

# 弧状削進工法におけるビット位置の AE法による標定

阿部 司\*・杉森 真\*\*・新妻弘明\*\*\*  
・中島 隆\*\*\*\*

最近、生活関連施設の地下埋設法として弧状削進工法が行われている。本工法では、ビット位置の把握が重要であるが、筆者らは NKK 京浜製鉄所構内での削進試験において、AE 法を適用した。その結果、掘削作業中に計測されるパースト信号を、ビット位置標定に利用できることが判明した。本計測法は、掘削作業の中断もなく、ビット位置の監視が可能なることから、他の測定法と相補的に用いることができる。

**Keywords:** acoustic emission, source location, horizontal drilling, process monitoring

## 1. はじめに

最近、都市部における電力・通信用ケーブルの地下埋設化、あるいはガス管・上下水道管などライフラインの地下管路の伸びは日毎に増している。これらの埋設工事では、一般に開削工法により行われるが、この工法は交通への影響、安全性、さらに計画進路上の建造物や河川により、設計施工上の制約を受ける。このため、開削によらず小口径の孔をボーリング技術により、水平に掘削する弧状削進工法が開発されている。このいわゆる水平ボーリング工法では、まずパイロット孔を貫通させ、後に拡孔ビットおよび本管を取付けて引込む 2 工程方式が多く用いられる。パイロット孔の掘削にあたっては、石油井の掘削で用いられるコントロール・ドリリング技術を応用して、方位ならびに深度を制御しながら掘り進められる。掘進長は数百 m、深度は数 m から十数 m である。到達点の精度は、工事の性格上、数十 cm 以下におさめる必要がある。この精度の達成は、既存のコントロール技術では難しいために、何らかの方法によってビット先端位置を計測しながら掘進する必要がある。

ビット先端位置のうち深度については、傾斜計などを利用して、比較的精度良く計測されている。ビットの方位検出には、磁気方位計、ジャイロ、地中レーダ、ロケータなどが用いられている。磁気方位計は都市部に多い鋼構造物の影響を大きく受けること、ジャイロは地表付近での電磁波の減衰が大きく、計測範囲が限定されるなど、地下条件に左右される。一方、ロケータは掘管に電流を流し、ビット位置を検出する簡便な手法ではあるが、3 m 程度が計測限界深度であり、測定分解能も高くはな

い。したがって、従来の方法と併用し、欠点を補う新たな計測法が現在必要とされている。

ビット位置計測の補助手段としては、簡便であり、工事に影響を与えず、リアルタイムで計測でき、工程にフィードバックできることが望まれる。このような条件を満たす計測法として、掘削に伴って発生する AE 波の利用が提案されている<sup>1),2)</sup>。筆者らは、パイロット・ボーリングのビット位置計測法として AE 法を採用し、その問題点や位置標定法を検討すると共に、NKK 京浜製鉄所構内の埋立て地で行われた掘削試験において計測実験を行った。

本論文は、水平パイロット・ボーリングのビット位置標定に関して、ビットの地山打撃によって発生する AE 信号、および掘削中に発生する AE 信号をゾーン標定法によって標定する方法を検討すると共に、現場試験の結果を示したものである。

## 2. 弧状削進工法

弧状削進工法の概要を、Fig.1 に示す。最初に発進側、到達側ともに簡易な傾斜台を設ける。発進側の傾斜台にはパイロット孔を掘進する削進機を設置し、その周囲にパワーユニット、ポンプ、泥水・特殊減摩剤タンク、計測室、事務所などを配置する。パイロット孔の掘進は、パイロット管とその内部にある内管を削進機で回転させ先端ビットで掘削する (Fig.1 (1) 参照)。掘削された土砂はパイロット管内部に取込まれ、発進側にスラリー排土される。パイロット管の方向制御は、先端部の特殊ヘッドを働かせて行い、敷設線形に合うようにする。先端位置はジャイロシステムを用いて計測する。パイロット管が到達するころに、本管を接続するための傾斜台を据え付ける。到達後、パイロット管の先端ビットを取り外し、拡孔ビット、スイベル、シャックルを接続し、その後部に塗覆装本管を接続する (Fig.1 (2) 参照)。拡

\* 正会員 理博 東北大学助教授 工学部資源工学科  
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

