

年代スケールで生じる膠結作用による
ベントナイト系材料の膨潤特性および
透水特性の変化に関する研究

Study on the changes in swelling and
permeability properties of bentonite materials
by the chronological time scale cementation effects

2022 年 2 月

伊藤 大知

Daichi ITO

年代スケールで生じる膠結作用による
ベントナイト系材料の膨潤特性および
透水特性の変化に関する研究

Study on the changes in swelling and
permeability properties of bentonite materials
by the chronological time scale cementation effects

2022 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建設工学専攻 地盤工学研究

伊藤 大知

Daichi ITO

— 目次 —

第1章 序論

| | | |
|-----|--------------------------------|----|
| 1.1 | 放射性廃棄物処分の概要 | 1 |
| 1.2 | 地層処分のバリアシステム | 4 |
| 1.3 | ベントナイトの概要 | 6 |
| 1.4 | ベントナイト系緩衝材の膨潤特性・透水特性に関する既往の研究 | 7 |
| 1.5 | 地層処分における安全性評価の時間スケール | 11 |
| 1.6 | 緩衝材の置かれる環境・長期的時間スケールによる変質現象の想定 | 12 |
| 1.7 | ベントナイト系緩衝材の変質・長期性能評価に関する既往検討 | 14 |
| 1.8 | 本研究の目的 | 16 |
| 1.9 | 本論文の構成 | 16 |
| | 参考文献 | 18 |

第2章 ベントナイト原鉱石の基本的性質

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| 2.1 | 使用したベントナイト原鉱石の地質情報 | 22 |
| 2.1.1 | 月布産原鉱石の成因に関する既往の研究 | 22 |
| 2.1.2 | 劉房子産原鉱石の成因に関する既往の研究 | 24 |
| 2.1.3 | Ten Sleep 産の原鉱石の成因に関する既往の研究 | 25 |
| 2.2 | 使用した原鉱石の基本的性質 | 26 |
| 2.2.1 | 土粒子の密度試験 | 26 |
| 2.2.2 | 液性限界・塑性限界試験 | 27 |
| 2.2.3 | 浸出陽イオン量測定試験 | 30 |
| 2.2.4 | モンモリロナイト含有率取得に向けたメチレンブルー吸着試験 | 31 |
| 2.2.5 | X線回折による鉱物組成分析 | 33 |
| 2.2.6 | 膨潤力測定試験 | 47 |
| 2.2.7 | 膨潤層・非膨潤層判定試験 | 48 |
| 2.3 | 本章のまとめ | 52 |
| | 参考文献 | 53 |

第3章 ベントナイト原鉱石の膨潤特性・自己シール性における膠結作用の影響評価

| | | |
|-------|----------------------|----|
| 3.1 | ベントナイト系緩衝材に求められる膨潤特性 | 55 |
| 3.2 | 膨潤特性実験の概要 | 55 |
| 3.3 | 供試体の作製方法 | 57 |
| 3.4 | 膨潤特性実験の手順 | 60 |
| 3.4.1 | 膨潤圧実験の手順 | 60 |

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 3.4.2 | 一次元膨潤変形実験の手順 | 61 |
| 3.5 | 膨潤特性実験結果の整理方法 | 61 |
| 3.5.1 | 膨潤圧測定実験の結果の整理方法 | 61 |
| 3.5.2 | 一次元膨潤変形実験の結果の整理方法 | 62 |
| 3.6 | 膨潤特性実験結果 | 63 |
| 3.6.1 | 膨潤圧実験結果 | 63 |
| 3.6.2 | 一次元膨潤変形率実験結果 | 81 |
| 3.7 | 有効モンモリロナイト密度を用いた統一的評価 | 102 |
| 3.8 | 高拘束圧の一次元膨潤変形実験 | 106 |
| 3.9 | 自己シール性試験の概要 | 109 |
| 3.10 | 自己シール性実験結果 | 112 |
| 3.11 | 本章のまとめ | 118 |
| | 参考文献 | 119 |

第4章 ベントナイト原鉱石の膨潤圧・XRD 連携試験

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 4.1 | 本試験実施の背景 | 120 |
| 4.2 | 本試験の概要 | 122 |
| 4.3 | 試験結果 | 124 |
| 4.3.1 | 月布産原鉱石の XRD・膨潤圧連携試験結果 | 124 |
| 4.3.2 | Ten Sleep 産原鉱石の XRD・膨潤圧連携試験結果 | 141 |
| 4.3.3 | 劉房子産原鉱石の XRD・膨潤圧連携試験結果 | 150 |
| 4.4 | 膨潤圧およびモンモリロナイト底面間隔の統一的評価 | 162 |
| 4.5 | 本章のまとめ | 165 |
| | 参考文献 | 166 |

第5章 ベントナイト原鉱石の土粒子骨格の評価

| | | |
|-----|--------------------|-----|
| 5.1 | 本検討の目的 | 167 |
| 5.2 | 岩片の SEM 観察 | 167 |
| 5.3 | 薄片の偏光顕微鏡および SEM 観察 | 171 |
| 5.4 | 本章のまとめ | 185 |
| | 参考文献 | 186 |

第6章 ベントナイト原鉱石の透水特性評価

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.1 | ベントナイト系材料の透水試験に関する現状 | 187 |
| 6.2 | 本研究で開発した厚さ 2 mm 供試体を用いた透水試験装置および試験方法の概要 | 188 |
| 6.3 | 変水位透水試験結果 | 191 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 6.3.1 | ベントナイト K_V1 を用いた厚さ 2 mm 供試体の適用性確認 | 191 |
| 6.3.2 | 月布産原鉱石の変水位透水試験結果 | 197 |
| 6.3.3 | Ten Sleep 産原鉱石の変水位透水試験結果 | 201 |
| 6.3.4 | 劉房子産原鉱石の変水位透水試験結果 | 205 |
| 6.4 | 有効モンモリロナイト密度による透水係数の評価 | 209 |
| 6.5 | 本章のまとめ | 211 |
| | 参考文献 | 212 |

第7章 ベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法の提案

| | | |
|-----|----------------------------------|-----|
| 7.1 | ベントナイト系緩衝材の設計フロー | 213 |
| 7.2 | 膨潤特性・自己シール性実験結果に基づく供試体乾燥密度と拘束圧関係 | 215 |
| 7.3 | 本研究で想定するシナリオと自己修復性評価手法 | 219 |
| 7.4 | 本章のまとめ | 222 |
| | 参考文献 | 223 |

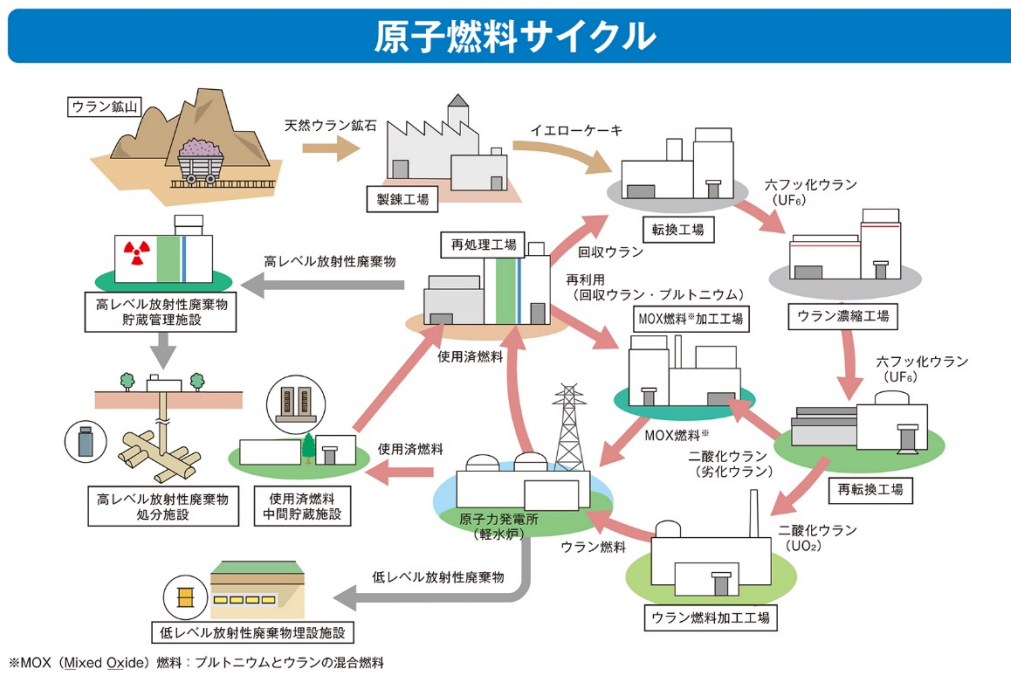
第8章 結論

| | | |
|-----|----|-----|
| 8.1 | 結論 | 224 |
|-----|----|-----|

第1章 序論

1.1 放射性廃棄物処分の概要

エネルギー資源に乏しい我が国では、1950年代より原子力発電を用いることとなった。原子力発電では、使用した核燃料からプルトニウム等を取り出して再び発電に用いる核燃料サイクル（図 1-1）が成立すると考えられたためである。年代を経るごとに、電源として原子力発電の占める割合は上昇し続け、2010年度時点では国内総発電電力量の約 1/4 を占め、LNG・石炭に次ぐ 3 番目の電源エネルギーであった¹⁾。2011年3月11日に発生した、東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所の事故により、日本各地に存在する原子力発電所は一時停止したが、その後の安全審査を通過した原子力発電所は随時再稼働されており、政策にも依るが CO₂ 排出量削減等の観点から今後も利用され続ける可能性がある。



7-2-1

原子力・エネルギー図鑑集

図 1-1 核燃料サイクル概念図²⁾

原子力発電に伴い、放射性廃棄物が生じる。放射性廃棄物の例として、発電に用いる燃料を処理した廃液や、制御棒等の原子炉内構造物、発電所や燃料再処理施設内で用いられる作

業服等の消耗品類，発電所内の構造物に用いられるコンクリートや金属類が挙げられる。これらの放射性廃棄物は，その放射能レベルに応じて高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物の2種類に大きく分類される。表 1-1 に主な放射性廃棄物の例を示す。

