

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560665

研究課題名(和文) ロッキング挙動を考慮したリアルタイム残余耐震性能判定装置の開発

研究課題名(英文) Development of a residual seismic capacity evaluation system with considering the rocking behavior

研究代表者

楠 浩一 (KUSUNOKI, KOICHI)

横浜国立大学・都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：00292748

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

研究成果の概要(和文)：建物の剛性が地盤に比べて相対的に高い場合、地盤のロッキング変形による影響が、建物の応答計測値から作成した性能曲線に含まれる。これは、地盤の非線形性があたかも建物の非線形性のように考慮されてしまうため、性能曲線から建物の損傷を判定するためには、ロッキングの影響を除去する必要がある。そこでまず、加速度計による建物のロッキング変形の計測の可能性を実構造物の計測により確認した。更に、ロッキング変形を鋼製ばねによりモデル化した鉄骨平面試験体による振動台実験を実施し、試験体脚部でのロッキング回転角 - 代表加速度関係を計測し、性能曲線からロッキングの影響を除去する方法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：When the stiffness ratio of a building to the ground is relatively high, the soil-structure interaction is not negligible. Under the condition, rocking behavior of the ground affects the performance curve derived from the measured accelerations on the building. Therefore, the effect of the rocking behavior needs to be subtracted from the performance curve in order to evaluate the building damage from the performance curve.

In this research, firstly it is confirmed with a real building that the rocking angle at the bottom of the building can be measured with the accelerometers placed at the bottom of the building. Secondly, a shaking table test with steel test frame that has rocking devices at the bottom of the frame was conducted to evaluate the accuracy of the measured relationship between the rocking angle and representative force.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：応急危険度判定 地盤と建物の相互作用 ロッキング挙動 ヘルスモニタリング 等価線形化法 加速度計 振動台実験

## 1. 研究開始当初の背景

大地震時には、多くの建物が被災し、その結果、多くの避難民を生む事となる。被災した建物の中には、その損傷ゆえに余震によって更に損傷が拡大し、建物内の人に甚大な2次被害を生じる可能性のあるものがある。また、それとは逆に、工学的な検証により、余震に対して十分な耐震性能を依然保有している建物に対しても、地震に対する恐怖心から住民が建物から避難し、その結果避難民の数を増加させる場合がある。余震による2次被害を低減するとともに、避難民の数を減らすためには、本震後の迅速な建物の応急危険度判定が必要不可欠である。しかし、現状では設計技術者あるいは研究者が目視で1棟ずつ応急危険度判定を実施しているのが現状であり、例えば平成7年兵庫県南部地震の際には、被災地域にの建物が約55万9千棟であったのに対して、判定を行った技術者のべ6000人で、46,000棟を判定するのに3週間が必要であった。判定に必要とした期間も長く、判定建物数も充分とはいえない。また、目視に依るが故に技術者のレベルによって判定が大きくばらつくことが問題である。更に技術者による詳細な調査が必要となる「要注意」という灰色の判定が多く出され、この詳細調査には時間がかかり、その結果、住民の不安を早急に取り除くことができず、避難民の数を増やす事となる。

そこで、本研究では、各建物に数台の安価な加速度センサーを配置し、その加速度センサー計測値を用いて、建物の地震時の応答を算出し、地震後の残余耐震性能をリアルタイムで判定する技術の確立を目的としている。

本研究では、建物基礎部に配した加速度センサーにより入力地震加速度を計測し、応答スペクトルを計算することによって入力地震動の要求曲線を作成する。この要求曲線とは、ある建物減衰に対して、縦軸に加速度応答スペクトルをとり、横軸に変位応答スペクトルをとった曲線であり、弾性一質点系の応答値を示し、各点と原点とを結んだ直線の傾きは系の角振動数の2乗となり、建物周期と関係している。また、建物内に配した数個の加速度センサーにより、建物の加速度を計測し、更に建物内および基礎部の加速度計測値を2階積分することにより、建物の相対応答変形量を算出する。これら慣性力および応答変形量から建物側の性能曲線を作成する。性能曲線とは、建物の1次モードに対する慣性力-変位関係の包絡線である。得られた性能曲線および要求曲線を用いて、建物の地震時応答を推定するとともに、建物の限界変形と応答値が等しくなる要求曲線を求めることから、建物が耐え得る将来の地震動の大きさ、つまり建物が保有する残余耐震性能を推定する。

