

高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた弾性波トモグラフィ  
地盤調査手法に関する研究

A Study on Velocity and Attenuation Tomography Method by High  
Frequency Seismic Wave for Geological Investigation

2013年10月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

榊原淳一

Junichi Sakakibara



## 目次

第1章	序論	3
1.1.	研究の背景	3
1.1.1.	建設業における地盤調査の意義	3
1.1.2.	地盤調査法と物理探査手法の概要	3
1.2.	物理探査手法の課題	8
1.3.	既往の研究成果	10
1.3.1.	探査精度の向上	10
1.3.2.	工学的に必要な物性値との関連性の把握	13
1.4.	本研究の目的と課題	19
1.5.	研究の構成	19
第2章	高周波数の弾性波を用いた孔間トモグラフィ法	24
2.1.	概要	24
2.2.	開発した手法の概要(計測方法)	24
2.2.1.	従来の孔内震源の課題	24
2.2.2.	疑似ランダム波の利用	25
2.2.3.	計測システム	32
2.3.	開発した手法の概要(解析方法)	36
2.4.	性能確認試験	37
2.4.1.	計測周波数の制御	37
2.4.2.	疑似ランダム波によるSN比の改善	40
2.5.	まとめ	42
第3章	支持層調査への適用とその検証	44
3.1.	概要	44
3.2.	フィリピン共和国マニラ港棧橋建設工事における杭基礎構造物の支持地盤調査	44
3.2.1.	調査概要	44
3.2.2.	調査結果と考察	45
3.3.	愛知県中部国際空港における杭基礎構造の支持地盤調査	46
3.3.1.	調査概要	46
3.3.2.	調査結果	47
3.3.3.	調査結果の検証	49
3.3.4.	効果の検証：ボーリング調査のみの場合との比較	51
3.4.	まとめ	54

第4章	減衰率を用いたトモグラフィ手法の開発.....	57
4.1.	概要 .....	57
4.2.	弾性波速度だけを用いた調査の課題.....	57
4.3.	小型模型土槽、岩石ブロック実験による減衰率トモグラフィ手法の検証.....	60
4.3.1.	減衰率に関する逆計算手法の検証.....	61
4.3.2.	計測装置の改良.....	65
4.3.3.	波線計算における計算精度の検証.....	67
4.3.4.	小型土槽実験による検証(砂層中の埋設物探知実験).....	72
4.3.5.	岩石ブロックを用いた検証(岩盤中の亀裂探知実験).....	80
4.4.	まとめ .....	84
第5章	速度と減衰率を用いた円型模型土槽内部の可視化.....	86
5.1.	概要 .....	86
5.2.	地盤の作成および計測方法.....	86
5.3.	実験結果 .....	90
5.4.	まとめ .....	94
第6章	速度と減衰率を用いた新しい地盤調査方法の提案.....	96
6.1.	判定方法の提案.....	96
6.2.	実際の調査結果への適用例.....	97
6.2.1.	埋立地における支持層、礫層の調査.....	97
6.2.2.	風化花崗岩の亀裂分布調査.....	99
6.3.	まとめ .....	100
第7章	結論 .....	102
	謝辞 .....	104
	研究業績 .....	105

# 第1章 序論

## 1.1. 研究の背景

### 1.1.1. 建設業における地盤調査の意義

地上・地下を問わず構造物の建設において地盤情報の把握は重要である。なぜなら構造物の設計・施工方法は地盤情報に基づいて決定されるからである。また、供用期間を長くしライフサイクルコストを低減するためには、地盤が構造物に与える影響(または構造物が地盤に与える影響)を知る必要がある。例えば、基礎構造物を支持する堅固な地盤に関する情報が十分でなければ、完成後の構造物が不等沈下を起こしたりするだけでなく施工中の安全にも影響を与える。また、既設の水道管など地中障害物や地下空洞の存在を事前に把握できなければ、供用中の設備を破壊するだけでなく施工に重大な影響を与えたり、地盤の崩落といった事故の原因となったりする場合がある。特に近年は構造物の巨大化や大深度地下の開発<sup>1)</sup>、地震防災<sup>2)</sup>や地盤汚染対策、沖合空港建設<sup>3)</sup>など以前よりも広く深い範囲における正確な調査が求められるようになっている。

### 1.1.2. 地盤調査法と物理探査手法の概要

地盤調査は調査段階や調査の目的による分類として概要調査と詳細調査に分けられる<sup>4)</sup>。地盤調査の一般的な進め方を図 1.1.1 に示す。まず、概要調査においては既存の文献調査や現地踏査が行われる。この結果に基づき事業性の検討を行い、事業の実施が決まれば詳細調査が行われる。一般的に、詳細調査においてはまずボーリング調査が行われ、さらに詳細な調査が必要な場合には物理探査が実施される。ボーリング調査ではサンプリングによる目視検査、サンプルを用いた室内試験、標準貫入試験などのサウンディング<sup>4)</sup>が行われる。ボーリング調査は原位置の地盤を直接調査することができるため、土質分類や地盤物性を正確に把握できるという長所がある。しかし、ボーリングした場所の情報しか入手できないため、ボーリング孔間の情報は推定に頼らざるを得ないという短所がある。この短所は地盤が複雑な構造をしている場合には大きな問題になることがある。例えば、図 1.1.2 に示すとおり、同じボーリング調査の結果から粘性土と砂の境界は(A)から(D)まで4通りの異なる地盤構造を推定することが可能であるが、どれが真の地盤構造をボーリングの結果だけから推定することは大変に困難である。間違った構造を推定してしまうと効率の悪い設計や施工中のリスク増大、供用期間の減少によるライフサイクルコストの増加という問題につながる。

一方、物理探査手法<sup>5)</sup>は2次元または3次的に連続した地盤情報を入手することがで

きる。物理探査手法は地盤を媒体とする弾性波や電磁波などの伝播特性が地盤の影響を受けて変化することを利用するもので、この伝播特性の変化を計測することで地盤の性状を把握することが可能となる。弾性波や電磁波などが伝播する範囲を調査できるため、調査範囲が広く地盤の連続性を把握できるという長所を持つ。しかし、弾性波や電磁波の変化は工学的に必要な強度定数などの情報と直接的な関係がない場合があり、精度や信頼性が低いという短所がある。

物理探査手法は波動の種類に応じて弾性波探査、電気探査・電磁探査、重力探査、磁気探査などに分類される<sup>5)</sup>(図 1.1.3)。本研究で取り上げる弾性波の場合には地表からの探査か、あるいは計測孔内からの探査なのかに応じて、反射法や屈折法、PS 検層や孔間トモグラフィ法などに分類される(図 1.1.4)。屈折法と反射法は地表面から弾性波を起震するため、計測用のボーリング孔を必要としないという長所があるが、精度が低いこと、傾斜した複雑な構造の把握は難しいという短所がある。孔間トモグラフィ法はボーリング孔内部で発振と受信を行うため 2 本以上の計測孔が必要であるという短所があるが、精度が高く複雑な地層構造も把握できるという長所がある。

以上述べたように、地盤を直接把握できるが点の調査しか行えないボーリング調査と間接的な調査しかできないが面的な調査が行える物理探査手法は相互に補完しうるものである。しかし、現状の建設現場においてはボーリング調査のみが行われることが多い。次節ではこの理由について物理探査手法の課題と関連付けて述べる。

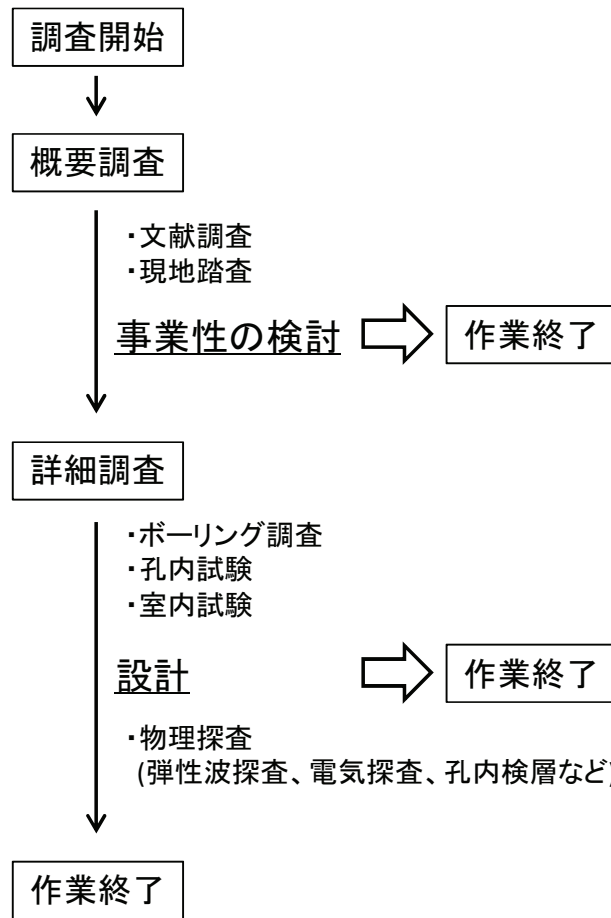


図 1.1.1 地盤調査の進め方

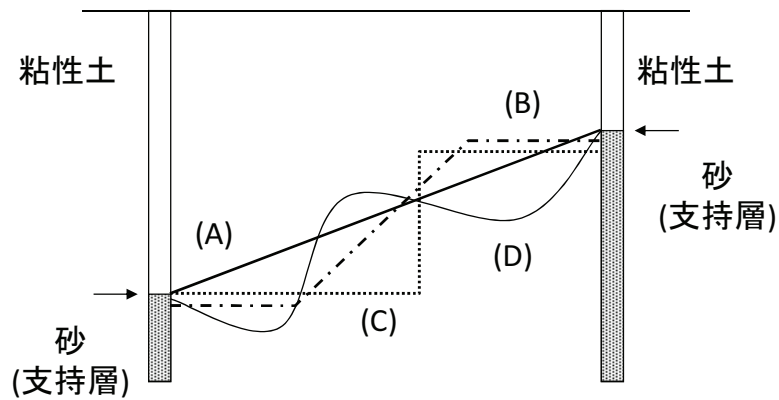


図 1.1.2 ボーリング孔間の地盤構造を把握する際の問題点

弾性波探査

地表から探査

- ・反射法
- ・屈折法

計測孔から探査

- ・PS検層
- ・ダウンホール法
- ・孔間トモグラフィ法

土質調査  
資源探査

電気・電磁探査

地表から探査

- ・比抵抗法
- ・電磁法
- ・レーダー

計測孔から探査

- ・電気検層
- ・孔内比抵抗トモグラフィ
- ・孔内レーダー

土質調査  
資源探査

重力探査

資源探査

磁気探査

資源探査

図 1.1.3 物理探査手法の分類



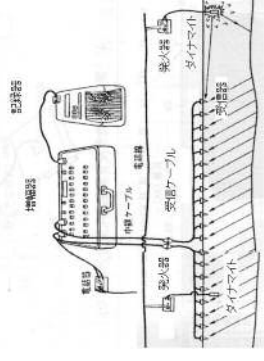
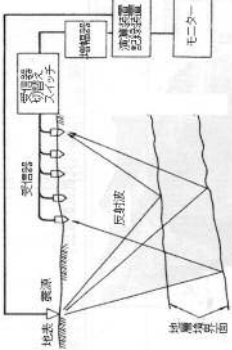
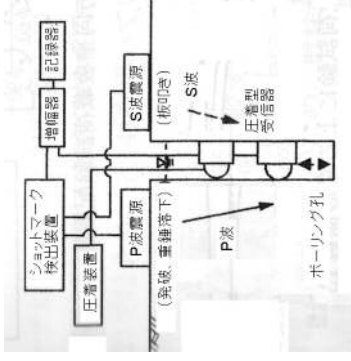
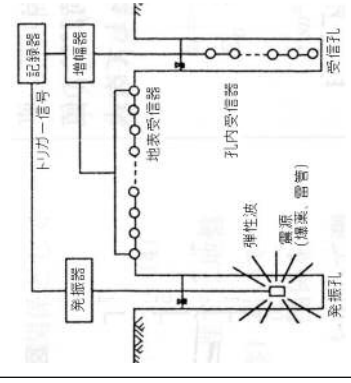
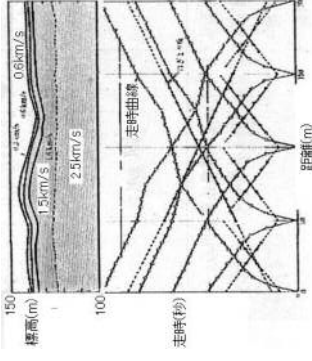
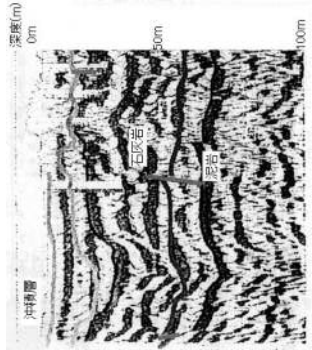
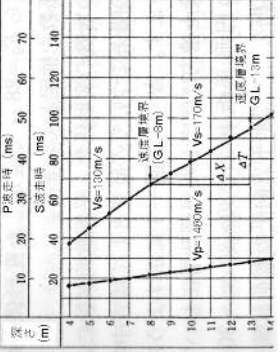
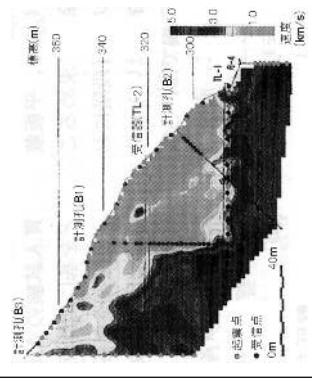
探手法	弾性波探査屈折法	弾性波探査反射法	PS 検層	弾性波トモグラフィ
測定原理	人工的に発生させた地震波の屈折波の初動走時から地下の速度構造を求める	弾性波が音響インピーダンスの境界に入射した場合、その音響インピーダンスに応じて反射し、振幅が変化する性質を利用して反射面の分布を探査する。	地表に設置した震源からP波およびS波を発生させ、受信器で記録する。波動記録から走時曲線を作成して区間速度を求める。	一方の孔中で弾性波を發振し、他方の孔中並びに地表で受信する。その測定値を逆計算により二次元断面を得る。
測定概念図				
結果の例				
適用分野	土木(切土、トンネル、ダム他)。 資源(地下水、温泉)。 防災(地滑り、断層)。	土木(切土、トンネル、ダム他)。 資源(地下水、温泉)。 防災(地滑り、断層)。	土木(切土、トンネル、ダム他)。 資源(地下水、温泉、石油)。 防災(地滑り、断層)。	土木(切土、トンネル、ダム他)。 資源(地下水、温泉、石油)。

図 1.1.4 弾性波探査の種類と概要<sup>6)</sup>

## 1. 2. 物理探査手法の課題

物理探査手法は資源探査と共に発展した技術であり<sup>7)</sup>、古くは1930年代から弾性波屈折法による石油探査に成功している。一方、建設分野への適用は1950年代から行われているが、主にダムやトンネル建設、斜面・地滑り調査などに用いられることが多く、都市部や臨海部における基礎構造物の支持地盤調査等への適用は少ない<sup>7)</sup>。この理由として、①現場に必要な計測精度と探査精度が一致しないこと、②工学的に必要な物性値や指標と探査結果で得られる物性値との関連が明確でないことの2点が挙げられる<sup>8)、9)</sup>。

前者については、例えば、物理探査手法をより有効に活用するためのシステム化への課題についてのアンケート結果<sup>10)</sup>を見てみると、探査精度と必要精度のバランスを課題としてあげる回答が最も多く、現場の技術者が物理探査の精度に満足していないことがわかる。例えば、物理探査による調査結果において、基礎構造物の支持地盤境界面の深度が数mもばらつくようでは構造物の設計に用いることはできない。

後者の問題は、表 1. 2. 1 および表 1. 2. 2<sup>11)</sup>に示すように、弾性波速度や比抵抗値は間隙、飽和度、亀裂の有無など様々な影響を受けて変化することに起因する。従って、同じ条件下では工学的に必要な物性値との関連は認められる場合もあるが、生成過程や組成などの地域差、さらには埋め立て地盤における圧密の違いなど人為的作用の差が存在すると、同種の地盤であっても異なる探査結果を示すようになり、工学的に必要な物性値との関連性が明確でなくなってしまう。

物理探査で得られる精度や物性値がボーリング探査で得られる精度や物性値と一致しないことが前節で述べたボーリング探査と併用されることが少ない理由であるとも言える。次節ではこれらの課題に対する既往の研究成果について述べる。

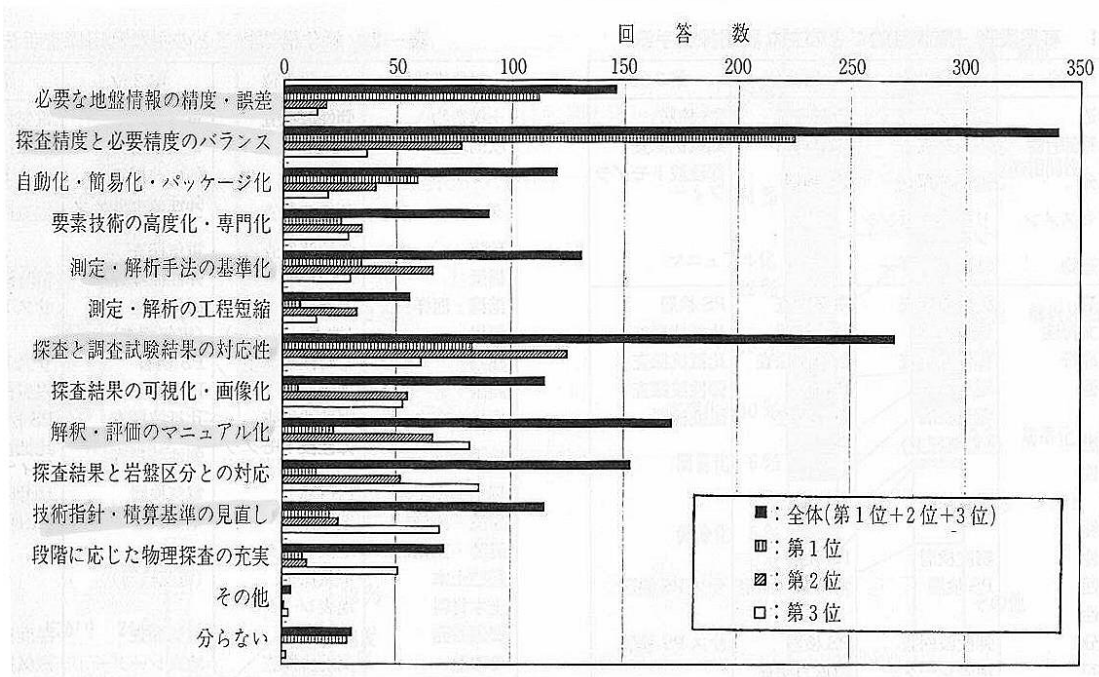


図 1.2.1 物理探査技術のシステム化への課題<sup>10)</sup>

表 1.2.1 P波速度・S波速度に及ぼす因子の影響度<sup>11)</sup>

		P波速度の変化					S波速度の変化				
		間隙	飽和度	拘束圧	亀裂	粒子配列	間隙	飽和度	拘束圧	亀裂	粒子配列
未固結土	粘性土	△	◎	○	—	—	○	—	○	—	—
	砂質土	△	◎	○	—	—	○	—	○	—	—
新第三紀層	泥岩	△	◎	○	◎	—	△	△	○	◎	—
	砂岩	○	◎	○	◎	—	△	△	○	◎	—
中生層	泥岩・頁岩	△	△	△	◎	○	△	△	△	◎	○
	砂岩	△	△	△	◎	—	△	△	△	◎	—
	石灰岩	—	—	—	◎	—	—	—	—	◎	—
変成岩	結晶片岩	△	△	○	◎	◎	—	—	○	◎	◎
	ホルンフェルス	—	—	—	◎	—	—	—	—	◎	—
火山岩	多孔質	○	◎	○	◎	—	—	—	○	◎	—
	稠密	—	—	—	◎	—	—	—	—	◎	—
花崗岩	新鮮岩	—	—	—	◎	—	—	—	—	◎	—
	風化岩	△	△	△	◎	—	△	—	△	◎	—
	強風化岩	○	◎	○	○	—	○	—	○	○	—

記号 ◎：影響大 ○：影響中 △：影響小 —：該当しない、影響ほとんどない

表 1.2.2 比抵抗に影響を及ぼす因子の影響度<sup>1)</sup>

地盤・岩盤		風化・変質	亀裂 <sup>1)</sup>	間隙率 <sup>1)</sup>	飽和度
未固結地盤	粘性土	—	—	△	△
	砂礫	—	—	◎	◎
堆積岩	泥岩, 頁岩	△	△	△	△ <sup>2)</sup>
	砂岩	○	○	○	△ <sup>2)</sup>
火成岩		◎	○	○	△ <sup>2)</sup>

記号)「—」: 該当はない, 「◎」: 影響大, 「○」: 影響中, 「△」: 影響小

注1) 亀裂や間隙に地下水が飽和されている場合は比抵抗が低下する傾向にあり, 空気だけの場合では比抵抗が増大する傾向にある。

注2) 飽和度が20%程度以下では比抵抗が著しく増加するが, 50%以上では飽和度の比抵抗に対する影響は少ないと考えられる。

### 1.3. 既往の研究成果

#### 1.3.1. 探査精度の向上

##### (1) 弾性波探査における探査精度の向上

弾性波探査における探査精度の向上はあまり進んでいない。これは精度を向上させると探査距離が短くなり実用的ではなくなるからである。弾性波探査の探査精度は使用する周波数の影響を大きく受ける<sup>12)</sup>。例えば反射法の場合では探査精度は波長の4分の1と言われているが<sup>13)</sup>、計測場所のバックグラウンドノイズや読取り誤差などを考慮すると探査精度は波長の2分の1程度とするのが妥当であると考えられる<sup>8)</sup>。地中を伝播する波の周波数、波長、速度をそれぞれ、 $f$ 、 $\lambda$ 、 $V$ とするとこれらの関係は式(2-1)で表される。探査精度 $\phi$ を式(2-2)とすると<sup>8)</sup>、式(2-1)と(2-2)から式(2-3)が得られ、探査精度を向上させるためには発振周波数を高くする必要があることがわかる。従来の弾性波探査で用いられてきた震源の発振周波数はほとんどが0.5 kHz以下<sup>14)</sup>であり、十分な精度を確保できていなかった。

例えば、発振周波数が $f = 0.5$  kHz、速度 $V = 2$  km/sの場合には探査精度は最高でも $\phi = 2$  mとなる。図 1.3.1 は式(2-3)から導いた発振周波数 $f$ と探査精度の関係に従来の弾性波探査と超音波探査の位置づけを併せて示しているが、例えば探査精度1mを得るためには発振周波数を1kHz以上とする必要があることがわかる。

一方、計測距離は地盤中を伝播する際の波の減衰量によって決まる。地盤中の波の減衰は、発振音圧 $A_0$ 、受信音圧 $A$ 、計測距離 $d$ 、減衰定数 $\alpha$ を用いて式(2-4)および(2-5)として表される<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup>、<sup>17)</sup>。 $Q$ は媒質の減衰特性を表す無次元量であって、 $Q$ の値が小さいほど減衰量は大きくなり未固結地盤で5~20である場合が多い<sup>18)</sup>。これらの式から波の減衰は

距離  $r$  に比例し発振周波数には指数関数的に影響を受けることがわかる。図 1.3.2 は式 (2-4) と式 (2-5) を用いて数値計算により求めた  $Q = 5$ 、速度  $V = 1.5\text{km/s}$ 、発振器からの出力  $A_0 = 140\text{dB}$ 、受信器感度  $50\text{dB}$  (受信信号を確認できる最小の音圧) とした場合の発振周波数  $f = 0.2\text{kHz}$ 、 $0.5\text{kHz}$ 、 $1\text{kHz}$ 、 $2\text{kHz}$  の伝播距離を示している。横軸は受信器までの距離、縦軸はそのときの受信音圧を示している。受信器までの距離が遠くなると受信音圧が低下し、受信音圧が受信器感度を下回ると信号を確認できなくなる。そのときの距離を伝播距離であると考え。発振周波数  $f = 0.1\text{kHz}$  の時、伝播距離は  $100\text{m}$  であるのに対して、 $0.5\text{kHz}$ 、 $1.0\text{kHz}$ 、 $2.0\text{kHz}$  ではそれぞれ  $35\text{m}$ 、 $20\text{m}$ 、 $10\text{m}$  となっていることがわかる。すなわち、計測精度を上げるために発振周波数を高くすると減衰が大きくなり実用的な計測距離を維持できなくなる。この相反する 2 つの事象の影響で探査精度の向上を図ることが難しかった。

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2-1)$$

$$\varphi > \frac{\lambda}{2} \quad (2-2)$$

$$\varphi > \frac{V}{2f} \quad (2-3)$$

$$A = \frac{1}{d} A_0 e^{-\alpha r} \quad (2-4)$$

$$\alpha = \frac{\pi f}{VQ} \quad (2-5)$$

## (2) 電気探査における探査精度の向上

電気探査に関しては高密度で測定されたデータをコンピューターで処理して最適解を求める高密度電気探査が開発されて用いられている<sup>19)</sup>。基本的には通常の比抵抗法と同じ方法であるが図 1.3.3 に示すように見かけ比抵抗から逆計算により地盤の比抵抗分布を求めることに特徴がある。図 1.3.4 は塩水トレーサーを注入し、注入前後のモニタリングを行うことで地盤内の構造、特に高浸透ゾーンをより詳細に調査した例である<sup>20)</sup>。図中 (a) は注入前、(b)、(c) は注入後および注入 6 日後の調査結果を示す。図中 (a) の左上から右下に向かう低比抵抗ゾーンが塩水の注入により比抵抗値が低下し (図中 (b))、注入 6 日後には比抵抗値が回復しており (図中 (c))、この部分が優勢な浸透ゾーンであることがわかる。

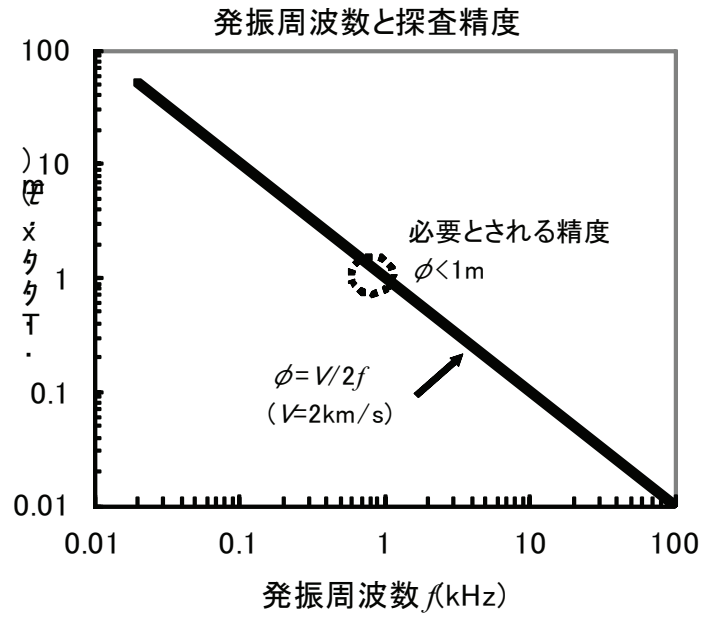


図 1.3.1 発振周波数と分解能<sup>8)</sup>

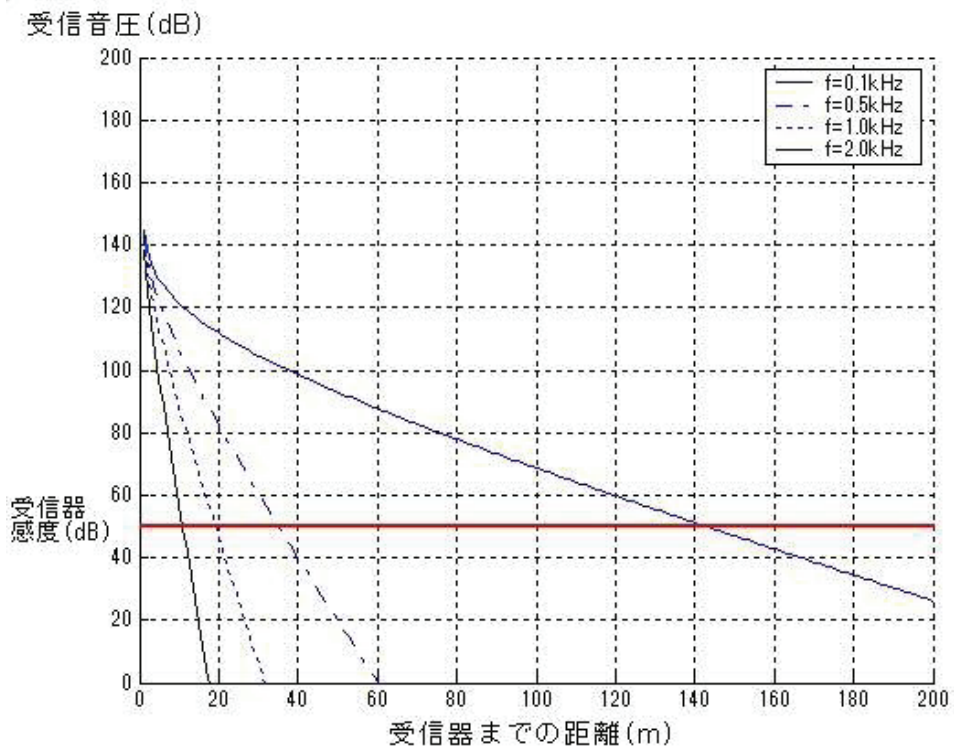


図 1.3.2 伝播距離の検討

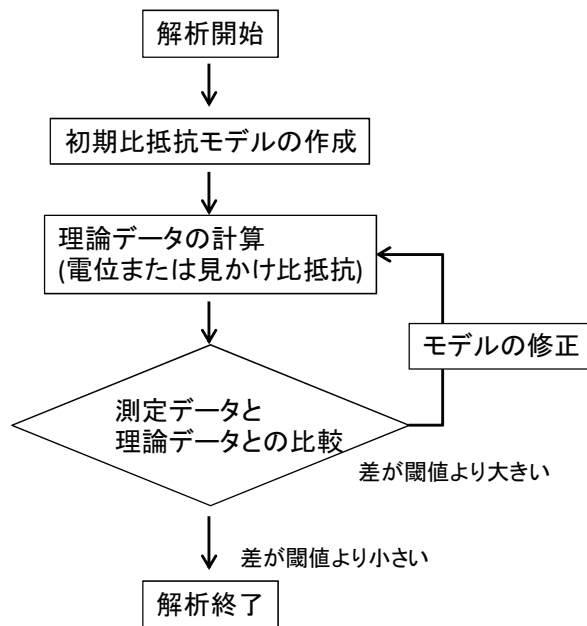


図 1.3.3 高密度電気探査の解析の流れ

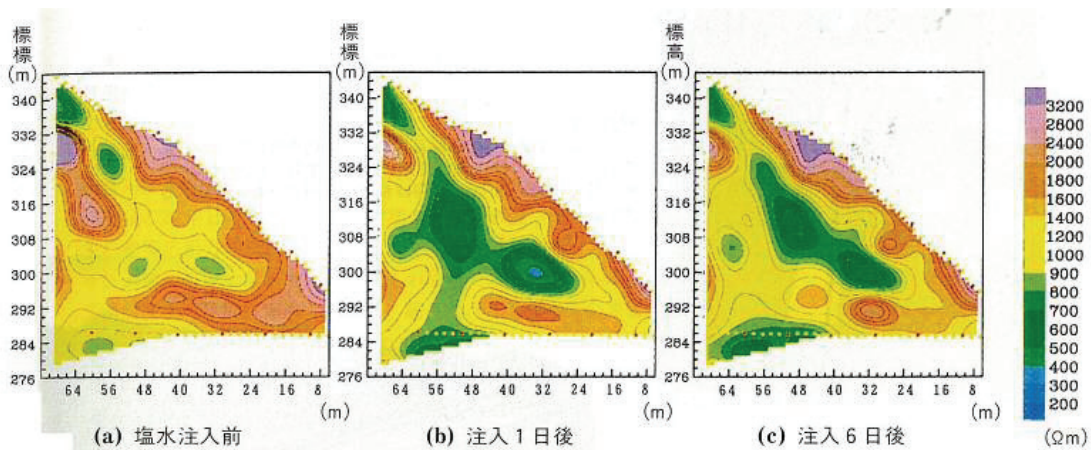


図 1.3.4 高密度電気探査の例、塩水トレーサの注入による地盤内構造の把握<sup>20)</sup>

### 1.3.2. 工学的に必要な物性値との関連性の把握

#### (1) 複数の手法を用いて結果を比較する試み

鈴木(2000)<sup>21)</sup>は実際の物理探査データから力学強度や透水係数などの地盤物性へ変換解析を行う際の問題点と課題について整理し、複数の手法を組み合わせることで調査結果を補正することを提案している。表 1.3.1 は地盤物性値ごとに、探査により得られる物性値、関連する物性値、対象とする岩種、適用に際し必要な探査法により整理してある。鈴木はこの表に基づき地盤の透水係数を把握する変換解析フローを提案し、物理探査によって得られる物性値を補正することで地盤物性を得られると述べている。これを図 1.3.5 に示す。

同図は比抵抗値を用いて透水係数を得るために必要な間隙率を弾性波探査で把握すること、堆積性軟岩を対象とする場合にはさらに電磁探査を追加することが必要であること示している。また、正確な変換を行うためには、物理探査の計測・解析誤差を正しく評価してから地盤物性と比較すること、必要とする地盤物性値に適した探査手法を選択することが重要であるとしている。

物性を直接把握するのではなく、解釈を容易にするために複数の手法を組み合わせるといふ試みもなされている。桑原ら(1994)<sup>22)、23)</sup>は飛騨片麻岩地域の地下実験施設で孔間弾性波・電磁波・比抵抗トモグラフィによる調査を行った。結果の例を図 1.3.6 に示すが、弾性波トモグラフィの結果からは探査領域の岩盤は4層に区分され、電磁波トモグラフィの結果からは3相に区分されることがわかる。両者の結果を比較すると同じ領域に低速度帯と高速度帯が認められる。ボーリングコアの記録と比較したところこれが岩盤中の亀裂が多く変形が大きい部分と一致していると述べている。一方、比抵抗トモグラフィの結果は弾性波や電磁波の結果とは一致していない。これについては比抵抗の結果は片麻岩中の石灰岩の含有量の影響を受けているとしている。しかし、異なる手法を同じ現場で行うことはコストや工期の観点から難しいこと、また、飽和度や近隣の構造物など、周囲の条件により必ずしも2つの手法を同時に行うことができるわけではないという問題がある。



表 1.3.1 比抵抗・弾性波速度と地盤物性値との相関性を解明した実験式<sup>2)</sup>

実験式	調査による物性値	関連する地盤物性値	対象岩種 <sup>1)</sup>	適用例 <sup>2)</sup>	今後の課題など
1. 岩盤の比抵抗モデル	比抵抗 比抵抗 表面伝導による比抵抗 (平行平板モデル) 表面伝導による比抵抗 (砂地盤) 表面伝導による比抵抗 (割れ目モデル)	飽和度、間隙率、間隙水比抵抗 間隙率、間隙水比抵抗、表面伝導による比抵抗 比表面積、比表面伝導率、割れ目幅と長さ 比表面積、比表面伝導率、間隙率 比表面積、間隙率 割れ目の開口幅、割れ目本数/単位長さ、岩石マトリックスの比抵抗	軟岩(粘土分少ない) 軟岩、硬岩 硬岩 軟岩 軟岩、硬岩 硬岩	電気検層 室内実験	間隙水比抵抗が透水程度の場合に適用可 あらゆる岩種に適用可。
2. 力学強度との関係	縦波速度-比抵抗 弾岩盤強度-比抵抗	間隙率、比表面積、間隙水比抵抗 岩盤の比抵抗、コアの比抵抗、コアの一軸圧縮強度	軟岩、硬岩 硬岩	室内実験 電気探査	表面伝導による比抵抗の補正が重要
3. 水理特性との関係	透水係数-比抵抗	間隙率、地下水比抵抗 間隙率、交換性陽イオン濃度、粘土タイプ係数 間隙率、地下水比抵抗	軟岩(粘土分少ない) 軟岩 硬岩	電気検層 & 間隙率検層 電気検層 & 電気検層 & 間隙率検層 電気検層(電流収束型) & 間隙率検層	適用可能な岩種が限られる。 検層では有効。地盤電磁探査の高精度化 検層では有効。
4. 新しい探査法による水理特性との関係	透水係数-NMR緩和時間 透水係数-チューブ液 透水係数-縦波速度・振幅の周波数依存性	間隙率、NMR緩和時間 チューブ液およびPP波の振幅、間隙率、波動の周波数 間隙率、ひずみ係数、Squirt flow長、粒子と流体の密度、粘性係数、体積弾性率など	軟岩(砂岩・頁岩) 硬岩 軟岩、硬岩	CMR検層 & 間隙率検層 VSP検層 音響トモグラフィ	高出力の地表探査装置の開発が重要 割れ目部の最適なモデル化が重要 高出力の高周波数が発振可能な震源の開発が重要

