

高レベル放射性廃棄物処分におけるベントナイト系緩衝材の飽和度予測の試み

早稲田大学 学生会員 ○曹基安, 阮坤林, 正会員 王海龍
早稲田大学 正会員 小峯秀雄, 伊藤大知, フェロー会員 後藤茂
戸田建設 正会員 関口高志

1. 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、膨潤性や低透水性などを有するベントナイトは人工バリアである緩衝材の主要材料として利用することが有力視されている。ベントナイト系緩衝材は地下岩盤に設置した後、地下水との接触により吸水し膨潤する。本研究では、緩衝材設計に資することを目的とし、緩衝材の初期条件から飽和度の推移を予測する方法について考察した。著者らは、水分拡散実験を通じて緩衝材の初期含水比や初期乾燥密度から飽和度の経時変化を予測し、その予測値と吸水量測定実験によって得られた実測値とを比較することにより、予測方法の有効性の確認を試みた。

2. 使用した試料・供試体の作製方法・実験装置の概要

試料は Na 型ベントナイトのクニゲル V1 (以降, KV1) を使用した。表 1 に KV1 の基本的性質を示す。モンモリロナイト含有率はメチレンブルー (MB) 吸着量試験 (JIS Z2451:2019) により測定した MB 吸着量を用い算出した。供試体は静的締固め装置を用いて、内径 28 mm, 外径 38 mm, 高さ 20 mm のモールド内に作製した。また本研究では図 1 のように¹⁾, 締固めた供試

体をステンレス製の板で挟み、供試体の変形を抑えるため 4 本のボルトで固定し給水した。給水開始後、板内側の溝を通りメンブレンフィルター (厚さ 0.14 mm, 孔径 0.45 μm) を介して均等に蒸留水が浸み込む。供試体は、表 2 に示すように異なる目標乾燥密度 ρ_{di} と初期含水比 w_i で作製した。

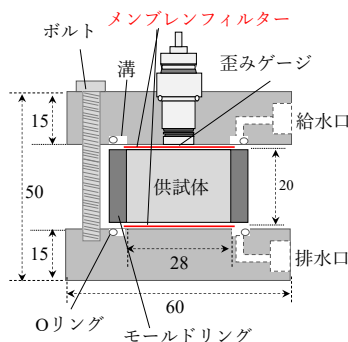


図 1 実験装置の概要 (単位: mm)

3. 水分拡散実験の方法と水分拡散係数の算出

水分拡散実験では図 1 の実験装置を用い約 4~20 時間の範囲で給水を行った。給水後、取り出した供試体を 1 mm ごとに押し出し分割した後、図 2 に示すように各部位での飽和度を測定した²⁾。ここで得られた給水時間 t , 給水面からの距離 z , 飽和度から換算した体積含水率 θ の関係を用い、図 3 に示すように水分拡散係数 $D(\theta)$ を算出した¹⁾²⁾。

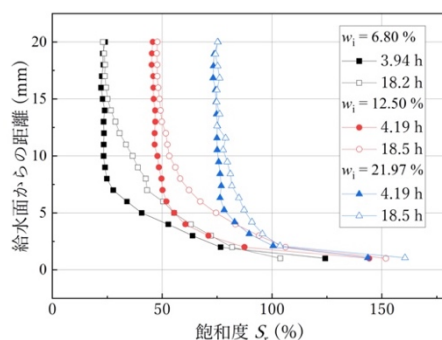


図 2 給水面からの距離と飽和度

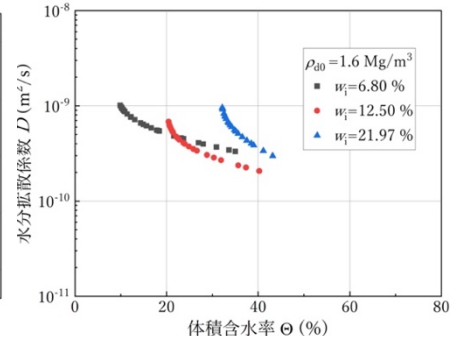


図 3 水分拡散係数 $D(\theta)$ の算出

表 1 Na 型ベントナイト KV1 の基本的性質

土粒子密度 (Mg/m^3)	2.78
液性限界 (%)	517.1
塑性限界 (%)	25.4
塑性指数	491.7
モンモリロナイト含有率 (%)	52.9

表 2 作製した供試体の条件 (目標乾燥密度 $\rho_{di} = 1.60 \text{ Mg}/\text{m}^3$)

	w_i (%)	ρ_{di} (Mg/m^3)	t (h)	w_f (%)	ρ_{df} (Mg/m^3)
水分拡散実験	6.80	1.56	3.94	10.18	1.56
		1.55	18.2	11.43	1.59
	12.5	1.59	4.19	15.11	1.59
		1.59	18.5	17.44	1.59
吸水量測定実験	20.97	1.59	4.19	22.01	1.61
		1.59	18.5	23.17	1.59
	6.91	1.56		27.55	1.56
	12.59	1.57	744	26.92	1.57
	21.01	1.58		25.03	1.62

ρ_{di} : 初期乾燥密度, ρ_{df} : 試験後乾燥密度, w_f : 試験後含水比

キーワード 不飽和ベントナイト, 飽和度予測, 初期含水比, 水分拡散実験, 吸水量測定実験

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 203 号室 早稲田大学 地盤工学研究室 TEL03-5286-2940