応答スペクトルから建物の応答を推定する方法は、「等価線形化法」と呼ばれ海外や日本でも研究が精力的に行われており、特に日本では、2000年の建築基準法の改正に伴

い、「限界耐力計算法」として設計法の一つに認められた。しかし、本設計法は建物の振動を1次モードが卓越すると仮定した設計法であり、多自由度応答を示す実存の地震応答に対して直接等価線形化法を適用する試みは他には無い。さらに、この等価線形化法を建物の残余耐震性能評価に用いた例も無い。「等価線形化法」を実建物の残余耐震性能評価に用いる技術が確立されることにより、建物の地震後の耐震性能を、将来起こりうる地震入力に対して明確に表示することが可能となる。

本技術は、H14～H16の科学研究費補助金若手研究(B)およびH19～H21の科学研究費補助金基盤研究(C)の助成を受け、横浜国立大学建築学棟および大学院棟の各階に加速度計を設置し、24時間の観測を行い、判定手法の確立を行った。その結果、立体振動など高次モードの影響が無視できない建物にも適用できる、Wavelet変換を用いた建物の性能曲線の作成方法と、判定において必要不可欠な加速度記録を2階積分し、変位を算出する技術について検討を行い、有意な性能曲線を算出できる出来るレベルに到達した。

しかし、観測結果によると、建物基部に設置した加速度計による記録は、建物との相互作用により、ある特定の周期成分のみが卓越しており、少なくとも余震を想定した入力地震動として取り扱えるかどうか不明確である。このような特定の周期成分のみが卓越した波を余震の入力地震動として評価すると、要求曲線は極めて特異な形状となってしまう。余震に対する安全性を判定するためには、観測地震波と建物の相互作用を検討することが不可欠である。その為には、建物から離れた地盤の振動観測が併せて必要である。

また、これまでは主にフレーム架構を対象としてきたが、本システムによる2次災害軽減効果が大きく発揮されると思われる中・高層集合住宅建物では、戸境に連層耐震壁が入っており、壁脚でのロッキング挙動が大きくなるとと思われる。ロッキング挙動により浮き上がりが生じると、見かけ上は性能曲線が低下するが、構造物の損傷は無く、よって耐震安全性の判定には、作成した性能曲線からロッキング挙動を除去することが必要である。

## 2. 研究の目的

大地震後に余震による2次被害を低減するとともに、避難民の数を減らすためには、本震後の迅速な建物の応急危険度判定が必要不可欠である。本研究は、応答スペクトル法を用いて、巨大地震発生時に被災した建物の残余耐震性能を、安価な加速度計を配置することで自動的に判断する装置の開発を目的にしている。この装置により、余震による2次災害や避難民の数を減らすことが出来る。これまでの検討結果から、建物基部に設置した加速度計の記録は、建物応答の影響が大きく、要求曲線を作成するのに不適切であること

が分かった。そこで、地盤面の計測点を増やし、要求曲線を作成するための、適切な地動加速度の計測点を検討する。更に、中高層板状集合住宅を想定して、性能曲線作成における連層耐震壁のロッキング挙動の分離方法を検討する。

### 3. 研究の方法

本研究では、横浜国立大学建築学棟を対象に、建物の直下、建物の高さ程度の距離を離れた点、およびその2倍程度離れた点で地動加速度を測定し、既設の各階の加速度記録との関係を検討し、余震への安全性を評価するために適切な地盤面での加速度計設置位置を検討した。具体的には、各地動計測点での観測波を入力加速度とした建物の動的応答解析を行い、各階の加速度計測値との比較を行い、地盤と建物の相互作用の影響を周期、減衰を軸に検討を行う。同時に、実観測記録から、建物の振動モードを検討した。

