

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870357

研究課題名(和文) 物理化学作用によるフラクチャーコントロールに基づく岩質材料の長期強度・浸透性制御

研究課題名(英文) Control of long-term strength and permeability in rock-like materials based on fracture control by physico-chemical phenomena

研究代表者

奈良 禎太 (NARA, Yoshitaka)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00466442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：岩盤構造物には長期安定性が不可欠であり、その設計にはフラクチャー(き裂、破壊)の進展を基にした長期強度評価が必須である。一方、石油や天然ガスの採掘では、フラクチャーの開口確保が求められる。従って、フラクチャーの閉塞・修復と開口確保の両方を研究することが重要である。そこで本研究では、岩質材料のフラクチャー修復・開口保持の周辺環境依存性を調べた。さらに、材料の長期強度に及ぼす影響因子について調べた。その結果、フラクチャーの進展や長期強度の低下には水が影響を及ぼすこと、フラクチャー修復にはカルシウム化合物の析出を促進させることが重要であり、カルシウムが豊富な環境下で修復が生じやすいことが示された。

研究成果の概要(英文)：Long-term stability is essential for structures in a rock mass. To ensure the long-term stability of structures, it is important to investigate the sealing of fractures in rock-like materials. For the excavation of oil, LPG and LNG, it is important to keep fractures open. Therefore, it is important to investigate both opening and closure of fractures. In this study, the influence of surrounding environmental conditions on fracture sealing in rock-like materials was investigated. In addition, the influence of environmental conditions on the long-term strength was investigated. It was shown that water had a remarkable influence on the reduction of the long-term strength. It was also shown that the acceleration of precipitation of calcium compounds on the surface of materials is important. It is considered that water with abundant calcium is important for the fracture sealing in rock-like materials.

研究分野：岩石力学

キーワード：岩石 セメント系材料 き裂 長期強度 自己修復

1. 研究開始当初の背景

原油地下備蓄空洞や放射性廃棄物処分施設等の地下岩盤構造物は、その目的から長期安定性が不可欠であり、その設計にはフラクチャー（き裂、破壊）の進展現象を基にした長期強度評価が必須である。地下は通常圧縮環境にあり、フラクチャーの力学的閉塞が起こりやすいと考えられるため、それを利用して岩盤構造物の長期安定性の確保に繋げることが極めて重要といえる。一方、石油や天然ガス等の採掘では、生産性確保のため、岩盤中のフラクチャーを閉塞させず、流路を保つ必要があるため、地下からのエネルギー資源採掘では、フラクチャーの開口確保が求められる。従って、フラクチャーの閉塞・修復と開口確保の両方を、実験と理論の両面から研究することが重要である。フラクチャー修復現象は地下環境下では自然に生じることが確認されていることから、この現象の促進と抑制を室内で実現することによって、フラクチャー閉塞・修復による長期強度の制御と開口確保による浸透性の制御技術の構築が実現できる。

2. 研究の目的

本研究では、鉱物の析出が生じる環境下で、フラクチャー修復と開口保持が実現できる条件を室内試験で見出すことにより、岩質材料の長期強度と浸透性の制御技術の構築を目指す。特に、温度・湿度や水質を制御して力学試験（弾性波速度・透気性・き裂進展計測）を行い、フラクチャー修復・開口保持の周辺環境依存性を調べる。さらに、材料組成の調査と、X線CTや顕微鏡での観察より、修復と開口保持に及ぼす組成の影響を調べる。これにより力学・化学的影響因子を明確にする。

3. 研究の方法

周辺環境をコントロールした条件下でフラクチャーを進展させる試験を行うことによって、周辺環境条件が材料中のフラクチャーに与える影響を調べた。さらに、X線CTや顕微鏡観察、破壊力学試験を用いることによって、フラクチャー修復や開口保持に及ぼす影響因子を調べた。このほか、岩質材料の長期強度に関するモデル計算を行い、長期強度に及ぼす影響因子について調べ、フラクチャーの進展や修復が岩質材料の長期的な性質に及ぼす影響を考察した。

