

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・竹田 茂嗣³・森 裕之⁴・浅田 昭⁵

¹正会員 鉄建建設株式会社 土木本部 (〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町 2-5-3)
E-mail: nobuhiko-yamada@tekken.co.jp

²正会員 鉄建建設株式会社 研究開発センター (〒286-0825 千葉県成田市新泉 9-1)
E-mail: takashi-iwase@tekken.co.jp

³正会員 株式会社ジェイテック 技術企画本部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町 3-12-3)
E-mail: shigetsugu-takeda@j-t-e-c.co.jp

⁴株式会社アーク・ジオ・サポート (〒151-0071 東京都渋谷区本町 2-18-14)
E-mail: h_mori@a-gs.jp

⁵東京大学名誉教授
E-mail: asada@iis.u-tokyo.ac.jp

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ために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、シールド外周の地山状態計測システムの開発に伴い、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計測および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が明確でなかったことから、その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計測の妥当性を検証した。

Key Words: shield machine, over excavation, sonar, measure, analysis

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。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、シールド外周の地山状態計測システムを開発し、シールド本体のスキンプレート内側から地山と計測器が非接触な状況での計測を実現した。また、計測結果をシールドオペレータ等にはわかる表示とした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、シールド外周の地山状態計測システムの内、シールド掘進時における計測方法と解析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。

2. 計測方法の概要と課題

(1) 計測方法の概要と特長

計測器に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。開発した地山状態計測システムのソナーによる計測の主な特長3点を次に示す。

- ・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専用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後付け可能であり、メンテナンスが容易である。

(2) ソナーによる計測の原理

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、発信からその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 : 泥土の伝搬速度

L_M : 鋼板外面から地山境界面までの区間長
(余掘り量)

L_S : 鋼板の厚さ

C_S : 鋼板の伝搬速度

t : 音波発信から地山からの反射波到達までの時間

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 に、その多重反射波の概要を併せて示した。

(3) ソナーによる計測の課題

過年度の報告¹⁾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付け試験計測を行い、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課題とし、課題解決を図るため、以下に示す①～③を検討した。

