

AE ゾンデによる水圧破碎亀裂方向推定のための 理論的・実験的検討

石田 毅¹・田仲正弘²・桑原和道³・金川 忠⁴・水田義明⁵

¹正会員 工博 山口大学助教授 地域共同研究開発センター(兼 大学院工学研究科社会建設工学専攻)
(〒755 宇部市常盤台 2557)

²(株)日本パブリック 技術開発部 主任 (〒134 東京都江戸川区東葛西 6-45-19 佐野ビル5階)

³(株)日本パブリック 技術開発部 (〒134 東京都江戸川区東葛西 6-45-19 佐野ビル5階)

⁴正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所地質地盤部岩盤グループ 研究主幹
(〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

水圧破碎法による地圧測定では、発生した亀裂の方向から最大地圧の方向を決定する。このため、水圧破碎を行ったのち、新たに別のゾンデを孔内に挿入して亀裂の型取りを行い、亀裂の発生方向を求めるのが一般的である。しかしこの方法は、特にボアホールの深度が大きくなると多大な時間を要するため、改良の余地が残されている。そこで筆者らは、水圧破碎のゾンデの1断面に90度の等間隔で4個のAEセンサーを設置し、水圧破碎に伴う亀裂の発生方向をAEのP波初動の到達時間差から推定する手法を考案した。そして、この手法による亀裂発生方向の推定精度を、試作したゾンデを基に理論的、実験的に検討した。その結果、センサーの配置などについて、実用化のための諸条件が明らかとなったので報告する。

Key Words : acoustic emission, source location, hydraulic fracturing, in-situ stress measurement, borehole sonde, rock mechanics

1. 緒 言

地圧の測定法として用いられている水圧破碎法¹⁾では、ボアホールに水圧を作用させて岩盤を破壊し、発生した亀裂の方向と破壊圧から岩盤に作用している地圧の方向と大きさを決定する。亀裂の方向は、亀裂発生後新たに別のゾンデを孔内に挿入して亀裂の型取りを行い、取り出したゾンデに残された亀裂の痕跡とあらかじめ定めておいた方向の目印から求めるのが一般的である。この方法は、ボアホールの深度が小さい間は問題を生じないが、深度が大きくなるとゾンデの交換に要する時間が作業の大きな部分を占めるようになり、測定上支障を生じるようになる。この問題を解決するひとつの方法として、水圧破碎ゾンデになんらかのセンサーを内蔵し、水圧破碎ゾンデを挿入したままで亀裂の方向を検出することが考えられる。比較的軟質な岩盤に適した地圧測定法であるスリープ・フラクチャリング法では、水のかわりにウレタンチューブを孔壁に押しつけて岩盤を破壊するが、この方法では、載荷に伴うボーリング孔の孔径変化をゾンデに内蔵した変位計で4方向測定し、圧力と変位の変化から亀裂の発生時期と発生方向を求めている^{2),3)}。しかし、大きな水圧が作用し脆性的な破壊が生じる水圧

破碎では、特に硬質な岩盤の場合変形が小さく、変位計を用いることは必ずしも適当でないように思われる。ボーリング孔孔壁の周方向の弾性波速度を孔内で測定し、その結果から地圧状態を直接求める方法も提案されており⁴⁾、この方法を応用して亀裂発生前後に孔壁の弾性波速度を測定することも考えられるが、十分な実用化ははかられていないようである。

そこで筆者らは、ボーリング孔内の1断面に90度の等間隔で4個のセンサーを設置し、水圧破碎に伴う亀裂の発生方向をAEのP波初動の到達時間差から推定する手法を考案し、このためのゾンデを試作した。この方法は、水圧の作用する区間の近傍でAE測定を行わなければならないこと、AEセンサーを適当な圧力で確実に孔壁に押し当てなければならないこと、また、ボーリング孔周辺の岩盤中で発生したAEをボーリング孔の壁面で測定するため、波動の伝播経路が直線にならない場合があり、亀裂方向の推定のために若干の理論的検討を要することなど、いくつかの問題を含んでいる。本論文では、特にセンサー設置断面を亀裂発生断面にどの程度近づければ現実的な推定精度が得られるかを、試作したゾンデを基に、理論解析と簡単な実験を行って検討した。この検討結果は、円孔を有する媒体での波動測定に

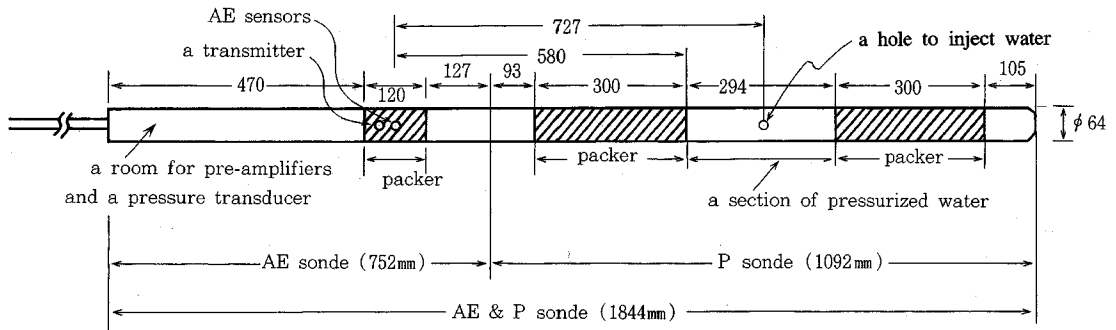


Fig.1 Sketch of AE & P sonde. (Hatched portions are made with rubber.)

共通する問題を含んでいるため、ゾンデ開発のための基礎資料として有用であるとともに、ボーリング孔や円形トンネル内壁でのAEや弾性波の測定においても参考になると思われるので報告する。

2. 試作ゾンデの概要

試作したゾンデの写真を**Photo 1**に、形状と寸法を**Fig.1**に示す。ゾンデは直径64 mm、長さ1844 mmの金属製の円柱で、図で斜線を施した部分は膨張可能なようにゴムでできている。ゾンデは、図の左側の亀裂方向を検出するためのAEセンサーを組み込んだ部分と、右側の水圧を加圧するための部分に区分することができる。簡単のため、前者をAEゾンデ、後者をPゾンデと呼び、両者を合わせた試作ゾンデ全体を、AE & Pゾンデと呼ぶことにする。Pゾンデは注水孔を中心に有する長さ294 mmの注水区間とこれをはさむ長さ300 mmの2つのパッカー区間からなり、全長は1092 mmである。AEゾンデは、AEセンサーを孔壁に押しつけるための長さ120 mmのパッカー部を有し、その中心断面に4個のAEセンサーを90度ずつの等間隔で配置している。ボーリング孔内にゾンデを設置した際にAEセンサーと孔壁との接触状態を確認するため、センサーの配置断面から26 mm離れたパッカー上に発振子を1個組み込んでいる。ゾンデには、プリアンプと圧力変換器を内蔵する空間が必要のため、AEセンサーと発振子を組み込んだパッカーの左側のゾンデ内にこれらのための空間を確保している。AEセンサーの配置断面は、AEゾンデをPゾンデと接続して孔内に設置した状態では、注水孔から727 mm、最も近い注水区間の端からでも、580 mmの距離がある。この距離は、このゾンデを適用しようとしているボーリング孔の孔径66 mmに比べて非常に大きく、AE測定による亀裂方向の検出には明らかに不利である。これは、今回のゾンデの試作に際しては個々のエレメントの機能を確立することを優先し、AEセンサーの配置断面を注水区間に近づける装置製作

