

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02237

研究課題名(和文) 軟弱・改良地盤の耐震性能評価へ適用可能な繰返しプレッシャメータ試験法の開発

研究課題名(英文) Development of the cyclic pressure meter test applicable to the estimation of seismic performance of soft and improved ground

研究代表者

風間 基樹 (Kazama, Motoki)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：20261597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：基礎地盤の耐震性調査を高度化するため、ボーリング孔を利用した孔内水平載荷試験法を繰返し載荷可能なシステムに拡張した。液状化の判定にも使えるよう繰返し載荷可能なハード・ソフトプロトタイプ試験機を作成した。開発した試験システムは、室内性能確認テストを経て、原位置実証試験を実施した。その結果、地盤の動力特性を原位置で従来法よりも安価に精度よく調査することができる見通しをつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震国である我国では、社会インフラ整備事業において基礎地盤の耐震性評価は重要な技術課題である。特に、基礎地盤の耐液状化性能を評価する原位置試験法としては、全世界的に標準貫入試験やコーン貫入試験が使われている。しかし、これらの調査技術は、液状化の判定評価に対して精度が悪いため、これに代わる原位置調査技術が求められている。本課題の目的は、これを実現する試験法として、従来静的な地盤物性の推定にのみ使用されていたPressure Meter (PM) 試験を繰返し試験に拡張し、地震時の剛性低下や液状化の可能性のある軟弱地盤の判定や改良地盤の品質評価が可能な試験技術として確立することである。

研究成果の概要(英文)：In order to advance the seismic resistance investigation of the foundation ground, the borehole horizontal loading test method was expanded to a system that can apply repeated load. A hard/soft prototype test machine has been constructed so that it can be used to judge liquefaction. The developed test system underwent an in-situ verification test after an indoor performance confirmation test. As a result, it is possible to investigate the dynamic characteristics of the ground in situ at a lower cost and with higher accuracy than the conventional metho

研究分野：地盤力学

キーワード：液状化 地盤の動的性質 原位置調査 繰返し載荷試験 液状化判定 ボーリング 孔内水平載荷試験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地震国である日本は、社会インフラ整備事業において基礎地盤の耐震性評価は重要な技術課題である。基礎地盤の耐震性評価のための地盤調査技術としては旧来からの標準貫入試験【SPT】やコーン貫入試験【CPT】が主で、これに代わる地盤調査技術のイノベーションがない状況にある。地盤の数値解析技術が進んだ今日でも、耐震設計に使用する地盤物性評価も SPT から得られる N 値に依拠することが多く、耐震信頼性が向上しない結果を招いている。一方、地盤物性の評価法としてサンプリングした土の要素試験を行い、力学物性を評価することも行われる。この方法の問題点は、サンプルの代表性と伴に、耐震的に問題となる軟弱地盤はサンプリング時の乱れや応力解放の影響を受けやすいという宿命がある点である[1]。

上記のような現状の課題を解決し、地盤の耐震性評価技術の信頼性の向上にブレークスルーをもたらすためには N 値に代わる基礎地盤の原位置耐震性能調査技術の開発が望まれる。

この課題を解決するため、本課題ではプレッシャーメータ試験【以下 PM 試験と記す】に着目した。PM 試験は、試験孔の壁面に対して垂直方向にフレキシブルなゴムチューブを介して載荷し、そのときの載荷圧力と孔壁変位から地盤の初期圧力やせん断剛性率などを求める試験として、国内外に実務的に普及している地盤調査技術である（図 1）。

この試験法は、今から 60 年ほど前にフランスで開発され、主に欧米で技術的に発展し、試験法やその解釈が確立されてきた[2]。我国でも、PM 試験は学会基準となっており（地盤工学会基準 JGS 1531-2012、地盤の物性を評価するための PM 試験方法、地盤調査の方法と解説、pp.664-675.）実務に普及している。諸外国では現在、PM 試験の結果を用いて数値解析に使う地盤物性を推定し、FEM 等の数値解析に応用する研究が盛んに行われている。

