

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14520

研究課題名(和文) ティップスクリーンアウトの可視化による現象解明とフラクチャリング制御の検討

研究課題名(英文) Experimental study of fracture tip screen-out with aid of X-ray CT considering its application to fracture control

研究代表者

伊藤 高敏 (ITO, Takatoshi)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：00184664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：石油天然ガス生産に不可欠なフラクチャリング技術で問題となっているスクリーンアウト現象を室内実験で再現し、そのときのフラクチャー挙動をCTスキャナにより可視化することに成功した。そこで、軟らかい材料を用いることで小さい試験片でも可視化できる大きさにフラクチャーが開くようにし、X線透過性に優れたCFRPと樹脂材料をうまく組み合わせた圧力容器を用いることで任意の軸対象三軸圧縮応力を負荷できるようにした。また、硫酸バリウムを添加した流体が流れと閉塞状況の観察に有効であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in reproducing the screenout phenomenon which is a problem in the fracturing technique indispensable for oil and natural gas production by laboratory experiments and visualizing the fracture behavior with the CT scanner. To this end, by using a soft material, fracture has become possible to open to a size that can be visualized even with a small test specimen, and by using a pressure vessel that well combines CFRP and engineering plastic with excellent X-ray transparency, it has become possible to apply any axisymmetric compressive stresses to a cylindrical specimen. Moreover, it has been found that the fluid to which barium sulfate was added is effective for observation of flow and clogging at fracture tip.

研究分野：岩石力学

キーワード：石油天然ガス開発 フラクチャリング スクリーンアウト 室内実験 X線CT

1. 研究開始当初の背景

フラクチャー(き裂)は一般に“悪”であるが、エネルギー資源開発では様々な恵みをもたらす“善”となる。その恵みの典型が、地層中に胚胎した天然ガス/オイルを生産井に導く経路に利用することであり、シェールガス/オイル開発は正に、それを無くして実現し得なかった。フラクチャーが経路として機能するには、フラクチャー形成のために負荷した水圧を取り除いても開口が保持されることが必要であり、そのために粒径の揃った小粒子(プロパント)で充填する。ただし、作業が常に成功するわけではなく、注入圧が大きくなりすぎて中止せざるを得ない障害がしばしば起こり、大きな問題となっている。そのような障害が発生する原因とされているのがティップスクリーンアウト、つまりフラクチャー先端が目詰まりし、それ以上の流体の侵入が阻止されるというものである(図1-1)。フラクチャーを形成するフラクチャリング作業は、大型のポンプを複数台必要とするような大がかりなものである。そこでしばしば問題となることでありながら、フラクチャー先端が目詰まりするという比較的単純な現象の実証がなされてこなかった。その大きな理由は、フラクチャーの開口幅にあると考えられる。つまり、フラクチャーの開口幅は長さ比べて非常に小さく1/10000程度に過ぎない。よって、フィールド規模の数十mの長さであれば開口幅は数mmであるが、実験室規模の1mに満たない長さのときの開口幅は0.1mm未満となってしまう。そのように小さい開口幅では現象の観察が難しいことはいうまでもなく、目詰まりそのものが起こらない可能性も大きい。

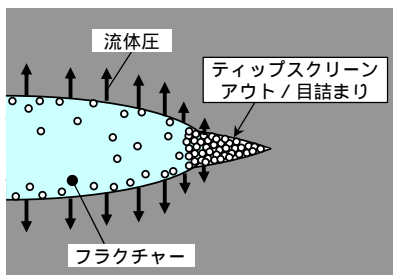


図 1-1 推定されているティップスクリーンアウトの姿

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて本研究では、従来の視点を変え、軟らかい模擬岩石を用いることでフラクチャーの開口幅を大きくして観察を容易にするという要領で室内実験を行い、またCTスキャナで試験片内部を可視化して現象の解明を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験の概要

円筒型圧力容器の内部に直径、長さ共に200mm程度の円柱試験片をはめ込む。直径方向と軸方向に模擬地殻応力を負荷する。た

だし、軸方向をより大きくする。そして、試験片を軸方向に圧縮するピストンに設けたスリット状の孔から、固形粒子を含んだ流体を試験片内部に圧入してフラクチャーを発生させる。このとき、試験片の軸方向に伸びるフラクチャーが形成される。さらにCTスキャナに装置を取り付けてX線を試験片の軸方向に透過させ、フラクチャーを含んだ試験片の軸方向断面画像を撮影し、それを流体の注入圧と比較して目詰まりとの相関性などを明らかにする。

