

ベントナイト原鉱石の膨潤特性測定結果に基づく緩衝材への年代変化に関する推察

早稲田大学 学生会員 ○伊藤大知, 正会員 小峯秀雄, フェロー会員 後藤茂, 非会員 王海龍
クニミネ工業 非会員 諸留章二
戸田建設 正会員 関口高志, 北原慎也

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材は数万年といった長期間、自己シール性や低透水性などの性能を発揮することが求められる¹⁾。緩衝材は地下数百 m の地盤深部に置かれるため、緩衝材内部にて膠結作用に伴う固結が生じ、膨潤特性等の物理特性において経年変化が生じる可能性が考えられる。著者らは天然のベントナイト原鉱石を固結した緩衝材のナチュラアナログ²⁾とみなし、その物理特性を調査することで緩衝材の性能維持に関する評価を行っている³⁾。本論文では、地質年代の異なる 4 種類のベントナイト原鉱石を用いて行った膨潤特性（膨潤圧・一次元膨潤変形率）実験の結果から、ベントナイトの膨潤特性における年代変化に関して推察を行った。

2. 使用した試料の概要および供試体の作製方法

本研究では、山形県月布鉱山 29 番層産の Na 型ベントナイト（以下、月布産原鉱石と表記）、中華人民共和国吉林省劉房子産の Na 型ベントナイト（以下、中国産原鉱石）、アメリカ合衆国ワイオミング州 Ten Sleep 産の Na 型ベントナイト（以下、アメリカ産原鉱石）および群馬県富岡産の Ca 型ベントナイト（以下、富岡産原鉱石）の 4 種類の原鉱石を用いた。表 1

表 1 使用した原鉱石の基本的性質

	月布産	富岡産	アメリカ産	中国産
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.77	2.61	2.67	2.73
液性限界 (%)	438.5	83.1	588.2	358.7
塑性限界 (%)	28.0	42.2	57.2	35.6
塑性指数	410.5	40.9	531.0	323.1
モンモリロナイト含有率 (%)	38.6	45.8	50.4	51.1
膨潤力 (ml/2 g)	12	5.5	16	13
陽イオン交換容量 (cmol/kg)	39.3	54.8	38.8	39.4
交換性 Na イオン容量 (cmol/kg)	51.5	2.52	53.8	42.3
交換性 Ca イオン容量 (cmol/kg)	8.5	55.9	17.8	20.1
交換性 K イオン容量 (cmol/kg)	定量下限値以下			
交換性 Mg イオン容量 (cmol/kg)	0.8	定量下限値以下	0.4	3.7
地質年代 ⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾	約 1000 万年	約 1500 万年	約 1 億年	約 1 億 5000 万年

に使用した原鉱石の基本的性質を示す。また、膨潤特性実験では、次に述べる方法により原鉱石の固結を保持した不攪乱供試体と再構成供試体を用意し、実験に供した。不攪乱供試体はカッターリング等のトリミング用器具を用いて、直径 28 mm、高さ 10 mm の円柱形となるように成形し、作製した。再構成供試体は 0.425 mm ふるいを通して粉末状試料に荷重を静的に加えることにより締固め、作製した。

3. 本研究で実施した膨潤特性試験の概要

本研究では、膨潤特性として膨潤圧および一次元膨潤変形率測定実験を実施した（参考文献 3）を参照）。図 1 に膨潤圧測定実験装置および一次元膨潤変形率測定実験装置を示す。膨潤圧は、供試体下部から蒸留水を供給し、吸水膨潤に対して側方および鉛直方向の変形を抑制した状態でロードセルにより測定した。一次元膨潤変形率は、鉛直方向の膨潤変形を抑制せず、鉛直圧 19.6 kPa における膨潤変形量を変位計により測定し、供試体の初期高さで除して算出した。また、不攪乱供試体と再構成供試体の測定結果から、以下の式(1)を用いて各原鉱石における膨潤圧抑制度を算出した。

$$P_R = \frac{(P_{re} - P_{un})}{P_{re}} \times 100 \quad (1)$$

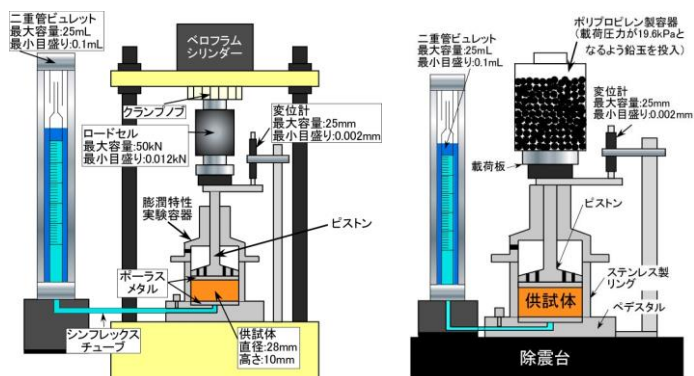


図 1 膨潤圧測定実験装置（左）および一次元膨潤変形率測定実験装置（右）

ここに、 P_R ：膨潤圧抑制度（％）， P_{re} ：再構成供試体の膨潤圧（kPa）， P_{un} ：不攪乱供試体の膨潤圧（kPa）である．なお、 P_R の算出に用いる P_{re} と P_{un} は、乾燥密度が最も近い供試体の組の測定値を用いた．また、一次元膨潤変形率抑制度（ ε_R ）についても同様の式により算出した．

4. ベントナイト原鉱石の膨潤特性実験結果に基づく膨潤特性における年代変化に関する推察

表 2 に各原鉱石における不攪乱供試体および再構成供試体の膨潤圧および一次元膨潤変形率の測定結果を示す．また、図 2 に各原鉱石の地質年代と、表 2 をもとに算出した膨潤圧抑制度（ P_R ）および一次元膨潤変形率抑制度（ ε_R ）の関係を示す．

