

## III-170

## 結晶片岩の水理・力学的異方性について

(株)大林組技術研究所 平間 邦興, 丸山 誠, 桑原 徹, 鈴木健一郎

## 1. はじめに

一般に岩盤は断層、節理、亀裂といった数cmのオーダーから数kmのオーダーまでの地質学的不連続面を含んでいる。これら規模や力学的・水理学的特性の異なる不連続面を統一的に捉えることは不可能である。そこで断層のような大規模な不連続面はdiscreteと捉え、幾何学的に複雑で、多数存在するような節理、亀裂等については、それらを含んだ岩盤を等価な物性をもった連続体又は多孔質媒体として近似評価すると、数値解析上便利である。更に、母岩の特性についても考慮する必要がある。

研究の対象とする岩盤は、断層及び節理の発達する結晶片岩を母岩とするものでその地質構造をモデル化し、岩盤の水理、力学的挙動を捉えることを主目的としている。母岩である結晶片岩は、片理の発達により強度特性、変形特性、更に透水性において著しい異方性を示すことが知られている。そこで本報告では、地質構造のモデル化の第一段階として、結晶片岩の水理学的及び力学的特性について実験的に捉えることを試みた。以下にその概要を述べる。

## 2. 実験

供試体は、一軸圧縮試験用(φ35 mm×h70mm)一面せん断試験用(φ50 mm×h50 mm)、及び透水試験用(φ50 mm×h100 mm)の円柱供試体を用いた。一軸圧縮試験用供試体は、片理面と載荷方向との成す角度( $\theta$ )で $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ のものを、また一面せん断、透水試験用は $0^\circ$ と $90^\circ$ のものを用意した。試料の異方性を考える上で、含まれる片理面の方向のみが異なる供試体を作成することが望ましい。そこで、一つの岩塊からできる限り全ての方向の供試体採取することを行なった。

## 3. 結果及び定数の決定

3.1 一軸圧縮試験と一面せん断試験：一軸圧縮試験及び一面せん断試験を行いヤング率、ポアソン比、及びせん断剛性率を測定し、弾性コンプライアンステンソルを決定する。まず、片理面の方向に伴うヤング率の変化を調べてみる。 $\theta$ が $0^\circ$ の場合の典型的な応力～ひずみ曲線は図-1に示すように下に凸の非線型になっている。そこでこの曲線を2本の直線で近似することとし、図-2及び3にそれぞれ低応力レベルでのヤング率と高応力レベルでのヤング率の片理面の方向による変化をまとめた。どちらも片理面に対して垂直な方向の弾性係数が最も小さく、片理面と平行な方向のそれが最も大きいことがわかる。片理面角度に対して、初期の弾性係数と通常の弾性係数の比をプロットしたのが図-4である。これより、片理面の法線と載荷方向の成す角が大きくなるにつれ非線型性は薄れ、 $45^\circ$ 付近からは、ほぼ線型になっていることがわかる。一方、一面せん断試験では片理面を強制せん断面にする場合と、片理面に垂直な方向に強制せん断面とする場合の2種類を行なった。結果を図-5に示す。片理面に沿うせん断の方が強度定数も剛性率も低いことがわかる。

ところでこのような片岩の場合、片理面内では等方性を仮定しそれと垂直の方向に対して異なる挙動をするような材料は、積層異方性(Transversely Isotropic Material)と考えるのが妥当である。積層異方性の弾性コンプライアンステンソルを主軸について行列表示すると次のようになる。

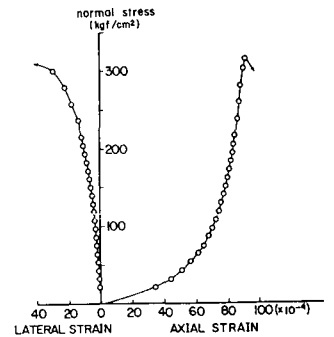


図-1

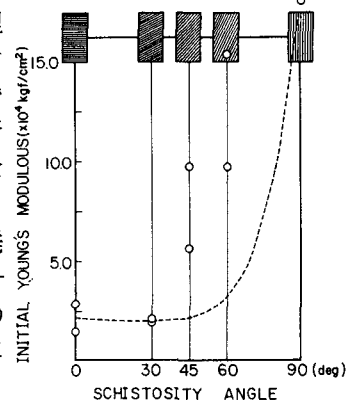


図-2

$$C_{ijkl} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu'/E' & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E & -\nu'/E' & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E' & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G & 0 & 0 \\ & \text{symm.} & & & 1/G' & 0 \\ & & & & & 1/G' \end{bmatrix}$$

