

岩盤斜面崩壊警報システムの構築

A WARNING SYSTEM FOR ROCK SLOPE COLLAPSE

道廣一利*・手嶋正和**・吉岡尚也***・網干壽夫****

Kazutoshi MICHIIRO, Masakazu TESHIMA, Hisaya YOSHIOKA, Hisao ABOSHI

PZT elements are generally used for detecting acoustic emissions in conventional AE monitoring systems. PZT elements are installed using wave guides¹⁾ or by gluing them directly on the rock surfaces, but uneven pressure on the attachment points invariably degrades the stability and precision of the data collected.

First, we propose a new type of sensor is consist of a self-made hydrophone covered with water-filled stainless steel pipe, and report the effectiveness of using this sensor for AE monitoring. And We introduce a newly developed monitoring and warning system for Slope collapses using this hydrophone. This system could be confirmed that transmit the warning signal to the watching points in practice experiments, quickly.

Key Words: rock slope, Acoustic Emission, hydrophone, monitoring,

1. はじめに

我が国には、急峻で危険な斜面が数多く存在し、その近傍には多くの幹線道路が張り巡らされており、このようなエリアで、斜面が崩壊すると多くの犠牲を伴う大事故につながる。事故を最小限度に食い止めるには、早い段階での危険個所の調査や現場付近での交通規制等を所轄機関（建設省、地方自治体等）にて即座に判断できる警報システムの構築が急がれる。本研究は、AE（Acoustic Emission、以後AEと記す）を観測し、震源地でのエネルギーや発生頻度などを考慮してそれらがあるレベル以上になると、所轄機関が即座に警報を発し、交通等の規制などを行い事故を未然に防ぐシステムの構築を行ったものである。

AE手法の最大の特徴は、個々の微小破壊により発生するAEをリアルタイムに捉えることができ、崩壊の早期予見が可能な点である。また、GPSなどによる変位の連続観測と併用すればさらに正確な情報を得ることができる。本論文は、斜面崩壊事故の未然防止を目的とした警報システムの提案を行ったものであり、その概要を図-1に、着目した項目を以下に示す。

- ①現場への適用性に優れたセンサーの検討
- ②警報発生のための監視パラメータ
- ③システムの構築

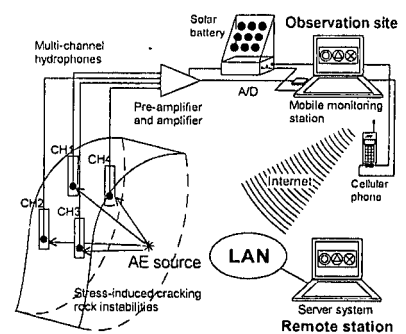


図-1 構築を行ったシステムの概要図

* 正会員 工学博士 摂南大学 工学部 土木工学科

** 正会員 修士（工学） 中央復建コンサルタンツ（株）総合一部地盤室

*** 正会員 博士（工学） 大阪工業大学短期大学部 土木工学科

**** 正会員 工学博士 （株）網干壽夫研究所

2. 現場への適用性に優れたセンサーの検討

現場でのAE計測では、センサーとしてPZT（チタン酸ジルコン酸鉛：圧電素子）がよく用いられており、そのセンサーの設置方法としては、接着剤等により直接岩盤に貼り付けたり、金属棒（ウェーブガイド）を介した設置が行われている。これらの方法での問題点として、計測対象領域にAEセンサーを強固にかつ均一に設置することが難しく、それに伴い均一な感度が得られないといったことが挙げられる。このような問題点を解消するために、センサーとしてハイドロフォンを使用することに着目した。

ハイドロフォン（hydrophone）は、波の媒体となる水が、波の伝播性に優れているため、潜水艦のソナーや魚群探知機といったものに利用されている。ここでは、斜面サイトで発生するAEのモニタリングにハイドロフォンの適用を試みた。斜面サイトにおけるハイドロフォンの設置を図-2に示す。この方法は、水で満たされたボーリング孔や地下水のしみだしによりできた水溜り内に防水加工を施したセンサーを挿入したものであり、この方法では設置の容易さに加えて、次の点において利点がある。

①水が地盤とハイドロフォンとの間の良好な媒体となる。②水は弾性波（S波）を伝播せず、地盤から伝播してきたAE信号のうちP波成分を効率よくハイドロフォンに伝えることが可能。③地盤との接触面積がボーリング孔全体と多くなり高感度のセンサーとしての使用が期待できるといった点である。

