

(21) 地圧計測のための水圧破碎データの解析

公害資源研究所 厨川 道雄
小林 秀男
松永 烈
小杉 昌幸

1. はじめに

水圧破碎技術は、地圧計測法として従来から用いられてきた。最近水田らは水圧破碎によって3次元の応力測定を行うなど、この分野で新しい研究開発がさかんに行われている。地圧計測のための水圧破碎法は、深部における計測が可能であること、比較的大きなスケールでの測定ができることなどの長所を有している。しかし、オーバーコアリング法による地圧測定では、応力解放による岩盤の変位の計測結果に基づいて行われる理論解析が確立しているが、水圧破碎法では得られたデータとフラクチャの進展などの地下の岩盤の挙動との相関性が必ずしも明確になっていない。これまで数多くの研究者が、それぞれの立場で水圧破碎データの解析を行っている。水圧破碎法を地圧計測法として確立するには、どのような過程で計測を行い、得られたデータをどのように解析するかを、岩盤の挙動を考慮に入れたいうで明らかにする必要がある。著者らは、このような観点に立って、室内および現場において水圧破碎実験を行っている。ここでは、水圧破碎データをどのような考え方にに基づき解析しているかについて述べる。

2. 水圧破碎によりボアホール壁面に生ずる応力の解析

水圧破碎に Fig. 1 に示すようなパッカーを使用すると、ボアホール軸方向に作用する水圧は、パッカーのロッドによってほとんど吸収されるので、ボアホール壁面には伝わらない。したがって、パッカーを用いてボアホールに加える水圧は、ボアホール軸と直交する面内のみに作用すると考えた解析ができる。

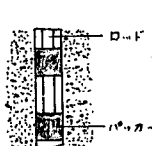


Fig. 1

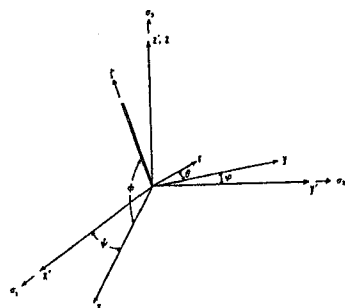


Fig. 2

Fig. 2 に示すように直角座標 $x'y'z'$ をとり、それぞれ方向に主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ が作用する岩盤内に掘削されたボアホールを考える。次に、 z 軸と z 軸を一致させ、 z 軸とボアホール軸を通る平面が $x'y'$ 平面と交わる線を x 軸、 x 軸および z 軸と直交する方向に y 軸をとる。さらに、ボアホール軸に沿って z 軸、 z 軸と直交する面内に y 軸を基準として、 r 軸、 θ 軸をとる。 r, θ は円柱座標系をなすようにする。ボアホール方向と Fig. 2 に示すように ψ, ϕ で表すと、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ および水圧 P_w によってボアホール壁面に生ずる応力は、次式で与えられる。³⁾

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -P_w \\ \sigma_\theta &= 2\alpha_1 - 4\alpha_2 \cos 2\theta - 4\alpha_3 \sin 2\theta + P_w \\ \sigma_z &= \beta_1 - 4\alpha_2 \nu \cos 2\theta - 4\alpha_3 \nu \sin 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= 0 \\ \tau_{\theta z} &= 2\gamma_1 \cos \theta + 2\gamma_2 \sin \theta \\ \tau_{rz} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 ν は岩盤のポアソン比、 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \gamma_1, \gamma_2$ はボアホール方向 ψ, ϕ と主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を変数とする係数である。このような応力状態のもとで、水圧破碎によってフラクチャがどのように形成されるか検討する。

1) 最大応力の方向にフラクチャが生ずる場合

(1) 式に示す応力状態において ボアホール壁面内に主応力面が存在するので、 θ 面内では応力が最大値(σ_m)を示す角度 γ_m と σ_m は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_m &= \frac{1}{2} \tan^{-1} 2\tau_{\theta_j} / (\sigma_{\theta} - \sigma_j) \\ \sigma_m &= \frac{1}{2} \{ \sigma_{\theta} + \sigma_j + \sqrt{(\sigma_{\theta} - \sigma_j)^2 + 4\tau_{\theta_j}^2} \} \end{aligned} \right\} (2)$$

(2) 式で与えられる σ_{θ} は、水圧(P_w)の関数となっているので、水圧によって σ_m と γ_m の値が変わる。さらに、 σ_m , γ_m と θ の関数であるため、 θ を $0 \sim 360^\circ$ の間で変化させ、 σ_m が最大値(σ_m)を示すときの θ の値(θ_m)と求めなければならない。

