

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

年代スケールで生じる膠結作用によるベントナイト系材料の  
膨潤特性および透水特性の変化に関する研究

Study on the changes in swelling and permeability properties of  
bentonite materials by the chronological time scale cementation  
effects

申請者

伊藤 大知

Daichi ITO

建設工学専攻 地盤工学研究

2022年2月

本論文は、高レベル放射性廃棄物の地層処分において緩衝材として用いられるベントナイト系材料の膨潤特性や透水特性に関して、超長期的な変質現象である膠結作用に伴う特性変化を論じたものである。ベントナイト系緩衝材は最大数十万年の長期間、バリア性能を維持することが求められるが、高温・高圧・塩類を含む地下水との接触など、複雑な地下環境下に長期的に置かれるため、膠結作用を受けて変質し、要求性能に係る膨潤特性や透水特性などの材料特性が変化する可能性が懸念される。このような長期的変質現象を室内実験のみで再現し、評価することは困難であり、本論文では地質学的概念であるナチュラルアナログ（自然界から類似現象を取り出して評価する研究手法）に着想を得て、膠結作用を受けたベントナイト系緩衝材の類似材料として、自然地盤中で続成変質作用を受けて生成されたベントナイト原鉱石を選定している。具体的には、原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体を用いて、膨潤圧・一次元膨潤変形率などの膨潤特性や透水特性を実験的に調査し、ベントナイト系材料の膨潤特性や低透水性に対する膠結作用の影響を評価している。また、上記の結果をもとに、ベントナイト系緩衝材の長期的変質を考慮した自己修復性（施工後生じる損傷部を膨潤変形により充填すること）の評価方法を提案している。

審査にあたっては、2021年11月3日に審査員予定者3名による予備審査会を実施し、さらに1名の審査員予定者への内容説明を11月11日に行い、専攻内縦覧に付してよい旨の判定を得た。11月4日から14日間の建設工学専攻における縦覧の後、11月18日の専攻会議で博士論文受理申請が承認され、12月16日の創造理工学研究科運営委員会で論文が受理された。その後、2022年1月12日に公聴会を開催した。研究倫理については受理前に申請者が所定の単位を取得していることを確認するとともに、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。

本論文は、全8章から構成され、以下にその概要と審査結果を述べる。

第1章は序論であり、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の概要と、ベントナイト系材料に係る研究の現状について述べられている。中でも、高温・高圧・塩類を含む地下水の流入など、緩衝材を含めたバリア材は複雑な地下環境下において長期的に要求性能を満たすことの照査の重要性や、変質を考慮した材料特性や性能評価の必要性が述べられ、本論文の目的と構成が示された。

第2章では、使用したベントナイト原鉱石の生成環境に関する文献調査結果および基本的な性質について論じられた。本論文で選定された山形県月布産・アメリカ合衆国ワイオミング州 Ten Sleep 産・中華人民共和国吉林省劉房子産の3種類の原鉱石は続成変質作用により生成され、母岩の地質年代はそれぞれ約1000万年、約1億年、約1億5000万年であることが示された。また、鉱物組成の定量分析や、モンモリロナイトに吸着されている交換性陽イオン組成をはじめとした、原鉱石の土質力学および粘土鉱物学的な基本性質を解明している。

第3章では、膨潤特性および自己シール性（隙間充填後の発生圧力）における膠結作用の影響が実験的に評価された。その結果、膨潤圧・膨潤変形特性のいずれにおいても、不攪乱供試体の値は再構成供試体よりも低く、その低下度合いは地質年代の古さに応じて大きくなり、膠結作用の影響を強く受けることが示された。また、供試体体積の12.5%、25%の隙間を設けた自己シール性実験では、いずれの原鉱石の不攪乱供試体においても充填後の発生圧力が増加しており、膠結作用を受けた場合でも良好な充填性が期待されることを明らかにしている。

