

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560562

研究課題名(和文) 地盤の非線形性を考慮した群杭基礎の杭間相互作用とインピーダンス特性の実験的評価

研究課題名(英文) Experimental Evaluation of Pile-to-Pile Interaction and Impedance Functions with Local Nonlinearity in Soils

研究代表者

齊藤 正人 (SAITOH, Masato)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40334156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、建物を支持する群杭基礎の強震時におけるインピーダンス特性について、模型実験を実施してその動特性を評価したものである。インピーダンス特性とは、建物を支持する基礎と地盤のばね特性を呼称するものであり、特に動的な効果を含めたばね特性を意味する。近年観測されるような強震時には、基礎近傍に地盤材料の非線形性が生じる。そのため、従来知られている線形弾性を仮定したインピーダンス特性とは異なることが予想される。本研究では、杭間の相互作用特性の評価、インピーダンス特性の評価と評価式を構築した。本研究により、地盤の非線形性はインピーダンス特性に著しい変化をもたらすことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This study dealt with impedance functions (IFs) of pile groups subjected to strong vibrations due to earthquakes. IFs are defined as dynamic stiffness and damping representing dynamic characteristics at the interface between superstructure and soil-foundation systems. In general, impedance functions have been evaluated under linear-elastic conditions of soils. However, in accordance with the recent earthquake events, strong ground motions and resultant high amplitude of structural response may generate strong nonlinearity in soils near the piles. Therefore, this study conducted model tests on fixed-head floating piles embedded in cohesionless soil carried out under 1-g conditions, to investigate the effects of local soil nonlinearity on the impedance characteristics of pile groups. Results obtained from such tests indicate that soil nonlinearity markedly change impedance characteristics.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：非線形動的相互作用 杭基礎 インピーダンス 杭間相互作用 模型振動実験

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者は、科学研究費補助金(若手研究 A: 研究課題番号 20686031)(期間: H20-H21)において、「基盤構造メカニカルインターフェース」の構築を行い、所定の目標性能を達成するに至った(図1)。この基盤構造メカニカルインターフェース構築の着想に至った発端を振り返れば、近年の超大型振動台による実大地震動加振実験が実施される中で、地上構造物のみをモデル化する事例が大多数であり、全体系応答に極めて重要な影響を及ぼす地盤-基礎系システムのモデル化が行われていないことがその第一要因であった。半世紀にわたる地盤-基礎-地上構造物全体系の動的相互作用の目覚ましい研究により、地上構造物の地震時挙動がこれを支持する地盤-基礎系システムのインピーダンス特性(剛性と減衰特性)に著しく影響を受けることが明らかにされている。これに反して地上構造物のみを対象に実験を実施している最大の要因としては、近年建設された超大型クラスの振動台であっても、一般に20m~40m寸法の杭基礎と、それと同位相で振動する数百トンの地盤質量を、地上構造物と合わせて振動台上で再現することは困難を極めるためである。

そこで本研究代表者が平成19年にアメリカ土木学会(ASCE)のJournal of Engineering Mechanicsにおいて世界で初めて提案したGyro-mass要素を用いたGyro-Lumped Parameter Model(以下、GLPM)の実機械装置化(メカニカルインターフェース)を、上記の科学研究費補助金課題(20686031)で実施し、その実現可能性を実証したのである。

Lumped Parameter Model(LPM)とは、インピーダンス特性、特に地盤-基礎系においては加振振動数の違いによりばね特性や減衰特性が変化する「振動数依存性」を表現するための手段の一つであり、質量、ばね、ダンパーの3種類の機械要素を好適に組み合わせ、システム全体として目標とするインピーダンス特性をシミュレートするモデルである。従来のLPMには複雑な振動数依存性を表現することが困難であることや、負の係数を持つ質量、ばね、ダンパーなどを含むことが頻繁であることなどが問題であった。しかし、本研究代表者が提案したGLPMでは、通常質量を用いる代わりに、回転する質量から生成される水平反力(Gyromass)を用いることで、数少ない要素数で、且つ全て正の係数を持つ要素により、複雑なインピーダンス特性を表現することができる。上記20686031では、巨大な地盤基礎系を直接モデル化する代わりに、動的な反力特性(インピーダンス特性)を表現できるGLPMを実機械装置化(メカニカルインターフェース)したのである。

