

AE を用いたシールドマシン位置の検知方法

藤 倉 裕 介 秩 父 顕 美 ^{*1}
吉 野 広 司 渋谷 光 男 ^{*2}
宮 崎 利 明 ^{*3}

概 要

近年、シールド工事では到達立坑を構築しない管渠同士の地中接合を採用するケースが増加しつつある。今回計画されたシールド工事では、接合部での土被りが 65m と大深度のため、地上からのボーリングによる観測孔設置や地盤改良等が大規模かつ長期間の工事となること、都市部での施工であるために作業用地の確保や道路規制に伴う交通渋滞、地盤改良による地下水への影響など環境問題も含め多くの課題が検討された。このような背景から、当社の音響診断技術を応用し、シールドマシンの掘削音が地中内で距離減衰することを利用したシールドマシン位置検知システムが計画された。本報告では、マシン位置検知システムの適用に際して実施した模擬実験の結果および位置の検知方法について報告するとともに、現場での計測結果について紹介する。

Position Detection Method for Shield Machines using Acoustic Emission

Abstract

Recently, shield tunnel docking methods without the use of conventional vertical shafts have been adopted in many projects. For such sites we have developed a method for determining the position of shield machines using acoustic emission measured from inside the tunnels. This system utilizes the distance decay effect of excavation sounds produced from shield machines. In this report, the outline of the detection system and the results of laboratory tests to verify the applicability of the system were discussed. In addition, an application of the system to a tunnel docking project was also shown.

In this project, it was very difficult to find suitable sites for vertical shafts, because the tunnel was located under busy roads in an urban area at the depth of 65m. As a result it was feared that the excavation of such shafts could cause heavy traffic jams and/or environmental issues (such as lowering of the underground water table).

キーワード: シールド, 地中接合, AE

*1 株式会社高環境エンジニアリング 工学博士

*2 土木本部機械部

*3 横浜支店土木部

§1. はじめに

近年のシールド工事では、到達立坑を構築しない管渠同士の地中接合を採用するケースが増加しつつある。従来の地中接合では次のような対策を行うのが一般的である。

- ・マシンの位置把握に高い測量精度が要求されるため、観測孔を設置して坑内基準線をチェックする。
- ・接合地点での止水と土砂流入防止を図るため、補助工法（薬液注入や高圧噴射注入、凍結等による地盤改良）を用いた地山安定処理を行う。
- ・マシンが接近した時点で水平ボーリングを行い、相互の位置関係を検知する。

今回計画されたシールド工事では、到達方法が掘削の完了した馬蹄型の既設トンネルへの地中接合であり、接合部での土被りが 65m と大深度のため、地上からのボーリングによる観測孔設置や地盤改良等が大規模かつ長期間の工事となることが予想された。また、作業用地の確保や道路規制に伴う交通渋滞、地盤改良による地下水への影響など環境問題を含めた多くの課題が抽出された。

このような背景から、当社の音響診断技術を応用し、シールドマシンの掘削音が地中内で距離減衰することを利用したシールドマシン位置検知システムが計画され、検知センサーの設置工事¹⁾が実施された。本システムは、到達立坑や観測孔、地盤改良といった地上部からの大規模な工事を必要としないため、地上の生活環境に与える影響は小さく、さらに環境負荷低減という観点からも貢献可能な技術である。本報告では、マシン位置検知システムの適用に際して実施した模擬実験の結果および位置の検知方法について示すとともに、現場での計測結果について紹介する。

§2. システムの概要

2.1 音響診断技術の適用

物体が巨視的な破壊に至る前に内部に微細な割れが発生し、その割れの進行に伴って弾性エネルギーが開放され、弾性波（超音波）が生じる。この現象はAE（Acoustic Emission）と呼ばれ、このAE波による振動をセンサーで計測し、機械などの設備診断に利用し、欠陥や異常の検出を行う方法が古くから多く行われている。土木分野においても、例えばコンクリート工学や地盤工学の分野で利用されている。当社でもAEによる地滑り発生前のわずかな地盤の変異音を察知する音響診断技術をシールド工事に適用し、目で見ることのできない切羽で発生した音を聞くことにより、土質性状の変化や異常事態の発生を感覚的に把握し、それによって、シールドカッタの回転速度や推進力、排土方法