注1)「軟岩」は未固結地盤や新第三紀以降の多孔質な堆積軟岩など主としてマトリックス部に透水性が支配される地盤を意味する。「硬岩」は新鮮な結晶質岩や先第三紀の硬質な堆積岩など開口割れ目に透水性が支配される岩盤を意味する。Archieの式以外はすべて飽和状態の地盤を前提。  
 注2) 適用例の欄は変換解析に必要な入力データを得るための探査法で適用例があることを示す。室内実験の場合はコア試料により実験式を導いた段階で適用例がまだないことを示す。

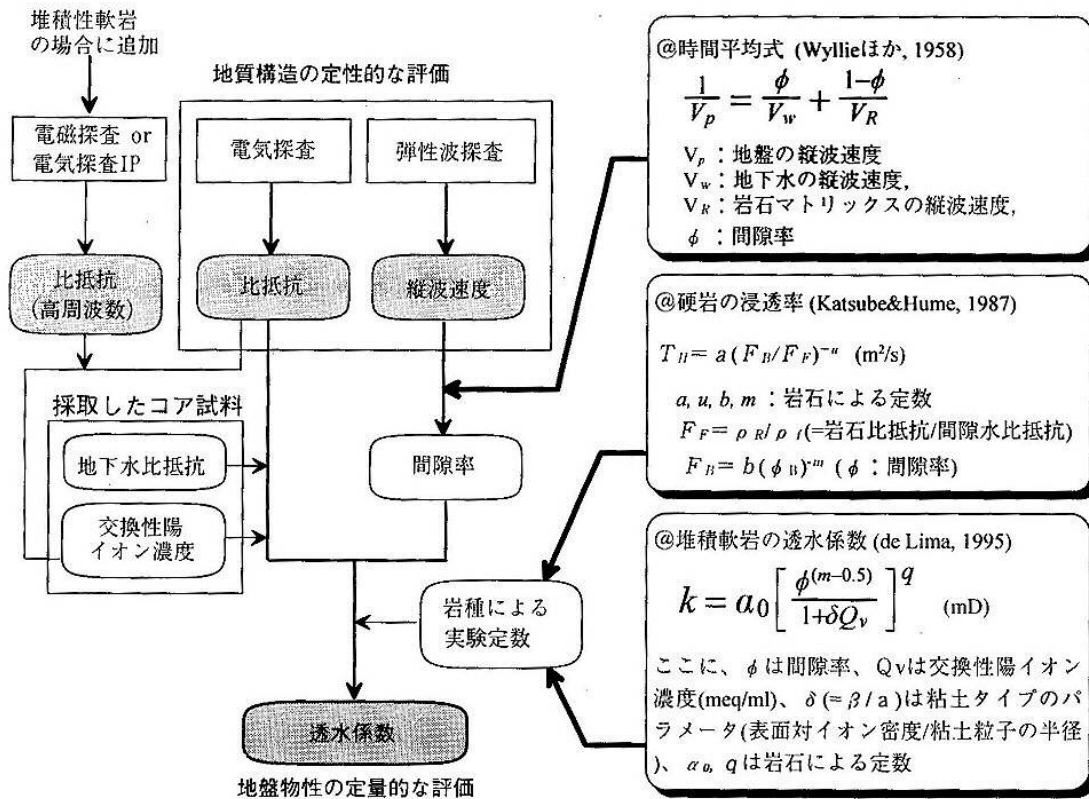


図 1.3.5 比抵抗値と弾性波速度を用いた透水係数の変換解析フロー<sup>21)</sup>

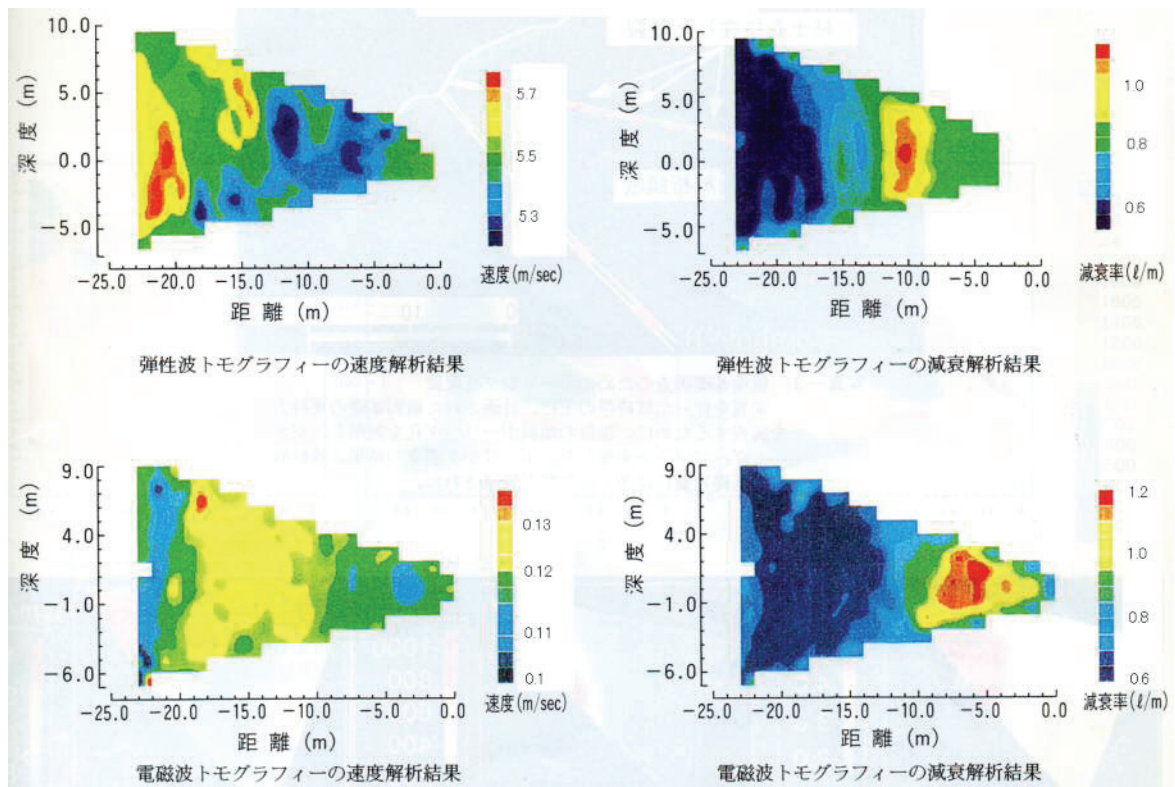


図 1.3.6 飛騨片麻岩地域の地下実験施設におけるトモグラフィの結果<sup>22)、23)</sup>

(2) 単一の探査手法で地盤物性を把握する試み

弾性波速度と振幅減衰率の周波数分散から透水係数を求める試みもなされている。Biot (1956)<sup>24)</sup>は多孔質媒体内を伝播する弾性波には土粒子と水粒子で形成された骨格全体が振動して伝播する「遅い波  $V_0$ 」と土粒子と水粒子が別々に振動する「速い波  $V_\infty$ 」の2つがあることを示した(図 1.3.7)。同モデルによれば弾性波の伝播周波数が低周波から高周波に変化するに従い速度と減衰率が変化する周波数分散を計測することで透水係数が求めることができる。さらに Dvorkin et al (1995)<sup>25)</sup>はこれを岩盤内部の亀裂に存在する流体に適用し岩盤の浸透率を求めた。図 1.3.8 にこの概念を示すが岩盤中の亀裂に存在する液相と気相(図中(a))、また、薄い亀裂と大きな間隙の間(図中(b))に発生する Squirt Flow に起因する速度と振幅減衰率の周波数分散から透水係数を求められるとした。Yamamoto et al (1995)<sup>26)</sup>は石灰岩と砂岩の互層での弾性波探査結果が Biot Model と Squirt Flow Model を組み合わせた BISQ モデルから計算した理論値と一致することを示した。(図 1.3.9)。しかし、この手法は地層の種別や状態に応じて解析パラメータを変える必要があるため<sup>27)</sup>、地層や土質分類など地盤の情報がある程度わかっていない場合には適用は難しい。また、複数の周波数の測定には時間がかかるため前項で述べたようなコストや工期の問題もある。

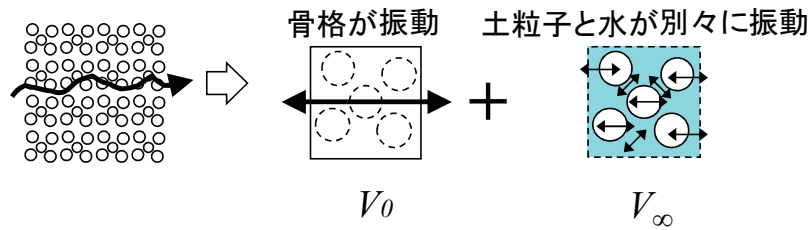


図 1.3.7 Biot Model における遅い波  $V_0$  と速い波  $V_\infty$

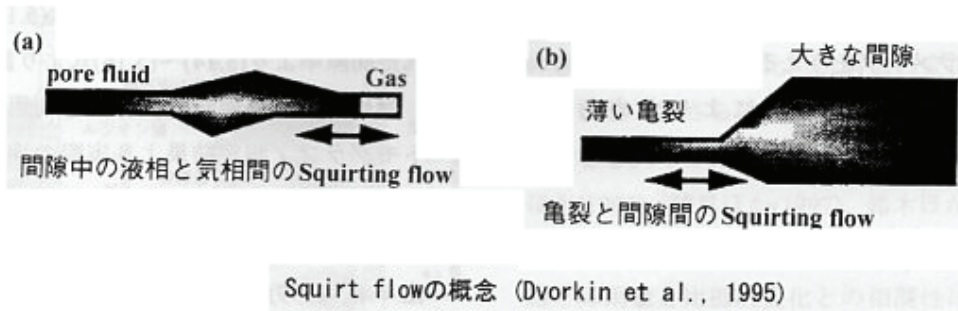
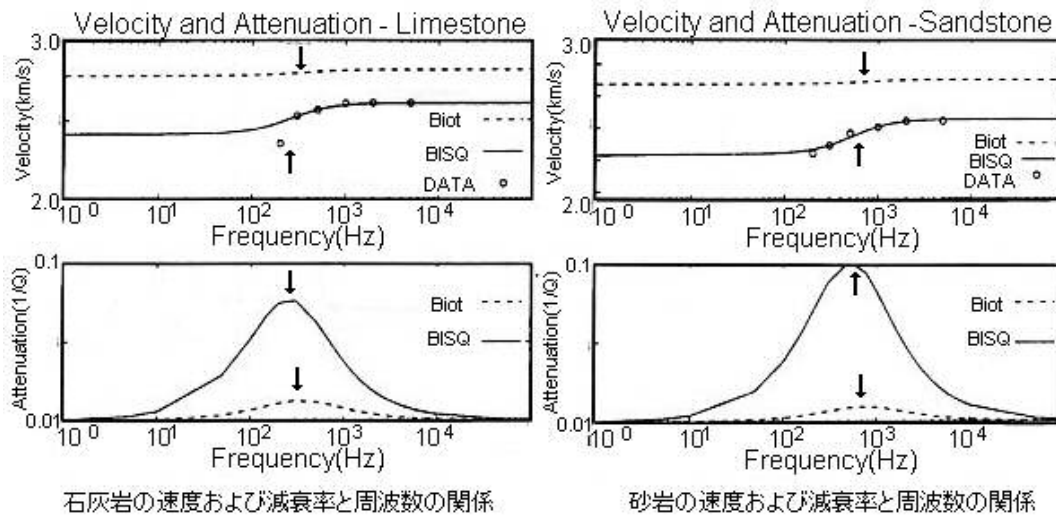


図 1.3.8 弾性波速度から透水係数を求めるモデル<sup>21)</sup>

(a) 岩盤の間隙内の液相と気相間の Squirting Flow

(b) 薄い亀裂と大きな間隙の間の Squirting Flow



速度の変曲点と減衰率の極大値を持つ周波数から透水係数を求める (矢印)

図 1.3.9 弾性波速度と振幅減衰率の分散から透水係数を求めた例<sup>21)</sup>

実線はモデル計算値、○は観測値

## 1. 4. 本研究の目的と課題

物理探査手法は2次元または3次元的に連続した地盤情報を把握できる長所を持っており、ボーリング調査の結果を補完することで正確な調査を行えると期待される。しかし、これまでは探査精度および必要な物性値が得られないという問題により、物理探査による調査結果をうまく活用することができず、結果として正確な調査を行うことは難しかった。そこで本研究においては、孔間弾性波トモグラフィ手法に着目し、発振・受信方法および解析方法について研究を行い、新しい調査手法を提案することを目的とする。この目的を達成するための本研究における課題を以下に示す。

- 従来の弾性波探査手法の発振・受信方法を整理し、調査精度という観点から問題点を明らかにする。そしてこの問題を解決する計測方法を開発する。
- 開発した新しい方法を用いた現場計測を行いその効果について検証する。
- 従来の弾性波トモグラフィ手法の解析方法である走時解析について、結果の解釈という観点から問題点をまとめる。そして結果の解釈を容易にするために複数のデータを組み合わせて考慮する解析方法を提案する。
- 開発した新しい解析方法の検証をシミュレーション計算や模型土槽を用いて行い、その効果を確認する。また、現場計測を行いその効果について検証する。
- 開発した新しい手法の長所と短所を整理し、その限界について検討する。また、同手法による調査が建設工事の安心・安全、コスト、工期に貢献することを示す。

## 1. 5. 研究の構成

本論文は図 1. 5. 1 に示すように第1章序論から第7章結論までの全7章で構成されており、それぞれの内容は以下の通りである。

第1章では、研究の背景として地盤調査法、特に物理探査手法の現状と課題について、①調査精度、②調査結果と物性値の関係の2つの観点から整理し、既往の研究成果をまとめる。そして本研究の目的と課題を設定し、本研究の構成を整理する。

第2章では、①調査精度の課題を解決するために、既存の手法の課題、特に発振方法に着目して整理する。次に疑似ランダム波を用いた発振手法の開発とこれを用いた計測・解析システムの概要を示し、その性能検証を行う。

第3章では、開発した手法を用いて行ったフィリピン共和国マニラ港および愛知県中部国際空港における基礎構造物の支持地盤調査の結果を示し調査精度の検証を行う。また、精度の高い調査が設計・施工に与える効果の検証として、中部空港の調査を例として、“従来のボーリング手法による調査に基づいた設計・施工”と基礎工事の施工コストの観点か

ら比較する。

第4章では、②調査結果と物性値の関係について、既存の弾性波探査の課題を整理する。次に弾性波の減衰率を用いた解析手法について示し、シミュレーション計算および小型模型土槽と岩石ブロックを用いて行った検証実験によりその効果を示す。

第5章では、速度と減衰率という2つの指標を用いて行った円型模型土槽内部の可視化実験について示し手法の有効性を検証する。

第6章では、これまでの検討結果をまとめて、弾性波速度と減衰率を用いた新しい調査手法の提案を行う。

第7章では高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた孔間トモグラフィ法とその効果に対する結論をまとめ、本研究で得られた成果を統括する。

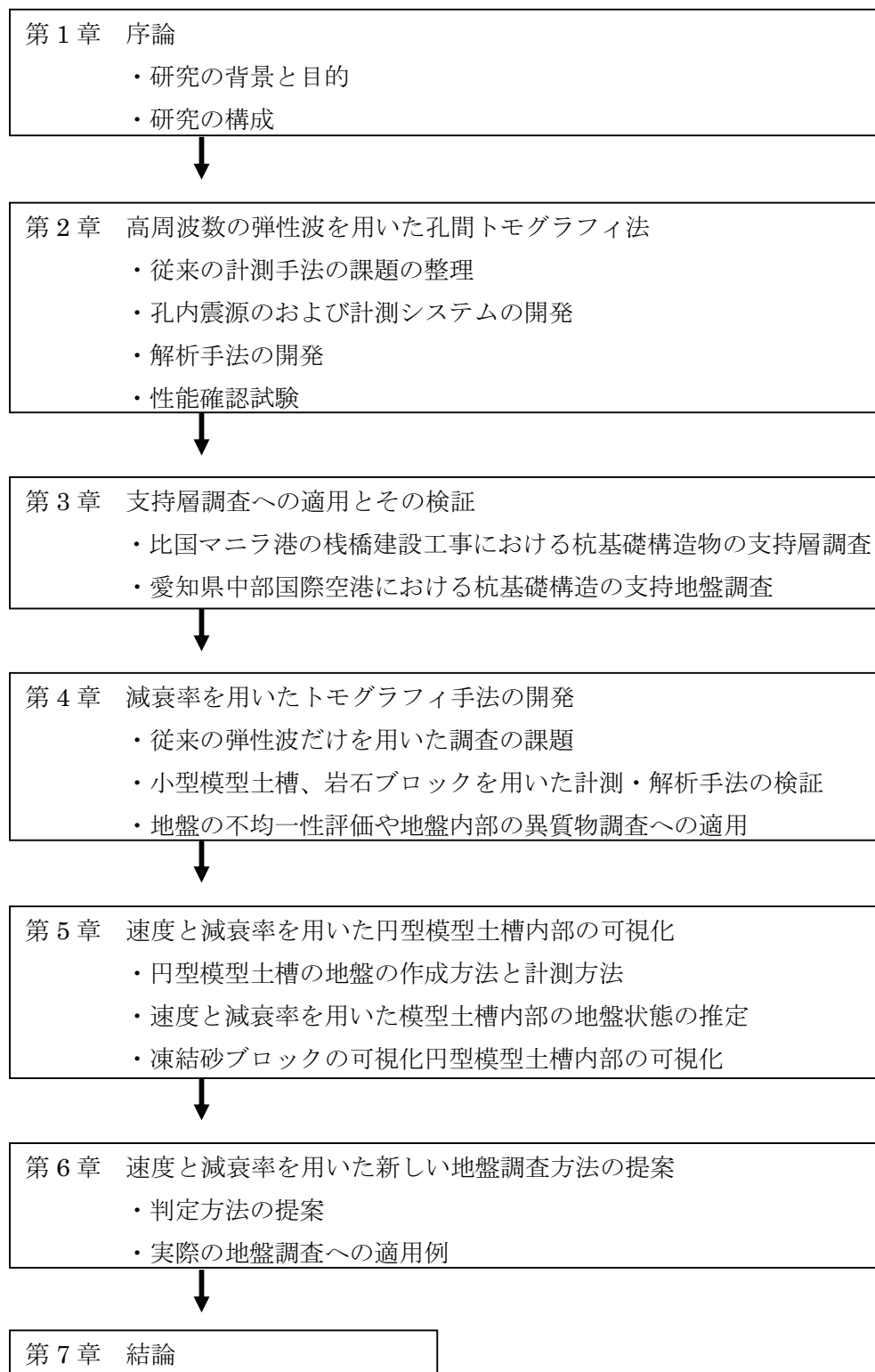


図 1.5.1 本論文の構成

## 【参考文献】

- 1) 笹尾春夫：委員会報告(第2章)、地下空間開発における調査・計測に関するシンポジウム発表論文集、pp. 2-1~2-4、2006
- 2) 西垣誠：地盤調査法の変遷と今後、土と基礎、Vol. 54、No. 5、pp. 1-5、2006
- 3) 中瀬明男：関西国際空港の沈下問題、土木学会論文集、No. 454/III-20、pp. 1-9、1992
- 4) 地盤工学会、地盤調査の方法と解説、2004
- 5) 物理探査学会、図解 物理探査、1989
- 6) 藤村健司、深沢晋治、榊永幸介：代表的な物理探査手法の概要総括表、土と基礎、Vol. 45、No. 9、pp. 32-35、1997
- 7) 藤村健司、深沢晋治、榊永幸介：各種物理探査の変遷と現状、土と基礎、45-9、pp. 7-pp. 10、1997
- 8) 榊原淳一、山本督夫：高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発、土木学会論文集C、Vol. 65、No. 1、pp. 97-106、2009
- 9) 楠 健一郎：物理探査法の地盤工学における課題と提言、土と基礎、Vol. 45、No. 9、pp. 19-22、1997
- 10) 桑原 徹、北郷俊明、カルキー マダン、山崎 淳：アンケートに見る物理探査の現状・ニーズと有効利用、土と基礎、45-9、pp. 3-pp. 6、1997
- 11) 鍛冶良和、三木茂、羽竜忠男、増本 清：物理探査結果と地盤特性の相関、土と基礎、45-9、pp. 11-pp. 14、1997
- 12) 渡辺俊樹、佐々宏一、芦田讓、岸本宗丸：多数の薄層からなる低速度帯がP波に及ぼす影響について、物理探査、Vol. 42、No. 4、pp. 75-81、1989
- 13) Widess, M. B. : How thin is a thin bed、Geophysics、Vol. 38、pp. 1176-1254、1973
- 14) Lavergne, M. : Seismic Methods、Graham & Trotman Ltd.、pp. 18-19、pp. 68-78、1988
- 15) 榊原淳一、毛利栄征、山本督夫：高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた模型土槽内部の可視化手法の開発、土木学会論文集C Vol. 67 (2011)、No. 3、pp. 310-318
- 16) 吉川茂、藤田肇：基礎音響学、講談社、pp. 169-170、2002
- 17) Johnston, D. H. and Toksoz, M.N. : Definition and Terminology、Seismic wave Attenuation Geophysics reprint series No. 2、pp. 1-5、1981
- 18) 佐々宏一、芦田讓、菅野強：建設防災技術者のための物理探査、森北出版、pp. 12-15、1993
- 19) 松井保：比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用、物理探査、Vol. 48、No. 6、pp. 530-580、1995
- 20) 川上 純：物理探査によるモニタリング、土と基礎、45-9、pp. 29-pp. 31、1997
- 21) 鈴木浩一：物理探査データによる地盤物性値の評価法の開発(その1)、電力中央研究所報告、U99036、2000



- 22) 桑原 徹、上野孝之、仮谷幸吉、金田義行、奥田 暁、野村 祐：地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価(その 1)、第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp. 343-pp. 348、1994
- 23) 桑原 徹、上野孝之、仮谷幸吉、金田義行、奥田 暁、平間邦興、玉井昭雄、秋吉賢治、三上哲司：大規模地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価(その 1)、大林組技術研究所報、No. 49、pp. 63-pp. 70、1994
- 24) Biot, M. A. , : Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media、J. Acoust. Soc. Am. 、 34(9)、pp. 1254-pp. 1246、1956
- 25) Dovorkin, J. , Mavko, G. and Nur, A. : Squirt flow fully saturated rocks、Geophysics、60、pp. 97-pp. 107、1995
- 26) Yamamoto, T. , Nye, T and Kuru, M. : Imaging the permeability structure of a limestone aquifer by crosswell acoustic tomography、Geophysics、60(6)、pp. 1634-pp. 1645、1995
- 27) Tokuo Yamamoto, and Junichi Sakakibara : Crosswell tomography imaging of the permeability structure within a sandstone oil field. 、 Proceedings of SEGJ International Symposium、Vol.4、1998

## 第2章 高周波数の弾性波を用いた孔間トモグラフィ法

### 2.1. 概要

前章で述べたとおり、①探査精度の向上、②工学的に必要な物性値との関連性という 2 つの課題に対して、①弾性波探査に関しては発振周波数を高くすることで探査精度を向上させられること、②複数の手法による調査結果を組み合わせることで地盤性状を正確に把握できることが分った。本章では、まず①探査精度の向上を目的とし、高周波数の弾性波を用いた孔間弾性波トモグラフィ法の開発について示す。次いで開発した手法の性能を確認するために、周波数制御、SN 比の改善の 2 点について検証する。検討の流れを図 2.1.1 に示す。

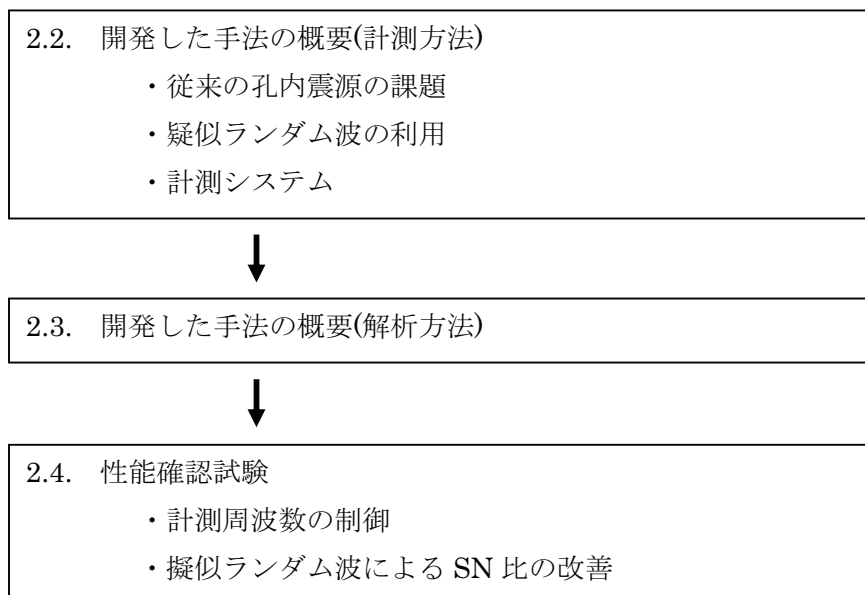


図 2.1.1 検討の流れ

### 2.2. 開発した手法の概要(計測方法)

#### 2.2.1. 従来 of 孔内震源の課題

図 1.3.1 に示したように現場に必要な計測精度を得るためには発振周波数を高くする必要はあるが、従来の手法ではこれを行うことは難しかった。この理由は 2 つある。1 つは機械式震源や発破震源のような出力の大きい震源は発振周波数が低いこと<sup>1)</sup>、2 つ

めは圧電素子型震源のような発振周波数が高い震源は出力が小さいことである<sup>2)</sup>。

表 2.2.1 は既存の孔内震源を比較して示したものであるが、出力が大きい坑内エアガン、爆薬、機械式震源は何れも発振周波数の制御ができないことがわかる。これは発破や機械式震源が発生させる衝撃波(パルス波)は周波数を制御することが難しいためである。図 2.2.1 にパルス波と連続波の出力波形を模した半波長の正弦波(a)、1 波長の正弦波(b)、3 波長の正弦波(c)、5 波長の正弦波(d)の波形とスペクトル強度を比較して示した。同図からパルス波のスペクトル強度は連続波の強度の 25 分の 1 から 50 分の 1 であること、また半波長の正弦波(a)は低周波数域の周波数制御ができていないこと、1 波長の正弦波(b)も連続波に比べて周波数帯域が倍以上広いこと、すなわちパルス波では周波数の制御が難しいことがわかる。結果として減衰しにくい低周波数の波のみが地盤を伝播し高周波数の波を計測することができなくなる。

一方、高周波数の連続波を出力できる孔内震源として圧電素子型震源(ピエゾ震源)があげられる。圧電素子とは、図 2.2.2 に示すように、電圧をかけると伸縮し機械的歪みを加えると電圧を発生する圧電効果<sup>3)</sup>を持つセラミック製の素子であり、家電・工業製品など幅広い分野で利用されている。圧電素子型震源は低周波数から高周波数まで優れた周波数特性を持つという利点を持つが、出力が小さいという欠点がある。さらに、図 1.3.2 に示したように高周波数の波は減衰が大きく伝播距離が短いため、これまでは実用的な調査を行うことができなかった。

## 2.2.2. 疑似ランダム波の利用

開発した手法は周波数を制御した疑似ランダム波と呼ばれる連続波を用いることに特徴がある。これにより計測精度を高くするために発振周波数を高くしても、高周波数による減衰の影響を低減することができ、実用的な計測距離を維持することが可能となった。

疑似ランダム波とはパルス圧縮<sup>4)</sup>と呼ばれる信号圧縮方法の一つである。連続波を用いることにより送信するエネルギーを時間軸上に分散させているため、パルス波に比べて送信信号全体のエネルギーを大きくすることができる<sup>5)</sup>。疑似ランダム波は特定のデータ長を持つ連続波でありこの範囲ではランダムな性質を持つこと、単一周波数の正弦波をベースとし位相変換されていること、相関関数の計算により正弦波の周波数に依存した波長のパルス波に復調できることが特長である<sup>6)、7)</sup>。図 2.2.3 に疑似ランダム波の例を示すが、1 と 0 のランダムな信号のコード(図中(a))を連続した正弦波(図中(b))に置き換えて作成する。信号が 0 の時は位相を反転させ、信号が 1 の場合には位相を戻す<sup>7)</sup>。波数(またはコード長)は  $2^{N-1}$  (N は正の整数) であり同図の場合は N=4 である。発振周波数を  $f_c$  とすると周期は  $T$ 、1 波長の周期は  $t$  で表される。図 2.2.4 に疑似ランダムコードの相関関数の計算結果を示す。図中、左側の矢印から右側の矢印までが 1 コードの長さでありが、黒塗り部分を+1、白塗り部分を-1 と考える。相関関数の計算は「2つのコードの同じ時間の値のか

け算の結果の合計」であり、符号が同じ時は+1、符号が一致しない時には-1 となりその結果の合計が計算結果となる。同図から位相が一致しない場合(図 2.2.4 の上図)には計算結果は-1 となり位相が一致する場合(図 2.2.4 の下図)には計算結果は 31 となっていることがわかる。図 2.2.5 は図 2.2.4 で示した 2 つのコードの位相をずらしながら相関関数の計算を行った結果である。横軸に時間軸、縦軸は計算結果の値を示す。同図から位相が一致した場合に計算結果が 31 となり、これが 1 周期毎に繰り返されること、それ以外の時は-1 となることがわかる。この“位相が一致した時には正の値を得るがそれ以外の全て場合には相関の値が-1 になる”という性質が最も重要な特長の一つである。さらに位相が一致した時の相関関数の計算結果の値はコード長に比例して大きくなるため、信号対ノイズ比(以後 SN 比と言う)もコード長が長くなると改善されることになる。図 2.2.6 にこの例を示す。横軸はコード長、縦軸は SN 比である。システムの受信感度が 30dB であるためコード長が 20 以上であれば有意な信号として受信できる。言換えれば計測環境のノイズの大きさに合わせてコード長を調整することでノイズの影響を受けにくい計測が可能となる。

図 2.2.7 に実際の波形の例として、発振波(a)、実際の受信波(b)、発振波と受信波の相関計算後の波形(c)を示す<sup>8)</sup>。相関関数のピーク値となる時間(図 2-(c)では 0.36ms 付近の極大値)は擬似ランダム波の到達時間であり、ピーク値の大きさは到達波の持つ受信エネルギーと考えてよいので、これにより地中を伝播してきた波の到達時間とエネルギー量を得ることができる。図 2.2.8 は擬似ランダム波を用いることによるノイズの低減効果について、パルス波の重ね合わせ結果と比較したものである<sup>8)</sup>。図 2.2.8(a)に示すパルス波に振幅の 3 倍のホワイトノイズを重ねてノイズを含んだ受信信号とし(図 2.2.8(b))、得られた波形を 1000 回足し合わせた結果が図 2.2.8(c)である。ホワイトノイズはランダム信号であるため足し合わせの過程で小さくなるが、パルス波は常に存在するため結果としてパルス波だけが大きくなる。図 2.2.8(d)は、上記の手順と同様に擬似ランダム波(連続波の波数は 4095)に振幅の 3 倍のホワイトノイズを重ねて受信波とし、ホワイトノイズを含まない擬似ランダム波(発振波)との相関計算を行った結果であるが、1000 回足し合わせたパルス波よりもノイズが小さいことがわかる。この擬似ランダム波を用いることで減衰が大きいために困難であった高周波数の弾性波を用いた計測が可能となる。

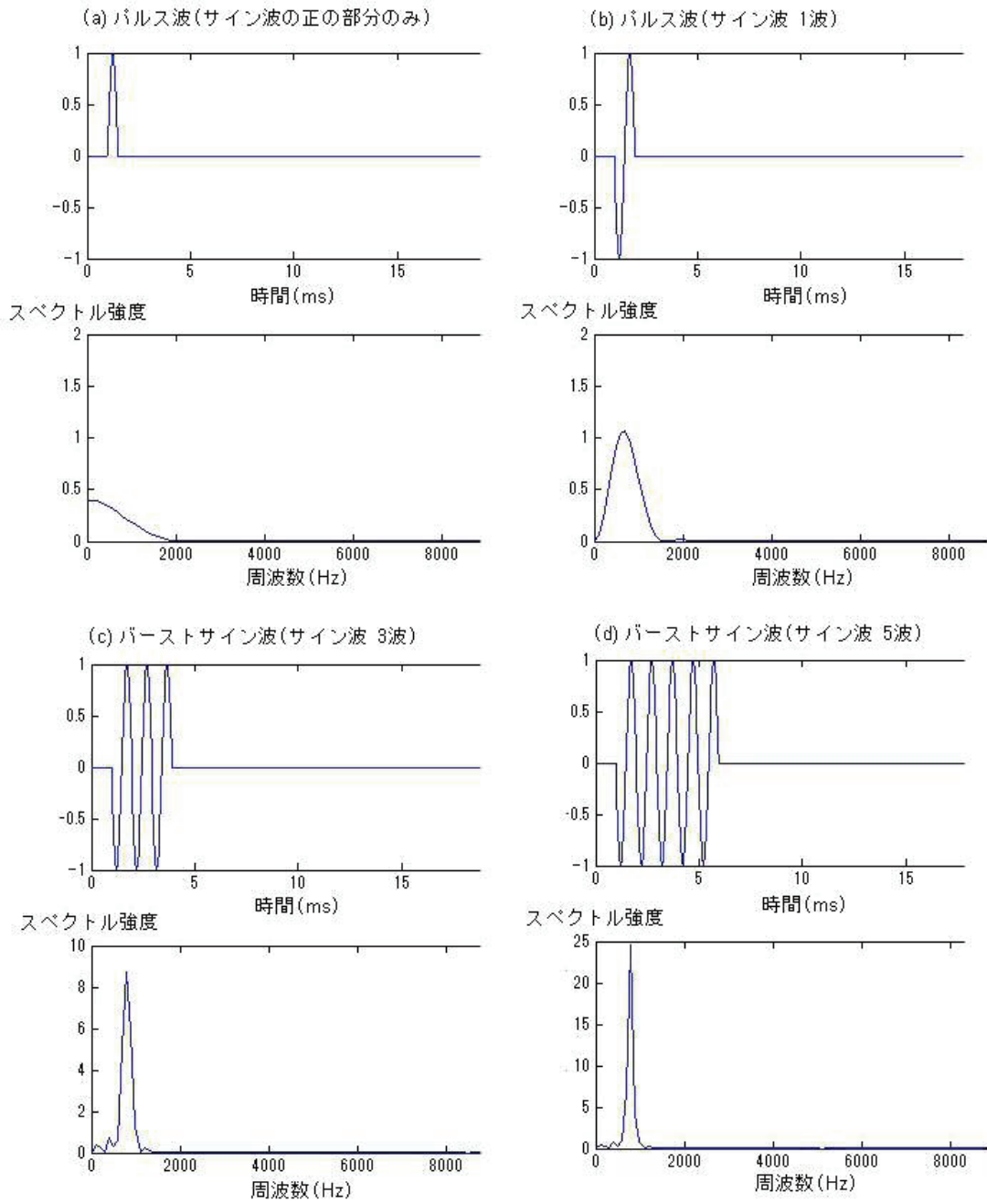


図 2.2.1 パルス波と連続波(バーストサイン波)のスペクトル強度の比較

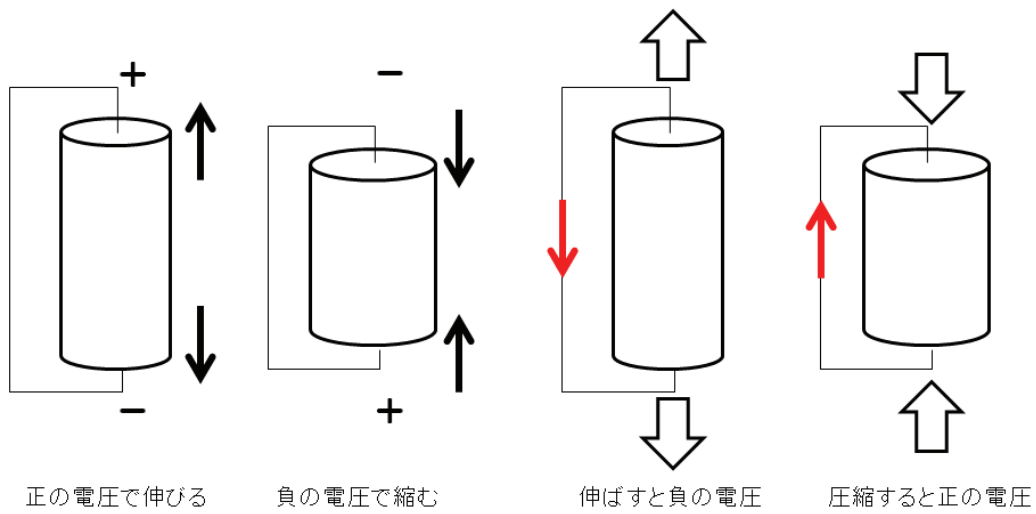


図 2.2.2 圧電効果

表 2.2.1 孔内震源の比較<sup>1), 2)</sup>

名称	仕組み・構造	利点・欠点
坑内エアガン	チャンバーに蓄えられた高圧の空気をシャトルの動きにより瞬時に外部に放出し弾性波を発生させる。	○出力波形が一定である。 ×周波数制御はできない。
爆薬	雷管または少量の火薬をナマイトまたは雷管を爆発させ弾性波を発生させる。	○出力が大きく計測距離が長い。 ×周波数制御はできない。 ×計測孔を破壊する可能性がある。
機械式震源	複数の円盤を油圧ピストンなどで上下させ、円盤と円盤の間の水を押し出して弾性波を発生させる。	○出力が大きく計測距離が長い。 ×周波数制御はできない。
圧電素子型震源(ピエゾ震源)	シリンダー状の圧電素子に電圧をかけ素子に歪みを発生させ弾性波を発生させる。	○低周波数から高周波数まで周波数のレスポンスがよい。 ×出力が小さく計測距離が短い。

