

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04031

研究課題名(和文) 微視的材料解析と巨視的構造解析を統合した構造性能評価システムの開発

研究課題名(英文) Development of a performance assessment system for concrete structures by using meso-scale and macro-scale structural analyses

研究代表者

斉藤 成彦 (SAITO, Shigehiko)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：00324179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート構造物の老朽化が進み、崩落のリスクが高まる中、劣化の生じた構造物の保有性能や将来的な性能変化を定量的に評価できる手法の開発が急務となっている。非線形構造解析手法は、有用な性能評価手法として期待されているが、複雑な材料の劣化過程やコンクリートの時間依存変形等を構造解析手法と組合せた事例は極めて少ない。本研究では、コンクリートの微視的構造に立脚することで多様な材料損傷の定量化を実現する非線形数値解析手法を提案し、コンクリート構造物に対する先進的な構造性能評価システムの構築に資することを目的とした。

研究成果の概要(英文)：There is a need to develop a reliable method for assessing the performance sustained by deteriorated concrete structures. A numerical simulation is one of the useful and comprehensively understanding approaches for such the performance assessment of existing structures, where there are difficulties in modeling time-dependent behaviors in constitutive materials because of their complexity. In this research, based on the micro- and meso-scale analyses of concrete as composite materials, concrete damage due to cracking would be quantified, then the macro-scale structural analysis would provide the performance of deteriorated existing concrete structures.

研究分野：コンクリート構造学

キーワード：コンクリート構造 剛体バネモデル 微視的構造解析 巨視的構造解析

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会の実現に向けて、老朽化する社会基盤施設を合理的かつ安全に維持管理するためには、従来の点検に過度に依存した消極的延命化策を捨て、適切な時期に補修・補強や廃棄・更新を実施する積極的改善策への方針転換が急務となっている。適切な対策の実施には、供用下にある構造物の保有性能とその後の性能変化を正確に把握する必要がある。しかしながら現状では、目視点検より得た外観変状に基づく簡易な(経験的な)評価法の適用が主流であり、構造物の性能を定量的に評価・予測できる手法の開発が求められている。

社会基盤施設に多用されているコンクリート構造物の定量的性能評価手法としては、有限要素法に代表される非線形数値解析手法の適用が期待されており、解析技術の高度化や実務設計への応用は日本の研究者の得意とする領域である。非線形数値解析手法を用いた性能評価における技術的課題は、材料劣化や力学的荷重に起因する多種多様な損傷の経時変化が構造性能に及ぼす影響を定量的に扱うことが困難なことにある。材料劣化の生じた構造物に関する研究は活発に行われているが、国内外を問わずその多くは点検技術や材料の劣化機構に関する研究であり、構造物の性能評価に関する研究の体系化は進んでいない。これは、材料劣化に伴う構造性能の変化は実験により定性的には確認できるものの、材料劣化の程度を制御することが難しく、損傷量と力学性能の変化との関係を定量的に評価することが困難なことによる。したがって、材料の微視的構造に基づいた新たな構造性能評価手法の開発は、コンクリートの劣化や時間依存変形等に起因する材料損傷の定量化を可能にするとともに、構造物の性能評価手法の相互検証を踏まえた日本独自の評価技術として、将来的な展開が期待されるものである。

そこで本研究では、独創的かつ先進的な離散型構造解析手法を発展させ、材料の微視的構造に立脚した機構解析(材料解析)により材料損傷の定量化を行い、その情報をインプットとした巨視的構造解析の実施により、材料劣化の生じた構造物の構造性能評価を可能とする新たな性能評価システムの構築を目的とする。

2. 研究の目的

コンクリート構造物の維持管理に関する研究の多くは、材料の劣化機構の解明と点検技術の高度化に関するものであったが、橋梁本体またはその付属物の落下事故のリスクが高まる中、劣化の生じた構造物の保有性能や将来的な性能変化を定量的に評価できる手法の開発が急務となっている。非線形構造解析手法は、有用な性能評価手法として期待されているが、複雑な材料の劣化過程やコンクリートの時間依存変形等を構造解析手法

