

(26) AE測定による水圧破碎における破碎流体の粘性の影響について

EFFECTS OF FLUID VISCOSITY IN HYDRAULIC FRACTURING DEDUCED FROM ACOUSTIC EMISSION MONITORING

陳 渠*・石田 毅**・水田義明***

Qu CHEN, Tsuyoshi ISHIDA, Yoshiaki MIZUTA

Abstract

In a 19 cm cubic granite specimen with a hole of 2 cm diameter, we conducted hydraulic fracturing experiments using fracturing fluid of water whose viscosity is 1 cP and oil whose viscosity is 80 cP. The measuring results of acoustic emission and pressure and observation of the fractures with the naked eye elucidated that viscous oil tends to make thick and plane fractures with few branches while the water tends to make thin and wavelike fractures with many branches composing a network. This suggests possibility to control the fracture properties by changing viscosity of fracturing fluid in hydraulic fracturing.

1. はじめに

高温岩体発電では、熱抽出のために高圧の水を圧入して地下の岩盤内に人工亀裂を造成する。この人工亀裂の合理的な造成のためには、人工亀裂面の評価とその生成メカニズムの解明、さらには亀裂の生成の制御法の開発が重要である。今回筆者らは、粘性の異なる2種類の破碎流体、すなわち水と油を用いて花崗岩供試体の破碎実験を行い、AEや圧力などを測定して、亀裂の性状と亀裂の進展の様子を比較検討した。その結果、破碎流体の粘性を変化させることにより、生じる亀裂の性状も変化することが明らかとなった。このことは、粘性の異なる破碎流体を用いることにより、水圧破碎で生じる亀裂の性状をある程度制御できる可能性を示していると思われる。すでに、イギリスのCamborne School of Minesの高温岩体プロジェクトでは、2300mの深度で粘性流体を用いて破碎実験を行っている¹⁾。したがって、粘性の異なる破碎流体を用いて岩盤を破碎することは、現実の高温岩体の地熱貯留層の造成においても可能であり、今回の実験結果は実用的にも有用と思われるので以下に報告する。

2. 実験方法

(1) 供試体と供試体の破碎方法

実験には、粘度1cPの水と粘度80cPの油を用いた。供試体は一辺19cmの黒髪島花崗岩の立方体である。直径2cmの水圧破碎孔を供試体の中心に、P波速度が最大のZ方向に削孔した。図1に示すように、岩石供試体を反力枠の中に入れ、供試体と反力枠の間にフラット・ジャッキを挿入し、X方向に3MPa、Y方向に6MPaの拘束圧を加え、この2軸応力状態の下で実験を実施した。破碎孔の内圧の加圧には、水と油のいずれの場合にも図2に示すダブル・パッカーを用い、プレッシャー・ジェネレーターで、1分間当たり約10cm³の流量で加圧した。いずれの実験においても、破碎実験終了後、供試体表面の亀裂を観察するとともに、破

* 山口大学大学院

** 正会員 工博 山口大学地域共同研究開発センター

*** 正会員 工博 山口大学工学部

砕孔を中心として、直径 7cm のオーバー・コアリングを行い、破砕孔周辺の亀裂の発生を観察した。

(2) 圧力及び AE の測定方法

破砕孔の内圧は圧力計を目視で確認しながら、手動で加圧した。破砕孔の内圧とフラット・ジャッキの圧力は、4 秒おきに自動デジタルひずみ測定器で A/D 変換し、コンピュータに収録した。

水圧破砕では、主要な亀裂が数秒で進展し、この間に数百個の AE が発生して供試体の破断に至る。そこで、AE データの収録は A/D 変換した波形データをただちに D/A 変換して出力し、アナログ・データ・レコーダーに収録する方法をとった。そして、実験終了後、データ・レコーダーのデープ速度を低下させて波形データを再生し、再度 A/D 変換し、フロッピー・ディスクに収録した。AE の測定には、供試体の上下面に設置した 12 個の共振周波数 150kHz のセンサー（図 1 参照）を用いた。

