

(94) 坑井軸に沿うき裂の逆解析による応力場評価

地熱技術開発株式会社 ○岡部 高志・篠原 信男・高杉 真司
東北大学 流体科学研究所 林 一夫

Stress Evaluation of Drilling Induced Fractures by an Inverse Problem

Takashi OKABE, Nobuo SHINOHARA and Shinji TAKASUGI, Geothermal Energy Research and Development Co., Ltd.
Kazuo HAYASHI, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Abstract

The fracture characterization becomes important. Because fractures directly relate to the production of geothermal fluid and oil, and possibly show the stress inhomogeneity in the earth. Sometimes the hydraulic fracturing is conducted at the well for refining the well productivity. In case of conducting the hydraulic fracturing, it is very important to know the three dimensional stress field at the well for predicting the direction of the fracture propagation.

We conducted the BHTV (Borehole Televiwer) and the FMI (Formation Micro Imager) loggings at the TG-2 well for the fracture characterization. From the results of the two loggings, we observed so-called drilling induced fractures on the borehole wall at some different depths. In detail drilling induced fractures were observed as θ_{mN} (position of the axial fracture) and γ_m (angle between the fracture and the borehole axis). So far γ_m s have not been discussed, while θ_{mN} s are recognized as maximum stresses direction on the plane perpendicular to the borehole axis. In this paper, we examine the new application method of analysis for the three dimensional stress field by using θ_{mN} s with γ_m s.

1. 緒言

水圧破砕実験井TG-2井(掘進長:1298m, 坑底方位:223° MN, 最大傾斜:38° 50', 裸坑部:710~1298m)において、水圧破砕前後におけるき裂検出及び評価を目的として、水圧破砕前後でBHTV(Borehole Televiwer)検層を実施した。また、水圧破砕後にはFMI(Formation Micro Imager)検層も実施した。その結果、地下応力の大きさ及び方向を現していると考えられる坑井軸に沿うフラクチャ(以下、ドリリング・インデューストフラクチャと呼ぶ)の詳細が観測された。これらのドリリング・インデューストフラクチャは坑井近傍の応力場に起因した方位(この大局的方位を θ_{mN} と表示する)に初生しており、これらに随伴する2次的なフラクチャが坑井軸方向とある角度(この角度を γ_m と表示する)をもって傾斜していることが確認された。これまで、水圧破砕等でき裂初生の位置(θ_{mN})については坑井軸に直交する平面内における最大圧縮応力として議論されているが、き裂の角度(γ_m)についてはほとんど検討されていない。本報では、今まで検討されていなかった γ_m を θ_{mN} とともに再検討することにより坑井近傍の3次元応力場の推定を行った。

TG-2井で観測されたドリリング・インデューストフラクチャに基づき、その概要及び解析方法については既に述べてきた¹⁾。そこで、本報では逆解析における観測誤差の影響の検討を含むケーススタディを中心に述べ、さらにTG-2井の逆解析結果について述べる。

2. 3次元応力場解析の概要¹⁾

第1図にTG-2井で観測されたドリリング・インデューストフラクチャを示す。大局的に見て坑軸に沿ったフラクチャは方位120° 及

び300° 付近に坑井軸に対して対称的に初生している他、坑井軸に対して傾斜している2次のフクチが連なっていることが確認される。このフクチは、坑井掘削中の泥水圧、過剰ポソ圧及び熱応力により生成されたと考えられ、坑壁において引張り応力が最大となる箇所に初生し、その後地下の最大圧縮主応力の方向に進展するとされている²⁾。これらのフクチの生成方位(θ_{mn})及びその傾斜(γ_m)を解析することにより3次元応力場を決定できる。第2図に解析方法の概念図及び座標系を示す。

本解析では、坑壁における応力場を評価するため3種類の座標系を使用する。1つ目は地下の3次元主応力軸を示すデカルト座標(X, Y, Z)で、2つ目は坑井軸(ζ)をZ' 軸に一致させたデカルト座標(X', Y', Z')で、3つ目は2つ目の座標に対応する円柱座標(r, θ , ζ)である。坑壁においてフクチは、(1)式で与えられる位置に初生し、坑井軸に対して(2)で与えられる角度だけ傾斜する。(3)式は(1)式における最大引張り応力の大きさを示し(圧縮を負とする)、この応力が岩盤の引張り強度に等しくなった時点で γ_m の方向にき裂が初生する。

$$d\sigma_m/d\theta=0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\gamma_m=1/2\arctan\{2\tau_{\theta\zeta}/(\sigma_{\theta}-\sigma_{\zeta})\} \dots\dots\dots(2)$$

