

平成30年6月13日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06194

研究課題名（和文）地震時不安定地盤に設置する橋梁基礎構造物の耐震性能および耐震補強工法

研究課題名（英文）Seismic performance and seismic retrofitting method of bridge abutment built on unstable ground during earthquake

研究代表者

安 同祥（An, Tongxiang）

早稲田大学・理工学術院総合研究所（理工学研究所）・客員上級研究員（研究院客員教授）

研究者番号：20530588

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：模型振動実験および数値解析法にて地震時不安定地盤に設置された橋台の耐震性能および耐震補強工法について検討した。橋台前背面地表面の高低差によって地盤の拘束圧が異なる。背面地盤に比べ前面地盤の拘束圧が小さく液状化はしやすく、過剰間隙水圧の持続時間も長くなる。液状化が激しい前面地盤の支持機能が大きく低下し、背面地盤の土圧作用に加えて橋台の振動は前面へ偏り、地震後橋台およびその周辺地盤に大きな変形を残す事になる。耐震補強について橋台の耐力を向上するグラウンドアンカー工法と地盤の耐力を向上する液状化対策工の地盤改良工法を検討した。グラウンドアンカー工法は橋台の応答変位を大きく抑制する事ができる。

研究成果の概要（英文）：Seismic performance and retrofitting method of bridge abutment built on unstable ground during earthquake were verified. The confining pressure of the ground is different between the front and rear of the abutment owing to the difference in the height of the ground surface. Comparing to that of the rear ground, the confining pressure of the front ground is small, liquefaction is easy to happen and the duration of the excess pore water pressure is long. Besides the action of the earth pressure from the rear ground, the significant decline of the support function of the front ground due to the intensive liquefaction, the vibration of the abutment is greatly biased to the front. Large deformation was left in the abutment and its surrounding ground after earthquake. The retrofitting effect of the ground anchor method and the ground improvement method of the liquefaction countermeasure work was verified. The ground anchor method can greatly suppress the response displacement of the abutment.

研究分野：工学

キーワード：地盤液状化 橋台耐震補強 模型振動実験 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年3月11日に起きた東北太平洋沖大地震は長時間強く揺れた。更に M7.0 以上の余震がその日に3回も発生した。数回長期間の強い揺れによって千葉県浦安地域を含む1都6県に渡って広い範囲で地盤は激しい液状化が生じ、橋梁を含む多くのインフラクチャーに多大な被害をもたらした。

(2) 半地下構造の橋台は十分な耐震性能を有すると考えていたが大地震で強い揺れと地盤の液状化などの影響を受けて基礎が破損したり、躯体が傾斜したり、周辺地盤が変状したりした被害が多数発生した。

(3) 平成8年改訂した道路橋示方書・同解説では初めて液状化地盤上に建設する橋台に対してレベル2地震動による照査すると規定した。旧基準で建設した橋台は地盤の液状化を考慮せず設計された。液状化地盤にある橋台の有効かつ安価の耐震補強工法の開発が必要である。

(4) 大地震によって地盤が液状化生じ流動した場合、構造物基礎に偏土圧をかける事となり、これで余震が来た場合、液状化した地盤にある基礎構造物は流動化による偏土圧に加え余震の地震動からの影響も受ける事となり、余震によって更に液状化が生じた場合構造物の受ける影響はもっと複雑となり、被害が更に広がる恐れがある。背面盛土などの影響を受け橋台前背面地盤の液状化状況が異なり、更に土圧の作用によって橋台の振動特性は一層に複雑になる。

2. 研究の目的

(1) 不安定地盤と基礎構造物との相互作用、不安定地盤および基礎構造物の変形・耐荷メカニズムの再解明。不安定となった地盤の余震時の挙動の把握。

(2) 不安定地盤および不安定となった地盤にある橋台とその基礎構造物の地震時の挙動および耐震性能の評価。

(3) 基礎本体が変状した場合構造物の耐震性能への影響の究明。

(4) 地震時不安定地盤にある橋台の耐震補強工法の開発。

3. 研究の方法

本研究は動的振動台模型実験と数値解析手法にて実施した。

(1) 模型振動実験

a. 対象橋台 本研究に用いた検討対象は平成2年の道路橋示方書・同解説に基づいて設計した2径間鋼床版橋のA1橋台である。図-1は橋台の形状寸法および地盤条件である。検討対象は24本のφ800の鋼管杭基礎を有する逆T式橋台とそれが支持している上部構造の重量および地震時不安定となる地盤を含む周辺地盤である。建設地点の耐震工学上の基盤面は平均N値が50以上の砂礫層の上面で、耐震設計上の地盤種別はⅢ種地盤である。「道示」H24によれば、地下水位(フーチングの