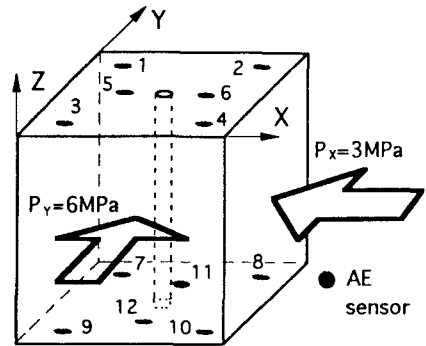


図 1 供試体の荷重状態及び供試体に設置した AE センサーの位置

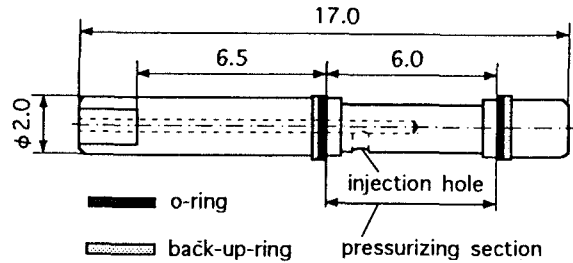


図 2 実験に用いたダブル・パッカー（単位：cm）

3. 実験結果

(1) 圧力と AE 発生頻度の経時変化

圧力と AE 発生頻度の経時変化を図

3 に示す。図 3(a)は破砕流体が水の場合、図 3(b)は油の場合である。これらの図で縦軸は圧力と AE の発生頻度、横軸は経過時間を示す。図中、太い実線は破砕孔に作用する流体圧 P を、細い実線 P_x と細い破線 P_y は、供試体の X 方向と Y 方向にそれぞれフラット・ジャッキで作用させた拘束圧を示す。棒グラフは 30 秒毎の AE 発生頻度である。以下では、加圧開始から圧力低下を経て次の加圧開始の直前までを 1 回の加圧サイクルと考え、1 回目の加圧、2 回目の加圧、3 回目の加圧などによぶ。

図 3(a)の水の場合をみると、1 回目の加圧においては 17.9MPa の 1 次破砕圧を示した後、内圧が急激に低下した。後で示すように、亀裂は破砕孔から Y 方向に進展している。したがって、圧力系が完全に閉回路で亀裂の進展が供試体内部で止まっておらず供試体内への流体の浸透がなければ、低下した圧力は X 方向の拘束圧 P_x に漸近するはずである。しかし、圧力は拘束圧 P_x を下回っていることがわかる。この実験のために何度か予備実験を行ったが、その際、水を破砕流体に用いた実験では亀裂が O リング部分を越えて生じ、破砕に伴って水がパッカーから漏れ出すのがしばしば観察された。圧力が P_x を下回ったのは、このパッカーからの漏水か、亀裂が供試体表面まで進展したため、あるいは供試体内部への水の浸透のためではないかと思われる。棒グラフは、12 個の AE センサーのうち、図 1 の 1, 6, 10 番のいずれかひとつのセンサーで検知された AE をカウントしたものであり、30 秒ごとの頻度を対数で示している。AE は、3 回の加圧のいずれの場合でも、破砕圧付近で集中的に発生しており、この時期は他の時期の 100 倍程度の頻度になっていることがわかる。

図 3(b)で、油を破砕流体とした場合の結果を見ると、破砕圧の大きさは水の場合と大きく違わない。また、これらの破砕圧の発生に伴って AE が集中的に発生している点も水の場合と同じである。一方、水の場合に比べて、大きな違いは内圧が一定値に低下するのに長時間を要している点である。図 3(b)は図 3(a)に比べて、横軸を 3 倍して示している点に注意されたい。粘性の大きい油の場合、水に比べて浸透性が低く流動速度

も小さいため、発生した亀裂内へ浸入しにくいと推測される。なお、水の場合には破碎時に破碎流体が破碎孔から漏れだす現象が頻繁に見られたが、油の場合にはこのような現象が見られることが少なかった。これは、破碎流体の粘性が大きい場合には、Oリングによる密閉効果が有効に表れるためと思われる。このことから、発生した亀裂内へ流体の浸入挙動が、流体の粘性の違いにより異なることが推測された。

再び図3で、破碎圧の発生に伴うX方向の拘束圧 P_x の変化を見ると、水の場合にはほとんど変化がないのに対し、油の場合には0.3~0.5MPaの増大がみられる。これは、粘性の高い油がY方向に生じた亀裂内に浸入する場合には、亀裂が大きく開口し、供試体がX方向に膨張してフラット・ジャッキを押し戻しフラット・ジャッキの圧力が増大するためと思われる。このことは水の場合に発生する亀裂よりも、油の場合に発生する亀裂のほうが亀裂幅が大きいことを示唆している。

