

令和元年6月4日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06443

研究課題名(和文) PC緊張力が低下したプレストレストコンクリート橋梁の診断技術の開発

研究課題名(英文) Development of the diagnosis technology of the prestressed concrete bridge which PC force decreased

研究代表者

伊藤 始 (Ito, Hajime)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：10553133

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、コア削孔による応力解放法により、プレストレストコンクリート橋梁(PC橋梁)の残存プレストレス量の計測法を開発することを目的とした。検討では、初めに数種類のセンサと計測方法の感度試験に基づき特徴を分析し、センサと計測法を絞り込んだ。次に実橋梁から切り出したPC桁においてコア削孔実験(開発)とPC鋼材切断実験を実施し、結果を分析した。検討結果から、直径100mmの削孔穴を設ける「標準タイプ」と損傷低減が可能な直径50mmの「小型タイプ」それぞれの計測精度を把握した。加えて、PC橋梁内部の応力やひずみに換算するための解析法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、我が国の橋梁の約40%を占めるプレストレストコンクリート形式の橋梁(PC橋梁)を対象とした。老朽化したPC橋梁では、橋梁自体の形状や性能を保持するために必要な力が低下する場合があります。本研究ではその力の低下量を計測する手法を検討した。検討では、数種類のセンサと計測方法の特徴を分析し、計測精度を把握した。この計測結果に基づき、PC橋梁の内部に作用する力を推定することができ、老朽化した橋梁の点検診断や補強設計を適切に実施することが可能である。

研究成果の概要(英文)：Purpose of this study is the development of measurement method of the effective pre-stress in the pre-stressed concrete bridge (PC bridge) by the stress release method by the coring. Firstly, several kinds of sensor and measurement method were examined. Then sensor and measurement method to use for the coring test were decided based on sensitivity tests. Next, in actual PC beam, coring test by the developed method and PC bar cutting test were carried out and their results were investigated. The measurement precisions of standard type (coring diameter 100mm) and small type (coring diameter 50mm) were clarified after comparison of two tests and simulation of results. In addition, numerical analysis method was examined in order to convert from released strain to internal force of PC bridge.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：PC橋梁 コンクリート 応力解放 コア削孔 埋込みセンサ プレストレス量 応力解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

土木学会の維持管理優先度委員会では、老朽化したプレストレストコンクリート（PC）橋梁の構造性能が主に 3 つの要因で低下することが報告されている。①グラウト不良や塩害による桁中央部の PC 鋼材の腐食、②定着部不良や凍結防止剤による桁端部の PC 鋼材の腐食、③PC 鋼材の緊張応力の低下である。PC 橋梁は鋼材によるコンクリートへの圧縮応力の作用を前提としていることや PC 鋼材は腐食による断面減少率が 15%程度で破断することなど、劣化状態に対して構造性能が敏感に変化する構造物である^{1),2)}。

しかしながら、PC 鋼材の腐食や緊張応力を直接的に計測する手法が確立されておらず、点検調査が十分に実施されているとは言い難い状況にある。特に、財政状況が厳しい地方自治体では、技術者の不足もあり詳細な調査が困難な状況である。このような状況から、点検を高度化して、残存 PC 量や鋼材腐食量を予測し、低コストで適切な補修や補強を計画・施工していくことが必要である。その検討には、現状のコンクリートからどの程度の応力が抜けているか、すなわち「現在の残存プレストレス量」（図-1）を定量的に評価することが重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、コア削孔による応力解放法に用いるセンサおよび測定法を、既存手法（図-2）から発展させて、PC 橋梁の残存プレストレス量（図-1）の測定手法とすることを目的とする。この PC 橋梁の残存 PC 量等から PC 鋼材の断面減少率や梁の耐荷力・変形性能を算定することで、PC 橋梁の安全余裕度の診断や効果的な補修・補強設計につなげる（図-3）。通常の調査時に実施されるコンクリートコア供試体採取するコア削孔に付加した調査と位置付けることで早期の実用化を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、研究課題(1)～(3)（図-3 中 ①～③）を達成するために行った。

