

(22) AE から推定される水圧破碎の破壊メカニズム

電力中央研究所

○佐々木俊二

〃

正会員 石田 毅

公害資源研究所

正会員 小林 秀男

〃

正会員 松永 烈

1. はじめに

水圧破碎は枯渇した石油井を刺激して石油の産出量を増やすために1940年代に開発された技術であるが、最近では、地殻応力の測定や高温岩体発電システムの中核をなす人工貯留層の造成方法としても注目され、国の内外で研究開発が進められている。従来からの水圧破碎の解釈によると、亀裂は引張り破壊により発生し最小主応力に直交する方向に進展するとされてきた。しかしながら、水圧破碎による亀裂の発生と進展のメカニズムについては不明な点も多い。

ここでは、水圧破碎機構に及ぼす流体の浸透の影響について検討するため、岩石内の微小破壊に伴って発生するアコースティック・エミッション（以下、AEと略す）に注目した室内実験を行い、AEの解析（震源分布、発生様式、発震機構）から明らかになった破壊メカニズムについて報告する。

2. 実験方法

実験には非透水性のアクリルと透水性を有する稲田花崗岩の2試料を用いた。試料は一辺の長さが200mmの立方体で、試料中心に径10mmの孔をあけ水圧破碎孔とした。孔井内の加圧区間（長さ30mm）のシールドはデュアルパッカーを用い、清水を8cc/minの流量で注入した。図-1は水圧破碎実験とAE計測システムのブロック図を示したものである。AEセンサーには500KHzにピークを有する共振差動型（NF製904D型）を16個用いた。各センサーからの出力信号は、前置増幅器で40dB増幅した後、8チャンネルは2台のローカルプロセッサ（AE9600）を介し、監視領域で発生したAEのみがウェーブメモリ（AE9620）に記憶される。このウェーブメモリの分解能は10ビット、記憶容量2Mバイト、内部タイマ精度0.5μsecで最小デットタイム1msecである。このウェーブメモリは1チャンネルのデータ長を1kワードとして、256個のAEを連続して記憶

できる。一方、残り8チャンネルの信号は別のウェーブメモリ（R390）に入力され有為と判断されたAEデータを逐次ハードディスクに転送する。ただし、データ転送に伴うデットタイムが約8秒と長く、実験中に収録できるAEデータの数ウェーブメモリAE9620と比べて1桁以上少ない。

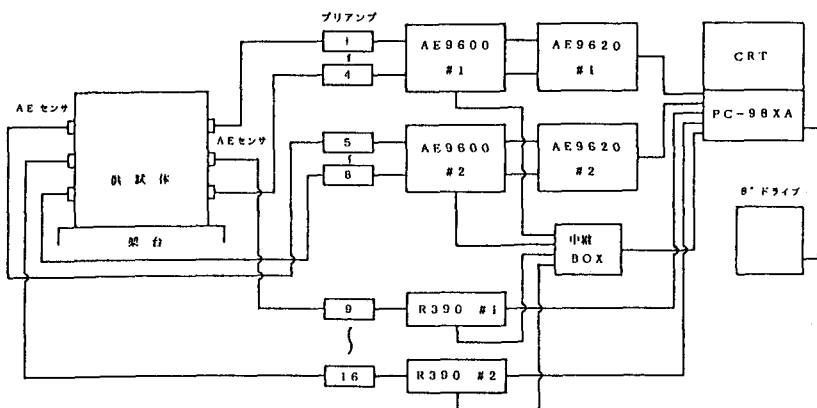


図-1 水圧破碎実験および計測システム

3. アクリル試料の実験結果

アクリル試料では、水圧破砕孔をZ軸と平行したとしたとき $\sigma_x = 25 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_y = 45 \text{ kg/cm}^2$ の2軸応力状態で水圧破砕実験を行った。なお、超音波測定から求めたアクリルのP波速度はx, y, z各方向とも $V_p = 2.75 \sim 2.76 \text{ km/sec}$ の範囲にあり、非常に均一な構造のものといえる。

3.1 AEの発生様式

図-2 (a) は水圧の経時変化を示したものである。この例では水圧が 372 kg/cm^2 の時にアクリルに亀裂が生じ、かつ急激に進展したため孔口を解放しなくとも水圧は急速に低下している。図-2 (b) に破砕水圧の拡大図を、また、同 (c) にこの時に計測されたAEの波形を示す。図から明らかに、AEは亀裂形成以前には全く発生しておらず、亀裂形成時に数個のAEが断続的に発生して活動を終了している。後述する花崗岩の場合に比べて、AEの発生数は極端に少なく、また、AEの波形は振幅が大きく、かつ振動継続時間が長いことから、放出された波動エネルギーは大きい。これらをアクリル試料を用いた水圧破砕におけるAE活動の特徴として挙げることができる。

