

## シールド外周の地山状態計測システムの開発と検証

山田 宣彦\*1・岩瀬 隆\*2

## 概 要

切羽の状態を直接確認できない密閉型シールドでは、掘削土の過剰な取り込みが行われた場合、地表面に変状が現われることがある。地表面の変状を防ぐには、地山の緩みや余掘り量を数値化または可視化して、余掘り量に見合った裏込め材を充填するなどの対策の初動を早めることが重要である。本研究では、ソナーをシールド本体のスキンプレート内側に取り付け、シールド外周の地山状態を計測し計測結果の解析を行った。また、解析結果とシールド外周の地盤の余掘り範囲の関係を明らかにするために、地盤の余掘り範囲を土槽内で模擬して改めて計測および解析を行い、計測の妥当性を検証した。

キーワード：シールド，ソナー，地山状態計測システム，余掘り

## DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF A GROUND CONDITION MEASUREMENT SYSTEM FOR THE OUTER CIRCUMFERENCE OF A SHIELD TUNNEL

Nobuhiko YAMADA \*1, Takashi IWASE \*2

## Abstract

In an enclosed shield tunnel, where the condition of the face cannot be checked directly, deformation spots may appear on the ground surface if an excessive amount of soil is excavated. To prevent deformation of the ground surface, it is important to quantify or visualize the loosening of the ground and the amount of over-breaks, and to expedite initial countermeasures early in the process including filling with backfill material appropriate for the amount of over-breaks. In this study, sonars were attached to the inside of the shield skin plate to measure the ground conditions around the outer circumference of the shield tunnel, and the measurement results were analyzed. In addition, in order to clarify the relationship between the analysis results and the extent of over-break excavation around the outer circumference of the shield tunnel, the extent of over-break excavation was simulated in a soil tank, and then measurements and analysis were conducted again to validate measurement results.

Keywords: Shield tunnel, Sonar, Ground geometry-measurement system, Over-break

---

\*1 Manager, Underground Structure Group, Underground / Foundation Technology Department, Civil Engineering Division

\*2 Senior Principal Researcher, Construction Technology Group, Research & Development Center

## シールド外周の地山状態計測システムの開発と検証

山田 宣彦\*1・岩瀬 隆\*2

### 1. はじめに

切羽での掘削土の状態を直接確認できない密閉型シールドでは、切羽圧力、排土量、シールドの機械負荷(シールドジャッキ推力、カッタートルク等)を計測することで、施工中の状態を間接的に確認する。また併せて、泥水式シールドでは泥水の品質について、泥土圧シールドではチャンバー内土砂の状態について監視を行うなどにより、総合的に管理を行うことが重要である。しかし、これらの管理により異常の兆候を複数の観点から把握するよう努めていたとしても、異常の兆候を捉えきれないこともあり、地表面変状が現れてから異常、トラブルを認識することがある。地表面の変状は掘削土の過剰な取り込みが原因であることから、地表面変状を防ぐには、地山の緩みや余掘り量を数値化または可視化して、切羽圧力の見直し、余掘り量に見合った裏込め材を充填するなどの対策の初動を早めることが重要になる。そのため上述したような、機械負荷の計測による間接的な地山状態の把握手段とは異なる直接的な測定手

法が望まれる。

地山の緩みや余掘り量の測定には、シールド本体の外へ向けて測定器を突出させて貫入抵抗を測定するものや電磁波レーダ等が一般的である。これらはシールド本体外での接触型の計測器であるためシールド本体への装備には専用設計が必要となる。

本研究では、シールド本体のスキンプレート内側から、シールド外周の地山と非接触な状態で計測が可能な地山状態計測システムを開発した。また、余掘り量等の計測結果をシールドオペレータ等に伝達するモニタリングシステムと、坑内に設置した計測機器の管理、監視を中央管理室内 PC または外部 PC により行うことのできるデータ通信システムを併せて構築した。

本稿では、開発したシールド外周の地山状態計測システムのうち、シールド掘進時における計測方法と解析方法について述べたのち、その解析結果を室内試験で検証した結果について報告する。

