
AE計測による岩盤斜面の安定性評価手法について

岩盤直接せん断試験による検証

APPLICABILITY OF ACOUSTIC EMISSION FOR THE PREDICTION OF ROCK SLOPE COLLAPSE VERIFICATION DUE TO IN-SITU ROCK SHEAR TEST

大河原彰*・松山公年**・金本康宏**・中曽根茂樹***・野村誠紀****

Akira OKAWARA, Kimitoshi MATSUYAMA, Yasuhiro KANEMOTO, Shigeki NAKASONE and Seiki NOMURA

Recently, disastrous rock slope failure occurred along road. There is no effective method to predict rock slope failure. Prediction techniques of the rock slope collapse are required.

Acoustic Emission (AE) has remarkable potential for the prediction method of the rock slope collapse. We observed AE activities under the in-situ rock shear test. In this paper, we study the relation between AE activities and rock shear process. We found different types of AE wave based on rock shear process. In conclusion, it is described that AE method is applicable to predict rock slope collapse.

Key Words : rock slope collapse, acoustic emission, rock shear test, prediction techniques

1. はじめに

平成8年2月の豊浜トンネル、平成9年8月の第2白糸トンネルなど、近年岩盤斜面の崩壊事故が発生しており、岩盤崩壊の災害発生を事前に予知・予測し、対策をとることが社会的な要請となっている。岩盤崩壊は、一般に規模が1,000～10,000m³と大きく、崩壊までの変位量は小さいが、崩壊時には変動が急激に活発化するため、事前予知が難しい。

岩盤斜面に対する対策としては、危険箇所の把握、安定度診断、計測による崩壊予知、防災対策工事、防災情報の伝達などの各段階があるが、ハード的な対策には経済的・時間的な限界もあり、予知技術の確立が急務である。しかし、岩盤崩壊の計測事例は極めて少なく、岩盤の挙動把握のための有効な計測手法は確立されていないのが現状である。

本研究では、岩盤崩壊の直前予知の手法としてAEに着

目して、岩盤直接せん断試験時におけるAE計測を行った。その結果、岩盤のせん断破壊とAE発生の関係について詳細に検討することができ、AE計測を岩盤斜面の安定性評価へ適用する可能性が得られたので報告する。

2. センサー技術を用いた岩盤計測技術について

(1) 岩盤崩壊の特徴

岩盤の破壊の特徴は、短期的な応力に対しては弾性変形領域でも最大応力に達すると瞬時に破壊すること、一定応力下でも長期的にひずみが増大(クリープ)すること、圧縮強度に比べて引張強度が極端に小さいことなどである。これらのことから、岩盤の崩壊は、応力集中により破碎部や弱面が長期にわたり徐々に広がり、最終的に崩壊にいたるものと思われる。

* 関東支店 技術部
** 中央研究所 開発研究部
*** 仙台支店 技術第二部
**** 大阪支店 北陸事務所

(2) 既存の岩盤計測技術

岩盤斜面の計測は、崩壊の前兆現象を把握し適切な対策をとることによって、岩盤斜面の崩壊を未然に防止したり、崩壊による被害を最小限に抑えることが基本的な目的である。

これまでに用いられている主な計測機器としては、以下のようなものがある。

< 計測対象 > < 計測機器 >

地表変位：伸縮計、傾斜計、移動杭、亀裂変位計、落石検知器

地中変位：地中ひずみ計、岩盤変位計、孔内傾斜計

構造物：土圧計、ロードセル、ひずみ計、鉄筋計

水文状況：水位計、雨量計、流量計

これらの計測機器の精度は、伸縮計や亀裂変位計などの直接2点間の距離を計測する手法でも、実質的には0.1mm程度のオーダーが限界となっている上、温度変化の影響を大きく受ける。したがって、小さな変形の後、急激な破壊にいたる岩盤崩壊の場合には、現在の技術による直前予知は難しい。しかし、岩盤の場合、内部の微小な亀裂が蓄積されて最終的に崩壊するため、微小な亀裂が蓄積する段階で検知することができれば、崩壊の前兆をとらえることが可能となる。

(3) AE法の特徴

AE(アコースティック・エミッション)とは、物体が破壊する以前の、微小な破壊にともなって開放されるひずみエネルギーの一部が弾性波として放出される現象である。岩盤崩壊の予知技術としてAE計測が期待されているのは、