2) ボアホール軸に沿ってフラクチャが生ずる場合

水圧破壊を行うと、ボアホール軸に沿ってフラクチャが形成されることが多い。このような場合には、ボアホールと直交する面内の応力のみを考えればよい。 σ_{θ} が最大値を示すような θ の値(θ'_m)とそのときの σ_{θ} の値($\sigma'_{\theta m}$)は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \theta'_m &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \alpha_2 / \alpha_1 \\ \sigma'_{\theta m} &= 2\alpha_1 - 4\alpha_2 \cos 2\theta'_m - 4\alpha_3 \sin 2\theta'_m + P_w \end{aligned} \right\} (3)$$

θ'_m は水圧(P_w)とは無関係なので、水圧によって破壊発生箇所が変わることはない。

さて、具体例をもとにフラクチャがどのような方向に発生するかを検討する。そのために $\sigma_1 = -70 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_2 = -100 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_3 = -130 \text{ kgf/cm}^2$ とする。ボアホール壁面にとどのような応力が生ずるかを、 $\psi = 30^\circ$, $\phi = 0 \sim 90^\circ$ として、最大応力(σ_m)とボアホール軸方向の面に働く接線応力(σ_{θ})の θ による変化を示したものが Fig. 3 である。ただし、水圧(P_w)は 0 とした。ボアホールの方向に合わせられず、 σ_m と σ_{θ} の差がかなりあることがわかる。そこで、ボアホールに水圧を加えると両者の関係がどのようなになるかを 1) $\psi = 30^\circ$, $\phi = 60^\circ$, 2) $\psi = 30^\circ$, $\phi = 30^\circ$ の 2 例について検討する。

まず、 $\psi = 30^\circ$, $\phi = 60^\circ$ の場合について、水圧(P_w)を 0 から 300 kgf/cm^2 まで 100 kgf/cm^2 毎に増やし、 σ_m と σ_{θ} の θ による変化を Fig. 4 に示す。この図から、水圧を増加するにつれて、 σ_m の最大値(σ_m)を与える θ の値(θ_m)が θ'_m に近づくことがわかる。水圧が 200 kgf/cm^2 に達するとボアホール壁面に引張応力が生じ、 σ_m は

66 kgf/cm^2 , σ'_m は 62

kgf/cm^2 となる。したがって

θ が 126° で、ボアホール軸と -13° をなす方向に破壊が発生する可能性が高い。

そこで、この方向に沿う面と直交する方向の応力の θ に伴う変化を σ_{θ} とともに

Fig. 5 に示す。この図から、先に述べた位置と方向

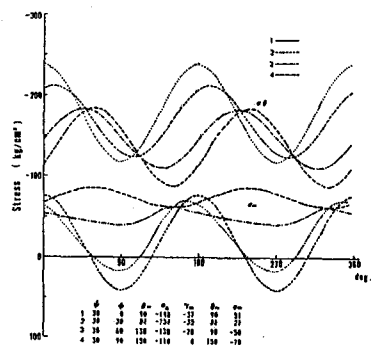


Fig. 3

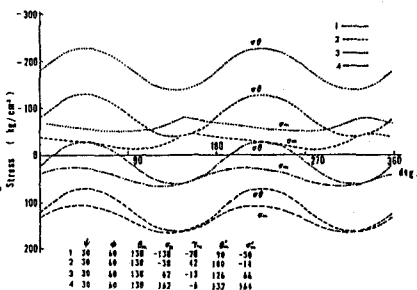


Fig. 4

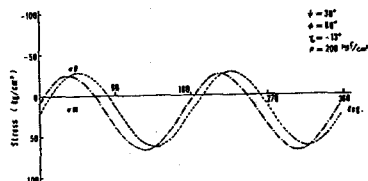


Fig. 5

に破壊が発生しても、 θ が 12° 変化する位置すなわち $\theta=138^\circ$ に達すると、 σ_θ の値がこの面と直交する応力よりも大きくなるので、フラクチャはボアホール軸方向に向きを変えると思われる。したがって、水压破壊によりボアホール軸の方向にフラクチャが形成された場合、応力 σ_m によって θ_m の位置で形成されたものと考えられることから、ボアホール軸と直交する面内の2次元問題として圧力データやフラクチャの位置を解析してもよいことがわかる。

