

(43) ボアホールスロッターを利用する水圧破碎応力測定法
に関する基礎的研究

山口大学工学部	正会員	水田 義明
日本国土開発(株)	正会員	佐久間 彰三
日本国土開発(株)	正会員	菊池 慎二
山口大学大学院		○荒木 義則
山口大学工学部	正会員	中川 浩二

Laboratory tests and analyses on hydraulic fracturing
stress measurement utilizing borehole slotter

Yoshiaki MIZUTA, Yamaguchi University
Shozo SAKUMA, Japan Development and Construction Co.Ltd.
Shinji KIKUCHI, Japan Development and Construction Co.Ltd.
Yoshinori ARAKI, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

ABSTRACT

Hydraulic fracturing technique has the advantage over other stress measuring methods in that elastic constants are not required in stress determination. However, the level of confidence in the measured maximum principal stress is lower than in the minimum principal stress. The work described here is to seek possibility of detection of the shut-in pressure which balances with the maximum principal stress by creating and extending a fracture in the direction perpendicular to the maximum principal stress. The authors carried out laboratory tests of hydraulic fracturing in the cubic specimen of mortar with a borehole and slot. The sealed-off section including the slot was pressurized by fluid injection. The relationship among principal stresses ratio, tensile strength of the material, and condition of fracture initiation and extension was obtained. Numerical analyses by the boundary element method were carried out to get such the relationship theoretically. Applicability of the procedure for determination of maximum principal stress was discussed through comparison of experimental results with numerical prediction.

1 研究の目的と意義

水圧破碎応力測定法¹⁾は、他の応力測定法に比べて岩盤の弾性係数を必要とせず、またボーリング孔さえあれば深部での計測が容易であり、経費も比較的安いという利点がある。一方、最小主応力は、シャットインプレッシャー (Ps: Shut-in Pressure) として直接検出されるが最大主応力は変形に対する等方均質性を仮定して弾性理論により算定するため、最大主応力の値に信頼性が低いという問題があり、一般には最大主応力の方がより重要である。ところで発生した亀裂の方向が最大主応力方向であるとされ、これには強度の等方均質性が仮定されているが、以下の議論においては一応この仮定は成り立つものとする。

あらかじめ通常の水圧破碎を行って主応力方向と最小主応力の大きさを決定した後、同じボアホール内で測定区間を変えたところに(実際には圧気駆動のダイヤモンドブレードを装備するボアホールスロッター²⁾を用いて)最小主応力方向に小判状のスロットを作り、これを含む区間で水圧破碎を行えば亀裂がス

ロットの延長上に伸展して最大主応力を P_s として直接測定できる可能性がある。そこで比較的等方で均質な材料であるモルタルを用いてボアホールとスロットを設けた供試体を作製し、これを用いて水圧破壊実験を行う。そして得られた圧力-時間関係や主応力比と亀裂伸展方向の関係さらにスロットの深さやその数（片スロットまたは両スロット）が亀裂の発生条件や亀裂の伸展に与える影響について検討する。

また二次元境界要素法を用いた応力解析では、スロット先端とスロットから 90° 度のボアホール壁面上の点の応力集中係数を計算し、主応力比や引張強度との関係において亀裂がどこから発生するかを判断する判別図を作製する。そして室内実験の結果と照らし合わせてこの方法の適用範囲について検討する。

2 スロットを有するボアホール壁面の応力解析

2.1 応力集中係数の計算

無限領域・無限応力場において、ボアホール孔軸方向に延びたスロットを持つボアホールを考える。このボアホール壁面を境界要素に分割し、荷重として最大主応力 (P_0)、最小主応力 (Q_0)、流体圧 (P) の三通りを考え、それぞれ単位荷重を与えたものをモデルとして計算した。図-1に片スロットの場合の要素分割モデルを、図-2に3種の荷重パターンを示す。モデルは、ボアホール半径 R 、スロット長 L 、スロット先端半径 r の半断面とし、スロットが一つの場合の片スロットと対角方向に二つある場合の両スロットを考え、スロットは常に最小主応力方向にあるものとする。

