

# 斜面の変形・破壊挙動の AE パラメーターによる評価

## Evaluation of Shear Deformation and Failure of Slope by AE Parameters

笹原 克夫\* 海老原 和重\*\* 門間 敬一\*\* 石橋 晃睦\*\*\*  
Katsuo SASAHARA Kazushige EBIHARA Keiichi MONMA Akichika ISHIBASHI

### Abstract

In order to establish a evaluation method of shear deformation and failure of slope by AE parameter, large-scale direct shear tests and rainfall-triggered slope failure experiments were carried out, and analysed the relation between stress-strain and AE parameters in the soil mass in these tests and experiments.

As the results, linear relation between shear work ratio and AE energy rate in the soil mass is made clear. In the direct shear test (strain-controlled), as the stress becomes larger, shear work ratio also becomes larger. In the slope failure experiment, stress state is almost constant and shear deformation proceeds with the saturation ratio rising, and shear work ratio becomes larger. These two types of soil mass deformation can be estimated by the shear work, so AE energy ratio also can estimate the shear deformation.

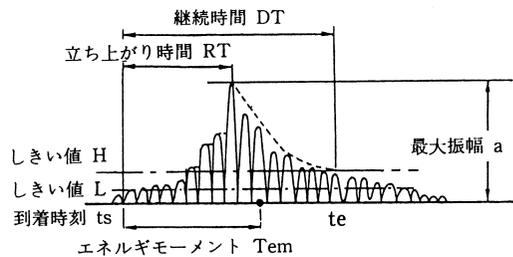
And in slope failure experiment, linear relation between shear strain rate and AE event rate in the soil mass is also made clear. These AE parameters are thought to be able to use in the Fukuzono's equation etc. instead of strain rate, and to estimate the failure time of the slope.

キーワード: 斜面崩壊, AE イベント, AE エネルギー, せん断仕事率, せん断ひずみ速度

### 1. はじめに

物体内部に生ずる微細な変形や損傷に伴って発生する弾性波である AE (アコースティックエミッション) を利用して地盤内部の微小な変形・損傷などを検知する方法が、最近注目を集めている。斜面崩壊についても、その安定度評価や発生予測を目的とした AE 計測・解析の事例が、いくつか発表されている。これらの中で基礎的な検討を行った事例としては、秩父らによる砂質土の三軸圧縮試験<sup>1)</sup>や模型盛土の載荷板による崩壊実験<sup>2)</sup>、塩谷らによる模型盛土の崩壊実験<sup>3)</sup>がある。いずれも試料および斜面の変位量の経時変化に伴い、AE 発生数及び AE エネルギー・AE エネルギーモーメントなどの各種 AE 波形パラメーター (図-1)<sup>2)</sup> や、ある時間内に発生した AE 波の振幅分布を示す b 値がどのように変化するかについて検討し、これらのパラメーターの崩壊発生時間予測への有効性を議論している。

しかしながらこれらの現象論的な検討のみでは、斜面崩壊の発生予測に AE を用いるための基礎的な検討は十分ではないと考えられる。つまりいずれの研究も土または斜面の変位によく追従する AE パラメーターの選択の



$$AE \text{エネルギー} = \int_{ts}^{te} a^2 dt$$

$$Tem = \left( \int_{ts}^{te} a^2 t dt \right) / \left( \int_{ts}^{te} a^2 dt \right)$$

図-1 AE 波形パラメーター

Fig. 1 AE parameters

みに終始し、力学的な検討のもとに斜面の変形及び AE に関するパラメーターを選定して検討している事例が見あたらない。

本研究では斜面崩壊発生前の斜面の変形挙動を AE パラメーターにより評価する手法について検討するため、砂質土を用いた一面せん断試験及び人工降雨による崩壊実験<sup>5)</sup>を行った。そして力学的な考察を行って土の応力・ひずみを表すパラメーター及び AE パラメーターを決定し、それらのパラメーターの斜面の変形挙動への適