と組合せた事例は極めて少なく、その妥当性検証は困難な状況にある。そこで本研究では、コンクリートの微視的構造に立脚することで多様な材料損傷の定量化を実現する非線形数値解析手法を提案し、コンクリート構造物に対する先進的な構造性能評価システムの構築に資することを目的とする。

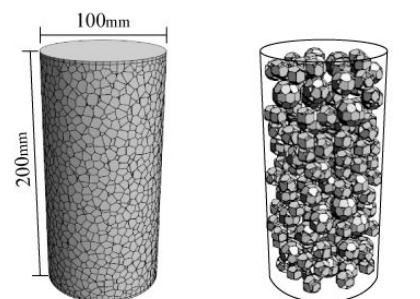
3. 研究の方法

本研究では、微視的材料解析と巨視的構造解析を統合した構造物の性能評価システムの構築を目的とし、研究代表者独自の解析技術を発展させた新たな微視的構造解析プログラムの構築、要素実験との比較による微視的構造解析プログラムの検証と材料損傷の定量化、巨視的構造解析プログラムとの統合による構造性能評価システムの構築と事例検討を行う。具体的には、既往の研究により開発してきた離散型構造解析手法を基に、コンクリートを骨材粒子、マトリックス、粒子界面からなる三相材料としてモデル化する微視的材料解析プログラムを作成し、促進劣化させた実験結果との比較検証を行う。更に、研究代表者が開発した構造物の巨視的解析プログラムに統合した上で、材料劣化の生じた実構造物の性能評価を実施し、解析システムの妥当性を検証する。

4. 研究成果

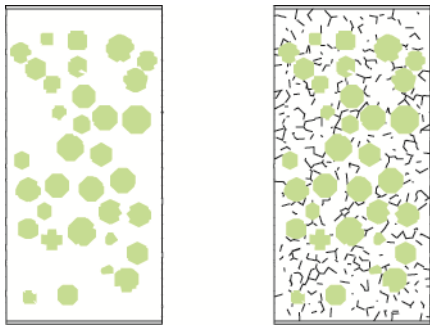
(1) 微視的構造解析に関する研究¹⁾

社会基盤施設の老朽化が深刻化する中で、材料劣化の生じた構造物の耐荷性能を定量的に評価する手法の開発が望まれている。有限要素解析等の数値解析技術を用いて既設構造物の耐荷力を予測するには、材料劣化の程度を把握し、材料の力学モデルに反映させることが必要となる。例えば、アルカリシリカ反応や凍害等を生じたコンクリートは、強度や弾性係数が低下することが知られている。しかしながら、材料劣化の程度と力学特性との関係を定量的に扱うことは困難な場合が多い。アルカリシリカ反応や凍害それぞれの劣化メカニズムは異なるが、いずれの場合でもコンクリートに生じる多数のひび割れが力学特性に影響を与えている。そこで本研究では、コンクリートに生じた多数のひび



a) 要素分割図 b) 骨材分布図

図 - 1 コンクリート円柱供試体概要



a) 損傷なし b) 損傷率 25%

図 - 2 不連続面の分布例

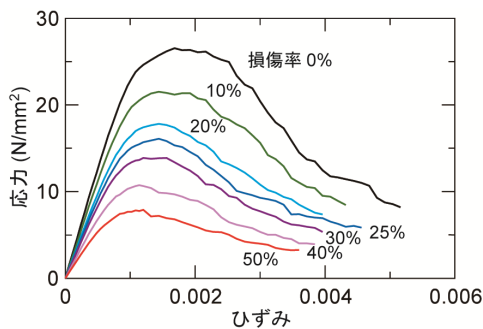


図 - 3 応力 - ひずみ関係

割れ（不連続面）が強度や弾性係数に与える影響を把握するため、円柱供試体の一軸圧縮試験を対象に基礎的な検討を行った。

コンクリートの力学特性を解析的に評価する手法の一つにメソスケール解析がある。これは、コンクリートの平均的な（マクロスケールでの）挙動を、骨材粒レベル（メソスケール）での比較的簡易なモデルで表現しようとするものである。離散型の解析手法である剛体パネモデルを用いたコンクリート供試体の解析には多くの実績があり、研究代表者も剛体パネモデルを用いたメソスケール解析により、一軸圧縮力を受けるコンクリート円柱供試体の破壊挙動が適切に評価できることを示している。そこで、予めひび割れ（不連続面）を導入したコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験を解析することにより、不連続面の量が圧縮強度や弾性係数に及ぼす影響について検討を行った。また、打設時にラミネート片を混入することで不連続面を模擬したコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験を実施し、解析結果の妥当性を議論した。

