

III-166 水圧破碎法におけるき裂閉合圧の評価法について

鹿島建設技術研究所 正員 日比谷 啓 介
 同上 正員 渥 美 博 行
 同上 正員 青 木 謙 治

1. はじめに

水圧破碎法により岩盤内の地圧を精度良く求めるためには、水圧破碎によって生成したき裂面の走向・傾斜と共に水圧破碎時に得られる2つの水圧特性値（き裂再開口圧、き裂閉合圧）を高精度で測定する必要がある。著者等は既報^{*1}にて、き裂再開口圧の求め方について提案したが、本報ではき裂閉合圧の評価法に関し提案を行う。

2. き裂閉合圧について

水圧破碎によって生成するき裂は、一般に孔井周囲の地圧条件に依存して孔壁に新たに発生するき裂（たてき裂）と、天然のき裂が開口して発生するき裂（よこき裂）の二種に分類される。水圧破碎法では、たてき裂に対してはき裂再開口圧を、よこき裂に対してはき裂閉合圧を測定して岩盤内の三次元地圧を解析する。ここで、き裂閉合圧は以下のように定義される。すなわち、水圧破碎によってボアホール孔壁にき裂を発生させた後、送水配管系を閉じると、き裂内に圧入されていた水はき裂面を通して徐々に岩盤内に浸透する。これに伴い水圧が減少してき裂が閉合するが、このき裂が閉合する瞬間のき裂内の水圧がき裂閉合圧である。水圧破碎法では、このき裂閉合圧がき裂面に垂直に作用している地圧成分 σ_n に等しいと考える。き裂閉合圧の求め方としてはこれまで5種類の方法が提案されてきたが、Aamodt・厨川（1981）^{*2}が提案した方法を除くといずれも物理的根拠に乏しい。ここでAamodt等の方法は、石油井における回復試験結果から貯留層の平均圧力を解析する際に繁用されるMuskatの方法に拠っている。Muskatの方法は、貯留層に対し回復試験を行うと、孔井内で測定した圧力から平均貯留層圧力を減じた量の経時変化は半対数紙上で直線を成すという理論的考察結果に基づき、パラメータ解析によって平均貯留層圧力を推定するものである。Aamodt等はMuskatの方法における貯留層を水圧破碎によって生成したき裂に、また平均貯留層圧力 $\bar{P}$ を岩盤内の自然間げき水圧 P_n により替え、き裂閉合時の水圧をMuskatと同様の形式でプロットした。パラメータ解析により適当な間げき水圧 P_n が与えられると、ある時点以降の計測量は図-1に示す通り直線を成す。Aamodt等は、この直線部を延長し配管系を閉じた時点（ $t=0$ ）の圧力からき裂閉合圧 P_s を求める方法を提案した。

著者等は、これまでに国内3ヶ所のサイトで水圧破碎法による地圧測定試験を実施してきたが、その際いずれの場合にもき裂閉合圧の解析にはAamodt等の方法を適用してきた。ところが、これらの原位置試験結果の解析を通じ、き裂再開口圧と、Aamodt等の方法によって求めたき裂閉合圧は整合しない可能性のあることが明らかとなった。すなわち、いずれのサイトにおいても、き裂閉合圧を含めた全データを用いた解析結果はき裂再開口圧のみのデータを用いた解析結果に比べ、地圧成分の絶対値がかなり大きく、き裂閉合圧が大きめに評価されている可能性をうかがわせた（表-1①、②欄参照）。

3. き裂閉合のメカニズム

水圧破碎によって生成したよこき裂を図-2のような単位面積の断面を有するシリンダーでモデル化した。シリンダーの内容液はき裂内に圧送された水を表わしており、その圧力 P は、ピストンを介して作用するき裂に垂直な地圧成分 σ_n と、水がき裂内及び配管系を流れる際の損失圧力 ΔP_{loss} の和に等しい。水圧破碎用の送水配管系を閉じると、シリンダー内の水は間げき水圧 P_n の岩盤内に漏出し、 σ_n によってピストンは右に押されき裂は閉合する。

