



# 膨潤性地盤材料の構成則開発とベントナイト緩衝材の品質評価への適用

伊藤, 真司

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2020-09-25

(Date of Publication)

2021-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7876号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007876>

※ 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 \_\_\_\_\_ 伊藤 真司 \_\_\_\_\_

専 攻 \_\_\_\_\_ 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。)

### 膨潤性地盤材料の構成則開発とベントナイト緩衝材の品質 評価への適用

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

指導教員 \_\_\_\_\_ 飯塚 敦 \_\_\_\_\_

(注) 2, 000字～4, 000字でまとめること。

放射性廃棄物の地層処分場において、人工バリアの構成要素である緩衝材に、高密度に締め固められたベントナイトの利用が検討されている。ベントナイトは、主成分のモンモリロナイトが水の浸潤に伴って膨潤性を発揮するため、土骨格が形成する空隙を満たすことによる難透水性や、周辺岩盤との間に生じた施工上の隙間を充填する自己シール性を発揮し、放射性核種の移行抑制が期待されている。そして、緩衝材が要求性能を満足しているかを判断する指標として、乾燥密度を取り上げた品質管理方法が検討されている<sup>1)</sup>。

一方で、緩衝材を施工する上で生じる、緩衝材と他のバリア材料との間に存在する隙間や緩衝材内の不均一な乾燥密度分布は、廃棄物の定置後、地下水の浸潤に伴う緩衝材の飽和化過程(再冠水過程)を通して、隙間は充填され、乾燥密度の不均一は解消され、乾燥密度は均質化すると想定されてきた。そのため、緩衝材全体の平均的な乾燥密度が目標とする品質を満たしていれば、再冠水後には要求品質を満足すると考えられてきた。また、再冠水後から超長期にわたる緩衝材の性能評価において、初期条件、すなわち再冠水後における緩衝材の乾燥密度分布は均一であると仮定されている場合がある。しかし、既往の報告<sup>2)</sup>では、意図的に設けた隙間を供試体が充填する過程で、平衡状態に至った状態でも供試体内の乾燥密度分布に不均一が残留していることを示している。また、密度分布の均質化に関する実験的検証においても、密度分布を有する供試体が均質化する傾向は見られるものの、不均一性は完全に解消されないことが示されている<sup>3)</sup>。したがって、施工時における緩衝材の品質が、再冠水過程を通して、どのように変化していくのかを評価し、そして、緩衝材の長期性能評価に向けて、より現実的な緩衝材の状態を提示する必要がある。

本論文では、再冠水過程における緩衝材の品質評価を念頭に置き、膨潤性地盤材料の飽和・不飽和状態における力学挙動を連続的に表現する弾塑性構成モデルの構築、さらに、開発した構成モデルを導入した有限要素解析による緩衝材の力学性状変化について評価を行った。以下に、各章の構成および得られた結果について纏める。

第1章「序論」では、本研究の背景および目的について記した。

第2章「塑性膨潤の概念を導入した弾塑性構成モデル」では、飽和状態にある膨潤性地盤材料の圧密特性に着目して、膨潤性地盤材料が示す力学的応答を巨視的かつ現象論的に表現する構成モデルの構築を行った。提案モデルのパフォーマンス検証において、除荷時の顕著な膨潤挙動や、除荷経路と再載荷経路の非可逆性といった膨潤性地盤材料の特徴的な圧密特性を表現し、またせん断特性についても概ね再現できていることを確認した。

第3章「膨潤性地盤材料を対象とした不飽和弾塑性構成モデル」では、飽和状態だけではなく不飽和状態にある膨潤性地盤材料が示す力学的応答を表現するために、既存の不飽和弾塑性構成モデルのフレームワークを援用し、第2章で提案する構成モデルの拡張を行った。また、膨潤圧試験により取得された材料特性データを構成モデルパラメータに反映

(氏名： 伊藤 真司 NO. 2 )

する手法を提案した。提案する構成モデルを用いた要素シミュレーションの結果、飽和化に伴う膨潤圧の発現だけでなく、応力状態の違いにおける吸水変形特性も表現できることを確認した。

第4章「飽和ベントナイト供試体の膨潤・隙間充填シミュレーション」では、室内試験における供試体寸法レベルのベントナイト緩衝材を対象として、緩衝材と周辺岩盤との間に隙間が存在するような状況を想定し、緩衝材の膨潤による隙間の充填、そして、充填後の平衡状態に至るまでの変状を解析的に評価した。それに加え、第2章で提案する構成モデル上で表現される応答を考察することにより、乾燥密度や膨潤圧の分布性状が変化するメカニズムを説明した。

第5章「壁面摩擦の影響を考慮した膨潤圧試験シミュレーション」では、膨潤圧試験を境界値問題として取り扱い、供試体と試験装置壁面との摩擦の影響を考慮した有限要素解析を実施し、試験結果に及ぼす摩擦の影響を定量的に評価した。さらに、試験結果へ及ぼす壁面摩擦の影響度やそのメカニズムを、供試体内部の変形および浸潤挙動とリンクさせながら検討した。

第6章「結論」では、第2章から第4章までの各章で得られた結果について総括を行った。

本論文で構築した数値解析手法は、再冠水過程を通して緩衝材の施工時品質がどのように変化していくのかを評価し、長期性能評価に資する初期条件を提示する技術として役立つと考えられる。また、長期性能評価によって再冠水時に満足されるべき品質が求められ、その品質を満足する施工時品質の設定に対しても、本解析手法の活用が期待できる。ただし、本研究で実施したシミュレーションでは、供試体寸法レベルのスケールを対象とし、また、隙間幅や浸潤プロセスといった解析条件を単純化している。そのため、今後は実スケールのシミュレーションやバリエーションを持たせた解析条件を課すことにより、再冠水過程で起こりうる緩衝材の品質変化についてさらなる検討を加えたい。

#### 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ、分冊2 地層処分の工学技術、JNC TN1400 99-022, 1999.
- 2) Dueck, A., Goudarzi, R. and Börgesson, L.: Buffer homogenisation, status report 3, SKB TR-16-04, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2016.
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成25年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第2分冊）—人工バリア品質/健全性評価技術の構築—, 平成26年3月.

