

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15092

研究課題名（和文）地震時の間隙水圧の変動が断層の再活動に及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Effects of pore pressure cycling during earthquakes on fault reactivation

研究代表者

朝比奈 大輔（Asahina, Daisuke）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員

研究者番号：40738316

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、地震発生に伴う間隙水圧の変動が断層面に与える影響について検討を行い、震源周辺の断層の再活動のメカニズムを解明することである。本目的を達成するため、間隙水圧の周期的振動変化が破壊した岩石の透水係数に与える影響について調べ、岩石の透水係数の変化に与える影響を明らかにした。また、真三軸変形・透水試験装置を用いて、間隙水圧の変動が岩石の破断面に与える影響について実験データを取得し、数値解析に必要なパラメータを整理した。本研究により、これまでの研究では考慮されていない間隙水圧の動的な変動パラメータ（流量、振幅、及び周波数）について、破断面の力学的な変化を計測・評価することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、地震動による間隙水圧の動的な変動と断層の水理・力学的な挙動を室内実験により再現し定量的に評価することにある。間隙水圧が断層の再活動に与えるメカニズムについて検討している研究は少なく、特に間隙水圧の変動と岩石破断面の力学的な伝播過程の定量的な評価に関する研究が少ない。断層の再活動に伴う間隙水圧の動的な影響及びその伝播過程を明らかにすることは、地震発生メカニズムの解明といった防災学的な価値だけでなく、例えば、油ガス田開発における資源の生産性の向上というより工学的な目的に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate the effects of pore pressure-induced fault reactivation during earthquake. To achieve this objective, the effects of cyclic changes in pore water pressure on the hydraulic properties of fractured rock samples were investigated. We have also conducted a direct shear test using the true triaxial test apparatus to characterize the shear behavior of rock samples under various pore pressure and joint roughnesses. This study enables us to measure and evaluate the parameters of pore pressure as well as the mechanical changes in the fracture surface that have not been considered in previous studies.

研究分野：岩石力学，断層の力学，岩盤工学，コンクリート工学

キーワード：断層再活動 間隙水圧 三軸試験 透水係数 不連続面

### 1. 研究開始当初の背景

間隙水圧の上昇による有効応力および破壊強度の低下については広く知られており、過剰な間隙水圧は断層のすべりを引き起こす主要因の一つである。断層面の間隙水圧の分布と透水性は密接な関係があるため、断層の活動に伴うせん断すべりと透水性変化の関係性を知ることは地震発生のメカニズムを理解する上で重要である。既往の研究では、岩石破断面の間隙水圧を周期的に上下させた結果、透水性を上昇させる要因は水の流量であることが室内実験により明らかになっている。しかし、地震発生に伴う間隙水圧の変動が、震源周辺の断層に与える水理・力学的な影響及びその伝播過程の理解は不十分であった。

これまで、地下岩盤の水理・力学の連成挙動メカニズムを定量的に評価するために室内物理実験とシミュレーションによる数値実験が行われてきている。我々の研究グループでは、新しい不連続体力学モデルを独自に開発し、花崗岩の水圧破碎実験の数値解析モデルを通して、岩石を破壊する流体圧(ブレイクダウン圧力)を高精度で再現することが可能であることを示した。また、断層の再活動性を評価するための試験として、せん断面を有する砂岩の間隙水圧を繰り返し上下させ、せん断面の再活動に関する力学的挙動を計測することに成功した(図1)。

このような学術的背景に対し、本研究では、地震発生に伴う間隙水圧の変動が断層面に与える影響について検討を行い、震源周辺の断層の再活動のメカニズムを解明することを目的とした。

### 2. 研究の目的

本研究では、地震動による間隙水圧の変動と岩石破壊面の状態変化の過程に関する再現物理実験を行うことで、地震時における断層と間隙水圧の関係を解明することを目的とした。具体的には、3主応力及び間隙水圧を制御することのできる真三軸試験装置を用いて、変動する間隙水圧と岩石破断面の透水特性の関係及び力学的な状態変化の過程を計測した。また、間隙水圧によって変動する断層の状態を評価するための数値解析シミュレータの構築を行うため、間隙水圧の変動パターンに必要なパラメータを取得した。

### 3. 研究の方法

本研究では、(i)間隙水圧及び封圧の周期的振動変化が破壊した岩石の透水係数に与える影響、及び(ii)間隙水圧の上昇が断層のすべり及び透水特性に与える影響について、室内物理実験を行った。また、これらを数値解析シミュレータで評価するためのパラメータの取得を行った。それぞれの研究の方法について以下に述べる。