カッタービットによるオーバーカットライン

土砂の取込み過ぎ等に起因する地山の緩み、空隙

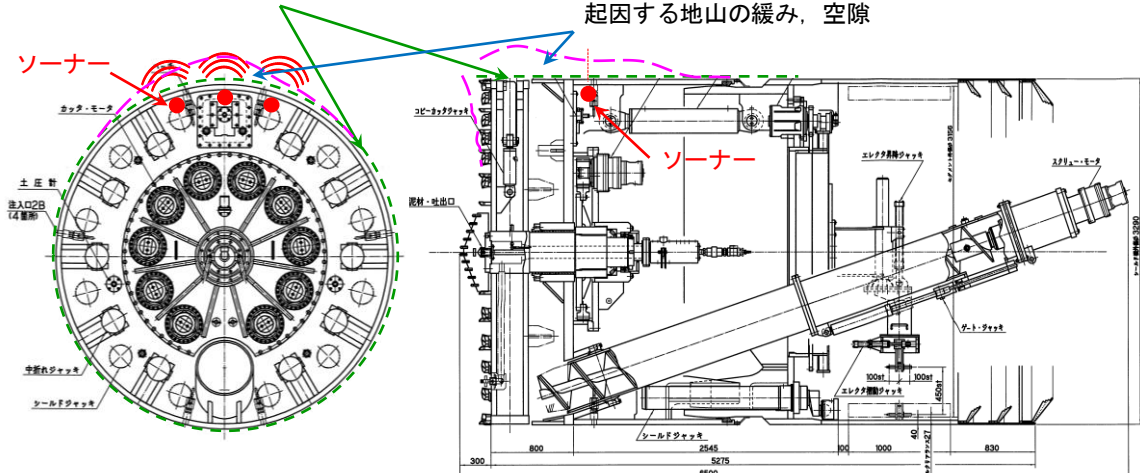


図-1 ソナーによる地山計測概要図

\*1 土木本部 地下・基礎技術部 地下構造グループ グループリーダー

\*2 研究開発センター 施工技術グループ 主幹研究員

## 2. ソナーによる地山状態の計測

### 2.1 計測方法の概要と特長

シールド外周の地山状態の計測は、音波により物体を探索する装置であるソナーを適用した。図-1にソナーによる地山計測の概要図を示す。シールド本体のスキンプレート内側にソナーを取り付け、外側に向け超音波を発信することで、土砂の取込み過ぎ等に起因する地山の緩みや空隙を把握する。ソナーによる計測の主な特長 3 点を次に示す。

- ・超音波は電磁波や磁気探査と異なり、鋼板(スキンプレート)の影響を受けにくい。
- ・計測器はシールド本体への装備に際し専用の設計を必要としない。
- ・シールド本体の内側から計測することから、ソナーは後付けで設置することが可能であり、メンテナンスが容易である。

### 2.2 ソナーによる計測の原理と課題

カッターヘッドにより切削された泥水または泥土が充満するほぐされた領域とその外側の地山では、音響インピーダンスに差がある。図-2にソナーによる計測原理についての概要図を示す。鋼板(スキンプレート)内側にソナーを取り付け、外側に向け超音波を発信するとそれらの境界で反射する。そのため、発信から反射波を受信するまでに要する時間と泥土中の音の伝搬速度から余掘り範囲の深さを推定することができる。余掘り範囲深さ推定の関係式を式(1)に示す。

$$L_M = c_M \left( \frac{t}{2} - t_s \right) = c_M \left( \frac{t}{2} - \frac{L_S}{c_S} \right) \quad (1)$$

ここに、 $c_M$ ：泥土中の音波の伝搬速度 (m/s)

$L_M$ ：鋼板外面から地山境界面までの区間長(余掘り量) (m)

$L_S$ ：鋼板の厚さ (m)

$c_S$ ：鋼板中の音波の伝搬速度 (m/s)

$t$ ：超音波発信から地山からの反射波到達までの時間 (s)

$t_s$ ：鋼板中の音波の通過時間 (s)