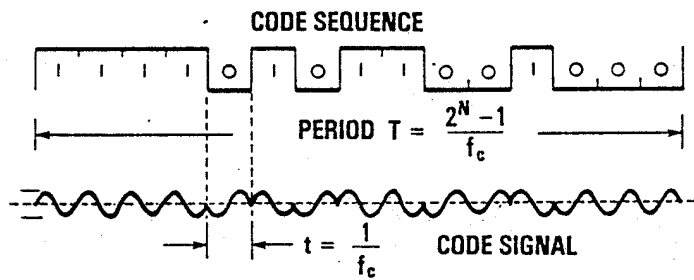


図 2.2.3 疑似ランダム波の例<sup>6)</sup>

発振周波数を  $f_c$  をすると周期は  $T$ 、1 波長の周期は  $t$  で表される。

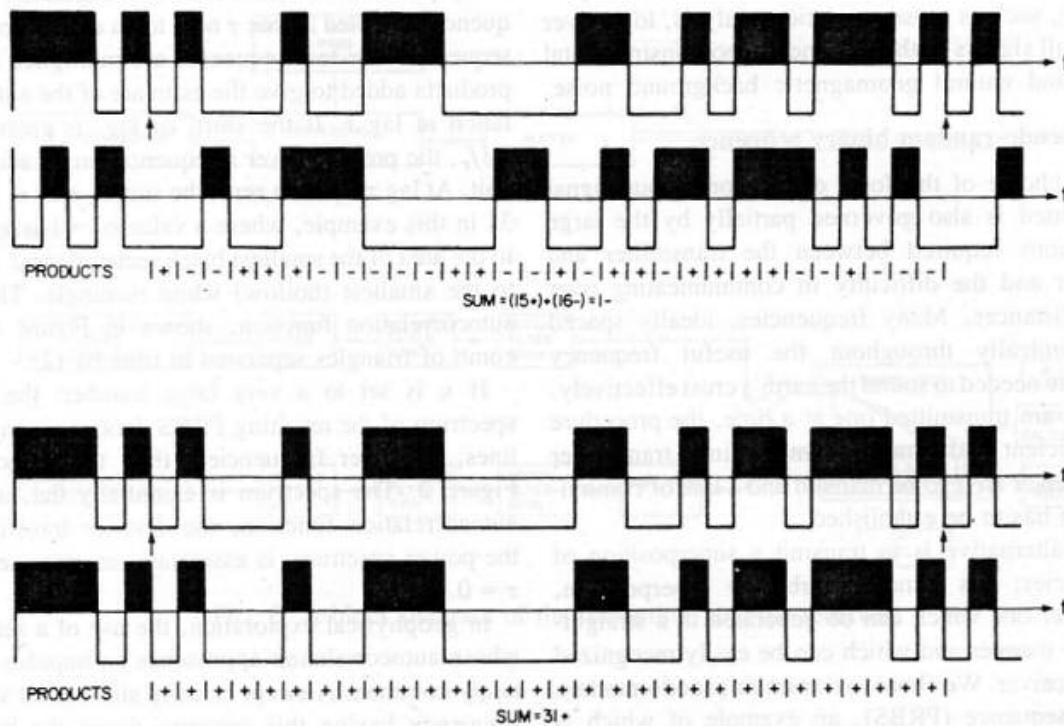


図 2.2.4 疑似ランダムコードの相関計算結果の例<sup>7)</sup>

図中、矢印から矢印までが1コード長を表す。黒塗り部分を1、白塗り部分を-1と考えると、上：位相がずれている場合の相関計算結果は-1、下：位相が一致している場合は相関計算結果は+31となる。

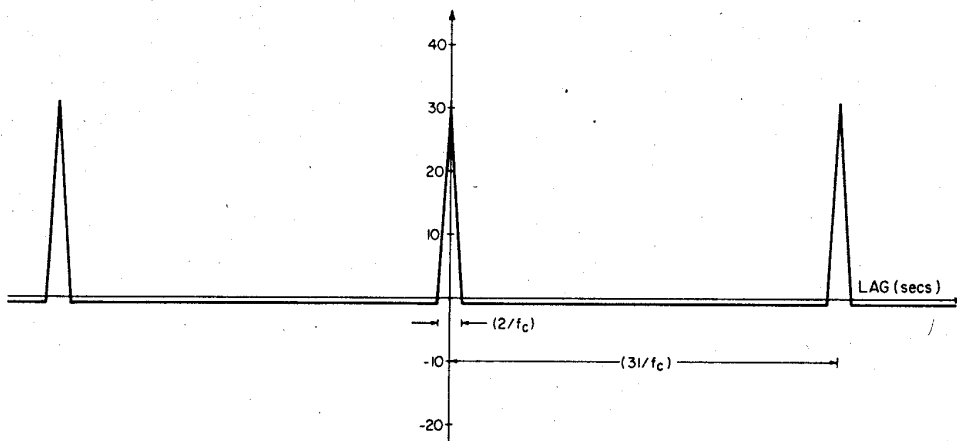


図 2.2.5 位相をずらして計算した自己相関関数の結果<sup>7)</sup>

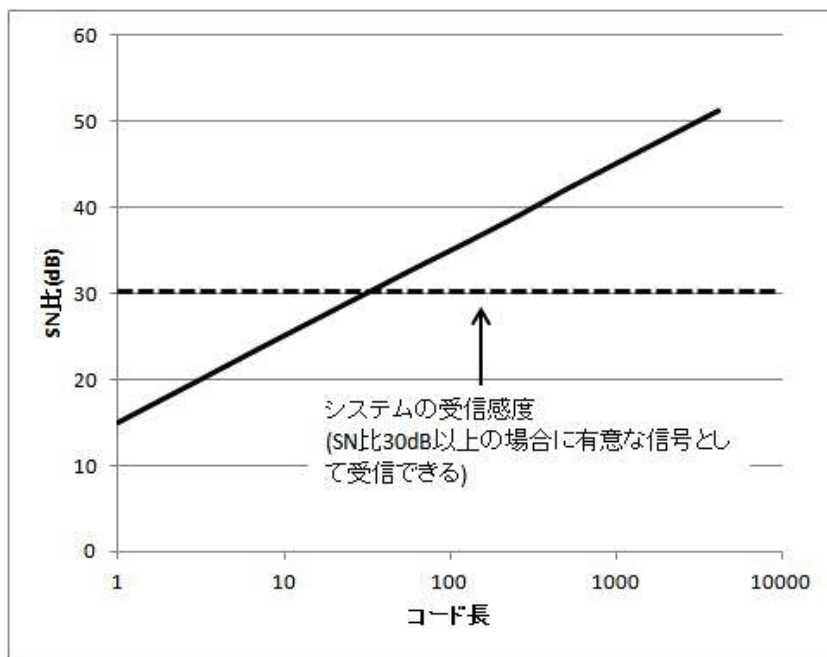


図 2.2.6 疑似ランダム波の効果

横軸はコード長を対数で、縦軸は受信信号の SN 比を示す。受信信号の SN 比がシステムの受信感度を超えるようにコード長を長くすることで計測が可能となる。



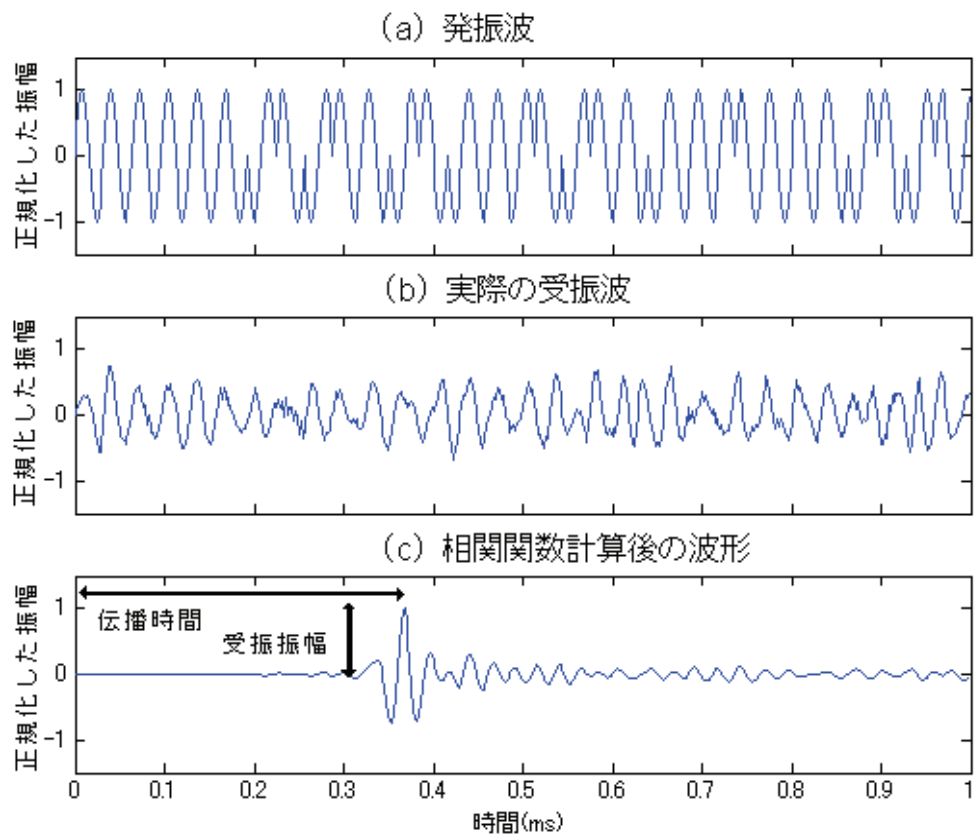


図 2.2.7 疑似ランダム波の例<sup>8)</sup>

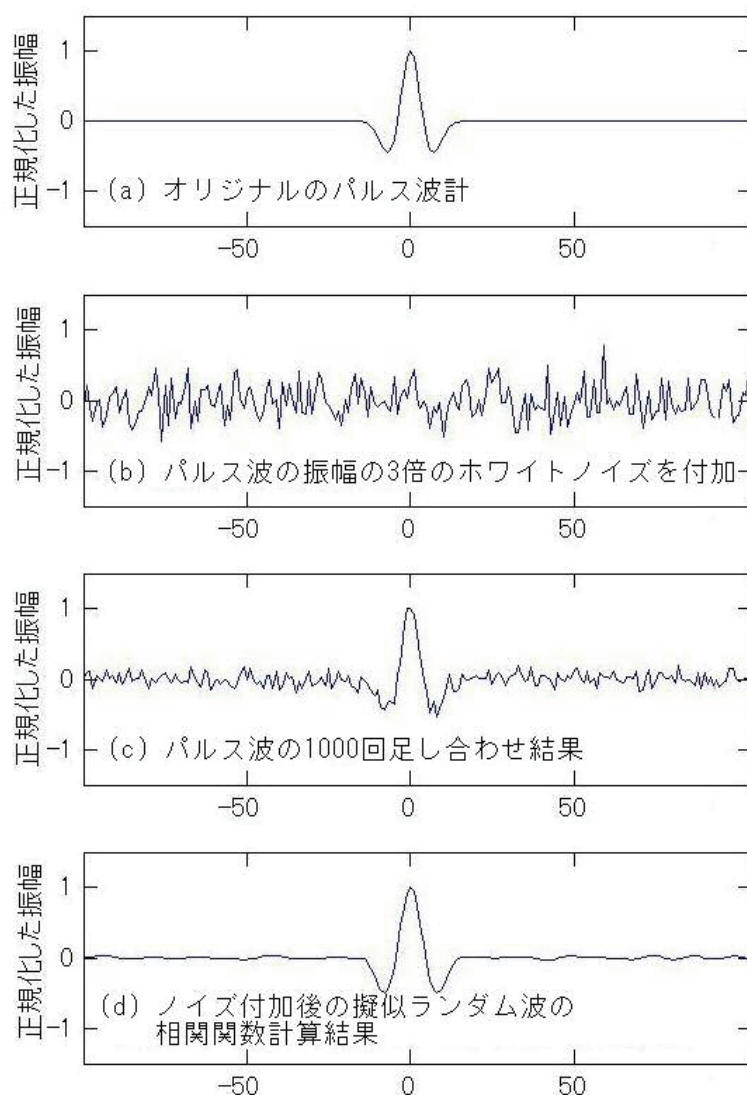


図 2.2.8 疑似ランダム波とパルス波のノイズ低減効果の比較<sup>8)</sup>

### 2.2.3. 計測システム

計測システムとその基本仕様、機材の写真を図 2.2.9、表 2.2.2 および図 2.2.10 に示す。データロガーとしてアナログ・デジタル変換およびデジタル・アナログ変換ボードを組込んだパソコン、増幅器(音響アンプ)、受信信号フィルター、発振器(圧電セラミックスピーカー)と受信器(24 チャンネル水中マイクロフォン)で構成される。パソコンから出力した発振信号は増幅器を介して計測孔に設置した発振器から弾性波として出力する。弾性波は計測孔内の水を介して地中に入射・伝播し、もう一方の計測孔に設置した受信器により電圧信号に変換され、信号フィルターを介してデータロガーにより記録される。疑似ランダム波のような複雑な波形を損失することなく出力するためには、高周波数帯域でも正確な波形出力が可能な圧電セラミックス型発振器を用いることが必要である。図 2.2.11

は本手法で用いている発振器の周波数特性(実測値)を示しているが、周波数特性が安定しており疑似ランダム波の出力に適していることがわかる。

計測フローを図 2.2.12 に示す。受信器と発振器を所定の位置に設置し発振と受信を行う。得られた受信記録の相関関数を計算して波形を確認し、次の発振位置へ移動して計測を繰り返す。予定の発振器位置を全て実施して計測は完了する。解析は発振波と受信波の相関関数の波形から最初に到達した波(初動波)の到達時間と振幅を読み取り、これらを用いて波線解析と特異値分解法による逆計算<sup>27)</sup>を行い伝播速度分布と振幅減衰率分布を求める。

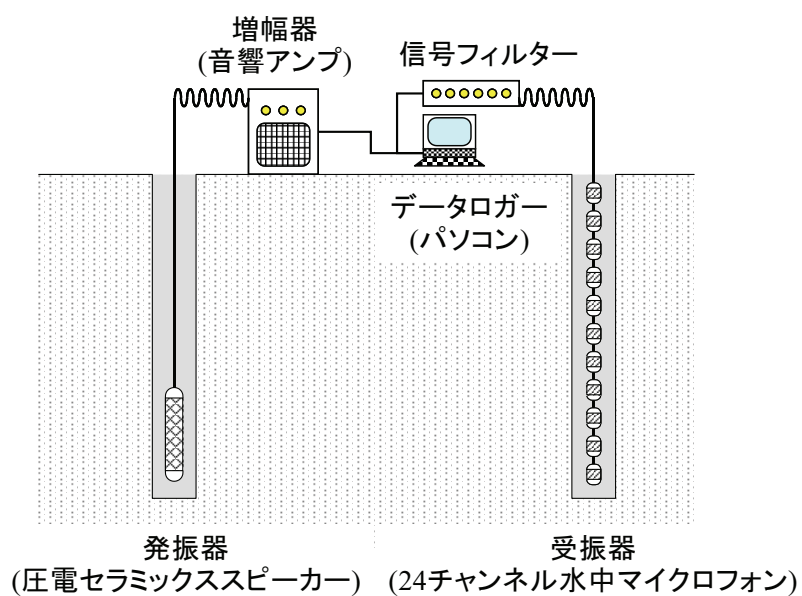


図 2.2.9 計測システム



図 2.2.10 計測システムの写真  
左上 発振器、右上 受信器、下 データロガーと増幅器

表 2.2.2 計測システムの基本仕様

名称	仕様
発振器	外径 44mm、長さ 270mm、重量 4.5kg、 出力 130.6dB(入力電圧 100V、発振周波数 5kHz)、 使用可能周波数帯 200Hz~30kHz、共振周波数 35kHz。
受信器	外径 35mm、センサー間隔 1m、センサー数 24 個、重量 11kg、 使用可能帯域 1Hz~20kHz(実績)、 受信感度 -162 dB <i>re</i> 1V/ $\mu$ Pa <sup>(*)</sup> 耐圧深度 200m。 <sup>(*)</sup> 1 $\mu$ Pa の圧力を受けた際に出力 1V を得るための増幅度
増幅器	出力電圧 120V(20kHz 以下)、使用可能帯域 20Hz~20kHz、 電源 AC100V、消費電力 60W、重量 9kg
信号フィルター	ゲイン 1 倍~100 倍、入出力 8 チャンネル、バンドパスフィルター 帯域 200Hz~60kHz、電源 DC $\pm$ 12V。
データロガー	入力 24 チャンネル、出力 1 チャンネル、 入力分解能 16bit、入力・出力電圧 $\pm$ 5V 以下 最小サンプリング間隔 10 $\mu$ 秒、最大サンプリング数 65,520。

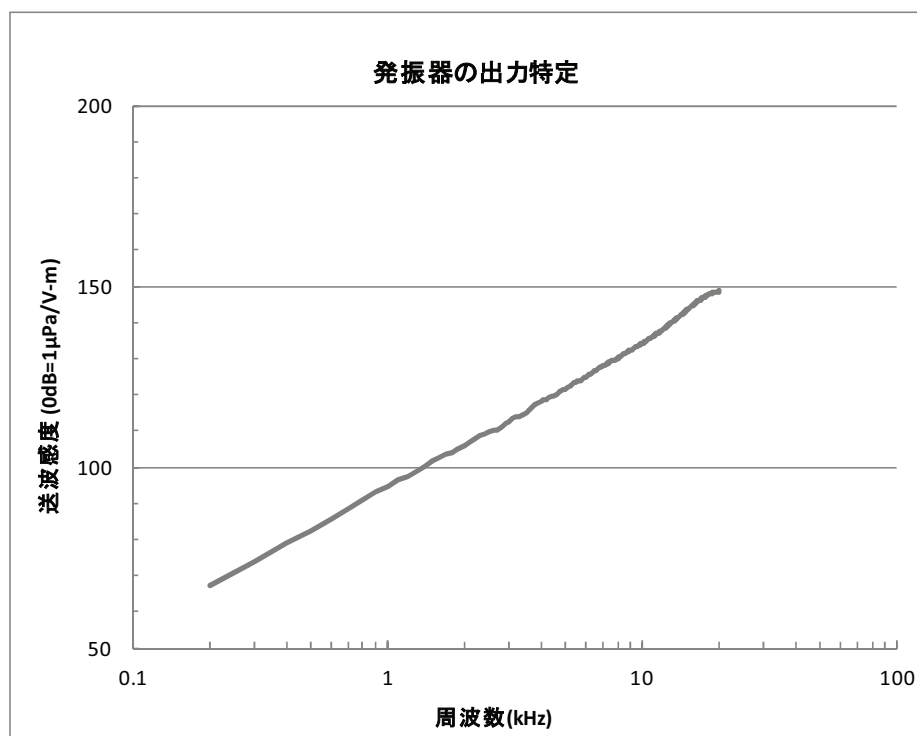


図 2.2.11 発振器の出力特性

送波感度：理論上 0V を印加した際の 1m 離れた場所における音圧レベル

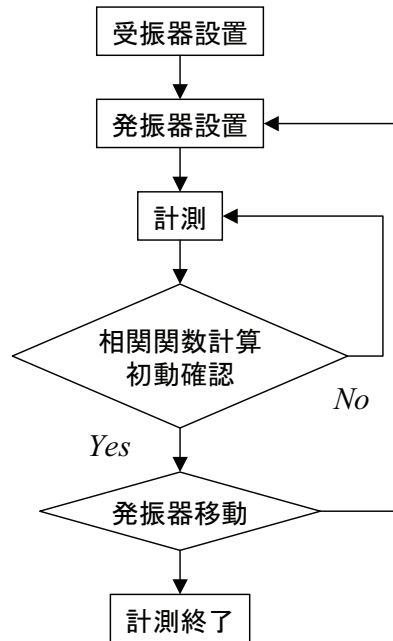


図 2.2.12 計測フロー

### 2.3. 開発した手法の概要(解析方法)

解析フローを図 2.3.1 に示す。まず、発振波と受信波の相関計算を行い最初に到達した波(初動波と呼ぶ)の到達時間と振幅を読み取る。次にこの到達時間と振幅から速度と減衰率を計算する。速度  $V$  は伝播距離  $d$ 、到達時間  $t$  を用いて式(3-1)として表される。減衰率は発振音圧  $A_0$ 、受信音圧  $A$ 、伝播距離  $d$ 、発振周波数  $f$ 、減衰定数  $\alpha$  を用いて式(3-2)および式(3-3)として表される<sup>8)、9)、10)</sup>。ここで  $Q$  は  $Q$  値と呼ばれる媒質の減衰特性を表す無次元量であり、この逆数の  $Q^{-1}$  を減衰率<sup>11)</sup> とする。式(3-2)、(3-3)から式(3-4)、(3-5)を得て  $Q^{-1}$  を求める。なお、式(3-4)の減衰定数  $\alpha$  は自然対数で表される減衰定数(neper<sup>11)</sup>)であり、式(3-5)の減衰定数  $\alpha$  は音圧レベル(dB)で表される減衰定数である<sup>11)</sup>。距離減衰以外の減衰には密度の異なる物質を透過する際の透過減衰、散乱による散乱減衰、土粒子と間隙流体の間の粘性減衰<sup>12)、13)、14)</sup>があり、計算結果として得られる減衰率はこれら全ての影響を受けている。しかし、透過減衰と散乱減衰の影響を取り除くことは難しいこと<sup>15)</sup>、また本研究では比較的均一な地盤を取り扱うことから計算によって得られる  $Q^{-1}$  を透過減衰、散乱減衰、粘性減衰全てを含む減衰率と見なすこととした。逆計算は特異値分解法<sup>16)、17)</sup>を用いた速度トモグラフィ解析によって波線経路を決定し、その波線に沿って各セルの  $Q^{-1}$  を計算する。

$$V = \frac{d}{t} \quad (3-1)$$

$$A = \frac{1}{d} A_0 e^{-\alpha d} \quad (3-2)$$

$$\alpha = \frac{\pi f}{VQ} \quad (3-3)$$

$$\alpha \text{ (neper)} = \frac{1}{d} \ln \left[ \frac{A}{A_0} \right] \quad (3-4)$$

$$Q^{-1} = \frac{1}{8.686\pi} \frac{V}{f} \alpha \text{ (dB)} \quad (3-5)$$

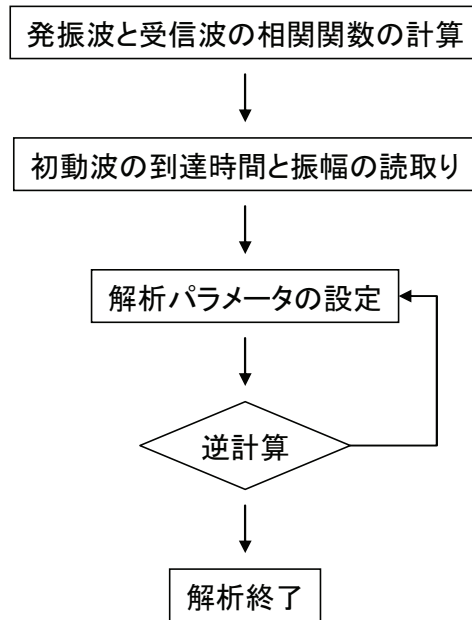


図 2.3.1 解析フロー図

## 2.4. 性能確認試験

### 2.4.1. 計測周波数の制御

計測周波数の制御に関わる性能を確認するために、茨城県霞ヶ浦の砂層中において発振周波数を 3kHz～20kHz まで変えた試験を行った<sup>8)</sup>。地盤は飽和した均質な砂で構成されており孔壁保護のために水で満たした塩ビパイプをケーシングとして用いた。発振器と受信器の距離および発振器と受信器の設置深度は共に 1.00m であった。計測レイアウトおよび計測結果をそれぞれ図 2.4.1、図 2.4.2 に示す。相関関数の波形図、周波数スペクトルと

も振幅はコンピューターの読み値を示している。図 2.4.2 からわかるように、発振周波数に対応して相関関数の波長とパワースペクトル(図中の矢印は発振周波数)が変化していることから、正確な周波数制御を行っていることを確認した。なお、これらの結果は表 2.2.2 に示す計測機器の周波数特性の範囲内に収まっており、相関関数の波形における到達波の決定に影響はない。

続いて従来手法と比較するためにハンマーによる打撃音との比較を長さ 1m のコンクリートブロックを用いて行った<sup>8)</sup>。発振器と受信器は粘土を用いて試験体に接着した。発振器と受信器の距離は 1.00m であった。図 2.4.3 および図 2.4.4 は計測レイアウトおよび試験結果を示す。打撃による受信波形と本手法による相関関数の波形の振幅はコンピューターの読み値を電圧で示している。打撃音の卓越周波数は約 5kHz、本手法では約 40kHz であった。図中、下向き矢印は初動波の到達時間を示すが、打撃音は波の立ち上がりを読む必要があるため図中の横向き矢印で示す範囲の読み取り誤差が発生する可能性があるが、本手法は相関関数の頂点を読むため読み取り誤差は発生しにくい。この結果から従来手法よりも波形の読み取り誤差が小さくより精度の高い計測が可能であることがわかる。ただし、図 2.4.4 の下図に示されるように、波長が短い故に遅れてくる波やその合成波が初動波付近に混在する場合もあるため初動波の同定に際しては近傍の受信器の波形も考慮するなどの対応が必要である。

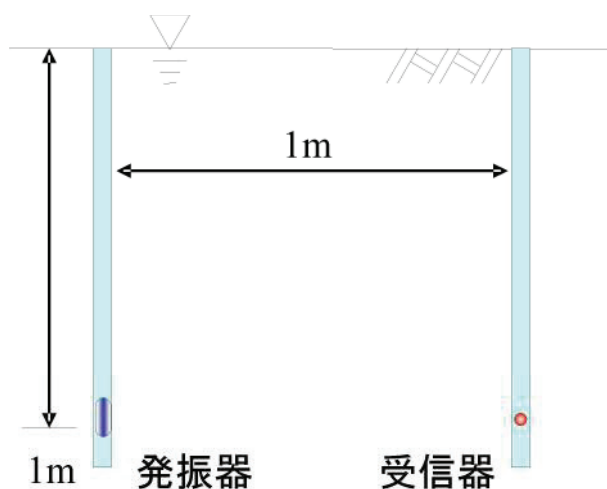


図 2.4.1 性能確認試験のレイアウト<sup>8)</sup>



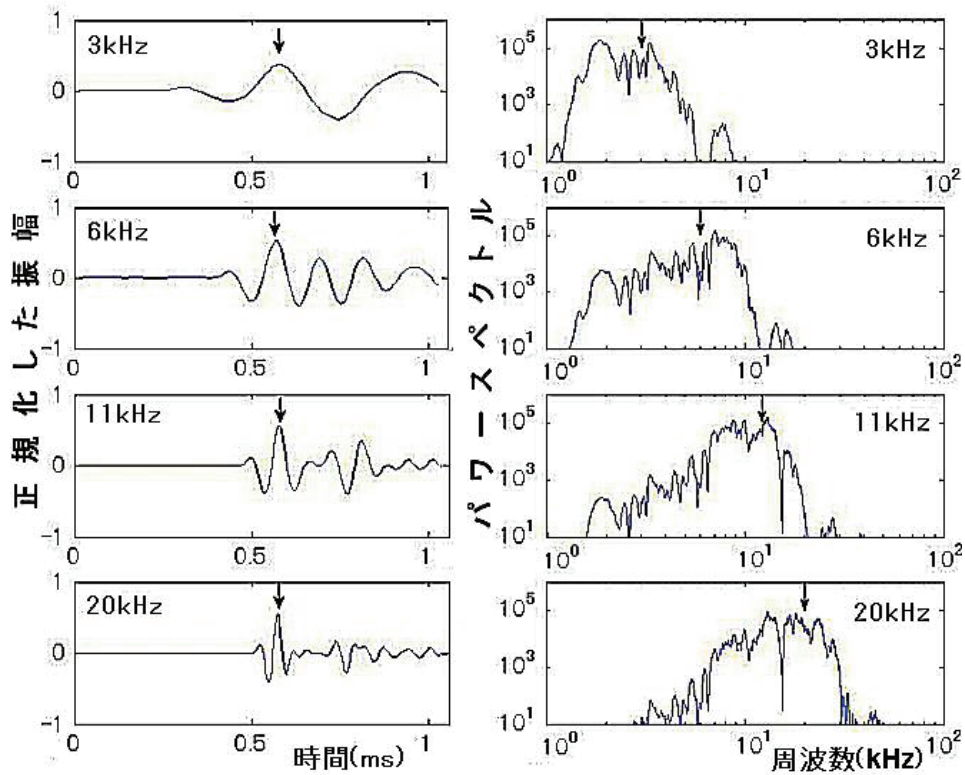


図 2.4.2 砂層中における相関関数の波形とパワースペクトル<sup>8)</sup>  
 発振周波数は上から 3kHz, 6kHz, 11kHz, 20kHz  
 左列) 相関関数の波形(振幅は正規化してある)、  
 右列) 周波数スペクトル(図中矢印は発振周波数を示す)。

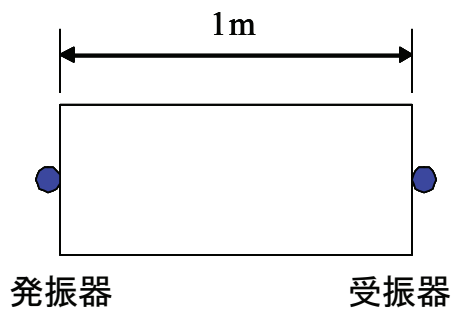


図 2.4.3 打撃音との比較試験の計測レイアウト<sup>8)</sup>  
 コンクリート試験体の両側に発振器と受信器を設置

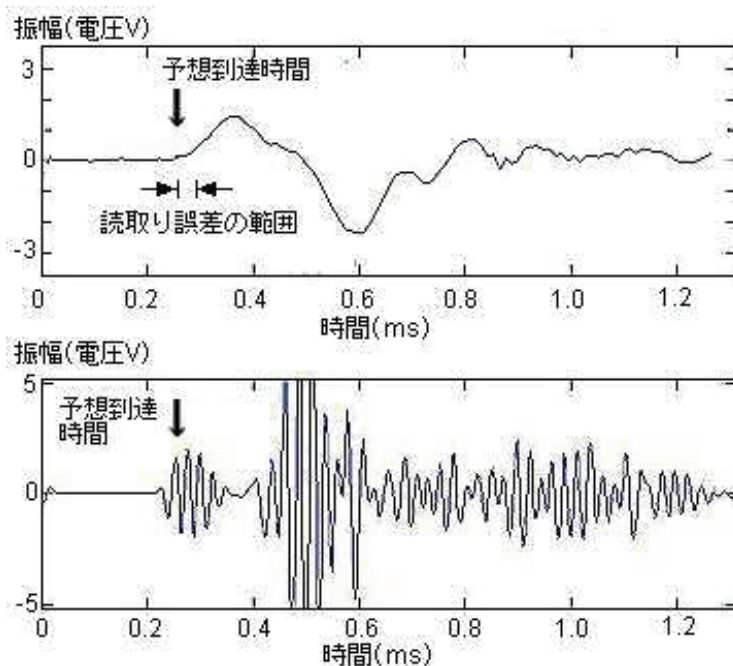


図 2.4.4 コンクリート試験体を用いた打撃音との比較(距離1m)<sup>8)</sup>  
 上) 打撃による受信記録(卓越周波数は約5kHz)、  
 下) 本手法による相関関数の波形記録(卓越周波数は約40kHz)。

## 2.4.2. 擬似ランダム波によるSN比の改善

擬似ランダム波の信号対ノイズ比の改善効果について検証を行うため、図 2.4.1 と同様の計測方法を用いてパルス波の受信記録と擬似ランダム波の相関関数の波形の比較を行った<sup>8)</sup>。発振周波数は2kHz、計測距離は0.450mであり、パルス波として1波だけの正弦波を用いた。図 2.4.5 に結果を示す。図中の下向き矢印は初動波の到達時間を示す。縦軸は受信波形および相関関数の波形の振幅をパソコンの読み値で示しているが、パルス波の初動の振幅が10程度であるのに対して擬似ランダム波の相関関数の波形の振幅は $10^5$ 程度であることがわかる。これは時間軸状に分散した信号成分は相関計算の結果として圧縮されるが、擬似ランダム波と相関性を持たないノイズ成分は相関計算の結果は圧縮されないためであり、本試験の場合は擬似ランダム波の相関関数波形のSN比は $10^4$ 倍も改善されていることがわかる。前節で述べたQ値を20、発振周波数 $f$ を1kHz、伝播速度 $V$ を2km/sとし、式(3-2)と(3-3)を用いて計算すると、擬似ランダム波を用いた場合は計測距離は約80m伸びることになる。

図 2.4.6 は本手法を用いて行った東京湾での地盤調査における受信記録の1例である<sup>8)</sup>。発振孔と受信孔の孔間距離は110m、発振周波数は1kHz、発振深度はGL.-32mであった。図中、●印で示す初動波が明瞭に判別できることから、これまでの手法では伝播させることが難しかった高周波数の波が伝播していることがわかる。

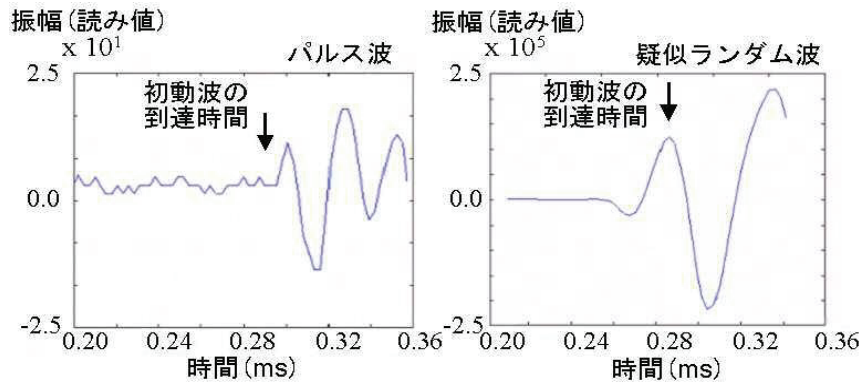


図 2.4.5 砂層中を伝播したパルス波(左)と擬似ランダム波の相関関数計算結果(右)の受信記録の比較<sup>8)</sup> (計測距離 0.45m)

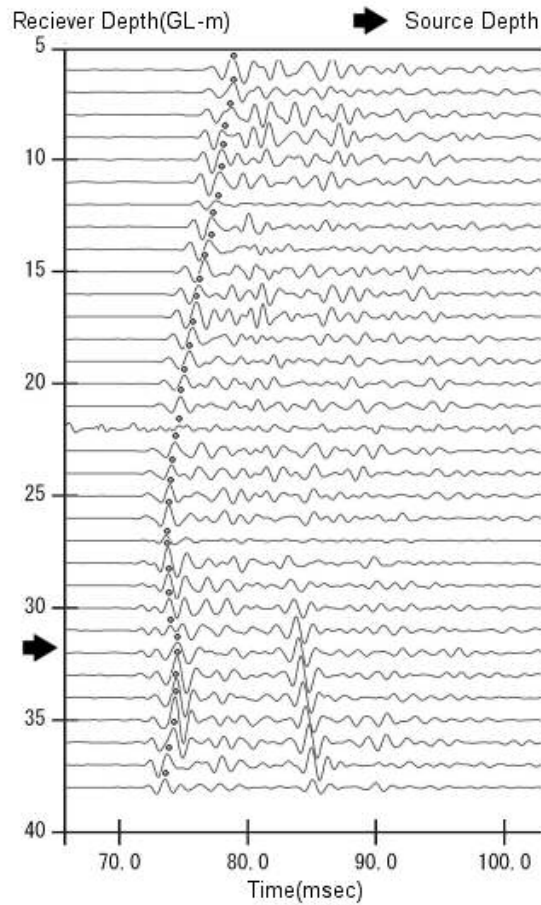


図 2.4.6 東京湾における計測結果(相関関数計算結果)<sup>8)</sup>  
計測孔間距離 110m、発振周波数 1kHz、粘性土/砂質土、●印は波の到達時間を示す。

## 2.5. まとめ

2.2. 開発した手法の概要(計測手法)において、従来の孔内震源の課題についてまとめ、発振周波数の制御と発振周波数を制御可能な震源の開発が必要であることを示した。そして疑似ランダム波と圧電素子型震源を組み合わせることでこの課題を解決できることを示した。さらにこの疑似ランダム波と圧電素子型震源を用いた計測システムの概要を示した。

2.3. 開発した手法の概要(解析手法)において、解析方法の概要について示した。

2.4. 性能確認試験において、まず、パワースペクトルを比較することで正確な周波数制御が可能であることを示した。次にノイズを混在させたパルス波と疑似ランダム波を発振信号として受信側の信号をシミュレーション計算により求め、これら2つの波の比較によりSN比の改善について効果を示した。

### 【参考文献】

- 1) Lavergne, M. : Seismic Methods, Graham & Trotman Ltd.、pp. 18-19、 pp. 68-78、1988
- 2) 物理探査学会、物理探査ハンドブック、pp. 765-pp. 767、1998
- 3) 株式会社富士セラミックス、圧電セラミック テクニカルハンドブック
- 4) Skolnik, M. : Radar/ Handbooks 2nd Edition、McGraw-Hill Inc.、Chapter 10、1970
- 5) 問山清和、林高弘、神谷庄司:改良型パルス圧縮方法によるガイド信号の高分解能化、超音波テクノ、No. 9-10、pp. 12-16、2006
- 6) Cunningham, A.B. : Some alternate vibrator signals、Geophysics、Vol. 44、pp. 1901-1921、1979
- 7) P. M. Duncan、 A.、 Hwang、 R. N.、 Edwards、 R. C.、 Bailey and G. D.、 Garland : The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using a pseudo-noise source、Geophysics、vol. 45、No. 8、 pp. 1276-pp. 1296、1980
- 8) 榊原淳一、山本督夫:高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発、土木学会論文集C、Vol. 65、No. 1、pp. 97-106、2009
- 9) 吉川茂、藤田肇:基礎音響学、講談社、pp. 169-170、2002
- 10) 中村顕一、吉久信幸、深井昌:わかる音響学、pp. 75-77、日新出版、1994
- 11) Johnston, D. H. and Toksoz, M. N. : Definition and Terminology、Seismic Wave Attenuation Geophysics Reprint Series、No. 2、 pp. 1-5、1981
- 12) 佐々宏一、芦田讓、菅野強:建設防災技術者のための物理探査、pp. 12-15、森北出版、1993

- 13) Yamamoto, T. and Turgut, A. : Measurements of acoustic wave velocities and attenuation in marine sediments, J. Acoust. Soc. Am. , Vol. 87, No. 6, pp. 2376-2383, 1990
- 14) 榑原淳一、毛利栄征、山本督夫：高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた模型土槽内部の可視化手法の開発、土木学会論文集C Vol. 67 (2011) 、No. 3、 pp. 310-318
- 15) 渡辺俊樹、佐々宏一：弾性波の初動振幅を利用した減衰トモグラフィ、物理探査、Vol. 45、No. 1、 pp. 10-21、 1992
- 16) Bergman, N. D., Bailey, R. C. and Chapman, C. H. : Travel time and amplitude analysis in seismic tomography, J. Geophysical Research, Vol. 94, No. B6, pp. 7577-7587, 1989.
- 17) Bergman, N. D., Bailey, R. C. and Chapman, C. H. : Crosshole seismic tomography, Geophysics, Vol. 54, No. 2, pp. 200-215, 1989.

