

音響計測による斜面崩壊の予知

Slope Sliding Forecast using Acoustic Emission

神戸大学 正員 ○ 篁 源亮
神戸市 正員 植村 和広
神戸大学 学生員 徳永 幸彦

1. まえがき

計測を行なう場に波動を伝わらせ、その変化する波動特性から計測量を求めようとする方法は、一般に非接触法であり、計測の場を乱さないため好ましいと考えられている。この計測では波動の振幅、位相、あるいは角速度等のいずれかの量が、計測しようとする量に / 対 / で対応して変化し、その原波動が変調された波を受け、復調することにより計測することが行なわれる。

波動には、光と音が古くより用いられている。光は可視出来る便利さがある一面、計測を行なう場は光を透過するものに限られることが多く、不便な点もある。このため音と比較すると、光はやや一般性に欠けるとも考えられる。

音を波動として計測に用いる場合、実用上、その取扱いについては、光と同様であり特に大きな差異は少ない。ただ音の場合、音速がそれほど大きくなく、伝わる場の圧力と密度の関数であるため、計測にこの音速変化を利用することが可能である。例えば、これは水中に混入している微小気泡の量を計測すること¹⁾等に応用されている。

たしかに音速が大きいということは、同一波長において、音の周波数は光のそれと比べるとはるかに低く、光では、原光そのものをその周波数領域において直接取扱うことが極めて困難であるのに反し、音は原音の周波数領域が最も取扱いやすいところにあり、原音を含めた処理を、音一電変換後、電子回路を用いて容易に行なうことが出来る。

光と比べて、音を用いた計測の弱点の一つは、シールド問題である。

水工学における計測では、光の場合、計測を行なう場そのものから発光を伴うことはほとんどまれであるのに反して、音の場合、逆にこれが無音の場であることは極めて少ない。従って s/n 比を高めるために、光の場合、暗室を用意すれば充分であるのに対して、音の場合は、たとえ無音室を用意しても、光の場合ほど効果をあげることは出来ない。

これまでに行なわれた音を利用した計測の研究²⁾³⁾においても、連続波よりもむしろパルス波がよく用いられ、その位相変化などから、速度、長さ等を求めることが行なわれてきたのは、このことが一つの理由になっているものと思われる。

ここでは、逆に計測場から発生する音の特性から計測を行なうことを試みたものであり、最近再び研究が盛んとなったAEに関する研究である。

2. AE

AEすなわちアコースティックエミッションは「固体の変形または破壊に伴って放出されるエネルギーが音として伝わる現象」と定義されるものであり、古くから知られている現象であるにもかかわらず、その発生機構などについてはまだ充分明確にされていない。

AEの周波数範囲は一般にきわめて広いものと言われている。AE信号にはCW性のものとパルス性のものがあり、前者は固体の変形、後者はひび割れ、亀裂などが生じる時に発生する。またAEにはカイザー効果と呼ばれる現象があり、AEの発生は非可逆的である。すなわち、AEは固体に、それ以前に加えられた最大変形を超えるまでは発生しない。このことを利用して、過去に加えられた最大荷重を求

めることも出来る。

パルス性AEのエネルギーレベルはCW性のものにはるかに大きく、これより固体内の微小なひび割れ等の発達の状態が求められる。累積したAEパルスの総数は亀裂の長さの2乗に比例し、振幅和はひび割れの長さに関係すると言われている。

従って、これらAE計測を行えば固体の変形、ひび割れ、破壊にいたる過程が求められることとなり、広く構造材料関係の研究において利用されている。

ここでは、浸透水による斜面崩壊を対象として、そのAE特性を求めた。

AE信号はエネルギーレベルの大きいパルス性のものでも受信子である圧電素子等を用いて音-電変換を行なった後の出力信号は μV 単位と極めて微弱である。

従って、その雑音除去には、差動アンプ、フィルター、フローティングリファレンス、ゲートコントロール等、金物として種々の回路が考えられている他、統計処理ももとより行なわれている。

