

### (37) 水圧破碎地殻応力計測法におけるき裂開口圧に及ぼす諸因子の影響

東北大学流体科学研究所 正会員 ○ 伊藤高敏  
東北大学流体科学研究所 川井健一  
東北大学流体科学研究所 正会員 林 一夫

#### Effects of Various Factors on Reopening Pressure of Hydraulic Fracturing Stress Measurement

Takatoshi ITO, Tohoku University  
Kenichi KAWAI, Tohoku University  
Kazuo HAYASHI, Tohoku University

#### Abstract

The reopening behavior of pre-existing crack due to borehole pressurization with a constant injection flow rate was analyzed based on the linear theory of elasticity and also on linear fracture mechanics. Then, the effects of various factors, i.e., fluid volume in a packer system, crack geometries and in-situ stresses, on the so-called reopening pressure was clarified theoretically for hydraulic fracturing stress measurement. The results show that the apparent reopening pressure, i.e., the borehole pressure at which the pressure vs. time history clearly deviates from a linear behavior, decreases with decreasing fluid volume in the packer system, and approaches the actual reopening pressure, i.e., the borehole pressure at which the reopening of crack lip occurs actually at the borehole wall. In the case of the packer system with small fluid volume, the value of apparent reopening pressure is nearly equal to that of actual reopening pressure independently of the crack geometries and the in-situ stresses. Hence, if the packer system with small fluid volume is used, the actual reopening pressure can be detected approximately from the apparent reopening pressure and can be applied as a reliable data for evaluation of the in-situ stresses.

#### 1. 緒 言

水圧破碎地殻応力計測法では、水圧破碎時に観測されるき裂開口圧およびき裂閉口圧という二つのボアホール水圧データから、ボアホールに直交する面内に作用する二つの地殻主応力（初期応力）の大きさを決定する<sup>(1)</sup>。ここで、き裂開口圧とは予めき裂（縦き裂）を作成したボアホールを一定流量で再加圧した際、ボアホール水圧の経時変化が線形から非線形に変わるときのボアホール水圧と定義され、き裂閉口圧とは注水停止後にき裂内水圧が減少する過程で、水圧とき裂面垂直方向の地殻圧縮応力とが平衡したときのボアホール水圧と定義される。しかしながら、前者のき裂開口圧に関する最近の研究で、上記の定義によるき裂開口圧（以下、見かけのき裂開口圧と呼ぶ）は後者のき裂閉口圧に本質的に等しく、さらに、き裂が実際に開き始めるときの水圧（以下、真のき裂開口圧と呼ぶ）とは一般に一致しないことが明らかになっている<sup>(2)・(3)</sup>。この結果は、見かけのき裂開口圧とき裂閉口圧に基づく上記の従来法<sup>(1)</sup>では、地殻応力の大きさを決定できないことを意味する。一方、真のき裂開口圧はき裂閉口圧とは独立した水圧で、かつ、同水圧と地殻応力との間には従来考えられていたき裂開口圧と地殻応力との関係に類似したある明確な関係が成立することが明らかになっている<sup>(2)</sup>。したがって、見かけのき裂開口圧の代わりに真のき裂開口圧を用いることが出来れば、その水圧とき裂閉口圧から地殻応力の大きさを決定することが可能となる。しかし、その真のき裂閉口圧を測定する方法は未だに明らかになっていない。

以上の点に鑑み本研究では、真のき裂閉口圧を地殻応力計測に用いることを目的とし、前報<sup>(2)</sup>の数値シミュレーションに基づいて、見かけのき裂閉口圧と真のき裂閉口圧間の差異に及ぼす諸因子の影響を検討した。この結果、水圧破碎に用いる加圧系の体積および水圧破碎時の圧入流量等の条件を適当に調整すれば、見かけのき裂閉口圧から真のき裂閉口圧を近似的に評価できることが明らかになった。