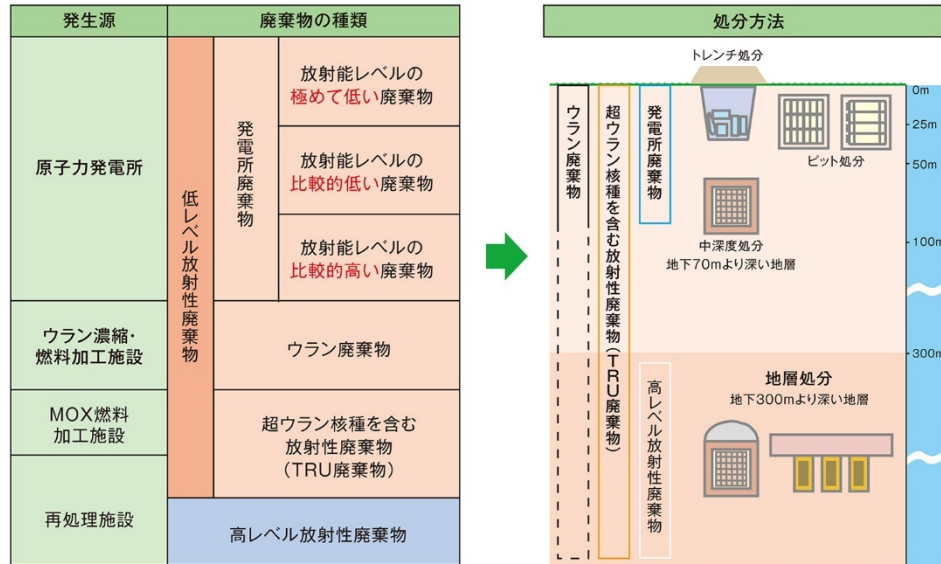
表 1-1 主な放射性廃棄物の例

| 廃棄物の種類 | | 廃棄物の例 | 発生源 |
|------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| 低レベル放射性廃棄物 | 発電所廃棄物 | 高レベル放射性廃棄物 | ガラス固化体 |
| | | 放射能レベルの比較的高い廃棄物 | 制御棒，炉内構造物 |
| | | 放射能レベルの比較的低い廃棄物 | 廃液，フィルター，廃器材，消耗品等を固化 |
| | 放射能レベルの極めて低い廃棄物 | コンクリート，金属等 | |
| | 超ウラン核種を含む放射性廃棄物 | 燃料棒の部品，廃液，フィルター | 再処理施設 MOX燃料加工施設 |
| | ウラン廃棄物 | 消耗品，スラッジ，廃器材 | ウラン濃縮・燃料加工施設 |

低レベル放射性廃棄物においては，放射能レベルの極めて低い廃棄物（通称：L3）は浅地中（トレンチ）処分，放射能レベルの比較的低い廃棄物（L2）は浅地中（ピット）処分，放射能レベルの比較的高い廃棄物（L1）は中深度処分として，それぞれ処分されることが決まっている³⁾。トレンチ処分はコンクリートピット等の構造物を設けずに地表面近くで埋設処分する方法である。ピット処分はドラム缶内で固化された廃液等を，地表から約5～10m程度の浅い地中に設けられたコンクリートピットなどの構造物内に収めて埋設する方法である。中深度処分は炉心から生じた廃棄物について，地表から約50～100m程度の地中に設置されたトンネル型やサイロ型のコンクリート構造物内に埋設処分する方法である。それぞれの処分方法における管理期間として，トレンチ処分では50年程度，ピット処分では300～400年程度，中深度処分では数百年程度が想定され，その後は一般的な土地利用が可能となると考えられている。図 1-2 に各種廃棄物の処分場深度・形状の概念図を示す。

放射性廃棄物の種類と処分の概要

放射能レベルに応じた深度や障壁(バリア)を選び、トレンチ・ピット処分、中深度処分、地層処分に分けて処分が行われる。



8-1-5

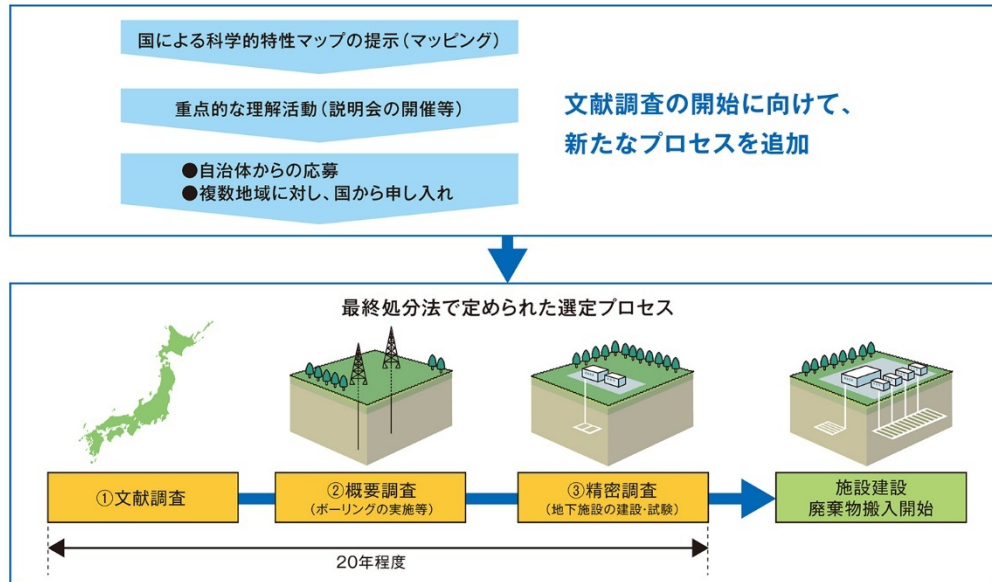
出典：資源エネルギー庁ホームページより作成

原子力・エネルギー図面集

図 1-2 各種廃棄物の処分場深度・形状の概念図²⁾

使用済み燃料の再処理過程で生じる放射能レベルの極めて高い廃液については、ガラスと合わせて溶かされた後、冷やして固められ（ガラス固化体）、地下 300 m 以深の深地層中に埋設処分（地層処分）することが「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（2000 年 6 月施行）」により定められている。我が国では、核燃料サイクル開発機構が中心となり、1999 年に地層処分の技術的信頼性に関する研究成果を取りまとめた「地層処分第 2 次取りまとめ」が出された。その後、2000 年に特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が制定され、地層処分の事業主体である NUMO が発足した。地層処分の立地選定プロセスを図 1-3 に示す。地層処分の立地選定において、3 つの選定プロセスが存在する。地層処分を行う最終処分場の候補地選定に関しては、2002 年より最終処分施設設置可能性を調査する区域の公募が開始された。2007 年に高知県東洋町が我が国で初めて文献調査に応募した（のち、取り下げ）。その後 2016 年に、船舶による輸送の容易さ・資源掘削の可能性・火山活動の可能性などの観点から、地層処分の操業地として相対的に好ましい場所・好ましくない場所を明記した「化学的特性マップ」が経済産業省資源エネルギー庁により発表された。また、2020 年 10 月には、北海道寿都町・神恵内村が文献調査に応募し、2021 年現在、文献調査が実施されている。

地層処分の立地選定プロセス



※各調査段階において、地元自治体の意見を聴き、これを十分に尊重する(反対の場合は次の段階に進まない)。

8-3-11

出典：経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会資料等より作成

原子力・エネルギー図面集

図 1-3 地層処分の立地選定プロセス²⁾

1.2 地層処分のバリアシステム

高レベル放射性廃棄物中に含まれる放射性物質の濃度が高く、減衰に要する時間が極めて長いことから、長期間にわたって周囲の環境および人間の生活圏から隔離することが求められる。そのため、水や物質の移動速度が極めて遅い、深い地層中に廃棄物を埋設する地層処分が世界各国で有力な処分方法となっている。

地層処分のバリアシステムは、国によって構造や材料に多少の差異はあるものの、天然バリアと人工バリアの2つによって構成されるという概念は共通している。図 1-4 にわが国における地層処分システムの概念図を示す。

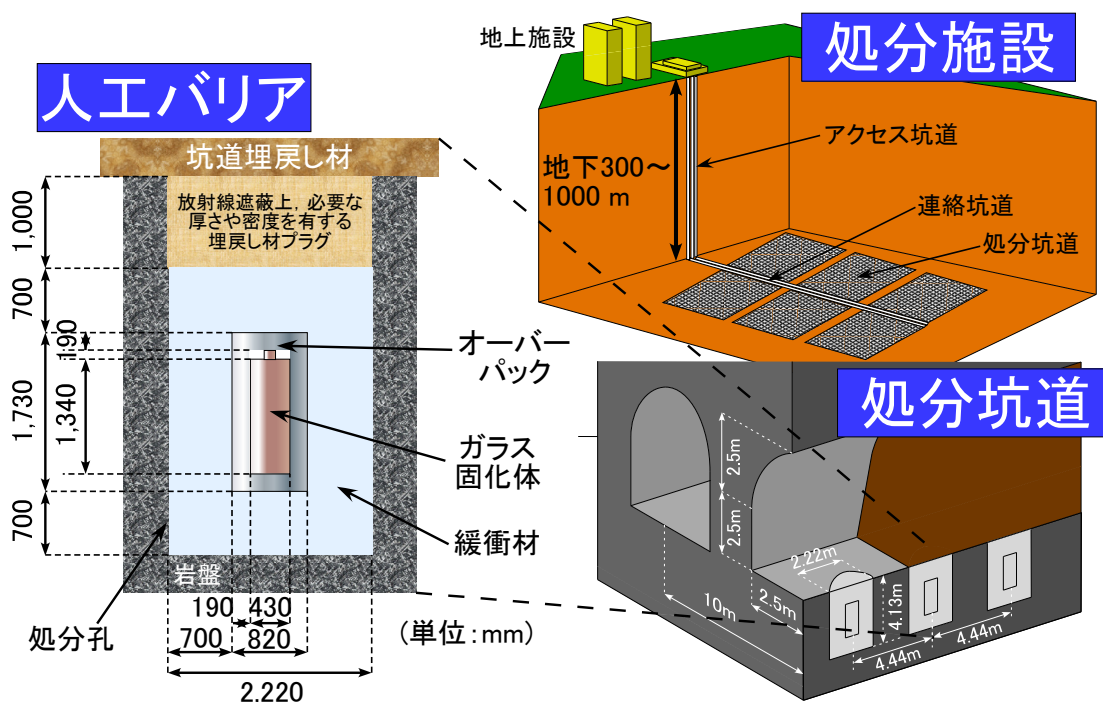


図 1-4 地層処分システムの概念図⁴⁾

天然バリアは深地層中の岩盤を指しており、地下水流速が極めて遅く、物質移行の際に吸着性を期待できると考えられる。岩盤の岩種として、大きく分けて花崗岩などの深成岩系、泥岩などの堆積岩系の2つがあり、スウェーデン・フィンランド・中国は前者、フランスは後者に処分場を建設することが有力である。日本やスイス等、その他の国では両者とも検討対象としており⁵⁾、日本では日本原子力開発機構 (JAEA) の保有する幌延深地層研究センターは堆積岩、東濃地科学センターは深成岩 (結晶質岩) を対象とした研究施設である。人工バリアは文字通り人類の手によって施工されるバリア材料を指しており、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材・埋戻し材で構成される。オーバーパックはガラス固化体を封入する金属製の容器であり、約 1000 年程度の期間、廃棄物の放射能レベルが減衰するまで地下水とガラス固化体の接触を遅延させることが求められる。オーバーパックの原料として、炭素鋼やチタン、銅などが検討されている⁶⁾。緩衝材においては、設計要件として低透水性、自己シール性、自己修復性など7項目が挙げられており⁷⁾、それらの要件を満たすための材料特性を満たすものとしてベントナイト系材料を用いることが極めて有力となっている。ベントナイト系緩衝材の製作方法として、粉体状のベントナイトを静的にプレスして製作する方法⁸⁾が有力視されている。図 1-5 に高レベル放射性廃棄物に対する緩衝材の設計要件を示す。

| 設計要件 | 内 容 |
|----------|---|
| 低透水性 | 緩衝材中の地下水の流れを抑制し、放射性物質の移行を遅延すること |
| コロイドろ過能 | 放射性物質がコロイドとして移行することを防止すること |
| 自己シール性 | オーバーパックや岩盤との隙間など、施工時にできる隙間を充填可能な膨潤性を有すること |
| 自己修復性 | ガス発生による亀裂が生じたとしても閉塞できること |
| 製作施工性 | 既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作施工が可能であること |
| 微生物影響の防止 | オーバーパックの腐食に影響を与える緩衝材中の微生物活動を抑制すること |
| 物理的緩衝性 | オーバーパックの腐食膨張による力学的な影響を緩和して、オーバーパックを保護するように物理的な緩衝性を有すること |