3.2 AEの震源分布

今回の実験ではパッカーの加圧区間を調整することにより、計12回にわたり亀裂を形成させることができた。このうち亀裂の発生に伴って発生した10個のAEの震源を決定した。震源決定にはP波初動到達時刻を用いた。計算方法は非線形最小自乗法を繰り返し適用することにより、走時残差の二乗和を最小とする震源要素を求めるものである。AEの震源位置 (○印) を肉眼観察から求めた亀裂の形状 (細い実線) とともに図-3 (a) に示す。図の左側が平面図、右側が $y=0$ 断面に投影した深さ分布図である。また、図中の番号は図-3 (b) に示す亀裂に対応している。図から明らかに、AEの発生位置と観察された亀裂の発生順とはよい一致を示している。

3.3 AEの発震機構

AEのP波やS波の初動方向を調べることで、AE発生 の直接の原因となった亀裂のメカニズムを推定することができる。地震の発震機構に関する理論によれば、引張り破壊が生じた場合、放射パターンはすべての点で初動の方向が押し (震源から遠ざかる方向) を示すのに対し、せん断破壊の

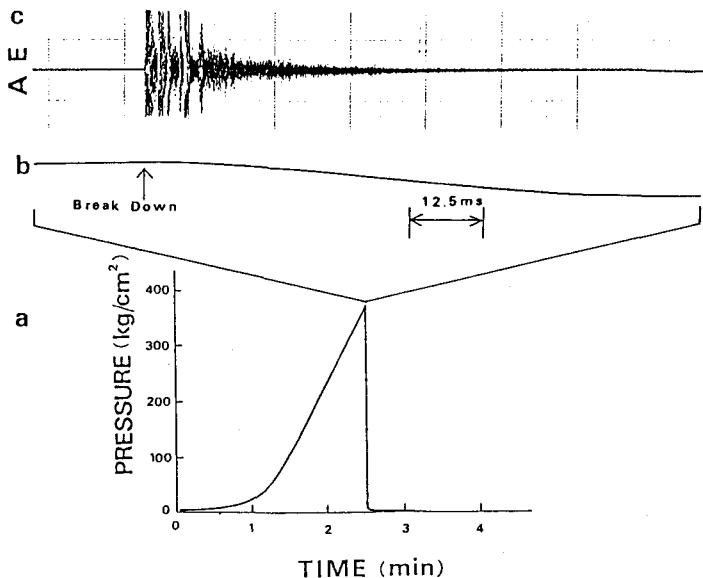


図-2 水圧の経時変化と亀裂形成時に発生したAE

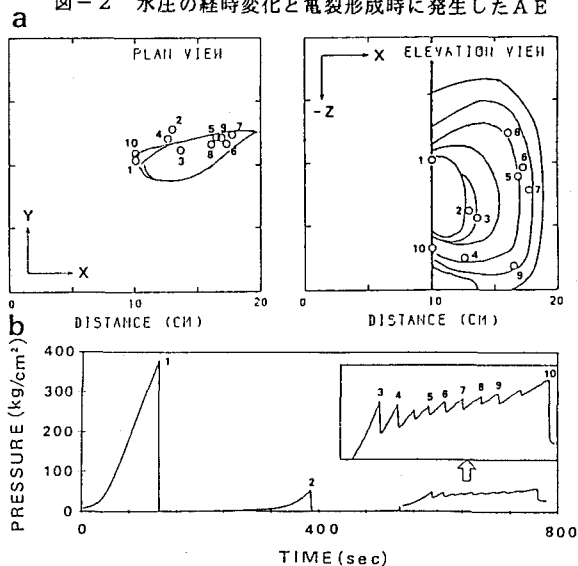


図-3 水圧の経時変化とAEの震源分布

場合では押しのほか引き（初動の方向が震源に近づく方向）も存在することが知られている。

図-4は図-2に示す破壊で発生したAEの1～10センサにおける初動部分の波形を示したものである。ただし、5と7のセンサからの信号はデータ伝送時にトラブルが生じたため省略してある。同図において三角印は初動の到達時刻を示したもので、初動の方向は上向きが引き（D）、下向きが押し（C）である。図よりP波初動の方向は、やや不明瞭な6と10のセンサの方向をのぞき他はすべて押しの方向を示している。なお、AEセンサの極性はすべてのセンサを試料の片面に固定し、もう一方の面に鋼球を当てることにより確認した。同様に残り9個のAEもすべて初動の方向が押しであった。このことから、アクリル試料の場合、水圧破碎により引張り型の亀裂が生じたことがAEの放射パターンから確認された。