しかし、PM 試験の利用は地盤の静的力学物性評価に留まっており、液状化の予測判定や地中構造物や基礎の設計に必要な繰返し荷重に対する物性評価へは応用されていない。

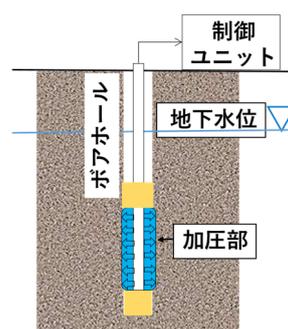


図 1 PM 試験の概要

2. 研究の目的

本研究の目的は、

- (1) 原位置繰返し PM 試験は、繰返しせん断によって剛性変化を生じるような地盤の原位置地盤調査法として成立するか
- (2) 他の調査法やサンプリング試料の物性との対応関係はどの程度か
- (3) 基礎地盤の耐震性評価に対して、従来法より有用な情報を与え、耐震設計法の信頼性が向上するか

を明らかにすることである。この試験法が確立できれば、図 2 に示すような基礎地盤の耐震性能の差が適切に評価可能である。

① 耐震上問題となる軟弱地盤（液状化の可能性のある地盤，粘性土系の軟弱地盤）

繰返しせん断を受ける軟弱地盤で問題となるのは、砂質土系のまたは粘性土系の軟弱地盤である。前者は液状化現象が、後者は軟弱地盤による地震動増幅現象などが問題となるが、両者ともひずみの増大に伴う骨格構造の軟化や破壊、過剰間隙水圧の上昇により、地盤のせん断剛性が低下する現象である。原位置で乱れない状況下での試験結果は、要素試験より高精度な情報が得られると考えられる。

② 種々の地盤改良が施された地盤

耐震性能が問題となる軟弱地盤は、様々な地盤改良工法によって改良される。改良効果は、固化処理系の地盤改良では Check Boring により Sample を取り、室内で一軸圧縮試験などを行っている。また、コンパクションパイルやサンドドレーンなどの改良工法では、N 値の増加などで設計や施工管理が行われる。これらの管理方法は、サンプルの代表性（多くの試験をし

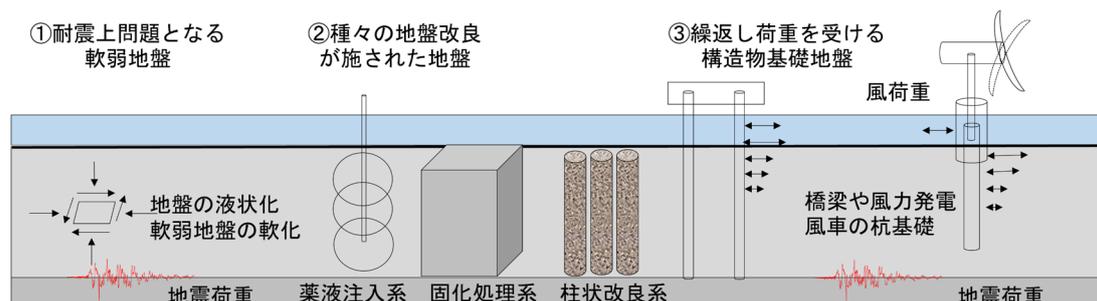


図 2 繰返し PM 試験法によって耐震性評価の高度化が期待できる基礎地盤の例

ないと信頼性が上がらない) や地盤全体としての改良効果を評価していないこと、改良効果の評価が曖昧であることなどの問題がある。繰返し PM 試験ならば、地盤の繰返しせん断に伴う剛性低下の度合いを改良前後で比較することによって、耐震対策として実施される地盤改良工法の性能向上に関して明確な施工管理・評価ツールとなりえる。

