

氏名	HAFIZ MUHAMMAD AWAIS RASHID
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 1046 号
学位授与年月日	平成 28 年 9 月 23 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 Geotechnical, Hydraulic and Solute Transport Properties of Liner Materials under Elevated Thermo-Chemical Exposure (昇温及び高塩分濃度条件下におけるライナー材料の地盤工学・透水・溶質移動特性)
論文審査委員	委員長 教授 川本 健 委員 教授 田中 規夫 委員 准教授 長田 昌彦 委員 准教授 浅本 晋吾

論文の内容の要旨

The study investigated the combined effect of chemicals and temperature on landfill liner materials. Geotechnical, hydraulic and solute transport characteristics of geosynthetic clay liner (GCL) were investigated using single species salt solutions at three different temperatures. In addition to this, geotechnical and barrier performance of locally available soils and its bentonite admixtures was investigated using different chemical species and consolidation pressures for their use as liner materials in landfills of developing countries.

The geotechnical (swell index and liquid limit) and hydraulic (intrinsic permeability) characteristics of GCL-bentonite were examined using deionized water and four single species salt solution (NaCl, KCl, CaCl₂ and MgCl₂). Concentrations of the salt solutions varied from 0.01 mol/L to 1 mol/L. The tests were performed at three temperatures (20 oC, 40 oC and 60 oC). Both swell index and liquid limit were found to decrease with an increase in solution concentration. Swell index increased and liquid limit slightly decreased with an increase in temperature. Temperature dependence of bentonite on both geotechnical properties was more prominent in samples permeated with DI water and lower concentration of salt solution suggesting that osmotic swelling is a temperature dependent phenomenon. At intermediate and higher concentrations, swelling of bentonite was mainly controlled by solution chemistry where effect of temperature was insignificant. Strong correlations were found to exist between swell index and liquid limit at all the three temperatures. Intrinsic permeability (K) of saturated bentonite samples was found to be temperature dependent for all the given permeant solutions. A significant increase in commutative flow volume with an increase in temperature was observed. Even after considering the temperature dependence of kinematic viscosity, the K values, generally increased with an increase in temperature. Intrinsic permeability (K) was found to be associated with the swell index values at all the temperatures. At 20 oC swell index seems to affect K values for lower swell index values. However, at higher temperatures, the effect was noticeable at higher swell index values. The intrinsic permeability (K) was found to be mainly affected by

temperature dependence of bentonite swelling at lower concentrations. Whereas, swelling and intrinsic permeability (K) were found to be mainly controlled by solution chemistry at higher solution concentration.

The solute transport by diffusion process through bentonite samples hydrating with salt solutions of four cation species Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} having a common anion (Cl^-) was investigated at three temperatures (20°C, 40°C and 60°C) using specified volume diffusion (SVD) test apparatus.

The salt solutions were used as source solutions and deionized water was used as receptor solution. The experimental data was fitted with the theoretically simulated model using COMSOL Multiphysics software. The results showed that the relative concentration of anion (Cl^-) decrease in the source reservoir and an equal amount increased in the receptor reservoir with time for all the four source solutions at all the three temperatures. The cation (Na^+) was offered a strong resistant to diffusion from source to receptor across the bentonite sample due to presence of abundant Na^+ ions at the exchange sites of bentonite sample. The concentrations of all other cations (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) were found to decrease in the source reservoir with time, whereas as only a slight increase in concentration of the cations in the receptor reservoir was observed. Instead, significant increase in the concentration of exchangeable Na^+ ions in both reservoirs (source and receptor) was observed at all the temperatures. The observations suggested that a strong cation exchange process is affecting the diffusion process of these cations. In general, temperature was found to have a direct effect on diffusion coefficient ($D_{s, \text{app}}$) of sodium (Na^+) and chloride (Cl^-) ions.

The barrier performance of locally available clayey soil in Sri Lanka and its bentonite admixtures (with 5% and 10% bentonite) was evaluated by means of their geotechnical (swell index and liquid limit) and hydraulic conductivity characteristics. The swell index and liquid limit tests were carried out using deionized water and salt solutions of NaCl , KCl , CaCl_2 and MgCl_2 at concentrations of 0.01mol/L, 0.1mol/L and 1mol/L. Hydraulic conductivity (k) tests were carried out using water and an aqueous solution of 1mol/L CaCl_2 on unconsolidated samples prepared by either dry or slurry packing and pre-consolidated samples with five different consolidation pressures (p) from 10 to 200 kPa. Hydrating liquid was found to have insignificant effect on swell index and liquid limit of tested samples. Swell index and liquid limit of the samples were found to increase with an increase in bentonite content. Liquid limits for tested admixtures were correlated well to the swell index values. The nature of permeant solutions had little effect on measured k values for both unconsolidated and pre-consolidated samples. The hydraulic conductivities were highly affected by change in consolidation pressure (p). The hydraulic conductivity (k) decreased upto two orders of magnitude as p increased from 10 to 200 kPa. The soil bentonite admixtures with 10% bentonite content at a consolidation pressure of 10 kPa were found to be to fulfill the minimum criteria for hydraulic conductivity of liner materials. The Kozeny-Carman equation, a theoretical permeability model that expresses the k -porosity relationship, was applied to measured data including reported values. Results showed the Kozeny-Carman equation captured well the porosity-dependent k values for tested soils and their admixtures with bentonite under a wide range of void ratios suggesting that the Kozeny-Carman equation is a useful tool to estimate the magnitude of hydraulic conductivity (k) for differently compacted soil and its bentonite admixtures.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、平成28年7月26日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

