

電磁レーダによるTBM切羽前方探査システム

— 岩盤を見通す電波の眼 —

今井 博^{*1}・八木下 修満^{*1}

Keywords : *electro-magnetic wave, tunnel face, geological fore-search, fracture zone, reflection method*

電磁波, トンネル切羽, 地質前方探査, 破碎帯, 反射法

1. はじめに

トンネルを掘削する工法は、場所、岩質、トンネルの大きさなどにより選択される。切羽観察による地質調査ができる NATM や削岩機などによる工法では、先進ボーリングなどの調査と併せてある程度の前方の地質が予測できる。また、TSP¹⁾、²⁾や HS 調査法などのダイナマイトやそれ相当の振源³⁾、⁴⁾、⁵⁾を用いた弾性波調査法があり、100mを越える切羽前方調査も行える。

しかしながら、トンネルの全断面を掘削する機械掘削工法の場合は、掘削機が切羽を占有し、地質調査を直接行う機会はほとんど無く、調査は全断面掘削機が停止している場合にカッターの隙間から観察する程度に留まる。また、TSP や HSP 調査法を実施する場合は掘削機の後方からとなり、しかも、爆薬を使用して行う場合は、爆薬使用の手続き、火薬庫の設営、火薬取り扱いの資格者や火薬の管理者が必要となり面倒である。したがって、全断面掘削機を用いたトンネルの掘削では、施工工程で十分な切羽付近の地質調査が出来ない場合が多い。

本研究は、硬岩掘削機である TBM 工法において、切羽前方 20m程度までの地山を連続的に監視し、亀裂面や破碎帯を掘削前に検知するために開発した切羽前方探査システムを検証する目的で、電磁レーダを TBM に実際に搭載し、システムを構成してデータ収集を行い、その解析を行った。

2. TBM について

TBM とは Tunnel Boring Machine の略称のことであり、広い意味では、トンネルの全断面を掘削する機械の総称であり、シールドマシンおよび狭い意味での TBM というように、大きく 2 つに分類されている。

土壌や軟岩掘削では泥水などを用いて掘削を行う泥水型密閉シールドなどをシールドマシンと呼び、地下鉄工事などで採用される。掘削方法は、後方のセグメントに反力をとって地盤にカッター面を押しつけながら面盤を回転させ、カッターで地山を削りながら掘削する方法である。このシールドマシンに電磁レーダを装着して、掘削予定断面内の杭やライフラインの検知、地質変化の検出を実施した例があるが、成果の報告は見られない。

一方、山岳トンネルのように硬岩地山を掘削するオープンタイプの掘削機があり、狭い意味での TBM がこれである。標準的な TBM による掘削方法は、側壁にメイングリッパーで押しつけて反力を取り、岩盤にカッターを押しつけ、壊しながら掘削する方法である。写真-1 に、A トンネルを掘削するために製作された TBM を示す。硬岩掘削機として直径 12.84m の大きさは世界 1 位で、しかも、面盤に電磁レーダを搭載した例はまだ無い。写真-1 で矢印で示した部分は、搭載した電磁レーダのアンテナ設置部であり、その中心は面盤の中心から 4.9m の位置である。面盤の回転方向は写真-1 で時計周り方

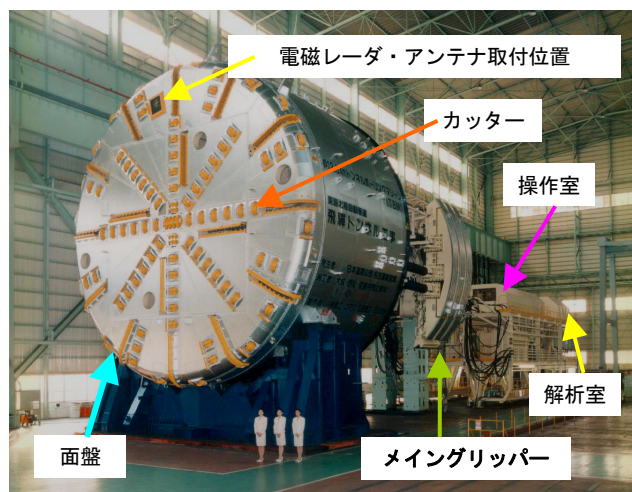


写真-1 A トンネル掘削 TBM
TBM for excavating the A Tunnel

*1 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア技術開発室

向が正転としている。面盤の回転に伴って、操作室では面盤回転角度を出力する、この回転角度は、電磁レーダが中央真上に来た時を 0° として定義している。

3. システム概要

地盤調査用電磁レーダは、地中レーダとも呼ばれ、電磁波の中心周波数で $350\sim 400\text{MHz}$ が標準的であり、探査は深度 $2\sim 3\text{m}$ 程度までが調査できる。地中レーダは、空洞、金属類、水の調査に適し、地盤内のライフラインの調査や地盤内の空洞調査に使われてきた。