などを調整したり、機械の異常を即座に把握するシステム²⁾を実用化している。

2.2 シールドマシン位置検知システムの概要

今回計画されたシールドマシン位置検知システムは、地滑り予知やシールドマシンのカッター磨耗量の定量化などに適用したAEによる診断技術²⁾を応用した技術である。システムの概念図を図 1 に示すが、シールドマシンの到達地点には、φ 25mm、長さ 30m のアルミ製の検知棒を上下左右の 4 本埋設してあり、この検知棒の端部にAEセンサーを取り付けてある。4 本の検知棒およびAEセンサーは、シールドマシンが地盤を掘削する際の振動を受信する。本システムは、この検知棒に近接または接触する際に受信された振動の変化を解析し、シールドマシンの位置を推定し、シールドマシンの姿勢制御管理に対応させるものである。

§3. 模擬地盤による検証実験

3.1 模擬地盤の作製

図 1 に示す本システムの概念を検証する目的で、室内実験を実施した。実験に用いた模擬地盤は、1000mm×1000mm×1000mm の大きさとし、模擬地盤内部にAEセンサーを取り付けたφ 20mm のアルミ製の検知棒 4 本を埋設した。検知棒の両端部が地盤中に埋設するよう、あらかじめ作製した型枠内に設置し、模擬地盤材料を打設した。模擬地盤は、到達時の掘削地盤が土丹であることを想定し、シールド工事に利用されている裏込め材をもとに表 1 に示す配合とし、A材をあらかじめミキサーにて練り混ぜた後、打設直前にB材を添加し、攪拌して作製した。

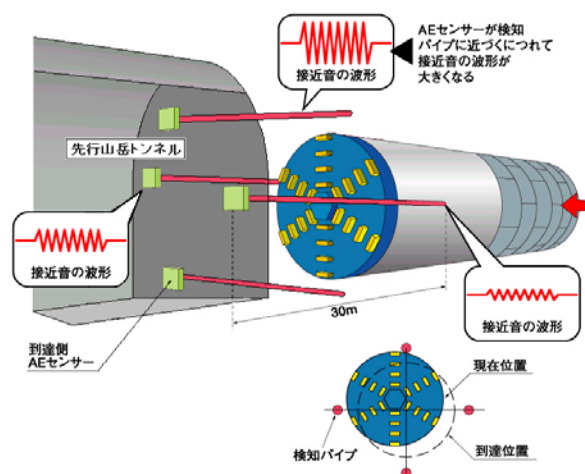


図1 システムの概念図

3.2 検証実験の概要

実験の概念図を図2に示す。上記の要領で作製した模擬地盤にAEセンサーを設置し、計測装置に接続後、φ100mmのコンクリート用のコアカッターを図2に示すように設置し、コアカッターの電圧を調整しながら低速回転にて、模擬地盤を削孔した。削孔による弾性波は、模擬地盤内に埋設されたアルミ製の検知棒を伝達してAEセンサーに受信される。受信されたAE信号は計測装置²⁾において自動的に信号処理され、AEカウント数や最大振幅値などのパラメータに書き換えられる。これらパラメータは、設定した一定時間間隔(例えば、30 秒間あるいは1分間と設定)で計測装置に接続したパソコンに蓄積される。シールドマシン位置(削孔位置)の推定方法は、これらの計測データを別途解析することにより検討した。なお、計測装置²⁾およびAEセンサーにおいて設定できる計測の設定条件を表2に示す。計測波形データの特徴は、対象となる地盤の特性や削孔方法などに起因して異なる。そのため、表2に示す設定条件を任意に変化させ、削孔位置を明確に判定可能な条件を調べた。

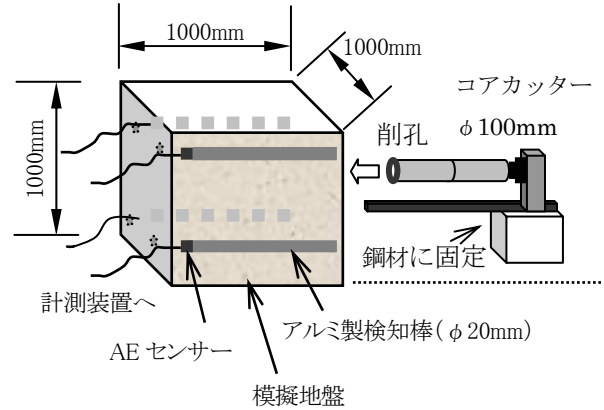


図2 検証実験の概念図

表1 模擬地盤の配合

単位量(kg/m ³)				
A材				B材
W (水)	C (セメント)	S (砂)	助材 (ペントナイト)	急硬材 (水ガラス)
830	320	690	50	70

