

膨潤圧を指標としたベントナイト系緩衝材の飽和・密度状態のモニタリングフレームワークの構築

早稲田大学 ○王海龍\*

早稲田大学 小峯秀雄\*\*

地層処分	緩衝材	ベントナイト
膨潤圧	水分拡散係数	間隙水密度

研究の目的

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの構成材料であるベントナイト系緩衝材に着目し、緩衝材の吸水時に発生する膨潤圧を指標として緩衝材の乾燥密度や飽和度をモニタリングするフレームワークを構築することを目的とする。

研究の内容

本研究で使用した試料は、高レベル放射性廃棄物の地層処分で使用すると検討されているクニゲル V1 である。本研究では目的が異なる実験シリーズを 5 通り実施した。シリーズ 1：吸水時の膨潤圧の経時変化に及ぼす供試体厚さの影響を確認するために、供試体の厚さを 2~10 mm 変化させ幅広い乾燥密度条件下で膨潤圧を計測した。

シリーズ 2：膨潤圧に及ぼすベントナイトの初期含水比の影響を調べるために、0~33%の初期含水比と 1.1~1.9 Mg/m<sup>3</sup> 供試体乾燥密度の組み合わせで膨潤圧を計測した。シリーズ 3~4：緩衝材における水の移動（水の緩衝材への浸入）挙動を示す水分拡散係数に及ぼす密度と初期含水比の影響を検討した。

シリーズ 5：緩衝材に浸入した水（間隙水）の密度が水密度の一般値（1.0Mg/m<sup>3</sup>）より大幅大きいことを確認するため、間隙水密度実験を実施した。

実験シリーズ 1 で得られる膨潤圧の代表例として、平衡膨潤圧と乾燥密度の関係を図 1 に示した。膨潤圧は乾燥密度の増加に連れて上昇し、同じ乾燥密度における膨潤圧の値が供試体の厚さによらず一致した結果が得られており、膨潤圧の値に及ぼす供試体厚さの影響が非常に小さい。しかし、供試体が厚いほど水が供水側から排水側に移動するための時間が長くなるため、膨潤圧の経時変化は長くなる。そこで本研究では、ベントナイト供試体における水の移動を水分拡散挙動理論で解釈し、吸水時間  $t$  を吸水時間係数  $\lambda$  (=供試体厚さ/ $\sqrt{t}$ ) で正規化し、代表例として図 2 に示すように同様な乾燥密度における正規化後の膨潤圧経時変化曲線は、供試体の厚さによらず同様な経時挙動があると分かった。

実験シリーズ 2 で得られる初期含水比の異なる平衡膨潤圧と供試体乾燥密度の関係を図 3 に示した。供試体の乾燥密度が 1.1~1.7Mg/m<sup>3</sup> の範囲において、平衡膨潤圧と乾燥密度の関係は、初期含水比状態によらず、一本の曲線で近似できるのがわかる。しかし、乾燥密度が 1.7 Mg/m<sup>3</sup>