当該研究の結果、所定のインピーダンス特性を本装置が十分な精度で再現できること

が明らかとなった。特に、回転質量と重ねギアとの連動による増速効果が、小さな質量から大きな慣性抵抗を生成させることができ、装置の飛躍的なコンパクト化・小スペース化が実現できた。これは地震工学史上、基礎-地盤系をコンパクトな機械装置で再現した初めての事例である。

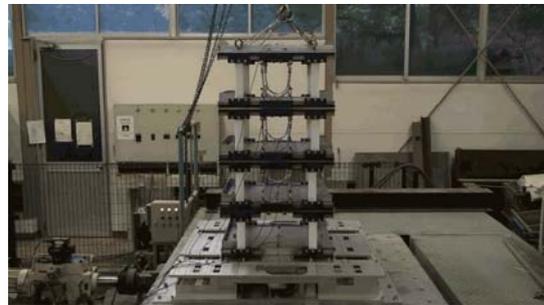


図1 メカニカルインターフェースを用いた模型振動実験(研究課題番号20686031)

2. 研究の目的

このような背景において、メカニカルインターフェースは地盤-基礎系の代替システムとして今後利用されていく機運が高まるものと思われる。ところが、近年の地震被害事例に見る様に、地盤-群杭系が降伏に至るような状況が浮き彫りにされている。また、最近の性能設計思想として、壁式橋脚のように強固な地上構造物に対しては、地盤-群杭系を降伏・損傷させて、運動エネルギーの吸収を促進させる向きがある。つまり、従来のように地盤-群杭系の降伏を許容しない弾性範囲内での特性のみならず、降伏後の地盤-群杭系の動特性を再現できるインターフェースがこれからの地震工学では必要となる。ところが、新たなインターフェースを構築する以前の問題として、喫緊に解決すべき研究課題が存在する。その課題とは、降伏後の群杭基礎のインピーダンス特性が一切解明されていない点にある。つまり、構築するインターフェースの目標値・目標性能が現時点では不明ということの意味している。このことは、幾多の研究論文が存在する弾性領域でのインピーダンス特性とは状況を著しく異にする。

そこで本研究では、群杭基礎の強震時(非線形時)インピーダンス特性の評価を解決すべき課題として取り上げる。研究代表者が世界地震工学会議で平成20年に発表した論文によれば、群杭基礎の非線形挙動は極めて複雑であり、また構造物応答に及ぼす影響は甚大であることが判明している。群杭基礎のインピーダンス特性の支配要因の一つとして、杭間相互作用係数が挙げられる。この杭間相互作用によって振動数依存性が生じることはよく知られている。そのため本研究では、第1に、非線形時における杭間相互作用係数を把握することを研究目的とする。一般に、相互作用係数は杭径、杭間隔、杭配列に影響を受けることが知られており、それらをパラ

メータとして、非線形レベル（加振振幅レベル）と相互作用係数の関係を実験により評価する。第2に、群杭基礎全体としてのインピーダンス特性について非線形レベルを変化させて評価する。第3に、第1で求めた杭間相互作用係数の評価モデル（評価式）の検討、全体系インピーダンス特性の評価モデルを構築し、その適用性を検証する。そして、これらの結果を踏まえて、最後にGLPMの非線形領域への拡張とメカニカルインターフェースへの適用方法について検討し、非線形性を考慮できるGLPMの提案を行う。

上記のとおり、本研究はこれまで解明されていない極めて複雑な群杭基礎の非線形時におけるインピーダンス特性について検討するものである。特に、振動数依存性の把握、ならびに、500Gal入力レベルまでの強非線形性を同時に考慮した実験的評価は皆無であり、本研究の最も卓抜した特色と言える。

