

# 結晶片岩の力学的異方性について

平 間 邦 興      丸 山      誠  
桑 原      徹      鈴 木 健一郎

## Mechanical Anisotropy of Crystalline Schist

Kunioki Hirama      Makoto Maruyama  
Tohru Kuwahara      Ken-ichiro Suzuki

### Abstract

Anisotropy of fabric induces mechanical and hydraulic anisotropy in rock. A crystalline schist is a typical rock which shows anisotropic fabric.

In this report, a pelitic schist, a kind of crystalline schist, subjected to a number of hydraulic and mechanical tests with the purpose of investigating its anisotropy and applicability of approximation as transversely isotropic material is discussed. To conclude, in order to approximate a pelitic schist which shows fabric anisotropy as a transversely isotropic material, non-linearity induced by anisotropy of fabric has to be considered.

### 概 要

某ダム基礎より採取された結晶片岩は、片状構造が著しく発達しているので構造的には異方性を呈している。本研究は、構造的な異方性が力学的および水理学的にどのように影響するか調べたものである。力学的には弾性係数に、水理学的には透水係数に注目し、方向に依存したそれらの係数を実験的に求めた。力学的異方性については弾性論に基づく理論解と実験結果との比較を行なったが、構造に依存する非線形性を考慮することで積層異方性を仮定できることが確認された。

### 1. 緒言

岩盤は、本来不連続なものであると著者らは考えている。不連続たるゆえんは、数 km オーダーの大規模な断層や数 m, 数 cm オーダーの節理・亀裂といった明瞭な不連続面からマイクロメートルオーダーの鉱物粒子の境界面、粒子中のクラック、さらに言及すれば分子・原子のオーダーでの不連続面が存在するからである。しかし、我々は岩盤を対象とする構造物の安定性などの議論を岩盤の連続性の仮定のもとに行なってきた。それは、連続体を仮定する理論が美しく体系化されていることが最大の理由であろう。

近年、放射性廃棄物の地層処分、原子力発電所の地下立地といった岩盤を対象とする大規模プロジェクトにおける安全性評価の厳格化やダム・トンネルなどの悪条件下での施工の増加に伴って岩盤の評価も厳密性への要求が高まる傾向にある。それはとりもなおさず連続体の仮定の再検討の要求である。

図-1(a)に示したのは、断層、節理を含んだ岩盤の模式図である。(d)図は断層系を取り出したもので岩盤の不連続部分として取り扱われる。(c)図は、節理系のみを取

り出したもので評価上、連続体として近似するか不連続体として近似するか議論の分かれるところである。そして(b)図が今回対称とする母岩である。本研究は、(c)図の節理系を含む岩盤にあって連続体を仮定するという立場に立脚し、(c)+(b)で表わせる岩盤の特性を(b)の母岩を基準として表わすためにその特性をモデル化しようとするもので、研究全体の第一段階として位置付けられる。

本報告の目的は、母岩の力学モデル、特に変形特性に注目したモデルを決定し、室内岩石試験によりその適応性について考察するものである。

母岩を構成する結晶片岩は、黒色片岩と緑色片岩である。片状構造の著しい発達、それらが力学的にも水理学的にも強い異方性体呈するであろうことを予想させる。一般に、片理面や層理面の発達した岩石または岩盤は、積層異方性としてモデル化される。積層異方性体の変形特性は、線形弾性で考えれば五つのパラメータで完全に表現される。また、透水性については、異方多孔質媒体で近似できるとすれば二つのパラメータが必要である。