また形状は実際にボアホールスロッターを用いて作り得るス

ロットの深さや厚さを考

えて、 $r/R=0.01, 0.02, 0.$

$04, 0.08$ の4通り、 $L/R=$

$0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の4通り

とした。各種モデルに

おける各要素の接線応力

を応力集中係数として求めた。

2.2 亀裂発生箇所予測

スロット先端では、ボアホール壁面より数倍大きな応力集中を生じる。またボアホール壁面上も、スロット形状の影響を受けて応力集中に変化を生じる。 $\sigma_y=P_0$ 、 $\sigma_x=Q_0$ 、 $P_0>Q_0$ としスロット先端のA点およびB点での応力集中について考えよう。いま P_0 、 Q_0 および P の単独載荷によるA点の応力集中係数 σ_A/P_0 、 σ_A/Q_0 および σ_A/P をそれぞれ $a(r/R, L/R)$ 、 $b(r/R, L/R)$ および $c(r/R, L/R)$ とし、B点の応力集中をそれぞれ $a'(r/R, L/R)$ 、 $b'(r/R, L/R)$ および $c'(r/R, L/R)$ とすると、供試体の破壊基準は、A点とB点で次式のようになる。

(I) 流体の浸透による影響がない場合

$$\sigma_A = aQ_0 - bP_0 - cP = -St, \quad St: \text{引張強度}$$

$$\sigma_B = b'P_0 - a'Q_0 - c'P = -St$$

(II) 流体の浸透を考慮する場合³⁾

$$\sigma_A = aQ_0 - bP_0 - (1+c-\alpha(1-2\nu)/(1+\nu))P = -St$$

$$\sigma_B = b'P_0 - a'Q_0 - (1+c'-\alpha(1-2\nu)/(1+\nu))P = -St$$

$$0 < \alpha(1-2\nu)/(1+\nu) < 1 \quad (\nu \text{ はボアソン比}, \alpha \text{ は定数})$$

(III) スロット先端の形状を考慮する場合

$$a \rightarrow ka, b \rightarrow kb, c \rightarrow kc, a' \rightarrow ka', b' \rightarrow kb', c' \rightarrow kc'$$

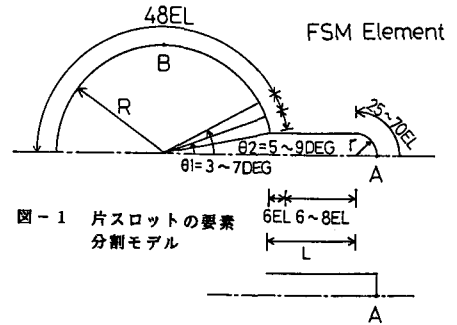
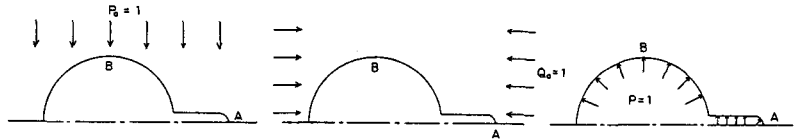


図-2 3種の荷重パターン



$$k = \sigma_a (\text{先端が角}) / \sigma_a (\text{先端が丸})$$

流体圧の上昇に伴いスロットを含むボアホール壁面の接線応力は増加する。この過程で応力集中度の高いスロット先端(A)とスロットから90度傾いたボアホール壁面(B)の接線応力は競争しあい、先に破壊基準を満たした方から亀裂が発生する。亀裂がどの点から発生するかを判断するため、横軸に流体圧をとり、縦軸に引張強度をとり、主応力比をパラメータとして亀裂発生基準を作製する。ただしこれらの値はすべて最大主応力(P_0)で無次元化してある。

