

## (36) 水圧破碎亀裂方向推定のためのAEゾンデの開発

(株) 日本パブリック

山口大学工学部

(財) 電力中央研究所

井上 朗・田仲 正弘・○桑原 和道

正会員 石田 毅・水田 義明

正会員 金川 忠

### Development of AE Sonde to Detect a Crack Direction in Hydraulic Fracturing

Akira Inoue, Masahiro Tanaka, Kazumichi Kuwabara (Nippon Public Co., LTD.)

Tsuyoshi Ishida, Yoshiaki Mizuta (Yamaguchi University)

Tadashi Kanagawa (Central Research Institute of Electric Power Industry)

#### Abstract

To determine in-situ stress state by hydraulic fracturing, it is needed to know a crack direction caused by the fracturing. However, usual methods now generally used to know the crack direction are not so efficient. Then, we have got an idea to detect a crack direction by measuring AE (Acoustic Emission). We made a test sonde on which AE sensors were mounted. Using the sonde, we examined a method to detect the crack direction with high accuracy through numerical analyses and laboratory tests. From the examination, we found that it is essential to set AE sensors near the fracturing section as possible as we can, although it is not easy to put AE sensors in the section of pressurized water for fracturing.

#### 1. はじめに

水圧破碎による地圧の測定<sup>1)</sup>では、ボーリング孔に水圧を作用させて岩盤を破壊し、その破壊圧と発生した亀裂の方向から岩盤に作用している地圧の大きさと方向を決定している。亀裂の方向の求め方は、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うのが一般的である。しかし、この方法はボーリング孔の深度が大きくなればなるほどゾンデの交換に要する時間が作業の大半を占めるようになる。

そこで筆者らは、この作業時間を大幅に短縮させるために、水圧破碎時に岩盤から発生するAE(微小破壊音)を測定してリアルタイムに亀裂の発生方向を求めることができるAEゾンデを開発した。

本論文では、AEゾンデの概要と亀裂発生方向の推定精度について、理論的、実験的に検討したので以下に報告する。

#### 2. 開発したゾンデの概要

ゾンデの形状と寸法を図-1に示す。ゾンデは長さ1844mmの金属製の円柱で、直径66mmのボーリング孔に挿入できるように直径を64mmとした。その構成は、水圧を加えるための部分(Pゾンデ)とAEセンサーを組み

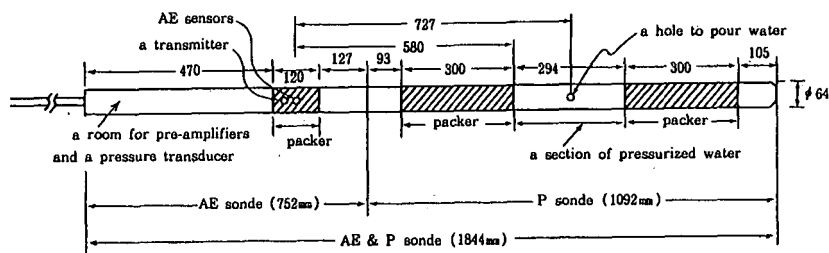


図-1 AE & Pゾンデの形状と寸法

込んだ亀裂方向を検出する部分（AEソンド）が接続されたものである。この両者を合わせたソンド全体をAE&Pソンドと呼ぶことにする。Pソンドは長さ294mmの注水区間とこれをはさむ長さ300mmの2つのパッカー区間からなり、全長は1092mmである。AEソンドはAEセンサーを孔壁に押しつけるための長さ120mmのパッカー部を有し、その中心部に4個のAEセンサーを90度ずつの等間隔で孔壁に当たるように配置している。ボーリング孔内にソンドを設置した際にAEセンサーと孔壁との接触状態を確認するため、センサー設置断面から25mm離れたパッカー上に発振子を1個組み込んでいる。AEセンサーと発振子を組み込んだパッカーの左側のソンド内の空間に、プレアンプと圧力変換器を内蔵している。