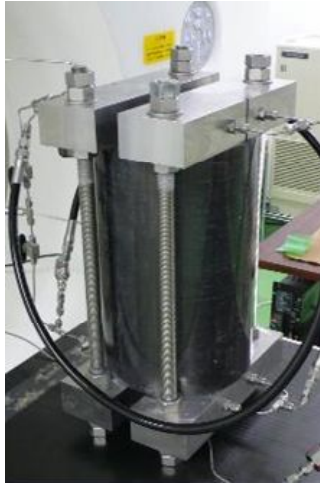
(2) 試験片

同じ流体圧でもフラクチャーの開口幅が比較的大きくなるようにするための軟らかい試験片として東北砂とカオリンを適当な割合で混合した材料を突き固めたブロックを用いることにした。この模擬岩石については、それをを用いてフラクチャリング室内実験を行った経験があり、適当な粘性の流体を用いることで硬い岩石と同様なフラクチャーが形成されることが既に分かっている。また、ヤング率が約100MPaと小さいので、フィールドレベルの岩石を用いた場合に比べて開口幅が約100倍程度になるはずである。ただし、上記の材料は浸透率が大きいので例えばただの水では逸水が大きく、フラクチャー形成に必要な大きさまで圧力が上がらない。このため、水の百倍以上の粘性を有する機械油あるいは高分子系の流体をフラクチャリング流体とした。

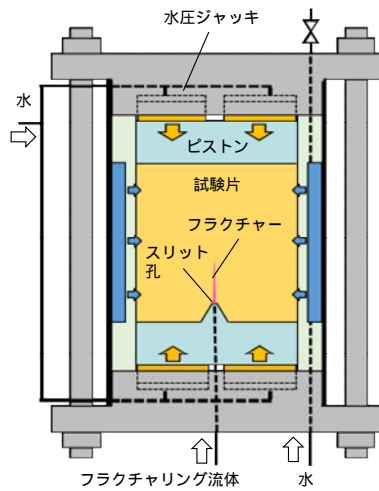
(3) 実験装置

CT撮影の外乱とならないように、X線の透過性に優れ、かつ試験片に負荷する圧縮応力を支えるのに十分な強度を有する炭素繊維複合材(CFRP)で円筒圧力容器を製作した(図3-1)。試験片は、上記円筒容器を型枠として、その内部で材料を突き固めながら積層する要領で作成する。模擬地殻応力の試験片軸方向成分は、試験片の両端にあるピストンを水圧駆動のジャッキで押し込むことで負荷する。試験片に接するピストンの表面にスリット状の孔があり、そこからフラクチャリング流体が試験片に圧入される。また、試験片の外周面と円筒圧力容器の内周面に樹脂製の薄膜を挟み、その薄膜と円筒圧力容器の内周面の間に水圧を負荷することで試験片に半径方向の模擬地殻応力を負荷する。なお、試験片軸方向にX線が透過する領域には、密度が大きくX線と干渉し易い金属ではなく樹脂材料を配し、また、試験片端部の油圧/水圧ジャッキを二分割して間を空けることで、透過するX線に外乱を与えないようにした。また、破碎流体の圧入には既存のシリンジポンプを用いた。ただし、固体粒子を含んだ流体を直接取り込むことはできないので、ピストンで区切られた2室を持つタンクを別途設け、片側にポンプで水を圧入して反対側に予め入れておいたフラクチャリング流体を挿

し出すことにした。



(a)



(b)

図 3-1 完成した実験装置の (a) 外観および (b) 内部構造

4. 研究成果

(1) 固形分の有無による変化

まず固形粒子を含まない機械油（粘性 300mPa s）をフラクチャリング流体とした実験を行った。圧入レートは 10mL/min、軸方向および半径方向に負荷した模擬地殻応力はそれぞれ 3MPa および 1.5MPa とし、以下に示す他の実験でも同じとした。この実験で得られた注入圧の時間変化が図 4-1 である。圧力がピークを取って急減した後、低下率が小さくなってほぼ一定の値に漸近するという、典型的なパターンとなっている。一方、固形粒子を含む流体の例として水に 12% のベントナイトを混合して作成した流体（以下、ベントナイト泥水）を用いて実験を行った。ただし、粘性は 340 mPa s であり、上述の機械油と同程度である。この実験で得られた注入圧の時間変化が図 4-2 である。これを図 4-1 と比較するとピークが大きく、また、急減後の値も大きめで、かつ小刻みに変動している

という明らかな違いがある。これはスクリーンアウトと認識されている現象と類似したものであり、同現象がやはり流体に含まれる固形粒子が影響していることを示唆している。ただし、CT 画像に固形分がフラクチャー内部に詰まった様子は確認できなかった。

