

# シールド切羽可視化システムの構築

## Development of a System for Visualizing Geological Components at the Face of a Shield-driven Tunnel

木下茂樹\* 外木場康将\* 宇留間高広\*\* 榊原光義\*\*\*

### 要 旨

近年、都市部において立坑用地の問題や地下埋設物の輻輳を避けるために、シールドトンネルの長距離化の傾向がある。そのため、掘進中に地盤変化に遭遇する場面が増え、地質条件に応じた掘進管理が一層重要となっている。一般的に密閉型シールドでは、土質の変化は排土性状、切羽土圧やカッタートルク値などで評価されている。しかし、これでは切羽面の地盤構成をその平均として捉えることになってしまう。その結果、切羽の地盤構成を把握せずに掘進することとなり、硬質地盤に遭遇した場合などにはシールド機の乗上げ・横滑りなどが生じ、縦断・平面線形の確保が困難となる。

本研究では、シールド面板に取り付けた加速度計の計測値を利用した地盤評価手法を応用し、シールドの径・種類に関係なく、切羽の地盤構成を図化することで面的に評価できる「切羽可視化システム」を構築した。また、直径 2.36m の泥土圧シールドに本システムを適用し、掘進途中の土質変化、ならびに切羽地盤構成を評価した事例について報告する。

キーワード：シールド、地盤変化、加速度計、切羽可視化

### 1. まえがき

都市部では、通信・ライフライン等の地下インフラ整備事業が積極的に推進されている。その主役を担うシールド工法によるトンネルの築造では、発進・到達立坑の用地問題等を理由に、長距離施工が要求される傾向にある。下水道や上水道では 1 スパンで4~5km、道路トンネルにおいては 1 スパンで5~10kmの掘進も珍しくない。

一方、長距離の掘進では、掘進中に地盤の変化に遭遇する場面も増え、切羽の土圧・泥水圧管理や添加材・泥水品質管理が難しくなることから、切羽の安定を確保する上で、地盤構成を把握することが重要となる。

このような背景より、密閉型シールドにおいては、「見えない切羽」の地盤構成を正確に把握することが、長距離掘進における安定した掘削や地盤変状を抑制することに寄与するものと考えられる。

本研究では、加速度計をシールド面板に取り付けて、掘進中に回転する面板の外周で応答加速度を連続計測し、地層の変化を把握することを目的とした。そこで、リングごとに収集した掘進途中の応答加速度を、シールド路線の延長方向にコンター図で整理することで、掘削した地盤の実績を把握する手法を新たに考案した。加えて、切羽地盤構成の判定履歴から、掘進中の切羽前方の地盤構成を予測することにも取り組んだ。

以下に、開発の経緯、試験施工での検証結果、実施工における計測と地盤構成評価について報告する。

### 2. 開発経緯

#### 2.1 既往の研究と計測手法の検討

過去において、切羽の地盤構成を把握する技術として、大口径シールドに加速度計を取り付けた特殊ビットを用いて切羽の地盤構成を評価した実績がある<sup>1)</sup>。

この技術は、球体式ビット交換システムを有したシールド外径 9,450mm、延長 4,435m の泥水式シールドに適用され、ビット交換位置の地盤構成の把握に役立てた。結果として、ボーリング調査から求めた土質分布と一致する正確な地盤判定が行えた(写真-1)。



写真-1 球体式ビット交換を採用したシールド

\*東日本支社土木技術部 \*\*東日本支社土木第2部 \*\*\*東日本支社名古屋支店

しかし本技術は、事前の室内試験で確認した対象土の切削時振動波形と切羽切削ビットの振動波形数を比較して土質判定を行うものであり、装置が大きく中小口径や面板型シールドに適用できないといった課題点があった。

また、ビット交換位置の地盤判定を目的としていたことから、計測頻度やデータ集積に連続性がなく、掘進の地質実績や切羽前方の地質予測に応用することまでは、開発要素に組み込まれていなかった。

## 2.2 計測手法の検討

既往の研究における課題点を踏まえて、本研究では、中小口径のシールドまで応用することを考慮した計測方法を検討した。特に、シールド面板の切削ビットに加速度計を取り付けることによって切羽の地盤構成を把握することを目的としているため、シールド面板の回転数に応じた計測頻度や範囲の設定が重要と判断し、以下の対応を実施した。

