

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14021

研究課題名(和文)小孔内部応力測定によるPC部材に作用するプレストレスの評価技術の提案

研究課題名(英文)Development of Evaluation Method on Prestressing Force in PC Members by means of Stress Concentration around a Circular Hole

研究代表者

三木 朋広(Miki, Tomohiro)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30401540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プレレストコンクリート(PC)部材におけるプレストレスを直接測定するため、装置先端に直径10mm、長さ約100mmの円筒形の加力部を有するジャッキを開発した。対象のコンクリートに直径約1～数cm程度の小さな円孔を設け、開発したジャッキをその円孔に挿入して加力し、円孔周辺のひずみ分布を計測することによって、作用している圧縮応力(プレストレス)を測定する方法を提案した。さらに、アルカリシリカ反応(ASR)が生じたPC部材における残存プレストレスを評価するために、ASRによって劣化したコンクリートの材料特性、特に弾性係数、ならびにポアソン比を実験的に把握した。

研究成果の概要(英文)：This study includes a proposal of a stress measurement method using a stress concentration factor around the circular hole located in a prestressed concrete (PC) member. In this study, the strain distribution in the mortar and concrete was investigated experimentally through compressive loading tests and expansion pressure tests using a newly developed small cylindrical jack. A prototype of the small jack has a cylinder in which 10 mm of the diameter and 100 mm in the length. The experimental results of loading tests were compared with the analysis that is based on the theory of elasticity and the thick-wall cylinder theory. In addition, in order to evaluate the prestressing force in the PC members damaged due to the Alkali-Silica Reaction (ASR) by using the proposed method, the mechanical properties of concrete having the ASR-induced cracks, especially the elastic modulus and the Poisson's ratio.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：PC部材 残存プレストレス 画像解析 ASR ポアソン比 微破壊試験 弾性厚肉円筒理論

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の維持管理では、耐荷力や変形性能など、構造物の評価時点での構造性能を評価するとともに、その性能の経時変化を定量的に予測していくことが求められる。プレストレストコンクリート（PC）部材の構造性能を評価するためには、評価時点の材料特性に加えて、特に導入されたプレストレスがどの程度残留しているのかを適切に、定量的に把握することが重要となる。

既往のプレストレスの測定技術として、応力解放法やフラットストレス法など各種手法が提案されているが、構造物の部分的な破壊を伴うことや測定を容易に行うことができない等の理由から、いずれも実用的な方法には至っていない。

この課題に対して、これまで申請者らはコンクリートの応力測定に関する技術、具体的には微小径円筒形ジャッキを用いて、コンクリートに作用する応力を直接測定することを試みてきた。形状や加圧機構を検討して試作したプロトタイプを図-1に示す。この装置は先端に直径10mm、長さ約100mmの円筒形の加力部（図-1(上)右側の突起部分）を有している。この加力部の内側から油圧挿入し、円膨張させて円孔周辺のコンクリートに加力して、それによって生じるひずみ分布の変化から、外力として作用している圧縮応力を測定する。また、精密に油量挿入が可能な可搬型スクリー式精密油圧ポンプ（図-1(下)）も作製した。

これらを用いた測定試験では、約0.05MPaの応力レベルで加力制御できることを確認している。ただし、①加力部に用いたステンレス材の特性から、一度加力すると円筒部に残留ひずみが生じてしまうこと、②いずれも実験室レベルでの検討であり、実構造物を対象とした検証を実施していないことが課題であった。本申請では、より実構造に近い条件で本手法の適用性について種々検討した。

本手法は構造物に与える影響（損傷）をできるだけ小さくすることができるとともに、



図-1 開発したジャッキシステム

可搬装置を用いているため、計測の合理化・省力化に大きく資するものである。特に、原位置のコンクリートに作用する応力を定点モニタリングできるようになるため、構造物の状態の経時変化を現場で容易に、また定量的にとらえることができるようになることが本研究の特徴である。

<引用文献>

1) 三木, Izyan : 小型加力装置によるコンクリートに作用する圧縮応力の測定に関する実験研究, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.22, pp.323-328, 2013.10.

