

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06173

研究課題名(和文) 磁歪型弾性波入力・受信装置によるコンクリート内部欠陥の新しい非破壊探査手法の開発

研究課題名(英文) Development of New Non-Destructive Inspection Method for Defects of Concrete by Magnetostrictive Elastic Wave Input / Receiving Device

研究代表者

内田 慎哉 (Shinya, UCHIDA)

立命館大学・理工学部・任期制講師

研究者番号：70543461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、コンクリート内部の欠陥として、(1)あと施工アンカーボルト固着部の状況、(2)PCグラウト充填状況、(3)RC床版内部の水平ひび割れの3種類を対象として、それぞれの欠陥に適した「磁歪型弾性波入力・受信装置」を開発し、適確に欠陥を評価する手法を構築することが目的である。その結果、いずれの対象においても、開発した「磁歪型弾性波入力・受信装置」により測定した弾性波伝搬速度、波形振幅、周波数特性から、欠陥を適切に評価できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, as defects of concrete, focused on three kinds of defects (1) post-installed anchor bolts, (2) PC grout filling condition, (3) horizontal crack in RC slab, it is aimed to develop "magnetostrictive elastic wave input / receiving device" suitable for this purpose and to establish a method for accurately evaluating defects. As a result, it was clarified that defects can be appropriately evaluated from elastic wave propagation velocity, waveform amplitude and frequency characteristics measured by "magnetostrictive elastic wave input / reception device" developed in any subject.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート 非破壊検査 弾性波 磁歪 あと施工アンカーボルト PCグラウト RC床板 内部欠陥

1. 研究開始当初の背景

コンクリートで用いられる弾性波法は、弾性波の入力や受信方法により超音波法、衝撃弾性波法、打音法、AE法に分類される。超音波法、衝撃弾性波法、打音法は、評価したい対象（ひび割れや空隙等）に狙いをさだめた上で、コンクリート表面から探触子、ハンマ、鋼球打撃によりコンクリート内部に弾性波を入力する。これら3つの手法では、入力した弾性波は、コンクリート中を伝搬する過程で、評価したい対象以外の微細なひび割れや鉄筋等により波の持つ特徴が変化する。そのため、波の特徴の変化が評価対象によるものかそれ以外かを区別することが困難であり、実用面での課題がある。一方、AE法は、評価対象となるひび割れそのものからの信号を基に評価を行える意味で、得られる情報は確かに評価対象からのものであるという強みを持つ反面、全く受動的な手法であり、対象から信号が発信されない限り対象物の評価を行うことができない。

このような背景を受け、若手研究(B)やその他の研究助成を受けて、非接触・非破壊で、PCグラウト未充填部を評価可能な「非接触衝撃弾性波法」や磁歪素子を用いた一体型の弾性波入力・受信装置の開発に取り組んできていた。これらをさらに発展させることにより、コンクリート内部の欠陥に適した磁歪型弾性波入力・受信装置を開発できるのではないかとこの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、コンクリート内部の欠陥として、(1)あと施工アンカーボルト固着部の状況、(2)PCグラウト充填状況、(3)RC床版内部の水平ひび割れの3種類を対象として、まず、それぞれの欠陥に適した「磁歪型弾性波入力・受信装置」の試作・改良を、動磁場・弾性波動連成解析に基づき行う。続いて、各欠陥を模擬した供試体に対して、上記で開発した「磁歪型弾性波入力・受信装置」を用いた計測を行い、各内部欠陥の検出を試みるとともに、評価結果によっては装置の再改良を行う。最後に、開発した「磁歪型弾性波入力・受信装置」と「高度な信号処理技術」を併用し、実構造物での欠陥検出が可能で、かつ、従来の非破壊試験方法では評価困難な内部欠陥も検出することができる「新しい非破壊探査手法」の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1)あと施工アンカーボルト固着部の状況

金属系あと施工アンカーボルトを対象として、「磁歪型弾性波入力装置」によりアンカーボルトを加振し、レーザードップラー振動計によりボルトの振動を受信する測定方法から、コンクリート内部の欠陥として、コンクリートを穿孔する際に生じやすい施工不良（穿孔径や深さが規定より大きいもの）を対象に、その評価を行う方法について検討