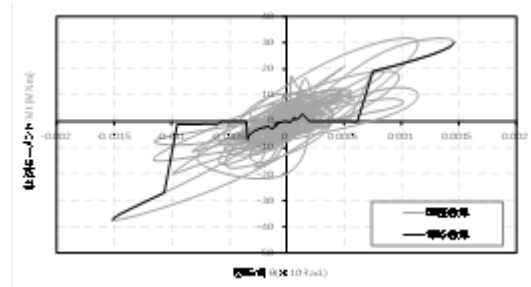
更に、連層耐震壁構造におけるロッキング挙動を再現するために、鋼板を用いた模型試験体を作成し、1方向加振により振動台実験を実施した。既に設置している安価な加速度計を2台、加振方向の両端に設置し、建物基部でのロッキングによる回転角（基部での回転角）を計測し、建物全体の水平変形から、基部でのロッキングによる水平変形性分を取り除いた性能曲線の作成方法、および建物基部での回転角と転倒モーメントの関係の作成方法を検討した。なお、本研究ではその第一段階として、中・低層の連層耐震壁構造を対象として、建物の曲げ変形性は小さいものを扱うこととするが、基部での回転角の計測が成功した場合は、建物の曲げ変形性を計測することも可能になると考えられる。

### 4. 研究成果

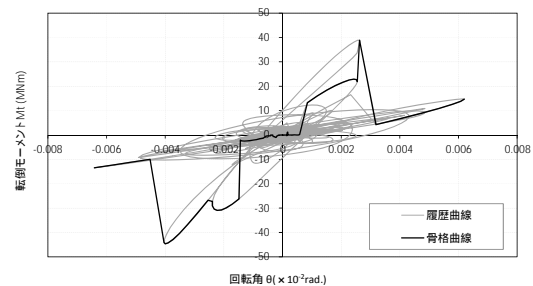
建物が揺れを被った際の損傷度合を即時に評価する健全度モニタリングシステムによる2次被害軽減効果は、中・高層の集合住宅やオフィスビル等の利用者数が多い建物で大きいと考えられる。しかし、中・高層建物では耐震要素として連層耐震壁が用いられることが多く、柱脚部でのロッキング挙動の影響を受けると考えられる。

図1(a), (b)に横浜国立大学教育人間科学部第3研究棟（以下、教育棟）における2013年11月16日20時44分頃に発生した強震動（以下、地震波E-1）のEW, NS各方向の転倒モーメント  $M_t$  - 回転角 関係を示す。ただし、転倒モーメントは上部構造を等価1自由度へと縮約した際の代表加速度、等価質量、等価高さの掛け合わせにより算出した。また、回転角は、基礎階加速度計による鉛直方向加速度測値の2階積分により鉛直変位を算出し、加速度計設置位置2点における鉛直変位の差を加速度計設置スパンで除すことで算出した。図2に教育棟基礎階加速度計設置位置概略図を示す。EW方向回転角算出には itk0a

と itk0b の鉛直変位、NS方向回転角算出には itk0a と itk0b の鉛直変位の線形補間により算出したA点の鉛直変位と itk00 の鉛直変位を使用した。



(a) EW 方向



(b) NS 方向

図1 転倒モーメント  $M_t$  - 回転角 関係

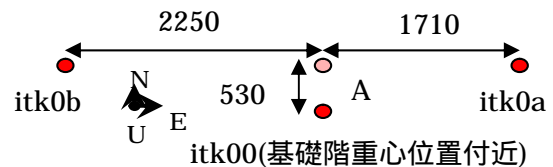


図2 基礎階加速度計設置位置概略図

図1より転倒モーメントと回転角に相関関係がみられる。ノイズや高次 Rank の影響に加え、地震波 E-1 の最大地動加速度 (itk00 において EW 方向 : 23.5gal, NS 方向 : 17.7gal) がそれ程大きくなく構造物の応答が小さいことにより骨格曲線が線形ではなくなっているものの、とくに NS 方向では履歴曲線の概形から線形性を確認することができ、転倒モーメントと回転角の相関性が強いことを示している。このことは微小であるが建物基部においてロッキング挙動が生じていることを意味している。NS 方向においてその傾向が強いことは、建物の短辺方向の応答においてロッキングが生じやすいと考えられる点とも一致する。壁式構造建物ほど剛な建物ではない教育棟においてもロッキングによる影響が生じており、ロッキングの影響を考慮する必要がある建物は壁式構造に限らないと考えられる。