図 1-5 高レベル放射性廃棄物に対する緩衝材の設計要件⁶⁾

1.3 ベントナイトの概要

ベントナイトは火山灰などの火山噴火に伴う噴出物が地中で続成作用、もしくは熱水変質作用を受けて生成したと考えられている粘土系土質材料である。主要な構成鉱物として、膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトをはじめとするスメクタイト系鉱物、石英やクリストバライトなどのケイ酸鉱物、方解石、斜長石等の長石類があり、産地によってその組成は異なる。ベントナイトの材料特性を規定するのはモンモリロナイトであり、その含有割合、吸着している交換性陽イオンの組成、あるいは浸潤水中のイオンによって、膨潤性や低透水性といった特性に影響を受ける。故に、ベントナイトの挙動を評価するうえで、モンモリロナイトの性状や含有量、そして流入する水質を把握する必要がある。

図 1-6 に、モンモリロナイトの結晶構造の概念図⁸⁾を示す。モンモリロナイトは、アルミニウム・マグネシウム 8 面体シートがシリカ 4 面体シート 2 枚に挟まれた構造である板状単位結晶層が数枚重なって構成されている。単位結晶層は同形置換により負に帯電しており、結晶層の間には層間水と呼ばれる水分子と、交換性陽イオンと呼ばれる陽イオンを吸着している。交換性陽イオンは主に Na^+ イオン、 Ca^{2+} イオン、 Mg^{2+} イオンおよび K^+ イオンで構成されており、その組成によりモンモリロナイトの特性は変化することが分かっている。 Na^+ イオンが優勢である場合、 Ca^{2+} イオンが優勢である場合に比べて、膨潤性（特に、膨潤変形性）、低透水性に優れている。

モンモリロナイトの膨潤は水分子が結晶層間に侵入することにより引き起こされるものであり、交換性陽イオンの水和による結晶性膨潤と層間・層間外の交換性陽イオンの濃度差

による浸透性膨潤に区分される。結晶性膨潤は結晶層間に水分子が0～3層ないしは4層分段階的に吸着される状態を指しており、浸透性膨潤はそれ以上の量の水分子が吸着され、含水比と比例的に結晶層間内の水分子数が増加する状態を指す。

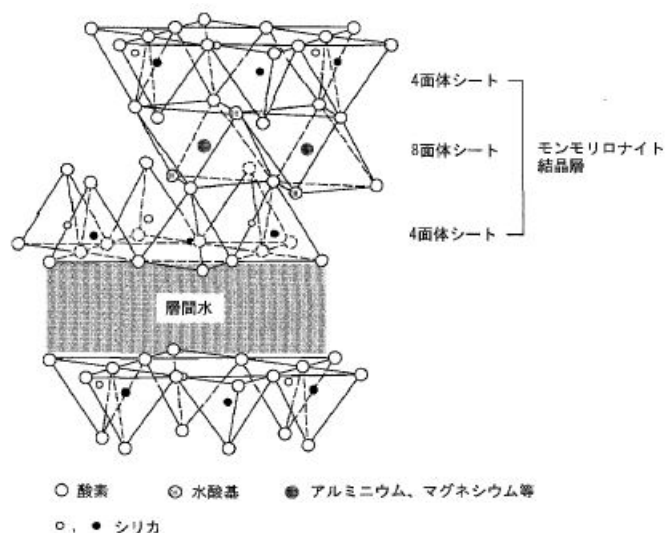


図 1-6 モンモリロナイトの結晶構造概念図⁸⁾

1.4 ベントナイト系緩衝材の膨潤特性・透水特性に関する既往の研究

日本国内において、ベントナイトの膨潤圧および膨潤変形率に関して体系的に要素実験による検討を行った研究事例として、小峯・緒方による研究⁹⁾がある。ベントナイト系緩衝材の設計に向けて、国産・海外産の4種類のベントナイトを選定し、ベントナイト配合率100%供試体および砂の配合率をパラメータとした砂・ベントナイト混合土の膨潤圧および膨潤変形率を測定したものである。その結果、膨潤圧に関してはベントナイトの種類に因らずベントナイト配合率および供試体乾燥密度に応じて指数関数的に増加する傾向が見受けられた。膨潤変形率においては、ベントナイト配合率、ベントナイトの種類および鉛直圧に因らず、最大膨潤率（膨潤変形率の経時変化曲線において双曲線近似した時の縦軸切片）は乾燥密度の増加に応じて一義的に増加する傾向が見られた。図 1-7に膨潤圧測定試験装置、図 1-8に膨潤変形試験装置、図 1-9に供試体乾燥密度と膨潤圧の関係、図 1-10に供試体乾燥密度と最大膨潤率の関係をそれぞれ示す。

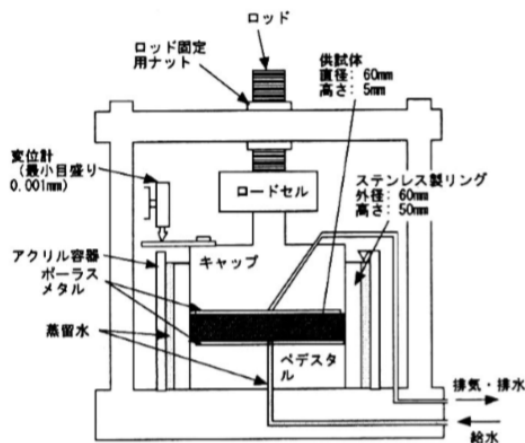


図 1-7 膨潤圧試験装置⁹⁾

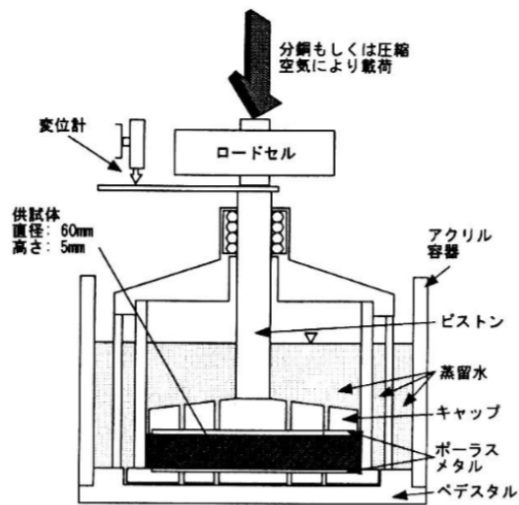


図 1-8 膨潤変形試験装置⁹⁾

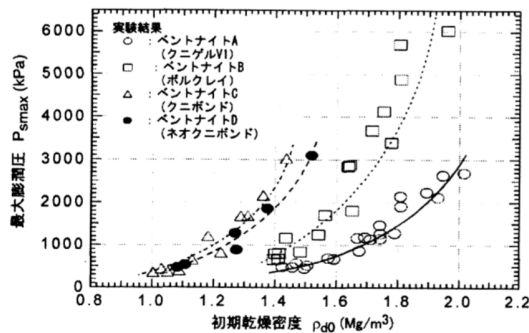


図 1-9 乾燥密度と膨潤圧の関係⁹⁾

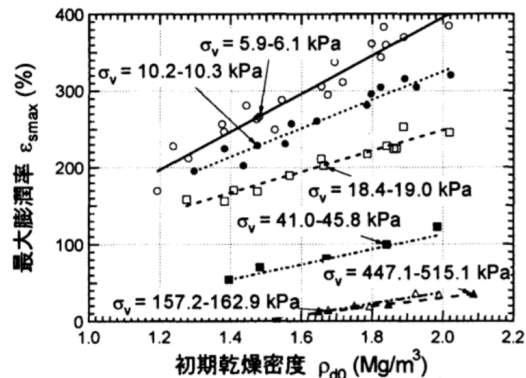


図 1-10 乾燥密度と最大膨潤率の関係 (クニゲル V1, ベントナイト配合率)⁹⁾

上記のような実験検討により得られた結果をもとに、Komine and Ogata¹⁰⁾はベントナイト中のモンモリロナイトの膨潤体積ひずみと、層間陽イオンの分布において拡散二重層理論を用いたモンモリロナイトの結晶反発力およびファンデルワールス力による層間の引力を組み合わせ、膨潤特性理論評価式を構築した。本評価式については、蒸留水環境下のみならず、海水環境下¹¹⁾や隙間充填後の発生圧力評価¹²⁾における適用性も確認されている。

海外においても、主に欧州各国や中国においてベントナイト系材料の性能評価に関する検討が鋭意進められている。欧米諸国ではアメリカ・ワイオミング州産の顆粒状 Na 型ベントナイトである MX-80 が主要な候補材料である。主な室内実験的検討として、サクシオンを変化させた場合の膨潤圧や圧縮特性に関する検討¹³⁾や、膨潤圧の異方性や微視的構造に関する検討¹⁴⁾、高温環境での挙動に関する検討¹⁵⁾などが挙げられる。数値解析に向けた挙動のモデル化も鋭意進められている^{16),17)}とともに、岩盤中での実規模試験も既に実施されている^{18),19),20)}。中国では、内モンゴル自治区・高廟子 (Gaomiaozi, GMZ) 産のベントナイ

トが主要な候補材料として検討されており、室内実験的検討が鋭意進められている^{21),22),23)}。このように、日本を含めた世界各国において、各国の有力な候補材料であるベントナイトについては、処分事業における操業初期段階における膨潤特性に関する要素実験・実規模実験検討事例が多く存在している。

