

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04603

研究課題名(和文) コア試料の連続スクラッチテストによる断層の再活動と流体移動リスク評価法

研究課題名(英文) Evaluation of risk for fault reactivation and migration by means of sequential scratch test using core specimens

研究代表者

竹村 貴人 (TAKEMURA, Takato)

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：30359591

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)：本研究では岩石のコア試料を用いて、その力学物性の連続的な評価をスクラッチテストを用いて行った。スクラッチテストでは、岩石表面を硬度の高い材料(ダイヤモンド圧子など)を用いて、垂直荷重を負荷させた状態で引っ掻くものである。引っ掻く時の水平方向にかかる荷重と垂直荷重の比が摩擦係数となり、その連続的な変化を得ることができる。岩石コアの脆性的な挙動を示す箇所は差応力が負荷された際には亀裂を生じる破壊が起こるため、将来の流体の移動経路になるものと考えられ、スクラッチテストはその評価を連続的にコア試料で行うことができることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地下空間の利用、廃棄物の地層処分や二酸化炭素地下貯留などにおいて、その流体移動経路となりえる亀裂が新たに形成されるかどうかを評価するための手法の開示を行った。流体移動経路の評価は地域全体で行うことはできず、ボーリングコアなど限られた試料から推定せざるを得ない。そのような中、本研究で開発したスクラッチテストはコア試料を用いて連続的に物性値を得ることを可能としている。また、スクラッチテストでは使用する領域が表面のみであることから、その後のコア試料の観察や室内試験への影響も極めて少ない。そのため、まず初めにコア試料を使って連続的な物性評価をするにはスクラッチテストが最適であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Rock core samples were used to continuously evaluate their mechanical properties using the scratch test. In the scratch test, the rock surface is scratched with a hard material (e.g., diamond indenter) under a vertical load. The ratio of the horizontal to the vertical load is the coefficient of friction, and its continuous variation can be obtained. A rock sample that shows short-period oscillations is a rock sample with ductile behavior, and the rock samples with large amplitude and periodic oscillations are considered to be brittle rocks. We can infer that areas of sedimentary rocks with locally low friction coefficients are surfaces with the potential to become slip surfaces. The horizontal stresses are related to the Young's modulus of the rock, and a comparison with the hardness of the rock shows a positive correlation. The scratch test can evaluate the brittle behavior of rock cores, because fractures that cause cracks occur when differential stress is applied.

研究分野：岩石力学, 岩盤力学, 応用地質

キーワード：スクラッチテスト 岩石の硬度 摩擦係数

1. 研究開始当初の背景

地下空間近傍もしくは地下における応力場の変化を引き起こす要因は、トンネルの掘削に伴う応力の再配置によるものと、二酸化炭素(CO₂)の地下貯留や地熱開発で行われるような高压流体の圧入による有効応力の低下などが挙げられる。このような応力場の変化により引き起こされるリスクの一つとして既存断層の再活動が挙げられる。断層が再活動した際の問題点は、新たな水みちが形成され、大深度に貯留・処分した物質が流体と共に地表付近まで到達する可能性を引き起こすことである。その発生メカニズムは既存断層面にかかる有効せん断応力が増加もしくは有効垂直応力が低下することによるものである。放射性廃棄物の処分場やCO₂地下貯留ではその対象深度は300m以深と大深度であることから、対象となる岩盤の破壊形態も脆性から延性と多様になる。しかしながら、断層の再活動のメカニズムと再活動による透水性の変化についての評価は追いついておらず未解明な点が多く残されている。今後、我が国においても、地下空間を利用する機会が増えるであろうことを考えると、その安全性を社会に対し説明する上でも断層再活動の可能性と再活動による地表面への影響を適切に評価し科学的な説明をできるようにしておく必要がある。

