

## 音波・レーリー波によるシールド機の前方形探査に関する実験的検討

## EXPERIMENTAL STUDIES ON MONITORING OBSTACLES IN FRONT OF A SHIELD TUNNELING MACHINE USING AN ACOUSTIC WAVE AND RAYLEIGH WAVE

笠 博義\*・山森隆江\*\*・西田昭二\*\*\*・大賀一秀\*\*\*\*

By Hiroyoshi KASA, Takae YAMAMORI, Syouji NISHIDA and Kazuhide OHGA

It is necessary to investigate the existence of obstacles or geological structure in front of a shield tunneling machine, especially in case of tunneling under the urban area or sea-bed. Accordingly, some field experiments were carried out for the purpose of developing a monitoring system regarding obstacles in front of the machine. Two methods which use an acoustic wave and Rayleigh wave respectively, were examined.

As a result, both methods were proved to be useful for detecting obstacles in size of 40 cm in diameter or more and exist in the maximum range of 7~10 m. Joint application of the both methods is expected to improve the reliability of the judgement.

*Keywords: geophysical exploration method, shield tunneling method, acoustic wave, Rayleigh wave, field experiment*

## 1. はじめに

トンネルをシールド工法で施工する際、シールドトンネル路線上の障害物の有無や大きな地盤条件の変化は、工程に大きな影響を与える場合も多く、安全性や経済性の面からも、事前にシールドマシン（以下単にマシンとよぶ）前方の状況を探査することは重要である。

特に、都市域の地下は構造物の基礎杭や地中構造物等が錯綜しており、シールド工事においてこれらの障害物と遭遇する危険性も高くなっている。現在、このような場合は状況に応じて、適当地盤改良を行った後、開削工法により地上から障害物を除去するか、シールドマシン前方に人間が入り、アンカーなどで周囲を固定した後、除去作業を行うなどの対策が採用されている<sup>1),2)</sup>。

しかし、予想される障害物が爆発物のような危険物であった場合や重要なライフラインなどの場合はマシンがそれに遭遇する以前に存在を確認し、必要な対策を講じ

なければならない。

また、埋没谷や、断層などのように地質の急激な変化によってマシン自体の方向制御が困難となることもあり、障害物の有無と同様に地質構造を探査することも、施工上重要なことである。

以上のようにシールドマシン前方の地中の探査(以下、地中前方探査とよぶ)は、海底トンネル工事のように事前の詳細な地盤調査が困難な場合や、路線変更の困難な大口径シールドにおいて、特に必要となるものと考えられる。合わせて、最近各方面から提案されているさまざまな大深度地下利用構想においては、地上からの地盤調査は一層困難になるものと考えられ、地中探査技術が強く要求されるものと考えられる。

こうしたシールドマシンの地中前方探査方法としては、パイロットボーリングによる方法のように直接マシン前方の地盤を探査する方法や、電磁波反射法のような物理探査技術を応用した方法が提案されている<sup>3)</sup>。しかし、非破壊でかつ前方10 m程度までの探査は困難である。

このような背景において、著者らは探査距離および分解能等において実用的な地中前方探査技術の研究を進めてきた<sup>4)</sup>。本報告は音波反射法およびレーリー波探査法を用いた地中前方探査技術について、地下水面以下の沖

\* 正会員 (株)間組技術研究所研究第四部  
(〒338 与野市本町西4-17-23)

\*\* 日立造船(株)技術本部技術研究所構造物性能研究室  
(〒554 大阪市此花区桜島1-3-22)

\*\*\* 日立造船(株)鉄鋼・環境事業本部建機設計部  
(〒554 大阪市此花区桜島1-3-40)

\*\*\*\* ビイック(株)技術部 (〒113 文京区本駒込6-12-16)

積地盤において実施した実験結果から、その実用性について検討したものである。

### 2. 研究の目的

本研究では、シールド工法における有効な地中前方探査技術を開発し、実際のシールドマシンによる施工実験によって性能を確認する予定である。このうち、本報告はその第一段階として、以下の項目について検討したものである。

- ① シールド工法において要求される探査性能を明確にし、その要求性能に対して十分に対応できる探査方法を提案する。
- ② 提案された探査手法について、探査可能距離、分解能、測定に要する時間など諸特徴を屋外実験により確認する。
- ③ 提案された探査方法について、実用化へ向けての課題を抽出する。

### 3. 研究の流れと探査手法の評価

本研究の流れを図-1に示した。以下、この図に従って研究の概略を述べる。

#### (1) 地中前方探査における要求性能

シールドの地中前方探査においては、探査目的(対象)によって、要求される性能が異なってくるが、ここでは今後さらに数が増えると予想される、直径5m以上のシールドトンネルでの障害物探査に主眼を置いて、要求性能の検討を行い、以下にその結果をまとめた。

- ① 探査可能距離：最低でもトンネル直径程度が必要。
- ② 分解能：不発弾、基礎杭などの大きさから、30~50cmの塊状のものが探知できること。
- ③ 探査時間：施工工程に影響を与えないように、セグメント組立時間内に終了すること(60分/断面)。
- ④ 地盤条件：シールド工法が採用されるようなあら

