



# ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価

高山, 裕介

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2014-03-25

(Date of Publication)

2015-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6083号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006083>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 論文内容の要旨

氏 名                     高山 裕介                    

専 攻                     工学研究科市民工学専攻                    

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価

指導教員                     飯塚 敦                    

(注) 2, 000字～4, 000字でまとめること。

本論文では、放射性廃棄物地層処分施設において緩衝材としての利用が検討されているベントナイトの力学挙動のモデル化、及び、放射性廃棄物地層処分施設への応用についての研究を行った。

ベントナイトとはモンモリロナイトを主成分とした粘土鉱物であり、その特徴として難透水性や著しい吸水膨潤特性が挙げられる。その難透水性や膨潤性能から、放射能に汚染された地下水の水みちを自己シールし、生活圏へ漏れ出すことを十分に延期することや、オーバーバックの支持性能や岩盤のクリープ変位などに起因しオーバーバックに発生する応力の応力緩和性能が長期に発揮されることが期待されている。施設建設操作から再冠水、その後の超長期に至るまで、処分施設を取り巻く環境は時々刻々と変化し、多様な物理的、化学的自然現象や人為的事象が関与する。処分施設におけるベントナイト緩衝材の長期性能評価のためには、建設・操作段階から再冠水、その後の超長期に至るベントナイト緩衝材の性能を連続的に評価する必要がある。本論文は第 1 章から第 9 章までであり、それぞれ以下のようになっている。

第 1 章では、研究の背景について述べ、放射性廃棄物処分施設緩衝材の長期性能評価のために考慮しなければならない事象について時系列的に整理している。

第 2 章では、ベントナイト材料の力学特性について、これまでに行われてきた実験的研究を基に考察した。その結果、飽和ベントナイトは、圧密に対しては弾性的であり、せん断に伴うダイレイタンス特性を有しない材料であって、ただし、せん断が進むと限界状態に至る材料であると考えた。すなわち、ベントナイトは飽和化するに従って、粒状性を喪失する弾塑性材料と捉えた。

第 3 章では、「ベントナイトは飽和化するに従って、粒状性を喪失する弾塑性材料」という解釈に基づき、既存の非膨張性土質材料に用いられる不飽和土の弾塑性構成モデルを拡張する形でベントナイト材料の力学挙動のモデル化を試みた。構築した構成モデルは、負のダイレイタンスの表現式に飽和度の関数を用い、粒状性消失過程を表現し、既存の不飽和土構成モデルに新たに 1 つパラメータを追加している。さらに、膨潤量試験、膨潤圧試験の要素シミュレーションを行いベントナイトの飽和化過程に起こる力学膨潤挙動の表現能力を検証した。その結果、コラプス挙動や膨潤挙動が表現できることを確認した。

第 4 章では、提案したモデルを土/水/空気連成有限要素解析(DACSAR-MP)に導入した。また本章では、本研究で用いる飽和透水モデル、不飽和透水モデル、不飽和透気モデルを示した。

第 5 章では、構築したモデルのキャリブレーションを目的に各種室内試験を境界値問題としてシミュレーションを行った。その結果、浸透挙動や締めめ挙動や膨潤挙動を精度よく再現できていることを確認した。

第 6 章では、TRU 処分施設の再冠水現象をシミュレートし、再冠水時期における緩衝材

(氏名： 高山裕介 NO. 2 )

が示す力学挙動を解析的に示した。再冠水により地下水が施設内に侵入すると、それに伴いベントナイト緩衝材が膨潤挙動や圧縮挙動を示すが、施設内部に空気が封入されることにより、ベントナイト緩衝材は完全には飽和化しないことが示唆された。

第7章では、再冠水後の超長期における、ベントナイト緩衝材の化学的な変質作用が力学特性に与える影響に着目し、化学変質現象を考慮した構成モデルの構築を行った。モデル化においては、固相自体の体積変化を考慮し、さらにモンモリロナイト含有率を変数として用いるモデル化を行った。さらにその後、モンモリロナイトのアナルサイム化とクリノプロチロライト化を例にとり、体積固定条件下での応力変化を調べる要素シミュレーションを行った。そして変質による応力変化を検討し、どのような物質に変質するかによって、応力変化は大きく異なることを示した。

第8章では、化学的な作用による固相と液相の相変化を記述できる数理モデルの構築を行い、有限要素法に適用した。そして処分施設における緩衝材が長期的な化学変質作用を受けることによりどのような挙動を示すのか解析的に示した。