ここでは、AEの周波数領域が広いことを利用して、一種の帯域フィルターによりAEのある周波数成分のみを高 $s/\Delta t$ 比で計測する方法を用いた。

3. 実験

実験装置は、図-1に示すような長さ100cm、幅15cm、高さ23cmの小型の斜面浸透流の装置を用い、単一粒径の土砂による長さ65cmの斜面を設けた。斜面の上流端高さは9cmである。この上流端に長さ14.7cmの水ソウ部を設け、水位を一定として、斜面に浸透流を生ぜしめ、これにより斜面が崩壊する実験を行なった。

使用した土砂の粒径、斜面底コウ配、実験前の使用土砂の状態、崩壊形状等は表-1に示す通りである。

斜面崩壊とそれに伴って発するAEとの関係を正確に求めるため、図-1に示すようにスイッチ回路を設け、わずかな斜面の移動でもこれが切れ、AE信号をサンプリングする時のトリガー信号としても使用出来るようにした。

斜面崩壊に伴うAE信号の検出には、直径5mmのチタン酸鉛ジルコン酸鉛系の圧電素子を用い、これによって音-電変換した後、AE信号を電気信号として取り出すようにした。

一般にAE検出は先に述べたように、その受音を行なうことによってなされるが、ここでは、計測系を図-2に示すような閉回路とし、搬送音を用いてこれとAE音の間に生じるビート音を受け、位相検波、ローパスフィルターを用いて、このビート信号を取り出す方法を用いた。

従って、得られる信号はAE信号そのものでは

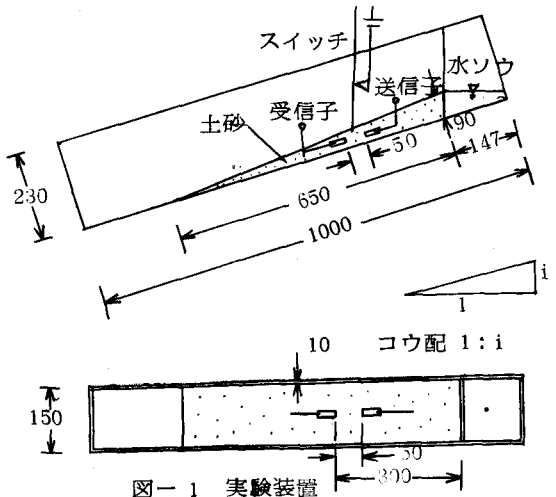


図-1 実験装置

表-1 実験ケース

粒径	~1.2mm	1.2~2.0mm	2.0~4.8mm
コウ配			
1:0.24		D1 (3000Hz) 乾燥土	
1:0.29		I2 (1000Hz) 乾燥土	E1 (1000Hz) 乾燥土 E2 (5000Hz) 乾燥土
1:0.35	H2 (16000Hz) 乾燥土	C1 (3000Hz) 湿潤土 H1 (16000Hz) 乾燥土 I1 (16000Hz) 乾燥土	A1 (3000Hz) 乾燥土 E4 (16000Hz) 乾燥土
1:0.41	C2 (3000Hz) 湿潤土	E5 (7000Hz) 乾燥土 F1 (5000Hz) 乾燥土	F2 (5000Hz) 乾燥土
1:0.47	I4 (7000Hz) 乾燥土		

なく、図-3 に示すように、AE音中、搬送音の周波数を中心に、ローパスフィルターにより定められる帯域幅をもった成分のものとすることが出来る。すなわち図-3 において信号(イ)は、搬送音とAEによるビート信号である。この信号を、搬送信号を参照信号(ロ)として、位相検波を行なうと、その出力(ハ)が得られローパスフィルターを通すことにより、時定数で定まる高周波成分が除去された出力(ニ)あるいは(ホ)が得られる。この出力信号は搬送音とAE音の周波数差に相当するものである。

ローパスフィルターの時定数を極端に大きくしていくと、最終的には搬送信号を整流した直流出力が得られることとなる。

このAE検出法は、従って本質的にフィルター法と変りないものと言える。また適当に時定数を定めたローパスフィルターからの出力には、搬送音と同じ周波数成分の雑音も当然含まれている。

