

室内水圧破碎実験における微小破壊の震源パラメタ推定

Source parameter estimation of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in the laboratory

○直井誠・陳友晴・今北啓一

○Makoto NAOI, Youqing CHEN, Keiichi IMAKITA

Complex characteristics of Acoustic Emission (AE) sensor make the difficulty of complex analyses that are conducted for the records of seismometers. In this study, we conducted moment tensor analysis, absolute magnitude estimation, and corner frequency estimation for AEs that were induced during hydraulic fracturing experiments in a laboratory by carefully correcting AE sensor characteristics. Almost all the obtained AEs showed tensile mechanisms, and their corner frequencies were slightly lower than those expected from the scaling relation that repeatedly reported for shear events in the previous studies.

1. はじめに

微小な破壊,あるいはそれに伴い放射される弾性波動は Acoustic Emission (AE) と呼ばれ,圧電素子をもちいた高感度の AE センサで測定される. AE センサは,室内スケールの破壊現象から数十 m 規模の,地震計に比べてより小規模な測定対象に用いられ,岩盤や金属の巨視的破断前の異常検出や破壊伸展プロセスのモニタリングなど,多用途で利用されている.

AE センサは地震計と同じく破壊に伴う弾性波動を測定するので,地震波の解析で行われる地震モーメントや応力低下量といった破壊固有の量の推定や,モーメントテンソル解析などが本質的には可能である.しかし,一般に AE センサは複雑かつサンプルとの接着方法・状態によって変化する周波数特性を持つことや,その指向性が未知であるために,これらの評価は簡単ではない.本研究では,室内水圧破碎実験中に生じる微小破壊に対し,AE センサの特性を丁寧に評価・補正することで,モーメントテンソル,地震モーメントの絶対値,コーナー周波数の推定を行なった.

2. 水圧破碎実験

シェールガス・オイル開発などの資源開発では資源の流路を確保するため,水圧破碎により透水性の低い岩盤を破壊し,透水性を向上させる.破碎が進展した領域など,水圧破碎の影響の評価にはしばしば微小地震記録が用いられる.

水圧破碎による亀裂の造成・伸展プロセスと,それに伴う微小地震との関係の理解を深めるために,シェールガス・オイル開発が行われている米

国テキサス州のイーグルフォード層の露頭サンプルを用い,室内水圧破碎実験を実施した.実験には 65x65x130 mm の直方体に成形した供試体を用いた.破碎流体には紫外線照射下で発光する蛍光剤を添加した熱硬化性樹脂を用い,破碎後に供試体を加熱して岩体内に入り込んだ樹脂を硬化させ,サンプルを切断して紫外線照射下で造成亀裂を観察した.水圧破碎時に生じる AE は,高感度・広帯域型の富士セラミックス製 M304A センサ 16 個と 200-750 kHz に感度を持つ Physical Acoustic Corporation 製 Pico センサ 8 個,計 24 個の AE センサで計測し,P 波走時から個々のイベントの震源を推定した.その後,推定された震源を初期震源として,Double Difference 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を適用し,震源の再決定を行った.得られた震源分布と造成亀裂の観察結果を図 1 に示す.

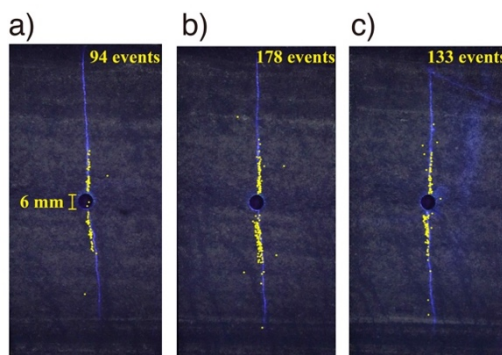


図 1. 震源分布と紫外線照射下で観察した造成亀裂. 破碎孔に垂直に切断した 3 断面での観察結果. 各断面から ± 5 mm 以内の AE 震源を黄色でプロットしている. 青白く発光している部分が樹脂の侵入領域で,造成亀裂に対応している.