## 第3章 支持層調査への適用とその検証

### 3.1. 概要

本章では、全焼で開発した手法を用いて行った現場調査の結果と効果の検証について述べる。まず、フィリピン共和国マニラ港で行った栈橋建設工事における杭基礎構造物の支持層調査について、調査結果と基礎杭の施工記録との比較による支持層の正確な把握に関する検証結果を示す。次いで愛知県中部国際空港で行った杭基礎構造物の支持層調査について、3次元的に得られた調査結果と基礎杭の施工記録との比較による3次元的支持層の正確な把握に関する検証結果を示す。さらにボーリング調査のみによる設計を行い基礎工事に関わる施工数量を計算し、本調査の結果に基づいて実際に行われた基礎工事の施工数量と比較する。検討の流れを図 3.1.1 に示す。

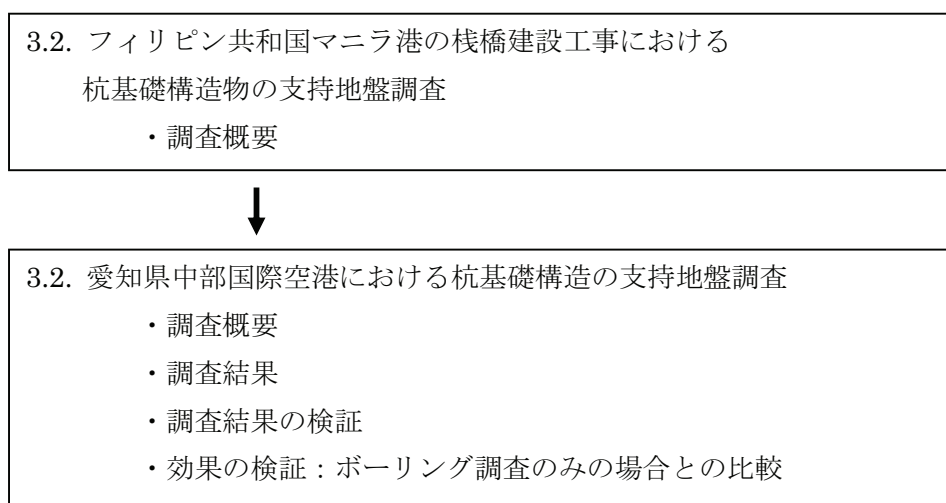


図 3.1.1 検討の流れ

### 3.2. フィリピン共和国マニラ港栈橋建設工事における杭基礎構造物の支持地盤調査

#### 3.2.1. 調査概要

フィリピン共和国マニラ港の南港で実施された栈橋新設工事<sup>1)</sup>において本手法の検証を兼ね、基礎構造物の設計を目的とした地盤調査を実施した<sup>2)</sup>。工事は既設の栈橋を沖合に延長するための杭基礎構造物を建設するものであった。現場は大きな河川の河口に位置し

ており地層が不陸していることが予想されていた。事前に実施したボーリング調査の結果から厚い粘土層の下部に杭基礎の支持地盤である砂礫層が堆積していること、50m 離れた場所における砂礫層の出現深度が 8m ずれていることが分っていた。図 3.2.1 に計測レイアウトを示す。基礎杭の杭長は 50m、地盤への根入長は 35m、平均的な杭間隔は 6m~8m であった。計測距離と計測深度は共に 50m であった。発振周波数は 2kHz、発振点と受信点は深度方向に共に 1m 間隔であり、これから予想される計測精度は 1m 以下であった。

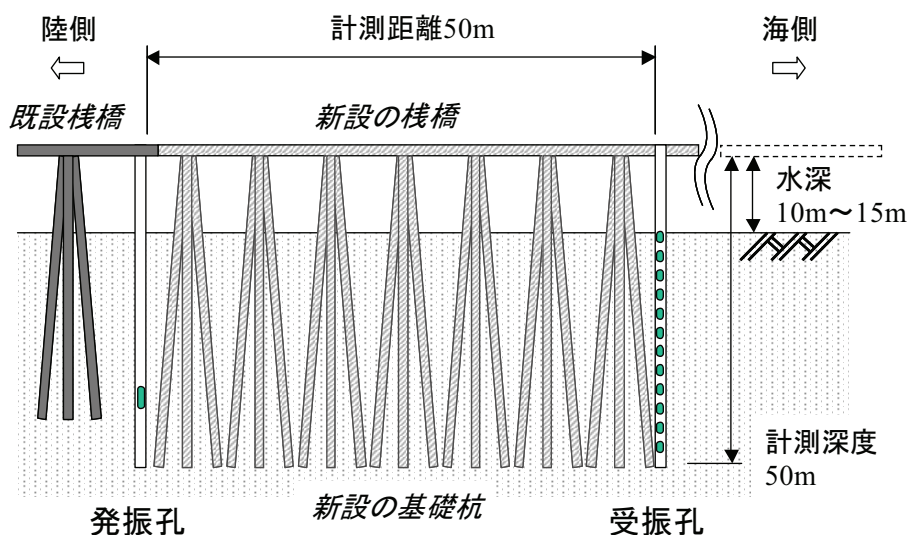


図 3.2.1 フィリピン共和国マニラ港における杭基礎の支持地盤調査、計測レイアウト<sup>2)</sup>

### 3.2.2. 調査結果と考察

調査結果として図 3.2.2 に速度分布図を示す。図中には 3 本の土質柱状図と N 値を併せて示してある。同図によると G.L. -30m から G.L. -40m に速度境界があり、上側の速度は 1,700m/s~1,740m/s、下側は 1,760m/s ~1,800m/s となっている。ボーリング柱状図と比較すると“速度 1,770m/s の部分”と“N 値が増加する粘土層と砂礫層の境界”が一致しており、この速度 1,770m/s の部分が支持地盤の境界面であることがわかる。この支持地盤の境界面は発振孔付近では砂礫層は GL. -40m 程度にあるが、受信孔側に向かうに従って砂礫層の上面の深度が浅くなっていき受信孔付近では GL. -30m の深度にあることがわかった。

調査結果の検証として、調査後に施工した基礎杭の打設記録と比較を行った。図 3.2.2 に基礎杭の単位長さ当たりの打撃回数を縦向きの実線で示した。白丸で囲んだ打撃回数の増加が始まる深度と調査結果から得られる支持地盤の境界が良く一致しており、本手法によって得られた支持地盤の境界面の位置が正しいことがわかる。

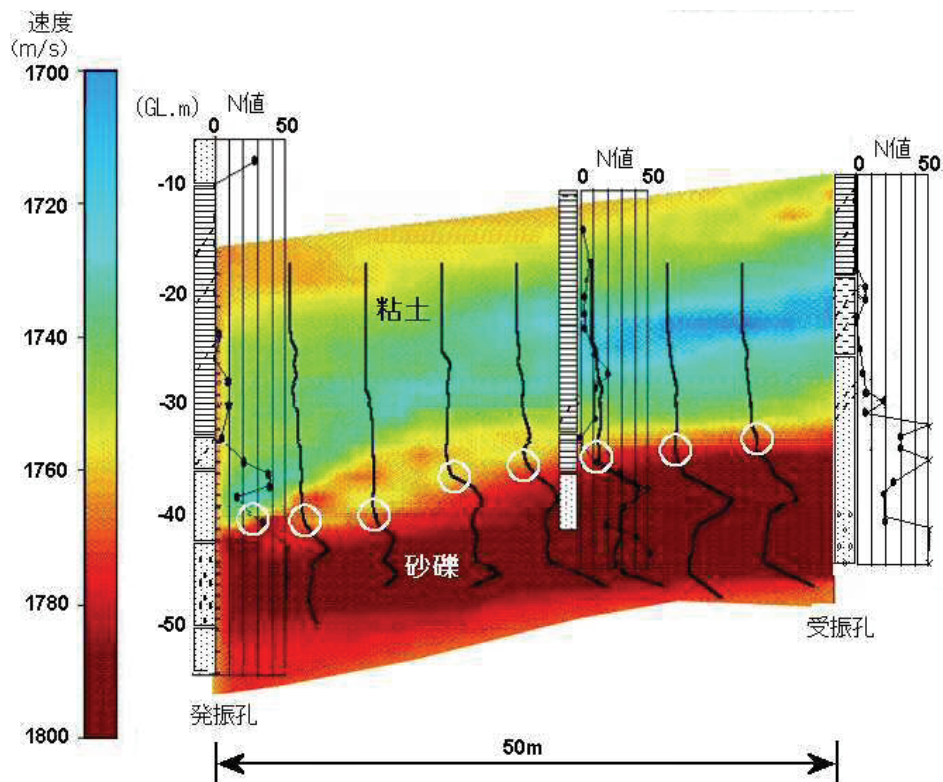


図 3.2.2 比国マニラ港における杭基礎支持地盤調査結果(速度分布図)<sup>2)</sup>  
 実線は単位長さ当たりの杭の打撃回数を示す. 白線で囲った部分は単位長さ当たりの杭の  
 打撃回数が増加している深度

### 3.3. 愛知県中部国際空港における杭基礎構造の支持地盤調査

#### 3.3.1. 調査概要

中部国際空港(愛知県常滑市沖)のある伊勢湾北部は木曾川や揖斐川などの大河川流域にあり、さらに氷河期の海進海退の影響を受け複雑な地層構造をしている<sup>3)</sup>。同空港内に建設された立体駐車場(高さ 12.4 m、4 層 5 段×2 棟、駐車台数 1,280 台)の基礎構造物建設工事(杭本数 220 本)においては、この複雑な地層構造による杭の高止まり、杭長不足などの施工リスクが懸念されていた。さらに、空港操業中の施工であることから騒音・振動の少ない施工方法(既成杭の埋込工法)が要求されており、杭長変更が基本的に不可能な状況にあった。このため、ボーリング調査だけでは杭長設計・施工リスクの低減には不十分であると判断し本手法を実施した。現場は軟らかいシルト層の下部に N 値 50 を越える固結シルトが存在しこれを支持地盤とした。図 3.3.1 に計測測線レイアウトを示す。図中、No. は計測孔の番号、Sec. は計測断面の番号、丸括弧で囲んだ数字は固結シルト層の出現深度、



角括弧で囲んだ数字は計測距離を示す。断面数は10断面、計測距離は48m～98mであった。発振点と受信点は共に深度方向に1m間隔、計測周波数は2kHzであり、式(2-3)から予想される計測精度は1m以下であった。

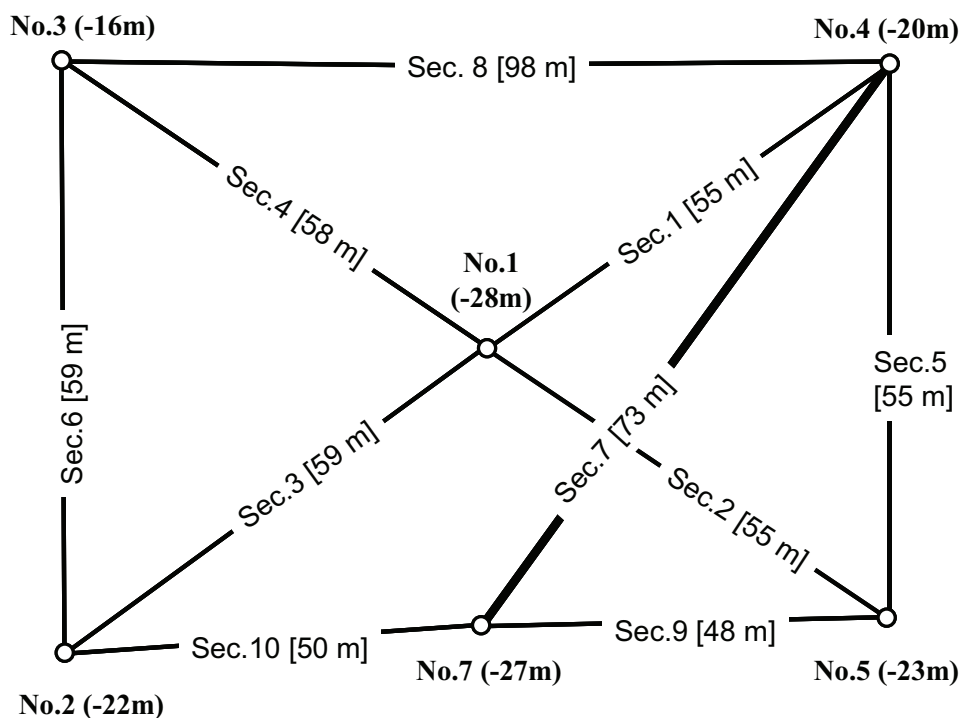


図 3.3.1 中部国際空港立体駐車場建設における杭基礎支持地盤<sup>2)</sup>  
調査(計測測線レイアウト)

No. (m) はボーリング孔と支持地盤の出現深度を、Sec.、[m] は断面番号と計測距離を示す。

### 3.3.2. 調査結果

代表的な調査結果として Sec. 7 (図 3.3.1 中の太線の測線) の速度分布図をボーリング調査結果と併せて図 3.3.2 に示す。同図から速度 1,700m/s 程度のシルト層・細砂層の下部に速度 1,850m/s を越える固結シルト層があること、シルト・細砂と固結シルトの境界面が右上がりに複雑に変化していることがわかる。図中の黒波線はボーリング調査結果の対比から得られたシルト・細砂と固結シルトの地層境界を示しており、これは速度 1,850m/s に相当している。同図からは支持地盤の境界面は深度方向に2段に変化していることがわかるが、このような複雑な変化はボーリング調査の結果だけでは把握が難しい。

基礎杭の杭長設計を行うためには3次元的な情報を得る必要があったため、調査した10断面の調査結果を基にして支持地盤の深度、すなわち固結シルトとシルト・細砂の地層境界のカウンター図を作成した。図 3.3.3 にこれを示す。図中、括弧囲いの数字はボーリング結果からわかる支持地盤深度、イタリックゴシックの数字は本手法による調査結果から推

定した支持地盤面の高さを示す。同図から支持地盤面は窪地(図中右下)や急傾斜(図中左上、右上)、平坦な部分(図中中央上、左下)などが存在する複雑な地形をしていることがわかる。基礎杭の杭長設計は同図を基にして行ったが、杭の高止まりや杭長不足などを全く発生させることなく予定通りに施工を終えることができた。

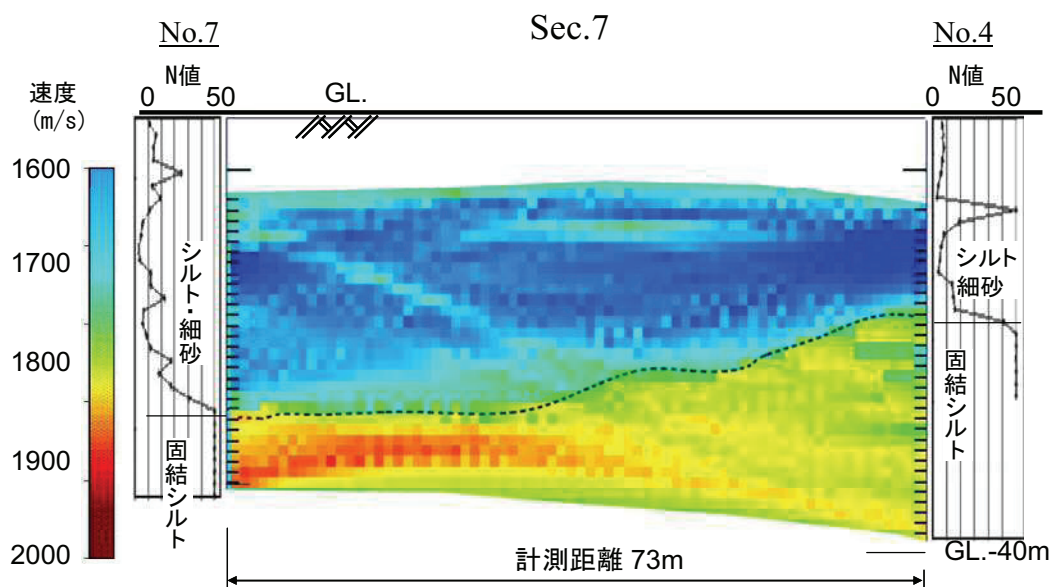


図 3.3.2 Sec. 7 の計測結果(速度分布図)と土質柱状図<sup>2)</sup>  
 黒破線はシルト・細砂と固結シルトの推定境界を示す。

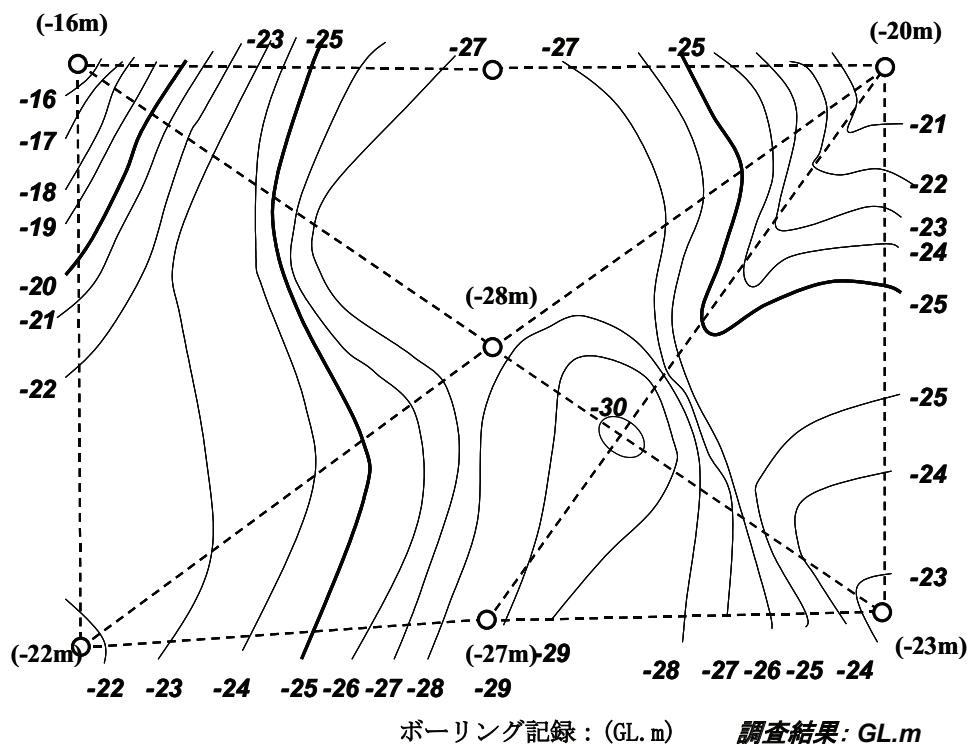


図 3.3.3 調査結果から推定する支持地盤深度のコンター図<sup>2)</sup>  
括弧内の数字はボーリング記録からわかる支持地盤の出現深度。

### 3.3.3. 調査結果の検証

本手法の調査結果を検証するために基礎杭の施工記録との比較を行った。基礎杭の施工記録とは杭の埋込貫入抵抗(オーガーの駆動電流値)と埋込深度の関係を記録したものである。施工記録の例を図 3.3.4 に示す。この例では深度 GL. -11m から記録を開始し GL. -19.5m から貫入抵抗が徐々に大きくなったことを示しており、支持地盤深度は GL. -20m であったと考えられる。全ての基礎杭の施工記録を基にして得られた支持地盤深度のコンター図を本手法の調査結果と比較して図 3.3.5 に示す。同図からは図 3.3.3 で認められた窪地や急傾斜、平坦な部分と実際の支持地盤深度がよく一致しており、実際の地盤構造を反映した結果を得られていることがわかる。

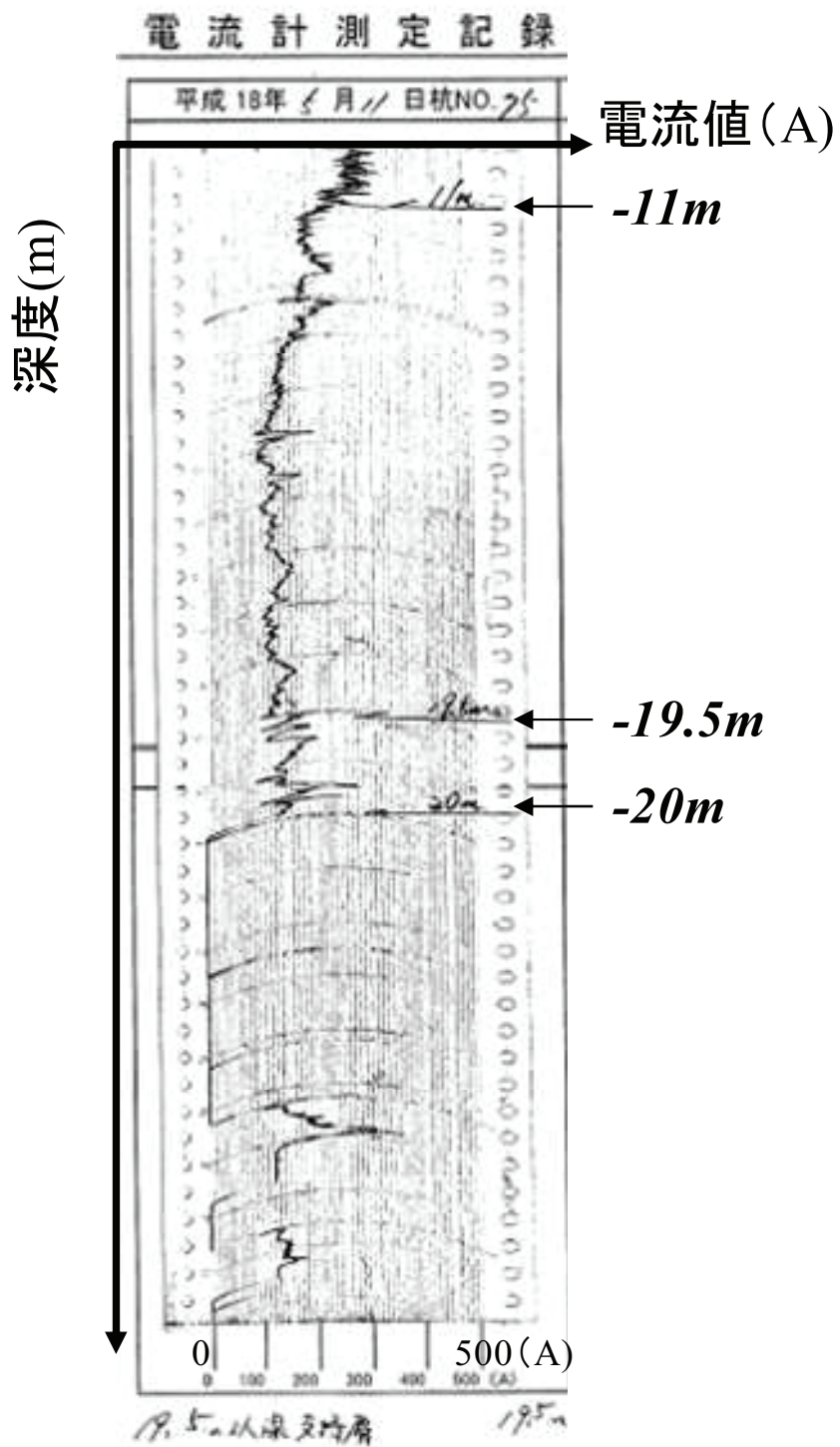


図 3.3.4 埋込工法のオーガー駆動電流の記録(例)

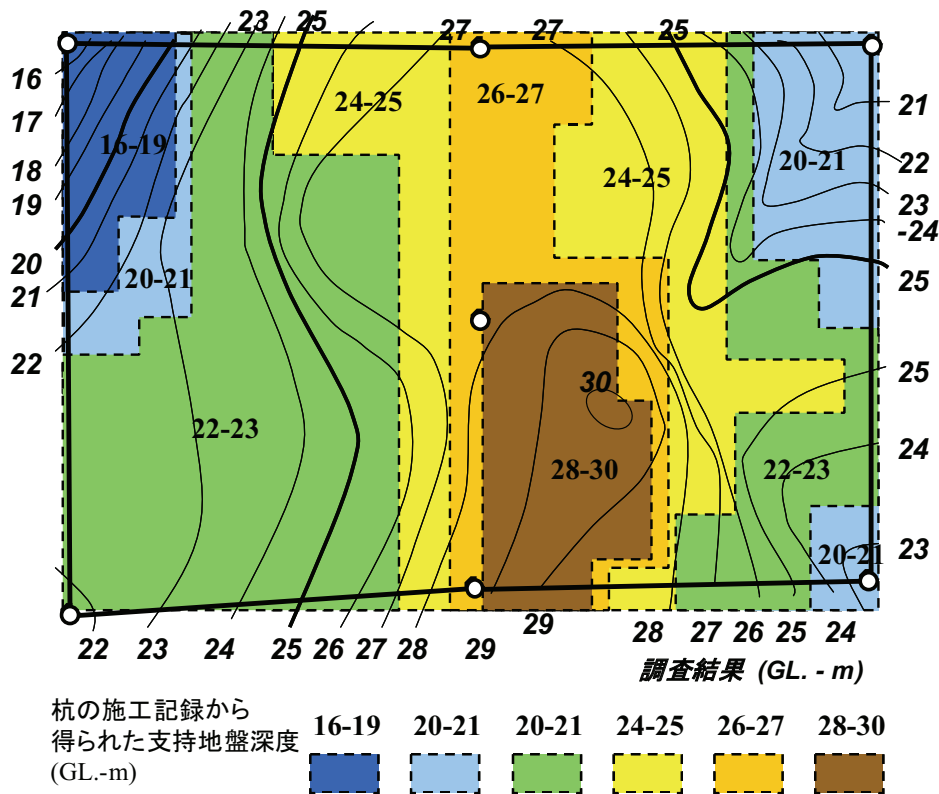


図 3.3.5 杭の施工記録から得られた支持地盤深度のコンター図と  
本手法から得られた支持地盤深度の比較<sup>2)</sup>

### 3.3.4. 効果の検証：ボーリング調査のみの場合との比較

本手法の効果を検証するため、代表的な従来方法である「ボーリング調査」だけから推定した基礎支持地盤のコンター図を作成した。これを図 3.3.6 に示す。ボーリング調査だけでは孔間の地層変化を把握する事ができない為、中央部を谷とする単純なコンター図となった。基礎杭の施工記録と比較して図 3.3.7 に示すが、図の左右方向の大まかな傾向は一致するが、複雑な地盤構造は反映できていないことがわかる。図中の一点鎖線で囲った範囲は 2m 以上の杭の高止まりや杭長不足の発生が予想される部分である。特に中央部の窪地では最大で 4m もの杭長不足が予想され、継杭のできない埋込杭工法では大きな問題になっていたと考えられる。

本手法の効果を定量的に検証するために図 3.3.6 のコンター図に基づいて杭長設計を行った。図 3.3.8 は Sec.7 に沿って検討した例である。ボーリング結果のみからは図中に 1 点鎖線で示すような直線で支持地盤を想定せざるを得ない。前述したように、現場で採用された埋込工法は継ぎ杭が不可能な工法であり、杭長不足の発生を避けるためにはより安全な設計、すなわち余分な杭長が必要となる。一方、本手法では複雑な地盤を把握できたため、図中の波線で示す支持地盤面に基づいた効率的な杭長設計を行うことができた。

全ての杭について同様の検討を行った結果を表 3.3.1 に示す。この検討結果では余分な杭長が 882m と全体の 14% も発生することになる。杭長の過不足による施工時の手間の増加等も加味すると、ボーリング調査結果だけに基づいて設計した場合と比較して施工費を約 30 百万円も削減できたことがわかった。これは本調査によるコスト、すなわち追加調査コストの 2 倍～3 倍に相当する。実際には材料手配や手間の増加などに伴う待機コスト、工期延長に伴う仮設費の増加を考慮する必要がある、コスト削減効果はさらに増大すると考えられる。

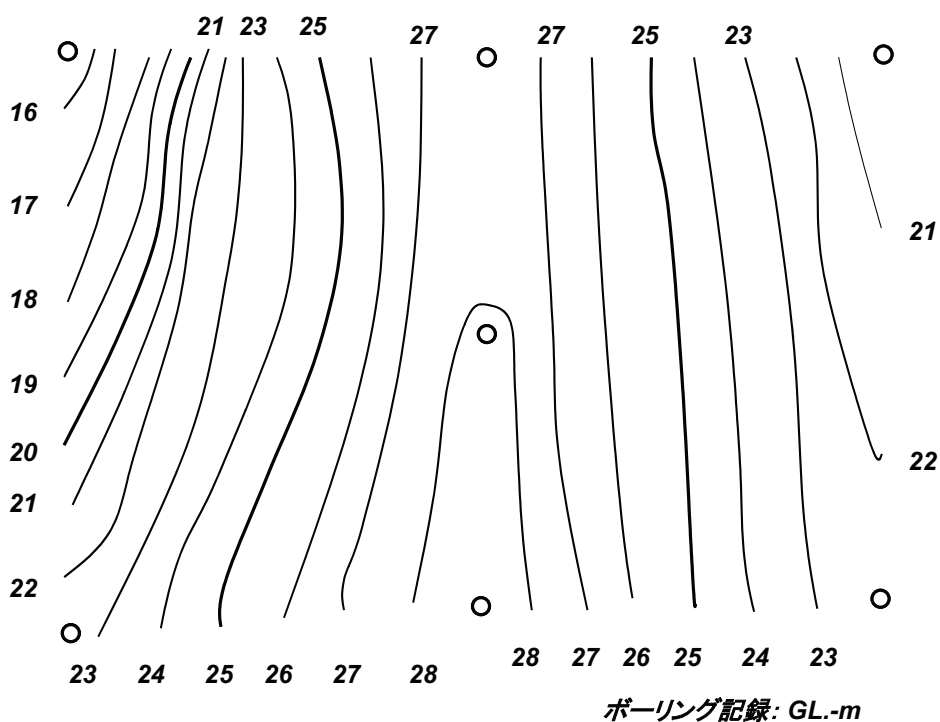


図 3.3.6 ボーリング結果のみから推定する支持地盤深度<sup>2)</sup>

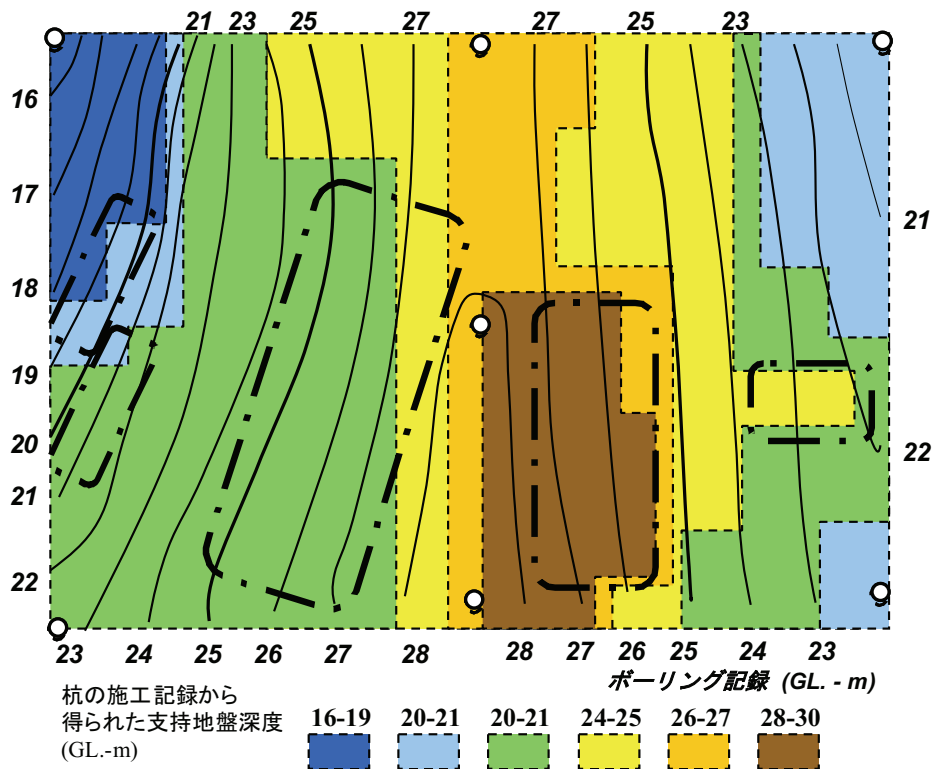


図 3.3.7 杭の施工記録から得られた支持地盤深度のコンター図とボーリング結果のみから推定する支持地盤深度の比較<sup>2)</sup>

(1 点鎖線で囲んだ部分は基礎杭の高止まりや杭長不足が予想される部分)

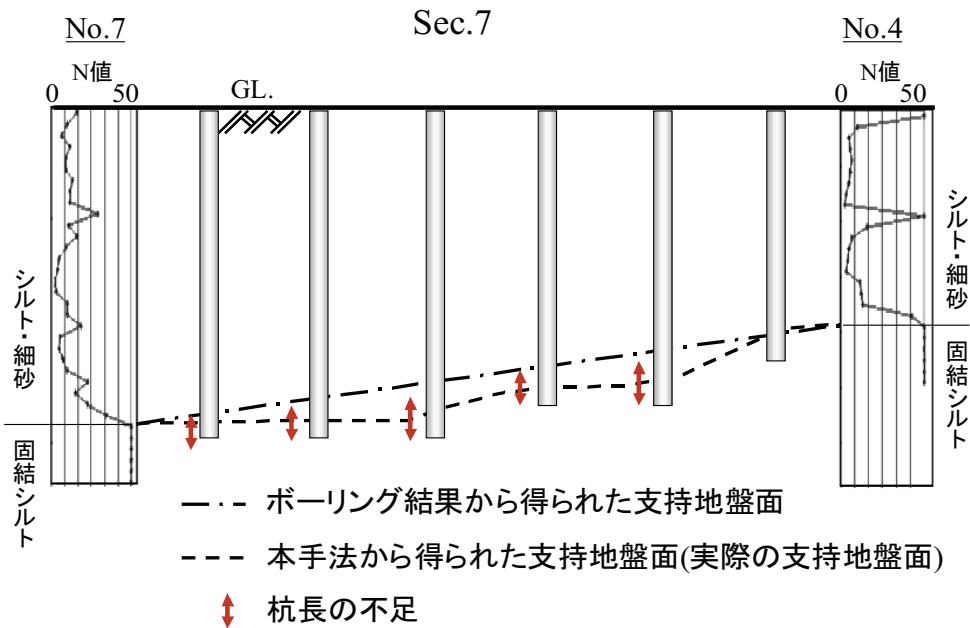


図 3.3.8 ボーリング結果のみによる杭長設計例と本手法による結果との比較<sup>2)</sup>

表 3.3.1 杭長設計方法の違いによる数量と金額の比較(試算)

(数量の比較)

杭長設計の方法	杭長(m)	杭重量(t)
ボーリング調査のみによる杭長設計	6,177	918
本手法の結果を反映した杭長設計	5,295	791
差	882	127

(金額の比較、杭長の差 882m を基にして計算)

項目	単価(千円)	数量	削減金額(千円)	備考
材料	12/m	882m	10,584	
施工	9/m	882m	7,938	
手間	57/20分	211本	12,027	1本当り20分と仮定
削減金額合計			30,549	