4. 吸水量測定実験の方法と水分損失量の補正

吸水量測定実験では図1の実験装置を用い図4に示すように約1ヶ月間給水し、ビュレットの減少量を目視で測定することで飽和度を算出した。また、ビュレットからの蒸発と図1の実験装置の溝などに残された残留水による水分損失を考慮するため、式(1)のように水分損失量 $m_{w_{loss}}$ を算出し、飽和度を補正した。

$$m_{w_{loss}} = m_{w_{read}} - (m_{w_{measure}} - m_{w_{initial}}) = m_{w_{read}} - (m_{sf}w_f - m_{si}w_i) \dots \text{式(1)}$$

ここで、 $m_{w_{read}}$ ：ビュレット内の蒸留水減少量、 $m_{w_{measure}}$ ：供試体内の試験後水分量、 $m_{w_{initial}}$ ：供試体内の試験前水分量、 m_{sf} ：試験後供試体の土粒子総質量、 m_{si} ：供試体作製時の土粒子総質量である。

5. 予測値と実測値の比較

表3には飽和度の予測値と実測値の算出における、実験目的と結果の違いについて明記した。加えて水分拡散係数から算出した予測値と、吸水量測定実験より求めた実測値の比較を図5に示した。予測した飽和度の推移は、吸水開始直後に急激に上昇し、一定時間が過ぎた後、定常状態に至るという点は一致した。しかし、実測値の方が予測値より緩やかに変化したことが確認できた。

そして、給水時間約1ヶ月の時点で予測値は $w_i = 20.97\%$ の場合のみ飽和に達しているが、 $w_i = 6.80\%$, 12.50% の場合は飽和度がそれぞれ 84%, 92% に留まっている。実測値は、全ての供

試体の飽和度が96%を超え、 $w_i = 6.91\%$, 12.59% の場合は予測値を超える結果となった。ここで、予測値と実測値の誤差を表4に示す。表4より、初期含水比が高くなるにつれて、実測値と予測値の誤差が小さくなる傾向が確認できた。これは、初期含水比が約13%や21%の場合に、膨潤性鉱物であるモンモリロナイトが、給水開始時点である程度飽和した状態にあり、給水開始後は主に土粒子骨格間隙の浸潤が支配的であったため、予測値と比較的に近い値が得られたと考えられた。

6. 結論

本論文では、地層処分における緩衝材設計への貢献を目的とし、緩衝材の初期条件から飽和度の経時変化を予測する方法について考察した。その結果、予測した飽和度と実測値を比較すると、初期含水比が低くなるにつれて実測値と予測値の誤差が大きくなったことから、本論文における飽和度の予測方法は比較的高い初期含水比の場合に有効であると考えられた。今後の展開として、水分拡散実験による飽和度予測方法を精査し、吸水実験の水分損失量を考慮した実験方法の改善を試みたい。

謝辞：本研究は早稲田大学・理工学術院総合研究所重点領域・持続的未來社会研究所の活動として行われた。本研究の一部は、大成学術財団の研究助成および戸田建設（株）との共同研究の内容である。ここで感謝する。

参考文献：1) Wang, H., Shirakawabe, T., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., Ichikawa, Y. & Chen, Q : Movement of water in compacted bentonite and its relationship with swelling pressure, *Can. Geotech. J.* 57, No. 6, pp. 921–932, 2020. 2) 曹基安, 王海龍, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林, 後藤茂, 関口高志：締固めたベントナイトの水分拡散特性に及ぼす初期含水比の影響, 第57回地盤工学研究発表会, 2022. (発表予定)

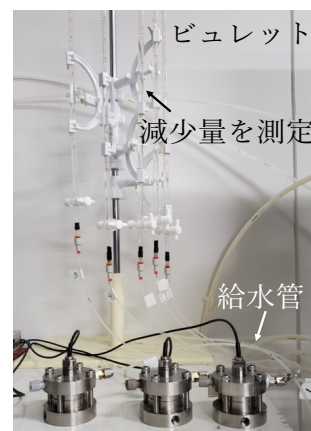


図4 給水実験の外観

表3 実験概要のまとめ

	水分拡散実験	吸水量測定実験
目的	(1) 水分拡散係数 $D(\theta)$ の算出 (2) $D(\theta)$ から飽和度推移を予測	(1) 実際の平均飽和度の計測 (2) 予測された飽和度との比較
実験結果	平均飽和度の経時変化の予測	平均飽和度の実測値
実験時間	4~20 時間	744 時間 (約 1 ヶ月)

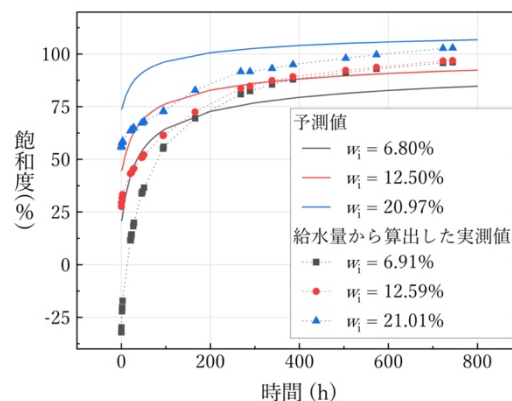


図5 飽和度の予測値と実測値の比較

表4 吸水時間約1ヶ月時点での飽和度の予測値と実測値の誤差

w_i (%)	飽和度	
	予測値-実測値 (%)	
6.80 ~ 6.91	12	
12.50 ~ 12.59	5	
20.97 ~ 21.01	3	