③ 繰返し荷重を受ける構造物基礎地盤 (道路橋基礎、建築物基礎、風力発電基礎など)

杭基礎は、現在 N 値を用いて支持力や水平地盤反力を経験的に推定している。特に、耐震設計で使う水平地盤反力係数に関する推定式は根拠が不明確で、非常に保守的 (安全率の高い) な設計となっている可能性が高い。繰返し PM 試験のデータが得られれば信頼性が大きく高まる。

3. 研究の方法

以下の3つの研究実施項目で研究を遂行した。

(1) 任意制御方式を設定できる繰返し PM 試験の制御システムの開発

PM 試験を繰返し試験法として確立するため、実務で汎用的に使用されている試験機器の荷重機構をハードおよびソフトともに抜本的に変える必要があった。目標とする試験は、大きく分けて応力制御方式とひずみ制御 (流量制御) 方式に分けられるが、軟弱地盤も対象とすることから、大流量の出入りを高速で制御できる仕様を目指した。それが可能となる制御システムを開発し、具体的な試験方法 (ひずみ振幅、ひずみ速度、応力制御かひずみ制御か、クリープや排水に伴う剛性変化等時間依存を伴う現象の場合の試験方法) を決めることを目標とした。

初年度には、既存の荷重ハード機構の荷重制御ソフトをのみを改良することであらかじめ定めた仕様での繰返し荷重試験ができるかどうかを検討した。その結果、試験機ゾンデ内に送り込む水圧・水量・荷重パターンの制御システムとして既存の危機の部分的な改良では、求める仕様を実現できないことがわかった。

結果として、最終年度までに図3に示すようなプロトタイプ試験システムを開発した。

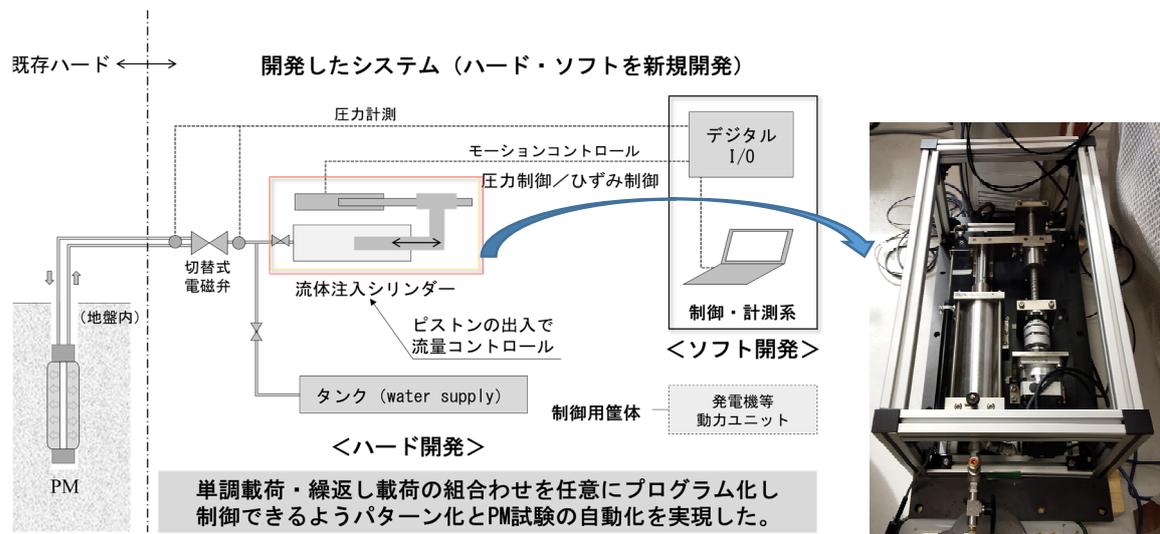


図3 開発した繰返し PM 試験の制御システム概要

(2) 大型模型土槽を用いた適用実験と結果分析

ゾンデに作用させる繰返し応力が地盤中の土の範囲まで影響を及ぼすかを実験的・数値的に検討した。実験的検討では、防災科研の有する大型模型土槽地盤において、比較的土被りの浅い砂質地盤を対象に PM 試験を実施した (図4-5)。その結果、ゾンデの圧力変化の影響範囲は 30 cm 以内と小さいこと、透水性の高い地盤では荷重周波数が低いと土圧は変化するが過剰間隙水圧が殆ど蓄積しないことがわかった [3, 4]。