注) 杭打ち機などの建設機械の待機コストは含まれない。

### 3.4. まとめ

3.2. フィリピン共和国マニラ港の棧橋建設工事における杭基礎構造物の支持地盤調査において、調査結果と基礎杭の施工記録との比較により、支持層の正確な把握が行えたことを示した。

3.3. 愛知県中部国際空港で行った杭基礎構造物の支持層調査について、3次元的に得られた調査結果と基礎杭の施工記録との比較により、3次元的な支持層の正確な把握が行えたことを示した。さらにボーリング調査のみによる設計を行い基礎工事に関わる施工数量を計算し、本調査の結果に基づいて実際に行われた基礎工事の施工数量と比較し、施工費の削減と工期短縮を実現できたことを示した。

擬似ランダム波を発振波として用いることで高精度かつ実用的な計測距離を持つ計測が可能となることがわかった。従来の弾性波探査では発振周波数が低いため十分な計測精度を得ることが出来なかったが、本手法では高周波数の弾性波を用いることで基礎杭の杭長設計などに適用可能な精度による探査を行うことができた。図 3.4.1 は計測範囲と計測精度という観点から他の地盤探査手法との比較を行ったものであるが、本手法はボーリング調査に匹敵する精度で、かつ、通常の探査手法と同程度の計測範囲で調査を行えることを示している。また、図 3.4.2 は従来のボーリング調査だけを実施する場合には必要となる「過剰に安全を見込んだ設計」や「追加工事費」が、本手法のような正確な調査を行うこ



とで不要となり、結果として工費全体を削減できることを示している。さらに、効率的な設計の基となる地盤情報を可視化して示すことは、顧客に対して施工に関する安心感を与える効果もあると考えられる。以上のことから、本手法を用いることで精度の高い調査が可能であり、調査結果に基づいた設計と施工を行うことでコストや工期の短縮につながることを結論として得た。

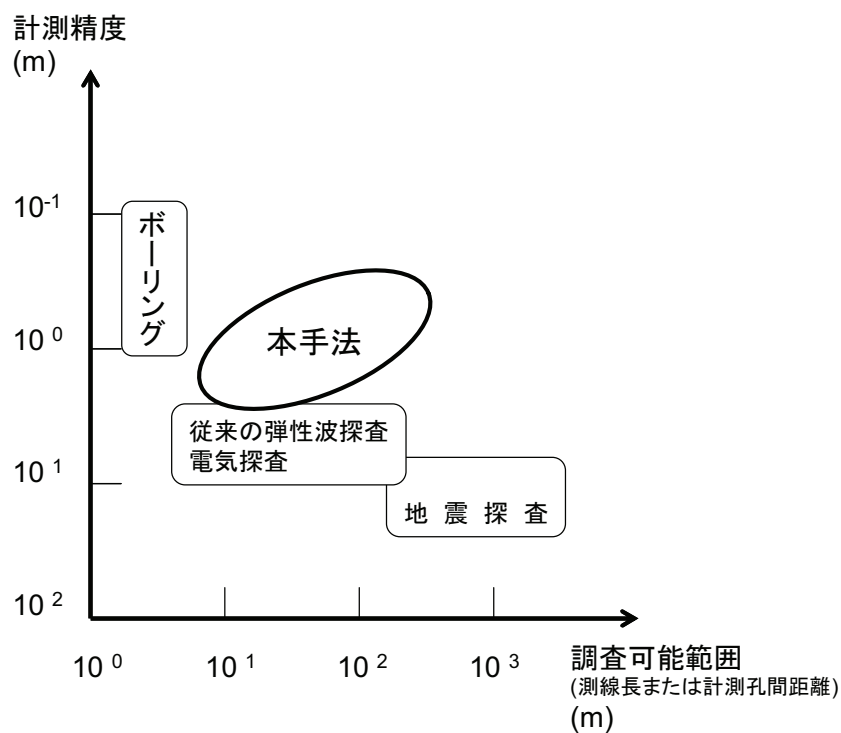


図 3.4.1 従来手法との比較<sup>2)</sup>を修正

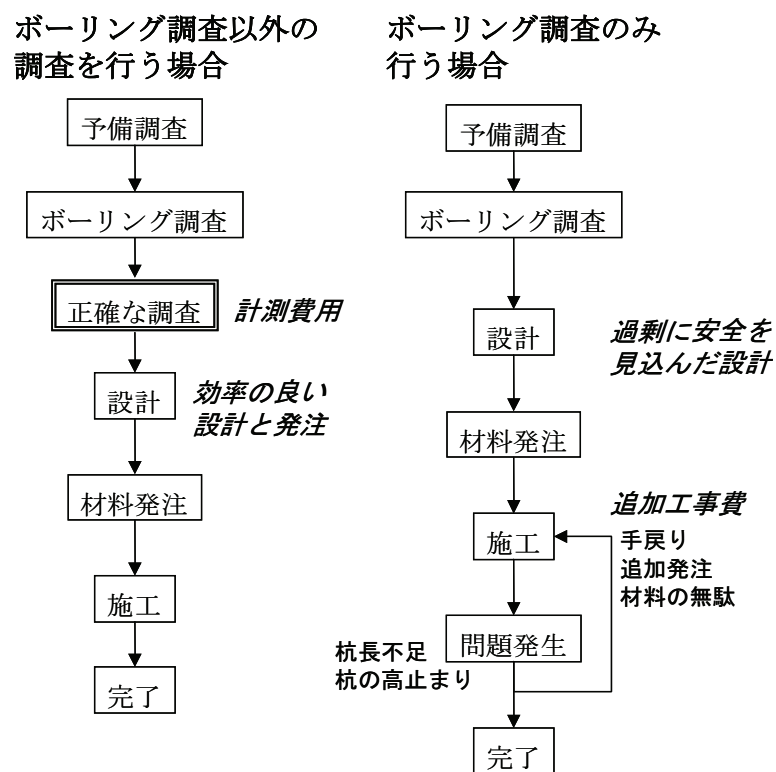


図 3.4.2 ボーリング調査以外の調査を行う場合と  
ボーリング調査のみを行う場合の比較<sup>2)</sup>

【参考文献】

- 1) 土肥 宏一郎、平川 雅人、山本 武志：マニラ南港における港湾構造物の機能診断技術と改修技術、川崎製鉄技報、Vol. 28、No. 3、pp. 165-169、1996
- 2) 榎原淳一、山本督夫：高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発、土木学会論文集 C、Vol. 65、No. 1、pp. 97-106、2009
- 3) 豊蔵 勇、岡田 篤正、牧野内 猛：「中部国際空港」海域(知多半島常滑市沖)の海底地形・地質、地学雑誌、108、No. 5、pp. 589-615、1999

## 第4章 減衰率を用いたトモグラフィ手法の開発

### 4.1. 概要

本章では、②工学的に必要な物性値との関連性に関して行った、異なる2つの指標を用いた地盤性状の正確な把握について述べる。まず、弾性波速度だけを用いた調査の課題について、結果の解釈の難しさと埋設物や岩盤中の亀裂などの異質物の探知が難しいことを示す。そして、小型模型土槽、岩石ブロック実験による減衰率トモグラフィ手法の検証として、まず、減衰率に関する逆計算手法の妥当性をシミュレーション計算により示す。次に小型模型土槽と岩石ブロック実験による手法の検証を行うために必要な計測装置の小型化や波線計算における計算精度の検証について示す。最後に、小型模型土槽を用いた砂層中の埋設物探知実験と岩石ブロックを用いた岩盤中の亀裂探知実験により減衰率トモグラフィの有効性を示す。検討の流れを図4.1.1に示す。

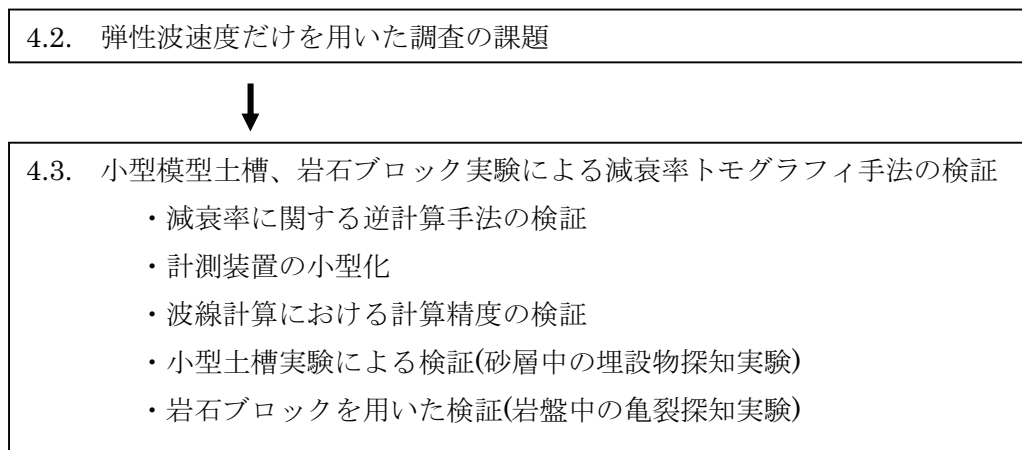


図 4.1.1 検討の流れ

### 4.2. 弾性波速度だけを用いた調査の課題

第2章で述べたように物理探査で得られる調査結果は必ずしも地盤の物性を表していない。例えば弾性波を用いた探査の場合、結果として得られる弾性波速度  $V$  は体積弾性係数  $K$ 、密度  $\rho$  を用いて式(5-1)のように表され<sup>1)、2)</sup>、地盤の固さの指標として用いられている。

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (5-1)$$

しかし、地盤の密度  $\rho$  も速度に影響を与えるため複雑な地盤である場合には結果の解釈が困難になる場合がある<sup>3)</sup>。図 4.2.1 は弾性波速度と地盤の性状の関係についてまとめたものである<sup>4)</sup>。一般的には速度の速い順に砂礫層、砂層、粘性土層と並ぶが、圧密された粘土が緩い砂よりも速度が速くなる場合や飽和度が下がった砂礫層の速度が砂よりも遅くなる場合がある。このように1つだけの指標で判断を行う場合には正確な地盤性状の把握ができず判断を誤る場合が出てくる。

弾性波速度のみを用いる探査には別の課題がある。それは弾性波速度では地中の構造物や空洞を把握できないことである。図 4.2.2 は 30m 離れた発振点・受信点の間にある埋設された水道管を調査した場合の弾性波速度の差について検討したものである。屈折した弾性波の伝播距離は水道管がなく直進した場合の距離と 0.02%しか差がなく、この僅かな差を弾性波速度の違いから判別することは困難であることがわかる。この問題は都市部の水道管整備に大きな影響を与えている。深さ 3m より深い位置に埋設されている水道管を調査する場合には、地表構造物の存在によりボーリングによる試掘、高圧線・鋼構造物の存在により電気探査を適用できない場合が多く、現状では既設の水道管を調査することが難しい。東京都では埋設水道管の老朽化による地表陥没が毎年 1000 件以上起こっているが<sup>5)</sup>、既設水道管の調査が困難であることは整備がなかなか進まない理由の1つとなっている。

この問題を解決するために弾性波の持つ速度以外の情報の一つに振幅がある。振幅は媒質内部の減衰特性によって変化し、岩石強度や亀裂の存在に関する情報を提供すると考えられる。振幅は伝播速度に比べて媒質の性質の変化に敏感であること<sup>6)</sup>が明らかになっており、速度情報だけでは把握できない媒質の性質の詳細な変化を検知することが期待されていた。地盤中の減衰には、発振点と受信点の距離に反比例して減衰する幾何減衰、密度の異なる物質に波が入射する際に生ずる透過減衰、またその境界面で散乱することで生ずる散乱減衰、間隙流体と間隙間の粘性抵抗により生ずる粘性減衰がある<sup>7)</sup>。例えば図 4.2.3 は弾性波が地盤中を伝播する際に減衰する原因の例を示しているが、減衰量の変化を把握することで、地層の分類、礫や転石、空洞の有無、地盤改良の範囲、岩盤中の亀裂の有無を把握できると考えられる。しかし、発振点と受信点間の減衰量を正確に把握するためには発振音圧を正確に制御しなければならないこと<sup>6)</sup>、減衰率の計算には伝播した波の周波数を考慮しなければならないこと<sup>8)</sup>から実験的な報告<sup>6)</sup>、<sup>8)</sup>はいくつかあるものの、実際に用いられることはあまりなかった。

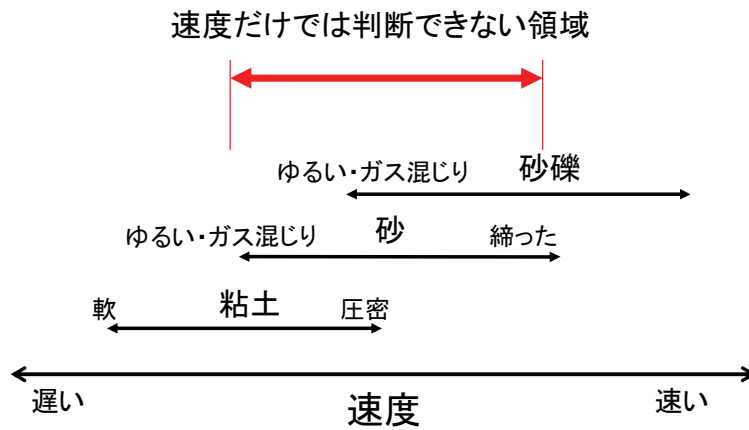


図 4.2.1 弾性波速度だけでは判断に困る例

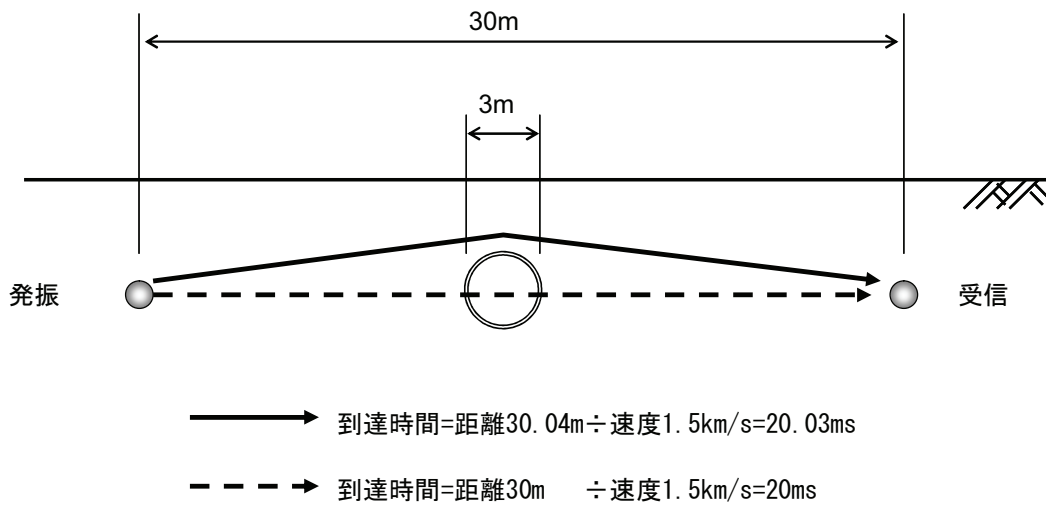


図 4.2.2 30m 離れた発振点・受信点の間にある直径 3m の水道管を探索する例

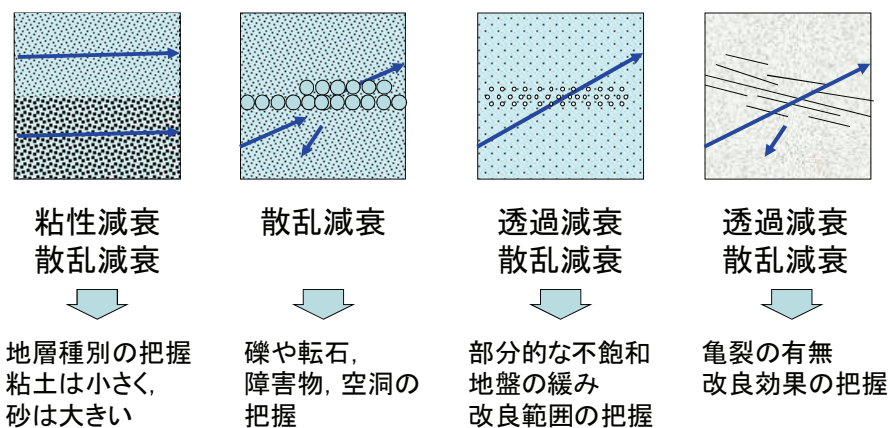


図 4.2.3 振幅減衰が起きる原因の例

### 4.3. 小型模型土槽、岩石ブロック実験による減衰率トモグラフィ手法の検証

本研究で開発した手法は正確に出力と周波数を制御できるため減衰率を用いた計測・解析に適していると考えられる。“第3章 支持層調査への適用とその検証”では実地盤を用いた検証を行ったが、減衰率を用いた計測・解析に関しては実地盤による検証は難しいと考えられた。これは2つの理由による。1つは実地盤における振幅減衰の影響に関する報告はほとんどないこと、2つめは検証を行うために実地盤に水道管などの埋設物を設置することや岩盤中に適切な亀裂を作成することは困難であるからである。そこでシミュレーション計算による減衰率トモグラフィの検証および小型土槽実験と岩石ブロック実験による検証を行うこととした。また、小型土槽や岩石ブロックなど実地盤に比べて小さいスケールの計測を行うにあたり発振器と受信器の小型化および解析プログラムの精度の検証が必要となったため併せて実施した。図 4.3.1 に検証手順を示す。

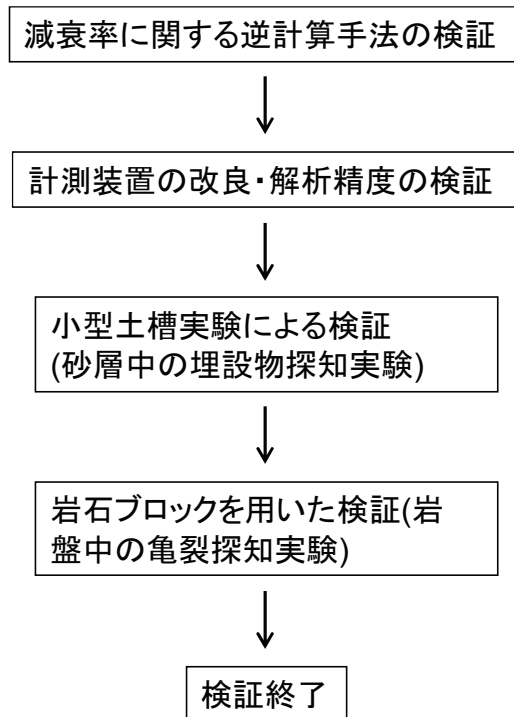


図 4.3.1 減衰率トモグラフィの手法の検証手順

#### 4.3.1. 減衰率に関する逆計算手法の検証

減衰率に関する逆計算手法の検証としてシミュレーション計算による検証を行った。地盤モデルを作成して初動波の到達時間と振幅を求める順計算を行い、この計算結果を入力値として逆計算により減衰率分布を求め、作成した地盤モデルが正しく再現できたかを確認した。なお、減衰率の計算方法および逆計算については“2.3 開発した手法の概要(解析方法)”を参照されたい。

図 4.3.2 はシミュレーション計算に用いた地盤モデルを示す。モデルは速度と減衰率の異なる 2 つの地層と下側の地層に埋設された水道管から構成されている。地層の速度と減衰率は一般的な沖積砂層(上側)と粘性土(下側)の値<sup>9)</sup>を用いた。また、音波は水道管の部分で屈折して回り込み速度が約 0.1%遅くなると仮定した。一方、音波は水道管部分で散乱・反射すると思われるが、解析プログラムはセルごとの粘性減衰しか考慮できないため減衰率を設定することは難しい。今回のモデルでは水道管部分で 2dB 程度減衰すると仮定して減衰率には 1.0dB/m を用いた。発振点と受信点は 0.25m 間隔で 39 点設置されているとし、計算に用いたセルの個数は 39×39 であった。シミュレーション計算結果として初動波の到達時間と振幅を図 4.3.3 に示す。同図から受信器のうち発振器との間に水道管が位置するものの初動波の振幅は水道管の影響を受けて部分的に小さくなっていること、到達時間は地層の影響を受けて変化していることがわかる。

シミュレーション計算の結果を基に行った逆計算の結果として減衰率分布図と速度分布

図を図 4.3.4 および図 4.3.5 に示す。減衰率分布図には水道管に相当する位置に高減衰率部があり、速度分布図には地層の影響は出ているものの水道管の影響は現れていない。以上のことから本研究で開発した解析手法は減衰率を用いたトモグラフィ手法に適用できることが分った。

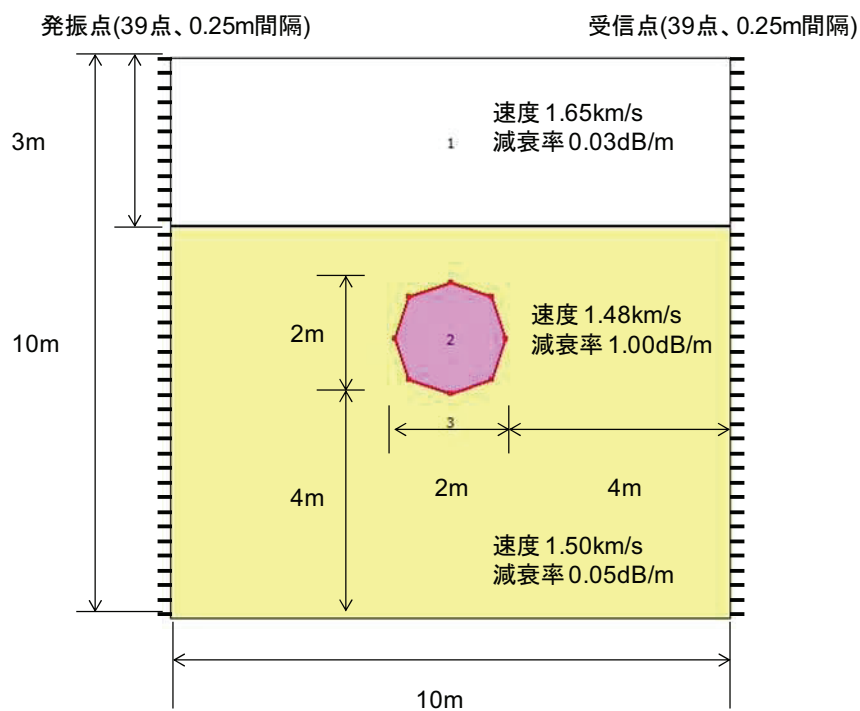


図 4.3.2 計算に用いたモデル



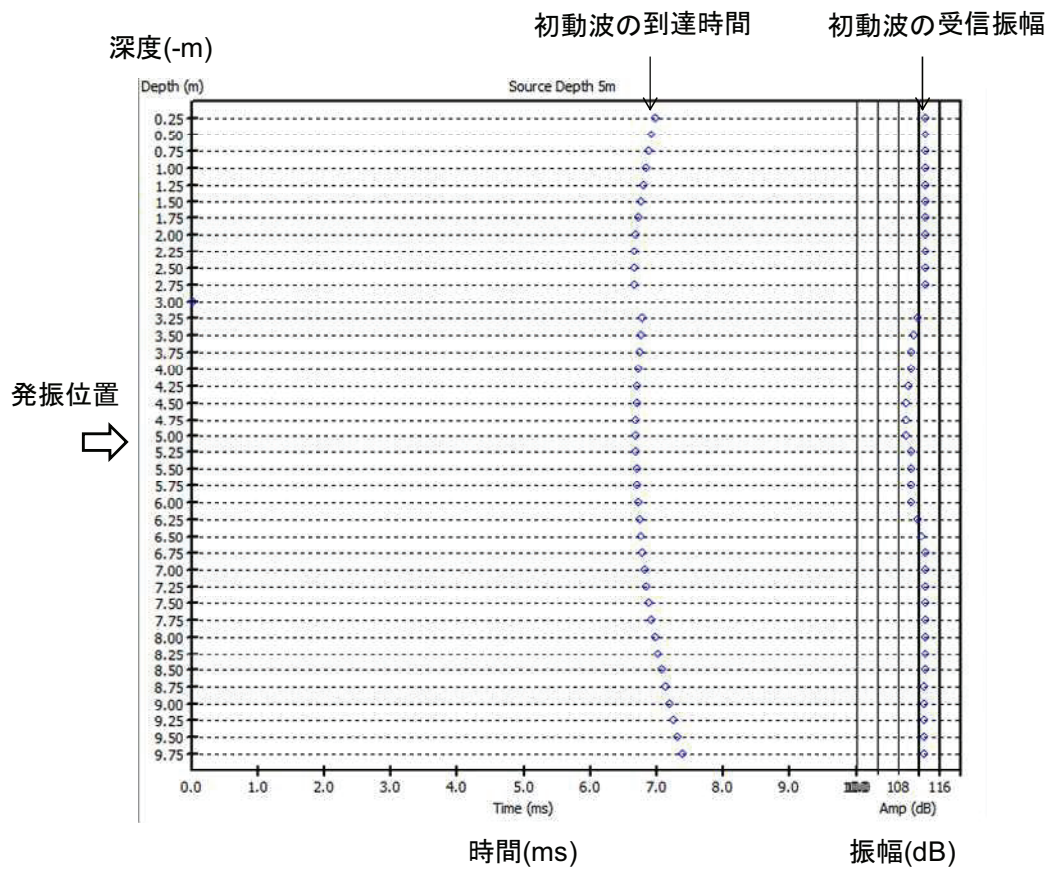


図 4.3.3 シミュレーション計算結果(初動波の到達時間と振幅)

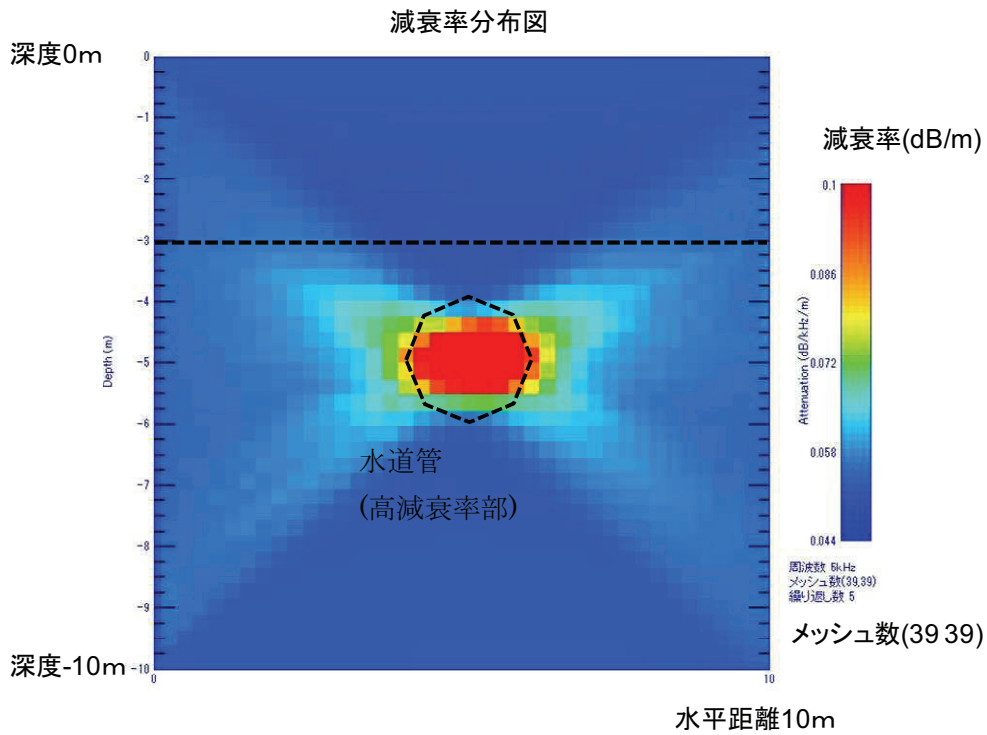


図 4.3.4 シミュレーション計算結果(減衰率分布)

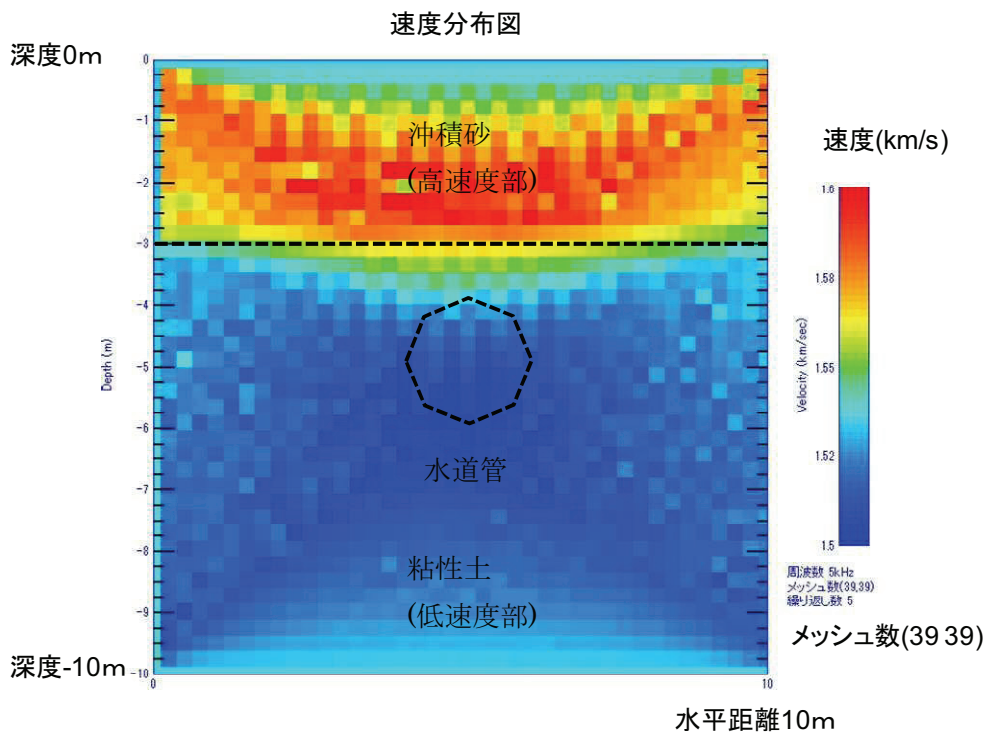


図 4.3.5 シミュレーション計算結果(速度分布)

### 4.3.2. 計測装置の改良

小型土槽や岩石ブロックを用いて行う実験は計測機器のもその寸法に合わせる必要がある。例えば図 4.3.6(a)に示すように深さ 1m の計測孔を用いたトモグラフィ計測を行う場合、発振器の大きさに合わせて発振位置を決めるとトモグラフィ計測を行うために十分な発振点数を確保できなくなる。図 4.3.6(b)に示すように 10 点以上の発振点数を確保するためには外径の小さい発振器を用いる必要がある<sup>10)</sup>。また、より高い精度で計測を行うためには発振周波数を高くする必要があり、計測システムの使用可能周波数帯域をより高くする必要がある。そこで表 4.3.1 に示す小型で高周波数帯域での使用が可能な計測システムを開発した。本システムは増幅器やデータロガーを高周波数対応に変更し、発振器と受信器に用いた圧電素子も高周波数対応かつ小型のものを用いた。これにより周波数 150kHz の発振・受信が可能となり、また発振点と受信点の間隔は 10mm まで短くできるようになった。図 4.3.7 に発振器と受信器に用いた圧電素子の写真を示す。

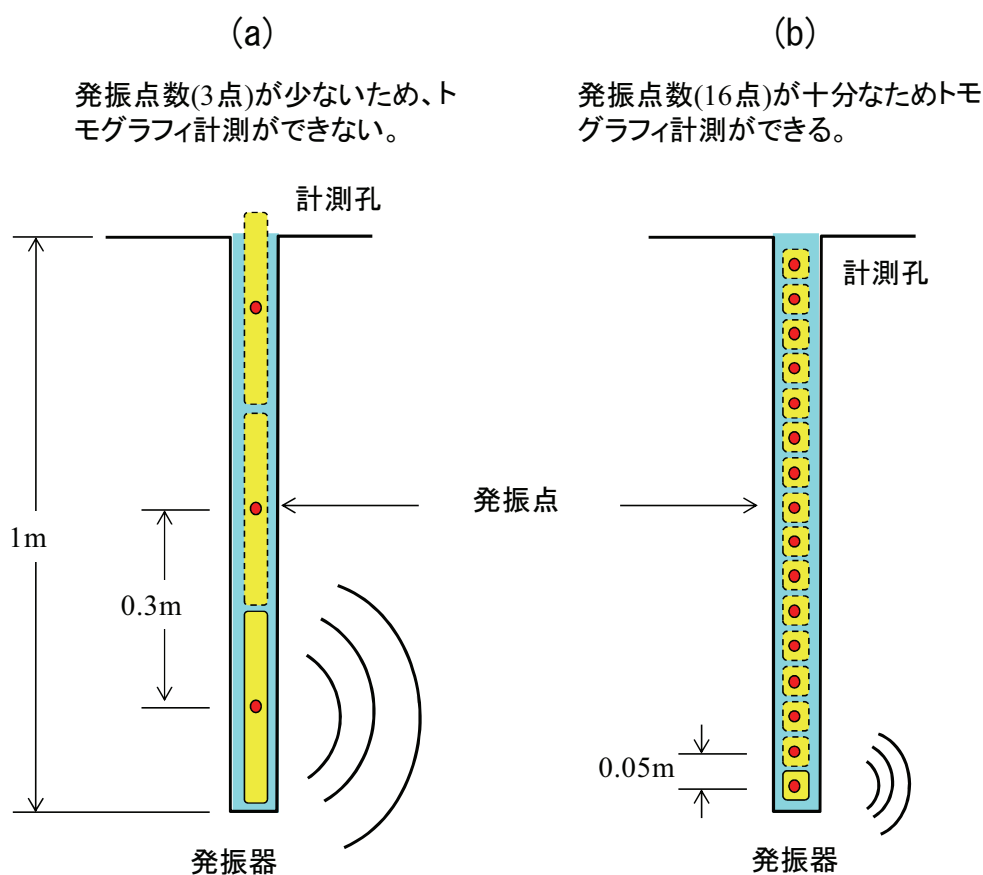


図 4.3.6 発振器の大きさに起因する問題点<sup>10)</sup>

表 4.3.1 計測システムの基本仕様

名称	仕様	改良点
発振器	外径 約 15mm 長さ 約 20mm、重量約 15g	小型素子を用いて寸法を小さくした。
受信器	外径 約 10mm、最小センサー間隔 10mm センサー数 12 個、重量約 10g/センサー 使用可能帯域 10kHz～200kHz(実績)	小型素子を用いて寸法を小さくした。 各センサーを塩ビ棒で剛結
増幅器	出力電圧 100V(50kHz 以下) 使用可能帯域 1kHz～200kHz 電源 AC100V、消費電力 30W、重量 5kg	1MHz でも使用可能な高周波数、高電圧タイプの素子を使用(APEX 社 PA85)
信号フィルター	ゲイン 1 倍～100 倍、入出力 4 チャンネル 使用可能帯域 1kHz～200kHz 電源 DC+12V	使用可能帯域を 200kHz まで高くした。
データロガー	入力 4 チャンネル、出力 1 チャンネル AD 変換速度 1 MHz/チャンネル DA 変換速度 2MHz、入力分解能 14bit	高速の AD/DA 変換ボードを使用。

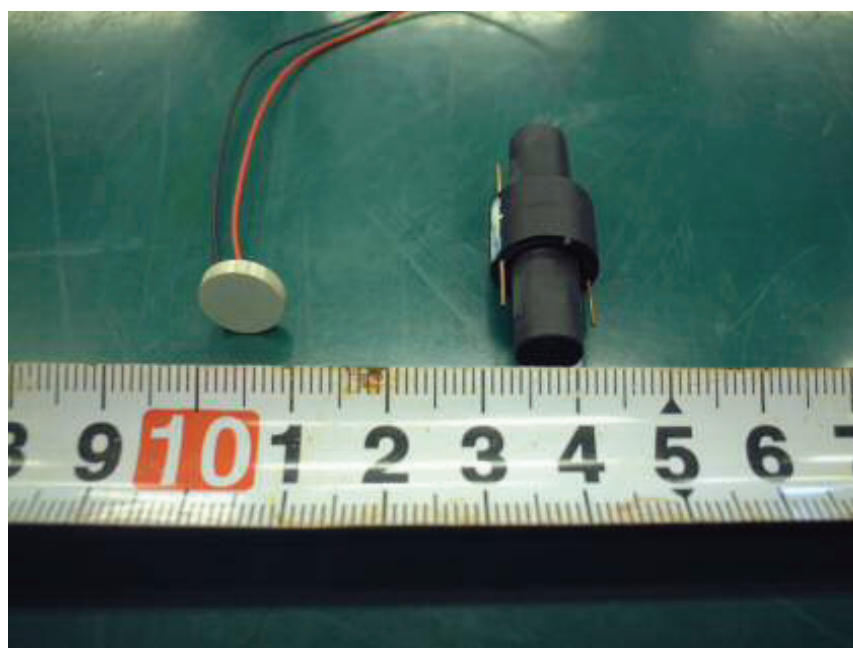


図 4.3.7 実験に用いた piezo 素子  
左 富士セラミックス製、右 Benthos 社製

### 4.3.3. 波線計算における計算精度の検証

本手法で開発した解析手法は波線計算により波線経路の決定を行っている。図 4.3.8 はこの計算フローを示している。まず、初期条件として波線は直進すると仮定して計算を開始し、速度モデルを作成した後、モデルと計測値の誤差  $\Delta t$  の評価を行う。次に隣り合うセル 1 とセル 2 の速度  $V_1$ 、 $V_2$  からスネルの法則を用いて屈折角を求め、新たな波線経路の計算を行う。再び速度モデルを作成しモデルと誤差の評価を行い、誤差が十分に小さくなれば計算を終了し、そうでなければ繰り返し計算を行う<sup>10)</sup>。図 4.3.9 に示す通り、小型土槽や岩石ブロックのように発振器と受信器の距離が短い場合には  $\Delta t'$  も小さくなるため、誤差も小さくなり繰り返し計算を行うことができなくなる恐れがあった。そこで使用する解析手法の計算精度が小型土槽や岩石ブロック実験から得られる時間差の少ない計算に対して十分であるかを検証した<sup>10)</sup>。

