

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860027

研究課題名（和文）地下環境を利用した破壊修復による岩質材料の力学特性向上の促進・制御に関する研究

研究課題名（英文）Study of improvement of mechanical property of rock-like material by fracture closure cause by underground environment

研究代表者

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：00466442

研究成果の概要（和文）：岩盤構造物には長期安定性の確保が必要である。特に、放射性廃棄物地下処分施設や原油地下備蓄空洞の場合、岩盤の高い遮蔽性が要求される。本研究では、地下のような、圧力下で化学反応が生じる場合に起こる岩質材料（岩石やセメント系材料）の破壊修復を活用して、力学的性質（強度・遮蔽性）の向上を室内で実現し、構造物の長期安定性の確保に繋がる研究を行った。その結果、破壊修復によって材料の力学的性質が改善されることを示す成果をあげることができた。

研究成果の概要（英文）：Long-term integrity is required for structures in a rock mass. Specifically, low permeability condition of rock is necessary for repositories of radioactive wastes and caverns to store liquefied petroleum gas or natural gas. In this study, I have tried to investigate the improvement of mechanical properties such as strength and permeability for rock-like materials (rock and cementitious material) using fracture closure phenomena occurred in a condition observed in underground environment. Consequently, I could obtain some results of improvement of mechanical properties by fracture closure in rock-like materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

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：岩石、コンクリート、き裂、遮蔽性

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などの、地下岩盤に形成される構造物は、極めて長い期間の安定性が要求される。また最近では、大地震や大津波により、地表での生活や産業などに大きな打撃を与えられたことが問題となっている。このような背景により、より安定した環境が期待できる地下の有効利用が、今後の人類の生活や社会の産業の発展に不可欠であると考えられる。ゆえに、地下環境で得られる現象の調査や、それを利

用して安定した環境の形成につなぐことのできる研究は極めて重要と考えられる。

2. 研究の目的

地下環境に相当する状況下では、化学的作用により破壊が修復することが示された。これまでは力学的性質向上に及ぼす影響因子の特定は実現されていないが、本研究では、室内試験によって破壊の進展や閉塞に伴う力学的性質向上を調べ、構造物の長期安定性に及ぼす影響因子を明確にする。

3. 研究の方法

主として実験的研究を行った。初めに、あらゆる履歴を加える前の材料の弾性波速度測定を行った。続いて、圧力下で周辺環境(温度・湿度・水質)を制御した条件下で試験を行い、破壊やその修復に及ぼす周辺環境の影響を調べた。弾性波速度測定は、材料中のき裂の密度を調べるのに適した測定方法である。さらに、X線CTを用いた内部の非破壊観察や、電子顕微鏡観察によって、破壊の修復を視覚的に調べた。X線CTは材料内部の破壊の修復を非破壊で調べることができるため、本研究で極めて有用である。顕微鏡観察では、ミクロな視点から材料内部を調べることができるため、破壊修復の微視的組織の影響を調べ、影響因子を特定するのに不可欠である。また、理論モデルを用いた評価を行うことによって、岩質材料内の破壊やその修復に及ぼす周辺環境の影響について考察した。

4. 研究成果

まず、あらゆる履歴を加える前の材料を用いて弾性波速度測定および透水試験を行い、続いて、圧力下で試験を行うことによって、破壊の閉塞が及ぼす影響を調べた。試験結果より、破壊が閉塞することにより、弾性波速度が上昇し、また、透水性が低下することが示された。図1に巨視的な破壊を含む場合と含まない場合の玄武岩における透水性と圧力の関係を示す。この図より、いずれの場合も圧力が増大するにつれて、圧力上昇とともに透水性が低下することが示されている。つまり、水みちとなる破壊が閉塞することにより、水の流れが断たれて透水性が低下する、すなわち遮蔽性が向上することが示されている。

破壊の進行に関しても有意義な成果を上げることができた。図2に、粘土鉱物を含む砂岩において、様々な塩分濃度の水中で測定されたき裂進展速度と加えられた荷重レベル(応力拡大係数)の関係を示す。図2aは塩分濃度が1mol/lまでの場合、図2bは塩分濃度が1mol/lから1.6mol/lまでの場合を示した図である。この図より、塩分濃度が1mol/lのときにき裂進展速度が最も低くなり、塩分濃度によって岩石内のき裂の進行速度が変化することが示される。図3に、粘土鉱物を含まない砂岩における結果を示す。この図より、粘土鉱物を含まない場合、塩分濃度はき裂進展速度に影響を及ぼさないことが明らかとなった。このような破壊力学を用いた試験により、破壊修復が岩石の遮蔽性に及ぼす影響や、破壊の進行の周辺環境依存性を明らかにした。

また、X線CTを用いた高強度高緻密コンクリートの破壊修復観察結果を図4に示す。この破壊修復現象は、巨視的な破壊を導入したコンクリートを水中に保存して、固体表面

に鉱物の析出を生じさせることによって得られたものである。特にこの図は、高強度高緻密コンクリートを水中に保存する前、1週間、3週間および7週間保存した後にX線CTで撮影して得られたものである。この図より、水中環境下に置かれた高強度高緻密コンクリートの破壊が修復し、材料の遮蔽性を向上させることができる可能性があることが示された。

