

断層スミアの形成実験とその浸透率変化にみる断層シール能力の応力依存性

A possible dependence of the seal potential of fault smear on the stress condition

高橋 美紀[1]

Miki Takahashi[1]

[1] 石油公団 T R C

[1] JNOC TRC

低浸透率をもち、流体移動に対しシール能力を保有する堆積岩中の断層の構造形態の一つに断層スミアと呼ばれるものがある。断層スミアは、カタクラサイトや断層ガウジの成因が剪断による粒子の破砕によるものであるのと異なり、初めから低浸透性を持つ層（例えば泥岩や頁岩）そのものが断層内に引きずられことによって形成されるシールである。断層スミアのシール能力を評価するにあたって、断層落差を泥質岩の厚さで割ったスミアファクター（DSF）と定義した量を用いるが、スミアファクターと流体の移動特性との関係を定量的に調べた研究例は少ない。そこで実験室内で断層スミアを再現し、浸透率を変形に連続して測定することでスミアの成長と浸透率の関係を調べることとした。実験には石油公団・石油開発技術センター所有の高温・高圧岩石変形試験機を用いた。変形中、30度のプレカット面にかかる垂直応力を50MPaもしくは25MPaに保つよう封圧を制御した。間隙圧媒体は蒸留水で、間隙水圧は5MPa、10MPaもしくは20MPaである。浸透率の測定方法としてオシレーション法を用いた。オシレーション法は変形を止めずに浸透率を計測できるというメリットがある。砂岩にBerea砂岩（初期孔隙率15~18%、常圧下において浸透率 $4 \cdot 10^{-13} \text{m}^2$ 以上）、泥質のシルト岩に銚子市・屏風ヶ浦で採取した珪藻泥岩（新第三系・鮮新統・飯岡層、初期孔隙率61%、変形前の浸透率 10^{-18}m^2 のオーダー）を用いた。断層を持った砂泥互層の模倣するため円柱形の軸方向に対し30度にプレカットされた砂岩サンプルをさらに端面に平行に分割し、薄い層状のシルト岩をその間に平行に挟んだものをサンプルとして用意した。

実験の結果、変形の進行による浸透率の変化は3つの領域（R）に分割できることがわかった。

R1：摩擦強度が降伏強度近くに達するまで、サンプルによらず浸透率は急激に約1~1.5桁低下した（バルク浸透率では、オーダーにして 10^{-17}m^2 から 10^{-18}m^2 への低下）。

R2：浸透率の低い状態がしばらく続く。この間が最もシール能力の高くなる領域と思われる。

R3：浸透率はDSFの増加とともに、R1における浸透率の減少に比較して、ゆるやかな回復を示している。断層スミアが変形と伴に引き延ばされ厚さが減少もしくは連続性が破られており、その変化は連続的であると解釈される。浸透率の回復速度はサンプルによってばらつきが見られ、そのため浸透率の回復速度と変形速度との関係は不明である。

プレカット面にかかる有効垂直応力（垂直応力-間隙圧）が40MPaの場合と30MPa以下の場合について考察すると、浸透率の3つの領域の境界（B1、B2）に相当するD/H値に顕著な違いが見られた。D/Hとは試験機のピストンの移動量をシルト岩の実験後の厚さで正規化した量を指す。

B1（R1からR2へ）：有効垂直応力30MPa以下の場合0.50であり、40MPaの場合0.99であった。

シルト層のコンパクション：シルト層の実験前と実験後の厚さの差を実験後の厚さで割った量が、それぞれの応力条件について、B1の値にほぼ等しいという結果を得た。このことからR1における浸透率の急激な低下は変形が始まるとともに増加する差応力によってシルト岩に圧密が働き、シルト岩層内の孔隙が減少した為と考えられる。よって、スミアを形成し始めるのはこの圧密段階が終了したと考えられるB1からであり、DSFもB1よりスタートすると解釈できる。

B2（R2からR3へ）：有効垂直応力30MPa以下の場合2.10であり、40MPaの場合3.30であった。よって、浸透率の低い状態を保てる範囲（R2）は30MPa以下の場合1.60であり、40MPaの場合2.31と計算される。

スミアの連続性：実験後、サンプル断面の観察からスミアが断層内で連続的に存在しているかどうかを調べ、連続的に存在しうる限界のDSFを求めると有効垂直応力30MPa以下の場合5.0であり、40MPaの場合6.5であった。これらの値はスミアの連続性について天然の断層で観測された結果と同様の範囲内に収まっている。

R2の範囲やスミアの連続性についてのDSFの値が、有効応力が30MPa以下の場合より40MPaの場合の方が大きい値をとる。つまり有効応力が大きいほど断層のシール能力が高いという結論になり、スミアが要因で形成される断層のシール能力と応力条件との間に正の相関が存在する可能性を示唆している。