コンクリート内部に生じたひび割れが圧縮破壊特性に与える影響について検討するため、予め比較的微細な不連続面を一定量導入した円柱供試体の解析を行った。解析対象は、図 - 1 に示す直径 100mm、高さ 200mm のコンクリート円柱供試体で、Voronoi 分割を適用した 3 次元剛体パネモデルによりモデル化した。供試体内には、粒径 12mm 以上（最大寸法 20mm）の粗骨材をランダムに生成して、体積比で 30%を配置した。コンクリート供試

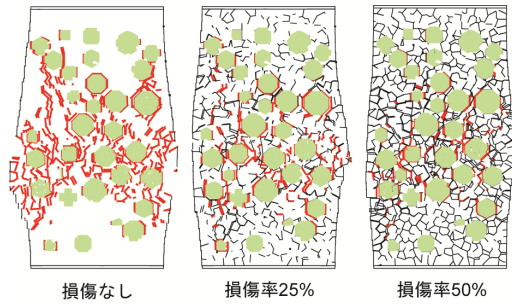


図 - 4 ひび割れ性状（最大応力後 50%）

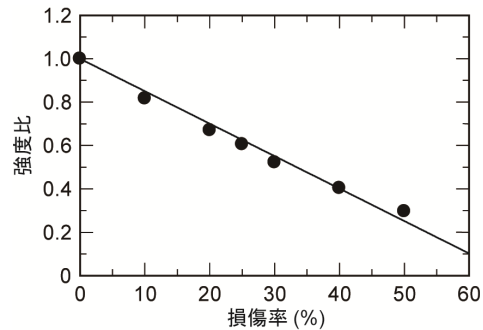


図 - 5 強度比 - 損傷率関係

体は、モルタル要素間パネ、骨材要素間パネ、モルタル要素 - 骨材要素間（界面）パネによる 3 相材料としてモデル化した。既往の研究に基づき、垂直パネには、破壊エネルギーを用いて引張軟化 1/4 モデルを導入し、圧縮応力下では破壊は生じないものとした。また、せん断パネにはモール・クーロン型の破壊基準を導入し、せん断すべり破壊を考慮した。

予め導入する微細な不連続面を定量的に扱うため、ここでは、モルタル要素間パネの面積（平均 10mm^2 ）を損傷量の指標とした。解析に用いた円柱供試体モデルのモルタル要素間パネの総面積（約 $5 \times 10^5\text{mm}^2$ ）を基準とし、例えば損傷率 25%の供試体は、総面積の 25%にあたるパネをランダムに抽出して取り除くことにより生成した（図 - 2）。なお、この損傷率はパネの影響体積（要素間パネの面積 \times パネ長さ / 3）を用いて算出しても同等の値となり、本論でのモルタル損傷率 25%の供試体は、モルタル部分に対する体積比では 25%に、供試体全体に対する体積比では約 18%の損傷率となる。

解析より得られた応力 - ひずみ関係を図 - 3 に示す。いずれの供試体も最大応力に達した後、ひずみの増大とともに応力が低下しており、圧縮応力下のコンクリートの応力 - ひずみ関係をよく表している。また、モルタルパネの損傷率が増加するにつれて、最大応力と弾性係数の低下が見られる。

損傷率 25%および 50%の供試体について、最大応力の 50%まで応力が低下した時点でのひび割れ性状を図 - 4 に示す。損傷率 25%および 50%の供試体は、予め導入した不連続面（黒色）と载荷により生じた新たなひび割れ

