

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24360187

研究課題名(和文) 堆積岩の構造異方性を考慮した不飽和過程の変形と水分分布状態の連成挙動の定式化

研究課題名(英文) Coupled behavior between deformation and moisture distribution process considering structural anisotropy of sedimentary rock

研究代表者

長田 昌彦 (OSADA, Masahiko)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00214114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトとして堆積岩が選ばれた場合、空洞周辺岩盤は乾燥状態に置かれる可能性が高い。岩石も多孔質材料であり、水分量が変化することにより変形する。しかし、与えられた温度湿度環境条件下において、岩盤がどのように乾燥し、どのような過程を経て変形していくのかは、実はよくわかっていない。そこで本研究課題では、室内実験と原位置計測により岩石の乾燥湿潤挙動を詳細に調べ、大気中の水分と岩盤中の水分がダイナミックに移動していることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When deep seated sedimentary rocks are excavated for radioactive waste disposal, the new environment may cause change in water content in surrounding rock of tunnel wall. Rock, which is one of the porous media, should deform in response to the change. In fact, it is not clear how much rock deform and how rock deform. In this study, coupled behavior between deformation and moisture distribution process is investigated by laboratory experiments and in situ measurements. As a result, it is elucidated that moisture transfer occurs dynamically between the air and pores in rock.

研究分野：岩盤力学、応用地質学

キーワード：放射性廃棄物の地層処分 堆積岩 乾燥湿潤変形 水分分布状態 飽和・不飽和 連成挙動

1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトが進行しつつある。処分サイトの選定にあたっては、可能な限り低い透水性を有する岩盤を選択することになる。これまでの岩盤構造物に関する土木事業が、どちらかと言えば、高い透水性を有する岩盤との戦いであったことと対照的である。したがって地層処分プロジェクトは、これまでとは性格を異にする建設事業であるという認識に立つ必要がある。

透水性の小さい岩盤を対象とすることで注意すべきことは、操業時において空洞周辺岩盤は乾燥状態に置かれる可能性が高いことである。しかしながら、与えられた温度湿度環境条件下において、岩盤がどのように乾燥し、どのような過程を経て変形していくのか、さらにそのような乾燥変形挙動が岩盤全体の透水特性に影響を与えるかについて、実はよくわかっていない。また廃棄物が埋設されたあと、徐々に地下水が涵養されること(再冠水)が想定されているが、トンネル壁面の乾燥により岩盤中の間隙に入った空気そのものの挙動も評価しておく必要がある。

2. 研究の目的

堆積岩は放射性廃棄物の地層処分サイトの有力な候補の一つである。堆積岩は初生的に内部構造的な異方性を有しているため、計測する方向によってその挙動も変化する。そこで本研究課題では、堆積岩の構造的異方性を考慮しつつ各種の堆積岩に対する乾燥・湿潤変形挙動を室内実験によって明らかにし、その過渡的な変形を試料内部の水分分布状態をパラメータとして定式化することを研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 堆積岩試料

主な試料としては、白浜砂岩、田下凝灰岩、能登珪藻泥岩、軽石凝灰岩、珪藻質泥岩/珪質泥岩、オパリナスクレイを用いた。

白浜砂岩と田下凝灰岩は、岩盤力学の分野で標準的な実験試料として用いられており、各岩石の平均的な力学特性が数多く報告されていることから、本研究課題による試験結果と比較可能なため選んだ。

珪藻質泥岩/珪質泥岩は、日本原子力研究開発機構が北海道幌延町で掘削した1本のボーリング孔から採取したコアを用いた。これらの地層は現在の位置にて続成作用を被っていることから、深度が深くなるに従い間隙率などの物性値が系統的に変化する。このコア試料を用いることにより、わずかな物性値に変化による岩石の乾燥変形挙動の差異を考察できるものと考えて選んだ。

