

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206095
 研究課題名（和文） 岩質材料のマイクロ・リストラクチャリングに関する研究
 研究課題名（英文） Study on Micro-Restructuring of Rocklike Materials

研究代表者
 金子 勝比古 (KANEKO KATSUHIKO)
 北海道大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：20128268

研究成果の概要（和文）：マイクロ・リストラクチャリングの要素技術とその工学的応用に関する一連の研究を実施した。特に、微視構造の人為的改変による物性改良法として、環境制御により微視亀裂進展を抑制させて強度を改善する方法、微生物代謝を利用して炭酸カルシウムやシリカを析出させて間隙を充填する方法、還元環境操作により地下水中から炭酸カルシウム等の鉱物を析出させて亀裂を閉塞させる方法など、工学的目的に応じた複数の手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：A series of experimental studies for the micro-restructuring of rocklike materials has been carried out. Various techniques to improve the physical properties of rocklike materials by reconstructing their microstructures have been developed, i.e., a method to change the rock strength by controlling of micro-cracking, a grout technique using microorganisms, a sealing technique using mineral separation from the ground water and so on.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,600,000	3,780,000	16,380,000
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度			
年度			
総計	25,000,000	7,500,000	32,500,000

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

1. 研究開始当初の背景

(1)リーチングにより低品位鉱石から有用金属を回収する場合には浸出を促進させるための粉砕処理が必要となるが、逆に、重金属含有岩盤の掘削では掘削ずりや開削空洞からの重金属溶出を抑制するための固化・被覆

などの安定化処理が必要となる。このように、岩質材料の工学的利用では、その材料固有の性質・挙動を有効に発現もしくは抑制させる技術、言い換えれば、材料性能を改善・向上させる技術が要求されていた。

(2)岩質材料の物理的・物理化学的性質はその内部微視構造と密接に関係していることから、岩質材料の物性評価のためには材料の微視構造を三次元的に把握し、定量評価する方法が必要であった。これはマイクロ・リストラクチャリングの最適化および効果評価のためにも必要である。また、微視亀裂の進展条件と環境依存性などとともに亀裂・間隙の閉塞挙動などマイクロ・リストラクチャリングのための要素現象も十分に解明されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、岩質材料の三次元微視構造を定量評価するとともに、工学的用途に応じて、材料の微視構造を改変させる“マイクロ・リストラクチャリング技術”を創生することである。

岩質材料の物理的・物理化学的性質はその内部構造と密接に関係している。これは材料の微視構造を目的に応じて改造することができれば、材料性能（工学的性質）の改善・向上が可能となることを示している。特に、岩質材料において工学的性質を支配する微視構造は微視亀裂・間隙であることから、改造対象は微視亀裂・間隙である。そこで、微視亀裂の進展条件・定量化法に関する基礎研究とともに、微視亀裂・間隙の充填・導入とそれらの制御技術の創出さらにはそれらの工学的応用を試みた。

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)亀裂進展挙動の環境依存性：種々の岩石試料に対して大気環境下および水中環境下におけるDT試験を実施し、亀裂進展挙動の環境依存性を分析した。

(2)岩石微視構造の評価法：弾性波速度計測・紫外線蛍光法、マイクロフォーカスX線CTなどにより岩石の3次元微視構造を分析するとともに微視亀裂・間隙の定量化法と数値モデル化手法などに関する基礎研究を行った。

(3)亀裂進展制御とその工学的応用：上記基礎研究の成果に基づいて、環境制御により亀裂進展を制御し、強度を改善させる方法、高湿度環境の熱応力により微視亀裂を急速に進展させ岩石を脆弱化させる方法について実験的検討を行った。

(4)亀裂・間隙の閉塞制御とその工学的応用：亀裂や間隙の閉塞・充填法として、微生物代謝を利用して炭酸カルシウムを析出させて間隙を充填する方法、アルカリ化により

炭酸カルシウムを析出させて亀裂を閉塞させる方法などについて一連の実験的検討を行った。また、マイクロフォーカスX線CTにより閉塞・充填プロセスの3次元可視化計測を実施し、充填速度・空隙率変化などを定量化する方法を検討した。

4. 研究成果

(1)岩石のマイクロ・リストラクチャリングのために、岩石内の亀裂の伸長挙動とその環境依存性に関する基礎的知見を蓄積した。具体的には、サブクリティカル亀裂進展ならびに破壊靱性の環境依存性として、花崗岩・安山岩および砂岩のサブクリティカル亀裂進展における湿度の影響、花崗岩および安山岩の水中環境下のサブクリティカル亀裂進展におけるpH・水質の影響などを明らかにした。特に、これらの実験結果に基づいて、亀裂進展速度とpHの関係に関する従来の考え方を否定するとともに、試験後の水分析・鉱物分析の結果から長石を主とする溶解反応に着目した新たな亀裂進展機構を提案した。