### a. カッター回転に伴う計測頻度の設定

回転するシールド機の面板外周における加速度の計測では、その計測角度間隔 ( $\Delta\theta$ ) はデータ収集の時間間隔 ( $\Delta t$ ) とカッターの回転速度  $r$  (rpm) から決まる。中小口径シールドでは、カッターの回転速度が速いことから、 $\Delta t$  を小さくしてデータ個数を多く得たいことから、計測時間間隔を 0.1s に設定して収集を行った。また、加速度計の円周上の切削位置 ( $\theta^\circ$ ) を把握するため、センターシャフトに接点スイッチを設置し、シールド天端をゼロ点として毎回通過時にリセット処理できるようにした。

[データ収集間隔]

$$\Delta\theta = r / 60 \times \Delta t \times 360^\circ$$

[設定した計測間隔]

$$\Delta\theta = 6.0 / 60 \times 0.1 \times 360^\circ = 3.6^\circ$$

$r$ : マシン設定の最大値 6 (rpm)

### b. 計測データの収集方法

加速度データを連続的に収集する方法としては、AC 出力と DC 出力があり、収集したい計測項目やシールドマシンのスペックに応じて、出力を選択する必要がある。AC 出力は加速度データそのものを出力するため、加速度の大きさや波形を計測できる。これに対し、DC 出力では移動平均法により平滑化処理した加速度の大きさ ( $\text{cm/s}^2$ ) を計測する。

小口径シールドの場合、上述したように 0.1s の計測間隔でも角速度が 3.6°となるため、データ転送速度の関係から AC 出力の採用が困難である。一方で、DC 出力においては、単位時間内の加速度の大きさをデータ平滑化回路を導入して出力すれば、データ量が圧縮され、データ転送が可能となる。

今回のシステムでは、DC 出力を採用し、データの平滑時定数  $2\tau$  を 0.1s と設定し、0.1s ごとの計測時間間

隔に適応させ、加速度値を収集する。

### c. 加速度データの集積

専用アンプから DC 出力された信号は、制御盤、シーケンサ盤を通過することで、その他の掘進管理データと同じ伝送システムを通じて、運転管理室に送られる。運転管理室では、計測された加速度値と掘進管理データを計測時間ごとに整理し、掘進リング No で紐付けたデータとして保存する (図-1)。

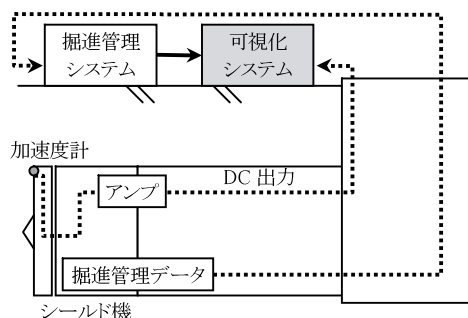


図-1 加速度計測の方法

## 3. 実機試験

実施工に先立ち、シールド機に装着した加速度計の取り付け確認と計測システムの動作・感度確認を目的とし、実機試験を実施した。以下に、実機試験の概要と結果を示す。

### 3.1 加速度計の取り付け

カッターの回転に合わせて面板外周部で加速度を計測するため、加速度の大きさはカッターの回転速度とシールドジャッキの伸長速度に依存することが予想される。これらの影響を把握するため、2軸 (X軸、Y軸) による加速度計測を実施する。

#### i. X軸の計測方向 (図-2)

計測軸を面板外周接線方向に設定する。これにより、カッターの回転速度の影響が把握できる

#### ii. Y軸の計測方向 (図-2)

計測軸をシールド軸方向に設定する。これにより、シールドジャッキの伸長速度、押付け圧の影響が把握できる

また、取り付け位置は①切羽センサーとしてカッタ

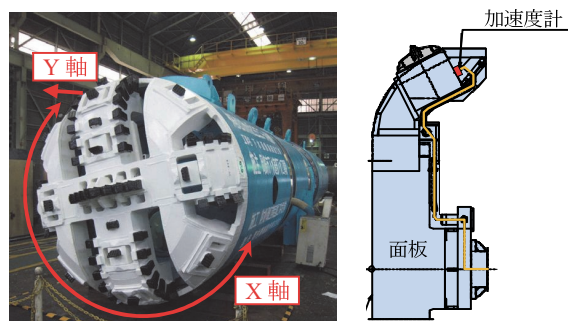


図-2 加速度計の取り付け位置

ヘッド外周部に1箇所、②隔壁センサーとして隔壁部に1箇所取り付け。なお、隔壁部センサーによる計測は、シールド機から発生する機械振動、およびノイズのキャンセルを目的としている。