3 室内水圧破碎実験

3.1 供試体

190mm立方の供試体は、材料に早強ポルトランドセメントと細骨材として豊浦標準砂を用いた。配合は、早強ポルトランドセメント(C)、細骨材(S)および水(W)の重量比でC:S:W=1:2:0.6とした。打設はすべて手練りで行った。また養生は、約20℃の水中にて14日以上行い、実験を行うまでに2日間の空気養生を行った。

従って養生日数は16日以上である。両スロットを有する供試体の形状、寸法およびスロットの位置を図-3に示す。

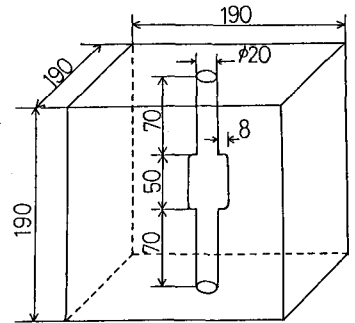


図-3 供試体の形状、寸法、およびスロットの位置

3.2 加圧

ミニチュアパッカーは、ステンレス鋼でできており、Sealing Elementを装着するための小さな溝と加圧部分を持ち、さらに中心軸にそって流体(油)を送り込むための孔と加圧区間の空気を抜くための孔がいている。Sealing Elementには、O-リングを用い、ボアホール壁面の粗さによる流体の漏れを防ぐために5mm間隔でO-リングが三個ずつ装着できるようにした。

側圧は、190×190×5mmのフラットジャッキ4枚と反力枠を用いて二軸載荷を行った。

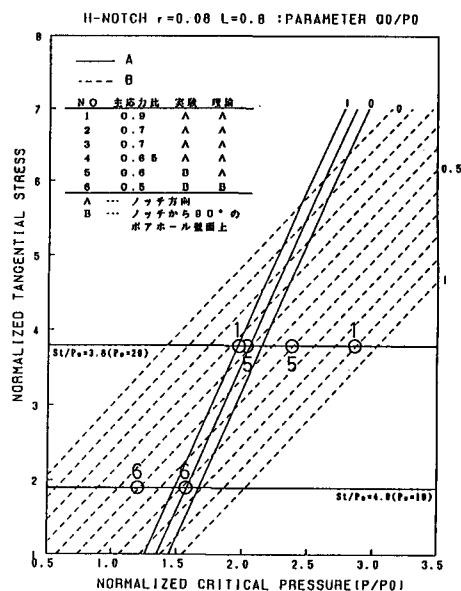
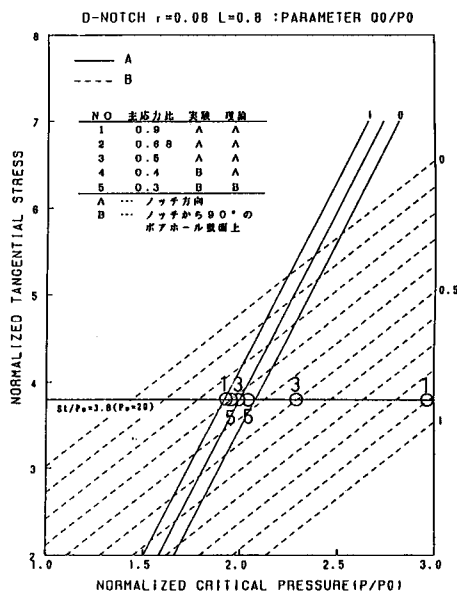
3.3 実験方法

ボアホール軸方向には載荷しないので、側圧(水平方向載荷)が大きすぎるとボアホール軸と垂直な方向に亀裂(横亀裂)が発生するおそれがある。これを防ぐため最大主応力(P_0)を20kgf/cm²以下になるようにした。この値は、予備実験で横亀裂が発生したときのデータに基づいている。次にバルブを切り替えて圧力を抜いた後、パッカーで密閉された区間に加圧してゆく。加圧に伴い圧力は、一直線状に上昇してゆき亀裂が発生すると圧力は低下する。圧力の低下をブルドン管またはコンピュータのディスプレイで確認して流体圧入を止める。圧力が十分に降下した後、亀裂を再開口させるための加圧とその後の圧入停止を3回繰り返して実験を終了する。