ここでE：等方面内のヤング率、E'：等方面に垂直な方向のヤング率、G：等方面内のせん断弾性係数（ $G = E/2(1+\nu)$ ）、G'：等方面に垂直な方向のせん断弾性係数、 $\nu$ ：等方面に作用する応力による等方面内の横ひずみの変化を特徴づけるポアソン比、 $\nu'$ ：等方面に垂直な方向に作用する垂直応力によって起こる等方面内の横ひずみの変化を特徴づけるポアソン比である。これらの定数のうち独立なものは5つであり、最低次の3種の試験結果から算定する。すなわち、片理に対して平行な方向及び垂直方向の圧縮試験、及び片理に対して垂直な方面でのせん断試験である。これまでに述べた結果を用いて全成分を決定すると、

$$C_{ijkl} = \begin{bmatrix} 4.76 & -0.62 & -0.14 & 0 & 0 & 0 \\ & 4.76 & -0.14 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0.58 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 10.80 & 0 & 0 \\ & \text{symm.} & & & 3.45 & 0 \\ & & & & & 3.45 \end{bmatrix} \times 10^{-5} \quad (\text{cm}^2/\text{kgf}) \quad \dots (1)$$

$$C_{ijkl} = \begin{bmatrix} 1.28 & -0.48 & -0.13 & 0 & 0 & 0 \\ & 1.28 & -0.13 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0.37 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 3.46 & 0 & 0 \\ & \text{symm.} & & & 3.45 & 0 \\ & & & & & 3.45 \end{bmatrix} \times 10^{-5} \quad (\text{cm}^2/\text{kgf}) \quad \dots (2)$$

となる。今、この結果を用いて、 $C_{1111}$ 成分をX軸を軸に回転させたときの値の変化を図-2と3に破線で示している。図-4の破線は、式(1)と式(2)の11成分の比の変化である。理論値の方が弾性係数が低めである。原位置における片理面の方向は、平均的にN20°E、20°Sであるので、座標係をN方向、W方向、鉛直上方の右手系をとるとすれば、コンプライアンステンソルをそれに従って回転させてやればよい。

3.2 透水係数テンソル：片理の存在は透水性にも方向による違いをもたらす。透水係数テンソルは、対称テンソルであるから決定すべき成分は6個であるが、片理面内で等方性を仮定し、さらに主軸方向で考えることにすれば、決定すべき成分は2つでよい。すなわち片理面と平行に水がながれる場合と、片理面と垂直な方向に流れる場合である。一様流型の透水試験装置により両者の透水係数を決定した結果、主軸方向に関する透水係数テンソルは、次のように決定される。

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} 2.86 & 0 & 0 \\ & 2.86 & 0 \\ & & 1.16 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \quad (\text{cm/sec})$$

片理面内の流れと片理面を透過する流れとの差はそれほど大きくなく、2倍程度であった。この結果も、原位置に適応する場合は、片理の方向について座標軸の回転を行なうことが可能である。

#### 4. おわりに

結晶片岩を母岩とし、断層及び節理を含む不連続性岩盤の水理・力学モデルを作成するために、第一段階として結晶片岩の弾性コンプライアンステンソルと透水係数テンソルを実験的に決定した。今後、節理及び断層を含んだ型にモデルを拡張していく所存である。

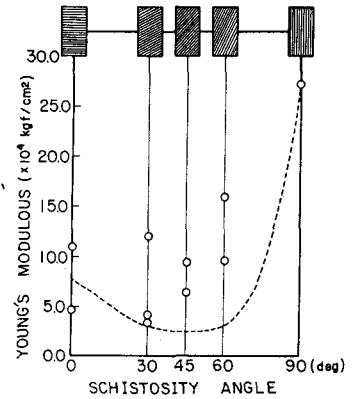


図-3

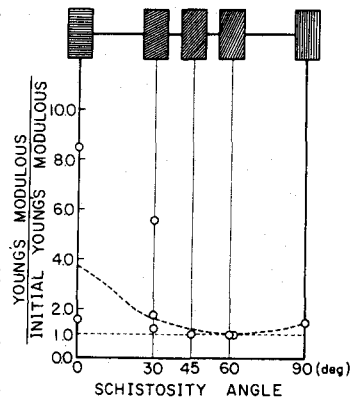


図-4

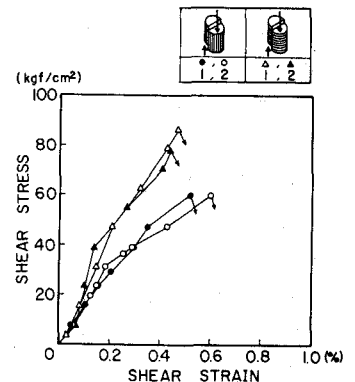


図-5