

超音波ソナーを活用した可視化システムのシールドマシンへの適用

加藤 竜之信

泥土圧式シールド工法において、切羽の安定を確保するためには、チャンバー内の泥土が均一に攪拌されていることが望ましく、泥土の状態を常時把握することが重要である。しかし、チャンバーは隔壁より隔てられているため、目視・接触による確認が困難である。そこで、超音波ソナーを用いた非接触の計測法に着目した。この方法は、超音波を発信して得られた音速からチャンバー内の泥土の状態を推測するものである。本報では、泥土の状態と音速値の関係を模擬地盤にて調査した。また、泥土圧式シールドトンネル現場にソナーを設置し、実現場における適用性を検証した。

キーワード：シールドトンネル，チャンバー，非接触計測法，超音波ソナー，可視化，音速

1. はじめに

泥土圧式シールド工法において、切羽の安定を確保するためには、図-1に示すようにシールドマシン先端部においてマシン内外の圧力のバランスをとることが重要である。外部の圧力は切羽部分の土圧及び水圧を、内部の圧力はシールドマシン先端部の空洞であるチャンバーと呼ばれる作泥土室に取り込んだ泥土の圧力のことを指す。チャンバー内に取り込んだ土砂はマシン後方から注入される作泥土材とチャンバー内にて混合、攪拌されて泥土となる。このときの攪拌状態が均一でないと、泥土の塑性流動性が確保されず、圧力分布が不均一となることで切羽の不安定化、切羽地山の崩壊につながる。そのため、泥土の状態を常時把握することが重要である。

しかし、チャンバーが位置するシールドマシン前方

部とセグメント組み立て等の人力作業を行うシールドマシン後方は鋼製の隔壁によって隔てられており、泥土の状態を後方部から目視で確認することや、チャンバー内の泥土を取り出してリアルタイムに確認することは困難である。

そこで、泥土の状態を非目視・非接触で計測するために超音波を用いた手法に着目した。超音波の伝播速度は伝播する媒質によって異なることから、発信した超音波の反射波を受信し、音速を求めることで泥土の状態を推定することができると考えられる。

これまでに行われた実験では、砂質土にベントナイトを混ぜた土砂を使用して模擬地盤を作成し、超音波を用いて音速を計測した¹⁾。その結果、異なる2段階の重量比でベントナイトを混ぜた模擬地盤では音速が異なることを確認した。本報では、泥土の状態と音速値の関係を確認するため、模擬地盤に混入させるベン

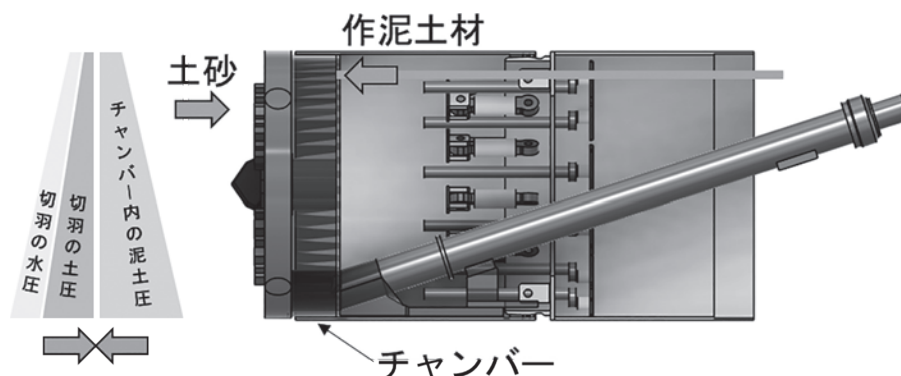


図-1 シールドマシンに作用する土圧

トナイトの重量比を変化させた複数の試験体にソナーから発信する超音波を透過させて音速との関係を調査した。また、泥土圧式シールドトンネル現場において稼働中のシールドマシンにソナーを設置し、実現場においてのデータ採取、適用性の検証を行った。