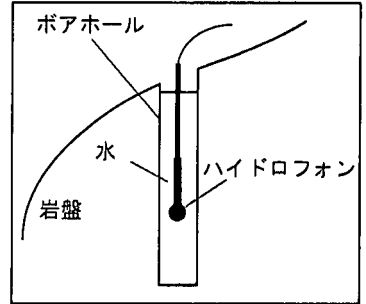


図-2 斜面サイトでのハイドロフォンの設置方法

(1)室内試験²⁾

ハイドロフォンの感度を確認するために、従来型のAEセンサーとの比較試験を行った。室内試験の概略を図-3に示す。

比較的大きな花崗岩ブロックの側面に従来型のAEセンサーとしてPZT素子（直径：10 mm、共振周波数：650kHz）をエポキシ樹脂で接着固定し、ブロック上面まで水で満たされたボアホール内に防水加工を施したハイドロフォン（側面に使用したPZT素子と同様のもの）を設置した。

これら2つのセンサーから等距離のブロック上面の地点でガラスビーズを押し壊しAEを発生させ、これら2つのセンサーに受信される波の入力信号をデジタルストレージオシロスコープ(DSO)で観測した。

観測された波形を図-4に示す。それぞれの波形を比較すると、振幅に関しては従来型のセンサーの方が若干大きい結果となった。しかし、従来型のAEセンサーではP波、S波の両成分を同時に捉えているのに対し、ハイドロフォンでは受信される信号が一旦水を介するためS波成分がカットされP波のみを捕らえている。

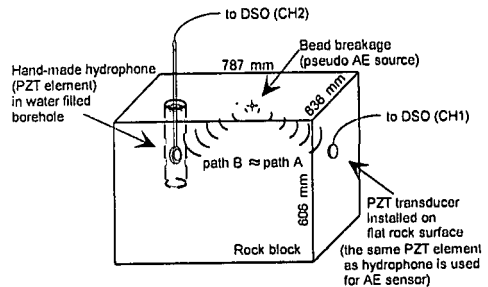


図-3 室内試験概要図

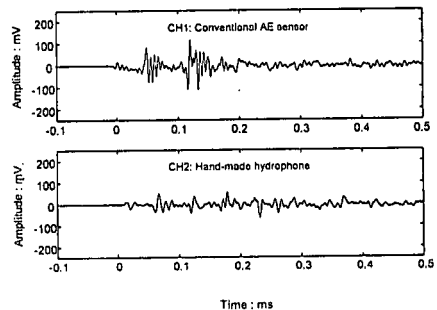


図-4 室内試験時の観測波形

今回ハイドロフォンを用いた理由の一つとして、入力された波のカウント数をパラメータの一つとしており、S波は地下水などにより振幅に大きく影響を受けるが、P波ではその影響がほとんどなく、震源地より発生した波はその伝播経路にあまり左右されないといった利点がある。両センサーによるP波の感度比較を行ったところ若干ハイドロフォンの方が感度がよかった。今回の室内試験では、従来型センサーの場合、理想的な状態での設置であるのに対し、ハイドロフォンは水で満たしたボアホール内にただ挿入しただけの簡単な設置方法であるにもかかわらず、明確にP波を受信しており、現場への適用に優れていると考えられる。いずれにしても、ハイドロフォンの設置は非常に容易であり、かつ同一条件での設置、設置における再現性にも優れているといえる。

(2) 予備的な現場計測

ハイドロフォンを用いたAEモニタリングの可能性を確認するために予備的な現場計測を行った。観測サイト（図-5、星印）は跡津川断層の分岐した茂住断層に沿う高度に破碎された断層破碎帯付近である。ここは、地震の研究を目的とし、活断層のひずみや応力の蓄積過程、破碎帯の形成過程等を調査するために活断層を貫き調査坑（全長480 m、内径3 m、土被り300 m）として掘削された場所である。

ハイドロフォンの設置を図-6に、AEモニタリングシステムの概略を図-7にそれぞれ示す。センサーは、2本の市販のハイドロフォン（Brüel & Kjær社製8105型ハイドロフォン、センサー部形状：球形、直径：22 mm、共振周波数：180 kHz）を地下水のしみだしによりできた水溜まりの中に沈め設置した。