本報告では、結晶片岩を積層異方性体であるとしてこれらのパラメータを決定して弾性テンソルまたは弾性コ

ンプライアンステンソルおよび透水係数テンソルを求め、実験結果と比較検討を行なった。

## 2. 弾性コンプライアンステンソルと透水係数テンソル

### 2.1. 弾性コンプライアンステンソル<sup>1),2)</sup>

一般に、弾性コンプライアンステンソル（または弾性係数テンソル）は21個の独立な成分をもつが、直交異方性材料のように三つの互いに直交する2回対称軸をもつ場合には、独立な弾性定数の数は9個になる。片岩の場合には、さらに片理面内では等方性であると仮定すれば積層異方性材料または面内等方性材料と考えられる。この場合、材料は一つの座標軸に関する回転にたいして弾性的に対称である。ここではその回転対称軸を局所座標系の  $x_3$  軸、片理面（等方面）に垂直な軸、とする。なお本報告中では図-2に示すような右手系の座標系を用いる。積層異方性の条件は、直交異方性の条件、すなわち“三つの互いに直交する2回対称軸をもつ”という条件に“ $x_3$ 軸についての任意の回転変換  $Q_{ij}$

$$Q_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

によって不変である”という条件を付加すればよい。すると積層異方性材料の独立な弾性定数は5個になる。弾性コンプライアンステンソル  $C_{ijkl}$ を主軸について行列の形に書き下せば

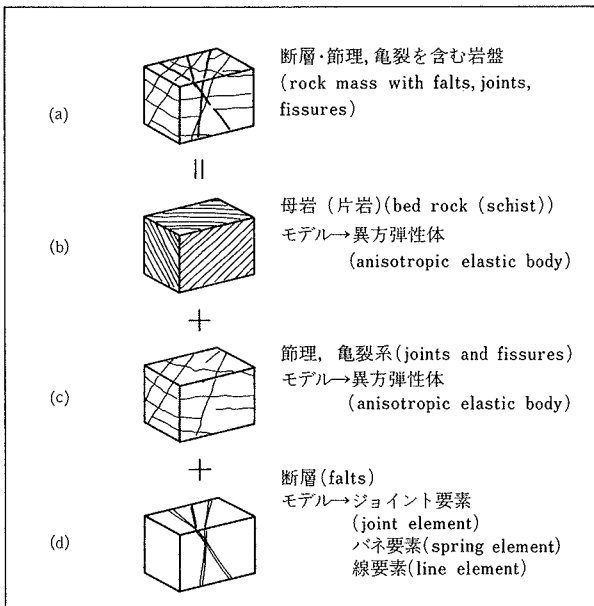


図-1 断層・節理系を含む岩盤のモデル

$$C_{ijkl} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ \text{symmetrical} & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{55} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

となる。工学上の弾性定数  $E, \nu, G$  で(2)式を書き直すと

$$C_{ijkl} = \begin{pmatrix} 1/E - \nu/E - \nu'/E' & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E - \nu'/E' & 0 & 0 & 0 \\ & & -1/E' & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G & 0 & 0 \\ \text{symmetrical} & & & & 1/G & 0 \\ & & & & & 1/G \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

- $E$  : 等方面内のヤング率
- $E'$  : 等方に垂直な方向のヤング率
- $G$  : 等方面内のせん断弾性係数( $G = E/2(1 + \nu)$ )
- $G'$  : 等方に垂直な方向のせん断弾性係数
- $\nu$  : 等方に作用する引張応力による等方面内の横ひずみの減少を特徴づけるポアソン比
- $\nu'$  : 等方に垂直な方向に作用する引張応力によって起こる等方面内の横ひずみの減少を特徴づけるポアソン比

である。今これらの独立な五つの弾性定数を実験により求めるためには最低次の三つの試験によらなければならない。すなわち片理面にたいする垂直な方向と平行な方向から作用させた応力に対する作用方向およびそれに直交する方向での応答をそれぞれ測定する圧縮試験、そして片理面を強制せん断面とするせん断試験の三つである。

主軸にたいして決定された積層異方性体の弾性コンプライアンステンソルは、テンソルの変換式

$$C_{ijkl} = Q_{ip}Q_{jq}Q_{kr}Q_{ls}C_{pqrs} \dots\dots\dots(4)$$

により原位置における片理面の走行と傾斜の状況に適合させることができる。

### 2.2. 透水係数テンソル

透水係数テンソル  $k_{ij}$ の成分を行列表示すると

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ & k_{22} & k_{23} \\ \text{symmetrical} & & k_{33} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