2. 研究の目的

プレストレストコンクリート（PC）部材に導入されているプレストレスを原位置において低コストで簡易に実施可能な評価技術の提案に向けた検討を行う。本手法では、まずコンクリートに直径約1~数cm程度の小さな円孔を設け、その際に円孔周辺に生じる応力集中を利用して、作用応力を推定する。さらに、開発した小型ジャッキをその円孔に挿入し、円孔内側から元の応力状態に近くなるよう加力したときの円孔周辺のひずみ分布を計測することによって、コンクリートに作用している圧縮応力（プレストレス）を測定する。これにより、PC部材におけるプレストレスを現場で容易ではあるが定量的に測定するとともに、その経時変化の測定手法への展開を目指す。

また、アルカリシリカ反応（ASR）が生じたPC部材における残存プレストレスの評価に向けた基礎検討として、ASRによって劣化したコンクリートの材料特性、特に弾性係数、ならびにポアソン比を実験的に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 要素レベルの検証

ジャッキの形状ならびに加圧機構について、プロトタイプを改良した。本装置では、精密に油量挿入が可能な外付けポンプから、ジャッキの加力部に油圧を導入することによって、断面放線方向に円膨張させ、その結果、周辺の対象物に加力できる機構を有している。ただし、加力部の円管にコスト面を考慮して市販のステンレス材を用いたが、材料特性として明確な降伏点を有さないといった特徴を示すために加圧に伴って塑性ひずみが生じてしまい、繰り返し使用することができなかった。そのため、例えば油圧ホースに用いられる強化プラスチック等、高い応力下まで弾性挙動を示す材料を用いるなど、加力部の材料、構造、寸法に関して改良を試みた。また、コンクリート供試体を対象とした実験では、骨材の存在が測定されるひずみ値に与える影響を調べるとともに、設ける円孔の大きさや形状、ジャッキと円孔との境界条件

(グラウトや樹脂材等の有無)の違いを実験パラメータとして検討した。

装置の検討では、**図-2**に示す円孔を設けたモルタル立方体を用いて、圧縮荷試験を実施した。用いた供試体は、一辺 100 mm のモルタル製の立方体であり、側面中央に直径約 10 mm の円孔を設けている。

一方、**図-3**、**写真-1**に示すコンクリート供試体では、実構造物で用いられる材料状態を対象とするとともに、作用応力を偏心させて加力し、応力勾配を再現することによって、実構造物を想定して本応力測定手法の妥当性を検討した。実験には断面が 75 mm×200 mm で、長さ 500 mm の供試体を用いた。円孔は 200 mm×500 mm の側面に直径 10 mm、20 mm、30 mm のものを設けた。用いたコンクリートにおける骨材の最大寸法 G_{max} は 20 mm とし、圧縮強度の実測値は 32 N/mm²であった。