ハイドロフォンにより観測された波はアンプ（利得：40dB、周波数領域：20 kHz～500 kHz）により増幅され、その信号をノート型パソコンに内蔵した2チャンネルのデジタルストレージオシロスコープ（DSO）で波形を収録した。計測にあたっては、予想されるノイズ（坑内通気時のファンによるノイズ、人の通行によるノイズ等）を避ける為に日中の計測は行わず、夜間のみ（各日、午後6時から翌朝の6時まで）の計測とした。今回用いた計測器の自動計測制御にはLabVIEWを用いた。計測時のDSOの各種設定パラメータを表-1に示す。

今回の観測（7日間）では、合計27個のイベントが両チャンネル共に観測されており、波の到達時間差も見られることから（図-8参照）得られた信号は計測器や電源等から発生した電気的なノイズではなく明確なAEイベントであると考えられる。

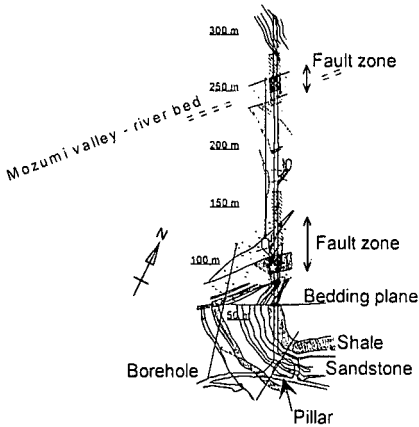


図-5 AEモニタリングサイト

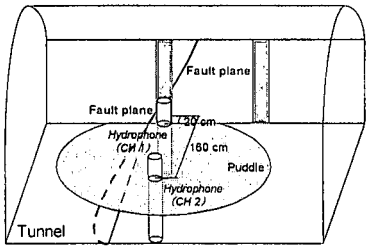


図-6 現場におけるハイドロフォンの配置位置

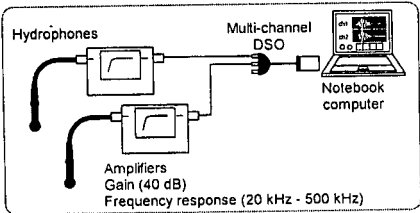


図-7 現場計測時のAEモニタリングシステム

表-1 DSOの設定パラメータ

Parameter	Input
Input range	±250 mV
Trigger mode	Pre-trigger
Trigger source	CH1
Trigger level	50 mV
Slope	rising
Pre-trigger points	15000 points
Acquisition time	6 mV
Sampling rate	5 MS/s
Sampling points	30000 points

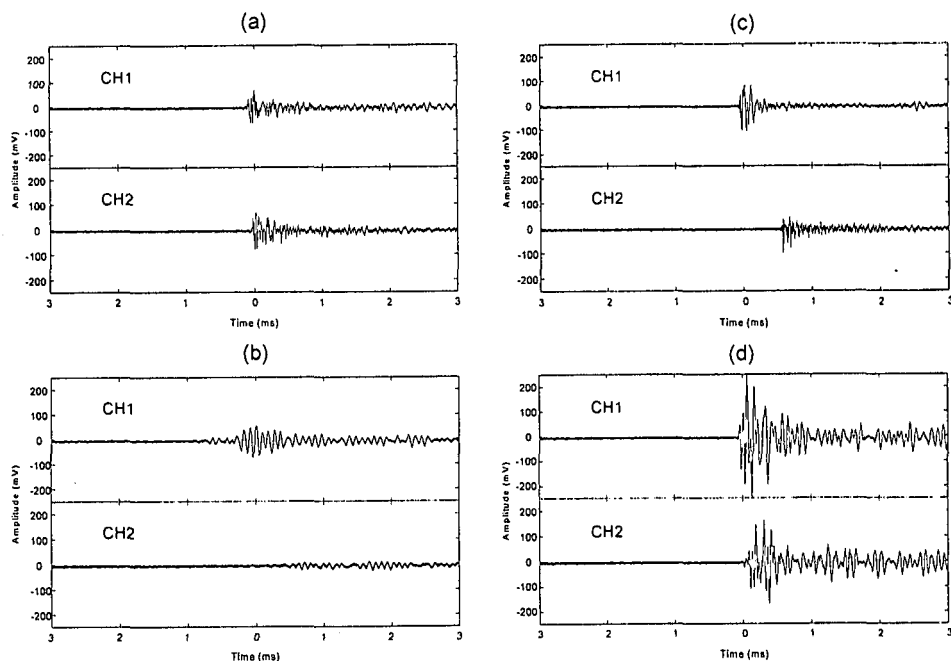


図-8 現場計測時の観測波形 (4タイプ)