4. 研究成果

図1に、周辺環境をコントロールした条件下で得られたフラクチャー進展の測定結果を示す。この図には、破壊力学試験法の1つであるダブルトーション試験法を用いて測定された緩やかなフラクチャー進展測定の結果から得られるサブクリティカルき裂進展指数と温度の関係を示している。試料は熊本県産の熊本安山岩である。サブクリティカ

ルき裂進展指数は $0.01\mu\text{m/s}$ 程度から 0.01m/s の範囲の速度から求められている。この図より、サブクリティカルき裂進展指数は、温度が高い環境下や水中で低くなることが示された。

図2に熊本安山岩での長期強度の計算結果を示す。この図では、周辺環境が大気中から水中に変化する場合の長期強度の計算結果を示している。この図において、長期強度の周辺環境依存性が示され、水中において、岩石の長期強度が低くなることが示された。

また、弾性波速度測定を行うことによって、岩石内部のフラクチャー、特に微視き裂の開口と閉塞を非破壊で調査した。図3に、周辺環境の湿度を変化させた場合の砂岩のP波速度と含水率の経時変化を示す。図3aは多孔質な砂岩であるアメリカ合衆国・オハイオ州産のベレア砂岩（空隙率20%）での結果、図3bは和歌山県産の白浜砂岩（空隙率13%）での結果を示している。この図より、周辺環境条件が変化した場合、多孔質なベレア砂岩ではP波速度や含水率は急速に変化し、間もなく一定値に落ち着くのに対し、空隙率が低い白浜砂岩では、P波速度や含水率の変化はベレア砂岩よりも緩やかで、一定値に落ち着くのにより時間がかかっていることが示された。このベレア砂岩と白浜砂岩におけるP波速度と含水率の変化の程度の違いは、材料の透過性の違いが影響していると考えられる。また、いずれの岩石においても、湿度が上昇した場合に含水率が上昇してP波速度が低下し、逆に湿度が低下した際には含水率が低下してP波速度は上昇する、という結果が得られた。これは、岩石内部の微視き裂の開口・閉塞の状態が変化していることを示している。つまり、開口幅が小さいき裂先端部において、毛管凝縮現象によって水蒸気が液体状態に変わることや、凝縮した水の量が湿度変化に伴い変化することによって、き裂先端部にかかる吸引力が変化するため、き裂の開口状態が変化し、P波速度にも変化が表れたと考えられる。

また、X線CTおよび電子顕微鏡を用いて観察を行うことによって、フラクチャーの修復と開口保持に及ぼす組成の影響を調べた。特にここでは、巨視き裂が導入された高強度高緻密コンクリート（太平洋セメント株式会社製）を人工海水中に保存することによって、フラクチャーの自己修復を生じさせ、それをX線CTと走査型電子顕微鏡（SEM-EDX）を用いて観察した。

図4に、巨視的なフラクチャーを含む高強度高緻密コンクリートを人工海水中に保存し、適宜取り出してX線CTで撮影した時の結果を示す。この図より、開口幅が小さいフラクチャーの方で自己修復が生じやすいことが示された。

図5に、高強度高緻密コンクリート表面の析出物をSEM-EDXで観察した結果を示す。SEM-EDXでの分析の結果、 CaCO_3 が析出する

ことによってフラクチャーの自己修復が生じることが示された。

本研究で得られた成果より、フラクチャーの進展や長期強度の低下には水が大きく影響を及ぼすこと、フラクチャーの修復には鉱物の析出を促進させることが重要であり、特に開口幅が小さい場合や、カルシウムが豊富な環境下でフラクチャー修復が生じやすいことが示された。本研究で選ら得た成果は、岩石内のフラクチャーの性質を実験およびモデル計算の両面から解明したものであり、フラクチャー閉塞・修復による長期強度の制御と、開口確保による浸透性の制御技術の構築の実現に大きく寄与するものと結論づけられる。

