

(34) 断層近傍における原位置応力測定

公害資源研究所	正会員	○ 木山 保
〃	〃	瀬戸政宏
〃	〃	緒方雄二
〃	〃	勝山邦久

In-Situ Stress Measurements in Rock Mass surrounding Faults

Tamotsu KIYAMA, National Research Institute for Pollution and Resources
Masahiro SETO
Yuji OGATA
Kunihisa KATSUYAMA

Abstract

In-situ stress measurements by hydraulic fracturing method and stress relief method were conducted in two test sites in Kamioka Mine located at a depth of 1000m from the surface. In the test site located under the fault, maximum, intermediate and minimum principle stresses were evaluated respectively 347.9, 158.9 and 60.4 kg/cm² by stress relief method. In the other test site located upper the fault, maximum, intermediate and minimum principle stresses were evaluated respectively 273.3, 151.4 and 84.9 kg/cm² by hydraulic fracturing method. However, the principle stresses by hydraulic fracturing method in the site located under the fault were estimated low values, and it suggested that tensile stresses were occurred in the measuring borehole surface by the high stress deviation.

1. はじめに

地下深部に空洞構造物を開削する場合、岩盤物性や応力状態を十分に調査し、安全性を確認しておくことが重要である。また、空洞の近傍に断層等の不連続面が存在する場合は、この影響について検討する必要がある。実際に原位置の断層近傍や断層から離れた部分で応力を測定してみることは、断層等の不連続面の力学特性を明らかにするために重要であると考えられる。

今回、神岡鉱山茂住坑の地表下約1000mの岩盤の応力状態を2カ所で測定する機会を得た。このうち1カ所は、大型空洞開削予定地で、断層の下盤側に位置し、断層からの水平距離は約25～30mである（以下、A点と呼ぶ）。もう1カ所は、断層の上盤側で、断層からの水平距離は約75～80mである（以下、B点と呼ぶ）。またこのB点は、地質的に安定しているもう1つの断層（南東部断層）に比較的近い。測定方法は、A点では水圧破碎法及び球面孔底ひずみゲージを用いた応力解放法の2手法を、B点では水圧破碎法のための1手法を採用した。本報では、応力測定結果とこれらから考えられる知見について述べる。

2. 測定現場及び測定孔

測定現場周辺の坑道位置、断層及び測定孔を図1に示す。2カ所の測定点（A・B点）の周辺には、応力状態に影響を及ぼすような採掘跡等は見当らない。断層との距離が短く下盤側にあるA点では、B点に比べて坑道壁面が剥離しやすく、き裂も発達している。断層の走向はN28E、傾斜は78Wである。

断層下盤側のA点では水圧破碎用HF1~HF3の3孔及び応力解放法用SR1の1孔を、上盤側のB点では水圧破碎用HF4~HF6の3孔を測定孔として穿孔した。水圧破碎用の孔は、孔径76.5mmφで孔長10mとした。またHF1とHF4は断層の走向にほぼ平行に上向き2°で、HF3とHF6は鉛直下向きに、HF2とHF5はこれらにほぼ直交し上向き2°で穿孔した。応力解放法用SR1は、パイロットボーリングは孔径76.5mmφ、オーバーコアリングは孔径180mmφとし、坑道軸方向に上向き2°で約12m穿孔した。