また、膨潤特性における境界値問題の代表例として、施工時に緩衝材の周囲に生じる隙間を膨潤変形により充てんする性能（自己シール性）がある。その評価に関する研究として、小峯らによる実験的検討事例²⁴⁾がある。図 1-7 に示した膨潤圧測定試験装置と同様の試験装置において、締め付けたベントナイト供試体の上部とピストンの間に所定の隙間を設け、隙間充填後に発生する圧力を測定する試験である。供試体高さ 10 mm に対して、0 mm（隙間なし）から 3.075 mm の隙間を設けた条件において発生圧力の測定が実施された。その結果、隙間充填後の乾燥密度と発生圧力の関係において、乾燥密度の増加に応じて発生圧力は指数関数的に増加する傾向が見られた。また、本研究で得られた発生圧力の測定結果は膨潤理論評価式による計算結果と良好に一致した。また、緩衝材が膨潤変形して処分孔壁面と接した際に、壁面に作用する圧力が 1000 kPa を超えていれば十分な止水性を有すると仮定し、隙間充填後の発生圧力が 1000 kPa を超える緩衝材の設計例を示している。その結果、ベントナイト配合率が 100% の場合には、隙間 50 mm のケースにおいて乾燥密度 2.0 Mg/m³ に締め固められた緩衝材の厚さが 200 mm 必要であり、乾燥密度 1.8 Mg/m³ の緩衝材の厚さが 330 mm 必要であるという試算結果が得られた。図 1-11 に隙間充填後の発生圧力と乾燥密度の関係、図 1-12 に自己シール性を満たす緩衝材の乾燥密度、厚さの試算結果を示す。

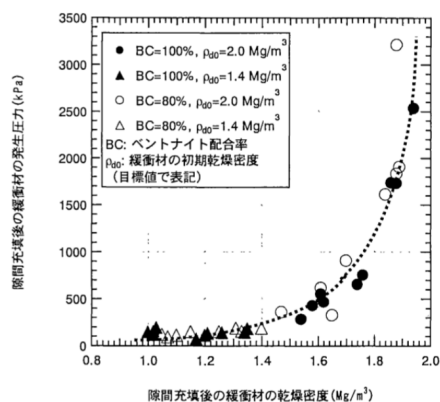


図 1-11 隙間充填後の発生圧力と乾燥密度の関係²⁴⁾

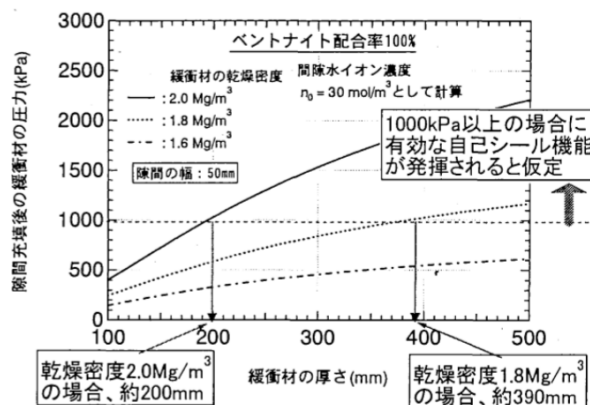


図 1-12 自己シール性を満たす緩衝材の乾燥密度、厚さの試算結果²⁴⁾

ベントナイトの透水特性については、廃棄体と地下水の接触および放射性核種の移行遅延の評価において極めて重要な特性である。透水特性の評価において重要な物理指標は透水係数であり、緒方らは緩衝材の設計透水係数として、ペクレ数が 1 より小さい条件を満たす 1×10^{-8} cm/s に安全率をかけた 1×10^{-10} cm/s を一つの目安としている⁶⁾。近年における各

種廃棄物処分における遮水材をはじめとしたベントナイトの用途拡大を受けて、JGSによりベントナイトをはじめとする低透水性材料の透水試験に関する試験規格²⁵⁾も策定された。

ベントナイト系材料の透水係数に関する既往の実験的検討から、図 1-13 に示すように乾燥密度や有効粘土密度に対して、負の相関を有する傾向が分かっているが、課題として測定精度の問題上 1 オーダー程度のバラつきが見られることも指摘されている²⁶⁾。長谷川は、定圧透水試験により締固めたベントナイト 4 種類について透水係数の測定を行い、透水係数と有効モンモリロナイト密度（モンモリロナイトのみに着目した乾燥密度）の間に負の相関が得られたと報告している²⁷⁾。また、透水係数の取得において、透水試験ではなく圧密試験を援用した研究事例もみられる²⁸⁾。海外においても、MX-80 の透水挙動と自己シール性能を実験的に評価した事例²⁹⁾や、MX-80 と砂の混合土の透水係数を測定した事例³⁰⁾をはじめとして、多くの事例が存在する。

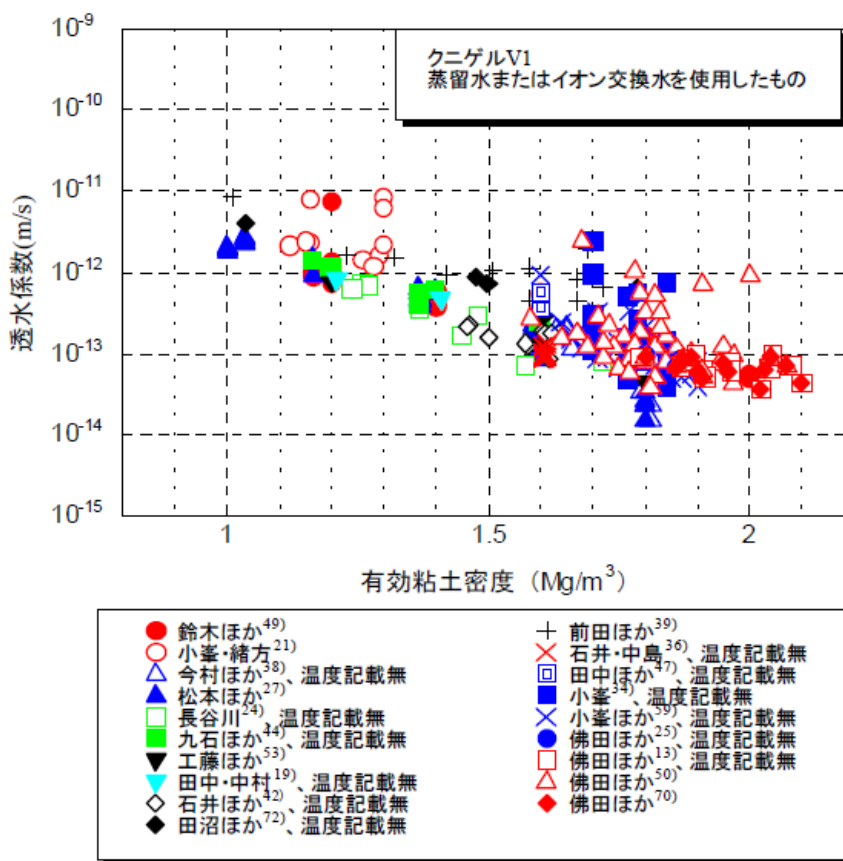


図 1-13 透水係数と有効粘土密度の関係²⁶⁾

ベントナイト系材料の透水係数の理論的評価手法として、膨潤理論評価式に基づいて交換性陽イオン組成やモンモリロナイト含有率等を考慮してモンモリロナイト結晶層間距離を計算し、層間中の水の流れを平行二平板間の層流と仮定して透水係数を求めるもの³¹⁾や、

交換性陽イオン組成や通水溶液の変化に伴う、間隙水の粘性やモンモリロナイト結晶間の反発力の変化を考慮した膨潤圧・透水係数のモデル³²⁾などがある。以上のように、ベントナイト系材料の透水特性についても、膨潤特性と同様、処分事業初期の性能評価を対象とした検討事例が多く存在している。

1.5 地層処分における安全性評価の時間スケール

地層処分における最大の懸念事項として、廃棄物の安定化に至る時間が極めて長く、処分後の安全性評価の対象とすべき期間が長期間にわたる点が挙げられる。これは、廃棄物に含まれる放射性核種の半減期が極めて長いこと、また燃料精製の際の濃縮過程により放射能濃度が極めて高いことに起因している。図 1-14 に高レベル放射性廃棄物の放射能の経時減衰の概念図²⁾を示す。

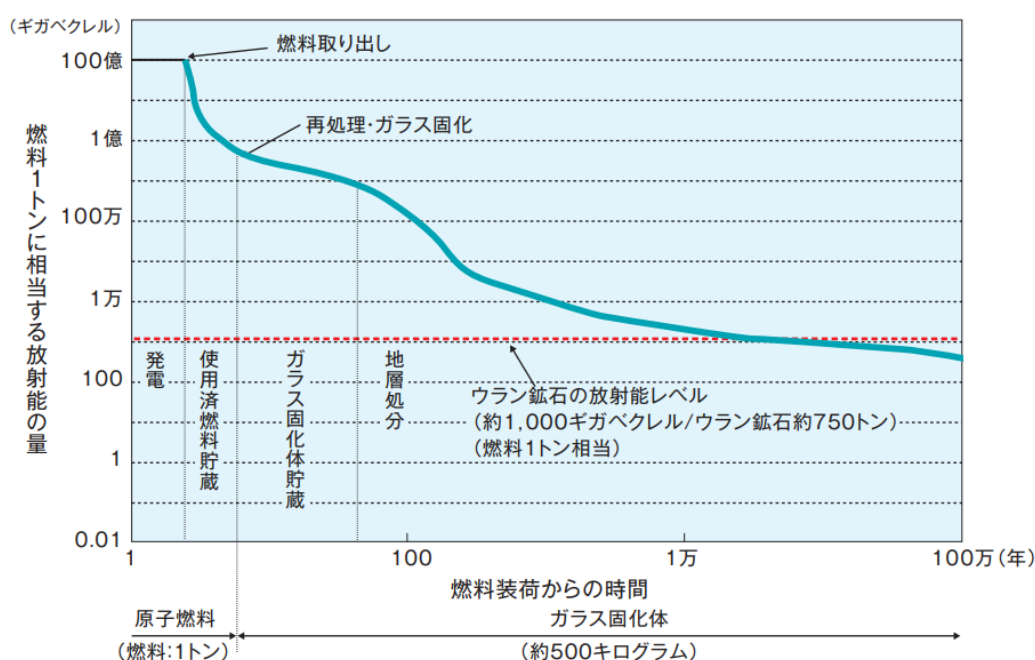


図 1-14 高レベル放射性廃棄物の放射能の経時減衰²⁾

これによると、発電での使用終了後に燃料を取り出した後、約 100 年程度をかけて貯蔵・冷却を行いつつ再処理・ガラス固化処理を行い、その過程で放射能は 1/1000 に減衰する。地層中に埋設処分後、放射能レベルの減衰は進行し、原材料であるウラン鉱石と同様の放射能に低下するまでにおよび 1 万年～10 万年を要すると試算される。地層処分におけるバリア材料においては、原則として上記のような長期間、バリア性能を損なわれずに維持することが要求される。