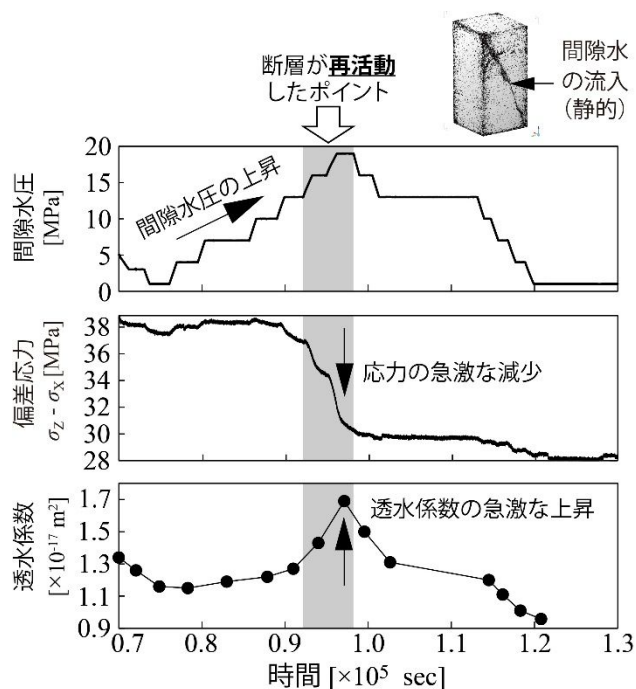


図1: 岩石試料への間隙水圧の段階的な上昇と  
応力及び透水係数の関係

#### (i) 間隙水圧及び封圧の周期的振動変化の影響

地震時における地下水位は、主に短周期の振動を伴う変動と長期的に変動が継続する変動の二つに分けられる。前者の振動を伴う地下水位の変動は、地震波の通過が帯水層の間隙水圧を振動させることによって生じると解釈されている。この地下水位の変動の周期は15~30秒である。一方、継続的な地下水位の変動は、地震発生後数週間にもわたり段階的に上昇・下降し、場合によっては緩やかに回復する。これらの地下水位の変動について、多孔質媒体の静的な弾性ひずみ、非排水圧密特性、及び地震による透水性の増加等が関係しておりそれらの相互作用の可能性について研究されている。しかし、地震時における岩盤の水理・力学特性の変化が、地下水位変動に与える空間的・時間的影響について詳細に検討されている例は少ない。また、地震波の通過に伴って変化する帯水層の岩盤の状態を直接観測することは困難であるため、継続的な地下水位の変動と岩盤の物理特性を関係づけることは容易ではない。

本研究では、地震時における地下水位変動と岩盤の物理特性の関係を解明することを目的として、間隙水圧の周期的振動変化における岩石の透水係数の変化についての室内物理実験を行った。実験は圧力容器を用いて行い、間隙水圧を制御し、振幅の違いが岩石の透水係数に与える影響を調べた。岩石は透水性の異なるサンプルとして白浜砂岩、来待砂岩、与那国砂岩を用い、岩石特性の違いについても検討した。

#### (ii) 間隙水圧の断層すべりへの影響

真三軸変形 - 透水試験装置を用いて、間隙水圧の変動が模擬岩石試料の破断面に与える影響を調べた。三軸試験装置の応力・変形状態を保持したまま、せん断割れ目の間隙水圧をシリンジポンプによって変動させ、破断面の力学的な挙動及び透水係数を測定した。非接触式の3Dレーザースキャナーを用いて不連続面の破面性状を数値化し、せん断による面の凹凸の変化や、間隙水圧がせん断面に与える影響について検討した。また、せん断すべり中の供試体の不連続面における、せん断荷重、垂直変位、および流量の時間変化についての計測結果を示し、実験後の不連続面の变化との関係性について詳細に検討した。

### 4. 研究成果

#### (i) 間隙水圧及び封圧の周期的振動変化の影響

間隙水圧の振動を伴う封圧試験は圧力容器を用いて行った。試験は封圧と間隙水圧を7MPaと3MPaまでそれぞれ上昇させ、その後間隙水圧を周期24秒で10サイクル振動させた。本研究では、間隙水圧の振幅が岩石試料の透水係数に与える影響を検討するため、振幅を1.5MPaと0.15MPaの2通り行った。

最初に、振幅1.5MPaで振動させ、その後上流側と下流側の流量の安定を確認した後、振幅0.15MPaで振動させた。なお、振動中は下流側は非排水とした。地震による地殻の変動が帯水層の間隙水圧や透水係数に与える影響に関するパラメータを取得するため、異なる封圧条件下において、間隙水圧の振動が亀裂を有する砂岩の透水係数に与える影響について実験的に調べ、間隙水圧及び封圧の振幅の違いが、透水係数の上昇に影響を与えることを確認した。