予備実験として、種々の斜面崩壊の場合について、フィルター法を用いたもの(表-1の(A)(C)(D))と、この方法によるもの(表-1の(E)(F)(H)(I))の得られたAE信号について比較を行なってみた結果、この搬送音方式では、後に述べるような斜面崩壊前に生じる前駆的なAE信号がすべての場合について検出されたにもかかわらず、単なるフィルター法では全く検出することが出来なかった。その一例を図-4 に示す。

この搬送音方式を用いて得られたAE出力信号は、斜面崩壊の機構、斜面構成土砂等との関係を求めるため、データーレコーダーに記録後A-D変換して、そのエネルギースペクトルを求めた。

4 実験結果と考察

斜面崩壊の実験を行なった結果、その崩壊の形態としては、表-1 に示すような次のものが得られた。

- | | | |
|---|-------|---------------|
| 送受信子の上流側においてすべり面を生じ崩壊する場合 | ----- | 表-1 の (E) (A) |
| 送受信子の下流側においてすべり面を生じ崩壊する場合 | ----- | (F) |
| 斜面全体がすべりを生じ崩壊する場合 | ----- | (H) (C) |
| 単なる浸透流だけでは崩壊しないため上流側水ソウより水をあふれさせることによって斜面浸食を生じさせ崩壊させる場合 | ----- | (I) (D) |

ただし、上記ならびに表-1 において(A)~(D) は、予備実験として、受信子のみ用い、フィルター

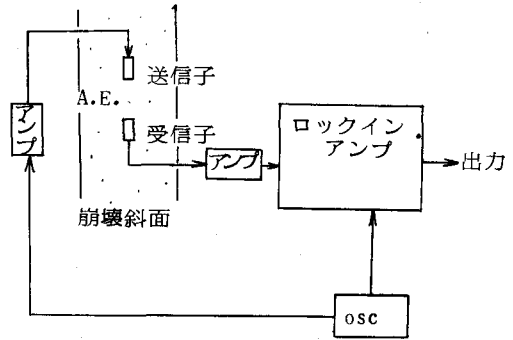


図-2 計測回路図

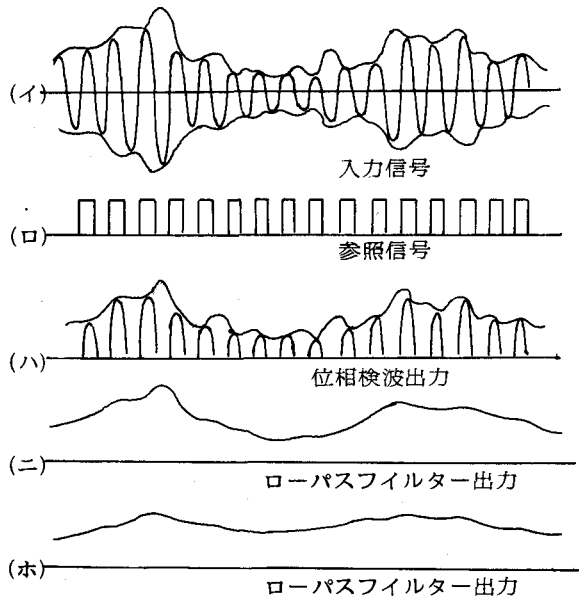


図-3 ロックインアンプ信号図

法により、AE検出を行なったもので、この実験結果考察と直接の関係はない。

斜面構成材には、乾燥土と湿潤土の二種類を用いているが、湿潤土は一度崩壊実験に使用したものを、水切り後、約 3 時間乾燥させたものである。

実験結果について全般的に述べると、実験を開始した当初は、雑音のみ検出される。斜面に浸透水が流下し、その先端が送受信子の設けてある場所に及ぶと、搬送音の受信強度が増加するが、AEはまだ検出されず、雑音レベルもそれほど変化しない。

浸透水が斜面全体に行きわたり、崩壊が近づくと、前駆的な微小AE音が検出されはじめ、続いて斜面の微小移動を生じこのため、図-1 に示すスイッチ回路が作動する。ここでは、この時を斜面崩壊の開始時としている。その後間をおいて、斜面の崩壊を生じ、そのAE信号が得られることとなる。