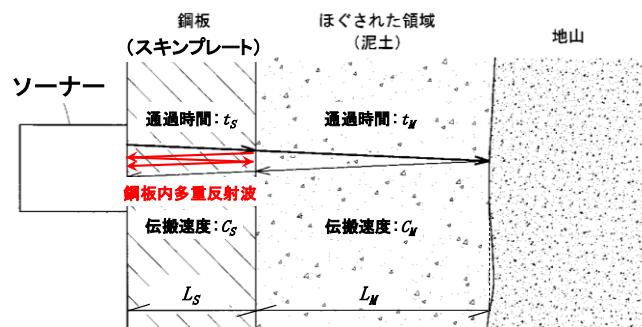


図-2 ソナーによる計測原理概要図

一方、ソナーから発信された超音波は、地山からの反射波として戻ってくる際に、鋼板内での多重反射波や横からの反射波と一緒に受信される。図-2中には、その多重反射波の概要を併せて示した。

過年度の報告<sup>1)</sup>では、模擬地盤を用いて、掘削泥土と模擬地盤との境界面からの反射波を計測する室内試験を実施した。その後、ソナーを稼働中のシールドに取り付けて試験計測を行い、計測環境が機器に及ぼす影響を確認した。室内試験では、スキンプレートを模擬した鋼板内の多重反射波は信号処理で除去した。一方、試験計測ではシールド本体の上部と下部にソナーを取り付けて計測を行ったところ、ソナーの位置により受信信号が異なった。つまりスキンプレート内での多重反射波の状況は、その背面の状況により異なることがわかった。そのため、多重反射波の影響を最小限にすることを検討した。

## 3. 多重反射波の影響を最小限にする手法の検討

### 3.1 多重反射波の収束促進

スキンプレート内の多重反射波の収束を早めるために、ソナーとスキンプレートの間に多重反射波の減衰効果が期待できるシート状素材を挟むことを考え、各種素材の音響特性試験を実施した。試験は、スキンプレートを模擬した鋼板(厚さ50mm)とソナーの間に、厚さの異なる各種シート状素材を挟み、素材のダンピ

ング効果を確認した。写真-1に試験の実施状況を示す。ダンピングの効果は相対的に、シリコンシート>ポリ塩化ビニルシート>ゴムシート>アクリル板の順に期待できた。試験結果の一例として厚さ1mmのシリコンシートおよび厚さ2mmのゴムシートの受信波形を図-3に示す。図では200 $\mu$ s付近で差が出ていることがわかる。一方、厚さ2mmまたは厚さ3mmのシリコンシート、ポリ塩化ビニルシートは地山からの反射波そのものの減衰が大きく、多重反射波の影響低減が困難と予想された。そこで、以後の試験では厚さ1mmのシリコンシートを用いることにした。

### 3. 2 発信波(周波数, 波数)の組合わせの最適化

スキンプレート内多重反射波の低減効果がある周波数を求めるため、80kHz~120kHzについてシミュレーションを行ったところ、厚さ50mmの鋼板では90kHz時に鋼板内多重反射波が少ないことがわかった。そこで、同鋼板に対して発信時90kHzの超音波が生成される波数を試験から求めた。

まず初めに60kHz~100kHzにおいて、5kHzごとに波数1, 波数3, 波数5と変えて計測した。写真-2に試験の状況を、図-4に波数1と波数3で発信したときに計測した受信信号について、高速フーリエ変換を行った結果を示す。波数1の発信ではピーク周波数は70kHzであるが、波数3と波数5ではピーク周波数が計測に有利な90kHzであった。

次に80kHz~100kHzについて1kHzごとに、波数4および波数5で計測を行った。計測結果から、波数5では受信する反射波との干渉が確認されたことから、ここでは波数3と波数4での計測が適当と判断した。これらの試験の結果、以後の計測においては、発信波(周波数, 波数)の組合わせとして、80kHz~100kHzについて1kHzごとに波数3および波数4で計測して1回の計測とした。