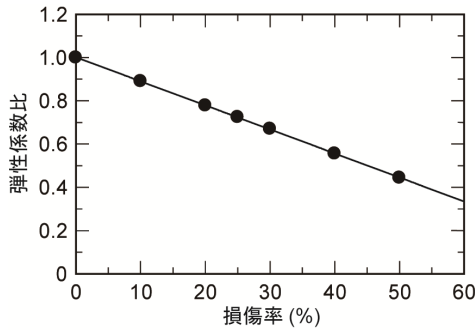


図-6 弾性係数比 - 損傷率関係

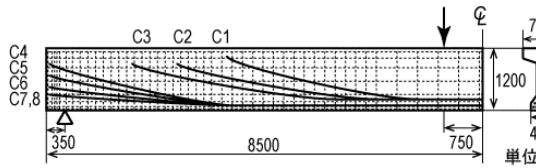


図-7 試験体概要

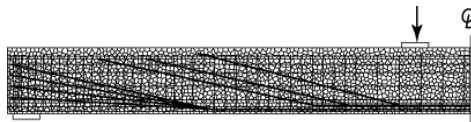


図-8 解析モデル

(赤色)が連結することにより破壊に至っている。また、損傷率が大きくなるにつれて、モルタルの弾性体としての性質が損なわれることから、供試体の体積膨張が小さくなっていることがわかる。

図-5 および図-6 に、損傷のない供試体で正規化した強度および弾性係数と損傷率の関係を示す。図中の直線は近似直線である。不連続面を導入した供試体の強度および弾性係数は、損傷率の増加とともに、ほぼ線形的に低下していることが確認できる。また、弾性係数の低下率は強度のものより小さい。これは、コンクリートの強度には破壊面を形成するモルタルの損傷が直接的に影響するのに対し、普通強度のコンクリートの弾性係数には骨材の弾性係数の方が大きく影響するため、モルタルの損傷の影響は小さいことを示している。

上記の解析では、不連続面でバネを完全に切り除いているため、不連続面での応力の伝達は一切ない。そこで、不連続面の垂直バネを残し、引張応力とせん断応力に対しては応力伝達0、圧縮応力に対しては弾性的に応力伝達を生じるものとして解析を行ってみた。解析より得られた応力 - ひずみ関係を図-11に、強度比 - 損傷率関係を図-12に示す。損傷率が増加すると最大応力が低下する傾向を示すが、その低下率はバネを取り除いたものよりかなり小さくなった。また、弾性係数については、不連続面を有しても変化しておらず、不連続面でも圧縮力を伝達することができれば、初期の弾性挙動には影響を及ぼさないことがわかる。

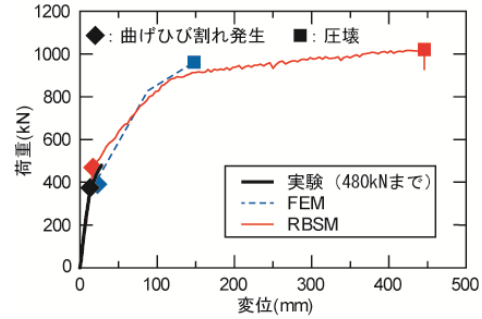


図-9 荷重 - 変位関係 (健全)

(2) 巨視的構造解析に関する研究²⁾

塩害等により劣化したコンクリート構造物の合理的な維持管理を行うためには、鋼材腐食が構造物の耐荷性状に与える影響を正確に把握する必要がある。鋼材腐食の生じた鉄筋コンクリート部材に関する研究は精力的に行われており、その耐荷性状は明らかになりつつあるが、プレストレストコンクリート(以下、PC)部材で鋼材腐食が生じた場合には、プレストレスの消失や鋼材の早期破断等により、耐荷機構は非常に複雑なものとなる。鋼材腐食の生じたPC部材に関する研究はまだ少ないが、既往の研究により、鋼材腐食の生じたPC部材では腐食量のばらつきや局所的な腐食が耐力・剛性に影響を与えることが確認されている。鋼材腐食の生じたPC部材に対する精度の高い構造性能評価法の構築が急務となる中、数値解析は耐荷性能を定量的に評価可能なツールとして極めて有効である。実際に約32年間供用され、鋼材腐食を生じた道路橋PC上部工に対して解析的に検討が行われた例も見られる。そこで本研究では、既往の研究で部材実験との比較検証に基づき提案した数値解析手法を実際に供用されたPC桁に適用し、鋼材腐食や破断が耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。