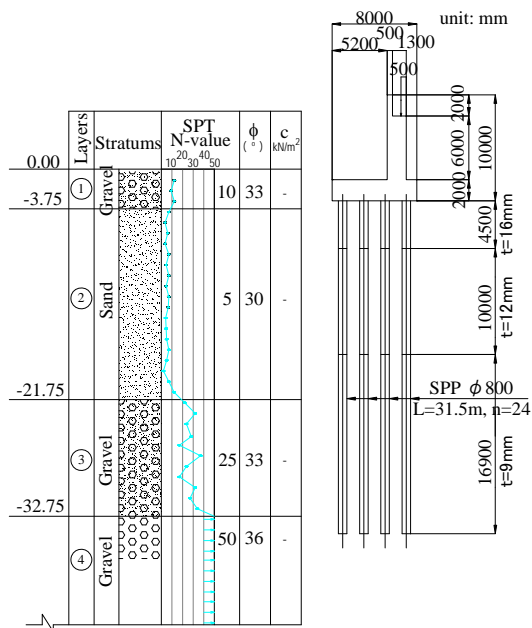


図-1 対象橋台と地盤条件

下面) 以下深さ 20.0m までの砂礫地盤と砂地盤は地震時液状化が生じる恐れがある。

b. 検討ケース及び実験模型 本研究では地盤の液状化による橋台の挙動を検証するために現況構造と周辺地盤からなる模型、耐震補強工法の開発のためにグラウンドアンカー工法および地盤改良工法によって補強した模型について検討した。図-2 は実験用模型および測定項目を示す。Case1 は現況無対策、Case2 はグラウンドアンカー工法、Case3 は橋台前背面地盤改良、Case4 は橋台周面地盤改良の模型を示す。実験用模型は井合進氏が提案する1G場における相似則に則って使用する土槽の大きさ及び振動台の性能に応じて1/30の縮尺で作成した。上部構造は支持する重量に着目して鋼板とした。堅壁は曲げ剛性に着目して厚さ6mmの鋼板を採用した。質量は鋼板にて調整した。フーチングは質量に着目して厚さ22mmの鋼板とした。フーチングの土圧作用範囲を相似するために前背面に鋼板を取り付けた。杭基礎は基礎の剛性を考慮して直径25mm、板厚2mmのアルミパイプを12本用いて橋軸方向に2列配置した。使用したアルミ材の降伏強度(0.2%ひずみ)は90MPaであった。地盤は飯豊砂(山形県産)を使用して液状化しやすい層(表層地盤)とし難い層(支持地盤)を作成した。耐震補強ケースの補強材の量および配置は事前数値解析によって決定した。グラウンドアンカー工法のアンカーは6本の直径1.5mmの鋼線によって相似した。配置は上部構造位置から背面へ水平方向との角度は30°とした。地盤改良工法は深層混合処理工法とした。前面改良ケース(Case3)の実改良幅は3.0m、周面改良ケース(Case4)の実改良幅は1.5mとした。改良体の一軸圧縮強さは1931kN/m<sup>2</sup>で、変形係数は705N/mm<sup>2</sup>である。