同時に、この野外実験では、既存の SWS 試験 (スクリーウエイト貫入試験) も実施し、SWS 試験におけるスクリーウエイトの回転貫入時に、周辺地盤に伝達される圧力の大きさと、伝達範囲を把握した。これらの結果も研究論文として発表した [5]。

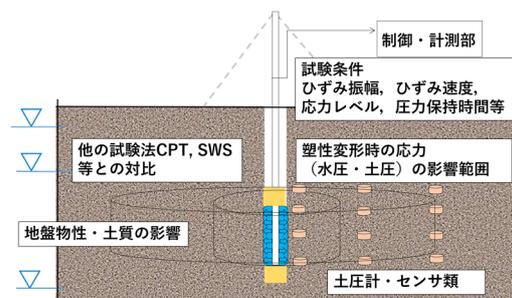


図4 大型土槽実験の断面図

一方、模型土槽実験の結果は3次元FEMによって再現解析を実施し、ゾンデの作用圧力が地盤内でどのように分布するかを数値解析的に検討した。その結果、地盤を弾性体と考えた場合、その影響範囲はゾンデ中心から30cm程度であり実験結果と整合した。また、地盤を弾塑性体と考えた場合には、地盤の塑性化による軟化挙動が再現できること、軟化挙動が徐々に周囲に進展することが明らかになった[6]。



図5 大型模型土槽を用いた試験の概要と実施状況

(3) 実地盤における開発したシステムの適用実験及び他の土質調査試験との対比検討

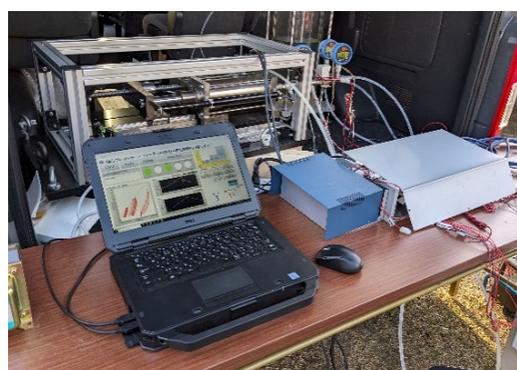
2年目に、仙台市の沖積平野部の比較的締まった砂地盤(N値10程度)を対象に、その時点で完成している試験システムの現場適用試験を実施した。この試験は、主に流量制御のシステムの適用性を検討した。しかし、繰返し载荷によって地盤はせん断破壊するが、過剰間隙水圧が蓄積しない状態では、ゾンデ周囲の地盤は徐々に密実化し、硬化挙動を示すデータが得られた。この実験から、地盤周囲に発生した過剰間隙水圧を計測する必要性、過剰過剰間隙水圧が逸散しない程度の速い速度での繰返し载荷の必要性が認識された。

最終年度に、千葉県袖ヶ浦市の埋立地盤で、その時点での開発システムの実証実験を行った。実際のフィールドは中央開発㈱の協力を得て行い、既存の土質調査試験結果と対比検討した。この試験の実施状況を図6-1)~3)に示す。この実験ではN値4程度の液状化の懸念される砂質土層とそれより以深の粘土地盤を対象にPM繰返し試験を実施した。この試験では、地盤に発生した過剰間隙水圧を捉えることができるよう3mm厚薄膜MEMS水圧センサ(図6-4)をゾンデ外側に貼りつけ実験を行っている。