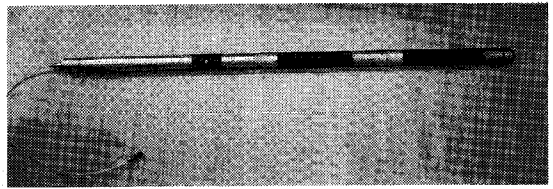
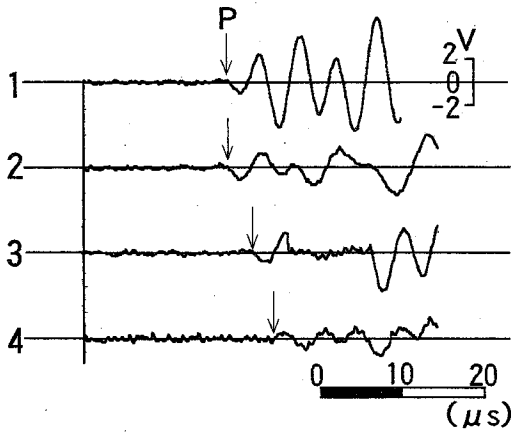


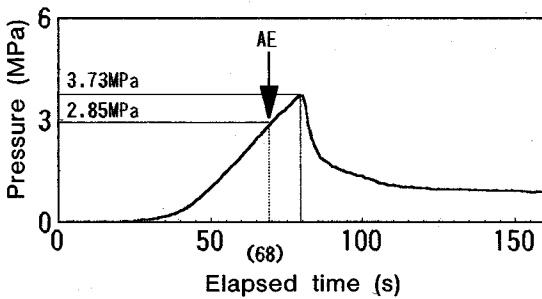
Photo 1 AE & P sonde.

上の工夫は、このゾンデを用いて理想的なAEセンサーの配置を理論的実験的に検討した後に詳細に検討することとしたためである。

Fig.2 (a)は、このAE & Pゾンデを用いて、原位置での水圧破碎の際に収録したAE波形である。1~4の番号はこのゾンデの4つのセンサーの測定チャンネルを表し、波形は同一のAEイベントに対して観測されたものである。この波形は、静岡県沼津市郊外の石英安山岩の露頭部に、孔径66 mmのボーリング孔掘削し、この孔内の地表面下6.0~6.3 mの間に注水して加圧し岩盤を破碎した際に記録された。注水量は約13 cc/sである。**Fig.2 (b)**に注水圧の経時変化を示したが、この実験では注水開始後79秒後に3.73 MPa最大圧力を記録した後圧力が低下しており、この時刻に岩盤内に逸水を伴う大きな亀裂が発生したと思われる。ここに示したAE波形は、この主破壊の11秒前(注水開始約68秒後)、圧力2.85 MPaの時に発生しており、主破壊に先立つ岩盤の微小破壊に伴うAEと推定される。**Fig.2 (a)**の矢印は、AEのP波初動の読み取り位置を示す。P波初動は必ずしも明瞭に読み取れるとはいえないが、1チャンネルと2チャンネルにほぼ同時にAEが到達していることは容易にわかる。従って、このAEは、1チャンネルと2チャンネルからほぼ等距離の位置で発生したことが推定される。このように、発生位置がある程度推定可能なAEが観測されていることは、この試作ゾンデが、基本的に原位置で利用可能な仕様を備えていることを示していると思われる。



(a) AE waveforms.



(b) Pressure versus elapsed time.

Fig.2 AE waveforms and pressure change recorded during an in-situ hydraulic fracturing test, by using the AE & P sonde.

3. AEによる亀裂方向推定精度の理論的検討

Fig.3は、センサー設置断面における4個のAEセンサーの配置と座標系を示す。 z 軸は紙面に下向きに正をとり、センサー設置断面を $z=0$ とする。したがって、注水孔の z 座標は、 $z=727$ mmとなる。亀裂方向の推定には、4個のセンサーのうち発生した亀裂に近い2個のセンサーに着目し、これらのセンサーで受振したAEのP波初動の到達時間差を用いることにした。問題の対称性から、Fig.3の $x>0, y>0$ の領域で発生した亀裂に伴うAE波を、 $A(0, \rho, 0)$ および $B(\rho, 0, 0)$ の2点に設置したセンサーで受振した場合について考察すれば、すべての場合を網羅できるので、以下ではこの場合について述べる。

(1) 波動の最短伝播経路と伝播時間

Fig.4は波動の伝播経路の説明図であり、Fig.4(a)はセンサーを設置した $z=0$ の xy 平面への波動伝播経路の投影図である。この図に示したように、孔壁面 $x^2+y^2=\rho^2$ 上の点Aおよび点Bにおける接平面、 $x=\rho$ と y

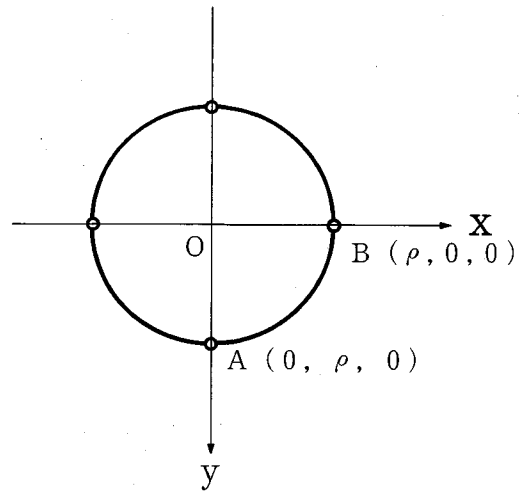
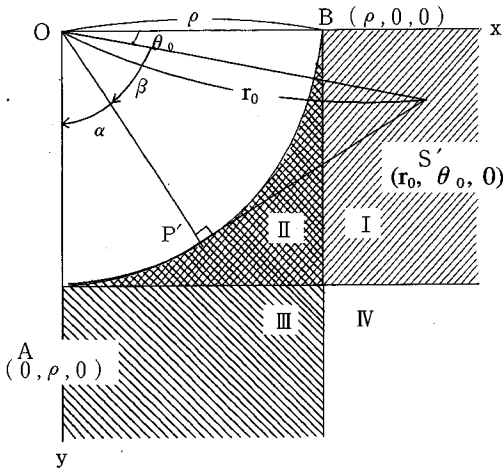


Fig.3 AE sensors located on a borehole wall.

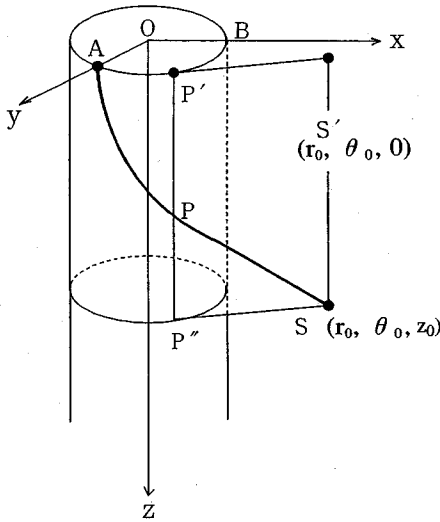
$=\rho$ を用いて、領域をI~IVの4つに区分すると、波動の最短伝播経路を次のように整理することができる。

- a) 領域Iで発生したAEは、センサーBには直線の経路で到達するが、センサーAには孔壁面に接する経路で到達する。
- b) 領域IIで発生したAEは、センサーAにもセンサーBにも孔壁面に接する経路で到達する。
- c) 領域IIIで発生したAEは、センサーAには直線の経路で到達するが、センサーBには孔壁面に接する経路で到達する。
- d) 領域IVで発生したAEは、センサーAにもセンサーBにも直線の経路で到達する。