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

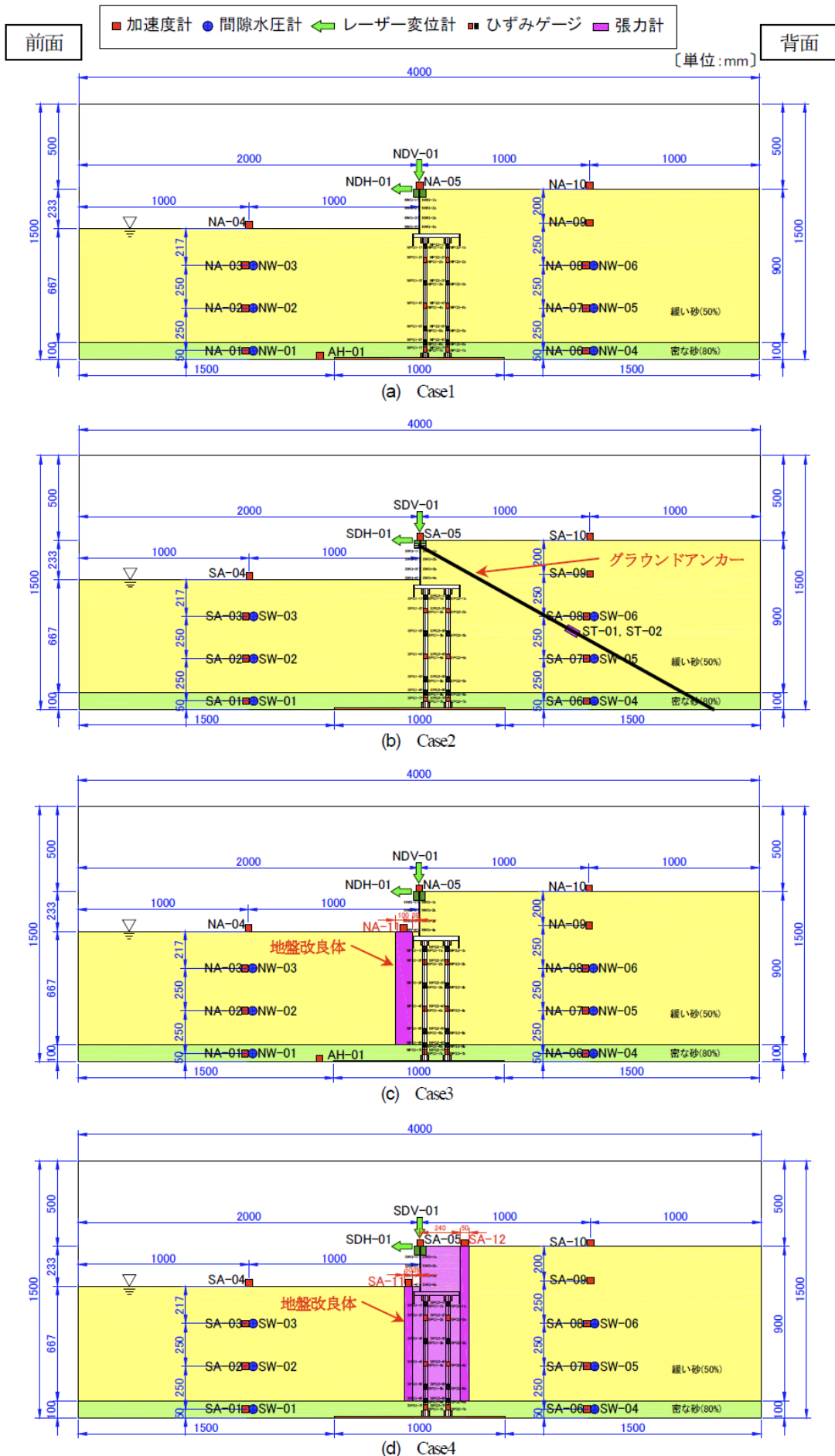


図-2 実験模型および計測項目

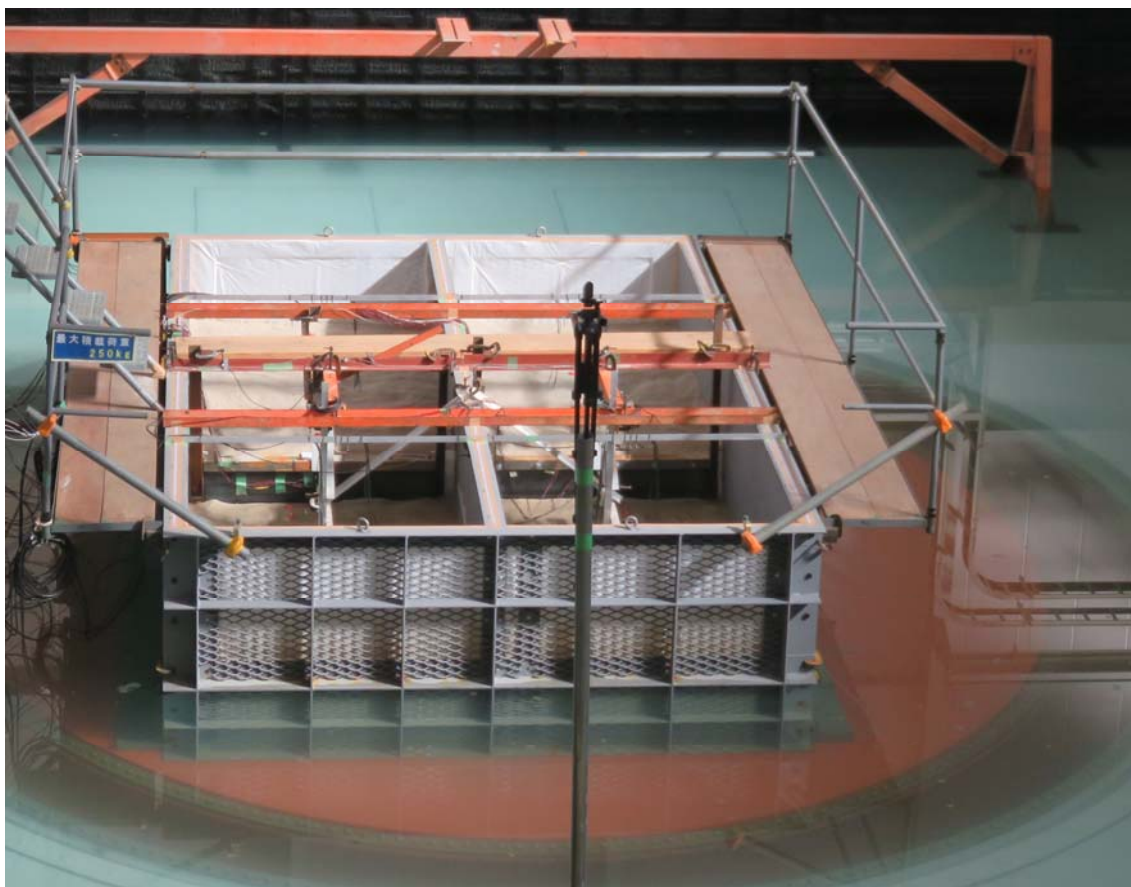


写真-1 実験模型および水中振動台

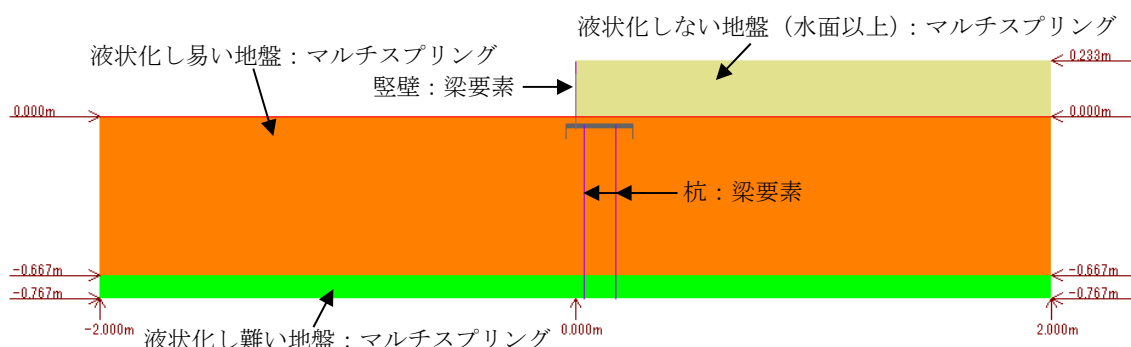


図-3 数値解析モデル (一例: 無対策ケース)

写真-1 は実験模型および実験用水中振動台を示す。

c. 計測項目および計測配置 模型実験での計測項目は上部構造位置の変位、構造と地盤の加速度、縦壁と杭のひずみ、地盤の間隙水圧、アンカーの張力および地表面の変状でした。計測計の配置は図-2 に示す。

d. 入力地震動および加振ケース 入力地震動は平成 24 年の道路橋示方書・同解説に示す I 種地盤レベル 1 およびレベル 2 タイプ I とタイプ II 地震動とした。レベル 1、レベル 2 タイプ I およびタイプ II 地震動の加速度波形はそれぞれ昭和 53 年宮城県沖地震時開北橋周辺地盤上の LG 成分、平成 23 年東北地方太平洋沖地震時開北橋周辺地盤上の EW 成分および平成 7 年兵庫県南部地震時神戸海洋気象台地盤上の NS 成分を採用した。実験用時間の

刻みは相似側によって調整した。実験はレベル 1 地震動の振幅を 50%加振後、レベル 1 地震動の振幅を 100%加振した。その後レベル 2 タイプ I 地震動の振幅を 100%加振した。続いてレベル 2 タイプ I 地震動の振幅を 75%加振した。レベル 2 タイプ II 地震動の振幅を 100%加振した後にレベル 1 地震動の振幅を 100%も一回加振した。

