坑井近傍の応力勾配を考慮した破壊基準に基づく 水圧破碎における破碎圧評価に関する基礎的研究*

伊藤 高敏¹ 林 一夫² 阿部 博之³

[UDC 622.236.5]

A Study for the Hydrofracture Breakdown Pressure Based on the Point Stress Criterion

by Takatoshi ITO¹, Kazuo HAYASHI¹ and Hiroyuki ABÉ²

1. Institute of High Speed Mechanics, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980

2. Faculty of Engineering, Tohoku University

Hydraulic fracturing is now widely used for in-situ tectonic stress measurements. With this technique, the stresses are calculated using equations derived through considerations on crack initiation and crack growth in the tectonic stress field. One of these equations is the so-called breakdown equation which relates the crack initiation pressure to the in-situ stress. However as demonstrated by many laboratory hydrofrac experiments published before, breakdown pressures predicted by the classical breakdown equation do not always agree with the experimental data. To resolve this problem, the mechanics of hydraulic fracture initiation have been investigated by comparing laboratory experiments with theoretical predictions based on the fracture criterion. In this criterion, it is assumed that failure occurs from a wellbore when the maximum principal stress at some fixed distance ahead of the wellbore reaches the tensile strength of the rock. Laboratory hydrofrac experiments were carried out on cubical rock specimens uniaxially loaded. Prior to fracture, the pressurizing fluid may penetrate into the surrounding rock and thus perturb the stress field by increasing the interstitial pore pressure around the wellbore. In order to avoid this effect due to fluid penetration, the experiments were carried out by using wellbores jacketed with plastic tubes. Results show that the breakdown pressures predicted by the classical breakdown equation are fairly lower than the breakdown pressures obtained experimentally. On the other hand, the pressures predicted based on the fracture criterion perfectly agree with the experimental data independently of the various conditions of experiments, i.e., the load, the wellbore size and the rock type.

KEY WORDS: Tectonic Stress, Hydraulic Fracturing, Breakdown Pressure, Crack Initiation, Fracture

1. 緒 言

深部地殻応力の計測法としては、現在のところ水圧破碎による方法が有力である。この方法は、水圧破碎時に計測される破碎圧 (Breakdown Pressure)、亀裂開口圧 (Reopening Pressure) あるいは亀裂閉口圧 (Shut-in Pressure) 等の観測データに基づき地殻応力を評価するものである。すなわち、あらかじめ理論的に導かれた上記観測データと地殻応力の関係を与える観測データの評価式に基づく逆問題解析を行い、実際のフィールド実験で得られた観測データから地殻応力を算定する方法である。このため、この方法によって評価された地殻応力の信頼性は、同評価式の妥当性に大きく左右される。しかしながら、応力評価の基礎となる観測データのうち破碎圧に関する研究によると、実験的に求めら

れた破碎圧は坑壁に作用する周方向応力に注目した従来の理論¹⁾に基づく破碎圧の評価式から予測されるものと必ずしも対応しないことが明らかとなっている。例えば、破碎圧が坑径が大きくなるほど小さくなるという現象²⁾³⁾は、従来の理論¹⁾で説明することは困難である。このため水圧破碎における坑壁からの亀裂初生機構に関する詳細な検討の必要性が指摘されている⁴⁾。この点に関し石島ら⁵⁾は、実験結果に基づく考察から坑壁面の応力状態のみならず岩体内部の応力状態が破碎圧に影響を及ぼすことを示唆している。一方、円孔からの亀裂初生挙動の評価という問題に対し複合材の分野においては、円孔近傍の応力勾配を考慮した破壊クライテリア (Point Stress Criterion)⁶⁾ (以下特性距離破壊基準と呼ぶ) が導入され、実験結果に基づきその有効性が確認されている。同様な破壊基準は岩石についても検討され、例えば混合モード荷重下にある亀裂の進展挙動⁷⁾あるいは圧縮荷重下にある円孔からの亀裂初生挙動⁸⁾の評価に用いられているが、これを水圧破碎に適用した報告は見当たらない。