## 2. 数値シミュレーション

図-1に示すようにボアホールに直交する面が地殻応力主面になっているものとし、この面内に作用する地殻主圧縮応力を  $S_1$ 、 $S_2$  ( $S_1 \geq S_2$ ) とする。このとき、き裂（縦き裂）は  $S_1$  の方向に形成される。簡単のため岩体は不透水性であり、ボアホールに直交する平面内の平面ひずみ状態にあるものとする。また、き裂が力学的に閉じた状態にあっても向かい合うき裂面上の凹凸が噛み合わず、噛み合わない部分が連なって水の通路となるき裂内の空隙の存在を考慮して、き裂の開口幅  $w$  を次式で評価する。

$$w(x) = w_0 + w_m(x) \tag{1}$$

ここに、 $x$  はボアホール中心を原点としてき裂線方向にとった座標、 $w_0$  は凹凸による空隙の大きさを表す定数、 $w_m$  はボアホール水圧とき裂内の水圧によって変化するき裂開口幅である。以上の条件の基に、き裂内の水の流れの問題とき裂問題を連成させて解き、ボアホールを一定流量  $Q$  で再加圧したときのボアホール水圧  $P$  の経過時間  $t$  による変化挙動を調べた。その結果の一例を図-2に示す。計算に用いた諸値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} S_1 &= 15 \text{ MPa}, & S_2 &= 10 \text{ MPa}, & p_0 &= 3 \text{ MPa}, & Q &= 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}, & V &= 10^{-1} \text{ m}^3, \\ a &= 0.05 \text{ m}, & c &= 1 \text{ m}, & h &= 1 \text{ m}, & w_0 &= 2 \mu\text{m}, \\ G &= 25 \text{ GPa}, & \nu &= 0.2, & \mu &= 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{sec}, & \beta &= 0.5 \text{ GPa}^{-1} \end{aligned}$$

ここで  $p_0$  はボアホールおよびき裂内の初期水圧、 $V$  は流量調整バルブより下流側でき裂が閉じた状態での加圧系内の水の体積、 $a$  はボアホール半径、 $c$  および  $h$  はそれぞれき裂の半径方向の長さおよびボアホール軸方向の高さ、 $G$  および  $\nu$  はそれぞれ岩体のせん断弾性係数およびポアソン比、 $\mu$  は水の粘性係数、 $\beta$  は水の圧縮率である。また、図-2中の  $2L$  はき裂全体の中で  $w_m > 0$  の部分の長さ（図-1）である。図-2の結果より、ボアホール水圧が約11 MPa になったところでボアホール水圧と時間の関係が明らかに線形から非線形に変化していることがわかる。つまり、図-2の例の見かけのき裂開口圧  $P_r^{(a)}$  が約11MPaであることがわかる。一方、真のき裂開口圧  $P_{r0}$  と地殻応力との関係は次式で与えられる<sup>(2)</sup>。