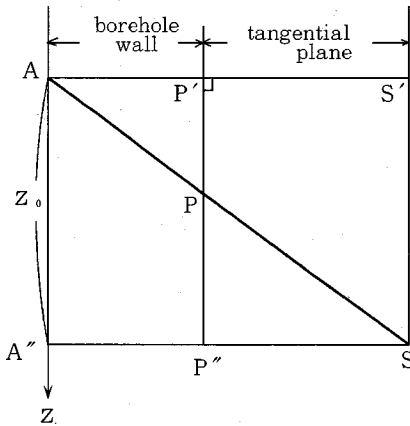
ここで、孔壁面に接する経路を検討するため、Fig.4(b)の模式図に示したように、領域Iの $z=z_0$ ($z_0>0$)の平面上の点Sで発生したAEがセンサーAに到達する場合を考える。波動伝播距離を求めるために、円柱座標系 (r, θ, z) を導入し、 r は原点からの距離、 θ は x 軸から時計回りの角度、 z は z 座標であり、 xyz 座標系とは、 $x=r \cdot \cos\theta, y=r \cdot \sin\theta, z=z$ の関係があるものとする。さて、点 $S(r_0, \theta_0, z_0)$ で発生したAEがセンサーAに伝播する最短の経路は、点Pで孔壁面に接し、その後孔壁面上を伝播してセンサーAに到達する経路である。ここで、孔壁面 $r=\rho$ に接する任意の平面をボーリング孔周辺の岩盤中に想像すると、これらはすべて z 軸に平行な平面である。従って、点Pで孔壁面 $r=\rho$ に接する平面と孔壁面が共有する点の軌跡(接線)は z 軸に平行となる。このことから、点 $S(r_0, \theta_0, z_0)$ で発生したAEがセンサーAに伝播する最短の経路は、Fig.4(c)の展開図に示すように、 \widehat{SP} 間を孔壁面に接する平面上を、 \widehat{PA} 間を孔壁面上を経路とし、かつ経路の展開図上で3点S, P, Aが1本の直線上にある経路とな



(a) Projection on $x-y$ plane ($z=0$).



(b) Sketch.



(c) The path on the unfolded plane.

Fig.4 Diagram on minimum path of wave propagation.

る. $z=0$ の xy 平面への点 P 及び点 S の投影をそれぞれ点 P' 及び点 S' , $z=z_0$ の xy 平面への点 P 及び点 A の投影をそれぞれ点 P'' 及び点 A'' とすると, Fig.4 (a) と (c) を参照して次の関係が成り立つ.

$$\widehat{SP''} = \widehat{SP'} = r_0 \cdot \sin\beta \quad (1)$$

$$\widehat{P'A''} = \widehat{PA} = \rho \cdot \alpha \quad (2)$$

$$\alpha + \beta = \pi/2 - \theta_0 \quad (3)$$

$$\cos\beta = \rho/r_0 \quad (4)$$

ここに, $\alpha = \angle AOP'$, $\beta = \angle POS'$ および $\theta_0 = \angle S'OB$ である. さて, 波動伝播の最短経路の長さを L とすると, Fig.4 (c) を参照して次式が得られる.

$$L = \widehat{SP} + \widehat{PA} = \sqrt{\{(\widehat{SP''} + \widehat{P'A''})^2 + (\widehat{AA''})^2\}} \quad (5)$$

震源 $S(r_0, \theta_0, z_0)$ が既知の場合を考えると, ρ はボーリング孔の半径であり既知であるから, まず式 (4) から β が求まる. θ_0 は震源座標で既知であるから, 式 (3) から α が求まり, 従って, 式 (1), (2) から $\widehat{SP''}$, $\widehat{P'A''}$ が求まる. また, 式 (5) で $\widehat{AA''} = z_0$ であるから, 結局式 (5) は, 次のようになる.

$$L = \sqrt{\{(r_0 \cdot \sin\beta + \rho \cdot \alpha)^2 + z_0^2\}}$$

\widehat{PA} 間は自由表面である孔壁面上の伝播であり, 振幅としては Rayleigh 波が卓越する. しかし, Rayleigh 波の伝播速度は P 波はもとより S 波よりも遅く, 最初にセンサーに到達するのは P 波であるため, \widehat{PA} 間も P 波で伝播すると考えることにする. このように考えれば, 震源からセンサー A までの P 波の伝播時間 Δt は, 上式を P 波伝播速度 V_p で除して,

$$\Delta t = L/V_p = \sqrt{\{(r_0 \cdot \sin\beta + \rho \cdot \alpha)^2 + z_0^2\}}/V_p$$

となる.

一方, 震源 S からセンサー B へは, 波動は直線経路で到達するから, 震源座標をデカルト直交座標で $S(x_0, y_0, z_0)$ と表現し直せば, P 波伝播時間 Δt は,

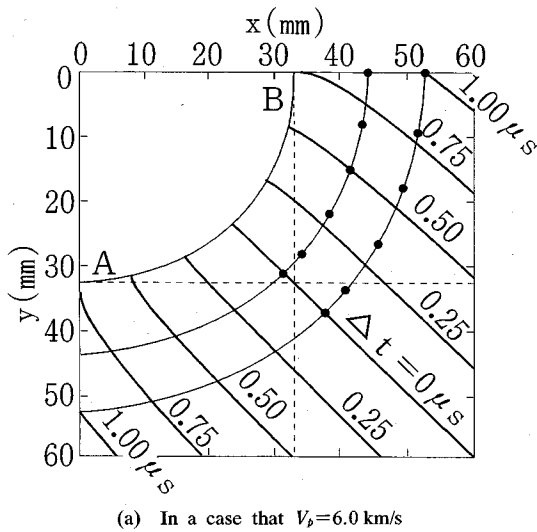
$$\Delta t = \sqrt{\{(x_0 - \rho)^2 + y_0^2 + z_0^2\}}/V_p$$

で容易に得られる.

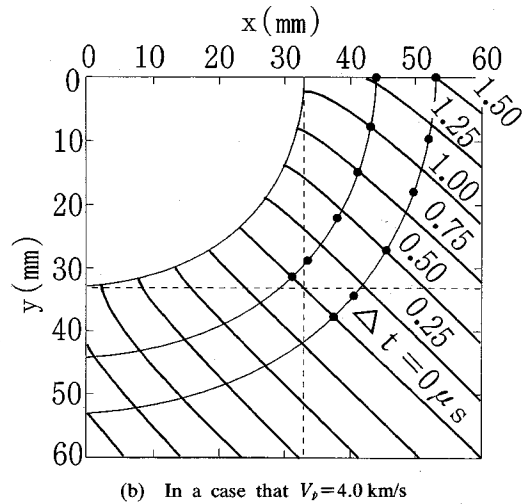
領域 I 以外で AE が発生した場合, その経路は上述の孔壁に接する経路か直線経路かのいずれかであるから, 同様にして, 2つのセンサー A 及び B への P 波の伝播時間を求めることができる.