大きな変形に先立つ岩盤内の微小変形段階での破壊音を察知できる点による。

岩盤のAE測定の有効性は、AE発生数、発生箇所、周波数特性などの変化を時系列的に把握することにより、上記の岩盤の破壊過程の変化、すなわち崩壊の前兆を把握できる可能性がある点にある。

しかし、技術的には未解決の点も多い。例えば、自然状態の雑音の除去、測定可能範囲を考慮した適切な配置、地中内部への設置方法、自然状態での長期的な計測のための性能維持などである。

これらについては、現在建設省土木研究所と民間各社による共同研究のほか、全国8カ所での岩盤モニタリング業務が実施されており、現場適用性の検証が続けられている。

3. 実験概要

(1) 実験対象

今回、岩盤直接せん断試験時のAE計測を行った対象地点の地質は、三畳紀～ジュラ紀の船津花崗岩類で、ダムサイトには花崗閃緑岩とカタクラスティックなミロナイト質花崗閃緑岩が分布している。

岩盤直接せん断試験は、このうちC_M級に相当するミロナイト質花崗閃緑岩分布域を試験対象箇所として選定された。対象岩盤には、圧縮応力場で形成された潜在的な微小亀裂が発達し、試験位置より浅層部で岩盤の緩みが進行している素因の一つとなっている。

これまでの試験結果によれば、試験対象地点の岩盤の強度特性は下記の通りである。

岩 相：ミロナイト質花崗閃緑岩

岩 級 区 分：C_M級

節 理 系：ENE～WNW 走向50～70°S 傾斜およびNW 走向20～50°N 傾斜の2系統

亀 裂 間 隔：5～15cm間隔（亀裂面に粘土薄膜有り）

P 波 速 度：3.2km/sec（試験面での弾性波探査による）

変 形 係 数：85,000kgf/cm²（予備載荷試験結果による）

静弾性係数：340,000kgf/cm²（予備載荷試験結果による）

単 体 重 量：2.4t/m³（C_M級）

粘 着 力：13.0t/m²（C_M級）

内部摩擦角：45°（C_M級）

(2) 実験方法

1) 岩盤直接せん断試験

試験方法は、土木学会「原位置岩盤の変形およびせん断試験の概要」および建設省土木研究所内部資料「ダムサイトにおける原位置岩盤のせん断マニュアル(案)」に準拠した。

試験地点において調査横抗の上流側壁を発破掘削により拡幅し、試験用チャンバーを設営した。その後、盤下げにより試験岩盤を切り出し整形し、幅60cm×60cm×高さ30cmのコンクリートブロックを打設した。試験装置の全体概要図を図-1に示す。

せん断方向は上流 下流とし、せん断荷重は水平面から下向き15度方向に載荷した。本載荷試験に先立って、予備載荷試験を行い、初期鉛直応力を2.5kgf/cm²(9tf)に設定した。本載荷試験のせん断裁荷速度は0.5kg/cm²/minとし、5分間隔で荷重上昇～静止を繰り返し(鉛直荷重は一定)岩盤が破壊するまで荷重を増加させた。

コンクリートブロックの変位測定は、図-1に示すように、せん断方向および鉛直方向変位量に対して実施した。せん断方向変位は、コンクリートブロックの背後(ジャッキの反対側、下流側)に変位計を4箇所設置した。また、鉛直方向の変位はコンクリートブロックの上面に変位計を4箇所設置した。