3.3 計測波形データ

計測結果の一例を図3に示す。AE波形は、コアカッターにより模擬地盤を削孔中、継続的に計測される。図3は削孔時間 30 秒間ごとの波の振幅値(単位:V)のカウント数の分布状況を計測チャンネルごとに示したものである。図3に示すように最大振幅値は一定値ではなく、ある幅をもって山型に分布することが分かる。

表2 計測の設定条件

項目	設定条件
利得	20dB, 30dB, 40dB
しきい値	0.5V~10V (任意に設定可)
周波数帯域	400Hz~16kHz
AEセンサー	加速度センサー(25kHz 共振)

3.4 削孔位置の算定方法の仮定

a) 波動の減衰理論³⁾

無限媒体内を伝搬する平面波の方程式は、変位 u で示すと、式(1)が与えられている。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \nabla^2 u \quad (1)$$

ここに、 u は変位、 t は時間、 $C = \sqrt{E/\rho}$ で、 E はヤング率、 ρ は密度である。また、 ∇ は式(2)で与えられる。

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2)$$

ここで、一点から全ての方向に同じ速度で広がっていく球面波について考える。波源を x, y, z 座標の原点にとると、波源からの距離 r は、

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

となるので、

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r} \frac{\partial u}{\partial r}$$

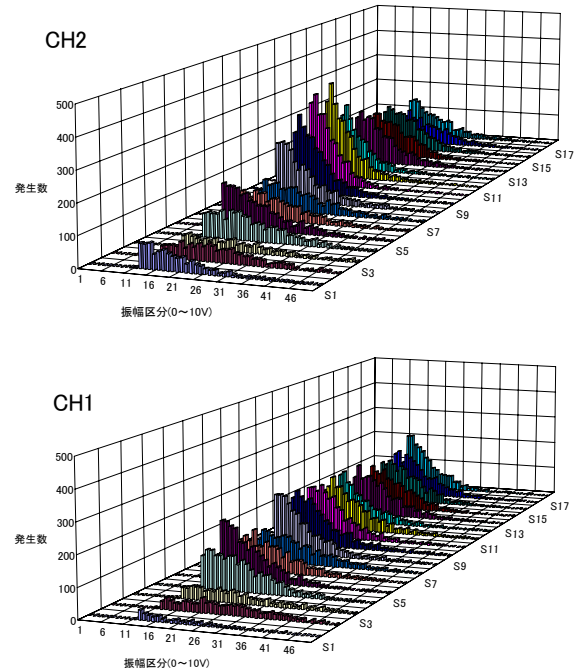


図3 計測波形データの一例(CH1, CH2)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{x^2}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{x^2}{r^3} \frac{\partial u}{\partial r} \quad (4)$$

y 方向と z 方向についても同様に表し、これらを元の式に代入して整理すると、式 (5) となり、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{C^2}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r \cdot u) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (r \cdot u) = C^2 \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r \cdot u) \quad (5)$$

この一つの解として、 $r \cdot u = f(r - Ct)$ が得られる。

$$u = \frac{1}{r} f(r - Ct) \quad (6)$$

すなわち、球面波の場合には、振幅は距離に反比例して減衰することを示している。しかし、実際の地盤内は一樣ではなく、完全弾性体では無いため、粘性減衰を考慮するべきであり、粘性による振幅減衰は次式で示される。

$$u = u_0 \exp \left\{ -\frac{\omega}{2QC} \cdot x \right\} \quad (7)$$

u_0 は基準点の振幅、 ω は角振動数、 C は伝播速度、 Q は媒質の減衰特性を表す無次元量であって、 Q の値が小さいほど波動の伝播に伴う減衰が大きい。また、波動の減衰は周波数の大きい波ほど激しいことが分かる。例えば、未固結地盤の Q の値は 5～20 程度である場合が多く、岩石の Q の値は 20～200 の範囲内にある。

b) 算定方法の仮定

以上の理論により、式(7)を用いて振幅の減衰の程度を算定した。まず、シールドマシンから発せられる振幅値 u_0 を 5.0Vとした。 C は伝播速度であるので、洪積層の弾性波速度として、1000m/sを与え、 Q は 20 または 100 を与えた。角速度 $\omega = 2\pi f$ より、周波数 $f=2000\text{Hz}$, 8000Hz を与え、基準点の最大振幅値 (5V) の距離減衰を算定した結果例を図 4 に示す。図 4 中の距離は、実際の現場におけるシールドマシンと検知棒との離隔の最大値である 1.5m までを示した。図 4 より、距離が 1.5m 程度以下での減衰の程度は、ほぼ直線的に変化することが分かる。また、現状のシステムでは、地盤中の C や Q の正確な値を逐次算定しながら計測を行うことは困難であるので、今回の計測の範囲では、最大振幅値が距離により、線形的に減衰すると仮定した。

