

## 飽和させた締めめベントナイトを用いた膨潤圧測定に関する留意点

電力中央研究所 正会員 ○渡邊保貴, 正会員 吉川絵麻, 非会員 横山信吾, 非会員 新橋美里  
原子力発電環境整備機構 正会員 山本陽一, 正会員 後藤考裕

## 1. はじめに

放射性廃棄物処分では、核種移行抑制機能を期待して締め固めたベントナイトを人工バリアとして使用することが検討されている<sup>1)</sup>。締め固めベントナイトの膨潤圧は、膨潤特性を把握するうえで重要である。多くの場合、室内試験により膨潤圧を測定する際には、不飽和の締め固めベントナイトを装置にセットし、給水し、飽和に至るまでに発生する圧力を測定する。それに対し、試験の目的によっては、飽和度を十分に高めた締め固めベントナイトを装置にセットして、膨潤圧を測定する場合も想定される。例えば、高飽和度で施工した緩衝材の特性を知りたい場合、あるいは、高飽和度の緩衝材に熱的・化学的作用による変質が生じたあとの特性を知りたい場合である。ベントナイトの膨潤は水分が多く存在し、かつ、物理的な拘束が弱いほど生じやすいため、一度、飽和度が高まった締め固めベントナイトを無拘束に近い状態におくと膨潤しようとする。上述したように、飽和度を十分に高めた締め固めベントナイトを装置にセットする膨潤圧試験においては、供試体の応力開放による体積変化が生じることにより、膨潤圧の測定や測定値の解釈における正確性が損なわれることが懸念される。こうした試験手順においても確からしい膨潤圧を取得するため、本研究では、飽和させた締め固めベントナイトを用いて膨潤圧測定を行い、測定結果と供試体状態に関する考察を通じて、本手法を膨潤圧測定に適用するうえでの留意点をまとめた。

## 2. 飽和供試体の再設置工程を含む膨潤圧試験方法

膨潤圧は、締め固めベントナイトの吸水膨潤による体積増加を抑えるために必要な圧力であり、膨潤圧試験としては、供試体の体積を一定に維持しながら給水し、その時に発生する圧力（主に鉛直圧）を測定する方式が用いられてきた<sup>2), 3)</sup>。試験装置としては大別して二つあり、一つは圧密試験装置のように供試体の上部キャップと荷重計が試験リングと分離されているもの（分離型）、もう一つは上下板に荷重計が内蔵され一体化しているもの（結合型）である<sup>4)</sup>。先行研究<sup>4)</sup>によれば、分離型の装置は供試体高さの違いに対応しやすい利点はあるものの、結合型の装置より供試体の拘束が弱く、飽和過程でわずかな変形が許容されることで平衡膨潤圧は小さく測定される傾向にある。室内試験で得られる平衡膨潤圧が供試体を拘束する程度によって異なることは本研究での検討を困難にすると考え、本研究では上下板に荷重計が内蔵された結合型の試験装置を使って以下の検討を行った。

本研究で使用した膨潤圧試験装置および試験フローを図1に示す。はじめに、粉末ベントナイト（表1）を用いて、厚さ20mm、直径60mmの不飽和供試体を試験リング内に直接作製した。締め固め時の含水比は、最適含水比または飽和度90%に相当する含水比とした。乾燥密度は1.2~1.5Mg/m<sup>3</sup>とした。試験装置を組み立て、供試体下部からイオン交換水または人工海水（マリンアートSF-1）を給水した。文献<sup>5)</sup>の方法により供試体の飽和度が十分に高まっていることを確認したのち、大気圧条件下で平衡膨潤圧を測定した。次に、試験装置の上蓋を外し、飽和供試体が収容された試験リングを一度取り出した。そして、供試体の厚さを測定して即時にこれを再設置し、試験装置を組み立てた。この時、上蓋を固定するボルトの締め付けは、最初に不飽和供試体をセットした時と同等のトルクで実施した。給水ラインを3分間減圧したあと、供試体に試験用水を給水し、鉛直圧がほぼ一定になった時点で、その値を供試体再設置後の平衡鉛直圧として記録した。