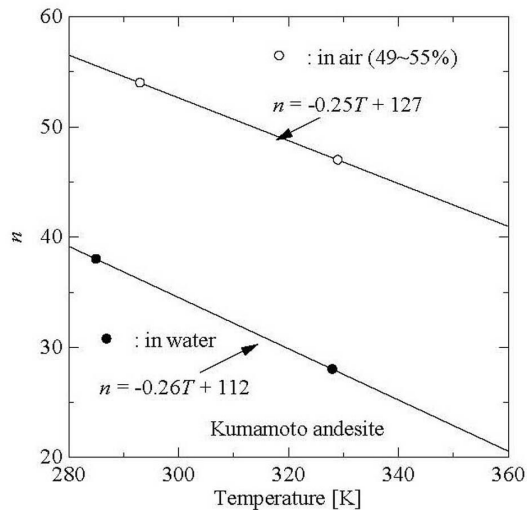


図1 熊本安山岩でのサブクリティカルき裂進展指数と温度の関係。湿度が高い環境下や水中においてサブクリティカルき裂進展指数が低くなることが示された。

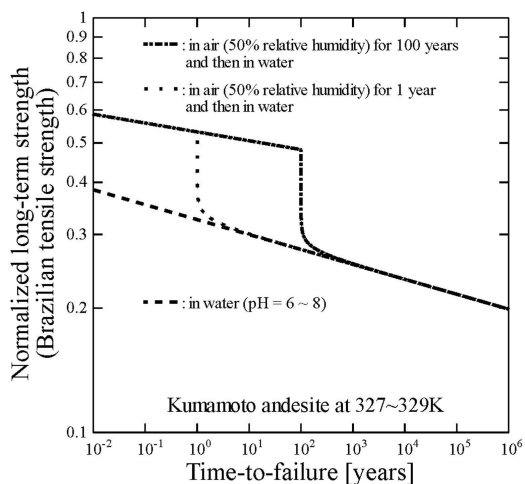


図2 熊本安山岩での長期強度の計算結果。水中において岩石の長期強度が低くなることが示された。

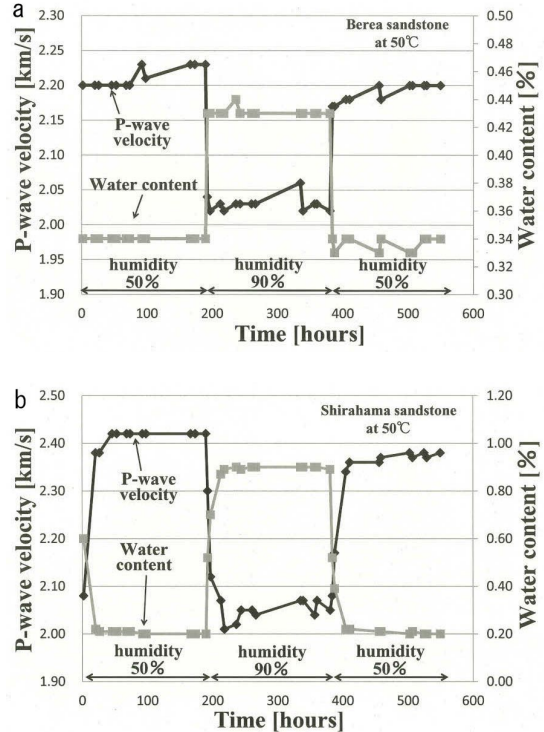


図3 乾燥した砂岩でのP波速度と含水率の経時変化。湿度上昇時にP波速度が低下し、岩石内部の微視き裂が開口することが示された。a: ベレア砂岩, b: 白浜砂岩。