(2)マイクロ・リストラクチャリングの最適化と効果評価のために岩石微視構造の定量評価法について検討を行い、弾性波速度測定により微視亀裂の分布を推定する方法を開発した。特に、花崗岩における速度方位分布と微視亀裂方位分布との関係を理論的に明らかにしている。また、微視亀裂制御による物性制御の可能性を検討するために、微視亀裂及び巨視亀裂が岩石の弾性波伝播特性および透水性に及ぼす影響を実験的に明らかにした。さらに、紫外線蛍光法による微視構造観察により、微視亀裂の存在形態が物性に及ぼす影響を明らかにした。

(3)岩石の破壊は微視亀裂の伸長と集積に起因することから破壊制御は微視亀裂の伸長制御である。そこで、マイクロ・リストラクチャリング要素技術として、温度・湿度・水質などの環境制御により亀裂進展を制御して岩石物性を改良する方法を開発した。まず、亀裂進展特性から長期強度を予測する手法を提案するとともに、環境制御により亀裂進展（すなわち破壊の進行）を抑制させ、強度を改善する方法を提案した。また、高湿度環境において熱応力を生じさせると微視亀裂が急速に進展して岩石強度が低下することを明らかにし、この現象に基づく強度脆弱化法を提案した。以上から、微視構造制御により、強度などの力学物性を人為的に制御できることが確認された。

(4)マイクロ・リストラクチャリング要素技術として、岩質材料中の亀裂や間隙を充填し、遮蔽性や透水性などを改良する方法について

て種々の観点から研究を実施した。具体的には、地下水中のカルシウムイオン、炭酸イオンを還元環境を利用して炭酸カルシウムとして析出させ亀裂を閉塞させる方法、バクテリアの代謝活動を利用して炭酸カルシウムやシリカを析出させ間隙を充填する方法などである。また、ベントナイトにおけるアルカリ金属イオンの置換による膨潤性変化と微視構造変化を確認するとともに、この現象を利用すると透水性の制御が可能であることを明らかにした。

これら亀裂や間隙構造の変化をマイクロフォーカスX線CTにより観察するとともに、CT画像の定量評価法も開発した。特に、材料中の亀裂内における鉱物析出とそれによる閉塞現象を観測し、析出速度を評価することに成功している。また、鉱物析出によるわずかな空隙構造変化を高精度に抽出する方法も開発した。これらはマイクロ・リストラクチャリングのモニタリング技術としても有効に活用できる。

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19件)

- ①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(査読有), 材料, 59(3)掲載決定, (2010)
- ②Y. Nara, M. Takada, T. Igarashi, N. Hiroyoshi and K. Kaneko: Sitical crack growth and long-term strength in rock and cementitious material(査読有), *Int. J. of Fractures*, DOI 10.1007/s10704-010-9455-z, (2010)
- ③奈良禎太, 米田哲朗, 金子勝比古: 火成岩のサブクリティカルき裂進展に及ぼす湿度の影響(査読有), *J. of MMIJ*, 124(2):57-61, (2009)
- ④Y. Nara, M. Takada, T. Igarashi, N. Hiroyoshi and K. Kaneko: Subcritical crack growth in rocks in aqueous environment (査読有), *Exploration Geophysics*, 40(1):163-171, (2009)
- ⑤C. Kawaragi, T. Yoneda, T. Sato, K. Kaneko: Microstructure of saturated bentonites characterized by X-ray Ctobservations(査読有), *Engineering Geology*, Vol. 106(1-2): 51-57, (2009)
- ⑥奈良禎太, 森本和也, 米田哲朗, 金子勝比古: 砂岩のサブクリティカルき裂進展に及ぼす湿度の影響(査読有), *J. of MMIJ*, 125(4.5):138-145, (2009)
- ⑦奈良禎太, 金子勝比古: 岩石と高強度高緻

密コンクリートにおけるサブクリティカル亀裂進展と長期強度(査読有), 材料, 58(6):525-532, (2009)

