

論文

[1078] モルタルの凍害評価手法としてのAE計測

正会員○嶋田 久俊（北海道開発局開発土木研究所）

正会員 堺 孝司（北海道開発局開発土木研究所）

1. まえがき

近年、微小ひびわれが生じる時に発生するAEの特性によって、コンクリートの破壊現象を明らかにしようとする研究が活発に行われている。筆者らも、凍結融解作用を受けるモルタルのAE計測を行い、AEのほとんどは凍結時に発生すること、凍結融解サイクルが増加しても1サイクル当りのAE発生数が増加する傾向は見られないこと等を明らかにすることができた[1]。しかし、満足できる位置標定結果が得られておらず[2]、計測条件が確立しているとは言い難い状態にある。AEの発生源位置標定は、材料内部の微小破壊の成長過程を定量的かつ立体的に把握できるため、凍結融解過程における劣化挙動を明確にするためには不可欠であると考えられる。本研究は、各種条件がAE位置標定結果におよぼす影響等について検討を行ったものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合

セメントとして普通ポルトランドセメント、細骨材として豊浦産標準砂を用い、水セメント比65%、砂セメント比2.0のプレーンモルタルを作製した。7日間の水中養生後、AEセンサを感熱接着剤（エレクトロニックワックス）で供試体に接着し、さらにシリコンで覆った。供試体の上面には給水のためシリコンで5mm程度の枠を設けた。

2.2 AE測定方法

AEセンサは、共振周波数が140KHzのものを4つ用いた。センサで受信したAE信号を、50KHzのハイパスフィルター内蔵のプリアンプで40dB増幅した後、AEデータをデータチェンバに、波形データをウェーブメモリに記録した。データチェンバは、ローパスフィルターを1000KHz、ディスクリレベルを55dBに設定した。波形データは200ns

間隔のデジタルデータを1イベント当たり4kワード記録した。測定終了後、コンピュータにデータを転送し、処理および解析を行った。図-1に、AE測定ブロック図を示す。

2.3 凍結融解サイクル

凍結融解サイクルは1サイクル6時間とした。槽内温度を1.5時間で+12℃から-25℃まで低下させ、-25℃で1.5時間保持し、1.5時間で-25℃から+12℃まで上昇させ、+12℃で1.5時間保持するパターンを用いた。

3. 位置標定における計測条件の検討

3.1 到達時間の測定方法が位置標定におよぼす影響

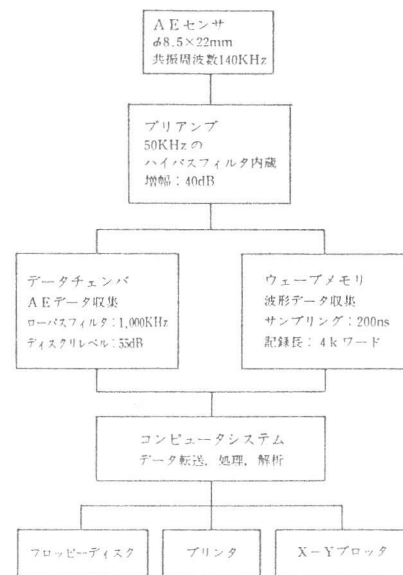


図-1 AE測定ブロック図

図-2に示すような円柱供試体を用いてAE計測を行った。センサ位置は、各々のセンサが他の3つのセンサから同程度の距離に位置することを考慮し、4つのセンサ位置が正四面体の頂点になるよう配置した。

図-3は、AE波形を示したものである。到達時間として、受信したAEの振幅がディスクリレベル(=55dB)を最初に越える時間イベントタイム T_e と、波形データから求めた実際の到達時間 T_w の2種類を用いた。位置標定の原理から言えば、 T_w を用いるべきであるが、 T_w を求めるためには画面上で1波形毎に処理する必要がある。そこで、簡便に得られるイベントタイム T_e が、位置標定を行う際の到達時間として使用でき得るかどうかの検討を行った。図-4は、凍結融解1サイクル目に生じたAEイベントから92イベントを抽出し、それらの最大振幅の分布を示したものである。これらのAEに対し、3次元位置標定を行った。その際用いた伝播速度は3625m/sである。これは上面の中心からパルスを発信させ、センサ1とセンサ2の到達時間差とパルス発信箇所から2つのセンサまでの距離の差との関係から求めた値である。図中の斜線部分、イベントタイム T_e で標定可のAEを、点線部分、波形から求めた到達時間 T_w でも標定不可のAEを示したものである。イベントタイム T_e で標定可のAEは、すべて T_w でも標定できた。ここでいう標定可とは、計算上発生点が求められたことを意味しており、供試体の外部に標定された場合も含まれている。イベントタイム T_e で標定できたAEは、92イベントのうちわずか7イベントであり、波形から求めた到達時間 T_w の64イベントの1割程度である。したがって、イベントタイム T_e は簡便に得られるが、位置標定には、波形から求めた到達時間 T_w を用いるべきであると考えられる。