ここに σ_m は坑壁上の最大引張応力であり、

$$\sigma_m=1/2\{\sigma_{\theta}+\sigma_{\zeta}+\sqrt{(\sigma_{\theta}-\sigma_{\zeta})^2+4\tau_{\theta\zeta}^2}\} \dots\dots\dots(3)$$

以上の理論的背景により坑井方位・傾斜の異なる3深度以上で θ_{mn} 及び γ_m の組が観測された時、上記の式を適用することにより3次元応力場を一意的に決定することができる。

逆解析は、6個のパラメータ($\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{33}$)を求めるため非線形最小自乗法を用い、非線形解法としてマルカート法、線形解法として正規方程式を用いないハウスホルダー法を使用した。

3. モデルスタディ

3-1. モデルスタディ 1¹⁾

ここでは、順解析によって得られた結果を観測値(真値)として逆解析を行い、初期値を適当に与えた時に、順解析で想定したモデルに戻るかどうかを吟味した。

3次元応力場のモデルは横ずれ断層型を仮定した(第3図参照)。このモデルにおいて第1表のケース1の坑軸方位及び傾斜の組合せて得た θ_{mn} 及び γ_m の順解析結果を観測値として逆解析を行った。初期値としては第4図に示すスタートポイント(Start Point)を使用した。同図にはこの時の解の収束の状況を示している。このように、順解析で仮定したモデルに非常に良い一致が得られ、このモデルスタディによりトリリングインデューストフクチによる3次元応力場の逆解析の可能性が示唆されると考えられる。

3-2. モデルスタディ 2 (観測誤差の影響の検討)

3-2-1. 概要

観測誤差の影響の検討は、第1表に示す順解析結果の θ_{mn} 及び γ_m に $\pm 5^\circ$ の観測誤差を与え、実際の観測値が正規分布($N(\theta_{mn}$ または $\gamma_m, (\pm 5^\circ)^2$))をなしていると仮定し、正規分布Nより正規乱数を使用して100組のデータセットを使用して100回の逆解析を行った。また、観測誤差の影響の検討での坑跡は実際の地熱坑井で予測される坑跡を想定している。

3-2-2. 観測誤差の影響の検討

(1) ケース 1

第5図～第7図に最大圧縮主応力、中間圧縮主応力及び最小圧縮主応力の分布を示す。第7図の最小圧縮主応力は良く決まっているが、第5図及び第6図に示す最大及び中間の分布は、真値付近に分布する他、それぞれ中間及び最大の位置にも分布している。これは、正規乱数を使用して組合わせた観測値により、計算結果が

最大圧縮主応力と中間圧縮主応力の間で逆転する可能性があることを示唆する。また、第8図及び第9図に最大圧縮主応力に対する中間及び最小圧縮主応力の比を示す。全体的に最大に対する各応力比は、ばらついており特に最大に対する中間の応力比は σ_2/σ_1 で仮定した応力比近辺に収束していない。

(2) ケース2

これは、ケース1よりも坑跡が変化に富む場合である。第10図～第12図に最大圧縮主応力、中間圧縮主応力及び最小圧縮主応力の分布を示す。最大及び中間圧縮主応力はケース1の場合に比較して良く決まっていると考えられる。また、応力比も良く決まっていると考えられる(第13図、第14図)。

以上、ここでは2ケース、3深度の必要最低限のデータセットを使用して検証を行っている。しかし、実際のドリリング・インジェクション・フラクチャの観測深度はもっと多いと考えられ、現実には検証した検証を実施する必要があると考えられる。つまり、ケース1の場合でももっと観測深度を増やし、多くのデータセットを使用して逆解析を行えば、ケース2以上の収束性が得られると考えられる。また、今回重みはゼロとしており、乱数を使用して得られた値と平均値(観測値)との誤差の大きさを議論していない。今後、どのように重みを与えて行けば良いか検討する予定であり、重みを考慮することによりケース1でも分布や応力比が収束してくる可能性があると考えられる。

4. TG-2井のケーススタディ¹⁾

TG-2井では、それぞれ坑井方位・傾斜が異なる数カ所の深度でドリリング・インジェクション・フラクチャが確認されている。その中で、 θ_{MN} 及び γ_m が読み取り可能な4箇所をピックアップし、逆解析を実施した。逆解析結果を第14図に示す。また、第14図には同坑井の885mで行われた37試験のAE-DR、ASR及びDSCA法の結果も合わせてプロットしている。ここで、図中黒塗りつぶしは最大を、黒半塗りつぶしは中間を、白抜きは最小圧縮主応力の方向を示す。第14図を見ると、最大圧縮主応力の方向はAE-DR法の結果を除きほぼ一致している。また、逆解析結果は、中間と最小圧縮主応力の応力比が小さいことにおいても37試験結果と整合的である。しかし、逆解析結果は応力比において中間と最小圧縮主応力が最大圧縮主応力に対して、他の37試験結果のそれより小さくなっている。これについては、現在検討中である。