これらの結果より、地下環境、すなわち圧力下や水中環境下を再現した室内試験により破壊修復を生じさせ、それが発現する環境を明確にすることにより、力学的性質向上の促進・制御を実現できる条件を明らかにでき、将来的な岩盤構造物の長期安定性の確保につながられる成果を上げられた。最近の大地震・大津波による地表での被害を考えると、より安全な環境の利用が必要である。地下は地震・津波の影響を受け難く、地球で最も安定した環境と言える。安定した地下環境の活用は、放射性廃棄物処分や原油地下備蓄等の工学プロジェクトでは極めて重要である。本研究は地下で生じる回復現象を活用するものであるため、得られた成果は、地下空間のより幅広い有効利用に貢献できる情報を提供していると考えている。このようなことが、本研究の特色・独創性であり、得られた成果である。

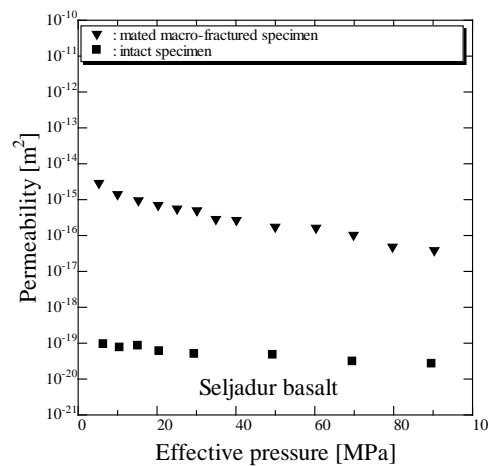


図1. 玄武岩の透水性と圧力の関係。

- ▼ : 巨視破壊を含む場合の透水性。
- : 巨視破壊を含まない場合の透水性。

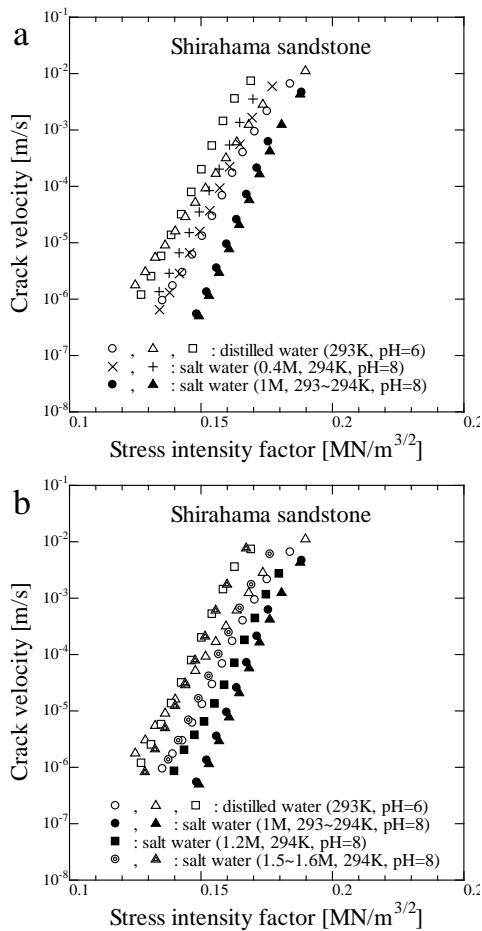


図 2. 白浜砂岩におけるき裂進展速度と加えられる荷重レベルの関係。
●, ▲: 塩分濃度が 1.0mol/l のときのき裂進展速度。この場合にき裂進展が基思抑制される。