(1) 計測法の確立

研究は、センサを埋め込んだコンクリート製拘束供試体にコアを削孔することで実施した。これまで開発した表面ひずみ法³⁾や正面削孔法による応力解放に加え、小型埋込みセンサや背面削孔法のように発展させた計測手法を適用することを検討した。拘束量や鋼材量等を変えた拘束供試体に応力を作用させた後に発展手法を適用し、コア削孔実験を行うことで供試体条件による計測値の違いを評価した。それにより拘束ひずみを確実に計測する方法を確立した。

(2) 算定手法の確立

研究は、3次元構造解析でコア削孔実験を再現することで実施した。解析を通して「課題(1)」で計測した拘束ひずみから逆解析的に、コンクリートの内部ひずみ（拘束ひずみ、残存 PC 量、PC 鋼材応力）を算定する手法を確立した。

(3) 構造物への適用

研究は、梁モデルと切出し PC 桁の実大モデル試験体のコア削孔実験を行うことで実施した。研究では(1)計測法や(2)算定手法の実構造物への適用性を検証し、提案手法を修正した。まず、実 PC 桁から切り出した部材のコア削孔による解放ひずみを計測した。次に PC 鋼材切断実験を行い、PC 鋼材のひずみと解放ひずみを比較した。加えて、3種類のセンサを用い、様々な実験パラメータの PC はりモデル試験体を用意して、荷重を作用させた状態でコア削孔実験を実施した。

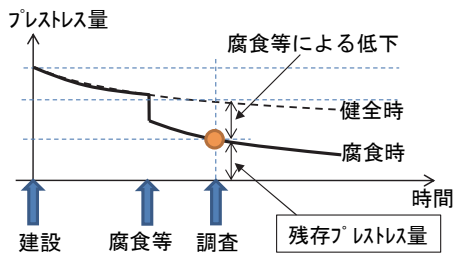


図-1 本研究のターゲット

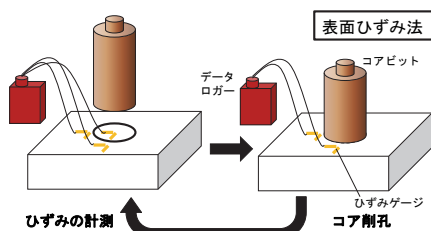


図-2 コア削孔によるひずみ測定法

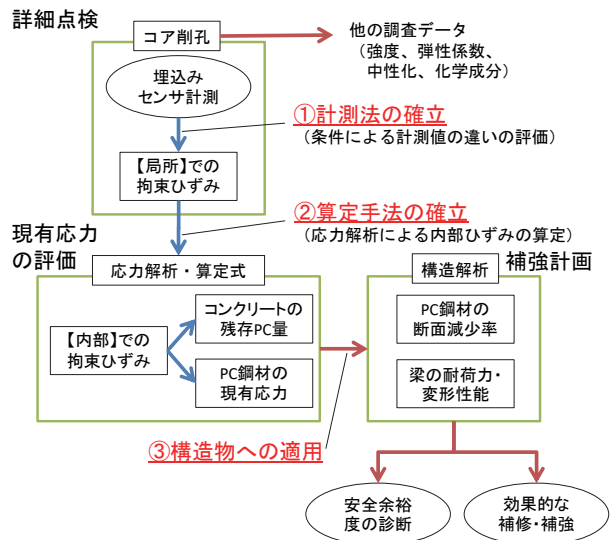


図-3 研究の全体構想と研究課題

4. 研究成果

コア削孔による応力解放法に用いるセンサおよび測定法を、既存手法から発展させて、PC 橋梁の残存プレストレス量の測定手法とすることを目的としている。研究期間全体の研究成果を以下の(1)～(3)に分けて説明する。

(1) 計測法の確立

①概要

(A)埋込みセンサの標準タイプ（市販の長さ 30mm の埋込み型ひずみ計を用いた方式、**図-4**）、(B)小型センサタイプ（ペンシルタイプ、削孔径を小さくした方式、**図-5**）、(C)応力計タイプを検討した。**図-6** に研究の流れを示す。初めに、センサ自体の応答、モルタルに埋め込んだ時の応答を計測し、試作品を作製した。次に、円柱供試体と角柱供試体の中心部を削孔し、各試作センサを埋込んでグラウトを充填して、その供試体に万能試験機で段階的に荷重を作用させた。

