

原位置 A E 計測による水圧破碎亀裂の挙動観測 IN-SITU AE MONITORING FOR A CRACK INDUCED BY HYDRAURIC FRACTURING

中山 芳樹* ・西村 均** ・石田 毅*** ・水田 義明***

Yoshiki NAKAYAMA, Hitoshi NISHIMURA, Tsuyoshi ISHIDA and Yoshiaki MIZUTA

In a hydraulic fracturing stress measurement, magnitudes of stresses are determined from breakdown, shut-in and reopening pressures found in pressure-time record. However, these pressures are not always clear on the record. The authors monitored acoustic emission during hydraulic fracturing stress measurement using a borehole sonde. The AE rates kept good coincidence with breakdown, shut-in and reopening of a hydraulically induced crack. These results indicate that AE monitoring could be used to observe behavior a hydraulically induced crack, and could contribute to improve reliability and accuracy of hydraulic fracturing stress measurement.

Keywords: acoustic emission, hydraulic fracturing, stress measurement, in-situ monitoring

1. はじめに

水圧破碎法による地圧測定では、ボーリング孔壁に水圧を作用させ、圧力-時間曲線の圧力変曲点から亀裂の発生圧や、発生した亀裂の開口圧・閉口圧を読みとることにより応力値を決定する¹⁾。しかしながら圧力-時間曲線は、試験位置の応力状態、岩盤強度あるいは岩質により複雑な挙動を示す場合が多く、明確な変曲点の読み取りが困難な場合が多い。亀裂閉口圧の読み取り法は、接線法、マスカット法、ステップ流量試験による方法など各種の方法が提案されているが、それらにより求められた応力値は、多くの場合ばらつきが見られる。そこで筆者らはこの圧力読み取りの精度向上を目的に、水圧破碎用ダブルパッカに A E センサーを搭載したゾンデを開発し、原位置での水圧破碎試験時に亀裂発生や亀裂閉口に伴って岩盤から発生する A E を計測した。その結果、注水加压による亀裂発生、繰り返しの亀裂再開および亀裂閉口時に対応して A E の発生が急増する事が判明した。この A E の発生が急増する時期は、圧力-時間曲線の変曲点に対応しており、A E が正確な亀裂再開口圧や閉口圧決定に有効であることが明らかとなった。また注水加压による亀裂再開を繰り返すと、A E の発生は次第に時間的遅れを生じることが判明した。これは亀裂が次第に孔壁の奥へ進展する事によるものと思われる。これらの測定結果は、水圧破碎時の原位置 A E 測定が、亀裂進展の動態観測に有効であるとともに、岩盤内応力の測定精度向上に有効であると思われるので、ここに報告する。

* 正会員 (株)日本パブリック 技術開発部
** 正会員 中部電力株式会社 電力技術研究所
*** 正会員 山口大学 工学部 社会建設工学科

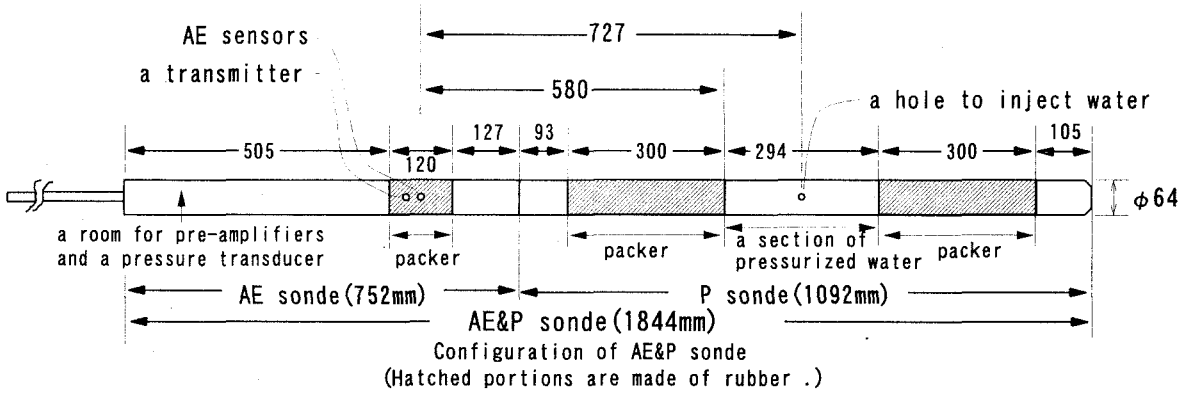


図-1 AE & P ソンデ (構造図)

