

無線式 A E 岩盤斜面安定性監視システムの開発

宇次原雅之^{1*}・金川忠¹・藤井真希¹・石田毅²

¹日特建設株式会社 技術本部 (〒104-0044 東京都中央区明石町13-18)

²京都大学教授 工学研究科 社会基盤工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター)

* E-mail: masayuki.ujihara@nittoc.co.jp

A E 測定による岩盤斜面の安定性監視手法は、変位測定等ほかの監視手法よりも早い段階から異常を検知できるという利点を有する。しかし、適用に当たっては斜面上にデータ送信用ケーブルを敷設する必要があり、これが適用上の課題のひとつとなっていた。筆者らは、この課題を解決するため原位置測定用の無線式 A E 岩盤斜面安定性監視システムを開発した。本システムは、斜面上に設置された A E センサから計測室等に置かれた解析・記録装置に、無線により A E 波形データを送信し、岩盤斜面の安定性を判定する機能を有している。これにより、ケーブル敷設が不要となり、また、A E 波形データが持つ有用な情報を安定性の監視に反映させることができる。本報告ではシステムの概要と適用試験の結果について述べる。

Key Words : *acoustic emission, wireless, waveform data, slope stability, monitoring*

1. はじめに

著者らは、材料の微小破壊音であるアコースティック・エミッション (A E) 測定により安定性を監視する手法の岩盤斜面への適用を進めている¹⁾。この手法は、一般に用いられている変位測定による手法に比べて、崩壊に至る前の早い段階で岩盤斜面の安定性の異常を検出できるという利点を有している²⁾。

これまでに、斜面安定対策工事中の安全確認方法として原位置への適用が図られてきた^{1), 3)}が、原位置測定の場合、センサで検出された A E 信号を、解析・記録装置まで送信するための信号ケーブルの敷設が問題となることが多かった。もともと岩盤の安定性が低い斜面上でのケーブル敷設作業は、煩雑であるうえ危険度が高い。また、ケーブルが長くなると、送信中に信号の減衰やノイズの混入が生じる恐れがある。さらに、ケーブル敷設後、落石や獣害などによりケーブルが切断された場合には、再度敷設が必要となる。

こうした問題を解消するため、著者らは、無線によるデータ送信機能を有する A E 岩盤斜面安定性監視システムを開発した。これにより斜面上への通信ケーブルの敷設が不要となり、原位置への適用性が大幅に向上した。

また本システムは、A E 波形データを送信する点を特徴としている。これにより、これまでに開発された A E 波形パラメータによるノイズ処理方法^{3), 4)}や、周波数の

変化を用いた安定性の判定方法¹⁾を適用することができるほか、A E 波形が持つさまざまな情報を斜面の安定性監視に役立てることができる。

以下では、開発したシステムの概要および室内・原位置で行った適用性確認試験の結果を述べ、本システムが岩盤斜面安定性監視のために必要な機能を備えていることを明らかにする。

2. 無線式 A E 岩盤斜面安定性監視システムの概要

(1) システムの構成

本システムは、岩盤斜面に設置した A E センサで得られた A E 波形データを、無線により現場事務所等の計測室に送信し、斜面の安定性の判定を行うものである。

システムの構成を図-1 に示す。本システムは、岩盤斜面上に設置する A E センサとデータ送信部、計測室に設置する解析・記録部 (パソコン) より構成される。さらに必要に応じて、解析・記録部から警報装置等に連結される。

A E センサは、市販されているプリアンプ付 A E センサを使用する。A E センサで検出された信号は、センサ近傍の斜面上に設置するデータ送信部に送られる。データ送信部までの信号の送信には 1~2m 程度の信号ケーブルを用いる。1 基のデータ送信部には、受振用の A E

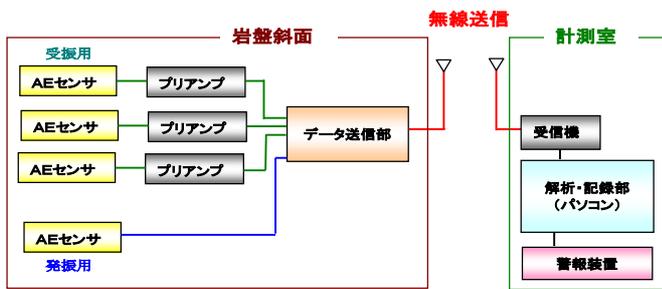


図-1 無線式AE岩盤斜面安定性監視システムの構成

センサを最大3個と、センサの作動確認を行うための発振用センサを1個接続することができる。測定点が多い場合には、データ送信部を斜面上に複数設置し、多点での測定を行う。