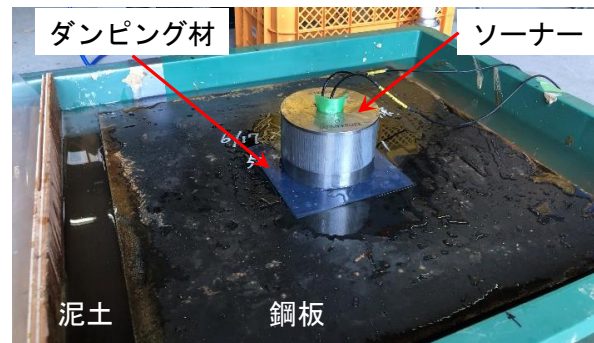


写真-1 ダンピング材試験状況

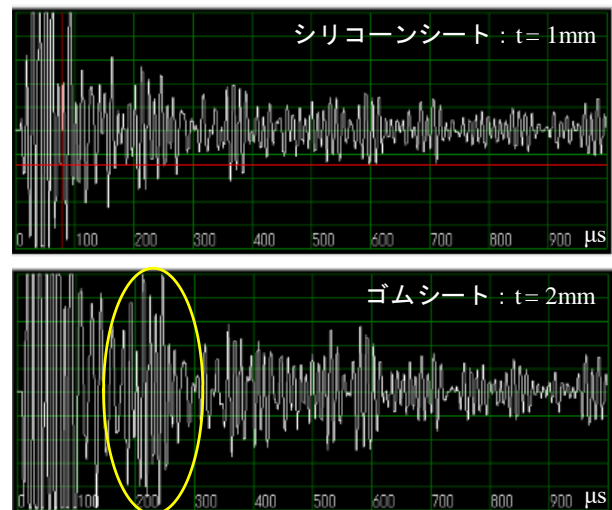


図-3 受信波形の例

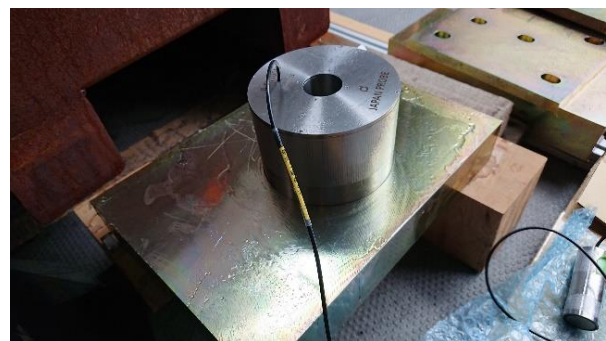


写真-2 発信波組合わせ試験状況



図-4 フーリエ変換結果  
(左: 波数1, 右: 波数3)

#### 4. シールド搭載試験

シールドでの試験計測で課題として挙げられた、多重反射波の影響を最小限にするために、3章ではダンピング材をソーナーとスキンプレート間に挟むとともに、発信波の組合わせの最適化を図った。本章シールド搭載試験では、これらの手法を用いて、あらためて別のシールドで余掘り量を計測することとし、ソーナーを増設して3チャンネルでの計測を実施した。併せて、計測条件および解析方法の深度化、高度化を図ることで、シールドの運転中における、余掘り範囲の深さの数値化、可視化をリアルタイムで可能とすることを目的とした。

##### 4. 1 ソーナー取り付け方法の検討

超音波の伝搬においてソーナーは、取り付けるシールド本体のスキンプレート内面に十分に接触させる必要があるため、長期間の計測に耐える接触触媒を検討した。接触触媒は、容易に手に入り、化学変化が起きにくく変質しない材料から選んだ。また、粘性、弾性がありソーナーとスキンプレート内面との間隙に馴染み、超音波の伝搬に優れるものとして、ドライカップリングシートとシリコンオイルの組み合わせを選定した。図-5にスキンプレートへのソーナーの取り付け模式図を示す。ソーナーは、金型用スプリングを用いてスキンプレートに押し付けた。図-6にドライカップリングシートとシリコンオイルの組み合わせ時の受信波形を示す。図-3と比較すると、スキンプレート内多重反射波の収束を促進させる効果を確認した。

##### 4. 2 データ通信システムの構築

シールド本体に取り付けての長期連続計測を行うにあたり、工程替え等による停電およびその電源復旧に対して、自動計測を開始するシステムを構築し、併せてリモートデスクトップによる遠隔操作が可能なシステムとした。また、シールドの掘進に連動して計測するシステムを構築した。