この数値計算においては、まず、模型土槽の寸法と土槽内部の速度を変えた地盤モデルを仮定し、次に順計算により各受信点における到達時間を求めた。この到達時間から逆計算により速度分布を求め、仮定したモデルと比較した。表 4.3.2 および図 4.3.2 に地盤モデルの仕様を示す。ケース 1 は実地盤を模しており、孔間距離と地盤の高さはそれぞれ 10m と 11m、地層 1 と地層 2 の速度は 1,600m/s と 1,700m/s とした。ケース 2、ケース 3 は小型土槽を模しており孔間距離と地盤の高さを 1m と 1.1m および 0.5m と 0.55m とした。地層 1 と地層 2 の速度はケース 1 と同じである。ケース 4 は伝播速度の変化量が小さいことを仮定して孔間距離と地盤の高さを 0.5m と 0.55m、地層 1 と地層 2 の速度は 1,600m/s と 1,610m/s とした。

ケース 1 からケース 4 までの逆計算結果を図 4.3.11～図 4.3.14 に示す。ケース 1～ケース 3 を比較すると、いずれも地盤下部の高速度体を精度良く抽出しており模型地盤のスケールに影響されずに解析できていることがわかる。また、模型土槽のスケールを小さくし地盤の伝播速度の変化量を小さくしたケース 4 とケース 3 を比較すると、ケース 3 とほぼ同様にモデルを再現できていることがわかる。これらの結果から本手法の解析精度は小型土槽内の地盤に適用可能であることがわかった。

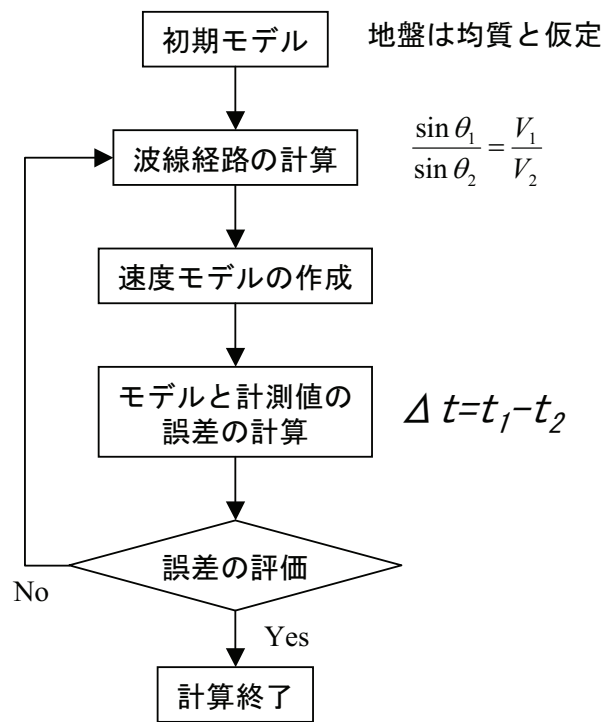


図 4.3.8 伝播速度 1500 (m/s) の時の発振周波数と分解能の関係

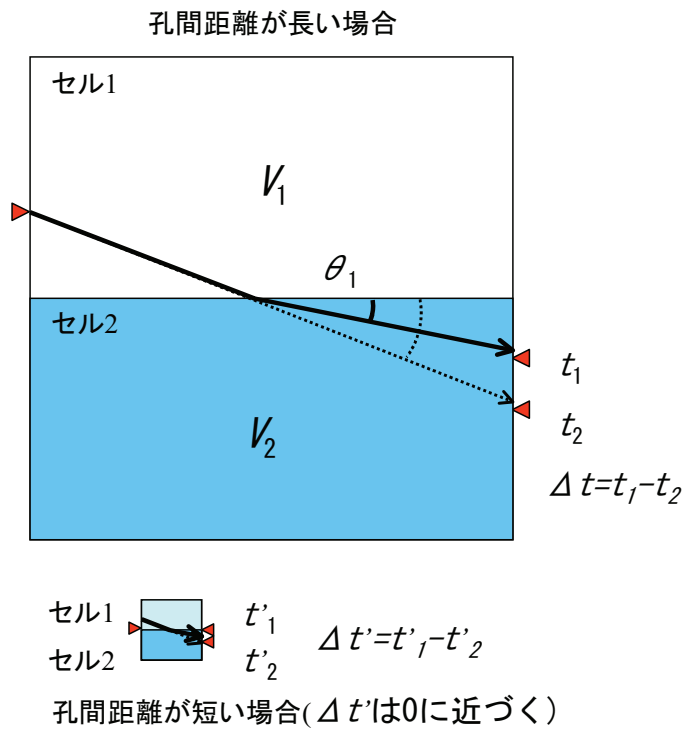


図 4.3.9 伝播速度 1500 (m/s) の時の発振周波数と分解能の関係<sup>10)</sup>

表 4.3.2 解析手法の検証(数値計算の条件)

ケース	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
水平孔間距離	10.0m	1.0m	0.50m	0.50m
地盤の高さ	11.0m	1.1m	0.55m	0.55m
センサー間隔	0.5m	0.05m	0.02m	0.02m
解析セルの個数	31×31	31×31	31×31	31×31
地層 1 の速度	1,600m/s			1,600m/s
地層 2 の速度	1,700m/s			1,610m/s

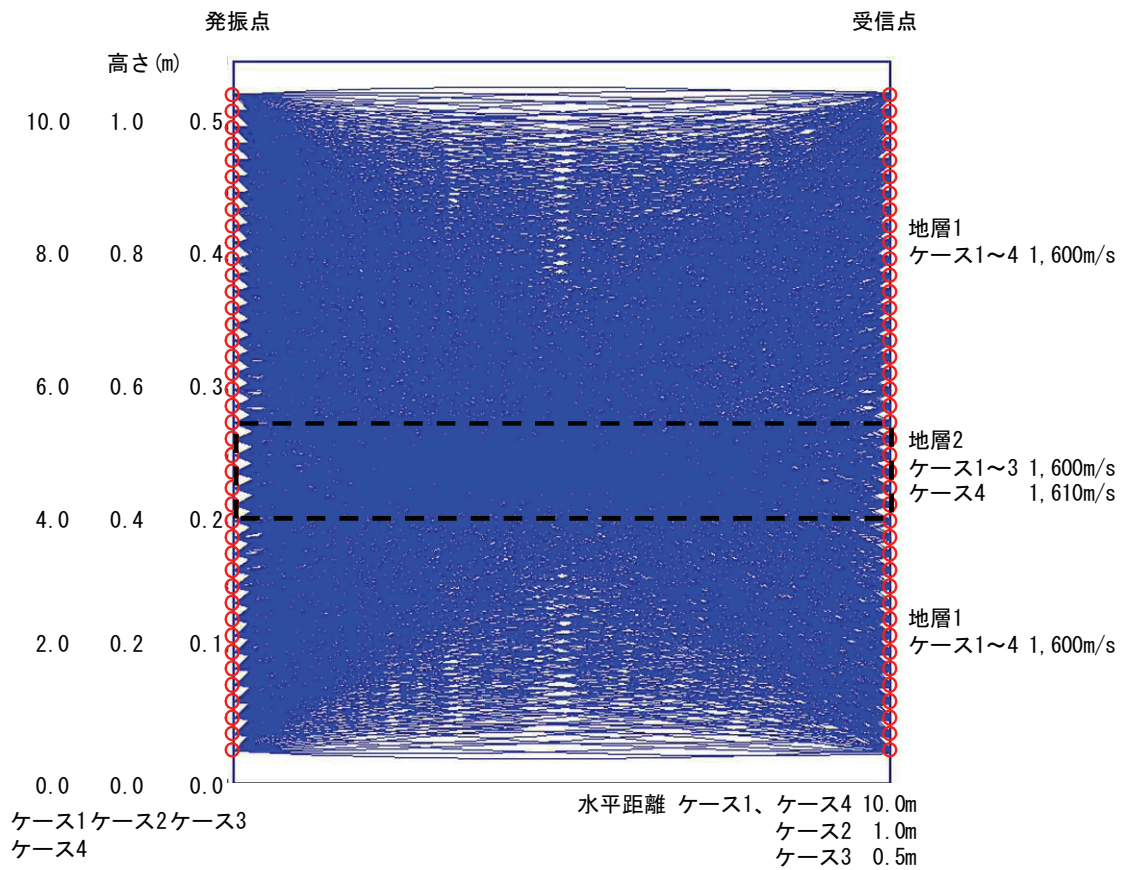


図 4.3.10 解析手法の検証(数値計算モデル)

縦軸、横軸の黒字は各ケースのスケール、○印は発振点及び受信点、青実線は伝播経路、黒点線は地層2の範囲を示す。

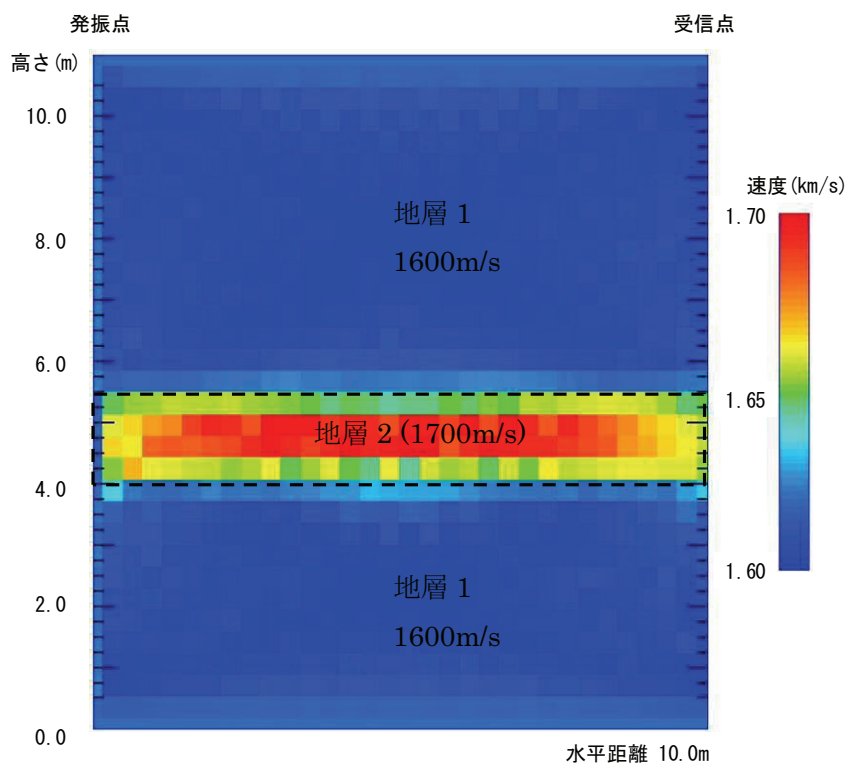


図 4.3.11 解析手法の検証(ケース 1)

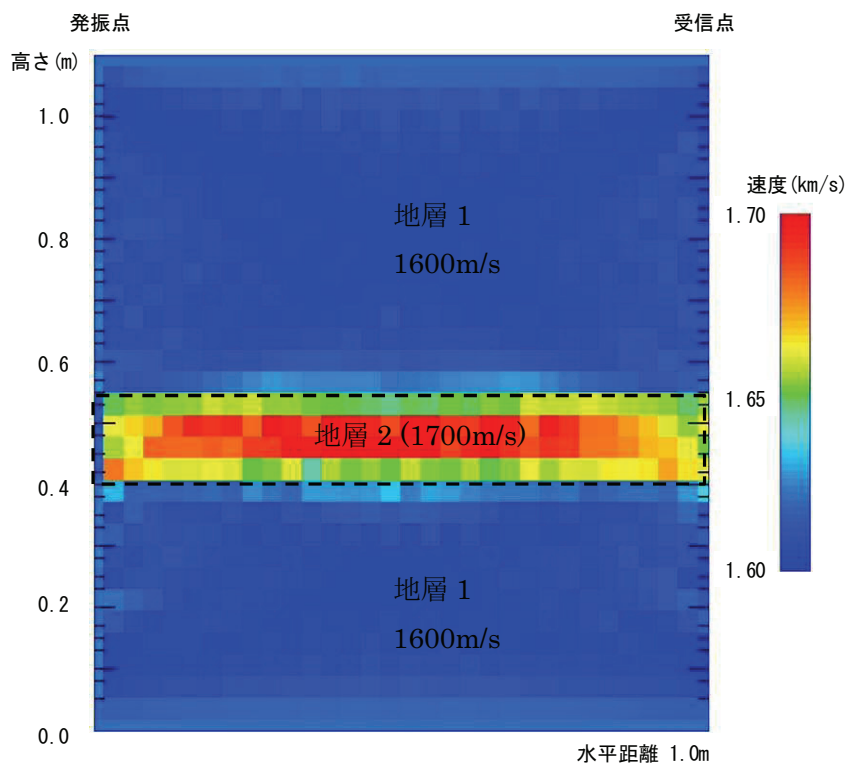


図 4.3.12 解析手法の検証(ケース 2)



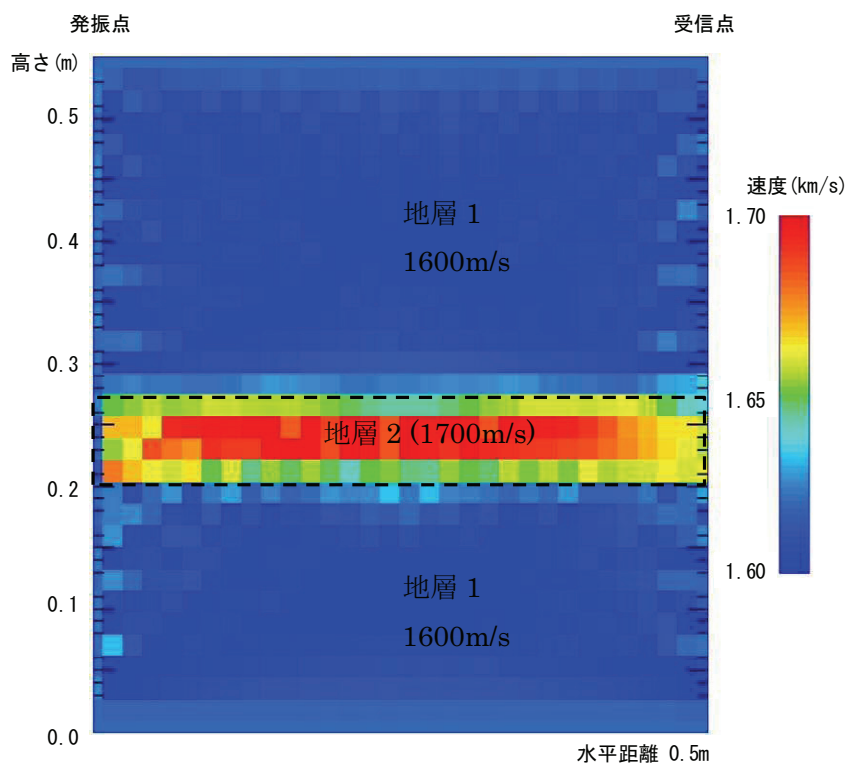


図 4.3.13 解析手法の検証(ケース 3)

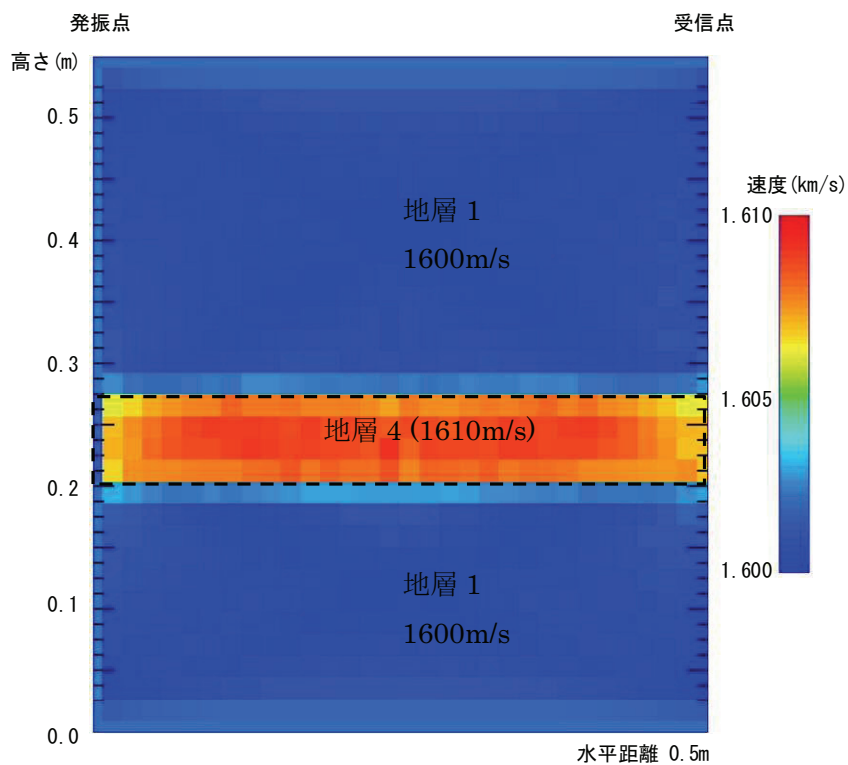


図 4.3.14 解析手法の検証(ケース 4)

#### 4.3.4. 小型土槽実験による検証(砂層中の埋設物探知実験)

実際の地盤での適用を検証するために小型模型土槽を用いて砂層中の埋設物探知実験を行った。図 4.3.15 は実験のレイアウト(断面図)を示す。アクリル製の容器に水と霞ヶ浦標準砂( $\rho_s$  2.626、 $e_{max}$  0.876、 $e_{min}$  0.157、 $D_{50}$  0.333)を入れ、完全に飽和させるために2日間ボイリングと締固めを繰り返した後、1日放置して初期状態とした。発振器と受信器は容器内に設置した塩ビ管(内径 16mm)の内部に設置し、塩ビ管内部はシリコンオイルで満たした。受信器は 20mm 間隔で 19カ所に設置し、発振器は 20mm 間隔で移動を繰り返しながら発振と受信を繰り返した。発振器と受信器は表 2.2.2、図 4.3.7 に示す素子を模型土槽に合うように製作した。計測フローは図 2.2.12 を参考にされたい。発振周波数は 150kHz であり式(2-3)から得られる分解能は 5mm であった。

実験は土槽内部の砂の状態、内部に設置する物体の寸法形状を変えて5通り行った。これを表 4.3.3 に示す。土槽の状態はボイリングとバイブレーターによる締固めで調整し、初期状態、緩い状態、締った状態の平均の相対密度は 0.43、0.36、0.58 であった。土槽内部には外径 20mm の鋼棒および縦 19mm、横 26mm の木片を設置した。

図 4.3.17、図 4.3.18 は 1. 初期状態と 5. 木片設置の発振器深度-0.19m の時の受信波形記録(相関関数計算結果)を示す。1. 初期状態の波形記録からは受信器深度-0.09m より浅い部分の振幅が小さく、到達時間は距離にほぼ比例していること、5. 木片設置の波形記録からは木片が設置されている深度に該当する受信器(深度-0.17m~-0.21m)で音圧が小さくなっていることがわかる。

逆計算の結果として速度分布図と減衰率分布図を図 4.3.19~図 4.3.21 に示す。まず速度に関しては、初期状態・緩い状態では音速は 1.6km/s 程度、締った状態では 1.64km/s 程度に変化している。これは相対密度の違いを反映していると考えられる。また、深度-0.3m~-0.4m にやや低速度になっている部分が全ての状態において認められる。しかし、鋼棒や木片の設置による影響は速度からは認められない。次に減衰率に関しては、4. 鋼棒設置と 5. 木片設置においては鋼棒と木片の設置位置に該当する部分の減衰率が大きくなっている。この高減衰率部分は実際の形状よりは左右に伸びた形をしている。また外径 20mm の鋼棒よりも 19mm×26mm の木片の方が減衰率は大きくなっている。これ以外の部分では 1. 初期状態の深度-0.2m を中心として高減衰率部分が認められるが 2. 緩い状態とそれに続く計測では周囲より減衰率が高いものの値は小さくなっている。これは初期状態で局所的に不均質な状態になったため減衰率が高くなったのではないかと考えられる。

これらの結果から、本研究で開発した減衰率トモグラフィは砂地盤中の埋設物探知に適用できることを結論として得た。

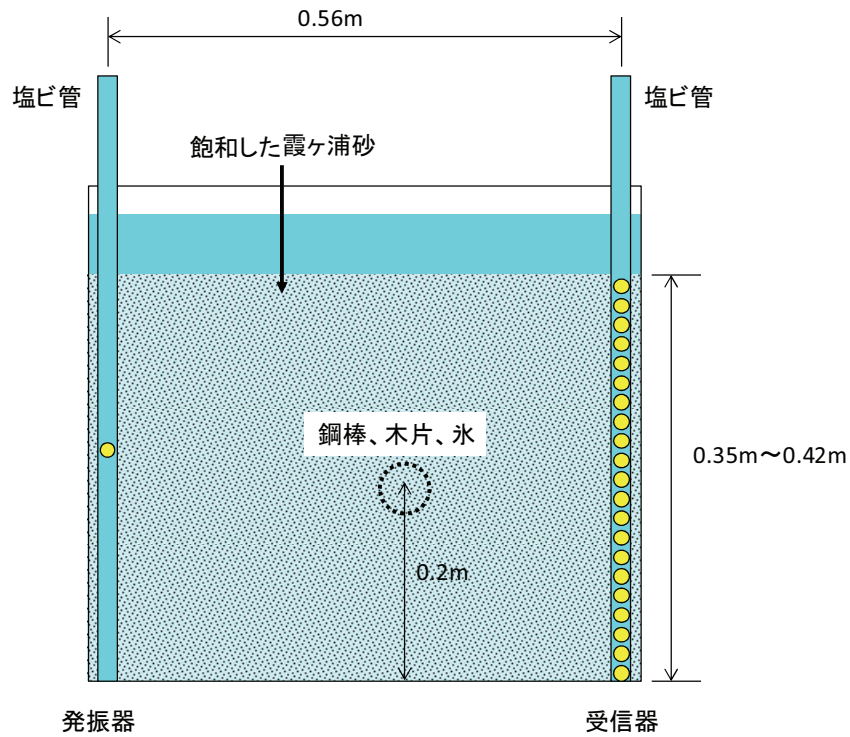


図 4.3.15 実験レイアウト

表 4.3.3 実験ケース

名称	状態	備考
1. 初期状態	ボイリングと締め固めを繰り返した最初の状態	相対密度 0.43
2. 緩い状態	ボイリングで緩くした状態	相対密度 0.36
3. 締った状態	バイブレーター等で締め固めた状態	相対密度 0.58
4. 鋼棒設置	締った状態で鋼棒(外径 20mm)を下から 0.2m、左から 0.25m の位置に設置	相対密度 0.58
5. 木片設置	締った状態で木片(19mm×26mm)を下から 0.2m、左から 0.3m の位置に設置	相対密度 0.58



図 4.3.16 実験の状況

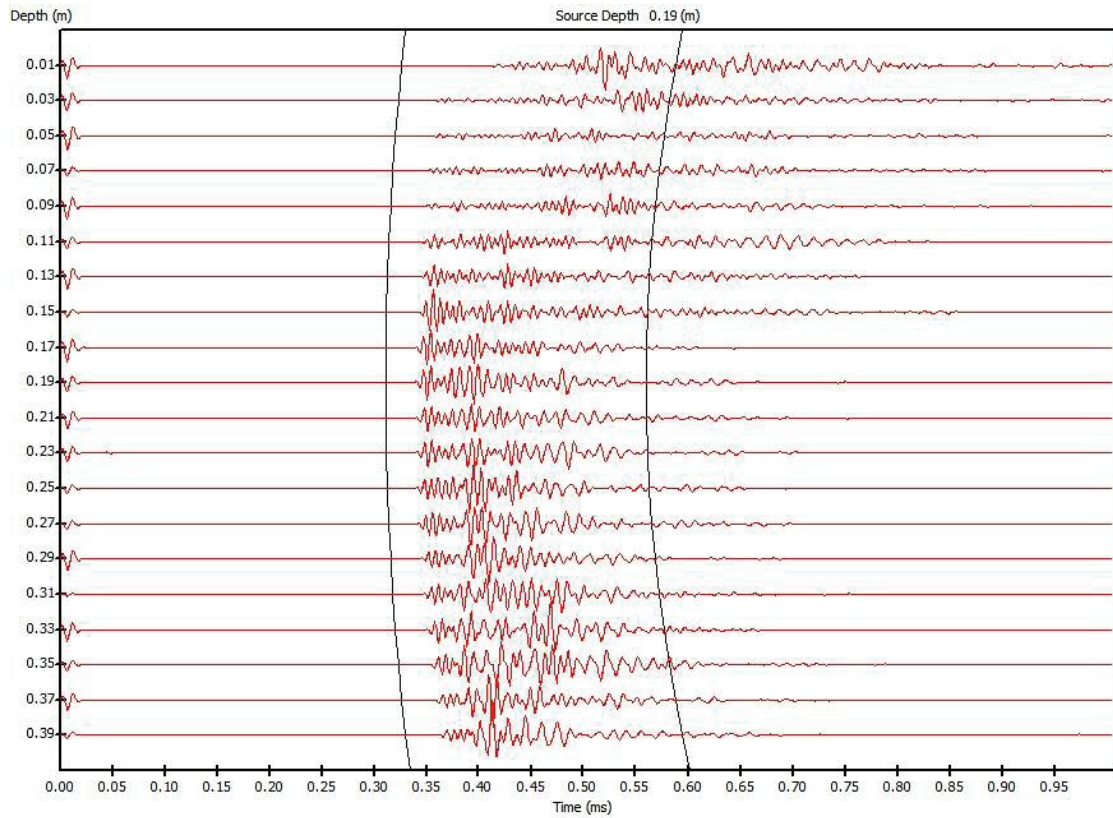


図 4.3.17 受信波形の例 (1. 初期状態)

縦軸は受信器の深度、横軸は時間を示す。図中の2本の曲線は速度 1.8km/s(左)と 1.0km/s  
の等速度線を示す。

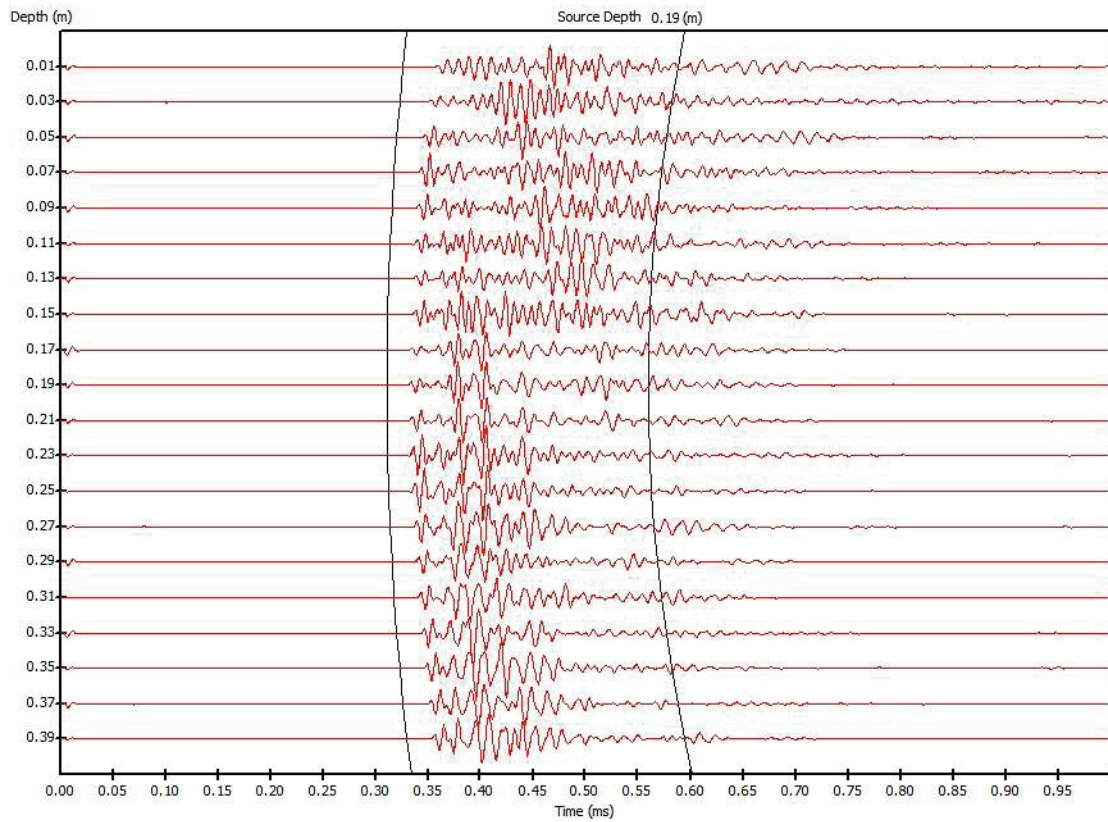


図 4.3.18 受信波形の例 (5. 木片)

縦軸は受信器の深度、横軸は時間を示す。図中の2本の曲線は速度 1.8km/s(左)と 1.0km/s  
の等速度線を示す。

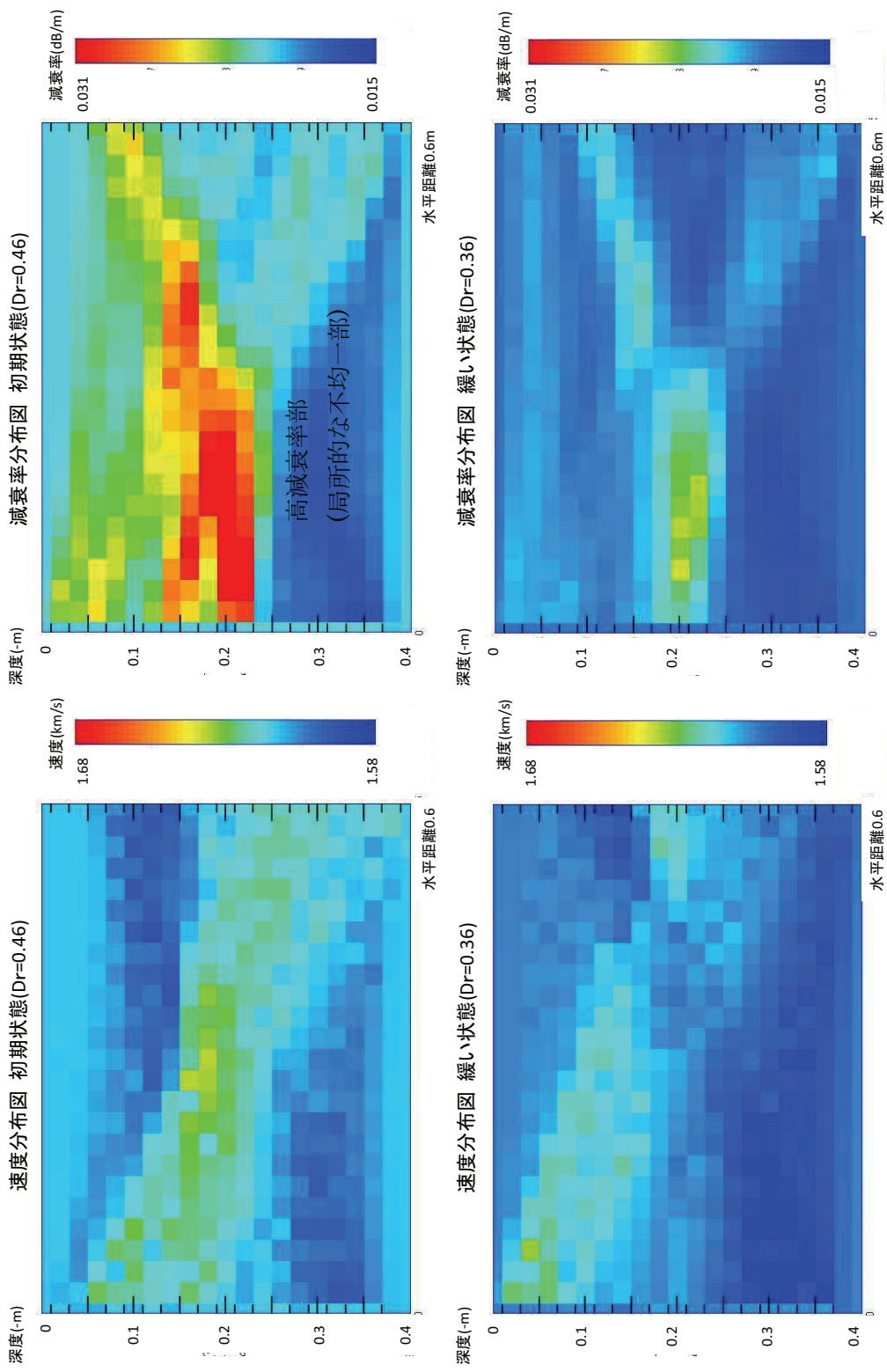


図 4.3.19 模型土槽実験の結果 上：初期状態、下：緩い状態

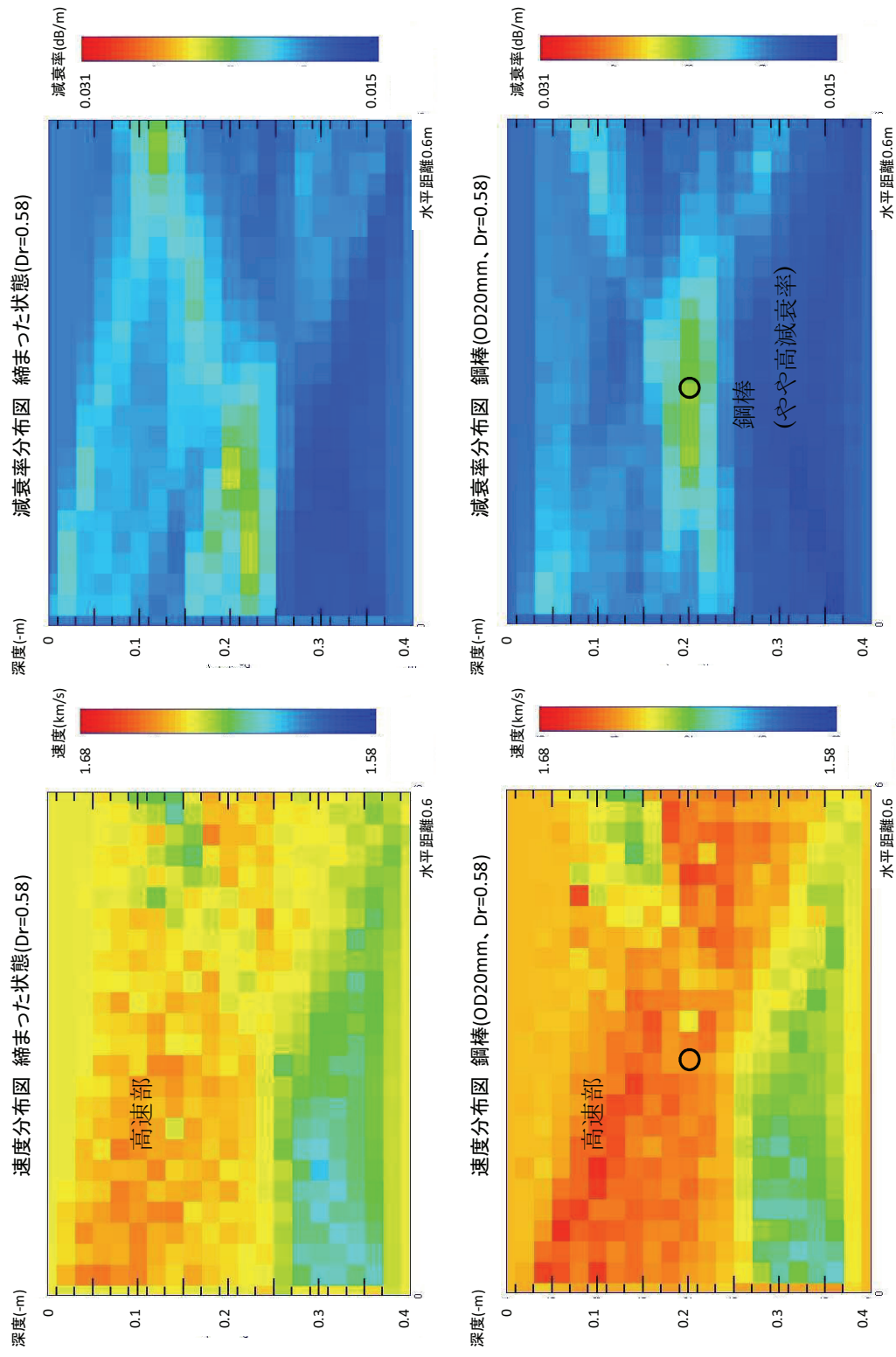


図 4.3.20 模型土槽実験の結果 上：締まった状態 下：鋼棒 (OD20mm)