- ① ダンピング材を利用した多重反射波の収束促進
- ② 発信波（周波数、波数）の組合わせの最適化
- ③ 相関処理等、解析方法（受信信号処理）の深度化

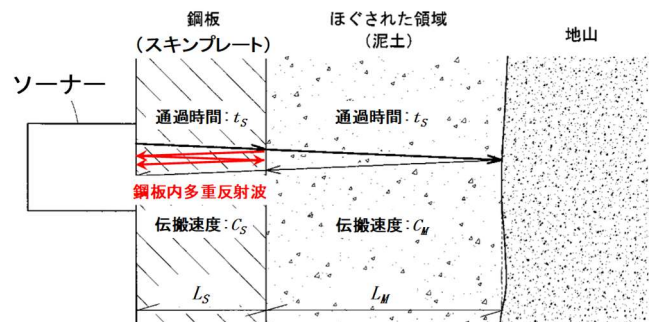


図-2 ソナーによる計測原理概要図

カッタービットによるオーバーカットライン

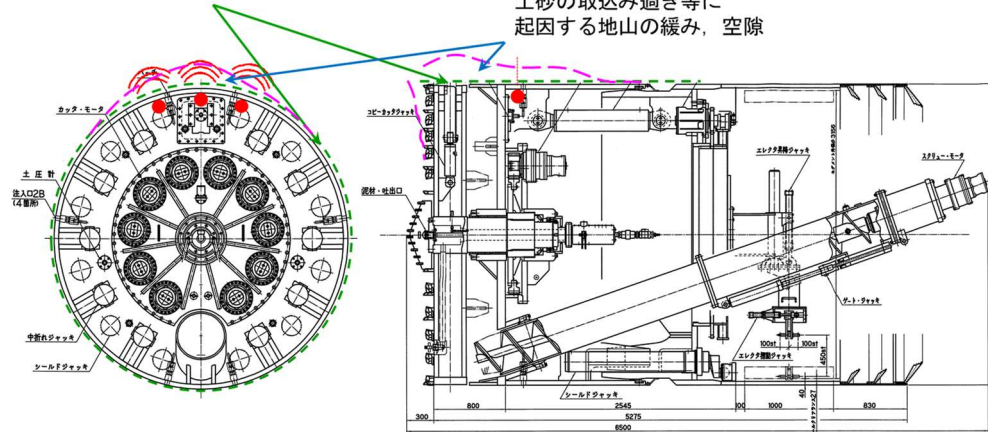


図-1 ソナーによる地山計測概要図

3. 多重反射波の影響を最小限にする手法の検討

(1) ダンピング材の検討

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検討し、各種素材の音響特性試験を実施した。試験では、スキンプレートを模擬した鋼板 ($t = 50\text{mm}$) とソナーの間に各種素材、厚さからなるシート状素材を挟み、素材のダンピング効果を確認した。図-3 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。図-4 に例としてシリコンシート : $t = 1\text{mm}$ およびゴムシート : $t = 2\text{mm}$ を用いて計測したときの受信波形を示す。200 μs 付近で差が出ていることがわかる。一方、シリコンシート、ポリ塩化ビニルシートの $t = 2\text{mm}$ または $t = 3\text{mm}$ のものは音波減衰が大きく、地山からの反射波透過への影響が予想された。そこで、以後の試験では $t = 1\text{mm}$ のシリコンシートを用いることにした。

(2) 発信波（周波数、波数）の組合わせの最適化

鋼板内多重反射波の低減効果がある周波数を求めるため、80 kHz~120 kHz についてシミュレーションを行ったところ、 $t = 50\text{mm}$ の鋼板では 90 kHz 時に鋼板内多重反射波が少ないことがわかった。そこで、鋼板 ($t = 50\text{mm}$) において鋼板内多重反射波の低減効果がある発信時 90 kHz の音波が生成される波数を求める試験を行った。

まず初めに 60 kHz~100 kHz において、5 kHz ごとに波数 1, 波数 3, 波数 5 と変えて計測した。図-5 に試験の状況を、図-6 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 70 kHz 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 90 kHz であった。

次に 80 kHz~100 kHz について 1 kHz 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。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、80 kHz~100 kHz について 1 kHz 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。

(3) 解析方法の深度化

次章に記述するシールド搭載試験で取得したデータを基に解析方法の深度化を検討したことから、4章4節に後述する。

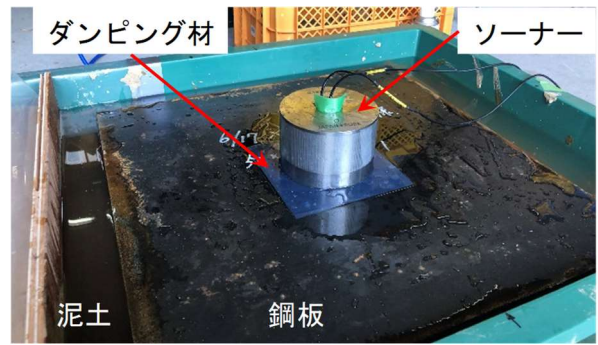


図-3 ダンピング材試験状況

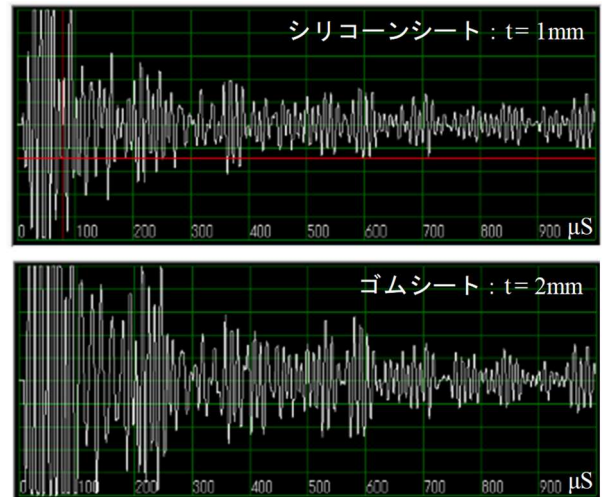


図-4 受信波形の例

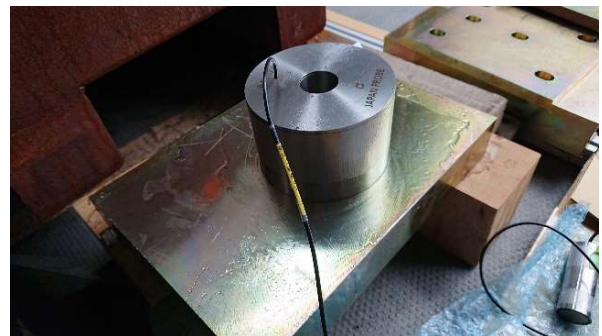


図-5 発信波組合わせ試験状況



図-6 フーリエ解析変換結果（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、ダンピング材をソナーとスキンプレートの間に挟むとともに、発信波の