\*\* 東北大学 大学院生

\*\*\* 工博 東北大学教授 工学部資源工学科

\*\*\*\* 正会員 日本鋼管(株) パイプライン部

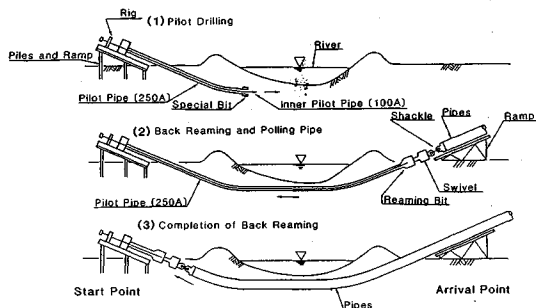


Fig.1 Schematic illustrations of the horizontal drilling technique.

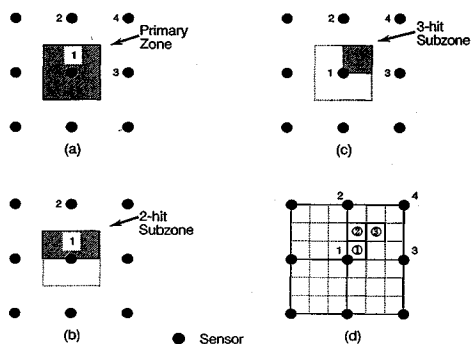


Fig.2 Concept of the zone-location method.

孔ビット径は本管径よりやや大きくしておく。削進機によりパイロット管を介して、拡孔ビットを回転し拡孔しながら本管を引込む。拡孔ビット内に取込まれた土砂は、パイロット孔掘進時と同様に、パイロット管内部より発進側スラリー排土されるようになっている。本管は順次溶接接続し、継手防食した後送り込んでいる (Fig.1 (3) 参照)。

一般に、ガス管などの地下配管は、他の埋設物や土地所有などの関係から、その敷設範囲が極めて限定されており、このため、このような埋設管を上記工法により敷設する場合に、管の掘進方向を高精度に管理する必要がある。特に、パイロット管先端が到達側に近づいた時の位置管理が重要であり、本計測はその点を対象としている。対象深度は1~10mであり、前述のように、深度については傾斜計などにより高精度で検出可能なため、水平面内での位置検出が重要となる。

### 3. 位置標定法とキャリブレーション

#### (1) AE 源標定法の原理および問題点

水平ボーリングにおいてビットから発生する AE 信号を検出し、その位置を標定する方法について考える。測定は地表から数 m 以内を対象としていることから、その範囲の速度構造は一般に複雑であることが予測される。このような場合には、少数のセンサによる決定論的な位置標定は、解が求まらないことが多く、不適当であることが知られている。したがって、多数のセンサを用いた観測と P 波到達時刻の最小二乗法による位置標定法、すなわち到達時間差法<sup>3)</sup>、および多数のセンサを用いたゾーン標定法が適していると考えられる。本解析で使用する到達時間差法は、一般に用いられている AE 源標定法と同じであるため、その説明は省略し、ゾーン標定法について述べる。この方法は、FRP 压力容器のき裂箇所の検出<sup>4)</sup>などの構造物の健全性評価、あるいは空港滑走路の陥没の監視などの地下計測の分野<sup>5)</sup>で用いられている。

この方法による AE 源の標定原理を、Fig.2 に示す。この図で、黒丸はセンサの位置を表す。各々のセンサに信号が到達したとして、最も早く信号の到達したセンサ、例えば (a) に示すセンサ 1 の周囲に初期領域が形成される (Primary zone)。次に 1 と 2 のセンサを用いて、AE 源の位置は (b) のように範囲は狭くなる (2-hit subzone)。さらに 1 と 3 のセンサから、範囲は (c) の如く限定される (3-hit subzone)。ところが実際の解析においては、センサ間の信号到達時間差に有意性が認められないこともある。そのような場合にはセンサ間を 3 等分に分割して、(d) の③のように AE 源を中間領域に標定する。