(3)原位置に適したセンサーの開発

対象とするエリアにおいて、ボアホールやくぼ地に水が満たされている場合では、ハイドロフォンでのAE観測は非常に効果的であることが明らかとなった。しかしながら、実際の斜面サイトでは岩盤に亀裂などもあり、設置箇所を常に水で満たしておくことは困難である。したがって、上記の問題点の解消と我々の目指すシステムへの適用性（システム内の監視パラメータとして閾値やAEカウントの使用を考えたため、①AE検出のために必要な程度の振幅が得られるセンサー、②複数のセンサー設置時にそれぞれがほぼ同等の感度を有するセンサーが必要であること）を考慮し、新たに改良型ハイドロフォンの試作を行った。

試作したハイドロフォンの概略を図-9に示す。このセンサーは室内試験の際に使用したタイプのハイドロフォン（センサー部：PZT素子〔共振周波数：400 kHz〕）を水で満たされたステンレスパイプ内に挿入し固定したものである。斜面サイトでのこのハイドロフォンの設置状況を図-10に示す。監視エリアに開けたボアホールにハイドロフォンを挿入し、すき間をモルタルやセメントミルク等で固定したものである。この設置方法によると次のことが期待できる。①誰が設置してもほぼ同じ状態を得ることができる。②センサーどうしの感度のバラツキを抑えることができるといった点である。

今回このタイプのハイドロフォンを複数本試作したが、どの程度の感度を得られるのか、また感度のばらつきがどの程度あるのかを確認するために、水中において試作した同タイプのハイドロフォン4本（以下S-1～S-4と略称）について感度チェックを行った。比較の際にはそれぞれの試作ハイドロフォンを市販のハイドロフォン（B&K社製 8105型）を基準として得られた信号の最大振幅に着目して比較検討を行った。

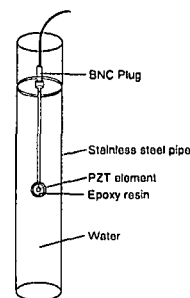


図-9 斜面サイトでの設置方法

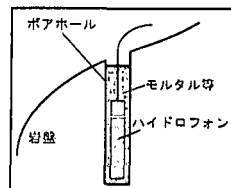


図-10 感度チェック試験概要図

試験の概略を図-11に示す。計測に使用したシステム（センサー以外）は2.(2)で述べた計測システム（図-7）を使用した。水中にCH1としてB&Kハイドロフォン（以下B&Kと略記）をCH2として今回試作した改良型ハイドロフォンを並行に設置し、各センサーから等距離の点でガラスビーズ（直径：0.6 mm）をペンチで押し壊すことにより擬似的なAE信号を発生させ、各センサーに入射された計30個（距離変化5点×6回）の信号を観測した。

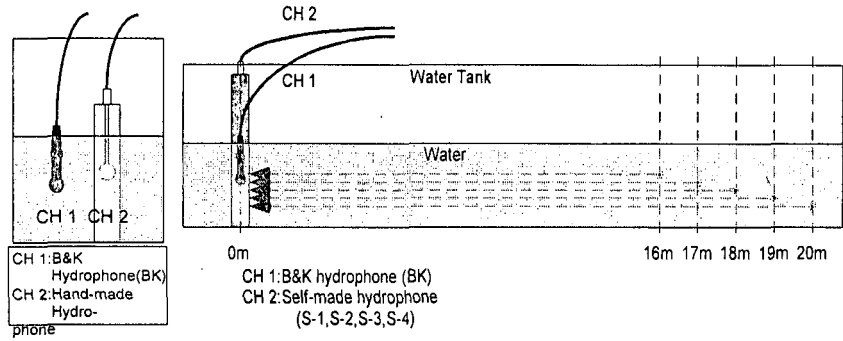


図-11 B&Kと改良型ハイドロフォンの感度比較

得られたデータを縦軸には試作ハイドロフォンにより観測された波の最大振幅を、横軸にはB&Kにより観測された波の最大振幅をとり表したものが図-12である。図中の45度破線は試作ハイドロフォンとB&Kハイドロフォンの感度が1：1を示したものである。実線3本は、今回行った実験データの最大と最小の範囲と平均を表しており、B&Kに対して最大振幅で約7割程度の最大振幅が得られており、ステンレスパイプ内に挿入しても感度低下がそれほど見られず、また4本の試作ハイドロフォンどうしの感度もほぼ同じであり現場への適用にも十分可能であることが明らかとなった。