透水係数は岩石試料ごとに数オーダーの違いがみられた。これは、巨視き裂のラフネスやき裂面のかみ合わせの違いが反映したものだと考えられる(図2)。全体の傾向として、透水係数は振動前より振動後の方が上昇した。特に、振幅1.5MPaを作用させた岩石試料については、透水係数の低かった試料を除き、すべての試料で振動後の透水係数は上昇した。振幅の違いが透水係数に与える影響は明確には現れなかったものの、透水係数の上昇量は振幅1.5MPaの方が大きい傾向があった。岩石の種類に着目してみると、振幅1.5MPa, 0.15MPaどちらにおいても来待砂岩に比べて白浜砂岩の方が振動後の透水係数が高く、違いが明瞭に確認できた。本研究で用いた岩石試料には巨視き裂が存在するため、透水係数の計算に用いられる流量はマトリックス部ではなく主に巨視き裂を通るものと考えられる。したがって、本試験結果は岩石の種類が、巨視き裂の水の流れやすさに影響を与えていることを示している。巨視き裂の透水係数の違いは、主にき裂幅やラフネスの違いが反映していると考えられる。き裂幅やラフネスは、母岩を構成する粒子の形状やサイズ等に影響を受けるため、母岩の違いが巨視き裂の透水係数に反映したのは妥当な結果である。ただし、破断面のラフネスは岩石引張強さや破壊時の応力状態等も大きく影響するため、ラフネスとの比較などによる詳細な検討が今後必要である。



図2 破壊した岩石試料：(上)来待砂岩、(下)白浜砂岩。

#### (ii) 間隙水圧の断層すべりへの影響

本研究は、3主応力及び間隙水圧を独立して制御することのできる真三軸試験機を利用して一面せん断実験を行った(図3,4)。圧力容器内でせん断試験を実施し、一面せん断 - 透水試験を行うことによって岩盤不連続面の力学・水理学的特性を計測した。供試体は岩石の不連続面を石膏によって型取りした模擬岩石供試体を用い、ラフネスとせん断挙動との関係を検討した。図4に示すように、L字型のエンドピースを食い違うように配置し、真三軸試験装置のピストンによってせん断荷重を載荷させた。鉛直Z方向のピストンによってせん断荷重を、水平Y方向のピストンによって不連続面に垂直な荷重を作用させる。さらに、通常の一面せん断試験では考慮されない側方荷重を封圧によって制御することが可能である。

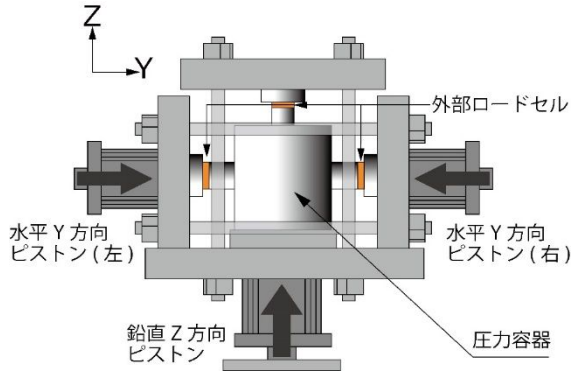


図 3：真三軸試験機の模式図概

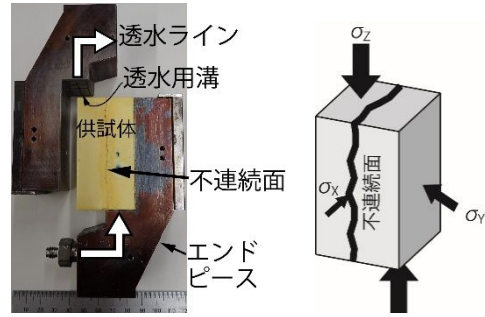


図 4：L字型エンドピース及び岩石の不連続面と載荷の方向

図 5 は、せん断試験中のせん断応力，法線方向変位および流量の推移を示したものである．実験結果は，試料のせん断応力と法線方向変位に伴い流量が変化する結果となった．滑らかな不連続面について以下のような結果が得られた（図 5a）．最初に，試料全体にせん断荷重が作用し始め，不連続面の隙間の凹凸が噛合うことによって隙間が閉じる．さらに，せん断荷重が増加すると，不連続面の隙間の間隙水圧が増加し始める．その結果，流量が負の値となり水が排出された．その後，不連続面の凹凸を乗り越えるすべりが始まり，法線方向変位が上昇し始める．法線方向変位の上昇とともに不連続面に隙間が生じるため，間隙水圧が減少した．試験後の不連続面を調べると，不連続面の凹凸の乗り越えに伴って生じる不連続面の損傷は，面全体に生じており，水の流入や応力の伝達は不連続面全体にわたって生じていたと考えられる．粗い不連続面の場合でも，せん断荷重がかかり始めるとすぐに流量が減少した．その後，せん断変位の増加に伴い流量は増加し始めるが，ピーク応力まではほとんど変化がない．せん断応力の緩やかな減少に伴い，流速の小さな応答が観察された．不連続面が粗い供試体では，不連続面の一部が大きく剥離しており，せん断ピーク応力前の応力の変化率の減少と関連していたと考えられる．

