

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04596

研究課題名(和文) 持続可能な鉱物析出による材料強靱化 - 岩盤・構造物長期安全利用 - 環境保全技術の創出

研究課題名(英文) Study of technique for ensuring long-term integrity of rock mass and environmental protection by mineral precipitation

研究代表者

奈良 禎太 (Nara, Yoshitaka)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00466442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：岩盤や構造物を長期間安全に利用するには、引張応力を避けるのが良い。ただし、引張下でもき裂進展を抑制させるとともに、き裂を閉塞させることにより材料の強度が上昇・回復する現象を起こせば、岩盤や構造物の長期安定性確保に大いに役立てられる。そこで、電解質が多く含まれる水中環境を利用して鉱物析出を促進し、材料の力学特性を保持・向上させる技術を創出することを目指すこととした。特に、岩質材料で透水試験を実施し、き裂の修復が生じるのか、透水特性が変化するか否かについて調べた。その結果、岩盤や構造物を構成する岩石やセメント系材料において、き裂の閉塞を生じさせ、材料の遮蔽性能を高められることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

岩石やセメント系材料内部のき裂や空隙が修復されていることから、本研究において示した現象は、材料の強靱化にもつながるものと考えられる。特に、カルシウムイオンや炭酸イオンが豊富に存在する水中環境下でカルシウム化合物が析出しき裂閉塞が起こることを見出しているため、カルシウムイオンが豊富な水中環境は、岩盤や構造物の長期安定性の確保に大きく貢献でき、放射性廃棄物処分のような岩盤工学プロジェクトの安全性確保に好都合であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：To ensure the safety of a rock mass and structures, the tensile stress should be avoided. However, if the crack sealing and healing happen, the long-term integrity of a rock mass and structures can be ensured. In this study, it was planned to create the technique to ensure the mechanical integrity of rock and cementitious material using aqueous environmental condition where the concentration of ions are high. Especially, using rock and cementitious material, measurement of permeability was conducted to investigate the change of the hydraulic conductivity by the crack closure. It was clarified that the crack closure occurred by the mineral precipitation on the cracks and pores, which resulted in the decrease of the permeability.

研究分野：岩盤工学

キーワード：岩石 セメント系材料 き裂 空隙 鉱物析出 透水係数

1. 研究開始当初の背景

岩盤やその内部に建設される構造物は、年月の経過とともに通常は力学的安定性が損なわれる。特に、変形やき裂の発生・進展等の力学的要因や、周辺環境の変化等の化学的要因により、適切に設計し建設した場合でも、予想より大きな劣化が生じ、場合によっては崩壊する。この理由から、時間経過やスケール拡大に伴う周辺環境や外力の条件変化が構造物の力学的安定性に及ぼす影響を理解することは重要である。そこで、き裂進展に及ぼす周辺環境の影響や、それが岩盤や構造物の長期安定性に及ぼす影響について研究が行われてきた (Nara et al., 2013; 2017)。

一方で、岩盤の開発や構造物の設計段階から材料の特性を把握し、損傷を抑制できる条件を見出し、長期の利用に耐えられるようにすることも重要である。岩石やセメント系材料では、圧縮に比べて引張強度ははるかに低い。そのため、岩盤や構造物を長期間安全に利用するには、引張応力を避けるのが良い。ただし、引張下でもき裂進展を抑制させるとともに、き裂を閉塞させて材料強度が上昇・回復する現象を起こせれば、岩盤や構造物の長期安定性確保に大いに役立てられる。特に、水中環境下で報告される鉱物析出によるき裂修復はその一つといえる (Fukuda et al., 2012, 2013, 2014)。この現象を岩石やセメント系材料で利用できれば、き裂修復を促進でき、岩盤や構造物の強靱化を人為的に起こすことができる。つまり、岩盤や構造物を長期間安全に利用するには、鉱物析出によるき裂修復を材料内で持続可能な形で生じさせ、材料を強靱化させる技術を創出することが必要となる。ただし、これはまだ達成されておらず、未解決の課題であった。