組み合わせの最適化を図った。シールド搭載試験では、あらためて別のシールドで計測することとし、ソナーを増設して、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、余掘り範囲の深度の数値化、可視化をリアルタイムで可能とすることを目的とした。

(1) ソナー取付け方法についての検討

音波伝搬においてソナーは、取り付けるシールド本体のスキムプレート内面に十分接触する必要があるため、長期間の計測中も変質しない接触触媒を検討した。材料は、容易に手に入り、化学変化が起きにくく変質しない。また、粘性、弾性がありソナーとスキムプレート内面との間に馴染み、音波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-7にスキムプレートへのソナーの取付け模式図を示す。ソナーは、金型用スプリングを用いてスキムプレートに押し付けた。図-8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選定時の受信波形を示す。鋼板内多重反射波を抑えられる効果を確認した。

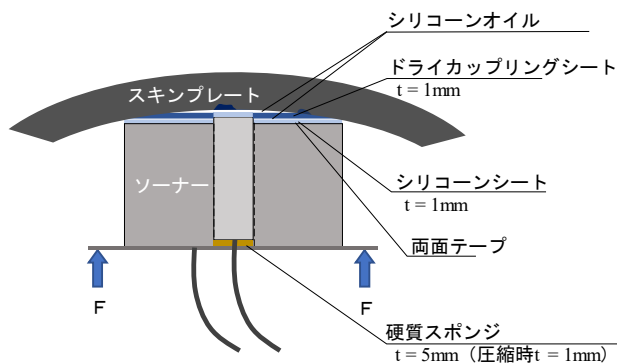


図-7 スキムプレートへのソナー取付け模式図

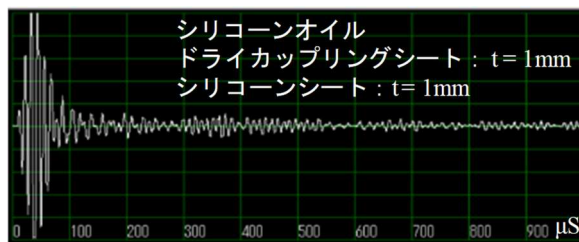


図-8 組み合わせ選定時の受信波形

(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。

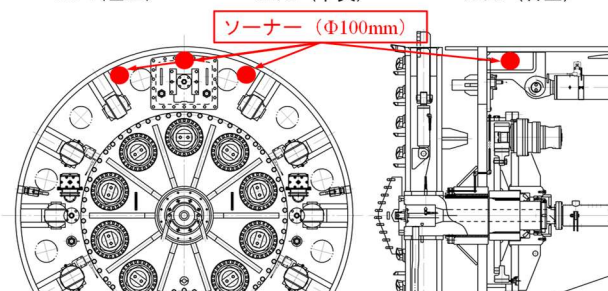
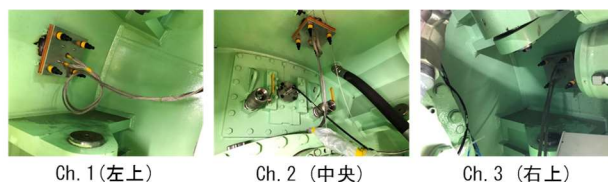


図-9 スキムプレートへのソナー設置状況

(3) シールドでの長期計測

2020年3月から2021年2月までの約1年間、稼働中のシールドに取り付けて連続して計測を実施してデータを取得した。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、発生した停電にも対応でき計測は順調であった。図-9にシールドへのソナー設置状況を示す。ソ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) 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、以下のa) ~e) に示すフローにより解析方法の深度化を図った。

a) 計測方法

各回、3波で80kHz~100kHzまで、4波で同様に80kHz~100kHzまで1kHzごとに、それぞれ1組、21回の計測を実施した。図-10に4波での1組の反射波列を示す。

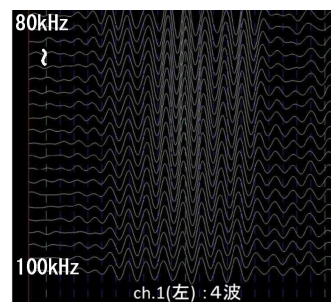


図-10 4波での1組 (80kHz~100kHz) の反射波

b) 合成波の生成

1組の計測回の反射波の波形を合成し、その合成した波形を平均して、1つの波形である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。

c) 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に対応して変化しており、多周波の位相合成により多重反射波は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た。図-11 に本項の解析で得られた図の例を示す。

d) 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3波と4波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-12に、図-11で示した4波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。

e) 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-13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。