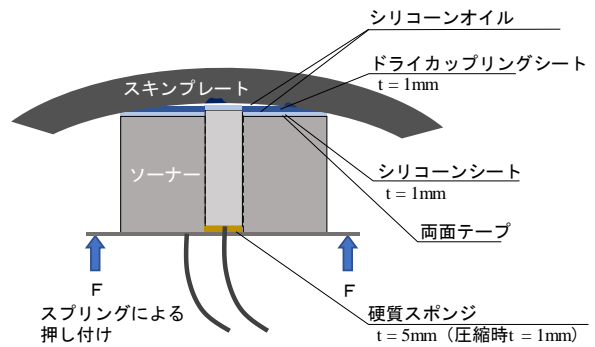


図-5 スキンプレートへのソーナー取り付け模式図

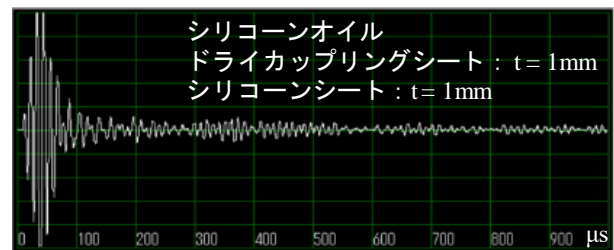


図-6 組み合わせ選定時の受信波形

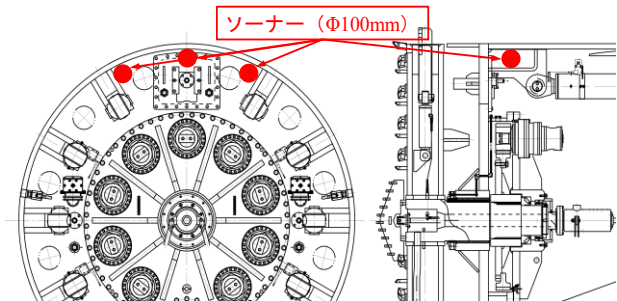
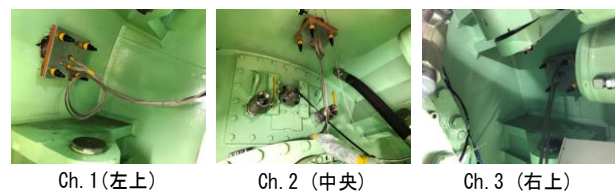


図-7 スキンプレート内面へのソーナー設置状況

##### 4. 3 シールドでの長期計測

2020年3月から2021年2月までの1年間、稼働中のシールドにソーナーを取り付けて連続して計測しデータを取得した。シールドの掘進中は1回/3分、停止中は1回/20分間隔で計測し、合計25,553レコードのデータを取得した。また、計測期間中に発生した停電にも対応でき計測は順調であった。図-7にスキンプレート内面へのソーナー設置状況を示す。ソーナーは天頂部付近の3個所に設置し、3チャンネル

での計測を実施した。

#### 4. 4 解析方法の深度化

シールドでの連続した計測で取得したデータを基に、解析方法の深度化を図った。

##### (1) 計測方法

3. 2で示したように、波数 3 および波数 4 で 80kHz~100kHz の間 1kHz ごとに計測を行い、これら一連の計測を 1 回と数えることとした。図-8 に波数 4 でのある回の反射波計測結果例を示す。

##### (2) 合成波の生成

計測回ごとに反射波の波形を合成し、その合成した波形を平均して、平均トレースを作成した。さらに、ある計測回のデータとその 1 回前に計測したデータの平均トレースの差分をとることとした。

##### (3) 合成波の利用

多周波数の音響信号を使うことでスキンプレート内部に生じる多重反射波の自己減衰効果を利用し、多重反射波を除去する。これは、反射波の位相は周波数ごとに変化しており、多周波の位相合成により多重反射波が打ち消しあうことを利用している。ここで、生成した平均トレースの差分の波形を計測回ごとに縦に並べてシフト表示したのち、振幅の絶対値を取り、波形の山の中を色付けした。図-9 に本項の解析で得られた図の例を示す。