3.2 検出波形の振幅と到達時間の関係

図-4より、イベントタイム T_e で位置標定が可能なAEは、いずれも最大振幅が78dB以上の大きなものに限定されていることがわかる。また、波形から求めた到達時間 T_w を用いた場合でも、振幅が小さいものほど標定するのが困難になる傾向を示している。そこで、検出波形の振幅と到達時間 T_e 、 T_w の関係について検討した。

図-5は、最大振幅が異なる場合の波形を示したものである。A図、B図、C図に示したAEの最大振幅はそれぞれ99dB、71dB、58dBである。A図の場合、AEの到達後、振幅が急に立ち上がっており、イベントタイム T_e と波形から求めた到達時間 T_w の差は非常に小さい。そのため T_e を

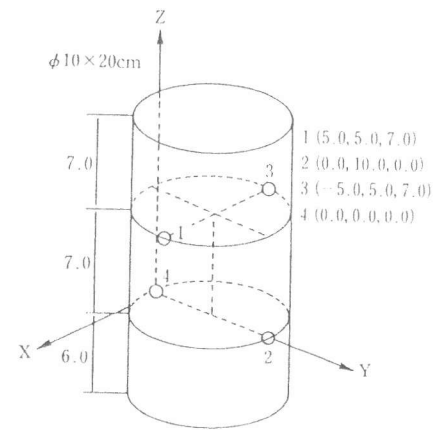


図-2 供試体およびセンサ位置

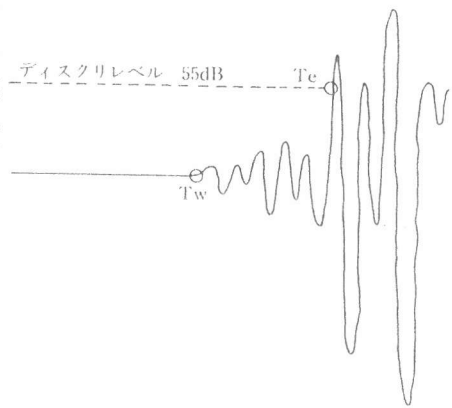


図-3 到達時間の求め方

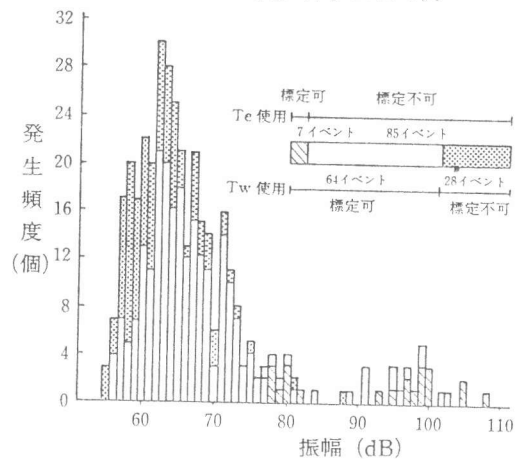


図-4 最大振幅の分布

用いても位置標定が可能であったと思われる。しかしB図の場合、振幅の立ち上がりが緩やかであり、 T_e と T_w の差は非常に大きいため、 T_e を用いた場合には標定ができなかったものと思われる。C図の場合、到達時の振幅が小さく雑音レベルと同程度であり、到達時間を判断することが困難である。そのため振幅の小さい場合には標定が不可となったと思われる。

3.3 位置標定結果と劣化の関係

図-6は、波形データから求めた到達時間 T_w を用い、3次元位置標定を行った結果を示したものである。この図より、AE発生源が上半分に集中していることがわかる。これは、給水を上部からのみ行っており、劣化は上半分のほうが下半分に比べ激しいことが原因であると思われる。測定終了後に供試体側面のシリコンを剥し、表面の観察を行った結果、ひびわれの数は上半分に多いことが確認された。