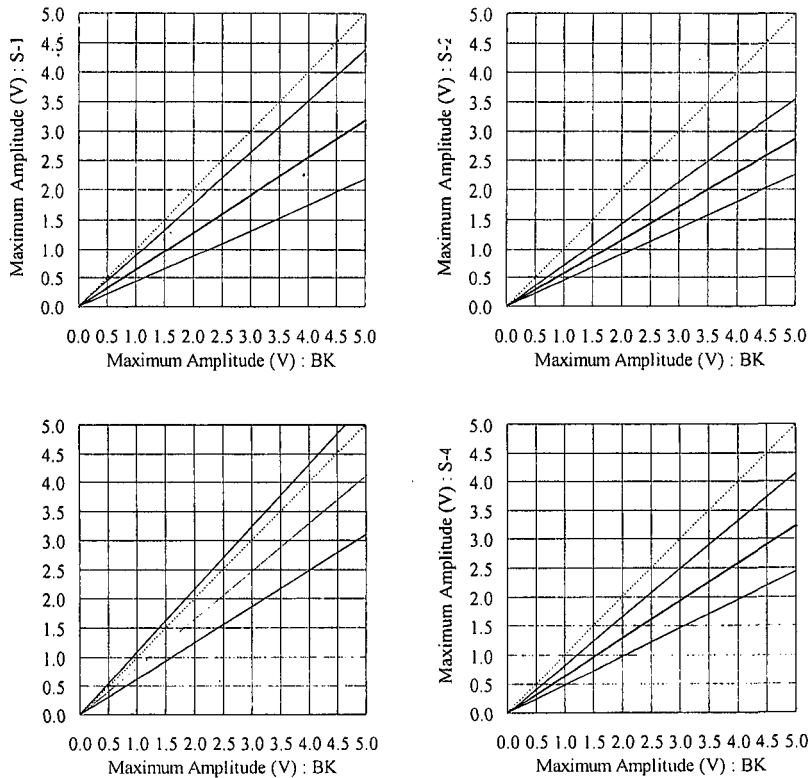


図-12 B&K と改良型ハイドロフォンの感度比較

3. 監視システム³⁾

現在では、AE計測手法として震源の位置決定や波形解析等を目的とした研究もよく行われている。しかし、長期間の計測により非常に膨大なデータが蓄積され、しかもデータ解析も複雑であり、リアルタイムの評価ができないといった問題点がある。本研究では簡便で信頼性の高いAEの監視パラメータを用いることにより、現場のシステムにおいてAEの監視と危険性の評価をリアルタイムで行い、現場システム内で危険と判断した際には、即座に監視点に警報信号を伝えることのできるシステムを構築した。

システムにおける危険性判断の第一段階のプロセスとして、複数チャンネル設置したセンサーのうち、いくつかの点（たとえば4チャンネルの内2チャンネル以上）に同時に、あらかじめ設定をした閾値を越える信号が観測される（複数点で同時にある一定レベルのエネルギーを有したAEイベントが観測される）と、そのイベントが危険性の判断に有効なAEイベント（有効AEイベント）であると判断する（第一段階の判断）。この際、システム内において、自動的に第二段階へと移行する。第二段階としては、単位時間当りの有効AEイベントのカウントレートを常時監視し、この有効AEカウントレートがあらかじめ設定した個数以上に達した時に（単位時間当りに発生する有効AEイベント数が高い値を示す際に）危険であると判断（第二段階の判断）するシステムである。

本論文で提案する監視システムは、現場システム内でAEの監視と危険性の評価を行い、危険と判断した際には、監視所に警報信号を転送する。ここで、想定される監視所としては公共機関、研究所、大学、企業等が挙げられ、このような場所ではすでにLANによるネットワーク網が構築されていると考えられる。したがって、我々は通信媒体としてインターネットを介した通信システムの構築を行った。インターネットを利用することで、遠隔監視所へも素早くかつ安価に警報を伝達することが可能となる。