水平ボーリングの AE 源標定における問題点として、次の事項があげられる。

- ① 発生する AE に関する問題：到達時間差法では、バースト型の AE の検出が必要であるが、掘進に伴いそのような AE が発生するかどうか。また、AE の発生位置がビット位置と一致するかどうか。
- ② 地下の速度構造に関する問題：水平ボーリングでは地表付近の掘削を行うが、地表付近は砂、粘土、玉石、碎石、コンクリートなど、弾性波伝搬速度が著しく異なる媒質が不均質に分布していることが予想され、速度構造の正確な把握は難しいこと。
- ③ 検出する AE 信号の伝搬モードと周波数帯域：地中で発生する AE 信号を地表で検出する場合、直接 P 波・S 波、屈折 P 波・S 波、反射波、表面波などが渾然と到達する。したがって、現場計測で検出され、位置標定に用いることができる信号のモードと周波数帯域がどのようなものであるかが問題となる。
- ④ 位置標定アルゴリズム：速度構造が複雑で、かつ把握が困難な場合に適用できる位置標定アルゴリズムの選択。
- ⑤ キャリブレーション法：位置標定アルゴリズムと現場状況に即したキャリブレーション法の選択。

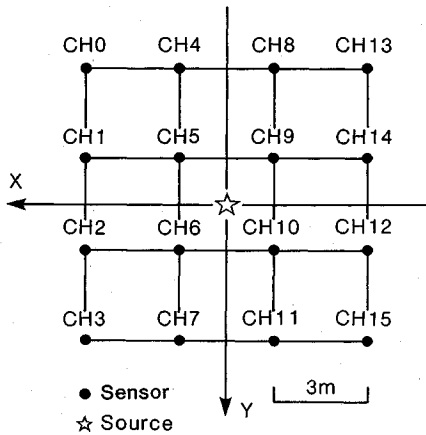


Fig.3 Array configuration in the calibration tests.

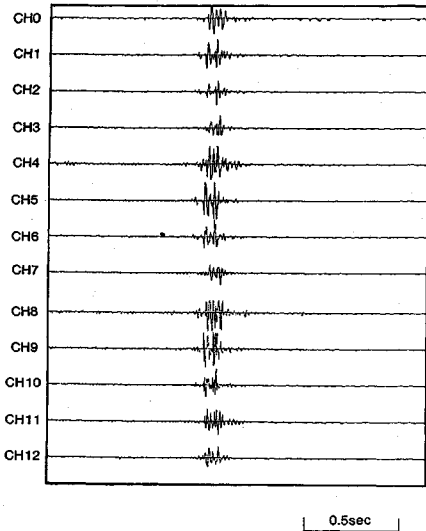
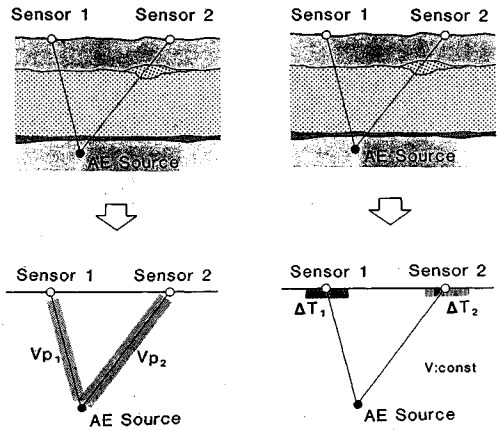


Fig.4 Waveforms recorded at the source depth of 3m.

(2) 計測法および速度構造モデル

1989年2月NKK京浜製鉄所構内の埋立て地において、本実験場の速度構造の調査ならびに計測システムのチェックをかねた予備実験を行った<sup>6)</sup>。固有周波数28 Hzの上下動速度型センサ (McSEIS-122H) を、Fig.3のように、地表に3m間隔で16個配置した。このアレイの中心に土質調査孔を掘削し、地上からボーリングロッドで孔底を叩いて弾性波を発生させ、このアレイ内の速度構造を調べた。孔底深度は1mから5mの範囲で、1mおきに変えた。弾性波発生時刻 ( $T_0$ ) を求めるために、ロッド先端にトリガー用のセンサを取付けた。受振された振動波形は、応用地質 (株) 製弾性波探査システム McSEIS-1600 (24 ch, 10 Hz-1 KHz, 12 bit, 4096 Word メモリ内蔵) により記録し、パーソナルコンピュータのフロッピーディスクに取込んだ。計測中のア



a) Unique-velocity model b) Unique-delay model  
Fig.5 Concept of unique-velocity and unique-delay models.