以上の点に鑑み本報では、破碎圧評価の前提となる、水圧破碎において坑壁から亀裂が初生する条件を明らかにすることを目的として、特性距離破壊基準に基づく坑壁からの亀裂初生挙動評価

* 1989年4月21日受付 12月6日受理 平成元年4月1日資源・素材学会春季大会において講演

1. 正会員 東北大学助手 高速力学研究所
2. 正会員 工博 東北大学助教授 高速力学研究所
3. 正会員 工博 東北大学教授 工学部機械工学科

キーワード: 地殻応力, 水圧破碎, 破碎圧, 亀裂初生, 破壊

の妥当性について検討した。このため、水圧破砕時の負荷形態を模擬した室内実験を実施し、同破壊基準に基づいて予測される亀裂初生時の坑内圧と実験結果を比較した。ただし、流体で坑井を加圧した場合、浸透の影響によって坑井近傍の間隙水圧が変化し、岩体の透水性、加圧速度、多孔質岩体の Biot の定数など多数の因子が岩体分応力に影響を及ぼす。すなわち、坑壁からの破壊の発生の基本を検討するに際し、浸透の影響を含んだ状態で検討を行うことは必ずしも適切とはいえず、まず、浸透の影響を排除した条件下での検証を行うことが必要である。そこで、実験は坑壁をジャケットすることにより浸透の影響を排除した条件下で実施し、従来の理論¹⁾ならびに特性距離破壊基準に基づく亀裂初生時の坑内圧の予測値と実験結果を比較した。その結果、実験結果は従来の理論¹⁾による予測値に比べ一様に大きく、その差は坑井半径が小さくなるほど大きくなることが明らかとなった。一方、特性距離破壊基準に基づく破砕圧の予測値は、実験条件によらず実験結果に良く一致し、よって特性距離破壊基準によればジャケットした坑壁からの亀裂初生挙動を定量的に評価できることが明らかとなった。なお、以後亀裂初生時の坑内圧を破砕圧と呼ぶことにする。

2. 特性距離破壊基準

特性距離破壊基準は、従来より主として複合材の分野において、円孔あるいは亀裂等の影響による応力集中部を有する材料の強度評価に広く用いられているものである⁶⁾。この破壊基準によれば応力集中の発生している点から材料固有のある特性距離 d だけ離れた点に作用する最大引張応力が、引張強度 σ_f に達した時に破壊が起きる。例えば、この破壊基準を亀裂問題に適用すると、亀裂進展の条件は次のように与えられる(図1(a))。

$$\sigma_\phi|_{R=d} = \sigma_f \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 (R, ϕ) は亀裂先端を原点とする極座標、 σ_ϕ は周方向応力である。さて、この破壊基準を水圧破砕に適用すると、坑壁から亀裂が初生する条件は次のように与えられる(図1(b))。

$$\sigma_\theta|_{r=a+d} = \sigma_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 (r, θ) は坑井中心を原点とする極座標、 σ_θ は周方向応力、 a は坑井の半径である。従って、坑内圧の上昇に伴って増加する σ_θ が、(2)式の条件に達したときの坑内圧として破砕圧が決定される。以上は岩体内に間隙水圧が作用していない場合であるが、間隙水圧が作用している場合には(1)式および(2)式中の σ_ϕ

図1 特性距離破壊基準

および σ_θ を有効応力成分に置き換えればよい。なお、従来の破砕圧評価法¹⁾によれば、坑壁上に作用する σ_θ が σ_f に達したときに坑壁から亀裂が初生する。従って、 $d=0$ のとき、(2)式の条件は従来の破砕圧評価法¹⁾で用いられている亀裂初生の条件と同一となる。