3.4 センサ位置が位置標定誤差におよぼす影響

図-7は、到達時間の誤差が位置標定結果に及ぼす影響を検討するために、センサ位置と標定誤差の関係を示したものである。簡単のために2次元とし、センサ位置をA図、B図に示すように2通りに設定した。伝播速度を4000m/sとし、センサ2への到達時間のみに $5.0\mu\text{s}$ の誤差が生じたと仮定する。 $5.0\mu\text{s}$ の誤差は、波形データから到達時間を読み取る際に生じ得る値である。センサをB図のように付けた場合、到達時間の誤差が位置標定結果に及ぼす影響は小さいが、センサをA図のように付け、センサで囲まれた以外の領域でAEが発生した場合、到達時間の誤差が位置標定結果に及ぼす影響は大きく、供試体の外に標定される場合がある。図-6で、供試体上部に標定されたAEはZ方向に幅広く分布しており、供試体の外も標定されているが、これは、AEの発生位置がセンサで囲まれた領域外であったことが原因である可能性がある。このように、4つのセンサをセンサで囲まれる領域が最大になるように配置することにより、到達時間の誤差が位置標定結果に及ぼす影響を小さくすることができると考えられる。

3.5 センサ位置および供試体寸法の決定

以上の検討結果より、これまで用いてきた供試体の場合には、図-8-Aのようにセンサを付けるのが良く、またセンサと供試体の密着性を考えた場合、供試体の曲面よりも平面にセンサを接着したほうがよいと思われる。しかし、この場合、センサ2とセンサ3の距離がセンサ1とセンサ3の距離に比べて長くなる。センサ間の位置関係から言えば、図-4に示したように正四面

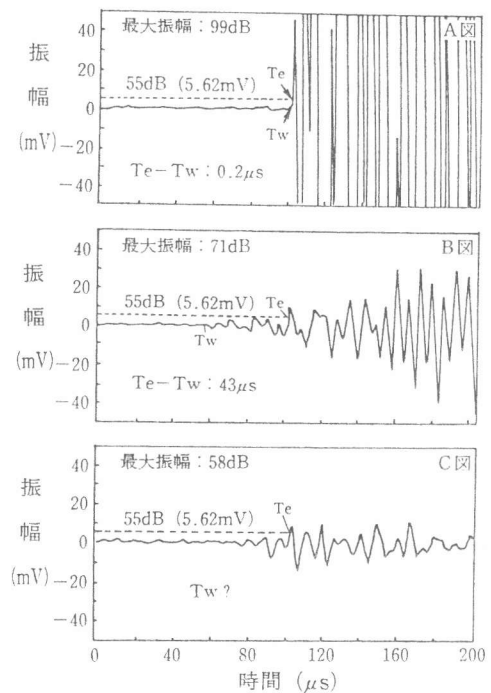


図-5 AE波形

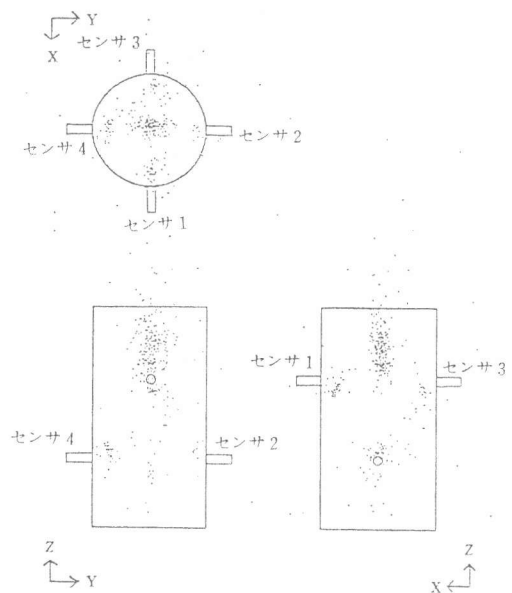


図-6 AE位置標定結果

体の頂点に配置するのが望ましい。

3. 6 センサ接着方法がAE発生に及ぼす影響

以上の検討結果を基に、 $\phi 10 \times 7$ cmの供試体を用い、AE計測を行った。得られた位置標定結果を図-9に示す。これより、センサ付近でAEの発生が集中していることがわかる。図-6の結果でも、センサ付近にAEの発生が見られる。この原因は、供試体とセンサの接着に用いた感熱接着剤の影響である可能性がある。そのため、センサを取り外し、感熱接着剤が残った状態で、センサ位置を図-10に示す位置に付け替え、計測を行った。その際のセンサの接着は、感熱接着剤を使用せず、低温でも固化しないグリースで密着させ、外部からセンサを支持する方法を用いた。図より発生位置は、ほぼ4か所に集中していることがわかる。その箇所は、やや中央によってはいるが、センサ付近ではなく、感熱接着剤が残っている部分から発生していると考えられる。感熱接着剤からAEが発生した原因は、凍結融解作用により生じる供試体の膨張収縮に接着剤が追従できなかったことと考えられる。