1.6 緩衝材の置かれる環境・長期的時間スケールによる変質現象の想定

1.5 で述べた通り、緩衝材をはじめとする地層処分におけるバリア材料には、長期間にわたって健全にバリア機能を維持することが求められる。しかし、長期間にわたって高温・高圧の環境に置かれるとともに、イオン等の塩類を含む地下水との接触といった、バリア性能の低下の要因となり得る外的影響を受ける可能性が高い。このような場合、緩衝材の内部において、長期的な変質現象である膠結作用（シリカ等の含有鉱物が溶解・再結晶化することで鉱物粒子間を接着すること）が発生し、性能が変化する可能性が懸念される。

まず、温度については高レベル放射性廃棄物の放射能減衰に伴い発生する崩壊熱の影響が考えられる。千々松ら³³⁾は、熱-水-応力連成モデルを用いて、ニアフィールドにおける温度状況に関する解析を実施した。その結果、図 1-15 に示すように、オーバーパック表面および緩衝材の最外部（周辺岩盤との接触点）において、およそ埋設後 30 年後に最高温度に達し、その後緩やかに低下していくという試算が得られた。処分後 1000 年経過後においても、60°C 程度の比較的高温に保たれており、緩衝材を含めた廃棄体周囲は長期間にわたって高温環境となることが想定される。高温環境においてはベントナイトの変質に伴う緩衝材の機能低下が懸念されており、設計上限温度として 100°C³⁴⁾が設定されている。また、廃棄体から発生する熱量と周辺のバリア材、岩盤の熱伝導特性を踏まえた廃棄体間の離隔距離が設計されることとなる。一方、欧米各国などでは廃棄物の再処理を行わずに処分する直接処分と呼ばれる処分方法が検討されており、日本においても行われる可能性が高まっており、検討も始められている³⁵⁾。この場合、緩衝材の晒される温度はさらに上昇することが試算されている。

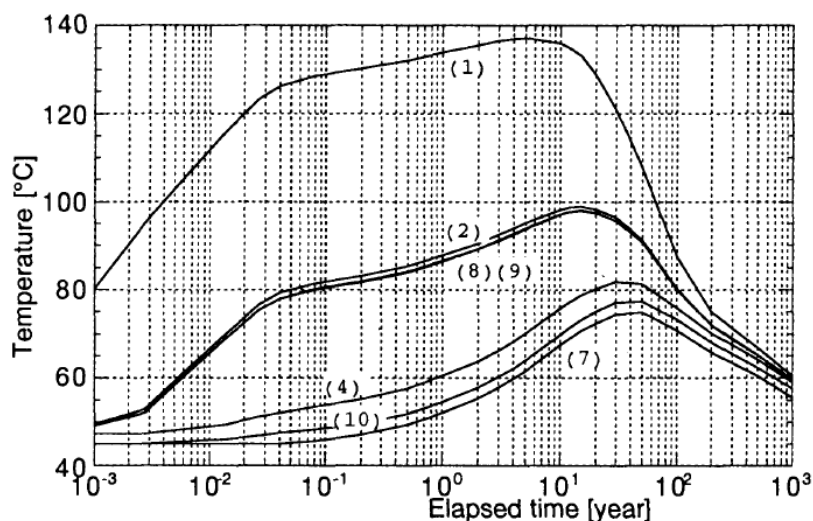


図 1-15 ニアフィールドにおける熱解析の結果³³⁾

このような高温環境にベントナイトが晒された場合、モンモリロナイトをはじめとする

構成鉱物の溶解や、溶解した鉱物の再結晶化に伴うセメンテーションが懸念される。横山ら³⁶⁾は、締固めたベントナイト供試体に対して加熱により温度履歴を与え、その前後の膨潤圧および透水係数の測定を実施している。その結果、120°Cで加熱した供試体においては、温度履歴前に比べて膨潤圧が低下したことが示されている。この理由として、シリカが高温環境において溶解した後に、温度低下に伴い沈殿し、土粒子間を固着するシリカセメンテーションの影響が考察されている。

緩衝材には周辺岩盤より地下水が流入し接触するが、その地下水にはイオンをはじめとする塩類が含有されることが有力である。幌延深地層研究センターの地下坑道にて採取された地下水において、ナトリウムイオンと塩化物イオン、次いで重炭酸イオンが多く含まれていることが分かっている³⁷⁾。また、イオン強度は0.21 mol/Lと算出されており、海水のイオン強度（およそ0.65 mol/L）と比較して1/3程度含有していることが分かった。モンモリロナイトの膨潤挙動や透水挙動においては、層間水と流入水のイオン濃度差に起因する浸透性膨潤の発現を考えた場合、流入する地下水の水質が極めて大きな影響を及ぼす。

また、地層処分における廃棄物は船舶による輸送が有力であり、処分施設は沿岸部に建設されることが有力である³⁸⁾。このような沿岸部の地下深部においては、塩淡水境界（相対的に密度の高い海水が淡水の下に潜り込むことに困り生じるくさび）の塩水側に処分場が位置する可能性が高く、処分場に流入する地下水には海水由来の塩類を含む可能性が極めて高く、バリア性能評価において考慮すべき事項である。平野部の深層に存在する地下水においては、地下水循環の影響を受けずに滞留する化石地下水の存在が示唆されている。丸井³⁹⁾によれば、関東平野の一部地域の地下水において、深度500 m程度を境に地下水年代が一気に増しており、1000 mを超える大深度深層地下水には地層に封入された化石海水が存在していることが示唆されている。このような化石海水については、塩分濃度が海水を超えている場合が多く、処分場建設の際には地下水質に留意する必要があると考えられる。

処分坑道の建設において、支保工や覆工としてセメント系材料を用いることが有力であるが、セメント系材料と地下水が接触することでpHが高く、Ca²⁺を含んだ水が浸出することが考えられる。この時、ベントナイト中のモンモリロナイトや随伴鉱物の溶解や、特にNa型ベントナイトにおいて、モンモリロナイトの交換性陽イオンがNa⁺からCa²⁺に交換されることにより、膨潤性や透水性等の緩衝材の要求性能に関連する特性が変化してしまう可能性が想定される。

このように、緩衝材に流入する地下水は様々な水質が想定され、各種水質環境におけるベントナイト系材料の特性変化が実験的に検討されている。小峯ら⁴⁰⁾は、高圧圧密実験により人工海水環境下での透水挙動の影響を検討している。その結果、低乾燥密度領域においては蒸留水環境に比べて透水係数が1オーダー程高くなるものの、乾燥密度を1.6~1.7 Mg/m³より高く締固めた場合においては蒸留水環境と同程度の透水係数が得られた。この理由として、モンモリロナイト結晶層間距離と水和した陽イオンの径の関係から、高乾燥密度に締固めた場合は海水中の陽イオンが結晶層によりろ過されて侵入できないためと推察してい

る。直井ら⁴¹⁾は、膨潤圧・膨潤変形特性における人工海水の影響を実験的に検討している。その結果、高乾燥密度で締固めた場合ほど膨潤圧に対する人工海水の影響は小さくなること、Ca型ベントナイトでは膨潤圧・膨潤変形特性のいずれにおいても人工海水の影響は小さいこと、拘束圧を高めることで膨潤変形特性に対する人工海水の影響を小さくすることができることが示された。菊池・棚井³⁷⁾は、幌延地下研究所のボーリング孔で採取された地下水（幌延地下水）および人工海水・NaCl溶液を用いて、膨潤特性・透水特性等に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、膨潤特性はイオン強度が高くなるとともに低下したものの、高乾燥密度になるにつれて蒸留水の場合との差異が小さくなる傾向が見られた。透水特性においては、イオン強度が高くなるにつれて、固有透過度（粒子や間隙の形状を考慮した透過抵抗）が小さくなる傾向が見られた。

また、参考文献⁴²⁾では、セメント反応水の影響を受けた緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオが作成された。セメント反応水とスメクタイトや非晶質シリカであるカルセドニーが接触することで溶解し、pH低下とSi、Al濃度の増加によりC-S-Hゲルが生成された。カルセドニーとスメクタイトの溶解・沈殿反応はすぐに平衡状態となり、二次鉱物の生成や種類は接する溶液のpHやSi/Al比、陽イオン組成等により変化する。Kの供給量に応じてスメクタイトのイライト化、沸石の生成も想定された。また、水酸化物や炭酸塩は過飽和状態であればどのような状況・時間でも生成するものと考えられる。

以上のように、緩衝材の性能低下の原因として想定される事象について、それぞれ実験的・理論的に検討が進められている。一方で、これらの事象の評価において、連成的かつ経時的な影響の検討が不可欠であるが、既往検討の多くは室内実験としての制約上、操業初期状態における影響の検討に留まっている。

1.7 ベントナイト系緩衝材の変質・長期性能評価に関する既往検討

地層処分のバリア材は、先述した通り複雑な地下環境下において長期的に性能を維持することが求められる。しかし、室内実験において、特に年代変化に関する検討についてはおよそ100年から200年程度の加速効果しか得ることができず、長期的な挙動評価は困難である。このような地層処分の技術的な信頼性や安全性に関わる、緩衝材の長期的変化の評価に対する学術的アプローチの一つとして、ナチュラルアナログ（自然界における類似現象）研究が挙げられる。ナチュラルアナログ研究とは、地層処分システムにおいて将来発生が想定される現象と類似した自然現象を見だし、その現象における緩衝材のナチュラルアナログを鉱物学的、地質学的手法により調査することで、地層処分の超長期的な技術的信頼性を評価する研究手法である⁴³⁾。

ベントナイトに関するナチュラルアナログ研究の代表例として、フィリピン・ルソン島の事例⁴⁴⁾が挙げられる。地層処分施設において、操業上の安全性や処分概念の実現性等の点から、支保工や力学プラグ等にセメントやコンクリート材料が用いられることが想定さ

れている。この場合、支保工等と地下水の接触により地下水がアルカリ化することが考えられ、高アルカリ性地下水とベントナイトとの接触に伴う変質が発生し、人工バリアシステムの劣化を引き起こす可能性が考えられる。このようなベントナイトと高アルカリ性地下水との相互作用を評価するには、解析的結果のみでは十分であるとは言い難く、ベントナイトと高アルカリ性地下水の接触現象が発生しているナチュラルアナログを対象とした調査を実施する必要がある。その意味で、フィリピン・ルソン島の事例では、自然に湧出している高アルカリ性地下水が過去から現在に至るまでベントナイト層と接触しており、緩衝材の長期挙動を評価する上で好ましいナチュラルアナログサイトであると言える。

フィリピン・Mangatarem 地域では高アルカリ性地下水を供給するオフィオライト層の近傍にベントナイト鉱床が存在しており、高アルカリ性地下水がベントナイト層下部と接触していることが確認された。そこで、高アルカリ性地下水の生成と進化やベントナイト層の形成と変質プロセス等の観点から、地下水や地質の調査が実施された。その結果、ベントナイト層下部においてはゼオライトに変質したベントナイトが確認されるものの、その領域の厚さは 1~3mm に限定されており、ベントナイトと高アルカリ溶液の相互作用による変質は数 mm 程度に限定されることが判明した。また、地下水調査や岩石鉱物学的観点の調査から、アルカリ変質においては Mg-Ca-Si-Al イオンのマスバランスの重要性が確認された。ベントナイト鉱山の断裂系では Magnetite が同定され、断裂系外部における蛇紋岩化作用や炭酸塩化作用の証拠と併せて、断裂系が高アルカリ性地下水の通り道となったことが考えられる。Mangatarem での研究は、地層処分地下施設におけるベントナイトと高アルカリ性地下水の接触によるベントナイトの変質がどのように進展していくかを評価する上で非常に重要な手がかりとなると言える。