解析対象は、首都高速横浜環状北線の工事に伴い撤去された首都高速横羽線生麦入口のPC桁で、撤去後に耐荷性状を確認するための載荷試験が実施されたものである。44年供用されたポストテンション方式単純PC桁で、かぶりコンクリートの剥離による鉄筋露出、ひび割れ、豆板等が近接目視により確認されたが、比較的健全な状態であると判断されている。試験体の諸元を図-7に示す。PC鋼線の切断によりプレストレス消失を模擬した試験に用いられた試験体で、I形断面内に12本のPC鋼線が8本配置されている。

解析には、離散型の解析手法である2次元剛体バネモデル(RBSM)を用いた。PCはり部材の実験結果との比較検討により、健全な場合および鋼材腐食の生じた場合の耐荷性状を比較的よく再現できることを確認している。解析モデルを図-8に示す。計算労力を低減するため、片側半スパンのみをモデル化し、

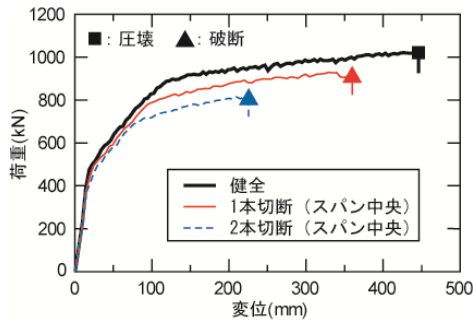


図-10 荷重 - 変位関係 (切断)

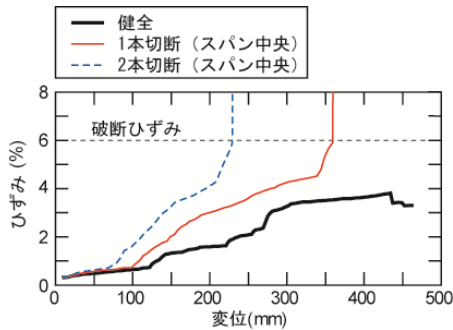


図-11 PC 鋼線ひずみ - 変位関係

フランジとウェブの奥行き方向の要素幅を変えた 2次元解析とした。

撤去された PC 桁に対して静的載荷試験、疲労試験、および解体調査を実施した結果、44 年供用後も PC 鋼線やコンクリートは健全な状態に保たれていたことが確認されている。そこで、この撤去 PC 桁試験体を健全試験体とし、文献に報告されている実験結果 (480kN まで載荷)、および上縁コンクリートの圧壊までの FEM 解析値と比較することで、本論の解析モデルの検証を行った。なお、FEM 解析は、ほぼ同様の諸元の実験結果との比較により、その精度が検証されている。図-9 に、荷重 - (スパン中央) 変位関係を示す。RBSM による解析結果は、実験および FEM 解析より得られた曲げひび割れ発生荷重をやや過大評価している。また、RBSM 解析の最大荷重は FEM 解析とほぼ対応したものの、最大荷重時の変位は、かなり過大評価する結果となった。これは、実験では桁上面に設計基準強度 30N/mm² の床版が合成された状態で載荷されていることから、比較的早期に圧壊することが想定され、FEM 解析はこの床版の影響を考慮しているものと推察される。RBSM 解析の結果は、曲げひび割れの発生、PC 鋼線の降伏、上縁コンクリートの圧壊といった破壊過程を適切に再現できており、PC 桁の挙動を概ね評価できていると判断できる。

図-10 に、スパン中央において PC 鋼線 C4 を 1 本切断した場合、および PC 鋼線 C4 と C1 の 2 本を切断した場合の解析より得られた荷重 - 変位関係を示す。PC 鋼線を切断することにより、曲げひび割れ発生荷重および最大荷重が低下するとともに、上縁コンクリートの