以上、応力比の議論を除けばTG-2井での逆解析結果はAE-DR法を除く37試験結果とほぼ整合的であり、本手法が実際の坑井にも適用できる可能性が明らかとなったと考えられる。

5. 結論

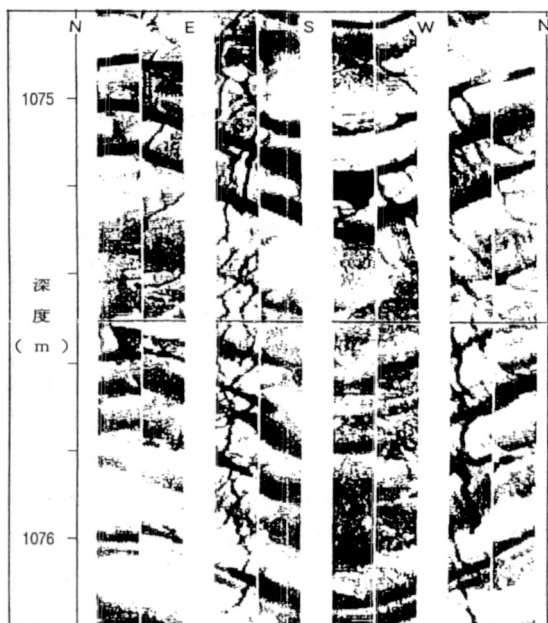
BHTV及びFMI検層結果によるドリリング・インジェクション・フラクチャの詳細な観測及びそれに基づく逆解析による定式化を行った。その結果、検証では逆解析による3次元応力場の解析の可能性が明らかとなった。また、観測誤差の影響の検討を行い、計算結果の分布を示した。さらに本逆解析法をTG-2井に適用し、計算結果の応力比については検討の必要があるが、実データを使用した解析の可能性も明らかとなった。

今後、さらに観測誤差の計算結果に対する影響について検討し、計算結果の信頼性を評価していく必要があると考えられる。

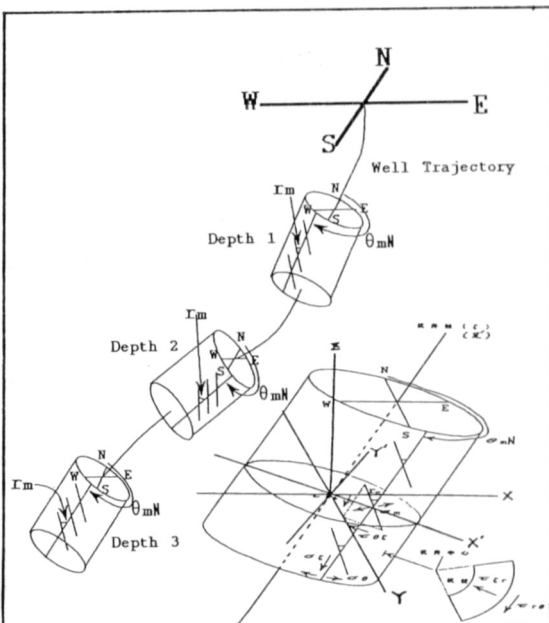
なお、FMI検層・BHTV検層データ取得及び逆解析は平成4年度「熱水利用発電プラント等開発」の一環として新エネルギー産業技術総合開発機構からの委託を受けて実施したものである。

参考文献

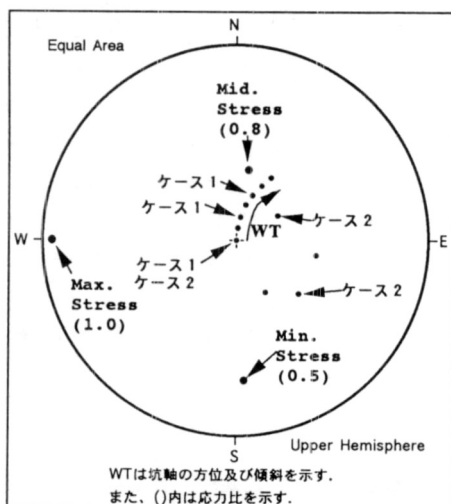
- 1) 岡部高志, 篠原信男, 高杉真司, 林一夫, 「坑軸に沿うき裂の逆解析による応力解析」, 物理探査学会第91回(平成6年度秋期)学術講演講演論文集, 15-19
- 2) 林 一夫, 阿部博之(1984), 「地熱地帯における地殻応力測定」, 日本地熱学会誌, Vol16, No. 3, 203-212