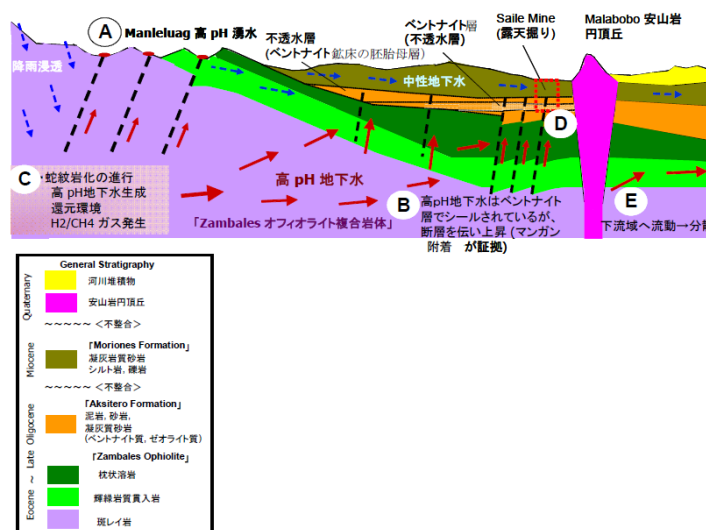


図 1-16 Mangatarem の地下水生成・流動の概念モデル（参考文献 44 より抜粋）

また、地下深部において高温環境下に置かれたモンモリロナイトの安定性についてナチ

ユラルアナログ的に評価した事例がある。Pusch and Karnland (1988)⁴⁵⁾は、スウェーデンのサルディニア・ゴトランドのモンモリロナイトリッチなベントナイト層に着目したナチュラルアナログ研究を行っている。サルディニアのベントナイト層はマグマにより最大 80°C 程度の高温環境に置かれているが、わずかに加熱により放出されたシリカによるセメンテーションが発生しているものの、少なくとも 60% 程度のモンモリロナイトを含有していることが分かった。また、ゴトランドのベントナイト層は地表から深さ 515 m に位置しており、有効応力は 30 MPa、過去数百万年にわたり 110°C 程度の高温環境に置かれていることが分かっているが、イライトへの変質は多少みられるものの既往検討におけるスメクタイトの変質シミュレーションと整合していることが分かった。これらの結果は、粘土鉱物学・地質学的観点からみて、ベントナイト系材料中のモンモリロナイトは高温・高圧環境においても安定的に存在しうることを立証する有力な証拠といえる。

このように、長期的な性状変化については、室内実験による加速・再現だけではなく、自然界より類似物質・現象を抽出し、評価するアプローチも有用であると考えられる。

1.8 本研究の目的

本研究では、ナチュラルアナログ概念に基づき、緩衝材が膠結作用を受けて変質する過程をベントナイト鉱床が続成変質を受けて生成する過程の一部に相当すると考え、ベントナイト鉱床より産出されるベントナイト原鉱石を用いた。ベントナイト鉱床生成の時間スケール（数千万～数億年）と、地層処分の安全評価で想定される時間スケール（数万～数十万年）は異なるが、鉱床および原鉱石の状態を地層処分における緩衝材変質の外挿的データとみなし、安全側の評価ができると考えた。地質年代の異なる数種類の原鉱石を選定し、それらから膠結作用を受けた後の緩衝材の状態を想定した不攪乱供試体と、地層処分操業初期の緩衝材の状態を想定し、粒径をパラメータとした再構成供試体を作製し、膨潤圧・膨潤変形などの膨潤特性や透水特性を実験的に調査することで、ベントナイト系材料の膨潤特性や低透水性に対する膠結作用の影響を評価した。また、ベントナイト原鉱石において得られた結果をもとに、ベントナイト系緩衝材の長期的変質を考慮した自己修復性に関する性能評価方法を提案し、地層処分事業におけるベントナイト緩衝材の設計法への適用方法について論じる。

1.9 本論文の構成

本論文は全 8 章で構成される。第 1 章では、本研究の背景として地層処分事業におけるベントナイト系緩衝材に係る研究の現状について論じるとともに、本研究の目的と構成について述べた。第 2 章では、本研究で使用したベントナイト原鉱石の生成環境と、土質力学・粘土鉱物学における基本特性についてまとめた。第 3 章では、ベントナイト系材料の膨

潤特性・自己シール性における膠結作用の影響について実験的に検討した結果を述べた。第4章では、膠結作用による膨潤特性低下メカニズムの解明を目的として、XRD・膨潤圧連携試験の概要と、その実験結果について述べた。第5章では、ベントナイト原鉱石の微視的構造評価と膠結作用メカニズムの解明を目的として、岩片および薄片試料のSEM・偏光顕微鏡観察結果について述べた。第6章では、ベントナイト系材料の透水特性における膠結作用の影響について、厚さ2mm供試体を用いた透水試験を新たに開発するとともに実験的に検討した。第7章では、ベントナイト原鉱石の膨潤特性実験結果と緩衝材の状態変化シナリオをもとに、緩衝材の長期的変質を考慮した自己修復性に関する性能評価方法を提案した。第8章では、本論文の結論を示した。

本研究の独創的な点は、ベントナイト系材料の長期的変質に伴う特性変化を定量的に評価し、その結果に基づいて変質を考慮した性能評価方法を提案した点である。これまで、ベントナイト系材料の性能評価は処分事業の操業初期の状態に近い状態での特性調査結果に基づいており、地層処分において最大のネックとなる、バリア材の性能における長期的な年代変化を考慮した研究はほとんどなされてこなかった。また、ベントナイト系材料に限らず、多くの材料においては初期の特性に基づいた性能評価が主であり、変質等に伴う特性変化を考慮した、長期的な性能評価方法は確立されていない。本研究では、そのような材料変質を考慮した長期的な性能評価方法のプロトタイプを提案することで、地盤工学・土木工学における既存の材料特性・性能評価方法に年代変化の概念を付加することができ、構造物・部材の供用期間を通した高精度な性能評価方法の構築に寄与できると考えられる。

参考文献

- 1) 電気事業連合会 HP : 発電設備と発電電力量 ,
<https://www.fepc.or.jp/smp/nuclear/state/setsubi/index.html> (2021年6月5日アクセス)
- 2) 一般財団法人 日本原子力文化財団 HP : 「原子力・エネルギー」図面集,
https://www.jaero.or.jp/data/03syuppan/energy_zumen/energy_zumen.html (2021年6月5日アクセス)
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁 HP : 放射性廃棄物について「放射性廃棄物の区分と発生」,
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html
(2021年6月5日アクセス)
- 4) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 : 日本原子力研究開発機構 (JAEA) における地層処分技術に関する研究開発の現状について, 地層処分研究開発調整会議 (第1回会合) 資料 2-2 (平成 29 年 5 月 31 日) ,
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/chisou_shobun_chousei/pdf/001_02_02.pdf, p.29, 2017. (2019年5月25日アクセス)
- 5) Sellin, P., Leupin, O. X. : The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management -A review, *Clays and Clay Minerals*, Vol.61, No.6, pp.477-498, 2013.
- 6) 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, -その4 人工バリアの設計と製作-, 原子力バックエンド研究, Vol.5, No.2, pp.103-121, 1999.
- 7) 原子力発電環境整備機構 : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築—レビュー版, NUMO-TR-18-03, p.4-37, 2018.
- 8) Grim, R. E. : *Clay Mineralogy (Second Edition)*, McGraw-Hill Book Co., New York, pp.77-92, 1968.
- 9) 小峯秀雄, 緒方信英 : 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.
- 10) Komine, H., and Ogata, N. : New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, No. 2, pp.460-475, 2003.
- 11) 直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴 : 各種ベントナイト系緩衝材に及ぼす人工海水の影響, 土木学会論文集, No.785/III-70, pp.39-49, 2005.
- 12) 小峯秀雄, 長田徹, 高尾肇, 植田浩義 : 高レベル放射性廃棄物処分施設の縦置き孔模型実験における緩衝材発生圧力の予測・評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.1, pp.108-117, 2013.
- 13) Lloret, A., Villar, M. V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., Alonso, E. E.: Mechanical behavior

- of heavily compacted bentonite under high suction changes, *Géotechnique*, 53, No.1, pp.27-40, 2003.
- 14) Saba, S., Barnichon, J. D., Cui, Y. J., Tang, A. M., Delage, P.: Microstructure and anisotropic swelling behavior of compacted bentonite/sand mixture, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, pp.126-132, 2014.
 - 15) Pusch, R., Blueming, P., Johnson, L.: Performance of strongly compressed MX-80 pellets under repository-like conditions, *Applied Clay Science*, 23, pp.239-244, 2003.
 - 16) Alonso, E.E., Vaunat, J. and Gens, A.: Modelling the mechanical behavior of expansive clays, *Engineering Geology*, Vol.54, pp.173-183, 1999.
 - 17) Schanz, T., Khan, M. I., Al-Badran, Y.: An alternative approach for the used of DDL theory to estimate the swelling pressure of bentonites, *Applied Clay Science*, 83-84, pp.383-390, 2013.
 - 18) ENRESA: Full-scale Engineered Barriers Experiment, Updated Final Report 1994-2004, 2006.
 - 19) Garitte, B., Shao, H., Wang, X. R., Nguyen, T. S., Li, Z., Rutqvist, J., Birkholzer, J., Wang, W. Q., Kolditz, O., Pan, P. Z., Feng, X. T., Lee, C., Graupner, B. J., Maekawa, K., Manepally, C., Dasgupta, B., Stothoff, S., Ofoegbu, G., Fedors, R., Barnichon, J. D.: Evaluation of the predictive capability of coupled thermo-hydro-mechanical models for a heated bentonite/clay system (HE-E) in the Mont Terri Rock Laboratory, *Environmental Earth Science*, 76:64, pp.1-18, 2017.
 - 20) Alesson, M., Sanden, T., Goudarzi, R., Malmberg, D.: Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels, SKB Report P-18-15, 2019.
 - 21) Chen, Y. G., Dong, X. X., Zhang, X. D., Ye, W. M., Cui, Y. J.: Cyclic thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted Gaomiaozhi bentonite, *Engineering Geology*, 255, pp. 37-47, 2019.
 - 22) Sun, D., Zhang, J., Zhang, J., Zhang, L.: Swelling characteristics of GMZ bentonite and its mixtures with sand, *Applied Clay Science*, 83-84, pp.224-230, 2013.
 - 23) Wang, Q., Tang, A.M., Cui, Y. J., Delage, P., Gatmiri, B.: Experimental study on the swelling behaviour of bentonite/claystone mixture. *Engineering Geology*, 124, pp.59-66, 2012.
 - 24) 小峯秀雄, 緒方信英, 中島晃, 高尾肇, 植田浩義, 木元崇宏: 一次元模型実験によるベントナイト系緩衝材の自己シール性評価, *土木学会論文集*, No.757/III-66, pp.101-112, 2004.
 - 25) JGS: 低透水性材料の透水試験方法, JGS0312-2018, 2018.
 - 26) 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦: ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討—日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究成果報告—(共同研究), *JAEA-Research* 2010-025, p. 43, 2010.
 - 27) 長谷川琢磨: ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, *電力中央研究所報告*, N04005, 2004.
 - 28) 佛田理恵, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: 高圧圧密試験装置を用いたベントナイトの透