4 新しい試験方法に基づくAE計測

センサ位置、供試体の形状およびセンサと供試体の密着に関する以上の検討結果に基づいて、新たに水セメント比65%のプレーンモルタル供試体を作製し、材令14日後にAEの計測を行った。供試体は、図-11に示すように方法で、3サイクル毎に5時間の給水を行った。

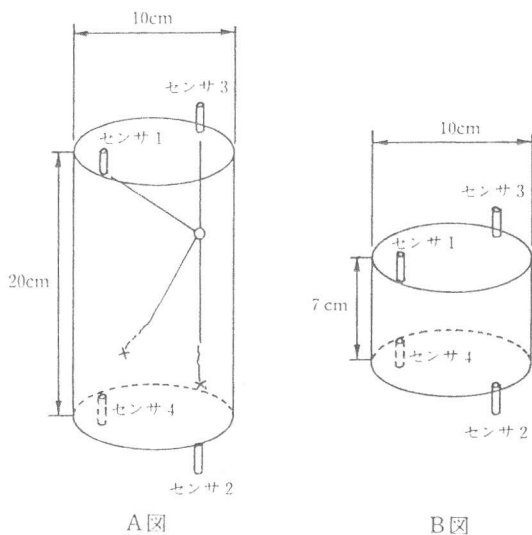


図-8 センサ位置および供試体寸法

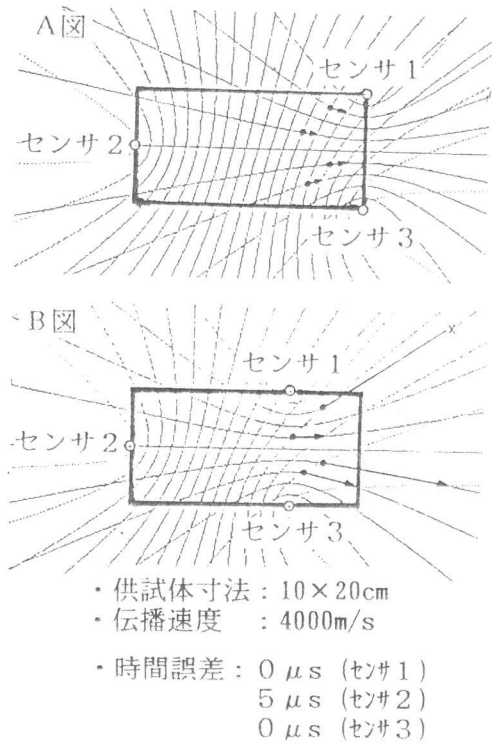


図-7 センサ位置と標定誤差

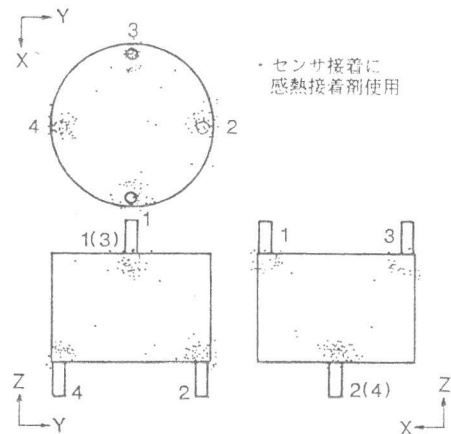


図-9 位置標定結果

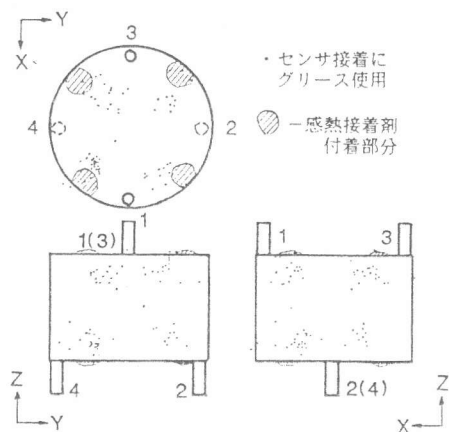


図-10 位置標定結果

4. 1 凍結融解サイクルとA E発生数

図-11に凍結融解サイクルとA E発生数および供試体重量の関係を示す。A Eは1サイクル目には多く発生しているが、給水直後の7サイクル目には発生していない。これは、1サイクル目のA Eが、供試体内部の水の凍結により発生したのではなく、微小クラックの形成により発生したものであることを示していると考えられる。2サイクル目以降のA E発生数は、1サイクル目に比べて非常に少ない。これは、1サイクル目に生じた微小クラックによりモルタルの内部組織が緩んだため、微小クラックが新たに生じたり、既存の微小クラックが進展したりする現象が、その後の凍結融解作用によってあまり生じなかったことが原因であると思われる。

