

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820194

研究課題名(和文)非接触衝撃弾性波法によるコンクリート表層品質・内部欠陥の弾性波トモグラフィの開発

研究課題名(英文)Development of Non-Contact Impact Elastic Wave Methods for Surface Layer Quality and Voids of Concrete by Elastic Wave Tomography

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、あと施工アンカーボルト固着部の接着剤充填状況(内部欠陥)を対象として、解析により励磁コイルの理論設計を行い、この結果に基づき励磁コイルを試作した。続いて、励磁コイルとレーザドップラ振動計を組合わせた「非接触衝撃弾性波法」を開発し、接着剤充填状況の評価を試みた。その結果、アンカーボルト固着部の充填率が25%程度以下の低いものを検出できる可能性があることを明らかにした。同様の手順で、非接触衝撃弾性波法によりPCグラウト充填評価も試みた。その結果、励磁コイルの性能を適切に設定することができれば、グラウト充填率を評価できる可能性があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This study, first, focuses on the level of adhesive filling around a post-installed anchor bolts in concrete. In order to evaluate the level of adhesive filling qualitatively and non-destructively, exciting coil designed by elastic wave simulation. Subsequently, non-contact impact elastic wave methods developed by combine with exciting coil and laser Doppler vibrometer, attempted the level of adhesive filling. As a results, for detecting bolts with a low adhesive filling level of 50% or less, focusing on whether peaks would appear or not due to multiple reflections (due to the resonance of longitudinal waves) is effective. By using a similar process, the feasibility of non-contact impact elastic wave methods for evaluating grouting condition in tendon ducts of existing prestressed concrete members was investigated. As a results, it is confirmed that the proposed methods are effective to be employed on existing PC members.

研究分野：工学

キーワード：鉄筋コンクリート 非破壊試験 非接触衝撃弾性波法 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、打音法およびAE法に分類される。このうち超音波法、衝撃弾性波法および打音法は、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超音波探触子、ハンマーあるいは鋼球打撃によりコンクリート内部に弾性波を入力する手法である。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播する過程で、評価したい対象以外の微細なひび割れやジャンカや鉄筋など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な場合が多く、実用面での課題は少なくない。一方、AE法は、評価の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、対象から何らかの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。

このような背景のため、上記の弾性波法におけるジレンマを解決すべく、両者のメリットのみを持ち合わせた「非接触衝撃弾性波法」を開発する着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、まず、動磁場・弾性波動解析により計測対象に応じた装置（励磁コイル/電源装置）の理論設計を行い、この結果に基づき装置を試作する。続いて、これら装置とレーザドップラ振動計を組み合わせた「非接触衝撃弾性波法」を開発する。開発した手法により、実物相当寸法のPC桁供試体を対象にグラウト充填評価（内部欠陥）の検討も併せて行う。最後に、非接触衝撃弾性波法を用いて弾性波トモグラフィ計測も実施し、かぶりコンクリート部分の品質（緻密性）の評価、あるいは従来の非破壊試験方法では評価が困難な内部欠陥の検出への適用および有効性を検証し、「非接触衝撃弾性波法による弾性波トモグラフィ」の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 解析による励磁コイルの理論設計とその試作

コンクリート中に埋め込まれたアンカーボルト固着部の接着剤充填状況を非破壊で評価するために、電磁力により非接触でアンカーボルトを振動させることにより、アンカーボルトとコンクリート界面における接着剤の充填状況を適切に評価するための励磁コイルの設計と、弾性波特性を利用した評価手法の検討をそれぞれ行った。

(2) 非接触衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥の評価への適用

接着系あと施工アンカーを模擬したコンクリート供試体を対象に、解析結果に基づき

試作した励磁コイルによりアンカーボルトを加振し、レーザドップラ振動計によりボルトの振動を受信する測定方法から、ボルト固着部の接着剤の充填状況の評価方法を検討した。

