

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14579

研究課題名（和文）掘削井と既存断層の距離が誘発地震の発生に及ぼす影響

研究課題名（英文）Effect of distance between drilled well and pre-existing fault on induced earthquakes

研究代表者

北村 真奈美（Kitamura, Manami）

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・研究員

研究者番号：40795960

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：近年、水の注入に伴い誘発地震が発生することが知られている。そのため、現場での注水を模擬した室内注水試験から、注水に伴う断層すべり特性を調べるのが重要である。そこで本研究では、掘削井（注水地点）と既存断層の距離、及びその他注水パラメータに着目し、室内注水試験を実施した。その結果、断層面までの浸透性がある程度高い場合は、注水速度によらず急激な応力降下を示すこと、また、有効圧がある程度高い場合は急激な応力降下を示し、有効圧が低くなると緩やかな応力降下を示す傾向があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

注水、つまり間隙水圧の上昇によって断層運動がおこることはよく知られていたが、どのような注水、間隙水圧の上昇方法が、どのような断層すべり特性（急激な応力降下やゆっくりとした応力降下か、など）を示すかはこれまであまり調べられていなかった。本研究によって、様々なパラメータが断層すべり特性に寄与していることが明らかになった。また注水誘発地震は、様々な地圏の地活用事業において問題視されているため、発生メカニズムの解明は地圏の地活用事業の促進に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：It is known that the induced earthquakes occur with the fluid injection. Therefore, it is important to investigate fault slip characteristics associated with fluid injection from laboratory fluid injection tests. In this study, we conducted laboratory fluid injection tests focusing on the distance between the drilled well (or injection point) and the existing fault, and other parameters related to the fluid injection such as permeability of host rock, injection rate, and effective pressure. As a result, the rapid stress drop is observed regardless of the fluid injection rate when the permeability to the fault surface is enough high, and a rapid stress drop is observed at higher effective pressure, while a gentle stress drop tends to occur at lower effective pressure.

研究分野：実験岩石力学

キーワード：誘発地震 注水 応力降下

1. 研究開始当初の背景

近年、地熱発電において天然の熱水や蒸気が乏しい場合に、水を送り込んで蒸気や熱水を得る技術を活用する高温岩体地熱発電(EGS: Enhanced Geothermal System)が注目されている(例えば Asanuma et al., 2012)。一方で、EGS における水の注入に伴い発生する誘発地震が注視されている。韓国では地熱開発事業中に、既存断層付近を震源としたマグニチュード 5.4 のポハン地震が発生した(例えば Ellsworth et al., 2019)。これをきっかけに安全に地熱開発をおこなうために、誘発地震の発生機構の解明が急務となった。

これまでに、先行研究により、既存断層へ流体が流れ込むことで間隙水圧が上昇して断層すべり運動が促進されて地震が誘発されることや、総注水流量が増えるにつれて地震の規模(マグニチュード)が増加する傾向があることもわかってきた(例えば McGarr, 2014)。また、注水により岩石が冷却されて亀裂が生じることも明らかにされている(例えば Ghassemi and Zhang, 2006)。これらを統合的に考察すると、掘削井が有意に既存断層に近い場合、注水により周辺の母岩部分に亀裂が生じることで水の通り道が既存断層へと到達し、地震が発生する可能性が考えられる。しかし、これまでに掘削井と既存断層の距離という地下構造に着目した研究はおこなわれておらず、掘削井と既存断層がどの程度近いことが“有意”であるのかは明らかにされていない。また、亀裂が掘削井から既存断層へとつながった場合に、掘削井と既存断層の距離が地震発生の規模へ関与するののかもわかっていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、より安全に地熱開発安全に地熱開発を進めるために必要不可欠である、誘発地震の発生機構の解明を目指し、注水試験を模擬した室内実験を実施し、掘削井と既存断層の距離と誘発地震の規模の関係を定量的に明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では、産業技術総合研究所に設置の油圧式三軸圧縮変形装置を使用して、現場の注水試験を模擬した室内注水試験を実施する。試料は、日本の地熱地域に広く分布している花崗岩(茨城県産)について、既存断層を模擬した傾斜 30° のカット面を入れたプレカット試料を用いた。