本システムで用いる電磁レーダは中心周波数 150MHz で、市販の地中レーダに比べてやや低周波となっており、多少解像度は落ちるが、減衰を軽減することで探査深度の向上を図った。

TBMに搭載した電磁レーダ切羽前方探索システムの概要を図-1に示す。面盤に設置したアンテナに電源供給し、電磁パルス発信信号や受信信号を伝送するケーブルを接続し、その他端をスリッピングに接続する。面盤のTBM側（パルクヘッド）は掘削したズリがスクレパーですくい上げられた後、最高部から落ちてくるので、スリッピングやケーブルは鉄板で保護している。スリッピングの出力側のソケットに同仕様のケーブルを接続し、他端は隔壁を通過させ、計測室にある電磁レーダ制御器からのケーブルに隔壁の計測室側で接続した。面盤回転角度信号はTBM制御室の端子板から $20\sim 4\text{mA}$ （ $0\sim 359^{\circ}$ ）の電流で取り出し、電圧に変換し、電磁レーダ制御器から出力されるビデオ信号（波形信号）と同期信号とともにA/D変換器に接続して 25KHz の同時サンプリングを行った。波形データを保存する場合は、

保存したトンネル内の位置が重要であり、本システムでは、TBM機械データ計測システム（写真-2のPC-k）から自動で出力されるファイル内のTDの値を抽出して同時に保存した。現状では、回転信号が不安定であり、A/D変換器に接続する前に整流器を入れた。さらに、電源の不安定に対処するため、無停電電源装置を設置した。

このように、A/D変換器から出力される、波形信号、同期信号、回転信号を常にパソコンPC-1に取り込むことで、航空管制のような連続モニタリングを行った。さらに、PC-1では、データベースを用意し、TBM機械データを定期的に登録した。パソコンPC-2では、反射面の特定を行い、データベースに登録した。写真-2に、計測室内部の状況を示す。手前から、TBM機械データ計測システム（PC-k）、TBMカッター荷重計測システム（仮称：PC-r）、電磁レーダ切羽前方探索システム（データ取得用：PC-1、解析用PC-2）である。