3.2 計測条件

a. 計測時期

掘進開始より、シールドジャッキまたは推進ジャッキストローク 100mm 時点から自動計測を開始する。

b. 計測回数

1 リング分の掘進は、セグメント幅で 750mm となる。この掘削区間におけるカッターの回転数はシールドジャッキの伸長速度とカッターの回転速度から、

$$N=750/s \times r$$

s:ジャッキ速度 (mm/min)

r:カッター回転速度 (rpm)

であり、 $N=50\sim 150$  (回) の範囲となる。

この条件を考慮し、計測では1リング分の掘削ごとにカッター回転数のうち5回転分を自動計測する。

c. 計測項目

計測データは、上記の5回転分の計測値に関して、各リングごとの切羽、隔壁の X・Y (図-2) の2方向を自動記録するものとする。また、X・Y の2方向ともに5周分の平均値を計算し、システムにグラフ化する。

3.3 計測結果

a. CASE1：無負荷回転時における計測

実施工で想定されるカッターの回転数を3段階で設定し、無負荷状態でカッターと隔壁の加速度計測を実施した (表-1)。

図-3より、隔壁の計測結果は、回転数と加速度の間には正の線形関係があることを示している。これは、加速度計の位置がカッターモーターに近いので、モーターの稼働による振動の影響を強く受けていると判断できる。

表-1 無負荷での加速度計測結果

| 回転数 (rpm) | 振動計 (cm/s <sup>2</sup> ) |       |       |       |
|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|
|           | カッターヘッド                  |       | 隔壁    |       |
|           | X                        | Y     | X     | Y     |
| 2.3       | 48.3                     | 68.3  | 119.3 | 53.7  |
| 3.6       | 57.8                     | 109.1 | 231.9 | 104.1 |
| 5.6       | 86.6                     | 104.3 | 434.7 | 191.1 |

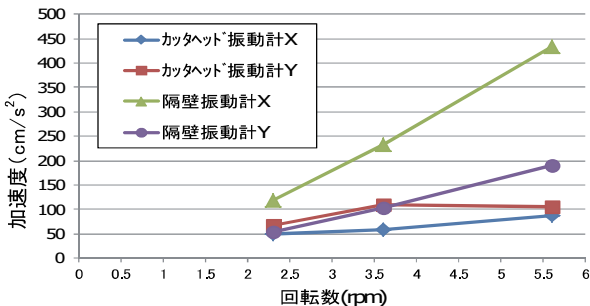


図-3 無負荷での加速度計測結果

また、カッターにおける応答加速度は、隔壁に比べて回転数との相関が低く、特に無負荷であるため X 方向は回転に影響がみられない。なお、カッターモーターの稼働による応答加速度は、 $50\sim 100\text{cm/s}^2$  程度と小さい結果となった。

b. CASE2：連続衝撃を与えた計測

面板に伝搬する切削振動がカッター加速度計の取り付け位置に及ぼす影響と、その時の加速度計の計測値の大きさを評価するため、加振器で連続衝撃を与えたうえで、カッターの回転中の加速度計測を実施した。

加振には、連続衝撃として高周波バイブレータを使用した。また、カッターは一定速度で回転 (3.6rpm) させ、加振位置は面板外周で1点に固定した (写真-2)。

図-4に、連続衝撃を加えた状態での加速度と面板の回転角度の関係を示す。図中の赤点線は、加振器の位置を示している。なお、加振器による連続衝撃は、 $430\sim 790^\circ$  の間で面板の1点に与えた。

図中の1周目 ( $70\sim 430^\circ$ )、および3周目 ( $790\sim 1150^\circ$ ) は、加振しない無負荷時の計測値となり、 $100\text{cm/s}^2$  前後で前実験と同様の結果を得た。

加振器の位置を加速度計が通過する時点 ( $430^\circ$ 、 $790^\circ$ ) が最も大きい加速度 ( $2,000\text{cm/s}^2$ ) となる。また、回転により加振器と加速度計が  $180^\circ$  の相対関係となる時点で、加速度は最小となり、 $300\text{cm/s}^2$  程度を計測した。したがって、面板を伝搬する振動は、 $2,000\text{cm/s}^2$  を超える振動に対して約15%の影響に留まるといえる。