\* インドネシア砂防技術センター

\*\* 建設省土木研究所

\*\*\* 日本工営(株)中央研究所

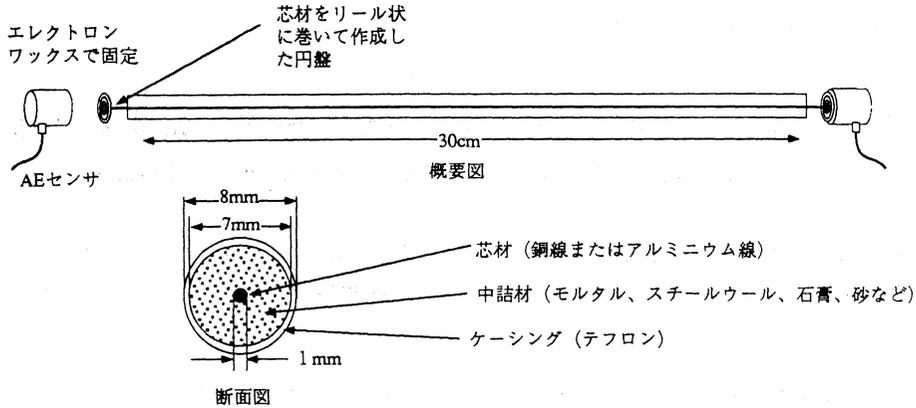


図-2 AE ウェーブガイド(WG)の構造  
Fig. 2 AE wave guide

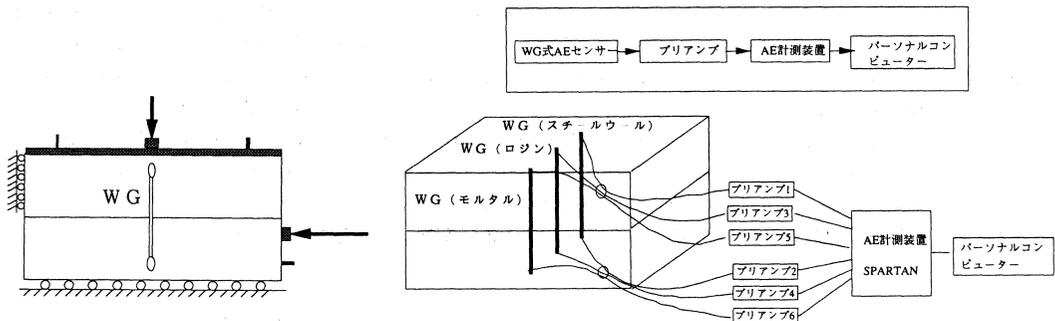


図-3 一面せん断試験の概要と AE 計測・解析システム  
Fig. 3 Direct shear test apparatus and AE monitoring system

用性について検討した。

## 2. 一面せん断試験及び崩壊実験の方法

### 2.1 AE 計測・解析方法

図-2に今回使用したAEウェーブガイド(以下WGと略称)の構造を示す。WGが土塊と共に変形すると、中詰材の破壊またはそれと土塊の間の摩擦によりAEが発生する。これをWG両端のAEセンサーにより計測するものである。つまり土塊から発生するAEを直接計測するのではない。この場合中詰材はその変形に伴ってAEをよく発生する材料である必要がある。本研究ではファイバー同士の摩擦によりAEが発生するスチールウール(平均直径0.025mm)と、破壊によるAEを発生するモルタル(水:モルタル=400g:200gで配合)、そしてロジン(松脂)を中詰材として使用した。芯材は中詰材の変形・破壊挙動により発生したAEを両端のAEセンサーまで伝播させるためのものである。伝播に伴う減衰の小さな金属を使用した。ケーシングにはフレキシブルで柔らかいテフロンを使用した。AEセンサーにはフィジカルアコースティック株式会社製作の

Nano 30(適正周波数帯域150~750kHz,共振周波数300kHz)を使用し、保護材としてシリコンを周囲に塗布した。

次に図-3に一面せん断試験におけるAE計測・解析システムを示す。WGで検出されたAEは、プリアンプで増幅されAE計測装置で解析される。なおハイパスフィルターにより2kHz以下の信号は除去している。

### 2.2 一面せん断試験

せん断箱の大きさが幅・長さ80cmで高さ40cmの、大型一面せん断試験装置を用い、垂直応力0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0(kgf/cm<sup>2</sup>)の正規圧密・定応力試験を、変位制御方式で行った。変位速度は1.0(mm/min)としたが、手動制御であるのでばらつきがあった。試料は自然含水比程度の含水比の砂質土を用いた。その物理特性を表-1に示す。また図-3に示す位置にWGを設置し、試験中のAEを計測・解析した。WGはスチールウール、モルタル、ロジンの3種類を中詰材としたものを用い、各々の比較検討を行った。この比較検討の結果は別途報告する予定である。

2.3 人工降雨による崩壊実験<sup>4)</sup>

一面せん断試験と同じ試料を用いて、層厚 10 cm 毎に人力での踏固めを行い、図-4 に示す模型斜面を作成した。作成中に試料をサンプリングして単位体積重量の計測を行い、ほぼ均質であることを確認した。なお乾燥時単位体積重量は  $1.393 \pm 0.015$  (kgf/cm<sup>2</sup>) (平均間隙比 0.9)、含水比  $6.2 \pm 0.1$  (%) であった。この斜面を底面勾配 40°、表面勾配 55° に設定し、実験開始から 120 分までは 10 (mm/hr) で、その後は 30 (mm/hr) の降雨強度の降雨を、崩壊発生まで継続した。計測項目は AE の他に、WG 位置での地表・地中変位、地中傾斜角、含水比、間隙水圧、地下水位である。WG はスチールワールを中詰材としたものを用いた。地中傾斜角については地中のせん断変形を計測する目的で計測した。実験装置及び方法の詳細については参考文献<sup>4)</sup> を参照されたい。

