

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01508

研究課題名(和文) 微細空隙中の水の移動に着目した高水圧下にあるコンクリートの破壊進展メカニズム

研究課題名(英文) Fracture progress mechanism of concrete under high water pressure considering water movement in microstructure

研究代表者

岩波 光保 (Iwanami, Mitsuyasu)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：90359232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高水圧載荷装置を用いた実験的検討とFEMに基づく解析的検討の2つから構成される。実験的検討では、コンクリートの材料・配合や形状を変化させた供試体を対象に、高水圧載荷装置を用いて載荷実験を行った。載荷条件として、最大水圧、載荷速度、繰返し載荷回数などを変化させて、コンクリートに発生するひずみや外観変状などを調べることで、微小ひび割れの発生からマクロ的な破壊に至る過程を追跡した。解析的検討では、水の移動を微細空隙のスケールで追跡可能な有限要素解析手法を用いて、実験では把握することが困難なコンクリート中でのミクロな破壊進展過程を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートの物性に及ぼす高水圧の影響をコンクリート中の微細空隙と関連付けて考察した点は、学術的にも特徴があり、本研究の独創的な点である。また、大水深海域にコンクリート構造物を建設することを想定し、高水圧下にあるコンクリートが外力を受けた時にどのように破壊していくのかを調べて、コンクリート部材の構造性能に及ぼす水圧作用の影響を明らかにしたことは、大水深海域におけるコンクリート構造物の設計・施工方法の構築に資する。

研究成果の概要(英文)：This study consisted of experimental investigation with high pressure loading apparatus and numerical investigation based on FEM. In the experiment, loading tests on concrete specimens with various shapes and materials were conducted using the high pressure loading apparatus. By changing the maximum water pressure, loading rate, repeated cycles, the strains in the specimen and its surface appearance were examined in order to make clear the fracture process of concrete under high water pressure. In the numerical investigation, utilizing the FEM analytical platform where the water transportation can be simulated in the micro-pore scale, the micro fracture process was examined to compensate the experimental approach.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 高水圧 破壊進展メカニズム 微細空隙 海洋開発

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最近、日本近海での海底資源の存在が確認され、自給できる資源として、高い注目を集めている。例えば、石油や天然ガス、国産の次世代エネルギーとして有望なメタンハイドレートが水深数百～数千 m の海底に存在していることが明らかとなっている。このことは、我が国のエネルギー戦略において大水深海域での海洋開発がきわめて重要であることを示している。このような海洋開発を実現させるためには、大水深海域での経済活動を支えるための大型プラットフォームが不可欠であり、現在のところ、石油掘削リグのような鋼構造物が広く用いられている。このような構造物のコスト削減や長寿命化を考えると、コンクリート構造物の活用が期待される。しかしながら、大水深海域におけるコンクリート構造物の設計・施工方法は確立されていない。これは、コンクリート構造物の構造性能に及ぼす高水圧の影響が解明されていないためである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大水深海域にコンクリート構造物を建設することを想定し、高水圧下にあるコンクリートが外力を受けた時の破壊進展メカニズムを明らかにすることである。

等方的に作用する水圧が何らかの要因によりコンクリートの内部に偏心応力を発生させれば、直ちに破壊に至る可能性がある。また、コンクリートは多孔質であり、その微細空隙と空隙中への水の移動度合いによって破壊形態が大きく異なるものと考えられる(図-1)。高水圧下における岩盤や鉄の挙動は、ある程度明らかになっているものの、内部に多様な微細空隙を有するコンクリートでは全く異なる挙動を示す可能性が高い。