(2) AE による亀裂方向推定精度の数値解析結果

上述のように, I~IV のいずれの領域で発生した AE に対しても, 2つのセンサー A 及び B への P 波の伝播時間を求めることができることがわかった. そこで, センサー設置断面から一定距離離れた z = 一定の断面で AE が発生した場合に, A, B 2つのセンサーで観測される P 波初動に, どの程度の時間差が生じるかを解析



(a) In a case that $V_p=6.0$ km/s



(b) In a case that $V_p=4.0$ km/s

Fig.5 Arrival time differences due to the crack direction, with variation of P-wave velocity. ($z=300$ mm)

した。Fig.5(a)は、 $V_p=6.0$ km/sの場合に $z=300$ mm、すなわち、センサー設置断面から300 mm離れた断面でAEが発生した場合に生じるP波初動の観測時間差を示す等時間差線図である。図の横軸と縦軸はそれぞれ、Fig.3、Fig.4のx軸、y軸に対応し、半径33 mmの4分円は、ゾンダを設置する半径33 mmのボーリング孔を示している。図中の直線の破線は前述のI~IVの領域の境界を示している。半径44 mmおよび半径53 mmの破線の4分円は後に述べる実験に使用した中空円筒形供試体の外径を、黒丸は実験における模擬AE振動の発振点の位置を示している。x軸とy軸のなす角を2等分する $\Delta t=0 \mu s$ の直線は、 $z=300$ mmのxy断面のこの線上でAEが発生したとき、 $z=0$ mmの断面に設置した

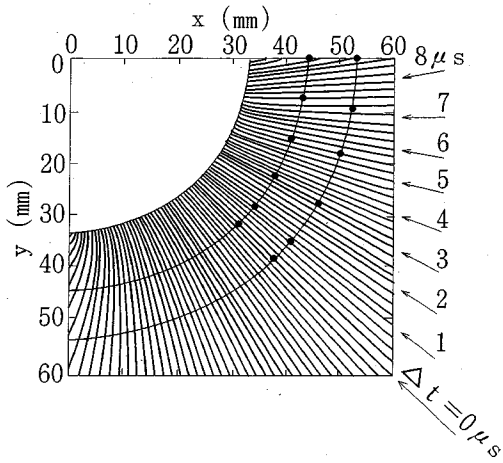
センサーAとセンサーBで観測されるAEのP波初動の観測時間差が $0 \mu s$ であることを示している。同様に、 $0.25 \mu s$ 、 $0.50 \mu s$ 、 $0.75 \mu s$ 、 $1.00 \mu s$ の曲線は、その曲線上でAEが発生したとき、それぞれの値の観測時間差が生じることを示している。 $\Delta t=0 \mu s$ の直線を境に、x軸に近い位置でAEが発生したときはセンサーAに、y軸に近い位置でAEが発生したときはセンサーBに先に波動が到達するが、その到達時間差の絶対値は $\Delta t=0 \mu s$ の直線を軸に対称であるため、図は $\Delta t=0 \mu s$ の直線を対称軸に線対称のグラフとなっている。曲線の間隔は $0.25 \mu s$ の精度でP波の到着時間差が読み取れる場合の亀裂発生方向の推定精度と見ることができる。すなわち、この図の場合、AEセンサー設置断面から300 mm離れた断面でAEが発生したとき、2つのセンサーで受振したP波初動の到達時間差が $0.25 \mu s$ の精度で読み取れるならば、孔壁面の45度の区間がほぼ3本の曲線で区分されるため、約15度の精度で亀裂の発生方向が推定できるといえる。

Fig.5(b)は同じ $z=300$ mmの断面であるが、 $V_p=4.0$ km/sの場合である。 V_p が低下すると同じ箇所でもAEが発生しても波動の伝播に要する時間が增大するため、2つのセンサーへの到達時間差が増大する。従って、時間差の読み取り精度が同じ $0.25 \mu s$ であっても、この場合、孔壁面の45度の区間が4~5本曲線で区分されるため、約10度の精度で亀裂発生方向を推定できることがわかる。

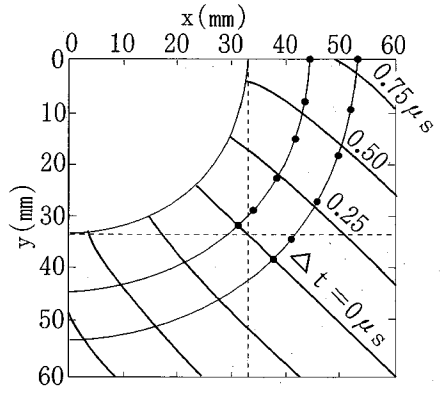
Fig.6は、センサー設置断面とAEが発生した断面の離間距離による亀裂発生方向の推定精度の変化を示す。センサー設置断面を $z=0$ としているので、 z の値がそのまま、センサー設置断面とAEの発生したxy平面の離間距離を表す。Fig.6では、 $z=0$ から150 mm間隔で $z=750$ mmまで、6つの断面の結果を示した。 V_p が5.0 km/sの場合を示したのでFig.6(c)の $z=300$ mmの場合の曲線の間隔は、Fig.5の(a)と(b)の図の間隔程度となっていることがわかる。いずれの図も、曲線は $0.25 \mu s$ 毎に示したので、曲線の密度から亀裂発生方向推定精度の変化を容易に理解することができる。

すでに述べたように、P波初動の到達が $0.25 \mu s$ の精度で読み取れる場合、亀裂発生方向の推定精度は、孔壁面の45度の範囲が図中で何本の曲線で区分されるかで、おおよそ推定することができる。例えば、AE発生断面と同じ断面にAEセンサーを設置した $z=0$ の場合をFig.6(a)で見ると、孔壁の45度の範囲が41本の曲線で区切られているため、約1.1度の精度で亀裂発生方向を推定することができる。これが、 $z=300$ mmの場合には約13度、 $z=600$ mmの場合には約25度に低下することがわかる。

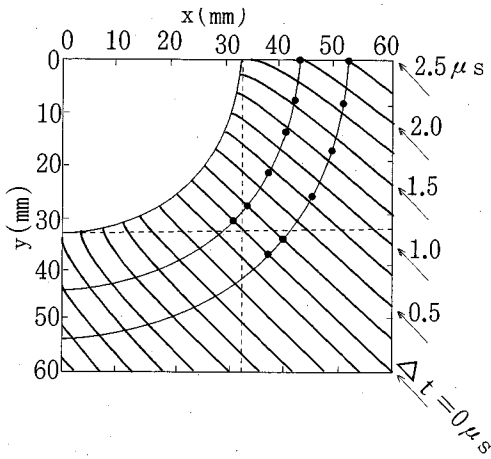
Fig.7は、このようにして求めた亀裂発生方向の推定



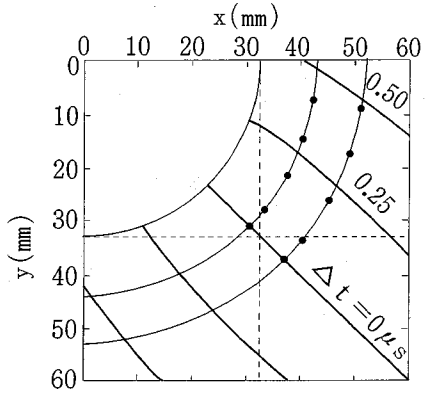
(a) In a case that $z=0$ mm.



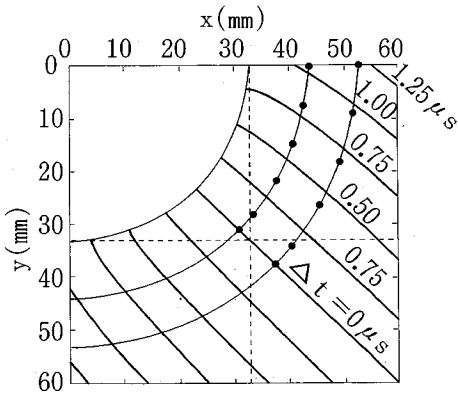
(d) In a case that $z=450$ mm.



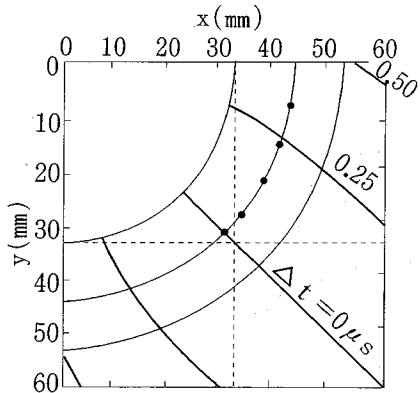
(b) In a case that $z=150$ mm.



(e) In a case that $z=600$ mm.



(c) In a case that $z=300$ mm.



(f) In a case that $z=750$ mm.