(2) 数値解析

実験結果の数値的な再現性および数値解析手法の適用性を検証するために実験結果を有効応力法に基づき開発された解析コード FLIP にて数値シミュレーションした。図-3 は数値解析用モデルの一例を示す。解析上橋台の縦壁・フーチングおよび杭は線形梁要素、地盤はマルチスプリング要素によってモデル化した。補強用アンカーはトラス要素、地盤改良

体は平面ひずみ要素でモデル化した。解析用地盤の物性値は相対密度から Meyerhof の式で変換して求めた等価N値に基づき FLIP の簡易設定法(改定版)にて設定した。緩い地盤の液状化パラメータは簡易設定法にて求めた。なお過剰間隙水圧モデルは井合モデルを用いていた。

#### 4. 研究成果

本研究で以下の知見を得た。

##### (1) 橋台の挙動について

a. 橋台前背面地盤の振動特性および液状化の状況が異なった。背面地盤に比べて前面地盤が液状化しやすく、過剰間隙水圧の持続時間も長くなった。これによって基礎前面からの抵抗が弱くなり、地震時の土圧作用により橋台の振動は前面へ偏り、加振後大きな変形を残した。

b. 加振後橋台および地盤の残留変形は殆ど橋台前面へ生じた。加振する度に残留変形が蓄積し、後で発生する地震は傾斜している橋台に作用した。

c. 堅壁前面引張の曲げモーメントは背面引張の方と同等レベルの応答値を得た。

d. レベル 1 地震動で再載荷時地盤の再液状化した橋台および地盤の応答特性が初回加振と異なった。

##### (2) 補強効果について

a. 橋台天端の応答変位を低減させるという点で最も効果があったのはアンカー工法 (Case2) であった。レベル 2 地震動のタイプ

I、タイプ II いずれにおいても変位を大幅に低減した。しかし背後地盤の沈下量は最も大きくなっており、沈下対策等が別途必要になると考えられる。一方で橋台前面側のみを地盤改良する工法 (Case3) は橋台応答変位の観点からは無対策の Case1 とほぼ同じ結果であった。橋台天端の応答変位抑制効果は見られなかったものの、背後地盤の沈下量は Case1 よりも少なくなっている。一方で Case4 においては Case1 よりも大きな変位が発生した。

b. 杭に発生する曲げモーメントや作用する土圧の分布から、まずタイプ I 加振においては全ての対策ケースにおいて断面力低減効果が見られなかった。一方でタイプ II 加振においては全ての対策ケースにおいて対策効果があるものと考えられる。

(3) 実験結果特に上部構造位置および地盤の応答値は数値解析によって再現できる。

#### <引用文献>

- ① Iai, S. : Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No. 3, 1988.
- ② 国土交通省関東地方整備局, 公益社団法人地盤工学会: 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書, 平成 23 年 8 月.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 宇野 州彦・安 同祥・清宮 理・白 可: 既設橋台の液状化地盤における耐震補強対策に関する模型振動実験、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、査読有、Vol. 74、2018 (掲載決定済み)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 安 同祥・清宮 理・宇野 州彦: 地震時地盤液状化による橋台の挙動に関する模型振動実験、土木学会 第 37 回地震工学研究発表会 2017. 10
- ② 宇野 州彦・安 同祥・清宮 理・白 可: 既設橋台の液状化地盤における耐震補強対策に関する模型振動実験、土木学会 第 37 回地震工学研究発表会 2017. 10
- ③ 安 同祥・清宮 理: 地震時液状化地盤に設置した橋台の耐震補強、土木学会 第 72 回年次学術講演会 2017. 9
- ④ Tongxiang An, Osamu Kiyomiya: Seismic Strengthening Effect on an Existing Bridge Abutment by Ground Anchor, IABSE, 2016. 5
- ⑤ 安 同祥・清宮 理: 橋台背面に杭打設し土圧低減を図る耐震補強工法、土木学会 第 71 回年次学術講演会 2016. 9

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

安 同祥 (AN, Tongxiang)  
早稲田大学・理工学術院・客員上級研究員  
研究者番号: 20530588

##### (2) 研究分担者

清宮 理 (KIYOMIYA, Osamu)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 50298139

##### (3) 連携研究者

林 偉偉 (LIN, Weiwei)  
早稲田大学・理工学術院・准教授  
研究者番号: 60623585

##### (4) 研究協力者

依田 照彦 (YODA, Teruhiko)  
早稲田大学・理工学術院・名誉教授  
研究者番号: 70112993