オパリナスクレイは、放射性廃棄物処分における国際共同実験施設であるスイスのモンテリ地下研究所に分布する泥岩である。現地にてボーリング掘削直後に密封して国内

に搬送したものをを用いた。この試料を用いることにより、国際的な議論が可能となるため選んだ。

その他、国内で現地調査を実施した地点の岩石を適宜試料として用いた。

(2) 試料の物理的性質

試料の初期物性値を把握するために、土粒子密度試験、含水比試験を実施し、乾燥密度や間隙率を算出した。整形した円柱供試体は寸法と質量を計測して乾燥変形試験に供した。なお、供試体の準備作業中は、濡れタオルで供試体を覆うなどできる限り供試体表面が乾燥しないように細心の注意を払った。

試料の間隙構造は、水銀圧入試験により間隙径分布を求め、これを代表値とした。乾燥クラックを生じた場合には、マイクロフォーカスX線CTにより、その形状等を把握した。また必要に応じて、走査型電子顕微鏡により細部の構造を比較検討した。

(3) 乾燥変形試験

試験の基本的な手順としては、まず供試体を水浸して真空に引き、質量が一定となるまで放置する(なお、原位置から採取した試料はほぼ飽和状態にあるものと仮定した)。次に、手早く供試体の側面に、4枚のロゼットゲージを軸対称に貼り付け、水分移動が上面のみで生じるように、供試体の側面および底面はシリコンゴムで覆う。このようにして準備した供試体を恒温恒湿槽中に置いた電子天秤の上に設置し、また蒸発量計測センサーを上面近傍に設置して水分移動を計測する。

乾燥環境条件は、自然乾燥条件あるいは恒温恒湿槽の温度湿度環境を一定とした。

蒸発量計測センサーは、渡辺ら(引用文献①、②)が開発した装置である。岩石表面からの水分移動が拡散に支配されていることを仮定して、表面から高さの異なる2点において温度と相対湿度を計測することにより、それぞれの計測点における絶対湿度を計算し、その差に水分拡散係数を乗じて蒸発量を求めるものである。

水分移動の計測において本センサーを同時に使用することは、乾燥変形試験結果の解釈に大変有意義であるとともに、類似研究と差別化しうる点となっている。

(4) 定式化

乾燥湿潤変形挙動、乾燥による水分量変化挙動、間隙空気圧の発生挙動のそれぞれについて、異なるモデルを用いた。

乾燥湿潤変形挙動は、不飽和流れにリチャードの式を用い、これと多孔質弾性体の構成式を連成させた。蒸発面での水分移動に関する境界条件には、蒸発量計測センサーにより得られた蒸発面直上における相対湿度をケルビン式に代入して、蒸発面での圧力水頭に置き換えたものを用い、水分特性曲線にはVG(van Genuchten)式を用いた。

リチャード式と多孔質弾性体の構成式の連成では、乾燥変形時の供試体内部の水分分布状態を適切に表現することができなかつたため、これに代わる方法として水分移動を水分拡散として扱う方法について検討し、乾燥による水分量変化挙動への適用を試みた。

乾燥した岩石を完全に水没させると、岩石内部に間隙空気圧が発生する。これを表現するために、水銀圧入試験から得られた間隙径分布情報を等価管路モデルへ組み込み、濡れによる水の浸透と間隙空気圧の上昇による排気挙動をモデル化した。

(5) 原位置計測

本研究課題の開始前にスイスのモンテリ地下研究所で実施した掘削直後のトンネル壁面における蒸発量とひずみ計測結果を再評価したほか、国内3か所においてトンネル切羽近傍での蒸発量計測を実施した。

4. 研究成果

(1) 乾燥収縮量の推定方法の提案

処分サイトの選定時に、対象とする堆積岩がどの程度収縮する可能性があるかを予め推定できることは有意義である。

乾燥変形試験を実施した堆積岩試料について、その最大乾燥収縮量と間隙径分布のピーク値の関係を整理したところ、乾燥収縮量の最低値に明瞭な負の相関が得られた。すなわち、間隙径分布のピーク値が小さいものほど、より収縮する傾向が明らかとなった。ただし、乾燥収縮量の最大値については傾向が見いだせなかつたため、真の収縮量が推定できるわけではないことに注意されたい。