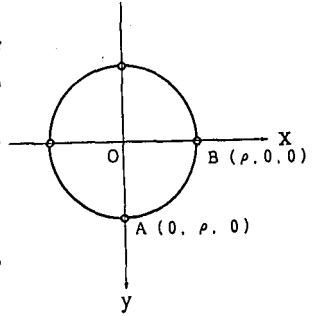


図-2 センサーの配置と座標系

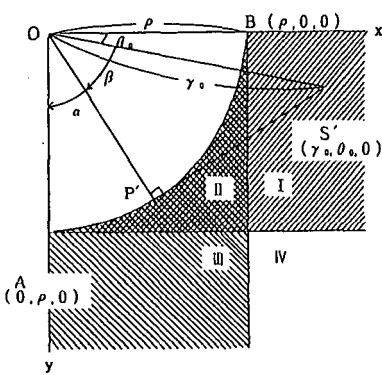
### 3. AEによる亀裂発生方向推定精度の理論的検討

図-2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。 $z$ 軸はセンサー設置断面を $z=0$ とし、紙面に下向きに正をとるものとする。したがって、注水孔の $z$ 座標は、 $z=727\text{mm}$ 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ABのP波初動の到達時間差を用いることにした。図-2の $x>0, y>0$ の領域で発生した亀裂に伴うAE波を $A(0, \rho, 0)$ ,  $B(\rho, 0, 0)$ の2個のセンサーで受振した場合について考察すれば、問題の対称性から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。

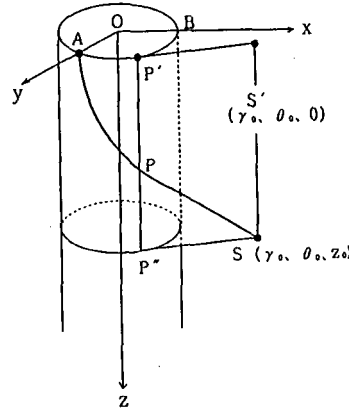
#### (1) 波動の最短伝播経路と伝播時間

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を図-3(a)に示す。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 ( $x=\rho, y=\rho$ ) を用いて、領域をI～IVの4つに区分し波動の最短伝播経路を次のように整理した。

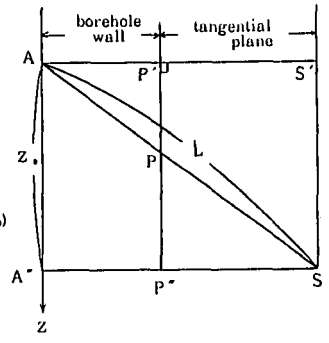
- ①領域Iで発生したAEは、センサーBには直線の経路で到達するが、センサーAには孔壁面に接する経路で到達する。
- ②領域IIで発生したAEは、センサーAにもセンサーBにも孔壁面に接する経路で到達する。
- ③領域IIIで発生したAEは、センサーAには直線の経路で到達するが、センサーBには孔壁面に接する経路で到達する。
- ④領域IVで発生したAEは、センサーAにもセンサーBにも直線の経路で到達する。



(a)  $xy$  平面への投影図



(b) 模式図



(c) 展開図

図-3 波動の最短伝播経路

ここで、図-3(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  $(r, \theta, z)$  を導入すると、 $r$ は原点からの距離、 $\theta$ は $x$ 軸から時計回りの角度、 $z$ は $z$ 座標で表わされる。 $xyz$ 座標系とは  $x=r\cos\theta$ ,  $y=r\sin\theta$ ,  $z=z$ の関係がある。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、図-3(c)の展開図に示すように、SP間は孔壁面に接する平面上、PA間は孔壁面上であり、かつ経路の

展開図上で3点S, P, Aが1本の直線となる。ここで、 $z=0$ のxy平面への点Pおよび点Sの投影をそれぞれ点P'および点S'とし、 $z=z_0$ のxy平面への点Pおよび点Aの投影をそれぞれ点P''および点A''とすると、波動伝播の最短経路の長さ $l$ は、図-3(c)を参照して次式が得られる。

$$l = SP + PA = \sqrt{(SP'' + P''A'')^2 + (AA'')^2}$$

図-3(a), (c)を参照して上式は、結局次のようになる。

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

したがって、震源からセンサーAまでのP波の伝播時間 $t$ は、上式をP波伝播速度 $V_p$ で除して、

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

となる。一方、震源SからセンサーBへの波動伝播経路は直線となるから、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 $t$ は、

