

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246114

研究課題名(和文) 岩石の亀裂自己修復機能とその強度・破壊制御への応用

研究課題名(英文) Self-sealability of fractures in rock and its application to fracture and strength control

研究代表者

金子 勝比古(KANEKO, Katsuhiko)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20128268

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,200,000円、(間接経費) 9,360,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、亀裂自己修復現象に関する一連の実験的研究を実施し、その工学的応用を試みた。具体的には、まず、岩石の低速亀裂伸長現象に及ぼす環境条件の影響を実験的に分析し、低速亀裂進展の機構を解明した。次に、亀裂自己修復現象に関して実験的検討を行い、その機構と活性化条件などを明らかにした。また、亀裂伸長プロセスを数値解析的に検討し、亀裂方向制御など高度制御破碎の設計法を提案した。これらの成果に基づいて、岩質材料の長期強度を予測する方法を提案し、環境条件の制御により長期強度を制御できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A series of experimental studies on the sealability of fracture has been performed and its application to geotechnical engineering has been discussed. Firstly, analyzing the influence of environments on the sub-critical crack growth in rock, the mechanism of crack growth has been clarified. Secondly, the self-sealing process of fracture in the rocklike material in water was investigated and the mechanism of self-sealing was clarified. Thirdly, the process of fracture propagation was analyzed numerically and a design method to control fracture propagation, i.e., crack orientation and so on. From these results, a method to estimate the long-term strength of rock has been proposed. Furthermore it is pointed out that the strength of rock can be controlled by controlling the environmental condition.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学 ・ 地球・資源システム工学

キーワード：地殻工学 岩石 自己修復 亀裂 破壊力学 長期強度

1. 研究開始当初の背景

岩石の強度は内部亀裂の存在・分布と密接に関係し、岩石の破壊は先在亀裂の伸長・集積による巨視的破断面の形成プロセスとして説明される。この観点から、岩石・岩盤における亀裂評価と亀裂進展現象に関する研究が実施されてきているが、いずれも天然材料では亀裂の存在は不可避であり、亀裂進展は非可逆的現象であるとの前提のもとで研究が展開されている。しかし、発生・伸長した亀裂を閉塞させることができれば、すなわち破壊を修復させることができれば、これら問題の捉え方は基本から異なることになる。ここで、地質学的時間スケールでは亀裂充填・修復は周知の現象であり、例えば岩盤の鉱物脈は、それ以前に生成・存在していた亀裂が鉱化作用等により充填された結果、言わば、亀裂が自己修復された結果であると解釈できる。したがって、地質学的時間スケールの現象を工学的時間スケールに変換することができれば、亀裂修復の新技术が生まれてくると期待される。

2. 研究の目的

浸水状態の岩石では、造岩鉱物と水質との関係によって、内部亀裂の表面に特定の鉱物が析出して亀裂が充填されていく場合がある。本研究では、この亀裂充填現象の機構と活性化条件を解明し、工学的時間スケールにおいて人為的に制御可能な機能、すなわち、自己修復機能としてその利用と展開を試みる。そして、この機能を利用して岩石・岩盤の強度を改善・向上させる技術、さらに、亀裂進展と修復の両者を制御して破壊時間・形態を制御する技術、すなわち、破壊の制御技術を構築する。

3. 研究の方法

次の4つの課題について研究を実施した。

(1) 低速亀裂伸長に関する実験的検討

サブクリティカル亀裂進展における岩石組成や環境の影響を実験的に検討した。特に、構成鉱物中の粘土鉱物の影響、大気条件における温度・湿度の影響、含水条件下における水温・塩分濃度などの影響を詳細に調べた。また、伸張速度が 10^{-9} m/s 以下の超低速亀裂伸張挙動を計測するために超低速 DT 試験装置を開発し、超低速亀裂伸長挙動について実験的に検討した。

(2) 亀裂自己修復に関する実験的検討

岩質材料における亀裂自己修復現象について複数の視点から実験的検討を行った。

人工亀裂を導入したコンクリート供試体の長期浸漬試験を実施し、水質・水温と析出鉱物・析出速度との関係を定量化した。特に、マイクロフォーカス X 線 CT により経時的に3次元画像を撮影するとともに、その画像解析により析出領域の3次元形状と時間変化を分析した。さらに、試験終了後の供試体か

ら試料を作成し、EPMA/EDX により析出鉱物の微細構造とその元素組成を分析した。

微生物の代謝活動による二酸化炭素あるいは PH 変化を利用して炭酸カルシウムやリン酸カルシウムを析出させる方法について実験的に検討した。特に、高強度化と低コスト化を目標として、各種添加剤の影響について実験的に検討するとともに、有効な微生物の探索を行った。

工学的時間スケールで固結する天然岩石であるビーチロックに注目し、固結のメカニズムと固結促進の環境条件を分析した。特に、天然に存在するビーチロックの組成、微視構造および物理特性を分析するとともに、室内実験によりビーチロック生成に及ぼす環境の影響について検討した。

(3) 岩石の長期強度とその制御法

低速 DT 試験の結果に基づいて亀裂の低速伸長現象を数値モデル化し、岩質材料の長期強度を予測する方法について検討を加えた。特に、温度・湿度や水質など環境条件の影響を定量化し、これら環境条件が長期強度に及ぼす影響を分析するとともに、環境条件の制御により長期強度を制御する方法について検討した。

(4) 岩石の亀裂進展プロセス解析と破壊制御法

岩石中の亀裂進展プロセスを数値解析的に分析し、破壊を制御する方法について検討を加えた。特に、ガイドホールによる亀裂方向制御、準高速載荷条件における破壊制御法について検討を加えた。

4. 研究成果

(1) 低速亀裂伸長に関する実験的検討

サブクリティカル亀裂進展における岩石組成や環境の影響を実験的に検討し、構成鉱物中の粘土鉱物の影響、塩分濃度などの水質の影響を明らかにした。特に、大気条件下では結晶質火成岩、堆積岩ともに温度及び湿度の増大に伴って亀裂伸長速度が増大すること、含水条件でも結晶質火成岩、堆積岩ともに温度上昇に伴って亀裂伸長速度が増大すること、などを確認した。そして、同じ温度条件では含水状態の亀裂伸長速度は大気条件下のものより早くなること、この傾向は堆積岩で顕著であり、堆積岩中の粘土鉱物の含有量に関係していることを明らかにした。さらに、粘土鉱物を有する堆積岩の場合は含水状態では、ある塩濃度以下では塩濃度の上昇に伴って亀裂進展速度が低下するが、それ以上の塩濃度では塩濃度上昇に伴って亀裂進展速度が増大することを明らかにした。これは低塩濃度では濃度上昇に伴って粘度鉱物中の電気二重層が狭まり反発力が低下すること、高塩濃度では粘土鉱物の凝集により粘土と石英・長石の鉱物粒界に微視的欠陥が発生すること、に起因していることを明らかにした。以上の結果は、温度・湿度や水温・塩濃度などの環境条件を制御することにより

岩石中の亀裂伸長速度を制御できることを示している。

(2) 亀裂自己修復に関する実験的検討

人工亀裂を導入したコンクリート供試体の長期浸漬試験結果を分析し、水質・水温と亀裂内の析出鉱物・析出速度との関係を定量化した。特に、マイクロフォーカス X 線 CT の画像から鉱物析出領域を抽出するための 3 次元画像処理法を開発した。そして、鉱物析出領域の 3 次元的形態を明らかにするとともにこれらの時間変化から析出速度を定量的に明らかにした。特に、析出速度は亀裂入口で高いこと、亀裂の入口と奥部では析出鉱物が異なること、海水は地下水に比較して析出速度が速いことなどを明らかにした。また、EPMA 分析により、析出鉱物は亀裂入り口付近では炭酸カルシウム、奥部ではブルーサイト他であることが確認され、前者は後者に比較して析出速度が早いことが明らかとなった。さらに、地下環境を模擬した閉鎖系の条件下では、水温 20~80 の範囲において、水温が低いほど析出速度が早いこと、析出速度は重炭酸イオンの初期濃度により規定されることなどを明らかにした。

リン酸カルシウム化合物を用いた固化法において種結晶としてホタテ貝殻粉末の添加について実験的に検討し、ホタテ貝殻粉末の添加により固化材料のイチジク圧縮強度が増大し、さらに原料コストが大幅に低下することを示した。また、PH 調整に有効なウレア活性を有する微生物が国内の地盤中に生息していることを明らかにするとともに菌種の単離培養に成功した。

沖縄の一地域のビーチロックを対象として原位置物理探査および室内実験を実施し、対象地域のビーチロックは微生物による尿素分解反応や海水蒸発によってマグネシウムに富むカルサイトが砂粒子間に析出することにより形成されたことを明らかにした。また、この生成メカニズムに基づいて室内実験を実施し、一軸圧縮強度約 10MPa を有するビーチロックを人工的に作成することに成功した。