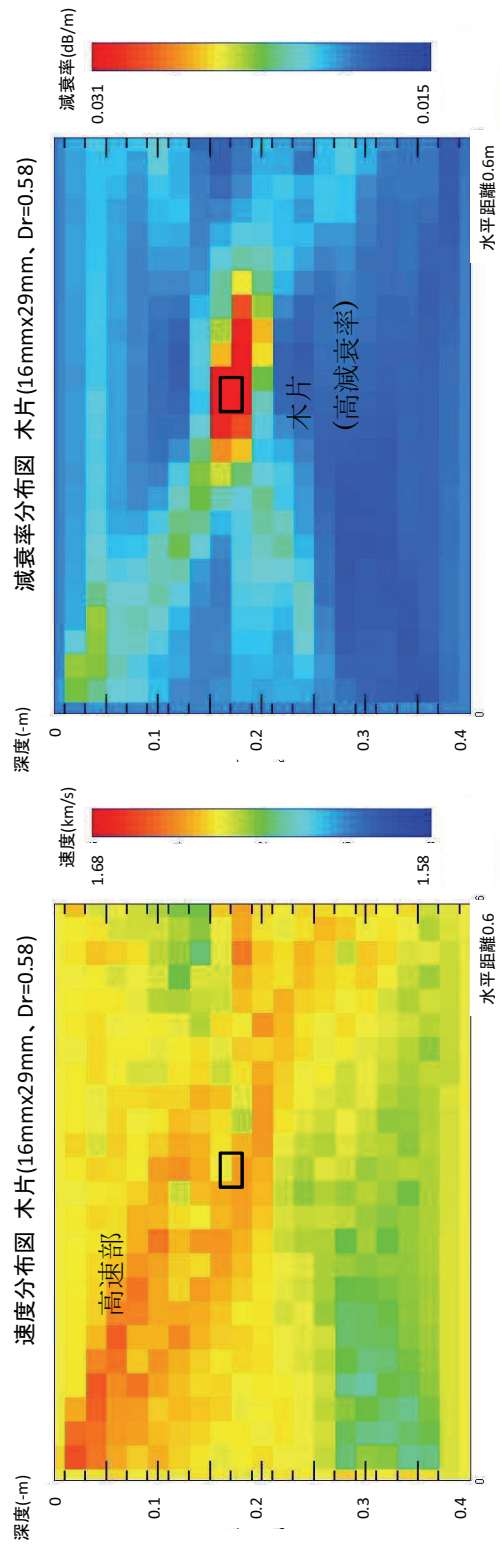


图 4. 3. 21 模型土槽実験の結果 木片 (16mm × 29mm)

#### 4.3.5. 岩石ブロックを用いた検証(岩盤中の亀裂探知実験)

実際の地盤での適用を検証するために岩石ブロックを用いて岩盤中の亀裂探知実験を行った。図 4.3.22 にレイアウト図を示す。0.25m×0.50m×0.50m の 2 つの岩石ブロックを 2mm のスペーサーを介して重ねて幅 2mm の模擬亀裂を作成した。模擬亀裂の間は水で充填した。重ねた岩石ブロックの両側に圧電素子型の発振器と受信器をそれぞれ 20 個、20mm 間隔で接着し発振受信を繰り返した。素子として図 4.3.7 の左側の円盤状の素子を用いた。実験状況を図 4.3.23 に示す。

受信波形記録(相関計算後の波形)の例として発振位置 0.46m(上面からの距離)の記録を図 4.3.24 に示す。同図から亀裂のある受信位置 0.24m と 0.26m を境界として上下で初動波の振幅に 20dB の差があること、一方、到達時間には差がないことがわかる。図 4.3.25 に逆計算結果として速度分布図と減衰率分布図を示す。図中、点線で亀裂の位置を示しているが、速度分布図は亀裂の影響を受けていないこと、一方、減衰率は亀裂の位置で減衰率が大きくなっていることがわかる。音波は 2mm の亀裂を透過する際、亀裂面での速度低下の影響は受けないが、音波は亀裂面で散乱減衰(反射)と透過減衰によりエネルギーを失うため減衰率分布図は亀裂の影響を反映した結果となる。

これらの結果から、本研究で開発した減衰率トモグラフィは岩盤中の亀裂探知に適用できることを結論として得た。

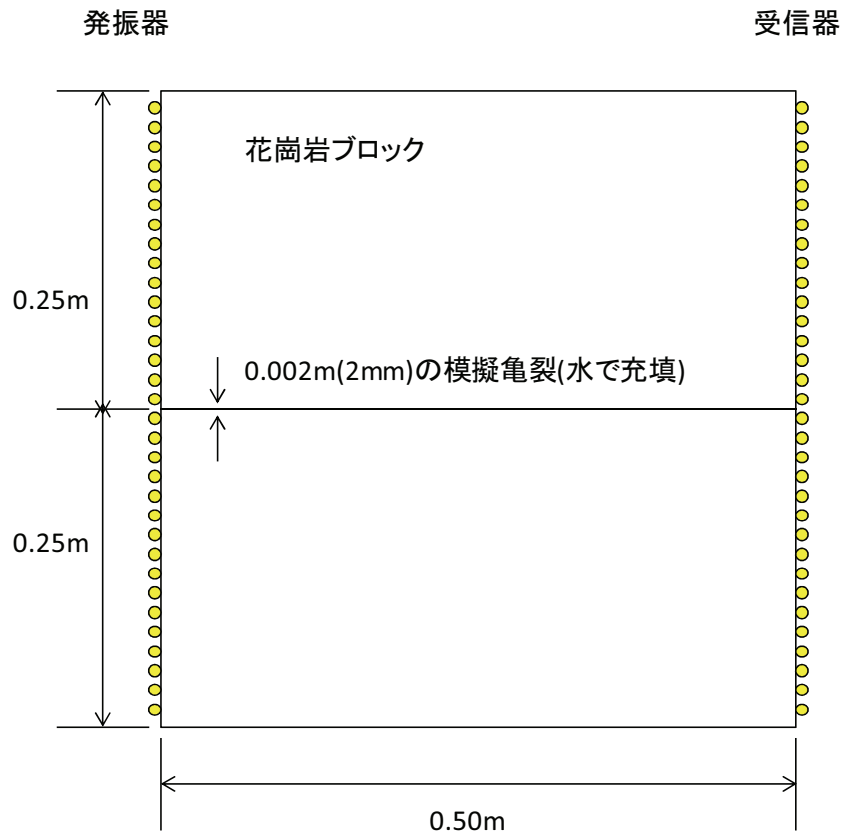


図 4.3.22 岩石ブロック実験レイアウト

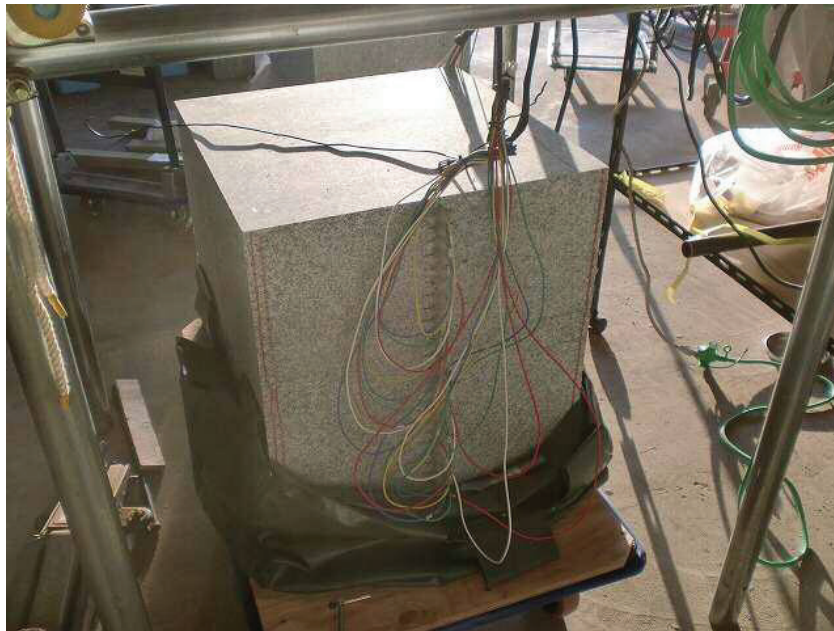


図 4.3.23 実験状況

上面からの距離 (m)

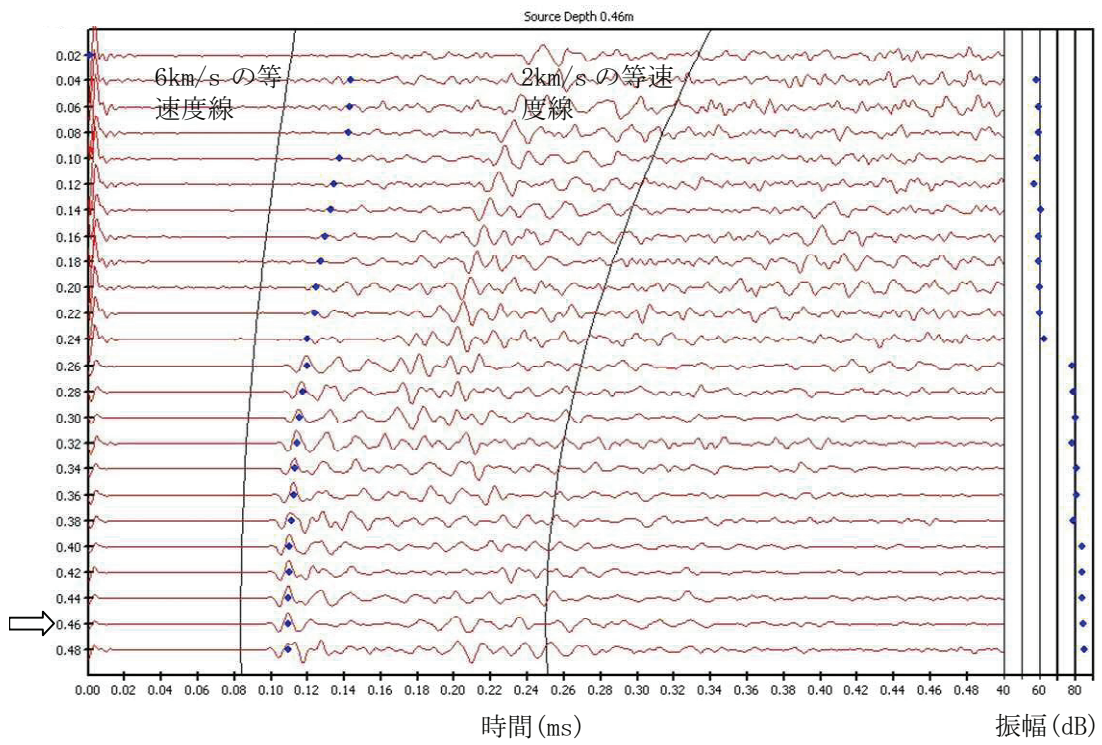


図 4.3.24 受信波形記録 発振位置 0.46m

●印は初動波の到達時間

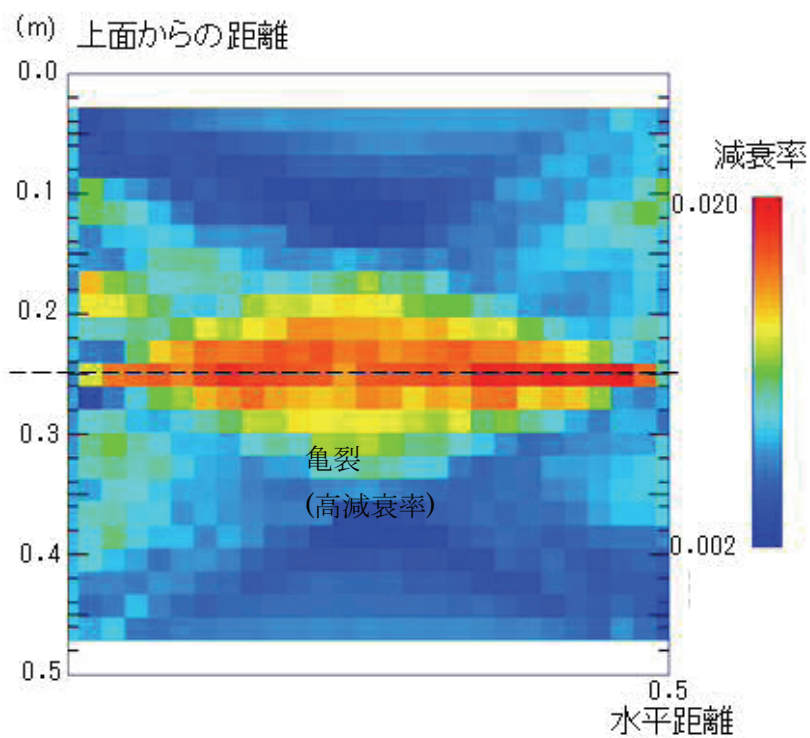
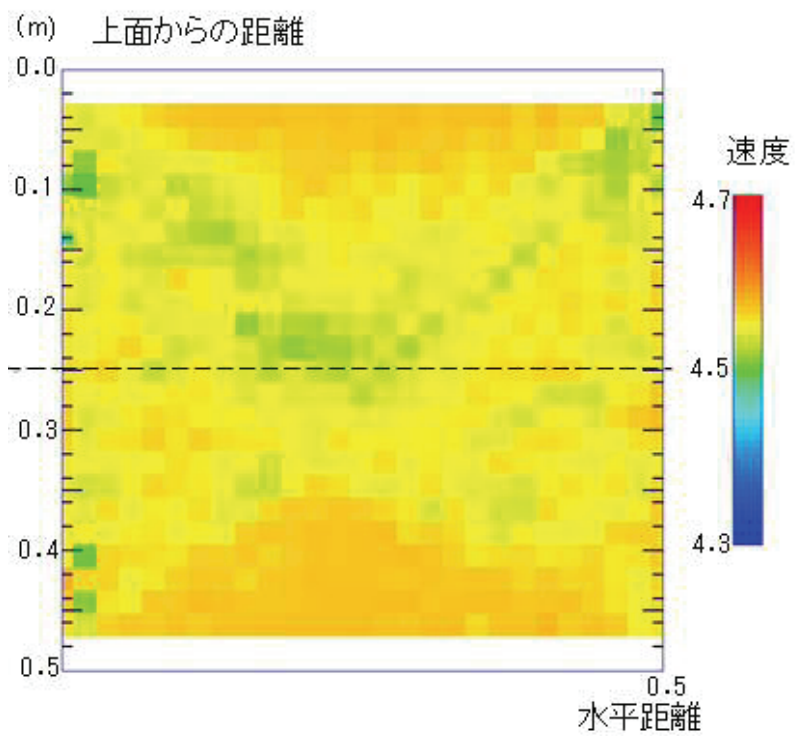


図 4.3.25 岩石ブロックによる亀裂探知実験の結果  
上 速度分布図、下 減衰率分布図、点線は亀裂の位置。

## 4.4. まとめ

4.2. 弾性波速度だけを用いた調査の課題において、物理探査の結果は地盤物性値との関連性が低いことに起因する結果の解釈の難しさ、弾性波速度という1つの指標だけでは地盤の性状を把握する際に間違った判断をする可能性があることを示した。そして、弾性波速度は、地中埋設物や岩盤中の亀裂に対しては影響を受けないことをシミュレーション計算により示した。

4.3. 小型模型土槽、岩石ブロック実験による減衰率トモグラフィ手法の検証において、まず、減衰率に関する逆計算手法の妥当性をシミュレーション計算により示した。次に小型模型土槽と岩石ブロック実験による手法の検証を行うために必要な計測装置の小型化と、伝播距離が短くなるために生じる波線計算の問題点についてシミュレーション計算を用いて計算精度を検証した。これにより本手法を用いた小型模型土槽や岩石ブロック実験の結果が妥当であることを示した。最後に、小型模型土槽を用いた砂層中の埋設物探知実験からは埋設した鋼棒や木片の位置や大きさを高減衰率部として把握できること、砂地盤の締固めの状態により減衰率が影響を受けることを示した。岩石ブロックを用いた岩盤中の亀裂探知実験から弾性波速度では把握できない開口幅2mmの亀裂を高減衰部として明瞭に把握できることを示した。以上のことから減衰率トモグラフィが地盤中の埋設物の調査、岩盤中の亀裂調査に対して有効であることを結論として得た。

### 【参考文献】

- 1) 吉川茂、藤田肇：基礎音響学、講談社、pp. 169-170、2002
- 2) 中村頭一、吉久信幸、深井昌：わかる音響学、pp. 75-77、日新出版、1994
- 3) 鍛冶良和、三木茂、羽竜忠男、増本 清：物理探査結果と地盤特性の相関、土と基礎、45-9、pp. 11-pp. 14、1997
- 4) 榊原淳一、米沢洋：高周波数の波の振幅減衰を用いた構造物の非破壊診断、JFE 技報、No. 27、p. 37-41、2011
- 5) 東京都下水道局、事業概要 平成24年度版、第3章、pp. 33、2012
- 6) 渡辺俊樹、佐々宏一：弾性波の初動振幅を利用した減衰トモグラフィ、物理探査、Vol. 45、No. 1、pp. 10-21、1992
- 7) 佐々宏一、芦田讓、菅野強：建設防災技術者のための物理探査、pp. 12-15、森北出版、1993
- 8) Bergman, N. D., Bailey, R. C. and Chapman, C. H. : Travel time and amplitude analysis in seismic tomography, J. Geophysical Research, Vol. 94, No. B6, pp. 7577-7587, 1989.
- 9) Yamamoto, T. and Turgut, A. : Measurements of acoustic wave velocities and

attenuation in marine sediments, J. Acoust. Soc. Am.、Vol. 87、No. 6、pp. 2376-2383、  
1990

- 10) 榑原淳一、毛利栄征、山本督夫：高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた模型土槽内部の可視化手法の開発、土木学会論文集C Vol. 67 (2011) 、No. 3、 pp. 310-318

## 第5章 速度と減衰率を用いた円型模型土槽内部の可視化

### 5.1. 概要

地震による地盤の液状化や構造物の倒壊などの被害を予測するために、現地でのモニタリングや数値解析と共に精密な模型実験は重要である。過去の大地震クラスの振動を再現した実大施設の挙動を把握することは困難であるが、模型土槽内部に作成した地盤と構造物の詳細な振動実験を行うことにより地盤や構造物の詳細な変状や対策技術の有効性を検証することはできる<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。しかし、これまで模型地盤の地盤構造を非破壊で2次元的に把握する手法についての検討は少なかった。本章では本研究で開発した速度と減衰率を用いたトモグラフィを用いて行った、振動実験に用いられる模型地盤を対象とした地盤構造の可視化実験<sup>5), 6)</sup>について示す。まず、模型土槽内部の地盤の作成方法と模型土槽用計測システムについて示す。次に実験結果として、速度と減衰率を用いた模型土槽内部の地盤状態の推定を行い、これについてコーン貫入試験の結果との比較により検証を行う。最後に、地盤内部の異物探査への適用を目的として、模型土槽内部に設置した凍結砂ブロックの可視化実験を行い適用性の検証を行う。検討の流れを図 5.1.1 に示す。

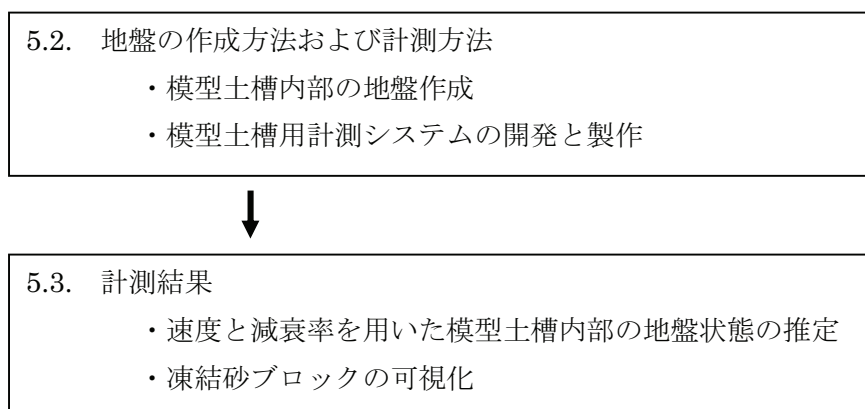


図 5.1.1 検討の流れ

### 5.2. 地盤の作成および計測方法

実験に用いた模型土槽は内寸法で直径 1.75m、高さ 1.81m の円筒型をしており、土槽底面には 16 カ所の注排水口が設置されている。この注排水口を用いて地盤を攪拌、浮遊状態にすることができる<sup>6)</sup>。模型土槽の断面図および写真を図 5.2.1 と図 5.2.2 に示す。この模型土槽は振動台の上に設置されており水平および鉛直方向の振動を加えることができる。



土槽内部への砂の投入は水中に砂を一定量ずつ落下させ堆積地盤を作製する水中落下法<sup>6)</sup>を採用し、実験試料には霞ヶ浦砂を用いた。模型土槽内部には計測孔として2本の塩ビ管(VP100)を設置し内部に発振器と受信器を挿入した。発振器と受信器の水平距離は1.41m、発振点と受信点の各々の深度方向の間隔は0.15m、発振点と受信点の数はそれぞれ10点であった。発振点と受信点のレイアウトを図5.2.3に示す。実験は図5.2.5に示すフロー図に従い実施した。まず、地盤を作製した後、飽和度を上げるためにボイリングによる攪拌と地盤の浮遊化、自然落下状態での堆積を3回繰り返した(ケース1)。次に土槽全体を振動台を用いて水平方向および鉛直方向にそれぞれ加振した(ケース2)。その後、地表面に設置したプレートからバイブレーターを用いて加振し(ケース3)、最後に地表面に60kgの重錘を設置した状態で土槽全体を鉛直方向に加振した(ケース4)。計測はフロー図に示すタイミングで4回実施した。また地盤の平均相対密度を把握するために地盤高の計測を2回、さらにコーン貫入試験を3回実施した。地盤高の計測から得られた相対密度は自然落下状態での堆積時で約35%、最も締め固まっている状態のケース4の計測時の状態で約65%であった。ケース1〜ケース4までの計測終了後、土槽内の砂を半分程度撤去して深度-0.7mの位置に厚さ0.1m、直径1mの円盤状の凍結砂ブロックを設置し、再び砂を投入して静かにボイリングによる攪拌・浮遊・再堆積を繰り返した後、計測を行った(ケース5)。

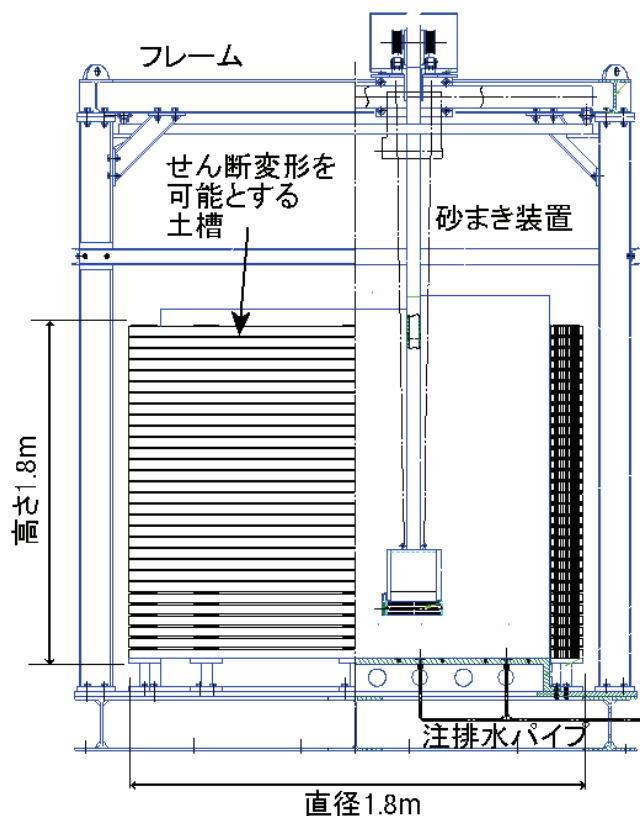


図 5.2.1 円型模型土槽(断面図)<sup>6)</sup>



図 5.2.2 円型模型土槽 (写真)<sup>6)</sup>

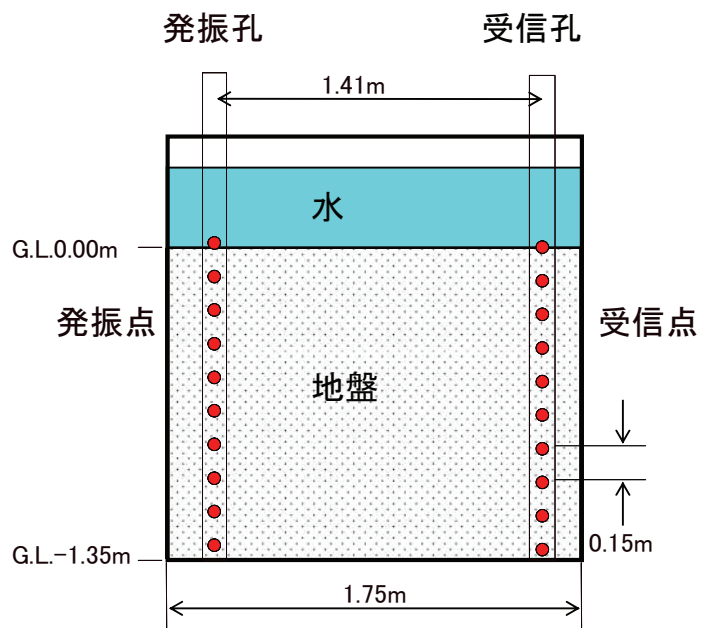


図 5.2.3 計測レイアウト<sup>6)</sup>



図 5.2.4 使用した発振器(左)と受信器(右)<sup>6)</sup>

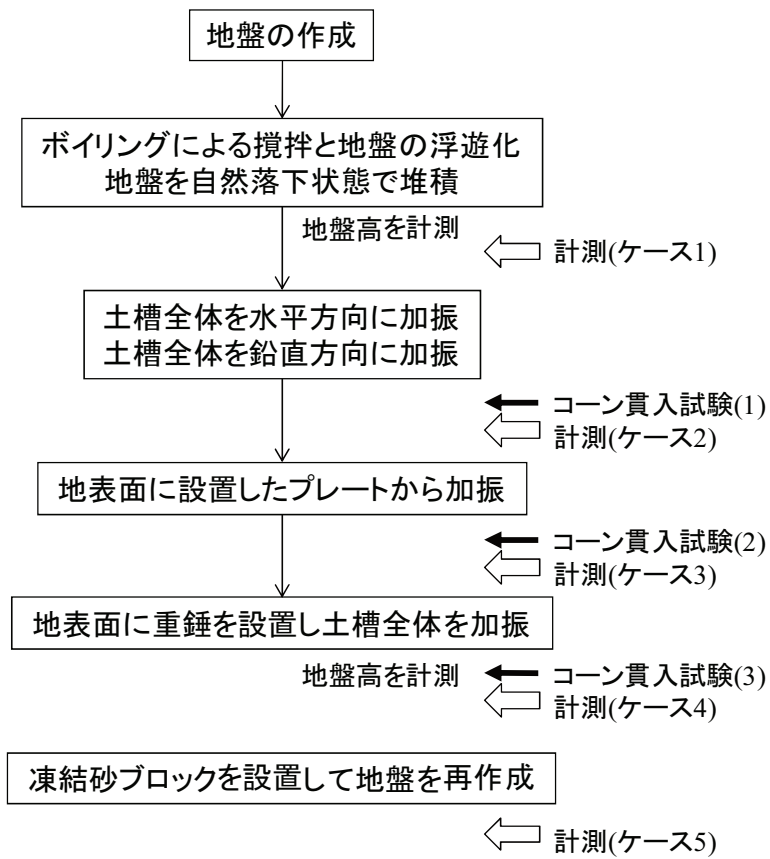


図 5.2.5 円型模型土槽実験のフロー図<sup>5)</sup>

### 5.3. 実験結果

#### (1) 速度と減衰率を用いた模型土槽内部の地盤状態の推定

実験結果としてケース 1～ケース 4 の実験後の速度分布図と減衰率分布図をそれぞれ図 5.3.1、図 5.3.2 に示す。また、図 5.3.3 にはコーン貫入試験結果を示す。これらの結果からわかることを以下に示す。

速度は実験が進むにつれて 1,450m/s から 1,800m/s まで増加した。ケース 2 までは深度方向中央部にやや低速度な部分を持つ 3 層構造を示していたが、最終的には 2 層構造となった。また、ケース 2 の実験の後、深度-0.8m～深度-1.0m に局所的な低速度部が現れた。深度 0m～深度-0.4m にある低速度部分は実験がケース 1 からケース 3 に進むにつれて徐々に上側に向かって消失していったが、ケース 4 では再び深度-0.3m まで現れた。

一方、減衰率は実験が進むにつれて 0.15 から 0.05 へと減少した。ケース 1 の実験後、深度-0.4m～深度-0.8m の間に高減衰帯が現れた。ケース 2 の実験後、減衰率は低下したがこの高減衰部は上下に広がったように見える。ケース 3 の実験の後、層構造は消失した。また、ケース 2 の実験後、深度-0.8m～深度-1.0m に局所的な高減衰部が現れた。この部分は局所的な低速度を示す部分と一致する。ケース 4 の実験後は均一な状態になり低減衰率を呈するようになった。コーン貫入試験の結果は実験が進むにつれ支持力が増加する傾向にあった。また、深度-0.4m より浅い部分と深度-0.8m より深い部分では支持力が下がるという結果となり、これらの深度に境界を持つ 3 層構造を示した。

以上の結果から模型土槽内部の状態について推定する。ケース 1 の初期状態では全体的に低速度、高減衰でありゆるい状態になっていると考えられる。この段階で図中に点線で示す層構造が形成され始めている。ケース 2 の加振後、図中点線で示す 3 層構造がより明瞭に現れてきている。図中点線で囲った深度-0.8m～深度-1.0m 付近の低速度、高減衰部分はコーン支持力も低下している部分であり局所的にゆるい状態になっていると考えられる。ケース 3 の加振後は深度-0.8m より浅い部分で速度は増加、減衰率は減少し締固めが進んでいると考えられる。特に深度-0.3m～深度-0.4m 付近はコーン支持力も増加しており密な状態になったと考えられる。一方、点線で囲った深度-0.8m～深度-1.0m のゆるい状態の部分はまだ残っており、特に減衰率でこの状態が明瞭に現れている。最後のケース 4 により地盤全体の締固めがさらに進み、深度-0.8m～深度-1.0m のゆるい部分も消失した。コーン支持力も増加しておりこの結果と一致した。

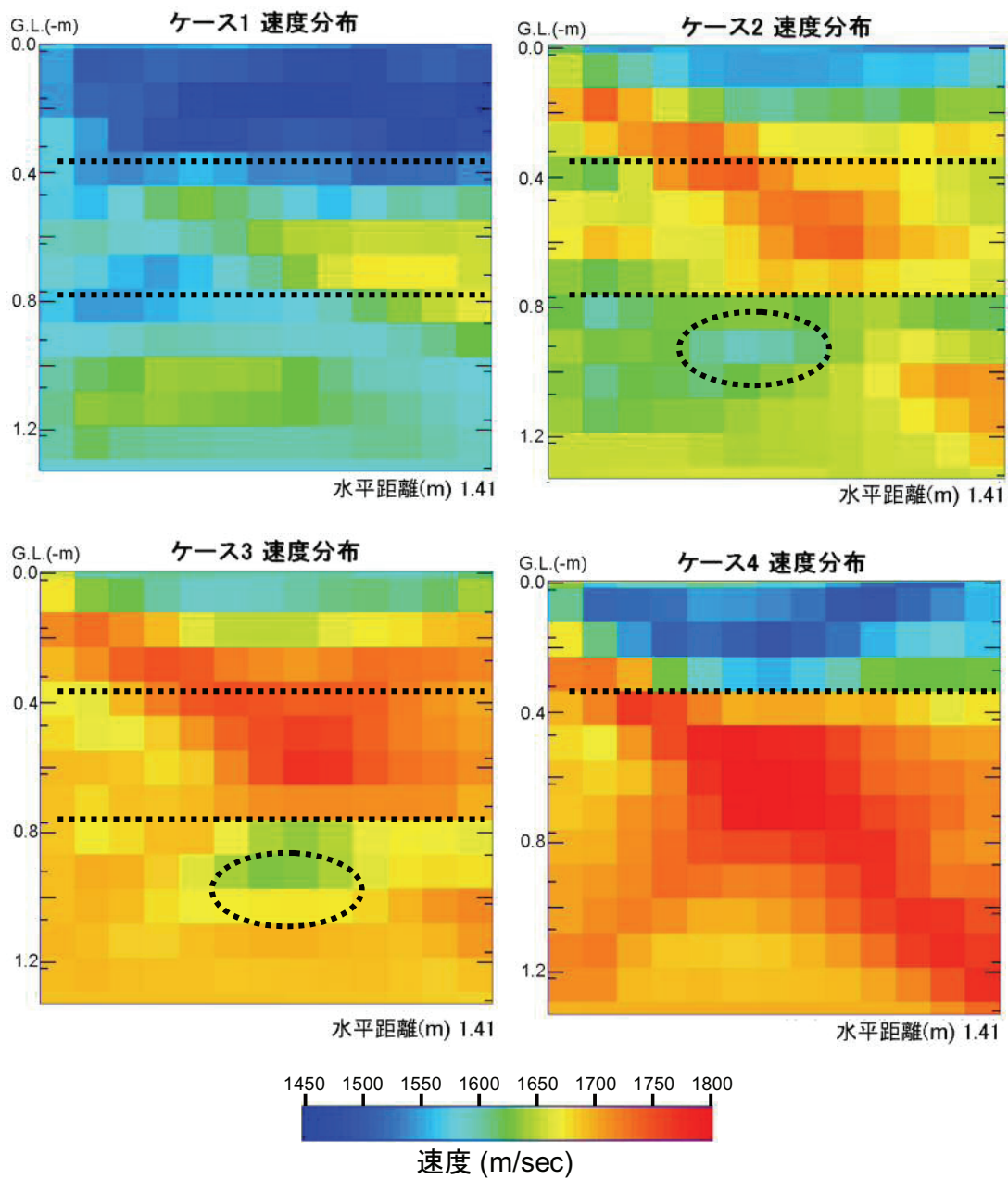


図 5.3.1 円型模型土槽の計測結果(速度分布図)<sup>5)</sup>

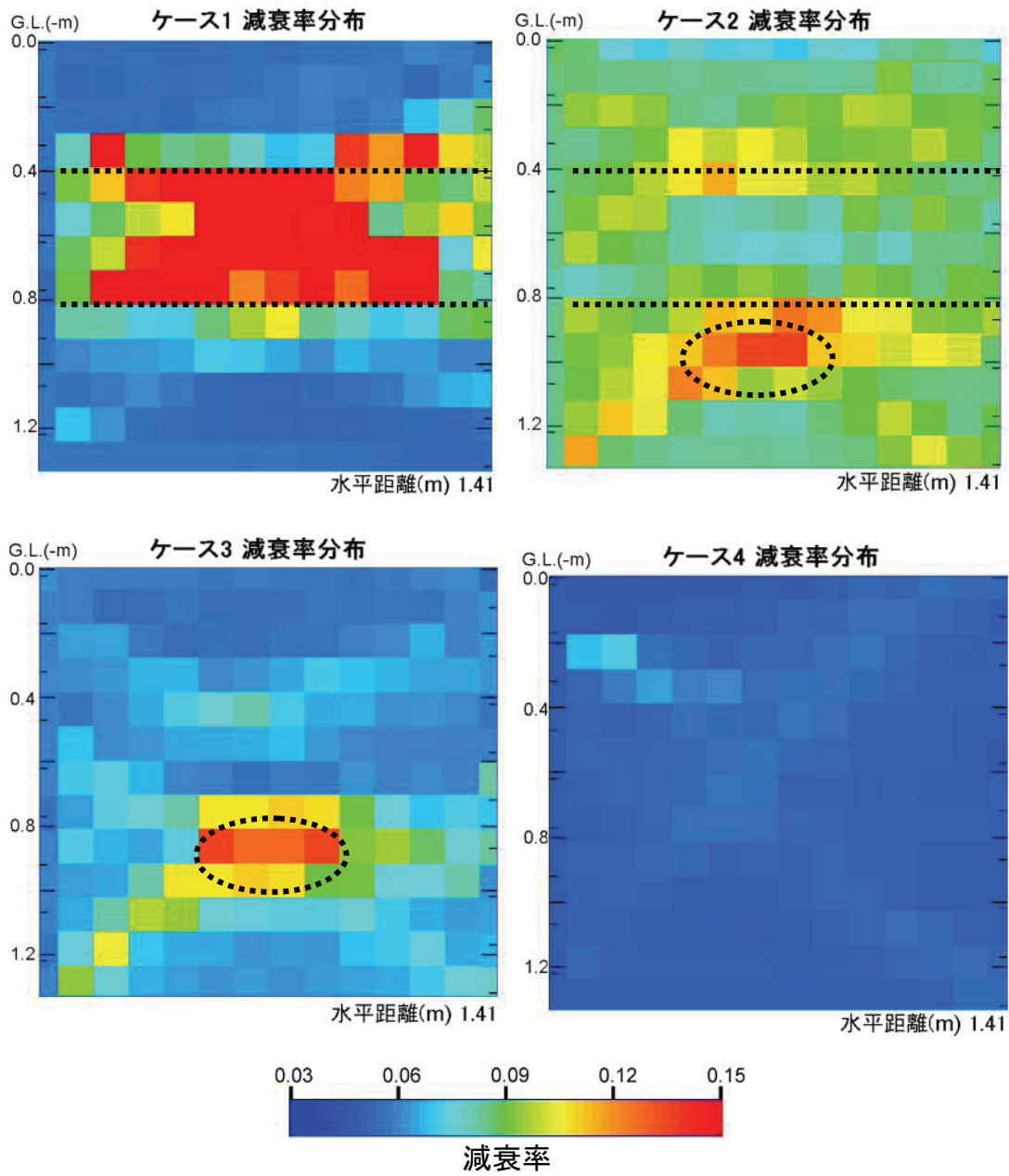


図 5.3.2 円型模型土槽の計測結果(減衰率分布図)<sup>5)</sup>

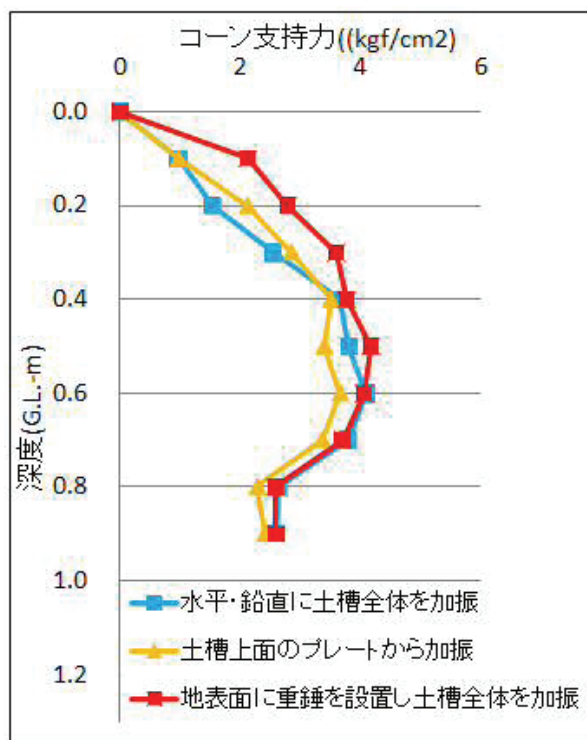


図 5.3.3 コーン貫入試験結果<sup>5)</sup>

(2) 土槽中に設置した凍結砂ブロックの可視化

地盤内部の異物探査を目的として砂層中に凍結砂ブロックを設置して計測を行った(ケース 5)。凍結砂ブロックは直径 1m、厚み 0.15m の円盤形であった。この結果を図 5.3.4 に示す。図中、点線で囲んだ部分は凍結砂ブロックの位置と大きさを示す。速度分布図からは深度-0.8m を境界として上側で低速度、下側で高速度になっている。この低速部はブロックよりも広い範囲に広がっている。“5.2 地盤の作成および計測方法”で述べたように、凍結砂ブロックの設置に際しては土槽内部の砂の上半分を撤去してブロックを設置し、再び砂を投入した。この再投入した上半分の砂の締固めが十分でなかったために速度が低下したと考えられる。また、凍結砂ブロックの位置で速度が最も遅くなっていることから、凍結砂ブロックの内部にある気泡の影響を受けたものと推定できる。