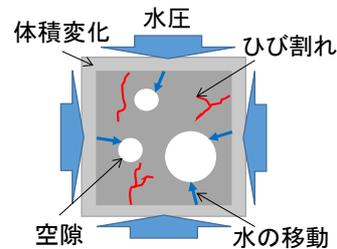


図-1 水圧下の挙動

3. 研究の方法

本研究における検討は、①高水圧载荷装置を用いた実験的検討、②FEMに基づく解析的検討の2つから構成される。①の実験的検討では、コンクリートの微細空隙と水の移動度合いが支配因子となることが推測されるため、コンクリートの材料・配合や形状を変化させた供試体を対象に、高水圧载荷装置を用いて载荷実験を行った。载荷条件については、最大水圧、载荷速度、繰返し载荷回数などを変化させて、コンクリートに発生するひずみや外観変状などを調べることで、マイクロクラックの発生からマクロ的な破壊に至る過程を追跡した。一連の実験的検討によって、ある程度の現象解明は可能であると考えられるが、コンクリート中の微細空隙に水がどのように浸入・移動していくのかを詳細には追跡できない。そこで、②の解析的検討では、水の移動を微細空隙のスケールで追跡可能な有限要素解析手法を用いて、実験では把握することが困難なコンクリート中でのマイクロな破壊進展過程を検討することとした。

4. 研究成果

4. 1 高水圧下におけるコンクリートの力学的挙動の解明

4. 1. 1 実験概要

ここでは、材齢を変化させたコンクリート、モルタル、セメントペーストに水圧を作用させ、外観、吸水量、ひずみ、圧縮強度、ビッカース硬さ、細孔径分布を調べ、高水圧を受けるコンクリートの力学的挙動について考察を行った。

(1) 供試体概要

使用したコンクリートとモルタルの配合を表-1に示す。透水の影響を調べるため、コンクリートはAE剤を用いたものとAE剤を用いていないものを用意した。また、セメントペースト供試体についても、水セメント比0.50としてセメント量に対して0.008%のAE剤を入れて作製した。それぞれの供試体はφ10cm×20cmの円柱供試体で、打設1日後に脱型し、その後温度20度の環境下で、ケースに応じて1日間から56日間の水中養生を行った。

表-1 配合表

	粗骨材 最大寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
コンクリート AE 有	20	17.0	50	5	40.7	175	350	651	1043	0.028
コンクリート AE 無	20	18.5	50	2	44.5	209	414	708	973	0
モルタル	—	—	50	5	40.7	175	350	651	—	0.028

(2) 水圧作用条件

水圧を作用させるために、本事業で新たに製作した高水圧载荷装置(図-2)を用いた。この装置は、水を満たした圧力容器の中に供試体を入れ、シリンジポンプで水を送り込むことによって水圧を作用させる仕組みになっている。制御用PCにより最大水圧値と維持時間、加圧速度、減圧速度を入力することで水圧を自動で調整することができる。

水圧を作用させる条件は、最大水圧 50MPa、維持時間 10 分間、加圧速度と減圧速度ともに 3MPa/min とした。材齢 2 日、7 日、13 日、28 日、56 日の供試体に対してそれぞれ水圧を作用させ、モルタルとセメントペーストに対しては材齢 7 日と 13 日に代えて 8 日と 15 日で水圧を作用させた。なお、水圧作用開始時の供試体の状態を揃えるため、水圧作用前のコンクリートに対し、-0.1MPa の圧力で水中での 2 時間の脱気処理を行った。

#### 4. 1. 2 水圧作用による外観上の変化

材齢ごとの水圧作用後の供試体の外観の例を図-3に示す。コンクリート(AE 有)の材齢 7 日の供試体は水圧を作用させた 4 本ともにひび割れと欠けが生じており、最大で断面方向に 5mm 程度の深さであった。モルタルでは材齢 8 日と 15 日の供試体にひび割れと欠けが生じた。セメントペーストでは、材齢 8 日で小さな欠けが生じており、材齢 2 日以外の供試体ではひび割れが見られた。

コンクリート(AE 有)の材齢 7 日の供試体と、モルタルの材齢 8 日、15 日の供試体において、層状のひび割れが生じ外側から剥がれるように割れていた。コンクリートとモルタルは複合材料であるため、空隙の繋がり方により透水しやすい空隙と透水しにくい空隙があり、図-4に示すように表面付近で局所的に内部の間隙水圧が高くなったことで、内側からの圧力によってひび割れや剥がれが生じたと考えられる。