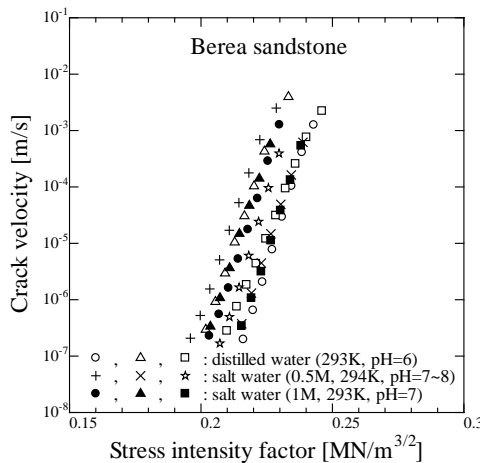


図 3. ベレア砂岩におけるき裂進展速度と加えられる荷重レベルの関係。

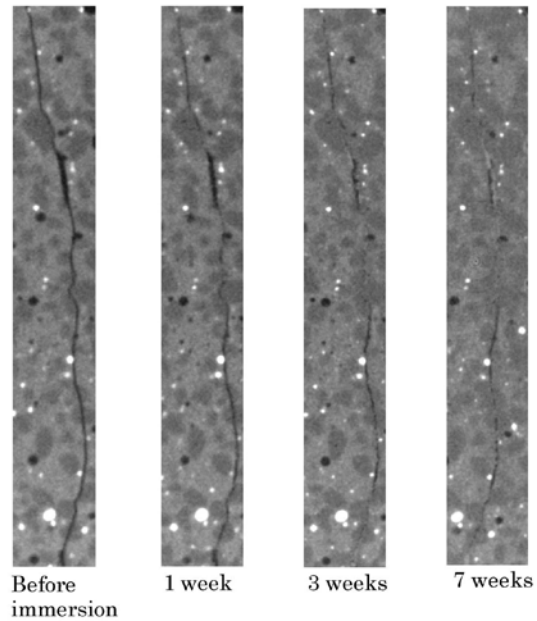


図 3. 水中に保存された高強度高緻密コンクリートにおける巨視破壊の閉塞の様子。

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 奈良禎太, 加藤春實, 金子勝比古, 松木浩二, 佐藤隆司, 塚本斉 (2013): 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*, Vol.129 (掲載決定) (査読有)
- ② 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*, Vol.193, No.1, pp.47-60. DOI: 10.1093/gji/ggs116 (査読有)
- ③ D. Fukuda, Y. Nara, Y. Kobayashi, M. Maruyama, M. Koketsu, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko (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. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.08.014 (査読有)
- ④ Y. Nara, K. Morimoto, N. Hiroyoshi, T. Yoneda, K. Kaneko and P.M. Benson (2012): Influence of relative humidity on fracture toughness of

rock: implications for subcritical crack growth, International Journal of Solids and Structures, Vol.49, No.18, pp.2471-2481. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.05.009 (査読有)

- ⑤ 福田大祐, 奈良禎太, 林大介, 大和田仁, 小川秀夫, 金子勝比古 (2012): 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, Vol.128, No.7, pp.471-477. (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 奈良禎太, 大江悠真, 村田澄彦, 石田毅, 中林亮 (2013): 炭酸塩岩石のサブクリティカルき裂進展計測, 資源・素材学会平成 25 年度(2013 年)春季大会, 2013 年 3 月 28 日, 習志野市.
- ② Y. Nara, P.G. Meredith, R. Nakabayashi, T. Yoneda and K. Kaneko (2012): Influence of pores, fractures and pressure on permeability and elastic wave velocities in rock, 7th Asian Rock Mechanics Symposium, 2012 年 10 月 15 日, Seoul, Korea.
- ③ 奈良禎太, Philip Meredith, Tom Mitchell (2012): 玄武岩の透水性に及ぼす巨視き裂および断層粘土の影響, 資源・素材 2012(秋田), 2012 年 9 月 13 日, 秋田市.
- ④ 大江悠真, 奈良禎太, 石田毅, 村田澄彦, 金子勝比古 (2012): 指数則でのサブクリティカル亀裂進展評価に基づく長期強度の計算, 資源・素材 2012(秋田), 2012 年 9 月 11 日, 秋田市.
- ⑤ Y. Nara, R. Nakabayashi, N. Hiroyoshi, T. Yoneda, K. Kaneko, S. Murata and T. Ishida (2012): Subcritical crack growth in sandstone in water with various electrolyte concentrations, Near Surface Geoscience 2012, 2012 年 9 月 3 日, Paris, France.
- ⑥ M. Maruyama, D. Fukuda, R. Nakabayashi, K. Kaneko, Y. Nara. and H. Ogawa (2012): Observation of Sealing behavior of fracture in cementitious materials by X-ray CT and SEM-EDX, 2012 International Conference on Geomechanics & Engineering, 2012 年 8 月 27 日, Seoul, Korea.
- ⑦ 丸山恵, 福田大祐, 奈良禎太, 金子勝比古, 小川秀夫 (2012): X 線 CT/SEM-EDX によるセメント系材料のき裂閉塞挙動評価, 平成 24 年度資源・素材学会北海道支

部春季講演会, 平成 24 年 6 月 16 日, 釧路市.

- ⑧ 奈良禎太, 大江悠真, 村田澄彦, 石田毅, 金子勝比古 (2012): 火成岩のサブクリティカルき裂進展指数の周辺環境依存性, 日本材料学会第 61 期学術講演会, 2012 年 5 月 26 日, 岡山市.
- ⑨ 大江悠真, 奈良禎太, 村田澄彦, 石田毅, 金子勝比古 (2012): 周辺環境を考慮した火成岩の長期強度評価, 日本材料学会第 61 期学術講演会, 2012 年 5 月 26 日, 岡山市.
- ⑩ 中尾堯雅, 奈良禎太, 村田澄彦, 石田毅, 金子勝比古 (2012): 温度・湿度制御下における砂岩の P 波速度測定, 日本材料学会第 61 期学術講演会, 2012 年 5 月 26 日, 岡山市.
- ⑪ 大江悠真, 奈良禎太, 村田澄彦, 石田毅, 金子勝比古 (2011): 火成岩のサブクリティカル亀裂進展指数と長期強度に及ぼす水の影響, 資源・素材学会関西支部第 8 回若手研究者・学生のための研究発表会, 2011 年 12 月 12 日, 京都市.

[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://geo.kumst.kyoto-u.ac.jp/lab/member/nara.html>

<http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucfbyna/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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: 00466442