Table 1 Unique-velocities at the source depth of 3 m.

| sensor number | P - wave velocity ( m/s ) | sensor number | P - wave velocity ( m/s ) |
|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|
| CH 0          | 354                       | CH 8          | 413                       |
| 1             | 536                       | 9             | 818                       |
| 2             | 578                       | 10            | 682                       |
| 3             | 458                       | 11            | 507                       |
| 4             | 457                       | 12            | 573                       |
| 5             | 603                       | 13            | 271                       |
| 6             | 792                       | 14            | 420                       |
| 7             | 588                       | 15            | 368                       |

レイのゲインは46 dB、サンプリング周波数は2 KHzであり、カットオフ周波数280 Hzのアンチエイリアシングフィルタ (ローパスフィルタ) を用いた。得られた観測波形の一例を、Fig.4に示す。チャンネル番号は、Fig.3のセンサの位置に対応している。

多点観測により AE 源位置標定を行う場合には、速度構造が重要となる。本実験場は埋立て地であることから、速度の著しい不均一性が予想される。したがって、速度モデルとしては、均質モデルや層状モデルの他に、Fig.5に示すように、各センサごとに固有の伝搬速度を有するユニークベロシティ・モデル、あるいは固有の遅延時間を与えるユニークディレイ・モデルなどが考えられる<sup>3)</sup>。

いま、各センサまでの距離を  $L_i$ 、P 波の到達時刻を  $T_i$  とすれば、ユニークベロシティ  $V_{pi}$  は、
$$V_{pi} = L_i / (T_i - T_0)$$
 と表わされる。また、ユニークディレイ  $\Delta T_i$  は、
$$\Delta T_i = (T_i - T_0) - L_i / V$$
 となる。ここで、 $V$  は  $V_i$  の平均値であり、均質モデル

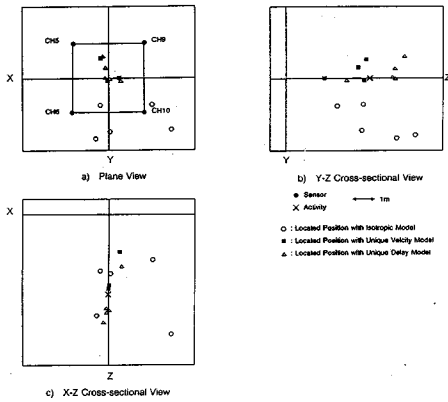


Fig.6 Results of the least-squares method applying to three velocity models.

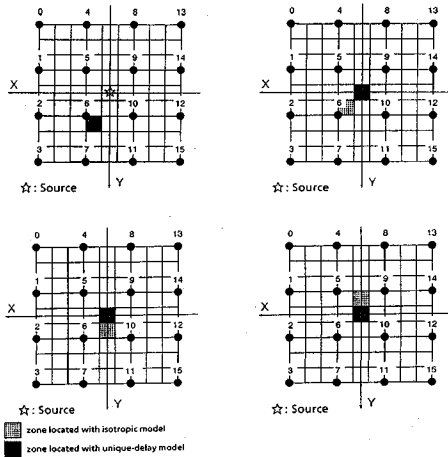


Fig.7 Results of the zone-location method for isotropic and unique-delay models.

の速度に相当する。Table 1 は、深度 3 m の振源により求められたユニークベロシティの一例である。本表に見られるように、速度は 271 m/s ~ 818 m/s と大きくばらついており、本実験場の速度構造の複雑さが推測される。

(3) キャリブレーションの結果

Fig.6 は、最小二乗法による位置標定について、均質モデル、ユニークベロシティ・モデル、ユニークディレイ・モデルの三つのモデルによる結果を比較したものである。均質モデルの結果は、他のモデルの標定点が比較的振源位置付近に収束しているのに対し、大きくばらついている。

これに対して、Fig.7 はゾーン標定法による均質モデルとユニークディレイ・モデルの結果を比較したものである。同図で黒丸はセンサ位置を表わし、センサ間隔は 3 m である。どちらのモデルで標定しても、振源位置付

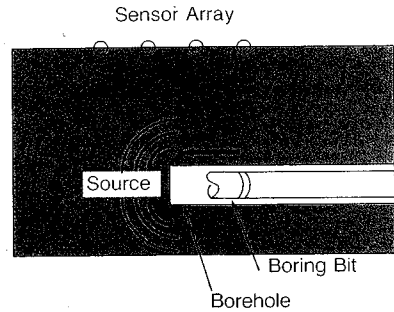


Fig.8 Generation of AE signals by striking soil with drilling bit.