$$P_{r0} = \frac{1}{2}(3S_2 - S_1) \tag{2}$$

したがって、図-2の例では  $P_{r0} = 7.5 \text{ MPa}$  となる。

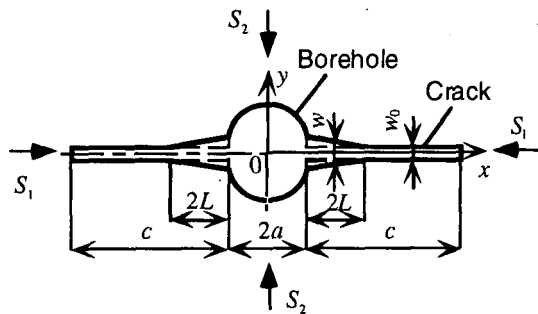


図-1 ボアホールと縦き裂

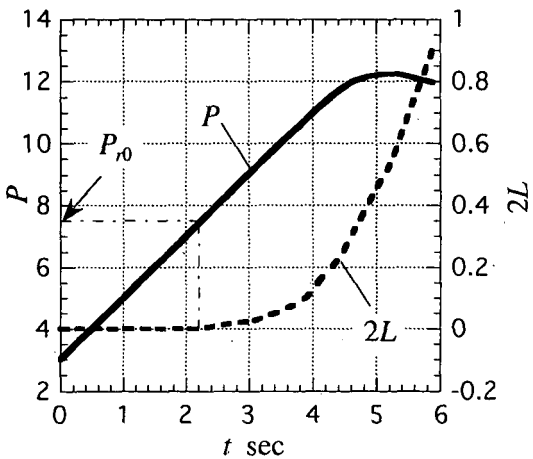


図-2 ボアホール水圧  $P$  およびき裂開口部長さ  $2L$  の経時変化

### 3. き裂開口に伴うボアホール水圧変化のメカニズム

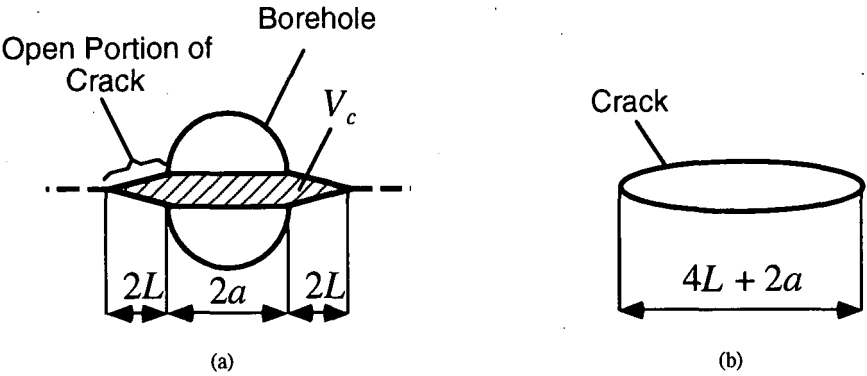


図-3 き裂と体積  $V_c$

上記のように真のき裂開口圧と見かけのき裂開口圧とは一般に一致しない。その原因をここで考察する。まず、簡単のため圧入流量  $Q$  は十分に小さいものと仮定する。このとき、再加圧時のボアホール水圧  $P$  と時間  $t$  の関係は近似的に次式で与えられる。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q}{dV_c/dP + \beta V} \tag{3}$$

ここで、 $V_c$  はき裂内部の水の体積とき裂開口に伴って増加したボアホール内の水の体積の和である（図-3(a)）。さて、式(3)において  $Q$  は一定であるから、左辺つまり  $P$  vs  $t$  曲線の勾配は右辺分母の  $dV_c/dP$  と  $\beta V$  の比によって変化することがわかる。そこで、 $dV_c/dP$  の  $\beta V$  の比と開口部分のき裂長さ  $2L$  との関係を調べてみた。ただし、簡単のため開口幅  $w_m$  を図-3 (b)に示すようなボアホールのない二次元き裂の開口幅<sup>(6)</sup>で近似した。このとき  $dV_c/dP$  は次式で与えられる。

$$\frac{dV_c}{dP} = \frac{2h(1-\nu)}{G} \left[ (a+2L)^2 \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \sin \left( 2 \sin^{-1} \frac{a}{a+2L} \right) - \sin^{-1} \frac{a}{a+2L} \right\} + a \sqrt{(a+2L)^2 - a^2} \right] \tag{4}$$

結果を表-1に示す。この結果からわかるように、き裂開口部の長さがボアホール半径の2倍程度になっても  $dV_c/dP$  と  $\beta V$  の比は高々数 %程度にしかなっていない。また、このために、き裂が開口しても直ちにはボアホール水圧の経時変化が非線形にはならず、見かけのき裂開口圧と真のき裂開口圧との間に差が生じてしまうもの

表-1  $dV_c/dP$  と  $\beta V$  の比と  $2L$  の関係

| $2L/a$ | $(dV_c/dP)/(\beta V)$ [%] |
|--------|---------------------------|
| 1      | 1.34                      |
| 2      | 3.55                      |
| 3      | 6.75                      |
| 4      | 11.0                      |
| 5      | 16.2                      |