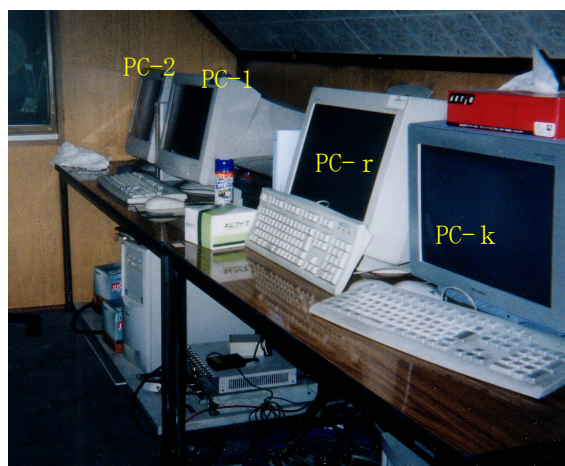


写真-2 計測室内の状況
Condition in measurement room

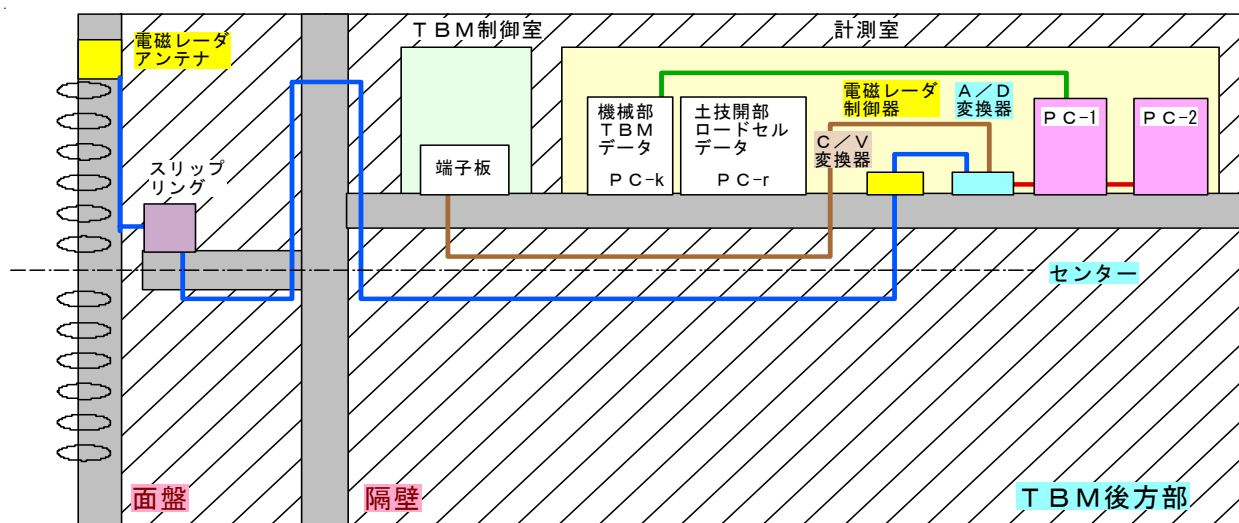


図-1 TBM内部のシステム配線図
Cables and the system in TBM

4. 切羽前方探査の原理

電磁レーダのアンテナは面盤に装着され、面盤は、TBM 後方から見ると、時計と反対方向に回転する。これは、円状測線で地盤を計測していることになる。図-2 に示すように、座標軸を設定し、反射面が切羽前方に存在する場合、回転角が θ で半径 r の円測線上に位置する電磁レーダのアンテナから反射面に降ろした垂線の足の長さを h_θ とし、反射面の走向角を α および傾斜角を β 、TBM の面盤中心から掘削予定方向に沿う反射面との交差距離を L とすれば、 h_θ は回転角 θ の関数として、

$$h_\theta = |r \cos \theta \sin \alpha \sin \beta - r \sin \theta \cos \beta + L \cos \alpha \sin \beta| \quad (1)$$

で表される。 r は既知なので、反射面を特定するには、この L 、 α 、 β を決定する必要がある。

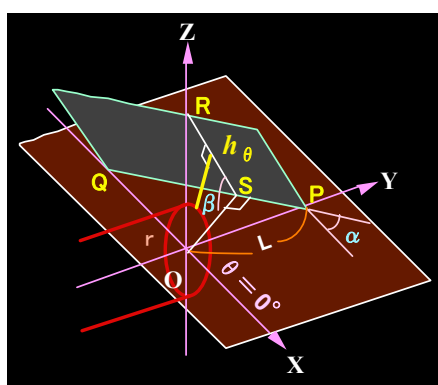


図-2 反射面特定パラメータ
Parameters for determining the reflection plane

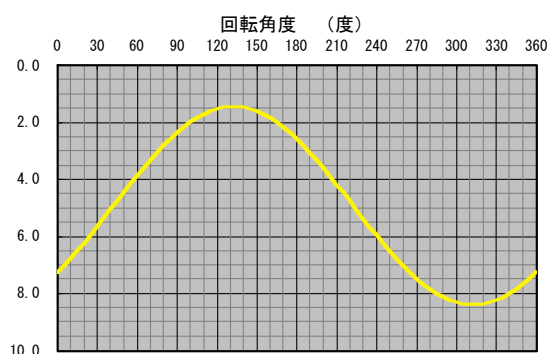


図-3 反射面シミュレーション
Simulation of a reflection plane

ここで、図-2 のパラメータを $L=10$ 、 $\alpha=50$ 、 $\beta=50$ 、 $r=4$ 、として、式(1)を用いて計算した結果を図-3 に示す。横軸は回転角度で、縦軸は TBM の面盤に設置された電磁レーダ・アンテナから反射面までの距離である。使用したパラメータの示す状況は、図-2 に示す反射面と TBM の位置関係と同様である。