2. 研究の目的

上記の課題解決のため、電解質が多く含まれる水中環境を利用して鉱物析出を促進し、材料内のき裂修復を起こし、材料の力学特性を保持・向上させる技術を創出することを目指すこととした。特に、岩質材料における透水試験を実施し、炭酸イオンやカルシウムイオンが多く含まれる環境下でき裂の修復が生じるのか、透水特性が変化するか否かについて調べることにした。

3. 研究の方法

き裂や空隙は岩石やセメント系材料に普遍的に存在しており、それらのネットワークが流路となり、材料の透水特性に大きく影響することが知られている (Nara et al., 2011)。そこで本研究では、岩石とセメント系材料を用いた透水試験を行い、き裂や空隙の閉塞が透水係数にどのように影響するかを調べることにした。

透水係数を求める場合、材料を水で飽和させることが必須である。そこで、全ての材料における透水試験の前に、材料を水で飽和させてから測定を行うことにした。また、透水係数測定には周辺環境の温度変化が大きく影響を与えるという報告がある (加藤ら, 2016)。そこで、全ての測定は、温度変化をなるべく小さくするため、可能な限り周辺環境の温度を制御して行うことにした。なお、測定中の温度は 20°C 程度である。

4. 研究成果

まず、セメント系材料の透水特性に関して述べる。試料として、放射性廃棄物処分において、TRU 廃棄物を閉じ込めるために使用することが考えられている高強度高緻密コンクリート (Nara et al., 2010) を用いることにした。この材料の空隙率を測定したところ、5%と緻密であるため、透水係数が極めて低く、その変化を検出することが困難であることが予想された。そこで、圧裂引張試験の技術によって、試料に巨視き裂を導入して透水試験を行った (Nara et al., 2011; Wang et al., 2016; Perez-Flores et al., 2017)。

初めに、巨視き裂を導入していない試料で透水試験を行った。次に試料に巨視き裂を導入し、蒸留水中で飽和させた。続いて、その試料で透水試験を行い、透水係数を測定した。続いて、様々な電解質を含む人工海水環境下で飽和させた場合の透水係数を求めることを試みた。なお、透水係数の測定には、インタクトな試料ではランジェントパルス法を、巨視き裂を導入した試料では変水位法を用いた。

表 1 に透水試験の結果をまとめる。まず、インタクトな高強度高緻密コンクリートの試料と巨視き裂導入後蒸留水中で飽和させた試料の透水係数を比較すると、巨視き裂を導入することで透水係数が約 7 オーダー上昇していることがわかる。また、巨視き裂導入後蒸留水中で飽和させた試料とき裂導入後人工海水環境下で 15 日間保存した供試体の透水係数を比較すると、透水係

数が約 1 オーダー低下していることがわかる。その後人工海水環境下で保存する日数が増加するにつれて、透水係数も徐々に下がっていくことがわかる。つまり、人工海水環境下で保存した日数が増えるほど、透水係数が低下していくことが示された。

表 1 高強度高緻密コンクリートの透水係数

試料の状態	透水係数 (m/s)
インタクトな試料	2.49×10^{-12}
巨視き裂導入後蒸留水中で飽和させた試料	4.12×10^{-5}
巨視き裂導入後人工海水環境下で 15 日間保存した試料	1.35×10^{-6}
巨視き裂導入後人工海水環境下で 35 日間保存した試料	1.62×10^{-7}
巨視き裂導入後人工海水環境下で 75 日間保存した試料	7.81×10^{-9}
巨視き裂導入後人工海水環境下で 125 日間保存した試料	1.03×10^{-10}

図 1 に X 線 CT で撮影した画像を示す。これらは、試料の表面付近（約 200 μm 内部）と約 850 μm 内部のき裂部分を観察した画像である。試料の表面から約 200 μm までのき裂は明らかにき裂閉塞が確認されたが、200 μm 以降ではき裂の開口幅が広がっていき、表面から約 850 μm ではき裂の閉塞が確認できないといえる結果となった。このことから、き裂の閉塞は材料の表面付近でのみ発生し、内部ではき裂閉塞は起こりにくいということが結論づけられる。