ロッキング挙動による基礎の浮き上がりが生じると、性能曲線上には浮き上がりによる剛性低下が生じる。そのため見かけ上は性能曲線が低下するが、上部構造物には損傷が生じていない。したがって、建物が揺れを被った際の損傷度合を即時に評価する健全度モニタリングシステムの構築にあたり、連成システムの影響を適切に評価するためには、計測値からロッキングの影響を取り除く必要がある。

ロッキングの影響を計測値から取り除く方法として、回転角と等価高さ  $H$  からロッキング変位波形  $H(t)$  を算出し、代表変位波形  $(t)$  から引くことで、ロッキングを除去した代表加速度-代表変位関係が算出可能である。今後、より最大加速度が大きい強震記録を用いて実建物におけるロッキング除去方法の適用性を検討する必要がある。

更に、ロッキングを模擬した振動台実験を実施し、性能曲線からロッキング挙動を除去する方法について実験的に検討した。試験体はいずれも、鉄の錘(約 18.5kg) 6 個と幅 100mm、厚さ 6mm の鋼板ばねをボルト接合によって組み合わせた 3 層 1 スパンの鉄骨平面フレームである。1 層の柱材については、強度を制御するため、柱脚側の断面の幅を 50mm に削除した。建物基部には、ロッキング挙動を再現するため、基部中央にピン支点を設置し、ロッキング剛性を調整するために、柱下に鋼製バネを配した。試験体の一例 (S-BN 試験体) を図 3 に示す。鋼板の鋼種はすべて SS400 材である。実験では製作の都合上、2 種類の鋼材を用いた。

試験体は 2・3 層をブレースにより固定することで、1 層の柱崩壊形に至るように計画している。転倒モーメントを大きくするために 3 層としているが、1 層に変形が集中し、ほぼ 1 自由度系の挙動を示すと考えている。

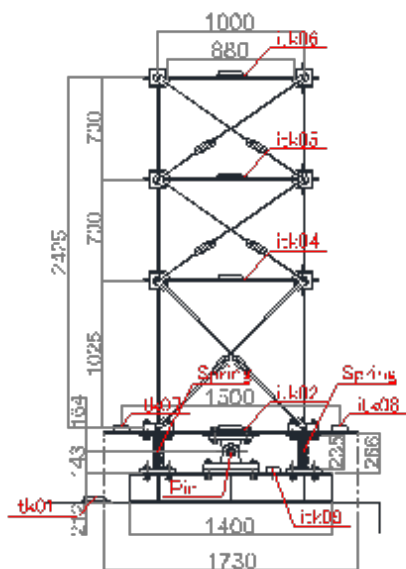


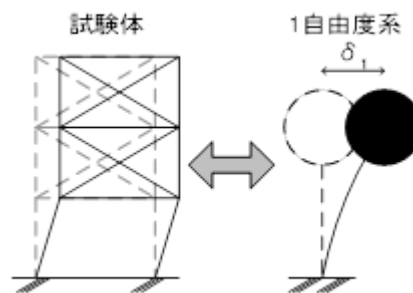
図3 試験体立面図 (S-BN 試験体)

試験体名の番号は入力地震波と柱脚部の浮き上がりの有無による区別である。各試験体と 1 質点系モデルの関係性を図 4 に示す。試験体の脚部の条件は、基礎を固定としてロッキングを生じない基礎固定試験体(同図 a)、以降、S-F)、脚部でロッキングを生じる基礎回転試験体(同図 b)、以降、S-S および S-N)、および脚部でロッキングは生じるが、1 層にもブレースを入れて建物は変形が生じない基礎回転ブレース付き試験体(同図 c)、以降、S-BS および S-BN) の 3 種類である。