3. モーメント・テンソル解析

得られた AE 波形の P 波初動振幅値と極性を用いてモーメントテンソル解を推定した。一般に AE センサは貼り付け状態によって感度が変わるため、ある AE センサからパルス波を発振し別のセンサで受振するテストを実験毎に全センサに対して行い、得られた P 波初動振幅値を用いてカップリング係数を推定・補正した上で解析を行なった。得られたモーメントテンソル解のほぼ全ては引張型であり、最大圧縮軸沿いに破壊面をもつイベントであることがわかった。このような破壊は水圧破碎の古典理論から予想されるものと一致しているが、先行研究における室内水圧破碎実験や実際の生産現場の微小地震の解析ではせん断型が支配的になるケースが多く、極端に引張破壊が卓越する例の報告はほぼ見られない。先行研究に比べてセンサ感度の補正を丁寧に実施しており精度の良い解析ができていること、ならびに既存亀裂の少ない非常にタイトな岩石を用いたことが原因として考えられる。

4. AE の絶対規模推定

水圧破碎実験と同様の接着方法における AE センサの絶対感度及び周波数特性を測定するため、ステンレス製の供試体を用意し、ある面に発振子を取り付けてパルス波を発振し、対面における振動を速度振幅に対してフラットな特性を持つレーザードップラー速度計（以下 LDV）で測定する試験を実施した。その後、同じ信号を AE センサでも記録し、これを LDV の記録で deconvolution して AE センサの周波数特性を求めた。AE センサの感度・周波数特性は供試体とのカップリング状況に依存するので、受振側の AE センサは 12 回貼り直して試験を繰り返し、得られた結果を平均化することで、AE センサの特性を評価した。発振側の AE センサは試験中一度も取り外さず、カップリングの影響は一定と仮定して解析を行った。

水圧破碎試験中に得られた AE の振幅スペクトルを上記の手法で得られた周波数特性で補整することで個々の AE の地動変位スペクトルを推定した。補正スペクトルに AE の理論変位スペクトル

をフィッティングすることで、個々の AE の地震モーメント M_0 及びモーメントマグニチュード M_w を求めた。本実験で得られた AE の M_w は -8.6 から -6.3 の範囲である。

5. コーナー周波数推定

次に、水圧破碎試験中に近接して発生したイベントペアの P 波スペクトル比を用いてコーナー周波数 f_c の推定（e.g., Ide et al., 2003）を行った。解析は、M304A センサで得られた記録のみを使用し、震源間距離が 3 mm 以下、かつ 6 個以上の M304A センサの記録で 0.8 以上の相互相関係数が得られたイベントペアに対して実施した。さらに推定されたスペクトル比における、高周波と低周波の極限での振幅比が 2 以上のもののみに対し解析を行った。

一般に、自然地震においては、 f_c と M_0 は 0.1-100 MPa の応力降下量に対応する関係になることが先行研究で繰り返し報告されている（e.g., Yoshimitsu et al., 2014）。本研究で得られた引張型のメカニズムをもつ AE は、先行研究で確かめられているスケールリング則から予想される f_c と調和的か、やや低い値をもつことがわかった。

6. 結論

本研究では、イーグルフォード頁岩を用いた室内水圧破碎実験で得られた AE 測定データに対し、個々のセンサ接着状態による感度の違いを推定・補正した上でモーメントテンソル解析を実施した。また、実験で用いる接着方法における AE センサの絶対感度および周波数特性を評価して、個々の AE の絶対規模を推定するとともに、スペクトル比法を用いてコーナー周波数を推定し、試験中に生じた AE に対して、先行研究で繰り返し確認されている応力降下量一定則から予想されるものと調和的か、やや低い値が得られることを示した。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 16H04614 と、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の助成を受けて実施しました。