データ送信部では、AEセンサから送られてきた信号を、増幅、フィルタ処理し、A/D変換を行った後に、無線通信により解析・記録部に送信する。データ送信部の仕様を表-1に、外観を図-2に示す。トリガレベルや、増幅率、フィルタ範囲等の設定は、計測室の解析・記録部から無線により行う。

解析・記録部に無線送信されたAE波形データは、時間波形パラメータを用いてノイズを分別・破棄した後、安定性の判定に用いる^{3), 4)}。判定は、筆者らが岩盤の安定性評価の指標として用いているAE発生数と周波数の変化により行う（手法の詳細は3(3)節で述べる）。

本システムは、工事現場などでの安全対策として使用することを考え、機能を必要最小限のものに絞り、できるだけ簡易に測定できるように配慮している。

(2) 無線通信の概要

無線通信には、2.4GHz帯スペクトラム拡散（SS無線モデム）通信方式を採用している。この方式は、免許が不要であり、後述するように通信距離が長い。

送信能力は115kbpsで、サンプリングレート $1\mu\text{s}$ 、記録長1kwordsの場合、1分間におよそ60波形（20個×3チャンネル）の送信が可能である。データ送信部にはメモリ機能があり、AEが短時間に多く検出されて通信能力が追いつかない場合には、一旦このメモリ内に保存された後、順次送信が行われる。波形の一時保存は210波形（3チャンネル分）まで可能である。

無線通信の状態は、解析・記録部に表示される受信電力値により確認できる。受信電力値は、解析・記録部が受信する電力値を、 1mW を0dBとするデシベル表示による電力比で示したもので、一般に単位はdBmが用いられる。本システムでは、受信電力が -80dBm 以上であれば良好な無線送信が可能である。

表-1 データ送信部の仕様

外形寸法	266×243×120mm
重量	3kg
無線通信	通信周波数 2.4GHz 通信速度 115kbps
サンプリングレート	$1\mu\text{s}$ 、 $2\mu\text{s}$
記録長	1kwords、2kwords
A/D分解能	14-bit
電源	DC12V、1.3W(Max)



図-2 データ送信部外観

(3) センサのメンテナンスのためのパルス機能

原位置での測定時にAEセンサに故障が生じていると、崩壊の兆候が現れているにもかかわらず、安全であると誤認する可能性があるため危険である。このため、AEセンサに故障が生じていないことを定期的を確認する必要がある。

本システムにはパルス発振機能があり、発振用センサの近傍に設置した発振センサからパルス波を発振させ、その信号を受振用センサで検出することにより、センサの健全性を随時チェックすることができる。パルス波の発振は無線による遠隔操作で行う。この機能は、装置の健全性のチェックだけでなく、発振用・受振用センサ間の岩盤の弾性波伝播状況を定期的に測定し、センサ間の岩盤物性の変化の把握にも利用する。

(4) 使用電力

測定中は、岩盤斜面に設置するデータ送信部に、測定、無線送信、プリアンプ増幅などのための電力を常時供給する必要がある。商用電源等からの供給が困難な場合は、バッテリー等を使用して長期の測定を行わなくてはならない。このため、本システムは、できるだけ少ない電力消費量で稼動が可能ないように設計されている。その結果、測定・通信時の電力消費は最大で1.3Wとなり、バッテリーとソーラパネルを併用して長期間稼働させることが可能である。また、1日のうちで時間を限定して測定を行うことで、消費電力を抑える機能も有している。

3. 適用試験

(1) 平坦地での通信距離確認試験

a) 試験の目的と方法

通信距離の限界を確認することを目的に、屋外での通信試験を行った。

試験は、データ送信部と解析・記録部との間のアンテナ間距離を変えたときの受信電力を測定することにより行った。事前の室内試験により、通信時の受信電力が $-40 \sim -90\text{dBm}$ ではほぼ同レベルの通信が可能であるが、 -90dBm 以下になると通信不良が多く発生することがわかっている。ここでは、長期間測定を行うことを考慮して、良好に通信が可能で受信電力を -80dBm 以上とし、この受信電力が確保できるアンテナ間距離を求めた。

試験は、茨城県内の平坦地（農地）で行った。アンテナにはコリニア式アンテナを用い、地表面から 1.5m および 1m の高さにプラスチック製のポールによって固定した。送信地点、受信地点周辺および両地点を結ぶラインの下は草地であり、障害物はなく見通しは良好であった。試験時の天候は晴れで、気温は 28°C であった。

b) 測定結果

測定結果を図-3に示す。横軸にアンテナ間の距離、縦軸に受信電力を取っている。アンテナ間の距離が 250m 程度までは、受信電力が -80dBm を超えており、良好な送信が可能であることがわかる。アンテナ高さが低くなると受信電力は低下するが、地上から 1.0m 程度の高さに設置されていれば、 250m 程度までは受信電力 -80dBm 以上を確保できた。