また、コンクリート供試体について、AE 剤を入れた場合、材齢 7 日時点で供試体にひび割れや欠けが生じたが、AE 剤を入れていない場合は養生日数に関わらず外観変状が見られなかった。一方、セメントペースト供試体では、材齢 8 日以降でもひび割れが発生したが、このひび割れはコンクリートやモルタルと違い、水圧作用直後は目立たなかったが、時間をおいたことで乾燥によりひび割れが広がり確認できるようになった。細骨材や粗骨材が入っていない分、透水自体が少なく、コンクリートやモルタルと比べてひび割れが目立たなかったと考えられる。

#### 4. 1. 3 水圧作用時のひずみ

コンクリート(AE 有)、モルタル、セメントペースト供試体の中心にモールドゲージを入れ、水圧作用中のひずみ変化を調べた。材齢を横軸にとった 50MPa 到達時のひずみを図-5に示す。50MPa 到達時点のひずみに注目すると、材齢 7 日から 15 日にかけて値が大きくなっており、外観変状が顕著だった供試体でひずみも大きくなっていることが分かる。

材料別にみるとモルタルで最もひずみが大きくなっている。空隙量としてはセメントペースト>モルタル>コンクリートであるが、セメントペーストは骨材周りの空隙がない分、透水性に影響がある連続的な空隙が少ない。よって、モルタルで透水が多く生じたため、透水による損傷が大きく、ひずみも大きくなったと考えられる。実際に外観変状についても、モルタル供試体のひび割れや欠けが最も顕著であった。

#### 4. 1. 4 水圧作用による圧縮強度の変化

水圧作用後のコンクリートに対し圧縮試験を行った。コンクリート AE 有について、水圧を作用させた供試体と作用させていない供試体の圧縮試験結果を図-6に示す。AE 剤入りのコンクリートでは材齢 7 日で水圧作用によって圧縮強度が 8.6MPa 低下、材齢 13 日では 2.9MPa 低下し

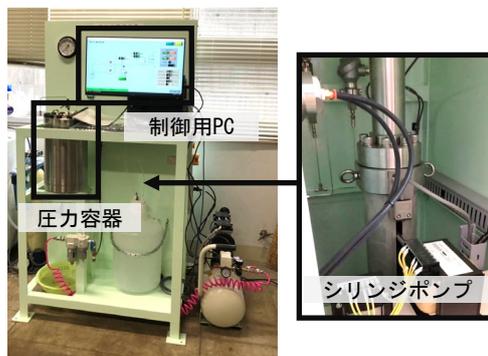


図-2 高水圧載荷装置

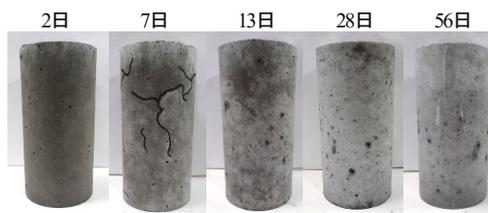


図-3 水圧作用後の外観 (コンクリート AE 有)



図-4 ひび割れや欠けが生じた仕組み

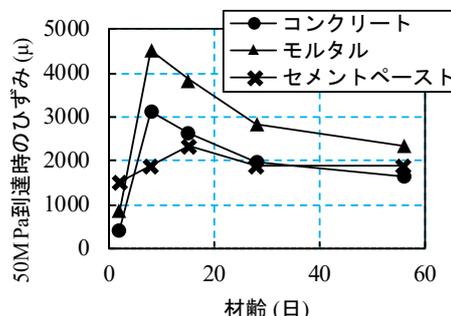


図-5 50MPa 到達時のひずみ

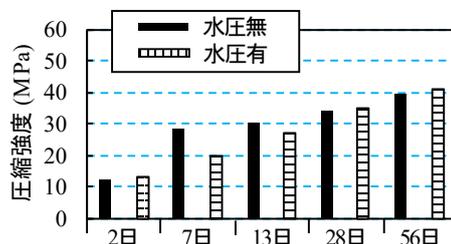


図-6 コンクリート AE 有の圧縮強度

たが、その他の材齢ではほとんど変化しなかった。図-3に示したように材齢7日では外観変状も顕著で、材齢7日の供試体に損傷が生じていることが分かる。AE剤を用いたコンクリートでは、空気量が多いため、吸水量が多く、水圧作用による損傷が生じやすくなり、圧縮強度が低下したと考えられる。