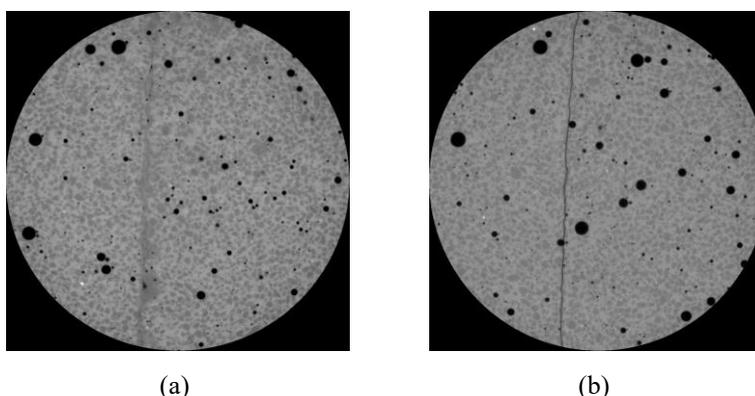


図 1 高強度高緻密コンクリートの X 線 CT 画像（縦 25mm, 横 25mm）
 (a): 表面付近(表面から約 200 μm), (b): 中央付近(表面から約 850 μm)

さらに、き裂閉塞に寄与した物質の同定を行うために、分析型走査電子顕微鏡による分析 (SEM-EDS 分析)、特に元素マッピングを行った。図 2 にその結果を示す。この図より、表面において SEM-EDS 分析を行った結果、主に Si, O, Ca, C, Mg が検出され、特に Ca が顕著であった。き裂部分において Ca, C, O が顕著に出ているため、き裂に見られた白い析出物は主に炭酸カルシウムと考えられる。また、Mg も検出されていることを考慮すると、炭酸カルシウムのほかに炭酸マグネシウムや水酸化マグネシウムも析出していると考えられる。

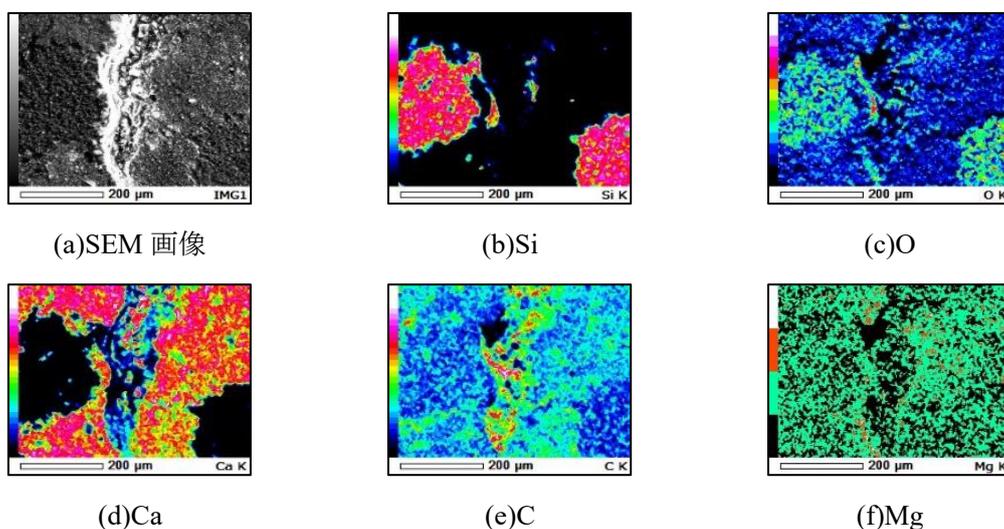


図 2 透水試験終了後（人工海水に計 125 日保存後）の高強度高緻密コンクリートにおける元素マッピングの結果

続いて、岩石の透水特性に関して述べる。試料として、多孔質な岩石を用いることとし、凝灰岩を試料に選定した。特に本研究において、支笏溶結凝灰岩を試料として用いた。この材料の空隙率は36%と非常に高いため、き裂や空隙の閉塞による透水係数の変化を調べやすいと判断し、き裂は導入せずに透水係数測定を行うこととした。

この岩石では、フローポンプ法による透水係数測定を行った。まずインタクトな試料に対して透水係数測定を行い、次に濃度 1.6g/L の水酸化カルシウム水溶液中に試料を 1 週間保存し、透水試験を行った。これを一回の試験として、同様の試験を同一の試料で合計 3 回繰り返した。なお、岩石の試験では、窒素環境下で保存するというような作業はしていないため、水中に二酸化炭素由来の炭酸イオンが存在している条件下となっている。

