

AE斜面崩壊予測手法における基礎的研究

塩谷智基¹・青木朋也²・藤井清司³

¹正会員 工修 飛島建設(株)技術本部技術研究所 (〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

²学生員 徳島大学大学院 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

³正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

AE現象を地盤材料の破壊現象に適用し、破壊を監視する場合、AE波の伝播減衰が大きな壁になり、センサーを地盤中(上)に設置するのみでは、設置個所近傍のみの情報しか得られず、破壊にともなう早期のAE検出は困難となる。本論文は、AE法を斜面崩壊予測に適用するための基礎的検討を目的に、ウェーブガイド(AE波を導く伝播減衰が少ない金属棒:導波棒ともいう)を利用したAE検出方法について検討した。さらに、傾斜箱実験にAE法を適用し、AE発生挙動から最適なAE計測位置、すべり面の推定を考慮したウェーブガイドの設置方法、そして、破壊監視パラメータ「改良b値」を導入し、その妥当性について検討した。

Key Words : *acoustic emission, slope failure prediction, wave-guide, AE source location, improved b-value*

1. はじめに

斜面崩壊は様々な外的要因(降雨、地震など)と内的要因(斜面形状、土質・地質、地形など)が重なり合って発生する現象であり、統一的な崩壊予知手法は未だに確立されていない。

斜面崩壊の危険箇所の判別方法としては、過去の崩壊事例から得られたデータを統計的に解析し、斜面崩壊の関連性が高い要因を見出す方法^{1)・2)}がある。降雨が斜面崩壊の主要因である場合は、限界降雨量の予測式を斜面の危険度評価法とした報告^{3)・4)}がある。このような手法により危険であると判断された斜面の崩壊を予測する場合、動態観測より得られた多くの計測データ(斜面変位、傾斜、間隙水圧など)を総合的に判断せざるを得ない状況にある。

一方、AE(アコースティック・エミッション)は、物体の微小な破壊にともない発生する弾性波であり、破壊に特徴的な情報をもたらす物理量として、近年特に注目されている。AE法は、土木分野でも盛んに研究されており、コンクリートの健全度評価⁵⁾、岩石の破壊予知^{6)・7)}、グラウトの施工監視⁸⁾などに適用され、内部の破壊状態やき裂の進展過程などを的確に知ることができる破壊監視手法であると報告されている。

一般的な斜面崩壊にAE法を適用した例としては、川上ら⁹⁾・秩父ら¹⁰⁾の研究が先駆的であり、AE計測結果と伸縮計、傾斜計、地表面変位の比較から、

AE発生頻度が斜面内部の崩壊挙動をより感度良く捉えていると報告している。岩すべりに適用した例としては、根岸ら¹¹⁾の研究があり、寒冷地の地形、地質、気象条件から発生する岩盤斜面の破壊形態の中で、一般的な熔結凝灰岩の長柱岩帯のすべり破壊の実態を調査し、岩盤温度とAE計測から、すべり破壊の発生機構と発生時期を詳細に検討している。しかし、これらの研究は、斜面の安全性評価に必要なAEパラメータの検討、斜面崩壊の予測に重要な要素である崩壊位置、崩壊時間、崩壊の規模の詳細な検討を行うまでには至っていない。

本研究は、AE法を斜面崩壊予測に適用するための基礎的検討を目的に、ウェーブガイド(AE波を導く伝播減衰が少ない金属棒:導波棒ともいう)を利用した崩壊位置の推定方法について検討する。さらに、モデル斜面を傾斜させる傾斜箱実験にAE法を適用し、AE発生挙動から最適なAE計測位置、ウェーブガイドの設置方法、そして得られるAE振幅データを用いた破壊監視パラメータ改良b値^{12)・13)・14)}を導入し、崩壊監視パラメータとしての妥当性について検討する。

2. AE計測システムと位置標定方法

(1) AE計測システム

岩盤や斜面内部におけるき裂の発生や進展などで

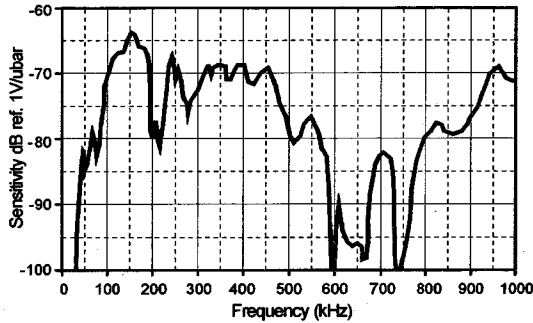
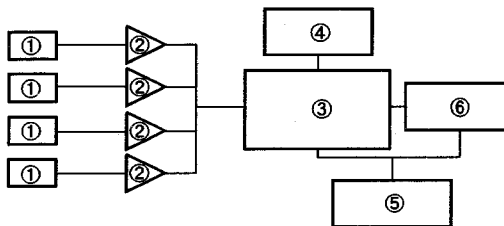


図-1 AEセンサーの周波数特性



- ① AE sensors (R15 : Physical Acoustics Ltd.)
- ② Pre-amplifier
- ③ AE Monitoring Instrumentation(Locan-AT AE System)
- ④ Personal Computer
- ⑤ Printer
- ⑥ Wave Memory

図-2 AE計測システム

発生したAE波は微弱であることから、AE波の取得には高感度の装置が必要である。また、電気雑音等の外部雑音の除去は、AE計測においては重要な問題となる。AE計測に用いるAEセンサーは、取扱いが極めて容易であり、共振特性を持たせることで高感度かつ低周波雑音にも強い計測が可能なPZTなどの圧電材料を使用したセンサーが一般的である。

図-1に使用したAEセンサーの特性を示す。周波数帯域が100～500kHzで150kHz共振型センサーを用いた。取得したAEは、プリアンプで40dB、メインアンプで52dBの合計92dB増幅し、35dB以上のAEを取得した。ただし、センサー入力時電圧1μVを0dBとして表している(図-2参照)。

(2) 一次元位置標定方法

AE源(AE波が発生する空間的領域)の位置を推定することを位置標定という。一次元位置標定方法は、AE波の到達時間差を利用した位置標定方法の中で最も簡単な方法である。

一般に、AEセンサーを測定対象物に直線上に配置し、各々のAEセンサーが取得したAE波の到達順序と到達時間差によりAE源を標定する。測定対象物中を伝播する速度がVである場合、図-3に示すウェーブガイ