(3) 非接触衝撃弾性波法によるPCグラウト充填評価への適用可能性

ここでは、まず、3次元動磁場解析を用いて、励磁コイルの導線巻き付け方法、励磁コイルのシースに対する配置、電磁コイルを構成するコア寸法の違いが、鋼製シースに生じる電磁力分布に与える影響について検討した。その後、解析により得られた結果の妥当性を評価するために実験を行った。これらの検討を終えた後、PC桁を模擬したコンクリート版状供試体を対象に、解析・実験で決定した励磁コイルを用いた計測を行い、PCグラウト充填率の違いが空隙検出に与える影響について把握することとした。なお、弾性波トモグラフィによる速度場を計算するためのプログラムも併せて構築した。

4. 研究成果

(1) 解析による励磁コイルの理論設計とその試作

電磁力により非接触でアンカーボルトを振動させるための励磁コイルを2種類考えた（図1参照）。解析モデルは、縦500mm×横500mm×高さ200mmのコンクリートに、直径16mm、長さ250mmのアンカーボルトを模擬した鋼棒をコンクリート表面から130mmの深さとなるまで埋め込んだ。コンクリートとアンカーボルトの間には、接着剤の有無を模擬するための媒介層を設けた。各構成材料の要素は、いずれも8節点6面体ソリッドとし、要素の代表長さは約10mmとした。また、

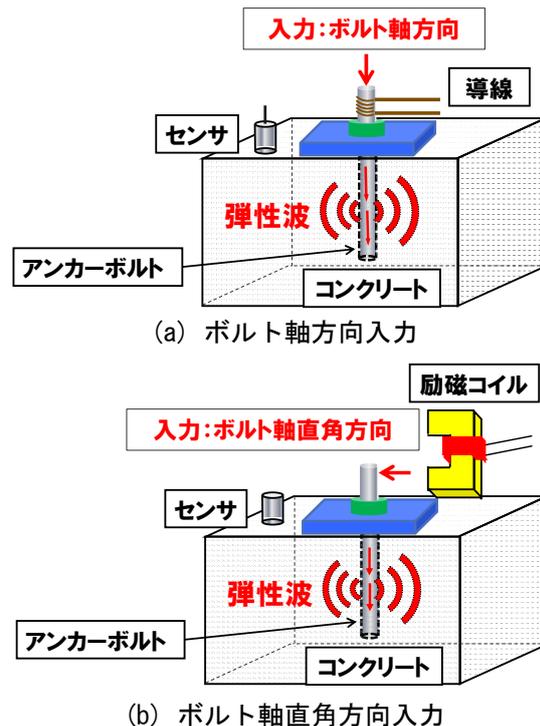


図1 設定した2種類の励磁コイルの概要

境界条件としてコンクリート部分の全側面 (500mm×200mm 面の4面) を無反射条件とした。各励磁コイルによる弾性波入力力は、**図1 (a)** の場合でボルト軸方向に荷重を加え、**図1 (b)** ではボルト軸直角方向に加重を加える設定として模擬した。いずれのケースも、波形出力位置は、ボルト中心から 100mm 離れたコンクリート表面の1節点とした。接着剤の充填状況の違いが弾性波特性に与える影響を把握するために、媒介層(長さ 130mm) をボルト長さ方向に 13 等分して接着剤の有無を模擬した。媒介層全要素に接着剤の物性値を設定したものを「健全度レベル 13」とし、アンカーボルト最下部の要素のみを接着剤、それ以外を空気として設定したものを「健全度レベル 1」とした。さらに接着剤の充填状況にバリエーションを持たせるため、ボルト長さ方向に接着剤要素を段階的に増やし、健全度レベルを全 13 段階に設定した (**図2** 参照)。