した。

(2)PCグラウト充填状況

磁性体に巻き付けた導線に電流を流すことで大きな歪みを生じさせることが可能な磁歪と水の非圧縮性流体としての特性に着目し、まず、コンクリート中へ弾性波を入力することが可能な「磁歪型弾性波入力装置（ウォーターカップリング磁歪センサ）」を作製した。続いて、この装置の特徴を把握するとともに、PCグラウト充填状況の評価への適用可能性についての検討も併せて行った。

(3)RC床版内部の水平ひび割れ

簡易で迅速に計測することが可能な「磁歪型弾性波入力・受信装置（電磁ハンマと磁歪センサを搭載したユニットを3台連結した平地走行ロボット）」を開発し、道路橋RC床版に生じる水平ひび割れを模擬したコンクリート供試体を対象に計測を行い、非破壊により対象欠陥の検出を試みた。

4. 研究成果

(1)あと施工アンカーボルト固着部の状況

磁歪型弾性波入力装置の概要

磁歪型弾性波入力装置の概要を図1に示す。励磁コイル（外径48mm、内径32mm、厚さ16mm、高さ30mmの円筒形状）にパルス状の電流を流すことによりコイル周辺に瞬間的に磁場（動磁場）を発生させ、これにより生じる電磁力により、アンカーボルトを非接触で振動させる。この方法では、アンカーボルト頭部の振動をレーザードップラー振動計（LDV計）により照射することで、アンカーボルトの振動に伴って生じる弾性波を捉え、これを分析することにより、アンカーボルトの固着状況を非破壊で評価することができる。

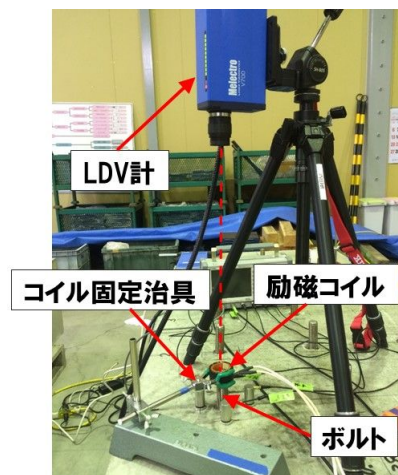
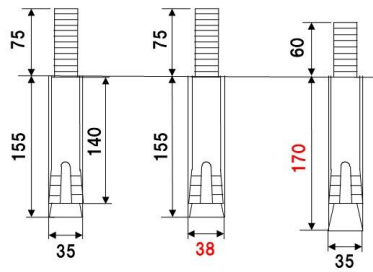


図1 磁歪型弾性波入力装置の概要

実験概要

コンクリート供試体の寸法は、縦900mm×横1800mm×高さ450mmである。金属系あと施工アンカーの施工パターンを図2に示す。ボルト（M24，SUS304）の長さを230mmとし、標準施工、穿孔を大きくしたもの（下穴径拡大）、穿孔深さが深いもの（打込み不良）の3



(a) 標準施工 (b) 下穴径拡大 (c) 打込み不良
図2 施工パターン

ケースを設定した。標準施工は、コンクリートを直径 35mm、深さ 155mm で穿孔し、専用の治具を用いてスリーブをコンクリート表面まで打込み、スリーブを拡張させることで適切な施工を再現した。これを基準に、コンクリート部分の直径 38mm に穿孔したケースを下穴径拡大とした。深さを 170mm に穿孔することでスリーブの打込み不足を模擬したケースを打込み不良とした。標準施工、下穴径拡大および打込み不良の施工パターンごとにアンカーボルトを 6 本設置し、施工状態のばらつきを把握した。

図1に測定状況を示す。コイル高さ方向中心部にボルト上端が一致するように励磁コイルを設置した。励磁コイルに瞬間的に電流を流し、磁場を発生させることによりアンカーボルトを振動させた。ボルトの振動に伴って生じた弾性波は、ボルト頭部に設置したLDV計により受信した。LDV計で測定した信号は、サンプリング時間間隔 0.1μsec で電圧の時刻歴波形として波形収集装置に記録した。いずれの施工パターンにおいても、測定回数を 5 回とし、評価指標のばらつきを把握した。