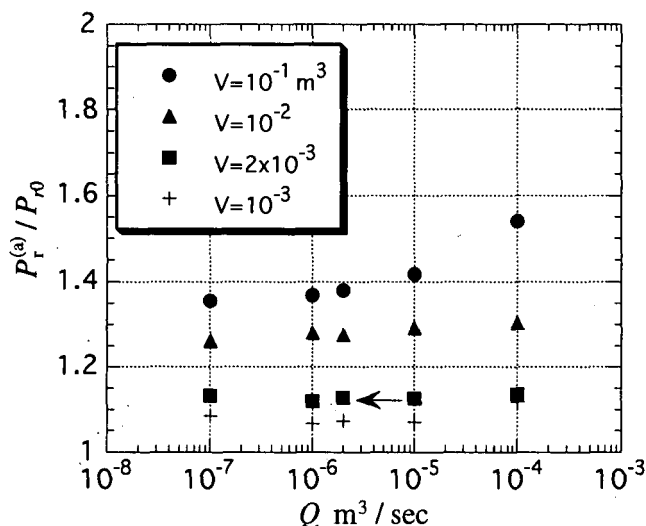


図4 見かけのき裂開口圧の体積  $V$  による変化

と考えられる。ところで、 $dV_c/dP$  の大きさは式(4)からもわかるように体積  $V$  の大きさとは全く無関係に決まる量である。したがって、 $V$  を小さくすれば  $dV_c/dP$  と  $\beta V$  の比が大きくなり、この結果、見かけのき裂開口圧と真のき裂開口圧との差も小さくなることが予想される。そこで、見かけのき裂開口圧が体積  $V$  によって変化する様子を上述の数値シミュレーションで調べてみた。その結果を図-4に示す。この結果より、予想通り見かけのき裂開口圧  $P_r^{(a)}$  は体積  $V$  が小さくなるほど真のき裂開口圧  $P_0$  に近づいていくことがわかる。また、見かけのき裂開口圧  $P_r^{(a)}$  は圧入流量が小さくなるほど小さくなる傾向があるが、この傾向は、体積  $V$  が小さくなるとめだたなくなつて、 $V$  が十分小さくなると  $P_r^{(a)}$  が圧入流量によらずほぼ一定となることがわかる。これらのことより、体積  $V$  の十分小さいシステムで水圧破砕を行えば、見かけのき裂開口圧から真のき裂開口圧を近似的に評価できると考えられる。しかしながら、水圧破砕システムの構造上、体積  $V$  を極端に小さくすることは不可能である。また、岩体は多少なりとも透水性があり、圧入流量が小さくなるほど透水性の影響が顕著になってき裂開口圧が不明確になる可能性が大きい。さらに、水の圧入開始からき裂が開くまでの時間があまりにも短いと圧入流量一定の条件で加圧することが困難になると考えられる。そこで、これらの条件と図-4の結果を勘案し、以下では、見かけのき裂開口圧から真のき裂開口圧を近似的に評価するために次のような圧入流量と体積の組み合わせを用いるものとして検討を進めることにする。

$$Q = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec} (= 120 \text{ cc/min}),$$

$$V = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 (= 2 \ell)$$

なお、このときの図-4の結果における真のき裂開口圧に対する見かけのき裂開口圧の誤差は13% (図-4中の矢印の付いた結果)、加圧開始からき裂が開くし始めるまでの時間は約3秒である。まず、見かけのき裂開口圧の真のき裂開口圧に対する誤差に及ぼす地殻応力比  $S_1/S_2$  の影響を調べた結果を図-5に示す。ただし、 $V$ 、 $Q$  および  $S_1$  以外の数値シミュレーションに用いた数値は図-2の場合と同じとした。この結果

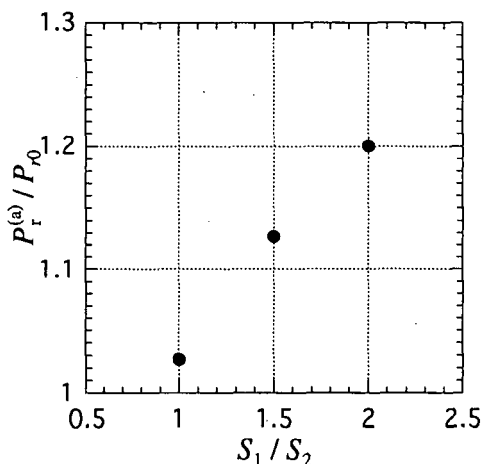


図5 見かけのき裂開口圧  $P_r^{(a)}$  の地殻応力比  $S_1/S_2$  による変化  
( $Q = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $V = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  の場合)