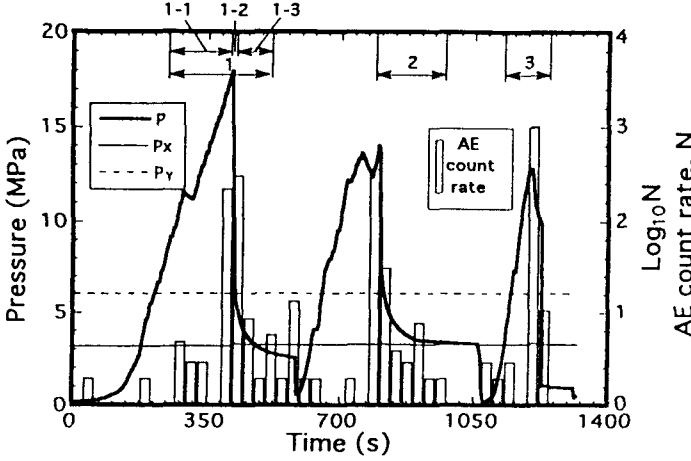
(2) AE震源分布の経時変化

AEの震源は、供試体の異方性を考慮し、各センサーへのP波初動の到達時刻から求めた。考察の対象とした震源は、センサー数（データ数）6以上、

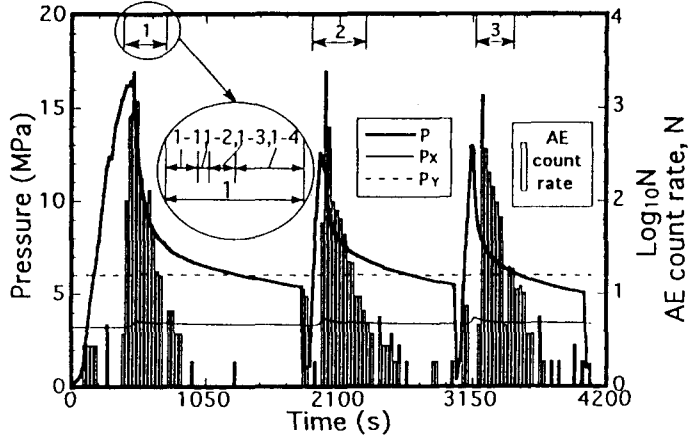
走時残差の標準偏差が $3\mu s$ 以下などの条件を満たした震源のみであり、震源決定誤差は数mm程度、最大でも20mm程度である。

水を破碎流体に用いた実験で、震源決定されたAE数は139個で、油を用いた実験では218個であった。これらの震源分布は、実験後に観察した供試体表面の亀裂、および破碎孔を中心にオーバー・コアリングして取り出したコアの表面で観察した亀裂とよい一致を示した。また、いずれの場合も亀裂は破碎孔から最大拘束圧方向のY方向に平面的に発生していた。なお、これらの亀裂の肉眼観察で、油の場合の亀裂は幅が大きく明瞭であったのに対し、水の場合の亀裂は細く不明瞭であり、注意してみないと識別が困難であった。

次に、水の場合の3回の加圧に伴う亀裂の進展状況を検討するため、各加圧サイクルにおけるAE震源のX-Y平面への投影図を図4に示す。なお、3回の加圧に伴うAEの発生時期を図3に矢印と数字で示した。図4より、1回目と2回目の加圧ではAEは破碎孔からみてY軸のマイナス方向で発生し、亀裂がこの方向に進展したことがわかる。しかし、3回目の加圧では、AEはY軸のプラス方向で発生し、亀裂は1回目、2回目とは逆方向に進展したことがわかる。