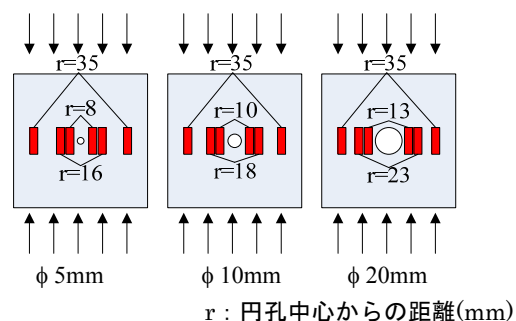


図-2 モルタル供試体のゲージ位置

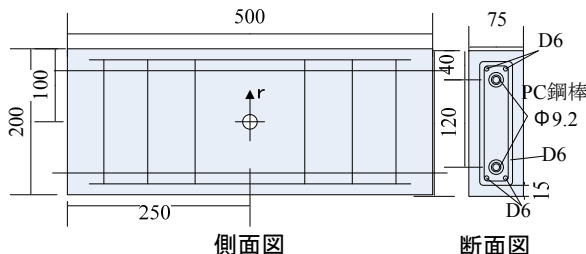


図-3 コンクリート供試体

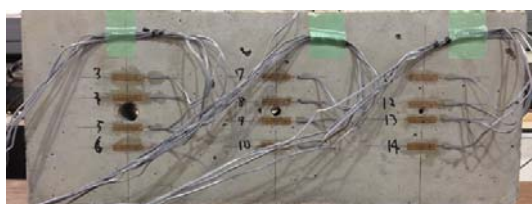


写真-1 コンクリート供試体

(2) アルカリシリカ反応が生じたコンクリートの弾性係数とポアソン比の評価

実験では、断面 100 mm×100 mm、高さ約 200 mm の角柱供試体を対象とした。用いた供試体は、内部ひび割れ観察用の ASR を促進させたコンクリート供試体が 1 体、圧縮荷試験用の健全なコンクリート供試体が 3 体、ASR コンクリート供試体が 3 体である。なお、健全コンクリート供試体の配合は、反応性の細骨材ならびに粗骨材をそれぞれ非反応性の細骨材ならびに粗骨材に変

えたものを使用した。骨材の最大寸法は 20 mm とした。全ての供試体において、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、AE 減水剤を使用した。反応性骨材を使用した ASR コンクリート供試体は ASR を促進することを目的として、荷試験まで屋外に暴露した。

供試体の表面ひずみの計測では、ひずみゲージ (ゲージ長 : 60 mm) による測定その他、画像相関法による画像解析による表面ひずみ計測を実施した。荷中、各荷重レベルにおける供試体を対象としてデジタルカメラを用いて写真を撮影しておき、荷試験後に画像相関法を用いてコンクリート供試体の表面のひずみ分布を求めた。これにより、ひずみゲージならびに画像解析から得られるひずみの値を用いて縦横ひずみ比の値を比較した。またひずみゲージを貼ることが難しく、表面の細かなひずみ分布を計測することを目的として、ASR コンクリート供試体を対象としてコンクリートの表面ひずみの分布、ならびにポアソン比を画像解析から求めた。ただし、本研究では非線形挙動までを含めた評価を行うため、ここではポアソン比ではなく、縦横ひずみ比と呼ぶことにする。

4. 研究成果

(1) 要素レベルの検証

一様な応力場でのコンクリート供試体の結果を**図-4**に示す。ここで用いたコンクリートは、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いて求めると、弾性係数 27000 N/mm²であった。

いずれの供試体においても実験値と応力集中によるひずみ分布の理論値はほぼ一致していることがわかる。円孔の直径 30 mm の供試体における $r = -50$ mm 付近の点において、理論値と大きな誤差が生じているが、これはコンクリート表面に存在する気泡が影響していることがわかった。

次に前述したように偏心させた場合の結果を**図-5**に示す。円孔の中心からの距離 r が負側では 7 N/mm²に相当するプレストレス力 (52.5 kN) を加力しており、 r が正側では 5 N/mm²に相当するプレストレス力 (37.5 kN) を加力している。また、縁応力はそれぞれ 7.7 N/mm² と 4.5 N/mm² となっている。**図-5**には比較のために、5 N/mm²、6 N/mm²、ならびに 7 N/mm² が作用したときのひずみ分布の理論値を示している。両供試体ともに r が負側でひずみの変化量が大きくなっていることがわかる。また、6 N/mm² の応力が作用した時の理論値と概ね一致していることもわかる。

以上の検討より、本研究の成果は以下のようにまとめられる。モルタル供試体において、ゲージ長 10mm もしくは 20mm のひずみゲージを用いた計測では、応力集中をひずみ分布として計測できたのは円孔の直径が 10mm と 20mm のケースであり、応力推定では測定誤差を 8% 以下に収めることができた。