(2) 乾燥変形挙動の基本的な特性の把握

ハンドスペーシメンサイズの供試体を用いた場合、乾燥時の温度湿度条件が同じならば、供試体形状や蒸発の生じる断面の大きさに関わらず、最終的な乾燥収縮量はほぼ同じ範囲に入ることがわかった。変形の経時的な変化は蒸発の生じる面積が広いほど乾燥にかかる時間が短くなるが、飽和度と乾燥収縮量の関係でみると、両者は同じ曲線上にプロットされる。このことは、乾燥時における供試体内部の水分移動は比較的速やかに生じていることを示唆している。この関係は、供試体内部に発生している毛管圧力が均質に作用していると思わせるか否かによるものと考えられる。

(3) 堆積岩の構造異方性の表現

用いた試料のうち、白浜砂岩と軽石凝灰岩は等方的な材料であり、田下凝灰岩とオパリナスクレイは水平等方性を有する材料である。乾燥変形試験を実施すると、この挙動が明瞭に現れることがわかった。

田下凝灰岩とオパリナスクレイでは、堆積面に直交する方向に大きく変形する。オパリナスクレイの場合、2週間以上経過しても乾

燥収縮し続けるが、異方性比（堆積面に平行方向のひずみに対する直交方向のひずみの比）は数日で一定値に落ち着く。このことは、供試体内部の水分分布は外部の温湿度環境あるいは保持している水分量に対して速やかに反応して均質になることを示唆しているものと考えられた。別の言い方をすれば、供試体内部に発生している毛管圧力が均質に作用するように水分分布が速やかに変化するという。

連成挙動の表現には、この挙動を取り入れておく必要がある。

(4) 初期乾燥変形挙動の観察

ある種の堆積岩では、乾燥の初期段階に無視できない収縮が生じる場合がある。

珪藻質泥岩の例では、乾燥初期に1500 μ 程度収縮し、その後一定となつてから再度収縮し始める。この現象を蒸発量計測センサーによって確認したところ、ひずみが一定となる期間は定常蒸発期と一致していることが明らかとなった。

この挙動が現れるかどうかは乾燥時の温度湿度環境に依存し、堆積岩内部の間隙構造と密接に関連しているものと考えられる。この初期変形は、いわゆる空気侵入値に相当するところまでに生じており、乾燥変形の連成現象をモデル化するには考慮すべき現象であるとともに、実務においても掘削直後の岩盤挙動に注意が必要であることを示している。

(5) 乾燥過程の影響について

これまで我々は、実際のトンネルなどの地下掘削を考慮して、ある一定の温度湿度環境下に飽和試料を暴露させる試験を実施することによって、飽和度-体積ひずみ関係を得てきた。しかるに一方で、類似の実験を実施している国際的な議論の場では、一定温度で段階的に相対湿度を下げる実験方法が主流である。

そこで珪藻質泥岩を用いて、これら両乾燥過程の比較を行った結果、得られる飽和度と体積ひずみの関係には、乾燥過程の影響は大きく現れないことを明らかにした。このことは、湿度環境の変化に伴って、内部の間隙水が比較的短時間で移動しつつ、変形が進むことを示していると考えられた。

(6) 長期の乾湿繰り返し挙動

長期にわたる乾湿繰り返し試験を継続して実施し、2年間に及ぶ珪藻質泥岩の変形挙動を取得した。3サイクルさせた乾湿繰り返し試験からは、初期乾燥時における変形挙動の影響が著しく大きく、その後の乾湿サイクルでは体積ひずみ-飽和度関係でみたときヒステリシスは示すものの可逆的な変化を示すことが明らかとなった。堆積岩からなる処分サイトでは、初期乾燥をできる限り避けることが大切であることが示唆された。

(7) 非接触な変形計測方向の検討

ある程度固結した岩石に対しては、これまでひずみゲージを用いて変形を計測してきた。しかしながらひずみゲージが貼付できないような軟らかい試料や不定形な試料に対しても乾燥変形挙動をとらえる必要が生じたため、レーザー変位計を用いた非接触計測方法を検討した。両手法を用いることができる試料を用いて検証した結果、十分により精度で推定できることが明らかとなった。

国内で変状を生じているトンネル掘削現場から採取した試料に対して本手法を適用した結果、体積ひずみで6%程度の収縮量が観測された。ほぼ土質材料との中間的な岩石と考えられる。