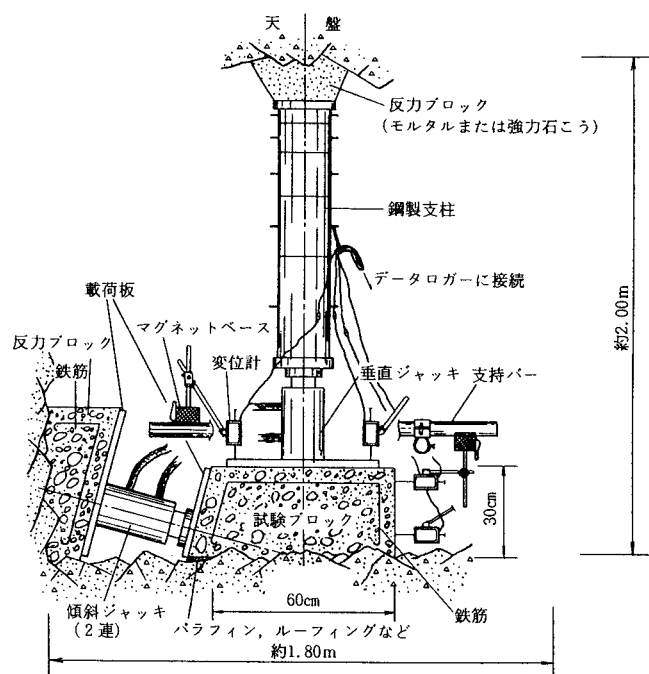


図-1 岩盤直接せん断試験装置図

2) A E 計測

本実験では図-2に示すように2種類のA Eセンサーを用いて計測を行った。A E計測システム(60kHzおよび15kHz共振センサーを配置)を図-3に示す。

A E計測は、予備載荷試験(鉛直方向のみ載荷)終了後の本載荷試験(せん断荷重の載荷)時に行った。

4. 実験結果

(1) 直接岩盤せん断試験結果

直接せん断試験の荷重と変位の関係を図-4に示す。対象岩盤は、せん断応力14.5kgf/cm²で初期変曲点となり弾性的変形から塑性的変形に変わり、せん断応力29.0kgf/cm²で降伏点となり変位量が急増し、33.8kgf/cm²で破壊点・最大せん断応力(約1.5mmのせん断変位)となり、以後せん断耐力を失い破壊にいたっている。

(2) A E 計測結果

図-5に本載荷(直接せん断)試験時のA E発生挙動を示す。図-5は、15kHz共振センサーで計測した単位時間(1分)当りのA E発生量を、計測時間に対するヒストグラムとして整理したものである。載荷によってせん断応力が增大するにともないA Eの発生量が漸増し、載荷終期の破壊点付近で急増している。

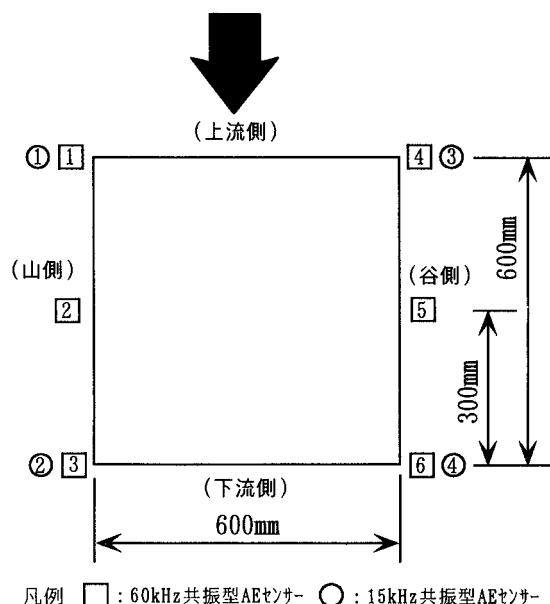


図-2 AEセンサー配置図(平面図)

