田下凝灰岩の力学的異方性と飽和度の変化に伴 う弾性波速度および変形の変化傾向

長田昌彦^{1*}, Adikaram Nayana Madurya²

¹埼玉大学 地圏科学研究センター(〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255) *E-mail: osada@mail.saitama-u.ac.jp ²(元) 埼玉大学大学院(〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

多くの堆積岩はその堆積構造に由来した構造的な異方性を有している.本研究で用いた田下凝灰岩も構造的 な異方性をもつことが知られている.この構造異方性のために、岩石から間隙水が蒸発するに伴って、弾性波速 度が方向ごとに異なる変化傾向を示すことがこれまでの実験結果から推定されている.そこで本研究では、そ の変化傾向の再現性を確かめると同時に、飽和度の変化に伴う供試体のひずみ変化を捉え、弾性波速度の変化 傾向との関係について考察した.その結果、飽和度の変化に伴う弾性波速度の異方的な挙動を再現するととも に、飽和度が低い状態における弾性波速度の増加 (いわゆる desiccation-driven hardening) は岩石の体積収縮 と密接に関係していることを示した.

Key Words : Tage tuff, transversely isotropic rock, desiccation-driven hardening

1. はじめに

乾燥・湿潤に伴って物質が変形する現象はよく知ら れており、土や軟岩を対象とした数多くの研究がある. しかし乾燥・湿潤過程における変形挙動を示したデー タが少ないのが現状である.岩石・岩盤を人間が利用 しようとする場合,必ずこの不飽和な状態を経て利用 することになる.従って,不飽和な状態における岩石 内部の水分状態と変形挙動に関して十分に理解してお く必要がある.

放射性廃棄物の地層処分を考えた場合,堆積岩は1 つの有力な候補である.多くの堆積岩はその堆積構造 に由来した構造的な異方性を有しており,その変形挙 動も異方性に依存することとなる.処分サイトは地下 水面下に建設されることになるであろうが,その要求 からできる限り透水性の小さい岩盤が選択されること になる.その場合,作業上の面から換気は必要不可欠 であり,場合によっては坑道壁面周辺には乾燥に伴い 不飽和領域が生じる可能性もある.

このような観点から,我々の研究室では,各種堆積岩 の乾燥変形挙動を調べている. 図-1 は,堆積面に直交 および平行にコアリングした円柱形の田下凝灰岩試料 を用いた乾燥変形実験の一例である¹⁾.ひずみは,供試 体側面に軸対称に貼り付けたロゼットゲージ4枚から の出力を同じ方向を向いているゲージについて平均を とり, それぞれ軸方向 (axial) と周方向 (circumferential 1 & 2) として表示し, これらを足し合わせた体積ひず み (Volumetric) も示している. ひずみのゼロ点は計測 開始時とし, 膨張を正にとっている. 供試体から一次 元的に蒸発させており, a) は堆積面に直交方向 (Z 軸 方向) に乾燥が生じるようにした供試体であり, b) は 平行方向 (X 軸方向) に蒸発させている. どちらの供試 体も高さ 5cm である.



図-1 乾燥に伴うひずみの変化 (供試体高さ 5cm の比較)¹⁾.
 Axial:円柱軸方向, Circ:周方向, Vol:体積ひずみ.

図からわかることは、蒸発方向によらず、常に堆積 面に直交する方向に大きく収縮することである.それ 以外の方向のひずみの大きさはほぼ等しく、水平等方 的であるといえる.

本稿では、田下凝灰岩が水平等方性を有すると仮定 して、弾性波速度測定により、弾性パラメータを求め た.また、乾燥変形実験と並行して弾性波速度を計測 し、飽和度の変化に伴う P 波 S 波速度と体積ひずみの 変化傾向について検討した.

弾性波速度測定による水平等方性弾性 パラメータの算出

一般化フック則を Voigt 表示すれば,

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \varepsilon_{4} \\ \varepsilon_{5} \\ \varepsilon_{6} \end{bmatrix}$$
(1)
と表わされる. 水平等方性を有する材料の場合には、マ
トリクス部は

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}$$
(2)
と表わされる. ここで、次の関係がある.

$$c_{66} = \frac{1}{2} \left(c_{11} - c_{12} \right) \tag{3}$$

5 つの独立なパラメータは,弾性波測定により V_P (0°), $V_P(90°)$, $V_P(45°)$, $V_{SH}(0°)$ と $V_{SH}(0°) = V_{SV}(0°)$ の5つの速度を求めることにより決定することができる²⁾. すなわち,

$$c_{11} = \rho \, V_P^2 \left(90^0\right) \tag{4}$$

$$c_{12} = c_{11} - 2\rho \, V_{SH}^2 \left(90^0\right) \tag{5}$$

$$c_{33} = \rho \, V_P^2 \left(0^0 \right) \tag{6}$$

$$c_{44} = \rho \, V_{SH}^2 \left(0^0 \right) \tag{7}$$

$$c_{13} = -c_{44} + \sqrt{A} \tag{8}$$

$$A = 4 \rho^2 V_p^4 (45^0) - 2\rho V_p^2 (45^0) (c_{11} + c_{33} + 2 c_{44}) + (c_{11} + c_{44}) (c_{33} + c_{44})$$

によって求められる.ここに、

である.

このようにして決定した5つのパラメータを用いて, 次式によりヤング率,ポアッソン比,せん断剛性を算 出する.なお座標系は,対称軸である堆積面に直交す る方向に x₃方向をとり,ほか2つの直交座標は,堆積 面内にとる.

$$E_{33} = \frac{\sigma_{33}}{\varepsilon_{33}} = c_{33} - \frac{2c_{13}^2}{c_{11} + c_{12}} \tag{9}$$

$$E_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}}$$
$$= c_{11} + \frac{c_{13}^2 \left(-c_{11} + c_{12}\right) + c_{12} \left(-c_{33} c_{12} + c_{13}^2\right)}{c_{33} c_{11} - c_{13}^2} (10)$$

$$\nu_{31} = \nu_{32} = -\frac{c_{11}}{\varepsilon_{33}} = \frac{c_{13}}{c_{11} + c_{12}} \tag{11}$$

$$\nu_{13} = \nu_{23} = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} = \frac{c_{13} \left(c_{11} - c_{12}\right)}{c_{11} c_{33} - c_{13}^2} \tag{12}$$

$$\nu_{12} = \nu_{21} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = \frac{c_{12}c_{33} - c_{13}^2}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2}$$
(13)

$$G_{12} = \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \tag{14}$$

$$G_{13} = c_{44} \tag{15}$$

ここで、 $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ は応力テンソル、ひずみテンソルである.

3. 田下凝灰岩の水平等方弾性定数

試料として用いた田下凝灰岩は,溶結構造により認 識される堆積面を有する.そこで,円柱供試体は1つ のブロックから,堆積面に平行,直交および45°傾斜 する方向にコア抜きし,供試体とした.供試体の直径 は5cmとし,高さは3cmとした.用いた試料の乾燥 密度は1.75~1.78g/cm³,湿潤密度は2.01~2.04g/cm³ であり,真密度は2.554g/cm³であった.間隙率は30% 程度である.試験条件は,実験室内で48時間以上放置 した場合(Lab Environment,以下では室内乾燥供試体 とよぶ)と,真空中で強制飽和させた場合(Saturated) とした.

準備した供試体に対して,図-2に示すような方向に 振動伝播する P 波速度,S 波速度を計測した.計測時 には,供試体に 100N の一定荷重をかけている.



図-2 堆積面と弾性波の伝播方向の関係

表-1 田下凝灰岩の水平等方弾性定数

Condition		Lab Environ.	Saturated
Poisson's	ratio		
ν_{12}	ν_{21}	0.15	0.07
ν_{13}	ν_{23}	0.06	0.46
ν_{31}	ν_{32}	0.05	0.43
Young's	modulus	(GPa)	
E_{33}		3.69	6.62
E_{11}	E_{22}	5.10	7.04
Shear	modulus	(GPa)	
G_{12}		2.22	3.29
G_{13}	G_{23}	2.07	3.72

一般に、P 波の立ち上がりと比較して、S 波の到達点 の判断は難しいことが多い.ここでは、指向性のある S 波センサーと指向性のない S 波センサーからの出力を 比較して、妥当な到達点を判断しているが、より厳密 な決定方法が望まれる.

また堆積面に直交および平行のそれぞれ1つの供試体に対して、30回の計測を実施し、試験値のバラツキの程度を調べている.P波では、堆積面に直交方向に計測した場合 90m/s 程度,平行方向では140m/s 程度であった.S波では、堆積面に直交方向に計測した場合70m/s 程度,平行方向では50m/s 程度であった.ここではこれ以上の差違は、有意な変化であると考えた.

以上の検討結果を踏まえて、2章で記述した方法により、田下凝灰岩の水平等方弾性定数を見積もった.結 果を表-1に示す.

室内乾燥供試体のポアッソン比は概して小さな値を 示す.一方飽和供試体では,堆積面に直交する方向の 変形に関連したポアッソン比 $\nu_{13} = \nu_{23}, \nu_{31} = \nu_{32}$ の値 は,供試体が飽和することにより大きくなり,0.5 に近 づいている.他方,堆積面に平行な方向の変形に関連 したポアッソン比 $\nu_{12} = \nu_{21}$ は小さいままであり,飽和 の影響が小さいと考えられる.仮に堆積面に平行に扁 平な間隙が多く存在する場合,このような結果になり うると考えられた.

ヤング率についてみると、室内乾燥供試体では堆積 面に直交する方向の変形性 (E_{33})が小さく、平行方向 の変形性 ($E_{11} = E_{22}$)はそれよりも大きく、その比は おおよそ 1.4 倍である. 図-1 に示した乾燥変形実験に よる異方性の大きさの比は、定常に落ち着いた段階で およそ 1.5 程度である。また Funatsu et al.(2004)³⁾は 田下凝灰岩の力学的異方性について記述しており、 E_{50} の平均値は堆積面に直交方向で 2.24GPa、平行方向で 3.33GPa であり、その比は 1.48 となる。いずれの試験 結果においても、田下凝灰岩の異方性の比はおおよそ 1.5 程度であり,乾燥変形を生じるような材料では,乾 燥変形実験は岩石の異方性を調べる簡易な測定方法に なりうると考えられる.

これに対して,飽和供試体のヤング率は大小関係は 同じであるが,その比は小さくなっている.岩石と水 との複合材料と考えた場合,間隙水のもつ剛性が弾性 波速度のような動的な方法では大きく影響した結果と 解釈できる.

4. 飽和度の変化に伴う弾性波速度と体積ひ ずみの変化

上述した堆積面に直交および平行方向にコア抜きした田下凝灰岩供試体に対して,乾燥変形実験と一定時間ごとの弾性波速度計測を実施した.供試体の直径は5cm,高さ3cmである.

乾燥変形実験では、供試体側面にロゼットゲージ4枚 を軸対称に貼り付け、供試体側面全体をシリコンゴム で被覆した(以前は底面も被覆していたが、影響が小さ いためこの実験では被覆していない).供試体は強制飽 和させたあと、相対湿度50%、温度50℃に制御された インキュベータ内の電子天秤上に置き、乾燥に伴う変 形と質量の変化を計測した.

一方,乾燥に伴う弾性波速度計測も同様に側面のみ 被覆された供試体を用い,乾燥変形実験と同じインキュ ベータ内に同時に置かれ,定期的に供試体を取り出し て P 波および S 波速度と質量を測定した.測定に用い た圧電素子は,P波 63kHz,P波 33kHz の共振周波数 をもつ.

乾燥に伴う弾性波速度と体積ひずみの変化を図-3 に 示す. 横軸に飽和度をとっているが,

$$Saturation = \frac{W_{time} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{dry}} \times 100\%$$

として計算している.ここに、 W_{time} は計測時の質量、 W_{dry} は 105 °Cで 48 時間炉乾燥後室温まで冷却させたあとの質量、 W_{sat} は強制飽和時の質量としたので、近似的な飽和度となっている.

図から、*V_p*は乾燥に伴い減少して極小値に至り、その後増加する.この傾向は若干堆積面との関係によって異なっており、飽和度が変化するに従い、両者のトレースが交差する.この関係は、以前に報告した高さ5cmの田下凝灰岩供試体を用いた実験結果(図-4)においても観察されており、その再現性が確かめられた.

一方 V_s の変化は、乾燥初期にはほぼ一定しており、 飽和度 30% 前後から大きくなっていく傾向にある. い わゆる、desiccation-driven hardening⁴⁾ が観察された と考えられる. このような弾性波速度の変化は、我が



図-3 高さ 3cm 田下凝灰岩供試体の乾燥に伴う弾性波速度と 体積ひずみの変化



図-4 高さ 5cm 田下凝灰岩供試体の乾燥に伴う弾性波速度の 変化¹⁾

国では古くから知られており⁵⁾,教科書的な内容となっている⁶⁾が,本研究の新規性としては,*V_p*の変化傾向が堆積面との関係によって変化することを示したこと,および体積ひずみがこの硬化現象とほぼ一致して収縮側に大きく変化していくことを示したことにより,desiccation-driven hardening が乾燥収縮により生じていることを明らかにしたことにある.

図-3と図-4の差違は、用いた供試体の高さの違いの みである.この程度の供試体寸法の違いでは結果に大 きな差違は見られない.しかし、乾燥変形現象は、岩 石骨格と水分移動との連成問題であり、寸法が変われ ば、得られる変形の大きさも変わる境界値問題として 捉えている.今後は、寸法の大きな供試体を用いて実 験を行い、この点をどう考えるべきかについて検討し ていきたいと考えている.

5. おわりに

本稿では乾燥に伴う力学的な物性変化を知るために, 田下凝灰岩を水平等方性を有する堆積岩の典型的な試 料として動的な水平等方弾性定数を求めるとともに,乾 燥変形実験と弾性波速度測定を実施した.得られた知 見をまとめると,以下のようである.

- 弾性波速度測定により見積もった室内乾燥条件および飽和条件における田下凝灰岩の水平等方弾性定数は、S波伝播速度計測の精度に課題を残すが、解釈可能な結果であると考えられた。
- 弾性波速度測定から得られた田下凝灰岩の力学的 な異方性は1.4 程度であり、他の結果と整合的で ある。
- 乾燥変形実験から得られた異方性の比は、他の試験結果とほぼ同程度であることから、岩石の異方性を調べる簡易な試験として、乾燥変形実験が有用であると考えられる。
- *V_p*の変化傾向は堆積面との関係によって変化し、 速度の大小関係は飽和度によって交差する関係に ある.
- V_sの増加傾向は飽和度約 30% 付近から生じ, desiccation-driven hardeningが観察されたものと 考えられ、この変化は供試体の収縮体積ひずみと 変化と協調的であり、乾燥収縮が主因であると考 えられた.
- この結果は、岩石の乾燥変形現象が岩石の骨格構造と密接に関連していることを示唆している。

参考文献

- 長田 昌彦, Thilini Nuwanradha Illankoon and Nayana Madurya Adikaram: 乾燥に伴う軟岩の弾性波速度の異 方性について、日本応用地質学会平成 22 年度研究発表会 講演論文集, CD-ROM, 2010.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J.: *The rock physics handbook, 2nd ed.*, Cambridge University Press, 2009.
- 3) Funatsu, T., Seto, M., Shimada, H., Matsui, K. and Kuruppu, M.: Combined effects of increasing temperature and confining pressure on the fracture toughness

of clay bearing rocks, *Int. Jour. Rock Mech. & Min. Sci.*,, Vol. 41, pp. 927–938, 2004.

- 4) Ghorbani, A., Zamora, M. and Cosenza, P.: Effects of desiccation on the elastic wave velocities of clay-rocks, *Int. Jour. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 46, pp. 1267– 1272, 2009.
- 5) 小島圭二:東京湾口の地盤, 土木研究資料, No. 730, p. 32, 1972.
- 6) 土質工学会(編):堆積軟岩の工学的性質とその応用,387p., 1987.

MECHANICAL ANISOTROPY OF TAGE TUFF AND THE CHANGE OF ELASTIC WAVE VELOCITY AND DEFORMATION WITH CHANGING IN SATURATION

Masahiko OSADA and Adikaram Nayana Madurya

Generally sedimentary rocks have structural anisotropy. Tage tuff, which was used in this study, also shows transversely isotropy. We firstly determine the elastic parameters for Tage tuff as a transversely isotropic material. Then drying induced deformation experiments with measurements of elastic wave velocities are conducted to reproduce the relation between the change in elastic wave velocities and saturation, which has been obtained in the previous study. As a result, we have confirmed the desiccation-driven hardening in Tage tuff. In addition, the results show that this hardening is concordant with the volumetric shrinkage strain of the specimen.