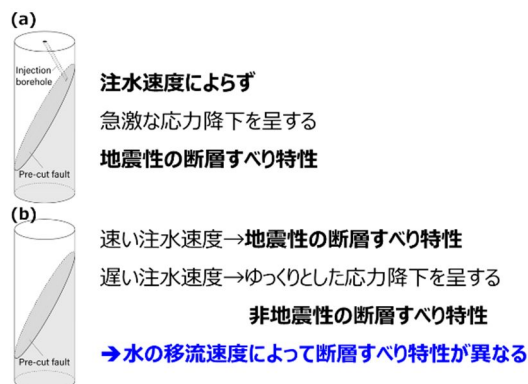
4. 研究成果

(1) 掘削井と既存断層の距離が断層すべり特性に及ぼす影響

熱処理を施した比較的浸透性が高い母岩(花崗岩)について、掘削井を模擬したボアホールが既存断層に到達している(断層面への明瞭な水の流路がある)ケースとボアホールが既存断層から十分に離れている(断層面への明瞭な水の流路がない)ケースを想定して注水試験を実施した。注水試験は、封圧及び試料下端側の間隙水圧が一定の状態に対し、試料上端側の間隙水圧から一定の注水速度で水を圧入して注水圧を上昇させた。その結果、ボアホールが既存断層への到達の有無にかかわらず、いずれのケースでも注水速度が速い場合には急速な応力降下を示すことが明らかになった(図 1)。一方で、掘削井が既存断層から十分に離れている際にゆっくりとした速度で注水した場合は、ゆっくりと応力が降下することが明らかになった。つまり、断層面に対する水の移流速度によって断層すべり特性が異なる可能性があることがわかった。

この結果は、これまでに先行研究により調べられていた、既存断層に直接注水するケースを模擬した室内注水試験において、注水速度が速いほど急速な断層すべりが発生するという結果と調和的である(Passelegue et al., 2018)。

図 1. (a) 掘削井を模擬したボアホールが既存断層に到達している(断層面への明瞭な水の流路がある)ケース、(b) ボアホールが既存断層から十分に離れている(断層面への明瞭な水の流路がない)ケースの試料形状、及び、断層すべり特性。



(2) 種々の注水パラメータが断層すべり特性に及ぼす影響

(1)を踏まえて、断層面に対する水の移流速度の影響が断層すべり特性に及ぼす影響を調べるために、母岩の浸透性と注水時の有効圧に着目して、2パターンの注水速度(0.05 ml/min または 5.0 ml/min)について注水実験を実施した。母岩の浸透性の影響を調べるために、インタクト及び熱処理(熱処理温度 150・450)を実施した花崗岩を使用した。注水試験は、環境温度(室温)一定、封圧 33 MPa 一定、試料下流側間隙水圧 2 MPa 一定の条件において、最大軸荷重の 80% 程度まで載荷した状態に対し、試料上流側から一定の注水速度(0.05 ml/min または 5.0 ml/min)で圧入し、目標注水圧まで上昇させるという操作を実施した。代表的な実験結果として、熱処理温度 150 と 450 の試料を用いた注水試験の結果を比較すると、注水速度によらず、いずれの実験においても目標有効圧(=封圧-目標注水圧)17.5 MPa 以上においては多くの場合、1回の急激な応力降下を示し、目標有効圧 17.5 MPa 以上においては1回の急激な応力降下の後に長い時間をかけた緩やかな応力降下を示すか、もしくは長い時間をかけた緩やかな応力降下のみで応力降下量をまかなう可能性があることがわかった(図2)。

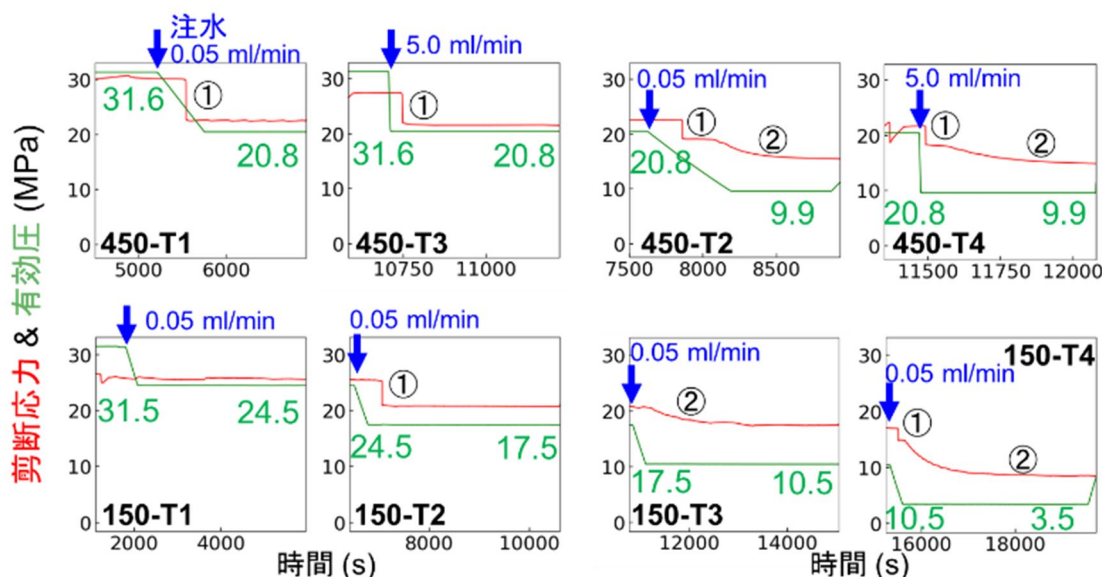


図2. 注水直後の時間に伴う剪断応力・有効圧の変化。450:450 で熱処理した試料、150:150 で熱処理した試料。T1-T4:1回の実験中の注水回数。①:急激な応力降下、②:緩やかな応力降下。

今後は、特に浸透率の違い(熱処理温度の違い)と有効圧について、より系統的な実験をおこない、各パラメータが断層すべり運動に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。

<引用文献>

Asanuma, H., Muraoka, H., Tsuchiya, N., and Ito, H., (2012), The concept of the Japan Beyond-Brittle Project (JBBP) to develop EGS reservoirs in ductile zone, GRC Transactions, 36, p. 359 – 364.
 Ellsworth, W. L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S., and Shimamoto, T., (2019), Triggering of the Pohang, Korea, Earthquake (Mw 5.5) by Enhanced Geothermal System stimulation, Seismological Research Letters, 90 (5), p. 1844 – 1858.
 Ghassemi, A., and Zhang, Q., (2006), Porothermoelastic Analysis of the Response of a Stationary Crack Using the Displacement Discontinuity Method, Journal of Engineering Mechanics, 132, p. 26 – 33.
 McGarr, A., (2014), Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119, p. 1008 – 1019.
 Passelegue, F. X., Brantut, N., and Mitchell, T. M., (2018), Fault reactivation by fluid injection: Controls from stress state and injection rate, Geophysical Research Letters, 45, p. 12837 – 12846.

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 SUEYOSHI Kazumasa, KITAMURA Manami, LEI Xinglin, KATAYAMA Ikuo	4. 巻 118
2. 論文標題 Identification of fracturing behavior in thermally cracked granite using the frequency spectral characteristics of acoustic emission	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2465/jmps.221014	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 Lei Xinglin, Ohuchi Tomohiro, Kitamura Manami, Li Xiaying, Li Qi	4. 巻 14
2. 論文標題 An effective method for laboratory acoustic emission detection and location using template matching	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 1642-1651
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jrmge.2022.03.010	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 KIM Garam, 北村真奈美, 澤井みち代
2. 発表標題 Effects of effective pressure on fault behavior triggered by fluid injection
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 KIM Garam, 北村真奈美, 澤井みち代
2. 発表標題 注水に伴う有効圧の変化が断層の挙動に与える影響
3. 学会等名 日本地震学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Garam KIM, Manami KITAMURA, Michiyo SAWAI
2. 発表標題 Laboratory study on fault reactivation by fluid injection and relationship between slip behavior and effective pressure
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SUEYOSHI Kazumasa, KITAMURA Manami, LEI Xinglin, KATAYAMA Ikuo
2. 発表標題 Experimental investigation on fault reactivation by water injection and the relationship between slip characteristics and injection rate
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末吉和公・北村真奈美・雷興林・片山郁夫
2. 発表標題 Frequency characteristics of acoustic emission in the fracture process of thermally cracked granite
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021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
---------	---------