実験結果および考察

図3に、波形エネルギーと施工パターンとの関係を示す。いずれの供試体においても、測定回数 5 回の波形エネルギーの平均値および最大・最小の範囲をエラーバーで同図に示している。この図より、施工不良の場合、波形エネルギーが大きくなる傾向がみられる。特に、打込み不良において、標準施工と比較すると、波形エネルギーは 2 倍以上大きくなっている。これより、施工パターンごとに得られる波形エネルギーを相対的に比較することで、アンカーボルトの施工不良を検知できる可能性があることが明らかとなった。

図4に、施工パターンごとのピーク周波数を示す。図より、標準施工のピーク周波数の平均値は 5.4kHz、下穴径拡大は 2.5kHz、打込み不良は 3.9kHz であった。標準施工の理論値（縦振動）と測定値（平均値）は概ね一致している。これに対して、施工不良の場合は、拡張部と母材コンクリートの固着力が弱くなるため、ボルトの固有振動数が小さくなったと考えられる。

以上のことから、受信波形の波形エネルギーと周波数特性に着目すれば、下穴径拡大や

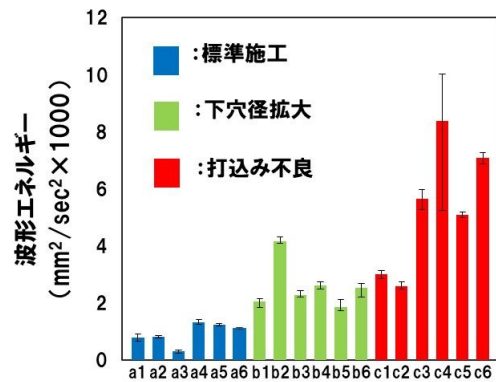


図3 波形エネルギーと施工パターン

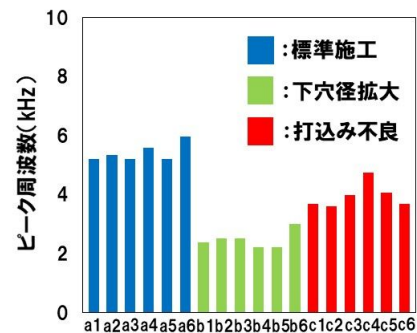


図4 ピーク周波数と施工パターン

打込み不良を施工不良として検出できることが明らかとなった。

(2) PC グラウト充填状況

磁歪型弾性波入力装置（ウォーターカップリング磁歪センサ）の概要

図5に開発したウォーターカップリング磁歪センサ（質量：4.8kg）の外観を示す。この装置は、水を貯めておくための「ウォーターチャンバー」、水を駆動するための「磁歪センサ」、磁歪センサの設置位置を微調整するための手動タイプの「xy軸ステージ」、装置をコンクリート表面に固定するための「吸着機構」の4つから構成されている。なお、「磁歪センサ」は、強磁性体コア（厚さ 0.35mm のコの字型のエレメントを 51 枚積層）と導線（直径 1mm の導線を 15 ターン巻き付け）から構成されている。導線に、電流発生装置を用いて、印加電圧：150V、パルス幅：5μs の電流（ピーク値（絶対値）：15A）を流すと、強磁性体コアが磁化する。磁化過