(3) 岩石の長期強度とその制御法

亀裂の低速伸長現象を数値モデル化し、環境条件を考慮して岩質材料の長期強度を予測する方法を提案した。提案した方法はサブクリティカル亀裂進展速度と作用応力および環境条件との関係を数値モデル化したものであり、亀裂の動的伸長に至るプロセスを計算するものである。本手法による計算結果は、岩石の引張り強度は大気環境下では温度・湿度に、含水状態では温度や塩濃度に密接に関係することを示している。これは岩石強度が制御できることを示している。さらに、提案した手法を、廃棄物容器材料の高強度コンクリートに適用し、温度・湿度などの環境条件の制御により長期強度は大幅に改善される可能性があることを明らかにした。

(4) 岩石の亀裂進展プロセス解析と破壊制

御法

岩石内の亀裂進展プロセスを解析し、破断面の生成機構を明らかにするとともに亀裂の長さや伸長方向など破壊を制御する方法を明らかにした。ガイドホールにより亀裂伸長方向を制御する方法については、ガイドホールの動的応力集中効果とプレクラッキング機構を定量的に明らかにし、ガイドホールの径および孔間隔など亀裂方向制御の設計法を提案した。また、爆燃性薬剤などを利用した準高速載荷条件における亀裂進展プロセスを解析し、複数装薬孔の応力干渉効果を定量的に明らかにした。そして、岩盤やコンクリート表面のはつり工を対象として、最適制御のための破碎設計法を提案した。

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 47 件)

- 1) S. H. Cho, M. Yokota, M. Ito, S. Kawasaki, S. B. Jeong, B. K. Kim, K. Kaneko: Electrical disintegration and micro-focus X-ray CT observations of cement paste samples with dispersed mineral particles, *Minerals Engineering*, 57:79-85, 査読有り, 2014.
- 2) M. Kato, M. Takahashi, S. Kawasaki and K. Kaneko: Segmentation of multi-phase X-ray computed tomography images, *Environmental Geotechnics*, 査読有り, 2013 (accepted).
- 3) M. Kato, M. Takahashi, S. Kawasaki, T. Mukunoki and K. Kaneko: Evaluation of porosity and its variation in porous materials using microfocus X-ray computed tomography considering the partial volume effect, *Materials Transactions*, 査読有り, Vol.54, No.9, pp.1678-1685, 2013.
- 4) Kawasaki, S. and Akiyama, M.: Effect of Addition of Phosphate Powder on Unconfined Compressive Strength of Sand Cemented with Calcium Phosphate Compound, *Materials Transactions*, 査読有り, Vol.54, No.11, pp.2079-2084, 2013.
- 5) Kawasaki, S. and Akiyama, M.: Enhancement of unconfined compressive strength of sand test pieces cemented with calcium phosphate compound by addition of various powders, *Soils and Foundations*, 査読有り, Vol. 53, No. 6, pp.966-976, 2013.
- 6) S. Kawasaki and M. Akiyama: Unique grout material composed of calcium phosphate compounds, *International Journal of GEOMATE*, 査読有り, Vol.4, No.1 (Serial No.7), pp.429-435, 2013.
- 7) 加藤昌治, 高橋学, 金子勝比古: 多孔質材料の水理定数評価のための室内透水試験法の理論, *Journal of MMIJ*, 査読有り, Vol.