3. 一面せん断試験及び崩壊実験の結果

3.1 一面せん断試験の結果

一面せん断試験結果の一例として、垂直応力 2.0 (kgf/cm<sup>2</sup>) での試験結果を図-5 に示す。AE のデータについては、スチールワールを中詰材とした WG の上端のセンサーで計測したものを示す。以後の解析についてもこの AE データを用いた。まずせん断応力はせん断変位の進行に伴って単調増加し、明確なピーク値を持たないこと、せん断変位が 20 mm 程度以上になるとせん断応力及び垂直変位の変化は非常に小さく、ほぼ残留状態で変位が進行していることがわかる。次に AE の発生に関しては、累積 AE イベント数 (発生数) はせん断変位の増加にほぼ比例して増加していること、そして AE 最大振幅値はせん断変位の進行に無関係であることがわかる。

3.2 崩壊実験の結果

図-6 に断面 1 における崩壊実験結果を示す。まず地表面変位が実験開始より負の方向に増加しているが、これについては原因が不明であるものの本質的な斜面の変動ではないと考えられる。そして地表面変位と地中傾斜を比較すると、正の方向に増加し始める時刻はほぼ同程度とみなせるが、その増加量は前者の方が大きくはっきりしている。斜面中の水分状態と変形の関係について見ると、斜面中下層部 (水分量計 3, 4) の飽和度が急増し始めると、地表面変位も急増するようである。次に AE の発生状況について検討する。崩壊実験における AE データは、断面 1 の上端の AE センサー (1 ch) のものを使用する。累積 AE イベント数は、斜面上部 (水分量計 1, 2) の飽和度が微増し始めるかなり早い時期より増加し始め、最終段階には地表面変位の急増と調和的に急激な増大を示す。AE 最大振幅については、累積 AE イベント数の急増に追従して大きくなるのがわかる。

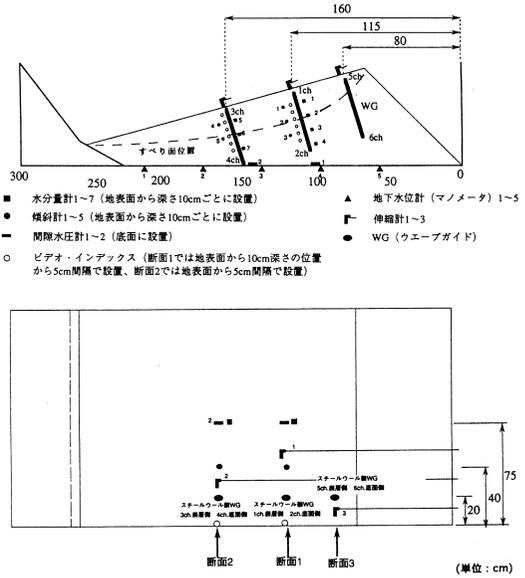


図-4 崩壊実験用模型斜面

Fig. 4 Model slope and measuring instruments for deformation and water condition of the slope

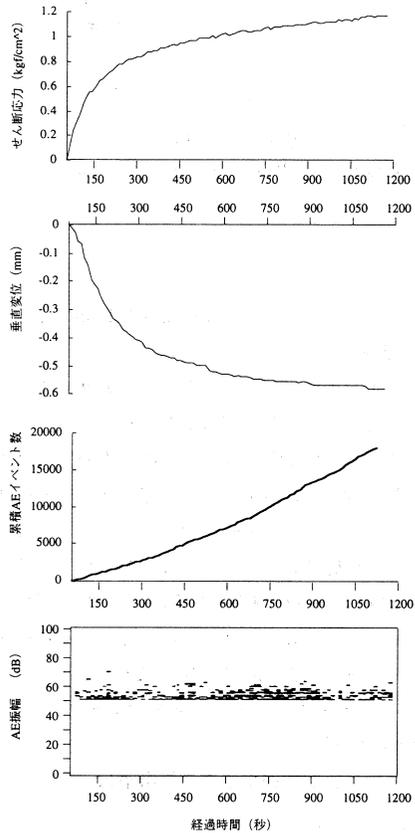


図-5 垂直応力 2.0 (kgf/cm<sup>2</sup>) における一面せん断試験結果  
Fig. 5 Result of direct shear test (normal stress 2.0 (kgf/cm<sup>2</sup>))