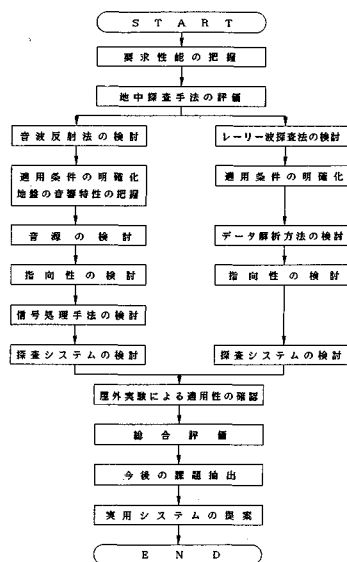


図-1 研究の流れ

ゆる地盤に対処できること、特にN値が10以下の未固結堆積層において探査できること。

- ⑤ 操作性：探査には熟練を必要とせず、専門的知識がなくても探査結果の判読が可能なこと。

ここに述べた事項以外でも、実際にシールドマシンに搭載できることを念頭におき、探査機器がマシンに搭載できる程度の小型化が可能で、振動、高温、高圧、多湿等の環境においても正常に作動することが要求される。

#### (2) 地中探査手法の評価

地中の探査には、その目的に応じてさまざまな手法が用いられている。表-1は主な地中探査方法に対して、分解能、土中での透過性、信号の識別性、操作性、探査実績の5項目の検討を加えたものである。

一般に分解能と透過性(探査距離)は反比例しており、分解能の高い電磁波を利用した方法は透過性が悪く、今回目標としている5m以上を達成することはきわめて

表-1 地中探査手法の比較・評価<sup>5)</sup>

項目 探査法	分解能 (探査対象)	探査深度 (信号の透過性)(m)	測定結果の判読性	測定時間 測定の容易さ	探査実績	評価
S 波 反 射 法	数m~(地下構造)	浅層反射法で0~100m	受信点を多くして地質断面を表示	震源の設置時間による準備に手間	地下構造調査で実績多い(大規模)	分解能が粗く、地中前方探査には適さない
音波(P波) 反 射 法	数10cm~(海底地下構造、埋設物)	地中での透過性は資料少ない(~10m)?	受信点を多くして地質断面を表示	水中探査では連続探査可能 システム化は容易	海底測深、海底地盤探査で実績多い	地中での音波の透過性が良好ならば適用性は高い
レーザ波 探 査 法	数10cm~(地下構造、埋設物、空洞)	起振力によって決定(~50m)	垂直構造を速度分布で表示	1点:~20分 システム化済み 測定容易	土木地盤探査で実績多い	障害物の識別性の確認が必要だが、適用性は高い
電磁波 反 射 法	数cm~(路盤調査、埋設管、空洞)	地盤探査(地下水面以上)2.3m	77MHz移動により構造断面図を表示	連続探査可能 システム化済み、測定容易	路盤探査、埋設管探査	探査深度が要求性能を満たす可能性は極めて低い
電気探査 反 射 法	電極配置間隔によって決定	電極配置間隔と同等	電極の多数配置により地質断面を解析	電極配置時間が必要 測定容易	地盤探査、地下水位調査で実績	分解能、探査深度を同時に向上することは困難
磁気探査	数cm~(金属探査)	磁力計から半径5m以内	磁気異常の深度分布を測定	連続探査可能 システム化は容易	不発弾探査、金属探査で実績多い	金属探査には有効だが、空洞や地盤探査は不可能

困難である。一方、透過性に優れているS波反射法は分解能の点で数10 cmを達成することがほとんど不可能である。

また、電気探査法や磁気探査法においては、いずれも表一に示したように分解能、探査対象が限定されることから適当な方法ではないと考えられる。

こうして、最終的には音波反射法とレーリー波探査法が候補として残されたので、この2つの手法の有効性についてさらに検討を加えた。

音波(P波)反射法は通常、水中測深や海底地質探査に用いられる探査手法であり、地盤探査への適用例は少なく、地盤中の音波の伝搬特性についての研究例も数少ない。しかし、シールド掘進時に発生する音を夜間に地表で測定した結果、数100 HzのP波成分が透過していることが確認されたことや、数100 HzのP波(衝撃弾性波)を用いて、鉄道のバラスト下の埋設物を探査し、バラスト下深度5 mの埋没遺跡が明瞭に確認されたとの報告<sup>6)</sup>がある。

このようなことから、音波は条件が整えば、地盤中を透過し、反射法が利用できるものと考えられる。

一方、レーリー波探査法は佐藤らの研究<sup>7)</sup>により、地盤探査への適用がなされ、これまでの探査実績も多い。ある開放型のシールドトンネルの前方探査に適用した例では、切羽前方5~7 mの探査が行われ、掘削によるゆるみ領域や地盤の境界が測定された。

以上の検討から、今回の要求性能を満たし得る探査方法として音波反射法およびレーリー波探査法を選定した。ここで、あえて2つの探査手法を選定した理由は次に示すとおりである。

- ① 音波反射法は地盤の音響特性によっては数10 cmの分解能で、10 m程度の探査距離を確保できる可能性がある。
- ② レーリー波探査法は地盤条件にあまり左右されず、探査距離を最大で数10 mとすることが可能である。また、レーリー波速度から $N$ 値等の地盤係数を求めることができる。
- ③ 音波反射法、レーリー波探査法を併用することによって、さまざまな地盤条件において、より高い精度の探査が可能となるものと考えられる。

#### 4. 音波反射法の検討

##### (1) 音波反射法の原理と適用条件

a) 音波反射法の原理 音波は音響インピーダンスの異なる面において反射することが知られている。この性質を利用し、地質の境界や埋設物などの音響インピーダンスの異なるものに向かって音波を送波し、対象物からの反射波の到達時間と、伝搬媒質の音速から対象物ま