3.4 実機試験結果

上述の実機試験の結果から、以下の知見を得た。

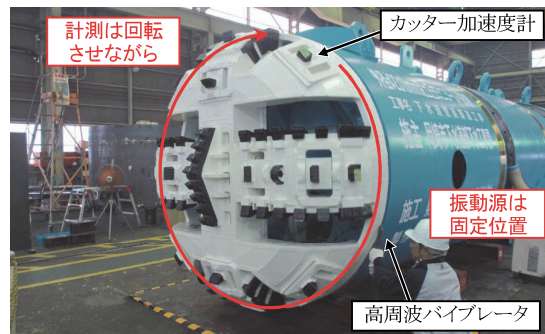


写真-2 加振状況

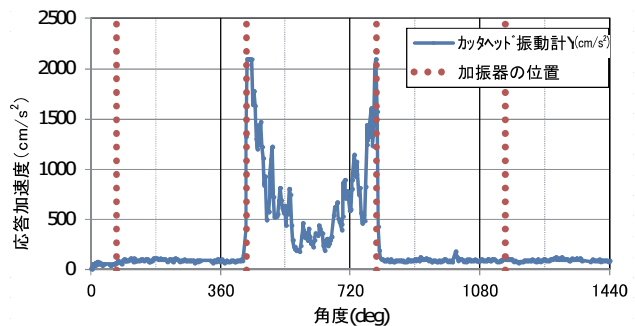


図-4 回転角度-加速度関係

- i. モーター稼働の振動がカットヘッドに与える影響は  $50\sim 100\text{cm/s}^2$  程度で、計測レンジに対して問題とならない
- ii. 面板の振動伝搬は、振動源から  $180^\circ$  で約 15% 程度の影響に留まるため、円周の連続計測に対しては影響するが、土質の違いの判断には悪影響を及ぼさないと判断できる

#### 4. 実施工適用

##### 4.1 実現場適用の概要

###### a. 適用現場の緒言

加速度計を利用した切羽可視化システムを下水道シールド工事で採用し、掘進の全延長でリングごとに計測した。適用した工事の工事概要を表-2に示す。

また、土質調査による土質縦断図を図-5に示す。この図より、発進地点は礫質土であり、路線後半になるにつれ風化岩へと変化し、到達地点では花崗岩となっている。

表-2 工事概要

| 下水道管渠築造工事 |                   |
|-----------|-------------------|
| 工法        | 泥土圧ミニシールド         |
| 掘削外径      | 2,360mm           |
| セグメント内径   | 1,800mm (二次覆工省略型) |
| 一次覆工延長    | 1,266.5m          |
| 掘削対象地盤    | 砂礫層、風化花崗岩層        |

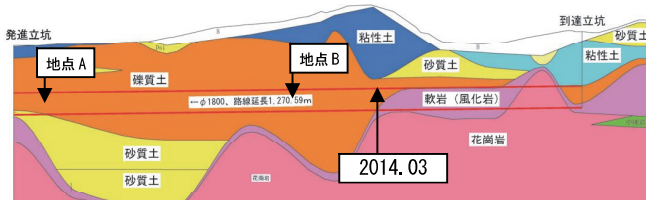


図-5 土質縦断図

###### b. データの表現方法<sup>2)</sup>

シールド機のカットフェイスは写真-3に示した面板タイプで、加速度計を図中 A の位置に配置している。

加速度データは、加速度一切削位置のグラフによる整理と、切羽断面を模した円の外周にリング状に配置した図を用いて表現する。この方法は、過去の評価した事例に倣っている。

また、評価については、応答加速度の違いにより、シールド切羽面の地盤構成をリングごとに行う。

当現場に適用した計測の仕様については、過去の実績<sup>1)</sup>をもとに、計測レンジは  $0\sim 2100\text{cm/s}^2$ 、最小計測値を  $0.5\text{cm/s}^2$  と設定した。

