

# 様々なベントナイト混合土の膨潤挙動に関する実験的検討

新潟大学 学正会員 ○ 飯田輝良      新潟大学 正会員 金澤伸一  
 新潟大学 学正会員 榎西松建設 正会員      吉野修      新潟大学 非会員 中島颯人

## 1. はじめに

地層処分において、ガラス固化した廃棄体と岩盤との間を充填する緩衝材として、吸水膨潤性と難透水性を有する粘土鉱物であるベントナイトが選定されている。緩衝材に要求される性能の中で、自己シール性や応力緩衝効果などを評価する指標の1つとして、膨潤圧は重要な材料特性であり、膨潤圧試験等を通じてその把握が進められている。廃棄体定置後において、ガラス固化体からの崩壊熱や岩盤の地熱により緩衝材が高温環境に長期間さらされることや、熱により温められた地下水が浸透することなど、高温環境が緩衝材に及ぼす影響を把握する必要がある。しかしながら、熱を考慮した研究例は少なく、熱的作用を受けたベントナイト緩衝材の詳細な膨潤挙動メカニズムは明らかになっていない。また、地層処分に必要な緩衝材の量は埋め戻し材も含めると数百万トン以上に及ぶと見込まれており、人工バリア材料の合理的な選定や仕様設定に資する多様な選択肢を増やすために、国内産ベントナイトを複数確保することが求められている。そこで、本研究では産地や性状の異なる複数の国内産ベントナイト供試体に対して、温度変化を考慮した膨潤圧試験を行い、データベースの構築と試料ごとに着目した膨潤特性を実験的に検討することを目的とした。

## 2. 温度変化を考慮した膨潤圧試験

### 1) 試験試料

表-1 に本試験で使用した各ベントナイトの基本的な特性を示す。試験試料はそれぞれ国内の異なる鉱山で産出されたクニゲル V1 (クニミネ工業製)、天竜ベントナイト (関ベン鉱業製)、三川ベントナイト (ホージュン製) の3種類を使用し、比較として非膨潤性粘土であるカオリン粘土 (竹原化学工業製) を試験試料に加えた。なお、カオリン粘土の土粒子密度は  $2.636 \text{ (Mg/m}^3\text{)}$  である。

表-1 各ベントナイトの基本的性質

	クニゲルV1 (山形県産)	天竜 (新潟県産)	三川 (新潟県産)
土粒子密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )	2.61	2.675	2.574
タイプ	Na型	Na型	Ca型
50% 粒径 $D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	10.1	5.9	19.4
モンモリロナイト 含有率(%)	55.0	72.8	55.0
Na/Ca比	5.74	3.81	0.35
膨潤力( $\text{ml/2g}$ )	20.0	15.5	7.5

### 2) 試験方法

図-1 に膨潤圧試験機の概略図を示す。膨潤圧試験では、各国内産ベントナイトと珪砂 8 号を 7:3 の割合で配合した混合試料を使用した。モールド内に試料を投入し、供試体直径 28mm、高さ 10mm、目標乾燥密度  $1.6 \text{ (Mg/m}^3\text{)}$  となるよう上部から油圧ジャッキを用いて静的に締め固めることで作製した。締め固め圧力は  $8\text{MPa}$  程度で、締め固め時の加圧保持時間は 10 分とした。初期鉛直圧は  $50\text{N}$  程度とし、浸潤水はイオン交換水を使用した。温度変化は温水循環装置によって制御し、給水温度は  $30, 60, 90^\circ\text{C}$  を常に維持しながら、下面給水により膨潤圧試験を行った。また、水面からの水の蒸発量を抑えるために水面に蒸発防止材 (pp 球) を浮かべた。試験期間は膨潤圧が平衡状態に到達する 4, 5 日程度とした。