での距離を求める方法が、音響測深に代表される音波反射法である。

b) 音波反射法の適用条件 音波反射法を適用するには、音波が伝搬媒質(地盤)を伝搬することが必要である。しかし、地盤中の音波の伝搬状況は、水中と異なり媒質が均一でないことから、地盤を構成する土質の種類、密度や飽和度、拘束圧等によって大きく異なることが知られている<sup>8)</sup>。

- ① 伝搬速度：地盤中を伝搬する音波(疎密波)の伝搬速度は、粘性土を用いた室内実験によると、含水比25%以下で、ほぼ1000 m/sの伝搬速度で一定となり、これ以上では急激に伝搬速度が小さくなることが報告されている<sup>9)</sup>。また、飽和地盤では水中音速(1500 m/s)に等しくなるものと考えられることから、不飽和地盤ではその含水比に応じて下に凸の曲線を描いて変化するものと考えられる。
- ② 伝達距離：水中に体積比率で0.1%の気泡が含まれた場合、体積弾性率は1/16に減少することがWoodの方程式<sup>8)</sup>から理論的に導かれており、地盤中においても、気泡を含む不飽和地盤での体積弾性率がきわめて小さくなるものと予想され、音波の伝達距離が極端に小さくなるものと考えられる。

以上のことから音波が地盤中を伝搬するには、気泡を含まない飽和地盤であることが望ましく、そのときの音波の伝搬速度は水中音速程度になるものと考えられる。

音波反射法の適用条件を以下にまとめた。

- ① 探査対象地盤が十分に水で飽和していること。
- ② 探査対象と地盤中との音響インピーダンスとの間に明確な差があること。
- ③ 音波の伝搬速度が測定できること。

##### (2) 地盤の音響特性の把握

地盤中における音波の反射限界を把握し、反射波の抽出をするためには、以下に示す地盤の音響特性をあらかじめ知っておく必要がある。

a) 伝搬速度 送波信号と受波信号の時間差を距離に換算するためには、対象地盤での伝搬速度が必要となる。地盤中の音波の伝搬速度を知る方法としては以下のようなものが考えられる。

- ① 送受波器を既知の距離だけ離して設置し、その間を音波が透過する時間を測定して地盤の伝搬速度を求める。
- ② あらかじめ土質、 $N$ 値、含水比などをパラメータとした伝搬速度のデータベースを作成しておく。
- ③ シールドマシンに搭載した場合は、掘進サイクルの前後で測定したデータを比較し、同一被反射物からの反射波の到達時間差と掘進距離から算出する。

実際のシールドマシンでの探査に際しては、①の方法は困難であると考えられるが、最も正確に伝搬速度を測定できることから②、③の方法との併用を検討すべきである。

**b) 伝搬損失** 音波反射法による探査限界距離を推定する場合、受信される反射波が伝搬途中で拡散減衰、吸収減衰等の減衰を受けることを考慮する必要がある。

本研究において用いた、伝搬損失の基本的な考え方は式(1)に示すように、送波信号レベルと受波信号レベルの差に着目したものであり、アクティブソナー方程式とよばれている<sup>10)</sup>。

$$SL - DL = 2 TL - TS \dots\dots\dots (1)$$

ここに、**SL**：送波信号レベル  
**DL**：目標探知のための受波信号レベル  
**TL**：伝搬損失  
**TS**：ターゲットストレングス (反射強度)

ここで、**TL**は本研究においては球面拡散と土質による吸収減衰からなる距離の関数で表わされるものと仮定し、その値を以下の式で求めることができる<sup>11)</sup>。

$$TL = \eta \times R + 20 \cdot \log R \dots\dots\dots (2)$$

ここに、**η**：単位距離当たりの土質による吸収減衰  
**R**：送受波器と障害物の距離

探査対象地盤での伝搬損失は式(2)から算出され、この値を式(1)に適用し、探査限界を知る事ができる(図-2)。この場合 **DL** は受波装置の検出限界以上である必要がある。なお、吸収減衰 **η** も伝搬速度と同様な方法で求めることができるものと考えられる。

**(3) 音源に関する検討**

音波反射法では用いる音波の発生機構(音源)によって生成される音波も異なる特長をもつ。いくつかの音源について、発生する音波、再現性、取扱い難易について実験によって評価したものが表-2であり、本研究ではこの結果から圧電素子を音源として採用することとした。

表-2 音源の検討

音源	項目	発生する波	送波再現性	制 御	評 価
圧電素子		P波	良	易(電気的)	◎ 総合的に適当
ハンマ		P波・S波	普通	難(機械的)	△ 制御が困難
ランマ		P波・S波	悪	難(機械的)	× 再現性に問題
雷管		P波・S波	悪	難(電気・機械)	× 取扱が困難

圧電素子は電気的な操作で音波を発生することが可能なので、音波発生再現性に優れ操作も容易である。また、他の音源と異なり、送受波器が同じ機構で小型であることから、マシン面板に取り付ける際にも問題が少ない。

ただし、発生エネルギーを増大させると振動面にキャビテーションが発生するため送波出力に限界がある。

**(4) 音源の指向性**

本研究において送受波器に用いた圧電素子は、いずれもほぼ無指向性に近いものであり、これらをそのままマシンに取り付けた場合、面板の前方ばかりでなく側方にも一様に音波が伝搬し、前方以外の反射波もとらえてしまう。そこで、波動の干渉を応用して送受波器に指向性をもたせるために、圧電素子を複数個組み合わせ、波動の干渉を応用する方法(アレイ音源方式)について検討した。

