

水 圧 破 壊

伊 藤 久 男 (地殻熱部)

Hisao Ito

水圧破壊 (ハイドロフラクチュアリング: hydraulic fracturing) は坑井内に水を圧入し 割れ目を生成させる方法であるが 1960年代に石油・ガス井の刺激法として発達したテクニックであり 石油・ガス井ではルーチン的に応用されている。最近水圧破壊法による地殻応力の測定 地熱開発に関連した高温岩体発電 地熱井の刺激等新たな応用と技術的進歩が生まれ脚光を浴びている。

水圧破壊による地殻応力測定の方法は HUBBERT and WILLIS (1957) の式にさかのぼる。すなわち

$$P_b = 3 S_n - S_H - P_p + T \quad (1)$$

ここで P_b 破壊水圧 (breakdown-pressure) T 岩石の引張強度 S_n 最小水平応力 S_H 最大水平応力 P_p 孔隙圧である。1960年代後半にミネソタ大学の HAIMSON らは室内岩石実験により 水圧破壊で求めた S_n S_H が地殻応力に一致することを実証し 精力的に水圧破壊法による地殻応力の野外測定を開始した。

水圧破壊法による地殻応力測定の方法は簡単で 坑井内のある区間をパッカーによってシールし 上下パッカー間に水を圧入して新しい割れ目を開かせ その時の水圧から地殻応力の絶対値を 割れ目の方向から地殻応力の方位を求めるものである。このために 岩石が破壊するまで線型弾性変形をする 脆性破壊をする 均質かつ等方的な媒質である 不透水性である 主応力軸の一つが坑井の軸と一致すること等の条件が必要であるが 一般的にはこれらの条件は満たされると考えてよいだろう。地殻応力測定法としては オーバコアリング等他の測定法もあるが 直接応力を測定できる 応力の絶対値と方向の両方が測定できる 深部での測定が可能であり 応力の深度分布決定が可能になるといった点で水圧破壊法は優れている。

パッカー間に水圧をかけ 割れ目が開いた時の圧力すなわち破壊水圧は(1)式より求められる。また破壊後水圧を下げると 割れ目面と垂直な方向の地殻応力 S_n と割れ目内の水圧がつり合う状態がある。この時の水圧を P_s とすると

$$P_s = S_n$$

となる。 P_b と P_s (割れ目閉口圧: shut-in pressure) を測

定することにより最大・最小主応力が求まる。垂直応力は overburden pressure と考えてコアサンプル密度 γ と深度 H から

$$S_v = \gamma H$$

として求める。ここで T はコアサンプルについて実験室において測定する。 P_p については実測することも可能であるが 一般には水頭圧に等しいとしている例が多い。

T については 実験室での測定は誤差が大きい 必ずしもコアについて測定が可能とは限らない (1)式中の T と実験室での測定結果と対応するとは限らない といった理由から T を使わないで応力値を求める方法が提案されている (BREDEHOEFT et al, 1976 ZOBACK et al, 1977)。すなわち 同じ位置で何回か加圧を行うと 2回目以降は一度できた割れ目を開口させるため $T=0$ と考えてよい。この時の水圧を P_b ($T=0$) (割れ目開口圧: reopening pressure) とすると

$$P_b (T=0) = 3 S_n - S_H - P_p$$

となり reopening pressure を測定することによって T に無関係に応力値を求めることができる。

割れ目の方位は ポアホールテレビュアーあるいは型撮りパッカーによって測定する。ポアホールテレビュアーは 超音波を坑壁に向けて発信し 反射波を受信して坑壁の状態を知る装置である (ZEMANEK et al, 1969)。

共振周波数約 1.2MHz の圧電素子から 1秒間2000パルスが発信され 圧電素子は 1秒間に 3回転する。テレビュアーをケーブルにより上下に 1 m/sec の速度で動かすことによって らせん状に坑壁全体を走査する。内蔵のマグネットメーターにより磁北を検出して方位を知る。坑壁からの反射波の強度をオシロスコープの輝度としてあらわし 写真にとりて記録する。割れ目の部分では反射強度が弱くなり 写真上では黒い線となる。ポアホールテレビュアーは水圧破壊によって生じた割れ目の検出を行うばかりでなく 水圧破壊前に既存割れ目の検出を行い 水圧破壊実施箇所の選定を行う点でも有用である。