一方、減衰率分布図は深度 0.3m より浅い部分の高減衰率部を覗けば、ブロックの位置に相当する部分で減衰率が大きくなっている。これはブロック内部に残る気泡の影響を受けたものと推定できる。以上の結果から、土槽内部に設置した凍結砂ブロックの探査に本手法を適用できることがわかった。

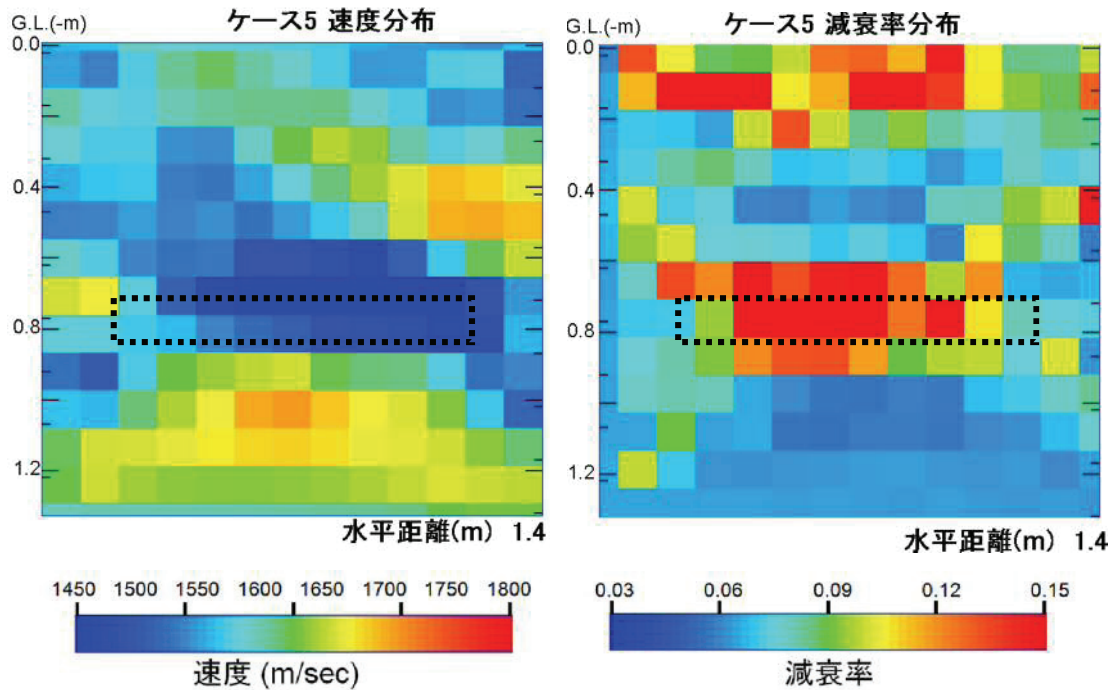


図 5.3.4 計測結果(ケース5 凍結砂ブロックを設置)<sup>6)</sup>  
 点線で囲んだ部分が凍結砂ブロックの位置と大きさを示す。

## 5.4. まとめ

5.2 地盤の作成および計測方法において、円型模型土槽の作成方法と計測方法について示した。5.3 実験結果において、速度と減衰率分布図を用いた模型土槽内部の地盤状態について、締固めに伴い地盤が均一になっていく様子が把握できること、また内部に設置した凍結砂ブロックの探査ができることを示した。特に模型土槽内部の局所的な緩み領域や凍結砂ブロックのような異物の探査には減衰率分布の方が速度分布よりも明瞭に表していることを確認した。以上のことから本手法が模型土槽内部の可視化に適用できることを結論として得た。



#### 【参考文献】

- 1) 花田賢師、張 至鎬、樋口俊一、松田 隆、濱田政則：杭基礎に作用する側方流動の外力特性に関する実験、土木学会第 58 回年次講演会講演集、III-144、pp. 287-288、2003.
- 2) 木村 亮、柴田 徹：大型土槽を用いた群杭の水平抵抗に関する模型実験、土と基礎、Vol. 40、No. 5、pp. 41-46、1992。
- 3) 佐藤正義、田端憲太郎、阿部秋男：大型土槽による護岸矢板と杭基礎の側方流動実験及び遠心振動実験による再現、土木学会論文集 C、Vol. 65、No. 4、pp. 834-845、2009。
- 4) 石川博之、大友敬三、末広俊夫、松本恭明、福本彦吉：RC 地中構造物の耐震性能に関する大型振動台実験とその解析（その 3）複数回加振による RC 試験体の塑性変形特性、土木学会第 55 回年次学術講演会講演集、I-B132、2000。
- 5) 榊原淳一、毛利栄征、山本督夫：高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた模型土槽内部の可視化手法の開発、土木学会論文集 C Vol. 67（2011）、No. 3、pp. 310-318
- 6) 毛利栄征、榊原淳一、吉村公孝、山本督夫：せん断土槽の作成方法と均一性、第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp. 83-88、2001

## 第6章 速度と減衰率を用いた新しい地盤調査方法の提案

前章までの議論から、本研究で開発した手法は調査精度が高いこと、速度と減衰率の2つの指標を得られることがわかった。本章ではこの速度と減衰率を用いた新しい地盤調査方法を提案し、実際の調査結果に適用した例を示す。

### 6.1. 判定方法の提案

図 4.2.1 に示したように、地盤中を伝播する音波の速度は、一般的には粘性土、シルト、砂の順に速くなり、軟岩、硬岩ではさらに速くなる。一方、音波の減衰率は、図 4.2.3 に示したように、礫や転石、ガスの存在や飽和度の低下、岩盤内部の亀裂の存在により大きくなる<sup>1),2)</sup>。これを横軸に音速、縦軸に減衰率をとり図 6.1.1 に示す<sup>3)</sup>。同図を用いると、速度だけでは判断が難しかった硬い粘土と緩い砂の区別は減衰率の高低を比較することで容易に行える。同図を基に実際の現場における判断を行うための判定方法の例を未固結地盤と固結地盤に分けて表 6.1.1 と表 6.1.2 に示す。これらの表には速度と減衰率の結果とボーリング柱状図を比較して得た速度と減衰率の閾値 ( $V_t$  と  $Q^I t$ ) を設定している。

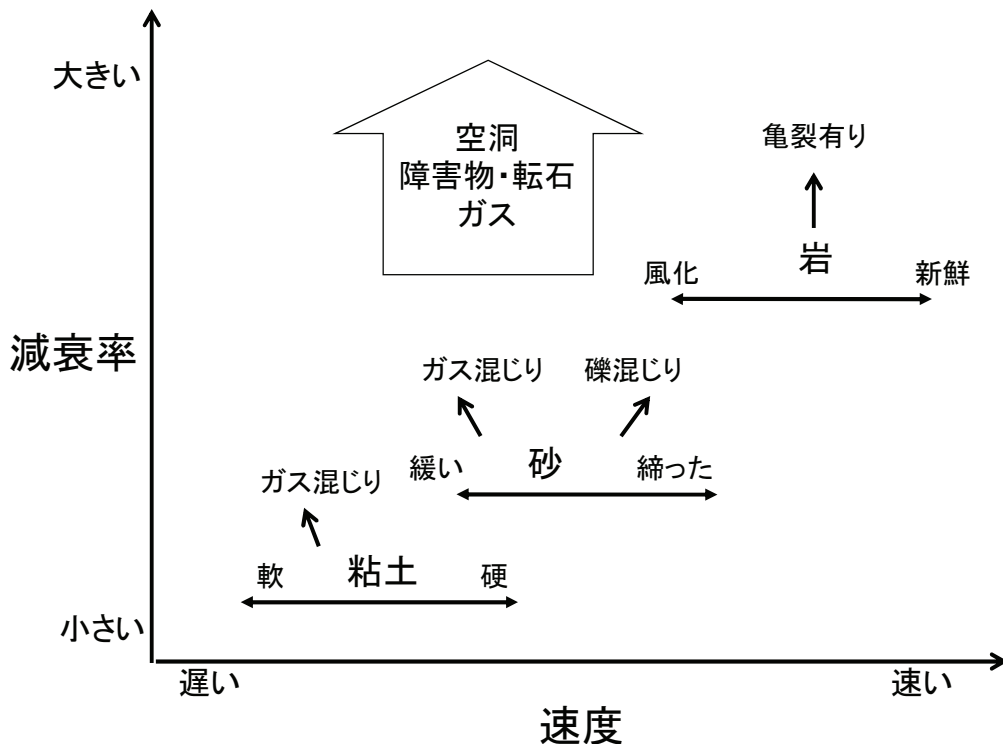


図 6.1.1 速度と減衰率を用いた地盤性状の解釈

表 6.1.1 未固結地盤における地盤の状態の判定例

		速度	
		遅い	速い
減衰率	大きい	ガス混じり粘土 緩い砂 転石、空洞	礫混じり砂 締った砂
	小さい	粘土	細砂 固結粘土

減衰率の閾値  
← ( $Q^{-1}t$ )

↑  
速度の閾値  
( $Vt$ )

表 6.1.2 固結地盤における地盤の状態の判定例

		速度	
		遅い	速い
減衰率	大きい	亀裂の入った風化岩 空洞やガス層の存在	やや亀裂の入った硬岩
	小さい	軟岩	新鮮で亀裂のない硬岩

減衰率の閾値  
← ( $Q^{-1}t$ )

↑  
速度の閾値  
( $Vt$ )

## 6.2. 実際の調査結果への適用例

### 6.2.1. 埋立地における支持層、礫層の調査

千葉県浦安市の埋立地において実施した基礎構造物建設を目的とした地盤調査結果<sup>4)</sup>について検討する。調査結果として速度分布図と減衰率分布図を図 6.2.1 に示す。速度分布図とボーリング記録を比較した結果、沖積砂層の深度(G.L. -20m 程度)と N 値 50 以上の支持層の深度(G.L. -60m)を把握することができた。この結果からは地層が沖積砂層、沖積粘性土層、シルト層、洪積砂層の 4 層に分かれていることが把握できる。また、この時の沖積砂層と洪積砂層の速度の閾値  $Vt$  はそれぞれ 1.55km/s と 1.65km/s となる。

一方、減衰率分布図とボーリング記録の比較から、G. L. -30m 付近に有機ガス混じりの粘土、G. L. -50m 付近に礫層が存在していることがわかり、このときの減衰率の閾値  $Q^1t$  は共に 0.28dB/m/kHz となる。これを基にして行った調査結果の考察を以下に示す。

「G. L. -20m までは沖積砂層が分布しており、減衰率が小さいことから細砂であると考えられる。その下部には有機ガス混じりの粘性土が G. L. 30m 付近まで堆積している。さらにその下部のシルト層と砂層の境界は G. L. -50m 付近にあるが、砂層の上面の高減衰部分には礫層が存在していると考えられる。故に、液状化対策を行う場合には G. L. -20m まで施工を行う必要がある。また、場所打ち杭や埋込み杭などのために削孔を行う場合には G. L. -50m 付近の礫層に注意をする必要がある。」

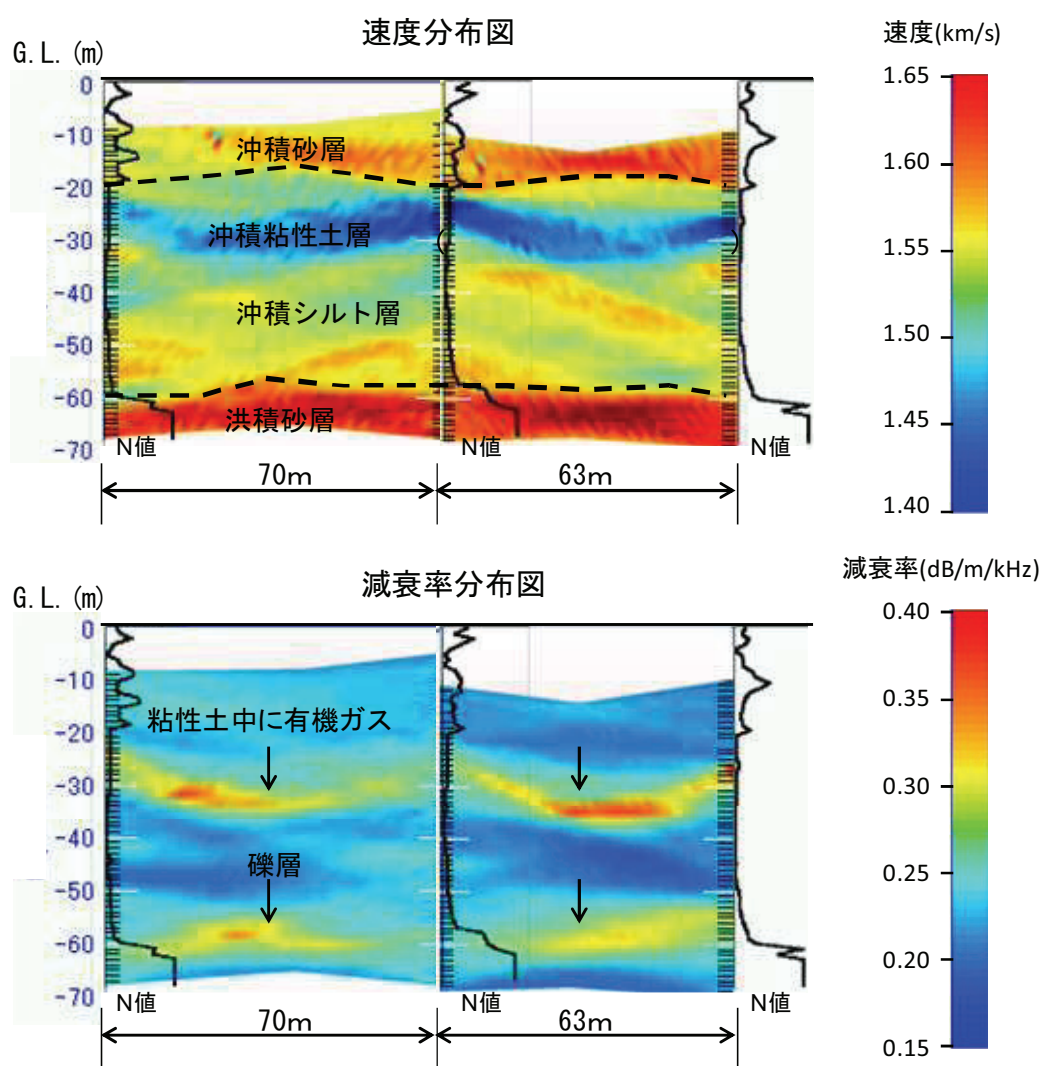


図 6.2.1 埋立地における地盤調査の例(千葉県浦安市)

## 6.2.2. 風化花崗岩の亀裂分布調査

シンガポール共和国における地下鉄建設を目的として実施した岩盤調査結果<sup>1)</sup>を図6.2.2に示す。この現場では風化花崗岩の風化程度や亀裂の有無を把握し、シールドマシンによるトンネル工事の施工方法の検討を行う必要があった。速度分布図からはG.L. -10m～G.L. -20m付近で強風化花崗岩と風化花崗岩、G.L. -40m付近(TBH-037)からG.L. -20m(TBH-036)にかけて風化花崗岩と新鮮な花崗岩の境界が存在していること(図中、点線で示す)、3層構造に分かれていることがわかる。速度の閾値 $V_t$ はそれぞれ4.5km/s、6km/sである。

一方、減衰率分布図からは特に減衰の大きい部分が左側に2カ所存在する(図中、点線で囲んだ部分)。ボーリング孔TBH-037の記録によるとこの部分は開口亀裂が卓越しているとの記述があり、ボーリング孔TBH-036の記録には開口亀裂に関する記述はなかったことから、この高減衰率部分は開口亀裂の有無を示していると考えられる。このときの閾値 $Q^{1/t}$ は0.5dB/m/kHzである。これを基にして行った調査結果の考察を以下に示す。

「まさ土と強風下花崗岩の下側には風化花崗岩があり、右上がりの境界を挟んで新鮮な花崗岩がある。TBH-037近傍の風化花崗岩にはG.L. -20mとG.L. -35mに開口亀裂が卓越する部分がある。またTBH-037近傍のG.L. -28mとG.L. -42mには割れ目の少ない部分が存在している。一方、TBH-036近傍の新鮮な花崗岩の内部には閉じた亀裂は存在するようであるが開口亀裂は少なく、また花崗岩の状態もほぼ均質であると考えられる。従って、地下鉄のルートを選定する場合には硬軟が複雑に存在しており、かつ亀裂からの出水の可能性もあるTBH-037側よりも、硬いが比較的均質な岩盤が存在するTBH-036の方が良いと考えられる。」

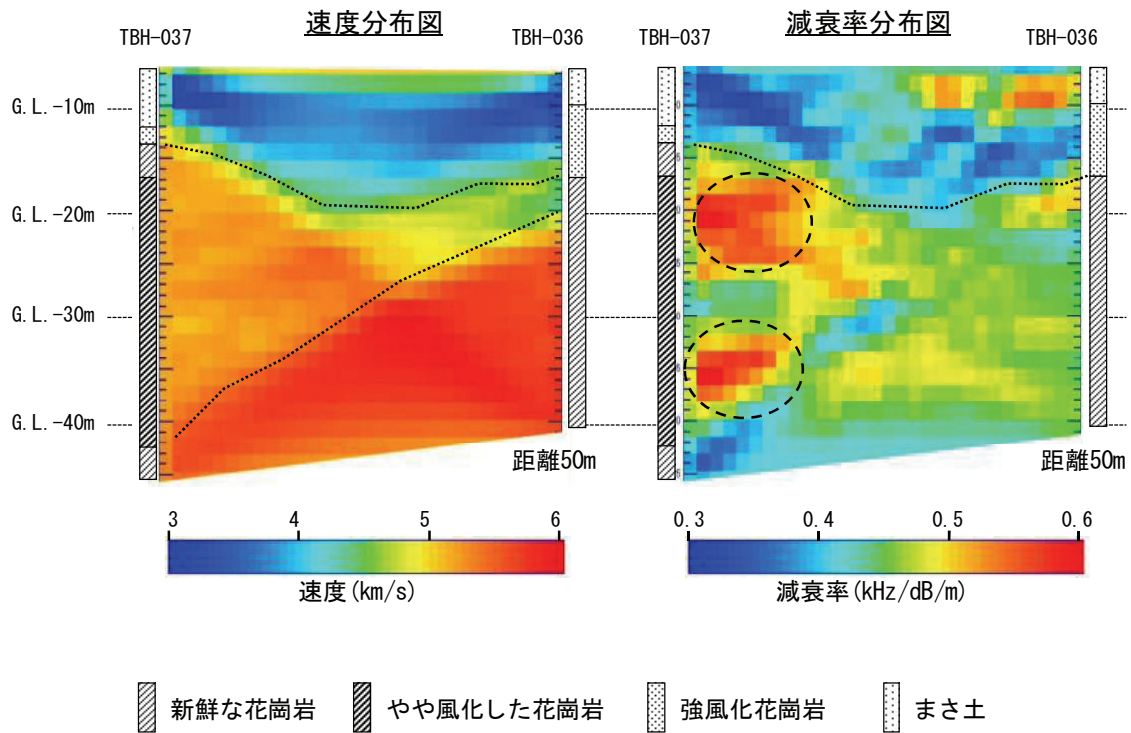


図 6.2.2 花崗岩中の亀裂分布の把握調査(シンガポール)

### 6.3. まとめ

6.1 判定方法の提案において、速度と減衰率の2つの指標を用いた地盤状態の判定方法を提案した。速度と減衰率にそれぞれ閾値をもうけ、地盤の種類だけでなく礫や転石、ガスの存在や飽和度の低下、岩盤内部の亀裂の存在を把握することが可能となった。

6.2 実際の調査結果への適用例において、千葉県浦安市の埋立地における支持層と礫層分布の調査、およびシンガポール共和国における風化花崗岩の亀裂調査を例として6.1で提案した判定法に基づき閾値を決め、地盤・岩盤の状態把握と設計や施工への影響について考察を行った。2つの考察は何れも速度分布図だけでは行えなかったものであり、以上のことから、速度と減衰率の2つの指標を用いた地盤の判定方法は従来手法よりも有効な手法であることを結論として得た。

## 【参考文献】

- 1) 榊原淳一：弾性波の振幅減衰を用いた地盤と地中構造物の非破壊計測、2010 年度土木学会年次学術講演集、2010
- 2) 榊原淳一：減衰率トモグラフィを用いた地盤の可視化手法の開発、第 45 回地盤工学研究会、2010
- 3) 榊原淳一、米沢洋：高周波数の波の振幅減衰を用いた構造物の非破壊診断、JFE 技報、No. 27、pp. 37-41、2011
- 4) 榊原淳一：音響トモグラフィを用いた新しい地盤評価技術、基礎工、Vol. 33、No. 9、pp. 81-83、2005

## 第7章 結論

地上、地下を問わず、構造物の建設においては地盤情報の把握は重要である。なぜなら構造物の設計・施工方法は地盤情報に基づいて決定されるからである。また、供用期間を長くしライフサイクルコストを低減するためには、地盤が構造物に与える影響(または構造物が地盤に与える影響)を知る必要がある。地盤調査は文献調査や現場踏査を除けばボーリングによる調査と物理探査に分類できる。地盤を直接把握できるが点の調査しか行えないボーリング調査と間接的な調査しかできないが面的な調査が行える物理探査手法は相互に補完しうるものであるが、現状の建設現場においてはボーリング調査のみが行われることが多い。この理由として①探査精度および②必要な物性値が得られないという2点が挙げられる。そこで本研究においては、孔間弾性波トモグラフィ手法に着目し、発振・受信方法および解析方法について研究を行い、新しい調査手法を提案することを目的として実施した。

第1章では、研究の背景として地盤調査法、特に物理探査手法の現状と課題について、①調査精度、②調査結果と物性値の関係の2つの観点から整理し、既往の研究成果をまとめた。そして本研究の目的と課題を設定し、本研究の構成について述べた。

第2章では、従来の孔内震源の課題についてまとめ、発振周波数の制御と発振周波数を制御可能な震源の開発が必要であることを示した。そして疑似ランダム波と圧電素子型震源を組み合わせることでこの課題を解決できることを示した。次に、この疑似ランダム波と圧電素子型震源を用いた計測・解析システムの概要を示した。また、性能確認試験を行い、パワースペクトルを比較することで正確な周波数制御が可能であることを示した。最後にパルス波と疑似ランダム波のシミュレーション計算による比較を行い SN 比の改善について効果を示した。

第3章では、フィリピン共和国マニラ港の棧橋建設工事における杭基礎構造物の支持地盤調査における調査結果と基礎杭の施工記録との比較により、支持層の正確な把握が行えたことを示した。次に愛知県中部国際空港で行った杭基礎構造物の支持層調査において、3次元的に得られた調査結果と基礎杭の施工記録との比較により、3次元的な支持層の正確な把握が行えたことを示した。さらにボーリング調査のみによる設計を行い基礎工事に関わる施工数量を計算し、本調査の結果に基づいて実際に行われた基礎工事の施工数量と比較し、施工費の削減と工期短縮を実現できたことを示した。

第4章では、弾性波速度だけを用いた調査の課題において、物理探査の結果は地盤物性値との関連性が低いことに起因する結果の解釈の難しさ、弾性波速度という1つの指標だけでは地盤の性状を把握する際に間違った判断をする可能性があることを示した。そして、弾性波速度は、地中埋設物や岩盤中の亀裂に対しては影響を受けないことをシミュレーション計算により示した。次に、小型模型土槽、岩石ブロック実験による減衰率トモグラフィ手法の検証を行うために、減衰率に関する逆計算手法の妥当性をシミュレーション計算



により示した。さらに、小型模型土槽と岩石ブロック実験による手法の検証を行うために必要な計測装置の小型化と、伝播距離が短くなるために生じる波線計算の問題点についてシミュレーション計算を用いて計算精度を検証し、本手法を用いた小型模型土槽や岩石ブロック実験の結果が妥当であることを示した。最後に、小型模型土槽を用いた砂層中の埋設物探知実験からは埋設した鋼棒や木片の位置や大きさを高減衰率部として把握できること、砂地盤の締固めの状態により減衰率が影響を受けることを示した。

第5章では速度と減衰率を用いた円型土槽内部の可視化実験の結果について、まず、地盤の作成方法と計測方法について示した。次に速度と減衰率の計測結果から、締固めに伴って局所的な緩み域が消失し地盤が均一になっていく様子を示した。さらに、内部に設置した凍結砂ブロックは高減衰領域として把握できることを示した。以上のことから本手法が円型模型土槽内部の可視化に適用できることを結論として得た。

第6章においては、まず速度と減衰率を用いた新しい地盤調査方法の提案を行った。次に提案した方法を用いて、千葉県<sup>1)</sup>の埋立地、シンガポール共和国の地下鉄建設における地盤調査結果を基に設計や施工に役立てるための考察を加えた。

## 謝辞

本研究の実施と本論文の執筆にあたり、終始変わらぬご指導とご鞭撻を賜りました早稲田大学教授 濱田政則先生、元 JFE シビル(株) 専務 榊豊和様に深く感謝し、心より御礼を申し上げます。また、本技術の発明者であるマイアミ大学山本督夫教授には長年にわたり熱心なご指導を賜りました。深く感謝いたします。

本研究の実験、現場計測、解析について協力して頂いた、JFE スチール(株) 田近久和氏、JFE シビル(株) 富重健一氏、田中真人氏、山田友秀氏、成海真一氏、元マイアミ大学 トム ナイ氏に感謝いたします。また、本研究を実施する機会を与えて頂きました旧川崎製鉄(株)、JFE シビル(株)の関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

これまでの研究業績を論文にまとめることを熱心に勧めて頂き、励まして頂いた元名古屋大学教授 杉崎隆一先生に深く感謝いたします。

最後に、本論文の執筆を励ましてくれた家族、友人に心より感謝いたします。

## 研究業績

種類別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者（申請者含む）
○論文	高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた模型土槽内部の可視化手法の開発 土木学会論文集C Vol. 67 (2011), No. 3, pp. 310-318 榑原淳一, 毛利栄征, 山本督夫
○論文	高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発 土木学会論文集C Vol. 65 (2009), No. 1 pp. 97-106 榑原淳一, 山本督夫
○論文	高周波数の波の振幅減衰を用いた構造物の非破壊診断 JFE技報, No. 27 2011年2月 pp. 37-pp. 41 榑原淳一, 米沢洋
○論文	音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術 JFE技報, No. 11 2006年4月 pp. 50-pp. 55 榑原淳一, 田中真人, 田近久和
○報文	高周波数の弾性波探査手法の新しい分野への適用 物理探査学会創立60周年記念シンポジウム「最新の物理探査適用事例集」、 pp. 187-192 (2008) 榑原淳一, 毛利栄征, 竹内睦雄, 杉山昌夫
○報文	ガイド波を用いた鋼構造物のき裂診断手法 検査技術, 15(12), 49-54, 2010-12 榑原淳一
○報文	音響トモグラフィを用いた高精度地盤探査 土と基礎 55(11), 17-19, 2007 榑原淳一
○報文	音響トモグラフィを用いた構造物設備診断システム 検査技術, Vol. 12, No. 4, p16-p21, 2007年4月 榑原淳一
○報文	音響トモグラフィを用いた新しい地盤評価技術 基礎工, Vol. 33, No. 9, p81-p83, 2005年9月 榑原淳一
○講演	Development of high resolution geological survey by high frequency seismic wave International Workshop on ICT in Geo-Engineering, 2012 Junichi Sakakibara
○講演	弾性波の振幅減衰を用いた地盤と地中構造物の非破壊計測 2010年度土木学会年次学術講演集 2010年 榑原淳一
○講演	減衰率トモグラフィを用いた地盤の可視化手法の開発 第45回地盤工学研究会, 2010年 榑原淳一
○講演	ガイド波を用いた鋼構造物の亀裂診断手法 2009年度日本建築学会大会学術講演会 2009年 榑原淳一
○講演	High resolution geological survey by high frequency seismic wave International Joint Symposium on Geodisaster Prevention and Geoenvironment in Asia, JS-Fukuoka 2009 J. Sakakibara, Y. Yamauchi, K. Kayukawa

種類別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者（申請者含む）
○講演	ガイド波を用いた鋼構造物の亀裂診断手法 第8回 評価・診断に関するシンポジウム，（社）日本機械学会 機械力学・計測制御部門 pp.153-155(2009) 榎原淳一
○講演	ガイド波を用いた新しい鋼構造物の非破壊診断手法 第62回 土木学会年次学術講演集，2008年 榎原淳一
○講演	ガイド波を用いた新しい鋼構造診断手法 平成20年度日本非破壊検査協会秋期講演会、pp.57-61(2008) 榎原淳一、山田知秀
○講演	音響波による地盤の見える化技術とその適用例 第62回 土木学会年次学術講演集，2007年 榎原淳一
○講演	音響トモグラフィによる“地盤の見える化” 第42回地盤工学研究会講演集，2007年 榎原淳一
○講演	音響波を用いた地下水探査 地下水地盤環境に関するシンポジウム2006講演集，p69-p72，2006年11月 榎原淳一、山内淑人
○講演	音響トモグラフィによる高精度地盤探査 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2006論文集，p43-p46，2006年12月 榎原淳一、山内淑人
○講演	音響トモグラフィを用いた大深度地下探査 地下空間開発における調査・計測に関するシンポジウム論文集，p17-p20，2006年5月 榎原淳一
○講演	音響トモグラフィによる立木断面の可視化 物理探査学会学術講演会講演論文集，113,383-384，2005年 榎原淳一、田中真人
○講演	Imaging of Homogeneity of the Sand Foundation by High Frequency Acoustic Method US-Japan Symposium on the Seismic Performance of Urban, Reclaimed and Port Areas - Full-Scale Experiment at Tokachi Port -, p166-169, 2003 I. Sakakibara, Y. Mohri, T. Yamamoto
論文	Estimation of the zone of excavation disturbance around tunnels, using resistivity and acoustic tomography Butsuri-Tansa, 57, 1, 62-69, Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2004 SUZUKI Koichi, NAKATA Eiji, MINAMI Masayuki, HIBINO Etsuhisa, TANI Tomonori, SAKAKIBARA Junichi, YAMADA Naoyuki
講演	音響トモグラフィを用いた浸透破壊現象における内部三相系構造の把握 第45回地盤工学研究発表会、466、E-07、2010年 柴田賢、榎原淳一、坂井宏隆、前田健一
講演	高周波数弾性波の振幅減衰を用いた地盤の緩み領域の把握 物理探査学会学術講演会、2010年 渡邊康夫、太田正彦、榎原淳一
講演	音響トモグラフィを用いた薬液注入による地盤改良の効果確認 土木学会第64回年次学術講演会 澤田亮、後藤幸司、粥川幸司、山内淑人、早川清、榎原淳一
講演	Application of acoustic tomography method to explore flow pass in hard rocks - Laboratory tests of granite blocks using high viscosity fluid SEGJ 118th (2008 Spring) Meeting Koichi Suzuki, Kenji Kubota, Junichi Sakakibara, Tomohide Yamada

種類別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者（申請者含む）
講演	音響波を用いたコンクリートの健全度評価—室内実験— 物理探査学会学術講演会講演論文集，117，126-129，2007年 山内淑人，高木栄一，佐藤智彦，尾崎利行，毛利栄征，榎原淳一
講演	変化の激しい支持地盤における地盤の見える化の適用例，音響トモグラフィによる経済的・効率的な設計施工例 第42回地盤工学研究会講演集，2007年 冨重健二，榎原淳一，田中真人
講演	物理探査法による堆積岩トンネル坑壁周辺のゆるみ域の可視化 日本応用地質学会研究発表会講演論文集，237-240，2004年 鈴木浩一，太山隆弘，中田英二，木方建造，榎原淳一
講演	超磁歪材を用いた遠距離大深度震源開発 物理探査学会学術講演会講演論文集，111，199-200，物理探査学会，2004年 吉村公孝，太久保秀一，林俊夫，榎原淳一
講演	音響透水トモグラフィによる大型模型地盤に均一性の可視化(その3) 第5回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，p103-108，2004年 毛利栄征，榎原淳一，山本督夫
講演	音響透水トモグラフィによる大型模型地盤の均一性の可視化 農業土木学会大会講演会講演要旨集，p528-529，2003年7月 毛利栄征，榎原淳一，山本督夫
講演	音響透水トモグラフィによる模型地盤の調査手法について 第38回地盤工学発表会，No. 38，p47-48，2003年7月 毛利栄征，榎原淳一，山本督夫
講演	音響トモグラフィ・比抵抗トモグラフィ法による坑道周辺岩盤の水理特性評価 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，32，2003，9-16，2003年 鈴木浩一，中田英二，南将行，日比野悦久，谷智之，榎原淳一
講演	弾性波の長距離伝搬を目指した高出力孔内震源開発 物理探査学会学術講演会講演論文集，107，113-114，2002年 吉村公孝，石橋勝彦，榎原淳一，土屋輝光
講演	弾性波の長距離伝搬を目指した高出力孔内震源開発(その2)小型試作器の性能と実証器の設計 物理探査学会学術講演会講演論文集，108，209-210，2002年 吉村公孝，太久保秀一，榎原淳一
講演	音響透水トモグラフィによる大型模型地盤の均一性の可視化 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，p95-100，2002年3月 毛利栄征，榎原淳一，山本督夫
講演	音響透水トモグラフィによる大型模型地盤の均一性の可視化 第37回地盤工学研究発表会講演要旨集，37，p85-86，2002年7月 毛利栄征，榎原淳一，山本督夫
講演	せん断土槽地盤の作成方法と均一性 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，p83-88，2001年3月 毛利栄征，榎原淳一，吉村公孝，山本督夫
講演	Crosswell tomography imaging of the permeability structure within a sandstone oil field Proceedings of SEGJ International Symposium, Vol.4(1998) Tokuo Yamamoto and Junichi Sakakibara
その他(講演)	音響波を用いた樹木内部診断機の開発(1)—計測方法の開発 第118回日本森林学会大会学術講演集，B14，2006年4月 榎原淳一，山添直也，中井堅
その他(論文)	地下水中の溶存ガス分析法の開発 地球化学，23，53-60，1989年 榎原淳一，杉崎隆一