図 3 に凝灰岩で実施したフローポンプ法による透水係数測定の結果を示す。この図において、縦軸は透水係数、横軸は水溶液中に岩石試料を保存した日数を示す。この図より、保存期間が 1 週間以降では、保存期間が長くなるほど、透水係数が減少することがみられた。このことから、繰り返し水酸化カルシウム水溶液内に供試体を保存したことで、鉱物析出が進み、透水係数が低下したと考えることができる。一方で、インタクトな状態と比較して、保存期間 1 週間の状態の透水係数が高い値をとることについては、現状では明確な原因は判明していない。ただし、水酸化カルシウム水溶液はアルカリ性を示し、本研究で用いたものでは pH は 13 となっていた。ここにインタクトな岩石試料を保存することによって、岩石組織が溶解したことが考えられる。一方、保存期間が 1 週間を経過した後では、岩石表面にカルシウム化合物が析出し、それが岩石組織をカバーして、溶解が妨げられたと思われる。その後は鉱物析出の進行によって、空隙が閉塞し、透水係数の低下がもたらされたと予想される。このことを証明するには、今後透水係数測定をより多く実行し、岩石表面分析を行うなど、より詳細な考察が必要であると考えられる。

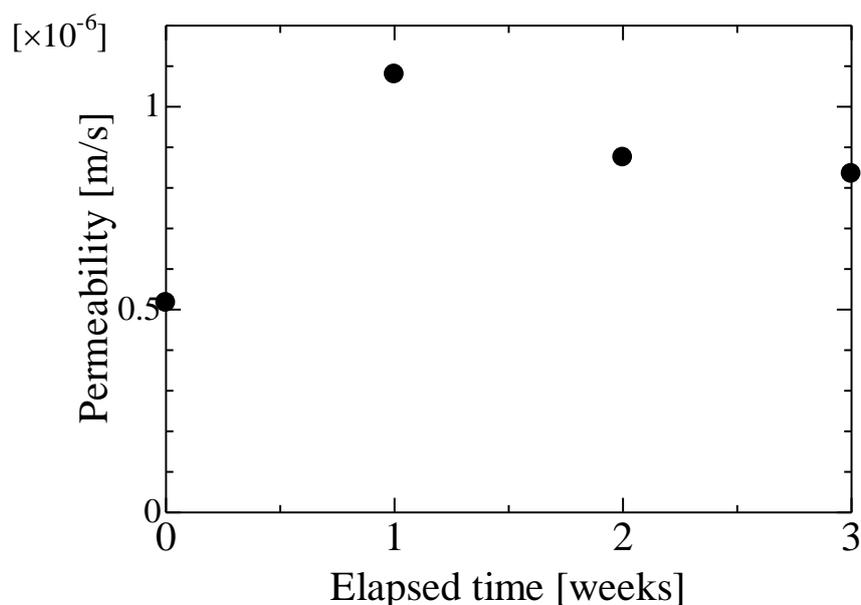


図 3 凝灰岩における透水係数の経時変化

引用文献

- Fukuda, D., Nara, Y., Kobayashi, Y., Maruyama, M., Koketsu, M., Hayashi, D., Ogawa, H. and Kaneko, K., 2012. Investigation of self-sealing in high-strength and ultra-low-permeability concrete in water using micro-focus X-ray CT, *Cement and Concrete Research*, Vol.42, No.11, pp.1494-1500.
- Fukuda, D., Nara, Y., Hayashi, D., Ogawa, H. and Kaneko, K., 2013. Influence of fracture width on sealability in high-strength and ultra-low-permeability concrete in seawater, *Materials*, Vol.6, No.7, pp.2578-2594.
- Fukuda, D., Maruyama, M., Nara, Y., Hayashi, D., Ogawa, H. and Kaneko, K., 2014. Observation of fracture sealing in High-strength and Ultra-low-permeability concrete by micro-focus X-ray CT and SEM/EDX, *International Journal of Fracture*, Vol.188, No.2, pp.159-171.
- 加藤昌治, 奈良禎太, 福田大祐, 河野勝宣, 佐藤稔紀, 佐藤努, 高橋学, 2016. 岩石の透水試験における環境温度の制御の重要性, *材料*, Vol.65, No.7, pp.489-495.