(a) 破碎流体が水の場合



(b) 破碎流体が油の場合

図3 圧力及びAE発生頻度の経時変化

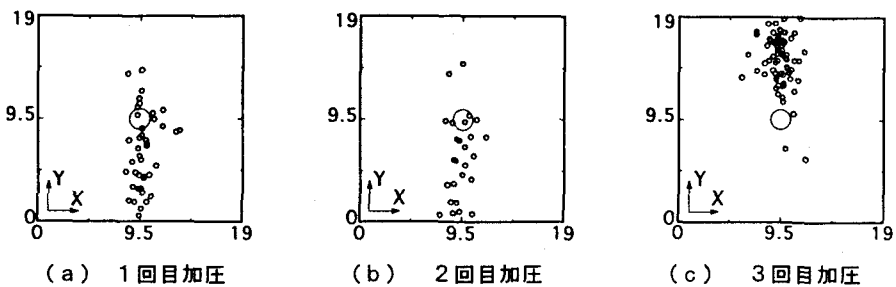


図4 水を破碎流体に用いた実験で発生したAE震源の各加圧サイクル毎の平面分布 (X Y平面図)

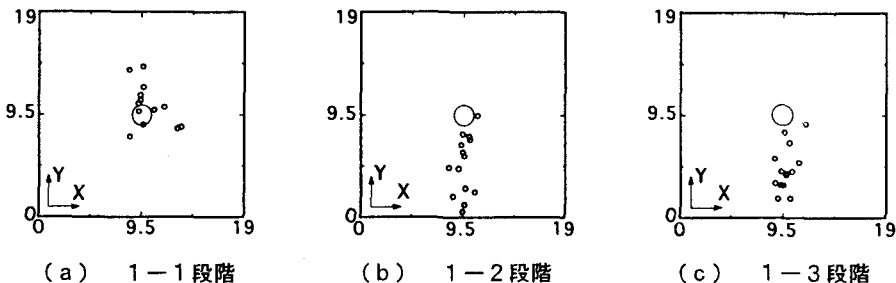


図5 図4の(a)図(1回目の加圧)のAE震源を発生時間によってさらに3分割して示したX Y平面図

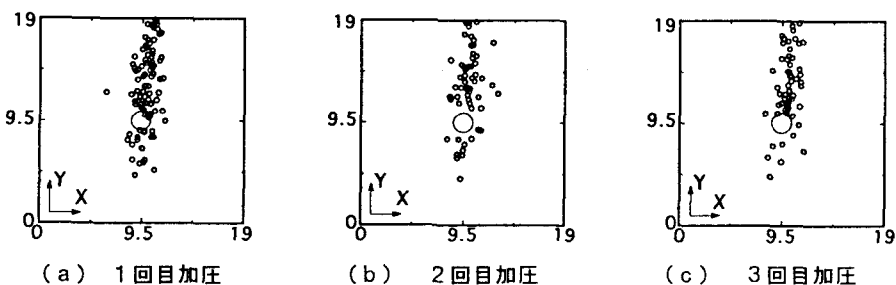


図6 油を破碎流体に用いた実験で発生したAE震源の各加圧サイクル毎の平面分布 (X Y平面図)

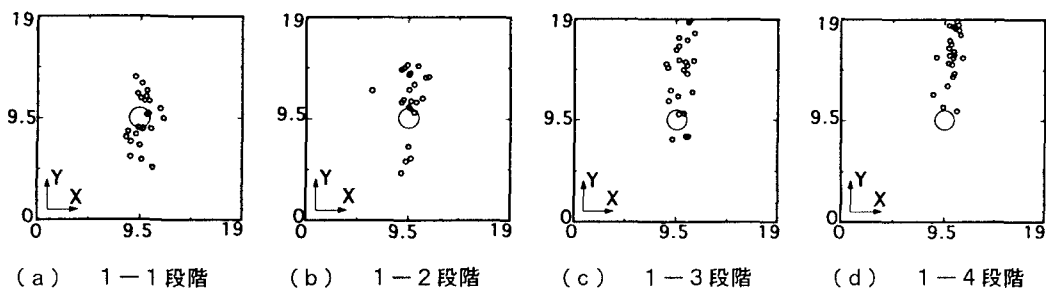


図7 図6の(a)図(1回目の加圧)のAE震源を発生時間によってさらに4分割して示したX Y平面図

さらに、この1回目の加圧に伴って発生したAEの震源、発生時間順に3つにわけて図を図5(a), (b), (c)に示す。この1回目の加圧を細分化した3つの段階をそれぞれ1-1, 1-2, 1-3段階と呼ぶことにする。これらの時間区分と圧力-時間曲線との関係も、図3に示している。1回目の加圧でAEの震源は全体としてはY軸のマイナス方向に分布したわけであるが、さらにこれを詳細にみると、震源は1-1段階では、Y軸のプラス方向に分布し、1-2, 1-3段階では逆にY軸のマイナス方向へ分布することが分る。同様の傾