このAE信号は細部を除いて、崩壊の形態、斜面構成材料等に関係なく、概略、図-4 に示すような結果として得られる。

崩壊前に生じる前駆的なAE信号は、斜面構成材である土砂の粒径が大きいものの方がやや得られる信号が大きく、この信号は、さきに述べた崩壊開始時の数秒前から発生する。

締め固めの強い斜面の方が、全体としてこの前駆的AE信号の経過時間が長いように観察される。

上流側にすべり面が生じ崩壊するものでは、送受信子から、すべり面までの距離の長いものほど、この前駆的なAE信号発生から、崩壊のAE信号発生に至る時間が長く、これはすべり面の亀裂が発生する間にその下流側斜面において数多くのひび割れが順次発生するためと思われる。

下流側にすべり面が生じるものでは、そのすべり面が送受信子から離れていると、すべり面上流側ではあまり微細なひび割れが発生しないためか、崩壊開始前に受ける前駆的なAE信号の受信時間が短い。このことは越水による崩壊についても言えて、微細なひび割れの発生が充分でない時に、越水により斜面表層が掃流され、崩壊開始を示すスイッチ回路が作動するためか同様に前駆的AEの受信時間は短い。全体崩壊についても同様に短い時がある。

崩壊開始時から崩壊のAEが発生し斜面が完全に崩壊の様相を呈するまでの時間は、やはり数秒程度のものであった。しかし、その時間差はまちまちであり特に崩壊形態、土砂粒子等との関係は明白でなかった。

搬送音の周波数を $1^k \sim 16^k$ Hz の間で変化させ、AEの周波数特性について調べてみたが、この程度の範囲ではなんらその差異を見出すことは出来なかった。

前駆的なAE、崩壊のAEのエネルギーは、崩壊形態と関係があると思われるので、その周波数領域において調べることにした。

先に述べた崩壊の各形態(E)～(I)のその各々については、概略同様なエネルギーレベルのAE信号であるため、各形態ごとにAEエネルギースペクトルを平均することにした。

AE信号は、崩壊に完全に無関係な浸潤後の雑音信号(a) 崩壊開始前に現われる前駆的AE信号(b) 崩壊に伴うAE信号(c)の三信号に区分して、各崩壊形態のエネルギースペクトルを求めてみると図-5～8 のようになる。(AE信号(a), (b), (c) は図-4 参照)

またこれから雑音エネルギー成分を差し引いてみると図-9～12 に示すようになる。

雑音エネルギーの周波数分布は、この程度の周波数領域では、一般に平坦と考えられることから、図-5～8 に示す雑音エネルギーの分布は計測系の周波数特性を示すものと思われ、わずかに低周波特性が良くなっている。

崩壊前の前駆的なAE信号は、明らかに低周波領域のエネルギーレベルが高く、この信号が固体のひび割れ等で得られるパルス性の減衰振動を伴うAEと同様のものと考えれば、このことはうなづけることである。

前駆的なAE信号は、図-9～12 を参照すると、全体崩壊の場合、そのエネルギーレベルは高く、上

下流にすべり面を生じる崩壊ではこれより低いエネルギーレベルであり、越水による崩壊の場合はさらに低いことがわかる。

このことに対して、崩壊のAEでは、全体崩壊の場合4つの崩壊形態中最もそのエネルギーレベルが高いことは、前同様であるが、その他の崩壊形態の場合差異は少なく、どちらかと言えば、越水による崩壊のエネルギーレベルが高くなっている。

ただ、崩壊のエネルギー信号には、恐らく崩壊時の土砂粒子とAE検出受信子の間に摩擦接触が生じ、これによる信号も含まれていると考えられる故、その出力を純粋にAEと見なせるか問題がある。

この計測法は、基礎に、AEが線型仮定に基づく速度ポテンシャルをもつ波動式⁴⁾⁵⁾によって表現されるものとし、音の重ね合せが可能と考えている。しかし音の重ね合せは、フィルターを有する計測器に入力として入った後に行なわれるのではなく、それ以前に計測場で生じさせているため、恐らく非線型であるAEとの重ね合せの結果は単純でないものと思われる。

