

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630216

研究課題名(和文)スメクタイト含有粘土地山の膨潤挙動に対するマルチスケール理論解析モデルの構築

研究課題名(英文)Construct of a theoretical model of multiscale analysis for swelling behavior of earth-ground including smectite

研究代表者

京谷 孝史 (Kyoya, Takashi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：00186347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：スメクタイトを含む地山の膨潤問題に対する合理的かつ効果的な対策法の確立のために、地山の膨潤挙動を予測評価するマルチスケール解析モデルの構築を目指した。

まず、スメクタイト吸水膨潤挙動を定量把握するために、モンモリロナイト試薬を用いた膨潤実験実施して膨潤挙動を記述する数理モデルを作成した。そして、作成した膨潤モデルと岩盤要素の損傷モデルを均質化理論の枠組みの中で組み合わせて、膨潤に伴って軟化する岩盤の力学挙動を、割線係数を用いて追跡するマルチスケール解析モデルを構築した。検証例題として膨潤性岩盤に構築されたトンネルの応力照査解析を通して提案手法の有効性および発展性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to construct a theoretical multiscale analysis model and a new numerical scheme and to become able to perform rigorous and effective predictions for the swelling behavior of ground including smectite. First, in order to recognize swelling behavior of the smectite qualitatively we carried out a series of laboratory swelling tests for montmorillonite powder under various conditions and formulated a phenomenological mathematical model of the swelling behavior. Then by incorporating the swelling model into a damage model of rock mass element we made a theoretical multiscale model and a scheme of multiscale numerical analysis using a series of averaged secant stiffness of rock mass element, which is gradually softened by the swelling. A series of sample analyses on stress distribution around a tunnel constructed in a swelling rock mass showed the validity and effectiveness of the proposed model and analysis method.

研究分野：岩盤力学

キーワード：膨潤性地山 スメクタイト マルチスケール解析

1 研究開始当初の背景

スメクタイトを含む粘土地山では、工事から数年あるいは数十年経ってから地山が膨張してトンネルなど構造物が破壊するといった問題が起きている。その原因はスメクタイトの吸水膨潤反応にあるのだが、そのミクロスケールで生起する鉱物の膨潤反応が、最終的にマクロスケールで起こる地山の膨張挙動に結びつく過程は詳細に解明されていない。そのため地山の膨張量や構造物への影響が定量評価ができず、したがって、構造物の設計や補修における地山の膨張挙動への対処は手探りの状態にある。しかし、インフラの劣化が社会的問題となっている今、地中構造物の設計や維持管理の高度化・合理化のために地山の膨張現象の解明と合理的な予測評価手法の確立は喫緊の課題であり、ミクロスケールでの鉱物の膨潤現象を支配する要因とその影響メカニズムの解明と、それを合理的に記述する理論モデルの構築が問題解決の第一歩である。

2 研究の目的

本研究では、スメクタイトを含む地山の膨張によりトンネルなどの地中構造物が破壊するといった問題が起きている。本研究では、この問題に対する合理的かつ効果的な対策法の確立のために、スメクタイト吸水膨潤反応に伴う粘土の微視構造の変化を定量的に把握し、そのミクロスケールで生起する現象を記述するマルチフィジクス数理モデルを開発し、そのミクロスケール膨潤モデルと、マクロスケールでの地山の膨張挙動を扱うマクロ解析モデルとをマルチスケール解析理論の枠組みにおいて組み合わせ、地山の膨潤挙動を高精度で予測評価するマルチスケール解析モデルを構築することを目的とする。

3 研究の方法

(1) スメクタイトの吸水膨潤挙動の定量的把握と膨潤挙動モデルの定式化

スメクタイト類の代表であるモンモリロナイトの粉末鉱物資料を用いて、拘束応力を変えながら吸水膨潤実験を実施し、膨潤速度・膨潤量を計測して、スメクタイトの膨潤挙動を定量的に把握する。それらの結果をもとにして、スメクタイトの膨潤挙動を表現するミクロスケール膨潤モデルを定式化する。