5. 反射面解析例

ここでは、Aトンネルで得られた実データの解析例を示す。反射面を特定したデータを図-4 に示す。横軸は回転角度（0～360 度）で、縦軸は電磁レーダ・アンテナから反射面までの距離である。正弦波らしき山が2つ確認でき、このデータから反射面を3つの方法で特定できる。第一は、式(1)のパラメータをそれぞれ変化させて最適なパラメータを自動で決定する方法で、計算に数分の時間がかかる。第二および第三の方法は、手動で処理する方法で、一瞬で計算が終了する。第二の方法では、図-4 で、反射波形の最浅点の反射波1つを選ぶと 180 度違う場所に縦線が引かれる。そこで最深点の反射波を選択する。または、その逆を行うことで、反射面パラメータが計算できる。第三の方法は、反射波を3箇所選択することで、反射面パラメータが計算できる。

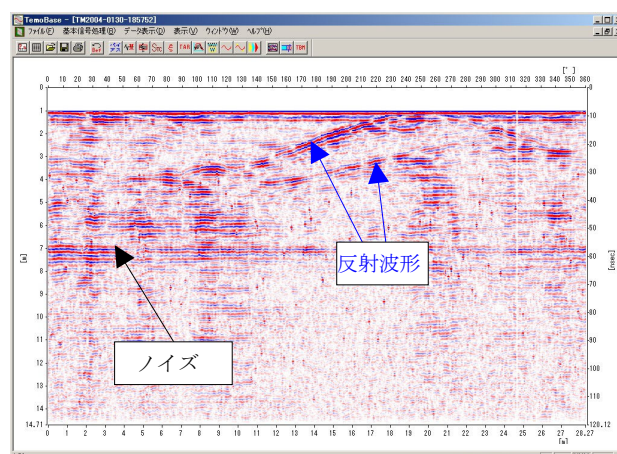


図-4 電磁波反射データ
Reflection data of electromagnetic waves

図-5 および図-6 はいずれも第三の方法で図-4 から反射面を特定した例である。特定した反射面のパラメータを表-1 に示す。表-1 の第1列は反射面の ID であり、1-1 および 1-2 は図-5 に、2-1 および 2-2 は図-6 にそれぞれ対応する。ここで表に示す走向角および傾斜角は式(1)で用いた α および β と異なる。現場の地質データとれていの整合性をとるため、表の走向角は 90 から α を引いた値であり、傾斜角は 180 度から β を引いた値である。1-1 および 2-2、1-2 および 2-1 を比較すると再現性に優ることが分かる。

図-7 は、図-5 または図-6 で捉えた反射面付近の地質調査結果で、TBM の掘削の合間に測定された。上は平面図、下は断面図である。TD はトンネル坑口からの距離である。表-1 の結果と地質調査結果（切羽前方 2～5 m の範囲で、走向角 90 度程度、傾斜 75～85 度の急傾斜

で、面盤側に流れ目の反射面) とを比較すると非常によく傾向が一致していることが分かる。また、他の位置でも同様な結果を得ている。

表-1 反射面位置パラメータ

	走向角 °	傾斜角 °	交差深度 m	垂線距離 m
1-1	85.8	72.9	2.8	2.6
1-2	95.3	80.3	3.5	3.4
2-1	96.9	80.3	3.3	3.3
2-2	83.6	72.2	2.9	2.8