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

となり容易に得られる。

領域I以外でABが発生した場合でも、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およびBへのP波の伝播時間を求めることができる。そこで、次に両者のP波初動の到達時間差( $\Delta t$ )がどの程度生じるかを解析し、亀裂発生方向の精度について検討する。

## (2) 亀裂発生方向の精度の検討

図-4は、センサー設置断面とABが発生した断面の離間距離 $z$ が $z=0, 300, 750\text{mm}$ の場合のP波初動の到達時間差を示す等高線図である。図中の半径33mmの4分円は、ゾンデを設置するボーリング孔であり、半径54mmの4分円は、後に述べる実験に使用した円筒形供試体の外径を示す。また、直線の破線は前述のI~IVの領域の境界を示している。ここで、媒体の弾性波速度が $V_p=5.0\text{km/s}$ でかつP波初動の到達時間差が $0.25\mu\text{s}$ の精度で読み取れるとする。x軸とy軸のなす角を2等分する $\Delta t=0\mu\text{s}$ の直線上は、センサーAとセンサーBで観測されるABのP波初動の到達時間差が $0\mu\text{s}$ であり、 $0.25\mu\text{s}$ 、 $0.50\mu\text{s}$ などの曲線はその曲線上でABが発生したときの各到達時間差を示している。例えば、AB発生断面と同じ断面にABセンサーを設置した $z=0$ の場合(図-4(a))をみると、45度の範囲では41本の曲線で区切られていることから約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 $z=300\text{mm}$ の場合(図-4(b))には約13度、 $z=750\text{mm}$ の場合(図-4(c))には約30度に低下することがわかる。

したがって、これらの図は、P波初動の到達時間差が $0.25\mu\text{s}$ の精度で読み取れる場合の亀裂発生方向の推定精度を示していると見ることができる。

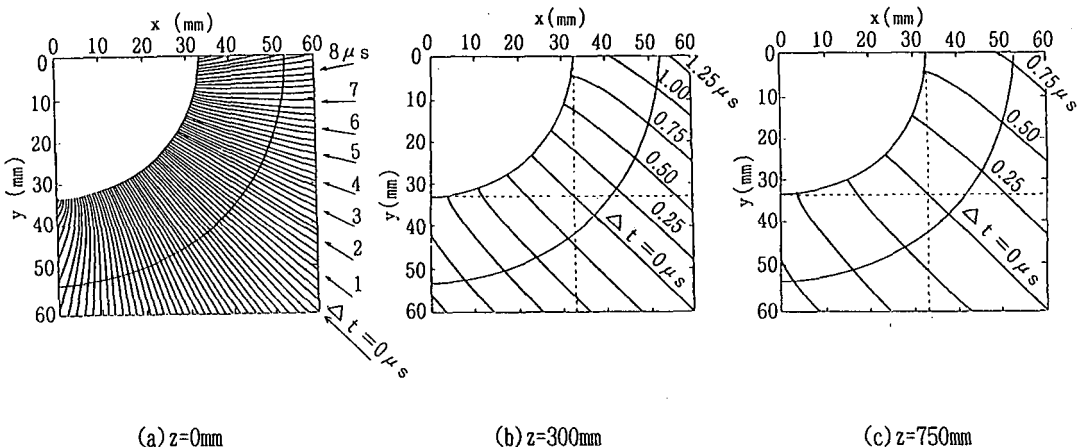


図-4 離間距離による亀裂方向推定精度の変化( $V_p=5.0\text{km/s}$ の場合)

図-5は、この亀裂発生方向の推定精度を縦軸に示し、離間距離( $z$ )を横軸に示したものである。この図より、開発したAE&Pゾンデの亀裂発生方向の精度を求めると、注水孔設置位置でAB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部でABが発生した場合は、 $z=580\text{mm}$ であるから24度程度であることがわかる。