以上の結果から、本システムでは、アンテナ間の距離が 250m 以内であれば良好に無線送信が可能であることが確認された。したがって測定を行う場合には、解析・記録装置を設置する計測室を、データ送信部から 250m の範囲内に設けるようにする。この範囲を超える場合は、受信電力を確認し、必要であれば中継ポイントを設置して測定を行う。

(2) 斜面での通信確認試験

a) 試験の目的と方法

実際の斜面での通信状態を確認するため、安定化対策工事実施中の斜面で連続測定を行った。

測定対象とする斜面は、県道沿いの高さ 20m 程度の岩盤斜面である。斜面の安定を図るためロックボルト工、モルタル吹付け工、ワイヤー掛け工が実施される。施工ヤード内の斜面上部にオーバーハングした岩塊が存在しているため、工事中の安全対策を目的として、岩塊下部に2つのAEセンサを取り付け、安定性の監視を行った。

測定対象斜面と解析・記録装置を設置する計測室（現場事務所）との間は、直線にして 70m 程度離れていた。

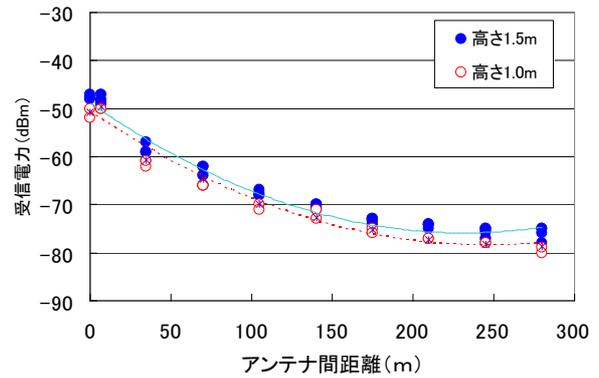


図-3 アンテナ間距離と受信電力の変化

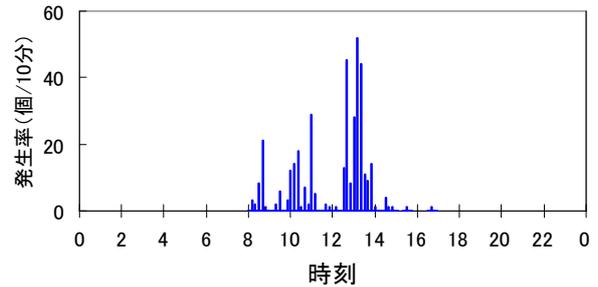


図-4 斜面での測定例

(ロックボルト削孔に伴って検出した削孔音)

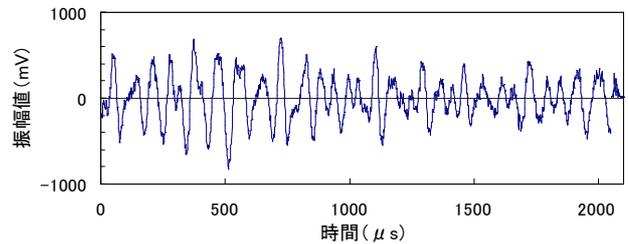


図-5 無線により送信された削孔音の時間波形

両者間の見通しはよいが、道路が横切っているため通信ケーブルを敷設することは困難であり、無線でのデータ送信が必要であった。

測定は、ハイパスフィルタを 5kHz 、ローパスフィルタを 400kHz に設定し、A/D変換はサンプリングタイムを $1\mu\text{s}$ 、記録長を 2kw ardsとして行った。

b) 測定結果

測定は約2ヶ月間実施した。その間、特に大きな通信障害は生じず、連続測定が可能であった。岩塊の不安定化に伴うと判定されるAEが検出されなかったため、センサ近傍でロックボルト工の削孔を行った際に検出された削孔音により、波形送信状況を調べた。

図-4は、1つのセンサでの24時間の測定結果を示したものである。横軸は時刻、縦軸は発生率を示している。ロックボルト孔の削孔は、1ヵ所あたり概ね1時間程度

で完了し次の位置に移動した。図-4 に示した例では、8～9時、10時～11時、12時30分～14時の間に、3箇所のロックボルト削孔が行われている。後に行くほど、削孔位置がセンサ設置位置に近づくため、発生率が増加している。