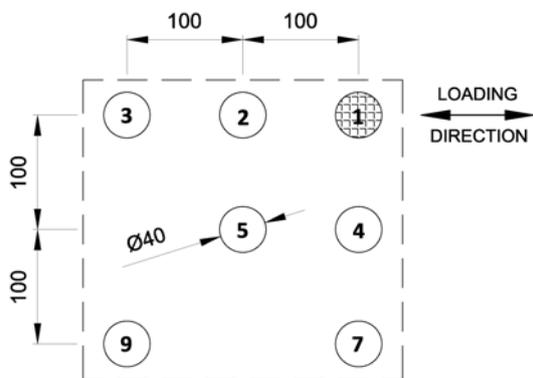


図2 杭間相互作用係数を求める杭配列

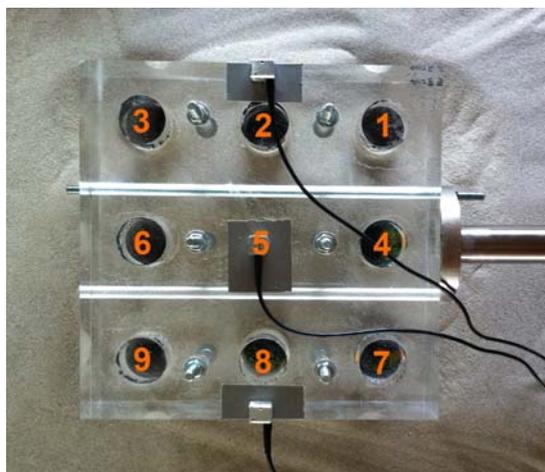


図3 群杭インピーダンス評価実験

3. 研究の方法

平成23年度は、杭間相互作用係数についての模型振動実験を実施し、地盤非線形性が杭間相互作用係数に及ぼす影響について実験的評価を行う。杭間相互作用係数は2つの杭間に生じる動的変位の伝達特性を表すものであり、波長と杭間隔によってその特性は大きく異なることが知られている。この杭間相互作用係数は振動数の関数であり、この係

数を把握することで群杭全体系のインピーダンス特性を物理的に解釈することができる。当該年度は、非線形条件下におけるこの杭間相互作用係数を模型振動実験により求める。実験方法は、埼玉大学所有の水平加振機（油圧加振型、加振力10kN）を用いて杭頭水平調和加振を行う。地盤材料は動的特性が明らかにされている岐阜砂を乾燥状態で用いる。加振パラメータとして、振動数依存性を評価するために0-35Hzの振動数範囲を加振領域とし、非線形性のレベルを考慮するために杭頭位置の加速度をパラメータに加振ストロークを設定する。また、杭配列の構成として、杭間隔 s/d (s は杭間隔、 d は杭径)を4ケース、杭の加振方向と受信杭(receiver)との角度(0度、45度、90度)の3つをパラメータとする(図2)。計測は杭頭部に設けた複数の加速度計をデジタルデータレコーダで収集する。また、全てに共通する鉛直杭の単杭試験を実施し、杭の有効長(Active Length)などの基本特性について、地盤の非線形性と振動数依存性をパラメータに実験を行う。

平成24年度については、主な実施内容が2つあり、1)模型加振実験による群杭インピーダンスの非線形性による影響の評価、そして2)理論-解析解の提案と実験結果との比較・検証である。まず1)については、平成23年度の杭間相互作用係数の評価が群杭内部の要素試験的な役割であるのに対して、平成24年度はそれら要素の積分値を実験的に評価するものと位置付けられる。ここでは標準的な群杭基礎を対象に、非線形条件下における群杭インピーダンス特性を評価するものである。実験方法は、前述の水平加振機先端を群杭基礎の杭頭拘束部(フーチング)に固定し、0-30Hzの振動数範囲で調和加振を行い、非線形性のレベルを考慮するために、加速度振幅を20, 50, 100, 200, 300, 400, 500Galとした加振ストロークを設定する。杭の構成は、3本×3本の9本杭とする(図3)。本実験により、当該基礎の非線形時におけるインピーダンス特性を定量的に評価することができる。インピーダンスの算定方法は、強制変位量と反力(ロードセル計測)の振幅と位相差を複素数値に置換し、剛性項(実部)と減衰項(虚部)を求めることができる。