Fig. 6は、 $\psi=30^\circ$ 、 $\phi=30^\circ$ で、 P_w が 200 kgf/cm^2 のときの、応力が最大値を示す方向 γ_m に沿う面と直交する方向の応力と σ_θ の θ に伴う変化を示すものである。 σ_m が 46 kgf/cm^2 であるのに対し、 σ_m は 124 kgf/cm^2 であるから、 θ が 270° の位置でボアホール軸と 33° で交わる面に沿って破壊が発生する。この方向にフラクチャが進展して、 σ_θ が最大となる $\theta=104^\circ$ に達しても、 σ_m よりもこの面と直交する応力の方が大きいので、フラクチャがボアホール軸方向に向きを変えることはない。したがって、このような場合には、ボアホール軸方向に沿うフラクチャは形成されない。

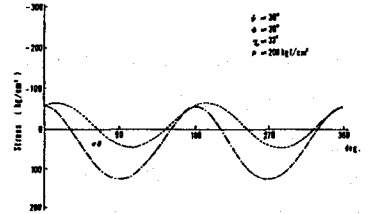


Fig. 6

3. 水压破壊データの解析

水压破壊は次の手順で行う。加圧区間にバッカーをセットした後、できるだけ大きい流量でアレーフダウン圧力が得られるまで送水する。その後直ちにフラクチャ内の水を排除し、再び同じ流量で送水する。圧力がピーク値に達した後、フラクチャ内の水を再び排除する。さらに、同じ流量で送水し、フラクチャをある程度進展させた後、ボアホールをシャットインする。Fig. 7は、東京電力(株)今市地下発電所坑内で、上記の手順に従って水压破壊を行った際得た水压の時間経過の一例である。

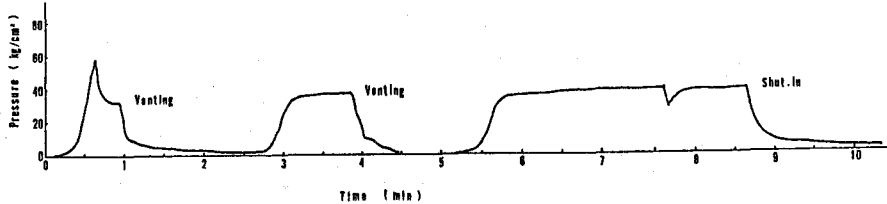


Fig. 7

このデータを用いて、フラクチャが開くときの圧力(P_b)を求める。Fig. 8に示すように1回目と2回目の送水の際の水圧データを比較して決定する⁴⁾。ボアホール軸に沿ってフラクチャが形成された場合、ボアホール軸と直交する面に座標 x, y をとリ、その面内での最大圧縮応力($\sigma_{x,y,m}$)と最小圧縮応力($\sigma_{x,y,n}$)および間隙水压(P_0)と P_b との関係は、次式で与えられる。

$$P_b = 3\sigma_{x,y,m} - \sigma_{x,y,n} - P_0 \quad (4)$$

さらに、フラクチャの方向を θ とし、この方向のせん断力と $\tau_{xy,\theta}$ で表せば、

$$\tau_{xy,\theta} = 0 \quad (5)$$

となる。

ボアホール軸と横切方向にフラクチャが形成された場合、フラクチャオープニング圧力は、水压破壊で新しいフラクチャを形成したかどうさによって異なる。新しいフラクチャが形成された場合、フラクチャの方向は力学的条件のみによって支配されるので、2節で述べたように

$$P_b = \sigma_m \quad (6)$$

となる。岩盤の弱面に沿ってフラクチャが形成された場合、弱面が内じりて

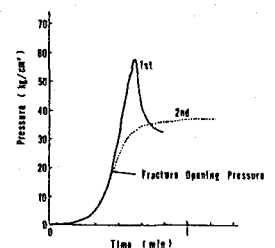


Fig. 8

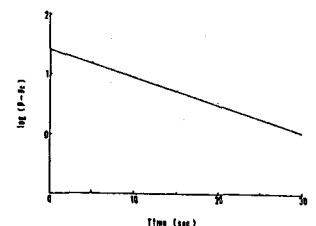


Fig. 9

P_0 が定まることがある。そこで弱面がボアホール軸と θ の角度で交差するとすれば、フラクチャ面と直交する方向の応力(σ_y)は、(1)式より次のように表すことができる。

$$\sigma_y = \cos^2 \theta \sigma_0 + \sin^2 \theta \sigma_1 + \sin 2\theta \tau_{01} \quad (7)$$