近に標定されている。これらの結果から、最小二乗法では均質モデルの標定結果は大きな誤差を伴うのに対して、ゾーン標定法ではその誤差は比較的少ない。各種伝搬モードの混在する本測定のような場合、P 波の到達順序のみを検出すればよいゾーン標定法が、P 波の初動の読取りを必要とする最小二乗法に比べ、安定な標定結果が得られる。それ故、本実験の解析法として、ゾーン標定法を採用した。

4. 現場実験

(1) 孤立 AE 波によるビット位置の標定

AE 法によりビット位置を標定しようとする場合、AE の発生源として、どのようなものを利用するかが問題となる。本実験では、まず、掘進作業を一時中断し、パイロット管先端部に取付けられている掘削ビットを地山に衝突させ、その際に発生する AE 波を前述の方法で位置標定することを試みた。その概念図を、Fig.8 に示す。

本方法では、掘進に伴い発生する種々の雑音の影響がなく、また、発生する AE 波が孤立波であるため、各センサへの P 波到達時刻の検出が可能であり、先に行ったキャリブレーションの結果がそのまま適用できる利点がある。しかし、同時にビットを地山に衝突させる際に、孔端からのみ AE 波が発生するとは限らないこと、地山が砂質土や粘土のように極端に軟弱な場合、標定に十分なエネルギーが得られないこと、掘進作業を中断する必要があることなどの難点もある。

実験は 1989 年 3 月に、さきのキャリブレーション実験と同じ場所で、同じアレイ配置で実施した。計測は掘進長 138 m の地点から 0.5 m ピッチで行い、144 m までの間で 13 回行った。計測システムはキャリブレーション実験と同様である。地表に設置したセンサから増幅器を通した信号をトリガーとし、さらに振動の初動を読取るためにプリトリガーを働かせた。測定開始時のビット位置は、掘管長ならびにジャイロ計測の結果から、アレ

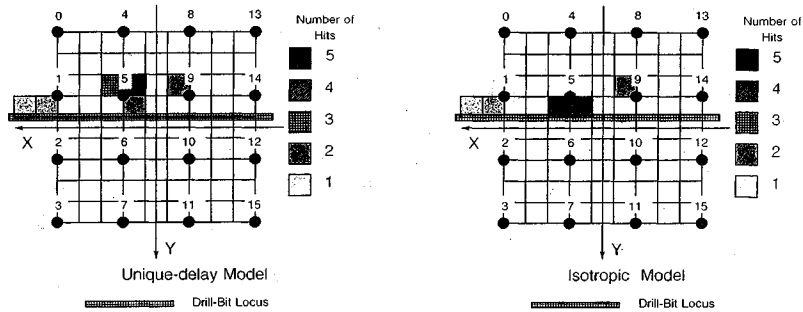


Fig.9 Estimated bit loci by the zone-location method.

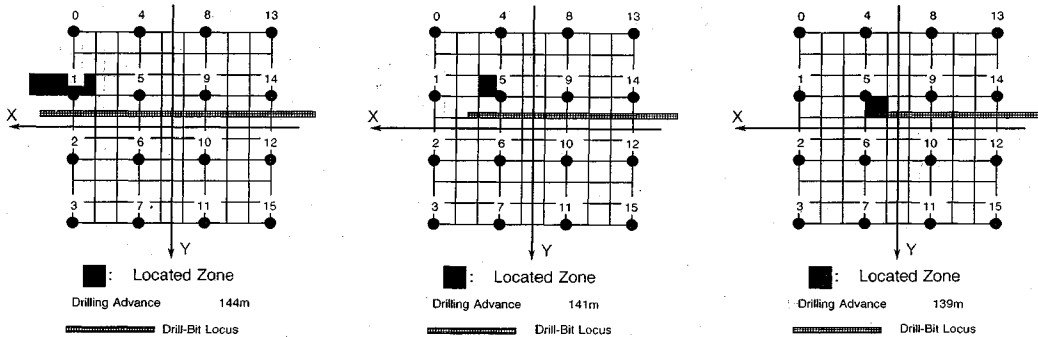


Fig.10 Estimated locations for different drilling lengths.

