

(25) 水圧破碎による3次元岩盤応力測定法について

山ロ大工学部 正会員 〇水田 義明
山ロ大工学部 正会員 萩野 正二
山ロ大工学部 佐野 修

1. はじめに

応力測定法としての水圧破碎技術は、オーバーコアリングを必要としないので、接近点から相当深いところに適用できるという点で他の測定法に勝る長所を有するが、得られたデータの解釈がまだ確かでなく、とくに最大主応力を知ることが最も重要であるにもかかわらずこの算定に信頼性がない。また一般にボアホール軸と主応力の方向とは一致しないと考えられるが、この場合の解釈も明確にされないまま現場測定に適用されている。筆者らは室内実験を通じて得られた事実にもとづいた新しい解釈によって、水圧破碎データから3次元岩盤応力状態を算定する方法を開発し、またこの方法の実用性について検討した。この方法においては、水圧破碎によってボアホール軸を含むようなき裂が生じた場合でも、一つの主応力が必ずしもボアホール軸と平行ではないとしている。またこの場合、流体はパッカーを越えてボアホール内に流れ込むので、流量がある程度小さければ、き裂をさらに拡大することなくき裂内に定常的な流れを実現できるので、このときの流体圧からき裂面に垂直な方向に作用する直応力成分が求められるとしている。

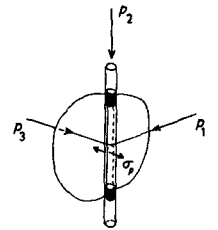


Fig.1 Conventional assumption for orientation of principal stresses with respect to the longitudinal fracture.

2. 従来の方法

水圧破碎を行なった岩盤中に Fig.1 に示すようにボアホールを含むき裂が生じたときには、一つの主応力はボアホール軸に平行であり、このときにもたらされる記録が Fig.2 に示されるものとする。また流体圧が P_b に達したとき、ボアホール壁面において円周方向に作用する直応力 σ_θ の最大値 σ_p が岩盤の引張強度 T と等しくなり、このときにき裂が生ずる（フラクチャリング）ものとする。いま圧縮を正とし、 $P_1 > P_2 > P_3$ であるとすれば、 $\sigma_p = -P_1 + 3P_3 - P_b - P_0 = -T$ ただし P_0 はポアプレッシャーで地下水のヘッドに等しい。一方流体の圧入を止めればそのときの流体圧 P_s は水平方向の最小主応力 P_3 とバランスする ($P_3 = P_s$)。またいったん閉じたき裂を再び開く（リオープン）ときの最大圧力 P_{sb} を測定すれば岩盤の引張強度は、 $T = P_b - P_{sb}$ で与えられる。さらに鉛直方向に作用する主応力 P_2 はかぶり圧 γh に等しいと考える ($P_2 = \gamma h$)。以上のことから P_1 、 P_2 および P_3 の大きさが決定される。

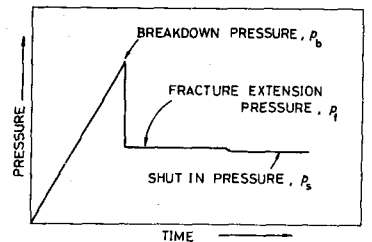


Fig.2 Idealized Pressure-time record.

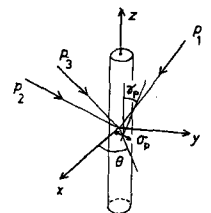


Fig.3 Traditional thinking on inclined hydraulic fracture initiation.

一般には主応力方向とボアホール軸とは一致しないが、この場合もボアホール壁面上の最大引張応力 σ_p が T に達したときに、その最大引張応力が作用する方向と直角にき裂が発生すると信じられている。すなわち σ_p の大きさとそれが作用する方向 θ_p に関して次式が得られる。

$$\sigma_p = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_\theta + \sigma_z + \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \right\} = -T \quad \cdots (1)$$

$$\tan \theta_p = \tau_{\theta z} / (\sigma_p - \sigma_z) \quad \cdots (2)$$

$$\sigma_{\theta} = P_x + P_y - 2(P_x - P_y) \cos 2\theta - 4P_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_z = P_z - 2\nu \{(P_x - P_y) \cos 2\theta + 2P_{xy} \sin 2\theta\}$$

$$\tau_{\theta z} = 2(P_{yz} \cos \theta - P_{zx} \sin \theta)$$

ただし ν は岩体のポアソン比である。もしこの考えが正しいとすれば、測定された σ_p と p_p の値から、岩盤応力状態に関する情報として、(1)と(2)の二つの方程式が与えられる。