(7)式は θ の関数だから、 θ を変えて σ_y が最大となる値(σ_{ym})を求め、

$$P'_0 = \sigma_{ym} \quad (8)$$

とする。

フラクチャをある程度成長させた後、ボアホールをシャットインするとフラクチャ内の水圧は、一時的にフラクチャと直交する方向の地圧とつり合う。したがって、シャットイン圧力(P_0)からフラクチャと直交する方向の地圧を求めることができる。しかし、シャットイン後フラクチャ内の水は岩盤に浸透するので、フラクチャ内の圧力は変化し、圧力ゲージから直接 P_0 の値を読み取ることはむずかしい。そこで、次の方法により P_0 を求める。フラクチャは大きく、フラクチャから岩盤への浸透水は、フラクチャと直交する方向のみにDarcyの法則に従って流出するものと仮定する。水の流出に伴うフラクチャの体積変化は小さく、フラクチャ内の水圧は一定値(P_c)に近づくものとすれば、フラクチャ内の水圧(P)と時間(t)との関係は次式で与えられる。

$$\ln(P - P_c) = at + \ln(P_i - P_c) \quad (9)$$

ここで P_i は、 $t=0$ のときのフラクチャ内の圧力である。 P_c の値を適当に設定して、 P と t の関係をFig. 9に示すようにセミログのグラフ上に描き、両者の関係がグラフ上で最も直線に近いときの P_c を選ぶ。この直線が縦軸と交わる点が $t=0$ でのフラクチャ内の圧力から P_c と引いた値になっているため、 P_0 は

$$P_0 = P_i + P_c \quad (10)$$

となる。

水圧破砕によって形成されるフラクチャの方向に関する情報は一般にボアホール壁面上のものに限られるので、 P_0 と解析に導入するに当り、次の点に注意しなければならない。水圧破砕により岩盤の弱面に影響されずに新たにフラクチャが形成される場合には、フラクチャの発生する方向は、ボアホール軸の方向と地圧によ

て支配される。フラクチャがある程度成長すると、フラクチャの方向はボアホールに影響されなくなるので、その方向が変わる可能性がある。このような場合には、フラクチャの進展方向を確認したうえで、シャットイン圧力を導入しなければならない。一方、岩盤の弱面に沿ってフラクチャが形成される場合には、フラクチャの方向は、ボアホール軸の方向に影響されないで、フラクチャが成長してもその方向が変わる可能性が小さい。したがって、ボアホール壁面の観察によりフラクチャ面を決定し、シャットイン圧力はこの面と直交する地圧に等しいと定める。

以上の点を考慮して、水圧ゲージの解析の手順をまとめものを、Fig. 10に示す。

参考文献)

- 1) 水田義明他. 水圧破砕による三次元岩盤応力測定法について、岩盤力学に関するシンポジウム論文集、pp 116-120、1983
- 2) 例えば B. C. Haimson 他. State of Stress, Permeability and Fracture in the Precambrian Granite of Northern Illinois. JGR, Vol. 88, No. B9, pp 7355-7371, 1983
- 3) A. A. Daneshy. A Study of Inclined Hydraulic Fractures. SPEJ. April 1973. pp 61-68
- 4) S. H. Hickman 他. The Interpretation of Hydraulic Fracturing Pressure-Time Data. HF Stress Measurements National Academy Press. 1981

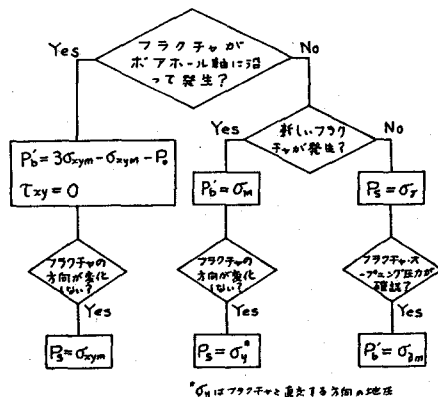


Fig. 10

(21) The Analysis of Pressure-Time Data by Hydraulic
Fracturing to Determine the Stress State

National Research Institute for
Pollution and Resources

Michio Kuriyagawa
Hideo Kobayashi
Isao Matsunaga
Masayuki Kosugi

Hydraulic fracturing is often used for the determination of in-situ stress state. Recently, Mizuta proposed to measure the three-dimensional stress by hydraulic fracturing with the three boreholes which orient to the different direction.

In this paper, the problems arising along with the three dimensional stress measurement are discussed. The stress concentration around the borehole arbitrarily oriented to the principal stress directions with applying the hydraulic pressure is analysed. The orientation of hydraulic fracture is determined from the stress concentration. It is also shown that the problem can reduce to the two dimensional situation of the plane perpendicular to the borehole axis, when the fracture parallel to the borehole axis initiates.

Then the basic procedure of our hydraulic fracturing test is shown. The fracture opening pressure is obtained by comparing 1st and 2nd cycle of pumping and instantaneous shut-in pressure (ISIP) is determined by the asymptotic method proposed by L.Aamodt. The interpretation of pressure-time data is also described with the relation to the fracture orientation.