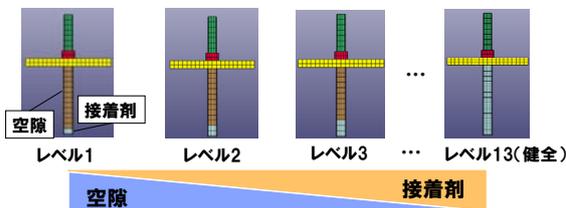


図2 健全度レベルの定義

各励磁コイルで測定した速度波形の波形エネルギーを**図3**にそれぞれ示す。ここでは、速度波形の振幅の大きさを定量的に表現するため、波形における各振幅を2乗した後これを総和したものを「波形エネルギー」と定義している。ボルト軸方向に弾性波を入力した場合は、健全度レベルが大きくなるにしたがって、波形エネルギーが増加していく傾向が見られた。これに対して、軸直角方向に弾性波を入力した場合は、健全度レベルと波形エネルギーとの間に相関関係は確認できない。このような傾向になった理由としては、波の入力方向と伝搬方向とが異なっているため、コンクリート内部を伝搬する際に弾性波が干渉し、複雑な形態となって各媒質中を伝搬したことが挙げられる。

以上の検討結果を踏まえて、ボルト軸方向に弾性波を入力できる励磁コイル(**図4**参照)を試作した。

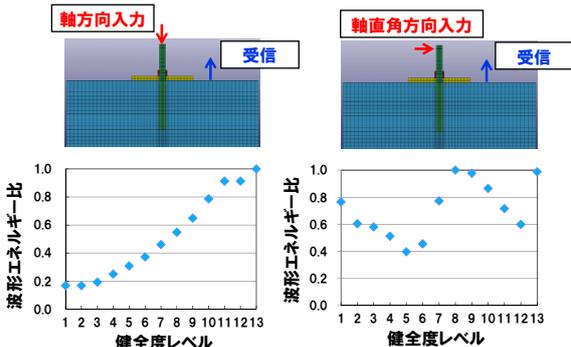


図3 波形エネルギーの比較



図4 試作した励磁コイルの概要

(2) 非接触衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥の評価への適用

供試体のコンクリート部分の寸法は、縦 1000mm×横 1000mm×厚さ 350mm とした。トンネルの天井板を固定する接着系あと施工アンカーを想定して、まずコンクリート部分に直径 24mm、深さ 130mm を穿孔した。続いて、孔内に長さ 240mm のアンカーボルト (M16, SS400 相当材) をコンクリート表面から 110mm 突出するように設置した後、接着剤 (エポキシ樹脂) を流し込むことでボルトを固着させた。接着剤の充填パターンを**図5**に示す。本研究では、接着剤の充填位置に

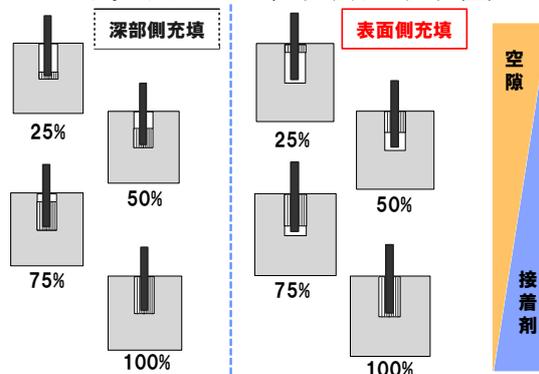


図5 接着剤の充填パターン

ついて孔内の深部側が充填されコンクリート表面側に空隙が存在するもの (深部側充填) と、それとは逆に孔内の深部側が空隙で表面側が充填されたもの (表面側充填) をそれぞれ作製した。各パターンの接着剤の充填率はそれぞれ3水準 (25, 50, 75%) を設けた。ここでいう充填率とは、孔内の全高 (穿孔深さ) 130mm に対する硬化後の接着剤高さの百分率である。また、孔内全てに接着剤を充填した充填率 100%も併せて作製した。以上の方法により、コンクリートに接着剤の充填率の異なるアンカーボルトを4本設置した。また、鋼製プレート (100mm×100mm×厚さ 9mm) とナット2個も別途用意し、アンカーボルトに固定できるようにした。

