

博士論文審査報告書

論文題目

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

申請者

榊原	淳一
JUNICHI	SAKAKIBARA

--

構造物の常時および地震時の安全性を向上させるためには精度が高く十分な量の地盤情報にもとづいた設計・施工が不可欠である。地盤調査の方法には、ボーリング等による直接的な調査法と、弾性波などの地中の伝播速度を用いた間接的な物理探査法がある。ボーリング等による方法は構造物の設計・施工に必要な情報を直接的に得られる利点があるが、広域にわたって地盤情報が必要な場合は、ボーリング数が増大し、調査費用が増加する。一方、物理探査による方法は広域の地盤を効率的に調査することが可能である反面、物理的探査より得られる地盤情報と構造物建設のために必要な強度や剛性など工学的情報と関連性が明確でないこと、また、物理探査による地盤情報の精度が構造物の設計・施工のために必要な精度を満足していないことが理由となって、十分に建設現場で活用されている状況にはない。本研究は物理探査法のうち、孔間弾性波トモグラフィ法に着目し、新たな弾性波の発信・受信方法を開発するとともに、速度と減衰率の2種類の観測データを統合的に解釈することにより、精度と信頼性の高い弾性波トモグラフィを開発し、その有効性を建設現場および室内実験により検証したものである。

第1章では、研究課題として現行の物理探査の方法と建設現場への活用の問題点を整理し、精度の向上と測定結果の解釈の容易さを図ることが必要だとした。このため、発信波の周波数と振幅を正確に制御する方法、および受信波データの解釈精度の向上などが課題であり、これらの解決に建設実務に活用し得る実践的な手法の開発が必要であることを述べている。

第2章では、新たな発信波と発信装置および受信システムの高度化を行って物理探査の精度と信頼度の向上を図った。発信波に正弦波の位相をランダムに反転させた疑似ランダム波を用いることにより送信エネルギーを増大させた。この発信手法は周波数の振幅を正確に制御出来るという特質を有している。さらに、発信器として圧電素子型電源を用いる方法を開発し、入力信号に忠実な高精度の発信を可能とした。これらの発信装置を用いた現場試験により、従来は難しいとされていた発振周波数 1kHz の波が 100m 以上伝播することを確認した。さらに、受信波の到達時間と電圧の読みとり結果をもとに、弾性波速度と減衰率の2次元分布を出力するシステムを開発した。

第3章では、第2章で提案した物理探査手法をフィリピン共和国マニラ港の栈橋建設工事に伴う杭基礎構造物の支持調査で適用し、深度方向に 8m もの不陸のある支持層を正確に把握可能であることを確認した。また、愛知県中部国際空港の立体駐車場建設に伴う杭基礎構造物の支持層調査に適用した事例では、3次元的支持層構造を良好な精度で把握できることを確認した。本建設工事では第2章で開発した物理探査法の効果の検証を行うため、“ボーリング調査のみによる設計”を行い杭基礎工事に関わる施工数量を計算し、

本探査法によって行われた基礎工事の施工数量と比較した。この結果から、ボーリング調査のみによる施工に比べて杭長が 14% 削減できていること、材料を含め施工費を 40% 削減できたことを示した。本章で示した地盤情報の可視化により、効率的な設計のみならず施工中の安全性確保にも貢献することができることを示した。

第 4 章では、波動の減衰率に着目した新たなトモグラフィ手法の開発を行った。本手法は、弾性波速度が同一の土質、岩質であっても間隙、飽和度、拘束圧、粒径および亀裂、風化などの影響を受けて変化するため、弾性波探査の結果の解釈が困難になることおよび、弾性波の振幅減衰が伝播経路における散乱や反射の影響を受けることに着目した手法である。この手法の妥当性を小型模型土槽および岩石ブロックにより確認した。小型模型土槽を用いた実験は地中障害物の探査を目的としており、標準砂中に埋設した鋼棒や木片の位置と大きさを本方法により高減衰率部として把握できることを示した。また、岩石ブロックを用いた実験から弾性波速度のみでは把握できない幅 2mm の亀裂を高減衰率部として検出できることを示した。これらの実験結果から、減衰率トモグラフィが地盤中の埋設物の調査や局所的な緩み領域、さらに岩盤中の亀裂調査に対しても有効であることを示した。

第 5 章では、模型地盤の加振による液状化現象など経時的な地盤物性の変化を、本研究で開発した。弾性波および減衰率によるトモグラフィで探査し、この結果を可視化する技術の開発を行った。模型地盤による振動実験では製作した地盤の均一性や加振による物性値の変化を時刻的に把握することが実験結果を解釈する上で重要である。可視化技術の有効性を砂地盤模型の液状化実験により検証した。相対密度の異なる 3 層の模型地盤を直径 1.75m、深さ 1.81m の土層内に作成し、これを加振により液状化させた。弾性波速度と減衰率を用いたトモグラフィによって初期状態から液状化発生さらに液状化後の砂粒子の堆積の過程における物性値の変化を探査した。この結果、初期の模型地盤の層構成および液状化中と液状化終了後再堆積した土層の物性値を効果的に可視化出来ることを確認した。探査した物性の測定精度は加振前後に実施したコーン貫入試験の結果と比較することにより確認している。

第 6 章では、速度と減衰率を用いた新しい地盤調査手法の提案を行った。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、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。これらの情報を同時に解釈するために速度と減衰率を用いた地盤状態の判定例を作成し、これまでは判断が難しかった複雑な地盤調査を行うことが可能となることを示した。また、減衰率に着目することでボーリング調査では難しい

障害物調査を行うことが可能となることを示した。千葉県浦安市の埋め立て地における構造物基礎建設のための地盤調査での事例では、支持層の把握のみならず礫層の分布と地中ガスの存在を把握し、施工時の安全性確保に貢献した。また、シンガポール共和国の地下鉄建設のためのシールド工事にとともなう風化花崗岩の亀裂調査での事例では、花崗岩の風化程度の判定および岩盤内の亀裂の把握を行い、設計と施工の実務に貢献した。

以上、要するに本論文は、弾性波トモグラフィによる物理探査の精度と適用範囲を広げるため、疑似ランダム波の活用と発信用圧電素子の開発および受信システムの開発を行い、その効果を建設現場での活用によって実証したものである。さらに減衰率に着目したトモグラフィを開発し、地中の障害物や岩盤中の亀裂の探査に活用可能であることを示すとともに、これらの探査結果を経時的に可視化する技術を開発した。本研究は地盤工学、特に地盤の探査技術の発展に貢献するものであり、博士（工学）の学位を授与するにふさわしいと判断する。

2013年10月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	濱田政則
	副査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	赤木寛一
		早稲田大学特任教授	Ph.D. (Geophysics) (コロラド鉱山大学)	斎藤章