(8) トンネル壁面を模擬した乾燥変形挙動

実際のトンネルは、トンネル壁面から水分が蒸発するが、地山からは透水特性に応じて水分が供給されている。このような場を模擬するために、供試体の片端面を蒸発面とし、もう片方の端面を水浸させた実験を実施した。供試体側面は不透水境界とした。

蒸発面直上における相対湿度を変化させることによって、供試体内部においても変形が確認された。この挙動をリチャード式と多孔質弾性体の構成式を連成させた解析で再現したところ、変形と飽和度の両方を十分に表現することはできなかった。今後改良を加えていきたいと考えている。

(9) 変形量推定のための変形係数値の検討

乾燥変形量は、主として毛管圧力と試料の弾性的な性質の関数として与えられると考えられる。しかしながら、試料の弾性係数の与え方には課題が残されている。多くの場合、弾性波速度測定などから求めた弾性係数をそのまま用いることができず、1/3程度小さな値を用いないと飽和度と収縮ひずみ量が整合しない。

乾燥変形では最終的には引張クラックを発生するような応力レベルまで変形が進むことから、ここでは破壊に近い領域までの圧縮・引張繰り返し試験を実施した。この結果、微小領域の変形係数ではなく破壊に至るまでの変形係数を考慮すること、また圧縮応力場ではなく引張応力場での変形係数を考慮することによって、この課題を解決できる見通しを得た。

(10) 水浸による間隙空気圧の発生

乾燥に伴い変形が生じる逆の現象として、岩石を水浸させると、間隙空隙圧が発生することを実験的に明らかにした。その発生過程は時間の平方根に比例する傾向にあり、間隙空気圧の発生が濡れによる水分移動を主要なメカニズムとしていることが示唆された。

水浸実験を実施すると、供試体の表面には小さな気泡が観察されるため、この排出された間隙空気量の測定も行った。

(11) キャピラリーライズの検討

堆積岩のキャピラリーライズに関する実験を実施した。ここでは間隙径分布のピーク半径はほぼ一致しているが、間隙率の大きさと間隙径分布パターンの異なる珪藻泥岩と白浜砂岩を用いて比較した。珪藻泥岩では1日で平均13cm程度上昇するが、白浜砂岩は1週間で1cm足らずの上昇速度であった。浸潤前線は肉眼で確認したほか、簡易の含水率測定装置と赤外線サーモグラフィを用いて位置を特定した。

その結果肉眼で確認できる位置よりも数cm上位に常に水分が供給されながらキャピラリーライズが生じていることが明らかとなった。屈曲度を考慮したルーカス・ウォッシュボーン式を適用し、間隙水の自重も考慮した理論式を適用することで、この現象を表現しうることがわかった。

(12) モンテリ地下研究所での原位置蒸発量とひずみ計測結果の再評価

本研究課題の開始前に、スイス・モンテリ地下研究所において、掘削直後のトンネル壁面における蒸発量とひずみ計測を実施していた。機器設置後インバートコンクリートを打設した際に、トンネル内の相対湿度が100%に達した。このとき、壁面のひずみも変化していたが、相対湿度のピークと変形のピークが一致していなかった。

今回この結果を蒸発量計測センサーで取得した温度と相対湿度から壁面近傍の絶対湿度を計算して再評価したところ、絶対湿度のピークと変形のピークがぴったり一致することがわかった。このことは、トンネル内の空気から岩盤への水分移動が比較的容易に生じ、直接的にトンネル壁面近傍の岩盤を変形させたことを明瞭に示した意義は大きいと考えている。

(13) 国内での原位置蒸発量計測

国内のトンネルにおいて原位置における掘削直後の岩盤からの蒸発量計測を実施した。特に、環境条件として強制的な換気が行われている状況と行われていない状況における岩盤からの蒸発量計測に成功した。これにより、換気による岩盤の乾燥が大きく影響を受けていることがわかると同時に、高相対湿度下においても蒸発が生じ、岩盤表面は乾燥しうることを実測として示すことができた。

これら一連の研究に対して、国際岩の力学会(ISRM)からFranklin Lecture賞を頂いた。

引用文献

- ① 渡辺邦夫, 藍沢稔幸, 小野 誠, 柳沢孝一, 佐久間秀樹, 山本肇, 神田信之, 蒸発量計測によるトンネル壁面から湧水量の測定(その1)-測定方法と室内試験-, 応用地質, Vol. 3, No. 4, pp. 189 -

196, 1989.