記録された波形の例を図-5 に示す。斜面の安定性判定のために対象とするAEは、次節に示すような突発型の波形形状を持つAEであり、図-5 に示すような連続型で周波数の低い波形信号はノイズと判断される。本システムでは、時間波形パラメータを用いてこれらのノイズを除去している^{3), 4)}。

(3) 室内における一軸圧縮試験時のAE測定

a) 試験の目的と方法

通常、AE測定により岩盤斜面の安定性を判定する場合、評価指標としてAE発生数の変化が用いられる⁹⁾。しかし、AE発生数の変化のみでは、破壊の段階を精度よく判定することが難しい場合が多い。このため著者らは、AE発生数に周波数の変化を組み合わせることで安定性の判定を行っている¹⁾。この判定方法では、AE発生数が急増し、周波数が低下し始めると最終的な破壊に近づいたと判定する。

この方法による安定性の判定が、本システムを用いたAE測定でも可能であることを、室内試験により確認した。試験は、本システムを用いて一軸圧縮強度試験時のAEを測定することにより行った。

供試体には、縦60mm、横60mm、高さ200mmの寸法の角柱状の凝灰岩（大谷石）を用いた。センサには70kHz共振型のAEセンサ（AE703SW；富士セラミックス製）を用い、瞬間接着剤により図-6 に示す位置に固着した。なお、図-6 には、試験により発生した亀裂・破壊面の位置も示した。

AEセンサで検出された信号は、プリアンプで40dB増幅され、データ送信部でさらに6dB増幅した。トリガーは100mVに設定し、これにより検出された信号は、ハイパスフィルタで5kHz、ローパスフィルタで400kHzに設定してフィルタ処理を行い、サンプリングタイムを

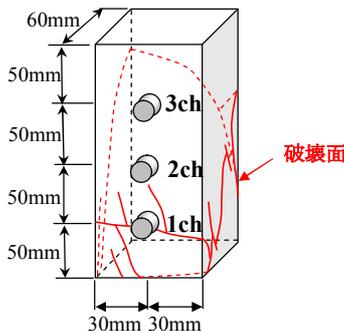


図-6 供試体とセンサ設置位置

1μs、記録長を1kwordによりA/D変換した。データ送信部から解析・記録部への送信は、室内用のアンテナを用いて行った。受信電力は-40～-60dBmの間で推移しており、常時良好な無線送信が可能な状態にあった。

解析・記録部に送られてきたAE信号は、FFT解析によりパワースペクトル図が作成される。安定性の判定に用いる周波数は、通常用いられるピーク周波数ではなく、スペクトルモーメントを用いた⁹⁾。スペクトルモーメントは、パワースペクトル図の曲線と横軸で囲まれた面積の重心を、一次モーメント法により求めたものである。

b) 測定結果

図-7 に測定されたAE波形の例を示す。これは、試験開始から約34分経過後に、1chセンサにおいて測定されたAEのものである。また、図-8 に、一軸圧縮強度試験中に3chセンサで測定されたAE発生数と周波数の変化を示す。横軸に試験開始からの時間を、縦軸に軸応力、AE発生数、周波数、10個平均周波数を取り、各々の経時変化を示す。なお、AEは3chセンサでファーストヒットしたもののみを対象としている。

供試体は、試験開始から38分後の軸応力11MPaで破壊した。AE発生数は载荷とともに増加しており、供試体内で微小破壊が進行しているものと推定される。周波数は载荷当初は増加傾向にあるが、破壊荷重の約80%に達した30分以降は低下しはじめ、巨視的な破壊が生

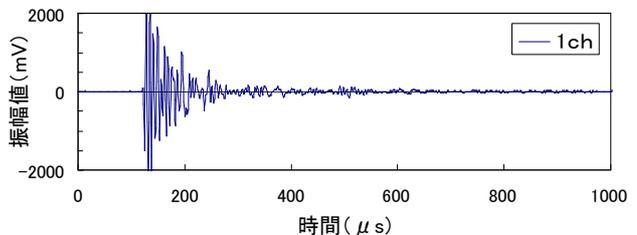


図-7 一軸圧縮試験時に検出されたAE波形例
(試験開始後34分後に1chセンサで検出されたもの)