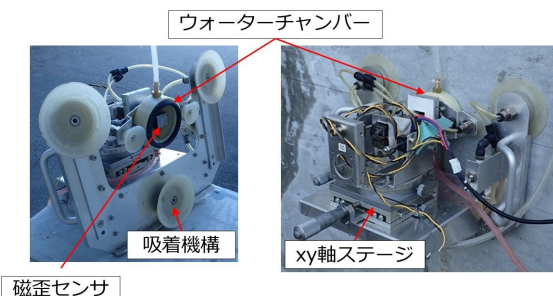


図5 ウォーターカップリング磁歪センサ

程において、強磁性体の結晶が磁化方向に歪む（磁歪）。この歪みにより、ウォーターチャンバー内に水が発信子として駆動し、コンクリート表面に衝撃を与えることができる。

実験概要

磁歪センサの振動特性を把握するため、「強磁性体コア」の表面に加速度センサを貼付けた。図6に計測状況を示す。

また、PCグラウト充填状況を把握するため、高さ1000mm×幅300mm×奥行き1000mmのコンクリート供試体を2体作製した。いずれも、コンクリート表面から深さ50mmの位置に、外形63mmのスパイラルシースが1本埋設されている。シースの内部には、呼び径32mmのPC鋼棒をそれぞれ挿入している。各シースに対して、PCグラウトを完全に充填したものと充填していないものをそれぞれ用意した。ウォーターカップリング磁歪センサは、シースのかぶり50mm側のコンクリート表面にエアコンプレッサーを使用して吸着させた。吸着後、ウォーターチャンバー内を、真空デシケーターにより脱気した水で満たした。その後、強磁性体コアの表面とコンクリート表面との距離が5mmとなるように、xy軸ステージにより磁歪センサの位置を微調整した。一方、弾性波の受信側である加速度センサは、ウォーターカップリング磁歪センサを設置したコンクリート表面と対向する面に、両センサの中心が一致するように設置した。

実験結果および考察

図7に、周波数スペクトルを示す。図より、17kHzと18kHzに単独の鋭いピークが出現していることがわかった。したがって、このような特性を有する弾性波をコンクリート中へ入力しているものと推察できる。

図8に、充填供試体および未充填供試体のシース上で得られた弾性波伝搬速度の10回の平均値とエラーバーで最大値と最小値をそれぞれ示している。図より、充填供試体および未充填供試体におけるばらつきは、約160m/sと約180m/sであった。一方、充填および未充填供試体での平均値を比較すると、未充填供試体での弾性波伝搬速度が充填供試体でのそれよりも小さくなった。弾性波の伝搬経路内にPCグラウト未充填部が存在するため、弾性波が迂回して伝搬した結果、弾性波伝搬速度が小さくなったと考察できる。

以上のことから、ウォーターカップリング磁歪センサにより測定した弾性波伝搬速度から、PCグラウト充填状況を評価できることが明らかとなった。

(3) RC床版内部の水平ひび割れ

磁歪型弾性波入力・受信装置（平地走行ロボット）の概要

図9に、電磁ハンマを示す。直径15mmの打撃体が内蔵されており、1s間隔で一定の打撃力でコンクリートを打撃することが可能である。

図10に、振動センサを示す。振動センサ

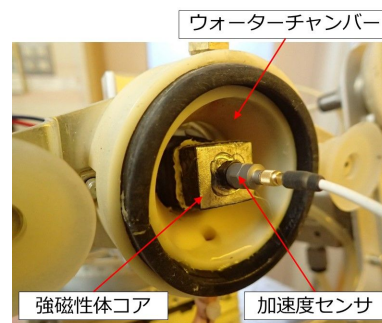


図6 計測状況

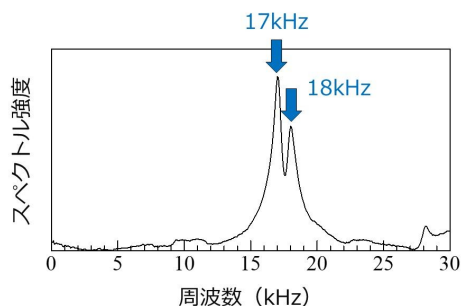


図7 周波数スペクトル

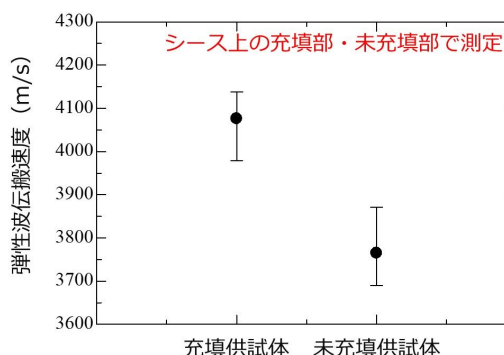


図8 充填供試体および未充填供試体のシース上で得られた弾性波伝搬速度

には、RC床版を走行するための直径30mmのローラーが付与されている。振動センサには、磁性体コアおよび導線から構成される磁歪センサが内蔵されており、磁歪センサとローラーが内部で連結されている。なお、磁歪センサ単体の周波数応答は、インピーダンス/ゲイン・フェーズアナライザを用いて、peak-to-peak150mV、1~500kHzのスweep波により計測を行ったところ、1~295kHzの範囲においてフラットな感度特性であった。