2)については、平成23年度に実施する杭間相互作用係数の定式化を行い、加振レベル(入力振幅)とインピーダンスの振動数依存性の関係を数値モデルとして表現する。そして、線形弾性を仮定したSuperposition法を適用し、(1)上記で定式化された数値モデルを組み込むことによって、非線形時のインピーダンス関数を誘導する。このモデルの妥当性は、1)で実施した実験結果と比較することで検証可能である。

平成25年度は、平成24年度までに得られた結果を踏まえて、非線形時における

GLPM を構築する。非線形時におけるインピーダンス特性は平成 24 年度までの実験により定量的に把握可能であり、また理論-解析モデルが確立すれば多様な群杭について GLPM の目標性能が定められる。地盤の局所非線形性の効果を GLPM に導入する手法について検討を加える。

4. 研究成果

平成 23 年度は、杭間相互作用係数についての模型振動実験を実施し、地盤非線形性が杭間相互作用係数に及ぼす影響について実験的評価を行った (図 4)。当該年度は、世界で初めての非線形条件下におけるこの杭間相互作用係数を模型振動実験により求めることができた。地盤材料は岐阜砂を乾燥状態 (相対密度 77.5%) とした。実験の結果、杭間相互作用係数は非線形時においても振動数依存性を保持した複雑な特性を示すこと、近傍非線形性の影響は s/d が 2.5 の範囲で顕著となることが明らかとなった。また、平成 24 年度実施を予定していた群杭インピーダンスの非線形性による評価実験は、水平加振実験の一環として鉛直加振より先行して実施した。これにより、上述の杭間相互作用係数を用いた Poulos の superposition 法による群杭インピーダンスが実験によるインピーダンスと良好に一致することが明らかとなり、非線形時にも同手法が適用可能であることを実験的に証明した (図 5)。さらに平成 25 年度に具体的に実施する LPM 構築については、本研究代表者が近年新たに提案したモデル LPM の動的相互作用への適用可能性を模索するため、本年度は先行して単純なフーチング (杭なし) と地盤のインピーダンス特性に関するモデル化手法の評価を行った。複雑な振動数依存性を示す状況を模擬したインピーダンス関数に対して、モデル LPM は少ない自由度で良好な再現性を示すことが確認できた。

平成 24 年度の研究成果として、1) 平成 23 年度に実施した杭間相互作用係数の計測を目的とした実験結果に基づく、杭間相互作用係数の数理モデルの提案と妥当性の検証、2) 同じく平成 23 年度に実施した群杭インピーダンス試験結果の現象解明と前記杭間相互作用係数を用いたスーパーポジション法の比較とその物理的解釈である。

1) に関しては、従来の一様な線形弾性半無限地盤を仮定した杭間相互作用係数 (Dobry and Gazetas, 1988) のモデルを骨格とし、加振加速度の大きさと地盤の非線形性に関する変数を含んだ形で表されるモデルを提案した。本モデルは実験結果を良好に再現することが可能であり、群杭インピーダンスのモデル化のための基本モデルとして極めて重要な成果と言える。

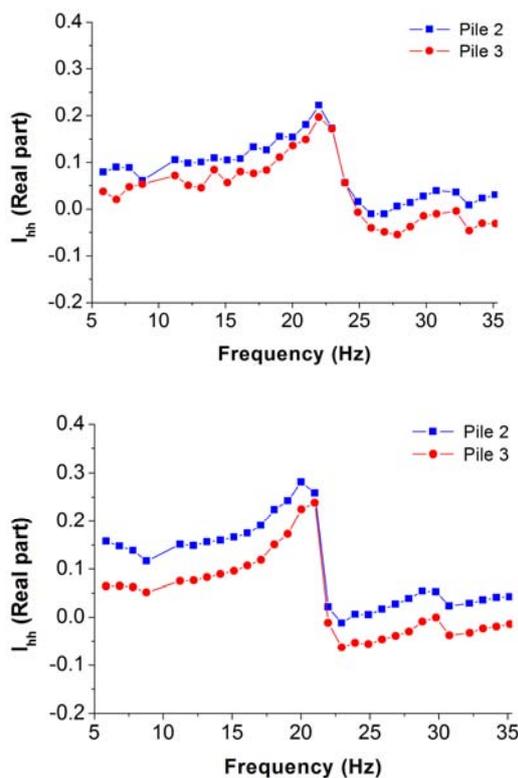


図 4 杭間相互作用係数の加振実験結果 (0.2 m/s^2 (左) と 2 m/s^2 (右))