- Nara, Y., Takada, M., Mori, D., Owada, H., Yoneda, T. and Kaneko, K., 2010. Subcritical crack growth and long-term strength in rock and cementitious material, *International Journal of Fracture*, Vol.164, No.1, pp.57-71.
- Nara, Y., Meredith, P.G., Yoneda, T. and Kaneko, K., 2011. Influence of macro-fractures and micro-fractures on permeability and elastic wave velocities in basalt at elevated pressure, *Tectonophysics*, Vol.503, No.1-2, pp.52-59.
- Nara, Y., Yamanaka, H., Oe, Y. and Kaneko, K., 2013. Influence of temperature and water on subcritical crack growth parameters and long-term strength for igneous rocks, *Geophysical Journal International*, Vol.193, pp.47-60
- Nara, Y., Tanaka, M. and Harui, T., 2017. Evaluating long-term strength of rock under changing environments from air to water, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.178, pp.201-211.
- Perez-Flores, P., Wang, G., Mitchell, T.M., Meredith, P.G., Nara, Y., Sarkar, V. and Cembrano, J., 2017. The effect of offset on fracture permeability of rocks from the Andean Southern Volcanic Zone, Chile, *Journal of Structural Geology*, Vol.104, pp.142-158.
- Wang, G., Mitchell, T.M., Meredith, P.G., Nara, Y. and Wu, Z., 2016. Influence of gouge thickness on permeability of macro-fractured basalt, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, Vol.121, No.12, pp.8472-8487.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 D. Fukuda, E. Nihei, S.H. Cho, S. Oh, Y. Nara, J. Kodama and Y. Fujii	4. 巻 61
2. 論文標題 Development of a numerical simulator for 3D analysis of dynamic fracture processes of rocks based on a hybrid FEM-DEM using an extrinsic cohesive zone model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 1767-1774
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.Z-M2020833	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 該当する
1. 著者名 M. Kato, Y. Nara and K. Shibuya	4. 巻 61
2. 論文標題 Precise permeability measurement for high strength and ultra low permeability concrete under controlled temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 2134-2138
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.Z-M2020846	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 T.F. Fu, T. Xu, P.L.P Wasantha, T.H. Yang, Y. Nara and Z. Heng	4. 巻 11
2. 論文標題 Time-dependent deformation and fracture evolution around underground excavations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geomatics, Natural Hazards and Risk	6. 最初と最後の頁 2615-2633
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/19475705.2020.1856202	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 該当する
1. 著者名 M. Kato, Y. Nara, D. Fukuda, M. Kohno, Toshinori Sato, Tsutomu Sato and M. Takahashi	4. 巻 70
2. 論文標題 Importance of temperature control in surrounding environment during permeability test for measuring hydraulic constants of rock	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Zairyo	6. 最初と最後の頁 300-306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.70.300	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 T.F. Fu, T. Xu, M. Heap, P. Meredith, T.H. Yang, T. Mitchell and Y. Nara	4. 巻 285
2. 論文標題 Analysis of capillary water imbibition in sandstone via a combination of nuclear magnetic resonance imaging and numerical DEM modelling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Geology	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) 10.1016/j.enggeo.2021.106070	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 該当する

1. 著者名 T.F. Fu, T. Xu, P.G. Meredith, T.M. Mitchell, M.J. Heap and Y. Nara	4. 巻 145
2. 論文標題 A meso-mechanical approach to time-dependent deformation and fracturing of partially saturated sandstone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	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) 10.1016/j.ijrmmms.2021.104840	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 該当する