送波器(点音源と仮定)2個をシールドマシン面板上に距離 **L** だけ離して、同位相、同パワーで送波した場合に対して、音源を含む前方平面での指向性の数値計算を試みた(図-3)。L=1/2波長の場合では音波の側方への伝搬は抑制され、前方平面での3dBの利得の向上が得られることがわかる。この結果をただちに地盤中の音波の伝搬に適用するには議論があるが、音響インピーダンス的に均質な飽和地盤であれば、同様な指向性の向上が基本的に得られるものと考えられる。

実際のシールドマシンに搭載する場合は、マシンの寸法などの物理的条件および経済性の面から、送受波器を

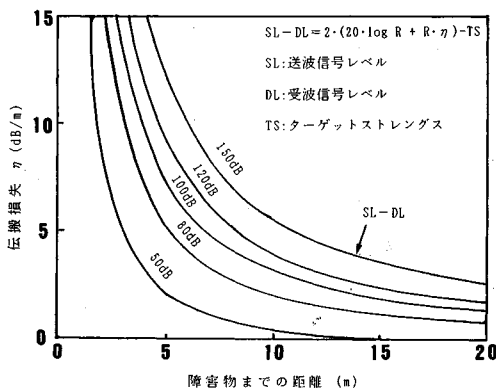


図-2 音波反射法における障害物探査限界距離の推定

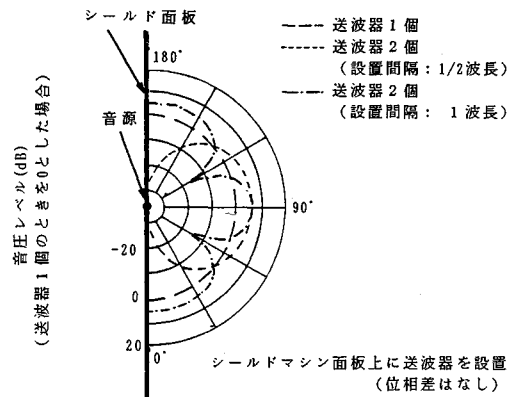


図-3 音波探査法の指向性の検討

各2個直交配置したものを1ユニットとする方法が考えられる。

(5) 信号検出処理方法

a) 相互相関関数による信号処理方法 音波が地盤中を伝搬する場合は、水中と比較してノイズも多く、反射波がそれ自身の反響やさまざまなノイズに埋もれてしまうおそれが大きい。そこで反射波を抽出する手法として、相互相関関数による信号処理方法<sup>12)</sup>について有効性を検討した。

この方法は受波波形の中で、送波波形と類似性の高い部分を捜し出して反射波として判別するもので、その類似性の指標として相関関数を用いるものである。

ここで、ある2つの波形  $x(t)$ 、 $y(t)$  間の相互相関関数  $r$  は式(3)で表わされ、 $x_n$  に対する  $y_n$  の遅れ、すなわち時間ずれ(タイムラグ)  $m$  の関数となる。ここで、式(3)の値が1に近いほど送波と受波の間に大きい相関関係があり、0に近いほど相関関係が小さいことを示す。

図-4に簡単な数値モデルで送波と受波の間の相互相関関数を求めた例を示した。

$$r_{xy}(m) = 1/N \sigma_x \sigma_y \sum_{n=0}^{N-1} x_n y_{n+m} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $m$  : タイムラグ

$N$  : サンプル数 ( $n=1, 2, 3, \dots, N-1$ )

$x$  :  $x(t)$  のデジタル量

$y$  :  $y(t)$  のデジタル量

$\sigma_x$  :  $x_n$  の標準偏差

$\sigma_y$  :  $y_n$  の標準偏差

b) 相互相関関数を利用するうえでの課題 相互相関関数を利用するうえで以下の4点について考察を行った。

- ① 送波波形の選択
- ② サンプルング周期
- ③ 相互相関関数のしきい値の設定
- ④ TVG (Time Variable Gain) 機能の組み込み

以下にその結果を示した。

- ① 送波すべき電気信号の波形ではなく、現実に地盤中に送波されている信号を送波波形として用いる。

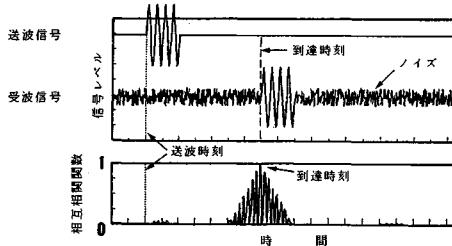


図-4 数値モデルでの相互相関係数

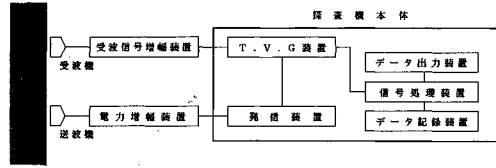


図-5 音波反射法システム

- ② 発信周波数に対してサンプリング定理を満たせば相関関数には実質的には影響がない。
- ③ 本来は送波との間に相関がないはずのノイズも関数が0にならずある程度の値をとる場合も考えられる。このため、有意な信号の抽出のために、相関関数値にしきい値を設定し、これを超えたピーク値をもつものを反射波と判断する方法が有効である。
- ④ 直達波のレンジを抑制し、探査対象とする距離範囲から反射してくる反射波のSN比を改善するため、TVGを受波回路に組み込み、受波信号のダイナミックレンジを大きくして、反射波を取得する方法が有効である。

