

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560590

研究課題名(和文)非破壊検査・モデル試験・数値解析を活用した盛土の健全性評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on the soundness evaluation of embankment using non destructive inspection, model test and numerical analysis.

研究代表者

檜尾 正也 (HINOKIO, Masaya)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・寄付講座准教授

研究者番号：00335093

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)：研究の結果、長期的な浸透水によって局所的な水みちが形成されることで、表面に変状がみられなくても耐震性や安定性が低下している可能性もあることが分かった。したがって、維持管理や長寿命化の観点から盛土の内部状態の変化の把握が必要である。
また、目視点検に加え、表面波探査を活用した維持管理システムの提案を行った。

研究成果の概要(英文)：From the results of surface wave propagation test and model tests, it is clear that seepage water has large influence on long-term stability of embankment. Moreover, fine particle soil was washed out and water path is formed by long-term seepage water. Therefore, even if deformation and settlement are not observed on the surface of embankment, earthquake resistance and stability may decrease. It is important to grasp the change of internal state of embankment.
The system of maintenance is proposed. In this system, the stability of embankment is evaluated by the grasp of internal state using surface propagation test in addition to visual inspection. By the management with such this system, the development of the priority of countermeasure and planning of long-term maintenance become easy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 地盤工学

キーワード：地盤と構造物 盛土 健全性評価 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

現在、道路ネットワークは人間の生活に必要な社会基盤施設であり、常に機能の保持が求められる。現在の道路ネットワークを構成する構造物は高度経済成長時に建設されたものがほとんどであり、これら構造物の効率的な維持管理・長寿命化が求められている。道路ネットワークを構築する構造物の多くの部分が地盤構造物であり、中でも盛土の維持管理手法の開発が喫緊の課題として挙げられる。盛土は建設後時間経過とともに安定性は増すと考えられており、施工時の現場管理により盛土の品質は確保されてきた。ところが、近年の豪雨や地震において、盛土の崩壊事例が相次いでいる。これらの事例の多く葉沢地や斜面に建設された盛土で発生しており、長期間地下水の侵入にさらされたことで盛土の安定性が低下し、崩壊に至っている。さらに、これらの事象は発生するまでその危険性を表面からはほとんど認知できないという困難な問題を抱えている。したがって従来の点検手法では対応できず、新たな手法による維持管理の提案が望まれている。

2. 研究の目的

盛土は主材料が土であるため建設コストが安価であり、さらに施工性に優れているため、多くの場面で用いられている。また、盛土の安定性評価や機能の劣化予測を正確に行うことは難しく、効率的な維持管理計画の策定は困難である。したがって、変状が生じたあとの事後処理に終始せざるを得ない。また、盛土の安全性を調査する手法として、一般的にサウンディング試験が行われているが、この試験では対象地点の状態が把握できるのみで、盛土全体の状態把握はできない。また、サンプルを採取するために盛土を部分的に傷つけることになる。したがって、費用対効果の面で構造物全体の内部状態の把握は現実的でない。そこで、盛土を傷つけず、盛土表面で計測が可能な非破壊検査手法による盛土の評価手法の提案を行う。さらに、通常の検査(表面上の変状を目視で確認)とあわせた検査手法の提案も行い、効率的な維持管理システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究は、現場計測・モデル試験・数値解析の3項目の実施によって達成する。まず、現場計測では、盛土にダメージを与えず内部状態が調査できる非破壊検査手法(表面波探査)によって盛土内部の地盤の剛性や密度を把握し、盛土の外的変状と内部状態の関係を明確化する。モデル試験では地盤内部の変形挙動まで観察可能なモデル試験では、表面波探査で得られた結果との比較を行うことで、盛土の定性的な評価手法の開発を行う。さらに、周辺の地形や盛土の状態(締固め土や補強材の有無)の差異を考慮して試験を行うことで、各種盛土の変状や破壊パターンを明

らかにする。数値解析では、モデル試験に合わせた解析を行うことで数値解析の妥当性を検証する。そして、表面波探査で得られた実地盤の状態を入力値とした解析により定量的な評価手法を検討する。最終的には、検査手法のマニュアル化や評価手法の確立を通じて維持管理システムの構築を行った。