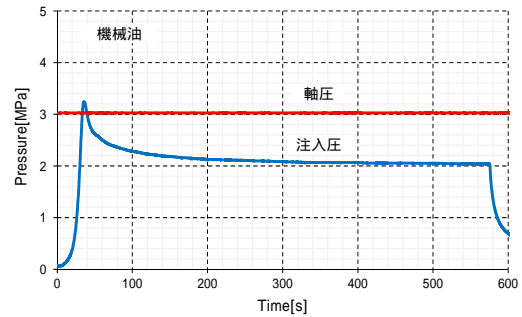


図 4-1 注入圧の時間変化（機械油）

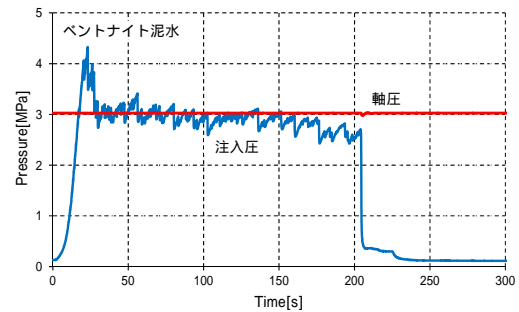


図 4-2 注入圧の時間変化(ベントナイト泥水)

(2) 硫酸バリウムを固形粒子とした実験

ベントナイト泥水を用いた実験の結果を考察した結果、フラクチャー内部における固形粒子の存在が CT 画像で確認できなかったのは、固形粒子として混ぜたベントナイトの密度が小さかったためと判断された。そこで、ベントナイトよりも密度が数倍大きい硫酸バリウムを機械油に混合した流体（以下、バリウム流体）で実験を行った。ただし、上述の実験と異なり、硫酸バリウムを含まない機械油を初めに注入し、フラクチャー形成を確認してから配管を切り替えてバリウム流体を注入した。この実験で得られた注入圧の時間変化が図 4-3 である。400 秒を過ぎたところからバリウム流体を注入した。図 4-1 および 4-2 と比べて圧力が全体的に高めではあるものの、機械油のみを注入した前半では圧力が急減後に低下率が徐々に減少するという図 4-1 と同様な傾向を示し、また、バリウム流体に切り替えた後半では圧力が変動するという図 4-2 と同様な傾向を示している。バリウム流体に切り替える前後で撮影した CT 画像をそれぞれ図 4-4a および b に示す。図 4-4a と異なって図 4-4b ではフラクチャー内部が白くなっていて密度の大きい物質で満たされていることがわかる。この結果から、硫酸バリウムがフラクチャーに詰まり、その結果、注入圧が脈動したものと考えられる。

以上の検討によってフラクチャー先端に固形粒子が詰まる様子をリアルタイムに可視化する実験方法を構築できた。これにより、固形粒子の詰まりによって注入圧が脈動するという、実規模の試験による観察と同様な現象が発生することがわかった。このような実験を積み重ねることで固形粒子の大きさや成分で詰まり方とフラクチャー伸展が変化する挙動が明らかになり、それを利用してフラクチャー伸展を制御できるようになることが期待される。

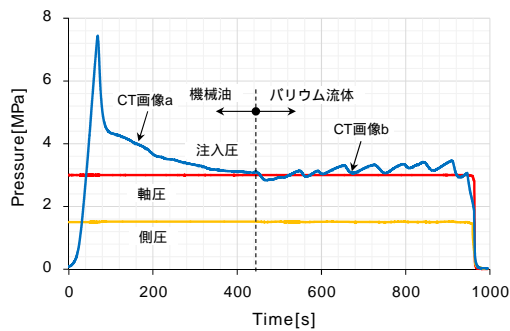


図 4-3 注入圧の時間変化（機械油ないしバリウム流体）

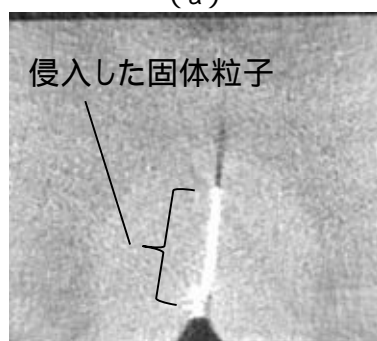
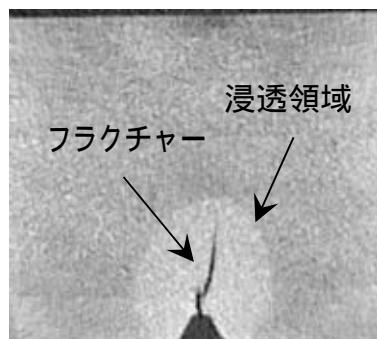


図 4-4 (a) 機械油および (b) バリウム流体圧入時に撮影した CT 画像

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）

〔学会発表〕(計 2 件)

吉田日向, 伊藤高敏, 山本晃司, 土屋慶洋, CT スキャナを用いた室内実験によるスクリーンアウト現象の検討, 石油技術協会 平成 30 年度春季講演会, 新潟, 2018.6.13-15.

吉田日向, 伊藤高敏, CT スキャナを用いたティップスクリーンアウト現象の可視化の試み, 石油技術協会 平成 29 年度春季講演会, 東京, 2017.6.13-15.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 高敏 (ITO TAKATOSHI)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：00184664

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

山本晃司 (YAMAMOTO KOJI)
石油天然ガス・金属鉱物資源機構・技術センター・研究員