

孔内水圧载荷による亀裂データからの初期地圧測定

山口大学工学部 水田 義明

1 水圧破碎とダブルフラクチャリング法

ボーリング孔の一区間の孔壁に水圧载荷（水の圧入）により亀裂を発生させ、そのときの载荷圧またはその後の流体の圧入、停止、抜き取り、再圧入の繰り返しから得られる圧力-時間曲線と発生した亀裂の方向とから岩盤応力を測定する方法として、現在わが国でよく使われているものに水圧破碎法とダブルフラクチャリング法（スリーブフラクチャリング法）の二つがある。水圧破碎法においては、造成された亀裂の中に水が圧入されるので、亀裂の伸展とともに水圧载荷による亀裂先端の応力拡大係数は増大する。これに対して、ダブルフラクチャリング法においては、スリーブを介して水圧载荷されるので、亀裂がまだ短いときには亀裂先端の応力拡大係数は亀裂の伸展とともにいったん増大するが、その後は減少する。したがって、亀裂を伸展させるためには、また内圧の増大による2次亀裂の発生に至るには、内圧をどんどん増大させなければならない。すなわち、水圧破碎法（HF）とダブルフラクチャリング法（DF）とを比較すると表-1のようである。

表-1 水圧破碎法（HF）とダブルフラクチャリング法（DF）との比較

	水圧破碎法	ダブルフラクチャリング法	備考
測定システム	圧力-時間曲線	圧力-内径変位曲線（4方向）	変位計内蔵の有無
最大水圧	亀裂発生時	2次亀裂発生後も増大	HF << DF（パッカーやスリーブの耐久性に関係）
既存亀裂の影響	横亀裂発生の可能性、縦亀裂データの解釈に破壊力学を導入する必要性		HF >> DF（方程式の数、使用する方程式の信頼性に関係）
圧力データに関係する岩盤物性	引張強度、（破壊靱性：既存亀裂が人工亀裂発生条件に関係するとする場合）	引張強度、破壊靱性（2次亀裂発生条件に1次亀裂伸展長が関係）	2次亀裂発生位置（角度）にも影響
検出する圧力	亀裂発生/再開口圧/閉口時、地圧とバランスする水圧	1次亀裂および2次亀裂の発生・再開口時	ボーリング孔1本当りの観測方程式の数に関係
亀裂発生位置の検出	型取りパッカー	孔径変化分布、型取り	ポアホールスキャナーほか
水圧载荷システム	系外からの水の供給と系外への水の流出	系内での油圧载荷	計測準備、計測環境に関係

2 初期地圧を算定する際の問題点およびオーバーコアリング法との比較

主応力軸がボーリング孔軸と傾斜する場合でもボーリング孔軸に平行な亀裂ができることから、これまでのHFやDFによる初期地圧測定においては、ボーリング孔軸に垂直な面での2次元応力状態（孔軸方向に関するせん断応力成分を無視）がその面内の亀裂の発生位置や発生時の载荷圧を支配するものとして応力を算定している。また、主応力軸が傾斜する場合、最大引張接線応力はボーリング孔軸と傾斜する面に生じるので、初期にはその方向に多数の微小亀裂が発生し、最終的にこれらが孔軸方向に連結（一連の初期亀裂は、その後ひずみエネルギー解放率が最小となるようにボーリング孔の存在に依存して伸展する）して、見掛け上、ボーリング孔軸に平行な亀裂が生じるものと考えられる。したがって、発生した亀裂の方向がボーリング孔軸に垂直な面内での最大主応力方向であるとする考えは必ずしも正しくないこと、言い換えれば、厳密には1本のボーリング孔のデータからは2次元応力場も算定できないことになる。また、従来の考えに起因する誤差は主応力差が大きいほど大きい。一方、主応力の大きさに対して岩盤の引