2. 研究の目的

断層の再活動は間隙水圧の上昇もしくは、 σ_1 の増加、 σ_3 の低下により引き起こされる。ここで、断層面の持つ抵抗力は上式右辺のように岩石の摩擦係数により決まり、現状では、三軸試験の結果(最大応力、もしくは残留応力)を用いたモールクーロンの式から得られる内部摩擦係数を使っている。ここで、処分場やCO₂地下貯留などでの実用を考えた場合、コア試料からこの摩擦係数を決める必要があり、供試体の数に限りがあることが問題となる。多くの堆積岩で見られるように砂岩泥岩が互層になっていることを考えると、コア試料から連続的な摩擦係数等を測定し、再活動評価に利用することが望ましいと考える。また、再活動時の透水性の変化は、断層面と平行な方向の特に鉛直方向が物質を移動させる経路となるため、地表面への漏洩リスク評価のための最も重要な物性値となる。したがって、破壊形態の違いが与える透水係数への影響を明らかにする必要がある。

3. 研究の方法

本研究では、断層の再活動メカニズムの解明とパラメータ取得方法の開発としてスクラッチテストを実施し摩擦係数の連続的な値の取得を目指す。再活動時の透水性の変化メカニズムの解明のため、破壊形態(脆性から延性)の違いで断層面に平行な方向の透水係数の変化の測定を行う。断層の再活動と再活動時の流体移動のリスク評価法の提案を行う。

4. 研究成果

スクラッチテストは、一定変位、もしくは一定荷重の元で、圧子(もしくは爪)をボーリングコアに対して垂直方向に押し込み、横方向にボーリングコアに水平荷重をかけて移動させ引っ掻きもしくは溝を掘ることで、圧子(もしくは爪)にかかる抵抗として水平垂直荷重を測定するものである。測定された水平荷重は、圧子(もしくは爪)の形状を考慮した指数とすることで一軸圧縮強度との強い相関があることが報告されている。本研究では、金属製の爪でなく圧子により垂直荷重と水平荷重を測定する装置(株式会社レスカ)によるスクラッチテストを行った。測定

は、平面を出した稲田花崗岩、凝灰質砂岩(三浦層群初声層、来待砂岩)、幌延泥岩、白浜砂岩の5種類で行った。試験は垂直方向に196Nの一定荷重で圧子を押し込み、水平方向に移動させることで水平荷重を測定した。水平方向への移動距離は10mmから20mmとした。

測定の結果を図1にまとめて示す。幌延泥岩に関しては、破壊強度が低いということから垂直荷重を50Nとして測定した。水平荷重の変化は5種類の岩石のうち稲田花崗岩の変化が他の堆積岩類と異なり、長い周期と短い周期が混在していることがわかる。堆積岩類での水平荷重は中程度の周期の変化を繰り返していることがわかるが稲田花崗岩ほどの鋭いピークは見られない。Richardほか(1998)によると、振幅の小さな周期の短い振動が見られる岩石は延性的(Ductile)な挙動を示す岩石であり、振幅の大きな変化を周期的に繰り返す振動が見られる岩石は脆性(Brittle)な挙動を示す岩石であるとしている。本研究の結果からみると稲田花崗岩では脆性的な特徴を示す振動が確認され、凝灰質砂岩(三浦)と来待砂岩でも一部、脆性的な挙動が確認された。脆性的な挙動で特徴である鋭いピークは、岩石を構成する鉱物粒子を掘り込む際に鉱物粒子の結合度が高い場合、圧子(もしくは爪)の抵抗に大きな水平荷重を必要とするため限界値まで値が大きくなるが、掘り込まれた直後に急激に水平荷重を低下させるために生じる。堆積岩類の一部で見られた脆性的な挙動は、大きな粒子に当たったためであると考えられる。今後、より長いレンジでスクラッチテストを行うため、垂直方向の荷重制御をどうするかという技術的課題が見つかった。