4. 研究成果

(1) 浸透水にさらされる盛土のモデル試験

このモデル試験では、スレーキング等が懸念される盛土材を用いた盛土に長期的な地下水の浸透が生じた場合に盛土の安定性にどれだけの影響があるのかを検討するために行った。このため、スレーキングが生じやすい盛土材料を人工的に製作している。また、同じ盛土材料ではあるが粒度分布が異なる2種類の試料を用いて同じ重量の盛土(全体の密度は同じ)を作成し、粒度分布や締固め特性の違いが盛土内部の状態に与える影響を考察した。この試料は豊浦砂とNSF粘土を重量比7:3で混ぜあわせたものを用い、これに同量の水を加え練返し乾燥させた塊を砕いた後に粒度調整をして製作した。Figure 1に用意した2種類の試料の粒度分布を示す。

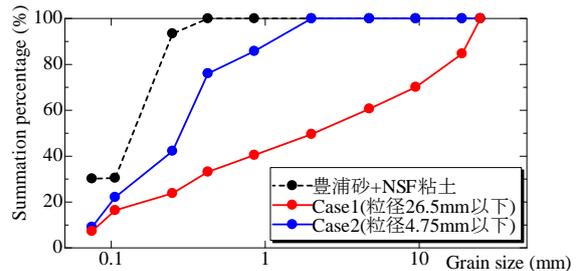
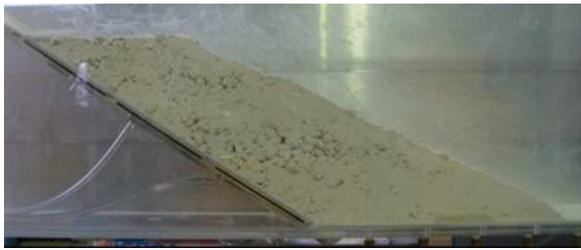


Figure 1 試料の粒度分布

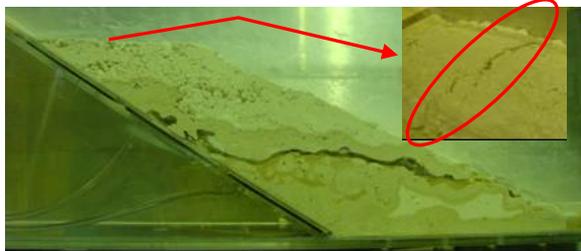
Case1は団粒の粒径が26.5以下となるように粒度調整したものであり、Case2は粒径が26.5以下となるように調整したものである。また図中の豊浦砂+NSF粘土は素材自体の粒度分布であり、団粒がすべて崩れた場合の粒度分布となる。

この試験では、盛土高さが30cm、盛土の斜面勾配が1:2.0、天端幅が25cmとなるように盛土を作成した。また、盛土が作られる傾斜地盤の勾配は1:1.5となっている。盛土の作成は乾燥状態の試料を使い、5cmの層厚になるまでスコップで土槽に投入する。そして表面に10cm四方の板を載せ、締固め荷重として1.96kPaの表面荷重を静的に作用させた。この手順を盛土高さが30cmになるまで繰り返した。

Figure 2,3にCase1,Case2での試験結果を示す。a)図は通水前の状態、b)は通水後の最終的な状態である。Figure 2のa)図から、断面の中には空隙が目立つ部分が見られ、盛土の締固めが十分に行われていないことがわかる。これは試料に含まれる大きな直径の試料が複数個でかみ合っている箇所であり、その中に細かい試料が十分に充填されなかった



(a) 通水開始前



(b) 通水後

Figure 2 Case1 の試験結果



(a) 通水開始前



(b) 通水後

Figure 3 Case2 の試験結果

といえる。一方、Figure 3 の a) 図では、4.75mm 以下の粒径のみを用いているため、空隙が目立つ部分はほとんどなく、より均質な盛土断面であるといえる。通水によって、Case1 では、浸透水が集中し、最終的には、明確な浸透水の通り道が発達していく。その際の発達メカニズムは、

