

# 博 士 論 文 概 要

## 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

2013 年 7 月

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を知る必要がある。地盤を調査する手法はボーリング調査と物理探査手法の 2 つに大別できる。ボーリング調査は原位置の地盤を直接調査できるという長所と、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とボーリングの間は推定せざるを得ないという短所がある。一方、物理探査手法は連続的な地盤情報を得られるという長所と、地盤物性を間接的に把握しているにすぎないため精度や信頼性が低いという短所がある。これらボーリング調査と物理探査は互いの短所を補完しうるものであると考えられるが、実際にはボーリング調査のみが行われる場合が多い。この理由として、①現場に必要な精度と物理探査の精度が一致しないこと、②工学的に必要な物性値と物理探査から得られる物性値との関連性が明確でないため調査結果の解釈が難しいこと、の 2 点が上げられる。この問題を解決するために多くの研究がなされているが、これまでは十分な成果が上がっているとは言い難い。

本研究は、これら 2 つの問題点、“調査精度の向上と容易な解釈”を実現する新しい調査手法を開発することを目的として実施した。このために物理探査手法のうち孔間弾性波トモグラフィ法に着目し、上記の 2 つの問題毎に議論を進めた。前者に対しては、まず、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し、そしてこの問題を解決する計測方法を開発した。実現場における調査結果を元にして精度の検証を行い、その効果について定量的に検証した。一方、後者に対しては、従来の弾性波トモグラフィ手法の結果の解釈に関する問題点をまとめ、そして複数のデータを組み合わせる解析方法を提案した。次に、数値計算や模型土槽実験による解析方法の妥当性を検証した。さらに、円型模型土槽による砂の均一性評価実験の結果を元に調査結果の検証を行った。最後に、速度と減衰率を用いた新しい地盤調査手法を提案し、現場調査の結果を示しながら効果についてまとめ、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。

第 2 章において、最初の問題である“探査精度”に関して、既存の震源の原理と発振波形(衝撃波と連続波)について整理し、エネルギーの大きな衝撃波は周波数制御ができないが故に精度の向上が難しいことを示した。一方、出力エネルギーは小さいが周波数制御が容易な圧電素子型震源と連続波の一つである疑似ランダム波を組み合わせることで、高周波数の弾性波を用いた適切な伝播距離による調査を実現できることを示した。この知見を元に計測システムの構築と性能確認を行い、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。

第 3 章において、現場調査の結果を元に効果の検証を行った。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の適用事例を元に調査結果と基礎杭の施工記録を比較し、深度方向に 8m も不陸した支持層を正確に把握できていることを確認した。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おける事例では、3 次元的に得られた調査結果と基礎杭の施工記録を比較し、ボーリング調査だけでは把握できない複雑な支持層構造を正確に把握できていることを確認した。さらに効果の検証を行うために“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、本調査の結果に基づい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% 削減できたことが分った。ボーリング調査のみに基づく設計はボーリング間の地層を推定せざるを得ないため、「過剰に安全を見込んだ設計」が必要となる。しかし、ボーリング調査に加えて本手法による正確な調査を行うことで、この過剰設計や誤った設計による追加工事が不要となり、結果として工費全体を削減できる。さらに、地盤情報を可視化することは、効率的な設計のみならず施工中の安全、施工後の安心、さらに顧客の安心感にも貢献することができる。

第 4 章において、2 つめの問題である“探査結果の解釈”を検討した。弾性波速度だけが得られる既存の弾性波探査では、例えば緩い砂と圧密した粘土は速度の逆転が起きるなど、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。さらに、ボーリング調査では把握が難しい地中障害物の探査は弾性波速度だけでは難しいことを数値計算により示した。一方、弾性波の振幅減衰は媒質の減衰特性や伝播経路における散乱や反射の影響を受けるため、岩石強度や亀裂の存在、転石や障害物の把握に適用できると考えられた。そこで数値計算による減衰率トモグラフィの妥当性の検証、また、小型模型土槽や岩石ブロックによる実証実験を行った。これに先立ち、50cm 立方程度の寸法を持つ模型土槽や岩石ブロック実験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解析精度の問題が解析に影響を与えないことを数値計算で確認した。小型模型土槽を用いた実験は地中障害物の把握を目的として実施した。実験結果から飽和した標準砂中に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が分った。また、局所的に緩くなっている部分では減衰率が大きくなることが分った。岩石ブロックを用いた実験は岩盤中の亀裂探知を目的として実施した。実験結果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が分った。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有効であることが分った。