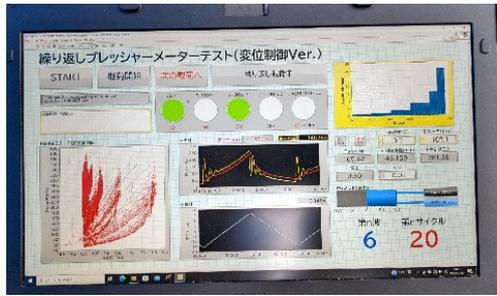
その結果、まず、試験機の制御方式として、任意の繰返し回数、任意の変位(流量)制御方式で試験を実施することができた。砂地盤に対しては、ゾンデ外側に貼りつけた水圧センサにより地盤に発生した過剰間隙水圧を捉えることができた。しかしながら、発生した過剰間隙水圧は液状化に至るほど大きくなく、発生した過剰間隙水圧の逸散が早く生じていることが推測できた。粘性土地盤に対しては、繰返しによる軟化挙動を示すデータを取得できた。



1) 実験状況全景



2) 試験制御の様子



3) 試験制御ソフト画面の例



4) ゾンデ外側に貼り付けた MEMS 水圧センサ

図 6 3年目に実施した袖ヶ浦市の現場実証試験の様子

4. 研究成果

これまで静的な載荷試験にのみ適用されていた孔内水平載荷試験を、繰返し荷重を作用できるように改良した試験システムの開発研究を実施した。主な研究成果は以下のとおりである。

- (1) 実務で使われている孔内水平載荷ゾンデに接続して、繰返し載荷を実施できるプロトタイプ試験機およびその試験制御ソフトを開発した。
- (2) 試験制御システムとしては、任意の制御パターン（圧力制御／変位制御／圧力変位ハイブリッド制御可能、任意の圧力／変位振幅の設定、任意の繰返し回数などの設定など）で実験を可能にした。
- (3) ゾンデの外側に薄膜状の MEMS 水圧センサを貼り付けて計測を行うことで、これまで全応力しか把握できない試験法から、有効効力を計測できる調査試験法となった。ただし、透水性の高い地盤に対しては、過剰間隙水圧の消散速度が速いため、液状化の懸念される地盤に対する試験には、工夫の余地がある。
- (4) 開発したシステムを用いて現場実証試験を実施し、現場で実施できることを確認した。室内で十分な事前試験を行うことによって試験法を深化させることが可能である。
- (5) PM 試験の発生応力の影響範囲がゾンデ半径から 30 cm 程度であることを実験的・解析的に明らかにした。この結果は直径 60 cm 程度のドラム缶を利用した室内実験で、試験機器のさらなる高度化研究が可能であることを意味している。

以上、実地盤において実用的な試験として実施できることが可能になったため、今後は種々の地盤に対する試験データを蓄積し、結果の解釈や実際の基礎設計に使う地盤物性の評価値について研究が必要である。国際的にも類を見ない日本発の基礎地盤の耐震性調査技術として先鞭をつけることができた。