(2) スメクタイト含有地山の膨潤挙動に対するマルチス

ケール解析手法の構築

マルチスケール解析理論の枠組みにおいて、スメクタイトの膨潤モデルと、地山の膨張挙動を扱うマクロスケール解析モデルを組み合わせて、地山の膨張挙動を伴う膨潤挙動を予測評価するためのマルチスケール解析手法を構築する。

4 研究成果

(1) モンモリロナイトの膨潤実験

① 実験の方法および結果

本研究では、まず、純粋なスメクタイト類の膨潤挙動を把握することを目的に、新たに吸水膨潤実験の装置を考案して実験を行った。作製した膨潤実験装置の概要を図1に示す。

計測部分は、底面に穴の開いたメスシリンダー内にモンモリロナイト粉末試料を入れ、それを水を張ったプラスチック容器内に設置することで、プラスチック容器内の水とメスシリンダー内の水の水頭差から浸透圧が発生し、メスシリンダー内に底面から水が浸透していく仕組みとなっている。

半分のケースについてはモンモリロナイト粉末試料を締め固めている。こうすることで、粉末試料への水の浸透の仕方に違いを持たせ、その影響を比較する。

実験開始直後から膨潤量の増加が見られなくなるまでの約20日間、鉛直方向の膨潤変位を計測した。

上載荷重0から40Nの時、それぞれ約20mm, 8mm, 4mm, 3mm, 2mmと、指数関数的減衰を示していることから、上載荷重40N以上、つまりトンネル直下4m以下の地点においては、スメクタイト類の膨潤量は同程度になると推測できる。

実験から得られた異なる上載荷重におけるモンモリロナイトの膨潤挙動を図2に示す。

② 膨潤ひずみの現象論的数理モデル

膨潤実験から得られた膨潤挙動は、粘弾性理論におけるVoigtモデルから得られるひずみの時刻歴の挙動と良く似ている。したがって、本研究では上記のVoigtモデルを参考にし、モンモリロナイトの膨潤ひずみ ϵ_{sw} を以下のように定式化する。

$$\epsilon_{sw} = \alpha (1 - \exp(-\beta t)) \quad (4.1)$$

ここに、 α は粘土鉱物にかかる荷重や拘束圧に依存する最終膨潤量に関するパラメータ、 β は境界条件である水の浸透速度およびその後の膨潤反応に依存する膨潤速度に関するパラメータ、 t は時間パラメータである。図2の膨

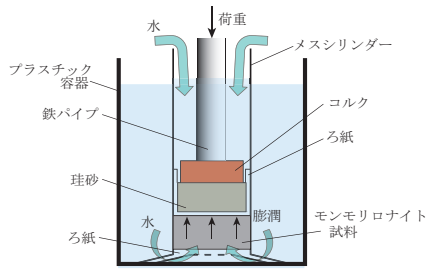


図1: 膨潤実験装置

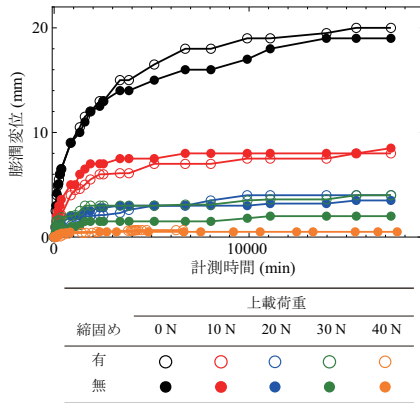


図2: 異なる上載荷重下におけるモンモロロナイトの膨潤挙動

潤挙動に最も近似した時の値をパラメータ α と β として決定した。図4および図5に代表例を示すように、各上載荷重下においてパラメータを決定した際の近似の様子を示す。こうしてスメクタイト類の膨潤挙動を概ね良く表す式が得られた。