- ② 渡辺邦夫, 柳沢孝一, PUSCH, R., 佐久間秀樹, 藍沢稔幸, 山本肇, 神田信之, 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定 (その 2) -現場計測-, 応用地質, Vol. 31, No. 1, pp.1-11, 1990.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Illankoon, T., Osada, M., Effect of saturation level on deformation and wave velocity of a transversely isotropic sedimentary rock, Int. Jour. of JSRM, Vol. 12, pp.1-9, 2016. <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijjsrm>
- ② 竹村 貴人, 高橋 学, 長田 昌彦, 北村圭史, 精密石材の岩石学的特徴と湿潤環境下での超微小変形の発生機構に関する考察, 材料, Vol. 63, pp. 227-233, 2014. <http://doi.org/10.2472/jsms.63.227>

[学会発表] (計 20 件)

- ① Amunugama, B. C., Osada, M., Illankoon, T. N., Maekawa, K., Evaluating the deformation behavior of Horonobe mudstone using water retention curves, Proceedings of the 14th Japan Rock Mechanics Symposium, 2017 年 1 月 10-11 日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市) .
- ② Osada, M., Ohtake, S., Drying- and wetting- induced behavior of Shirahama sandstone under the evaporative condition of tunnel surface, EUROCK 2016, pp.1029-1033, 2016 年 8 月 29-31 日, Perissia Hotel & Convention center, カッパドキア (トルコ) .
- ③ Osada, M., Amunugama, B. C., Illankoon, T. N., Maekawa, K., Effect of drying process on water retention curve in mudstone, 2016 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, 2016 年 5 月 19-20 日, KIGAM, 大田 (韓国) .
- ④ 武藤 圭佑, 長田 昌彦, 水浸に伴う砂岩と泥岩の間隙空隙圧変化の比較検討と等価管路モデルを用いた評価, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 273-277, 2016 年 1 月 8-9 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市) .
- ⑤ 長田 昌彦, 中原 壮一郎, 武藤 圭佑, 高橋 学, 竹村 貴人, 水浸に伴う岩石内間隙空気圧の発生とその等価管路モデルを用いた解釈, 日本応用地質学会平成 27 年度研究発表会講演論文集, pp. 11-12, 2015 年 9 月 24-25 日, 京都大学防災研究所黄檗ホール (京都府宇治市) .
- ⑥ 多田 浩幸, 齋藤 亮, 熊坂 博夫, 長田 昌彦, 竹村 貴人, 前川 恵輔, 堆積岩の乾燥に伴う変形挙動に関する検討 (3)

堆積岩の間隙構造と乾燥変形挙動との関係に関する検討, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 2015 年 9 月 9-11 日, 静岡大学静岡キャンパス (静岡県静岡市)