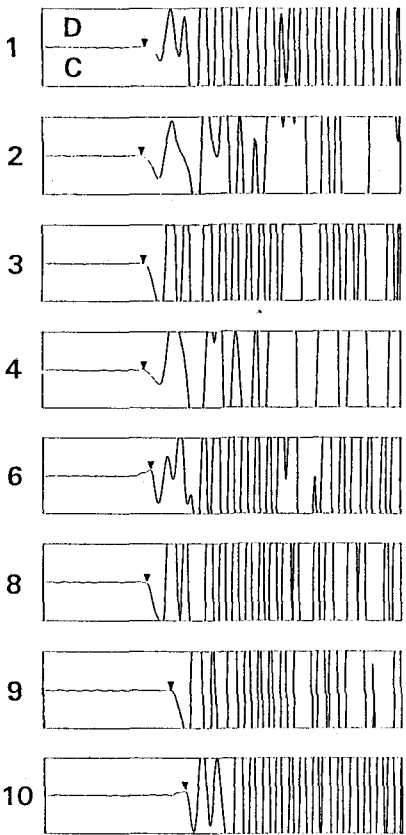


図-4 水圧破碎で発生したAEの例

4. 花崗岩試料の実験結果

超音波測定によれば、稲田花崗岩のP波速度は平均すると4.22km/sec程度であるが、軸方向により最大5%程の異方性をもつ。

4.1 AEの発生様式

図-5(a), (c)は水圧の経時変化と破壊発生時に計測されたAEとを示したものである。

この実験では水圧が13.3kg/cm²の時に亀裂が生じたが、AEは破壊圧力の60～70%頃から発生し始め、亀裂発生時に活動が最も活発になり、その後次第に低下した。また、図から明らかのように、AEは亀裂形成時においても連続的には発生せず、個々のAEを識別できるだけの時間間隔をおいて発生している。最大振幅や振動継続時間より判断すると発生したAEは全体に小さく、アクリル試料の場合の様な亀裂形成に伴うAEの激しい発生は見られない。また、図-5(b)に見られるように、亀裂形成後圧力はゆるやかに低下している。以上が花崗岩試料におけるAEの発生様式の特徴であり、これから花崗岩の場合アクリルに比べて

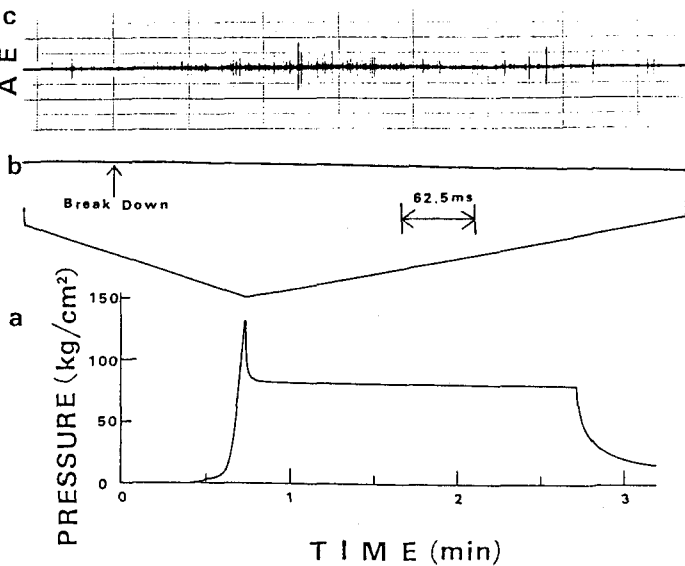


図-5 水圧の経時変化と亀裂形成時に発生したAE

破壊量は小さく、また亀裂はゆっくり進展したと推定される。

4. 2 AEの震源分布

試料のx, y, z各方向でP波速度が異なるため、震源決定は速度の異方性を考慮して行った。実験で発生したAEのうち震源が決定されたAEの震源分布を図-6に示す。図の左上側が平面図、また、左下側と右上側は、それぞれY=0とX=0断面に撮影した深さ分布である。図に示すAEの震源分布より、亀裂は最小抵抗線方向のうちの一つの方に進展したことがわかる。AEの震源分布から推定される亀裂の進展方向は、実験終了後に採取したコアの観察から確認された亀裂の方向とよい一致を示した。このことは水圧破碎で形成された亀裂の規模・形状を評価する上で、AEによるマッピングが極めて有効な方法であることを示すものである。