(2) 分離型マルチスケール解析法

① ミクロスケール膨潤損傷解析

膨張性粘土鉱物を含んだ部分の膨潤解析を行うにあたり、その挙動の発生源となる膨潤ひずみを ϵ^{swe} と表す。こ

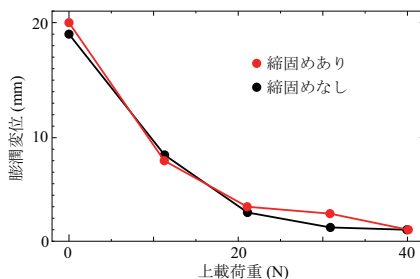


図3: 異なる上載荷重下における膨潤変位の収束値の比較

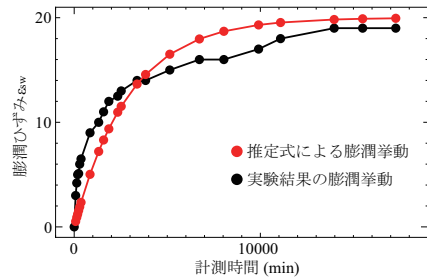


図4: 上載荷重 0 N(締固めなし)の実験結果に対する推定式による膨潤挙動の近似

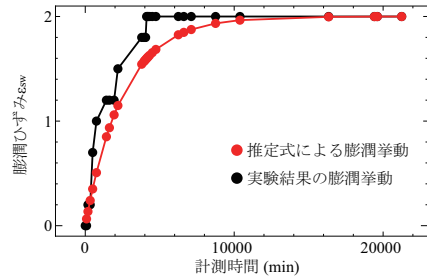


図5: 上載荷重 40 N(締固めあり)の実験結果に対する推定式による膨潤挙動の近似

の膨潤ひずみテンソル ϵ^{swe} は膨張性粘土鉱物が引き起こす分子レベルでの吸水膨潤によってミクロスケール(岩石供試体スケール)で発現するひずみである。岩石の応力ひずみ関係式は次式で与えられる。

$$\sigma = c : (\epsilon - \epsilon^{swe}) \quad (4.2)$$

ここに、 c は弾性係数テンソル、 ϵ は全ひずみテンソルである。本解析ではミクロスケールにおいて膨潤ひずみ以外の力は作用してないため、有限要素法において離散化した解くべき式は次式である。

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (4.3)$$

ここに、 $\{u\}$ は節点変位であり、 $[K]$ 、 $\{F\}$ は以下の通りである。

$$\{F\} = \int_v [B]^T [c] [\epsilon^{swe}] dv \quad (4.4)$$

$$[K] = \int_v [B]^T [c] [B] dv \quad (4.5)$$

② 等方性損傷モデルの適用

ミクロスケールで想定する地山内部における膨張性粘土鉱物の膨潤挙動による微小ひびわれの発生・進展などによる岩石の剛性が減少する様子を等方性損傷モデルの

構成則を適用し表す。次式で与えられる等価ひずみ ε_{eq} を用いる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (4.6)$$

ここに、 ν はポアソン比、 k は引張圧縮強度比である。 I_1 はひずみテンソルの第一不変量、 J_2 は偏差ひずみテンソルの第二不変量である。等方性の損傷モデルは損傷変数 D をスカラー値関数とすることにより、次式で表される。

$$\sigma = (1-D)c : \varepsilon^e \quad (4.7)$$

ここに、 ε^e は弾性ひずみである。変形履歴における等価ひずみの最大値を $\kappa \geq 0$ で表すことにより、損傷変数 $D(\kappa)$ は次式で表される。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0)\right) \quad (4.8)$$

ここで、 E はヤング率、 h_e は要素長さ、 G_f は破壊エネルギーを表す。この等方性損傷構成則を適用しユニットセルの膨張性粘土鉱物を含むとする領域に膨潤ひずみ ε^{swe} を与えることで、ユニットセルは膨張しつつ、それに伴いユニットセル内に損傷が進展する。この解析を膨潤ひずみ ε^{swe} を複数ステップに分けて少しずつ増加させて行い、各ステップでの膨潤ひずみ ε_i^{swe} に応じたマクロ膨潤ひずみ \bar{E}_i

$$\bar{E}_i = \frac{1}{|Y|} \int_Y \varepsilon_i(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \quad (4.9)$$