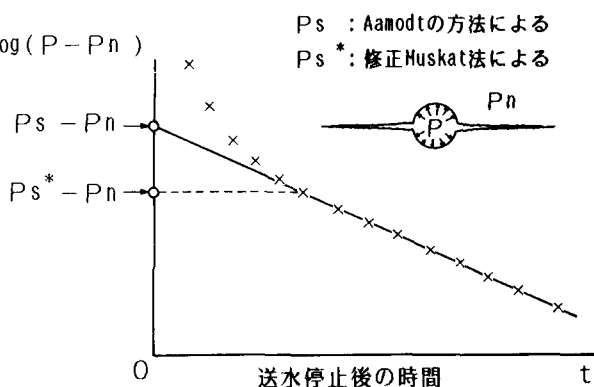


図-1 き裂閉合圧の求め方

さて、実際に原位置試験においてき裂再開口を行うと、き裂再開口に至るまでの水圧の上昇速度は、き裂初生時の上昇速度に比べて一般に低いことから、一度開口したき裂は完全に閉合しないものと判断される。その原因としては、き裂生成時にき裂内に微細な岩屑が詰まる、あるいはき裂面に作用していたせん断応力がき裂の生成と共に解放され、せん断変形によってき裂面間の凹凸に乗り上げが生じる等が考えられる。シリンダー中に設けた棒要素は、このようにき裂閉合時にき裂は完全に閉合しないことをモデル化している。送水配管系を閉じピストンが右に移動し棒要素に接触した瞬間には、き裂内の水の流れによる圧力損失が0となり、また、棒要素の担う力も0であるため、水圧Pは地圧成分 σ_n に等しくなる。ところで、ピストンが棒要素に接触した瞬間以降はシリンダーの内容積、すなわちき裂の内容積は変化せず、さらに内容液の圧力低下はき裂面を介した水の岩盤内への漏出のみによって生ずるため、圧力の測定値はMuskatの考え方に従い図-1の直線部になるはずである。したがって、ピストンが棒要素に接触した瞬間は、圧力の測定値が図-1の直線にのってくる時点をもって特定することができる。以上の考察に基づけば、き裂閉合圧はAamodt等の提案するように $t=0$ の時点で求めるのではなく、測定値が直線にのってくる瞬間に対応する圧力をもって決定すべきであると考えられる。著者等はこのようなき裂閉合圧の求め方を修正Muskat法と称する。

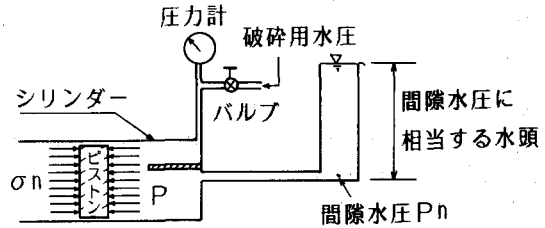


図-2 き裂閉合のメカニズム

4. 修正Muskat法の適用

き裂閉合圧の解析に修正Muskat法を適用し、三次元地圧の解析を行った。解析対象データとして花崗岩岩盤中で実測した水圧破砕試験の結果³⁾を用いた。なお、当地点においては水圧破砕試験を実施した極く近傍で、オーバーコアリング法による異例ともいえる測定密度の高い地圧測定が実施されており、地圧状態が高精度で把握されていると判断される。解析結果を表-2の③欄に示した。Aamodt等による方法で求めたき裂閉合圧を用いて解析した地圧解析結果を②欄に併記したが、④欄のオーバーコアリング

表-1 三次元地圧解析結果

法の結果と比較すると、修正Muskat法による結果がAamodt等の方法による結果と比べ、より正確な地圧状態を示していると判断されること、さらに各地圧成分の右に示した解析誤差の推定値も小さくなっており、解析精度も向上していることがわかる。この傾向は、他の2地点で実施した原位置試験結果の再解析においても同様に認められた。

5. おわりに

本報では、き裂閉合時のメカニズムをモデル化することにより、き裂閉合圧の求め方を修正Muskat法として提案した。本方法に基づき原位置試験結果を解析すると、従来の方法と比較して異種データ間の整合性が改善され、解析精度も向上することを確認した。

（参考文献）

1. 日比谷、渥美、青木 1985. 水圧破砕時のき裂再開口圧について、第40回土木学会年次学術講演会
2. Aamodt, R. L. and M. Kuriyagawa 1981. Measurement of Instantaneous Shut-in Pressure in Crystalline Rock, Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurement
3. Hibiya, K., H. Atsumi and K. Aoki 1987. In-situ Tectonic Stress Measurement by Hydraulic Fracturing Method, 2nd International Conference on Field Measurement in Geomechanics

	水 圧 破 砕 法			④オーバーコアリング法
	①き裂再開口圧（たてき裂）のみを用いた解析	全データ（たてき裂+よこき裂）を用いた解析		
		き 裂 閉 合 圧 の 求 め 方		
		②Aamodt等の方法	③修正Muskat法	
σ_N	2.78 ± 0.14	3.73 ± 0.30	3.10 ± 0.21	2.95
σ_E	2.07 ± 0.08	2.71 ± 0.19	2.44 ± 0.13	3.02
σ_V	2.64 ± 0.14	3.89 ± 0.21	3.26 ± 0.15	3.27
σ_{NE}	0.31 ± 0.04	0.57 ± 0.10	0.48 ± 0.07	0.21
σ_{EV}	-0.32 ± 0.11	-1.37 ± 0.17	-0.85 ± 0.12	-0.80
σ_{VN}	-0.12 ± 0.04	-0.21 ± 0.12	-0.14 ± 0.09	-0.40
σ_1	3.04	4.99	3.96	4.12
σ_2	2.59	3.60	3.02	2.80
σ_3	1.87	1.74	1.82	2.32

(MPa)