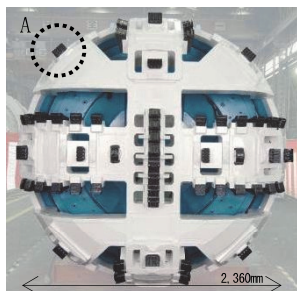


写真-3 シールド機面板

1 リング当たりの計測は、掘進開始よりシールドジャッキ、または推進ジャッキストロークが 100mm 進んだ時点から開始し、5回転分計測する。

##### 4.2 断面土質判別

図-6は、図-5の地点 A における応答加速度の計測結果である。地点 A は、土質縦断図では礫質土であるが、排土の粒度分析結果では、 $2.0\text{mm}$  以上の礫含有率が 23%の砂質土であった。計測結果は、応答加速度が  $33\text{cm/s}^2\sim 350\text{cm/s}^2$  と、非常に小さな値を示している。一方、図-7は、図-5の地点 B における応答加速度の計測結果である。排土の粒度分析結果では、 $2.0\text{mm}$  以上の礫含有率が 67%で、礫層の卓越した地盤である。応答加速度が、 $77\text{cm/s}^2\sim 2,085\text{cm/s}^2$  と幅が広く、大きな値を示す。以上の結果より、応答加速度の傾向と実際の粒度分析結果が合致していると判断できる。

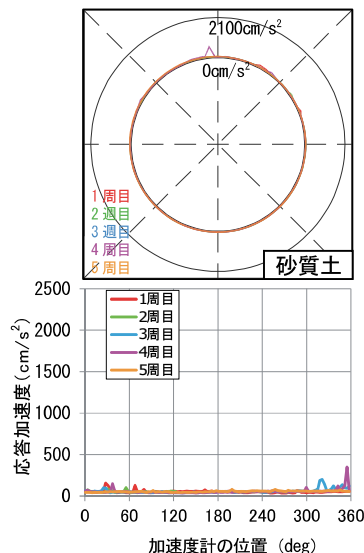


図-6 計測結果 (地点 A)

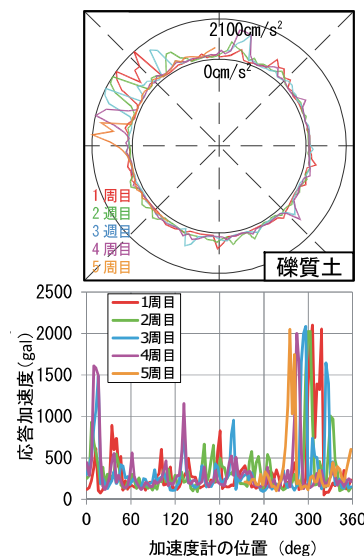


図-7 計測結果 (地点 B)



### 4.3 地盤変化の把握

本システムの目的の一つである切羽地盤構成、および地盤変化の把握に関して、実施工で確認した中で特徴的な区間の結果を示す。

図-8~10は、掘進95リングから135リングにかけての加速度計の円周上での計測結果である。95リング(図-8)では、切羽全周で $33\sim 350\text{cm/s}^2$ の応答加速度を計測しており、シールド前面の土質が一様で、排土性状から砂質土であることが判別できた。また、40リング進捗した135リング(図-10)では、断面の上部30%程度に加速度応答が $2,000\text{cm/s}^2$ に達する地盤が出現しており、その部分は、同じく排土性状から礫質土であると判断できる。

これらの結果から、本システムは、切羽地盤の掘進に伴う経時変化の把握に有効であるといえる。また、断面外周で角度ごとに加速度の違いが確認できるため、加速度が同等(同一の土質)と判断できる左右の計測点を断面内で区分するように線で結合すれば、断面内における切羽地盤構成を模擬的に可視化できる(図-11)。

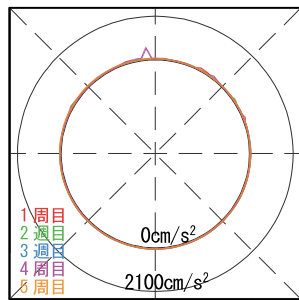


図-8 計測結果 (95リング)

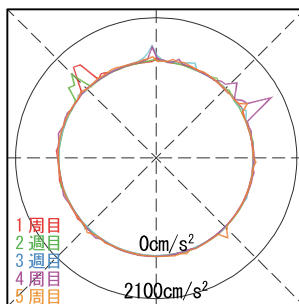


図-9 計測結果 (115リング)