本課題に関する参考論文・主な発表論文

- 1) 山口輝大, 加村晃良, 金鍾官, 風間基樹, 原位置サンプリング試料を用いた非排水繰返し三軸試験結果の信頼性とランダム地震動入力の影響について, 第 15 回日本地震工学シンポジウム 2359-2368 2018 年 12 月.
- 2) R. J. Mair and D. M. Wood, Pressure-meter Testing, Method and interpretation. CIRIA Ground Engineering Report: In-situ Testing, First published 1987.
- 3) Keigo Azuno, Tatsumi Ishii, Youngcheul Kwon, Akiyoshi Kamura, Motoki Kazama: An attempt to evaluate dynamic soil property for liquefaction assessment by cyclic loading pressuremeter test, 4th International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, 2022.7.15-17, Beijing, China. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11898-2_126
- 4) 石井 辰実、加村 晃良、風間 基樹、東野 圭悟、河又 洋介、権 永哲、大矢 陽介、森 友宏：[13-2-4-08] 圧力制御型の繰返しプレッシャメータ試験による砂質土地盤の動的挙動計測の試み, 第 56 回地盤工学研究発表会, 2021.
- 5) 森友宏, 土倉泰, 関崇夫, 加村晃良, 風間基樹: SWS 試験におけるスクリーポイント周辺の圧力分布, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.3, pp.451-466, 2022. 9.1. <https://doi.org/10.3208/jgs.17.451>
- 6) 石井 辰実: 地盤の動的変形挙動評価のための原位置繰返しプレッシャメータ試験法に関する基礎的研究, 東北大学修士論文, 2022.3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 MORI Tomohiro, TSUCHIKURA Toru, SEKI Takao, KAMURA Akiyoshi, KAZAMA Motoki | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 Pressure distribution around screw point in Screw weight sounding test | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Journal | 6. 最初と最後の頁 451 ~ 466 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.17.451 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Azuno Keigo, Ishii Tatsumi, Kwon Youngcheul, Kamura Akiyoshi, Kazama Motoki | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 An Attempt to Evaluate In Situ Dynamic Soil Property by Cyclic Loading Pressuremeter Test | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 4th International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering | 6. 最初と最後の頁 1446 ~ 1453 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-11898-2_126 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Jiang Mingjin, Kamura Akiyoshi, Kazama Motoki | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Numerical study on liquefaction characteristics of granular materials under Rayleigh-wave strain conditions using 3D DEM | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Soils and Foundations | 6. 最初と最後の頁 101176 ~ 101176 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101176 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Jiang Mingjin, Kamura Akiyoshi, Kazama Motoki | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Comparison of liquefaction behavior of granular material under SH- and Love-wave strain conditions by 3D DEM | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Soils and Foundations | 6. 最初と最後の頁 1235 ~ 1250 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.06.013 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Kim Jongkwan, Kazama Motoki, Kawai Tadashi | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Evaluation of post-liquefaction volumetric strain of reconstituted samples based on soil compressibility | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Soils and Foundations | 6. 最初と最後の頁 1555 ~ 1564 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.09.002 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 凌路寧, 森友宏 |
| 2. 発表標題 低加重のSWS試験のトルク値を用いた造成盛土の締固め層厚の探索 |
| 3. 学会等名 第48回土木学会関東支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石井辰実, 加村晃良, 風間基樹, 東野圭悟, 河又洋介, 権 永哲, 大矢陽介, 森 友宏 |
| 2. 発表標題 圧力制御型の繰返しプレッシャメータ試験による砂質土地盤の動的挙動計測の試み |
| 3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Mingjin Jiang, Akiyoshi Kamura, Motoki Kazama |
| 2. 発表標題 11) Simulation of granular soil liquefaction due to Rayleigh wave transformation by 3D Discrete Element Method |
| 3. 学会等名 17th World Conf. on earthquake Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 大矢 陽介 (Ohya Yousuke) (30571202) | 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・上席研究員 (82627) | |
| 研究分担者 | 森 友宏 (Mori Tomohiro) (40552394) | 前橋工科大学・工学部・准教授 (22303) | |
| 研究分担者 | 権 永哲 (Kwon Youngcheul) (70805283) | 東北工業大学・工学部・教授 (31303) | |
| 研究分担者 | 加村 晃良 (Kamura Akiyoshi) (80761387) | 東北大学・工学研究科・准教授 (11301) | |
| 研究分担者 | 河又 洋介 (Kawamata Yohsuke) (90740994) | 国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主任研究員 (82102) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

| | |
|--|--------------------|
| 国際研究集会 17th World Conf. on Earthquake Engineering | 開催年 2021年～2021年 |
|--|--------------------|

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|