以上のような検討を経て、本研究では図-5に示す探査システムを構築した。

5. レーリー波探査法

(1) レーリー波探査法の原理と適用条件

レーリー波とはL. J. Rayleighによって理論的に証明された、半無限弾性体の表面に沿って伝搬する粗密波とよじれ波の合成波である。このレーリー波の変位を表現する理論式はR. Woodsによって誘導され、この式からポアソン比が0.5に近づくときレーリー波とS波の速度が同一値に収束することが導かれた。この事実から、対象となる地盤の力学的特性を調査する方法として、S波に代わってレーリー波を用いたものがレーリー波探査法である<sup>13)</sup>。

実際の探査は、ハンマーや電磁式起振機などによって地表面から対象地盤に振動を与え、それによって発生するレーリー波の垂直振動を2つの検出器で測定し、検出器間の時間差からレーリー波速度を求めるものである。

すなわち、レーリー波探査は半無限弾性体に対して成立することを前提としており、これまでの適用も地表面に探査装置を設置することによって、この条件を近似的に満たしていた。

このようなことから、トンネル切羽のような極端に限定された平面に対して適用できるかどうかは課題となる。そこで、関東ローム層中に掘削された地下空間(底面:6×3m、高さ:2m)の底面に起振機および検出器を設置して、周囲の壁面と探査機器の距離を変えて測定を行い、その影響を検討した。その結果、検出器が壁面

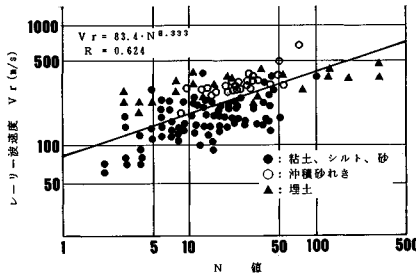


図-6 N値とレーリー波速度の関係<sup>13)</sup>

から 20 cm 以上離れており、かつ地盤に十分固定されていれば、測定データは地表面から測定されたレーリー波速度値とほぼ同等であり、速度分布や周波数特性の検討からも妥当なデータであることが確認された。また、探査機器を空洞の壁面に取り付けられた実験においても同様な結果が得られた。

以上のことから、面積が数 m<sup>2</sup> 程度の平面においても設置条件さえ満たされれば、レーリー波探査法が実質的に成立するものと思われ、地中前方探査への適用が可能であると考えられる。

(2) レーリー波探査法のデータ解析方法

レーリー波探査法によって測定されたレーリー波速度の深度分布から N 値やヤング率などの地盤の情報が取得されることが、これまで実施されてきた多くの測定例から示されており、図-6 に N 値とレーリー波速度の相関図を示した。

また、空洞や埋設物が存在する場合は、レーリー波速度の急激な変化点として現われることが、著者らが行った埋設物探査実験<sup>4)</sup>から確認されており、障害物探査ではこの速度の変化点に着目した解析方法が有効になるものと考えられる。

(3) レーリー波探査法の指向性

レーリー波探査法において、取られる地盤情報は、理論的には起振点直下であり、実際の探査においては検出器間（厳密にはその中央の地点：測定点とよぶ）のものである。しかし、現実にはある程度の立体的な広がりをもった領域を代表する地盤情報がデータには反映しているものと考えられる。そこで探査指向性を調査するために直径約 2 m のシールドトンネルを探査対象とした屋外実験を行い、検討を加えた。

その結果、図-7 に示すように、速度の変化点は深度 4.5 m 付近でトンネル部分とその周辺で連続してみられる。このトンネルによる速度の変化点の出現範囲は、水平方向では両トンネルの中心から 2.5~3 m であり、トンネル端部から 1~0.5 m である。つまり、深度 4.5 m の測定ではトンネル端部より 1 m 程度離れても、その影響があるものと考えられることができる。

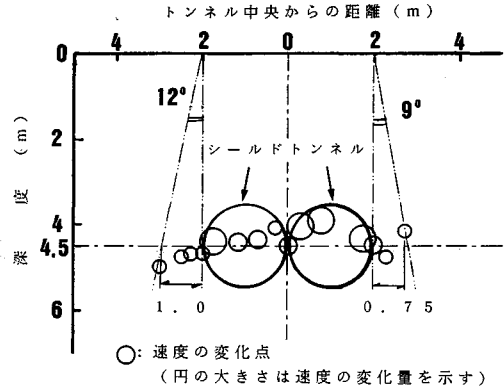


図-7 レーリー波探査の指向性

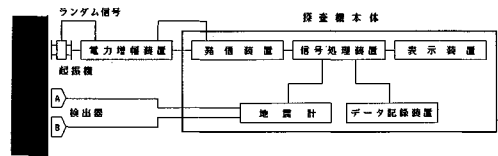


図-8 レーリー波探査システム

また、起振機と検出器の配置を変えて同一場所の探査を実施した結果、特に測定結果に差異がみられないことがわかった。

深度方向の指向性は今後より詳細な検討を加える必要があるが、今回の実験結果より測定点から鉛直方向に向かって、18°~24°であり、およそ 20°と推定される。

(4) レーリー波探査法システム

レーリー波探査において、地盤を振動する方法には単一振動で起振する方法と、さまざまな周波数を含むランダム波を用いる方法がある。このうちランダム波を用いる方法は、いろいろな振動数の波が連続的に発振、受振されるために、スタッキング処理を行う場合でも、70 s 程度の短時間で信号取込みが可能である。このような理由により、ランダム波を用いる方法は単一振動方法に比較して、計測時間が少なくてすむ<sup>14)</sup>。