- ①空隙が多い部分への浸透水の集中
- ②浸透水による細粒化
- ③細粒分流失と空隙の拡大
- ④水の通り道の形成(局所的な流れ)
- ⑤更なる浸透水の集中
- ⑥より大きな空洞の形成

となる。また、天端には内部の空洞化の影響としてクラックが発生した。締固められた盛土の内部の荷重分担を考えると、粒径の大きなものがより多くの荷重を負担している構造と考えられる。したがって、大粒径で形成されている盛土は、その骨格構造が変化しな

ければ(材料の細粒化等がなければ)、多少の細粒分の流出は荷重分担にはそれほど影響を与えないと考えられる。しかし、細粒分の流出で内部の空隙が大きく変化することで地盤の剛性は大きく低下すると推測される。このため、地震などの大きな外力を受けると、構造が大きく変化し盛土の破壊の危険性が大きくなるといえる。今後の盛土の安定性評価をより定量的に行うためには、非破壊検査等を活用して盛土内部の2次元・3次元的な空隙や剛性の分布を把握する必要がある。細粒化が懸念される材料を用いた盛土では、浸透水により大きな空隙が生じ、安定性が大きく低下することが考えられる。

また、スレーキングの懸念がない材料を用いた盛土でも、モデル試験を行っているが、浸透水の影響は大きく、盛土内部での水みちの形成のみならず、十分に締固めが行われていない盛土では崩壊に至る結果となるケースもあった。したがって、盛土の建設では、十分な締固めを行うことが重要であることが理解できる。また、長期的な浸透水によって細粒分が流失し局所的な水みちが形成されることで、盛土内部での局所的な密度および剛性の低下が生じるため、表面に変状がみられなくても耐震性や安定性が低下している可能性もある。したがって、維持管理や長寿命化の観点から、盛土の内部状態の変化の把握が必要である。

よってモデル試験の結果より、以下の結論が得られた。

- 建設時には、盛土材の状態変化や締固め特性を考慮して、適切な締固めを行う必要がある。
- 維持管理時に適切に安定性を評価するためには、盛土内部の状態を把握することが必要である。

(2) 表面波探査による盛土内部の状態把握

従来からの目視点検では盛土の内部状態が確認できないため、危険性の定量的な評価が難しい。そこで非破壊検査手法の1つである表面波探査を用いて、盛土の内部状態の把握によって、健全性評価を試みる。この探査は、

- a) 建設直後の検査(新規の盛土のみ)
- b) 供用開始後の定期的な検査
- c) 変状が生じた場合の検査

の3段階での探査に分けて実施してきた。この3段階の探査では建設直後の初期状態を基準として、その後の時間の経過や変状の発生に合わせて行った探査結果との相対的な差異を比較することで、相対的な変化から盛土の健全性の簡易的な評価が行える。研究では3つの段階で探査を行っているが、同じ場所でも a) の建設直後の検査と b) の供用開始後の定期的な検査を行っている箇所がなく、データの充実には長期的に継続した探査が必要であり、定量的な評価を行うまでには至っていない。したがって、c) の変状が生じた場合

の検査についての成果を記載する。

スレーキングが懸念される現場発生土を用いて構築された盛土では、長期的な地下水の浸入によって盛土内部の土が細粒化し、地震等の外力によって崩壊する可能性がある。そのため、盛土全体の安全性の低下が問題視されている箇所の一部では対策工事が行われている。そこで、盛土の評価として牧之原類似盛土での対策工事の前後に表面波探査を行い、盛土内部の剛性変化を調べることで対策工事の効果の検証を試みた。表面波探査による計測を行った盛土は2箇所で、

- 1) 水の集まりやすい地形上の盛土
 - 2) スレーキングしやすい岩質材料が使用されている可能性のある盛土
 - 3) 高さが10mを超える盛土
- の項目に該当する盛土である。

Figure 4,5 に計測を行った盛土の平面図を示す。図中の青線は計測を行った箇所を示している。Figure 5 の Site1 での計測箇所は対策前後の計測では位置がずれているため、対策前の測線を破線で、対策後の測線を実線で示す。