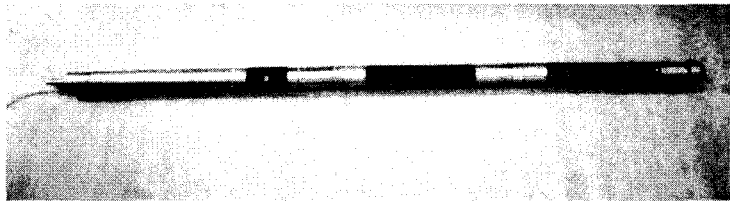


写真-1 AE & P ソンデ

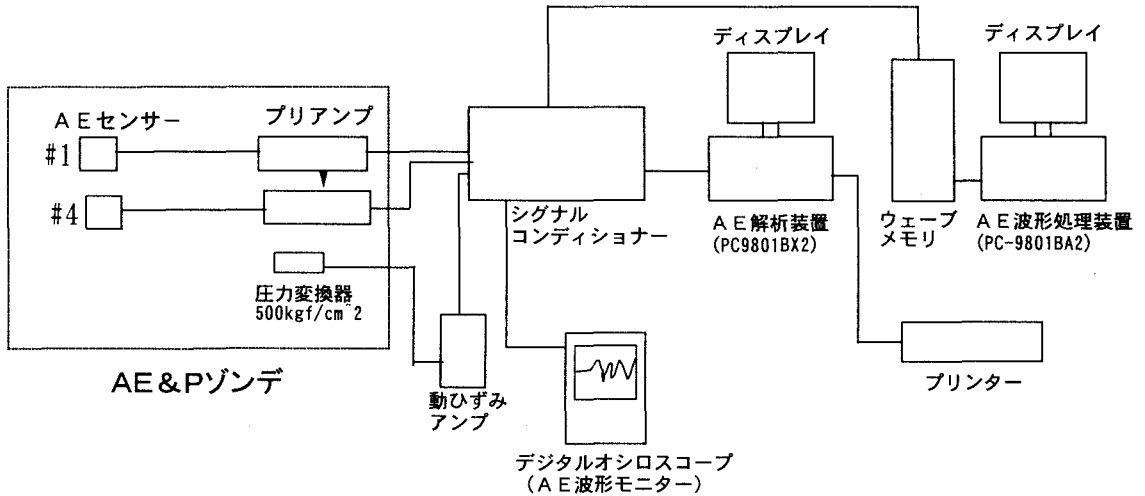


図-2 AE計測システム

2. 原位置試験の方法

2.1 試験装置

原位置試験のために開発した水圧破碎用AE & Pソンド^{2),3)}を図-1および写真-1に示す。図-2は原位置試験に使用したAE測定システムである。AE & Pソンドは直径64mm、長さ1844mmで、水圧破碎用ダブルパッカのPソンドとその孔口側に連結したAEソンドより構成される。図で斜線を施した部分は膨張可能のようにゴムで出来ている。Pソンドは注水孔を中心に、長さ294mmの注水区間とこれを挟む長さ300mmの2つのパッカからなる。AEソンドは長さ120mmのパッカゴムの中心断面に4個の

AEセンサーを90度ずつの等間隔で配置し、孔口側にプリアンプ、圧力変換器を収納したシリンダー一部を連結している。またボーリング孔内にゾンデを設置した際にAEセンサーと孔壁の接触状態を確認するため、センサー配置断面から25mm離れたパッカ上に発振子を1個組み込んでいる。AEセンサーの配置断面は水圧破碎用Pゾンデの注水孔から727mm、最も近い注水区間から580mmの距離である。

AE & Pゾンデに組み込んだAEセンサーは、共振周波数 200kHz の圧電型センサー（(株)富士セラミックス製 AE204）である。センサーで受振したAE信号をゾンデ内のプリアンプで20dB増幅し、シグナルコンディショナー（(株)昭和電気研究所製 NAIS-5000）で100kHzのハイパスフィルターを通し40dBの増幅をした後、AE解析装置(NEC製)で発生頻度などのAEパラメーターを収録した。同時にウエーブメモリーを通してAE波形処理装置(NEC製)にAE波形を収録した。

