

氏名	MIN MAUNG MAUNG
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 683 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 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	Development of evaporation measurement techniques and its application to the analysis of unsaturated flow (蒸発計測法の開発とその不飽和浸透解析への適用)
論文審査委員	委員長 教授 渡辺 邦夫 委員 教授 風間 秀彦 委員 准教授 長田 昌彦 委員 准教授 小口 千明

## 論文の内容の要旨

Groundwater flow in unsaturated soft rock is relating to many problems such as the fractured unsaturated zone (*UZ*) around a tunnel due to the drying process, the salt crystallization on rock surface, etc. Consequently, the evaluation of those phenomena became vital for the absolute safety of hazardous waste disposal tunnels constructed in soft rock in many countries. One of the most important points for evaluating those phenomena is the estimation of saturated-unsaturated hydraulic properties of soft rock.

The first part of this research is to develop the practical estimation technique for the unsaturated hydraulic properties of soft rock on the basis of the evaporation measurement techniques, the Campbell model and Genetic Algorithm (*GA*). The major objectives of the first part of this present study are; to investigate whether or not the Campbell model can be applied to soft rock and to study the performance of *GA* technique for estimating the Campbell model parameters. Two transient evaporation tests under different atmospheric conditions were proposed and carried out in this research by using 13 disk shaped Tertiary soft sedimentary rock specimens (5 sandstone and 8 tuff breccia specimens), sampled from the *Rokkasho Low-Level Radioactive Waste (LLW) disposal site* in Japan. As the results it was clearly found that the transient change of evaporation rate can be well fitted by the Campbell model except for the region of low saturation. This fact implies that the Campbell model can be applied to the soft rock. And also it was found that *GA* is a promising technique for the parameters estimation in the inverse solution technique. It can be concluded that the estimation technique is practical for estimating the unsaturated hydraulic properties of soft rock.

The accurate evaporation measurements can be used to evaluate the saturated-unsaturated groundwater flow in the rock mass around the waste disposal facility and to predict the long term weathering process from the ground and wall surfaces and so forth. Accordingly, the second part of the present research is to study on the improvement and the development of the direct evaporation measurement equipments (*i.e. evaporation logging equipment and newly design portable evaporation meter*) on the basis of the evaporation measurement techniques (*Watanabe, K. et*

al 1989 and 1996). The objectives of second part of the present research are the following; 1) to study the accuracy of the evaporation logging equipment to improve the evaporation logging measurement system, 2) to investigate the accuracy of the measurements of the newly designed evaporation meter under the no-wind condition and the wind condition in the laboratory and field tests and 3) to study the applicability of the new evaporation meter in the actual field measurement. From the measurements of the evaporation logging equipment, it can be concluded that the measurement values are good under different average air flow conditions. Although the evaporation distribution could not well be measured in the high average air flow rate due to the turbulent motion of air in the model of borehole. This feature implies that the improvement of the control of small average air flow rate is very important for the accurate evaporation measurements of the evaporation logging system. According to the measurements of new type evaporation meter, it is observed that the accuracy is good under no-wind condition and also it is found that when the average wind velocity is less than  $0.2 \text{ m/s}$ , the maximum error is lower than  $20\%$ . The applicability of the new type evaporation meter was conducted for the preservation works of historical Buddhist monastery, Ajina Tapa, Tajikistan. From the field measurements, it can be concluded that the newly designed evaporation meter can successfully be applied in the actual field. And also it can be found that the measured evaporation rate is large at the foot part of the historical wall and it decreases with the height. This fact implies that the height of the protection cover wall is at least larger than  $1.0 \text{ m}$  is needed to reduce the decay of historical walls due to the salt crystallization for preservation works.