以上のようなことから、本研究ではランダム振動を用いた計測システム（図-8）を用いることとした。

6. 屋外実験結果

(1) 屋外実験場の概要

屋外実験は図-9 に示すような実験用ピットを用いて実施した。ピット 1 は音波反射法音源およびセンサ、レーリー波探査起振機、検出器を取り付けるためのピットである。ピット 2 は音波の土中の透過速度、減衰特性を測定するための音波透過実験に用いるものである。

実験場は木曽川河口部の沖積低地にあり、図中に示した柱状図からもわかるように、均等係数  $U_c = 2.6 \sim 4.6$  の粒径の揃った細砂からなる。また、地下水位は地表面

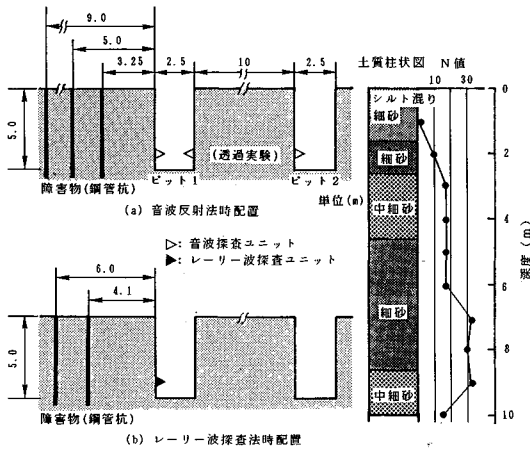


図-9 屋外実験概要

から2m程度であった。なお、ボーリング調査はピット築造後に行った。

屋外実験における探査対象の障害物は直径40cm、長さ5.5mの鋼管を利用し、この打設には振動式の杭打機を用い、障害物周辺の地盤を乱さないように注意して打込みを行った。

### (2) 音波反射法実験

a) 地盤の音響特性の計測 障害物探査実験に先だって、地盤の音響特性を調査するためにピット1とピット2の区間(10m)で透過実験を実施した。なお、送波する音波は分解能と伝搬距離に対する検討から数kHzの周波数が適当であると判断され、本研究においては送波器の機械的特性から6kHzの音波を用いている。この結果、今回の実験地盤においては、伝搬時間は約7.7msであり、平均伝搬速度は1300m/sとなる。これはほぼ水中音速に近く、飽和地盤の伝搬速度としては妥当であると考えられる。また、この区間での吸収減衰が約60dBであることから、単位距離当たりの吸収減衰はおよそ6dB/mであることがわかった。以後音波反射法の解析にはこの値を用いることとした。

b) 障害物探査実験 図-9において示した位置に設置した送受波器を用いて、ピット1から前方3.25m、5.0m、9.0mの距離に打設した上述の鋼管を探査対象物として実験を行った。

実験結果は図-10に示すように、受波信号の時系列からではほとんど反射波の判読が困難であるが、相互相関関数による信号処理を行い、背景雑音を考慮したしきい値を設定すると図-10に示すように、3.7m、5.1m、7.6m、8.7mに相当する位置から反射信号が抽出された。ここで、3.7m、5.1m、8.7mの3地点は、鋼管の探査ユニットに対する表面位置(反射面)に対応しているものと考えられる。このときの、おのおのの測定デー

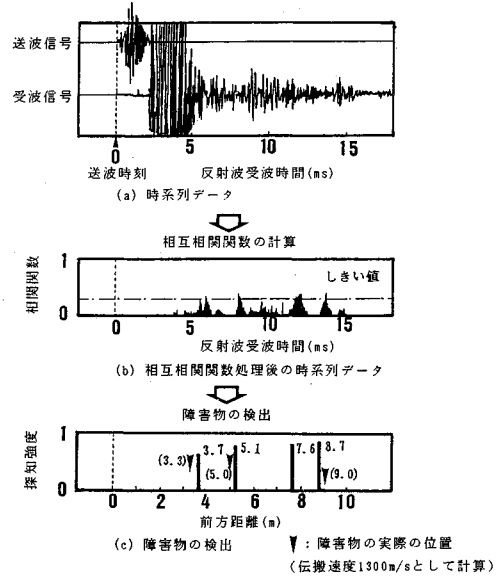


図-10 音波反射法実験結果

タと距離の差は0.1~0.45mであり、探査距離に対する誤差は±10%以内である。

一方、7.6m地点での反射は杭を打設し、引き抜いた位置(実距離7.5m)であることから、鋼管の抜き跡による反射と考えられる。これは鋼管の抜き時に気泡が混入し、この部分と周囲の地盤との音響インピーダンス比が大きくなったことによるものと推測される。

### (3) レーリー波探査法

レーリー波探査法についても音波反射法の場合と同様に屋外実験を実施した。障害物は同じく直径40cmの鋼管である。実験は次の3ケースについて行った。

探査ユニットから前方に4.1mに設置した場合、除去した場合、新たに6.0mに設置した場合の順に実施した。その結果を図-11に示した。

ケース1では鋼管が設置された4.1mの位置に平均速度(ある深度までの平均レーリー波速度)の変化点が現われており、この速度曲線をもとに計算した区間速度(同一の速度構造区間のレーリー波速度)もこの部分で変化している。このことから障害物の検出ができていると考えられる。

しかし、これ以外にも7.5m、9.0m付近にも同様な変化点が現われている。これについては図-12に示した周波数-探査深度曲線(F-D曲線)によって、この変化点の有意性を検討した。その結果、今回の実験条件において、探査結果が有効であると考えられる範囲は1.5~7mとなり、7.5mおよび9.0mの2つの変化点はいずれも測定限界距離を超えており、有意なデータではないことがわかった。