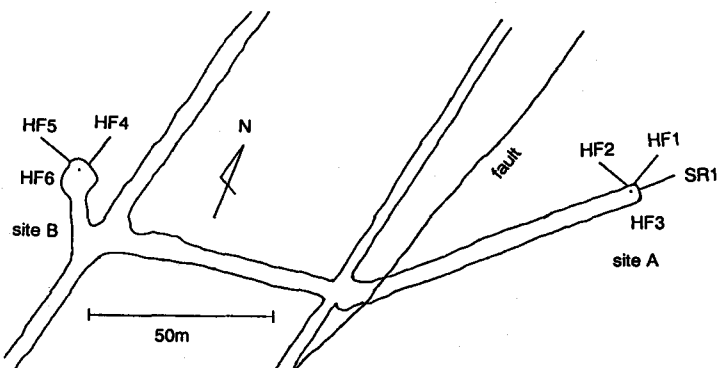


図1. 応力測定実施現場及び測定孔の配置

3. 水圧破碎法による応力測定

先ず採取されたボーリングコアを観察し、天然き裂の無いと思われる区間を1孔につき3カ所選び、この区間に型取りパッカーを挿入して、孔壁の凹凸を写し取り、天然き裂の有無を確認した。次にダブルパッカーを挿入し、前後のパッカーエレメントを膨張させて、これに挟まれた区間を密閉し、高圧ポンプから注水し、水圧破碎せお行なった。一連の注水手順で応力算定に必要な水圧-時間曲線を得た。ダブルパッカー回収後、再び型取りを行い、水圧破碎で新たに造成されたき裂を確認した。

水圧-時間曲線から、岩盤に初めてき裂が進展する際のブレイクダウン圧 (P_{ba})、このき裂が再開口する際のリオープン圧 (P_{bi}) 及びき裂が閉口する際のシャットイン圧 (P_s) が得られ、このうちリオープン圧とシャットイン圧から、孔軸に直交する面内の最大及び最小主応力値を求めた。

水圧破碎の前後の型取りから、水圧破碎によって造成されたき裂が孔軸に平行な縦き裂であると確認された場合は、このき裂方向を面内の最大主応力方向、これに直交する方向を面内の最小主応力方向とした。

測定点A・B点で、孔軸方向の異なる3孔で測定しており、これらに直交する面内の応力成分からたてた観測方程式を解くことにより3次元応力状態を表わす6個の応力成分を得ることができる¹⁾。さて、1孔につき3カ所で水圧破碎を行なっているのので、各孔からそれぞれ1カ所の測定データを使い、全ての組合せについて計算し、誤差の分散が最小となる組合せの計算結果を応力測定結果とした。

図2に水圧-時間曲線を示す。HF2-1はA点、HF5-7はB点における測定結果の例

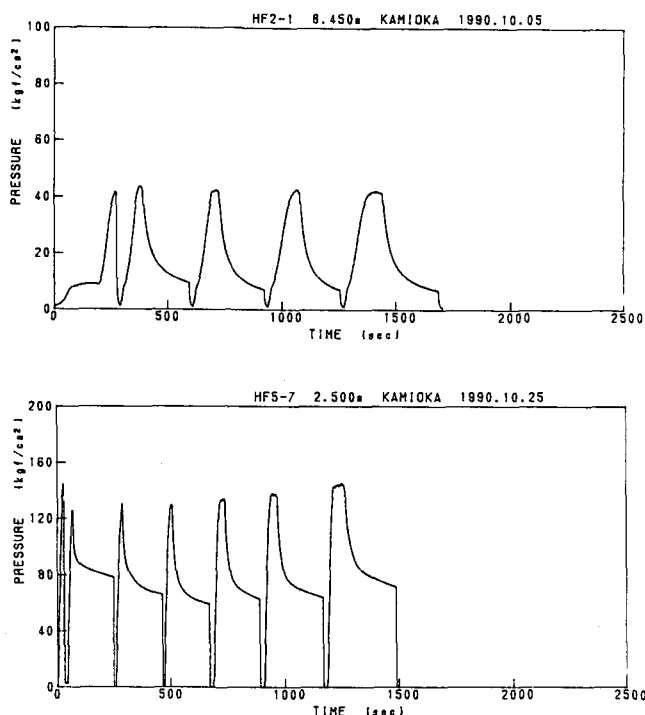


図2. 水圧-時間曲線

である。これらの図から明らかなように、A点ではB点に比べて水圧のレベルが極めて低い。また、A点では、水圧の立ち上がりやゆるやかで、多量の注水でもなかなか水圧が上昇しない。このことは、B点では岩盤に水があまり浸透しないのに対し、A点では微細なクラックが開口しているか開口しやすい応力状態にあり、低い水圧で水が浸透していくものと考えられる。さらにA点では、HF2-1のようにシャットイン直後に急激に水圧が下がってしまう場合多くみられた。