**図6**に測定状況を示す。励磁コイルは外径 35mm、内径 31mm の厚さ 4mm で高さ 20mm の円筒形状である。コイル上端と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大電流 (3200A) を流し、動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レーザードップラ振動計 (LDV 計) により受信した。

**図7**に、深部側充填における受信波形の周

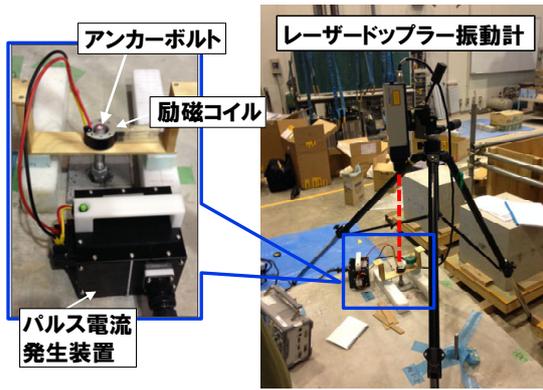


図6 非接触衝撃弾性波法による測定状況

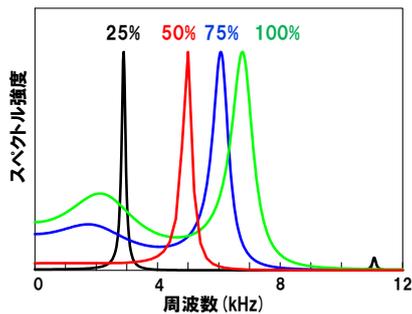


図7 周波数スペクトル（ボルト単体）

波数スペクトルを示す。この図に示す周波数スペクトルは、ボルト単体の場合の結果である。なお、周波数スペクトルの算出にあたっては、最大エントロピー法を適用した。図によれば、深部側充填の充填率 25%の場合で、約 3kHz に明瞭な単独の鋭いピークが出現している。充填率 50%で 5kHz 周辺に、充填率 75%で 6kHz 周辺にピークが現れており、充填率が大きくなるにしたがって高周波側にピークがシフトしている。アンカーボルトの振動は、孔内深部に接着剤が充填された端部側を固定端として、他方の先端を自由端とした片持ち梁の振動挙動を示すと考えられる。1 次振動モードの固有振動数（理論値）を計算すると、実験値（図 7 参照）と概ね一致していた。続いて、図 7 に示す周波数スペクトルにおいて、8kHz 以上の周波数範囲に着目すると、充填率 25%の場合のみ、11kHz 周辺にピークが出現している。これは、ボルト内部を伝搬した縦波の多重反射によるピークであり、理論値（11kHz）と実験値は一致していることがわかる。

図 8 に、プレートを設置した上で、ナットによりボルトを締め付けた場合の深部側充填および表面側充填における周波数スペクトルをそれぞれ示す。アンカーボルトだけの状態で振動を測定する場合（図 7 参照）は、5~7kHz の周波数帯にピークが規則的に表れていることなど充填率の変化に伴う一定の傾向があったが、ナットで十分に締結されるとこうした特徴が見られなくなる。しかしながら、11kHz 周辺のピークの存在に着目すると、ボルト単体と同様に、深部側充填は 25%、

表面側充填は 25%と 50%においてはピークが表れていることが確認できる。したがって、11kHz 周辺の周波数特性に着目することにより、充填率が 50%程度以下の低いものはナットで締結された状態においても検知できる可能性があることが明らかとなった。

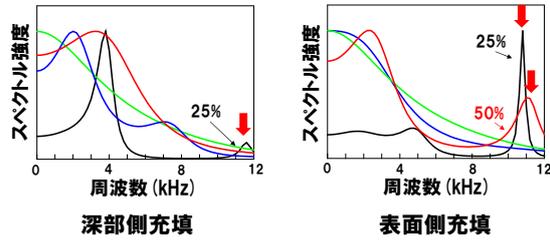


図8 周波数スペクトル（締め付けあり）

(3) 非接触衝撃弾性波法による PC グラウト充填評価への適用可能性

3 次元動磁場解析および実験の結果、シースの振動が最も大きくなるケースは、電磁鋼板を絶縁処理して積層し、導線先端部分に 38 ターン巻き付けたコの字型の電磁コイルであることがわかった（図 9 参照）。

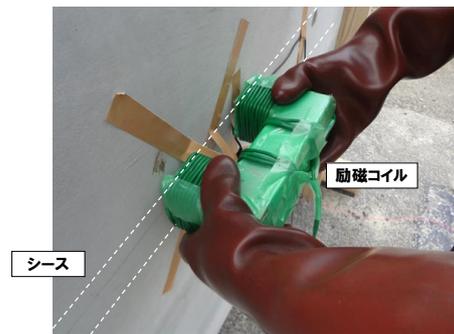


図9 計測概要

縦 1000mm×横 2000mm×奥行 450mm のコンクリート版供試体を作製した。供試体には、外径 63mm の鋼製シースを 2 本埋設した。PC グラウト充填率は、シース端部から 0, 25, 50, 75 および 100%とし、各区間は 400mm である。埋設深さは 50mm とした。

図 9 に、電磁パルス法による計測状況を示す。励磁コイルは、発生した磁束線とシース長手方向とが平行になるように、コンクリート表面から 20mm 離して設置した。

図 10 に、シース直上で受信した波形に対して波形エネルギーを算出した結果を、充填率ごとに示す。充填率が大きくなると波形エネルギーが小さくなる傾向になった。ただし、これらの結果は接触型センサを用いたものであり、非接触型センサでの計測の場合は波形を受信することが困難であった。今後は、コイルにより生じた磁束が漏れないように、コイル周辺を強磁性体により遮蔽するなどの工夫が必要であると考えられる。

実験結果を可視化するために開発した弾性波トモグラフィプログラム（Matlab により製作）での計算結果の一例を図 11 に示す。解析で計算した波形ではあるものの、コンク

リート内部の欠陥を可視化できることがわかった。

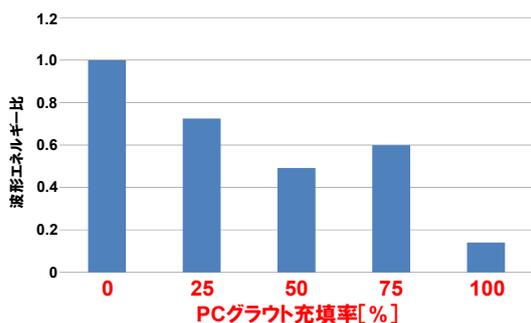


図10 波形エネルギーと充填率との関係

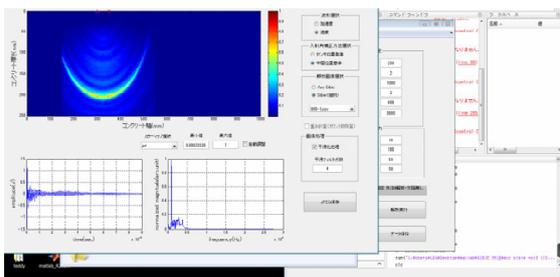


図11 弾性波トモグラフィ結果の一例

## 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6件)

① 前川晴香, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和: 電磁パルス法による接着系あと施工アンカーボルト固着部の接着剤の充填状況の評価手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.37, 2015 (掲載決定)

② Shinya Uchida, Toshiro Kamada, Hirokazu Miyata, Liu Xuan and Takahisa Okamoto: Non-Destructive Evaluation for Soundness of Adhesive Portion around Post-Installed Anchor Bolts in Concrete Based on Analysis-Aided Elastic Wave Methods, Proceedings of the 5th International Conference on Construction Materials, 査読有, 2015 (in press)

③ 劉 軒, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 木村貴圭: アンカーボルト固着部の健全度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, 査読有, 第14巻, pp.87-94, 2014