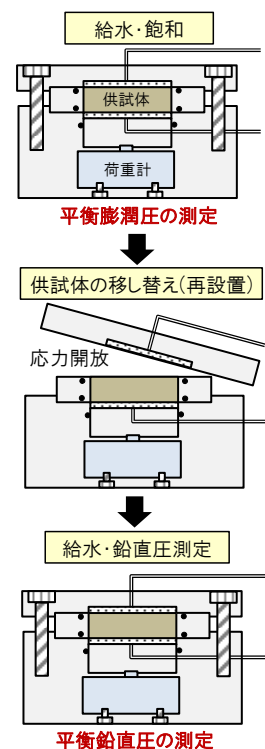


図1 試験フローのイメージ

表1 ベントナイトの物理化学的性質

ベントナイトの種類	A	B	C	
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.768	2.675	2.574	
液性限界 (%)	436.4	238.9	93.6	
塑性限界 (%)	26.4	39.8	30.3	
モンモリロナイト含有率 (%)	51.2	64.5	40.8	
浸出陽イオン量 (meq/100g)	Na <sup>+</sup>	53.4	57.1	7.6
	K <sup>+</sup>	0.4	2.5	2.4
	Ca <sup>2+</sup>	9.3	15.0	21.5
	Mg <sup>2+</sup>	0.8	3.4	19.8

キーワード ベントナイト, 膨潤圧, 応力開放 連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 一般財団法人 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門 TEL 070-6568-9619

### 3. 平衡膨潤圧と供試体再設置後の平衡鉛直圧の比較

上下板を取り外した際に測定した飽和供試体の厚さを図2に示す。試験リングの厚さは20.0 mmであるのに対し、上下板を取り外して応力開放された供試体の厚さはその値を上回ることが多く、1点を除いて20.0~20.6 mm（最大3%増加）の範囲であった。これにより、図3に示すように、再設置直前（上下板を取り外し応力開放された状態）において、乾燥密度は飽和時点（上下板を取り外す直前）の値より小さくなった。

飽和供試体を再設置する前後において測定された鉛直圧の変化（ベントナイトAの一例）を図4に示す。不飽和供試体を飽和させて平衡膨潤圧が得られてから、上下板を取り外したことで鉛直圧は一度ゼロになった。そして、供試体を再設置し、上蓋のボルト締めを行ったことで鉛直圧が一時的に平衡膨潤圧を超えた。これは、再設置直前の飽和供試体の厚さが試験リングの厚さを超えていたことが原因である。ボルト締めの直後に3分間の減圧を経て給水を再開した。一時的に高まった鉛直圧は減少し、30分以内にはほぼ一定の値（平衡鉛直圧）となった。平衡膨潤圧と平衡鉛直圧の比較を図5に示す。これによると、ベントナイトの種類、乾燥密度、試験用水によらず、本研究で測定された供試体厚さの範囲であれば、平衡膨潤圧と平衡鉛直圧はほぼ一致する結果となった。

結合型の試験装置では供試体用の空間が一定であるため、再設置時に供試体の厚さが微増していても上蓋を締め付けることで供試体が元の体積に戻るよう圧密し、応力開放する前と概ね同等の乾燥密度において膨潤圧の測定が行われたと考えられる。図4では、一度低下した鉛直圧が増加に転じていた。上蓋締め付けにより圧密した後の乾燥密度において吸水膨潤が生じ、平衡膨潤圧に近い状態に至ったと推察される。平衡膨潤圧と同等の平衡鉛直圧を得るためには、圧密量を減らす観点で応力開放による供試体厚さの変化を小さく抑えることは重要であると考えられる。また、上述した鉛直圧の増加は、一時的に供試体に過剰な圧縮力が作用したことを意味している。そのため、1章で述べたように、高飽和度での施工や変質を想定する場合には、供試体の再設置時にその状態が乱れる可能性があることに注意しなければならない。分離型の試験装置を用いれば供試体を過剰に圧縮することは避けることができるが、その場合、供試体の乾燥密度が低下したまま平衡鉛直圧を測定することになる点には注意すべきと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、飽和度を十分に高めた締固めベントナイトを装置にセットすることを想定した膨潤圧試験を行い、本手法を使用するうえでの留意点を示した。飽和供試体の応力開放による厚さの変化が少なければ（目安3%以内）、再設置後に測定される平衡鉛直圧は平衡膨潤圧とほぼ同等になると考えられる。ただし、供試体に過剰な圧縮力が作用することで、供試体の状態を乱す可能性があることには注意しなければならない。