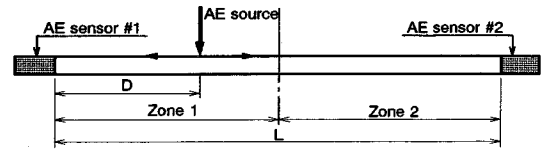


図-3 一次元位置標定方法

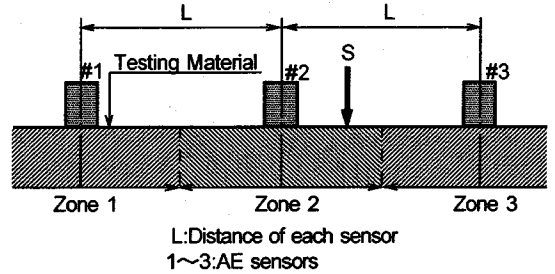


図-4 一次元ゾーン標定方法

ド左端からAE源までの距離Dは、

$$D = \begin{cases} (L + V \cdot \Delta t) / 2 & (1) \\ (L - V \cdot \Delta t) / 2 & (2) \end{cases}$$

で与えられる。ここでLはAEセンサーの配置間隔、Δtはセンサー#1とセンサー#2の到達時間差である。

式(1)は、AEセンサーへのAE波到達順序がセンサー#2→センサー#1の場合(D > L/2)、式(2)はセンサー#1→センサー#2(D < L/2)となる場合を示している。

(3) 一次元ゾーン標定法

複数のAEセンサーへのAE到達順序によって、AEの発生領域を標定する方法をゾーン標定法という。一次元ゾーン標定法は、図-4に示すようにAEセンサーを間隔Lで測定対象物に設置し、それぞれのAEセンサーが図中に示すゾーン、例えば#2のAEセンサーはゾーン2を受け持つようにAE発生領域を同定する方法である。ここで、図中のS点にAEが発生したとき、各AEセンサーへの到達順序は、2→3→1となり、ゾーン2が標定されたゾーンとなる。ゾーン標定法は、一次元位置標定法とは異なり、複数個のAEセンサーが同時に一つのAEを取得しなければならないという制約はなく、一つ以上のAEセンサーで取得されれば直ちに標定できる。したがって、測定対象物のAE伝播減衰が著しい場合に有効な標定方法である。さらに、ゾーン標定法は一次元位置標定法と合わせて用いることで、一次元位置標定法では標定不可能な複数個のAEセンサーが同一のAE波を取得できない場合でも、ゾーンによるAE源の位置標定が可能となる。

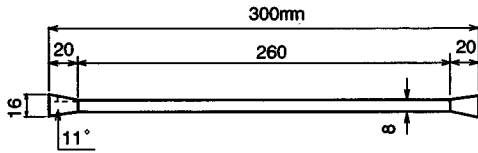


図-5 ウェーブガイドの形状

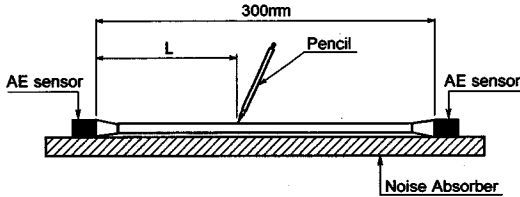


図-6 ウェーブガイド上の擬似AE源

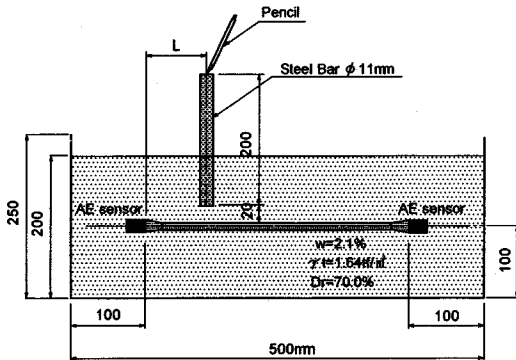


図-7 砂中での擬似AE源

3. ウェーブガイドによるAE位置標定法のキャリブレーション

(1) 実験の概要

地盤材料中を伝播するAE波は、他の材料よりも伝播減衰が著しいため、ウェーブガイドと呼ばれる伝播減衰が比較的小さい材質の媒体をAE源近傍に設置することが一般的である。

本研究では図-5に示すアルミニウム製ウェーブガイド(φ=8mm)を使用し、ウェーブガイド中のAE波伝播速度は予備実験により5183m/sを用いた。AEセンサーは、ウェーブガイド両端にシリコングリスを介してアルファシア/アクリレート系の瞬間接着剤で取付けた。AEセンサーの取付方法は、以後に述べる実験についても同様である。

AE位置標定キャリブレーションは標定点の信頼性を検討するため、a)ウェーブガイド上の擬似AE源によるキャリブレーション、b)試料中での擬似AE源によるキャリブレーションの2種類の検討を行った。擬似AE波はウェーブガイ

ド左端よりL=50, 100, 150, 200, 250mmの位置で、φ=0.5mmのペンシル芯を50回圧折し発生させた。2種類の位置標定キャリブレーションの方法を図-6、図-7に示す。

(2) AE位置標定キャリブレーション結果の検討

表-1(a)は、各擬似AE源の発生位置におけるAEイベントの位置標定分布結果を統計処理し、平均値:μ、標準偏差:σ、擬似AEと平均値との差D:、そして、Dの全ウェーブガイド長に対する割合:Rとして表している。また、表-1(b)は表-1(a)のAEイベントに各イベントが有する継続時間(一つのAE波形の継続時間)を用いて重み付けし、整理し直したものである。

ここで、1つのAEイベントとは、1つのAE波形を意味しており、各々のAEイベントは最大振幅、継続時間などのパラメータを有している。本論文で用いたAE継続時間によるAEイベントに対する重み付けは、1つのAEイベントを10μs、あるいは1000μsという波形の有する継続時間で表し、ウェーブガイド上の各AEイベントを加算したものである。

図-8は上述の結果を模式的に表したもので、AEイベントの位置標定分布をFrequency 1、継続時間による結果をFrequency 2とした。なお、同図の横軸はウェーブガイド長さ、縦軸はそのウェーブガイド位置におけるAEの頻度を示している。

(a) 発生状況の異なる擬似AE波の位置標定結果の比較および検討

実験a)は、得られる標定点のAEイベント頻度が平均値を中心に幅の狭い分布形状となるが、実験b)は実験a)に比べて幅の広い分布形状を呈する。これは擬似AE源が実験a)の場合は点であるのに対し、実験b)の場合は面であり、かつ、砂中を擬似AE波が伝播するとき、砂とウェーブガイドとの境界面が加わることで新たな多重反射の影響が加わるものと考えられる。

AEイベント頻度に継続時間で重み付けをした場合、実験a)、b)ともに誤差は小さくなる。つまり、ウェーブガイドを用いて位置標定を行う場合はAEイベント頻度にAEパラメータで重み付けをすることで、より真のAE源に近づく標定結果が得られることが認められた。

(b) ウェーブガイド上で発生する擬似AE波の位置標定特性

位置標定結果から、ウェーブガイド上で擬似AE波の発生位置を変化させた場合、ウェーブガイド中央部が最も位置標定の精度が良く、擬似AE波の発生位置がウェーブガイドの両端部に向かうほど精度が低下する傾

表-1 AE位置標定キャリブレーション結果 (左図a)AEイベント, 右図b)AE継続時間)

AE sources	Real loc (mm)	μ (mm)	D (mm)	R (%)	σ
On waveguide	50	45.04	-4.96	1.65	7.65
	100	92.79	-7.21	2.40	6.32
	150	145.45	-4.55	1.52	9.06
	200	194.61	-5.39	1.80	7.24
	250	240.18	-9.82	3.27	7.73
Average				2.13	7.60
In sand	50	49.04	-0.96	0.32	12.53
	100	105.87	5.87	1.96	15.08
	150	152.56	2.56	0.85	24.18
	200	196.92	-3.08	1.02	13.48
	250	250.49	0.49	0.16	10.34
Average				0.86	15.12

AE sources	Real loc (mm)	μ (mm)	D (mm)	R (%)	σ
Duration	50	46.42	-3.58	1.19	6.01
	100	92.69	-7.31	2.44	6.23
	150	144.42	-5.58	1.86	9.18
	200	194.94	-5.06	1.69	7.28
	250	240.62	-9.38	3.13	7.57
Average				2.06	7.43
In sand	50	48.67	-1.33	0.44	12.39
	100	105.32	5.32	1.77	14.14
	150	151.88	1.88	0.63	24.19
	200	200.17	0.17	0.06	14.12
	250	250.63	0.63	0.21	10.76
Average				0.62	15.12

Real loc: Real location of artificial AE sources μ : Determined mean value
 D: Difference between true loc and μ R: Difference ratio of D in wave-guide σ : Standard deviation

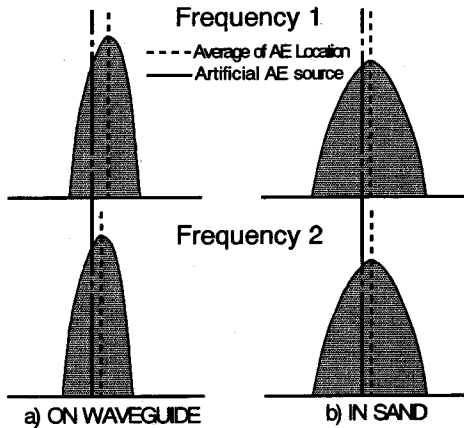


図-8 位置標定キャリブレーション結果の模式図
 Frequency 1: AE source frequency by AE events.
 Frequency 2: AE source frequency weighted by AE duration.

図-8 位置標定キャリブレーション結果の模式図

向がある。これは、計測器械自身のAE到達時間の判定基準に依存している。擬似AE波がウェーブガイド上の中央部、および、端部で発生したとき、位置標定誤差は模式的に図-9に示すようになる。

図-9(a)は擬似AE源がウェーブガイド中央部にある場合、AEセンサー(A)により取得されたAE波の計測器械で得られる到達時間を $t_{as'i}$ 、真のAE初動としきい値により生ずる誤差を ϵ_{as} とすると、真の初動時間 t_{as} は、

$$t_{as} = t_{as'i} - \epsilon_{as} \quad (3)$$

AEセンサー(B)も同様に考えると、真の立上り時間 t_{bs} は、

$$t_{bs} = t_{bs'i} - \epsilon_{bs} \quad (4)$$

となる。よって、真のAE到達時間差 δt_s は、

$$\begin{aligned} \delta t_s &= t_{bs} - t_{as} \\ &= (t_{bs'i} - \epsilon_{bs}) - (t_{as'i} - \epsilon_{as}) \\ &= t_{bs'i} - t_{as'i} \quad (\because \epsilon_{bs} = \epsilon_{as}) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、標定誤差 ϵ はキャンセルされる。

一方、図-9(b)は擬似AE源がウェーブガイド端部(擬似AE源が限りなくAEセンサー(A)に近い)にある場合を表しており、AEセンサー(A)により得られる計測器械で得られる到達時間は $t_{as'i}$ 、真のAE初動としきい値により生ずる誤差を $\epsilon_{as'}$ とすると、真の初動時間 $t_{as'}$ は、

$$t_{as'} = t_{as'i} - \epsilon_{as'} \quad (6)$$

同様にAEセンサー(B)の真の立上り時間 $t_{bs'}$ は、

$$t_{bs'} = t_{bs'i} - \epsilon_{bs'} \quad (7)$$

この場合、擬似AE源がAEセンサー(A)に接近していることから、ウェーブガイド上の伝播にともなう立上り時間の誤差 $\epsilon_{as'}$ はほぼ0に等しい。よって、真の

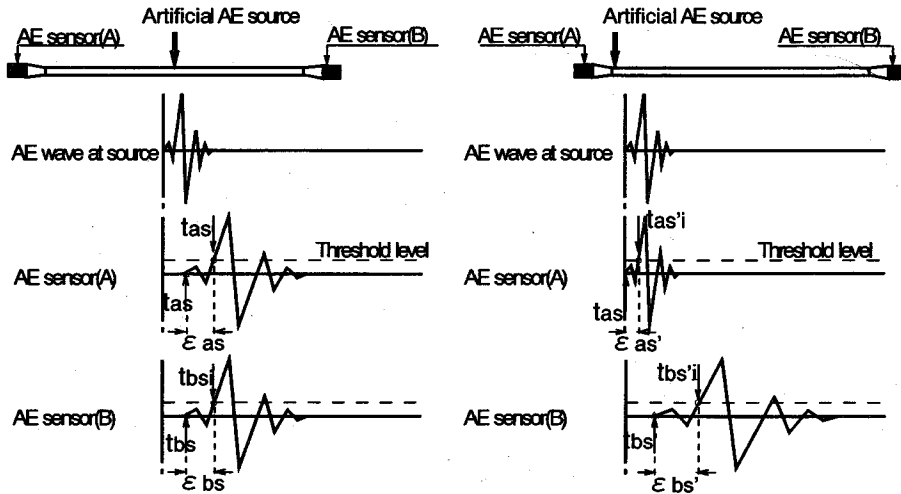


図-9 位置標定誤差模式図 (左図 a) A E 源ガイド中央, 右図 b) A E 源ガイド端部)

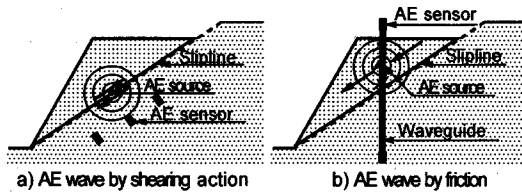


図-10 斜面崩壊ともなう A E 模式図

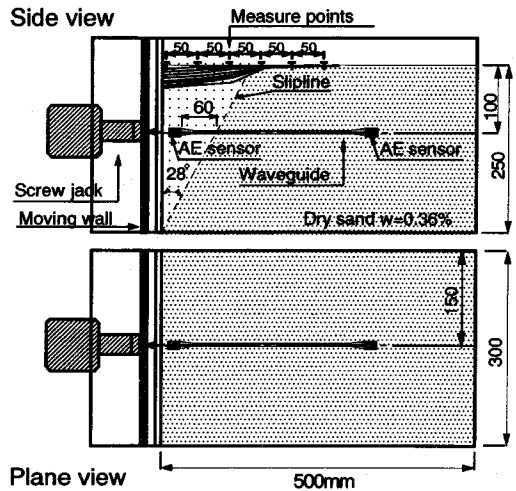


図-11 すべり面位置推定実験装置

A E 到達時間差 $\delta t_{as}'$ は,

$$\begin{aligned} \delta t_{as}' &= t_{bs}' - t_{as}' \\ &= (t_{bs}' - \epsilon_{bs}') - t_{as}' \\ &= (t_{bs}' - t_{as}') - \epsilon_{bs}' \quad (8) \end{aligned}$$

一般に, ϵ_{bs}' は A E 源からの距離に比例するので $\delta t_{as}'$ が大きくなるほど ϵ_{bs}' も大きくなる。

したがって, 大きな標定誤差をまねく結果となることから, 測定対象をウェーブガイドの中央とするようウェーブガイドを配することが望ましい。また, ウェーブガイド端部に A E 源が認められる場合には, 以上に示した誤差を十分考慮の上, A E 源を検討しなければならないといえる。

4. A E によるすべり面位置推定方法のキャリブレーション

模式的に斜面崩壊ともない発生する A E 波は, 図-10 (a) のようにすべり面上のせん断作用によって発生すると考えられる。したがって, A E 波の取得には, すべり面近傍に A E センサを埋設する必要がある。しかし, 地盤内部を伝播する A E 波を直接

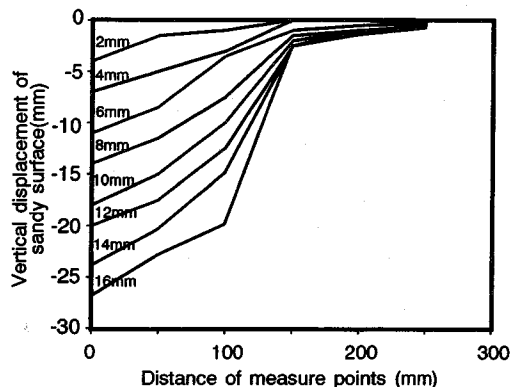
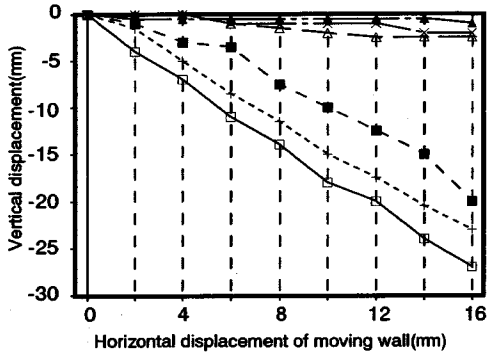


図-12 側壁の移動による砂層表面の挙動



□0mm +50mm ■100mm △150mm ×200mm ▲250mm
 図-13 各測定点での沈下挙動

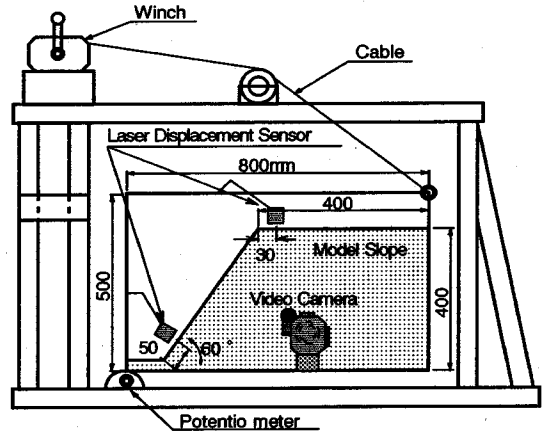


図-16 傾斜箱実験装置

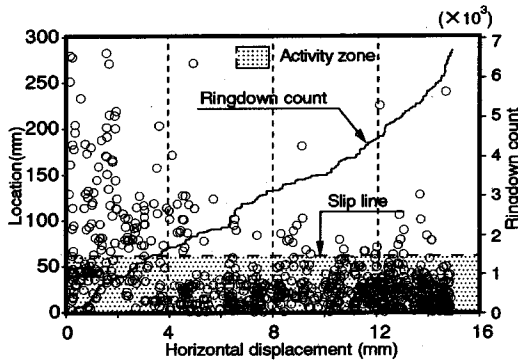


図-14 側壁の移動によるAE推移

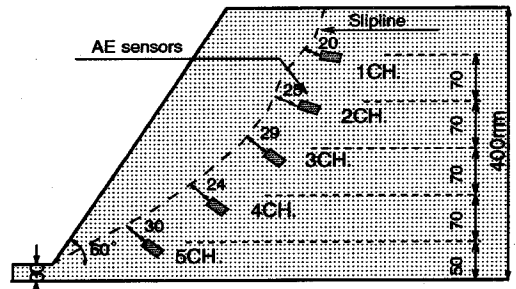


図-17 すべり面とAEセンサー位置測定結果

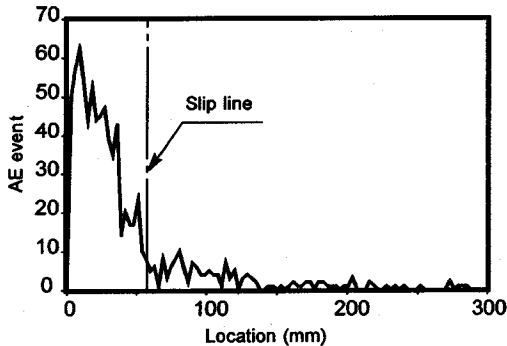


図-15 ウィーブゲイト上のAE源分布

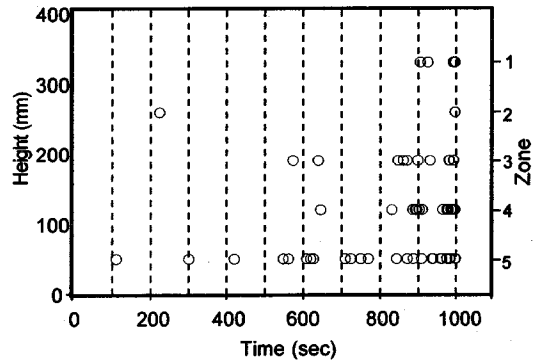


図-18 一次元ゾーン標定結果

AEセンサーで取得する場合、第一に、AEセンサーを予め推定されたすべり面近傍に埋設すること、第二に、特にAE波の伝播減衰が地盤材料では著しいため、現実的に意味をなさない。そこで、著者らは運動土塊とウィーブゲイトとの摩擦によるAEがせん断面上でのAEに卓越することを利用して、崩壊位置の特定、および、監視が可能であると考えその妥当性を簡易な主働土圧実験により検討した。

(1) 実験方法

試料は乾燥川砂（内部摩擦角 ϕ : 34° 、含水比 w :0.6%、湿潤密度 γ : 1.67tf/m^3 、間隙比 e :0.59)を用い、全砂層厚250mmまで均質に充填する。実験時に箱側面と試料との間に発生する摩擦音は、フェルトを貼付け低減させた。図-11に示すように側壁を毎分2mm変位（最大16mmまで変位）させたとき、砂層の土圧状態は、静止から主働状態へ移行し

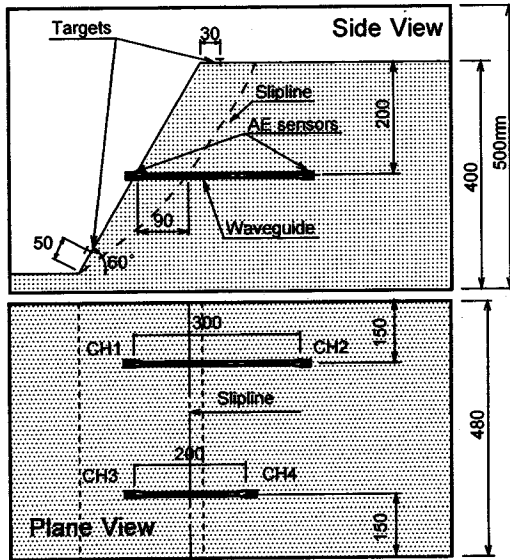


図-19 ウィ-フがト埋設状況の詳細図

破壊面が現れる。この時のAE挙動を、砂層表面より深さ100mmの位置にAEセンサーを両端に取付けたウィ-フがトを埋設し計測した。そして、AE位置標定結果から破壊面の位置を推定し、実破壊面位置との差異を比較検討した。また、同図に示すようAE以外に砂層表面の変形挙動を左端より50mmごとに250mmまで合計6カ所測定した。

(2) AE計測による主動状態の砂層の変形挙動

図-12は、側壁の変位に伴う砂層の変形挙動の描画を表しており、図中に示す数字は側壁の変位量である。また、図-13は側壁の移動に伴う各測定点の変位を示している。これらの図から、側壁の移動が砂層に大きく影響を及ぼす範囲は、左端より100mm～150mmまでの範囲であると推定でき、理論上の破壊面位置（左端より133mm）と一致している。さらに、破壊面が形成され運動土塊が連続的な動きを示すのは側壁変位が6mm移動した後であると考えられる。

図-14に、側壁の移動により発生したAE挙動を示す。なお、同図における実線はリグゲダウカウトの累積を、○印はAE発生源（ウィ-フがト左端を原点）を示している。また、破壊面とウィ-フがトとの交点を破線で示し、同図中の網掛け部分が運動土塊領域である。

ここで、リグゲダウカウトとは、AEの検出に用いるしきい値電圧を越える振幅に対して、その回数を全て計数した値をいう。

AEは側壁の移動とともに単調に増加するが、AE源は側壁移動が6mmまでは、ウィ-フがト全体で認められ、その後運動土塊領域に集中して発生する。つまり、砂層が側壁の初期変位で全体に緩み、変位量6mm後には運動土塊のみで変形が進行するものと考えられ、砂層表面の変化から判断される運動土塊の連続的動きが6mm以降であることに矛盾しない。したがって、運動土塊とウィ-フがトとの摩擦によるAEを検出し、AE源が集中する位置を運動土塊（崩壊）領域と推定することが可能であると考えられる。

実際に、AE源分布を描けば図-15のようになり、ウィ-フがト上の標定でAE源の頻度が急激に低下する位置がすべり面であると特定できることが認められた。また、著者らは大規模なモデル斜面（ $h=3m$ ）崩壊実験においても同様なウィ-フがトを用いたAE計測を行い、すべり面の位置とAE源の頻度分布の減少位置とが一致している結果を得ている¹²⁾。

6. モデル斜面の傾斜箱実験へのAE法の適用

(1) 実験方法

傾斜箱実験装置を図-16に示す。川砂（土粒子比重 $G_s:2.74$ 、礫分:13.1%、砂分:85.5%、シルト分:1.4%、均等係数 $U_c:4.11$ 、曲率係数 $U_c:1.15$ 、含水比:2.3%）を実験箱（長さ×高さ×奥行き=800×500×500mm）に一層の締固め層厚を50mmとし、2.5kgfのソマにより落下高さ100mmで一様均質になるように締固め、砂層厚さ400mmまで充填した。（本方法により間隙比 $e:0.75$ 、湿潤密度 $\gamma:1.6tf/m^3$ 、相対密度 $Dr:50%$ が得られる）

傾斜箱の両側面のうち、一方はビデカメラにより斜面崩壊状況を録画するため、市販のワックスにより側面摩擦を軽減した透明アクリル板を、もう一方は摩擦抵抗の小さいテフロンシートを張り付けた合板を使用した。AE以外に法肩の鉛直変位と法尻の法線方向変位を非接触型変位計（LB-040、キエンス社製、精度 $\pm 0.01mm$ ）により測定した。実験の制御方法は傾斜角度制御とし、毎分1.0度で実験箱を傾斜させた。

(2) AE検出位置についての検討

粘性土、砂質土斜面の崩壊形態は斜面下部から発生するとして報告^{15)、16)}や斜面表面の粒子が引き金となって発生するとして報告^{17)、18)、19)}などがある。斜面の崩壊形態を把握し、効果的なAE計測位置を把握することは、高精度の崩壊監視を行う場

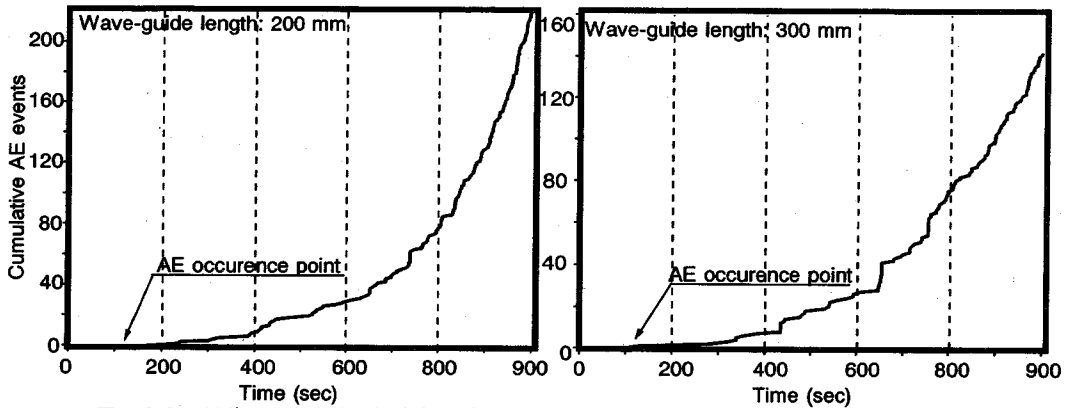


図-20 累積AE発生数の経時変化 (左図 a) ガイド長 200mm, 右図 b) ガイド長 300mm)

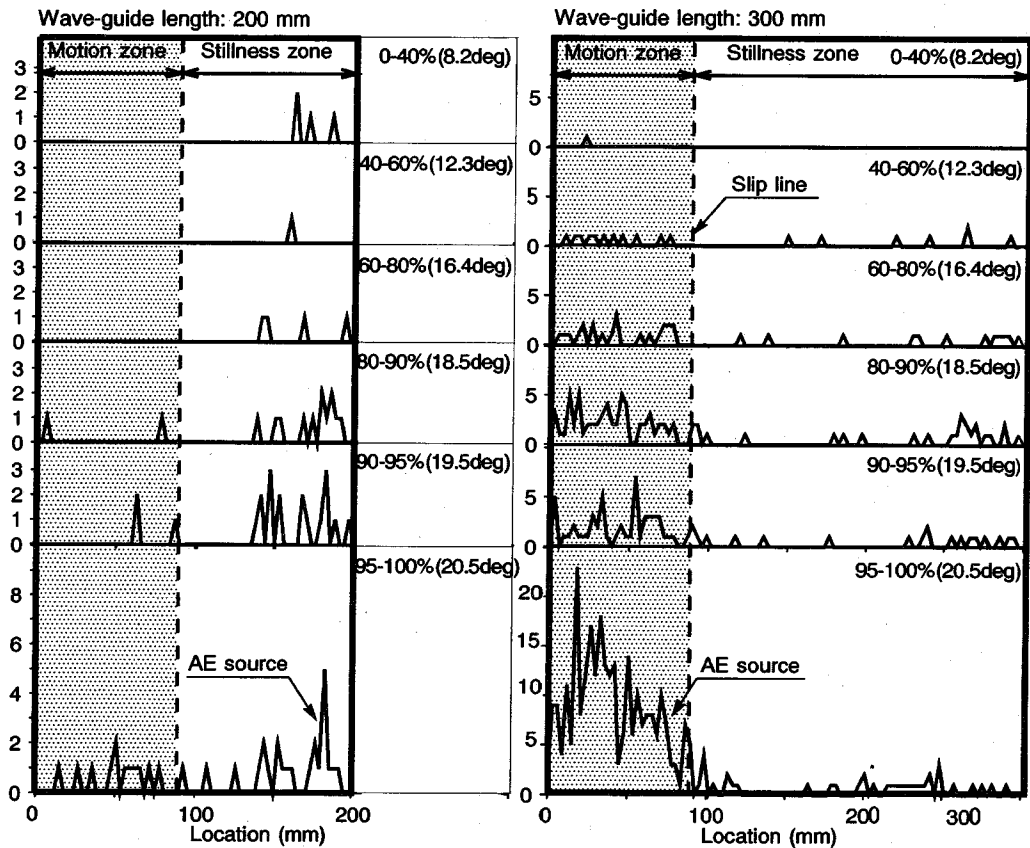


図-21 ガイド上のAE位置標定分布結果 (左図 a) ガイド長 200mm, 右図 b) ガイド長 300mm)

合、特に重要となる。そこで、最適なAE計測位置を傾斜箱実験により検討した。

(a) 傾斜箱実験による進行性破壊の検討

斜面全体が崩壊に至るまでの斜面内部における局所破壊の進展形態を把握するために、すべり面より発せられるAEを5個のAEセンサーを予備実験により

推定したすべり面の近傍に等間隔で埋設し検出した。

図-17は崩壊後のすべり面を点線で、図中の各センサーへの添字は、すべり面とAEセンサーとの間隔を示している。AE源の標定は、各AEセンサーへの到達順序を利用する一次元ゾーン標定法を用いた。

図-18は、AE源を一次元ゾーン標定により求め

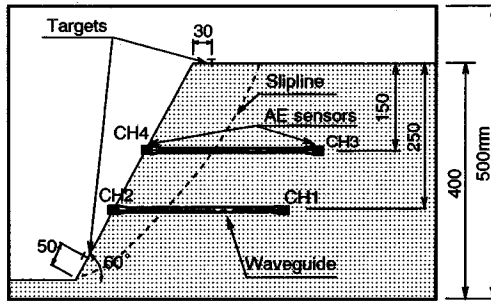


図-2.2 ウェーブガイド埋設状況(側面図)

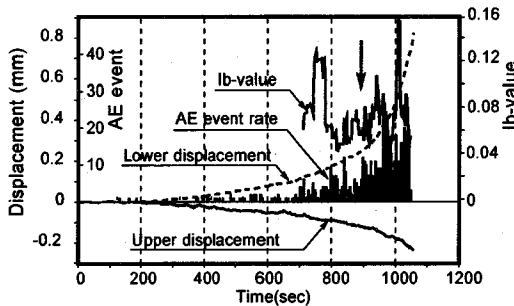


図-2.3 AE測定結果(下方のウェーブガイド)

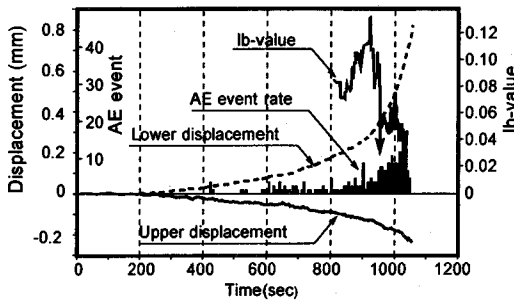


図-2.4 AE測定結果(上方のウェーブガイド)