以上になった初期含水比 18% のケースにおいては、平衡膨潤圧は低含水比ケース（0% と 7%）のデータと比べて明らかに小さいと確認された。

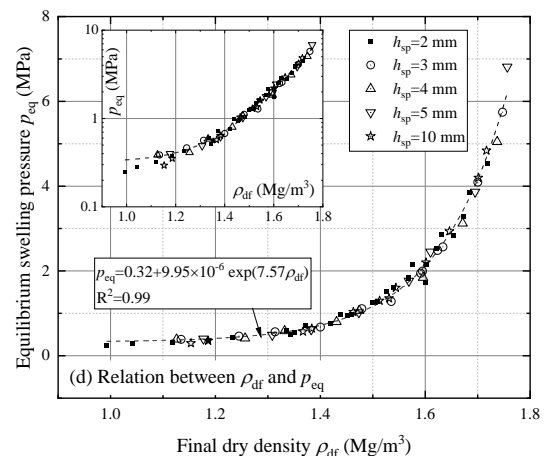


図 1 厚さの異なる供試体の乾燥密度と膨潤圧の関係図

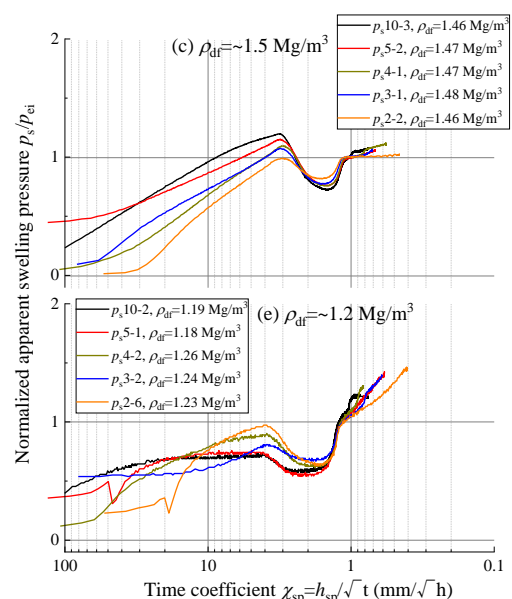


図 2 厚さの異なる供試体の正規化膨潤圧の経時変化

実験シリーズ 3 と 4 の実験結果から得られた水分拡散係数と体積含水率の関係をそれぞれ図 4 と図 5 に示す。これらの結果は不飽和土の水分拡散理論に基づき、一定の吸水時間における含水比の分布より算出したものである。図 4 によると水分拡散係数はまず初期体積含水率の付近

で急上昇しその後緩やかに減少する。乾燥密度によって水分拡散係数が多少変化するが全体として変化が限定である。図 5 によるとベントナイトの水分拡散係数に及ぼす初期含水比の影響も限定である。