氏名	伊藤 真司		
論文題目	膨潤性地盤材料の構成則開発とベントナイト緩衝材の品質評価への適用		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	飯塚 敦
	副査	教授	遊谷 啓
	副査	講師	橋 伸也
	副査	准教授	竹山 智英

#### 要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分場において、人工バリアの構成要素である緩衝材に、高密度に締固められたベントナイトの利用が検討されている。ベントナイトは、主成分のモンモリロナイトが水の浸潤に伴って膨潤性を発揮するため、土骨格が形成する間隙を満たすことによる難透水性や、周辺岩盤との間に生じた施工上の隙間を充填する自己シール性を発揮し、放射性核種の移行抑制が期待されている。そして、緩衝材が要求性能を満足しているかを判断する指標として、乾燥密度を取り上げた品質管理方法が検討されている。一方で、緩衝材を施工する上で生じる、緩衝材と他のバリア材料との間に存在する隙間や緩衝材内の不均一な乾燥密度分布は、廃棄物の定置後、地下水の浸潤に伴う緩衝材の飽和化過程（再冠水過程）を通して、隙間は充填され、乾燥密度の不均一は解消され、乾燥密度は均質化すると想定されてきた。そのため、緩衝材全体の平均的な乾燥密度が目標とする品質を満たしていれば、再冠水後には要求品質を満足すると考えられてきた。また、再冠水後から超長期にわたる緩衝材の性能評価において、初期条件、すなわち再冠水後における緩衝材の乾燥密度分布は均一であると仮定されている場合がある。しかし、近年の実験結果によれば、意図的に設けた隙間を供試体が充填する過程で、平衡状態に至った状態でも供試体内の乾燥密度分布に不均一が残留していることを示している。また、密度分布の均質化に関する実験的検討においても、密度分布を有する供試体が均質化する傾向は見られるものの、不均一性は完全に解消されないことが示されている。したがって、施工時における緩衝材の品質が、再冠水過程を通して、どのように変化していくのかを評価し、そして、緩衝材の長期性能評価に向けて、より現実的な緩衝材の状態を提示する必要がある。本研究は、再冠水過程における緩衝材の品質評価を念頭に置き、膨潤性地盤材料の飽和・不飽和状態における力学挙動を連続的に表現する弾塑性構成モデルの構築し、さらに、有限要素解析による緩衝材の力学性状変化について評価を行っている。

本論文は、6章からなる。第1章は、序論であって、本研究の背景および目的について述べている。第2章では、飽和状態にある膨潤性地盤材料の圧密特性に着目して、膨潤性地盤材料が示す力学的応答を巨視的かつ現象論的に表現する構成モデルの構築を行っている。ベントナイト材料が示す除荷時の顕著な膨潤挙動や、除荷経路と再載荷経路の非可逆性といった特徴的な圧縮特性を表現し、かつせん断特性も説明できることが示されている。第3章では、飽和状態だけではなく不飽和状態にある膨潤性地盤材料が示す力学的応答を表現するために、既存の不飽和弾塑性構成モデルの硬化・軟化則を適用し、第2章で提案した構成モデルを不飽和状態に拡張している。また、膨潤圧試験により取得された材料特性データから、構成モデルのパラメータを決定する手法の提案も行っている。要素シミュレーションを行ったところ、飽和化に伴う膨潤圧の発現だけでなく、応力状態の違いにおける吸水変形特性の違いも表現できることを示している。第4章では、室内試験における供試体寸法レベルのベントナイト緩衝材を対象として、緩衝材と周辺岩盤との間に隙間が存在するような状況を想定し、緩衝材の膨潤による隙間の充填、そして、充填後の平衡状態に至るまでの変状を、有限要素法解析によって評価している。さらに、締固めベントナイト材料の乾燥密度や膨潤圧の分布性状が変化するメカニズムの解明を試みている。第5章では、ベントナイト材料に対する膨潤圧試験を境界値問題として取り扱い、供試体と試験装置壁面との摩擦の影響を考慮した有限要素解析を実施し、試験結果に及ぼす摩擦の影響を定量的に評価している。また、試験結果へ及ぼす壁面摩擦の影響を定量的に検討し、そのメカニズムを議論している。第6章は、結論であって、第2章から第4章までの各章で得られた結果を総括している。

以上より、本研究は、荷重の載荷・除荷や再冠水過程を通してベントナイト緩衝材の力学的挙動を定量的に評価できる統一的な数理モデルと解析手法を提案するものであり、既往の実験・観測事実を良く説明できるものとなっている。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緩衝材の力学的品質評価に関し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すものであり、学位申請者の伊藤真司は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。