4 実験結果および考察

4.1 解析結果と実験結果の比較検討

亀裂発生基準にスロットのない供試体の水圧破碎実験より求めた引張強度を当てはめると、主応力比(Q_0/P_0)をパラメータとして亀裂発生箇所(AまたはB)と亀裂発生時の流体圧(P_b)を理論的に決定できる。この理論値と、実験で求めた結果を比較すると、スロットの種類に関係なく、低透水性($\alpha=0.02$)で先端の形状を考慮する場合に最も近づいている。図-4は計算から得られた図とこれに実験結果をプロットしたものである。Double Notch-8mmの図では、 Q_0/P_0 が0.4の場合に理論値と実験結果がくいちがっているがその他は一致している。Single N-8mmの図では、 Q_0/P_0 が0.6の場合にくいちがいが、DN-4mmの図では、 Q_0/P_0 が0.9と0.75の場合にくいちがっているのがわかる。また、くいちがいの程度を比較すとDN-8mmの場合が最も少ないことがわかる。よって両スロットでスロット長の長い場合には、弾性計算から得られる応力集中度によって亀裂発生点が決まるという考えがほぼ成立する。一方、この図から亀裂発生時の内圧を求めることができるが、実験より得られた内圧は理論値より2倍程度大きい。



4.2 Shut in pressure の決定

Ps値は、水圧破碎を行って亀裂を発生させた後、ボアホール内への加圧を止めたときに見られる下降曲線（シャットイン曲線）の屈曲点で与えられ、しかもこれは亀裂面に垂直に作用する圧縮応力を表している。林ら⁴⁾によると、シャットイン曲線は水圧の時間変化率の逆数（ dT/dP 、T: 加圧停止後の時間、P: 加圧区間の水圧）と加圧区間の水圧との関係において、二本の直線で屈曲点が明確に表わされることを理論的に説明している。

そこでこの手法を実験データの解釈に適用することにする。ただし1サイクル目で亀裂が十分に伸展している場合は、1サイクルと2サイクルの二つのシャットイン曲線を対象とし、図-5に示される例のように2サイクル目で前半は亀裂伸展傾向（圧力の下降）があり後半に定常状態に達している場合は、2サイクルと3サイクルの二つのシャットイン曲線を対象とした。図-5にはシャットイン曲線をこの手法で処理した結果が示されている。このようにして求めたPs値と実際に与えた P_0 や Q_0 と比較した結果はつぎのようである。(1)スロット方向から亀裂が発生した場合、図の右寄りに二本の直線を引いて屈曲点を求めると、DN-4mmの場合を除いてPs値は、 P_0 値（最大主応力値）よりいくぶん小さな値となる。(2)スロットから90度傾いたボアホール壁面上から亀裂が発生した場合、図の左寄りに二本の直線をとると、SN-8mm $P_0=40$, $Q_0=20$ の場合を除き Q_0/P_0 が0.5~0.6ではPs値は、ほぼ Q_0 値となるが、 Q_0/P_0 が0.9ではPs値が Q_0 値よりかなり小さな値となり、 Q_0/P_0 が0.3~0.4ではいくぶん大きな値となる。表-1は得られたPs値を各サイクルごとにま