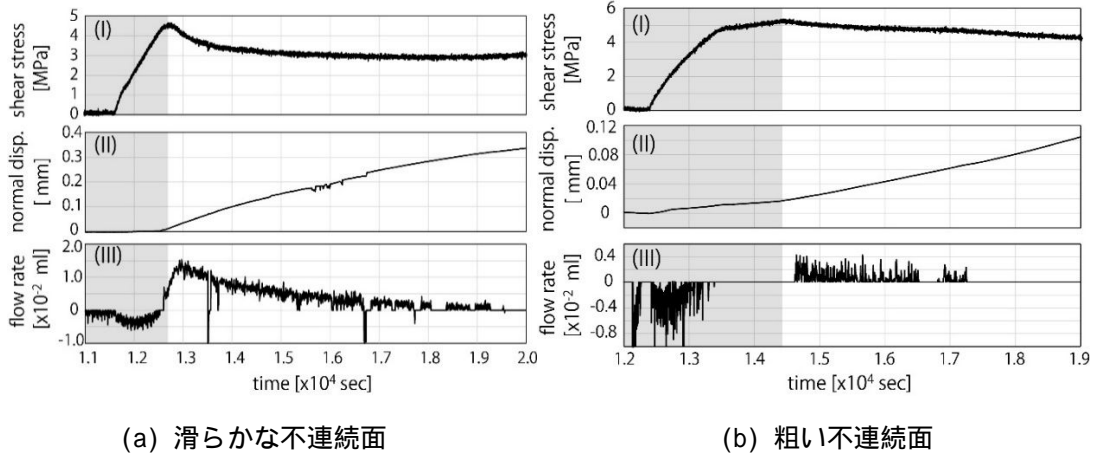


図 5：せん断中の時間変化：(I)せん断応力，(II)法線方向変位，(III)流量

本実験装置によって，これまでの一面せん断試験では計測できなかった，不連続面の粗さや間隙水圧の時間変化を計測することが可能となった．今後の課題として，不連続面における粗さや間隙水圧の変形過程が，強度定数に与える影響を実験的に計測する予定である．

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawakita Shogo, Asahina Daisuke, Takemura Takato, Hosono Hinako, Kitajima Keiji	4. 巻 7
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 1~12
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 Panaghi Kamran, Takemura Takato, Asahina Daisuke, Takahashi Manabu	4. 巻 810
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 228865 ~ 228865
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 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 朝比奈 大輔, 竹村貴人, 李楊
2. 発表標題 Effect of roughness and pore pressure on shear behavior of rock joint under true triaxial loading conditions
3. 学会等名 Eurock 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李楊, 細野日向子, 竹村貴人, 朝比奈大輔
2. 発表標題 Experimental study on the mechanical properties of past submarine landslide layers including volcanoclastic material
3. 学会等名 The 5th International Workshop on Rock Mechanics and Engineering Geology in Volcanic Fields (RMEGV2021)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈大輔, 李楊, 竹村貴人, 塚本斉
2. 発表標題 真三軸応力下で形成された破断面が弾性波速度に与える影響について
3. 学会等名 応用地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹村貴人, 朝比奈大輔
2. 発表標題 スクラッチテストによる地質材料の物性値連続測定 の検討
3. 学会等名 応用地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈大輔, 竹村貴人, 川北章悟, 李楊
2. 発表標題 Effect of intermediate stress on permeability of sedimentary rock under true triaxial compression
3. 学会等名 The 11th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS11) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川北 章悟, 朝比奈 大輔, 竹村 貴人, 北嶋圭二
2. 発表標題 堆積層境界の固結度が海底地すべりを引き起こす水膜形成に及ぼす影響
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会
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 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 令和二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, 川北 章悟, 李 楊, 竹村 貴人
2. 発表標題 真三軸試験機を利用した新しい一面せん断実験手法の開発
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈 大輔, 竹村 貴人, 川北 章悟, 李 楊
2. 発表標題 Development of a direct shear testing method using true triaxial apparatus
3. 学会等名 EUROCK2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈 大輔
2. 発表標題 動的な間隙水圧が破壊した砂岩の透水係数の変化に与える影響
3. 学会等名 第47回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈 大輔
2. 発表標題 Effect of pore pressure oscillation on the permeability of fractured sandstones and granite
3. 学会等名 Eurock 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈 大輔
2. 発表標題 Simulating hydraulic fracturing processes in cement composites using TOUGH-RBSN
3. 学会等名 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FramCoS-X) (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------