図11に、一体型ユニットを示す。ユニットの寸法は、長さ134mm×幅92mm×高さ123mmである。ユニットの内部には、電磁ハンマ(図9)と振動センサ(図10)が設置されている。

図12に、平地走行ロボットの全景および裏面を示す。ロボットの寸法は、長さ700mm×幅500mm×高さ230mmである。ロボットの内部では、一体型ユニット(図11)が3台連結されている。ロボットの質量は約29kgである。また、各ユニット間の距離は140mmで設置している。走行速度は、最大で400mm/s



図9 電磁ハンマ

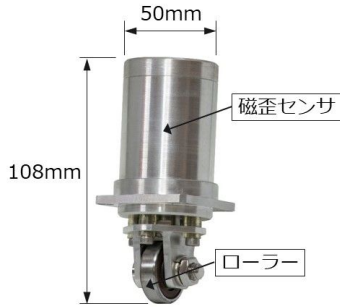


図10 振動センサ



図11 一体型ユニット

である。

実験概要

図13に、コンクリート供試体および人工欠陥の配置状況を示す。RC床版を模擬したコンクリート供試体の寸法は、長さ2000mm×幅2000mm×高さ180mmである。供試体の内部には、計測するコンクリート上面から深さ32mmおよび142mmの位置に、直径100、200および400mm（厚さ5mmの発砲スチロール）の水平ひび割れを模擬した人工欠陥をそれぞれ埋設した。

図12に示す平地走行ロボットで、コンクリート供試体上面を走行し、計測を行った。

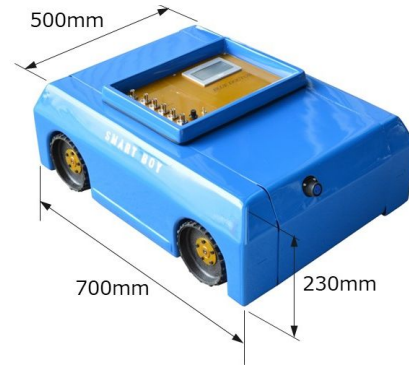
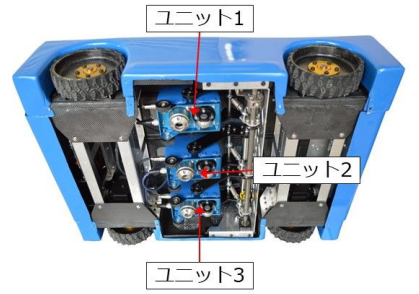


図12 平地走行ロボット

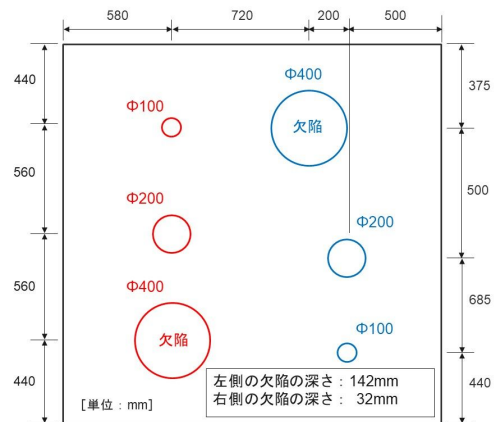


図13 コンクリート供試体および人工欠陥の配置状況

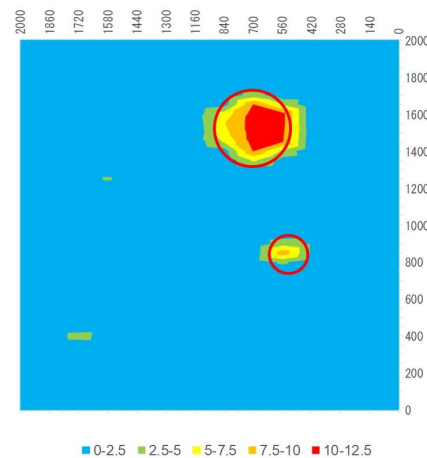


図14 コンター図

具体的には、ユニット1の電磁ハンマで打撃をし、ユニット1~3の振動センサで信号を受信した。その後、ユニット2の電磁ハンマで打撃をし、その信号をユニット1~3で受信、最後にユニット3で同様に測定した。