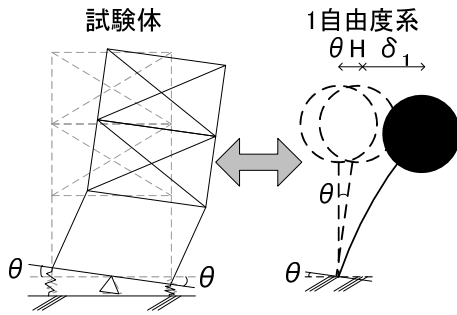
更に柱脚部はバネの初期縮み量を変えることでばねに浮き上がりの有無を変化させた。以降、「浮き上がりバネ」と呼ぶバネ配置では、振動時の脚部の回転により一定以上の引張側変形が生じると、バネと試験体脚部が離間するように、バネ上端は試験体脚部と緊結せず、かつ小さな初期縮みを与えたものである。

また、以降「弾性バネ」と呼ぶバネ配置では、振動時でもバネの浮き上がりが生じないように加振前の初期縮み量を大きく設定している。また固定時には、バネを取り外し、同じ個所に固定用の鉄骨部材を入れた。

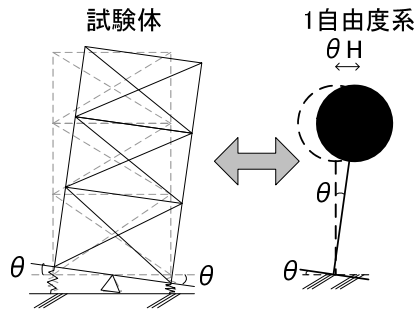
脚部に配するバネは、硬いバネと柔らかいバネの 2 種類を用意した。脚部の回転角は、実際に建物のモニタリングで使用する加速度計を用いて計測する。その為、試験体の縮尺にかかわらず、実物と同程度の鉛直変位が発生しないと計測誤差の影響が縮尺により拡大することとなる。そこで、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に横浜国立大学建築学棟で計測された建物基部での鉛直変位の最大値(約 2mm 程度)を参考に、本実験でも同程度の鉛直変位が発生するよう、あらかじめ数値解析により検討してバネ定数を決定した。このバネを以降は硬いバネ (SH) と呼ぶ。



a) 基礎固定試験体 (S-F)



b) 基礎回転試験体 (S-S, S-N)



c) 基礎回転ブレース付き試験体 (S-BS, S-BN)

図4 各試験体と1質点系モデルの関係

図5に、S-N01 60%入力での性能曲線を示す。S-N01は浮き上がりパネを用いており、60%入力では引張側に浮き上がりが生じており、転倒モーメント-ロッキング回転角は非線形関係を示している。図から、軟らかいパネを用いた場合は、ロッキング挙動が性能曲線に与える影響が大きくなったことが分かる。また、ロッキングを除去していない性能曲線の初期の傾きは、弾性時に計測した周期1.11秒の傾きとほぼ一致しており、除去後の性能曲線の初期の傾きは、S-Fの初期周期0.92秒に近いことが分かる。また、図中には、基礎固定時の性能曲線(S-F01)も併せて示している。S-N01でも同様に、ロッキング除去後の性能曲線は、基礎固定時の性能曲線と初期剛性、剛性低下点、剛性低下後の傾きがほぼ一致していることが分かる。

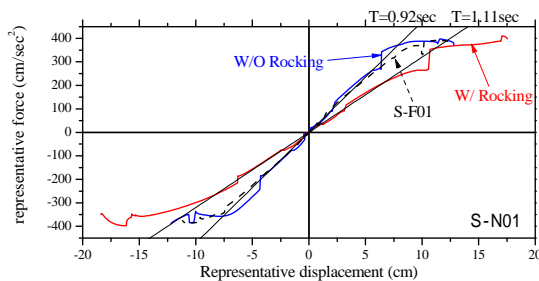


図5 性能曲線の比較(S-N01)