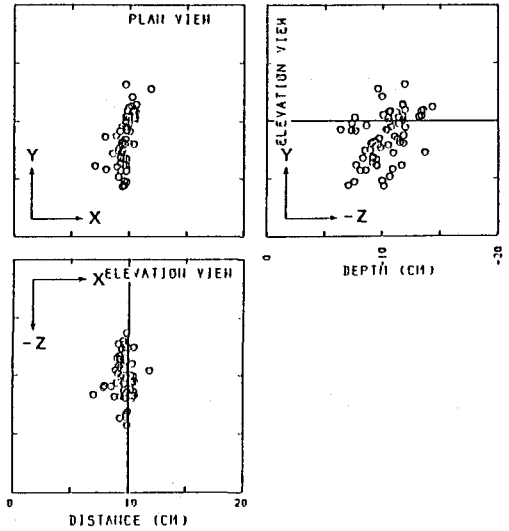


図-6 AEの震源分布

4. 3 AEの発震機構

AEの発震機構の一例を図-7に示す。同図は押し(黒丸)、引き(白丸)をP軸(主応力軸)、T軸(主張力)とともに震源球の下半球に等積図法で投影したもので、図-6に示す震源分布を参考にすると、メカニズムは断層の走行がほぼY軸に平行で傾斜角70°程度の横ずれ断層である。このように、今回の実験では計測されたすべてのAEはせん断破壊から期待される四象限型の押し引き分布を示し、全点で初動の方向が押しを示すAEは見い出されなかった。この結果および亀裂形成時に顕著なAEが発生しなかったことから判断すると、花崗岩のように透水性を有する場合は、水圧破碎によりせん断型の破壊が生じることが明らかとなった。

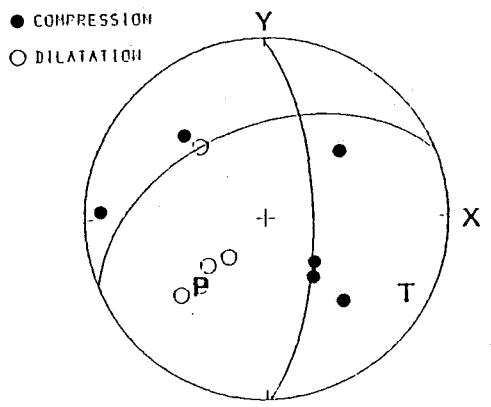


図-7 AEの発震機構

5. まとめ

従来の水圧破碎機構に関する解釈では、亀裂は引張り破壊により発生するとされてきた。しかし、これまでに行われた野外での水圧破碎では、観測されたAEのうち引張り破壊に起因するものは稀れで、ほとんどのものはせん断破壊によることが発震機構解から示されている。この理由としては、天然の岩盤では応力状態や岩盤の異方性などの他、岩盤中の水の浸透の影響が大きいと思われる。このため、水圧破碎機構に及ぼす流体の浸透の影響を検討する目的で室内実験を実施した。その結果、非透水性のアクリル試料では従来通り亀裂は引張り破壊により形成されたのに対し、透水性を有する花崗岩の場合では亀裂はせん断破壊によって発生したことがAEの発震機構から確認され、流体の浸透が水圧破碎による破壊機構に及ぼす影響の大きいことが実験から明らかとなった。

謝辞： 実験に際しては公害資源研究所の佐藤嘉晃主任研究官の御協力と御助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

(22) Mechanism of hydraulic fracturing inferred from acoustic emission

Shunji SASAKI, Tsuyoshi ISHIDA

(Central Research Institute of Electric Power Industry)

Hideo KOBAYASHI, Isao MATSUNAGA

(National Research Institute for Pollution and Resources)

Laboratory hydraulic fracturing experiments of acrylic resin and granite were carried out to detect the acoustic emission (AE) events associated with the failure and clarify the fracture mechanism. 16 AE sensors were mounted on the specimen and full wave forms were measured with a transient recorder.

The results of this study may be summarized as follows :

1. AE events in acrylic resin were primarily tensile failure in nature as inferred from the radiation of the first motions. On the other hand, the focal mechanism solutions showed that all AE events in granite were caused by the shear failure. There was no evidence of the tensile failure in granite.
2. This result suggests that the process of the hydraulic fracture is strongly influenced by rock permeability as well as the stress condition.
3. The pattern of AE events in acrylic resin and granite was remarkably different. A single predominantly large AE event occurred and no AE events followed it in acrylic resin. On the other hand, events began to occur preceding the failure and AE events occurred successively following the failure in granite. In the case, predominantly large AE event was not observed
4. The location of AE events almost agreed with the actual path of fracture obtained using overcoring. Therefore, AE method is very useful for monitoring the process of the hydraulic fracture.