となり、 $k_{ij}$ の主軸を図-2の座標系と一致させて考えれば対角項以外は0になる。今、 $k_{ij}$ の成分6個を完全に決定することを考えよう。座標の変換によってテンソルの値は不変であることから、主軸において  $k_{11}, k_{22}, k_{33}$ の

値のみを決めれば良いことになる。

等方性材料であれば図-2における  $x_1, x_2, x_3$  方向の透水係数、透水係数テンソルの 11, 22, 33 成分はすべて同じであるが、片岩のように

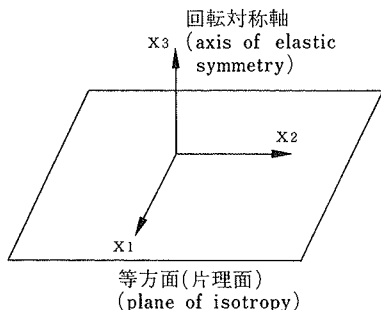


図-2 構造の主軸と一致させた局所座標系

片状構造の発達した岩の場合片理面内では任意の方向で透水係数はほぼ等しいと考えられるが、片理面と垂直な方向の透水係数はそれらとは異なると考えられる。そこで図-2の座標系での透水係数テンソルを次のように考える。すなわち、

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ & k_{11} & 0 \\ \text{symmetrical} & & k_{33} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

これを現位置での片状構造の全体的な方向にたいして(4)式で変換することにより基準座標系でのテンソルが求められる。

### 3. 実験

本実験の目的は、初めに述べたように結晶片岩を積層異方性体であると仮定したときに、その力学的および水理学的諸物性を決定し、それらの一般性について検討するものである。力学的物性は弾性係数に、水理学的物性については透水係数にそれぞれ注目し、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、一面せん断試験および透水試験を行なった。以下に供試体の作製とともに上記試験法について簡単に述べる。

#### 3.1. 試料および供試体の作製

実験に用いる試料は、某ダム基礎において採取された黒色片岩であり、その組織は異方性の原因となる明瞭な片状構造(写真-1)<sup>3)</sup>を呈している。この片状構造が紙面と垂直な方向にたいして連続しているとすると、積層異方性体が仮定でき、上下方向と左右方向の性質が大きく異なるものである。

供試体は、一軸および三軸圧縮試験用 ( $\phi 35 \text{ mm} \times h 70 \text{ mm}$ ) 一面せん断試験用 ( $\phi 50 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ ) および透水試験用 ( $\phi 50 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ ) の円柱である。前に述べたように積層異方性体の変形特性は、五つの係数により、また透水性については二つの係数により特徴づけられる。これらの係数を実験により決定する場合作用させる荷重の方向や動水勾配を与える方向を片理面の方向にたいして変化させた複数の実験が必要である。従っ

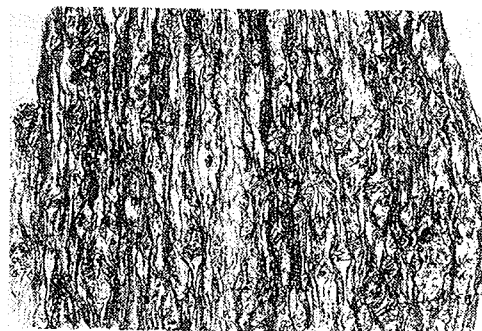


写真-1 結晶片岩の片状構造

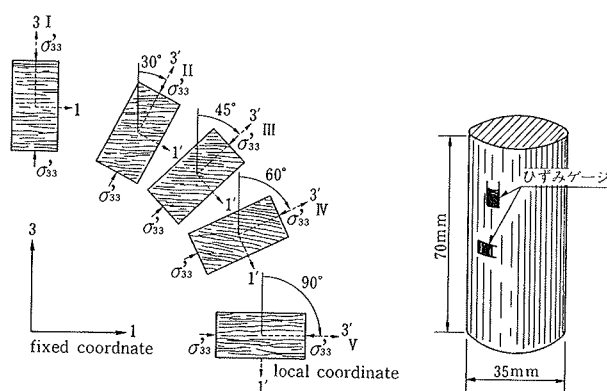


図-3 実験における基準座標系と局所座標系 図-4 一軸圧縮試験用供試体

てここでは、可能な限り同一試料(岩塊)より、多くの方向をもった供試体を作製した。

#### 3.2. 一軸および三軸圧縮試験<sup>4)</sup>

一軸および三軸圧縮試験では図-3のように片理面の傾斜と最大主応力の作用する方向との角度が  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  の5種類の供試体について試験を行なった。積層異方性体の変形を特徴づける五つのパラメータのうち四つが  $0^\circ$  と  $90^\circ$  の一軸圧縮試験によって決定できる。ただし、最大主応力と軸方向および側方向ひずみの測定を行なわなければならない。軸方向および側方向ひずみは、図-4に示すように貼られたひずみゲージの各々二つの平均として計測される。ほかの3方向の供試体は決定されたすべての係数を用いて表わされる積層異方性体の変形特性を検証するためのものであり、三軸圧縮試験ではその側圧依存性を調べるためのものである。

#### 3.3. 一面せん断試験

今回行なったのは等体積一面せん断試験であり、強制せん断面は、片理面に平行なものと直交するものの2種類である。

#### 3.4. 透水試験

透水試験に供する供試体も一面せん断試験と同様、動水勾配を与えて強制的に水を流す方向が、片理面に平行なものと直交するものの2種類である。円柱供試体上端

面に水圧をかけて下端面から流出する水の量を経時的に測定するものである。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1. 弾性コンプライアンステンソルの決定

2種類の供試体(図-3におけるIとV)の一軸圧縮試験と1種類の一面せん断試験により積層異方性体の弾性コンプライアンステンソルの全成分を決定する。図-5に示したのは載荷方向が片理面に直交する供試体の一軸圧縮試験結果である。軸方向応力に対して軸方向ひずみは下に凸の非線形応答をしている。このような応答は、岩石内の空げきや微小クラックの閉塞としてとらえられており、この場合は片理面の影響である。三軸圧縮試験において拘束圧を大きくしていくと、この傾向は次第に弱まっていく。図-6に示すのは、拘束圧の増加に伴う非線形性の減少である。このような非線形性をここでは初期とその後の直線部分のbi-linearで近似し両者の比をもって非線形性の指標とした。一面せん断試験でも同様な傾向が見られる(図-7)。これはダイラタンシーがおさえられ高応力レベルにおいて等体積を保つために拘束圧がかかるためである。しかし、一面せん断試験ではより高応力レベルでのせん断弾性係数が再び小さくなる傾向がある。以上の結果から次の点が指摘される。

- (1) 応力-ひずみ関係は非線形である。
- (2) 非線形性は拘束圧にも依存する。

そこで先ず(1)についてはbi-linearで近似し、低応力レベル(変形開始直後)と高応力レベル(下に凸後の直線部分)においてそれぞれ弾性コンプライアンステンソルを決定してみる(図-5の破線)。低応力レベルでは

$$C_{ijkl} = \begin{pmatrix} 0.43 & -0.17 & -0.44 & 0 & 0 & 0 \\ & 0.43 & -0.44 & 0 & 0 & 0 \\ & & 3.70 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1.20 & 0 & 0 \\ \text{symmetrical} & & & & 7.50 & 0 \\ & & & & & 7.50 \end{pmatrix}$$

また、高応力レベルでは

$$C_{ijkl} = \begin{pmatrix} 0.37 & -0.14 & -0.30 & 0 & 0 & 0 \\ & 0.37 & -0.30 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2.50 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1.02 & 0 & 0 \\ \text{symmetrical} & & & & 5.00 & 0 \\ & & & & & 5.00 \end{pmatrix}$$

となる。

一軸および三軸圧縮試験から求めた初期ヤング率  $C_{33}$  を片理面の法線と最大主応力方向との間の角度( $\theta$ )で整理したのが図-8と図-9である。図中の破線は、(4)式

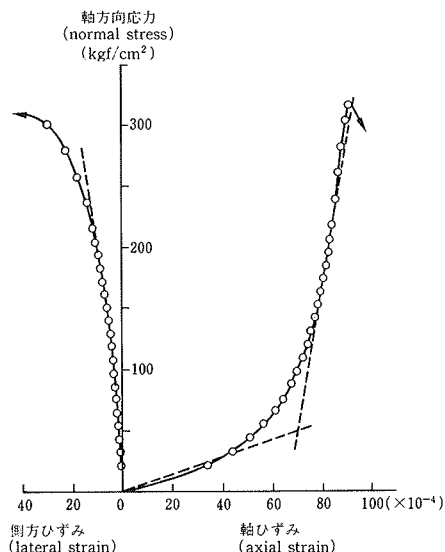


図-5 供試体Iにおける応力-ひずみ関係の一例

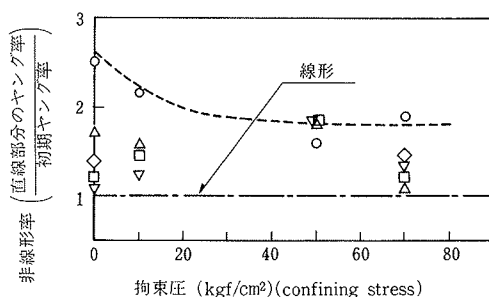


図-6 拘束圧に伴う非線形性の減少

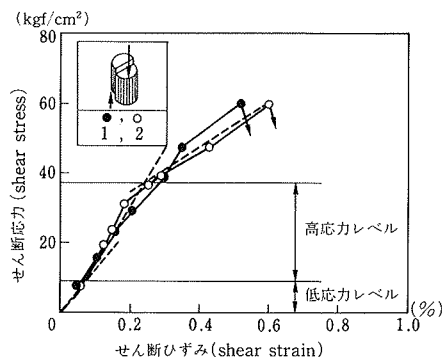


図-7 一面せん断試験におけるせん断応力-せん断ひずみ関係

に従ってテンソルを回転させたときの  $C_{33}$  の軌跡

$$C_{33} = C_{11}\sin^4\theta + 2(C_{13} + C_{55})\sin^2\theta\cos^2\theta + C_{33}\cos^4\theta \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。10 kgf/cm<sub>2</sub> 以下の低拘束圧下の結果を反映していると考えられるが、 $\theta$ が60°付近では明らかな差があり、またそれより高い拘束圧のもとでは理論を適用できない。これは低拘束圧下では $\theta$ が90°付近では岩石の破壊形式がせん断ではなく引張りであることが考えられる。

破壊後の岩石の状況からそのような判断が下せる。三軸試験における岩石の破壊形式は拘束圧が高いほど  $\theta$  の値に関係なく明瞭なせん断面を持つので、二つのヤング率を拘束圧  $\sigma_3 = 50 \text{ kgf/cm}^2$  のときの値とせん断試験における高応力レベル時のせん断弾性係数（定体積せん断であるので高応力レベルでの係数は拘束圧の存在下でのそれであると考えられる）を用いて  $C_{33}$  の異方性を同様に評価したのがそれぞれの図中の実線である。ただし、図一9の実線と点線では同一のせん断弾性係数を用いている。この場合も  $\theta$  が  $45^\circ$  付近において理論値と実験値が一致しているとは言い難い。両者を一致させようとするればせん断弾性係数を適当に大きくすることにより可能となる。これはせん断弾性係数が拘束圧に依存して大きくなることを意味するが、今回その検証は行なっていない。

#### 4.2. 透水係数テンソルの決定

片理面と平行な方向と片理面に垂直な方向にたいして行なった二つの実験結果から主軸に関する透水係数テンソルは次のように決定された。

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} 2.86 & 0 & 0 \\ & 2.86 & 0 \\ \text{symmetrical} & & 1.16 \end{pmatrix}$$

片理面内の流れと片理面を透過する流れとの抵抗の差はそれほど大きくなく、2倍程度である。従って水理学的には異方性の程度が小さいと言える。

#### 5. 結論

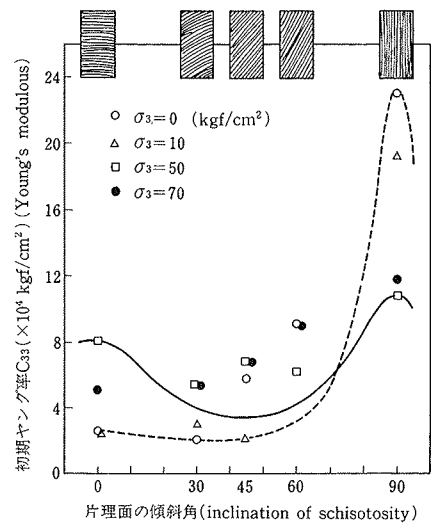
片状構造の顕著な結晶片岩について力学的および水理学的な異方性の程度を実験的に調べ、積層異方性体を仮定し、弾性論から得られている構成関係の適応性の検討を行なった。その結果以下の知見を得た。

(1) 実験より、方向に依存するヤング率の最大値と最小値の間には低応力レベルで10倍弱の差がある。その差は応力レベルが高くなると減少する傾向がある。

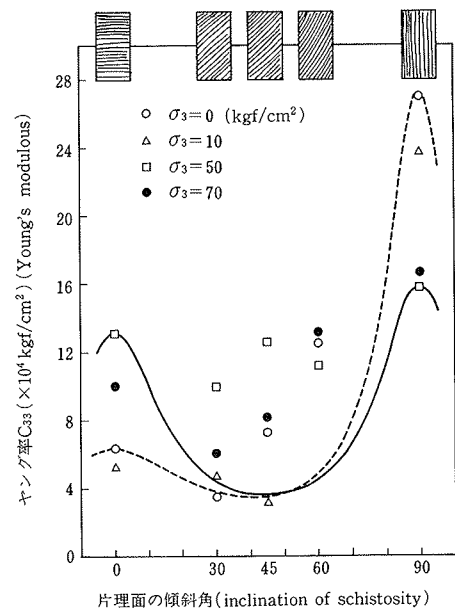
(2) 片状構造は、岩石または岩盤に異方性を与えるが、応力-ひずみ関係に著しい非線形性も与える。そのため非線形性を bi-linear で近似して線形弾性論を適用した。拘束圧が低い場合は実験結果をうまく表現しないが拘束圧が高い場合にはある程度の適応性が確認された。

(3) (2)のように異方性と非線形性はどちらも不連続性に依存するので数値解析において異方性を扱う場合には周辺の応力状態を十分に考慮しなければならない。

(4) 透水係数テンソルの独立な二つの成分を実験的に決定したがその差は2倍程度で力学的な異方性に比べると水理学的な異方性は、非常に小さいものであった。



図一8 低応力レベルでのヤング率と片理面の傾斜の関係



図一9 高応力レベルでのヤング率と片理面の傾斜の関係

#### 参考文献

- 1) 日本材料学会編：固体力学の基礎，日刊工業新聞社（1981）
- 2) W.F.Chen, A.F.Saleeb: Constitutive Equation for Engineering Materials, John-Wiley,(1982)
- 3) 桑原，鈴木，丸山，平間：結晶片岩中の断層粘土に関する地質・工学的特性，第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，（1986），pp.166～170
- 4) R.Cotza, P.P.Manca, C.Vivanet: Measurement of the Elastic Tensor in Rock-like Anisotropic Materials, Proc. U.S.Symp. Rock Mech., vol. 21, (1980), pp. 249～255