##### (4) 表示方法

ソーナーが発信する連続波は、最初の 1 波目より次の 2 波目、2 波目より 3 波目と後波ほど応答が良い。計測した波数 3 と波数 4 の連続パルス波を用い、音響信号発生過程の電気機械変換の応答性を解析することで高分解能な反射信号が形成される。計測回ごとの平均差分トレース波形(振幅の絶対値)の最大値に対して 0.3 以上となる波以降を赤く着色した。ここでは、仮に「0.3」を閾値として設定した。

図-10 に、図-9 で示した波数 4 の平均差分トレース波形群に対して、この操作を行った結果を示す。赤く着色された部分の立ち上がり

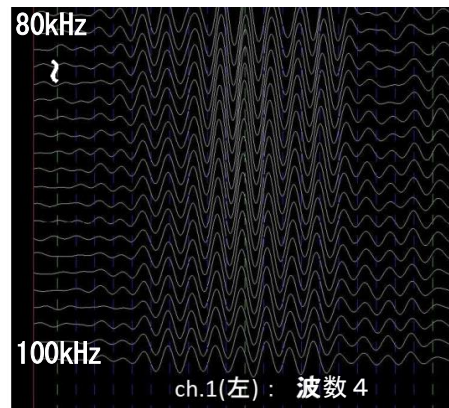


図-8 波数 4 での反射波計測結果例

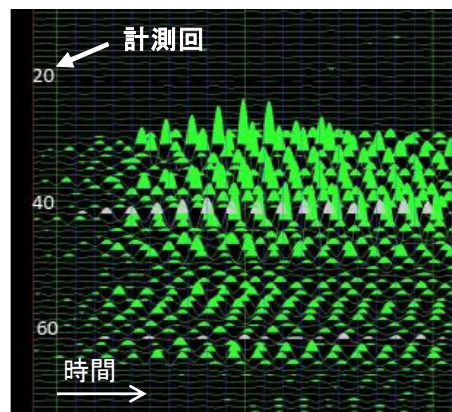


図-9 波数 4 の平均差分トレース波形群

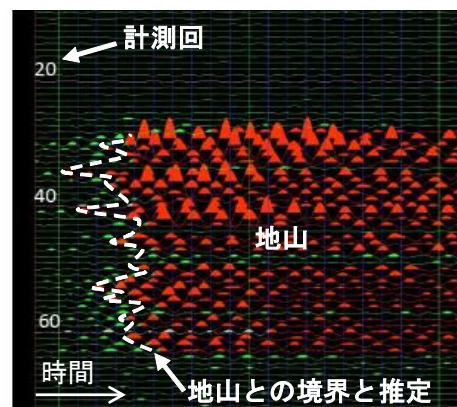


図-10 色分けした波数 4 の平均差分トレース波形群

を地山との境界と推定した。また、図の横軸は時間を表しており、ソーナーが反射波を受信するまでの時間を把握することができるため、シールド外部からの距離に変換できる。

##### (5) 解析手法の課題

今回のデータの解析では、基準とする計測回と、その一計測回前のデータを用いて、その差から音響反射面を算出したが、図-11 に示

すようにシールド掘進時の差分反射波は地山境界が明瞭に現れるが、シールド停止中の差分反射波は変化がなく、地山境界検出が難しかった。

## 5. データ解析結果の検証

シールド外周地盤の余掘り範囲を視認できなかったことから、余掘り範囲を土槽内で模擬し計測および解析を行うことで、データの解析結果の妥当性を検証した。図-12 に模擬地盤を用いた計測検証の概要図を示す。

検証に用いる模擬地盤における計測は、シールド掘進に代わり、模擬地盤上をソーナーを載せた鋼板を移動させ、シールド掘進時の差分解析に近い状態を再現した。

### 5. 1 模擬地盤の製作

2000mm×1000mm×深さ 500mm の土槽に層厚 440mm～470mm の十分に圧密した粘性模擬地盤を製作した。模擬地盤上には加泥材を混ぜた泥土を 30mm～60mm の厚さで覆い被せるように充填し、余掘り範囲を模擬した。