#### 4. 室内実験による検討

##### (1) 実験方法

AEゾンデを用いて、実際にどのような波動を捉えることができるかを確認するために、以下の実験を行った。

まず、肉厚が20mmの鉄製の中空円筒(外径106mm、内径66mm、長さ800mm)を用い、円孔にAEゾンデを挿入してAEセンサーを孔壁に押しつけ、外壁から擬似AEを発生させてその波動を測定した。擬似AE源を選定するために様々な方法を試行した結果、玩具のピストルでプラスチック製の弾丸を円筒の外壁に発射して打撃する方法を採用した。

実験に使用したAEセンサーの配置(A, B)と弾丸による打撃点(●)を図-6に示す。打撃点は、 $z=0, 300, 600, 750\text{mm}$ の各断面内においてセンサーBから0, 20, 40度の各位置とした。用いたAEセンサーは、厚み方向の振動に受感する共振周波数200kHzの高感度のものである。このAEセンサーで受振したAE信号を70dB増幅した後、サンプリング・タイム  $0.1\mu\text{s}$  でA/D変換し、フロッピー・ディスクに波形データとして収録した。

##### (2) 実験結果

図-7は、 $z=300\text{mm}$ の断面内における $\theta=0, 20, 40$ 度の位置を打撃したときの結果である。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、下側が打撃点から遠いセンサーAの受振波形である。各図の下側の波形に示した白矢印は、上側の受振波形のP波初動を黒矢印で読みとったときの、センサーAへの理論的なP波初動の到達時間を示している。同図より、実験結果は理論的なP波初動到達時間と良い一致を示している。なお、この到達時間の計算には、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。

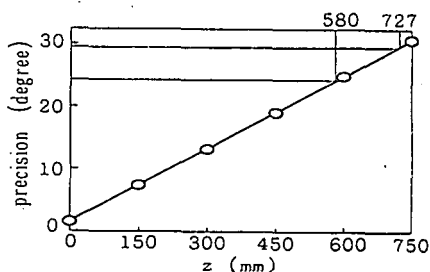


図-5 亀裂方向精度と離間距離の関係

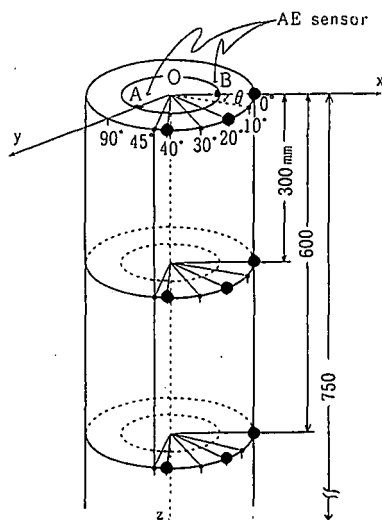


図-6 AEセンサーの配置と打撃点の位置

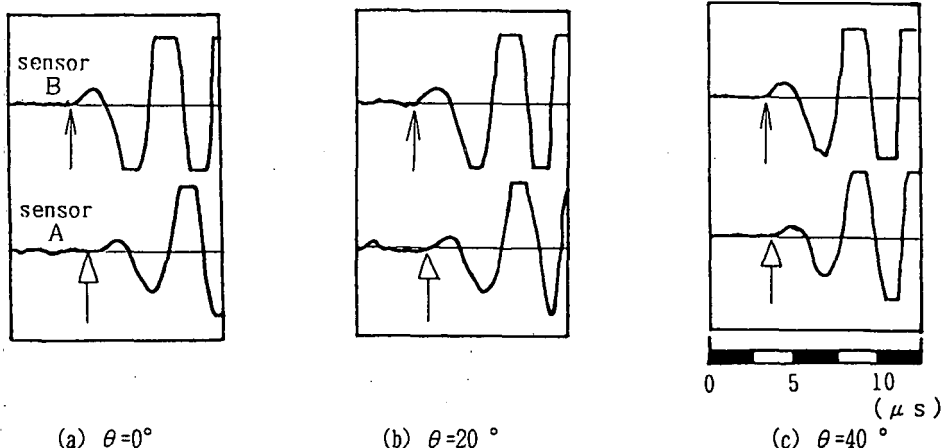


図-7 擬似AEから得られた波形の初動位置( $z=300\text{mm}$ )