水圧-時間曲線からリオープンング圧を求めるために、図3のように水圧の立ち上がり部分を重ねて描いた。

1回目の注入、すなわち初めてき裂が発生しブレイクダウンする際の直線的な水圧上昇曲線を基準とし、2回目以降の曲線がこれから離れていく点の水圧をリオープンング圧とした。また、1回目の水圧上昇曲線が直線的でなく、途中で水圧の上昇が緩やかになる場合は、この屈曲点の水圧をリオープンング圧とした。

シャットイン圧は、水圧の自然対数と時間の関係から求めた。シャットイン後の水圧変化(P)から、水圧の漸近値を P_a とし、まず $(P - P_a)$ の自然対数と時間との関係が直線に載るような P_a を見つける。この直線を外挿し、シャットイン時の水圧 P_e を求め、シャットイン圧 P_s は P_a と P_e の和として求めた²⁾。図4に、その1例を示した。

水圧-時間曲線から求めたブレイクダウン圧、リオープンング圧及びシャットイン圧と測定孔の方向及び孔壁に造成されたき裂の方向を表1に示した。測定孔の方向は、水平面からの傾斜角 α を下向きを正として、孔軸を水平面に投影した方向 β を北向きから時計回りを正として示した。また、き裂の方向 θ は、孔軸に直交する面とき裂面の交線が、孔軸に直交する面と孔軸を含む鉛直面の交線となす角を、孔口元からみて上方から時計回りを正として示した。なお表1では、水圧変化が明らかに異常でデータとして使用不能なものと、き裂の方向がよく分からなかったものを省略した。