3. 室内水圧破壊実験

花崗せん緑岩の岩体から採取された400mm立方の不透水性の供試体に、フラットジャッキを用いて3種類の2軸応荷を行ない、この供試体中に種々角度でせん孔された直径25mmのボアホール内の長さ約100mmを、長さ50mm(うち約25mmが膨張)の二つのパッカーでシールして、流体圧(ハイドリク油 #32)をかけて行なった水圧破壊実験のフラクチャリングにおいて発生したき裂のパターンはFig. 4に示すようであった。この図において、パターンaはパッカーの外側に至るまでボアホール軸を含むき裂を、パターンbは載荷されていない方向に垂直なき裂を示し、パターンa'とb'はそれぞれaとbの不完全なものを示す。また記号A~Cは同図左欄に示された載荷の組合わせを示し、記号Iはボアホール軸と P_2 が傾く場合を、記号IIはボアホール軸と P_3 とが傾く場合を示す。なお数字は鉛直方向に対するボアホールの傾きを、破線はリオープンニング時に発生したものを示す。

フラクチャリングを行なったときの載荷を変えずに、またサーボコントロールによってフラクチャリング時以下の一定流量でリオープンニングを行ない、流体圧の時間変化が測定された。供試体の27個のうちき裂のパターンaのもの10個とBII-9が定常流れを実現した。定常に達したときの圧力 P_{st} とき裂に垂直な応力成分 P_y との比が、リオープンニングにおける3種類の流量に対してFig. 5に示されている。

4. 数値解析

パターンaのき裂のリオープンニングにおける定常流れを、き裂に沿った方向に作用するせん断応力がない状態のモデルについてシミュレートするために数値解析を行なった。このき裂はボアホール軸を含むような面のうち、その面に作用する直応力が最小となる面に

MAGNITUDE OF PRESSURES APPLIED TO SIDES OF TEST CUBES (MPa)	OIL FLOW RATE (nm ³ /s)	FRACTURE PATTERN					
		a	a.b	a'	b'	b	
$P_1 = 13.78$ $P_2 = 6.89$ Note. $P_3 = 0$.	210						AI-36
	105		AI-9	AI-18	A-0	AE-9	AE-27
	59.3	A-0				AE-36	A-0
	26.2		A-0				AI-27
$P_1 = 8.27$ $P_2 = 6.89$	26.2	BI-9	BI-18	0-0	BE-18	BE-9	BI-27
							BI-36
$P_1 = 6.89$ $P_2 = 3.45$	26.2	C-0	CI-36	CI-18	CI-36		CI-27
							CI-36

Note: Designation AI-9 indicates stress state AI with 9° borehole inclination

Fig.4 Relationship between induced fracture pattern, applied stresses and fluid flow rate obtained from fracturing tests.

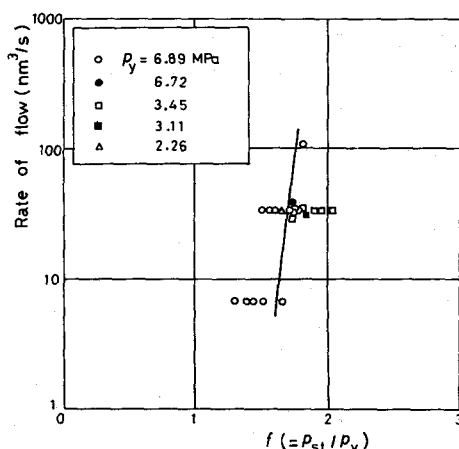
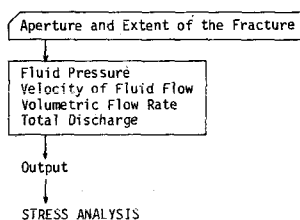


Fig.5 Relationship between P_{st}/P_y ratio and fluid flow rate obtained from re-opening tests for the longitudinal fractures.