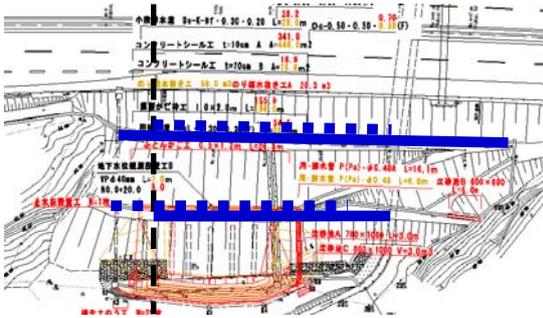


Figure 4 Site1の平面図

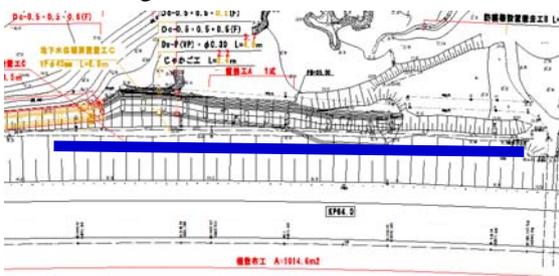
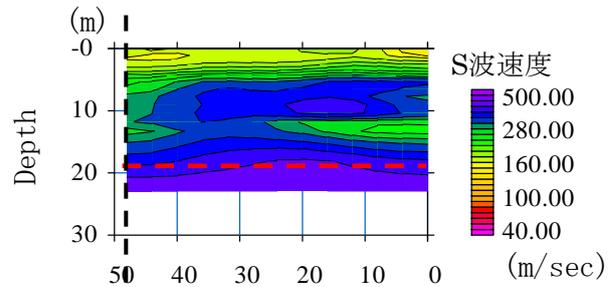


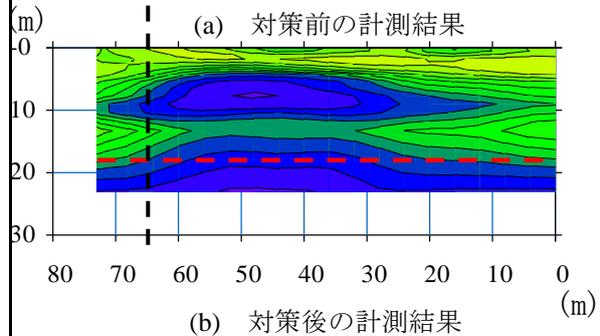
Figure 5 Site2の平面図

Figure 6~8 はそれぞれの測線での結果であり、(a)図に対策前の計測結果、(b)図に対策後の計測結果を示す。なお、計測箇所は対策前後で位置がずれており、その位置関係をわかりやすくするため左右の位置をずらして図示する。なお、図中の黒破線は Figure 5 図中にある黒破線の位置である。また、参考として盛土と原地盤の境界であろう位置を赤破線で示す。

Figure 6 および Figure 7 の結果から、Site1 の上小段では対策前後の結果にはほとんど違いがみられない。これは計測位置が対策箇所から離れた上小段であるため、対策工の効果が届いていないものと思われる。また S 波速