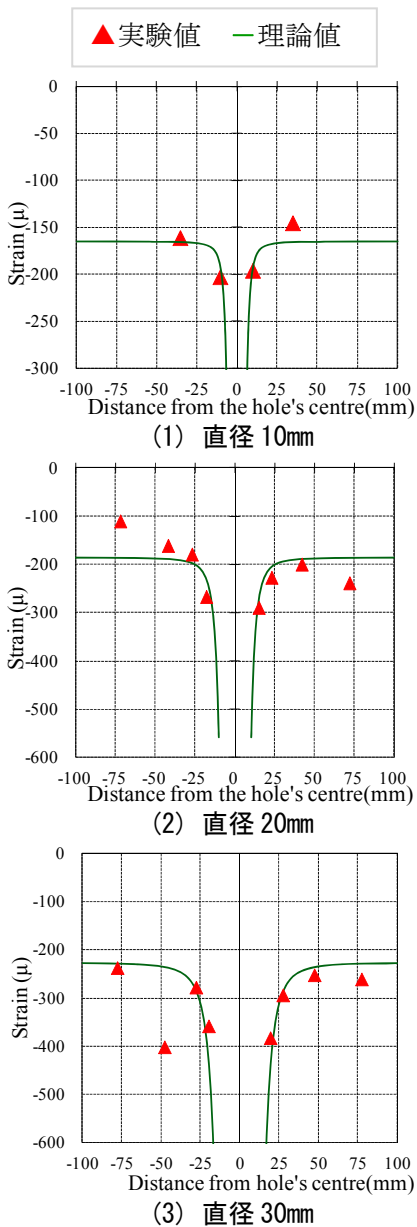


図-4 プレストレス力導入試験結果
(一様な応力場) (5 N/mm²作用時)

一方、コンクリート供試体では全ての供試体、荷重方法で5%以下の測定誤差となった。一様荷重と偏心荷重の結果を比べると、測定誤差が2%程度となったことから、今回行った応力勾配をもった応力分布が本手法に与える影響は極めて小さいということがわかった。

これらの検討に基づき、実構造物においては、円孔を設ける際に周辺が欠けることが想定されるので、円孔から比較的離れた位置でも応力集中が生じる直径20mmの円孔を用いるのがよいと提案した。

(2) アルカリシリカ反応が生じたコンクリートの弾性係数とポアソン比の評価

水平方向のひび割れが強度特性に及ぼす影響を検討するため、ASR 供試体を対象に画像解析を行い、応力の増加に伴う表面ひずみ

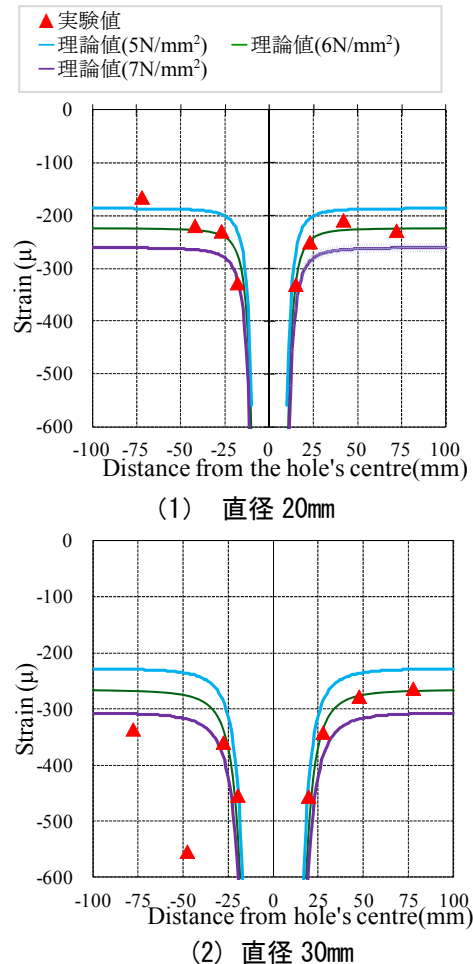


図-5 プレストレス力導入試験結果
(偏心力場)
(作用応力：負側 7 N/mm²、正側 5 N/mm²)

の分布を算出した。画像解析によって得られた最大主ひずみ分布、および最小主ひずみ分布を図-6に示す。図-6の最小主ひずみ分布をみると、荷重応力が増加するにつれて直交方向に生じていたASRひび割れの周辺において、圧縮荷重によってひび割れが閉じる方向に変形することを示す圧縮ひずみが生じたことがわかる。このように、圧縮荷重荷重を受けることにより、荷重軸に直交方向のASRひび割れが閉じることで供試体の圧縮変形が増大し、さらに、その影響によって弾性係数が小さくなったと考える。

