

## 11 - 5 地殻応力測定法の現状評価と新たな提案

### Existing Techniques, Problems and Proposal for the Reliable Measurement of the Crustal Stress

佐野 修 東京大学地震研究所

The Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

#### 1. 背景

地殻応力場およびその変化測定は地震予知研究における重要な測定量の一つであることは間違いなく、新たな観測・実験技術開発研究に携わるものとして、地震予知研究者が抱く地殻応力測定への期待と技術開発レベルのミスマッチ、さらに深部ボアホールを利用した地殻応力測定法の主力である水圧破碎法の原理的な問題が提起されたまま未解決であること等を深刻に受けとめ、筆者らはこれまで地震研究所において二回にわたり地殻応力測定に関する研究集会を開催し議論を深めてきた。研究集会の主題は大別すると、(1) 地震予知研究者がえがくサイエンスプラン、(2) 現状の地殻応力測定法の問題点の整理、(3) 不均質場のなかのポイントでしかえられない測定結果と広域応力場の問題、である。ここでは(2)に着目し、地殻応力測定法の現状評価と新たな提案を試みる。

#### 2. 個々の測定法の問題点の整理と提案

##### ・応力解放法の問題点の整理

応力解放法は工学部門で古くから用いられている手法であり、問題点はこれまでもよく整理されている。列挙すると、

- (1) 弾性率評価エラーが直接影響する。
- (2) パイロット孔掘削とオーバーコア掘削によるコストアップ。
- (3) 測定プローブの弾性率が無視できない場合、大口径オーバーコアが必要。
- (4) 鉛直ボアホール深部に解放ひずみ測定プローブを固定する方法。
- (5) 微小アナログ信号の長距離伝送。

上記(1)～(3)については、これまでも多くの提案がある。問題点(4)(5)は深部ボアホールに適用する場合の障壁であったが、計測系とA/Dコンバータを内蔵した測定プローブを埋設する手法が提案されている。石井他の稿を参照されたい。

##### ・水圧破碎法の問題点の整理

水圧破碎法は1960年代に地殻応力測定法として提案された。二次元問題として取り扱うことが普通であり、きれつ生成方向、きれつ再開口圧(Pr)およびきれつ閉口圧(Ps)が計測され、主応力方向、および下記の二つの方程式を解くことにより水平面内の二つの主応力値が求められる。

$$Pr = 3Sh - SH - Pp$$

$$Ps = Sh$$

ただしSHおよびShは水平面内最大および最小主応力値であり、Ppは空隙圧項である。これまでに指摘されている問題点をまとめると、

- (1) きれつ再開口の瞬間にきれつ面内に作用する水圧がよくわかっていない。すなわち上記のPp項は静水圧なのか、あるいはボアホール内水圧Prと連動するかが論争点である。
- (2) 再開口圧を決めている流量/時間曲線の非線形開始圧力はきれつ閉口圧であるという指摘。
- (3) 主応力比が3を越えると、きれつは完全に閉じることはないが確認困難。

(4) 主応力方向はきれつ生成方向により決定される。応力変化測定で問題が生じる。

上記の問題のうち、(1)(2)は1980年代からしばしば指摘されてきたが、未だ決着しておらず、国際岩の力学学会 (ISRM) により昨年作成された水圧破碎法の推奨法は従来どおりである。(1)(3)(4)は精度の問題であるが、(2)の指摘は原理的問題である。

水圧破碎法による応力測定結果を見ると再開口圧と閉口圧が等しいとみなせる例が非常に多い。過去の論文で再開口圧と閉口圧が数値で示されているものを図示したものが第1図である。これは問題点(2)の指摘に関する状況証拠である。水圧破碎法の諸問題について1980年代から数値シミュレーション研究が実施されてきた。伊藤高敏[2004]による解析結果の一例を第2図に示す。流量一定が仮定されているので、横軸は高圧ホース、ボアホール加圧領域およびきれつからなる被加圧系への流入量とも考えられる。図中368秒の時点で明瞭な非線形開始点が見えるので、この圧力が再開口圧と判定される。しかしきれつはすでに225秒の時点で開口しているため、この時の圧力が真の再開口圧である。仮に二つの再開口圧が二つの主応力の関数であれば精度の問題である。