FLOW ANALYSIS by FEM



STRESS ANALYSIS by FEM/BEM

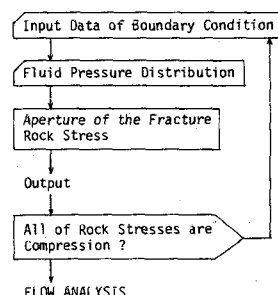


Fig.6 Flow chart of coupled stress-flow analysis.

沿。て生じたと考えられるので、この面を y 面に選べば $p_{xy}=0$ である。しかしボアホール α の傾きがIの状態では p_{3x} が、IIの状態では p_{3y} がゼロでない。Fig.5の実線は載荷条件、ボアホールの傾き、 p_{3t} を種々変えたモデルに対して、 p_{2x} または p_{2y} を無視した解析から得られた $f(=p_{3t}/p_y)$ と流量との関係である(p_x と p_z の影響は極めて小さい)。解析は3次元応力解析と2次元流れの解析を組み合わせて行ない、き裂内を流れる流体の透過性を表す係数 k は、 $k=e^3/12\mu$ で与えられるものとした。ここに μ は流体の静粘性係数、 e はき裂の開口変位である。Fig.6にこの解析手順の概略を示す。

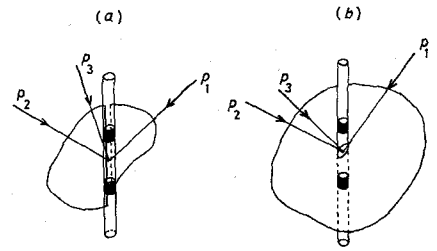


Fig.7 Two kinds of typical fracture patterns, longitudinal (a) and transverse (b).

5. 新たな知見

上記の実験結果や解析結果は従来の考えが、1) Fig.7のようなクラックに対してはFig.2に示されるような明確な p_3 が得られず、2)一般にはき裂はFig.3に示される p_p 方向には生じないという点で正しくないことを示している。すなわち実際にはFig.7に示すように、(a)ボアホール軸を含むき裂または(b)ボアホールと交差するき裂のいずれかが生じ、もし岩体に弱面がなく、最小主応力が他の二つの主応力と比較して非常に小さければ(b)のき裂は最小主応力に垂直となる。また(a)のき裂が生じた場合には流体の大部分はパッカーを越えてボアホール内に流れ込み、流体の圧入を止めても流体は p_3 とバランスすることなく p_0 とバランスするまで徐々に下降する。なお主応力差が小さければ(a)のき裂が生じ易く、これが大きければ(b)のき裂が生じ易いが、もしどちらのき裂をも生ずる可能性がある場合には圧入する流体の流量が大きい方が(a)のき裂が生じ易い。

不透水性の堅固な岩体中に(a)のき裂ができれば流れは定常となり、このときの流体圧 p_{3t} はき裂面に平行なせん断応力成分には殆んど影響せず、流量の影響も非常に小さい(Fig.5)。すなわち p_y だけが p_{3t} に大きな影響を与え、 $f=p_{3t}/p_y$ は室内実験または解析から求めることができる。またき裂を発生させたボアホール壁面上の引張応力(T)は、き裂面に垂直な接線応力 σ_p に等しい。

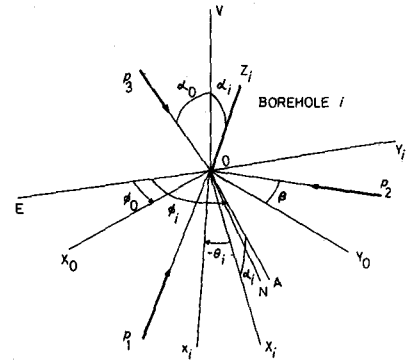


Fig.8 Orientation of the longitudinal fracture (lies in the x_1-Z_1 plane) induced in the borehole i with respect to OENV and the principal stresses.

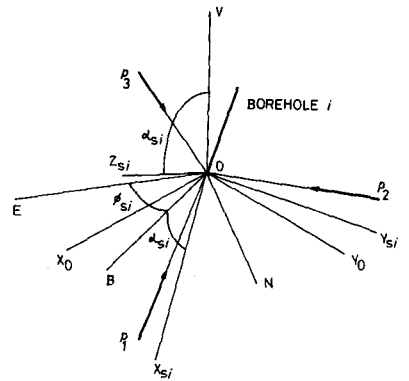


Fig.9 Orientation of the transverse fracture (normal to the direction of Z_{si}) induced in the borehole i with respect to OENV and the principal stresses.