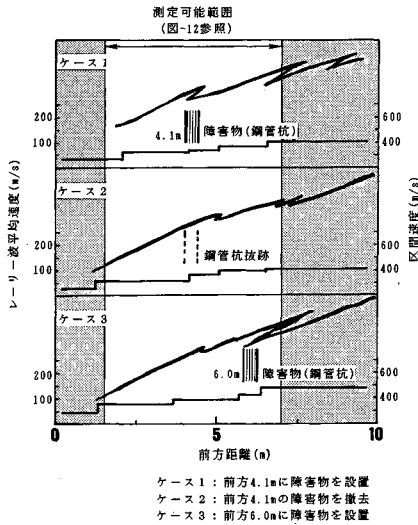


図-11 レーリー波探査実験結果

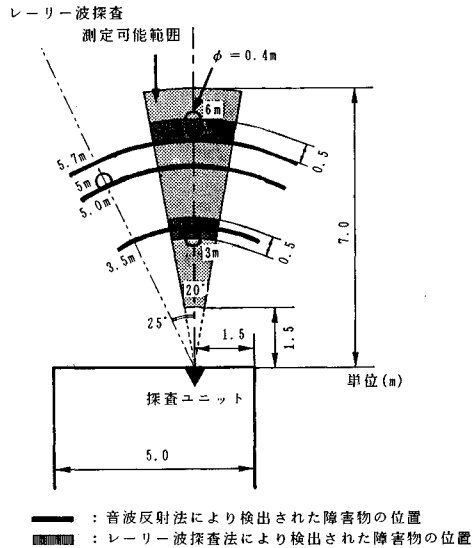


図-13 両探査手法の比較

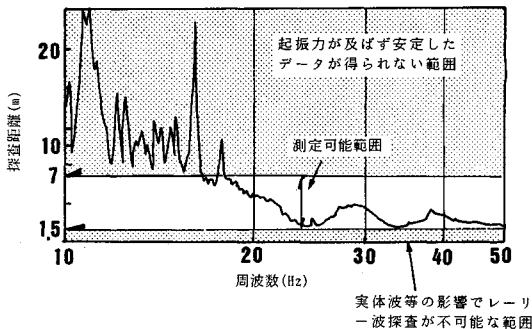


図-12 探査可能範囲の検討 (周波数-深度曲線)

障害物を4.1mの位置から除去したケース2では目立った平均速度の変化点は現われていない。また、7.5m付近での変化点はケース1と同様に測定範囲外である。

ケース3では距離6.0mに鋼管を設置しており、平均速度曲線においてもこの地点で大きな平均速度変化点が生じている。

以上の実験結果から、今回の実験条件においては前方距離1.5~7.0mの範囲において、平均速度の変化点の位置が障害物の鋼管(直径40cm)の設置位置とほぼ一致し、レーリー波探査法が地中前方探査に有効であることが確認された。

一方、障害物探査距離の誤差は、探査距離に対して5~10%であった。この値は、これまでレーリー波探査技術者により経験的にいわれていた探査深度の10%と同程度である。

また、今回の測定結果をもとに実験場のN値の検討を行ってみた。N値とレーリー波速度の関係式はいく

つか提案されているが、ここでは砂地盤での関係式<sup>14)</sup>である式(4)によって検討を行った。

$$N = 10 \{ (\log V_r - 1.959) / 0.337 \} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、N : N値

$V_r$  : レーリー波平均速度 (m/s)

今回の実験での、前方距離1.5~7mにおけるレーリー波平均速度は150~400m/sとなり、この値から求めたN値は13~19となる。この結果は実際の深度4~5mでの標準貫入試験結果(N=16)にほぼ一致する。ピット近傍の地盤のN値が小さいのは、ピット築造工事等により全体的に地盤が緩んでいるものと考えられる。

(4) 両探査方法の測定結果の比較

音波反射法およびレーリー波探査法において、同一対象物を測定した結果をまとめて示したものが、図-13である。この図において、探査ユニットからの距離およそ3.5mおよび6.0m位置が音波反射法、レーリー波探査法の両方の手法にて障害物と判断され、それぞれ3.0mおよび6.0m地点に設置された鋼管杭(A, C)に対応している。また、音波反射法では距離5.0m地点にも反射面があり、5.0m地点の鋼管杭Bに対応しているが、レーリー波探査からはこの地点の障害物は検出されていない。これは、レーリー波探査の指向性(およそ20°)の範囲外に鋼管杭Bが設置されているためであると考えられる。

以上から、前方を広く探査する音波反射法と比較的指向性の狭いレーリー波探査法を組み合わせることによって、次に示す効果が得られるものと考えられる。

- ① 音波反射法によって前方を広く探査することによ



り、障害物の見落としがなく、レーリー波探査の指向性の及ぶ範囲では、ある程度の位置の推定ができる。実際のシールドマシンに搭載した場合は面板を回転させて、複数の位置で測定を行うことにより、障害物の位置はさらに特定できるようにすることが可能である。

- ② 原理の異なる両手法ともに障害物があると判断された位置に関しては、探査精度が向上する。
- ③ レーリー波探査法により地盤の  $N$  値を同時に取得できることから、障害物のみならず前方の地盤の状況が推定できる。

このように、2つの探査手法を並列で用いることによって、より正確な前方探査ができるものと考えられる。

7. まとめと今後の課題

本研究において、シールドマシン前方の障害物や土質の  $N$  値の探査方法として、音波反射法およびレーリー波探査法を選択し、その適用性について数値解析および屋外実験から検討を重ねてきた。その結果明らかとなったことを表—3のようにまとめた。