3.5 削孔位置の算定結果

以上、検証実験の計測データおよび算定方法をもとに、削孔位置の検証を行う。削孔位置は半径 R の円を考え、中心座標を (X,Y) とおき、図 5 に示すような座標系を考える。また、各センサーの設置位置の座標をそれぞれ

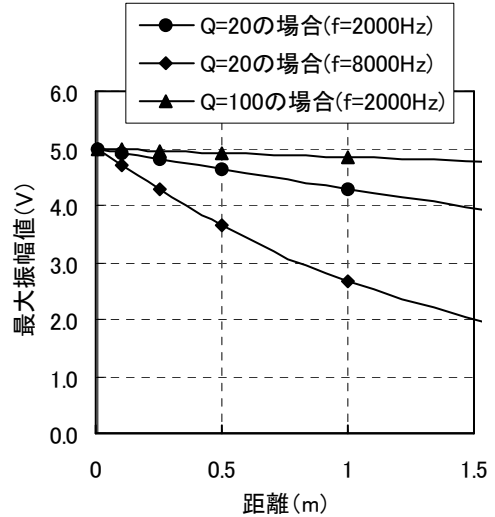


図 4 最大振幅値の距離による減衰(例)

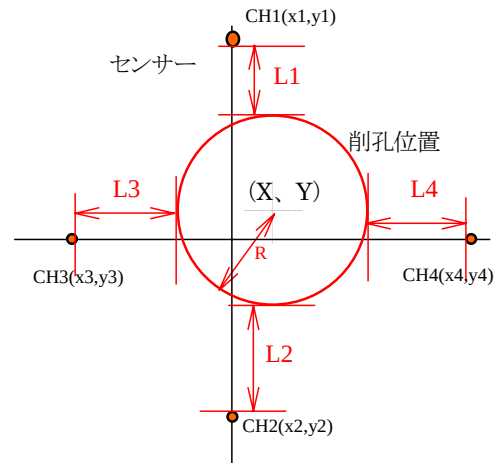


図 5 削孔位置算定の座標系

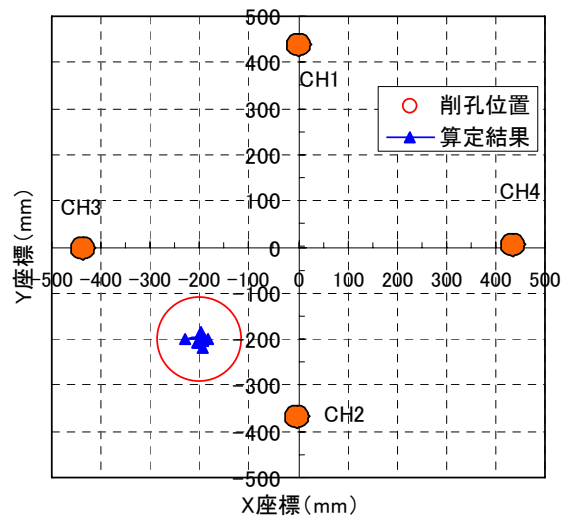


図 6 模擬地盤における削孔位置と算定結果の一例

(x_i, y_i) と与え、削孔位置(円の外周)から各センサーまでの距離をそれぞれ L_i とする。距離 L_i は、計算を簡略化するため、図 5 に示すように X 軸あるいは Y 軸と平行な直線距離として与えた。CH1 と CH2 とのセンサー間の距離は、 $y_1 - y_2 = L_1 + L_2 + 2R$ で表され、 $L_1 + L_2 = y_1 - y_2 - 2R$ は一定値となる。次に CH1 と CH2 から得られた AE 波形の振幅値をそれぞれ A_1, A_2 とすると、振幅値が距離より線形的に減衰する(振幅値は距離に反比例)という仮定より、 $L_2/L_1 = A_1/A_2$ の関係が成り立ち、 $L_1 + L_2 = \text{一定}$ より、 $L_1/(L_1 + L_2) = A_2/(A_1 + A_2)$ が得られる。すなわち、削孔位置の中心座標 (X, Y) は、各センサーの座標および AE 波形から得られた振幅値を用いて、式 (8) で表される。