2. ソナーによる地山状態の計測

(1) ソナーによる計測法の概要

シールドマシンにおけるチャンバー内の泥土の状態を非目視・非接触で確認する方法として、超音波を用いて物体を探索する装置であるソナーを使用した。シールドマシンの隔壁後方側にソナーを取り付け、前方のチャンバー内に向け超音波を発信することで音速を求め、泥土の状態を推定する。これは超音波の伝播速度が伝播する媒質の状態によって異なるためである。ここで、超音波の発信源から反射面までの距離を L [m]、超音波を発信してから反射波を受信するまでに要する時間を t [s] とすると、超音波の伝播速度 c [m/s] は

$$c = 2L/t \quad (1)$$

で求めることができる。

ソナーによる計測の主な特長は以下に示す通りである。

- ・超音波による計測法は電磁波による計測法や磁気探査と異なり、隔壁の影響を受けにくい。
- ・シールドマシン側に計測器取り付けのための構造を必要としないため、製作済みのシールドマシンへの取り付けが可能である。
- ・シールドマシン本体の内側に計測器を設置するため、掘進開始後の設置、撤去が可能でメンテナンスが容易である。

(2) ソナー本体の構造

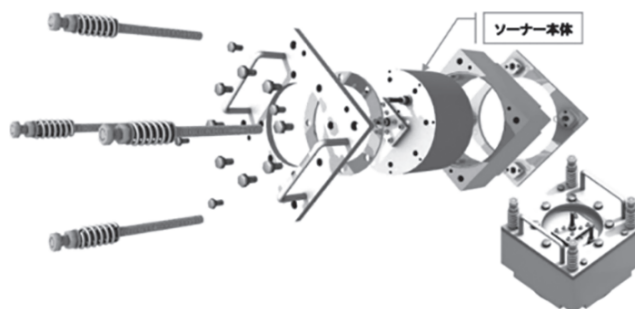
実験で用いたソナーの外観を写真—1に、ソナーの設置構造を図—2に示す。図—2のようにソナーはベース部、ソナー本体、防護部から構成されており、それらをテンションボルトにて締結している。ソナー本体の計測面側には、音速測定を阻害する空気の侵入を防止するためにシリコンシートが貼り付けられており、これを介して隔壁の壁面に設置する。

ソナーから発信、計測する超音波の仕様は以下の通りである。

- ・発信周波数：27.25～45 kHz
- ・中心周波数：35 kHz
- ・計測する波数：5波
- ・サンプリング周波数：5 MHz



写真—1 ソナー外観



図—2 ソナー本体の構造

3. ソナーを使用した音速の計測

(1) 模擬地盤による調査

はじめに、模擬地盤を用いて泥土の状態と音速の関係を調査した。図—3に示すように、模擬地盤の底面に厚さ0.5 mmのアルミ反射板を設置し、上側に100 mm離れた表面にソナーを配置した。ソナーとアルミ反射板の間はベントナイトと水の混合物を充てんし、ベントナイトと水の比は表—1のようにベントナイトの重量比を2%ずつ8段階で変化させた。

調査結果を図—4に示す。横軸はベントナイトの重量比、縦軸は観測された音速を表している。ベントナイトの重量比が増加するのに従って音速も増加する傾向が見られた。これは、これまでに行われた実験結果と同様の傾向であり¹⁾、泥土の状態と音速には相関関係があると考えられる。一方、傾向から大きく外れた音速も観測された。この原因として、模擬地盤の攪拌が十分でなかったこと、表面や側面での多重反射によるノイズの音圧が相対的に大きかったことが考えられる。

(2) 実現場における測定

次に、稼働中のシールドマシンにソナーを取り付け、音速の計測を実施した。実際にソナーを取り付け

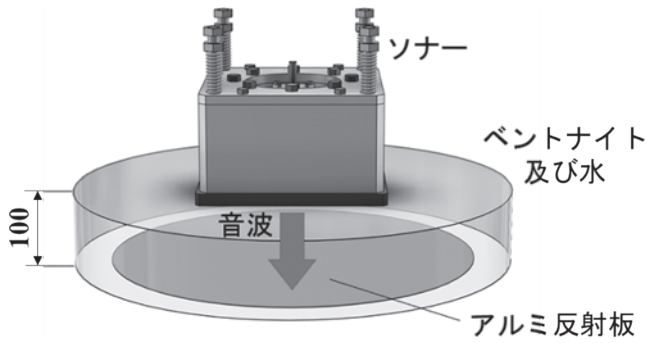


図-3 模擬地盤実験

表-1 ベントナイト重量比

ベントナイト重量 [kg]	水重量 [kg]	ベントナイト重量比 (%)
1.761	9.173	16.1
	7.950	18.1
	6.972	20.2
	6.172	22.2
	5.576	24.0
	5.000	26.0
	4.527	28.0
	4.089	30.1