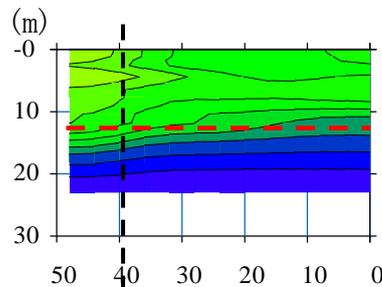


(a) 対策前の計測結果

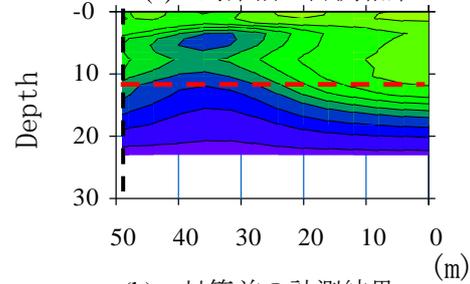


(b) 対策後の計測結果

Figure 6 Site1上小段での計測結果

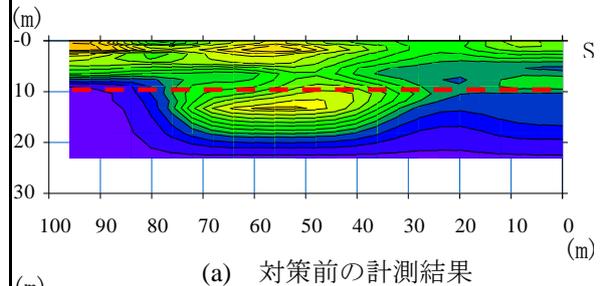


(a) 対策前の計測結果

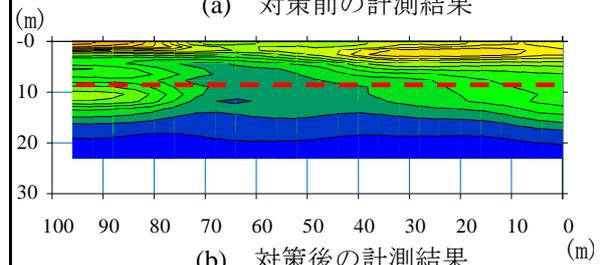


(b) 対策後の計測結果

Figure 7 Site1下小段での計測結果



(a) 対策前の計測結果



(b) 対策後の計測結果

Figure 8 Site2での計測結果

度分布がほとんど変化していないことから、盛土内部で対策前後のスレーキングの進行や安定性の変化はほとんどないと考えられる。一方、Figure 7 下段の結果では対策工(ふとんかご工や押え盛土)がなされた部分((b)図の20m~50m 付近)では深さ 10m までの部分で S 波速度が上昇している。これは対策工(ふとんかご工や押え盛土)の効果によって拘束圧が上昇し土が締固まったため、S 波速度が上昇したと考えられる。Figure 8 の Site2 の結果から、対策後の地表面付近に S 波速度の小さい部分が多くみられる。これは、対策前後で地表面の高さが変化しており、対策によって小段上に盛られた新設の盛土部分の結果であると考えられる。一方、対策前には 40m~70m で深さ 15m 付近の原地盤において S 波速度の小さい部分があった。しかし、対策後にこの部分の S 波速度は大きくなっている。これも、対策工によって土に作用する拘束圧が増加した効果であると思われる。ただし、端の部分では S 波速度が低下している部分が見られる。この端部では対策工(ふとんかご工やコンクリートシール工)がされていないため、時間経過に伴うスレーキング等が進行した結果により S 波速度が低下した可能性もある。

2 次元表面波探査の結果から、対策工の効果の検証が行えた。このように、対策工の前後のデータを比較することで、対策工の効果の検証が行えることが分かった。また、定期的な探査を行い、それらの時間経過に伴う変化から盛土内部の状態変化を把握することで、対策工の効果のみならず、対策の必要の有無や対策時期の策定等の長期的な維持管理にも役立つと考えられる。

(3) 維持管理システムの提案

従来の盛土の維持管理では、定期的な目視による点検が主であり、その点検で路面(天端)や法面にクラック等の変状および湧水の有無が確認されてから安定性の評価や対策の必要性を検討する。したがって、変状が生じない限りは盛土の安定性は低下していないものと考え、対策等の検討は行われない。しかしながら、供用開始から、長期の年数が経過した盛土では表面上に変状が表れていなくとも、その内部では細粒分の流出、スレーキング等が生じている可能性もある。したがって示す目視による点検では、それらの潜在的な危険性を調査することはできない。そこで、従来の目視による点検に加え、表面波探査による盛土の内部状態の把握によって、盛土の安定性の評価を行うものとする。その管理システムの概要を Figure 9 に示す。この提案システムでは、初期状態を把握するため建設完了後に最初の表面波探査を、さらに 5 年ごとの点検の際に表面波探査を行う。これらの結果の時間的な変化から盛土の安定性の変化を判断する。つまり、定期的な目視による点検で変状がみられず、表面波探査の結