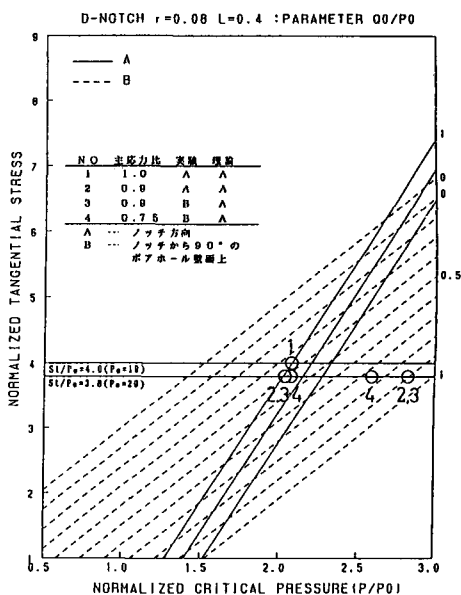


図-4 亀裂発生基準

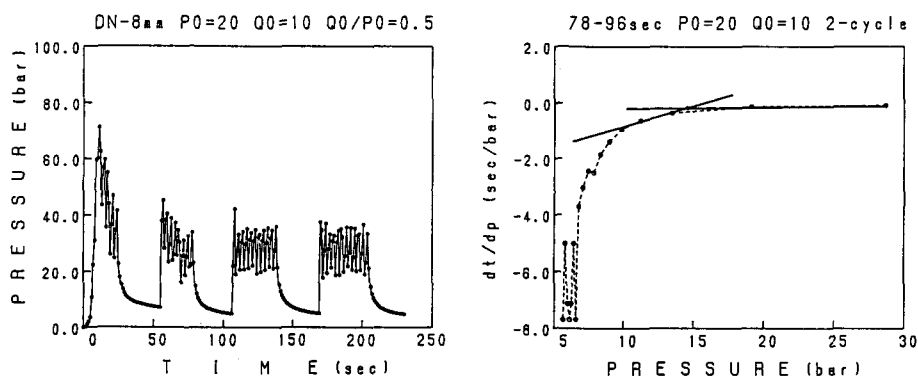


図-5 圧力-時間データおよびシャットイン曲線（2サイクル目）からの最大主応力の検出

とめたものである。

5 結 論

スロットを有する供試体の室内水圧破砕実験から次の結論を得た。

(1) 応力解析から求めた亀裂発生基準に基づいて亀裂発生箇所を判断すれば、両スロットで長さが半径比で0.8（ボアホールロッターで作り得る最も深いスロット）の場合に最も実験結果と一致する。

(2) Shut in pressure と亀裂面に垂直な直応力成分（最大または最小主応力）との関係は、亀裂面の方向（最小または最大主応力方向）に大きく左右される。

(3) スロットは、亀裂伸展に一定の方向性を持たせる効果がある。また Shut in pressure の検出においては、スロットのない場合（通常の水圧破砕）と異なる方法をとる必要があるが、亀裂面に垂直な直応力を表す指標としての精度はむしろ向上する。

表-1 Shut in pressure 一覧表

	主応力比	P ₀	Q ₀	1-cycle	2-cycle	3-cycle	時刻
両スロット 8mm	0.9	20	18	16	18.3		3 sec
	0.68	18	13	18.6	17.8		3
	0.5	20	10		15	15.5	1
	0.4	20	8			8.5	1
	0.3	20	8		10.7	8.5	1
片スロット 8mm	0.9	20	18		20.0	16.8	1
	0.6	20	12		14.4		1
					(14.8)		
	0.5	40	20		7.8		3
	1.0	18	19		23.9	24.4	1
						(16.9)	
両スロット 4mm	0.9	20	18		22.4	20.0	1
	0.9	20	18	11.3	10.2		
					(16.3)		1
	0.5	20	10		8.9	9.9	1
	0.5	20	10		11.1	9.6	1
					(12.5)		
スロット なし	0.5	20	10	10.6	10.5		1
				(11.8)	(12.5)		
	0.4	20	8		15.5	16.3	1

単位: kgf/cm²

参考文献

- 1) たとえば Y.Mizuta, O.Sano, S.Ogino and H.Katoh, Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.Vol.2 4, No.1, pp.15-29, 1987
- 2) R.Azzam and H.Böck, Proc.2nd.Int.Symp.on Field Measurements in Geomechanics(Kobe), Vol.1, p.145-158
- 3) B.Haimson, phd thesis, University of Minnesota(1968)
- 4) 林 一夫 櫻井 泉, 第954回講演会 材料力学 講演論文集, No880-7, 昭和63.11