これより、Na 型ベントナイトである月布産、アメリカ産、中国産原鉱石では、値にバラつきが見られるものの、地質年代が古くなるにつれて P_R および ε_R が高くなる傾向が見受けられた．これは、経年に伴い膠結作用に因る固結が強まるため、モンモリロナイトの膨潤変形が阻害されたためと推察される．なお、Ca 型ベントナイトである富岡産原鉱石では、他の原鉱石に比べて P_R および ε_R が約 95% と一番高い値であった．また、いずれの原鉱石においても、 P_R の値は ε_R に比べて高い傾向が見受けられた．これは、供試体の体積変化を拘束する膨潤圧実験に比べ、鉛直圧が低く拘束の弱い一次元膨潤変形率実験では、不攪乱供試体の内部固結に因る膨潤変形に対する抵抗性が弱まったことが推察される．

表 2 各原鉱石における不攪乱供試体および再構成供試体の膨潤圧および一次元膨潤変形率の測定結果

原鉱石（地質年代）		膨潤圧 P_{re}, P_{un} (kPa) 供試体乾燥密度 (Mg/m ³)	一次元膨潤変形率 $\varepsilon_{re}, \varepsilon_{un}$ (%) 供試体乾燥密度 (Mg/m ³)
月布産 (1000 万年)	不攪乱	480～1040 1.71～1.81	18～174 1.61～1.83
	再構成	1160～2680 1.67～1.81	119～180 1.57～1.80
富岡産 (1500 万年)	不攪乱	100 1.54	0.3～0.9 1.44～1.49
	再構成	3330 1.55	18 1.39
アメリカ産 (1 億年)	不攪乱	680 1.46～1.48	105～121 1.41～1.46
	再構成	3680～3900 1.47～1.52	227～276 1.48～1.53
中国産 (1 億 5000 万年)	不攪乱	560～2450 1.82～1.84	53～95 1.83～1.92
	再構成	5780～8000 1.87～1.89	165～226 1.84～1.86

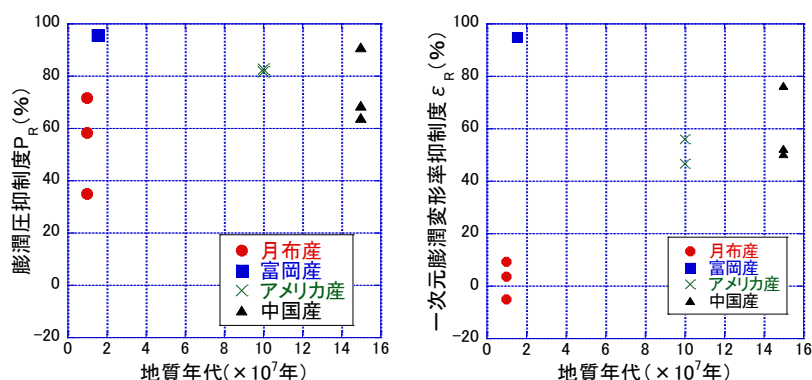


図 2 地質年代と膨潤圧抑制度（左）および一次元膨潤変形率抑制度（右）の関係

5. まとめ

地質年代の異なるベントナイト原鉱石の膨潤特性から、ベントナイトの膨潤圧・膨潤変形特性における年代変化に関して推察を行い、以下の結論を得た．

- 1) 膨潤圧および一次元膨潤変形率において、Na 型ベントナイトの原鉱石では地質年代が古くなるにつれて抑制度が高まる傾向であり、これは経年に伴い膠結作用に因る固結が強まるためと考えられる．
- 2) 拘束条件の違いにより、膨潤変形特性に比べて膨潤圧において抑制度の値が高くなったと考えられる．
- 3) 今後、モンモリロナイト含有率、交換性陽イオンの組成等の特性を考慮し、膨潤特性における年代変化の評価に関して精度を向上させる必要がある．

謝辞：本研究の一部は、平成 30 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）の成果である．また、ベントナイト原鉱石の入手にあたっては、クニミネ工業株式会社伊藤雅和氏、株式会社クニマイン、株式会社ホーヴェンの皆様のご協力を得た．ここに感謝致します．

参考文献：1) 緒方信英，小崎明郎，植田浩義，朝野英一，高尾肇：高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術，一その 4 人工バリアの設計と製作一，原子力バックエンド研究，Vol.5，No.2，pp.103-121，1999．2) 例えば，鹿園直建：放射性廃棄物の地層処分に対するシミュレーション研究とナチュラアナログ研究の意義，地質ニュース 499 号，pp.13-22，1996．3) 伊藤大知，小峯秀雄，諸留章二，関口高志，三浦玄太：ベントナイト原鉱石の膨潤特性・透水特性の測定結果に基づく膠結作用による物理特性への影響評価，第 12 回環境地盤工学シンポジウム，16-6，pp.547-552，2017．4) 寺田賢二，関根一郎，雨宮清，伊藤雅和：中国産ベントナイトの利用可能性調査報告書，原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-10002，pp.57-62，2011．5) 伊藤雅和，石井卓，中島均，平田征弥：ベントナイトの成因・生成環境に関する一考察，粘土科学第 38 巻第 3 号，pp.181-187，1999．6) 関根一郎，伊藤雅和，山本卓也，雨宮清，佐藤泰，寺田賢二：海外産ベントナイトの特徴と放射性廃棄物処分への適用可能性調査，土木学会第 63 回年次学術講演会，CS05-23，pp.213-214，2008．7) 澤田武夫：安中一富岡地域ベントナイト鉱床に関する被熱履歴の推定，粘土科学第 43 巻第 3 号，pp.137-144，2004．