実験結果および考察

図14に、コンター図を示す。なお、コンター図は、受信波形の正側の最大振幅値に基づき作成した。図より深さ32mmで直径200mmおよび400mmの人工欠陥がある位置の最大振幅値が、その他の箇所のそれと比較して大きくなっていることがわかる。したがって、評価可能な人工欠陥は深さ32mmで直径200mmおよび400mmに限定されるものの、人工欠陥を視覚的に把握することが可能であった。

以上のことから、一体型ユニットを3台連結した平地走行ロボットによる測定から、RC床板内部の人工欠陥を視覚的に把握できることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

久保元樹, 内田慎哉, 岩野聡史, 野崎峻: コンクリート表面に設置した加速度計で測定した応答波形から鋼球とコンクリートの接触時間を推定する方法の実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 2018. (査読有り)

久保元樹, 内田慎哉, 岩野聡史, 森和也, 炭谷浩一: 鋼球打撃によりコンクリートへ入力される弾性波の周波数特性に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.515-520, 2017. (査読有り)

野崎峻, 内田慎哉, 松橋貴次, 栗原陽一, 神田利之: 電磁ハンマと磁歪センサを搭載したユニットを3台連結した平地走行ロボットによるRC床版内部の欠陥検出方法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.665-668, 2017. (査読有り)

三谷宗平, 内田慎哉, 岩野聡史, 久保元樹: 周波数解析方法の違いが衝撃弾性波法によるコンクリートの圧縮強度および部材厚さの評価に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1957-1962, 2017. (査読有り)

内田慎哉: ウォーターカップリング磁歪センサの開発 コンクリートの内部欠陥評価への挑戦, 超音波 TECHNO, Vol.29, No.3, pp.75-79, 2017. (査読無し)

内田慎哉, 松橋貴次, 手塚正道, 栗原陽一, 湊利行: ウォーターカップリング磁歪センサによるコンクリートの弾性波伝搬速度の測定とPCグラウト充填状況の評価への適用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告

集, 第16巻, pp.113-118, 2016. (査読有り)

山本貴大, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 寺澤広基, 林本和也: 金属系あと施工アンカーボルト固着部の電磁パルス法による非破壊評価手法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第16巻, pp.223-226, 2016. (査読有り)

内田慎哉, 久保元樹, 岩野聡史, 山下健太郎: 衝撃弾性波法によるコンクリートの内部欠陥の検出に関する理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2121-2126, 2016. (査読有り)

[学会発表](計4件)

内田慎哉, 野崎峻, 松橋貴次, 栗原陽一, 湊利行: ウォーターカップリング磁歪センサによるPCグラウト充填状況の非破壊評価手法に関する基礎的研究, 日本非破壊検査協会平成29年度秋季講演大会, 2017.

野崎峻, 内田慎哉, 松橋貴次, 栗原陽一, 神田利之: 平地走行型ロボットを用いたコンクリート内部欠陥の非破壊評価手法, 平成29年度全国大会 土木学会第72回年次学術講演会, 2017.

野崎峻, 内田慎哉, 木村貴圭: 衝撃弾性波法による計測条件の違いがコンクリートの版厚推定に与える影響, 平成28年度全国大会 土木学会第71回年次学術講演会, 2016.

野崎峻, 内田慎哉, 木村貴圭: 計測条件の違いが衝撃弾性波法によるコンクリートの版厚推定に与える影響, 平成28年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2016.

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 弾性波送受信プローブ, これを用いた測定装置及び測定方法

発明者: 松橋貴次, 栗原秀夫, 栗原陽一, 内田慎哉

権利者: 株式会社オンガエンジニアリング

種類: 特許

番号: 2017-078026号

出願年月日: 平成29年4月11日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

内田 慎哉 (UCHIDA Shinya)

立命館大学・理工学部・任期制講師

研究者番号: 70543461