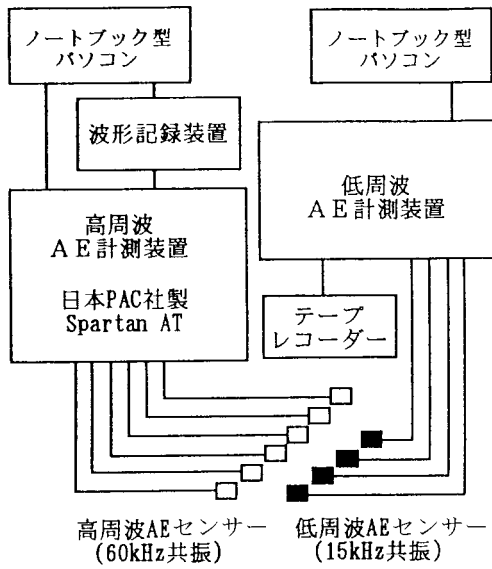


図-3 AE計測システム



写真-1 AE計測装置

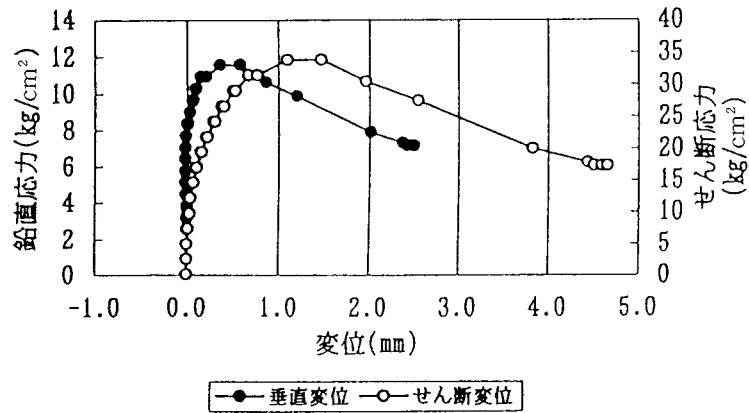


図-4 直接せん断試験の荷重と変位の関係

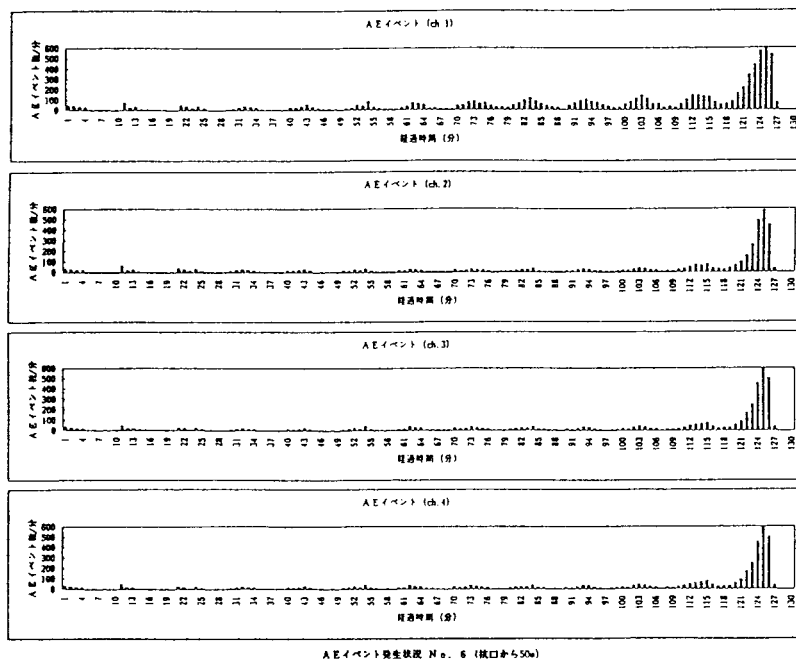


図-5 直接せん断試験時のAE発生挙動 (15kHz共振型AEセンサー)

(3) A E 計測と変位計測の比較

載荷初期(初期変曲点付近までの概ね弾性的変形の段階)におけるコンクリートブロック背後の変位と A E 発生挙動を図 - 6 に示す。図 - 6 に示す時間は、せん断荷重の載荷開始後50分間で、これに相当するせん断応力は約12kgf/cm²である。図 - 6 で、せん断荷重載荷開始後20分間は、ブロック背後の変位が現れていないのに対し、AEはせん断荷重載荷直後から発生していることがわかる。これは、せん断荷重載荷後、ブロック背後の変位が現れるまでのブロック中(岩盤)の微小ひび割れを A E として計測したと考えられる。また、AE 発生挙動は、せん断荷重の載荷過程に良く対応している。これは、せん断荷重が増加する0~5、10~15、20~25、30~35、40~45分間に岩盤内でひずみエネルギーが蓄積・開放し、この結果、岩盤内に発生した微小ひび割れ・変形を A E として計測したと考えられる。これらの特徴は、A E 計測により岩盤内の微小ひび割れ・変形を鋭敏に把握できることを示している。

(4) A E 発生挙動と岩盤せん断破壊

1) 2次元 A E 発生源位置標定結果と岩盤破壊状況の比較

経過時間毎の A E 発生源位置の変化を図 - 7 に示す。位置標定された A E 発生源の分布をせん断荷重の増加とともに比較すると、載荷初期は上流谷側(4チャンネルの近く)に多く A E が発生していることがわかる。さらに、時間の経過とともにせん断荷重の増加により、A E の発生源が上流側から下流側全体に広がっていく状況が確認できる。