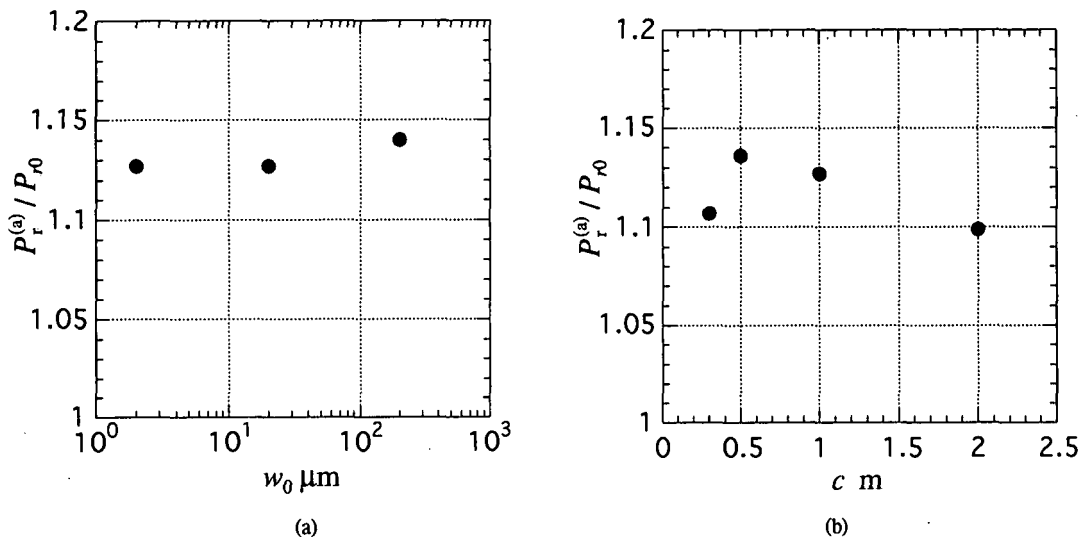


図-6 見かけのき裂開口圧  $P_r^{(a)}$  の(a)初期き裂開口幅  $w_0$  および(b)き裂長さ  $c$  による変化 ( $Q=2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $V=2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  の場合)

より,  $S_1/S_2$  が大きいほど誤差も大きくなるが,  $S_1/S_2$  が2以下の範囲では, 約 20 % 以下の誤差の範囲内で真のき裂開口圧を評価できることがわかる. なお, 圧入流量が同じでも体積が  $V = 10^{-1} \text{ m}^3$  の場合には約 100 % の誤差となる. 一方, 見かけのき裂開口圧の真のき裂開口圧に対する誤差に及ぼす  $w_0$  およびき裂長さ  $c$  の影響を調べた結果をそれぞれ図-6(a)および(b)に示す. ただし,  $V$ ,  $Q$  および  $w_0$  (あるいは  $c$ ) 以外の諸値は図-2の場合と同じとした. 図-6の結果より,  $w_0$  は誤差にほとんど影響しないことがわかる. また, 誤差は  $c$  によって多少変化するものの約 14 % 以下の誤差の範囲内で真のき裂開口圧を評価できることがわかる. したがって, き裂開口圧等を使って  $S_2$  の大きさを決定するものとするれば, その結果と, 加圧系体積の十分小さい水圧破砕システムを用い十分小さい圧入流量で測定した見かけのき裂開口圧 ( $\equiv$  真のき裂開口圧) から, 式(2)の關係に従って  $S_1$  の大きさを評価できる.

最後に, 本研究は文部省科研費奨励研究(A) (課題番号06750078) によるものであることを記し, 謝意を表する.

## 参考文献

- (1) Zoback, M.D., Healy, J.H., Roller, J.C.; Preliminary stress measurements in central California using hydraulic fracturing technique, *Pageoph*, Vol.115, pp.135 - 152, 1977.
- (2) 伊藤高敏, 林一夫; 水圧破砕地殻応力計測における縦き裂開口挙動の解析, 日本機械学会論文集(A)編 57巻, pp.1715-1719, 1991.
- (3) 伊藤高敏, 林一夫; 水圧破砕地殻応力計測における縦き裂のき裂開口圧と地殻応力の関係, 日本機械学会論文集(A)編, 58巻, pp.72-77, 1992.
- (4) 伊藤高敏, 林一夫; 水圧破砕地殻応力計測における横き裂開口挙動の解析, 日本機械学会論文集(A)編, 59巻, pp.1287-1291, 1993.
- (5) Ito, T., Hayashi, K.; Analysis of crack reopening behavior for hydrofrac stress measurement, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.30, pp.1235-1238, 1993.
- (6) Tada H., Paris, P., Irwin, G.; *The stress analysis of cracks handbook*, 2nd Ed., Paris Production Incorporated, p.5.1a, 1985.