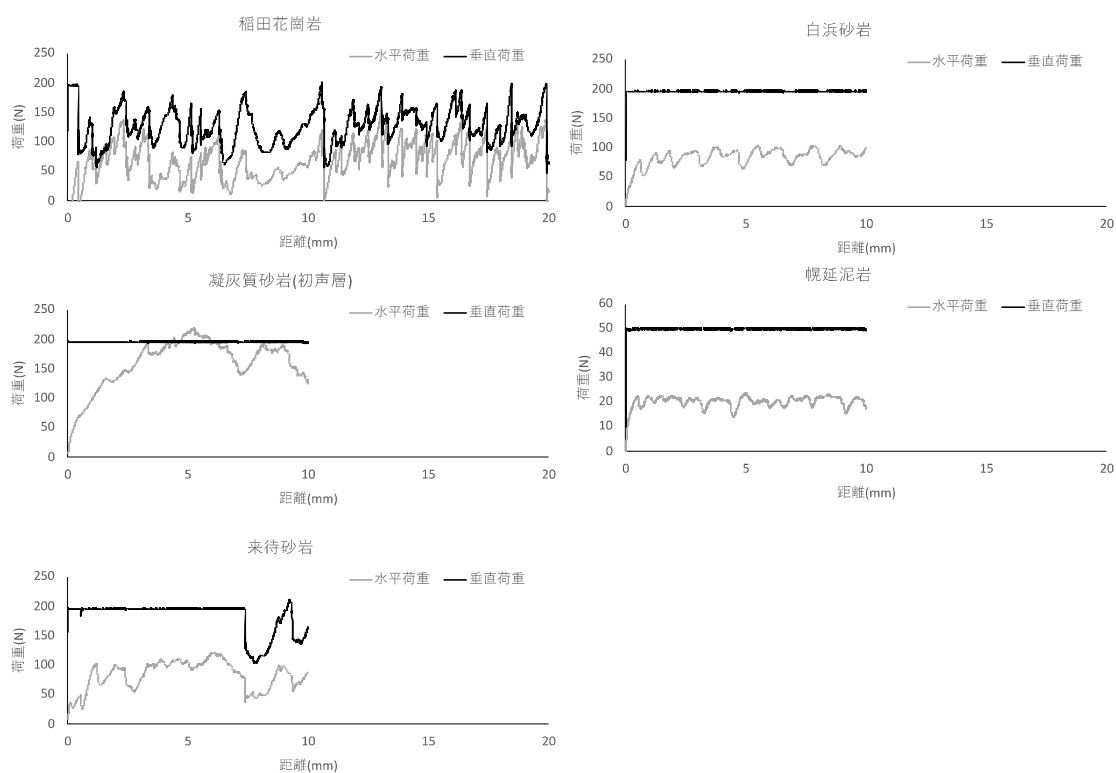


図1 スクラッチテストの結果

破壊形態の違いによる透水性の変化を明らかにするため、堆積岩試料を用いた断層面の透水係数の測定を行った。実験用試料はオーストラリア Otway 堆積盆において掘削・回収されたコアを用いた。本研究では砂泥互層からなる地層から砂岩、シルト岩、泥岩を採取し実験用試料とした。実験三軸圧縮主応力下で行い、形成される断層に平行な方向である σ_2 軸の方向の透水係数の測定を行った。また、同じステップにおいて弾性波速度を σ_2 軸の方向、すな