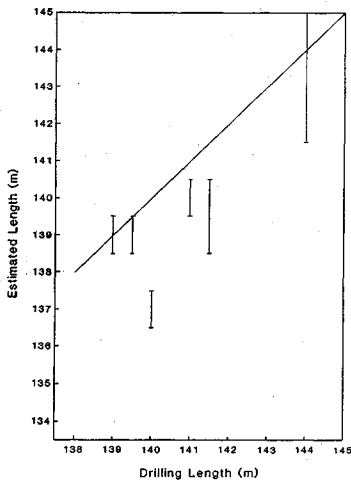


Fig.11 Relationship between estimated and drilling lengths.

の中心付近にあり、深さは約2.8mと推定されている。

Fig.9は、水平面内の孔跡の速度構造による相違を示したものである。(a)はユニークディレイ・モデル、(b)は均質モデルによる結果であり、波線はジャイロならびにロケータにより推定された孔跡である。本図によれば、均質モデルによる標定の方が、ユニークディレイ・モデルによる標定より優れていることがわかる。

Fig.10は、掘進距離が139, 141, 144mの地点でのビット位置の標定例を示す。ただし、速度構造は、上述の結果に基づき、均質モデルを用いている。また、ハッチングされた部分が標定ゾーンである。これらの図から明らかかなように、ビット位置は予想ビット位置近くに標定されている。

Fig.11は、掘管長から求まるX軸方向の位置と標定位置との関係を示したもので、実線が真の値であると予想される。本図に見られるように、測定結果は真の位置の後方に標定される傾向にある。これは、ビットで地山を叩く際に孔端ばかりではなく、途中抗壁とのこすれにより、AE波を発生しているためと考えられる。この傾向は、孔端地山が軟質であるときに著しい。

(2) 連続掘進音によるビット位置の標定

孤立AE波によりビット位置の標定が可能であることが、前述の実験により明らかになった。しかし、本方法は、作業の中断を伴う等の難点があった。もし、連続掘進中に発生するAE波によりビット位置標定が可能であれば、その工学的意義は大きい。連続掘進音により、ビット位置を標定しようとする場合に、まず、①現実の掘進において、何らかの方法により位置標定の可能なAE波が発生しているかどうか、②観測される連続掘進音は直達P波ばかりでなく、屈折波、変換波、表面波など、多様なモードの波の合成であり、このような状況

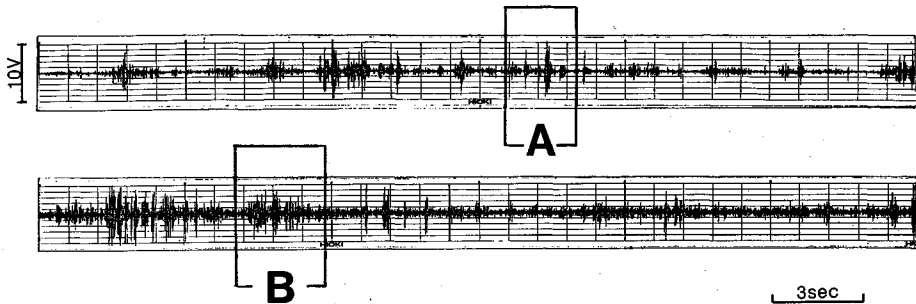


Fig.12 Examples of observed AE signals during drilling operations.

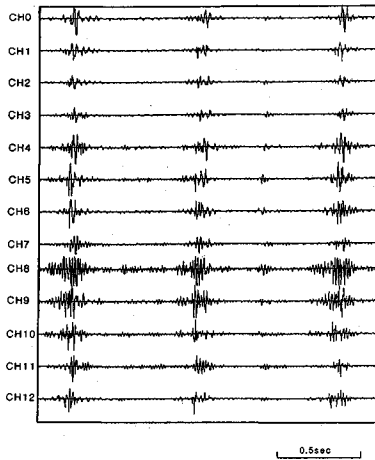


Fig.13 Typical burst AE signals detected by all sensors.