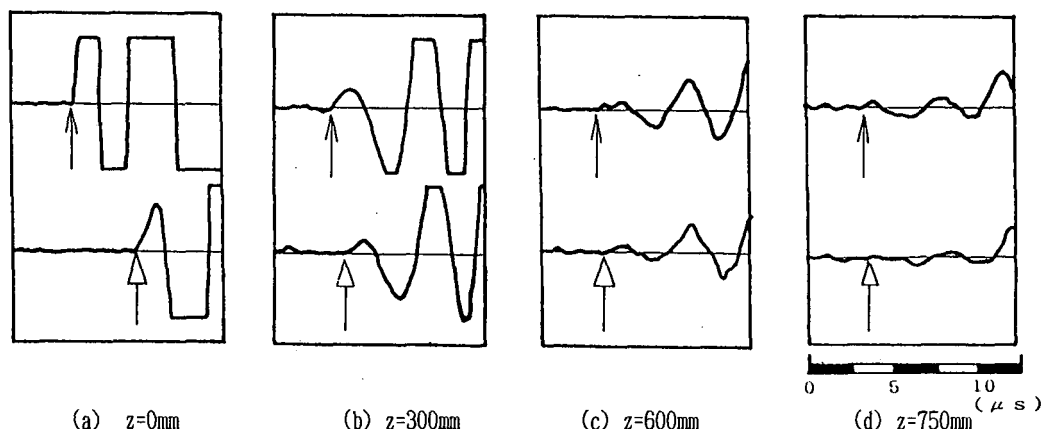


図-8 擬似AEから得られた波形の初動位置 ( $\theta = 20^\circ$ )

図-8は、 $\theta = 20^\circ$  の場合で、 $z=0, 300, 600, 750\text{mm}$  のときの結果である。 $z=0, 300\text{mm}$  では初動を容易に読みとることができる。また、 $z=600\text{mm}$  でも読み取ることが可能であるが、 $z=750\text{mm}$  では白矢印の位置で初動を読みとることは困難である。

以上のことから、今回の実験では孔壁から20mm程度離れた箇所が発生するAEに対しては、 $z=600\text{mm}$  程度までは十分に測定が可能といえる。ただし、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、大きな信号の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、初動の読みとれる $z$ の範囲はより大きくなると思われる。

## 5. まとめ

水圧破碎実験における亀裂発生方向を求める方法として、亀裂発生時のAEを利用したゾンデを開発し、その精度を理論的、実験的に検討した。その結果を以下に示す。

- (1) 開発したAEゾンデは、ボーリング孔の孔軸に垂直な面内の4箇所(90度間隔)にAEセンサーを取り付けたものであり水圧破碎により孔壁で発生したAEの到達時間差から亀裂の発生した方向を求めるものである。この方法によれば、亀裂の発生と同時にその方向(ボーリング孔が鉛直の場合は方位)を求めることができ、従来に比べて測定時間が飛躍的に短縮される特徴を有する。
- (2) AEゾンデによる亀裂発生方向の推定精度を理論的に検討した結果、水圧破碎の加圧区間の中心部(センサーとの離間距離727mm)で亀裂が発生した場合の精度は29度程度であった。加圧区間の最もAEセンサーに近い位置(センサー離間距離580mm)で亀裂が発生した場合でも24度程度であった。また、理論的には加圧区間内にAEセンサーを配置できれば、その精度は数度となり飛躍的に向上することがわかった。
- (3) AEゾンデを肉厚20mmの鉄製の円筒の内側に設置し、外壁を打撃して擬似AEを測定する実験を行った。その結果、P波初動の到達時間は理論的な結果と良い一致を示し、本ゾンデの有用性が確認された。

今後、AEセンサーを加圧区間内に配置するなどの改良を行ってゾンデの高精度化を図り、水圧破碎実験の作業性向上に役立てたい。

## 謝辞

最後に、数値解析と実験に協力頂いた山口大学大学院生柳之内浩君とAE & Pゾンデ製作に貴重な助言と指導を頂いた日特建設㈱の山懸秀年氏ならびに(株)日本パブリック(現在 国立極地研究所へ出向 第36次南極地域観測隊)中山芳樹氏に感謝の意を表す。

## 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