#### 参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書，NUMO-TR-20-03，2021.
- 2) Sridharan, A., Rao, A. S., Sivapullaiah, P. V.: Geotechnical Testing Journal, 9, No. 1, 24-33, 1986.
- 3) Wang, Q., Tang, A. M., Cui, Y. J., Delage, P., Gatmiri, B.: Engineering Geology, 124, 59-66, 2012.
- 4) 田中幸久：土木学会論文集 C, 67, No.4, 513-531, 2011.
- 5) 渡邊保貴ほか：電力中央研究所研究報告，N13005, 2013.

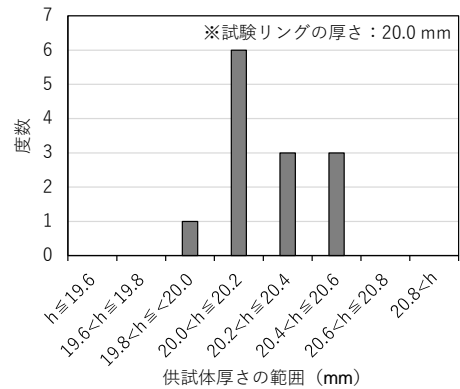


図2 上下板を取り外した際に測定した飽和後供試体の厚さ

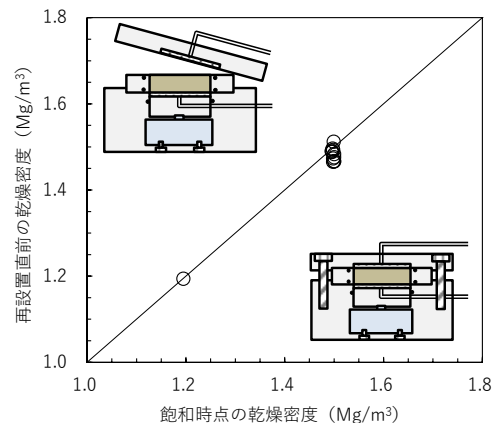


図3 試験装置の上下板を取り外す前後における供試体の乾燥密度の比較

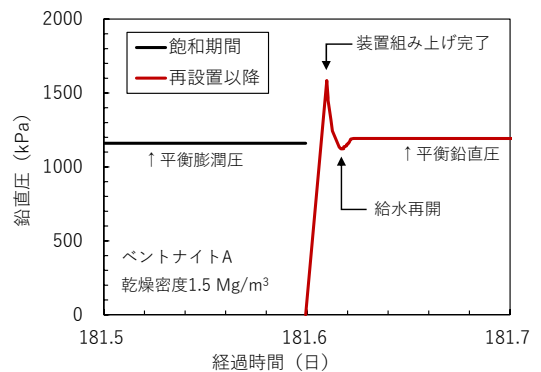


図4 供試体再設置前後における鉛直圧の変化

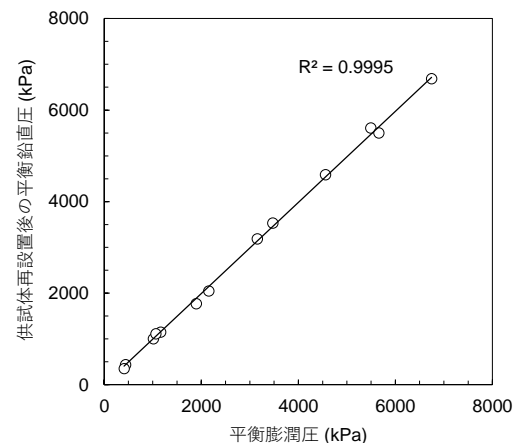


図5 平衡膨潤圧と平衡鉛直圧の比較