下で現実位置標定が可能であるかどうかの2点が問題になる。

Fig.12に、連続掘進中に観測された波形の一例を示す。同図に見られるように、実験中に観測された波形には、図中A部に示すような小振幅の連続信号に大振幅のバースト状の信号(以下、バースト信号と呼ぶ)が重畳されたものが多数存在する。また、B部に示すように、振幅の大きな信号が継続的に観測される場合もある。

Fig.13に、各センサで観測されたバースト信号の一例を示す。本図に見られるように、バースト信号は、各チャンネルにそれぞれ遅れを持って到達しており、バースト信号に着目することにより、各センサ間のAE波の到達時間差を決定できることがわかる。連続波を用いた位置標定では、波の到達順序を決めるに際し、注目すべき信号に変換波やコーダ波が重畳されているため、孤立波の場合のように、単純に波形観測により波の到達時刻を検出することは困難である。また、掘削機の発生する雑音も無視できない。さらに、観測されたバースト信号は、P波とは限らないために、先のキャリブレーション結果を用いて、通常の到達時間差法で位置標定するこ

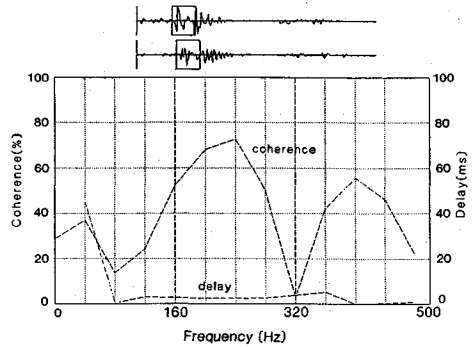


Fig.14 An example of a cross-spectral analysis.

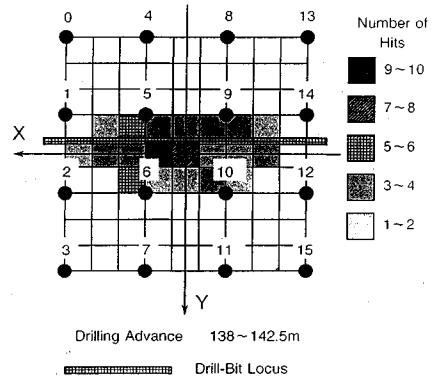


Fig.15 AE event distribution of bit location determined between 138 and 142.5 m.

とは無理である。そこで本解析では、各チャンネルの信号間でのクロススペクトル解析を行い、ある特定の周波数成分におけるディレイを算定した。これより各チャンネルへの信号の到達順序のみを評価し、速度構造に鈍感なゾーン標定法を用いて、ビット位置の標定を試みた。

Fig.14は、クロススペクトル解析の一例である。本解析ではBlackman-Tukey法により<sup>7)</sup>、2つの波形間の類似度を表わすコヒーレンス、時間遅れを意味するディレイを求めた。同図から、コヒーレンスの値が50%以上、および安定なディレイを示す周波数帯は、150-300 Hz

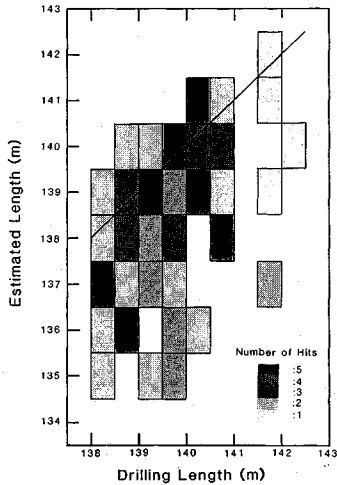


Fig.16 Relationship between estimated and drilling lengths.

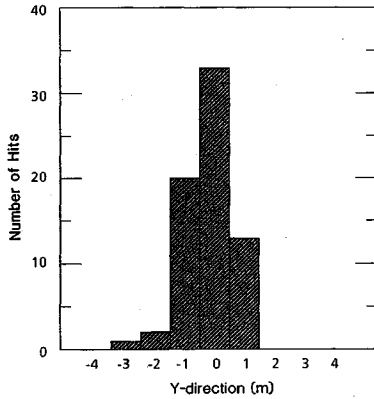


Fig.17 AE event distribution of the deviation from the actual bit location in the Y axis direction.