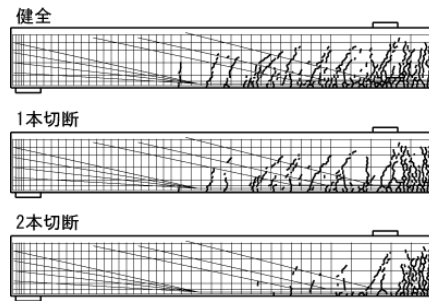


図-12 ひび割れ性状 (スパン中央切断)

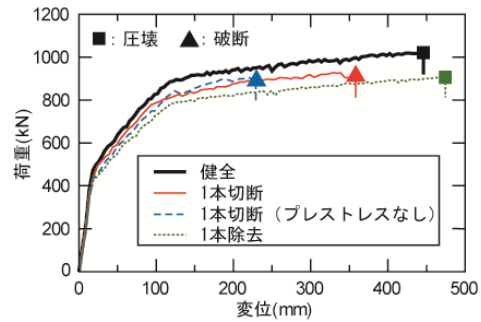


図-13 PC 鋼線のモデル化の影響

圧壊ではなく PC 鋼線の破断により破壊に至っていることが確認できる。図-11 に、切断されていない PC 鋼線 (C5) のスパン中央におけるひずみ - 変位関係を示す。PC 鋼線を切断することにより、鋼材量の少ない断面に応力が集中し、PC 鋼線のひずみが早期に破断ひずみに達していることが確認できる。

解析より得た変位 200mm 時点におけるひび割れ性状を図-12 に示す。PC 鋼線の切断本数が増えるにつれ、スパン中央の断面に損傷が集中するため、ひび割れの分散性が低下していることが確認できる。

図-13 に、切断した PC 鋼線のモデル化の違いが耐荷性状に及ぼす影響について検討した結果を示す。前述の解析結果である「1 本切断」は、スパン中央で PC 鋼線を 1 本切断したもので、切断した断面の近辺でプレストレスが消失した状態をモデル化したものである。それに対し、「1 本切断 (プレストレスなし)」は、スパン中央で PC 鋼線を 1 本切断するとともに、切断した PC 鋼線のプレストレスを部材全域にわたって消去したものであり、プレストレス量の減少によって部材の引張抵抗性が低下したため、より早期に破断が生じて破壊に至ることが分かる。一方、「1 本除去」は、切断する PC 鋼線そのものを部材全域にわたって除去してしまったもので、スパン中央で 1 本切断した場合に比べて剛性は小さいものの、コンクリートの圧壊によって破壊に至っている。これより、PC 鋼材の切断によって鋼材量の少ない断面が生じた場合には、応力が集中するため早期の破断による破壊が生じやすくなることが確認できる。したがって、PC 鋼線が破断している場合に、

破断した PC 鋼線を完全に消去（無いものと）して解析を行うことは、必ずしも安全側の評価にならない場合があることに注意する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

大垣志穂, 斉藤成彦, 渡辺忠朋: 微細な損傷を有するコンクリート円柱供試体の圧縮破壊特性に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.40, 印刷中, 2018

中村宗一郎, 斉藤成彦: PC 鋼材の腐食のモデル化が PC 桁の耐荷性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.40, 印刷中, 2018

大垣志穂, 斉藤成彦, 渡辺忠朋: 微細な不連続面を有するコンクリート円柱供試体の圧縮破壊特性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, pp.85-90, 2017

斉藤成彦, 小林京史郎: 数値解析による鋼材腐食の生じた PC 桁の耐荷性状評価, 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, 査読有, Vol.24, pp.469-474, 2015

〔学会発表〕(計 3 件)

大垣志穂, 斉藤成彦: 損傷を有するコンクリート円柱供試体の圧縮疲労特性に関する基礎的研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 発表予定, 2018

中村宗一郎, 斉藤成彦: PC 鋼材の切断が PC ホロ-桁の耐荷性状に与える影響, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 発表予定, 2018

大垣志穂, 斉藤成彦: 損傷を有するコンクリート円柱供試体の圧縮破壊特性に関する基礎的実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, V-343, 2017

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~ssaito/conc/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斉藤 成彦 (SAITO, Shigehiko)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号: 00324179