3. 試験片および実験方法

(2)式に基づいて破砕圧を評価するためには、水圧破砕を行う岩体の d ならびに σ_f の2つの物性値が必要である。本報では、まず圧裂引張試験によって σ_f を決定した。次に、片側に予亀裂を有する三点曲げ試験を実施して d を決定した。三点曲げ試験によれば、水圧破砕に比べ亀裂の初生をより精度良く評価することが可能である。なお、 d を決定する手順は以下の通りである。

開口型亀裂が進展開始する際、亀裂先端近傍に作用する最大引張応力の分布は、亀裂延長線上で

$$\sigma_\phi = \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi R}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

のように与えられる⁹⁾。ここに K_{IC} は破壊靱性値である。特性距離破壊基準によれば、(1)式に記したように亀裂進展時には $R=d$ で $\sigma_\phi = \sigma_f$ となる。従って、(3)式を用いると d は次のように求められる。

$$d = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_f} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

以上の手順により σ_f および d を決定した後、緒言に述べたように坑壁をジャケットすることにより浸透の影響を排除した条件下における模擬水圧破砕実験を実施して、先に求められた σ_f および d を用い(2)式に基づいて評価される破砕圧の予測値と実験結果を比較した。具体的な実験手順を以下に述べる。

実験に供した岩石は、i) 山梨県甲府産の甲府安山岩、および ii) 神奈川県真鶴産の本小松安山岩である。i), ii) の岩石それぞれについて、試験片はいずれも同一の原ブロックから切り出し成形研磨した。圧裂引張試験においては、直径80mm、厚さ40mmの円盤型試験片を用い、日本工業規格(JIS M0303)に従って σ_f を算出した。三点曲げ試験片の形状ならびに寸法を図2に示す。予亀裂として亀裂先端半径0.075mmの切欠きをカーボンブレードにて導入した。実験に際しては亀裂の初生を精度良く検出することを目的としてAE計測を実施し、AE信号の累積エネルギーと応力拡大係数との関係¹⁰⁾から K_{IC} を求めた。なお応力拡大係数の算出は米国材料試験規格(E399-83)によった。

模擬水圧破砕実験においては、試験片として $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ の寸法を有するブロックを用い、水圧破砕を行う坑井をダイヤモンドドリルで掘削した。実験に用いた坑井の大きさは、坑井半径 $a = 5, 7.5, 15 \text{ mm}$ の三種類である。また、坑井近傍の応力場に及ぼす自由境界(試験片側面)および隣接する坑井の影響を考慮し、坑井の位置は半径の違いに合わせて図3に示す位置とした。

図2 三点曲げ試験片

 (A) $a=5\text{ mm}$, (B) $a=7.5\text{ mm}$, (C) $a=15\text{ mm}$

図3 模擬水圧破碎実験試験片

図4 模擬水圧破碎実験模式図

実験に際しては、図4に示すように地殻応力を模擬するためフラットジャッキを用い、試験片側面に垂直に圧縮応力を負荷した。負荷は試験片側面の互いに向かい合う2組の側面の内の1組にのみ作用させ、残りの側面および上下面は無負荷とした。以下、この一軸圧縮負荷応力を S と表示する。坑井内の加圧は、プースターポンプおよび坑井半径が5, 7.5, 15 mmのそれぞれの場合について、加圧区間の長さが40, 60, 120 mmのストラドルパッカを用いて行った。ただし岩体内へ加圧流体が浸透するのを防ぐため、ストラドルパッカにジャケットとして厚さ0.07~0.15 mmの熱収縮チューブを巻いて用いた。この場合、水圧破碎時に通常見られる坑壁からの亀裂初生に伴う坑内圧の減少(Breakdown)は観測されず、このため坑内圧の経時変化から亀裂の初生を検出することは困難となる。そこで三点曲げ試験同様にAE計測を実施し、詳細は後述するがAE信号の累積エネルギーの急増点に対応する坑内圧を亀裂初生時の水圧(破碎圧)と定めた。なおAEセンサの取り付け位置は試験片側面において加圧区間中心に最も近い位置とした。