わち形成される断層面を跨ぐ方向を測定した。実験での応力条件として、初期状態の σ_1 , σ_2 , σ_3 を試料採取深度で測定された初期地圧力と同じ 11, 13.5, 16 MPa とした。この応力条件で保持したのち σ_1 を破壊まで増加し軸歪み 3% を目安として残留状態まで実験を行った。実験の結果、岩種ごとで断層の形成に伴う透水係数の変化が異なっていることが確認された。砂岩では母岩部の透水係数(初期の応力状態で $1.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)が高いことから断層が形成されても透水係数の変化は小さかった。すなわち砂岩では断層が形成されても断層の水みちとして寄与は小さいものと考えられる。シルト岩の場合、差応力の増加に伴う透水係数の増加率はわずかであった。また、P 波速度は破壊の進行に伴い低下をしており、開口した亀裂が形成されていることが確認できた。しかしながら、透水係数の増加率は小さいことから、シルト岩の本試料では、形成された亀裂の連結性が悪かったものと考えられる。泥岩ではガウジを伴う断層の形成が実験後試料の観察で確認できた。また、泥岩試料では、透水係数は初期状態で不透水であり、破壊近辺でも測定不能の不透水であったが、破壊後の残留状態では透水係数の測定が可能となった。破壊後では、高い透水係数となる断層を伴うため、断層が形成された後の透水係数は初期状態と比べ大きくなっている。また、亀裂の状態はガウジを伴わないものも見られることから、本研究で用いた泥岩では、断層の形成に伴いガウジが発達したとしても、流体移動はガウジを伴わない亀裂を通じて断層面に平行な方向に起こりやすくなると考えられる。また、シルト岩試料においては実験終了後の供試体観察からカーボネイト層での滑りが確認された。このことは、カーボネイト層の摩擦係数が極端に低いことから、せん断破壊をする前に層内もしくは層境界で滑りを引き起こしている可能性を示唆している。

断層の再活動を考える際にボーリングコアからそのリスク評価を行おうとすると、得られる情報は限られてくる。そのため、スクラッチテストを導入することで、岩石の破壊が脆性的か延性的かの判定と摩擦特性に関する情報を連続的に得たのちに、既存断層の室内試験を行い、特にカーボネイト層の存在に注意を払う必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shogo Kawakita, Daisuke Asahina, Takato Takemura, Hinako Hosono, Keiji Kitajima	4. 巻 7(62)
2. 論文標題 Effect of hydraulic and mechanical characteristics of sediment layers on water film formation in submarine landslides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-020-00375-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kamran Panaghi, Takato Takemura, Daisuke Asahina, Manabu Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of stress path on brittle failure of sandstone: Difference in crack growth between tri-axial compression and extension conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tecto.2021.228865	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 李 楊, 川北 章悟, 朝比奈 大輔, 竹村 貴人
2. 発表標題 封圧の周期的変動が岩石亀裂の透水特性に与える影響に関する実験的研究
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村 貴人, Tenthorey Eric, 細野 日向子, 佐藤 稔, 朝比奈 大輔
2. 発表標題 真三軸透水試験によるOtway地域の堆積岩の断層形成に伴う透水特性の変化
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村貴人, 朝比奈大輔, 佐藤 稔
2. 発表標題 二酸化炭素地下貯留サイトとしての堆積岩類のせん断面形成過程と透水挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 令和2年度日本応用地質学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈大輔, 竹村貴人
2. 発表標題 岩盤不連続面のラフネスと間隙水圧がせん断強度に与える影響
3. 学会等名 令和2年度日本応用地質学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細野日向子, 竹村貴人, 木村克己, 杉山直也, 菊地輝行, 秦野輝儀
2. 発表標題 紀伊半島南部の四万十帯と熊野層群におけるイライト結晶度の分布特性
3. 学会等名 令和2年度日本応用地質学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細野 日向子、竹村 貴人、平内 健一
2. 発表標題 間隙水のpH変化が岩石の摩擦係数に与える影響に関する実験的研究
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村 貴人、Tenthorey Eric、細野 日向子、佐藤 稔、朝比奈 大輔
2. 発表標題 真三軸透水試験によるOtway地域の堆積岩の断層形成に伴う透水特性の変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hinako Hosono, Takato Takemura, Daisuke Asahina
2. 発表標題 Experimental study on the effect of changes in pore water pH on friction coefficient of rock
3. 学会等名 Eurock2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------