#### 4. 1. 5 水圧作用による微小部分の硬さの変化

水圧作用による微小部分の硬さの変化を知るため、コンクリート(AE有)供試体のビッカース硬さ試験を行った。水圧作用後の供試体と作用させていない供試体からカッターにより4cm×4cm×2cmの直方体に切り出し、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて作製した試料に圧子を押し当て、できた正方形のくぼみの表面積で試験力を割った値から、ビッカース硬さを計算した。試験力はHV0.5(4.903N)で、荷重保持時間は10sとした。

測定結果より、水圧を作用させた試料と作用させていない試料でビッカース硬さの値があまり変化しなかった。ビッカース硬さ試験で作られるくぼみのサイズが150~300 $\mu$ と水圧作用による変化が表れた空隙サイズよりも大きかったため、変化が現れなかったと考えられる。

ただし、材齢2日では水圧作用によってビッカース硬さが低下した。材齢2日の時点ではセメントの水和反応が十分に進んでおらず、まだセメント硬化体自体が弱かったためであると考えられる。

#### 4. 1. 6 水圧作用による細孔径分布の変化

水圧作用による空隙の変化を調べるため、コンクリート(AE有)供試体に対し水銀圧入法によって水圧作用前と後の供試体の細孔径分布を調べた。水圧を作用させた供試体と作用させていない供試体をカッターとハンマーによって5mm角に砕き、アセトンを用いて水和停止を行った後、24時間乾燥させて作製した試料を用いて水銀ポロシメータによって測定した。

測定結果より、特に材齢7日の供試体では水圧作用によって細孔径が70nmの空隙が減少し、300nmの空隙が増加していた。つまり、水圧作用により細孔径が70nmの空隙周りのセメント硬化体が破壊したと考えられ、セメント硬化体の破壊により材齢7日の供試体でひび割れや欠け、ひずみの増大、圧縮強度の低下が引き起こされたと考えられる。

材齢7日の供試体でセメント硬化体が壊された原因について考える。コンクリートは材齢が大きくなるにつれて水和反応が進み、硬化していく。本供試体では28日まで硬化が進んでおり、空隙量のピークを示す空隙サイズが材齢2日から28日にかけて小さくなっている。特に材齢2日の供試体では、それ以降の材齢と比較して空隙のピークが1桁大きかった。よって、材齢2日の供試体では細孔径が400nmほどの大きな空隙が多く、水圧を作用させた際に空隙に水が浸入し、空隙中の水が水圧に抵抗できるため、セメント硬化体の強度自体は小さいものの損傷が生じなかったと考えられる。一方で、材齢7日の供試体では、材齢2日と比較して細孔径が60nm程度の小さな空隙が多くなるため水が供試体内部に浸入しづらくなり、空隙中の水が水圧に抵抗することができず、さらにセメント硬化体の強度自体も小さいため、水圧による損傷を受けてしまったと考えられる。しかし、材齢28日になると、空隙サイズは材齢7日と同じであるため透水はしにくいものの、セメント硬化体の強度が上がることで、水圧による損傷を受けなくなったと考えられる。以上のメカニズムにより、高水圧を受けるコンクリートの力学的挙動に材齢による差が生じたと考えられる。材齢により力学的挙動が変化したメカニズムをまとめた概念図を図-7に示す。