4. 実験結果および考察

表1に圧裂引張試験の結果を、表2に三点曲げ試験の結果と圧裂引張試験の結果から求められた特性距離を示す。なお d を(4)式から決定するに際しては、 σ_f として圧裂引張試験結果の平均値(表1)を用いた。

表1 圧裂引張試験結果

Rock	σ_f MPa	Average σ_f MPa
Kofu Andesite	10.6	11.1
	12.4	
	9.5	
	10.5	
	11.9	
	10.6	
	11.5	
Honkomatsu Andesite	11.5	12.1
	12.2	
	12.5	
	12.1	
	11.7	

表2 三点曲げ試験結果および特性距離

Rock	K_{Ic} MPa $\sqrt{\text{m}}$	d mm	Average d mm
Kofu Andesite	1.61	3.34	3.39
	1.63	3.43	
Honkomatsu Andesite	1.19	1.54	1.54
	1.22	1.62	
	1.16	1.46

図5 模擬水圧破碎実験におけるAE信号の累積エネルギーと坑内圧との関係の一例

表3 模擬水圧破碎実験結果

Rock	d mm	S MPa	P_f MPa
Kofu Andesite	5.0	0	29.2
			33.4
		4.91	31.2
			30.3
			31.2
			31.2
		9.81	31.2
			32.1
7.5	4.91	21.6	
Honkomatsu Andesite	5.0	4.91	20.2
			17.2
			19.8
			18.4
	7.5		14.2
			16.3
			13.2
			14.1
	15.0		10.9
			12.0

図6 坑井および座標系

模擬水圧破碎実験結果の一例を図5に示す。同図から分かるようにAE信号の累積エネルギー量 ΣE_{AE} と坑内圧 P の関係は、ほぼ2本の直線で近似することができる。この関係は、先に述べた三点曲げ試験時に観測される ΣE_{AE} と応力拡大係数の関係に見られる特徴と同一であり、三点曲げ試験においては、それら2本の直線の交点が、予亀裂からの亀裂初生に対応するものとされている¹⁰⁾。そこで、ここでも2本の直線の交点以降の ΣE_{AE} の急増が亀裂初生によるものと考え、その交点に対応する坑内圧として破碎圧 P_f を定義した。なお、一部の実験において ΣE_{AE} が急増する前後の時点において加圧を止めて坑井を含むコアを抜き、切断研磨した断面を観察することにより、 ΣE_{AE} の急増が亀裂の初生に一致することを確認した。このようにして求められた破碎圧の結果をまとめて表3に示す。

さて、本実験条件のように坑内圧 P および一軸圧縮応力 S が作用し（図6）また間隙水圧が零の場合、坑井近傍に生じる σ_θ の分布は次式で与えられる¹¹⁾。

$$\sigma_\theta = P \frac{a^2}{r^2} - \frac{S}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{S}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (5)$$

ここに θ は S の作用方向から測った角度である。従って、坑壁における亀裂の初生が特性距離破壊基準に従うものとすれば破碎圧 P_f は、(5)式を(2)式に代入した式を満足する P の θ に関する極小値として求められ、次のように与えられる。

$$P_f = \frac{S}{2} \left\{ 1 - 3 \frac{a^2}{(a+d)^2} \right\} + \frac{(a+d)^2}{a^2} \sigma_f \quad (6)$$

(6)式ならびに従来の理論¹⁾より求められる破碎圧の予測値と、模擬水圧破碎実験結果を比較した結果を以下に述べる。ここで、

(●: 実験結果, 実線・破線: 予測結果)

図7 破碎圧の実験結果と予測値の比較

(●・▲: 実験結果, 実線・破線: 予測結果)

図8 坑径の違いによる破碎圧の変化 ($S=4.91$ MPa)

破碎圧の予測値を求めるに当たっては、引張強度および特性距離として表1および表2の平均値、すなわち

甲府安山岩 : $\sigma_f = 11.1$ MPa, $d = 3.39$ mm

本小松安山岩 : $\sigma_f = 12.1$ MPa, $d = 1.54$ mm

を用いた。

まず坑井半径を $a=5$ mmとし、負荷応力 S を変化させて行った実験結果を図7に示す。実験に用いた岩石は甲府安山岩である。同図より、実験によって求められた破碎圧は従来の理論¹⁾による予測値に比べ非常に大きく、その違いは S が大きくなると共に大きくなることがわかる。これに対し本報の(6)式より求められる破碎圧の予測値は、 S の大きさによらず実験結果に極めて良く一致している。

次に負荷応力を $S=4.91$ MPaとし、坑井半径を変化させて行った実験の結果を図8に示す。同図より破碎圧は、従来の研究²⁾³⁾で明らかにされているように坑井半径に依存し、坑井半径が大きくなるほど小さくなることがわかる。また、例えば坑井半径 $a=5$ mmの坑井を用いた場合の甲府安山岩と本小松安山岩の結果を比較すると、これら2つの岩石の引張強度がほぼ等しいにもかかわらず破碎圧は10 MPa以上異なり、この結果は引張強度だけで破碎圧を評価することが困難であることを示している。一方(6)式より求められる破碎圧の予測値は、坑井半径の大きさならびに特性距離の異なる岩種によらず実験結果に良く一致している。本報で

実験に用いた坑井半径の大きさは、実験上の制約から $a=15\text{mm}$ までとしたが、(6)式よりわかるように破碎圧は坑井半径がさらに大きくなるにつれ従来の理論¹⁾による予測値に漸近する。しかしながら、甲府安山岩のように特性距離が比較的大きい岩石の場合、坑井半径が $a=60\text{mm}$ 程度であっても、(6)式による破碎圧は従来の理論¹⁾による破碎圧の予測値に比べ依然として3割以上大きくなる。なお、 $a=60\text{mm}$ の坑井は水圧破碎地殻応力計測に用いる坑井としては平均的な大きさである。

5. 結 言

本報では、水圧破碎における坑壁からの亀裂初生挙動の評価を目的として特性距離破壊基準を導入し、安山岩を用いた室内実験によって同破壊基準の妥当性を検証した。得られた知見を以下に示す。

(1) 特性距離破壊基準に基づく評価式によって、破碎圧を評価する際に必要な引張強度および特性距離は、圧裂引張試験およびA E法を併用した片側に予亀裂を有する三点曲げ試験によって決定することができる。

(2) 坑壁をジャケットすることにより、加圧流体の浸透の影響を排除した条件下における、A E法を併用した模擬水圧破碎実験によって得られた破碎圧の実測値は、従来の破碎圧評価式によって求められる予測値に比べ一様に大きく、その差は坑井半径が小さくなるほど大きくなる。

(3) 一方、本論文で導入した特性距離破壊基準に基づく評価式によって求められる破碎圧の予測値は、坑井半径の大きさ、負荷

荷重の大きさ、岩種によらず実験結果に極めて良く一致する。従って、特性距離破壊基準は、水圧破碎におけるジャケットした坑壁からの亀裂初生挙動評価に対し、極めて有効である。

なお、本研究は昭和63年度文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号63750073)ならびに総合研究(A)(課題番号62300001)によるものであることを付記し謝意を表する。

参 考 文 献

- Hubbert, M. K. and Willis, D. G.: Trans AIME, 210, 153~160, (1957)
- Haimson, B. and Fairhurst, C.: J. Petrol. Technol., 811~817, (1969)
- Haimson, B. and Rummel, F.: J. Geophys. Res., 87 [B8], 6631~6649, (1982)
- Schmitt, D. R. and Zoback, M. D.: Proc. 2nd Int. Wkshp. Hydraulic Stress Measurements, I, 425~450, (1988)
- 石島洋二・木下重教・伊藤芳則: 日本鉱業会昭和57年度春季大会講演要旨集, 377~378, (1982)
- Nuismer, R. J. and Whitney, J. M.: ASTM STP, 117~142, (1975)
- 村田裕之・橋田俊之・庄子哲雄・高橋秀明: 日本機械学会論文集(A編), 53 [489], 894~898, (1987)
- Lajtai, E. Z.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, 569~578, (1972)
- 岡村弘之: 線形破壊力学入門, (1976), 培風館(東京)
- 和田千春・庄子哲雄: 材料, 35 [389], 145~151, (1986)
- Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N.: Theory of Elasticity, 3rd ed., (1970), McGraw-Hill (New York)