②小型センサの感度試験

小型センサは、**図-5** にその概要を示すように、中心の 5mm×5mm×12mm の角柱の部材とその両端に 12mm×12mm×2mm の台座を取り付けた構造である。角柱には、ひずみゲージが 2 枚貼り付けてあり、台座により引張ひずみを捉える構造である。**図-7** に試験結果を示す。図中のひずみは、圧縮を正としている。圧縮試験と引張試験のいずれの試験においても表面ひずみゲージとの差異が約 15%以内であり、荷重に対しておおむね適切なひずみが得られた。センサの値がひずみゲージの値よりも若干大きくなっているのは、モルタルとアクリル部材の弾性係数の違いに起因するものと考えられた。

③小型センサ埋込み供試体の荷重試験

小型センサを φ100mm×200mm の円柱供試体に埋め込み、荷重試験を実施した。供試体の型枠面側と均し面側の荷重軸直角方向にあけた直径約 20mm の穴にセンサを埋め込み、グラウトを充填した。グラウトの材齢が 7 日と 28 日に荷重試験をそれぞれ 3 供試体について行った。まず荷重によるセンサの挙動把握を目的に応力解析を行った (**図-8**)。グラウト部分は、コンクリートと弾性係数を変えることで表現した。**図-9** に荷重試験でのセンサのひずみと解析でのセンサの埋設部に相当するグラウト要素のひずみの関係を示す。全体的な傾向として、一部のケースを除きセンサのひずみは解析のひずみと約 20%以内の精度であった。また、センサのひずみは、コア削孔への適用を考慮したひずみの計測範囲 (0~500×10⁻⁶) では、おおむね線形関係が得られた。一部ケースにおいてばらつきが生じた要因として、供試体の形状により荷重試験で偏心荷重が

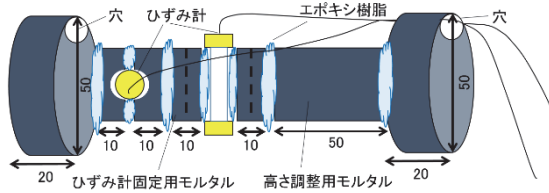


図-4 埋込みセンサ (A)標準タイプ

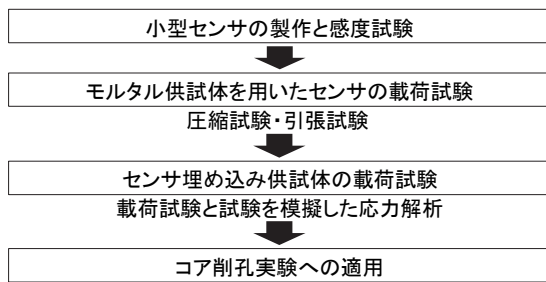


図-6 研究の流れ (B)小型センサ

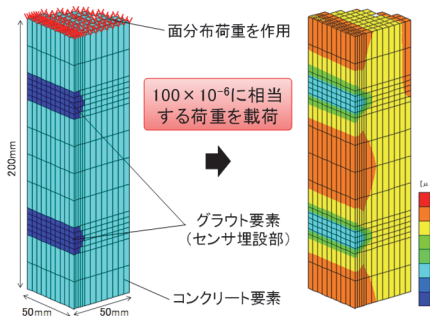


図-8 解析によるセンサ埋込み供試体の荷重

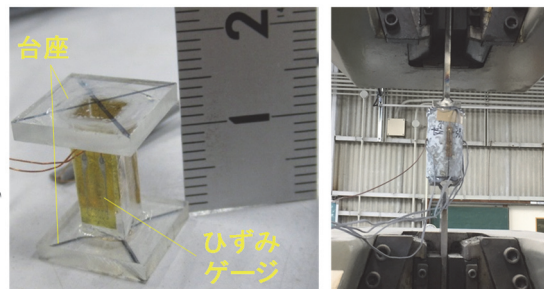


図-5 (B)小型センサと供試体の引張試験

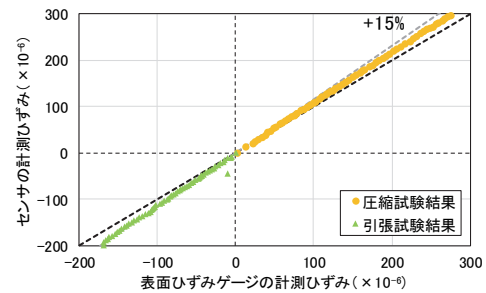


図-7 感度試験結果 (モルタル埋込み試験)