- 水係数算出における試験方法の高度化, 土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 3, pp.573-578, 2006.
- 29) Karnland, O., Nilsson, U., Weber, H., and Wersin, P.: Sealing ability of Wyoming bentonite pellets foreseen as buffer material-Laboratory results. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, S472S475 Parts A/B/C., 2008.
- 30) Wang, Q., Cui, Y. J., Tang, A. M., Barnichon, J. D., Saba, S., Ye, W. M.: Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration, *Engineering Geology*, 164, pp.67-76, 2013.
- 31) Komine, H : Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 134, No. 4, pp. 497-508, 2008.
- 32) 田中幸久, 長谷川琢磨, 中村邦彦: 海水の濃度が各種ベントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に及ぼす影響のモデル化, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.66-84, 2009.
- 33) 千々松正和, 谷口航, 鈴木英明, 西垣誠: 熱-水-応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.9-25, 2001.
- 34) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, 一 地層処分研究開発第2次取りまとめ, 分冊2 地層処分システムの工学技術, JNC TN1400 99-023, pp.IV-272-IV-289, 1999.
- 35) 日本原子力研究開発機構: わが国における使用済燃料の地層処分に関する概括的評価 - 直接処分第1次取りまとめ -, JAEA-Research 2015-016, 2015.
- 36) 横山信吾, 田中幸久: イオン交換水で飽和したベントナイト系材料の透水性と膨潤特性に及ぼす熱影響に関する実験的検討, 電力中央研究所報告, N11021, 2012.
- 37) 核燃料サイクル開発機構 東海事業所: 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験 (試験報告), JNC TN8430 2004-005, 2005.
- 38) NUMO (原子力発電環境整備機構): 科学的特性マップ, https://www.numo.or.jp/kagakutekitokusei_map/detail.html (2021年6月5日アクセス)
- 39) 丸井敦尚: 首都圏の深層地下水, 地学雑誌, 123(2), pp.172-181, 2014.
- 40) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: 人工海水環境下における各種ベントナイトの透水係数, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.2, pp.276-287, 2011.
- 41) 直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴: 各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響, 土木学会論文集, No.785/III-70, pp.39-49, 2005.
- 42) 核燃料サイクル開発機構東海事業所: 緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ, JNC TN8400 2005-020, 2005.
- 43) 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ルアナ

ログ研究の意義, 地質ニュース, 499号, pp. 13-22, 1996.

- 44) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集および整備, 平成21年度放射性廃棄物共通技術調査等, 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査報告書(第4分冊), pp.1-1-4-3, 2010.
- 45) Pusch, R., Karland, O.: Geological evidence of smectite longevity The Sardinian and Gotland cases, SKB Technical Report, TR88-26, 1988.

第2章 ベントナイト原鉱石の基本的性質

本研究で使用したベントナイト原鉱石は、山形県月布産の Na 型ベントナイト（以下月布産）、中華人民共和国吉林省劉房子産の Na 型ベントナイト（以下劉房子産）、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 Ten Sleep 産）の計 3 種である。本章では、これらの原鉱石に関する地質情報や、土質力学・粘土鉱物学における各種基本的性質について述べる。

2.1 使用したベントナイト原鉱石の地質情報

ベントナイトの成因として、一般に続成変質作用と熱水変質作用の 2 種類が挙げられる。前者は海底もしくは湖底に火山砕屑物が層状に堆積した後、経年とともに地中深くに埋没するのに伴い、作用する温度や圧力が高まることによって、含まれる鉱物が物理化学的に変質し、生成されたとされるものである。堆積した場所の水質に応じて、生成したベントナイトの交換性陽イオンの組成が変化するとされている。後者は、既に堆積した火山砕屑物に対して、地下から熱水が接触し、鉱物の熱変質に伴い生成されたとするものである¹⁾。本研究において用いた原鉱石は、月布産、Ten Sleep 産は前者の続成変質作用により生成されたと考えられており、劉房子産は前者の続成変質作用および後者の熱水変質作用の両方が考えられている。以下に各原鉱石の成因に関して地質学的検討を行っている既往の文献を示す。

2.1.1 月布産原鉱石の成因に関する既往の研究

伊藤ら²⁾は、原岩の地質年代、生成温度、熱履歴に関して調査した。ベントナイトの原岩である火山砕屑物の噴出年代の推定のため、ベントナイト中に含まれるジルコンのフィッシュトラック年代測定および K-Ar 年代測定を実施したところ、月布ベントナイト原岩は 1300~2000 万年前ごろに噴出したと推定された。生成温度に関して、ベントナイト中のスメクタイトの水素および酸素同位体比を測定したところ、海水の影響下において 58~69°C の温度下において生成されたと推定された。熱履歴に関して、ESR（電子スピン共鳴法）および熱ルミネッセンス法を実施したところ、地層中において約 30~40 万年前まで何らかの要因により熱を受けていた可能性が推定された。

澤田³⁾は、ベントナイト層の生成年代を硬質頁岩の堆積速度や沈降速度から逆算することにより、約 1000 万年前と推定している。また、地殻熱流量や熱伝導率および層厚から、約 8 万年前から 5 万年前にかけて 60°C 程の温度履歴を受けていた可能性が推察されている。以上より、月布ベントナイトは約 1000 万年前に堆積した火山砕屑物が海水影響下において

続成作用を受けて生成した可能性が考えられる。

図 2-1 に月布鉾山における積層状況の模式図⁴⁾を示す。これより、月布鉾山においてベントナイト層は地下 180m～260 m に存在していることがわかり、特に今回サンプリングした 29 番層は約 190 m に位置していることがわかる。また、各ベントナイト層は頁岩に挟まれていることや、ベントナイト層に付随して砂質凝灰岩も薄く存在していることがわかる。

図 2-2 に月布鉾山 29 番層にてサンプリングした原鉍石の様子を示す。なお、今回原鉍石をサンプリングした 29 番層は、垂直方向ではスメクタイト含有量に差異があり、上盤側の含有量が高くなっている。しかし、上盤側においては層理が見られるため、供試体成型時に割れが生じる可能性があるため、今回は下盤側よりサンプリングを行った。一方、水平方向での物性や品質の差異は小さいことから、坑内での採取場所は一か所とした。また、原鉍石サンプルは長辺がおおよそ 40 cm 程度の大きさとなっている。

月布ベントナイト層の積層状況 (ボーリングコアに基づく)

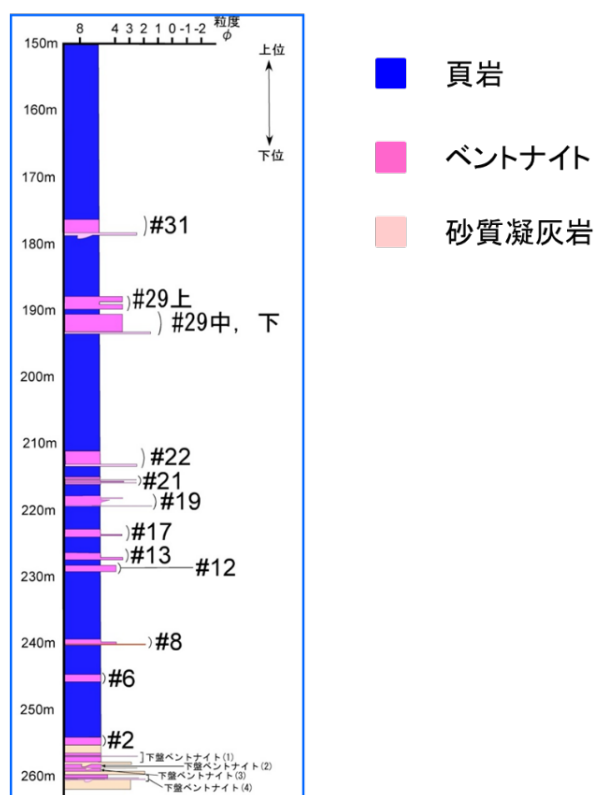


図 2-1 月布鉾山における積層状況の模式図⁴⁾

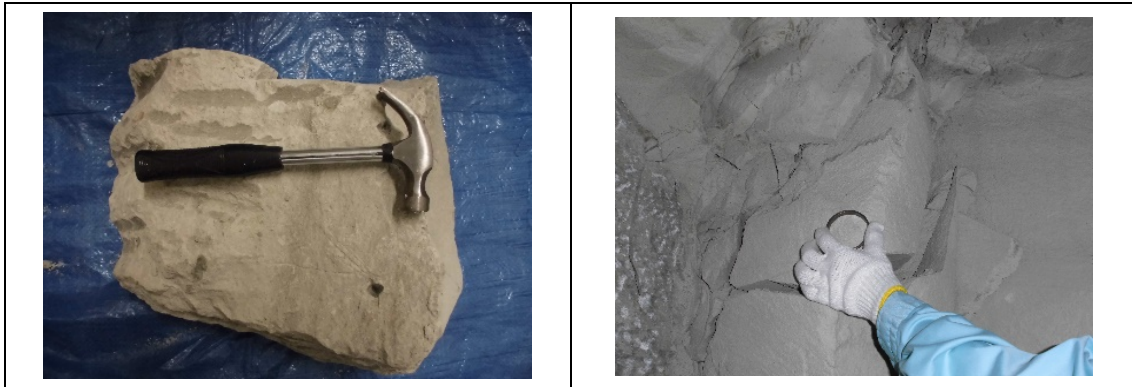


図 2-2 月布産ベントナイト原鉱石の様子（左：試料室での写真，右：月布鉱山 29 番層でのサンプリング時の写真）

2.1.2 劉房子産原鉱石の成因に関する既往の研究

Tomita ら⁵⁾によって、中国の Na 型ベントナイト 4 鉱床に関して、鉱物組成分析および CEC、EXC の測定が実施されており、対象試料の一つとして本研究でも用いている劉房子産ベントナイトが用いられている。劉房子産ベントナイトは、ジュラ紀後期頃（約 1 億 5000 万年前）に石炭とともに河川もしくは湖底に堆積した火山碎屑物が、アルカリ環境下において続成作用を受けて生成されたものと考察されている⁶⁾。また、劉房子鉱山での採掘を管理している吉林劉房子膨潤土科技有限公司のホームページによれば、続成変質作用の他に熱水変質作用の影響を受けた可能性についても記述されている⁷⁾。ベントナイト層はいずれも 1~2 m 程度の厚さであり、その間には砂質の礫岩、泥岩および石炭が存在している。ベントナイト層には傾斜があるものの、概ね地表から 200 m 程の深度に存在している⁸⁾。粉末試料に対して X 線回折分析を行ったところ、12.45 Å (d(001)) および 1.50 Å (d(060)) に Na 型モンモリロナイトのピークが現れた。また、少量の石英および長石が随伴鉱物として確認されている。CEC および EXC の測定結果として、CEC は 87.1 meq/100 g（試料 100 g が保持する交換可能な陽イオン量，すなわち試料の負電荷の値を示す），EXC は Na⁺が 60.0 meq/100 g，Ca²⁺が 5.7 meq/100 g，Mg²⁺が 3.10 meq/100 g，K⁺が 0.73 meq/100 g と示されている。図 2-3 に劉房子産ベントナイト原鉱石の様子を示す。