図-12は、1つのセンサから発信された一定のパルスを受信した3つのセンサが受信した時の最大振幅を示したものである。発信センサと受信センサの位置関係としては、センサ1と3のように同方向の関係と、センサ1と2のように反対方向の関係の2種類であり、感熱接着剤を用いた場合には、同位置関係であれば、受信時の最大振幅は同程度の値が得られている。しかし、グリースを使用した場合は、同位置関係にあってもかなりのばらつきが見られ、さらに受信時の振幅も感熱接着剤を用いた場合に比べかなり小さくなっている。

図-13にA Eの振幅分布を示す。この図からも、グリースを使用した場合、感熱接着剤を用いた場合に比べ、振幅が小さい方に偏っており、感度が低下していることがわかる。今回の実験では、全般的にA E発生数が少ない傾向が得られたが、これはグリース使用によるセンサ感度の低下が原因であると考えられる。

4. 3 位置標定

位置標定に必要な伝播速度を測定する場合、到達時間はイベントデータから求めていたが、これは、パルス受信時の振幅が大きいと、波形データから求めた値とほとんど変わらないことを確認したからである。図-14に示すように、感熱接着剤を用いた場合には、イベントデータから求めた伝播速度は、発信センサと受信センサが同位置関係であれば同程度の値を示している。しかし、グリースを用いた場合、イベン

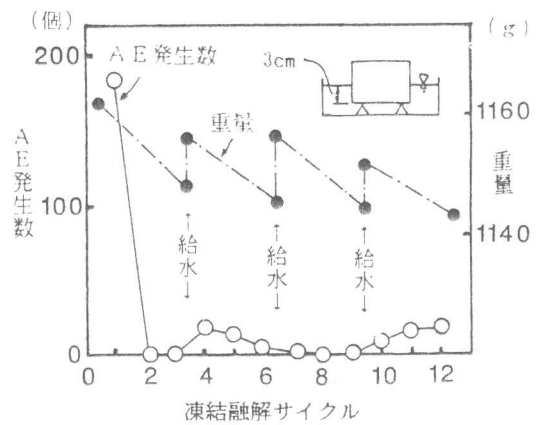


図-11 凍結融解サイクルとA E発生数および重量

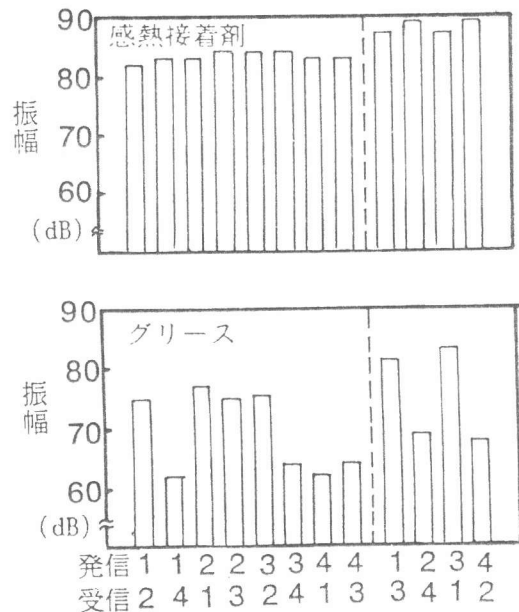


図-12 パルス受信時の最大振幅

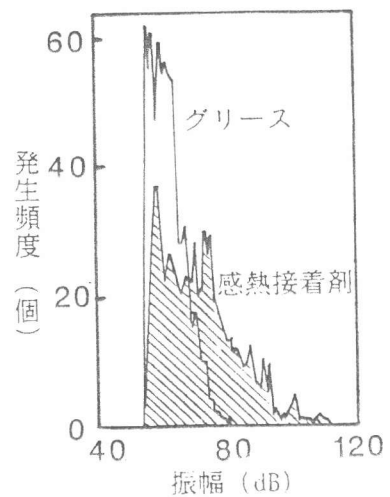


図-13 A Eの振幅分布

トデータから求めた伝播速度は、ばらつきが大きく、値も小さくなっている。これは、感度低下により受信時の振幅が減少したことが原因である。これらのデータから、伝播速度を決定することは困難である。しかし、波形データから求めた場合には、ある程度安定した値が得られる。