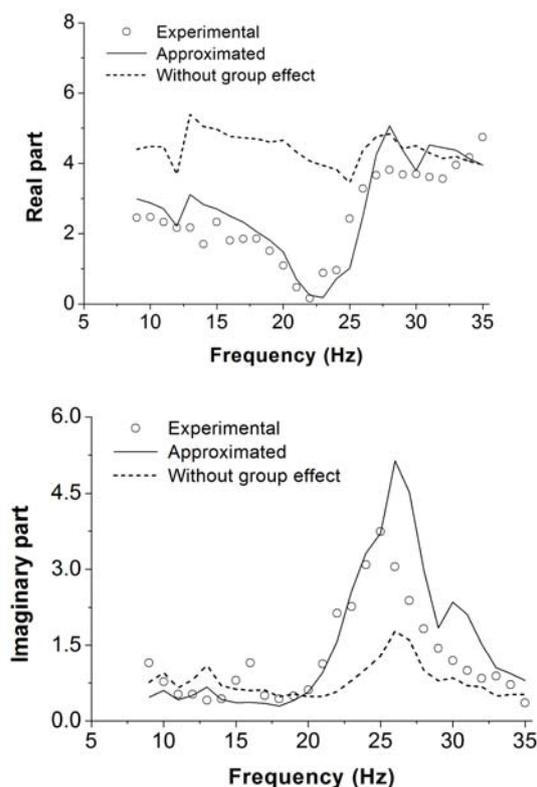


図 5 Superposition 法による水平方向の群杭基礎のインピーダンス特性 (単位 kN/mm) と直接計測した群杭基礎のインピーダンス特性との比較 (2 m/s^2 加振時)

2) に関しては、実験から得られた群杭インピーダンスの力学的特性や性質の現象解明ならびに物理的解釈を行った。平成 23 年度の成果報告で説明しているように、スーパーポジション法が地盤非線形状態においても適用可能であることを確認している。しかしながら、非線形状態にある杭間相互作用係数が、群杭の剛性と減衰（実部と虚部）に及ぼす物理的なメカニズムは不明であった。本年度は、杭間相互作用係数の有無が群杭インピーダンスに及ぼす影響とその相違点を把握した。その結果、杭間相互作用係数の振幅値と位相差の振動数依存性により、群杭内の各杭が分担する単位変位あたりの杭頭反力が変化し、それにより剛性と減衰が振動数に応じて増減することで、群杭全体のインピーダンスが地盤の非線形性によらず特定のパターンで変化すること、そしてその特性は杭間相互作用係数の左記の特性に起因することが解明できた。実験結果から、地盤の非線形性と杭間相互作用、そして群杭インピーダンスを分析した事例はこれまでになく、極めて新しく有用な成果である。

平成 25 年度の研究成果として、1) 杭基礎の鉛直方向に関するインピーダンス特性の把握、2) 非線形性を考慮した GLPM の拡張モデルの開発を実施した。

水平方向の一連の研究を優先的に実施したため、当初計画とは順番が前後したが、1) に関しては、先行して実施した水平方向のインピーダンス特性の実験評価に続く検討として、本研究で構築した鋼製鉛直フレームに鉛直方向にアクチュエータ（10kN）を固定して杭頭インピーダンス特性の実験的評価を行った。本研究により、加振振幅の増加に伴い杭周辺には局所的な非線形性（主に周面滑り）が生じる一方で、鉛直インピーダンスは増加する傾向が加振振動数の広い範囲で確認された（図 6）。この特性はこれまで検討した水平インピーダンス特性とは大きく異なる特性である。その理由として、杭頭押し込み側での杭先端支持力の増加が起因しているものと推察された。加えて、静的試験による荷重-変位関係からは、押し込み側と引き抜き側での著しい特性の違いが確認できた。特に、引き抜き側に対して押し込み側では剛性（割線剛性）がおおよそ 2 倍から 4 倍程度の違いが現れる結果となった。そのため、鉛直インピーダンス特性ならびに杭間相互作用係数については、これまで実施した水平インピーダンスのモデル化を直接適用することは困難であることが明らかとなった。振動数ごとに荷重-変位関係をモデル化するなどの工夫が必要と思われる。