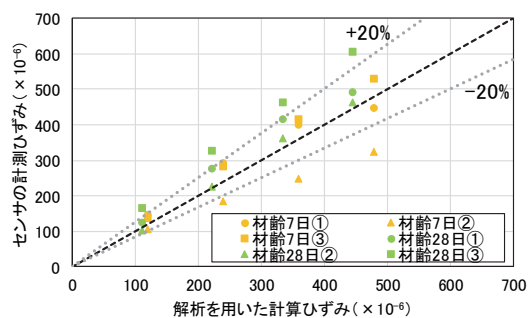


図-9 センサ埋込み供試体の荷重試験結果

生じたことが考えられた。

以上の結果から、センサ(A)と(B)において、コンクリート部とセンサ部の剛性の違いを計算に考慮することで、荷重に対して±20%で計測可能であった。(C)のセンサは出力値が小さくなることが確認でき、実用にはセンサ自体の改良が必要であるとの結論に至った。

(2) 算定手法の確立

①概要

3次元応力解析を用いて、コンクリートの内部ひずみ(拘束ひずみ、残存PC量、PC鋼材応力)を算定する手法を確立することを目的に実施した。PCの作用応力を変化させて解析を繰り返し、作用応力と内部ひずみなどからコア削孔による応力解放のメカニズムを評価した。

②実橋梁モデルの算定

対象としたPC桁は北陸自動車道で25年間供用され、塩害により損傷し撤去されたT型桁である。PC桁は、**図-10**のように高さ1.0m、幅1.3m、桁長17.9mを持ち、12φ7mmのPC鋼線5本が配置された構造である。コンクリートとPC鋼材の強度試験を行っており、強度物性値が得られている⁴⁾。数値解析は、3次元非線形有限要素解析プログラムを使用した。解析モデルは、桁の対称性を考慮し、**図-11**に示すようにPC桁の断面変化を与えた2分の1モデルとした。PC鋼材の緊張応力をパラメータとした解析を実施した。

③解析結果

コンクリートの橋軸方向のひずみの解析結果を**図-12**に示す。ひずみは、床版付近にはほぼ発生せず、ウェブでは-60~-240μm/mほどの圧縮ひずみ、支間中央付近の桁下縁側では、-300~-350μm/mほどの圧縮ひずみが発生している。解析で得られたひずみから設計プレストレスによる応力度を算出すると、ウェブで6.4N/mm²ほど、桁下縁で11.2N/mm²ほどとなり文献4)の値と概ね一致することが確認できた。

④解放ひずみと有効プレストレスの関係

コア削孔で得られた解放ひずみと有効プレストレスを構造解析で結ぶことを検討するため、PC鋼材の緊張応力を変化させるパラメータ解析を行った。PC緊張応力と**図-11**のA~C地点のコンクリートの橋軸方向のひずみの関係を**図-13**に示す。A地点とC地点は、おおむね同様の傾向を示しているが、B地点では、PC鋼材による緊張応力が大きくなると、コンクリートの橋軸方向のひずみが他のケースと比較して大きくなることが確認できた。

以上の結果から、コア削孔で得られた解放ひずみを基に、構造解析を通して有効プレストレスの算出が可能であることが確認できた。

(3) 構造物への適用

①概要

(A)標準タイプのセンサを用いて、実PC桁から切り出した部材の解放ひずみを計測した。PC鋼材切断実験を行い、PC鋼材のひずみと解放ひずみが一致することを確認した。加えて、3種類のセンサを用いて、PCはりモデル試験体に荷重を作用させた状態でコア削孔実験を実施した。

②実験方法

実験では、前記の北陸自動車道の実PC桁から切り出された長さ2.32mの部分を対象とした。鋼材切断によるひずみの計測は、**図-14**に示すP-1、P-2、P-3の3つの断面で行った。P-2では