一応、斜面崩壊前に発生する前駆的なAE信号をとらえ、その概略の特性を明らかにしたものの、崩壊時との時間関係は短く、まだこの結果だけでは崩壊の予知を行なうに充分であるとは考えない。

実験因子も複雑でありこれらを変えて研究を行なわなければならないと思っている。

参考文献

- 1) L. Van Wijngaarden: One-Dimensional Flow of Liquids containing Small Gas Bubbles, Annual Review of Fluid Mechanics Vol.4 1972 pp369~396 Annual Review Inc.
- 2) 石原安雄・余越正一郎: 超音波流速計による河川乱流の測定 11回水理講演会講演集 1967 pp53~58 土木学会
- 3) 光田 寧他: 1976年オーストラリアで実施された乱流計測器の国際比較観測, 天気 Vol.25 No.10, 1978 pp7~14 気象学会
- 4) J. Lighthill: Waves in Fluid, 1978, pp1~11 Cambridge University Press
- 5) 実吉純一・菊池喜充・熊本乙彦: 超音波技術便覧 1960 pp9~15 日刊工業新聞社

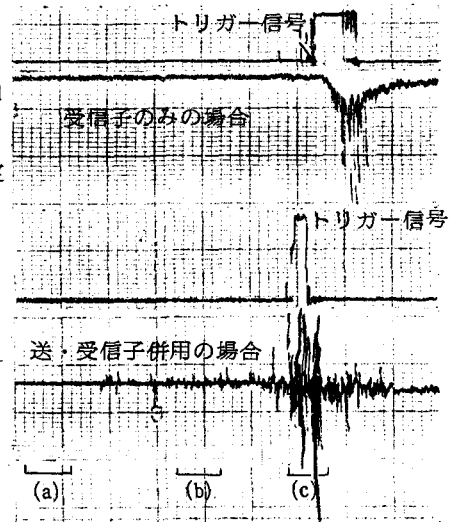