また、圧縮荷重初期の10 MPa作用時から、供試体左側において、ASRひび割れに沿った位置で圧縮ひずみが集中していることがわかる。その後の荷重に伴い、鉛直方向のひび割れが新たに発生し、最終的には圧縮応力度36 MPa付近で応力が低下し、最大応力に至った。ただし、水平方向(荷重軸直交方向)のひび割れの位置もその後の外力によって生じるひび割れの進展に影響していることがわかった。

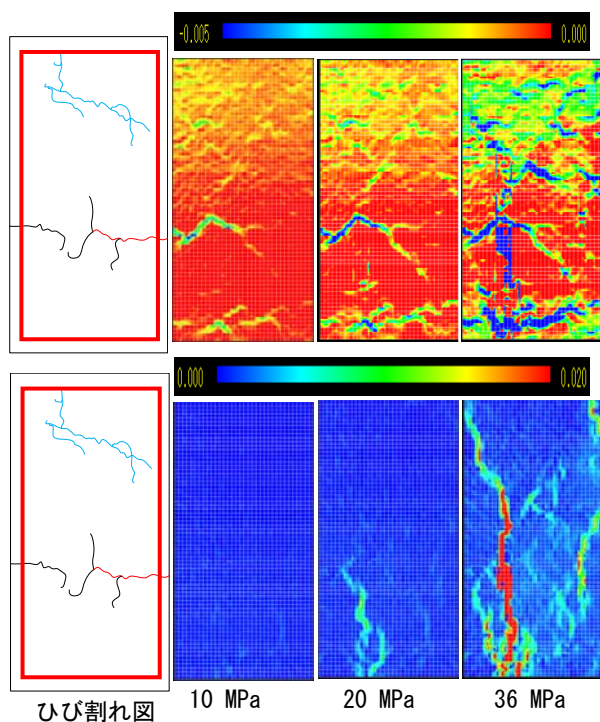


図-6 最小ひずみ(上)と最大主ひずみ(下)の分布

ポアソン比(縦横ひずみ比)についてみると、健全コンクリート供試体とASRコンクリート供試体の比較により違いがあった。画像解析によって得たそれぞれの結果を図-7にまとめる。各供試体で弾性挙動を示す約 15N/mm^2 までの応力範囲における縦横ひずみ比を比較すると、健全コンクリート供試体においては $0.1\sim 0.15$ 程度の小さい値を示す一方、ASRコンクリート供試体では、 $0.2\sim 0.3$ 程度の値の比較的大きな値を示すことがわかった。これは、ASRコンクリート供試体では、今回対象とした供試体では膨張量が 500μ 程度であったが、既に表面から観察できるひび割れが生じており、さらにはコンクリート内部においてもひび割れが生じていることが考えられるため、そのような3次元的なひび割れの影響によって直交方向のひずみの値が増大しやすいことが要因であると推察する。ただし、本研究で示したデジタル画像を積層化によるコンクリートの内部におけるひび割れの3次元的に可視化の結果とあわせて、応力-ひずみ関係において弾性挙動を示す領域の挙動解明を行う必要があり、今後の課題として指摘する。

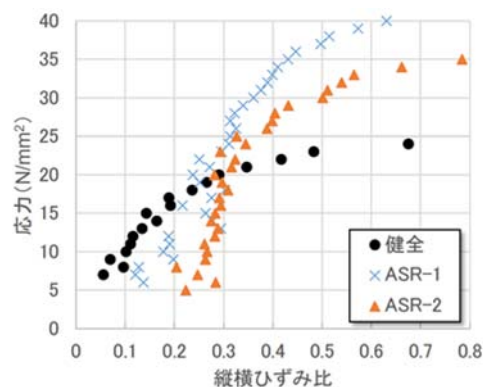


図-7 縦横ひずみ比の比較

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)