2.2 原位置試験

原位置試験ではAE & Pゾンデを所定の試験位置に挿入した後、それぞれ独立した加圧装置によりPゾンデのダブルパッカ、AEセンサーを試験孔壁に圧着させ、注水加圧による試験を行う。水圧破碎試験は注水量を毎分500ccに設定して注水系のエア抜きを十分した後、排水系を閉じて注水を行い圧力を上昇させる。

試験は、注水加圧による亀裂発生後直ちに注水を停止し、圧力降下を測定する。以後再加圧→注水停止を繰り返し行い、亀裂再開口、閉口による圧力変化を測定した。

試験時の測定項目は、送水による圧力-時間-流量変化とAE発生頻度、AE波形の収録である。

3. 試験結果

図-3に原位置水圧破碎試験で測定した亀裂発生時、続いて行った3回の亀裂再開口時の圧力-時間曲線に、AE発生頻度を棒グラフで表示した。図は横軸に時間(s)、縦軸左に注水圧力(MPa)、右軸に0.8秒間毎のAE発生数を示してある。

試験の結果、圧力-時間曲線から読み取った亀裂発生圧(Pb)は15.7Mpa

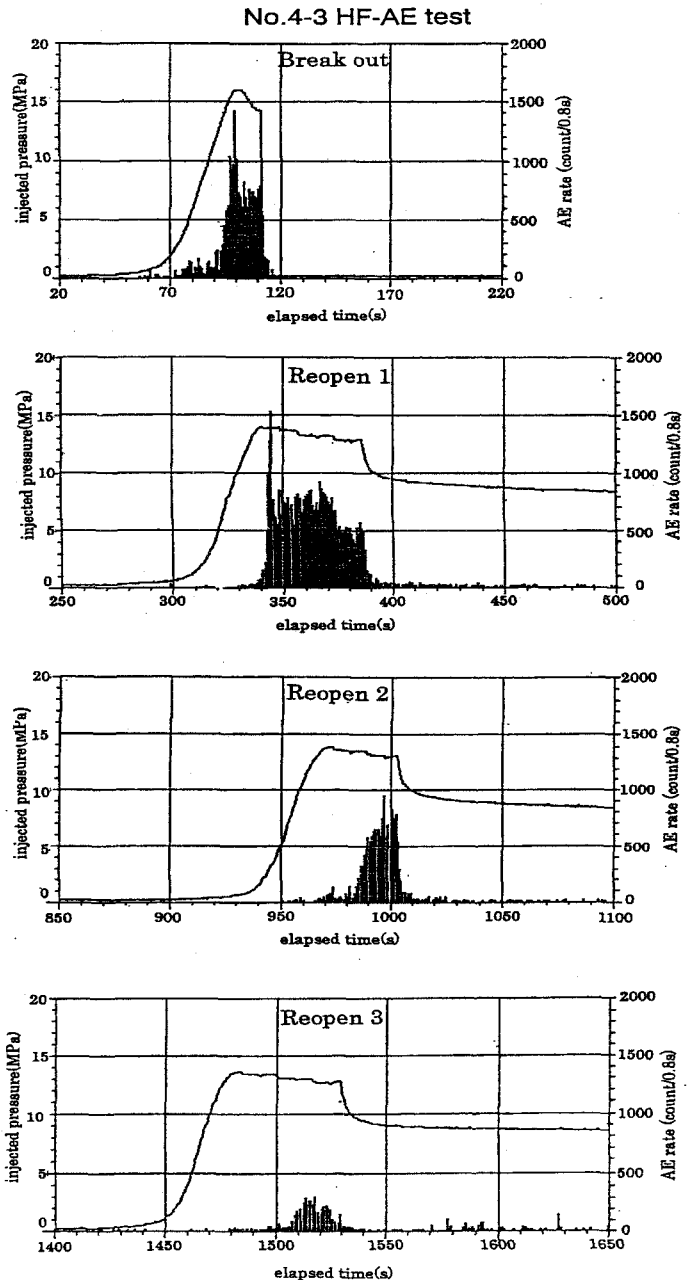


図-3 圧力-時間-AE発生頻度(test 4-3)