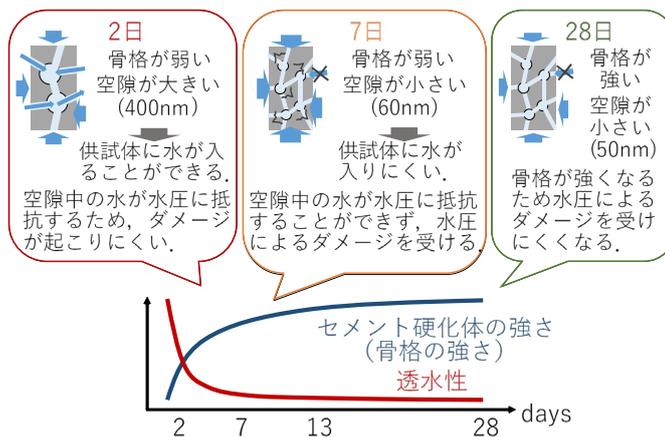


図-7 透水性と骨格の強さによる水圧作用時の変化

### 4. 2 コンクリート表面からの位置と水圧の作用時間の影響

#### 4. 2. 1 実験概要

ここでは、実験①でモルタル中への透水状況を観察し、その後、実験②および実験③で水圧作用時のひずみの変化を観察した。

実験①では供試体の質量を測定し、その後高水圧载荷装置(図-2)の圧力容器内に入れ、昇圧速度3MPa/min、降圧速度10MPa/minで水圧を作用させた。水圧の作用条件は、最大水圧5MPaで最大水圧維持時間1秒、最大水圧50MPaで最大水圧維持時間1秒、最大水圧50MPaで最大水圧維持時間1時間の3ケースとした。水圧徐荷後にそれぞれの供試体の質量を測定した。その後、供試体を割裂し、割裂面に水漏れ検査剤を吹き付け、水の浸透深さを観察した。

実験②では、材齢 7 日の供試体を高水圧載荷装置の圧力容器内に入れ、最高水圧 50MPa、水圧保持時間 24 時間、昇圧速度 3MPa/min、降圧速度 10MPa/min で水圧を作用させ、供試体に作用する水圧が上昇する過程でのひずみ変化を調べた。実験③では、材齢 16 日の供試体に実験②と同様に水圧を作用させ、一定水圧が作用している間のひずみの変化を調べた。

供試体はモルタルで作製した。結合材には早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 35%とした。供試体はφ10×20cmの円柱とした。打設 1 日後脱型を行い、その後水中養生を行った。養生終了後、上面以外にエポキシ樹脂を表面に塗ることで透水の方向を制限した。実験①においては 6 日間の水中養生の後、エポキシ樹脂を塗る前に供試体を気温 60℃、湿度 0%の環境で 6 時間乾燥させ、その後エポキシ樹脂を塗り透水の方向を制限した。

#### 4. 2. 2 実験結果

##### (1) 実験① (透水量の観察)

表-2に、浸透深さ、吸水率、供試体の割裂面に水漏れ検査剤を吹き付けた様子を示す。表-2から分かるように、水圧が大きいほど、水圧作用時間が長いほど、供試体内部に水が浸透していることが分かる。

##### (2) 実験② (水圧上昇時のひずみ挙動)

昇圧過程におけるひずみの挙動を図-8に示す。昇圧過程において透水面から遠いほどひずみが大きくなることが分かる。

##### (3) 実験③ (水圧維持時のひずみ挙動)

水圧 50MPa 到達後の圧縮ひずみの増加量を図-9に示す。時間とともに圧縮ひずみが増加した。また、水圧保持期間中に急激にひずみが増加していることが分かる。さらに透水面からの距離によってひずみの増加の仕方が異なった。

#### 4. 2. 3 考察

実験①および実験②より、水圧作用時、供試体中の透水状況が異なり、透水が起きている位置ではひずみは間隙水圧が働くことによりひずみの変化が抑えられたものと考えられる。

実験①および実験③より、一定水圧作用時のひずみの増加の原因として水の浸透が考えられる。水圧が 50MPa に到達した時にはまだ透水が完了していなかったが、時間とともに透水は進んだことで、モルタル中のセメント硬化体の骨格に損傷を与え、圧縮ひずみが増加したものと考えられる。

