ソナーを使用したチャンバー内可視化技術のシールドトンネル現場への適用検証

加藤 竜之信\*1·谷崎 英典\*2·平田 惣一\*3

# 概 要

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 ーに撹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超音 波伝播速度からチャンバー内の泥土の状態を推測するものである。本検証では、泥土の状態と 超音波伝播速度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,超音波ソナー,超音波伝播速度

# VERIFICATION OF THE APPLICATION OF SONAR-BASED CHAMBER VISUALIZATION TECHNOLOGY AT SHIELD TUNNEL SITES

Ryunoshin KATO\*1, Hidenori TANIZAKI\*2, Soichi HIRATA\*3

#### Abstract

In the high-density slurry shield method, it is recommended that the slurry within the chamber is stirred uniformly in order to ensure the stability of the tunnel face, and it is imperative that the condition of the slurry is monitored at all times. However, as the chamber is separated by a bulkhead, it is difficult to confirm the condition visually or by physical contact. To address this issue, we focused on a non-contact measurement method that uses ultrasound sonar. This method estimates the condition of the slurry within the chamber by emitting ultrasound waves and measuring their propagation velocity. In this verification, we investigated the relationship between slurry condition and ultrasound wave propagation velocity in simulated ground. We also installed a sonar at a high-density slurry shield tunnel worksite and verified the applicability of the technology in the field.

Keywords: Shield tunnel, Chamber, Ultrasound sonar, Ultrasound wave propagation velocity

<sup>\*1</sup> Construction Technology Group, Research & Development Center

<sup>\*2</sup> General Manager, Machinery & Electrical Engineering Department, Civil Engineering Division

<sup>\*3</sup> Project Manager, Sapporo Branch, JV Shimukappu Office

#### 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 の土圧及び水圧を、内部の圧力はチャンバーに取 り込んだ泥土圧のことを指す。チャンバーとはシ ールドマシン先端に位置する作泥土室のことで、 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・ 撹拌されて泥土となる。このときの撹拌状態が均 ーでないと、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部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・非接触で把握す るために, 超音波を用いる手法に着目した。超音



図-1 シールドマシンに作用する土圧

加藤 竜之信\*1・谷崎 英典\*2・平田 惣一\*3

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,伝播 速度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。

過年度は、異なる2種類の重量比でベントナイ トを混合した模擬泥土を用いて、ベントナイトの 重量比によって超音波伝播速度が異なることを 確認した<sup>1)</sup>。本検証では、作泥土材の状態と超音 波伝播速度の関係を確認するため、ベントナイト 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超音波伝播速度 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、実現場でのデータ採取を行うと ともに、適用性の検証を行った。

# 2. ソナーによるチャンバー内泥土の状態の計測 2.1 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, 本検証では超音波を用いて物体を探査する装置 であるソナーを用いた。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 向け超音波を発信し,泥土の状態を推定する。な お,超音波の伝播速度は式(1)により求められる。

c = 2L	/ t	(1)
c = d d	/ (	(1)

- ここで, *L*: 超音波の発信源から反射面までの距 離[m]
  - t: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[s]
    c:超音波の伝播速度[m/s]

\*1 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 \*2 土木本部 機電部 部長

\*3 札幌支店 JV 占冠作業所 所長

ソナーによる計測の主な特長を以下に示す。

- ・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。
- ・計測器をシールドマシンに取り付ける際に、
  シールドマシン側に専用の設計を必要としない。
- ・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。
- 2.2 ソナー本体の構造

本検証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固定 している。ソナー本体の計測面(ベース部側の面) には, 超音波伝播速度の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: 27.25~45kHz
- ・中心周波数:35kHz





図-2 ソナーの設置構造

・計測する波数:5波

・サンプリング周波数:5MHz

## 3. 作泥土材の超音波伝播速度の計測

# 3.1 調査概要

はじめに,作泥土材を用いて超音波伝播速度との関係を調査した。図-3に示すように,容器の 底面に厚さ 0.5mm のアルミ反射板を設置し,離 隔 100mm の高さにソナーを配置した。ソナーと アルミ反射板の間には作泥土材を充てんした。な お,作泥土材はベントナイトと水の混合物であり, 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。

# 3.2 調査結果

調査結果を図-4 に示す。横軸はベントナイト の重量比,縦軸は計測された超音波伝播速度を表 している。検証で用いた作泥土材では超音波伝播 速度は 1590~1630m/s 程度の範囲であり,この