4. 応力解放法による応力測定

応力解放法による応力測定を行なうために、まず坑道

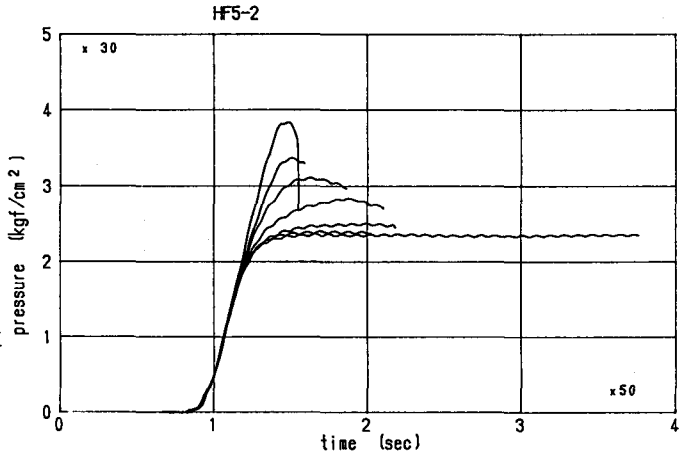


図3. リオープンング圧の読み取り

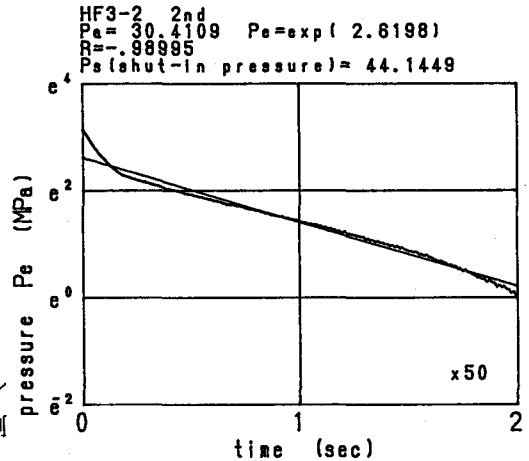


図4. シャットイン圧の決定

表1. 水圧破碎法の測定データ

Borehole	Breakdown Pressure (kg/cm²)	Re-opening Pressure (kg/cm²)	Shut-in Pressure (kg/cm²)	Dip α (deg)	Azimuth β (deg)	Fracture Angle θ (deg)
HF1.2 (A)	66.8	47.2	61.5	-2	19	117.0
HF1.3 (A)	63.6	41.6	46.1	-2	19	107.5
HF2.1 (A)	41.6	38.0	39.3	-2	289	94.7
HF3.2 (A)	64.3	53.6	44.1	90	0	99.3
HF3.3 (A)	49.2	38.4	39.8	90	0	123.0
HF4.1 (B)	123.0	98.4	115.5	-2	19	49.0
HF4.3 (B)	138.0	86.2	107.8	-2	19	124.0
HF4.4 (B)	139.0	77.8	100.1	-2	19	105.3
HF5.2 (B)	115.7	56.4	89.8	-2	289	74.3
HF5.7 (B)	145.8	110.8	97.9	-2	289	74.7
HF6.1 (B)	147.2	125.1	134.5	90	0	74.3
HF6.2 (B)	151.2	139.2	116.9	90	0	76.2

の影響を受けない岩盤部分まで、孔径180mmφのコアビットで約5mの先進ボーリングを行なった。次に孔底に孔径76.5mmφのコアビットで約50cmのパイロットボーリングを行い、さらにこの孔底を球面ビットで半球面状に仕上げ、球面ひずみゲージを接着した。ここでひずみの初期値を計測し、今度は孔径180mmφのコアビットで約1mオーバーコアリングを行なった。コアを回収し、ひずみの最終値を計測した。この孔底に再び小孔径ビットでパイロットボーリングを行い、測定を繰り返した。本来は、オーバーコアリング中もひずみ計測を行なうのが望ましいが、今回はスイベルの加工が間に合わなかったため、初期値と最終値の計測のみとなった。また、5mから奥の岩盤は比較的き裂が卓越しており、応力算定に使用できた測定データは1組であった。

測定孔から採取された岩石コアは実験室に持ち帰り、整形したコアに材料試験機で繰り返し載荷し、ヤング率及びポアソン比を測定した。原位置で測定したひずみ変化と、除荷時のヤング率及びポアソン比から、応力状態を計算した。球面ひずみゲージは16素子のひずみゲージで構成されており、応力状態を計算する際に、最確値と実測値の残差が大きい素子のデータを除いて繰り返し計算し、残差が最小となる組合せの計算結果を応力測定結果とした³⁾。

表 2. 応力測定結果

5. 応力測定結果及び考察

水圧破砕法と応力解放法による応力測定結果を表2及び図5に示した。PN～PVNは、北、東及び鉛直方向に座標軸をとったときの応力成分である。また、S1(σ_1)、S2(σ_2)及びS3(σ_3)は、それぞれ最大、中間及び最小主応力である。なお、主応力の方向を表わす α 及び β のとり方は、孔軸の方向の場合と同様である。図5において、(HF-A)及び(HF-B)はそれぞれ、A点及びB点における水圧破砕法の結果、(SR)はA点における応力解放法の結果であることを示す。Faultは、断層の法線方向を示す。また同図はそれぞれの主応力方向を下半球に投影したものである。

A点における主応力の方向は、水圧破砕法及び応力解放法ともに同様の傾向を示したが、主応力値は水圧破砕法が極端に小さな値を示した。応力解放法の結果では、最大主応力(348kg/cm²)が最小主応力(60kg/cm²)の5倍以上となっており、偏差応力が高い応力状態にあることを示している。このような応力状態の岩盤では、孔軸のとり方によっては、穿孔しただけで孔壁に引張り応力が作用する場合がある。この部分で水圧破砕を行なえば、造成されたき裂は水圧を解放しても開口したままとなるため、水圧破砕法による応力測定は困難であると考えられる。B点における主応力の方向は、A点と幾分ズレがあるものの、大局的には似た傾向を示した。この主応力方向のズレの原因として、もう1つの断層(南東部断層)の影響が考えられる。B点の最大主応力は273kg/cm²、最小主応力は85kg/cm²で、A点と比べて最大主応力が小