と損傷進展によって剛性が低下したユニットセルの均質化剛性 C_i^H を求める。ミクロスケール膨潤損傷解析はユニットセルについて周期境界条件で行う。

(3) マクロ構造解析

マクロ構造解析では均質化材料剛性 C_i^H とマクロ膨潤ひずみ \bar{E}_i を用いて次式を解く。

$$[\bar{K}_i] \{\bar{u}\} = \{\bar{F}_i\} \quad (4.10)$$

ここに、

$$\{\bar{F}_i\} = \int_V [\mathbf{B}]^T [C_i^H] [\bar{E}_i] dV \quad (4.11)$$

$$[\mathbf{K}] = \int_V [\mathbf{B}]^T [C_i^H] [\mathbf{B}] dV \quad (4.12)$$

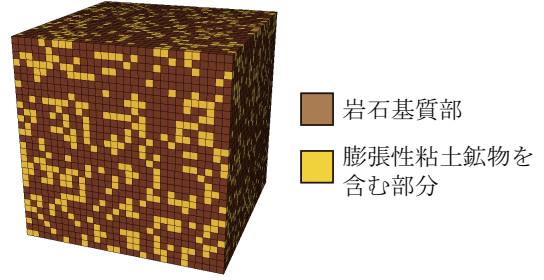


図6: ミクロ構造のユニットセルモデル

表1: 6 ケースの膨潤損傷解析における材料パラメータ

	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破壊エネルギー (GPa)
case1	9	1	0.45
case2	18	1	0.45
case3	90	1	0.45
case4	9	3	4.5
case5	18	3	4.5
case6	90	3	4.5

(4) 検証例題：膨張性岩盤中のトンネルの応力照査

① ミクロスケール膨潤損傷解析 ユニットセルは、図6に示した3次元8節点六面体要素を用いた有限要素モデルとした。ユニットセルは70%を占める岩石基質部と、30%を占める膨張性粘土鉱物を含んだ岩石で構成されているとし、膨張性を考慮する要素をユニットセル内にランダムに配置した。膨潤解析に際しては、膨張性を示す要素に与える膨潤ひずみ ε^{swe} の上限値を

$$\varepsilon^{swe} = 0.3I$$

として、これを $N = 30$ 段階に分割して所与の膨潤ひずみ $\varepsilon_{(i)}^{swe}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) として、30%を占める膨張性粘土鉱物を含んだ岩石の部分に与える。

材料定数については岩石基質部も膨潤性粘土鉱物を含む部分も共通とする。解析ではポアソン比を $\nu = 0.3$ 、引張圧縮強度比を $k = 10$ に固定し、「岩石の硬さ」を示すヤング率と「損傷しやすさ」に関わる引張強度・破壊エネルギーの組み合わせを変化させて表1に示す合計6ケースのミクロスケール膨潤損傷解析を行った。

図7に、30%の膨潤性の部分に段階的に増加する膨潤ひずみ $\varepsilon_{(i)}^{swe}$ を与えたときの、引張強度と破壊エネルギーの値が小さな「損傷しやすい」ケースでのユニットセルにおける損傷進展の様子を示している。

損傷の発生・進展の様子を見てみると、膨潤ひずみ $\varepsilon_{(i)}^{swe}$

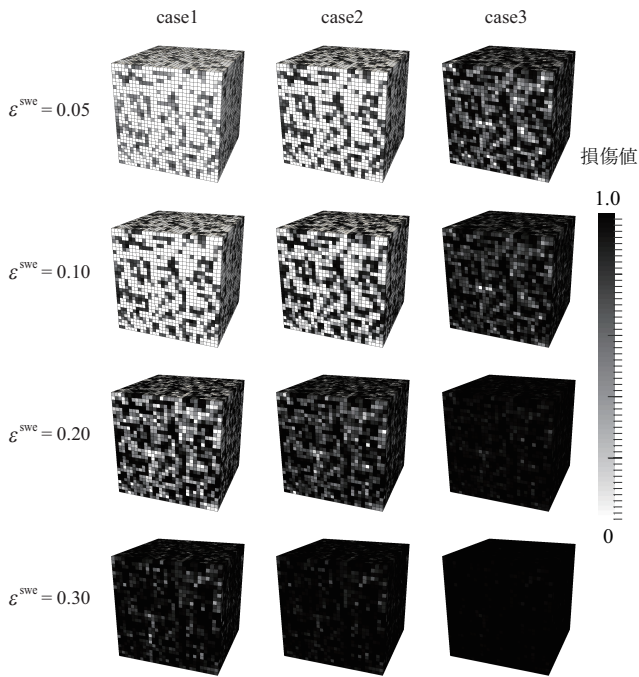


図 7: 損傷進展の推移 (case 1~3 : 損傷しやすいケース)