- 129, No. 7, pp. 409-417, 2013.
- 8) 奈良禎太, 加藤春實, 金子勝比古, 松木浩二, 佐藤隆司, 塚本齊: 花崗岩のP波速度分布とDSCA法から求めたクラックパラメータの関係, Journal of MMIJ, 査読有り, Vol.129, No.7, pp.447-454, 2013.
- 9) 加藤昌治, 高橋学, 金子勝比古: トランジェントパルス法を用いた低透水性岩石の水理定数の高精度評価, Journal of MMIJ, 査読有り, Vol.129, No.7, pp.472-478, 2013.
- 10) 檀上堯, 川崎了: セメント物質に着目したビーチロックの形成メカニズムに関する考察, Journal of MMIJ, 査読有り, Vol.129, No.7, pp.520-528, 2013.
- 11) H.M. Kim, D. Fukuda, J. Ikezawa, K. Moriya, S.H. Cho and K. Kaneko, Dynamic Fracture Process Analysis in Rock-like Materials for Axisymmetric Problem, Science and Technology of Energetic Materials, 査読有り, Vol.74, No.3, pp.73-79, 2013.
- 12) D. Fukuda, K. Moriya, K. Kaneko, K. Sasaki, R. Sakamoto and K. Hidani, Numerical simulation of the fracture process in concrete resulting from deflagration phenomena, International Journal of Fracture, 査読有り, Vol.180, pp.163-175, 2013, DOI: 10.1007/s10704-013-9809-4.
- 13) Y. Nara, H. Yamanaka, Y. Oe and K. Kaneko (2013): Influence of temperature and water on subcritical crack growth parameters and long-term strength for igneous rocks, Geophysical Journal International, 査読有り, Vol.193, pp.47-60, 2013. DOI: 10.1093/gji/ggs116.
- 14) T. Danjo and S. Kawasaki: A study of the formation mechanism of beachrock in Okinawa, Japan: Toward making artificial rock, International Journal of GEOMATE, 査読有り, Vol.5, No.1 (Serial No.9), pp. 633-638, 2013.
- 15) J. Kodama, T. Miyamoto, S. Kawasaki, Y. Fujii, K. Kaneko and P. Hagan: Estimation of regional stress state and Young's modulus by back analysis of mining-induced deformation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 査読有り, Vol.63, pp.1-11, 2013.
- 16) M. Akiyama and S. Kawasaki: Improvement in the unconfined compressive strength of sand test pieces cemented with calcium phosphate compound by addition of calcium carbonate, Ecological Engineering, 査読有り, Vol.47, pp.264-267, 2012.
- 17) Y. Nakamura, S. H. Cho, K. Kaneko, S. Kajiki and Y. Kiritani: Dynamic fracture experiments of mortar using a high-speed loading apparatus driven by explosives, Science and Technology of Energetic Material, 査読有り, 73(5):136-142, 2012.
- 18) D. Fukuda, Y. Nara, Y. Kobayashi, M. Maruyama, M. Koketsu, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko: Investigation of self-sealing in high-strength and ultra-low-permeability concrete in water using micro-focus X-ray CT, Cement and Concrete Research Cement and Concrete Research, 42:1494-1500, 2012.
- 19) M. Akiyama and S. Kawasaki: Microbially mediated sand solidification using calcium phosphate compounds, Engineering Geology, 査読有り, Vol. 137-138, pp. 29-39, 2012.
- 20) 檀上堯・川崎了: 沖縄本島ビーチロックの物理・力学特性, 応用地質, 査読有り, Vol. 53, No. 4, pp. 191-200, 2012.
- 21) 檀上堯・川崎了: 文献調査によるビーチロックの諸特性 - ビーチロックを模擬した人工岩の開発を目指して, 応用地質, 査読有り, Vol. 53, No. 3, pp. 129-141, 2012.
- 22) Y. Nara, K. Morimoto, N. Hiroyoshi, T. Yoneda, K. Kaneko and P. M. Benson: Influence of relative humidity on fracture toughness of rock: implications for subcritical crack growth, International Journal of Solids and Structures, 査読有り, Vol.49, No.18, pp.2471-2481, 2012, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.05.009.
- 23) H. A. Keykha, B. B. K. Huat, A. Asadi and S. Kawasaki: Electro-Biogrouting and Its Challenge, International Journal of Electrochemical Science, 査読有り, Vol.7, Issue 2, pp.1196-1204, 2012.
- 24) 福田大祐, 奈良禎太, 林大介, 大和田仁, 小川秀夫, 金子勝比古: マイクロフォーカスX線CTを用いた水中環境下における高強度高緻密コンクリートのき裂閉塞挙動の評価, Journal of MMIJ, 査読有り, Vol.128, No.7, pp.471-477, 2012.
- 25) 奈良禎太, 広吉直樹, 米田哲朗, 金子勝比古: 電解質濃度の異なる水中における白浜砂岩のサブクリティカルき裂進展, 材料, 査読有り, Vol.61, No.7, pp.662-667, 2012.
- 26) 奈良禎太, 中林亮, 米田哲朗, 金子勝比古・Philip George Meredith: 静水圧下における砂岩の透水性および弾性波速度, 材料, 査読有り, Vol.61, No.3, pp.214-221, 2012.
- 27) M. Akiyama and S. Kawasaki: Novel grout material comprised of calcium phosphate compounds: In vitro evaluation of crystal precipitation and strength reinforcement, Engineering Geology, 査読有り, Vol.125, pp.119-128, 2012.
- 28) 福田大祐, 金子勝比古, 石山宏二, 内藤将史: 大口径ガイドホールを用いたトンネル最外周発破における破断面平滑性に関する数値的検討, 土木学会論文集 C (地圏

工学), 査読有り, Vol. 68, No. 1, pp.213-223 2012 .