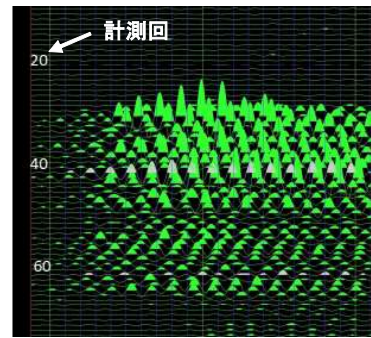


図-11 80 kHz～100 kHzの4波の平均差分トレース波形群

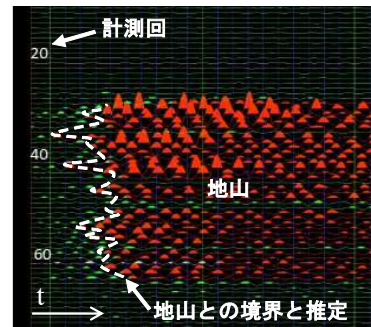


図-12 色分けした4波の平均差分トレース波形群

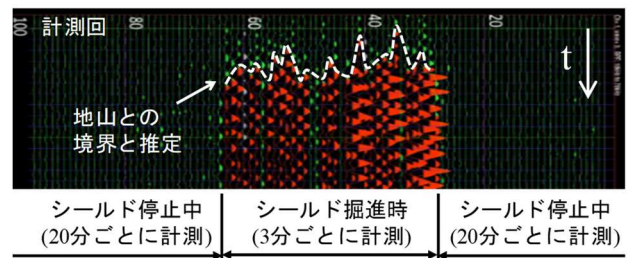


図-13 シールド停止中および掘進中の4波の平均差分トレース波形群

5. データ解析結果の検証

シールド外周の地盤の余掘り範囲を視認できなかったことから、その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-14に模擬地盤を用いた計測検証の概要図を示す。

検証に用いる模擬土層における計測は、模擬土層自体はシールドの停止状態に相当する。シールド掘進に代わり、模擬土層上をソーナーを載せた鋼板を移動させることで、シールド掘進時の差分解析に近い状態を再現した。

(1) 模擬地盤の製作

2 000 mm×1 000 mm×深さ 500 mmの土槽に層厚 440 mm～470 mm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 30 mm～60 mm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。

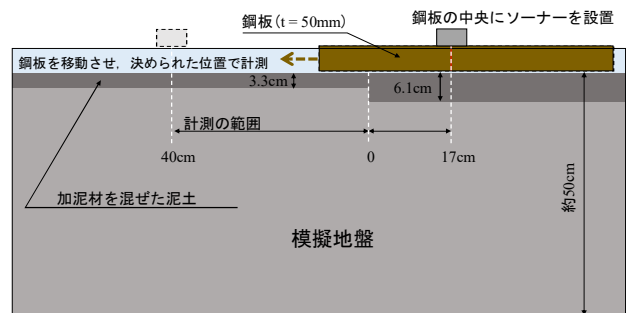


図-14 模擬地盤を用いた計測検証概要図

(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に模擬した厚さ 50 mmの鋼板を用いた。土層上に鋼板を設置し、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。計測状況を図-15に示す。計測は計測点ごとに80 kHz～100 kHzについて1 kHzごとの他周波数で、波数3および波数4で計測を行った。

(3) 解析手法の高度化

前章のデータ解析では、基準となる回の一計測回前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、一計測回程度の移動距離の変化では、計測対象の模擬地盤の高さは、泥土部分の層厚が 30 mm~60 mm に変化しているものの、泥土部の土質変化がなく、模擬地盤と泥土部の境界検出が困難であった。そこで、解析では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タを選定平均し当該基準回との差を求めて行った。図-16 に 3 波および 4 波で計測した、模擬地盤からの反射波の解析結果とデータの選定例を示す。