図 - 8 に直接せん断試験実施前の試験面の状況を示す。試験面において谷側(M~Oの範囲)にNW 走向25~38 N 傾斜の比較的明瞭な岩盤の亀裂面がみられるほか、試験面

全体に小規模な亀裂面が点在している。また、図 - 9 に試験後のせん断面の状況を示す。図 - 9 にみられる岩盤の亀裂面沿いに生じたせん断破壊の領域は試験面全体の約70%を占める。上流部にわずかに岩盤とコンクリートの付着面での破壊がみられる他は、岩盤および亀裂面のせん断破壊がほぼ全域に分布している。

試験前後のせん断面の観察から岩盤のせん断破壊過程を以下のように推測できる。「載荷初期においてまず上流谷側の亀裂面沿いに破壊が生じた。その後、せん断荷重の増加にもなると、せん断破壊が上流谷側の亀裂面から全域に広がり、岩盤の亀裂面沿いの破壊と岩盤そのもののせん断破壊が逐次進行した。」

2次元 A E 発生源の位置標定結果と試験前後のせん断面の観察結果を比較すると、AE 発生源位置標定結果が示す破壊領域の広がる様子と、試験前後のせん断面の観察から推測されるせん断破壊過程が良く一致している。

2) せん断破壊過程と A E 発生挙動の変化

A E 計測では、計測された波形とその波形の特徴を示す A E パラメータが計測・記録される。この A E パラメータの主なものを図 - 10 に示す。

これらの A E パラメータのうち、「継続時間」および「最大振幅値を立上り時間で除したもの(以下振幅/立上り時間と呼ぶ)」をせん断応力およびせん断変位と比較して、図 - 11 に示す。

継続時間は、せん断荷重の増加とともに減少し、最大せん断応力(降伏点)の直前で急増し最大となる。これは、載荷初期では比較的継続時間が長い A E 波形が発生し、その後徐々に継続時間が短い A E 波形が増加し、最大せん断

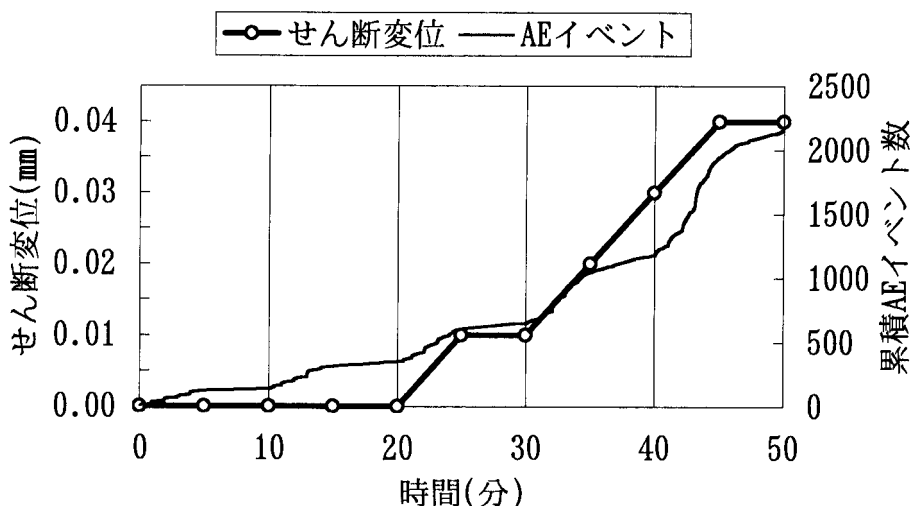
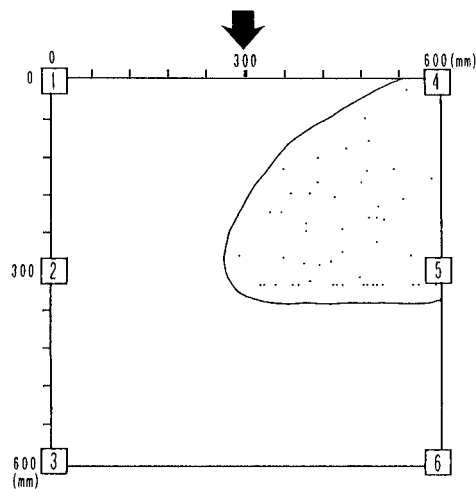
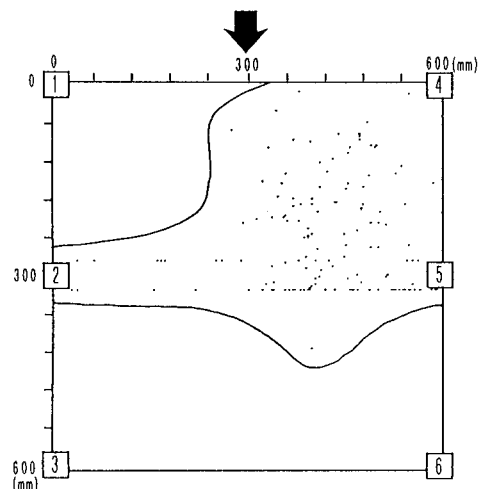