第2図の非線形開始点とは、高圧ホースを含む被加圧領域のコンプライアンスが変化したことを意味するが、数百メートルもの高圧ホースの容積と比較してきれつの再開口の瞬間の体積変化はあまりにも小さく、流量計や圧力計が地上に設置されている通常のシステムでは検出不可能である。むしろ水圧破碎きれつ全体が開いた瞬間が検出されていると伊藤高敏[2004]は主張した。これが問題点(2)に書かれた指摘であり、通常の手法で検出されている再開口圧が閉口圧と等しいならば、測定量には最大主応力に関する情報が含まれないことを意味する。すなわち精度の問題ではなく、原理的問題となる。議論の詳細は、このトピックスの伊藤久男の稿を参照されたい。

再開口圧と呼ばれている圧力がきれつ閉口圧に等しいという主張はすでに1980年代初頭にみられるのに、何故、これまで決着していないのか整理すると、

- (1) 計測結果をチェックする明快なりファランスに乏しい。
- (2) 疑問点の根拠は上記のような状況証拠とシミュレーション結果が主体である。
- (3) 加圧水がきれつ内部に侵入するので水圧破碎法はきれつが拡大しやすい。すなわち室内検証試験には大きな供試体と大きな二荷軸載荷試験系が必要となるため、地殻応力測定に用いられる実機による室内検証試験は実施困難である。
- (4) これまでに計測された結果からえられた地殻の応力場は、適当な空隙圧を仮定すれば、摩擦係数0.6前後の断層の力の釣り合いで説明できる [Scholz 2000, 2002].
- (5) 深部ボアホールに適用可能な水圧破碎法にかわる手法がなかった。
- (6) 異なる手法による比較試験はこれまでも実施されてきたが、個々の手法の規格等の制約により、同じ地点でも異なったボアホール、同じボアホールでも異なった深度で実施せざるをえないことが多く、まったく同じ深度で実施できたとしても観測方程式レベルの比較は一般に不可能なので、岩盤の不均質性の影響と試験方法の問題の切り分けが困難なことが多かった、などがあげられる。

#### ・新たな手法

水圧破碎法の問題点が深刻であると認識した研究者により、これまでいくつかの提案がなされている。例えば計測系と加圧系をダウンホールに設置し、従来型水圧破碎法の問題点をクリアしようという修正水圧破碎法 [伊藤高敏 2004] の提案、ボアホール壁面の流体載荷を避けることにより水に起因する諸問題をクリアしようという提案などがある。修正水圧破碎法については伊藤久男の稿で詳しく述べられる。後者の手法は、大別すると、特定の方向に応力集中が生じるよう工夫された金属フレームを外側に取りつけたスリーブを介して破碎あるいは再開口する手法 [世羅田 2004]、およびボアホールジャッキを改良した油圧載荷装置を用いてボアホール壁面の特定の方向を破碎あるいは再開口する手

法である [水田ほか 2004]. 修正水圧破碎法は既存の水圧破碎システムにダウンホール載荷装置と計測装置を導入するだけなので, この手法が有効であれば普及は容易であろう. 後者のスリーブ式およびジャッキ式破碎法は水圧破碎法と比較した場合, クリアランスの問題等で劣るが, 室内検証試験が容易に実施できるという利点を持っている. 水圧破碎法で生成したき裂の再開口をジャッキ式破碎法で再開口した場合, その条件は,