## 論文の審査結果の要旨

軟岩中の不飽和浸透流は、トンネル壁面の乾燥に伴う劣化や塩類析出による建築物基礎の崩壊などで重要であるに関わらず、まだその性質が妥当に解析されるに至っていない。この原因の1つは、不飽和パラメーター（飽和度、サクシオン圧、不飽和透水係数の関係）が定量的に評価し難い事によるものである。本論文は、軟岩試料からの蒸発量変化の経時変化から不飽和パラメーターを算定する方法を用い、その妥当性と適用性を研究した結果を取りまとめたものである。研究の過程で、蒸発計の精度向上や新しい蒸発計測システム開発の必要性が生じ、それについても併せて研究した。本論文では、研究成果を下記の7章に分けて記述している。

第一章では、研究の目的を述べ、本論文の内容を概観している。この中で軟岩の不飽和浸透流解明の重要性とそれを評価するための蒸発計測の必要性を述べている。

第二章では、本研究に関連する従来の研究を取りまとめている。まず、軟岩の不飽和浸透流による、トンネル壁面の劣化などの工学的問題と不飽和浸透流の基礎理論に触れた後、不飽和パラメーター計測法について整理している。これらを踏まえ、蒸発計測に基づくパラメーターの逆推定法が実用的である事を指摘し、軟岩についても開発する必要性が高い事を述べている。

第三章では、パラメーターの逆推定法の考え方と理論について述べている。逆推定法は、飽和度、サクシオン圧、不飽和透水係数の関係を表現する式の中に含まれる定数を実験と数値解析のフィッティングにより求める方法であり、まず基礎となる式を選定する事が必要である。本研究ではCampbellモデルを採用した。しかしこのモデルは、主に細粒砂質土について導かれた式であり、①それが軟岩に適用できるか、②式中の2つのパラメーター（Campbellパラメーター）を合理的に推定する事、が大きな研究課題である事を指摘している。また、実験としては、基本的にはCampbellの提案に基づき軟岩試料からの蒸発量の経時変化を用いるものの、第六章で述べている、開発した蒸発計を使用する事でより実用性を高められる事を述べている。

第四章では、実験と数値解析をフィッティングし、2つのCampbellパラメーターを推定するため、遺伝的アルゴリズムの適用を提案している。次いで従来提案されている遺伝的アルゴリズム（GA）の理論と適用例を精査し、この問題に適したGA計算の方法とGAパラメーターの妥当な設定方法について論じている。

第五章では、実際の軟岩資料を用いたパラメーター同定について述べている。まず実験として2つの方法を行なっている。1つは、恒温恒湿槽の中で行なわれた蒸発量の経時変化試験であり、他は温度・湿度が変化する室内での試験である。後者の方法は現場でも行なえる意味でより実用性が高いと言える。まず前者の方法で得られた蒸発量の経時変化を本研究で開発した方法で解析し、極めて良くフィッティングができる事を示した。この事は、Campbellモデルが軟岩にも適用できる事を現している。またGAによるパラメーター推定法は収束性が高い事を明らかにした。後者の実験についても、ある程度良いフィッティングが可能である事が明らかとなった。問題は、蒸発量が小さくなった場合に多少の差が生じたことである。この理由として、

- ① Campbellモデルが、もともと飽和度の小さい範囲には適用でき難いこと、
- ② 蒸発量が小さい場合の蒸発計の精度が悪い、風や室内の対流の影響

の2つが考えられる。①の問題に関して、実際2つの実験で得られたパラメーターに差が見られ、各々のパラメーターを用いて、飽和度、サクション圧、不飽和透水係数の関係を描いた所、飽和度の小さい範囲で差が見られたが、飽和度がほぼ30%以上ではその差は小さいことがわかった。②の問題については、蒸発計の改良が大事となる。

第六章では、蒸発計測の改良について記述している。まず、トンネル周辺の不飽和域を調べる方法の1つである Evaporation Logging 法の精度、とくにボーリング孔に送気される空気風速の影響を調べ、平均風速がほぼ10cm/sより小さければ測定精度が良い事を明らかにした。また蒸発計のセンサー部を改良し、蒸発計測に与える風速の影響を調べ、表面上5mm位置の風速が20cm/sであれば、測定誤差が20%以下である事を明らかにした。この改良した蒸発計の実用性・妥当性をタジキスタンで検証した。

第七章は、上記の研究成果を整理した物である。また、今後発展すべき研究方向について論述している。上記の研究は丹念な努力により行われたものであり、その中で、不飽和パラメーターの新しい逆推定法や改良型の蒸発計を提案するなどの技術開発が行なわれた。また、軟岩の不飽和特性に関する新知見を得ている。それらを総合的に判断して博士学位論文として十分な内容と判定した。