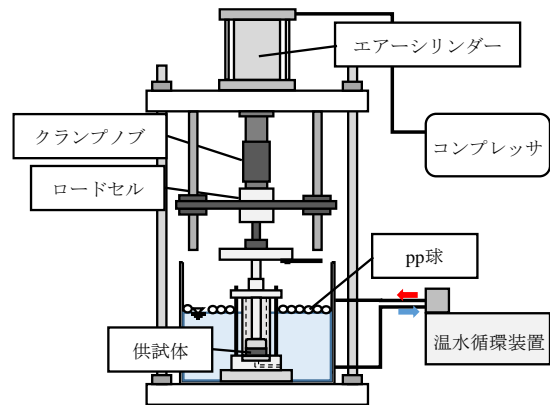


図-1 膨潤圧試験機概略図

### 3. 試験結果

図-2 に各試料ごとの膨潤圧の経時変化を示す。膨潤性粘土に着目すると、いずれの試料においても、吸水に伴い膨潤圧が増加した後減少し、その後は再び増加していることが確認できる。この一連の挙動は、ベントナイトの土粒子層間内に水が取り込まれることによる吸水膨潤と吸水圧縮挙動であるコラプスが供試体内部で連続的に生ずると考えられている<sup>2)</sup>。また、試料ごとに比較すると、Ca型ベントナイトよりもNa型ベントナイトのほうが膨潤圧が高く、モンモリロナイト含有率に依らず、クニゲル V1 の膨潤圧が最も高くなった。この要因として、モンモリロナイトの結晶層間に存在する陽イオン構成の違いによるものと考えられる。層間内の  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  などの陽イオンと周辺溶液の水分子の水和反応により、層間に水分子が入り込み、層間を押し広げることで膨潤するが、 $\text{Na}^+$  が多く含まれているベントナイトほど層同士の電氣的引力が弱いため、膨潤性が高くなるとされている。表-1 から層間内に含まれる  $\text{Na}^+$  と  $\text{Ca}^{2+}$  の割合 (Na/Ca 比) を比較するとクニゲル V1 が大きくなっている。これにより、層間距離が広がりやすくなることで膨潤圧が高くなったと考えられる。

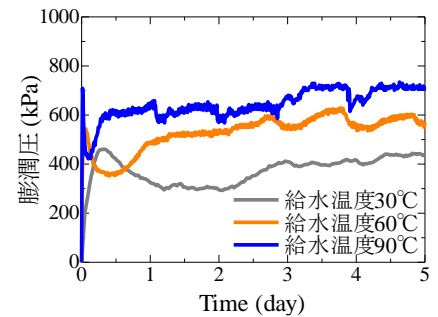
温度変化に着目すると、いずれの試料においても吸水温度が高くなるにつれて膨潤圧が高くなり、膨潤圧が平衡膨潤圧までに達するまでの時間が短くなることが確認できた。膨潤圧が高くなる要因として、拡散電気二重層の拡大が考えられる。粘土鉱物の表面は負または正の電荷をもっているため、その反対電荷のイオンが粒子に集まる電気二重層が形成される。電気二重層の厚さを表すパラメータとしてデバイ距離が定義されており、絶対温度が上昇することによりデバイ距離が増加するとされている。粒子が持つ電気二重層は重なり合うことで反発しあう斥力が発生するが、デバイ距離が増加することで電気二重層が重なり合う範囲が大きくなる。これにより斥力が増加し、粒子同士がより反発するようになったことで膨潤圧が増加したと考えられる。また、温度上昇によって水の粘性係数が減少したことや、水和反応が促進されたことで、高温ほど層間内の構成陽イオンと水分子の水和反応が早く進み、水和数が上限に達したところで反応は終了し、膨潤圧が平衡状態に至ったと考えられる。

### 4. おわりに

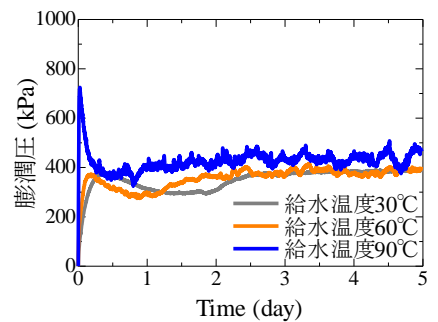
本研究により、ベントナイトの膨潤特性はモンモリロナイト含有率だけでなく、結晶層間に存在する構成陽イオンによる影響が大きいことが示唆され、また、給水温度の違いにより膨潤挙動が変化する傾向がみられた。今後は初期含水比を変化させた試験や熱履歴を考慮した膨潤圧試験を継続的に行い、データベースの構築とともに詳細な膨潤特性を検討していく。

### 5. 参考文献

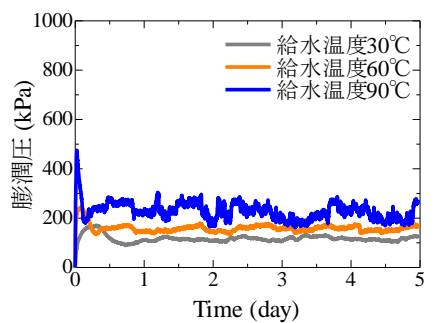
- 1) 小峰秀雄, 緒方啓英: 砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp. 373-385, 2002.
- 2) 飯田輝良, 金澤伸一, 吉野修: 浸透過程におけるベントナイトの膨潤挙動に関する解析的検討, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, CS12-27, 2023.



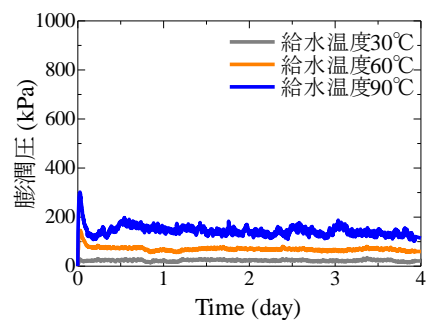
(a) クニゲル V1



(b) 天龍ベントナイト



(c) 三川ベントナイト



(d) カオリン粘土

図-2 各試料ごとの膨潤圧経時変化