#### 4. 3 FEMに基づく解析的検討

コンクリート中の微細空隙への水の浸入を有限要素解析で正確に追跡できるようにするため、微細空隙内部における液状水の移動のモデル化などの検討を行った。実際の深海におけるコンクリートの力学挙動と①の実験結果を比較すると、深海における特有の環境条件の影響を適切に評価する必要がある。

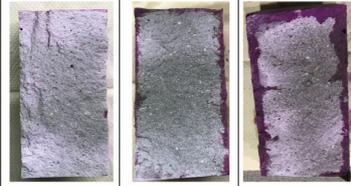
既往研究より、低温環境下(海水温 4℃)においてコンクリートが劣化すること、深海に長期間暴露(608 日間)したモルタル供試体が劣化することが分かっている。しかし、深海環境において水圧、水温、海水成分のそれぞれがどの程度の劣化の具合に影響するかは分かっていない。そこで本検討により、水圧と温度によってコンクリートにどのような影響を与えるかを調べるため、モルタル供試体に低温環境で 50MPa の水圧を作用させて、水圧と水温がどのような影響を与えるのかを調べた。

その結果、本研究の範囲内では、高水圧を受けるコンクリートの力学挙動に及ぼす低温の影響はほとんどないことが確認できた。XRD 分析結果からとわかるように、どの供試体においても表面と中での生成物の変化は特に見られなかった。また水圧・水温が違う供試体同士を比較しても特に変化は見られなかった。

表-2 供試体の吸水特性

水圧	5MPa	50MPa	50MPa
最大水圧維持時間	1秒	1秒	1時間
浸透深さ	2mm	5mm	9mm
吸水率	0.89%	1.63%	1.77%

割裂面に水漏れ検査剤を吹き付けた様子



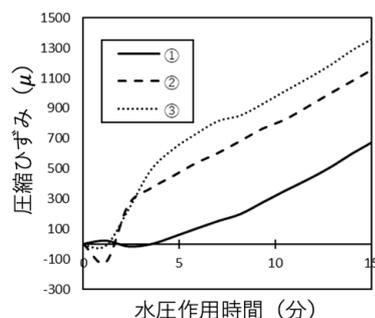


図-8 水圧昇圧時のひずみ変化

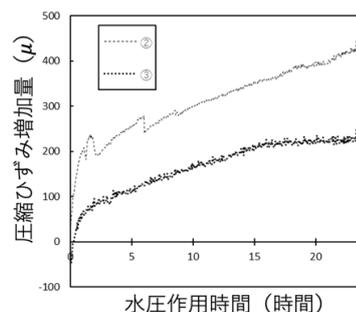


図-9 水圧維持時のひずみ変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田中佳南, 中山一秀, 岩波光保	4. 巻 42
2. 論文標題 高水圧を受けるコンクリートの力学的挙動に関する基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Keisuke, Kawabata Yuichiro, Kobayashi Mari, Gotoh Shinpei, Nomura Shun, Kasaya Takafumi, Iwanami Mitsuyasu	4. 巻 19
2. 論文標題 Action of Hydraulic Pressure on Portland Cement Mortars - Current Understanding and Related Progress of the First-Ever In-Situ Deep Sea Tests at a 3515 m Depth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 226 ~ 239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.19.226	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩本大輝, 岩波光保, 中山一秀
2. 発表標題 深海環境におけるコンクリートの物性変化に関する基礎的研究
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

世界初 深海でセメント硬化体の力学特性を計測開始 - 深海インフラの設計手法構築に貢献  
<https://www.titech.ac.jp/news/2021/049310.html>

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	千々和 伸浩  (Chijiwa Nobuhiro)  (80546242)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授    (12608)	

	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
連携研究者	川端 雄一郎  (Kawabata Yuichiro)  (10508625)	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・グループリーダー    (82627)	

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0件

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