図-10 実橋梁から撤去されたPC桁

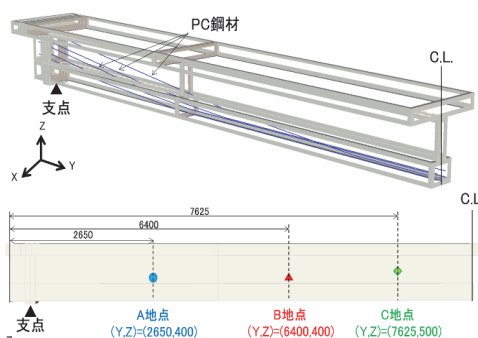


図-11 PC桁の解析モデル

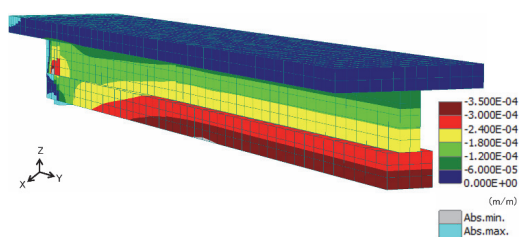


図-12 橋軸方向のひずみ分布

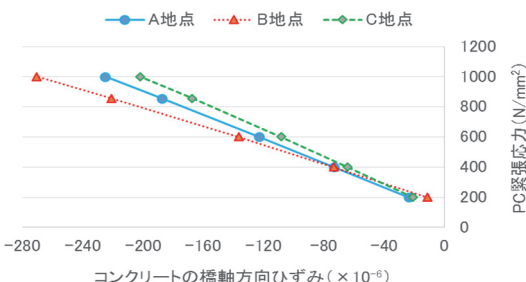


図-13 PC緊張応力と橋軸方向ひずみの関係

図-14 に示す面の反対面でも鋼材を切断した。実験の手順は、図-15 に示すように、切出し桁中の PC 鋼材をはつり出し、そのうち 5 本 (P-2 は 4 本) にひずみゲージを貼り付けた。その後、鋼材を切断することで解放されるひずみを計測した。

コア削孔実験は、図-14 の A-1 と A-2 の 2 箇所において、図-16 のようにコンクリート中にセンサを埋め込み、その外側をコアドリルで円形に削孔しながら、センサのひずみを計測した (正面削孔方式)。同図の B-1 と B-2 の 2 箇所では、センサの埋込み面の背面を削孔した (背面削孔方式)。解放ひずみには、橋軸方向の削孔前のひずみと削孔後のひずみの差を用いた。コア削孔実験で得られた解放ひずみは、前記の解析手法を用いて PC 桁の鋼材応力に換算した。

③実験結果

コア削孔実験から得られた削孔深さとセンサひずみの関係を図-17 に示す。削孔深さが大きくなるに伴い、ひずみが滑らかに解放される様子が見て取れる。削孔前と削孔後のひずみ差が解放ひずみである。図-18 と図-19 に鋼材切断とコア削孔で得られた鋼材応力の比較を示す。コア削孔による鋼材応力の平均値は 432N/mm^2 となり、これらの鋼材応力は、鋼材切断法の値の 87% であり、おおむね近似した値になった。また、これらの鋼材応力は、設計時の応力の 50% であり、長さ 2.32m に切り出した今回の PC 桁の鋼材応力は、設計時の応力の 5~6 割であることが推察された。

④PC はりモデル試験体のコア削孔実験

コア削孔実験の結果として、PC 緊張力やグラウト材齢、コア径、センサ寸法などの実験条件に応じて解放ひずみが増加することを確認した。その中で、センサが小さくコア径が小さい場合に、コア孔とグラウトの境界面が割れる場合が見られ、実験条件から適用範囲を確認した。

<引用文献>

- ① 土木学会：材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会報告書 (1 期・2 期)、コンクリート技術シリーズ、1 期 2012・2 期 2015
- ② 陸賢、田中泰司、山口貴幸、下村匠：腐食した PC より線の機械的性質とプレテンション PC 梁の残存耐力の評価、PC シンポジウム論文集、2012
- ③ 二井谷教治、渡瀬博、阪田憲次、綾野克紀：コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究、コンクリート工学論文集、第 20 巻、pp. 27-37、2009
- ④ 青木圭一、渡邊晋也、三加崇、宮永憲一、睦好宏史：供用後 40 年経過した PC 桁の性状から推定される PC 橋の性能評価、土木学会論文集 E2、2015