### 5. 2 計測方法

これまでの室内試験同様にシールドのスキンプレートを模擬した厚さ 50mm の鋼板を用い、模擬地盤上に鋼板を設置した。計測は、鋼板の中心にソーナーを置いて鋼板を移動させながら行った。計測状況を写真-3 に示す。計測は、計測点ごとに 80kHz～100kHz の間で 1kHz ごとに波数 3 および波数 4 で行った。

### 5. 3 解析手法の高度化

前章のデータ解析では、基準となる回の 1 回前の計測回のデータを用いて基準との差を求めた。この解析プロセスを用いて今回の検証試験の解析を行うと、1 回程度の移動距離の変化では泥土部の土質および層厚に変化がなく、模擬地盤と泥土部の境界検出が困難であった。このことは、図-11 で地山境界の検出ができなかったシールド停止中の状態に相当する。そこで、解析から得られたデータについて、基準とする測定回に対して当該回の過去の複数回分または将来の複数回分もしくはその組み合わせたデー

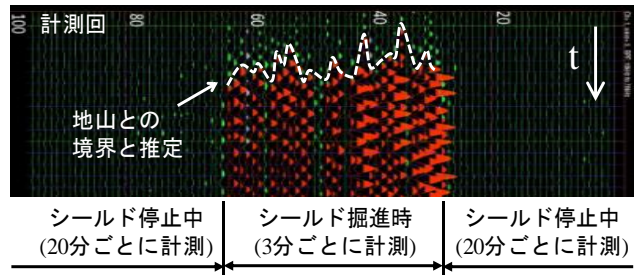


図-11 シールド停止中および掘進中の4波の平均差分トレース波形群

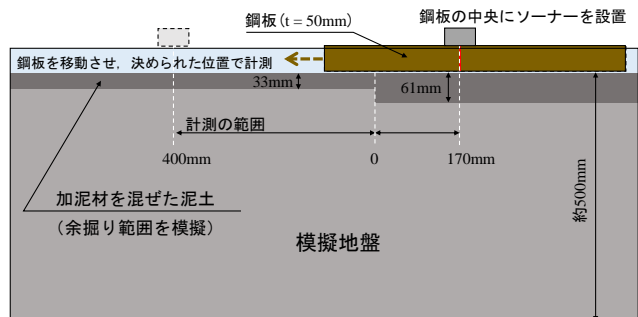


図-12 模擬地盤を用いた計測検証概要図

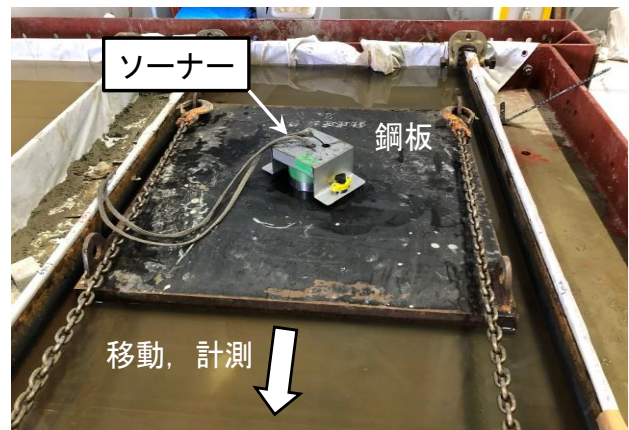


写真-3 模擬地盤の計測状況

タを選定して平均し、当該基準回との差を求めて行った。図-13 に波数 3 および波数 4 で計測した、模擬地盤からの反射波の解析例を示す。反射波の差分を取ることで、反射波の見られる範囲が浮き出てくる。

### 5. 4 解析結果

各計測点において計測し解析した反射波の受信に要する時間から推定される距離について、実測した模擬地盤形状と比較した。図-14 に反射波解析結果と模擬地盤の概要図を示す。ここで、赤く着色された波は、波形(振幅の絶対

値)の最大値に対して前章同様に 0.3 以上となるものを示し、その立ち上がりが模擬地盤との境界と推定した。この結果は、模擬地盤の地形に近似するものであり、模擬地盤と泥土部の境界面からの反射波を抽出できたと判断した。