第1図 坑井軸に沿うフラクチャの例

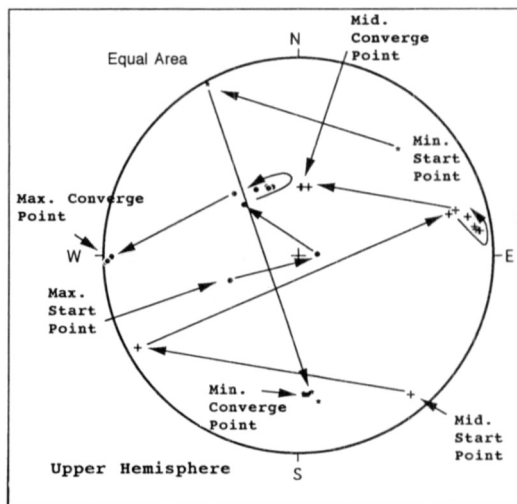


第2図 解析の概念図及び座標系

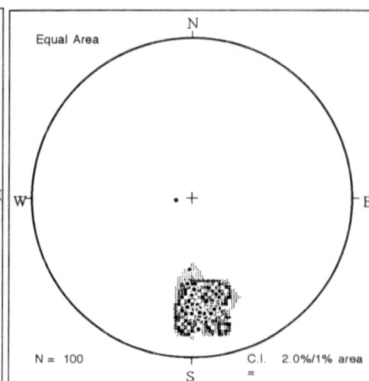
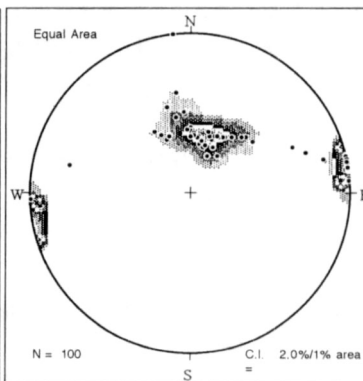
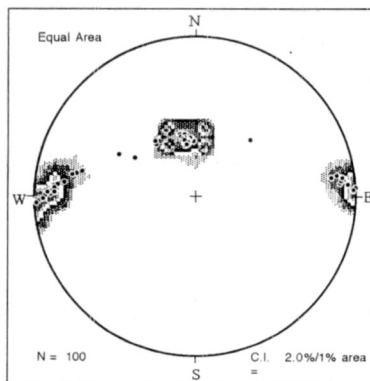


WTは坑軸の方位及び傾斜を示す。
また、()内は応力比を示す。

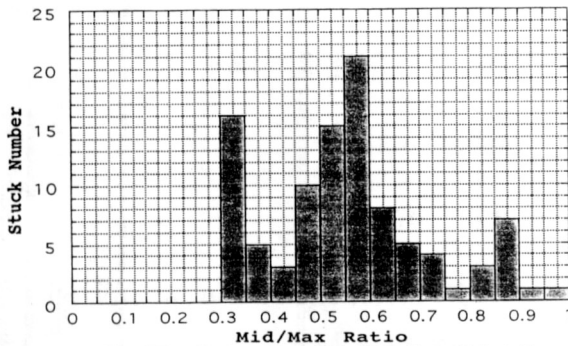
第3図 逆解析用モデル



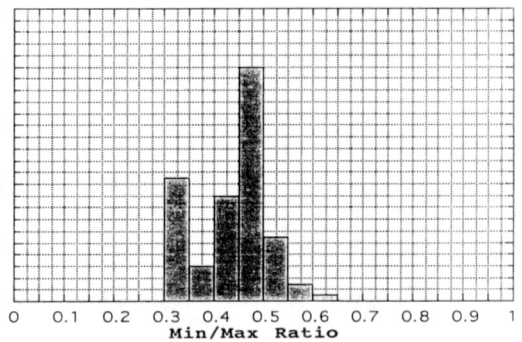
第4図 逆解析収束状況(初期値: 正断層型)