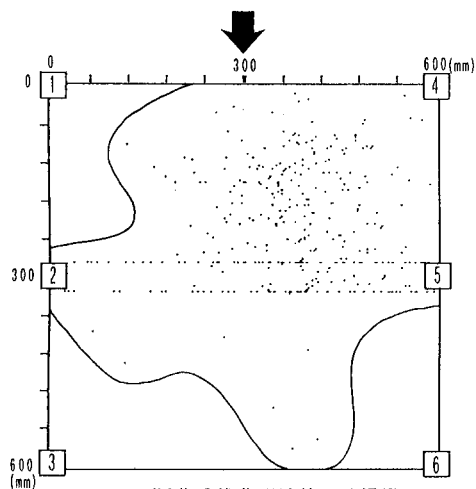
図-6 せん断変位と AE 発生挙動



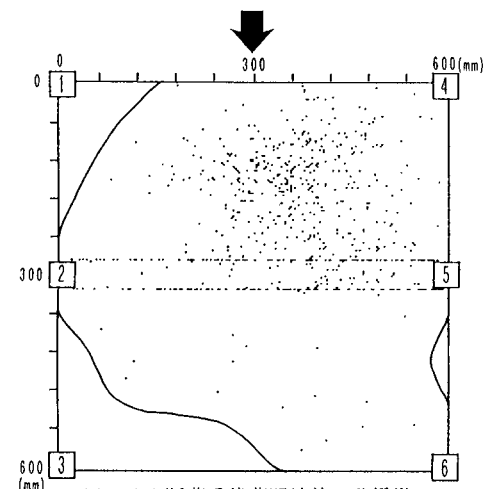
(a) セン断荷重載荷開始後10分経過
 セン断応力 2.4kgf/cm^2 、セン断変位 0.00mm



(b) セン断荷重載荷開始後30分経過
 (セン断応力 7.3kgf/cm^2 、セン断変位 0.01mm)

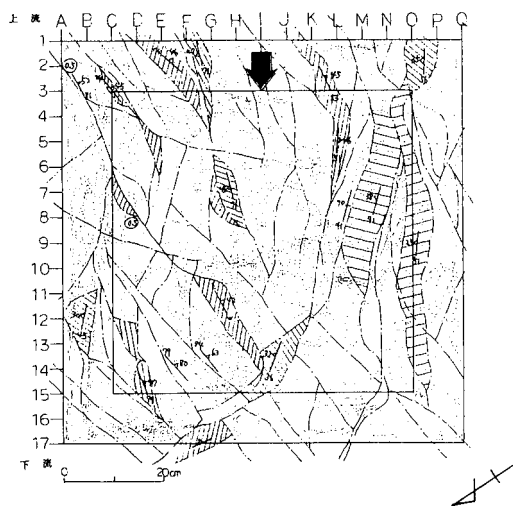


(c) セン断荷重載荷開始後50分経過
 (セン断応力 12.1kgf/cm^2 、セン断変位 0.04mm)