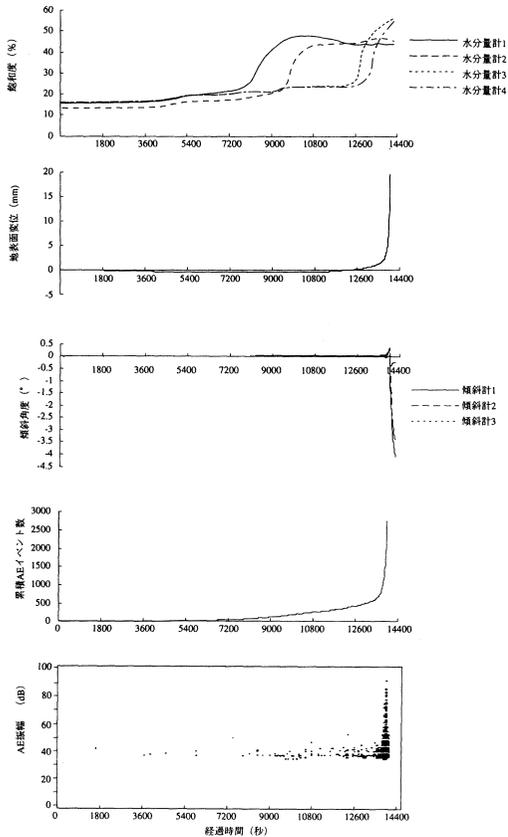


図-6 崩壊実験結果  
Fig. 6 Result of slope failure experiment

## 4. 実験結果の解析

### 4.1 AEパラメーター及び土のせん断に関するパラメーター

せん断応力の増加によりせん断変形の進行する一面せん断と、基本的にせん断応力があまり変化せずに飽和度の上昇に伴ってせん断の進行する崩壊実験における、土のせん断を同時に表現するには、応力とひずみの変化を共に扱おうるパラメーターを使用する必要がある。そのため土のせん断に関して外力によりなされる単位時間当たりの仕事、つまり仕事率<sup>9)</sup>を考え、土のせん断に要するエネルギーを取り扱うこととする。そしてAEに関するパラメーターも単位時間当たりのAEエネルギー(図-1)であるAEエネルギーレイトを考える。

#### (1) せん断仕事率

垂直応力により土がなされる仕事率は、

$$\partial W_z = \sigma_z \cdot \partial \epsilon_z \dots\dots\dots(1)$$

$\sigma_z$ : 垂直応力 (kgf/cm<sup>2</sup>),

$\partial \epsilon_z$ : 単位時間当たりの垂直ひずみ増分

せん断応力により土になされる仕事率は、

$$\partial W_{xz} = \tau_{xz} \cdot \partial \gamma_{xz} \dots\dots\dots(2)$$

$\tau_{xz}$ : せん断応力 (kgf/cm<sup>2</sup>),

$\partial \gamma_{xz}$ : 単位時間当たりのせん断ひずみ増分

よって外力全体により土になされるせん断仕事率は、

$$\partial W = \partial W_z + \partial W_{xz} \dots\dots\dots(3)$$

上記の $\partial \epsilon_z$ と $\partial \gamma_{xz}$ は、垂直変位速度とせん断変位速度に等しい。

一面せん断試験における供試体のせん断ひずみは、実際には上下せん断箱間のせん断面付近に集中する、不均一な分布となる。しかしながら今回は供試体全体が単純せん断変形すると近似し、水平変位を供試体高さで除した値をせん断ひずみ $\gamma$ とした。

崩壊実験における模型斜面内のせん断ひずみ $\gamma$ 及びせん断仕事率は図-7に示す方法で算出した。この場合土の湿潤単位体積重量は表-1の物理特性と図-6の飽和度より1.5~1.8 (gf/cm<sup>3</sup>)と算出できる。このように応力の変化が小さいことと、垂直変位は計測できないもののせん断変位に比較して小さいと考えられることから、垂直応力の変化による仕事は無視するものとする。

なお、計算に当たっての単位時間は1秒とした。

#### (2) AEエネルギーレイト

AEエネルギーレイト(単位時間当たりが発生するAEエネルギー)は、

$$\partial E = \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \dots\dots\dots(4)$$

$A(t)$ : 時間 $t$ におけるAE振幅,

$t_1, t_2$ : 単位時間の開始, 終了時刻

通常AEエネルギーとは、AE1波形当りのエネルギーを指すが、今回は特にAE1波形ということではなく、単位時間中に発生した全てのAEについて、振幅を積分した値とした。またその算出方法は、AEセンサーからの出力電圧(振幅)が1V、その継続時間が1msecとなるAE波形のエネルギーを1000 countsとして、比計算により求める方式とした。