- ⑧小林優矢, 川崎了, 加藤昌治, 椋木俊文, 金子勝比古: バイオグラウト処理された地盤材料を用いた間隙率評価手法に関する研究(査読有), *J. of MMIJ*, 125(10-11):540-546, (2009)
- ⑨寺島麗, 島田俊介, 小山忠雄, 川崎了: 微生物代謝により固化するシリカ系地盤注入材バイオグラウトの基礎研究(査読), 土木学会論文集C, 65(1): 120-130, (2009)
- ⑩J. Kodama, E. Nishiyama and K. Kaneko: Measurement and interpretation of long-term deformation of a rock slope at the Ikura limestone quarry(査読有), *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science*, 46(1), 148-158, (2009)
- ⑪R. D. Alorro, N. Hiroyoshi, M. Ito and M. Tsunekawa: Recovery of Heavy Metals from MSW molten Fly Ash by CIP Method, *Hydrometallurgy*, 92:8-14(2009)
- ⑫K. Hori, M. Tsunekawa, N. Hiroyoshi and M. Ito: Optimum Water Pulsation of Jig Separation for Crushed Plastic Particles, *Int. J. Miner. Process.*, 92: 103-108 (2009)
- ⑬M. Ito, S. Owada, T. Nishimura and T. Ota: Experimental Study of Coal Liberation: Electrical Disintegration Versus Roll-crusher Comminution, *Int. J. Miner. Process.*, 92:7-14(2009)
- ⑭M. Ito, K. Kashiwaya, N. Sumiya, N. Hiroyoshi and M. Tsunekawa: Anode Activating Agent Recovery by Magnetic Separation from the <0.0075 mm Fraction of Crushed Nickel Metal Hydride Batteries from Hybrid Vehicles, *Separation and Purification Technology*, 69:149-152(2009)
- ⑮西山えるむ, 宮本高充, 児玉淳一, 川崎了, 金子勝比古: 採掘変形計測による広域応力と地盤ヤング率の評価(査読有), *J. of MMIJ*, 124(9):570-575, (2008)
- ⑯奈良禎太, 加藤春實, 金子勝比古: 微視き裂分布評価を目的とした多面体試験片を利用した花崗岩の主軸方向決定法(査読有), *J. of MMIJ*, 124(12)725-732, (2008)
- ⑰柏谷公希, 川崎了, 金子勝比古, 米田哲朗: 泥質岩の盤膨れに岩石組織が及ぼす影響-能取泥質岩の例-(査読有), 応用地質, 48(2):97-102, (2007)
- ⑱奈良禎太, 金子勝比古: 温度・湿度変化に伴う花崗岩内のP波速度伝播特性(査読有), 材料, 56(9):803-808, (2007)
- ⑲川崎了, 趙祥鎬, 金子勝比古: エコーチップによる人工風化岩の風化層厚の推定(査読

有), 応用地質, 48(4):162-169, (2007)

[学会発表] (計 42 件)

① D. Fukuda, Y. Nara, D. Mori and K. Kaneko: Sealing behavior of fracture in cementitious material with micro-focus X-ray CT, Proc. GeoX 2010, New Orleans, Louisiana, USA, March 1-3, 2010.

② Y. Kobayashi, W. Kawasaki, M. Kato, T. Mukunoki and K. Kaneko: Evaluation of porosity in geomaterials treated with biogrout considering partial volume effect, Proc. GeoX 2010, New Orleans, Louisiana, USA, March 1-3, 2010.

③ S. Ogata, S. Kawasaki, N. Hiroyoshi, M. Tsunekawa, K. Kaneko and R. Terajima: Temperature dependence of calcium carbonate precipitation for biogrout, Proc. of EUROCK 2009, pp.339-344, Dubrovnik, Croatia, Oct. 29-31, 2009.

④ S. Ogata, S. Kawasaki, N. Hiroyoshi, M. Tsunekawa, K. Kaneko and R. Terajima: Effect of temperature on CaCO₃ precipitation for biogrout, Proc. of 3rd Int. WS and Conf. on Earth Resources Technology, 2009.

⑤ Y. Nara, T. Yoneda and K. Kaneko: Effect of the relative humidity on subcritical crack growth in sandstone, Proc. 71th EAGE Conference (Amsterdam), No.2017, Amsterdam, The Netherlands, June 8-11, 2009.

⑥ Y. Nara, T. Yoneda and K. Kaneko: Effect of humidity on fracture toughness and slow crack growth in sandstone, Proc. ISRM Regional Symposium EUROCK 2009, pp.313-319, Dubrovnik, Croatia, Oct. 29-31, 2009.