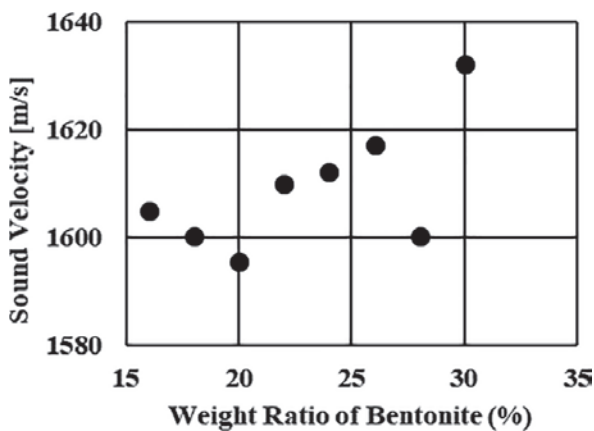
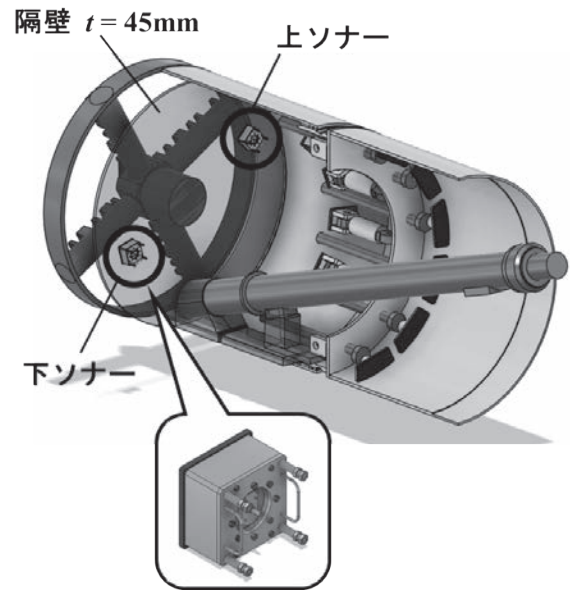


図-4 ベントナイトの重量比と音速の関係

たシールドマシンの直径は最外周で 3,280 mm、隔壁厚さは 45 mm である。ソナーは図-5 (a), (b) の枠に示すようにシールドマシンの隔壁後方側の可能な限り離れた 2 か所に取り付けた。シールドマシン中心からの各ソナーの距離は図-5 (b) に示す通りである。次節以降では、シールドマシン後方側から見て右上に配置したものを上ソナー、左下に配置したものを下ソナーと記載する。

音速を計測する際には、音響インピーダンスが変化する境界面、すなわち 2 つの媒質の境界面で超音波を反射させる必要がある。本検証では、シールドマシン最前部にあるカッタースポークに反射した超音波を対



(a) 俯瞰図

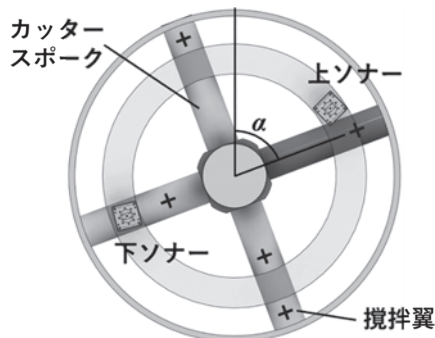


(b) 背面図

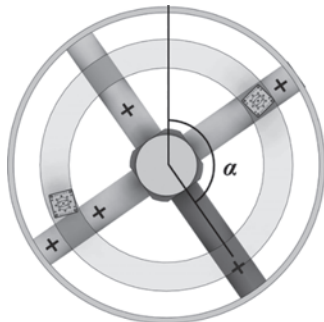
図-5 ソナー取り付け位置

象とした。

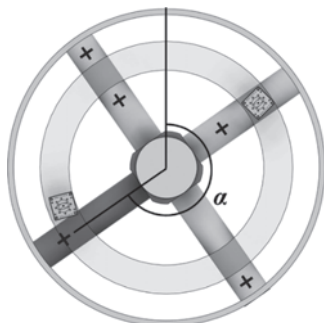
実験で使用したシールドマシンにはカッタースポークが 4 本あるため、カッタースポークが 1 周する間にソナーの前方を 4 回通過する。しかし、カッタースポークの後方側には攪拌翼と呼ばれる突起が存在し、ソナー前方部付近に攪拌翼があると多重反射によって正確な音速値を測定するのが困難となる。そのため、攪拌翼が干渉しない瞬間のみで計測を行うこととした。図-6 (a), (b), (c), (d) は計測する各瞬間のカッタースポークの配置で、カッタースポーク表面の十字状の突起が攪拌翼である。また図-6 において基準とするカッタースポークのマシン頂部からの回転角を α とする。上ソナーは図-6 (b), (c) のとき、下ソナーは図-6 (a), (d) のときに計測が行われるため、カッタースポークが 1 周する間の計測回数は上下ソ