張強度が大きいと亀裂発生時の載荷圧の差は相対的に小さくなり、亀裂発生位置の差も小さくなるので誤差は小さくなる。しかし、引張強度が小さいと誤差は強調される。

ボーリング孔軸に垂直な面内の最大応力の方向が亀裂方向であるとみなせる限り（主応力差が小さい／引張強度が大きい）においては、表-1のすべての圧力データを利用できる可能性がある。また、数本のボーリング孔から得られるデータから、座標変換により、線型方程式を構築すれば3次元応力場が簡単に逆算できる。しかし、主応力差が非常に大きい場合や主応力差がある程度大きくて岩盤の引張強度が小さく、運悪くすべてのボーリング孔の方向が主応力方向と大きく傾斜していた場合には、厳密な逆算が必要となる。またこの場合には、方程式が線型ではないので、最適化の手法を用いた3次元応力場の算定が必要となる。筆者らは、すでに、3次元主応力場を逆算する厳密なシステムを開発している。しかしこのシステムは、いまのところ、亀裂（ダブルフラクチャリング法においては1次亀裂のみ）の発生条件（亀裂発生時の載荷圧、発生位置および初期亀裂のボーリング孔軸に対する傾斜角）だけをデータとしている。それは亀裂発生時に最大引張応力が発生する位置といったん発生した亀裂を再開口させるときに最大引張応力が発生する位置とは異なってくるので、再開口データを使うには計算が複雑になり過ぎるためであるが、再開口データを使う計算も可能ではある。

水圧破碎法／ダブルフラクチャリング法の長所・短所・問題点をオーバーコアリング法と比較して示せば表-2のようである。

表-2 オーバーコアリング法（OC）との比較

	OC	HF/DF
長所	オーバーコアリング中の連続測定から判定された有効なデジタル計測値（ひずみ）のすべてから機械的に逆解析される。また1本のボーリング孔で3次元応力場を決定できる。	地圧とバランスする水圧応力の計測に信頼性がある。またオーバーコアリングを必要としない分だけ計測作業が簡単であって、接近点から相当深い所に適用できる。
短所	岩盤の応力-ひずみ関係が必要であり、その非線形性を考慮に入れるが一般には難しい。またオーバーコアリングに費用がかかる。	3次元応力場の決定に数本のボーリング孔が必要。また記録された曲線に種々の処理を施して圧力データが検出される。
主応力差が大きく引張強度が小さい場合	ボーリングを行ったときにすでに引張降伏が生じて応力解放後のひずみの回復が弾性回復からはずれる可能性がある。	縦亀裂の方向は孔軸に垂直な面での最大主応力方向と異なるので、1本の孔では2次元応力場も決定できない。
不連続性岩盤への適用性	有効なデータが少なくなり、その信頼性も低下する。	HF：節理に垂直な応力成分の検出可能 既存の亀裂は縦亀裂発生条件に影響 DF：既存の亀裂の影響は比較的少ない。
軟弱地盤への適用性	適用できない	HFは適用できないが、DFは適用できる可能性がある（せん断破壊を起こさせる）。

3 今後の課題と見通し

地圧とバランスする水圧や再開口圧（または閉口圧）の検出は、測定点が不透水性硬岩中の比較的深い所にあれば、ほぼ確実に検出することができるが、岩盤が透水性であったり既存亀裂が存在する場合には、それらの検出（データ処理の仕方）や方程式の組み立て（破壊力学の導入）に課題が残されている。そこで地球物理学の分野で水圧破碎測定を行っている人たち（彼らにとっての水圧破碎応力測定とは鉛直ボーリング孔1本を使用する2次元応力測定）はいまだにこの種のデータ解釈の問題と取り組んでいる。

一方、岩の力学関係者にとっては、地下空洞の開発設計に資するための応力測定が目前的課題である（ISRM関係者の内には応力測定の基準化を急いでいる人たちもいる）。そのために、筆者らは水圧破碎法による3次元応力測定を提案し、実施してきた。また、主応力差が大きい場合など、条件によっては2次元応力測定の方法には原理的にも問題があることを指摘した。

今後、両者の情報交換を盛んにし、お互の測定方法を洗練して、精度の向上を計ることが望まれる。