④ Hirokazu Miyata, Katsunori Tanaka, Shinya Uchida, Toshiro Kamada, Kohei Nishigami and Xuan Liu: Non-Destructive Testing to Evaluate Soundness of Adhesive Portion around Anchor Bolts in Concrete by Elastic-Wave Simulation Analysis-Based Electromagnetic Pulse, Proceedings of the 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 査読有, pp.1931-1936, 2014

⑤ Hirokazu Miyata, Katsunori Tanaka, Shinya Uchida, Takayoshi Kimura Toshiro Kamada and Xuan Liu: Non-Destructive Evaluation Methods

for Soundness of Adhesive Portion around Anchor Bolts in Concrete by Elastic-Wave Simulation Analysis-Based Electromagnetic Pulse, Structural Faults + Repair-2014, 査読有, 2014

⑥ 西上康平, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 劉 軒: 電磁パルス法によるアンカーボルト固着部の健全度評価に関する基礎的検討, 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, 査読有, 第13巻, pp.209-214, 2013

[学会発表] (計10件)

① 宮田弘和, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 木村貴圭, 林本和也, 劉 軒: 電磁パルス法によるアンカーボルト固着部の非破壊評価手法における加振メカニズムに関する一考察, 平成27年度全国大会 土木学会第70回年次学術講演会, 岡山大学 津島キャンパス (岡山県・岡山市), 2015.9. (発表決定)

② 木村貴圭, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 前川晴香, 林本和也, 劉 軒: 電磁パルス法に基づく接着系あと施工アンカー固着部の接着剤充填状況の非破壊評価手法, 平成27年度全国大会 土木学会第70回年次学術講演会, 岡山大学 津島キャンパス (岡山県・岡山市), 2015.9. (発表決定)

③ 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 岡本享久, 前川晴香, 林本和也: 非接触衝撃弾性波法による接着系あと施工アンカー固着部の接着剤充填状況の非破壊評価手法, 日本コンクリート工学会 コンクリート構造物の最先端診断技術に関するシンポジウム, 東京理科大学 森戸記念館 (東京都・新宿区), 2015.07.30. (発表決定)

④ 前川晴香, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎, 劉 軒, 木村貴圭: 電磁パルス法による接着系あと施工アンカーボルト固着部の接着剤の充填状況の評価手法, 平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会, 摂南大学 寝屋川キャンパス (大阪府・寝屋川市), V-42, 2015.5.30.

⑤ 内田慎哉: 電磁パルス法の課題と今後の展開, 日本材料学会 コンクリートの革新的非破壊評価技術の今後の展開, 大阪大学 中之島センター (大阪府・大阪市), 2015.3.17.

⑥ 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 劉 軒, 木村貴圭, 岡本享久: アンカーボルト固着部の接着剤充填状況の電磁パルス法による非破壊評価手法, 第41回セメント・コンクリート研究討論会, 新潟日報メディアシップ (新潟県・新潟市), 2014.10.10.

⑦ 劉 軒, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 木村貴圭: 電磁パルス法に基づく接着系あと施工アンカー固着部の非破壊評価手法に関する解析的検討, 平成26年度全国大会 土木学会第69回年次学術講演会, 大阪大学 豊中キャンパス (大阪府・豊中市), 2014.9.10.

⑧ 劉 軒, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 木村貴圭: 電磁パルス法に基づく接着系あと

施工アンカー固着部の健全度評価に関する解析的検討，平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会，大阪産業大学 中央キャンパス（大阪府・大東市），2014.5.31.

⑨ 内田慎哉：電磁パルス法によるアンカーボルト固着部の非破壊試験方法について，日本非破壊検査協会 平成 25 年度鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験ミニシンポジウム，機械振興会館（東京都・港区），2014.1.27.

⑩ 宮田弘和，内田慎哉，鎌田敏郎，長岡康之，三輪秀雄，高鍋雅則，木村貴圭，西上康平，劉 軒，田中克則：電磁パルス法に基づくアンカーボルト固着部の健全度評価に関する実験的検討，日本非破壊検査協会平成 25 年度秋季講演大会，RCC 文化センター（広島県・広島市），2013.11.26.

## 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