29) 畠 俊郎, 佐藤厚子, 川崎了, 阿部廣史: 高有機質土(泥炭)由来の土壤微生物による炭酸カルシウム液出技術に関する実験的研究, 土木学会論文集C(地盤工学), 査読有り, Vol.68, No.1, pp.31~40, 2012 .

30) Y. Nara, K. Morimoto, T. Yoneda, N.Hiroyoshi and K. Kaneko: Effects of humidity and temperature on subcritical crack growth in sandstone, Int. J. Solids Struct., 査読有り, Vol.48, No.7-8, pp.1130-1140, 2011. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.12.019.

31) 秋山 克, 川崎了, 青井標野: リン酸カルシウム化合物を用いた新しい地盤注入材に関する基礎的研究 - アンモニア供給源および土壤微生物の添加が供試体の一軸圧縮強さに及ぼす影響 -, 地盤工学ジャーナル, 査読有り, Vol.6, No.4, pp.513~524, 2011 .

32) 児玉淳一, 中谷匡志, 奈良禎太, 後藤龍彦, 藤井義明, 金子勝比古: 凍結融解作用を受ける岩石の破壊プロセスと耐久性の評価, Journal of MMIJ, 査読有り, Vol.127, No.3, pp.117-126, 2011.

33) 稲垣由紀子, 塚本将康, 森啓年, 中島進, 佐々木哲也, 川崎了: 微生物代謝による液状化対策に関する動的遠心模型実験, 地盤工学ジャーナル, 査読有り, Vol.6, No.2, pp.157~167, 2011 .

34) 山中裕史, 川崎了, 加藤昌治, 椋木俊文, 金子勝比古: マイクロフォーカス X 線 CT を用いた二相構成材料の内部構造の相分離に関する基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, 査読有り, Vol.6, No.2, pp.273~284, 2011 .

35) 秋山克, 川崎了: リン酸カルシウム化合物を用いた新しい地盤注入材に関する基礎的研究 - 結晶析出試験と砂供試体の一軸圧縮試験 -, 地盤工学ジャーナル, 査読有り, Vol.6, No.2, pp.341~350, 2011 .

36) Y. Nara, H. Kato, T. Yoneda and K. Kaneko: Determination of three-dimensional microcrack distribution and principal axes for granite using a polyhedral specimen, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 査読有り, Vol.48, No.2, pp.316-335, 2011, DOI:10.1016/j.ijrmms.2010.08.009.

37) Y. Nara, P. G. Meredith, T. Yoneda and K. Kaneko: Influence of macro-fractures and micro-fractures on permeability and elastic wave velocities in basalt at elevated pressure, Tectonophys., 査読有り, Vol.503, No.1-2, pp.52-59, 2011. DOI:10.1016/j.tecto.2010.09.027.

38) 川崎了: 微生物機能を利用した地盤改良技術, 地盤と建設, 査読有り, Vol.29, No.1, pp.11~18, 2011 .

39) Y. Nara, S. H. Cho, T. Yoshizaki, K. Kaneko, T. Sato, S. Nakama and H. Matsui:

Estimation of three-dimensional stress distribution and elastic moduli in rock mass of the Tono area, International Journal of the JCRM, 査読有り, Vol.7, No.1, pp.1-9, 2011.

40) 椋木俊文, 川崎了, 下屋敷寛弘, 吉永智昭: 微生物代謝を利用したバイオカバースoilの開発に関する基礎的研究, 地盤工学ジャーナル, 査読有り, Vol.5, No.4, pp.545-553, 2010 .

41) 寺島 麗, 島田俊介, 小山忠雄, 川崎了: 地盤注入工法分野での生分解性プラスチックを用いた注入管の適用性検討, 地盤工学ジャーナル, 査読有り, Vol.5, No.3, pp.425-435, 2010 .