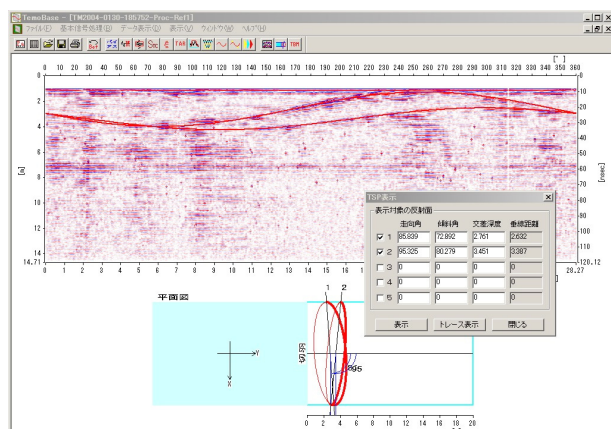


図-5 反斜面の特定-1
Determinations of reflection planes - 1

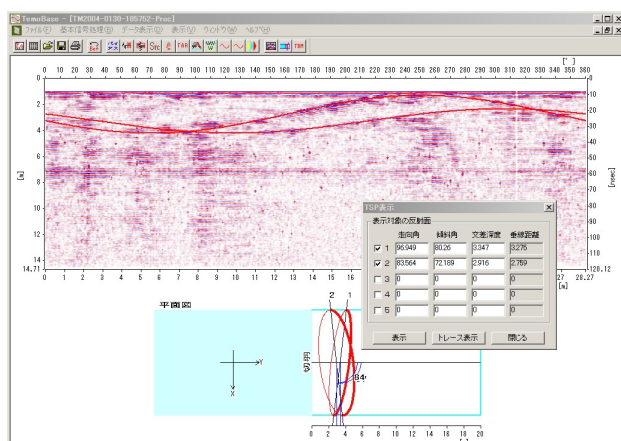


図-6 反斜面の特定-2
Determinations of reflection planes - 2

このように、本システムの実用性を検証することが出来た。今後は、さらに反射面データや機械データの蓄積を行い、本システムの反射データ、機械データ、地質調査データとの比較・検討を行い、本システムの反斜面特定精度・地質予測などの機能向上を図りたい。

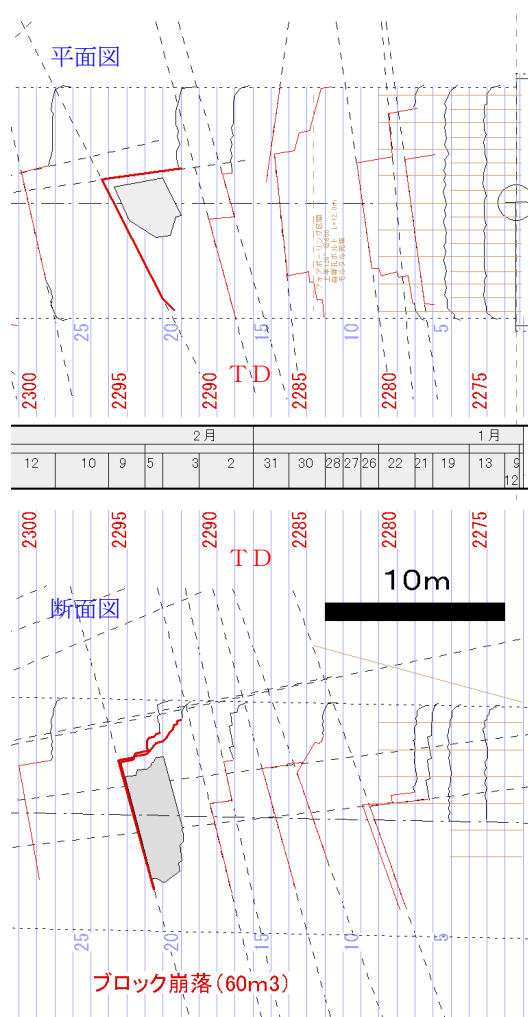


図-7 地質調査結果 (TD=2275~2300)
The result of geological survey

参考文献

- 1) 川上純, 今井博, 峯村英二, 小林光雄: TSP を用いたトンネル切羽前方探索の一事例, 土木学会第 50 回年次学術講演会梗概集, III-51, pp.102-103, 1995.
- 2) 城まゆみ, 今井博, 川上純: 弾性波による切羽前方探索法 (TSP) の適用事例とその評価, 大成建設技術研究所報, Vol.30, pp.199-204, 1997.
- 3) 今井博, 川上純, 前畑英彦, 荒井浩成, 佐々木加津也: 放電衝撃のトンネル前方反射法弾性波探索への適用実験, 土木学会第 52 回年次学術講演会梗概集, III-A332, pp.664-665, 1997.
- 4) 川上純, 今井博, 前畑英彦, 荒井浩成, 佐々木加津也: 放電衝撃の地震探査用震源としての特性, 物理探査学会第 98 回学術講演会論文集, pp.93-96, 1998.
- 5) 城まゆみ, 川上純, 今井博, 前畑英彦, 荒井浩成, 佐々木加津也, 和田有司: 放電衝撃の弾性波探査震源としての性能評価, 第 34 回地盤工学研究発表会 (東京) 1999 年 7 月 (梗概 182), pp.365-366, 1999.