6. 応力算定の手順とその精度

いま n 本のボアホールにおいてボアホール軸を含むき裂(Fig.8)ができ、 n 本のボアホールにおいてボアホールと交差するき裂(Fig.9)ができたものとする。両図の座標に対して各応力成分は、

$$\begin{aligned} p_{x0} &= p_1 \cos^2 \alpha_0 \cos^2 \beta + p_2 \sin^2 \alpha_0 \sin^2 \beta + p_3 \sin^2 \alpha_0, & p_{y0} &= p_1 \sin^2 \beta + p_2 \cos^2 \beta, \\ p_{z0} &= p_1 \sin^2 \alpha_0 \cos^2 \beta + p_2 \sin^2 \alpha_0 \sin^2 \beta + p_3 \cos^2 \alpha_0, & p_{x_{y0}} &= 0.5(p_1 - p_2) \cos \alpha_0 \sin 2\beta, & p_{r_{z0}} &= -0.5(p_1 - p_2) \sin \alpha_0 \sin 2\beta, \\ p_{x_{z0}} &= p_1 \sin^2 \alpha_0 \cos^2 \beta + p_2 \sin^2 \alpha_0 \sin^2 \beta + p_3 \cos^2 \alpha_0, & p_E &= p_{x0} \cos^2 \phi_0 + p_{y0} \sin^2 \phi_0 - p_{x_{y0}} \sin 2\phi_0. \end{aligned}$$

(25) A Procedure for Three Dimensional Stress Determination
by Hydraulic Fracturing

Yoshiaki Mizuta, Shoji Ogino and Osamu Sano

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

For the determination of in-situ stresses, hydraulic fracturing has an advantage over other stress measuring methods, in that it can be used at considerably greater depths from a point of access.

Dispite the increasing use of hydraulic fracturing, however, there are uncertainties associated with the interpretation of the resulting data. In particular, confidence in the calculated maximum principal stress is less than in the minimum principal stress, although the former is often of great moment. Furthermore, where the borehole axis is not parallel to principal stress direction, the interpretation of hydraulic fracturing data with respect to stress magnitudes and directions is unclear.

laboratory hydraulic fracturing of intact rock in biaxial compression was effected in order to investigate fracture extention under conditions in which the principal stresses were inclined to the axis of the pressurized borehole.

In-situ hydraulic fracturing of jointed rock was also carried out in order to investigate joint effect on fracture initiation direction and pressure-time relation.

Two typical fracture patterns were produced, which were able to occur at any borehole onclination.

One type of fracture, called here a "longitudinal" fracture initiated along the borehole axis bypassing the sealing elements, the fracture changing direction to become perpendicular to the minimum principal stress after bypassing the sealing elements. Re-opening such a fracture using low fluid injection rates leads to a stable flow established whereby fluid flows into the borehole beyond the sealing elements. For a given flow rate, the fluid pressure is proportional to the normal stress component perpendicular to the fracture, the pressure being scarcely affected by the remaining stress components. Numerical analysis, applying the concept of an hydraulic aperture, was employed to explain these facts.

The other type of fracture, called here a "transverse" fracture initiated across the sealed-off section. This fracture is perpendicular to the minimum principal stress and continued to extend in this plane, if it is produced in intact rock, suggesting that difference among principal stresses are relatively large.

Short sealed-off section, short sealing elements and rapid fluid injection may assist in producing a fracture of the first type.

The study suggests that the complete stress state in intact rock can be evaluated from tests on two fractures(longitudinal and transverase fractures) in a single borehole and the authors proposed a overall procedure for three dimensional stress determination, interpreting hydraulic fracturing data from the boreholes with different inclination. Hydraulic fracturing data from "transverse" fracture produced in jointed rock can be also utilized in the procedure.

In order to examine the accuracy of the method, example hydraulic fracturing data were considered and it is found that three dimensional stress state can be given with some accuracy.

Finally, outline of the hydraulic fracturing apparatus for the rock stress determination for the purpose of design of underground space, which the authors are now using, was shown.