であり、繰り返し行った亀裂再開口圧(P_r)の平均値は 13.1MPa、接線法により求めた 亀裂閉口圧(P_s)は 10.6MPa である。

この試験の A E 発生数を圧力と対比すると、1 回目の注水による亀裂発生前の圧力増加段階では、注水開始から約 90 秒後の 13MPa 付近から A E 発生が急増し、100 秒後の亀裂発生圧 15.7MPa で A E 発生数はピークに達している。注水は約 110 秒で停止したが、A E の発生は減少するものの約 115 秒まで続いている。

2 回目の注水加圧による亀裂の再開口 1 回目では、圧力がピークを示す亀裂再開口時に A E 発生はほとんど認められず、亀裂開口に約 5 秒遅れの 342 秒付近から A E 発生が急増する。A E は注水中の 385 秒まで多数発生しており、停止後約 5 秒でほとんど発生しなくなる。

3 回目の注水すなわち再開口 2 回目では、亀裂再開口直後あまり A E の発生は認められないが、再開口の約 20 秒後から A E 発生は増加し注水停止まで多数発生している。

4 回目では A E 発生が再開口の約 30 秒後から増加するが、その発生数は前の注水時に比較して減少している。

A E の発生数について、図-3 の亀裂発生とその後 3 回の亀裂再開口を対比すると、亀裂発生時の A E は圧力がピークを示す直前から急増するが、再開口時には圧力がピークを示した後、すなわち亀裂が開いた後で発生が増加し、その発生時間は再開口を繰り返すことにより、遅れを生じる事が判明した。

図-4 は同一地点でボーリング孔を変えて実施した試験である。測定は図-3 の設定よりシグナルコンディショナーでの増幅を 10dB 上げた設定で、プリアンプとメインアンプで計 70dB 増幅して測定した。

図-4 は亀裂再開口 4 回目の注水加圧期間およびその前後で、試験開始から 2300 秒から 2400 秒間の拡大図であり、棒グラフは 0.4 秒間毎の A E 発生数である。なお右上に挿入した添付図は接線法による亀裂閉口圧を読み取った値であり、閉口圧は 9.9MPa であった。

図-4 の A E 発生は、試験経過時間の 2322 秒から急増し 2325 秒でピークに達する。その後も注水圧は上昇するが A E の発生数は減少し 2328 秒で定常値となる。この A E 発生が定常値となる 2328 秒の圧力は 10.7MPa である。なお亀裂再開口後の継続した注水による定常圧は、図に示した通り 10.9MPa であり 2328 秒の圧力と 0.2MPa の差が認められる。この差は亀裂に注水する抵抗圧あるいは亀裂進展に関係する圧力と考えられる。すなわち、2328 秒の 10.7MPa で亀裂が開いた後、流体の抵抗圧 0.2MPa を加えた

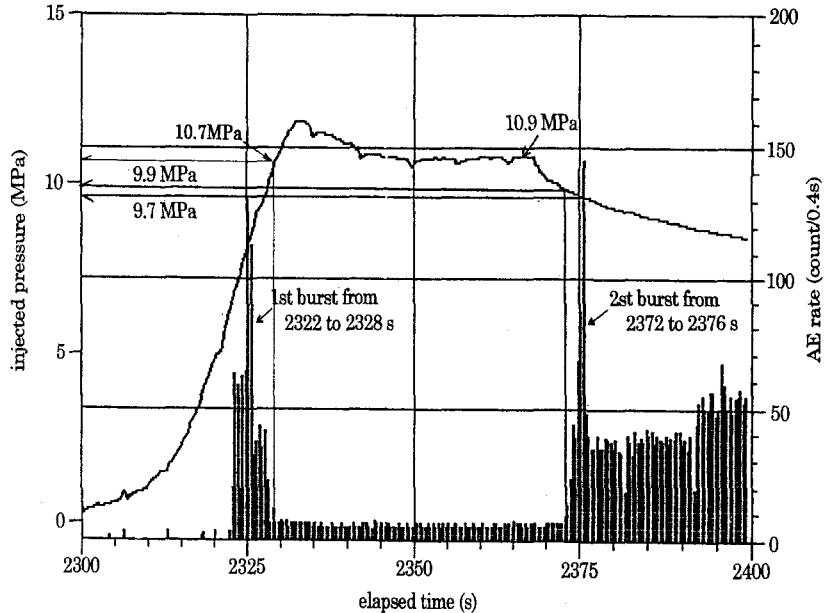
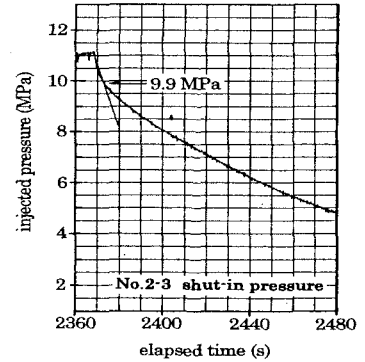