型撮りパッカーは通常のパッカーの外側にゴムのエレ

メントを装着したものであり 坑井内で水圧をかけエレメントを膨張させて 割れ目の型撮りを行う。 パッカーを引上げ割れ目の観察を行う。

ボアホールテレビュアーあるいは型撮りパッカーによる方法は 水圧破壊を行った後での測定であるので 割れ目が閉じて検出しにくいという困難点がある。 割れ目が開く際の AE 信号を検出する方法は この困難点を克服できる可能性がある。 しかしブレイクダウンの際に放出される波動エネルギーは信号の検出に十分なほど大きくないため AE によるブレイクダウン検出の成功例は多くはない。 AE 計測はむしろ 割れ目の進展の検出に有効であろう。

水圧破壊法による地殻応力測定は リソスフェアの応力分布 地震予知に関連した断層近傍の応力場測定 誘起地震のメカニズム解明といった純科学的目標とともに 地下構造物設計・建設のための応力測定といった実用的目的にも応用されている。 測定は世界各地で活発に行われている。 1981年12月にアメリカ カリフォルニア州モントレーで開催された Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements には アメリカ カナダ フランス スウェーデン オーストラリア 西ドイツ 中国 日本からの参加者があった。 その他 南アフリカ アイスランド インドにおける測定例も報告されている。 ミシガン州では5,325mの深度における水圧破壊実験が行われ 現在世界最高深度での測定である(HAIMSON 1978)。 特にアメリカでは測定例が多く 地震発震機構や地質学的データによる結果とともに応力場が詳しく解明されている(ZOBACK & ZOBACK, 1980)

高温ではあるが十分な流体の供給がない地熱地域において 二本の坑井を水圧破壊によって連絡させ 水を循



水圧破壊作業風景

ボアホールテレビュアーを坑内に

環し熱抽出を行う研究がアメリカを中心に西ドイツ 日本の共同で進んでいる。 この際水圧破壊によって割れ目を制御しながら進展させる技術と 割れ目を検出する技術の開発が必要である。 破壊力学にもとづいた キ裂の設計に関する理論的研究(ABe et al,1976)や地震学的手法による割れ目の検出および評価(FEHLER, 1979)についての成果があがっている。

地熱井の刺激のための大規模水圧破壊についても今後の進歩が期待されている。

地質調査所では地熱地域において 水圧破壊法による応力測定を行っている。 微小地震の観測結果とあわせて 地熱地域の応力場を総合的に理解できるのも間近であると思われる。 水圧破壊による深部応力場の情報は他の手法では得ることのできない 新しい質のデータを与えてくれるので 地殻の総合的研究を目指す地質調査所にとって 地熱開発への実用的応用とあわせて興味ある研究課題といえる。

参考文献

- Abé, H., Mura, T., and Keer, L.M.(1976) : Growth rate of a penny-shaped crack in hydraulic fracturing of rocks, J. Geophys. Res. vol. 81, pp. 5335-5340
- Bredehoeft, J.D., Wolff, R.G., Keys, W.S., and Eugene Shuter (1976) : Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin, Colorado, Geol. Soc. Amer. Bull. vol. 87, pp. 250-258
- Fehler, M. (1979) : Seismological investigation of the mechanical properties of a Hot Dry Rock geothermal system, Ph.D thesis, MIT
- Haimson, B.Z., (1978) : Crustal stress in the Michigan Basin, J.Geophys. Res., vol. 83, pp. 5857-5863
- Hubbert, M.K., and Willis, D.G. (1975) : Mechanics of hydraulic fracturing, J.Petrol. Tech. vol.9, pp. 153-168
- Zemanek, J., Caldwell, R.L., Glenn, E.E.Jr., Holcomb, S.V., Norton, L.J. and Straus, A.J.D "1969" : The borehole televiewer-A new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection, J.Pet.Tech. vol. 21, pp. 250-258
- Zoback, M.D., Healy J.H. and Roller, J.C. (1977) : Preliminary stress measurements in Central California using the hydraulic fracturing technique, Pure Appl. Geophys. vol. 115, pp. 135-152
- Zoback, M.L. and Zoback, M. (1980) : State of stress in the conterminous United States, J. Geophys. Res. vol 85, pp. 6113-6156