($i = 1, 2, \dots, N$) を与えている膨張性粘土鉱物を含んだ要素から損傷し、それが徐々に進展していく様子が確認できる。これは、膨潤ひずみ ϵ^{swc} が与えられると周囲の要素との相互作用からその近傍に局所的に大きなひずみが生じるためである。

図 8 に、「損傷しやすい」ケースでの膨潤ひずみ $\epsilon_{(i)}^{swc}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) に呼応した損傷の進展に伴うマクロ均質化剛性の低下の様子を示す。図では垂直剛性のうち C_{YY}^H 成分に注目しているが、 C_{XX}^H , C_{ZZ}^H 成分も同様の傾向を示す。

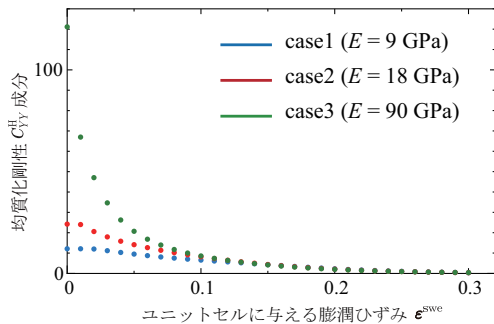


図 8: 均質化剛性 (case 1~3 : 損傷しやすいケース)

② マクロ構造解析

対象とするトンネルを図 9 に、想定する岩盤膨潤領域を図 10 に示す。周囲と比べて明るい色の部分が膨潤領域である。膨潤領域の深さ方向の範囲については、いくつ

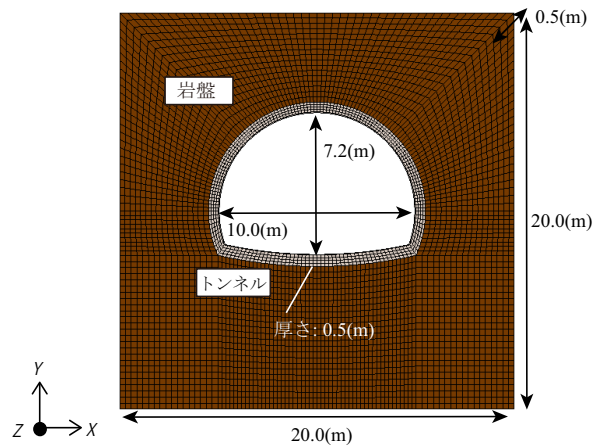


図 9: 対象とするトンネルと解析領域

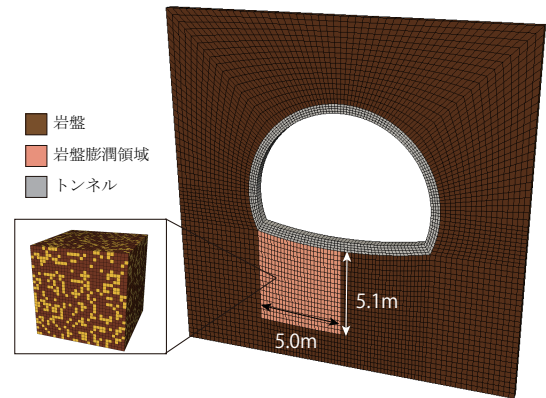


図 10: 膨潤領域の設定

かのトンネル変状の報告事例を元にインバートから下に 5m 程度とした。有限要素モデルは 1 要素の厚みを持った 3 次元モデルである。ここでは、上下の面で y 方向変位を、左右の面で x 方向の変位を拘束している。また、トンネル軸方向の二面において z 軸方向の変位を拘束し、擬平面ひずみ条件を課す。

こうして、膨潤領域に対して 4 のミクロスケール膨潤損傷解析によって得られた「損傷しやすい」case 1~3、および「損傷しにくい」case 4~6 の合計 6 パターンの均質化剛性 $C_{(i)}^H$ を付与し、マクロ体積ひずみ $\bar{E}_{(i)}$ を与える線形解析を $i = 1, 2, \dots, N$, $N = 30$ ステップにわたって行う。