た結果である。AEは傾斜開始直後から法尻付近のゾーン5から発生し、傾斜角度が増すにつれゾーン5からゾーン1に向かい移行する。つまり、斜面下部から上部への微小破壊の進展が位置標定結果から判断できた。したがって、砂質土系斜面のAE監視を行う場合、法尻(すべり面下部)近傍での計測が有効であることが認められた。なお、すべり面下部から上部へのAE源推移は、斜面の形成角度に依存しないことが認められている¹³⁾。

(3) AE位置標定による崩壊位置予測

これまで述べてきたように実斜面におけるAE計

測を考える場合、AE波の検出にウェーブガイドは必要不可欠である。AE計測では、ウェーブガイド両端にAEセンサーを取付ることでAE発生源の位置標定が可能であるが、静止土塊へのウェーブガイドの根入れの違いでAE取得状況が大きく異なる^{20), 21)}。

そこで、長さの異なる2本のウェーブガイドを同じ深さに並列に埋設し静止土塊への根入れ量を変化させ、得られた位置標定結果から根入れの影響を検討した。

(a) すべり面形状および根入れの異なるウェーブガイドのAE取得状況の比較

図-19は、ウェーブガイドの埋設状況と崩壊後に測定したすべり面形状を示している。すべり面の位置はウェーブガイド左端より90mmであり、運動土塊がガイド上に占める割合は、300mmのウェーブガイドではガイド長さに対する30%、200mmのウェーブガイドでは45%となった。

図-20は、各々のウェーブガイドにより取得された累積AE発生数の経時変化を示している。それぞれのウェーブガイドによるAE取得開始時間はともに150秒付近となり、同様な変化傾向を示す結果となった。つまり、すべり面と交わるようにウェーブガイドを設置する場合、AE発生挙動はウェーブガイド上の運動土塊の占める割合には左右されないものと考えられる。

(b) AE位置標定結果

図-21は、各ウェーブガイドのAE位置標定結果を示しており、箱の最大崩壊角度(20.5度)を100%として6区間に分割し表している。それぞれのウェーブガイドの標定イベント数は、200mmのウェーブガイドでは標定イベントが80個、300mmのウェーブガイドでは標定イベントが514個であり、200mmのウェーブガイドによるAEの標定イベント数は極端に少ない。さらに、200mmのウェーブガイド上に現れるAE源は、これまで述べてきた運動土塊側ではなく静止土塊側に集中している。

一方、300mmのウェーブガイドは、砂粒子の挙動を早期から捉えており、ウェーブガイドとすべり面との交点(90mm)までが崩壊土塊と考えた場合、計測初期の段階でAE源が90mmまでの領域に多く現れ、AE源の分布形状から崩壊位置の推定が可能である。両者の結果の違いは、300mmのウェーブガイドが静止土塊側に深く設置され安定した状態にあるのに対し、200mmのウェーブガイドでは静止土塊への根入れが十分ではないため、運動土塊側で、ウェーブガイドが土塊の移動に追従するようになり、ウェーブガイドと土塊との摩擦によるAEが少なくなる。また、静止土塊側では、ウェーブガイドが砂を上方に押し上げるよう挙動するために、AE源の判断が困難となり、崩壊位置の特定が不可能になるものと考えられる。

(c) A E 計測の有効性についての検討

A E 計測の最大の特徴は、” A E 波 ” を解析することで計測対象内部の欠陥の早期診断が可能になることである。これは、斜面の安全性の監視を行う場合も同様であり、A E 計測では斜面表面の計測からでは察知できない斜面内部の破壊の判断が可能となる。一方、著者らは A E 振幅分布の統計量を利用した「改良 b 値」を提案し、改良 b 値の変化傾向と破壊とが密接に関連していること（b 値の上昇はマイクロ破壊がマクロ破壊に比して卓越する破壊現象を、b 値の低下はマクロ破壊がマイクロ破壊に比して卓越する破壊現象を示す）を検証している²²⁾。ここで、b 値とは、地震の規模別頻度分布の負勾配として知られている地震学における経験則²³⁾であり、地震の大きさ M（マグニチュード）以上の地震の総数を N（M）とすれば、

$$\log N(M) = A - bM \quad (9)$$

となり、式 (9) 中の b が b 値として知られるパラメータである。

ただし、A、b は定数であり、A E では式 (9) 中のマグニチュード M を最大振幅 a として $\log a$ なるデシベル（dB）単位で表す。

改良 b 値は、算出時の振幅範囲に統計量（振幅分布の平均値、標準偏差）を用い、さらに振幅個数を一定個数として b 値を求めることで、b 値の定性化と定量化を図ったものである。

実験は、モデル斜面中に長さの等しい 2 本のワイヤゲイト（ $L=300\text{mm}$ ）を埋設深さを変えて設置して行い、崩壊までの改良 b 値の挙動から、改良 b 値の破壊監視パラメータとしての有効性について検討した。

図-22 に各ワイヤゲイトの埋設状況を、図-23 は下方に設置したワイヤゲイト、図-24 は上方に設置したワイヤゲイトから得られた 5 秒毎の A E 発生率および改良 b 値の経時変化を示している。ここで、A E 振幅分布から改良 b 値を算出するとき用いる A E データを 50 個とし、振幅分布の平均値から標準偏差までの範囲で算出した。

斜面法肩の鉛直方向変位は、斜面崩壊まで終始単調に増加しており特筆すべき変化が認められない。法尻変位は崩壊にともなって急増しており、法尻変位の急増点（図中↓）が A E 発生急増と対応している。ここで、改良 b 値の変化に注目した場合、埋設深さ 250mm の下方のワイヤゲイトでは、780 秒でマクロ破壊の発生を示す大きな低下が認められる。つまり、この時点で大規模な破壊が計測位置で発生したものと推測できる。一方、埋設深さ 150mm の上方

のワイヤゲイトでは、下方のワイヤゲイトに比べて A E 発生数が少なく、A E 急増時間および改良 b 値の低下時間（950 秒）に明確な遅れが見られる。また、これらの結果は、A E センサーを直接埋設した場合の進行性破壊検討結果（すべり面上の破壊が下方から上方に向い進行する）と合致している。つまり、実斜面に深さを変えてワイヤゲイトを設置すれば、A E の発生挙動から破壊の進行が推定可能と考えられる。