$$Pr = 3Sh - SH - Pp \quad (\text{水圧破碎法})$$

$$kPj = 3Sh - SH - Po \quad (\text{ボアホールジャッキ式破碎法})$$

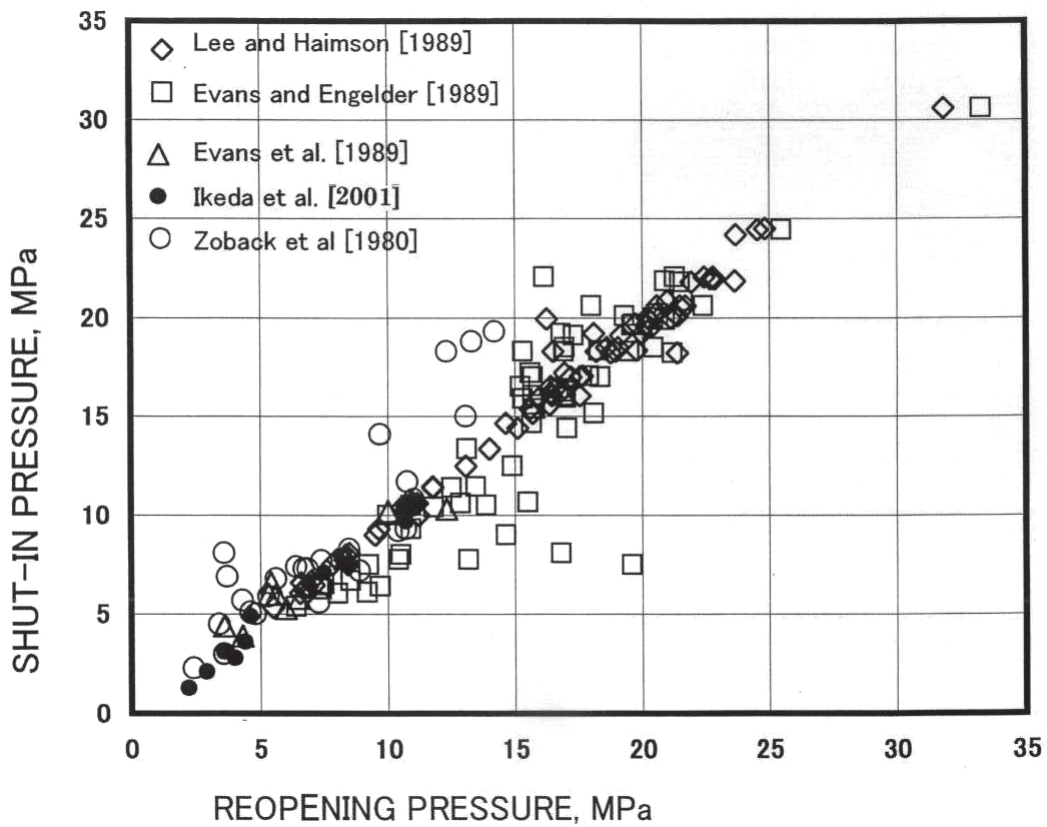
で表すことができるので, 両式を比較することにより,  $Sh$  も  $SH$  も知ることなく, 水圧破碎法の問題点 (1) に関する議論, および問題点 (2) に関する議論, さらに修正水圧破碎法と従来型水圧破碎法の結果の信頼性に関する相互比較が可能である. ただし上式の比例係数  $k$  は測定プローブ固有の係数であり, 室内検証試験により求められる. また  $Po$  は静水圧である.

### 3. まとめ

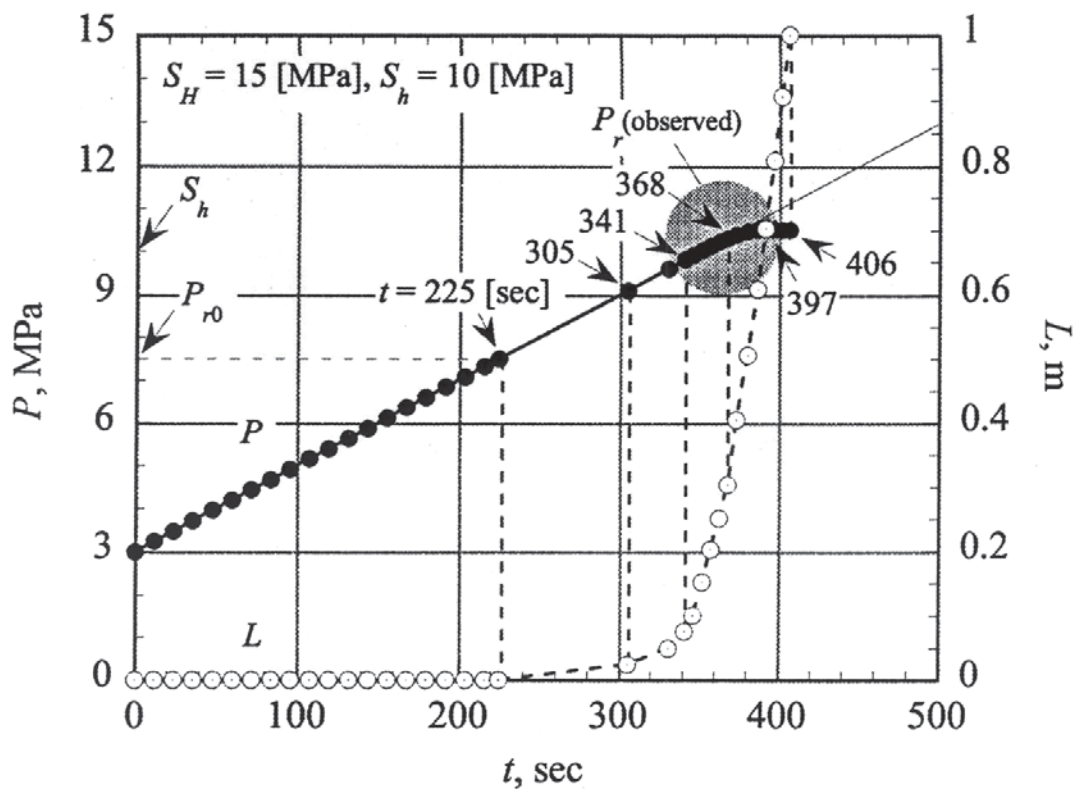
各種応力測定法, 特に水圧破碎法の何が問題になっているか, これまでの試験結果や数値シミュレーション結果に基づき解説し, 解決のための新たな手法を紹介した. 水圧破碎法の問題点に関する議論は未だ決着していない. ここで解説した内容は, 昨年および今年の二年間にわたって地震研究所で開催された研究集会で議論されており, 昨年の結果は月刊地球にまとめられている. 今年の結果は簡単なプロシーディングを発行すると同時に, EPS や地震研究所彙報にまとめる計画である. 最後に示した提案は, 過去 20 年以上にわたって続いてきた論争に決着をつける方法に関する提案であり, 今年度から来年度にかけて実施する計画である.

### 参考文献

月刊地球特集号: 地殻応力の絶対量測定 - その現状・問題点・今後の課題 - (上) および (下), 2004.



第1図 水圧破碎法により、アメリカ、カナダおよび日本でえられた再開口圧と閉口圧の関係。  
 Fig.1 Relationship between reopening pressure and shut-in pressure by hydrofracturing method observed in U.S.A., Canada and Japan.



第2図 きれつモデルを対象として、流量一定で加圧した時のボアホール水圧ときれつ開口部長さ変化を求めた数値シミュレーション結果。SHおよびShは仮定された水平面内最大主応力および最小主応力 [伊藤高敏, 2004]。  
 Fig.2 Temporal variation of borehole pressure and length of open-crack obtained by numerical simulation for crack/borehole model. SH and Sh are assumed maximum and minimum principal stresses [Ito, 2004].