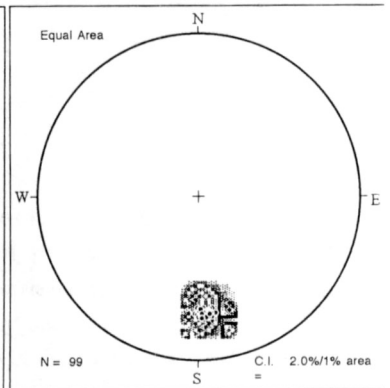
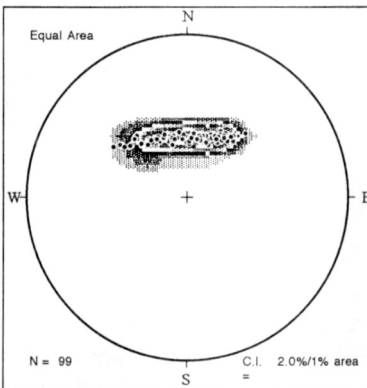
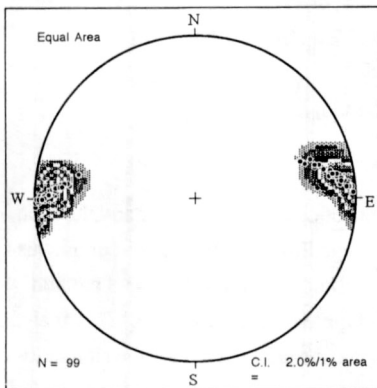
第5図 最大圧縮主応力の分布(ケース1) 第6図 中間圧縮主応力の分布(ケース1) 第7図 最小圧縮主応力の分布(ケース1)



第8図 最大に対する中間圧縮主応力の比



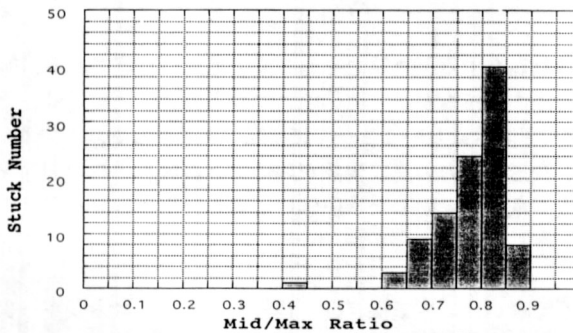
第9図 最大に対する最小圧縮主応力の比



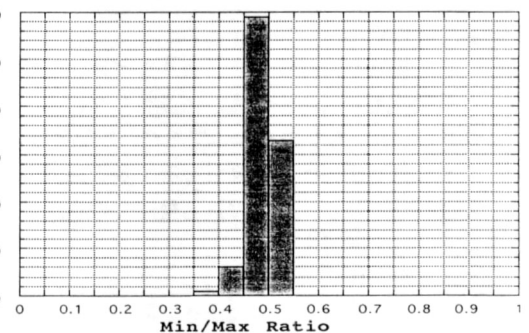
第10図 最大圧縮主応力の分布(ケース2)

第11図 中間圧縮主応力の分布(ケース2)

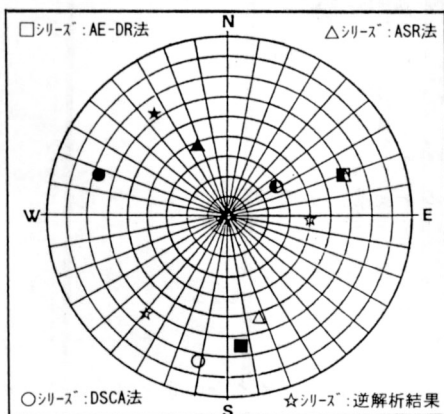
第12図 最小圧縮主応力の分布(ケース2)



第13図 最大に対する中間圧縮主応力の比



第14図 最大に対する最小圧縮主応力の比



第15図 T G - 2 井逆解析結果

第1表 順解析結果

ケース		深度(m)	坑軸方位	坑軸傾斜	き裂位置 (θ_{mN})	き裂角度 (γ_m)
1	2		deg.	deg.	deg.	deg.
○	○	1000	0	0	87.6	-26.5
		1100	5	5	87.7	-23.3
		1200	10	10	87.9	-19.6
		1300	15	15	88.2	-15.5
		1400	20	20	88.3	-11.4
○	○	1500	25	25	88.3	-7.4
		1600	30	30	87.9	-3.7
		1700	60	20	92.2	-19.1
		1800	100	35	105.8	-27.5
		1900	130	35	108.5	-32.4
		2000	150	25	97.1	-32.6

坑軸方位及びき裂位置は北を基準にしている。