひずみと明らかに対応していることがわかる。このことから、12 月初旬の高い AE アクティビティーは瞬間的ではあるが岩盤内部の局所変状に対応し、得られた AE パラメータから、せん断破壊に対応しているものと考えられる。

8. おわりに

長期岩盤 AE 計測および評価を適切に行うことを目的に著者らが研究開発した 1)遠隔操作可能な AE 計測シス

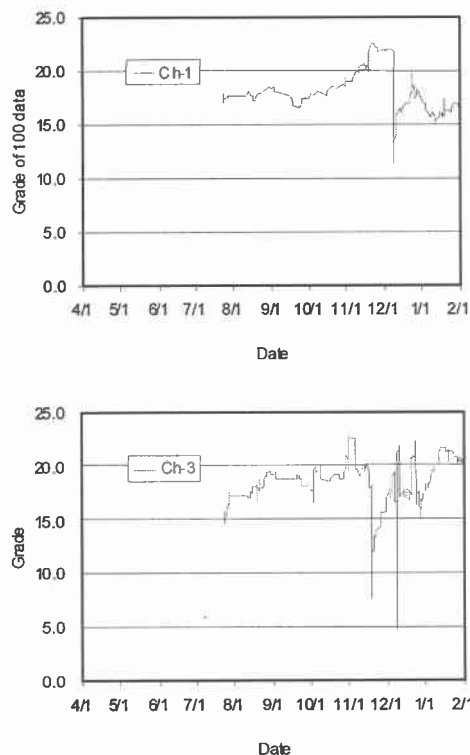


図-8 Gradeの経時変化（上：ch-1，下：ch-2）

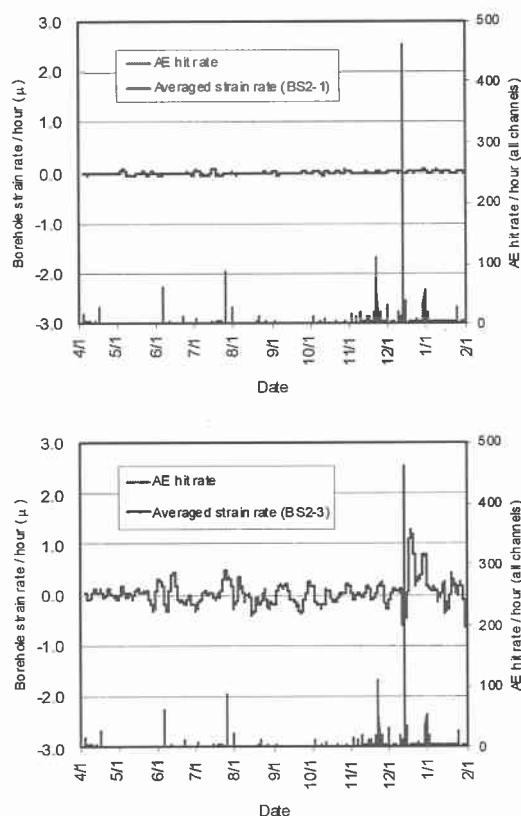


図-9 ひずみレートとAE発生率（上：BS2-1，下：BS2-3）

テム、2)AE センサ設置方法、2)AE 解析・評価方法などを解説し、開発した手法を北海道えりも町庶野「宇遠別第2覆道地区岩盤斜面」でのAE計測に適用した。計測されたAEデータ、および斜面挙動の計測結果に基づき

本計測方法や解析手法の妥当性を検討した結果以下の知見を得た。

1) 降雨の特徴を考慮したAEセンサ配置により、計測データに降雨に直接起因したノイズ混入は認められず、本除去方法の効果が実サイトで検証された。

2) AE源の一次元位置標定より、12月初旬の瞬間的なAE源の集中が確認された。

3) AEパラメータの経時変化から、あらかじめ策定したAEパラメータによる岩盤破壊規準を用いて岩盤内部の破壊状態を推定し、12月初旬の一時的なせん断挙動が推定された。

4) ひずみレートの急増が3)で示した時期に認められ、かつ1)で示したAE源集中位置に合致していた。

これらのことから、12月初旬の一時的岩盤挙動は、AE源、AEパラメータなどにより十分説明可能であり、本AE計測手法の妥当性が実岩盤斜面でのAE計測および岩盤挙動により明らかとなった。

参考文献

- 1) T. Shiotani, S. Yuyama, M. Carlos and S. J. Vahaviolos, "Continuous Monitoring of Rock Failure by A Remote AE System," Journal of Acoustic Emission Vol. 18, pp. 248-257, 2000.
- 2) T. Shiotani, Shigeru Miwa and M. Ohtsu, "Development of AE Wave-Guide for Rock Failure Monitoring, JSNDI, Progress in Acoustic Emission X, pp. 85-90, 2000.
- 3) T. Shiotani, K. Ikeda and M. Ohtsu, "Detection and Evaluation of AE Waves due to Rock Deformation," Elsevier Science, Construction and Building Materials, in press.
- 4) 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.
- 5) 池田憲二・日下部祐基・塩谷智基・三輪滋：模擬岩盤斜面での岩盤変状とAE計測，土木学会北海道支部論文報告集 第56号（A），pp. 802-807, 2000.
- 6) 塩谷智基・三輪滋・門間敬一：岩盤AEモニタリングに影響を与える雨滴の弾性波特性，資源・素材学会，第6回地下と土木のAE国内コンファレンス論文集，pp. 7-12, 1999.
- 7) M. Shigeishi, T. Shiotani and M. Ohtsu, "A consideration about the rainy influence in field AE measuring," JSNDI, Progress in Acoustic Emission X, pp. 177-182, 2000.
- 8) 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, pp. 529-534, 1994.
- 9) Shiotani, T. and M. Ohtsu, "Acoustic Emission Activity with Slope Behavior on a Model Slope of Rock," paper presented at AE Working Group 43rd Meeting, Seattle, 2000.