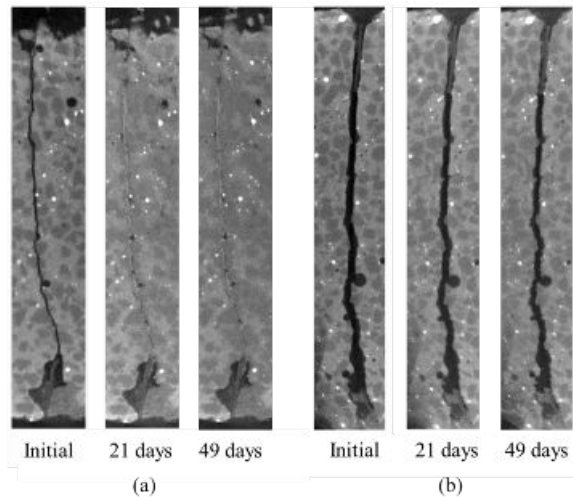
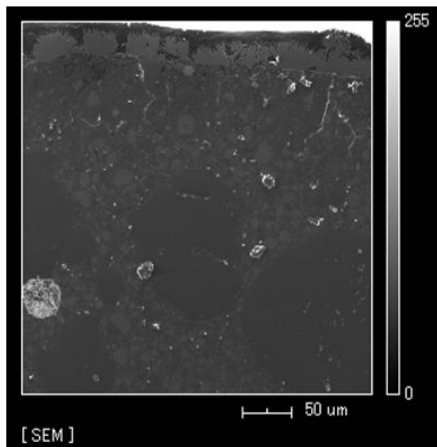
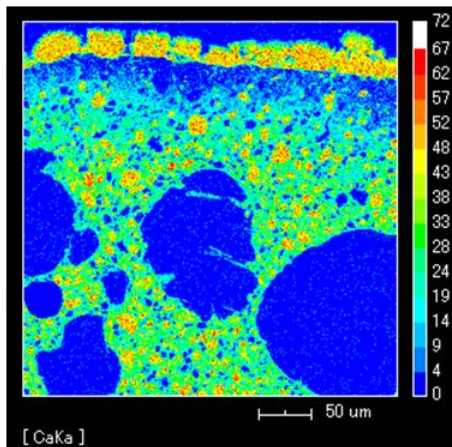


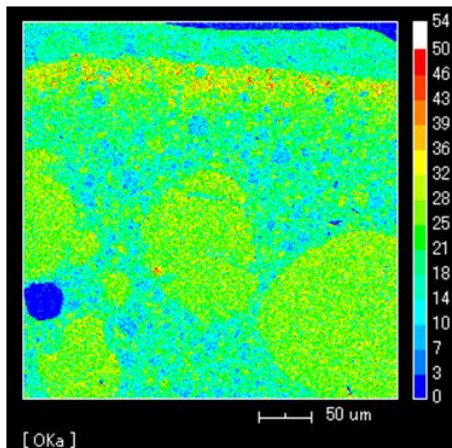
図4 人工海水中に保存した巨視的なフラクチャーを含む高強度高緻密コンクリートのX線CT画像。画像の幅は2mm、高さは14mm。開口幅の小さいフラクチャーほど自己修復が起こりやすいことが示された。a: 開口幅が小さいフラクチャー, b: 開口幅が大きいフラクチャー。



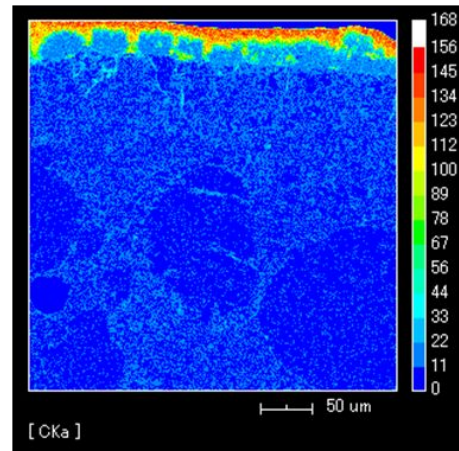
(a)



(b)



(c)



(d)

図5 高強度高緻密コンクリート表面の析出物のSEM-EDXでの分析結果． CaCO_3 が析出することでフラクチャーの自己修復が生じることが示された．a: 二次電子像, b: Caの検出結果, c: Oの検出結果, d: Cの検出結果．

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5件)

1. Y. Nara (2015): Effect of anisotropy on the long-term strength of granite, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.48, pp.959-969.
DOI: 10.1017/s00603-014-0634-5 (査読有)
2. D. Fukuda, M. Maruyama, Y. Nara, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko (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, pp.159-171.
DOI: 10.1017/s10704-014-9952-6 (査読有)
3. Y. Nara, R. Nakabayashi, M. Maruyama, N. Hiroyoshi, T. Yoneda and K. Kaneko (2014): Influence of electrolyte concentration on subcritical crack growth in sandstone in water, *Engineering Geology*, Vol.179, pp.41-49.
DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.06.018 (査読有)
4. 奈良禎太, 大江悠真, 村田澄彦, 石田毅, 金子勝比古 (2014): 周辺環境の変化を考慮した岩石のサブクリティカルき裂進展に基づく長期強度の評価, *材料*, Vol.63, pp.212-218. (査読有)
5. D. Fukuda, Y. Nara, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko (2013): Influence of fracture width on sealability in high-strength and ultra-low-permeability concrete in seawater,

[学会発表](計24件)

1. Y. Nara, Y. Nishida, T. Ishida and K. Kaneko (2015): Influence of water on subcritical crack growth and long-term strength for carbonate rock, 13th International Congress on Rock Mechanics, 2015年5月10~13日, モントリオール国際会議場, Montreal, Canada.
2. D. Fukuda, M. Maruyama, J. Kodama, Y. Fujii, N. Aramaki, K. Kaneko and Y. Nara (2015): Evaluation of 3-D strain distribution in lignite based on image analysis, 13th International Congress on Rock Mechanics, 2015年5月10~13日, モントリオール国際会議場, Montreal, Canada.
3. 奈良禎太, 中尾堯雅 (2015): 温度・湿度を制御した環境下における岩石のP波伝播速度の測定, 資源・素材学会平成27年度春季大会, 2015年3月27~29日, 千葉工業大学, 習志野市.
4. J. Kodama, M. Nakaya, Y. Nara, T. Goto, D. Fukuda, Y. Fujii and K. Kaneko (2014): Observation of fracture process of rocks subjected to freeze-thaw cycles using X-ray CT, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014年10月14~16日, ロイトン札幌, 札幌市.
5. Y. Nishida, Y. Nara, T. Ishida and K. Kaneko (2014): Influence of surrounding environment on subcritical crack growth in marble in air, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014年10月14~16日, ロイトン札幌, 札幌市.
6. A. Nakao, Y. Nara, K. Kashiwaya, T. Ishida and H. Ogawa (2014): Observation of mineral precipitation on rock surface, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014年10月14~16日, ロイトン札幌, 札幌市.
7. Y. Nara, H. Kato, K. Kaneko and K. Matsuki (2014): Evaluation of principal stress directions and ratio in underground from P-wave velocity measurement in granite, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014年10月14~16日, ロイトン札幌, 札幌市.
8. Y. Nara, Y. Oe, S. Murata, T. Ishida and K. Kaneko (2014): Estimation of long-term strength of rock based on subcritical crack growth measurement, 12th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, 2014年9月15~19日, リンゴット会議場, Turin, Italy.
9. 福田大祐, 丸山恵, 奈良禎太, 金子勝比古, 小川秀夫 (2014): 淡水環境下における岩質材料のき裂閉塞挙動, 資源・素材2014(熊本), 2014年9月15~17日, 熊本大学, 熊本市.
10. 田中翔, 福田大祐, 奈良禎太, 金子勝比古, 小川秀夫 (2014): 高強度高緻密コンクリートのき裂閉塞挙動に与える温度の影響, 平成26年度資源・素材学会北海道支部会春季講演会, 2014年6月14日, JAEA 幌延深地層研究センター, 幌延町.
11. 奈良禎太 (2014): 花崗岩の破壊じん性異方性, 日本材料学会第63期学術講演会, 2014年5月16~18日, 福岡大学, 福岡市.
12. 西田雄貴, 奈良禎太, 石田毅 (2014): 大理石のサブクリティカルき裂進展に及ぼす湿度の影響, 日本材料学会第63期学術講演会, 2014年5月16~18日, 福岡大学, 福岡市.
13. 中尾堯雅, 奈良禎太, 石田毅 (2014): 周辺環境制御下で測定した砂岩のP波伝播特性に関する研究, 日本材料学会第63期学術講演会, 2014年5月16~18日, 福岡大学, 福岡市.
14. 福田大祐, 丸山恵, 荒牧憲隆, 奈良禎太, 金子勝比古 (2014): 3次元画像解析を用いた岩石内ひずみ分布の評価法, 日本材料学会第63期学術講演会, 2014年5月16~18日, 福岡大学, 福岡市.
15. 奈良禎太, 石田毅, 金子勝比古 (2014): 周辺環境が変化する条件下での岩石の長期強度, 資源・素材学会平成26年度春季大会, 2014年3月26~28日, 東京大学生産技術研究所, 東京都.
16. 中尾堯雅, 奈良禎太, 柏谷公希, 村田澄彦, 石田毅, 小川秀夫 (2013): 岩石表面における鉱物析出挙動の観察, 資源・素材学会関西支部第10回若手研究者・学生のための研究発表会, 2013年12月6日, 京都大学, 京都市.
17. 丸山恵, 角田祐基, 福田大祐, 奈良禎太, 玉村修司, 金子勝比古 (2013): 3次元画像処理による岩石内ひずみ分布の評価, 資源・素材2013(札幌), 2013年9月3