AEエネルギーレイトを求める際の単位時間は1秒とした。

#### 4.2 一面せん断試験結果の解析

図-8(a)に垂直応力 $\sigma_z=2.0$  (kgf/cm<sup>2</sup>)の場合の、一面せん断試験中のせん断仕事率とAEエネルギーレイトの経時変化を示す。AEデータはスチールウールWGの上端のセンサーのものを用いる。これを見るとせん断応力の増加につれて、いずれの値も変動しつつ増加する傾向にあり、かつ両者の変動は調和的であることがわかる。ちなみにせん断仕事率の変動は手動の変位制御のため変

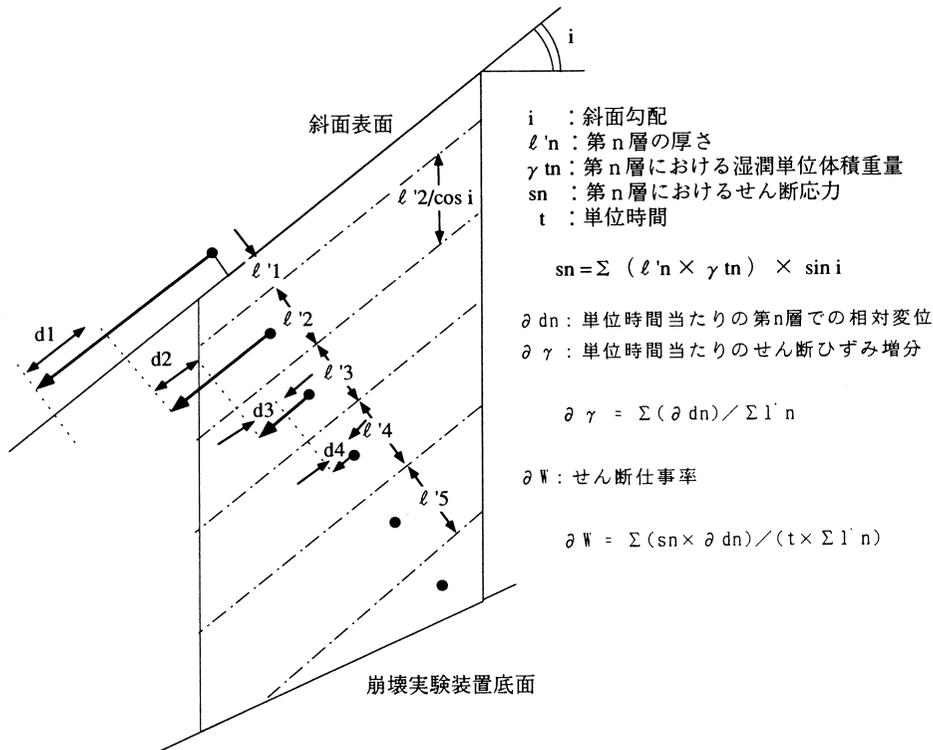
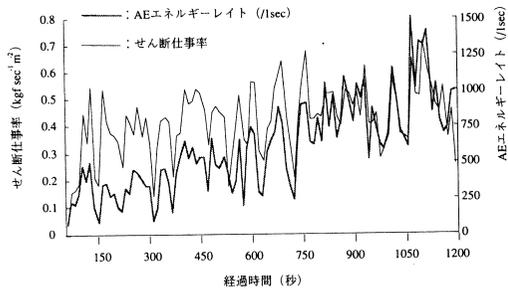
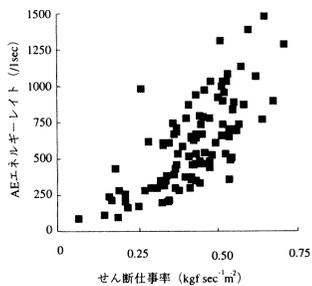


図-7 模型斜面内のせん断ひずみ及びせん断仕事率の算定方法  
 Fig. 7 Definition of shear strain and shear work ratio in the model slope



(a) 経時変化



(b) 両者の関係

図-8 一面せん断試験中のせん断仕事率とAEエネルギーレート(垂直応力2.0(kgf/cm<sup>2</sup>))

Fig. 8 Shear work ratio and AE energy rate in the direct shear test (normal stress 2.0 (kgf/cm<sup>2</sup>))

表-1 試料の物理特性

Table 1 Physical properties of soil used in the direct shear test

試料名		砂 (利根川)	
土質名		シルト混じり砂	
日本統一土質分類		(S-M)	
土粒子の密度 $\rho_s$	(g/cm <sup>3</sup> )	2.688	
自然含水比 $W_n$ (%)	(%)	4.8	
粒度特性	砂分 (75~2000 $\mu$ m)	(%)	85.5
	シルト分 (5~75 $\mu$ m)	(%)	10.2
	粘土分 (5 $\mu$ m以下)	(%)	4.3
	最大粒径	mm	2.0
	均等係数 $U_c$		3.3
	曲率係数 $U_c'$		1.3

位速度が一定ではないことによる。次にせん断仕事率とAEエネルギーレートの関係を図-8(b)に示す。これを見ると両者は高い正の相関関係を持ち、線形関係にあるとみなせる。1試験のみでなく、異なる垂直応力で行った一面せん断試験(5試験)におけるせん断仕事率とAEエネルギーレートとの関係をまとめて表したものが図-9である。試験の応力レベルが変化しても各試験のせん断仕事率とAEエネルギーレートの関係は同一の直線上にとみなせる。つまり同一のせん断形態及びせん断ひずみ速度であれば、応力レベルが異なっても同一のせん

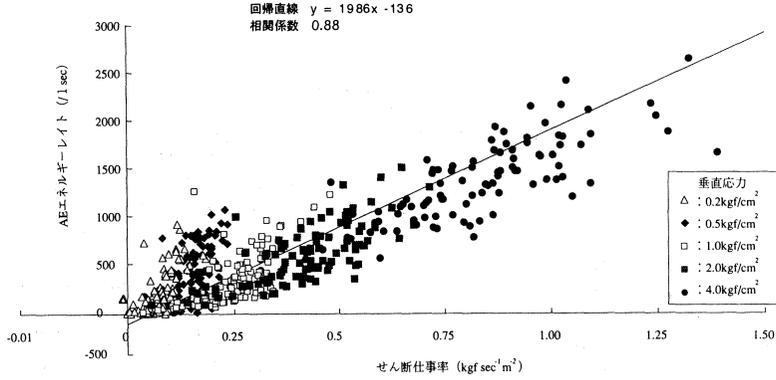
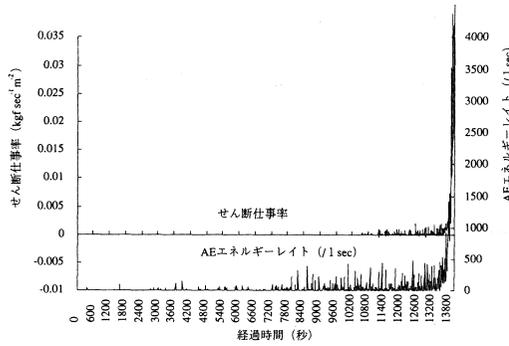
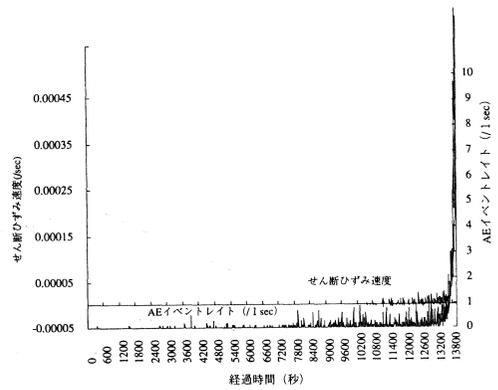


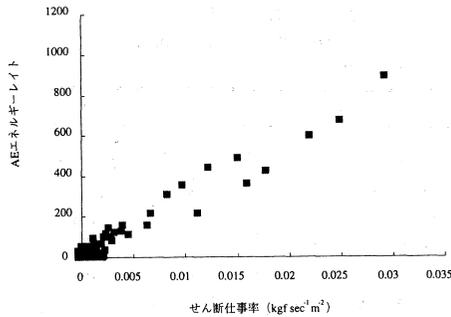
図-9 垂直応力の異なる一面せん断試験でのせん断仕事率と AE エネルギーレートの関係の比較  
Fig. 9 Comparison of the results of direct shear tests under different normal stress



(a) 経時変化



(a) 経時変化



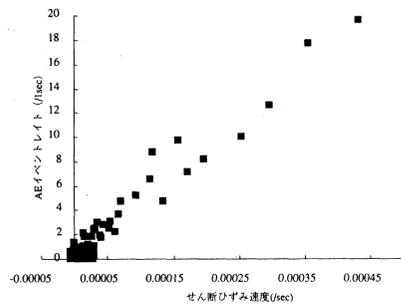
(b) 両者の関係

図-10 崩壊実験中のせん断仕事率と AE エネルギーレート  
Fig. 10 Shear work ratio and AE energy rate in slope failure experiment

断仕事率と AE エネルギーレートの線形関係が成立する。

#### 4.3 崩壊実験結果の解析

次に崩壊実験中のせん断仕事率と AE エネルギーレートの関係について考える。AE データは図-4 の断面 1 の 1 ch の AE センサーのものを用いる。図-10(a) に崩壊実験中のせん断仕事率と AE エネルギーレートの経時変化を示す。これを見るとせん断変位の進行に伴ってせん断仕事率が変動しながらも増加し最終段階で急増すること、AE エネルギーレートもそれと調和的に変化してい



(b) 両者の関係

図-11 崩壊実験中のせん断仕事率と AE イベントレート  
Fig. 11 Shear strain rate and AE event rate in slope failure experiment

ることがわかる。次に図-10(b) にせん断仕事率と AE エネルギーレートの関係を示す。これを見ると一面せん断試験での関係と同様に、両者は線形関係にあることがわかる。

よってせん断応力の増加によってせん断仕事率の変化する一面せん断試験の場合でも、せん断ひずみ速度 (単位時間当たりのせん断ひずみ増分に等しい) の増加によってせん断仕事率の増加する崩壊実験の場合でも、せ

せん断仕事率と AE エネルギーレイトの関係は線形関係にあることが確認された。

ここで崩壊実験においてはせん断ひずみ速度の増加によりせん断仕事率が増加していること、また図-6より地表面変位と累積 AE イベントが調和的な変化をしていることより、せん断ひずみ速度と AE イベントレイト(単位時間当たりの AE イベント) の関係について検討する。図-11 に崩壊実験中のせん断ひずみ速度と AE イベントレイトの経時変化と、せん断ひずみ速度と AE イベントレイトの関係を示す。これらの図よりせん断ひずみ速度と AE イベントレイトの関係も、せん断仕事率と AE エネルギーレイトの関係と同様に、線形関係にあることが判明した。

### 5. 考察

崩壊実験においては、せん断仕事率と AE エネルギーレイトというエネルギーに関するパラメーターが線形関係にあると同時に、せん断ひずみ速度と AE イベントレイトという速度の概念を有するパラメーターも線形関係にあることが確認された。ここでは崩壊実験における、土のひずみと AE に関するこれらのパラメーターの関係について検討する。

まずせん断仕事率とせん断ひずみ速度の関係について検討する。崩壊実験においては、垂直方向の仕事は無視すると、

$$\partial W = \tau_{xz} \cdot \partial \gamma_{xz} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

$$\tau_{xz} = \sin \theta \cdot \int_0^z \gamma_t dz \dots\dots\dots(6)$$

$\gamma_t$ : 土の湿潤時単位体積重量 (gf/cm<sup>3</sup>),

$z$ : 地表面からの深さ (cm),  $\theta$ : 地表面勾配

そして  $\gamma_t = 1.5 \sim 1.8$  (gf/cm<sup>3</sup>) と  $\gamma_t$  の変化はせん断ひずみ速度  $\partial \gamma_{xz}$  の変化に比べて小さいので、これを一定とすると(6)式より  $\tau_{xz}$  は

$$\tau_{xz} = \gamma_t \cdot z \cdot \sin \theta \dots\dots\dots(6')$$

で一定とみなしうる。するとせん断仕事率  $\partial W$  は、

$$\partial W = C_1 \cdot \partial \gamma_{xz} \dots\dots\dots(7)$$

$C_1$ : 定数

となり、せん断ひずみ速度  $\partial \gamma_{xz}$  に比例する。

次に AE エネルギーレイトと AE イベントレイトの関係について検討する。ここで崩壊実験中の AE 振幅の平均値である AE 平均振幅はせん断ひずみの進行に無関係であり(図-12)、ばらつきはあるもののほぼ一定であるとみなせる。すると AE エネルギーレイト  $\partial E$  を表す(4)

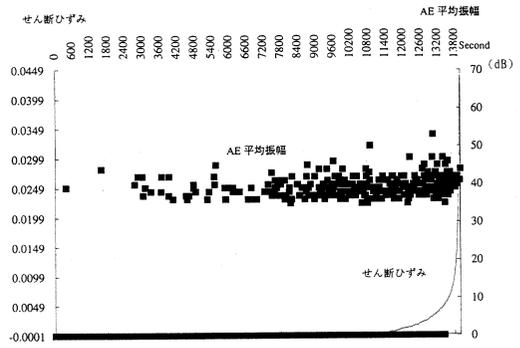


図-12 崩壊実験中の AE 平均振幅  
Fig. 12 AE average amplitude in the slope failure experiment

式は以下のように近似できる。

$$\partial E = A_{const.} \int_{t_1}^{t_2} dt \dots\dots\dots(4'')$$

$A_{const.}$ : AE 平均振幅 (一定),

$t_1, t_2$ : 単位時間の開始, 終了時刻

上式の意味は、AE 波形を振幅一定の矩形波に近似するということであり、さらに AE 一波形の継続時間を一定と仮定すると (つまり AE 波形をすべて同一波形の矩形波に近似するという仮定),

$$\partial E = A_{const.} \cdot dT \cdot \sum_{i=1}^N i = A_{const.} \cdot dT \cdot N \dots\dots\dots(4''')$$

$dT$ : AE 一波形の継続時間,

$N$ : AE イベントレイト

となって、AE エネルギーレイトは AE イベントレイトに比例すると近似することができる。

以上の検討より様々な仮定はあるものの、せん断仕事率とせん断ひずみ速度との、そして AE エネルギーレイトと AE イベントレイトとの線形関係が確認された。よってせん断仕事率と AE エネルギーレイトの関係は、せん断仕事率をせん断ひずみ速度に置き換えるか、または AE エネルギーレイトを AE イベントレイトに置き換えても成立するということになる。

これらの検討結果をもとに、AE パラメーターによる斜面崩壊発生予測について考える。今までの検討より、せん断ひずみ速度と、AE エネルギーレイトや AE イベントレイトは線形関係にあるということになるので、これらの AE パラメーターをせん断ひずみ速度の代わりに、斉藤<sup>7)</sup> や福園<sup>8)</sup> の提案した斜面崩壊発生予測手法に用いることができる。例えば第3次クリープを表す福園の基本式は、

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \cdot \left( \frac{dx}{dt} \right)^a \dots\dots\dots(8)$$

$x$ : 移動量,  $a, \alpha$ : 定数

上式の  $dx/dt$ , つまり移動速度はせん断ひずみ速度と同じ意味を有するので, その代わりに AE イベントレイトや AE エネルギーレイトを用いることができる。

## 6. おわりに

本研究では AE パラメーターによる斜面の変形・破壊挙動を評価する手法を確立するために, 一面せん断試験と模型斜面の崩壊実験を行った。その結果斜面内の応力とひずみ速度の積であるせん断仕事率と, 単位時間当たりの AE エネルギーである AE エネルギーレイトとは線形関係にあることが確認された。せん断仕事率の概念を用いれば, 一面せん断試験のような応力の増加による地盤の変形・破壊挙動も, そして崩壊実験のような飽和度の増加により応力条件があまり変化せず地盤の変形(ひずみ)がクリープ的に進行する場合の挙動も, 統一的に表現される。また AE エネルギーレイトによってそれらの異なる 2 種類の地盤変形挙動が統一的に評価しうることになる。

また地盤内の応力変化がほとんどなく, 変形挙動がクリープ的に起こっている場合は, AE エネルギーレイトや AE イベントレイトと, せん断ひずみ速度の間に線形関係が成立する。つまりせん断ひずみ速度の代わりにこれらの AE パラメーターを用いた斜面崩壊発生予測が可能と考えられるので, 今後検討していくつもりである。

なお, 本研究は建設省総合技術開発プロジェクト「土砂災害に関する防災システムの開発」の一環として行われた。

## 参考文献

- 1) 秩父顕美: 砂のせん断試験における AE 波形特性, 第 4 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, pp. 36~41, 1991.7
- 2) 菊池正・古賀重利・秩父顕美・岸下崇裕: AE 波形特性を用いた地盤構造物の崩壊予知方法, フジタ技術研究所報, 第 28 号, pp. 37~42, 1992
- 3) 塩谷智基他: 土質材料への AE 法の適用と破壊評価予測, 第 5 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, pp. 40~46, 1993.7
- 4) 海老原和重・笹原克夫・門間敬一: AE による斜面崩壊発生時間予測手法に関する検討—ウエーブガイド方式の AE センサーを使用して行った崩壊実験について—, 平成 7 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 271~274, 1995.5
- 5) 笹原克夫・海老原和重・綱木亮介: 急勾配斜面の崩壊発生機構に関する実験的研究, 地すべり, Vol. 32, No. 4, pp. 1~8, 1996.3
- 6) Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London, 1968
- 7) 斉藤迪孝: 土質工学におけるレオロジー—7.2 斜面崩壊予測, 土と基礎, Vol. 29, No. 5, pp. 77~82, 1981.5
- 8) 福園輝旗: 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, Vol. 22, No. 2, pp. 8~13, 1985.9

(原稿受理日 平成 7 年 6 月 23 日)