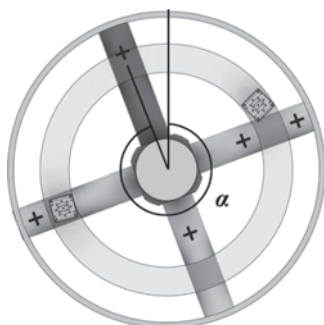
(a) $\alpha = 69.5^\circ$



(b) $\alpha = 145^\circ$



(c) $\alpha = 235^\circ$

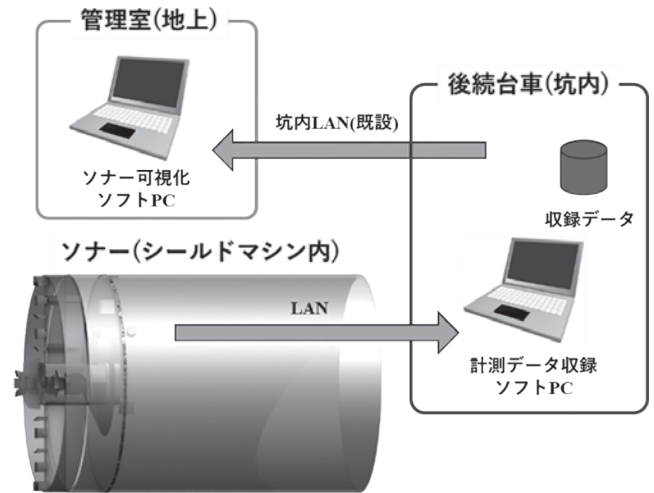


(d) $\alpha = 339.5^\circ$

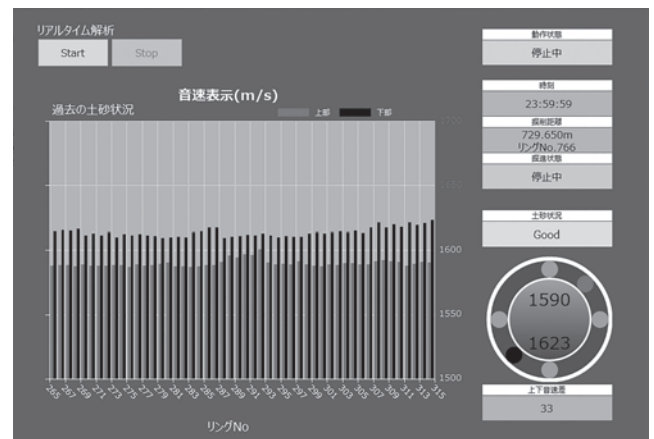
図一六 計測時のカッタースポーク配置

ナーとも2回となる。

計測されたデータは図一七に示すように専用のLANケーブルを介して、坑内の後続台車に設置した計測データ収録ソフトPCに取り込まれ収録される。さらに、既設の坑内LANケーブルを介して地上の管理室に設置したソナー可視化ソフトPCにデータが送