2) については、線形弾性を仮定した GLPM に多段式のマルチ摩擦モデルを与えることで、地盤ばねとしての有効抵抗土圧を考慮できる非線形 GLPM モデルを考案した。平成 23 年度からの非線形性を考慮した杭間相互作用係数のモデル化、ならびに群杭基礎のイン

ピーダンス特性の Superposition 法の開発と検証により、地盤の局所非線形性を考慮した応答予測のための要素技術を構築できた。今後、それらの要素技術を統合した応答予測手法を確立する上で極めて重要な成果と言える。

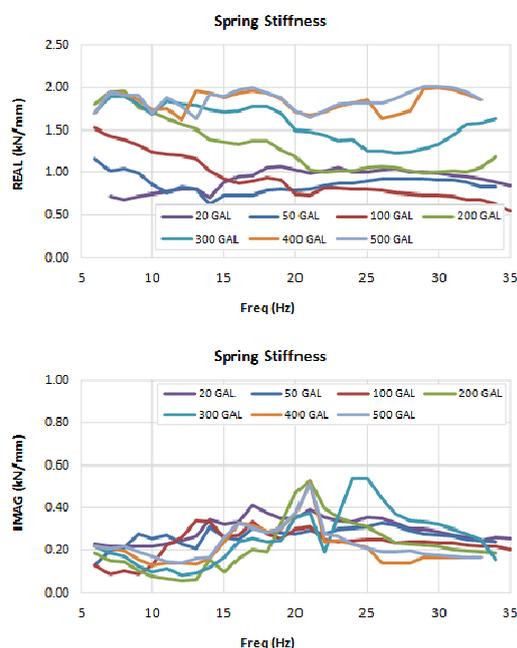


図 6 鉛直加振振幅の違いによる鉛直インピーダンス特性の評価

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 3 件）

1) Goit, C. S., Saitoh, M., Oikawa, H., and Kawakami, H., Effects of soil nonlinearity on the active length of piles embedded in cohesionless soil: model studies, Acta Geotechnica (published on line), DOI 10.1007/s11440-013-0257-0, 2013.

2) Goit, C. S., Saitoh, M., Mylonakis, G., Applicability of Principle of Superposition in Obtaining Horizontal Impedance Functions of Pile Groups under Soil Nonlinearity, Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (CD-ROM), pp.1-7, 2013.

3) Goit, C. S., Saitoh, M., Mylonakis, G., Kawakami, H. and Oikawa, H., Model tests on horizontal pile-to-pile interaction incorporating local non-linearity and resonance effects, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.48, 175-192, 2013.

〔学会発表〕（計 3 件）

1) 齊藤正人, Goit Chandra, Mylonakis George, 地盤の非線形性を考慮した杭間相

相互作用係数と Superposition Method の適用性に関する実験的研究, 土木学会平成 25 年度全国大会 第 68 回年次学術講演会, 2013, 9.4~9.6 日大津田沼キャンパス

2) 齊藤 正人, Chandra Shekhar Goit, 及川大輝, George Mylonakis, 地盤の非線形性を考慮した群杭基礎のインピーダンス特性と動的復元力特性に関する実験的検討, 土木学会平成 24 年度全国大会 第 67 回年次学術講演会, 2012, 11.8~11.10 オリピックセンター

3) Goit C. S., Saitoh M. and Mylonakis G., Model tests on validation of principle of superposition in obtaining pile groups' horizontal impedance functions under soil non-linearity, Proceedings of the International Symposium on Earthquake Engineering, Japan Association for Earthquake Engineering, 2012, 9.5~9.7 名古屋大学

〔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:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 正人 (SAITOH, Masato)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 40334156

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: