

氏 名	AUNG KO KO SOE
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 754 号
学位授与年月日	平成 21 年 9 月 18 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	CHARACTERIZATION OF DRYING-INDUCED DEFORMATION IN SEDIMENTARY ROCKS AND ITS IMPLICATION TO UNDERGROUND STORAGE FACILITIES (堆積軟岩における乾燥変形挙動の特徴とその地下貯蔵施設に対する意義)
論文審査委員	委員長 教授 渡邊 邦夫 委員 准教授 小口 千明 委員 准教授 長田 昌彦 委員 准教授 山辺 正

## 論文の内容の要旨

A significant portion of near-surface rocks is made up of soft sedimentary rocks and more than two-third of them exhibits argillaceous in nature. Among the argillaceous clastic sedimentary rocks, shales and mudstones are the most abundant rock types in uppermost part of the geologic column. Therefore, they are of wide reaching interest to engineers for frequent encounters in civil engineering projects. Due to their massive occurrences in strategic locations, self-healing characteristics and desirable generic properties, many national and international programmes on facility management consider argillaceous rocks as a candidate for underground storage facility construction. However, being presence the clay minerals for more than 50% and their porous nature, argillaceous rocks such as shale and mudstone tend to be very sensitive to environmental changes. They are of well known and notorious for exhibiting a strong tendency to shrink when partially or completely dried.

Clay minerals also appear in sandstone as minor proportion in cementing phase and these clay bearing sandstones are often encountered in excavation, foundation, monument and building stone. These rocks tend to have moderate to medium strength and are likely to withstand the volume changes induced by water content variation than shales and mudrocks. But having the swelling clay in the cementing phase, not necessarily to be a large amount, still has a drastic effect on elastic, viscoelastic properties and dimensional changes in sandstone. Therefore, in an instance when an underground space is excavated in saturated rock mass, evaporation of pore water will occur when they come to contact with new environment. As a result, dimensional changes and micro to macro scale structural modification will take place in the unsaturated rock mass around the excavation face. Although the degree of changes depend on clay mineral contents and strength characteristics, this effect nonetheless can enlarge or contribute as one significant factor to further growth of Excavation Damaged Zone (EDZ) in addition to the effects of mechanical perturbation and stress

field re-orientation. For the fact that, the response to evaporation of pore water and interaction with other solutions make characterizing the deformation properties of argillaceous and argillaceous natured rocks a great importance for the foundation of strategic civil engineering structures.

Taking this into consideration, an attempt has been made to investigate the deformation behavior of Opalinus Clay, Pumaceous Tuff and Shirahama sandstone under a no-stress condition in drying process to evaluate their generic susceptibility to the formation of EDZ. A series of comprehensive laboratory experiments were performed in different drying conditions and evaporation modes. The saturated samples were subjected to different drying conditions while deformation and evaporative water loss were being monitored simultaneously and quasi-continuously. The significance of strain occurrences in the drying process were evaluated with tensile strain criterion and examined the cracking potential of each rock type. In addition, the quasi-continuous availability of the strain data were further used in poroelastic relation for the estimation of matric suction occurrence created by desaturation. Then the deformation mechanism and matric suction evolution were characterized and explained by thermodynamic behaviour with the evidences obtained from Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Basically, this study applied the theories well utilized in soil mechanics to sedimentary rocks to address the scattering observation and promote the understanding of inherent deformation that can be induced by evaporation of pore water itself as it will be of beneficial for the study of EDZ in underground storage facility constructions.

It is observed that the drying phase induced significant strain magnitude and damage in Opalinus Clay samples, which is evidenced by the formation of hairy cracks on the surface parallel to the bedding. But the strain occurrences in Pumaceous Tuff samples are relatively insignificant, and no tendency of cracking is observed. On the other hand, the results show that virtually no volume change occurs in Shirahama sandstone until half of its saturated water content is evaporated. Moreover, the evaluation with strain based failure criterion shows that strain accumulations in Opalinus clay are large enough and very favourable to form the cracks parallel to bedding. In contrast, it reveals that maximum strain magnitudes that can occur in the drying process for Pumaceous Tuff and Shirahama sandstone are relatively insignificant and reach about 50% or 60% of their critical tensile strains and the strain occurred in the drying process is found to be insignificant. However, strain magnitude in drying phase is observed to be higher for Shirahama sandstone saturated with concentrated sodium sulphate solution and considerable mass wasting is detected even in a few cycles. It is also observed that the ultimate dimensional change capacity of each particular rock type is independent of drying condition, whereas evaporation rate and strain occurrences are shown to be affected significantly. In addition, the study of pore structure indicates that substantial strain magnitude and high matric suction occurrence can be ascribed to water loss from pores smaller than  $0.01 \mu\text{m}$  in radius. All tested samples, except Opalinus Clay, displayed neither a tendency nor likelihood of crack formation in the drying process. For Opalinus Clay, when they are exposed to low humidity environment, they will show severe cracking parallel to bedding. The obtained results allow to conclude that significance of drying-induced deformation and cracking susceptibility in clay bearing soft sedimentary rocks are dependent of clay mineral content, pore structures, water holding capacity and presence of mineral fabric alignment. The present study sheds light on essential elements in the studies of dimensional changes in clay and clay bearing soft sedimentary rocks to assist in evaluating ground movement, deterioration, fluid flow and isolation properties of underground facilities.

## 論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、平成 21 年 8 月 3 日に論文発表会を開催し、申請者による発表、質疑応答および論文内容の審査を実施した。なお発表会に先立ち、各審査委員に論文内容を説明し、詳細な質疑を行っている。発表内容を含む本学位論文審査結果についての概要は以下のとおりである。

高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトが進行しつつある。処分サイトの選定にあたっては、可能な限り低い透水性を有する岩盤を選択することになる。透水性の小さい岩盤を対象とすることで注意すべきことは、操業時において空洞周辺岩盤は乾燥状態に置かれる可能性が高いことである。空洞表面が乾燥状態に置かれるか否かは、岩盤の持つ透水特性、動水勾配および掘削空洞内の温度湿度環境に依存する。ライニングの施工等により長期的には飽和状態に戻すことができると考えられるが、どのような温度湿度環境条件下において、どの程度の期間開放状態においても問題を生じないかについては、よくわかっていないのが現状である。特に、日本に広く分布する第三紀泥岩には、特徴的な乾燥クラックが発生することが経験的に知られている。このような乾燥クラックは非弾性変形であり、一度生じてしまえば、回復不能であるか、あるいは回復までにはより長い時間を要することになる。またクラックの発生にいたらずとも、乾湿の繰り返しによって、岩石、特に堆積岩は劣化する傾向にある。これはもともと岩盤のもっている天然バリアとしての性能を脆弱化させる方向に働くことになる。このような課題を克服して安心して安全な地層処分プロジェクトを推進するためには、乾燥変形現象を十分に理解しておく必要がある。本学位申請論文は、この課題に室内実験的に取り組み、その成果をまとめたものである。

本論文は、10 章から構成されており、以下に各章の概要と成果を示す。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、特に放射性廃棄物の地層処分における乾燥変形現象の重要性について説明するとともに、研究の目的および論文の構成について述べている。

第 2 章では、堆積岩を対象として乾燥湿潤過程における体積変化に関する研究をレビューするとともに、関連した力学的な挙動である膨潤・収縮特性およびクラックの発生について論じている。

第 3 章では、本研究で用いた 3 種類の堆積岩(オパリナスクレイ、六ヶ所凝灰岩、白浜砂岩)に関する詳細な記述と、実験室での乾燥変形挙動の測定方法がまとめられている。

第 4 章では、実験室で実施した乾燥変形実験の結果を、上記の堆積岩ごとにまとめている。また補足的に実施した追加実験の方法と結果についても示している。特に、乾燥に伴う三次元的なひずみ場を計測することにより、岩石の有する異方性の程度を容易に定量的に記載することができることを示したことは、岩石物性評価の観点からは有意義である。

第 5 章では、引張ひずみ基準について記述するとともに、別途実施した圧裂引張試験時の引張ひずみの大きさと乾燥変形過程で観察される引張ひずみの大きさを比較している。この比較により、乾燥に伴いそれぞれの堆積岩に乾燥引張クラックが発生するか否かを判定できる可能性を示した。この成果は、空洞周辺で生じる乾燥に伴う変形を計測するとともに温湿度条件を制御することにより、乾燥引張クラックの形成を最小

限に抑制することに応用できる。この内容に関しては、国際誌である Environmental Geology に掲載決定しており、web 上 (online first) で公開されている。

第 6 章では、乾燥に伴い発生するひずみの大きさに関する議論を行うために、各堆積岩について水銀圧入試験を実施し、間隙径分布を求めている。その結果、乾燥に伴い発生するひずみの大きさと間隙径分布との間には密接な関係があることを示した。特に、マイクロポア以下の間隙径分布が乾燥変形現象に大きく寄与していることを明らかにしている。

第 7 章では、三次元的に計測したひずみをもとに、多孔質媒体理論を援用して、供試体内部で発生しているマトリックサクションの推定を試みている。各堆積岩の力学物性は弾性波速度測定により決定している。この方法により、不飽和浸透問題を表現するために必要な水分特性曲線が得られることを示した(既往の研究成果との比較については第 8 章で議論している)。

第 8 章では、ここまで得られた実験結果を総合的に評価し議論している。特に、水分特性曲線と間隙径分布との関連について議論し、これまでに提案されている水分特性曲線モデルへの適用方法についてまとめている。白浜砂岩についての議論の詳細は、国際誌である International Journal of Japan Society of Rock Mechanics に公表されている。

第 9 章では、モンテリ地下研究所での原位置計測結果との比較のための予備検討として、第 8 章で得られた水分特性曲線モデルを用いて、2次元不飽和浸透解析を実施している。

第 10 章には、上述した一連の成果が結論として要約されており、今後検討すべき課題がリストアップされている。

以上のように、本論文は、各種堆積岩を対象として乾燥変形現象を実験的に詳細に調べたものであり、放射性廃棄物の地層処分に対して有用な知見を得ており、岩石物性評価上の貢献度も高い。よって当論文審査委員会は本論文を博士(工学)の学位論文として価値あるものと認め、合格と判定した。