今回の解析では基準とする計測回との差を求める他の計測回の選択を検討した。基準とする計測回と選択した計測回は、ある距離が離れており泥土部の層厚に変化があったことから、反射波に違いが生まれ模擬地盤までの計測距離の変化量を確認できたと考えた。

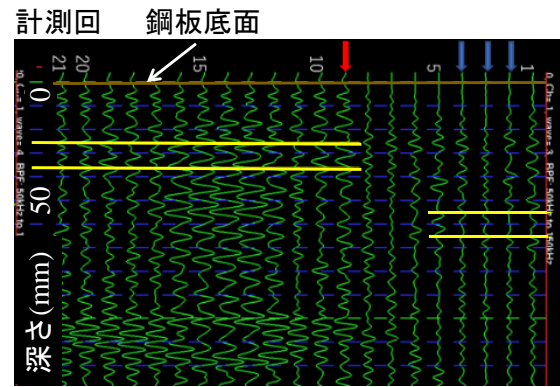
## 6. まとめ

地山状態計測システムを構築する中で、ソナーの適用の検討およびシールド搭載による連続した計測と解析手法の検討とその検証によって、システムの実用化を進めた。

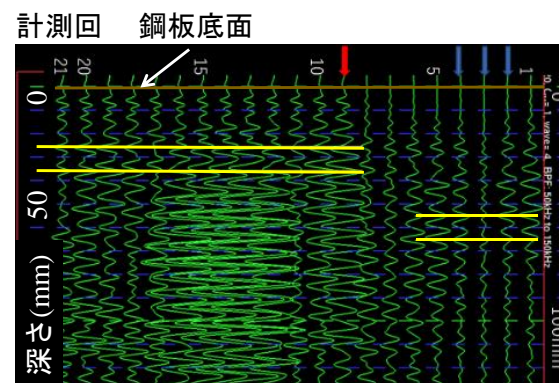
課題であった多重反射波の減衰では、ソナーとスキンプレート間に挟むシート状素材として厚さ1mmのシリコンシートを選定し、多重反射波を収束させるできた。また、発信波(周波数、波数)の組み合わせの最適化を検討し、厚さ50mmの鋼板では90kHz時に鋼板内多重反射波が少ないことを確認し、発信時90kHzの音波が生成される波数を求めた。

解析手法の検討では、シールドでの計測と得られたデータの解析手法の検討や、その後の模擬地盤を使用したデータ解析結果の検証を行うことで、解析手法を確立することができた。

模擬地盤を用いたデータ解析結果の検証では、泥土部の層厚の変化に着目して差分波形を検出したが、実施工においては土質の変化に対応して、シールド掘進時の差分波形の変化量が変換ることが想定される。今回の解析に用いた計測パラメータは、実際の作業の計測状況を確認しながら試行錯誤を行い設定した。今後、全自動で計測、解析を行うにあたり計測データを蓄積して、計測回の選択を的確に行うこと、差分波形の検出閾値設定の検討を行う必要がある。



波数 3 での計測



波数 4 での計測

- ↓ : 基準とする計測回
- ↓ : 基準との差を求めるために選定した回
- : 反射波の見られる範囲

図-13 模擬地盤からの反射波解析例

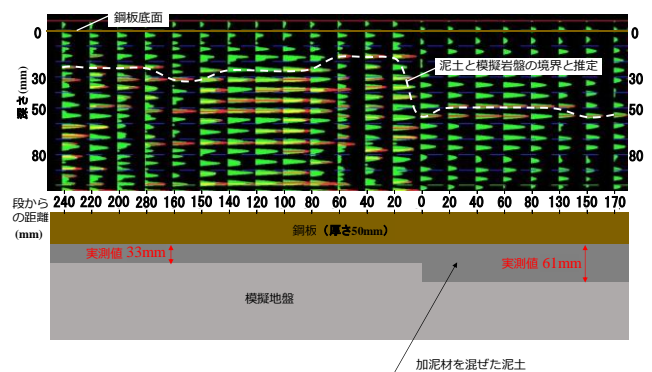


図-14 反射波解析結果と模擬地盤との比較

## 参考文献

- 1) 岩瀬隆・浅田昭：シールド機外周の地山状態計測へのソナーの適用検討，土木学会第74回年次学術講演会，VI-486，2019