	P _N	P _E	P _V	P _{NE}	P _{EV}	P _{VN}
水圧破砕法(A点)	60.3	86.6	45.8	-1.0	16.1	0.5
水圧破砕法(B点)	142.6	259.9	107.0	40.7	19.3	-26.6
応力解放法(A点)	236.7	191.3	139.2	-76.5	-22.2	112.3

	S1(σ_1)		S2(σ_2)		S3(σ_3)	
	α	β	α	β	α	β
水圧破砕法(A点)	92.2		60.3		40.2	
	19.2	91.5	2.6	0.6	70.7	263.1
水圧破砕法(B点)	273.3		151.4		84.9	
	3.8	73.5	34.5	166.0	55.2	338.0
応力解放法(A点)	347.9		158.9		60.4	
	27.5	119.8	25.1	15.8	51.2	250.2

$P_N \sim P_{VN}, S1(\sigma_1) \sim S3(\sigma_3)$: kg/cm²
 α, β : degree

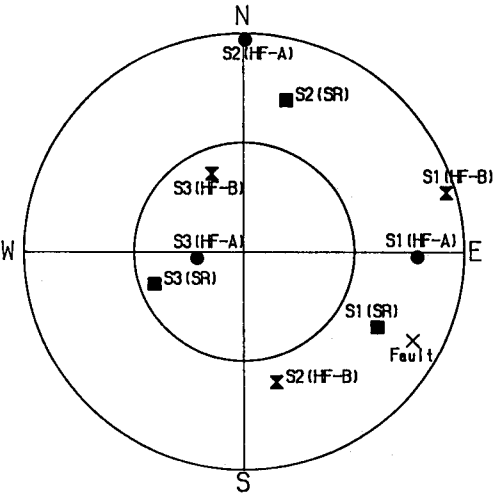


図5. 応力測定結果

さく、最小主応力が大きくなっている。このため、偏差応力はやはり高いものの、A点ほど極端ではないと言える。このことは、A点ではき裂が発達していたのに対し、B点ではき裂が少なかったことと一致する。例えば、最大及び最小主応力を含む面に直交する方向（中間主応力方向）に穿孔する場合を想定すると、孔壁周方向にA点で最大168kg/cm²、B点で最大21kg/cm²の引張応力が作用することになり、A点ではこれが、採取コアのブラジリアンテストによる引張り強度（数個の試験のうち最大120kg/cm²、最小88kg/cm²）を越えるため、引張き裂が発生することも考えられる。また中間主応力はA点で159kg/cm²、B点で151kg/cm²となっており、ほぼ一致している。

6. まとめ

断層近傍の上下盤2カ所の測定点において、水圧破碎法と応力解放法による応力測定を行い、以下の様な結果を得た。(1)断層下盤側のA点では水圧破碎法と応力解放法で測定したが、主応力の方向に関しては同様の傾向を示したが、主応力値に関しては水圧破碎法が極端に小さい値を示した。(2)A点では、最大主応力が最小主応力の5倍以上で、偏差応力の高い応力状態にあることが分かった。(3)断層上盤側のB点では水圧破碎法で測定したが、A点の応力解放法の結果と比較して、最大主応力は小さく、最小主応力は大きかった。(4)中間主応力は、A点とB点ではほぼ一致した。

今後は、これらの応力測定結果をもとに、断層が周辺岩盤の応力状態に及ぼす影響について検討する予定である。最後に、測定現場を提供して頂き、実験に協力して頂いた神岡鉱山茂住坑の皆様には謝意を表します。

参考文献

- 1) 荻野：水圧破碎による3次元岩盤応力測定法の研究，昭和58年度科研費研究成果報告書，1984
- 2) AGGSON, J. R., K. KIM.: Analysis of Hydraulic Fracturing Pressure Histories, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, No. 1, pp75-80, 1987
- 3) 菅原，他：球面孔底ひずみ測定による3次元岩盤応力の決定，日本鉱業会誌，Vol. 101, No. 1167, pp277-282, 1985