⑦ Y. Nara, P. Meredith, T. Yoneda and K. Kaneko: Effect of pressure on permeability and elastic wave velocities in macro-fractured rock, Proc. 8th Euro Conference of Rock Physics & Geomechanics, 10-11, Ascona, Switzerland, Sep. 13-18, 2009.

⑧ Y. Watanabe, Y. Nara, D. Mori, H. Owada, H. Nakanishi and K. Kaneko: Subcritical crack growth and long-term strength of rocklike materials, Proc. Korea-Japan Joint Symp. on Rock Eng., 435-442, Suwon, Korea, Oct. 22-23, 2009.

⑨ D. Fukuda, K. Kaneko, K. Ishiyama M. Naito and S. H. Cho: Numerical Method for Achieving Smoothness of Fracture Plane and Minimizing Overbreak in Tunnel-Blasting, Proc. 2009 Korea-Japan Joint Symp. on Rock Engineering, Suwon, Korea, Oct. 22-23,

2009.

⑩ A. Sainoki, D. Fukuda, K. Kaneko and J. Kodama, Elasto-plastic analysis of rock slope with geological discontinuity, Proc. 2009 Korea-Japan Joint Symp. on Rock Engineering, Suwon, Korea, Oct. 22-23, 2009.

⑪ S. H. Park, H. M. Kim, S. H. Cho, K. Y. Kim, D. K. Kim and K. Kaneko: Effect of the shape of notches on the fracture propagation in rock blasting, Proc. 2009 Korea-Japan Joint Symp. on Rock Engineering, Suwon, Korea, Oct. 22-23, 2009.

⑫ M. H. Jeong, S. H. Cho, S. B. Jeong, Y. H. Kim, D. Fukuda and K. Kaneko: 3D visualization and assessment of ore minerals using Micro-focus X-ray CT scanner and an image processing method, Proc. 2009 Korea-Japan Joint Symp. on Rock Engineering, Suwon, Korea, Oct. 22-23, 2009.

⑬ S. K. Jo, S. K. Kim, S. H. Cho, C. Park, D. Fukuda and K. Kaneko: Three-dimensional visualization and assessment of impact-induced damage of rock-like materials using a suggested X-ray CT image processing method, Proc. 2009 Korea-Japan Joint Symp. on Rock Engineering, Suwon, Korea, Oct. 22-23, 2009.

⑭ Y. Nara, Y. Ichihara, M. Sawada, S. Tomita and K. Kaneko: Effects of the Relative Humidity on the Crack Growth in Rocks, Proc. 70th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPECK 2008 (ROME 2008), Paper No. D032, Rome, Italy, June 9-12, 2008 (in CD-ROM).

⑮ Y. Nara, D. Mori, H. Owada and K. Kaneko: Study of Subcritical Crack Growth and Long-Term Strength for Rock and Cementitious Material for Radioactive Waste Disposal, Proc. 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (SHIRMS2008), Vol. 2, 135-147, Perth, Australia, Sep. 16-19, 2008.

⑯ S. Ogata, S. Kawasaki, N. Hiroyoshi, M. Tsunekawa, K. Kaneko and R. Terajima: Effect of temperature on precipitation of calcium carbonate for biogrout, Proc. of the Korean Rock Mechanics Symp. 2008, pp.271-277, 2008.

⑰ Y. Nara, M. Takada, K. Kaneko, H. Owada and T. Hiraishi: Experimental study of subcritical crack growth in brittle materials, Proc. 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symp., Vancouver, Canada, May 27-31, 599-606, 2007.

⑱ Y. Nara and K. Kaneko: Subcritical crack growth in granite, Proc. ISRM 11th Int. Congress on Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, July 9-13, 101-104, 2007.

⑲ Y. Nara, M. Takada, T. Igarashi, N. Hiroyoshi and K. Kaneko: Subcritical crack growth in rocks under aqueous environment, Proc. 19th Int. Geophysical Conf. and Exhibition, No.40, Perth, Australia, Nov. 18-22, 2007.

[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]

ホームページ等

<http://wwwgeo-er.eng.hokudai.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子勝比古 (KANEKO KATSUHIKO)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20128268

(2) 研究分担者

高橋 弘 (TAKAHASHI HIROSHI)

東北大学・大学院環境科学研究科・教授

研究者番号：90188045

五十嵐敏文 (IGARASHI TOSHIFUMI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90301944

佐藤 努 (SATO TSUTOMU)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10313636

村田 澄彦 (MURATA SUMIHIKO)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30273478

川崎 了 (KAWASAKI SATORU)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00304022

伊藤真由美 (ITO MAYUMI)

北海道大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10339690

(3) 連携研究者

なし