図 11 に最終ステップにおける Mises 応力および最終変

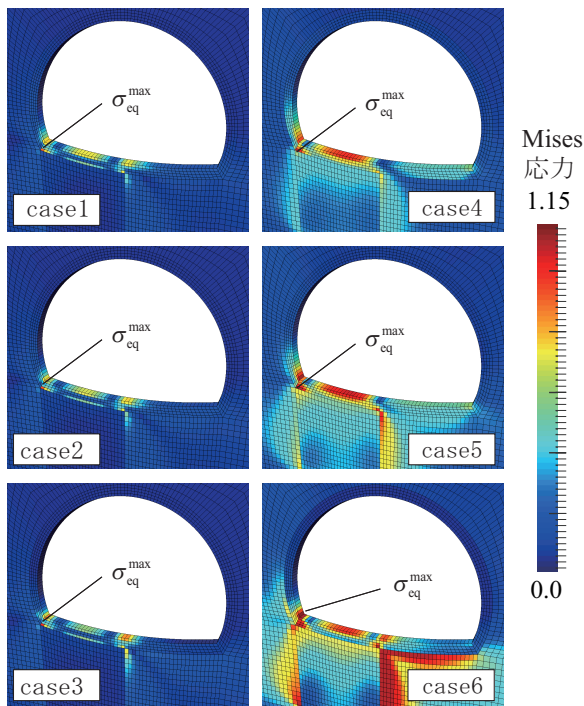


図 11: 最終ステップにおける Mises 応力分布 (GPa)

形図を示す。インバート下部左半分の膨潤領域の押し上げによって、インバート左半分の上面には引張りが生じるとともに、Mises 応力も卓越する。そして、それらはいずれもアーチ部との連結部分に近い応力照査点において最大となっている。

参考文献

- [1] 鈴木 英明, 藤田 朝雄: 緩衝材の膨潤特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-038, pp.1-98, 1999.
- [2] 稲葉 力, 平田 篤夫, 友田 孝: 膨張性泥岩の膨張性および物理・力学特性についての考察, 第 19 回岩盤力学シンポジウム, pp.111-115, 2004.
- [3] 平井 卓, 重野 喜政, 高治 一彦, 飯塚 敦: 膨潤性土質材料の弾塑性構成則に関する研究, 応用力学論文集, Vol.9, pp.471-478, 2006.
- [4] 操上 広志, 千々松 正和, 小峯 秀雄, 小林 晃, 大西 有三: 膨潤評価式を適用した熱-水-応力連成解析, 土木学会論文集, No.771, III-68, pp.21-31, 2004.
- [5] J. Mazars: A description of micro-and macroscale damage of concrete structures, *Engng. Fract. Mech.*, 25, pp.729-737,1986.

[6] J.H.P. de Vree, W.A.M. Brekelmans and M.A.J. van Gils: Comparison of nonlocal approaches in continuum damage mechanics, *Comput.Struct*, Vol.17,pp.441-452,1995.

[7] Terada, K., Kato, J., Hirayama, N., Inugai, T. and Yamamoto, K.: A method of two-scale analysis with micro-macro decoupling scheme: application to hyper-elastic composite materials, *Comput. Mech.*, Vol. 52, pp. 1199-1219, 2013.

5 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Hitoshi Unosawa, Junji Kato, Takashi Kyoya : Two-scale Stability Analysis of a Tunnel Constructed in Swelling Rockmass, *Creative Development of Rock Mechanics and Engineering*, (査読無), pp. 105-110, 2016.

[学会発表] (計 2 件)

1. 加藤準治: 分離型マルチスケール解析による膨潤性岩盤トンネルの安定性評価解析, 岩の力学国際シンポジウム, 2017 年 1 月 10-12 日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)
2. Takashi Kyoya : Two-scale Stability Analysis of a Tunnel Constructed in Swelling Rockmass, Korea-Japan Joint Symposium on Rock Mechanics (国際学会), 2016 年 5 月 19-20 日, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (Daejeon, Korea).

6 研究組織

(1) 研究代表者

京谷 孝史 (KYOYA, TAKASHI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00186347

(2) 研究分担者

加藤 準治 (KATO, JUNJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00594087