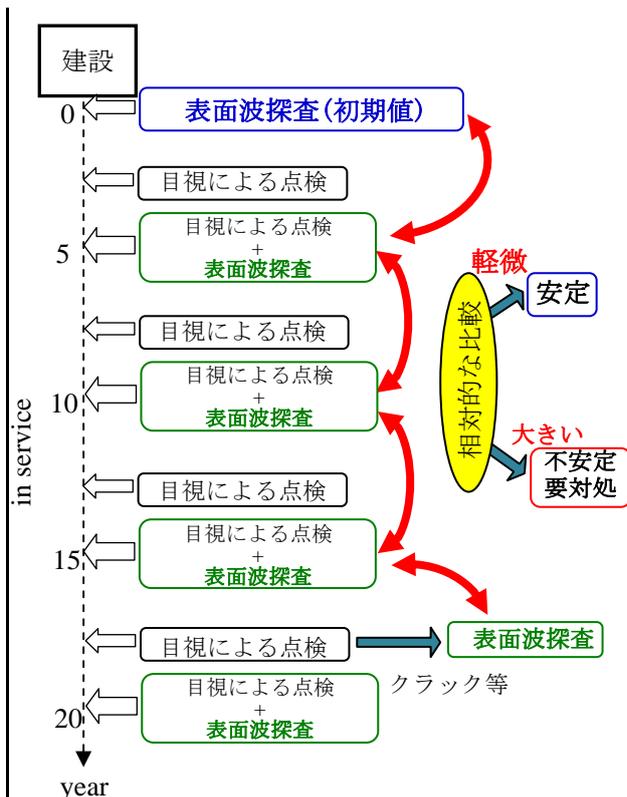


Figure 9 提案する維持管理システム

果の時間変化も確認できない場合、盛土は安定性を失っていないと判断できる。また、目視による点検で顕著な変状が確認された場合でも、その箇所では表面波探査を行うことで対策が必要な部分の絞り込みができる。さらに、対策前後での比較から対策工の効果検証も行える。このようなシステムによる管理によって、盛土の対策の優先順位や長期的な維持計画の策定が容易となる。

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 2 件)

- ① M. Hinokio, H. Yamato, K. Suzuki, T. Sakai, M. Nakano and M. Kawaida, Soundness evaluation of the embankments for effective maintenance and long-life of shin-tomei expressway, Proc. 3rd International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, vol3(1), 2013, pp.142-147
 - ② M. Hinokio, M. Nakano and M. Kawaida, Model Tests of Embankment Subjected to Seepage Water, Proc. 6th International Workshop on New Frontiers in Computational Geotechnics, 2012, pp.187-190
- [学会発表] (計 8 件)

- ① 榎尾正也, 近藤豊, 他, 地下水の浸透にさらされる盛土の安定性に関する模型実験, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014, 発表予定

- ② 倭大史, 檜尾正也, 他, 表面波探査による牧之原類似盛土の対策効果の検証, 第49回地盤工学研究発表会, 2014, 発表予定
- ③ 檜尾正也, 倭大史, 他, 新東名高速道路に用いられた盛土材の力学特性の把握と健全性の検討(その1), 第48回地盤工学研究発表会, 2013, pp.561-562
- ④ 倭大史, 檜尾正也, 他, 新東名高速道路に用いられた盛土材の力学特性の把握と健全性の検討(その2), 第48回地盤工学研究発表会, 2013, pp.563-564
- ⑤ 檜尾正也, 倭大史, 他, 盛土の維持管理・評価システム構築に関する基礎的研究(その1), 平成24年度土木学会中部支部研究発表会, 2013, pp.195-196
- ⑥ 倭大史, 檜尾正也, 他, 盛土の維持管理・評価システム構築に関する基礎的研究(その2), 平成24年度土木学会中部支部研究発表会, 2013, pp.197-198
- ⑦ 檜尾正也, 中野正樹, 川井田実, 地下水が流入する盛土の安定性に関する研究, 第47回地盤工学研究発表会, 2012, pp.508-509
- ⑧ 檜尾正也, 中野正樹, 川井田実, 2次元表面波探査を用いた盛土の健全性評価, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012, pp.31-32

〔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

檜尾 正也 (HINOKIO, Masaya)
名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・
寄附講座准教授
研究者番号：00335093

(2) 研究分担者

菊本 統 (KIKUMOTO, Mamoru)
横浜国立大学・都市イノベーション学府・
准教授
研究者番号：90508342

(3) 連携研究者

()

研究者番号：