以上から、実斜面における崩壊監視に A E 法を適用する場合、適切にワイヤゲイトを設置することが可能であれば、崩壊の予測が効果的に行えるものと考えられる。

今後、簡易に実斜面に設置可能なワイヤゲイト、A E 挙動のみにより推定可能な崩壊時間の予測手法を検討したい。

8. まとめ

A E 法を斜面崩壊予測手法に適用するために、基礎的事項（A E 検出方法、A E 検出箇所、崩壊位置推定方法）を検討し以下の知見を得た。

- (1) ワイヤゲイトを利用した A E 源位置標定方法では、ワイヤゲイト端部に A E 源が向うほど大きな標定誤差が生じる。
- (2) 斜面崩壊予測に A E 法を適用する場合、直接すべり面（破壊面）より発せられる A E を検出しなくても、ワイヤゲイトを斜面内部に適切に設置すれば、崩壊の予測は効果的に行えるものと考えられる。
- (3) 砂質土系斜面崩壊に A E 法を適用する場合、早期に A E が現れる法尻（すべり面下部）付近を計測の的とすることが効果的である。
- (3) 斜面の崩壊位置は、ワイヤゲイト上に現れる A E 位置標定分布から早期に推定可能であるが、ワイヤゲイトの静止土塊への十分な根入れが必要となる。
- (4) 崩壊監視パラメータ「改良 b 値」は、破壊の監視に有効であると思われる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、熊本大学大津政康先生、飛鳥建設（株）技術本部 長谷川昌弘氏に有益な助言を戴いた。未筆ながらここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡 信彦, 風間英彦, 芥川真知: 地質の異なる斜面での降雨に起因した表面崩壊の地域特性, 土木学会論文報告集, 第 481 号, pp.11-20, 1993.
- 2) 杉山和一, 後藤恵之輔, 吉住龍也, 棚橋由彦: 数量化理論による地すべりの危険度評価法の一試案, 土木学会論文報告集, 第 424 号, pp.69-74, 1990.

- 3) 岡田勝也, 杉山友康, 村石 尚, 野口達雄: 統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法, 土木学会論文報告集, 第 448 号, pp.25-34, 1992.
- 4) 八木則男, 矢田部龍一, 榎 明深: 降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量, 土木学会論文報告集, 第 418 号, pp.65-73, 1990.
- 5) 油野邦弘, 井上芳樹, 大津政康: A E 発生特性によるコンクリート劣化評価法の考察, 第 5 回地下と土木の A E 国内コンファレンス, 資源・素材学会, pp.116-122, 1993.
- 6) 道廣一利, 畑 浩二, 藤原紀夫, 吉岡尚也: 各種岩石における A E 発生パターン, 第 42 回土木学会年次講演概要集, pp.332-333, 1987.
- 7) 道廣一利, 畑 浩二, 藤原紀夫, 吉岡尚也: A E による岩石の破壊予知, 土木工学における A E 発表会資料, 日本非破壊検査協会, pp.48-53, 1988.
- 8) 柿沢忠弘, 上田貴夫, 鈴木志郎, 長谷川豊, 池川哲也: クラック時の A E 特性に関する考察, 土木工学における A E 発表会資料, 日本非破壊検査協会, pp.30-36, 1989.
- 9) 川上 純, 山口伊佐夫: 地すべり実験時の A E 観測, 土木工学における A E 研究発表会, 日本非破壊検査協会, pp.42-47, 1988.
- 10) 秩父顕美, 城 和裕, 中村正博, 鎌田正孝: 斜面崩壊予知における A E 計測の適用性, 第 3 回地下と土木の A E 国内コンファレンス, 資源・素材学会, pp.92-97, 1988.
- 11) 根岸正充, 中島 巖: 層雲峽熔結凝灰岩の柱状節理におけるき裂進展とすべり破壊 (第 1 報), 応用地質 34 巻 2 号, pp.47-57, 1993.
- 12) 塩谷智基, 藤井清司, 青木朋也, 天羽恵子: 土質材料への A E 法の適用と破壊評価方法, 第 5 回地下と土木の A E 国内コンファレンス, 資源・素材学会, pp.40-47, 1993.
- 13) 塩谷智基, 藤井清司, 青木朋也, 天羽恵子: A E 法の盛土斜面への適用と崩壊予知, 第 28 回土質工学研究発表会, pp.2157-2158, 1993.
- 14) 塩谷智基, 藤井清司, 青木朋也, 天羽恵子: A E による模型斜面崩壊実験における進行性破壊評価, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム, 土質学会, pp.73-80, 1994.
- 15) 徳江俊秀, 釜井俊孝, 宮本義浩: フェルシウム斜面の破壊伝播機構と変形の役割, 土木学会第 47 回年次講演会概要集, III 部門, pp.394-395, 1992.
- 16) 徳江俊秀, 釜井俊孝, 宮本義浩: 表面上部載荷による模型砂斜面の破壊伝播, 第 28 回土質学会研究発表会, pp.609-610, 1993.
- 17) 松岡 元, 杉山要一郎, 田島 準: 非粘性および粘性粒状体斜面の崩壊機構と補強方法, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.1885-1888, 1992.
- 18) 恩田裕一: 粒状体斜面の崩れを規定する α - β 法, 第 36 回土質工学シンポジウム, pp.59-66, 1991.
- 19) 松岡 元, 杉山要一郎, 田島 準: 粒状体斜面の崩壊機構と補強方法についての考察, 第 36 回土質工学シンポジウム, pp.67-74, 1991.
- 20) 青木朋也, 天羽恵子, 塩谷智基, 藤井清司: A E 法による砂質土斜面の崩壊 α - β 法の推定と崩壊位置予測, 第 5 回地下と土木の A E 国内コンファレンス, 資源・素材学会, pp.56-61, 1993.
- 21) 塩谷智基, 青木朋也, 藤井清司, 天羽恵子: A E 斜面崩壊予測における α - β 法設置方法, 第 29 回土質工学研究発表会, pp.1817-1818, 1994.
- 22) Shiotani, T., Fujii, K., Aoki, T. and Amou, K.: Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model tests, Progress in Acoustic Emission VII, JSNDI, pp.529-534, 1994.
- 23) 宇津徳治: 地震学, 共立全書, pp.133-140, 1977.

(1995.2.8 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON PREDICTION OF SLOPE FAILURE BY ACOUSTIC EMISSION

Tomoki SHIOTANI, Tomoya AOKI and Kiyoshi FUJII

In the case that the acoustic emission technique is applied to the prediction of slope failure of geotechnical materials, the AE propagating attenuation causes enormous problem to obtain the AE signals. Therefore, wave-guide made of undecayed metal is generally employed to execute the effective AE monitoring.

In this paper, utilization of the wave-guide is discussed as AE acquisition tools for geotechnical materials. Moreover, the AE techniques are applied to tilting box test of slope model. The optimum arrangement of wave-guide is examined by AE occurrence behavior and a method for early presumption of slip line is discussed, based on the ratio of moving mass portion to motionless mass portion on the wave-guide.