

地層の力学特性と岩石物理

Rock physics and mechanical properties of rocks

山本 晃司 [1]

Koji Yamamoto[1]

[1] 資源機構

[1] JOGMEC

砂岩のような Granular な材料からなる地層の強度は、1) 地層を構成する粒子自体の強度、2) 粒子の幾何学的配置、及び3) 粘土等による粒子間の固着の状態という、ミクロな視点の3つの要素から決定されると考えられる。そのため、岩石物理モデルとは親和性が高いと考えられるが、実際にはこの方面でのミクロの原理からの研究はごく限られている。三軸強度試験による岩石強度の直接計測は十分な大きさを持つ良好な状態のコアが必要で、コストや岩石強度の問題からコアを取得できない場合に、弾性波速度、密度、自然ガンマ線による粘土分量、Element Capture Spectroscopy (ECS) などの検層から取得できる情報から地層強度を正確に評価できれば理想的であると言える。しかし、地層強度とこれらの岩石組成及び物理定数との関係は、コアとログの比較による経験式を用いたものが中心であり、モデルを介してミクロの原理から追求しようという試みは少ない。

岩石のせん断破壊のようなマクロな挙動を、個別要素法 (Discrete Element Model, DEM) などの岩石を粒状体でモデル化する手法で予測する試みは以前からなされていて、定性的に現象を再現することには成功しているが、モデルに与えるミクロな定数 (粒子の圧縮率、粒子間に働くばね定数等) から弾性定数、内部摩擦角、引張強度といったマクロなパラメータを定量的に再現することは十分できていない。

同種の岩石の弾性波速度は数倍程度のばらつきであるが、強度は数桁の広がりがある。鉱物組成に大差なく、密度や孔隙率といった物理定数は数十%程度の違いの範囲にある砂岩であっても、強度に大きな違いが生じる理由は、上記のミクロな要素のうち特に幾何学的構造の違いが強度に与える影響が大きいためと考えられる。

岩石が同じ直径の球体が集まってできているとしても、面心立方格子と体心立方格子の充填率の違いは74%対68%に比して10%以下であるが、単位体積あたりの接触点の数にはほぼ1.5倍の違いがある。

現実の岩石は、ミクロンオーダー以下の粘土から、1 mm オーダーの砂・礫粒子まで数桁にわたって粒径が広がっている。孔隙を順次より小さい球で埋めていくことで、一階層ごとに接触点の数はほぼ累乗で増えていく。この場合、空隙を埋めた粒子により全体としての弾性定数も増えるであろうが、密度も同様に増加するので、弾性波速度への寄与は小さい。しかし、接触点の数は摩擦の増加につながるため、直接強度に関わると考えられる。さらに、実際には、これに粘土分の結晶や炭酸塩が粒子間のセメントとして、あるいは粒子孔隙を埋めるように存在して強度に寄与している。

また、異なったスケールでは異なった非均質性や異方性を持っていて、それぞれの階層が強度に寄与している。たとえば、岩石が様々なスケールの円形き裂を含んでいて、き裂の半径が $1/t$ になるたびに個数が n 倍に増えるとすると、 n/t が1よりも大きければ、トータルのき裂の断面積は収束に向うが、 n/t よりも大きい場合では発散する方向に向う。当然、き裂の断面積は引張り強度、せん断強度に直接影響する。

以上示したのは簡単な思考実験に過ぎないが、岩石強度が弾性波速度に比べてはるかに内部構造に敏感であることは示せたであろう。しかし、最初に述べたようにマクロな岩石強度をミクロな構造から再現することは、実用上魅力的なテーマであることは確かである。

その方向での一つの試みとして、ミクロン以下の探針を岩石に突き刺して貫入深度と荷重の関係から、ミクロな硬度・弾性定数を決定するとともに、マクロ挙動との関係を追及する研究が進められており (Ulm et al., 2007)、このような具体的なミクロの計測結果から、強度をマクロな強度を評価する研究も進められると考えられる。また、数値計算によるモデル化で階層的な粒径分布を扱うことには、粒子数が増加することによる計算負荷の問題があるが、今後計算機の能力や計算技術の向上で、より現実的な強度モデルが作られることが期待される。

Reference-Ulm, F.-J., Vandamme, M., Bobko, C., Ortega, J.A., Statistical Indentation Techniques for Hydrate Nanocomposites: Concrete, Bone, and Shale, J.Am.Ceram.Soc., 90(9), 2677-2692, 2007.