この表からわかるように、本研究において提案する方法によって、シールドマシン前方の7~10mまでの障害物、前方の  $N$  値の把握が可能であると考えられる。また1測点の測定に要する時間が5分以内であり、実機に搭載した場合でも測定準備等を含めても、セグメント組立時間内に一断面分の測定が可能と考えられる。

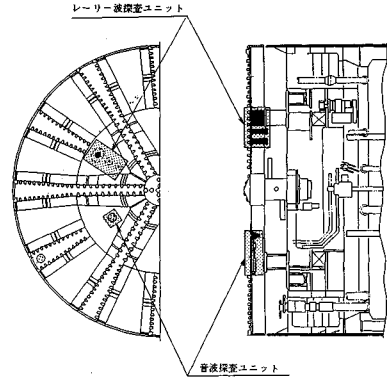
シールドマシンへの取付方法の一事例を示したものが図—14である。このような探査ユニットを必要に応じて複数設置し、一断面をいくつかに分割し測定することによって、マシン前方を均一に探査できるようになるものと考えられる。

今後の課題としては次のような点が挙げられる。

- ① 音波反射法での地中音速測定方法の現場適用実験

表—3 探査性能のまとめ

項目	手法	音波反射法	レーリー波探査法
測定事項		反射波の到達時間	レーリー波伝搬速度
分解能 (m)		0.3	探査深度の10%
最大探査距離 (m)		6~10	6~10
所用探査時間		1~2分/点	5分/点
発信機器		圧電素子	動磁方式起振機
受信機		圧電素子	地震計 (2個/組)
探査対象		音波反射物 (埋設物、空洞、地質境界)	レーリー波伝搬速度の異なる範囲 (地質境界、空洞、埋設物)
備考		実験地盤中の音波の伝搬速度: 1300m/s	$N$ 値、ヤング率など土質工学係数への換算が可能



図—14 シールドマシン搭載例

による検証と多様な地盤での音速のデータベースを作成する。

- ② 測定結果の解析・表示ソフトウェアをさらに高度化し、両方法の探査結果を他の施工情報と合わせて、合理的な施工のために反映する。
- ③ 本研究によって提案されたシステムを実際のシールドマシンに搭載し、現場でのデータ収集および取付条件、システムの耐久性などについて確認する。

8. おわりに

本研究では、シールドマシンによってトンネルを施工する際の、マシン前方の探査方法として音波反射法とレーリー波探査法の2つの方法について検討を重ねてきた。その結果、最長7~10m程度までの障害物の位置測定および、前方の  $N$  値の測定を行うことができた。

シールド工事における地中前方探査技術は、埋設物の多い都市部での施工や、事前調査が困難な海底シールドトンネル工事や大深度地下開発の増加に伴って、今後ますます重要になるが見込まれる。しかし、実際の建設工事における使用では高温、多湿な環境下においての正確な作動が必要であり、現場での適用実験および改良が必要になるものと思われる。

本研究において検討したシステムを実用化させるために、今後、現場計測を含む多角的な検討を積極的に進めていく予定である。

参考文献

- 1) 須賀 武・莊子幸弘・木下哲龍・阿部修三：京葉都心線シールド工事における地中障害物・既存杭除去工事例，基礎工，Vol.16，No.11，pp.92~101，1988.
- 2) 朝比奈敬二・小浦場博・巽 治：シールド工事における橋台基礎杭地中撤去例，基礎工，Vol.16，No.11，pp.102~108，1988.
- 3) 橋本 司・多田幸司・谷口 徹：密閉式シールドにおける切羽前方探知システム，電力土木，No.218，1989.

- 4) 笠 博義・園田徹士・深掘久雄・一色 浩・西田昭二：  
シールド前方探査システムの開発—その1—，第23回土  
質工学研究発表会予稿集，pp.59～60，1988.
- 5) 物理探査学会：図解物理探査，手法編，pp.3～110，  
1989.
- 6) 池田和彦・秋鹿為之：土木分野における衝撃弾性波によ  
る非破壊測定，土と基礎，Vol.29，No.12，pp.39～43，  
1981.
- 7) 每熊輝記・佐藤長範・竹内幸雄：起振機振動による地盤  
探査の可能性，昭和59年度物理探査学会講演予稿集，  
pp.52～53，1984.
- 8) F.E. リチャード，Jr.，J.R. ホール，Jr.，R.D. ウッズ  
(岩崎敏男・島津晃臣訳)：土と基礎の振動，鹿島出版会，  
第5章，pp.128～149，1975.
- 9) 岡田平治・芝山幹夫：土中音速の測定，日本音響学会誌，  
Vol.41，No.12，pp.877～880，1985.
- 10) Robert, J. Urick：水中音響の原理，第2章，共立出版，  
pp.18～31，1978.
- 11) 海洋音響研究会：海洋音響—基礎と応用—，第5章，  
pp.63～79，1984.
- 12) 城戸健一：デジタル信号処理入門，第3章，pp.31～60，  
丸善，1985.
- 13) (株)ビイック：表面波探査法地盤調査の現況—レーリー  
波速度と工学的諸量の関係—，(株)ビイック技術ニュー  
ス，1989.
- 14) 每熊輝記・松岡達郎・佐藤長範：ランダム加震源を用い  
る地盤調査法に関する実験，物理探査学会第81回学術講  
演会論文集，pp.28～33，1989.

(1990.6.20・受付)