$$Y = y_1 - R - (y_1 - y_2 - 2R) \left(\frac{A_2}{A_1 + A_2} \right)$$

$$X = x_4 - R - (x_4 - x_3 - 2R) \left(\frac{A_3}{A_4 + A_3} \right) \quad (8)$$

図 6 は、図 3 に示す最大振幅値を計測時間 30 秒間ごとに平均値を算定し、これを式 (8) 中の $A_1 \sim A_4$ にそれぞれ代入して求めた座標値の推移を示す。図 6 中には、模擬地盤における各センサーの位置および削孔位置を示す。図 6 より、振幅値の平均値を用いて算定した座標は実際の削孔位置をほぼ示していることが分かる。ただし、模擬地盤を用いた実験では、コア削孔が模擬地盤内の約 100mm 以深まで進行すると、模擬地盤の境界面における反射波の影響を受け、座標の算定結果がばらつくような現象を生じた。

§4. 現場計測の結果

4.1 検知棒の設置工事^{1), 4)}

本システムの適用が計画された現場では、シールドマシンの到達側の既設トンネルの切羽からパーカッションドリルで 40m の水平削孔を行い、上下左右 4 本の検知棒を設置した。また、削孔穴と検知棒の隙間にはセメントミルクを注入した。検知棒は、到達から 10m 手前の地点でシールドマシンの外周との離隔をゼロとし、40m 手前の地点で離隔が 1500mm となるように放射状に設置した。検知棒の設置後、孔曲がり測定機を用いて設置精度を確認するとともに、シールド基線に対する検知棒の位置座標を求めた。

4.2 計測システム⁴⁾

計測システムは、4 チャンネル仕様の AE 計測装置、波形観察用のオシロスコープ、テープレコーダおよびパソコンで構成される。シールドマシンの掘削により発生する弾性波は地盤内の検知棒を伝達して AE センサーに受信される。到達側の地上には計測室を設置し、パソコンにて自動的にデータ解析を行った。その解析結果をインターネット通信で発進基地の中央制御室に送信し、図化した。シールドマシンのオペレータは、シールド機の位置をリアルタイムで確認することができ、この計測結果を掘進中のシールド機の姿勢方向制御に反映することができる。