図-4 受信信号

E_n : 雑音の平均エネルギースペクトル

f_0 : 搬送波周波数

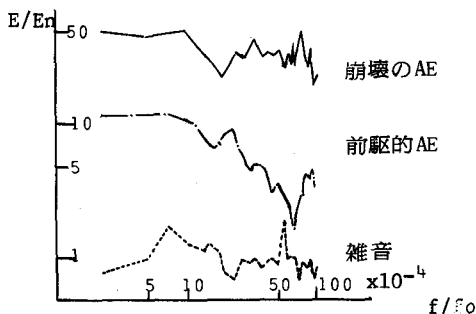


図-5 ケース(E)のスペクトル分布

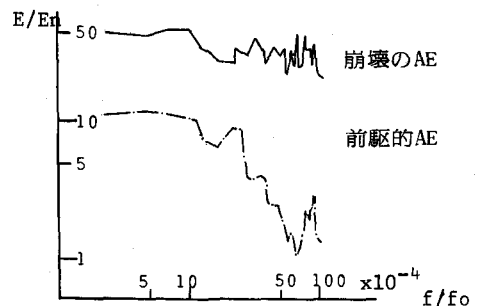


図-9 ケース(E)の雑音を除去したエネルギースペクトル

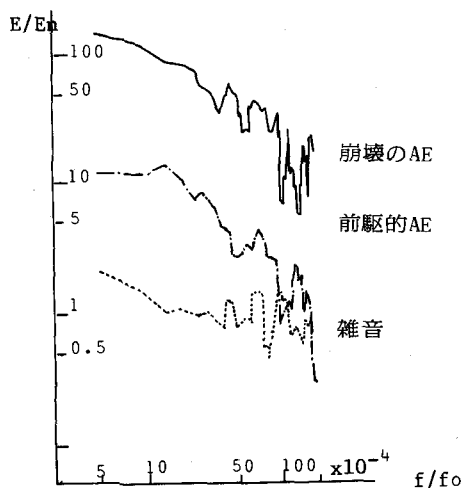


図-6 ケース(F) のスペクトル分布

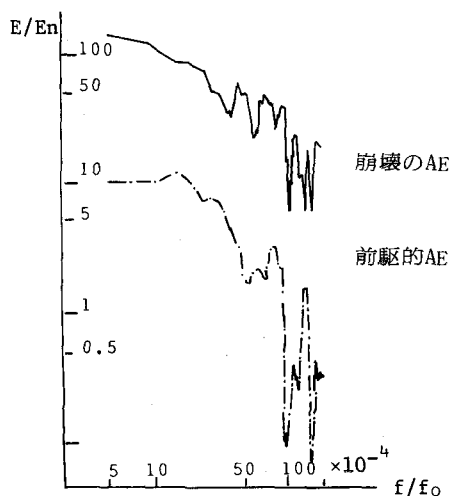


図-10 ケース(F) の雑音を除去したエネルギー・スペクトル

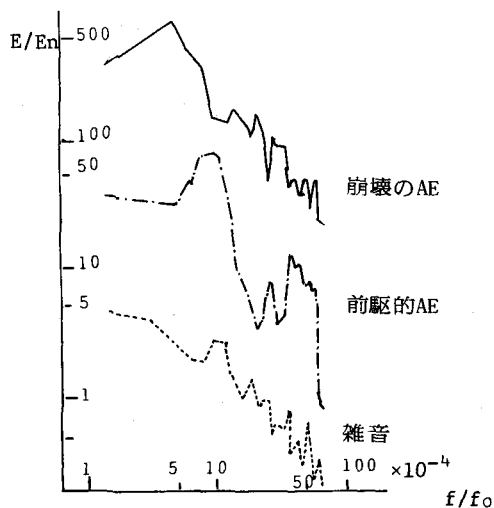


図-7 ケース(H) のスペクトル分布

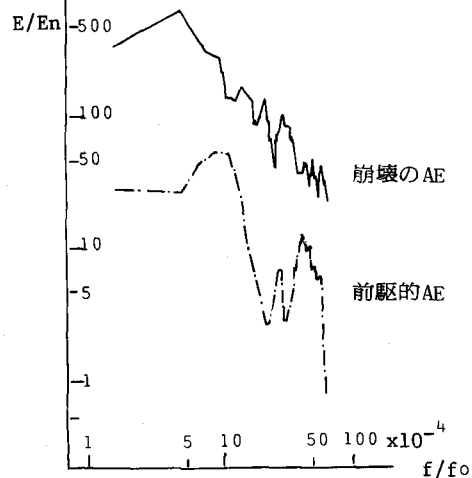


図-11 ケース(H) の雑音を除去したエネルギー・スペクトル

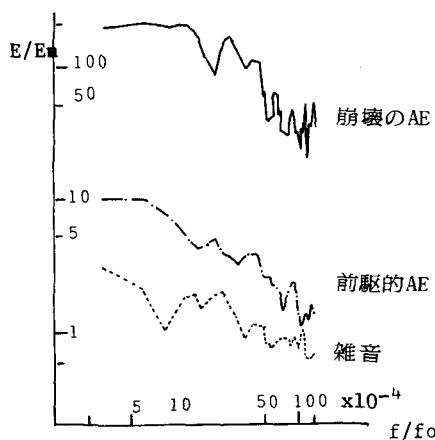


図-8 ケース(I) のスペクトル分布

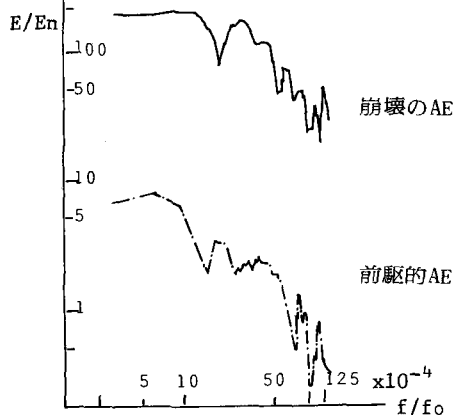


図-12 ケース(I) の雑音を除去したエネルギー・スペクトル