図-4 圧力-時間-A E 発生頻度 (test 2-3)

10.9MPa で亀裂から岩盤内に流入しながら、亀裂の開口を維持したものとされる。試験は 2368 秒で注水を停止するが、A E の発生数は送水停止 4 秒後の 2372 秒まで定常値のままであり、以後 A E は急増し 2376 秒でピーク値を示す。A E 急増点の圧力は 9.9MPa、A E 発生数がピークの値は 9.7Mpa である。この A E 急増点の 9.9MPa は亀裂閉口圧と一致している。

4. 亀裂の挙動と A E 発生頻度

水圧破碎試験による亀裂再開口を繰り返すと A E の発生は、図-3 に示したように亀裂開口から発生時間が次第に遅れて発生する事が判明した。このことは、再開口の繰り返しにより亀裂が次第に孔壁の奥へに進展する、すなわち、亀裂の先端が加圧している孔壁から次第に遠くなり、水が亀裂内に充填されて亀裂先端に圧力が作用するまでに時間を要するようになるためと思われる。また繰り返しによる A E 発生数の減少は、亀裂面の微小な凹凸の摩耗が進み亀裂面が平滑になり、A E を発生する岩片の微小破壊が少なくなるためと思われる。

注水停止による A E の発生は、図-4 の 2372 秒からの発生数が急増する現象が示す通り、圧力低下に従って亀裂が次第に口を閉じる現象を捉えたものと思われる。亀裂は 2372 秒から閉じ始め 2376 秒で元の閉口状態に戻ったものと思われる。この 2376 秒の圧力は接線法で得た亀裂閉口圧 9.9MPa と一致している。

なお、図-3 および図-4 の 2 回の試験を比較すると、明らかに A E の発生状況が異なっている。これは試験位置の岩盤物性あるいは岩質の違いによるものと思われるのと同時に、図-4 の試験で亀裂発生時に 60dB 増幅ではほとんど A E 発生を測定出来なかったため、亀裂再開口時に計測条件のアンプ増幅を 60dB から 70dB へ上げたことに起因すると思われる。

5. まとめ

新たに開発した A E & P ゾンデを用いて、原位置での水圧破碎試験を実施した。その結果、測定した A E は水圧破碎による圧力-時間曲線によく対応しており、岩盤内応力の測定精度向上に有効であることが明らかとなった。また水圧破碎の試験圧力と A E 発生頻度を比較したところ、次のことが判明した。① A E 発生頻度は、水圧破碎試験による亀裂発生あるいは亀裂開口、閉口時の挙動をよく捉えており、亀裂発生圧、亀裂再開口圧及び閉口圧を精度良く決定する事が出来る。② 亀裂発生時の A E は、亀裂が生ずる前から次第に増加し、亀裂発生時に A E 発生数の最大値を示す。また注水停止による圧力降下時には、亀裂が閉じ始めるとともに A E の発生は増加し、亀裂が完全に密着する段階で発生数はピークを示すものと思われる。③ 注水加圧による亀裂の開口を繰り返すと、A E の発生に時間的遅れを生ずることが判明した。このことは亀裂が孔壁から次第に奥へ進展していく状況を捉えたものと思われる。

なお、原位置水圧破碎試験時の A E 測定は、試験位置の岩盤状況あるいは測定条件の設定に大きく影響されることが明らかとなった。今後原位置岩盤状況に応じた測定条件設定の確立と、それに対応した機器の改良を進めていきたいと考えている。

6. 参考文献

- 1) 例えば、Mizuta, Y., Sano, O., Ogino, S. and Katoh, H. : Three dimensional stress determination by hydraulic fracturing for underground excavation design, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.24, No.1, pp.15-29, 1987.
- 2) 石田毅・田仲正弘・桑原和道・金川 忠・水田義明：A E ゾンデによる水圧破碎亀裂方向推定のための理論的・実験的検討、土木学会論文集 No.529/Ⅲ-33, pp.165-176, 1995.12.
- 3) 石田 毅：岩盤破壊音の科学、近未来社、pp.150-154, 1999.