第 5 章において、本手法による円型模型土槽内部の砂の不均一性の可視化実験を行った。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は、現地でのモニタリングや数値解析と共に正確な模型土槽実験は重要な手段である。過去の大地震クラスの振動による実大施設や構造物の挙動を把握することは困難であるが、振動台上に設置した模型土槽を用いることで地盤や構造物の変状を把握できるからである。模型土槽実験を行うにあたり、設置した砂の初期条件の把握、すなわち均一性の確認や加振による変化を把握することは重要である。そこで本手法を用いて模型土槽内部の可視化を行うこととした。実験には内寸法で直径 1.75m、高さ 1.81m の円型模型土槽を用い、内部には霞ヶ浦標準砂を設置した。この模型土槽は底面に設置した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。また、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で砂層の締固めを行える。実験の結果から、初期状態では局所的に緩い状態が存在して 3 層構造となっていた土槽が、加振による砂の締固めが進むにつれ均一になり層構造が徐々に消失していくことが分った。この局所的に緩い部分は低速度、高減衰率部として現れていることを同時に実施したコーン貫入試験の結果から確認した。引き続き実施した、地盤内部の障害物探査を目的とした凍結砂ブロックの可視化実験結果からは、速度よりも減衰率の方が正確にブロックの位置や寸法を把握できることを確認した。以上のことから本手法が模型土槽内部の均一性の可視化や障害物探査に有効であることを示した。

第 6 章において、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できることを示した。千葉県浦安市の埋め立て地における基礎構造物建設を目的とした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、施工の安全確保に貢献できた。また、シンガポール共和国の地下鉄建設を目的としたシールド工事に伴う風化花崗岩の亀裂調査での事例では、提案した判定法に基づき閾値を決め、花崗岩の風化程度の判定だけでなく、岩内部の亀裂の把握を行い、設計や施工に対して貴重な助言を行うことができた。以上のことから開発した手法を用いることで、従来よりも高精度で、かつ解釈の容易な地盤情報を得られることを結論として得た。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏 名 榊原淳一 印

(2013年 4月 現在)

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）
a. 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, No. 3, pp.310-318、2011.9 <u>榊原淳一</u> ，毛利栄征，山本督夫
a. 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, No. 1 pp.97-106、2009.2 <u>榊原淳一</u> ，山本督夫
b. 総説○	音響トモグラフィを用いた高精度地盤探査 土と基礎 <小特集>地盤調査・計測における先端技術、55(11)，17-19，2007.11 <u>榊原淳一</u>
b. 総説○	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-p83，2005.9 <u>榊原淳一</u>
c. 講演○	Development of high resolution geological survey by high frequency seismic wave International Workshop on ICT in Geo-Engineering、2012.5 <u>Junichi Sakakibara</u>
c. 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 土木学会第64回年次学術講演集 2010.9 <u>榊原淳一</u>
c. 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 2010.9 澤田亮，後藤幸司，粥川幸司，山内淑人，早川清， <u>榊原淳一</u>
c. 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、2010.9 渡邊康夫，太田正彦， <u>榊原淳一</u>
c. 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回地盤工学会，2010.8 <u>榊原淳一</u>
c. 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回地盤工学会研究発表会、466、E-07、2010.8 柴田賢、 <u>榊原淳一</u> 、坂井宏隆、前田健一

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

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）
c. 講演	High resolution geological survey by high frequency seismic wave International Joint Symposium on Geodisaster Prevention and Geoenvironment in Asia, JS-Fukuoka 2009.12 <u>J. Sakakibara</u> , Y. Yamauchi, K. Kayukawa
c. 講演	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 60 周年記念シンポジウム「最新の物理探査適用事例」、pp. 187-192、2008. 9 <u>榊原淳一</u> ，毛利栄征，竹内睦雄，杉山昌夫
c. 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. 9 <u>榊原淳一</u>
c. 講演	音響トモグラフィによる“地盤の見える化” 第 42 回地盤工学会研究会講演集，2007. 7 <u>榊原淳一</u>
c. 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 回地盤工学会研究会講演集，2007. 7 富重健一， <u>榊原淳一</u> ，田中真人
c. 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. 12 <u>榊原淳一</u> ，山内淑人
c. 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. 11 <u>榊原淳一</u> 、山内淑人
c. 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，p 17- p 20，2006. 5 <u>榊原淳一</u>
c. 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 4 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. 3 毛利栄征, <u>榊原淳一</u> , 山本督夫
c. 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. 7 毛利栄征， <u>榊原淳一</u> ，山本督夫

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

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）
c. 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2) 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, 2003.3 毛利栄征, <u>榊原淳一</u> , 山本督夫
c. 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, 2002.7 毛利栄征, <u>榊原淳一</u> , 山本督夫
c. 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, 2001.3 毛利栄征, <u>榊原淳一</u> , 吉村公孝, 山本督夫
c. 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 <u>Junichi Sakakibara</u>
e. その他	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- pp. 41、2011.2 <u>榊原淳一</u> , 米沢洋
e. その他	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 <u>榊原淳一</u>