- ⑦ 多田 浩幸, 齋藤 亮, 熊坂 博夫, 長田 昌彦, 竹村 貴人, 前川 恵輔, 堆積岩の乾燥に伴う変形挙動に関する検討 (2) 堆積岩の異方性を考慮した応力-ひずみ関係に関する検討, 日本原子力学会 2015 年春の年会, 2015 年 3 月 20-22 日, 茨城大学日立キャンパス (茨城県日立市) .
- ⑧ 大竹 伸太郎, 長田 昌彦, トンネル壁面を模擬した蒸発環境における白浜砂岩の乾燥変形挙動, 第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.193-198, 2015 年 1 月 8-9 日, 土木学会 (東京都新宿区) .
- ⑨ 長田 昌彦, Illankoon, T. N., 大塚 絢香, 堆積岩の初期乾燥変形挙動と空気侵入値の関係について, 日本応用地質学会平成 26 年度研究発表会講演論文集, pp. 23-24, 2014 年 10 月 29-30 日, 九州大学百年講堂 (福岡県福岡市) .
- ⑩ Illankoon, T. N., Osada, M., Effect of shrinkage level on elastic modulus in drying-induced deformation process of soft sedimentary rocks, Proceedings of 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, P0-22, 2014 年 10 月 14-16 日, 札幌ロイトンホテル (北海道札幌市) .
- ⑪ Osada, M., Drying-induced deformation characteristics of rocks, Proc. of 8th Asian Rock Mechanics Sympo., FL-01 (Franklin Lecture Award 受賞講演), 2014 年 10 月 14-16 日, 札幌ロイトンホテル (北海道札幌市) .
- ⑫ Illankoon, T. N., Otsuka, A., Osada, M., The use of triaxial strain gauge and laser displacement meter for drying shrinkage measurement: a comparative analysis, 土木学会 平成 26 年度全国大会 第 69 回年次学術講演会, 2014 年 9 月 10-12 日, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市) .
- ⑬ 多田 浩幸, 齋藤 亮, 熊坂 博夫, 長田 昌彦, 竹村 貴人, 前川 恵輔, 堆積岩の乾燥に伴う変形挙動に関する検討 (1) 堆積岩の力学的異方性と弾性波速度との関係に関する検討, 日本原子力学会 2014 年春の年会, 2014 年 3 月 26-28 日, 東京都立大学世田谷キャンパス (東京都世田谷区) .
- ⑭ 大竹 伸太郎, 長田 昌彦, 乾燥過程における白浜砂岩の挙動についての数値解析的検討, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 247-251, 2014 年 1 月 9-10 日, 土木学会 (東京都新宿区) .
- ⑮ Illankoon, T. N., Suu Mon, Yee, Osada, M., Maekawa, K., Tada, H., Kumasaka, H., Drying-induced deformation of

Horonobe sedimentary rocks in the Koetoi and Wakkanai formations, 第13回岩の力学国内シンポジウム(併催:日韓ジョイントシンポジウム), pp.899-904, 2013年1月9-10日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市).

- ⑩ 前川 恵輔, 長田 昌彦, 多田 浩幸, 熊坂 博夫, 堆積岩試料における水分量と物性の変化に関する数値解析的検討, 第13回岩の力学国内シンポジウム(併催:日韓ジョイントシンポジウム), pp.179-184, 2013年1月9-10日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市).
- ⑪ Illankoon, T. N., Osada, M., Adikaram, N. M., Effect of desiccation on the strain and elastic wave velocities of Tago Tuff, Proceedings of 7th Asian Rock Mechanics Symposium, pp.192-201, 2012年10月15-19日, COEX, ソウル(韓国).
- ⑫ Illankoon, T. N., Osada, M., Adikaram, N. M., Effect of specimen height on deformation and elastic wave velocity of Tago tuff during drying, 土木学会年次講演会, CS4-048, 2012年9月5-7日, 名古屋大学(愛知県名古屋市).
- ⑬ 多田 浩幸, 熊坂 博夫, 齋藤 亮, 長田 昌彦, 前川 恵輔, 堆積岩の間隙構造の定量化に関する検討, 土木学会年次講演会, III-377, 2012年9月5-7日, 名古屋大学(愛知県名古屋市).
- ⑭ 長田 昌彦, 矢口 亮介, 竹村 貴人, 白浜砂岩の水浸に伴う内部空隙圧の発生と水質の変化, 第47回地盤工学会研究発表会, pp.729-730, 2012年7月15日, 八戸工業大学(青森県八戸市).

[その他]

ホームページ等

<https://www.isrm.net/gca/?id=1044>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長田 昌彦 (OSADA, Masahiko)
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 00214114

(2) 研究分担者

竹村 貴人 (TAKEMURA, Takato)
日本大学・文理学部・准教授
研究者番号: 30359591

橘 伸也 (TACHIBANA, Shinya)
神戸大学・都市安全研究センター・講師
研究者番号: 90432567

(3) 連携研究者

前川 恵輔 (MAEKAWA, Keisuke)
日本原子力研究開発機構・地層処分研究開発部門
研究者番号: 60421640

熊坂 博夫 (KUMASAKA, Hiroo)
清水建設株式会社・技術研究所・社会基盤技術センター
研究者番号: 20393556

多田 浩幸 (TADA, Hiroyuki)
清水建設株式会社・技術研究所・社会基盤技術センター
研究者番号: 30416820