Fig.6 Arrival time differences due to the crack direction, with variation of a distance, z , between a section where sensors are mounted and a section where an AE source is located. ($V_p=5.0$ km/s).

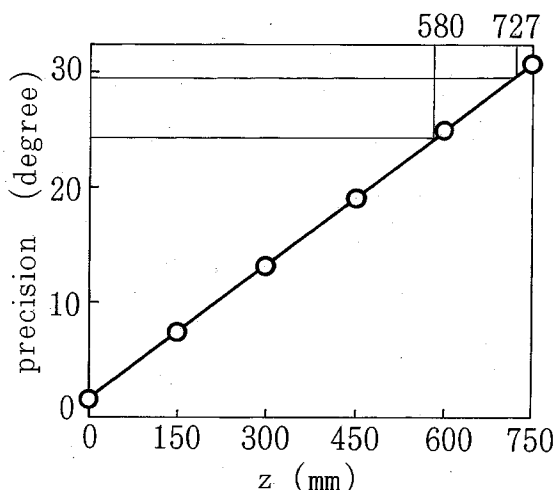


Fig.7 Relation between the precision and the distance, z , supposing that V_p is 5.0 km/s and P-wave initial motion can be read in an accuracy of $0.25 \mu\text{s}$.

精度を、横軸にセンサー設置断面と AE が発生した断面の離間距離 (z) をとって示したものである。この図で、現状の AE & P ゾンデを使用して注水孔設置位置で AE が発生した場合は、 $z=727 \text{ mm}$ であるから 29 度程度、センサーに最も近い注水区間の端で AE が発生した場合でも、 $z=580 \text{ mm}$ であるから 24 度程度の亀裂発生方向推定精度であることがわかる。また、実用的と思われる 10 度以内の精度で亀裂発生方向を推定するためには、センサー設置断面と亀裂の発生する断面との離間距離を 220 mm 以下にする必要のあることがわかる。なお、この結果は、初動の読取り精度が $0.25 \mu\text{s}$ であるとした場合であるから、この初動読取り精度に依存して、上述の亀裂発生方向の推定精度は変化する。

4. 室内実験による検討

(1) 実験方法

P 波初動の読取り精度を $0.25 \mu\text{s}$ と仮定して議論を進めてきたが、初動読取り精度を含め、実際にどのような波動が測定できるかを実験的に検討することは、理論的な検討結果の妥当性を確認するうえで、また、実際に使用可能なゾンデを開発するうえで重要と思われる。そこで、鑄鉄製の中空円筒を用意し、内側の円孔をボーリング孔に見立てて AE センサーを設置し、外壁に所定の位置で振動を発生させ、これを AE に見立てて測定する実験を行った。AE 発生位置のボーリング孔壁からの深度が異なる場合を模擬するため、中空円筒は肉厚の異なる 2 種類を用意した。それぞれの寸法は、肉厚 20 mm のものが外径 106 mm、内径 66 mm、長さ 800 mm、

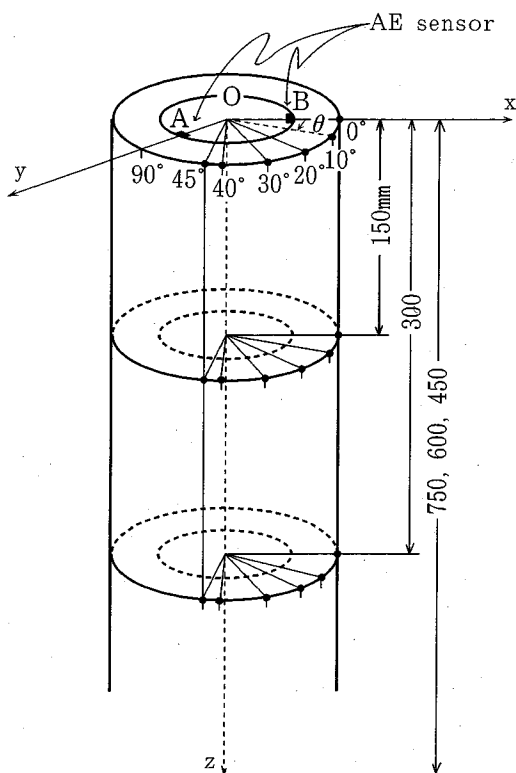


Fig.8 Locations of AE sensors and source points hit in the experiment.

肉厚 11 mm のものが外径 88 mm、内径 66 mm、長さ 750 mm である。発振源として、外壁に接着した圧電素子に電気的パルスを加えて振動を与える方法、シャープペンシルの芯の圧折時の振動を用いる方法、鉄球 (パチンコ玉) を手で投げて当てる方法なども検討したが、十分なエネルギーの振動を所定の位置にしかも同じ大きさで繰り返し容易に与える方法として、玩具のピストルでプラスチック製の弾丸を発射して円筒の外壁を打撃する方法を採用した。AE センサーの配置と弾丸による打撃点を Fig.8 に示す。AE ゾンデに用いている AE センサー 2 個をゾンデからとりはずし、円筒の上端部の内壁に 90 度離して蝟で接着した。弾丸による打撃点はセンサーから 0, 10, 20, 30, 40, 45 度の方向とし、実験に用いる断面は解析と同じく、センサー設置面から 0, 150, 300, 450, 600, 750 mm 離れた 6 つの断面とした。

模擬 AE 振動の測定システムを Fig.9 に示す。AE センサーは、厚み方向の振動に受感する共振周波数 200 kHz の圧電型センサー ((株) 富士セラミックス製, AE 204) である。センサーで受振した信号は 2 個のプレアンプで 20 dB ずつ計 40 dB 増幅した後、ローカル・プロセッサー ((株) エヌエフ回路設計ブロック製, AE-9600) に導き、ここでさらに 30 dB の増幅とハイパス・フィ

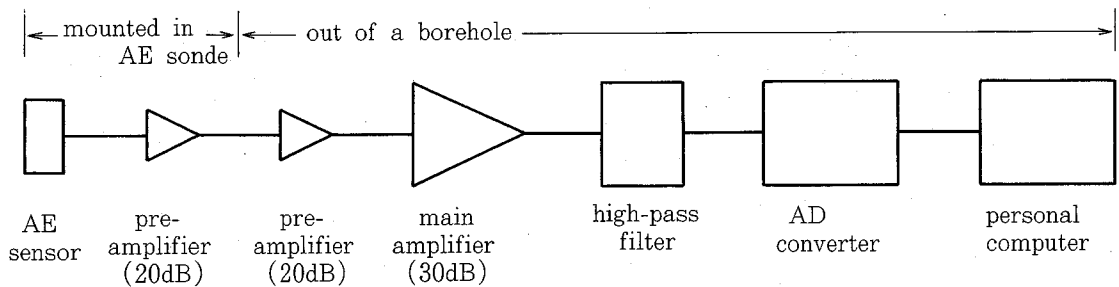


Fig.9 Block diagram of the measuring system.