図一七 データの収録方法



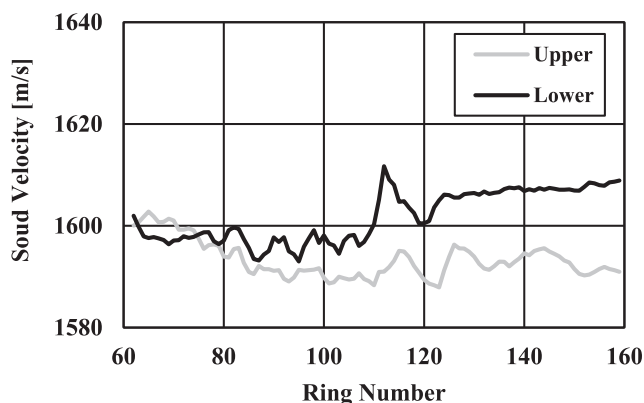
図一八 ソナー可視化ソフトPCの表示画面

られる。ソナー可視化ソフトPCでは計測されたデータが画面に表示され、結果を確認することができる。ソナー可視化ソフトPC表示画面の一例を図一八に示す。

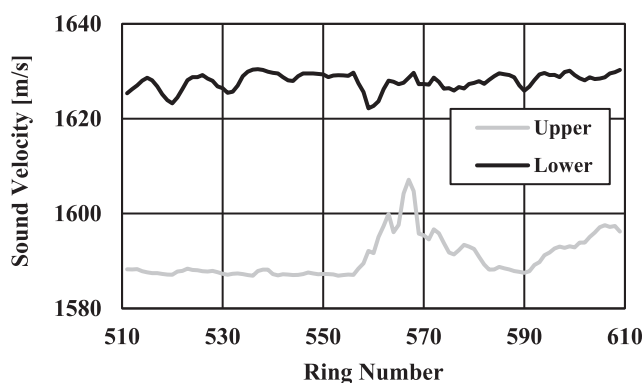
(3) 計測結果

上下の各ソナーで計測された音速を図一九(a), (b)に示す。いずれも横軸はセグメントのリング番号で、範囲は図一九(a)が61～160リング、図一九(b)が511～610リング、縦軸はセグメント1リング分の平均音速である。

同じリングにおいて上下ソナーで計測された音速の差に着目すると、図一九(a)では上下の音速に大きな差がなく最大で20 m/sであるのに対し、図一九(b)では音速の差が大きくほとんどのリングで40 m/s程度となった。この原因として、シールドマシンの上下での土質の違いが影響していると考えられる。掘進箇所における土質は61～160リングの範囲ではマシンの上下とも固形シルトであるのに対し、511～610リングの範囲ではマシンの下部が固形シルト、上部が粘



(a) 61 ~ 110 リング



(b) 511 ~ 610 リング

図-9 計測された1リング分の平均音速

土質砂礫であることがわかっている。そのため、シールドマシンの上下で土質が異なる511～610リングの範囲では、断面内の土質を均等に攪拌することが難しく計測された音速に大きな差が生じたものと考えられる。

一方で掘進箇所による音速の絶対値の変化に着目すると、途中で土質が変化する上側では音速は1,590 m/sでほとんど変化がないのに対し、土質が変化しない下側では、511～610リングの音速は61～160リングの音速より30 m/s程度大きな値となっている。このことから、土質によって音速は変化するが、他にも音速に影響を与えるパラメータが存在すると思われる。

4. おわりに

本報では、シールドマシンのチャンバー内に存在する泥土の状態を知る方法として、超音波ソナーを用いた非接触の計測法に着目し、実現現場での適用性を検証した。ソナーを発信した際の反射波を計測することで音速を求め、音速の値から地山の状態を推定した。

はじめに、模擬地盤においてベントナイトと水の混合物を用いて音速を計測し、ベントナイトの重量比が大きくなるほど音速が大きくなる傾向が得られた。

次に、実現現場において稼働中のシールドマシンにソナーを取り付け、掘進中の各リングで平均音速を計測した。その結果、上下のソナーで計測された音速に大きな差が見られる箇所が存在した。これは、土質の境界部において十分に攪拌を行うことが難しく、チャンバーの上下で支配的な土質が異なっていたためと考えられるが、同じ土質でも音速は掘進箇所によって変化するため、音速に影響を与える別のパラメータもあると考えられる。

超音波の音速は伝播する媒質の弾性率と密度に依存する。また、液体、固体といった媒質の相によっても異なり、媒質の温度にも依存する。そのため、現在までに得られた結果だけではチャンバー内の土質を正確に推定することが難しい。

今後、物性が既知の泥土を用いた音速の調査や、類似の土質において各パラメータが音速に与える影響を解明することで、泥土の状態を的確に判断できるようになり、チャンバー内の攪拌状態の可視化精度向上につながると期待される。

JICMA

《参考文献》

- 1) 山田宣彦, 岩瀬隆, 森裕之, 浅田昭: ソナーを使用したチャンバー内の可視化に向けた基礎実験, 土木学会第78回年次学術講演会, VI-837, 2023.9

【筆者紹介】

加藤 竜之信 (かとう りゅうのしん)
 鉄建建設(株)
 建設技術総合センター
 研究開発センター 施工技術グループ