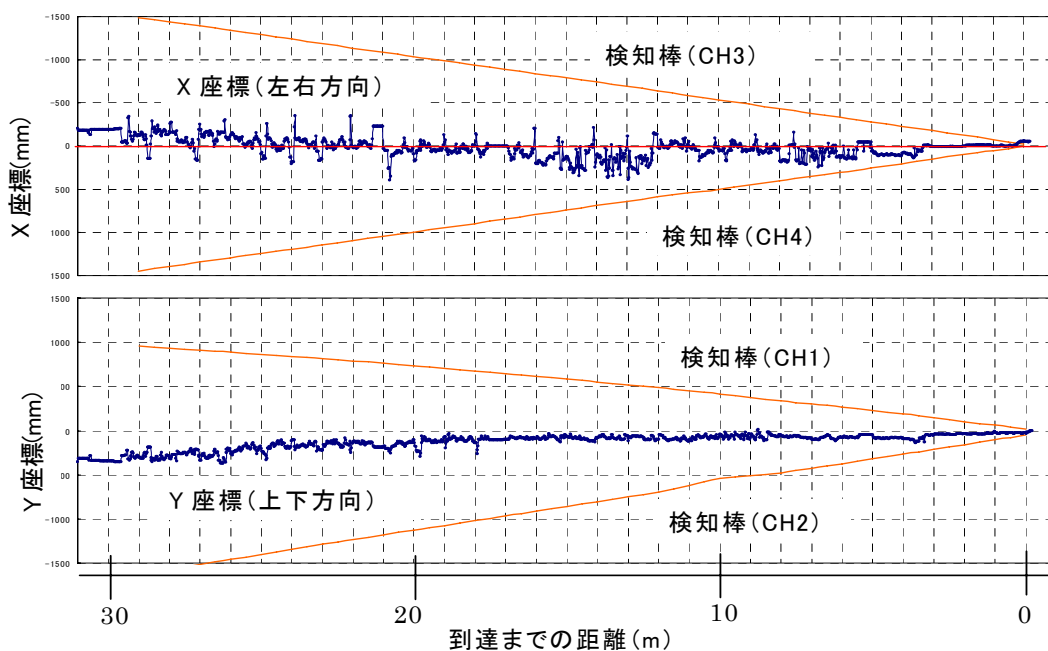


図 7 AE 計測によるシールドマシン位置の算定結果

4.3 シールドマシン位置の検知結果

検知棒の位置座標の計測結果を基に、シールド基線と上下左右 4 箇所検知棒との離隔距離を 2m 毎に整理し、これをマシン誘導管理図として到達の 40m 手前からシールドマシンの姿勢方向制御に反映させた。マシン位置の算定および掘進管理は、マシンの中心座標(X, Y)の変化を示すことにより実施した。図 7 に、鉛直方向(Y 座標)と水平方向(X 座標)の AE センサーによるシールドマシン位置の算定結果を示す。図 7 中にはシールド基線および検知棒の設置位置を示す。検知棒の設置位置は、シールドマシンの外周端部からの距離を示している。図 7 より、マシン位置の算定結果は、実際の測量による誤差よりも大きな値を示しているものの、シールドマシンが 4 本のセンサーのほぼ中心付近を掘進していることが確認できる。接合手前 40m 地点から本システムによる連続計測・解析を開始したが、マシン位置の算定結果は、坑内測量による位置データと極めて近似していることを確認した。そのため、シールドマシンの姿勢方向制御は大きな修正もなく円滑に行われ、到達誤差 18mm(上 10mm、右 15mm)の高精度で隣工区の馬蹄トンネル内への地中接合に成功した。

写真 1 にシールドマシン制御室での計測状況を示し、図 8 にはマシン位置算定結果のパソコン上の表示状況を示す。シールドマシンのオペレータは、図 8 に示す画面をリアルタイムに確認しながら、掘進中のシールド機の姿勢方向制御に反映させた。

マシンカッターの掘削により生じた弾性波を AE センサーで計測し、シールドマシン位置をミリ単位の精度で検知することは、地盤の不均一性を考慮すれば非常に高度な技術である。しかし、今回のように観測孔からの座標確認が困難なケースでは、掘進管理の補助的な技術として十分に適用可能であると考えられる。また、掘進を継続しながらシールドマシン位置を検知できる点にも優位性があるものと考えられる。

§5. おわりに

本システムを適用した現場では、交通量の多い幹線道路路上からの大規模なチェックボーリングを実施せず、交通渋滞を引き起こすことなく工事を進めることができたことから、環境面や物流面においても大きな効果が得られたことが⁴⁾が報告されている。また、ボーリングによる測量が 20m 以上の深さになる場合には、コスト面においても本システムの優位性が出てくるものと試算⁴⁾されている。

本システムは特に都市部における大深度地下開発に向けた有用な技術と位置づけられる。今後は、適用実績

を増やすとともに、高精度なシステムへと向上させていきたいと考える。



写真 1 制御室での計測状況

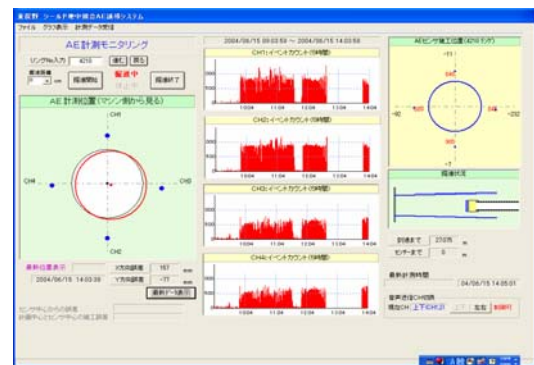


図 8 シールドマシン位置算定結果の表示状況

参考文献

- 1) 森 俊之, 米山 利行, 吉野 広司, 渋谷 光男, 高橋 繁夫: AE による大深度シールドのマシン到達誘導システム, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol.57 巻, pp.611-612, 2002.
- 2) 秩父顕美, 吉野広司, 佐藤一彦: 音響診断法を用いたシールド掘進機の運転監視方法に関する研究, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.137-146, 2000.12.
- 3) 佐々木宏一, 芦田譲, 菅野強: 建設・防災技術者のための物理探査, 森北出版株式会社, 1993.
- 4) 渋谷光男, 宮崎利明, 秩父顕美, 藤倉裕介: 大深度長距離シールドの地中接合に AE マシン位置検知を適用, -地上周辺環境に配慮した地中接合-, トンネル技術協会 第 55 回(都市)施工発表会 論文報告集, 2004.11.



藤倉 裕介

ひとこと

本システムの精度向上、現場への適用、普及に努めていきたいと思います。