開発途上国の廃棄物処分場では、家庭ごみ由来の有機性廃棄物の搬入が多いため内部保有水の塩濃度が高くなり、有機性廃棄物の分解・発酵にともない、処分場内部温度が上昇することが知られている。このため、保有水の周辺環境への漏えいを防ぐために設置される処分場遮水材には、通常の低透水性のみならず、耐塩性や耐熱性が強く求められる。一方、途上国の廃棄物処分場では、経済的・技術的な理由から、遮水材としては低コスト・低環境負荷かつ施工性の容易なライナー材の開発・導入が求められている。このような背景のもとに、本学位論文では、現地での導入可能性が高い締固め粘土ライナー（CCL：Compacted Clay Liner）に注目し、粘土ライナーの材料となるベントナイト及びベントナイトと現地土質材料を混合したベントナイト混合土を用いて、膨潤性や塑性、長期透水性、溶質拡散性に塩濃度や温度がどのように影響を及ぼすのかを室内実験を中心に調べている。

第1章では、研究の背景や目的、関連する既往の研究について記述している。既往の研究については、各国の処分場遮水材の構造基準を整理するとともに、特に本研究で主要な内容となるベントナイトの膨潤性、透水性、溶質拡散性に塩濃度や温度が及ぼす影響を調べた研究事例のレビューを行っている。

第2章では、4種類の塩溶液（NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂）を用いて、塩濃度（0~1M）と温度（20, 40, 60°C）がベントナイトの膨潤性、塑性、透水性に及ぼす影響を室内実験によって定量的に調べ、自由膨張指数、液性限界、透水係数、固有透過度といった指標を用いて、その関係性を考察した。その結果、液性限界と自由膨潤指数の間には、塩溶液の種類に関係なく、良好な直線性を有する正の相関が得られること、これらの直線関係の勾配は温度の関数として表現されることを明らかにした。また、固有透過度の塩濃度依存性は温度条件により異なり、20°Cでは塩濃度が高くなるほど（自由膨張が小さくなるほど）固有透過度が大きくなる傾向を有するのに対して、40°Cや60°Cでは塩濃度0.1M以上の濃度では固有透過度がほぼ一定となることを示した。これらの成果は、これまでに十分に検討されていないベントナイトの塑性や透水性の温度依存性解明に重要な知見を与えると同時に、比較的簡易に決定可能な自由膨張指数が、ベントナイトの塑性や透水性の温度依存性の評価に有効であることを示唆している。

第3章では、0.01Mの4種類の塩溶液（NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂）を用いて、異なる温度条件下（20, 40, 60°C）によるベントナイトの溶質拡散係数を定体積拡散試験（Specific volume diffusion test）により求めている。ここで、溶質拡散係数は、数値解析的手法を用いて、拡散方程式を塩化物イオンの濃度変化データにフィットすることにより決定している。その結果、すべての塩溶液において、温度が上昇すると（塩化物イオン）溶質拡散係数が上昇すること、いずれの塩溶液における溶質拡散係数の温度依存性はアレニウス式で上手く表現できること、を明らかにしている。特に、NaClの（塩化物イオン）溶質拡散係数は、他の塩溶液とは異なる傾向を示し、温度依存性が強い（アレニウス式中の活性化エネルギーが大きい）といった興味深い結果を示している。今後は実測データを増やして結果の再現性を高めていくこととしている。

第4章では、地域に適したCCLの開発を目的とし、特にスリランカを対象として、現地土質材料及びベントナイトと現地土質材料を混合したベントナイト混合土の透水性評価を行っている。その結果、現地土質材料（膨潤性粘土質材料）のみでは、圧密応力が100kPa以上に達しないと基準となる低透水性（透水係数 $< 10^{-9}$ m/s）が確保できないことを示した。これに対し、5%のベントナイト混合土では圧密応力が50kPa、10%のベントナイト混合土では圧密応力が10kPaで低透水性が確保できることが示され、CCL材料としてベントナイト混合土が適していることを示した。

さらに、ベントナイト混合土の透水係数-間隙比関係はコゼニー・カルマン式で上手く表現できることが明らかとなり、これら知見は現場での締固め密度及び透水係数のコントロールに有効利用されることが期待される。

第5章では、第1章から第4章までに得られた知見をもとに結論を述べるとともに、ベントナイトの透水性や溶質拡散性を評価する際に重要となる有効物質輸送間隙の定量的評価の重要性を挙げるなど、今後の研究展開の方向性を示している。

以上のように、本研究は、処分場遮水材として、特に、粘土ライナーの材料となるベントナイト及びベントナイト混合土を対象として、膨潤性や塑性、長期透水性、溶質拡散性に塩濃度や温度が及ぼす影響を定量的に評価している。得られた知見は、粘土ライナー材の耐塩性や耐熱性の評価に直接的に貢献するものであり、今後の粘土ライナー材の改良等に効果的に活用されることが大いに期待される。以上より、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位に相応しい内容であると判断した。

なお、本論文の内容は、第2章が国際学術雑誌 International Journal of GEOMATE(2015)、国際プロシーディングス論文 Proceedings of 3rd International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development に掲載済みであり、第4章は国際学術雑誌 Environmental Earth Science に投稿中である。