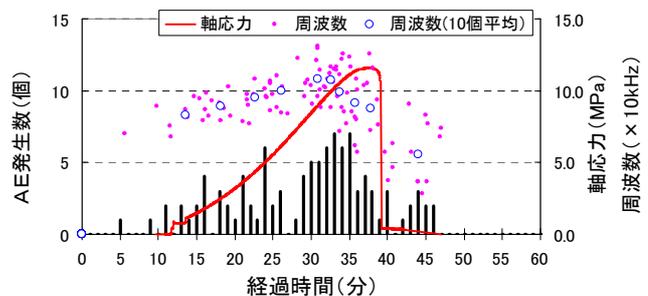


図-8 一軸圧縮試験時のAE発生数と周波数の変化
(3chセンサでファーストヒットされた波形のみ表示)

じた後は大きく低下している。

以上の結果から、AE発生数が増加し、周波数が低下し始めると、巨視的な破壊に近づいていると判定することができる。したがって、筆者らが開発しこれまで岩盤の安定性の判定に用いてきたAE発生数と周波数の変化を指標とした安定性判定手法が、本システムを用いたAE測定においても適用できることが確認された。

4. まとめ

岩盤斜面でAE測定を行う場合、通信ケーブルの敷設が大きな問題となる。その解決のため筆者らは、ケーブルの敷設が不要で、操作が容易な無線式AE岩盤斜面安定性監視システムを開発した。本研究では、そのシステムの適用性を、室内・原位置試験により確認した。

開発したシステムは、岩盤斜面に設置したAEセンサーで得られたAE波形データを、計測室等に設置した解析・記録装置に、無線により送信するものである。

無線通信には、2.4GHz帯スペクトラム拡散（SS無線モデム）通信方式を採用した。屋外での通信試験により、アンテナ間の距離が250m程度まで良好に無線送信が可能であることを確認した。また原位置の斜面において長期間連続計測を行い、良好に無線送信が可能であることを確認した。

また本システムは、AEの波形データそのものをA/D変換して無線送信することを特徴としている。これにより、筆者らがこれまで行ってきた、時間波形パラメータによるノイズ除去、AE発生数と周波数の変化を指標とする安定性判定を行うことができる。一軸圧縮試験時のAE測定により、AE発生数と周波数の変化を指標とした安定性判定手法が、本システムにおいても適用可能であることを確認した。

以上の結果、本システムを用いることにより、筆者らがこれまで行ってきたAE測定による岩盤斜面安定性監視手法を、岩盤斜面上に通信ケーブルの敷設を行うこと

なく適用できるようになった。今後は、このシステムを用いて岩盤斜面安定性監視の実績を増やすことにより、安定性判定の信頼性向上および原位置での適用性の向上を目指したい。

謝辞：本研究を行うに際し、(株)ジオファイブ五江渕通専務には、データ送信装置の開発に当たりさまざまな助言をいただいた。またシステムの開発、室内・原位置試験では、日特建設株式会社の関係各位にご配慮いただいた。記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 宇次原雅之, 金川忠, 石田毅: AE測定による岩盤斜面安定性監視手法と適用事例一周波数の変化を指標とした安定性評価手法と無線式AE測定装置について一, 第17回AE総合コンファレンス論文集, pp.95-98, 2009.
- 2) 塩谷智基: アコースティック・エミッション検査による診断への展開, AEによる岩盤斜面の診断, 非破壊検査, 第52巻2号, pp.78-83, 2003.
- 3) 庄子邦彦, 田中尚, 大場照一, 本間誠: 岩盤斜面掘削工事におけるAE特性を利用した安全性の確認, 第11回岩の力学国内シンポジウム, pp.105-110, 2002.
- 4) 田仲正弘, 金川忠, 森孝之, 福田真, 杉村亮二, 丹野剛男: 岩盤斜面安全監視のためのAE自動化システムと岩盤破壊判定法, 日本地すべり学会誌, Vol.39, No.1, pp.77-86, 2002.
- 5) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ: 岩盤モニタリングにおけるAE計測マニュアル(案), 2001.
- 6) 金川忠: 地下空洞建設におけるAcoustic Emissionの利用技術に関する研究/京都大学大学院工学研究科学学位請求論文, 1999.

DEVELOPMENT OF A WIRELESS ROCK SLOPE STABILITY MONITORING SYSTEM BY ACOUSTIC EMISSION

Masayuki UJIHARA, Tadashi KANAGAWA, Maki FUJII and Tsuyoshi ISHIDA

A method to evaluate of rock slope stability by AE monitoring had an inconvenient problem to need to lay a cable on a slope for the data transmission. To avoid this problem, we have developed a wireless rock slope stability monitoring system. The use of this system made it possible to transmit AE waveform data without laying a cable, from an AE sensor installed on a rock slope to a device in a research shed. This paper explains the outline of this system and describes the results of its application tests.