向は、2回目の加圧においてもみられたが、3回目の加圧ではみられなかった。

一方、油の場合の3回加圧に伴うAE震源のX-Y平面への投影図を図6に示す。この図より、3回の加圧に伴う震源はいずれも概ね破砕孔の周辺からY軸のプラス方向へ分布することが分る。すなわち、水の場合には、3回の加圧サイクル毎に亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向がみられたのに対し、油の場合は最初の加圧の際に発生したのと同じ方向に2回目、3回目の加圧時にも亀裂が発生したといえる。

さらに、1回目の加圧に伴って発生したAE震源を、水の場合と同様に発生時間順に、1-1、1-2、1-3、1-4の4段階に分け、図7(a)、(b)、(c)、(d)に示す。震源は1-1段階では、破砕孔の周辺に分布し、1-2段階では破砕孔からY軸のプラス方向に分布し始め、1-3段階では破砕孔から供試体のYのプラス側の端部まで広く広がり、1-4段階では破砕孔側よりむしろ供試体のYのプラス側の端部に震源が集中している。この震源分布は、加圧初期に破砕孔周辺のY方向のプラス側、マイナス側の両側に亀裂が進展しかけた後、1-2段階に入って亀裂の進展がY方向のプラス側に偏り、時間とともに1-3、1-4段階と亀裂が逐次的に供試体の端部まで進展していったとみることができる。このように亀裂が一方方向に進展する傾向は、2回目、3回目の加圧においても同じようにみられた。

以上のことから、3回の加圧サイクル毎にみても、それぞれの1回の加圧サイクルを経時的に細分化してみても、水の場合には亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向がみられたのに対し、粘性の高い油の場合には一定方向に安定的に亀裂が進展していく傾向がみられたといえる。

4. 考察とまとめ

粘度1cPの水と粘度80cPの油を破砕流体に用いて、AE測定による花崗岩供試体の水圧破砕実験を行った。その実験の結果を考察してまとめると次のとおりである。

- (1) 亀裂と直交する方向に拘束圧を載荷していたフラット・ジャッキの圧力変化をみると、水の場合にはほとんど変化がないのに対し、油の場合には亀裂の発生時に0.3~0.5MPaの一時的な増大がみられる。これらは、亀裂内に粘性の高い油が浸入する場合には水の場合と異なり、亀裂が大きく開口することを示していると思われる。供試体表面と破砕孔を中心にオーバー・コアリングしたコアの表面における亀裂の肉眼観察の結果からも、破砕流体に油を用いた場合の方が水を用いた場合よりも、亀裂の幅が大きいことがわかった。
- (2) 3回の加圧サイクル毎の震源分布および1回の加圧サイクルを経時的に細分化した震源分布を詳細に検討したところ、水の場合には亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向があるのに対し、油の場合には一定方向に安定的に亀裂が進展していく傾向があることがわかった。粘性が小さく浸透しやすい水で亀裂を造成する場合、亀裂の進展の過程において供試体中の既存の微細な割れ目でその進展方向が変化しやすいのに対し、粘性が大きく浸透しにくい油の場合、微細な割れ目の影響が少なく亀裂が安定的に進展するのではないかと考えられた。
- (3) 以上のことから、粘性の低い流体で破砕を行うと、亀裂幅の小さい微細な割れ目が網の目状に多数発生しやすく、一方、粘性の大きな流体で破砕を行うと、亀裂幅が大きく平面的な亀裂が発生しやすいといえる。このことを現実の高温岩体の地熱貯留層の造成に応用すると、次のことがいえる。すなわち、回収熱水の温度が低下してきた場合には、粘性の低い流体を用いて亀裂幅の小さな微細な割れ目を網の目状に多数造成して、熱交換面積を拡大する。一方、注入水量に対して生産井からの回収水量が少ない場合には、粘性の大きな流体で破砕を行い、注入井と生産井を直結する厚さの大きい単一の板状亀裂を造成すればよいと思われる。

参考文献

- 1) Baria, R., Green, A.S.P. and Jones, R. H.: Anomalous seismic events observed at the CSM HDR project, U.K., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.3/4, pp.257-269. 1989.