これまでに示した着目点の検討を総合して以下のようなシステムを構築した。また、このようなシステムを現場へ適用する際には、現場サイト内における通信用回線等の有無に対する検討が必要である。したがって、ここでは次の二つのタイプのシステムを示す。

図13-(a)(b)は、それぞれ現場に通信用回線がある場合と無い場合である。現場に電話回線、ISDN回線あるいは光ファイバーケーブル等がすでに引かれているか、あるいは敷設が可能な場所では、複数点設置されたセンサー（ハイドロフォン）からのAE信号を常時現場システムが監視し、危険と判断した際には即座にこれらの回線を利用して自動的にインターネットを介して監視点に危険信号を伝え、監視所のモニターに危険信号を表示する。一方、このような回線を引くことが困難なサイトでは、携帯電話を使用する。この場合でも、現場監視システムは最寄りのプロバイダーのアクセスポイントへ接続するだけでよく電話料金等も安価に設定することが可能である。

これらのシステムの動作テストを野外にて模擬的に行った結果、いずれのシステムでも正確に警報を監視側に即座に伝達できることが確認できた。

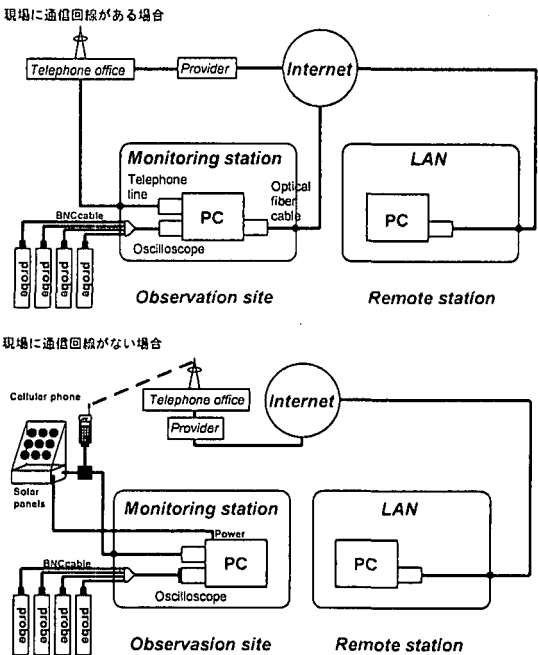


図-13(a)(b) 構築したシステム構成図

4. まとめ

- 1) ハイドロフォンは設置の容易さ、感度の面で現場への適用性に優れる。また、斜面サイトへの適用性を考慮して試作した改良型ハイドロフォンは、設置も比較的容易で感度的にも十分使用が可能である。コストの面でも安価に製作を行えるため現場の多数点に設置することが可能であり、本システムへの適用性にも優れ有効である。
- 2) 今回構築を行ったシステムは、危険性の判断や危険信号の伝達を素早く行え、経済性の面でも安価なシステム構築が可能である。したがって、このようなシステムを現場に普及させることにより大事故を未然に防ぐことが可能であると考えられる。

今後は、実際にこのシステムを現場へ適用して、現場でのセンサーの配置方法や危険と判断するための閾値やAEカウントレートのレベル設定の方法に対する検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は平成10年度の（社）中国建設弘済会「技術開発支援制度」として研究補助を受けて行ったものであり、ここに謝意を表す。また、京都大学防災研究所地震予知研究センターの柳谷俊助教授に、本研究を行うにあたり多大なるご指導をいただいたことをここに記して謝辞を表す。

参考文献

- 1) 川上純、服部弘道、中尾正博、後藤哲男：斜面崩壊時に発生する AE 特性について、土木工学における AE 研究発表会、非破壊検査協会、 pp.110 ～ 115、 1988
- 2) 手嶋正和、道廣一利、柳谷俊、網干壽夫：ハイドロフォンを用いた AE モニタリング、第 54 回土木学会学術講演会論文概要集、 1999
- 3) Teshima, M., Michihiro, K., Yanagidani, T. & Aboshi, H.: A system for predicting rock slope collapse using hydrophones. 8th international symposium on Landslides, pp.1461-1466, cardiff, 2000