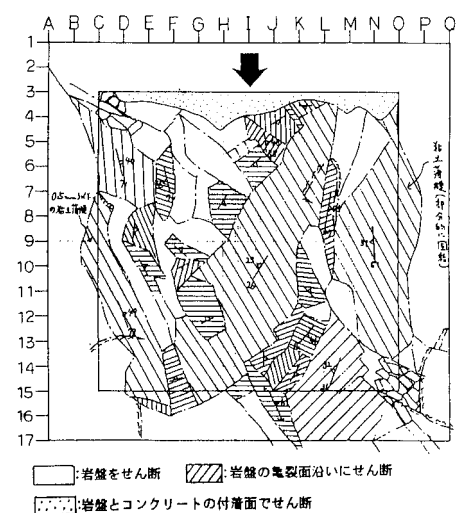


(d) セン断荷重載荷開始後90分経過
 (セン断応力 21.7kgf/cm^2 、セン断変位 0.22mm)

図一七 2次元 AE 発生源位置標定結果 (60kHz 共振型 AE センサー使用)



図一八 試験面の状況 (直接せん断試験前)



図一九 試験面の状況 (直接せん断試験後)

応力(降伏点)の直前で非常に長い継続時間を有するAE波形が発生したことを意味している。

また、振幅/立上り時間は、载荷初期および载荷中期でせん断荷重の増加とともに漸増し、最大せん断応力(降伏点)直前に最大となる。振幅/立上り時間は、発生したAE波形前部の立上りの勾配を示している。この振幅/立上り時間の変化は、载荷初期でみられた立上り勾配が小さいAE波形の発生から立上り勾配が大きいAE波形の発生に移り変わり、最大せん断応力直前に立上り勾配が非常に大きい波形のAEが発生していることを示している。

これら継続時間と振幅/立上り時間の変化及び载荷初期、中期、終期に得られた波形例を表-1に示す。破砕部や弱面を有する岩盤のせん断破壊過程は、以下のものであると考えられる。まず、破砕部や弱面での局所的な微小破壊が

発生し、せん断荷重の増大にしたがい、局所的な微小破壊領域の拡大が進行する。さらに、局所的な微小破壊領域同士の連結によりせん断面が形成され、最終的にせん断面におけるすべり破壊が発生する。

表-1より岩盤の直接せん断破壊過程において、①既存の亀裂面で生ずる破壊(载荷初期)、②岩盤のせん断破壊(载荷中期)、③せん断面形成後のすべり破壊(载荷終期)の移り変わりが、継続時間と振幅/立上り時間の変化とAE波形の対比により確認された。このことは、AE計測により岩盤のせん断破壊過程の変化を把握できる可能性を示している。

5. AE計測による岩盤斜面の安定性評価手法への適用性について

今回の岩盤の直接せん断試験におけるAE計測により、

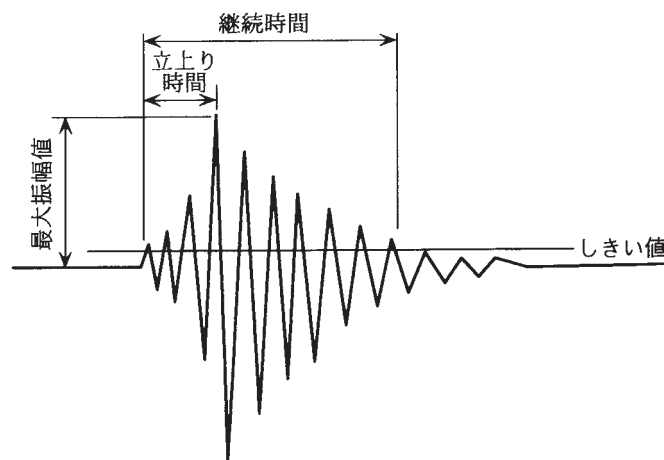
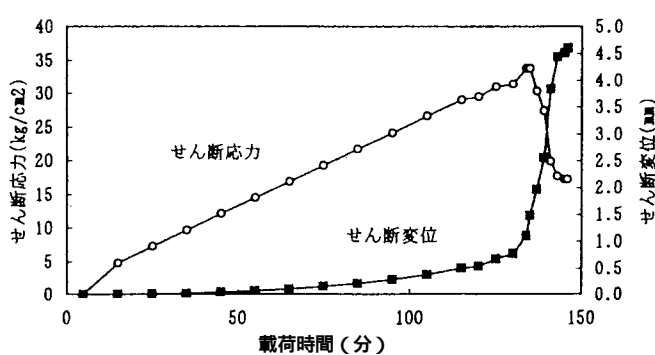
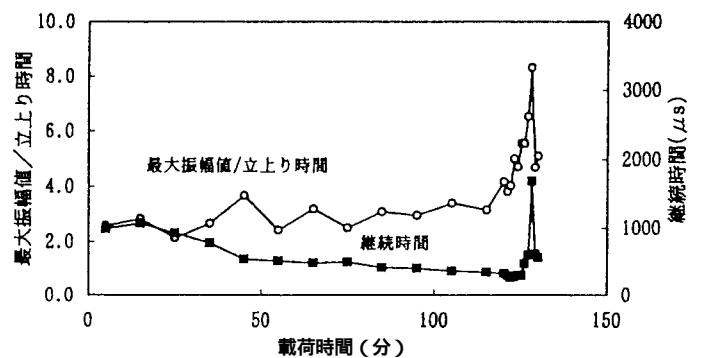