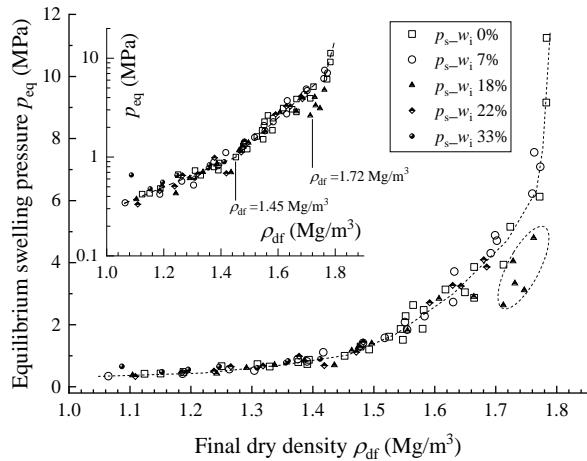


図 3 初期含水比の変化による膨潤圧と乾燥密度の関係

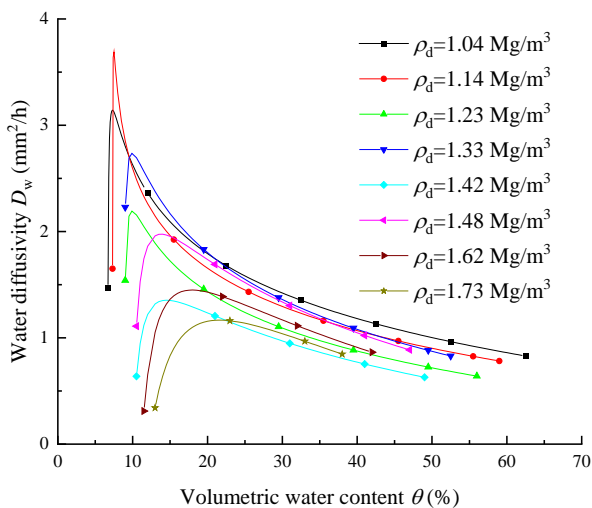


図 4 水分拡散係数に及ぼす乾燥密度の影響

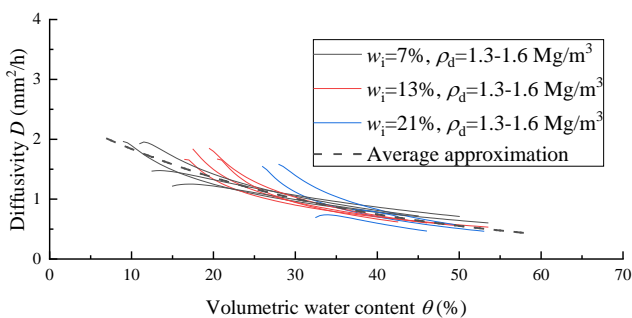


図 5 水分拡散係数に及ぼす初期含水比影響

実験シリーズ 5 で得られたベントナイトの間隙水密度を過去のデータとも図 6 に示す。ベントナイトの間隙水密度は乾燥密度の増加に伴い上昇し、乾燥密度 0.2Mg/m<sup>3</sup>

付近での 1.0 Mg/m<sup>3</sup>程度から乾燥密度 1.8Mg/m<sup>3</sup> 付近での 1.23 Mg/m<sup>3</sup>程度に上昇した。

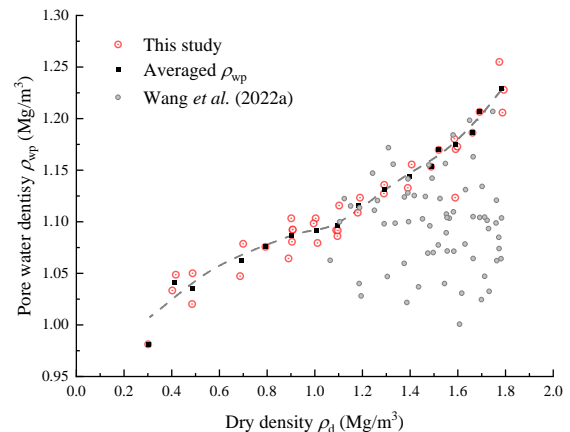


図 6 ベントナイトの間隙水密度と供試体密度の関係

### 研究の成果、新知見

本研究では、独自の実験技術および体系的な実験・数値解析研究により以下の新知見が得られた。

- 1) 膨潤圧の値に及ぼす供試体厚さの影響が非常に小さく、供試体の厚さによる膨潤圧の経時的な変化は、新しく提案した時間係数で正規化できる。
- 2) ベントナイトの平衡膨潤圧に及ぼす初期含水比の影響が限定である。
- 3) ベントナイトの水分拡散係数に及ぼす乾燥密度と初期含水比の影響は限定である。
- 4) ベントナイト間隙水の密度が 1.0 Mg/m<sup>3</sup>以上であることを明らかにした。

これらの新知見に基づき、緩衝材の膨潤圧のモニタリング結果および緩衝材における水分移動の数値解析を用いて、緩衝材の膨潤圧を指標として緩衝材の乾燥密度や飽和度をモニタリングするフレームワークをおおむね構築した。

### 今後の予定

今後の研究では、以下の研究方向を計画している

- 1) 地下処分環境の水圧（数 MPa）の条件下で発生する緩衝材への水分移動の解明
- 2) 緩衝材の膨潤変形に伴う水分・土粒子移動の解明
- 3) 緩衝材に設置する膨潤圧・含水比・湿度の多機能モニタリングセンサーの開発

### 謝辞

本研究の成果は大成学術財団、早稲田大学、JSPS 科研費の助成を受けており、ここに感謝いたします。

\*早稲田大学 国際理工学センター

\*\*稲田大学社会環境工学科

\* Global Center for Science and Engineering, Waseda University

\*\* Department of Civil and Environmental Engineering Waseda University