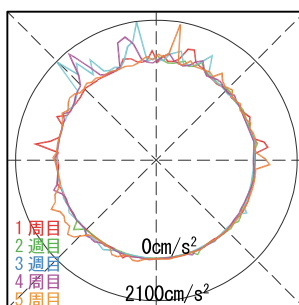


図-10 計測結果 (135リング)

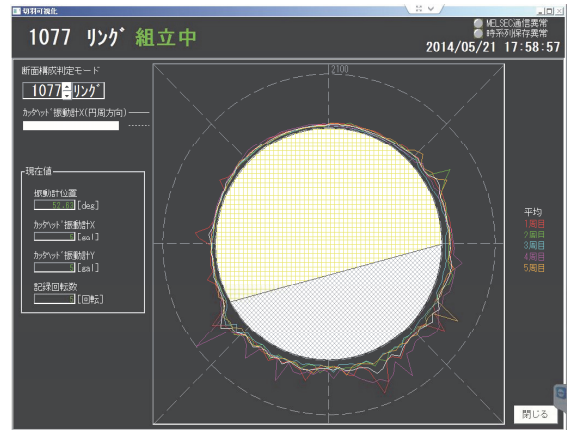


図-11 地盤構成可視化画面(1077リング)

### 4.4 地質実績図の作成

本システムでは、シールド掘進の1リングごとに加速度データを集積しているため、それをシールド路線方向に整理すれば、掘削路線の加速度変化の実績が得られる。

図-12は、シールド天端部と下端部の加速度における5回転分の平均値を、掘進リングごとに繋げたグラフである。同一リングで、青線で表した天端部と赤線で表した下端部に差が読み取れる部分(120、250、1050リング付近)には、地質境界が存在する。特に4.3で述べた90~140リング付近で天は、端部に遅れて下端部の加速度が徐々に大きくなる結果が読み取れる。

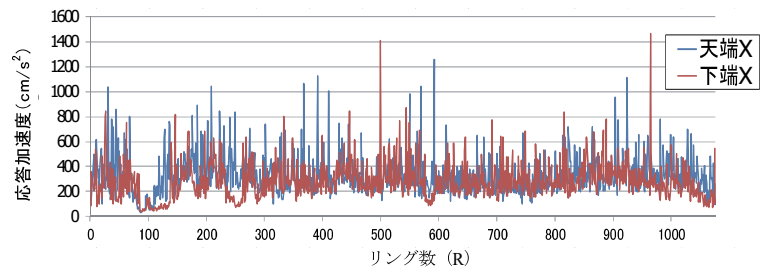


図-12 リングごとの応答加速度の推移

次に、掘進履歴として地盤の応答加速度を断面内で鉛直方向に評価することで、地質実績をコンター図で表現する。表現方法を以下に示す。

- i. 各リングにおける加速度計測値を、シールド断面( $\phi 2.36\text{m}$ )の鉛直方向に15分割し、左右の平均値を計算したうえで、データを整理する
- ii. 加速度を計測レンジ $0\sim 2,100\text{cm/s}^2$ でコンター表示し、ボーリング柱状図より得られた地質縦断面の掘進場所に応じて、重ね合わせ(図-13)

今回のシールド路線の掘進結果を、この方法で整理したものが図-13である。結果を詳細に観察すると、同じ断面内でも、鉛直方向で応答加速度の計測値に大きな差異が表れている。これは、礫質土の特徴ともいえ、加速度計のビットが礫部を掘削するとき大きな応答値を示すからである。

一方、図-13の区間①は礫質土の中でも、断面内の鉛直方向のコンターに差異が小さい。これは、礫質土層の地盤形成時に、河川堆積物である礫が山部ではなく、谷部に堆積したものと推測でき、きわめて興味深い結果である。