ルターによる 100 kHz 以下の低周波ノイズの除去を行った。したがって、増幅率は合計 70 dB である。この波形信号を、ウエーブ・メモリー ((株) エヌエフ回路設計ブロック製, AE 9620) に導きサンプリング・タイム 0.1 μ s, 記録長 1 kwords, トリガー・ディレー -128 words で A/D 変換し, GP-IB を介してパーソナル・コンピュータ (PC-9801) に転送し, フロッピー・ディスクに収録した。

実験に用いた AE センサー, プリアンプをはじめとする上述の測定機器は, Fig.2 に測定結果を示した現状の原位置測定で筆者らが用いているのと同じ機器である。現状の測定システムでは, AE センサーと Fig.9 で AE センサーに近い第 1 段目のプリアンプが AE ゾンデに内蔵されている。原位置での測定では, これらはボーリング孔内に, これ以外の測定機器はボーリング孔の外に位置している。

(2) 実験結果

実験結果を Fig.10, 11, 12 に示す。

Fig.10 は, 肉厚 20 mm の円筒の $z=300$ mm の断面の外壁を, センサー設置方向からの角度を変えて打撃したときの結果で, 上から順に打撃点の方向 θ が, $\theta=0, 10, 20, 30, 40, 45$ 度の場合の結果を示す。(打撃点の配置は Fig.8 を参照のこと。) 各図は, 2つのセンサーで受振した波形を示しており, 上側が打撃点に近いセンサー B の受振波形, 下側の波形に示した白矢印は, 図の上側の受振波形の P 波初動を矢印で読み取ったときの, 他のセンサーへの理論的な P 波初動の到達時刻を示している。この到達時刻の計算には, 実験に用いた円筒で実測した P 波速度 5.54 km/s の値を用いた。図を見ると, $\theta=10$ 度の場合に下側の波形の初動の立ち上がりやや不明瞭であるなど, 角度によって受振波形が微妙に異なる場合があるが, これは打撃点での発振状態が必ずしも同一ではないことによるものと思われる。いずれにしても, 白矢印は概ね初動位置に一致しており, 理論解析結果は実験結果とよく一致を示しているといえる。

Fig.11 は, 同じ肉厚 20 mm の円筒で, 角度を 20 度

に固定し, 打撃点の断面を $z=0, 150, 300, 450, 600, 750$ mm と変化させたときの結果である。 $z=300$ mm までは, 初動を比較的容易に読み取ることができるが, z が 450 mm より大きくなると白矢印の位置で初動を読み取るのは困難となり, 実際の測定では初動の読取りに大きな誤差を生じることが予想される。

Fig.12 は, 肉厚 11 mm の円筒で, Fig.11 と同じく角度を 20 度に固定し, 打撃点の断面を $z=0, 150, 300, 450, 600$ mm と変化させたときの結果である。この場合は, $z=150$ mm までは, 比較的容易に初動を読み取ることができるが, z が 300 mm となると初動の振幅が小さくなり, 白矢印の位置で初動を読み取るのは困難になる。このように, 肉厚がうすくなると小さな z の値で初動の読取りが困難になるのは, 振動のセンサーへの入射角が小さくなり, センサーの受感方向への変位成分が小さくなるためと思われる。

以上のことから, 孔壁から 20 mm 程度離れた箇所が発生する亀裂に対しては, センサー設置断面が亀裂の発生する断面から 300 mm 程度離れていても測定は可能であるが, 孔壁に近い位置で発生する亀裂の発生方向を推定するためには, センサー設置断面を亀裂の発生位置に近づける必要があり, 孔壁から 11 mm 程度離れた箇所が発生する亀裂については, 亀裂発生断面から 150 mm 程度より近い断面にセンサーを設置する必要があるといえる。なお, 以上の議論は今回の実験条件を前提とした場合であり, 今回の実験よりも大きなエネルギーの AE が発生する場合や, 信号の大きな増幅を行うことのできる良好な S/N 比のデータが得られる場合には, 初動の読み取れる z の範囲はより大きくなる。しかし, 現実の原位置の測定でこのような条件が満たされることは考えにくいので, 今回の実験に基づく以上の検討結果は測定可能な z の範囲について有用な目安を与えていると思われる。

5. 考 察

(1) 亀裂発生方向の推定可能な範囲

初動読み取り精度が $0.25 \mu\text{s}$ として理論的検討を行った結果、現状の AE & P ゾンデを使用して注水孔設置位置で AE が発生した $z=727 \text{ mm}$ のとき、亀裂発生方向の推定精度は 29 度程度、センサーに最も近い注水区間の端で AE が発生した $z=580 \text{ mm}$ のとき、推定精度は 24 度程度であることがわかった。また、実用的に必要なと思われる 10 度以内の精度で亀裂発生方向を推定するためには、 z を 220 mm 以下にする必要のあることがわかった。

一方実験結果から、孔壁から 20 mm 程度離れた箇所が発生する亀裂に対しては、センサー設置断面が亀裂の発生する断面から 300 mm 程度離れていても測定は可能であるが、孔壁に近い位置で発生する亀裂の発生方向を推定するためには、センサー設置断面を亀裂の発生位置に近づける必要があり、孔壁から 11 mm 程度離れた箇所が発生する亀裂については、亀裂発生断面から 150 mm 程度より近い断面にセンサーを設置する必要があるといえる。

以上の理論的および実験的検討の結果を総合し、亀裂の方向を大まかに推定できる 10 度以内を目安とすると、この精度で亀裂発生方向を推定できるのは、AE センサー設置断面からボーリング軸方向に 150 mm 程度以内の範囲の孔壁付近で発生する亀裂と思われる。

(2) $0.25 \mu\text{s}$ の初動読み取り精度について

上述のように、 $0.25 \mu\text{s}$ の初動の読み取り精度があるとして理論的検討を進めてきたが、実験で測定された波動の周期から、次のことがいえる。Fig.12 の右下に示した時間スケールからわかるように、Fig.10, 11, 12 の横軸は、フルスケールで $12.5 \mu\text{s}$ である。したがって、例えば Fig.11 (a) のセンサー B の受振波形の初動の周期は $5 \mu\text{s}$ 程度であり、今回の実験で測定された振動では、この程度の周期の振動が卓越していることがわかる。また、AE & P ゾンデを用いて原位置で実際に測定した AE 波形を Fig.2 で見ると、最も震源に近い AE センサーで測定された Fig.2 (a) の P 波初動の周期は $5 \mu\text{s}$ 程度であり、上述の今回の実験で得た波動の周期にほぼ等しい。測定波動の周期は現場の岩盤の状況や使用するセンサーの固有周期、アンプ等の特性に支配されるが、卓越周期が $5 \mu\text{s}$ 程度であれば、 $0.25 \mu\text{s}$ は、この周期の 20 分の 1 程度であり、この精度で初動到着時刻を読み取ることは不可能ではないと思われる。周期の短い波動は減衰が大きく測定が難しいが、より短い周期の波動をとらえることができれば、初動の読み取り精度はこれより改善される可能性がある。なお、今回の実験で用