1. 著者名 石塚師也, 林為人, 神谷奈々, 奈良禎太	4. 巻 71
2. 論文標題 セグメント処理を行わずに作成したデジタル岩石モデルを用いた空隙径分布の異なる砂岩のP波速度の計算	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 235-242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.235	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 酒本琴音, 加藤昌治, 石井祐輔, 胡桃澤清文, 奈良禎太	4. 巻 71
2. 論文標題 鋼繊維入り高強度高緻密コンクリートの透水性評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 228-234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.228	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 前崎智史, 奈良禎太, 加藤昌治, 渋谷和俊
2. 発表標題 海水環境下における破壊した高強度高緻密コンクリートの透水係数測定
3. 学会等名 日本材料学会第69期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前崎智史, 奈良禎太, 木戸隆之祐, 加藤昌治, 渋谷和俊
2. 発表標題 巨視亀裂を導入した高強度高緻密コンクリートの透水係数の変化
3. 学会等名 資源・素材学会関西支部 第17回「若手研究者・学生のための研究発表会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎌田健人, 奈良禎太, 藤井宏和, 趙越, 松井裕哉, 尾崎裕介
2. 発表標題 幌延地域の泥岩層における原位置透水試験
3. 学会等名 資源・素材学会関西支部 第17回「若手研究者・学生のための研究発表会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前崎智史, 奈良禎太, 加藤昌治, 渋谷和俊
2. 発表標題 海水中に保存した破壊した高強度高緻密コンクリートの透水係数
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鎌田健人, 奈良禎太, 松井裕哉, 尾崎裕介
2. 発表標題 破壊した幌延泥岩の透水係数測定
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野匡希, 河野勝宣, 西村強, 奈良禎太, 加藤昌治
2. 発表標題 各種粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む岩質材料の透水性
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Takeda, Y. Nara
2. 発表標題 Effect of calcium ion concentration on subcritical crack growth in sedimentary rock
3. 学会等名 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nishiguchi, Y. Nara, K. Kashiwaya
2. 発表標題 Influence of pore sealing by calcium compound on permeability in sandstone
3. 学会等名 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM 2019 and REIF 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田健人, 奈良禎太, 松井裕哉, 尾崎裕介, 藤井宏和, 趙越
2. 発表標題 北海道幌延地域の泥岩層における炭酸水注入実験
3. 学会等名 日本材料学会第70期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤昌治, 奈良禎太
2. 発表標題 岩石の透水試験における温度制御の重要性
3. 学会等名 日本材料学会第70期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奈良禎太
2. 発表標題 コロナ禍における国際共同研究ネットワークの推進 - サブクリティカルき裂進展の研究 を通じて -
3. 学会等名 資源・素材2021 (札幌)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑原彰吾, 鎌田健人, 奈良禎太
2. 発表標題 凝灰岩の透水係数測定
3. 学会等名 資源・素材学会関西支部 第18回「若手研究者・学生のための研究発表会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鎌田健人, 奈良禎太, 柏谷公希, 多田洋平, 藤井宏和, 趙越, 松井裕哉, 尾崎裕介
2. 発表標題 北海道幌延地域の原位置岩盤における炭酸水注入実験
3. 学会等名 資源・素材学会関西支部 第18回「若手研究者・学生のための研究発表会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒本琴音, 加藤昌治, 石井祐輔, 胡桃澤清文, 奈良禎太
2. 発表標題 岩石とコンクリートにおける透水係数の有効封圧依存性
3. 学会等名 資源・素材学会令和4年度(2022年)春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奈良禎太
2. 発表標題 岩石のサブクリティカルき裂進展に及ぼす周辺環境の影響
3. 学会等名 資源・素材学会令和4年度(2022年)春季大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T.F. Fu, T. Xu, Y. Nara, Y.C. Xue, Z. Heng and Y. Yuan
2. 発表標題 Time-dependent deformation analysis of the surrounding rock mass around a tunnel
3. 学会等名 China Rock 2020(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 G.J. Min, D. Fukuda, S.W. Oh, Y. Nara, H. Liu and S.H. Cho
2. 発表標題 Numerical analysis of anisotropic influence of of mode-I fracture toughness under dynamic loading for rock using GPGPU-based three-dimensional combined finite-discrete element method (FDEM)
3. 学会等名 ARMS11 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Maezaki, Y. Nara, M. Kato and K. Shibuya
2. 発表標題 Change of permeability in high-strength and ultra-low-permeability concrete in seawater
3. 学会等名 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM 2019 and REIF 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------