である。したがって、この帯域の成分に着目して、各センサへの到達順序を決定した。解析に用いたパースト信号は84個である。

Fig.15は、均質モデルによるゾーン標定法によりビット位置を標定した結果である。同図は、掘進長138.0~142.5 mにおける標定ゾーンの度数分布を示している。図中の色の濃い部分は、標定頻度の高いゾーンを意味する。この図から明らかのように、実際のビット軌跡の周囲で、AE源位置の標定頻度が高くなっており、標定はある程度成功している。

Fig.16は、掘進長から予想されるX軸方向の位置と標定位置との関係を示したものである。実線が真の値である。この図から、標定頻度の高いゾーンは、掘進に伴い実線に沿って移動している様子が明白である。標定位置は、標定誤差が零を示す実線上に数多く分布しており、掘進方向の標定精度は良好とみなされる。また、ビット

後方約3 m付近にも標定頻度の高い部分があり、これも、掘進に伴って移動している。この位置はほぼスタビライザの継目と一致する。したがって、このAEはスタビライザと掘管との衝突により生じたAEであると考えられる。実際の計測では、X軸方向の位置は掘管の長さや傾斜から計算できるため、Y軸方向の検出能力が特に問題となる。

Fig.17は、Y軸方向の検出頻度を示すヒストグラムである。他の計測法の結果から、ビットはY軸上でマイナス方向に約0.5 mずれた地点を通過していると推定される。したがって、Y軸方向の標定誤差は、±0.5 m程度とみなすことができる。本結果は実用的な値である。このように連続掘進音では、多数の信号の統計的处理によって、信頼性の高い位置標定が可能となる利点がある。

### 5. おわりに

ライフラインなどの地下埋設化のための水平ボーリングにおいて、AEを利用したビット位置標定法について検討を加えると共に、現場実験によりその有効性を評価した。まず初めに、キャリブレーション実験において速度構造を調べ、仮定した速度モデルで2つの標定法を比較した。そして、複雑な速度構造を示す本実験場のような場合には、ゾーン標定法の方が適当であることを確かめた。次に、この方法をビットで地山を叩いて発生する孤立AE波に適用し、ビット位置標定を行った。標定精度は現場の要求に対して必ずしも十分とは言えないが、他の測定法との相補的使用の見通しを得た。更に、掘進中に発生するパースト信号にも着目し、クロススペクトル解析とゾーン標定法とを組み合わせることにより高精度のビット位置標定ができることを明らかにした。本解析法は、掘削作業を中断することなく、ビット位置の監視ができることから、水平ボーリング工法で重要なビット位置標定法の一つの手法として利用できるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) Niitsuma, H. and Chubachi, N. : AE monitoring of well-drilling by using a downhole AE measurement system, Proc. 8th Inter. AE Symp., JSNDI, pp.436~445, 1986.
- 2) Asanuma, H., Niitsuma, H., Sato, M. and Chubachi, H. : Characterization of rock formation by means of AE monitoring during well drilling, Proc. 9th Inter. AE Symp., JSNDI, pp.248~257, 1988.
- 3) Hardy, H. R., Jr. : Source location velocity models for AE/MS field studies in geologic materials, Proc. 8th Inter. AE Symp., JSNDI, pp.365~388, 1986.
- 4) Fowler, T.J. : Acoustic emission testing of chemical process industry vessels, Proc. 7th Inter. AE Symp., JSNDI, pp.421~449, 1984.

- 
- 5) Hardy, H. R., Jr., Belsky, R.M. and Ge, M. : Acoustic emission/microseismic source location in geotechnical applications, Proc. 4th Eur. Confer. Non-destruct. Testing, London, 1984.      るビット位置の AE 法による標定, 第7回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.229~235, 1989.
- 6) 新妻弘明・京極孝子・中島 隆: 水平ボーリングにおけるビット位置の AE 法による標定, 第7回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.229~235, 1989.      7) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1982. (1990.8.20 受付)
- 

## DETECTION OF BIT LOCATION BY ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE IN HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING

Mamoru ABE, Shin SUGIMORI, Hiroaki NIITSUMA and Takashi NAKAJIMA

In recent years, a horizontal drilling technique has been successively applied to embed life-lines underground. We have utilized an acoustic emission (AE) technique, as a means to detect the bit location during a horizontal drilling conducted at NKK Oogishima field. We employed the zone-location method, which provide location information in the cases that considerable attenuation exists and velocity structure is complicated.

AE signals were generated by striking soil with drilling bit.

Burst signals observed during the drilling operations were also analyzed. Arrival time sequences for the signals were determined by a cross spectral analysis. It has been revealed by the experiment that the AE source location for the burst signals can successfully be used for the detection of bit location without stopping drilling operation.

---