第4章では、膨潤圧発生とモンモリロナイト結晶の水和・膨潤挙動の解明を目的とした、膨潤圧実験前後にXRD測定を行うXRD・膨潤圧連携試験が実施された。その結果、本試験により膨潤圧測定前後の含水比変化とモンモリロナイト底面間隔の推移をリンクして捉え、モンモリロナイト結晶層間の水和状態の変化に伴う膨潤圧の増加を確認している。供試体を支配的に構成するモンモリロナイト結晶底面間隔と含水比の関係において、不攪乱供試体と再構成供試体の間に大きな差異は見られなかったため、底面間隔が変わるほどの水和状態の差は生じていないものの、膨潤圧に大幅な差異が生じることが示された。また、月布産原鉱石において同一含水比の不攪乱供試体と再構成供試体のXRDピーク形状を比較したところ、不攪乱供試体の方がモンモリロナイト結晶層間中に存在している水分子数が少ない可能性が示され、膠結作用によりモンモリロナイト結晶層間の膨潤が低下し、結果として供試体レベルで測定される膨潤圧が低下したと推察している。

第5章では、膠結作用のメカニズム解明のため、ベントナイト原鉱石の岩片・薄片試料のSEM観察を実施している。その結果、岩片のSEM観察により、粒子のすりつぶしを経ている再構成供試体に比べて、不攪乱供試体の方が膠結作用により土粒子や鉱物形状が複雑であるとともにマクロな空隙を有することが示された。また、月布産原鉱石の薄片に対してSEM・EDS分析を行ったところ、土粒子間の膠着物質として有力なのは石英等のシリカ系鉱物であり、粗粒鉱物間の膠着においてはモンモリロナイトも寄与していると推察している。

第6章では、ベントナイトの透水特性における膠結作用の影響を明らかにするため、変水位透水試験による透水係数の測定を実施している。ここでは、ベントナイトの低透水性による試験期間の長期化といった課題の解決のため、新たに供試体厚さ2 mmの変水位透水試験装置を開発している。日本国内で標準的に使用されるベントナイト試料を用いた予備的検討の結果、厚さ10 mmの供試体に比べて試験期間をおよそ1/10程度に短縮できるとともに、流速と動水勾配の関係から供試体中の巨視的な水分移動はダルシー則を満たしていることを確認している。また、乾燥密度と透水係数の関係について既往研究と比較したところ、同様の傾向を示すとともに、特に圧密試験結果と比較して値のバラつきが小さいことを明らかにした。以上から、厚さ2 mm供試体を用いた変水位透水試験装置の適用性

が確認された。本試験装置を用いて、3種類の原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体の透水係数を測定したところ、透水係数にオーダーが変わるほどの差異が見られず、地質年代に応じた差異の増大も見られなかった。この理由として、膠結作用によりモンモリロナイト結晶の膨潤が阻害される一方、間隙構造の複雑化により結果として透水特性が大きく変化しないことによると推察している。

第7章では、本研究成果の適用として、ベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法を提案している。本評価手法は、第3章で得られた膨潤特性・自己シール性実験結果に基づく試験終了時乾燥密度－拘束圧関係が、不攪乱供試体・再構成供試体のいずれにおいても拘束状態に依らず一意な関係にあることに基づいており、緩衝材の経時的な状態変化シナリオと紐づけることで、拘束圧（膨潤に伴う発生圧力）を予測できる可能性を提示したものと評価できる。

第8章では、本研究で得られた成果をとりまとめている。

以上を要約すると、本論文はベントナイト系材料の膨潤特性・透水特性における、年代スケールで生じる膠結作用の影響に伴う特性変化を定量的に示したものである。膨潤特性については初期状態に比べて1/2程度に低下する可能性が示されたが、自己シール性に関しては体積に対して25%程度の隙間や損傷が生じた場合でも、良好な充填性を期待できることを立証している。また、透水特性については、膠結作用を受けた場合でも初期状態と同程度の性能を期待できることを指摘している。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト系緩衝材の状態変化シナリオと、拘束圧－乾燥密度関係を組み合わせることで、膠結作用の影響を考慮した自己修復性評価手法を提案している。これらの成果は、地盤工学のみならず、土木工学全般における材料劣化を考慮した設計・性能評価方法の高度化に対して多大なる貢献が期待できる。

よって、本論文は高レベル放射性廃棄物地層処分に係る地盤工学技術に寄与する研究成果と判断され、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2022年1月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）	早稲田大学	小峯秀雄
	早稲田大学教授	工学博士	早稲田大学	赤木寛一
	早稲田大学教授	博士（工学）	早稲田大学	岩波基
	早稲田大学教授	工学博士	早稲田大学	山崎淳司