～5日, 北海道大学, 札幌市.

18. 中尾堯雅, 奈良禎太, 柏谷公希, 村田澄彦, 石田毅, 小川秀夫 (2013): セメント系材料を用いた岩石表面における鉱物析出挙動の観察, 資源・素材 2013 (札幌), 2013年9月3～5日, 北海道大学, 札幌市.
19. 奈良禎太, 村田澄彦, 石田毅, 金子勝比古 (2013): 周辺環境が変化する際の岩石の長期強度, 資源・素材 2013(札幌), 2013年9月3～5日, 北海道大学, 札幌市.
20. A. Nakao, Y. Nara, S. Murata, T. Ishida and K. Kaneko (2013): P-wave velocity in sandstone under controlled temperature and humidity, International Symposium on In-Situ Rock Stress, 2013年8月20～22日, 仙台国際センター, 仙台市.
21. S. Murata, Y. Nara, H. Ito, O. Sano and O. Nishizawa (2013): Multi-channel elastic wave velocity measurement for anisotropic rock specimens under very high confining pressure, International Symposium on In-Situ Rock Stress, 2013年8月20～22日, 仙台国際センター, 仙台市.
22. M. Maruyama, Y. Kakuda, D. Fukuda, Y. Nara and K. Kaneko (2013): Evaluation of strain distribution in rock by 3-D image analysis, International Symposium on In-Situ Rock Stress, 2013年8月20～22日, 仙台国際センター, 仙台市.
23. D. Fukuda, Y. Nara, M. Maruyama and K. Kaneko (2013): 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, 2013年7月1～5日, ゲント大学, Ghent, Belgium.
24. Y. Nara, Y. Oe, S. Murata, T. Ishida, R. Nakabayashi and T. Yoneda (2013): Influence of water on subcritical crack growth in marble, 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013 (London 2013), 2013年6月10～13日, エクセル展覧会センター, London, UK.

〔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
無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奈良 禎太 (NARA YOSHITAKA)
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00466442