42) 奈良禎太, 五十嵐敏文, 広吉直樹, 米田哲朗, 金子勝比古: 岩石のサブクリティカルき裂進展指数と長期強度に及ぼす周辺環境の影響, 材料, 査読有り, Vol.59, No.3, pp.180-185, 2010.

43) 奈良禎太, 森本和也, 米田哲朗, 金子勝比古: 砂岩の破壊靱性に及ぼす湿度の影響, Journal of MMIJ, 査読有り, Vol.126, No.1,2, pp.10-17, 2010.

44) Y. Nara, M. Takada, D. Mori, H. Owada, T. Yoneda and K. Kaneko: Subcritical crack growth and long-term strength in rock and cementitious material, Int. J. Fract., 査読有り, Vol.164, No.1, pp.57-71, 2010. DOI: 10.1007/s10704-010-9455-z.

45) Y. Nara, N. Hiroyoshi, T. Yoneda and K. Kaneko: Effects of relative humidity and temperature on subcritical crack growth in igneous rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 査読有り, Vol.47, No.4, pp.640-646, 2010 DOI:10.1016/j.ijrmms.2010.04.009.

46) 川崎了, 小湊 暁, 広吉直樹, 恒川昌美, 金子勝比古, 寺島 麗: 土壤微生物による炭酸カルシウム析出に及ぼす温度の影響, 応用地質, 査読有り, 第 51 巻, 第 1 号, pp.10-18, 2010 .

47) 椋木俊文, 吉永智昭, 川崎了: 溶媒の pH および有機栄養源がバイオカバースoilの生成と特性に及ぼす影響評価に関する基礎的研究, 地盤工学ジャーナル, 査読有り, Vol.5, No.1, pp.69-80, 2010 .

〔学会発表〕(計 6 件)

1) T. Danjo and S. Kawasaki: A STUDY OF THE FORMATION MECHANISM OF BEACHROCK IN OKINAWA, JAPAN: TOWARD MAKING ARTIFICIAL ROCK, Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Meitetsu New Grand Hotel, Nagoya, Japan, Nov. 13, 2013.

2) D. Fukuda, Y. Nara, M. Maruyama and K. Kaneko: Investigation of sealing behavior of fracture in cementitious material in ground water using micro-focus

X-ray CT and 3D image analysis, 1st International Conference on Tomography of materials and structures, Intercontinental Hotel, Ghent, Belgium, July. 3, 2013

3) T.Danjo, S. Kawasaki and T. Hata: Formation mechanisms of beachrocks in Okinawa and Ishikawa, Japan, 47th U. S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, Holiday Inn, San Francisco, California, USA, June. 24, 2013.

4) K. Moriya, D. Fukuda, K. Kaneko, K. Sasaki and R. Sakamoto: Experimental and numerical investigation of fracturing mechanism in concrete using deflagration agent, 19th European Conference on Fracture, Old Town Hotel, Kazan, Russia, 28 August, 2012

5) Y. Nara, P.G. Meredith, R.Nakabayashi, T. Yoneda and K. Kaneko: Influence of pores, fractures and pressure on permeability and elastic wave velocities in rock, 7th Asian Rock Mechanics Symposium, COEX, Seoul, Korea, Oct. 17, 2012.

6) M. Maruyama, D. Fukuda, R. Nakabayashi, K. Kaneko, Y. Nara and H. Ogawa: Observation of Sealing behavior of fracture in cementitious materials by X-ray CT and SEM-EDX, Mini-Symposium "X-ray CT Application in Geotechnical Engineering" in the 2012 International Conference on Geomechanics & Engineering, COEX, Seoul, Korea, Aug. 26-29, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

金子 勝比古 (KANEKO, Katsuhiko)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：2 0 1 2 8 2 6 8

(2)研究分担者

川崎 了 (KAWASAKI, Satoru)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：0 0 3 0 4 0 2 2

奈良 禎太 (NARA, Yoshitaka)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：0 0 4 6 6 4 4 2

伊藤 真由美 (ITO, Mayumi)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：1 0 3 3 9 6 9 0

椋木 俊文 (MUKUNOKI, Toshifumi)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：3 0 4 2 3 6 5 1

広吉 直樹 (HIROYOSHI, Naoki)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：5 0 2 5 0 4 8 6

坂口 清敏 (SAKAGUCHI, Kiyotoshi)

東北大学・大学院環境科学研究科・講師

研究者番号：5 0 2 6 1 5 9 0

原田 周作 (HARADA, Syusaku)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：8 0 3 1 5 1 6 8

(3)連携研究者

なし