第9章は結論である。

以上本研究では、放射性廃棄物処分施設における緩衝材の施設建設・操作から再冠水、その後の超長期に至るまでの力学挙動のモデル化を行い、処分施設の長期性能評価の技術的信頼性の向上及び技術基盤の確立を行った。しかしながら、処分施設が想定しているような超長期にわたる力学挙動をシミュレーションしても、そのシミュレーションを検証できる計測値の蓄積は望めない。そのため、可能性のある複数のシナリオを提示し、実際が望ましくないシナリオに沿った場合には、望ましいシナリオに変更できるような外的作用の具体的方策をあらかじめ用意しておくロバスト性が求められる。今後は、構築したモデルの更なる高度化を目指すとともに、このようなロバスト性を担保したシステム設計を目指す。

## \* 作成上の注意

1. A4版とし、横書きすること。
2. 右上に氏名及びページ数を記入すること。
3. “要旨”及びその草稿を作成する時には、以上の注意事項を記載する必要はない。

氏名	高山 裕介		
論文題目	ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	飯塚 敦
	副査	教授	大石 哲
	副査	教授	澁谷 啓
	副査	准教授	河井 克之

## 要 旨

ベントナイトとは、モンモリロナイトを主成分とした粘土鉱物であり、その特徴として難透水性や著しい吸水膨潤特性が挙げられる。その性能から、放射能に汚染された地下水の水みちを自己シールし、生態系生存圏への放射性物質の漏出を防ぎ、核廃棄物が格納されているオーバーパックの安定を長期にわたって確保することが期待されている。施設建設・操作から再冠水、その後の超長期に至るまで、処分施設を取り巻く環境は刻々と変化し、多様な物理的、化学的自然現象や人為的事象が関与する。処分施設におけるベントナイトの緩衝材としての長期性能評価のためには、建設・操作段階から再冠水、その後の超長期に至るベントナイト緩衝材の力学的性能を連続的に評価する必要がある。本論文は、以下のような構成で、このような課題に取り組み、成果を得ている。

第1章は、序論であり、研究の背景について述べている。放射性廃棄物処分施設緩衝材の長期性能評価のために検討しなければならない事柄について整理している。第2章では、ベントナイト材料の力学特性について論じている。過去の実験的研究を基に、モンモリロナイトを主成分とするベントナイト材料の飽和/不飽和状態の力学特性を考察している。その結果、飽和ベントナイトは、圧密に対しては弾性的であり、せん断に伴うダイレイタンシー特性を有しない材料であって、ただし、せん断が進むと限界状態に至る材料であるとしている。すなわち、ベントナイトは飽和化するに従って、粒状性を喪失する弾塑性材料と捉えることができるとしている。第3章では、第2章での考察に基づき、既存の非膨張性土質材料に用いられる不飽和土の弾塑性構成モデルを拡張する形で、ベントナイト材料の力学挙動のモデル化を示している。構築した構成モデルは、既存の不飽和土構成モデルに新たに1つのパラメータを追加することで、飽和に伴う粒状性消失過程を表現できるものとなっている。ベントナイト材料に対する膨潤量試験、膨潤圧試験の要素シミュレーションを行いベントナイトの飽和化過程に起こる力学膨潤挙動の表現能力を検証している。第4章では、提案した構成モデルを土/水/空気連成有限要素解析(DACSAR-MP)に組み込むことにより、飽和/不飽和、不均質場への適用を可能とする初期値・境界値問題への拡張をはかっている。第5章では、構築したモデルのキャリブレーションを目的に種々の室内試験を初期値・境界値問題としてシミュレーションしている。浸透挙動や締め固め挙動、膨潤挙動を精度よく再現できていることを確認している。第6章では、TRU 処分施設の再冠水現象を取り上げ、再冠水時期における緩衝材が示す力学挙動を論じている。例えば、再冠水により地下水が施設内に侵入すると、それに伴いベントナイト緩衝材が膨潤や圧縮挙動を示すが、施設内部に空気が封入されることにより、ベントナイト緩衝材が完全に飽和化されるには相当の長期を要することが示されている。第7章では、再冠水後の超長期における、ベントナイト緩衝材の化学的な変質作用が力学特性に与える影響について論じ、ベントナイトの化学変質現象を考慮した構成モデルの提案を行っている。固相自体の体積変化を考慮し、さらにモンモリロナイト含有率を変数とした構成モデルを提案している。さらに、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトのアナルサイム化とクリノプロチロライト化を例にとり、体積固定条件下での応力変化を調べる要素シミュレーションを行っている。化学変質に伴う応力変化の予測を可能とし、ベントナイト緩衝材の超長期力学性能評価への道を切り開いている。第8章では、化学的な作用による固相と液相の相変化を記述できる数理モデルの構築を行い、有限要素法を適用している。そして処分施設における緩衝材が長期的な化学変質作用を受けることによりどのような力学的挙動を示すかを例示している。最後に、第9章は結論であって、以上の成果をまとめている。

以上、本研究は、ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価について、その力学モデルの提案と初期値・境界値問題への適用を行ったものであり、核廃棄物地層処分の力学性能評価・予測について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の高山裕介は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。