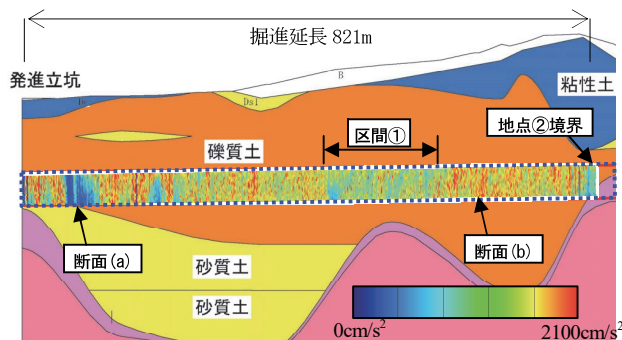


図-13 地質実績図

#### 4.5 前方予測

本システムでは、切羽地盤構成の判定履歴のうち任意に指定した直前リング数で、土質境界と判断できる同等の加速度帯を掘進方向に繋ぎ合わせ、その延長線から前方を予測する<sup>3)</sup>。図-14に図-13の地点②に示す「礫質土と風化花崗岩の境界部」の地盤判定と前方予測結果を示す。1074リングから切羽に向かって右下より風化花崗岩が出現し始め、1077リングでは、切羽の約1/3が風化花崗岩となっている。また、図-14における右側に表示された断面構成は5m前方の切羽予測となる。予測では、切羽の50%近い部分が風化花崗岩になることが示されている。

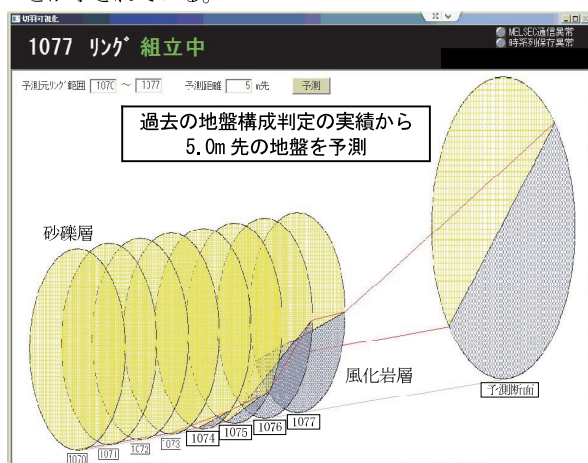


図-14 地盤構成判定と前方予測

なお、1077リングでは、ビット交換のために切羽隔壁内の土砂を除去して、実際の切羽地盤構成を確認した(図-15)。実際の切羽は、砂礫層、風化花崗岩層、花崗岩層で構成されており、システムでは、土質の違いは把握できるが(図-15の1077リング)、風化の程度を含めた岩盤強度の違いの判別までには至っていない。

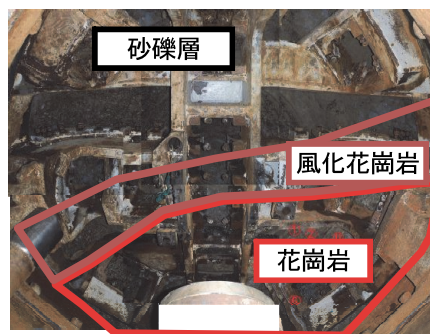


図-15 1077リングの実際の切羽岩盤線

#### 5. あとがき

長距離化の傾向にあるシールド工において、掘進管理の高度化を図るために、切羽の地盤構成を把握する切羽可視化システムを構築した。本システムでは、シールド外周部の切削ビットでカッターの回転を利用して加速度を計測し、掘進管理データと合わせて記録する方法を採用し、小口径シールドの実現場で実用化できている。

応答加速度の計測結果は、掘削地盤の砂質土と礫質土の違いを明確に捉え、切羽断面を模した円の外周にリング状に配置した図を掘削中にリアルタイムで表示することが可能となった。これは、地盤の変化を把握して、的確な掘進管理を行ううえで有効であると判断している。また、掘進予定の地盤構成予測、計測結果の縦断方向での評価についても本システムで可能となった。

なお、現在のところ、応答加速度の計測結果から風化の程度や岩盤強度の違いを把握するまでには至っていない。今後、切削ビットをローラービットに交換した後、岩盤掘削時の応答加速度の詳細な分析を行い、取り組む予定である。さらに、シールド工事での積極的なシステム導入を図るとともに、切羽が可視化できる利点を活かした切羽土圧や裏込め注入圧の設定等に役立てていきたい。

本開発を行うに当たりご指導・ご協力頂いた関係各位に深謝する。

#### 【参考文献】

- 1) 篠原茂他、「シールド掘削時の切羽土質分布の判明」、土木学会、トンネル工学報告集 Vol.10、pp.337-342、2000.11
- 2) 外木場康将他、「シールド切羽可視化システムの構築と実現場への適用(その1)」、第69回土木学会年次学術講演会、投稿中、2014.9
- 3) 木下茂樹他、「シールド切羽可視化システムの構築と実現場への適用(その2)」、第69回土木学会年次学術講演会、投稿中、2014.9