- ① 三木大地、三木朋広、円孔周辺の応力集中を用いたプレストレスの測定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.37、No.2、2015、pp.397-402
http://data.jci-net.or.jp/data_html/37/037-01-2067.html
- ② 星野翔太郎、三木朋広、ASRが生じたコンクリートの内部ひび割れが圧縮破壊挙動に与える影響に関する基礎的研究、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、Vol.15、2015、pp.517-522
- ③ Simao, R.M., Miki, T., Dynamic Analysis for RC Columns with Circular Cross Section using Multi-Directional Polygonal 3D Lattice Model, Proceedings of the Japan Concrete Institute, 査読有、Vol.37、No.2、2015、pp.757-762
- ④ Simao, R.M., Miki, T., Damage Evaluation of RC Columns Subjected to Seismic Loading by Energy Dissipation Using 3D Lattice Model, Proceedings of 4th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, 査読有、Vol.4、2015、pp.983-991
- ⑤ Miki, T., Tsukahara, H., Crack Propagation in ASR Damaged Concrete Detected by Image Analysis, Proceedings of 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9)、査読有、Vol.9、2016、pp.1-7
DOI : 10.21012/FC9.280
<http://framcos.org/FraMCoS-9/Full-Papers/280.pdf>
- ⑥ Miki, T., Kita, K., Oya, A., Kono, K., Experimental Study on Shear Capacity of High Strength Fiber Reinforced Concrete

Beams、Proceedings of 9th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete、査読有、Vol.9、2016、pp.1-8

- ⑦ Simao, R.M、Miki, T.、Cumulative Seismic Damage Assessment in Circular RC Columns using Multi-Directional Polygonal 3D Lattice Model、Proceedings of 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering、査読有、Vol.11、2016、pp.517-524

http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/fib_PhD2016/conf_proceedings.htm

- ⑧ 星野翔太郎、三木朋広、アルカリシリカ反応によりひび割れが生じたコンクリートを対象とした圧縮応力下での表面ひずみ計測に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.39、No.2、2017、pp.91-96

http://data.jci-net.or.jp/data_html/39/039-01-2016.html

[学会発表] (計 8 件)

- ① 星野翔太郎、三木朋広、アルカリ骨材反応が生じたコンクリートにおける内部ひび割れの可視化に関する基礎的研究、平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2015.5.30、摂南大学 (大阪)
- ② 星野翔太郎、三木朋広、ASR が生じたコンクリートの空間的ひび割れ状態の把握に関する基礎的研究、土木学会第 70 年次学術講演会、2015.9.16、岡山大学 (岡山)
- ③ Simao, R.M.、Miki, T.、Seismic Damage Analysis of RC Rigid-Frame Railway Viaduct Using 3D Lattice Model、土木学会第 70 年次学術講演会、2015.9.17、岡山大学 (岡山)
- ④ 渡邊大基、三木朋広、世界最高レベルの圧縮強度を有する超高強度繊維補強コンクリートの圧縮破壊挙動の高速計測、平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2016.6.11、立命館大学 (滋賀)
- ⑤ 渡邊大基、三木朋広、河野克哉、超高強度繊維補強コンクリートの圧縮破壊挙動に関する高速画像計測、土木学会第 71 年次学術講演会、2016.9.9、東北大学 (仙台)
- ⑥ 塚原宏樹、三木朋広、表層研磨した ASR 劣化コンクリートはり供試体におけるひび割れ進展挙動に関する研究、土木学会第 71 年次学術講演会、2016.9.8、東北大学 (仙台)
- ⑦ 田中敦士、三木朋広、軸方向鉄筋が部分的に腐食した RC ディープビームのせん断耐荷機構評価に関する実験的研究、平成 29 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2017.5.27、大阪工業大学 (大阪)
- ⑧ 田中敦士、三木朋広、部分的鉄筋腐食を

させた RC ディープビームにおけるせん断耐荷力の実験的研究、土木学会第 72 年次学術講演会、2017.9.12、九州大学 (福岡)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 朋広 (MIKI, Tomohiro)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30401540