図-10 主なAEパラメータ




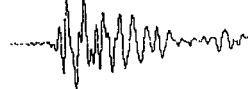
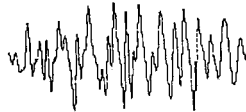
(a)せん断応力とせん断変位の変化



(b) AEパラメータの変化

図-11 せん断応力、せん断変位とAEパラメータの比較

表一 直接せん断破壊過程における AE パラメータ、波形の変化

AE パラメータ および AE 波形	载荷初期	载荷中期	载荷終期 (最大せん断応力直前)
継続時間	長い	短い (徐々に短くなる)	非常に長い
最大振幅値/立上り時間	小さい	大きい (徐々に大きくなる)	非常に大きい
波形例			

表二 AE 計測による岩盤斜面の安定性評価への適用性

せん断試験結果	岩盤斜面への適用性	今後の課題
① AE は、载荷初期の段階から岩盤の応力変化と微小破壊に反応する	応力が集中する箇所为重点的に計測することにより、崩壊の前兆現象を把握できる	応力集中箇所の把握、地山内部への設置方法
② AE の位置標定により、せん断破壊の進行過程を追跡できる	地山内部の微小破壊領域の進行や、亀裂の伸張状況を把握できる	有効計測範囲を考慮した、AE センサーの配置計画
③ 岩盤せん断破壊の進行過程に応じて、AE パラメータが変化する	応力集中→微小破壊→亀裂の伸張→崩壊のどの段階にあるかを確認できる	現在における AE パラメータの変化の検証

以下のことが明らかにされた。

- ① AE 発生挙動は、コンクリートブロック背後のせん断変位の開始よりも早い段階から、岩盤内の応力変化と微小破壊に敏感に反応する。
- ② 2次元位置標定結果と試験前後のせん断面の観察結果の対比から、AE 計測により岩盤内のせん断破壊の進行過程を追跡することができる。
- ③ 岩盤せん断破壊の進行過程に応じて、AE パラメータの変化が認められる。

今回の結果にもとづき、AE 計測手法を岩盤斜面の安定性評価に適用する場合の有効性と問題点を表 - 2 に示す。今回の実験で、AE 計測により得られる3つの特徴に対比させて、岩盤斜面への適用性および今後の課題を示したが、AE 計測により得られる岩盤内部の挙動に関する情報は、いずれも岩盤斜面の安定性を評価する上で有益な情報である。

今回の研究により、岩盤斜面の安定性評価に AE 計測手

法が適用できる可能性が示された。今後、岩盤斜面の安定性評価における AE 計測手法の有効利用を図っていくためには、現場における AE 計測事例を増やし、崩壊形態の異なる岩盤を対象としたデータの取得や、得られた AE データの解析方法の検討を進めることが必要である。

参考文献

- 1) 石田毅、金川忠、佐々木俊二、浦沢義彦：AEによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験、土木学会論文集、376/ -6、141-149、1986。
- 2) 青木謙治、戸井田克、腰塚憲一、酒井学：AE計測による地下洞周辺の緩み領域の評価、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、161-165、1989。
- 3) 城和裕、野間達也、村山秀幸、秩父顕美、中村正博、古賀重利：一面せん断試験における岩の発生特性について、第7回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集、43-48、1989。
- 4) 中田文雄：大谷石採石場跡地の陥没前のAE、現場技術者のための AE 技術の応用、342-354、1994。