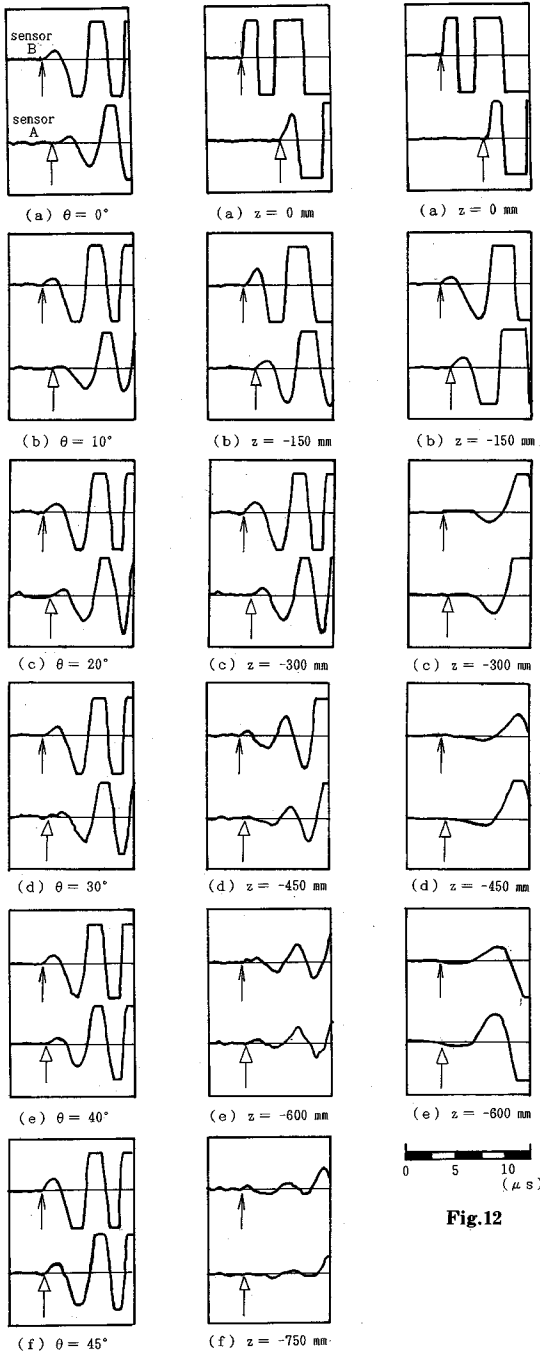


Fig.10

Fig.11

Fig.12

Recorded waveforms when the bullets hit the surfaces of the specimen cylinders. In Fig.10, the bullets hit points at a section of $z=300 \text{ mm}$ with various angle, θ . In Figs.11 and 12, the bullets hit points on a line that $\theta=20$ degree with various distance, z . A thickness of the cylinder is 20 mm for Fig.12, while it is 12 mm in Fig.10 and 11. See Fig.8.

いたA/D変換機のサンプリング・タイムは $0.25\ \mu\text{s}$ より小さい $0.1\ \mu\text{s}$ であったが、初動の読み取り精度を向上させるためには、このように必要とする読み取り精度より小さなサンプリング・タイムを有するA/D変換機を用いる必要がある。

上述のように、原位置で実際に測定したAEの周期と、今回の実験で測定した模擬AE波形の周期はいずれも $5\ \mu\text{s}$ 程度であった。これは、原位置用の試作ゾンダと同じセンサーを実験に用い、その固有周期が $5\ \mu\text{s}$ （固有周波数が $200\ \text{kHz}$ ）であったためと思われる。このように、測定波動の周期について、今回の実験は原位置での測定を模擬しているといえよう。従って、岩盤のP波速度が $5\ \text{km/s}$ 程度であれば、上述の $0.25\ \mu\text{s}$ の初動読み取り精度をひとつの目安とした、亀裂発生方向推定精度の定量的評価は、原位置の実際の測定に対してもそのまま適用できるとと思われる。

(3) Rayleigh波などの影響について

実験では、すでに述べたように肉厚 $20\ \text{mm}$ および $11\ \text{mm}$ の铸铁製中空円筒の内側にAEセンサーを設置し、玩具のピストルでプラスチック製の弾丸を発射して外壁を打撃し、その振動をAEに見立てて測定した。波動の観測は自由面である铸铁製中空円筒の内側で行っており、振幅においてはRayleigh波が卓越すると思われる^{5),6)}。したがって、Fig.10, 11, 12の観測波形上でP波初動と認識している波動はRayleigh波である可能性がある。また、観測波形にはすでに述べたように周期 $5\ \mu\text{s}$ 程度の波動が卓越しているが、実験に用いた铸铁製中空円筒のP波速度は $5.54\ \text{km/s}$ であるから、この卓越波動の波長は $25\ \text{mm}$ 程度である。実験に用いた2つの中空円筒の肉厚 $20\ \text{mm}$ と $11\ \text{mm}$ は、この波長より小さい。したがって、観測波形には肉厚の影響が生じている可能性がある。さらに、伝播波動の波長より板厚が薄い板材ではLamb波（板波）と呼ばれる弾性波が発生する。Lamb波には多くの分枝モードと呼ばれる成分が存在し、その成分の伝播速度は周波数とともに変化する分散という現象を生じ複雑である^{5),6)}。今回の実験は、これらの問題を有しており、例えば、理論的に予想したP波初動（Fig.10, 11, 12白矢印）と観測波形の初動位置が一致したからといって、ただちに理論の妥当性が確認されたとは言えない。

さて、最初に述べたRayleigh波の問題について、打撃点が亀裂発生方向の推定可能と思われる範囲にあり、かつ離間距離 z が $0\ \text{mm}$ と $300\ \text{mm}$ と異なるFig.11(a)と(c)を例にとり、次のような検討を試みる。まず、波動の孔壁面の伝播距離（Fig.4の \widehat{PA} ）と岩盤中の伝播距離（Fig.4の \widehat{SP} ）を式(1)~(5)に従って求めると、Fig.11(a)の場合にはそれぞれ $10.66\ \text{mm}$ と

$41.47\ \text{mm}$ 、(c)の場合にはそれぞれ $62.26\ \text{mm}$ と $242.22\ \text{mm}$ となる。次に、P波、S波、Rayleigh波の伝播速度をそれぞれ V_P 、 V_S 、 V_R とし、実験に用いた中空円筒のポアソン比を 0.25 とすると、 $V_P/V_S=1.732$ 、 $V_R/V_S=0.9194$ であるから⁷⁾、P波の伝播速度 $5.54\ \text{km/s}$ に対し、Rayleigh波の伝播速度は $2.94\ \text{km/s}$ と予測される。したがって、波動が孔壁面上の点P（Fig.4参照）に到達しそこでRayleigh波が発生し、Rayleigh波が孔壁面 \widehat{PA} を伝播してセンサーで観測されたとすると、その初動はP波初動より、Fig.11(a)の場合には $1.70\ \mu\text{s}$ 、(c)の場合には $9.94\ \mu\text{s}$ だけ到達が遅れるはずである。そこで、この観点からFig.11(a)(c)を見ると、Fig.4(a)で検討したように、センサーBには震源から直線経路で波動が到達するから、Fig.11(a)(c)の各図の上側に矢印で示したセンサーBの観測波形の初動がP波初動であることは疑いない。各図の下側の白矢印は、図の上側のセンサーBの観測波形のP波初動を矢印の位置で読み取ったときの、センサーAへのP波初動の理論的な到達時刻である。Fig.11(a)の場合には白矢印と初動は図上でほとんどずれがなく、(c)の場合も $2\sim 3\ \mu\text{s}$ の遅れは認められるが、Rayleigh波が到達する場合に予測される $10\ \mu\text{s}$ 近い遅れは認められない。したがって、今回の実験の範囲では、各図の下側のセンサーAの観測波形においてもRayleigh波との誤認はなくP波初動が読み取れていると思われる。Lambの解では、微弱なP波と不明瞭なS波そしてこれらに比較して振幅が大きく明瞭なRayleigh波が順次到達することが示されているが^{8),9)}、これは打撃点と観測点が同一平面上にある場合であり今回の実験とは条件が異なる。また今回の実験では、増幅度を S/N 比の許すかぎり大きくして波動の観測を行っているため、P波初動が読み取れたのではないかとと思われる。また、すでに述べたLamb波の分枝モードと呼ばれる成分も、その伝播速度はP波速度を越えることはないから、この影響もあまり大きくはないと思われる。従って、第1近似として、P波初動による亀裂発生方向の推定は概ね妥当であると思われる。しかし、孔壁面という自由面で波動を観測している以上、Rayleigh波の問題は常に意識しておく必要がある。上述の検討はこの意味で必ずしも十分ではなく、精度の向上をはかるためには、今後Rayleigh波やLamb波の分枝モード、さらには実験に用いる中空円筒の肉厚の影響の詳細な検討を行っていく必要があると思われる。