図-15は、凍結融解12サイクルまでに生じたA Eの位置標定結果を示したものである。図より、供試体内部の全体から、凍結融解作用による微小クラックが発生しているものと考えられる。給水は、センサ1、3の面から行っているが、今回の給水方法では含水分布に大きな違いが生じなかった可能性がある。発生位置が全体に分布しており、センサの接着や、位置関係による偏りが見られなかったことは、位置標定の方法が適切であることを示していると思われる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

(1) 凍結融解作用を受けるモルタルから発生するA Eの位置標定では、波形データから求めた到達時間 T_w を用いる必要がある。波形から求めた到達時間 T_w を用いた場合でも、振幅が小さいものほど標定するのが困難になる傾向がある。

(2) センサ位置と位置標定誤差との関係から、センサで囲まれる領域が、最大になるように配置し、各々のセンサが他の3つのセンサから同程度の距離に位置するように供試体形状を決定することが望ましいと考えられる。

(3) センサ接着に感熱接着剤を用いることによりA Eが発生するため、グリースを用いたほうがよいと考えられる。しかし、その場合、センサ感度は低下し、ばらつきも大きくなる。

(4) 検討結果に基づいて行ったA E計測から、微小クラックによるA Eは凍結融解1サイクル目に最も多く発生していること、発生位置は供試体全体に分布していることが示された。

参考文献1) 嶋田久俊、堺 孝司：凍結融解作用を受けるモルタルのA E特性、土木学会第44回
年次学術講演会講演概要集、pp.20-21、1989.10

2) 嶋田久俊、堺 孝司：凍結融解作用下モルタルのA E伝播特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.675-678、1990.6

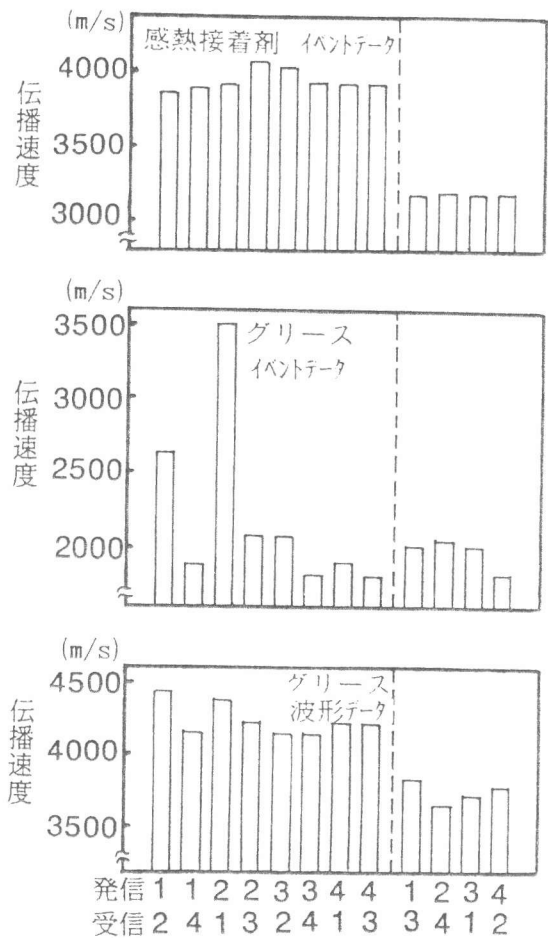


図-14 パルスより求めた伝播速度

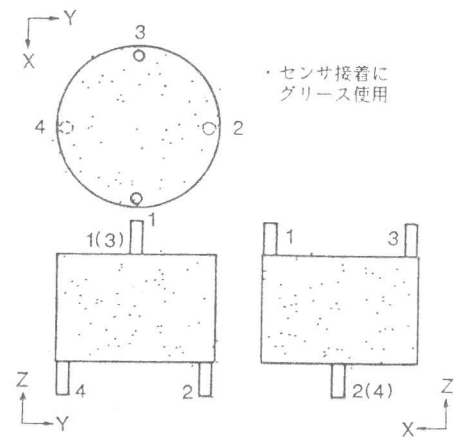


図-15 A E発生位置