# 図-3 作泥土材を用いた実験

# 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[%]
	9.173	16.1
	7.950	18.1
	6.972	20.2
1 701	6.172	22.2
1.761	5.576	24.0
	5.000	26.0
	4.527	28.0
	4.089	30.1

範囲においてはベントナイトの重量比が増加す るのに従って伝播速度も増加する傾向がみられ た。このことから泥土の状態と超音波伝播速度に は相関関係があると思われる。しかし、上記の傾 向から大きく外れた値も観測された。この原因と しては、作泥土材の撹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。

#### 実現場における計測

#### 4.1 計測概要

稼働中のシールドマシンにソナーを取り付け, 超音波伝播速度の計測を実施した。シールドマシ ンの直径は最外周で 3280mm,隔壁厚さは 45mm である。

ソナーは図-5(a), (b)の赤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。

本検証では、この2か所のソナーで計測した超 音波伝播速度の差から泥土の撹拌状態を判断す る。以降、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。

超音波伝播速度を計測する際には,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象とした。

当該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周する間にカ ッタースポークはソナーの前方を 4 回通過する。 しかし、カッタースポークの後方側には撹拌翼と 呼ばれる突起が存在し、ソナー前方部付近に撹拌 翼があると多重反射によって正確な超音波伝播 速度を測定するのが困難となる。そのため、撹拌 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 の黄色の十字状の突起が撹拌翼である。また図ー 6において赤色で示されるカッタースポークの頂 部からの回転角を a 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 を行うため、カッタースポークが1周する間の計 測回数は上下ソナーとも2回となる。

計測されたデータは図-7 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



4





(b) *α* = 145° (上ソナー)



(c) α = 235° (上ソナー)



(d) α = 339.5°(下ソナー)図-6 計測時のカッタースポーク配置

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。

# 4.2 計測結果

上下の各ソナーで計測された超音波伝播速度 を図-8(a),(b)に示す。いずれも横軸はリング番 号で,範囲はそれぞれ 61~160 リング,511~610 リング,縦軸はセグメント1 リング分の超音波伝 播速度の平均値である。

同じリングにおいて上下ソナーで計測された 超音波伝播速度の差に着目すると、図-8(a)では 上下で大きな差がなく最大で 20m/s であるのに 対し、図-8(b)では差が大きく、ほとんどのリン グで 40m/s 程度であった。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の分布を示した縦断図 を図-9に示す。図-9において中央部の赤色の 斜線でハッチングされた部分がシールドマシン の掘進箇所である。61~160リングの範囲では, マシンの全断面で固結シルト(黄緑色)であるのに 対し,511~610リングの範囲では,マシンの下部 が固結シルト(黄緑色),上部が粘土質砂礫(黄土色) となっている。

そのため、511~610 リングの範囲では上下ソ ナーで計測された超音波伝播速度に大きな差が 生じたものと推測される。このことから、土質に



#### 図-7 データの収録方法

よって超音波伝播速度は変化すると考えられる。 一方で、120~160 リングのように土質が同じで も超音波伝播速度に違いがある箇所も存在する ため、他にも影響を及ぼすパラメータが存在する と考えられる。

#### 5. まとめ

本検証では,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推定する方法として,超音 波ソナーを用いた非接触の計測法に着目し,現場 への適用性を調査した。得られた知見を以下に示 す。

- ベントナイトと水を混合した作泥土材において、ベントナイトの重量比が大きくなるほど 超音波伝播速度が大きくなる傾向が認められた。
- 2)稼働中のシールドマシンにソナーを設置し、 リング毎の超音波伝播速度の平均値を計測し



図-8 1リングごとの超音波伝播速度の平均値



図-9 土質縦断図

た結果,上下のソナーで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 て撹拌が不十分であり,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。

 主質が同じでも超音波伝播速度は掘進箇所に よって差異が生じた。そのため、別のパラメー タも影響を与えていると考えられる。

超音波伝播速度は、伝播する媒質の弾性率、密度、温度など多くのパラメータに依存し、固体・ 液体等の状態によっても変化する。

今後は, 粒径や密度など物性が既知の泥土を用

いて,泥土の状態ごとの超音波伝播速度を調査す ることで,超音波伝播速度と泥土の状態の関係を 推定できるようにするとともに,各パラメータが 超音波伝播速度に与える影響を検討することで, チャンバー内の撹拌状態のより正確な可視化を 目指す予定である。

#### 参考文献

 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.