(4) 今後の発展性

本論文では、ボーリング孔内の1断面に 90 度の等間隔で4個のセンサーを設置し、水圧破壊に伴う亀裂の発生方向をAEのP波初動の到達時間差から推定する手

法について検討した。従来、水圧破碎による亀裂の発生は、ボーリング孔内に加圧した水圧の低下から知ることができるが、亀裂の発生方向やその進展の仕方についての情報をリアルタイムで把握する方法は実用化されていない。従って、本手法は亀裂の方向を簡便に知り水圧破碎による地圧計測の労力を軽減するだけでなく、原理的に水圧破碎時の亀裂挙動をリアルタイムで把握する手法として有望と思われる。本手法を基礎に、亀裂挙動をモニターする技術が開発できれば、モニター結果をみながら、適切な亀裂を造成するために水圧破碎作業そのものを制御できる可能性がある。また、不明な点が多い孔内水圧の時間変化と亀裂の進展挙動の関係も明らかにできる可能性がある。今後、このような観点から、本手法を発展させていきたいと考えている。

6. ま と め

ボーリング孔内の1断面に90度の等間隔で4個のセンサーを設置し、水圧破碎に伴う亀裂の発生方向をAEのP波初動の到達時間差から推定する手法を考案した。この手法による亀裂発生方向の推定精度を、試作したゾンデを基に理論的、実験的に検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 亀裂の発生方向の推定精度を検討するに際し、ボーリング孔周辺の岩盤中で発生したAEのP波のセンサーへの最短伝播経路は、その発生位置により直線とはならず孔壁面に沿う経路となる場合があり、またセンサーではAEのP波初動が検出できると考えた。実験を行ったところ、次に述べるRayleigh波との誤認などいくつかの問題は残されているが、今回の実験の範囲では、第1近似として、このような考え方が概ね妥当であると思われる。

(2) AEの観測は、自由面である孔壁面に設置したセンサーで行っており、観測波形においてはRayleigh波が卓越するから、Rayleigh波をP波初動と誤認している可能性がある。このような観点から、今回の実験の代表的な観測波形を検討したが、検討の範囲ではそのような誤認は認められなかった。しかし、孔壁面という自由面で波動を観測している以上、Rayleigh波の問題は常に意識しておく必要があり、今後亀裂発生方向の検出精度の向上をはかるためには、Rayleigh波などの影響の詳細な検討を行っていく必要があると思われる。

(3) センサー設置断面とAE発生断面の離間距離 z による亀裂発生方向の推定精度の変化を理論的に検討したところ、次のことがわかった。すなわち、初動読み取り精度が $0.25\mu\text{s}$ であるとした場合、現状のAE&Pゾンデを使用して注水孔設置位置でAEが発生した $z=727\text{mm}$ のとき、亀裂発生方向の推定精度は29度程度、セ

ンサーに最も近い注水区間の端でAEが発生した $z=580\text{mm}$ のとき、推定精度は24度程度であることがわかった。また、実用的に必要なと思われる10度以内の精度で亀裂発生方向を推定するためには、 z を 220mm 以下にする必要のあることがわかった。

(4) 肉厚 20mm および 11mm の鑄鉄製中空円筒の内側にAEセンサーを設置し、玩具のピストルでプラスチック製の弾丸を発射して外壁を打撃し、その振動をAEに見立てて測定する実験を行なった。この実験の結果、孔壁から 20mm 程度離れた岩盤中で発生する亀裂に対しては、センサー設置断面が亀裂の発生する断面からボーリング軸方向に 300mm 程度離れていても測定は可能であることがわかった。しかし、孔壁に近い位置で発生する亀裂に対しては、センサー設置断面を亀裂の発生位置に近づける必要があり、孔壁から 11mm 程度離れた岩盤中で発生する亀裂については、亀裂発生断面からボーリング軸方向に 150mm 程度以内の断面にセンサーを設置する必要があることがわかった。

(5) 上述の理論的および実験的検討の結果を総合すると、亀裂の方向を大まかに推定できる10度以内を目安とすると、この精度で亀裂発生方向を推定できるのは、AEセンサー設置断面からボーリング軸方向に 150mm 程度以内の範囲の孔壁付近で発生する亀裂と思われる。

(6) 試作したAE&Pゾンデを用いて原位置で実際に測定したAE波形を、今回の実験で測定した模擬AE波形と比較した。その結果、測定波動の周期はいずれも $5\mu\text{s}$ (周波数にして 200kHz)程度であり、少なくともこの点について、今回の実験は原位置での測定を模擬していることがわかった。従って、岩盤のP波速度が 5km/s 程度であれば、上述の $0.25\mu\text{s}$ の初動読み取り精度をひとつの目安とした、亀裂発生方向推定精度の定量的評価は、原位置の実際の測定に対してもそのまま適用できると思われる。

(7) 本論文で提案した手法は、原理的に水圧破碎時の亀裂挙動をリアルタイムで把握する手法としても有望と思われる。本手法を基礎に、亀裂挙動をモニターする技術が開発できれば、モニター結果をみながら、適切な亀裂を造成するために水圧破碎作業そのものを制御できる可能性がある。また、不明な点が多い孔内水圧の時間変化と亀裂の進展挙動の関係も明らかにできる可能性がある。今後、このような観点から、本手法を発展させていきたいと考えている。

付記：本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(試験研究(B)課題番号07555330,研究代表者:石田毅)の助成を得て行った。

謝辞：(株)日本パブリック技術開発部長中山芳樹氏と

日特建設(株)山縣秀年氏にはAE & Pゾンデの試作に際して、貴重な御助言と御指導をいただいた。また、当時山口大学4年生の柳之内浩君(現在、サンコーコンサルタント(株))には数値解析と実験に御協力いただいた。ここに、記して深く感謝の意を表すものである。

参考文献

- 1) 例えば, Mizuta, Y., Sano, O., Ogino, S. and Katoh, H. : Three dimensional stress determination by hydraulic fracturing for underground excavation design, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.24, No.1, pp. 15-29, 1987.
- 2) 佐久間彰三, 菊地慎二, 中村哲也, 水田義明: ダブルフラクチャリング法による3次元応力場の決定, 土木学会論文集, No. 448/Ⅲ-19, pp. 9-18, 1992.
- 3) Serata, S., Sakuma, S., Kikuchi, S. and Mizuta, Y. : Double fracture method of in situ stress measurement in brittle rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.25, pp.89-108, 1992.
- 4) Su, W.H., Peng, S.S., Okubo, S. and Matsuki, K. : Development of ultrasonic methods for measuring in-situ stresses at great depth, *Mining Science and Technology*, Vol.1, pp.21-42, 1983.
- 5) 佐藤泰夫著: 弾性波動論, pp.92-97, 岩波書店, 1978.
- 6) 大津政康著: アコースティック・エミッションの特性と理論, pp.76-78, 森北出版, 1988.
- 7) 文献5), p.88 (表7.2.1).
- 8) ファン, Y.C. 著 (大橋義夫, 村上澄男, 神谷紀男共訳), pp.216-220, 固体の力学/理論, 培風館, 1970.
- 9) 文献6), pp.76-78.

(1995.4.11 受付)

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION TO DETERMINE CRACK DIRECTION OF HYDRAULIC FRACTURING BY BOREHOLE ACOUSTIC EMISSION SONDE

Tsuyoshi ISHIDA, Masahiro TANAKA, Kazumichi KUWABARA,
Tadashi KANAGAWA and Yoshiaki MIZUTA

In hydraulic fracturing for stress measurement, the direction of cracks due to fracturing follows the direction of the maximum compressive stress. To identify the direction, the sonde is usually removed after hydraulic fracturing, and then the other sonde is inserted into the borehole and traces of the cracks are obtained. Thus, this method takes a lot of time when a borehole becomes deep. To solve the problem, we get an idea to measure AE (Acoustic Emission) events accompanied with hydraulic fracturing and determine the crack direction. We developed a test sonde mounting four AE sensors in a cross section normal to the axis of the sonde. Using the sonde, the feasibility in determination of the crack direction is investigated. It is found that the sonde could be used practically with some improvements clarified from this investigation.