(4) 解析結果

模擬地盤と泥土部の境界面からの反射波を抽出できた。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ところ、図-17 に示すように、その結果は模擬地盤の地形に近似するものであった。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。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を選択を検討した。基準とする計測回と選択した計測回は、ある程度乖離していることから、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、ソー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、ソーナーとスキンプレート間に挟むことで、多重反射波の減衰効果が期待できるシート状素材を検討し、音響特性試験結果から、効果の大きい素材を選定することができた。また、発信波（周波数、波数）の組み合わせの最適化を検討し、 $t=50\text{mm}$ の鋼板では 90 kHz 時に鋼板内多重反射波が少ないことを確認し、発信時 90 kHz 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、解析手法として確立することができた。

今後の課題について述べる。解析手法の高度化におい

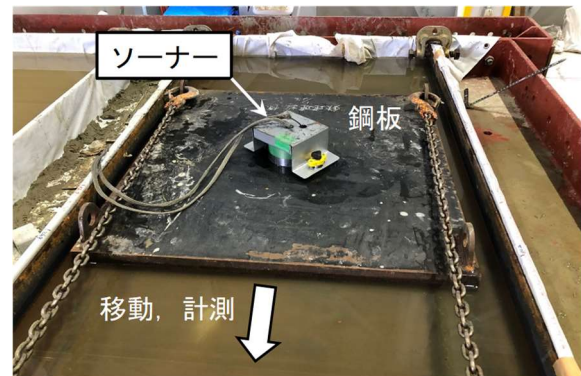


図-15 模擬地盤の計測状況

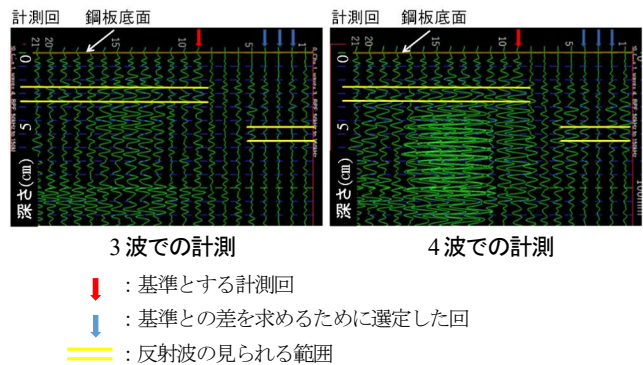


図-16 模擬地盤からの反射波解析結果

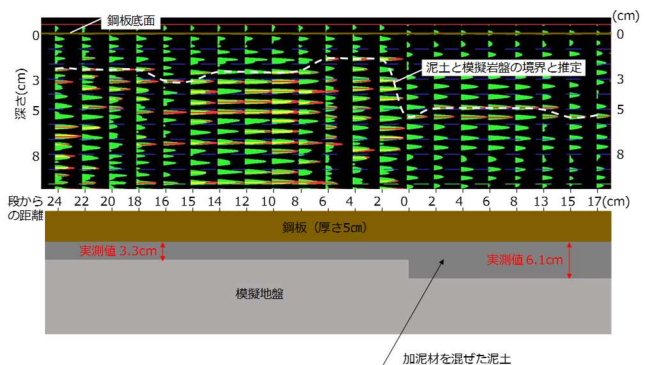


図-17 反射波解析結果と模擬地盤との比較

ては、差分波形の検出閾値を自動化する必要がある。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ることが想定される。これらの計測パラメータの設定は、実際の作業の計測状況を確認しながら主観的要素を含みながら行われる。今後、全自動で計測、解析を行うにあたり、計測回を選択を的確に行うためのデータの蓄積が必要である。

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ーナーの適用検討, 土木学会第 74 回年次学術講会, VI-486, 2019.

(2022. 8. 26 受付)

MEASUREMENT SYSTEM FOR SHIELD PERIMETER GROUND CONDITIONS DEVELOPMENT AND VERIFICATION

Nobuhiko YAMADA, Takashi IWASE, Shigetsugu TAKEDA, Hiroyuki MORI
and Akira ASADA

In enclosed shield tunneling, where the condition of the face cannot be checked directly, deformation may appear on the ground surface if excessive excavated soil is taken up. In order to prevent deformation of the ground surface, it is important to quantify or visualize the loosening of the ground and the amount of excess excavation, and to accelerate the initial response by using backfilling material that is appropriate for the amount of excess excavation. In this study, we developed a system for measuring the ground conditions around the outer circumference of a shield, and installed a sonar inside the shield skin plate to measure and analyze the measurement results. Since the relationship between the analysis results and the extent of the extra excavation of the ground around the outer circumference of the shield was not clear, the validity of the measurements was verified by simulating the extent of the extra excavation in a soil tank and performing the measurements and analysis.