他の試験体でも同様に、ロッキング除去後

の性能曲線は、S-Fシリーズの性能曲線と良好に一致した。また、図6に、各試験体の弾性応答レベルの入力における、最大応答点から求めた等価剛性を示す。図では、S-SおよびS-Nシリーズではロッキング除去後の性能曲線における最大応答点から求めた等価剛性も併せて示している。図から、パネの剛性に従って、S-Fシリーズ(基礎固定)より等価剛性が低下していること、およびロッキング除去後はS-S、S-NシリーズともにS-Fシリーズの等価剛性とほぼ一致しており、良好にロッキングの影響が除去されていることが分かる。

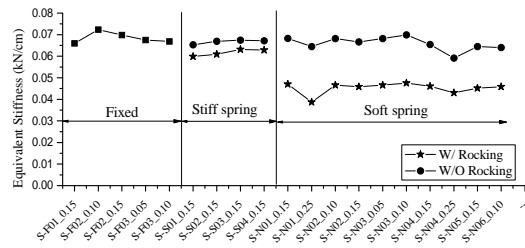


図6 最大点応答点での等価剛性の比較

## 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 1件)

1. 加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出法に関する研究 1質点系構造物の場合, 川村学, 楠 浩二, 山下美帆, 服部勇樹, 日向大樹, ミゲール ディアス, 田才晃, 日本建築学会構造系論文集, 査読有り, pp.1061-1069, 2013

〔学会発表〕(計 16件)

1. 等価粘性減衰定数と応答低減率を用いた余震に対する耐震性能評価方法に関する解析的研究, Miguel Diaz Figueroa, Koichi Kusunoki, Akira Tasai, 構造工学論文集, 査読あり, 2013
2. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その19 性能曲線におけるロッキング除去方法 実験概要, 服部勇樹, 楠 浩二, 田才晃, 山下美帆, 日向 大樹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.93-94, 2013
3. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その20 性能曲線におけるロッキング除去方法 実験結果と検討, 山下美帆, 楠 浩二, 田才晃, 服部勇樹, 日向 大樹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.95-96, 2013
4. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その21 加速度計測値から算出する性能曲線の精度, 日向 大樹, 楠 浩二, 山下美帆, 服部勇樹, 川村学, 田才晃, 日本建

- 築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.97-98, 2013
5. Development of building monitoring system to evaluate residual seismic capacity after an earthquake, K. KUSUNOKI, A. Tasai, and M. Teshigawara, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 査読あり, DVD, 2012
  6. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 15 観測値を用いた剛性評価方法, 日向 大樹, 楠 浩一, 川村 学, 山下美帆, 服部 勇樹, 田才 晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.567-568, 2012
  7. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 16 Wavelet 変換を用いた実建物の1次モード成分抽出方法, 服部 勇樹, 楠 浩一, 川村 学, 山下美帆, 日向 大樹, 田才 晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.569-570, 2012
  8. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 17 スウェィ・ロッキングモデルにおける要求曲線の検討, 山下 美帆, 楠 浩一, 川村 学, 山下美帆, 日向 大樹, 田才 晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.571-572, 2012
  9. Analytical Study of Residual Seismic Performance by Estimation of Response Reduction Ratio and Equivalent Damping for Aftershocks, Miguel Diaz Figueroa, Koichi Kusunoki, Akira Tasai, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 査読あり, 2012
  10. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 13 減衰力の計測及び復元力の算出, 山下 美帆, 楠 浩一, 川村 学, 田才 晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.883-884, 2011

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 耐震性能評価法、耐震性能評価装置及び耐震性能評価システム

発明者: 楠浩一、勅使川原正臣、荒木正之

権利者: 横浜国立大学、名古屋大学、株式会社 エーラボ

種類: 特許

番号: 特願 2010-34904

出願年月日: 2014 年 1 月 1 日

国内外の別: 国内

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

楠 浩一 (Kusunoki Koichi)

横浜国立大学・都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号: 00292748

(2) 研究分担者

田才 晃 (Tasai Akira)

横浜国立大学・都市イノベーション研究院・教授

研究者番号: 40155057

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: