堆積岩の乾燥変形過程と多孔質弾性論的解釈

長田 昌彦^{1*}・山辺 正²

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) ²埼玉大学大学院 理工学研究科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255) *E-mail: osada@rock.civil.saitama-u.ac.jp

地下空洞やトンネルなど岩盤を掘削することによって,壁面沿いに掘削影響領域が形成される.その形 成過程では,掘削による応力状態の変化とともに,比較的乾燥した空気が空洞内に流入することによって 岩石表面からの乾燥が進み,これによって掘削影響領域の形成が加速されることが懸念される.その影響 の程度は岩石の種類ごとに異なると考えられるが,乾燥に伴う岩石の変形過程についてのデータはほとん ど存在していないのが現状である.本論文では堆積軟岩を用いて実施した室内乾燥変形実験の結果を報告 するとともに,その結果について多孔質弾性論による解釈を試みた.また乾燥変形実験結果から不飽和浸 透解析に必要となる水分特性曲線を推定する手法を提案した.

Key Words : drying induced deformation, poroelasticity, water retention curve, soft sedimentary rock

1. はじめに

地下空洞やトンネルなど岩盤を掘削することによって, 壁面沿いに掘削影響領域(以下EDZという)が形成され る.EDZの形成過程では,掘削による応力状態の変化と ともに,比較的乾燥した空気が空洞内に流入することに よって岩石の乾燥が進み,乾燥収縮によって掘削影響領 域の形成が加速されることが懸念される.実際に,スイ ス・モンテリ地下研究所内に分布するオパリナスクレイ には,図-1に示すように巨視的な乾燥クラックが発生し ており,一部の研究者はこれに着目して現地実測を開始 している.

このような乾燥領域では,地下水は毛管水頭によって 移動し,これに伴って地下水に溶け込んでいる成分も移 動・濃集して,沸石類や黄鉄鉱などの鉱物が蒸発箇所で 析出することになる.したがって溶質移動を考慮する際 にも,駆動力としての乾燥現象を考慮する必要がある.

一般の建設事業ではあまり考慮されないが,難透水性 の岩盤を利用しようとする放射性廃棄物の地層処分では, 乾燥変形の影響がより顕著に現われる可能性が大きい. しかし乾燥過程における変形過程のデータはあまりない のが現状である.

このような背景から,いくつかの堆積軟岩に対する乾燥変形実験を行っている¹⁾.本稿では,その概要を紹介するとともに,得られた結果を多孔質弾性論による解釈を試みる.また合わせて岩石中では計測しづらい体積含



図-1 掘削後約 90 日後に観察された乾燥クラック.ス イス・モンテリ地下研究所にて撮影.

水率と毛管水頭の関係である水分特性曲線を乾燥変形 実験の結果から推定する方法を提案する.

2. 実験方法と結果

(1) 実験方法

試料には,ボーリングによって採取された直径6cmの 凝灰岩コアを用いた.試料はできるだけ乾燥させること なく,厚さ3cm程度の大きさに切断して供試体とした. 供試体の概要を表-1に示す.湿潤密度は 2.013 g/cm³,乾 燥密度は 1.547 g/cm³,間隙率は43%である.凝灰岩は肉

表-1 供試体の概要

No	質量g)	体積 (g/cm ³)	直径(cm)	高さ(cm)
1	232.62	88.09	5.924	3.198
2	145.20	78.84	5.931	2.856
3	160.17	81.92	5.920	2.978
4	157.70	81.45	5.955	2.925
5	162.15	80.54	5.942	2.905



図-2 単位体積当たりの質量の経時変化

眼では等方均質な材料である.

供試体の側面には,4枚のロゼットゲージを対称に貼 り付けて乾燥過程における変形を計測した.5つの供試 体のうち,1つには供試体下面にもロゼットゲージを貼 り付けている.供試体の側面はシリコンゴムで覆い,蒸 発は上面のみで生じるようにした.このようにして準備 した供試体を電子天秤の上に設置し,さらに渡辺ら²⁾の 開発した2点センサーを上面近傍に設置して蒸発に伴う 水分移動を計測した.また外気の流れを遮断する目的で 天秤全体をアクリルカバーで覆い,その上面付近の温度 湿度環境も合わせて計測している.

(2) 実験結果

a) 単位体積当たりの質量変化

5つの供試体における単位体積当たりの質量変化の経 時変化を図-2に示す.5つの供試体でほぼ同じ傾向を示 しており,試験開始から5~7日後から質量の低下傾向が 変化していること,また15日を過ぎた段階ではほぼ変化 がなくなっていることがわかる.湿潤密度と乾燥密度の 値から推定される値にほぼ収束しているので,試験終了 時には供試体中の水分はほとんどなくなっていることを 示している.

b) 蒸発量の経時変化

この関係を蒸発量の経時変化としてみたものの1例が 図-3である.図には2点センサーで計測した相対湿度(far とnear)とアクリルカバー直近での相対湿度(com)も合わ



図-3 相対湿度と蒸発量の経時変化の例(sample 1)



図-4 ひずみの経時変化の例(sample 1)

せて示している.計測環境を通常の実験室内としたため 日変化が大きいが,明らかに恒率蒸発期と減率蒸発期が 確認できる.この供試体の場合には,その境界は8.9日 と推定される.他の試料についても同様な傾向の結果が 得られている.この境界の位置は,供試体直上での相対 湿度(near)の値が高い値を維持できなくなる点としても 定義できる.

c) 乾燥過程におけるひずみ挙動

供試体側面に貼り付けた4枚のロゼットゲージによっ て,それぞれの点におけるひずみ場を求め,空間的に同 じ方向を向いているひずみゲージの計測値の平均をとっ て,軸方向ひずみ,直交する2方向の周方向ひずみを算 出した.またこれらの値より体積ひずみを求めた.

図-3に対応する計測結果の一例を図-4に示す.なお, ひずみは圧縮を正として表示している.試験開始から約 1日の間,すべてのひずみは圧縮側に推移している.ま た各方向のひずみの大きさはほぼ一定であり,毛管圧力 が等方的に作用していると考えると,今回用いた試料は 等方的であるといえる.この間に間隙内にメニスカスが 形成されているものと考えられる.

その後、図中破線で示した境界付近まで、各ひずみは

表-2 蒸発量とひずみの変化点(単位;日)

No.	Evaporation	Strain
Sample 1	8.9	5.3
Sample 2	5.9	5.4
Sample 3	6.0	4.4
Sample 4	6.0	4.5
Sample 5	6.5	5.2

ほぼ一定となっていることが分かる.このことは,恒率 蒸発期には供試体の変形はほとんど進行しないことを示 している.しかし,供試体全体としては体積含水率が減 少しており,この間の水分移動がどのように生じている のか,このときのメニスカスの生成・消滅が平均的に同 じ割合で生じているかなどについて,さらなる検討が必 要である.

次に恒率蒸発期から減率蒸発期に移行するのに先立ち, 軸方向と周方向のひずみが変化し始めている.この挙動 はすべての供試体で観察され,その変化点の値を表-2に まとめてある.具体的には,軸方向ひずみが伸張側に変 化するのに対して,周方向ひずみは圧縮側に変化する. ただしこの間も体積ひずみは大きくは変化していない.

減率蒸発期も終わりに近くなって初めて,体積ひずみ が伸張側に変化しはじめる.図-3の例では最終的に-400×10⁶の値となっているが,他の供試体では最大-1500×10⁶まで到達しているものもある.

3. 多孔質弾性論による解釈

乾燥に伴う岩石の変形は,毛管圧力の発生を駆動力とした不飽和浸透と変形の連成挙動である.ここではBiotの多孔質弾性論^{3,4}を不飽和領域に拡張して用いる⁵.

多孔質線形弾性体の構成式は,全応力テンソルを _{ij}, ひずみテンソルを _{ij},間隙水圧をp,流体体積変化を として,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \sigma_{kk} + \frac{\alpha}{3K} p \delta_{ij}$$
(1)

$$\zeta = \frac{\alpha}{K} \frac{\sigma_{kk}}{3} + \frac{\alpha}{KB} p \tag{2}$$

のように書ける.ここで*E*, , *K* はそれぞれ, 排水条件におけるヤング率, ポアソン比, 体積弾性係数であり,

, B はBiot - Willis係数, SkemptonのB値として知られている値である.なお,応力,ひずみに関しては,引張り,膨張側を正,間隙水圧に関しては増加を正,流体体積変化については流入を正としている.

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \frac{\alpha}{3K}p \tag{3}$$

$$\zeta = \frac{\alpha}{KB} p = \frac{1}{B} \varepsilon_{kk} \tag{4}$$

となる.この式から言えることは,各点においては,試料が等方性を有しておれば毛管水圧の作用によって生じる各方向のひずみはすべて同じ大きさで,符号も同じになることである.図 4に見られるひずみの等方的な挙動は,上面から蒸発が生じているのにも関わらず,供試体内部の毛管圧力分布はほぼ一定であることを示していると考えられる.

一方,上述した軸方向ひずみと周方向ひずみの乖離は 供試体内部に軸方向に毛管圧力の勾配が形成されつつあ ることを示していると考えられる.また周方向の圧力勾 配は比較的小さいため,その変化の絶対値は毛管圧力の 増加を示していると考えられる.おそらくは飽和度の低 下により,メニスカスの形状が変化したためと考えられ る.この乖離が生じたときの飽和度は0.4から0.5程度で ある(図 5参照)から,間隙水の連続性が断ち切られ つつある可能性が大きい.したがって,これ以下の飽和 度では,不飽和領域まで拡張されたDarcy則を適用する ことも困難となり,水蒸気としての流れを考慮する必要 が生じる.

体積ひずみが伸張側に推移する領域は,メニスカスが 分断され,もはや毛管圧力を伝達できなくなることを示 していると考えられる.ひずみ計測の0点は,試験開始 時としているため,体積ひずみ量の最終値は試験開始前 の弾性ひずみを現しているのか,乾燥変形による非弾性 的な性質を表わしているものかは現段階では不明である.

4. ひずみ計測による水分特性曲線の推定

不飽和浸透 変形現象の連成解析を行う場合,岩石に 対する水分特性曲線が必要となる.しかしながら,土に 対して開発されている様々な方法⁵は,岩石にはなかな か適用しがたい.そこでここでは,乾燥変形実験から得 られる体積ひずみの変化から,岩石を線形弾性体である と仮定して,毛管水圧を推定する方法を提案する.

上述したように,ひずみ挙動が等方的である領域では, 供試体内の圧力分布は一様であると仮定してもよさそう である.この仮定が成り立つとすれば,変形と浸透を連 成させる必要はなく,(3)式より

$$\alpha p = K \varepsilon_{kk} \tag{5}$$

となり,単純な弾性問題となる.すなわち,観測された体積ひずみの値は,供試体の体積弾性係数 K と Biot - Willis 係数 が定数として与えられるならば,毛管圧力の大きさに置き換えられることを示している.ゆえに, 試験において計測される体積含水率の変化に対して,体



図-5 乾燥変形実験から求めた水分特性曲線.破線は van Genuchten 式による近似(vg=0.035, m=0.9).

積ひずみの大きさをプロットすれば,この試料に対する 水分特性曲線が得られたことになる.ここでの値は

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \tag{6}$$

で与えられるため,固体粒子部分の体積弾性係数 K_sが 十分に大きければ,1とおくことができる.このように 仮定して得られた曲線を図-5に示す.排水条件における 体積弾性係数の値としては,別途実施したP波S波速度 測定結果から推定した値(K=346MPa)を用いている. 図では横軸を(w-wnin) (wnex-wnin)としており,wnexは試験 開始時の質量,wnin は試験終了時の質量,wは試験中の 質量である.したがってこの値は供試体全体としての正 規化した体積含水率(あるいは飽和度)に相当する量で ある.また縦軸は,体積ひずみから計算される毛管水圧 を毛管水頭に変換して示している.なお,図ではひずみ 計測結果の日変化を取り除くために,スムージングを施 しており,ひずみの乖離が生じた後のデータは省略して いる.

全体としての曲線の形状は,砂に見られるような水分 特性曲線の形状と類似していることがわかる.水分特性 曲線モデルとして van Genuchten 式⁶⁰を用い,式のパラメ ータである __wとmをそれぞれ0.035,0.9の値を目安とし て示すと,図中の破線のような形状となる.この曲線の 適用は,毛管圧力の作用によって各方向のひずみが同じ 挙動を示す領域に限られる. ここで提案した手法は,微小変形領域において毛管圧 力が供試体内で一定であるとみなせるならば,適用可能 であると考えられるが,その絶対値の妥当性や毛管圧力 分布が一定とみなせない試料については,他の手法との 比較によってなされるべきであり,今後の課題としてお きたい.

5. おわりに

本論文では堆積軟岩を用いて実施した室内乾燥変形実 験の結果を報告するとともに,多孔質弾性論によって結 果解釈を試みた.その結果,観測されたひずみ挙動を説 明できた.ここで用いた試料に対しては飽和度が0.4か ら0.5までしか不飽和領域に拡張されたDarcy則が適用で きないことがわかった.また乾燥変形実験結果から不飽 和浸透解析に必要となる水分特性曲線を推定する手法を 提案した.

参考文献

- Aung Ko Ko Sœ,長田 昌彦:蒸発量計測による堆積岩の乾燥 収縮実験,日本応用地質学会平成17年度研究発表会講演論 文集,pp.331-332,2005.
- 2) 渡辺邦夫ほか:蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水 量の測定(その1)-測定法と実験-,応用地質,Vol.30, No.4,pp.11-18,1989.
- Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., vol.12, 155-164, 1941.
- Wang, H. F. : Theory of linear poroelasticity with applications to Geomechanics and Hydrogeology. Princeton Univ. Press, Prenceton, 287pp, 2000.
- 5) 地盤工学会:不飽和地盤の挙動と評価,地盤工学会,223pp,2004.
- van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol 44, pp.892-898, 1980.

DRYING INDUCED DEFORMATION OF SOFT SEDIMENTARY ROCKS AND ITS EXPLANATION BY POROELASTICITY

Masahiko OSADA and Tadashi YAMABE

Drying induced deformation experiments were performed on a soft sedimentary rock in order to evaluate the effect of drying process on the formation of excavated disturbed zone. The results are discussed on the basis of poroelasticity. The strain behaviors in the drying process can be explained well and include much information about the condition of pore water. Under the assumption of homogeneous pressure distribution inside the specimen, we also propose a new method to estimate the water retention curve from the measured volumetric strains.