新刊紹介

HOKKAIDO GEOTECHNICS '90

北海道応用地学合同研究会論文集 No. 1

定価3,000円
(送料別)
(1990年2月発行)

共同主催 資源・素材学会北海道支部
日本応用地質学会北海道支部

申込み先 〒060 札幌市北区北13条西8丁目
北海道大学工学部資源開発工学科内
北海道応用地学合同研究会事務局
電話011-716-2111 内線6314(恒川)
6321(米田)

論文集発刊に寄せて 資源・素材学会北海道支部長 中島 巖
日本応用地質学会北海道支部長 鈴木 守

—内 容—

第四紀学の1方法「正四面体法」 —北海道の後期更新世降下火砕堆積物の研究を通して—	近 藤 務
イルムケップ火山周辺の断層系について	菊 地 純・山本明彦
北海道の地層と地下水の揚水特性	根 岸 正 充
十勝平野西部の地下水流動系に関する一考察	池 田 光 良
掘進にともなう地下水位の変動の予測に関する研究 —氏平増之・加藤規泰・森川達也	氏平増之・加藤規泰・森川達也
十勝岳温泉の異なる2つの熱水流動系	川 口 通 世・河 田 孝 一
西野層を対象とした地熱生産試験結果の定量的解析 —佐野 栄・秋田藤夫	佐野 栄・秋田藤夫
ブルーレジン注入法によって測定した孔隙率 —温泉・地下水探査への応用可能性—	加 藤 孝 幸・佐々木 克 久 菊 池 純・川 口 通 世
サーマルブローブ法による北海道の岩石の熱伝導率	根 岸 正 充・菊 地 昌 博

北海道生田原町岩戸地区での最近の地すべりの地質特性	前 田 寛 之・大 井 桑 司
積丹半島の黒鉱鉱石	小 野 修 司・品 川 祐 司 河 野 純 一・佐 藤 壽 一
エレクトラムの組成と反射率	小 野 修 司・佐 藤 壽 一
岩石穿孔音のスペクトルに関する研究	中 島 巖・村 井 融
超音波距離センサーの走査による岩石の2次元形状の測定	皿 田 滋
モルタル平板爆破における供試体物性と漏斗指数の関係	本 間 久 朗
引立面付近の炭層状況と破壊に関する2、3の考察 —後藤龍彦・藤井義明・佐藤千城	後藤龍彦・藤井義明・佐藤千城
石炭滑走におけるプラスチックトラフの摩擦抵抗 —藤崎 仁・中島 巖・氏平増之	藤崎 仁・中島 巖・氏平増之
Analysis on the Characteristic Curve of Centrifugal Mine Fans	Toshiro Isobe
Effect of Acoustic Emission Activity on Gas Permeability of Coal	Iwao Nakajima, Qiluan Yang
—Masuyuki Ujihira and Fangtai Ma	Masuyuki Ujihira and Fangtai Ma
坑内火災検知用SO ₂ センサーの動作特性	野 田 和 俊・高 橋 保 盛 木 山 保 保・羽 田 博 憲
自己触媒によるマンガン(II)イオンの酸化について	高 森 隆 勝・嶋 津 恵 子 恒 川 昌 美・平 島 剛
ウルトラ浮選による石炭灰中の残留炭素質物質の除去 —高森隆勝・恒川昌美・三 野 陽 一	高森隆勝・恒川昌美・三 野 陽 一