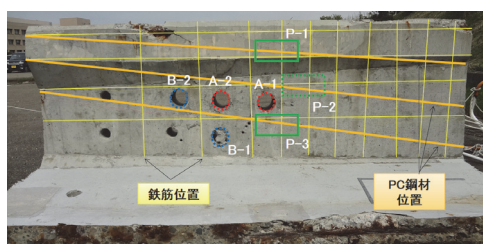


図-14 切り出した PC 桁と実験位置



図-15 PC 鋼材切断実験

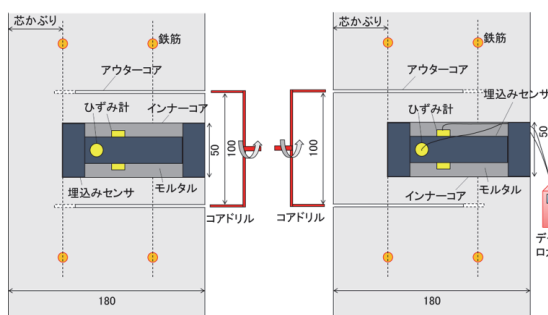


図-16 コア削孔方法

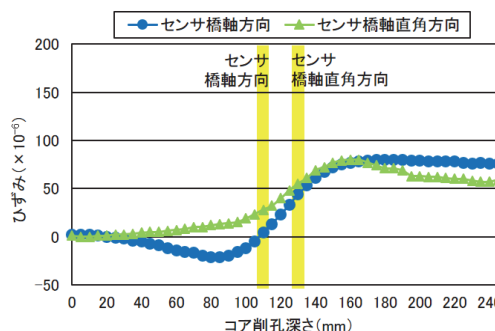


図-17 コア削孔実験結果 (B-2)

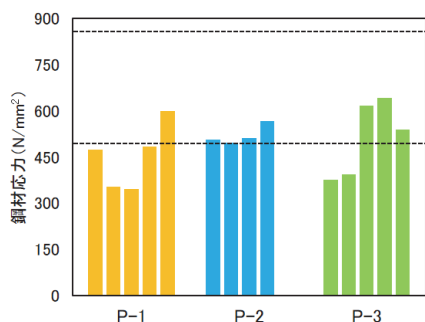


図-18 鋼材切断実験による鋼材応力

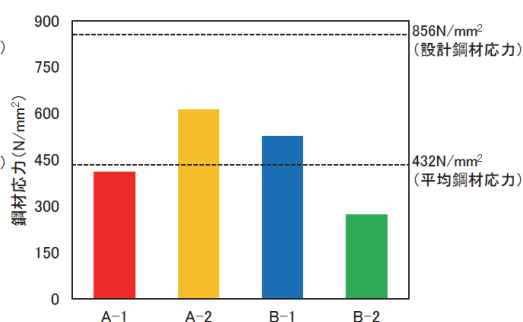


図-19 コア削孔実験による鋼材応力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ①小林勇佑、伊藤始、西野哲史、白上新、埋込みセンサを用いた PC 桁の内部ひずみ測定手法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol. 39、No. 1、pp. 147-152、2017 年

〔学会発表〕(計 2 件)

- ①小林勇佑、伊藤始、西野哲史、白上新、細野恭成：PC 橋の内部ひずみ測定に用いる埋込みセンサの小型化に関する基礎的検討、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、V-30、pp. 573-574、2018 年
②小林勇佑、伊藤始、西野哲史、白上新、細野恭成：切出し PC 桁におけるコア削孔法の鋼材応力と鋼材切断法の鋼材応力の比較、土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集、V-151、pp. 301-302、2017 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

○取得状況 (計 1 件)

名称：コンクリート構造物の現有歪み測定手法及び測定装置

発明者：伊藤始、西野哲史

権利者：富山県立大学、北電技術コンサルタント

種類：特許

番号：6489527

取得年：2019 年

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

伊藤研究室ホームページ

<https://www.pu-toyama.ac.jp/EE/itouh/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。