図 2-3 劉房子産ベントナイト原鉱石の様子

2.1.3 Ten Sleep 産の原鉱石の成因に関する既往の研究

Heathman⁸⁾によれば、アメリカ合衆国ワイオミング州に存在するベントナイト層は、火山灰が海底に堆積した後に、還元雰囲気の下盤中で水との接触や海水由来の塩類との接触により変質し、生成されたと考えられている。今回用いた原鉱石は、モーリー頁岩層の上部に位置するベントナイト層から採取したものであり、白亜紀中期のセノマニアン（約 1 億年前）に堆積した層（Clay Spur Bentonite）と考えられている⁹⁾。層の厚さは 1~2 m 程度であり、ワイオミング州西部~中部の Big Horn 地域のみが存在し、これは白亜紀前期までカナダ~アメリカ北中部に広がっていた Mowry Sea の範囲と重なっている。図 2-4 に Ten Sleep 産ベントナイトの様子（試料室でのサンプルおよびベントナイト層の露頭）を示す。

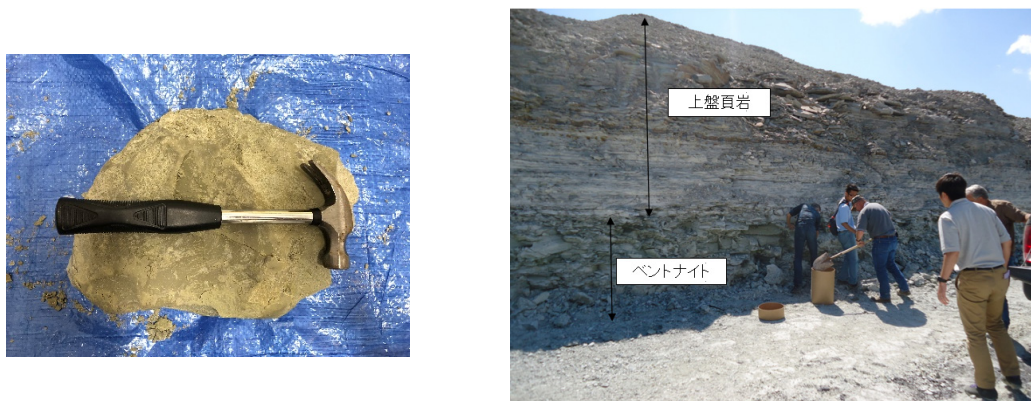


図 2-4 Ten Sleep 産ベントナイト原鉱石の様子（左：試料室での写真，右：採掘場所のベントナイト層の露頭（クミネ工業伊藤雅和氏撮影））

2.2 使用した原鉱石の基本的性質

本研究では、使用した原鉱石の基本的性質として、土質力学的諸性質（土粒子の密度、液性限界、塑性限界、浸出陽イオン量）と粘土鉱物学的諸性質（モンモリロナイト含有率、鉱物組成、膨潤力、膨潤層・非膨潤層割合）を調査した。本節では、これらの諸性質の試験方法および得られた結果について述べる。

2.2.1 土粒子の密度試験

ベントナイトのような吸水膨潤性を有する土質材料を用いて測定する場合、試料がピクノメーターの内壁にこびりつき、脱気が不十分となることが懸念される。また、煮沸による脱気では試料に熱を加えるため、主要な粘土鉱物であるモンモリロナイトの性状が変化する可能性が考えられる。以上より、ベントナイトの土粒子の密度を測定する際、従来の方法（日本工業規格(JIS A 1202:2009)「土粒子の密度試験方法」¹⁰⁾）では正確な値を求めることは困難である。そこで本研究では、小峯らにより実施された膨潤性土質材料の土粒子の密度試験に関する既往の研究¹¹⁾にならい、ベントナイト原鉱石の土粒子の密度試験を実施した。以下、試験の手順を示す。

- ① JIS 規格と同様、使用するピクノメーターの乾燥状態の質量と水で満たした状態の質量を予め測定した。
- ② 100 mL ビーカー内に蒸留水 50mL と、ベントナイトの粉末状試料 5g を投入した。なお、試料は原鉱石岩片を乾燥・破砕して粒径 0.425 mm 以下に調整したものを使用した。
- ③ 試料と蒸留水の入ったビーカーを超音波洗浄機内に入れ、ガラス棒による攪拌を行いながら試料を十分に分散させた。分散は試料のダマが目視で確認できなくなるまで継続した。今回用いた試料ではいずれも 10 分間の分散によりダマが消失したため、十分に分散されたとみなした。
- ④ 漏斗を用いて、ビーカーの内容物（試料の懸濁液）をピクノメーター内に移した。この時、ビーカー内部もしくは漏斗上に試料が残らないように、蒸留水を追加で投入して十分にゆすいだ。
- ⑤ 真空ポンプと接続したデシケーター内にピクノメーターを入れ、-98 kPa まで減圧させた。この時、一気に減圧すると試料の吹きこぼれ等が生じるため、1 時間ほどかけて徐々に圧力を低下させた。
- ⑥ ピクノメーターを減圧したデシケーター内に 7 日間置いた。なお、1 日に 1 回取り出して揺すり、気泡を除いて脱気を促進した。7 日後にデシケーターより取り出した後は、JIS 規格と同様の手順により土粒子の密度を算出した。

以下に減圧状態のデシケーター内に設置しているピクノメーターとベントナイト懸濁液

の様子を示す。

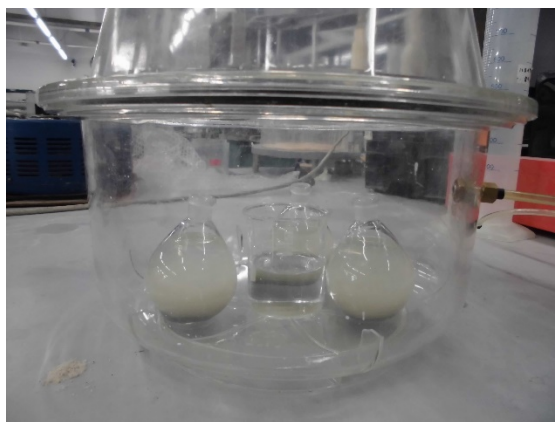


図 2-5 減圧状態のピクノメーターおよび試料

以下に月布産，劉房子産，Ten Sleep 産の粉末状試料について土粒子の密度試験を実施した結果を記載する。各サンプルについて再現性確認のため複数回試験を実施したため，標準偏差および試験数も併せて示した。

表 2-1 ベントナイト原鉱石の土粒子の密度試験結果

| | 月布産 | 劉房子産 | Ten Sleep 産 |
|----------------------------|-------|-------|-------------|
| 土粒子の密度(Mg/m ³) | 2.77 | 2.73 | 2.67 |
| 標準偏差 | 0.044 | 0.049 | 0.017 |
| 試験数 | 3 | 4 | 3 |

月布産原鉱石については，既往の研究^{12),13)}の値と比較しても同程度の値が求められたため，信頼性のあるデータを取得できたと言える。劉房子産原鉱石については，参考文献¹⁴⁾では 2.78 Mg/m³ と記載されており，概ね同程度の測定値といえる。Ten Sleep 産原鉱石については，同一鉱山で産出された原鉱石の基本的性質情報を探すことはできなかったが，同じワイオミング州産のベントナイトの測定結果が 2.60～2.70 Mg/m³ の範囲にあることから，本研究で得られた値は妥当なものと考えられる。

2.2.2 液性限界・塑性限界試験

液性限界は土質材料が塑性状態でいられる最大の含水比を指し，塑性限界は塑性状態でいられる最小の含水比を指す。日本工業規格（JIS A 1205：2009）「土の液性限界・塑性限界試験方法」¹⁵⁾では，含水比の低い試料を用いて試験を開始し，徐々に加水していくことで試料の含水比を高めると記載されている。しかし，ベントナイトのような膨潤性土質材料にお

いては、加水する度に膨潤することによって、試料の含水状態にバラつきが生まれ、再現性のある結果が得られないことが経験的に分かっている。そこで、本研究では膨潤性土質材料の液性限界試験に関する既往の研究¹¹⁾に基づき、ベントナイト原鉱石の液性限界試験を行った。なお、塑性限界に関しては日本工業規格に基づいて行った。以下に試験の手順を示す。

—液性限界試験—

- ① ステンレスバット内に、予想される液性限界よりも高い含水比となるよう試料と蒸留水を投入した。その後、ヘラを用いて試料と蒸留水をよくかき混ぜた。試料の投入量は100gとした。液性限界用試料の初期含水比は、月布産原鉱石は500%、劉房子産およびTen Sleep産原鉱石は600%をそれぞれ目標とした。
- ② ①で作製した試料を7日間養生させた。その際、水分の蒸発を抑制するため、ステンレスバットをラップ等で密閉した。
- ③ 養生した試料を液性限界試験用試料として用いた。養生後の試料を図2-6に示す。
- ④ 液性限界試験を行う際、ステンレスバット内より一部を取り出して試験に用いた。含水比を下げる場合、ドライヤーを用いて乾燥させた。その際、表面部のみ含水比が下がることが考えられるため、なるべく均一に含水比を下げられるようによくかき混ぜながら乾燥させた。なお、含水比を下げすぎてしまった場合にはその試料を捨て、新たにバット内から試料を取り出して試験を実施した。試料をドライヤーにより乾燥させている様子を図2-7に示す。
- ⑤ 上にて述べた部分以外は日本工業規格に従って試験を実施し、液性限界を求めた。

—塑性限界試験方法—

- ① 試料30gを用意し、試料が団子状になるように蒸留水を加え、含水比を調整した。試料の一部を用いてひも状になるように手で転がした。直径3mm程度のひも状の状態で試料が切れ切れになった時、その試料の含水比を測定し、塑性限界とした。



図 2-6 蒸留水を加え養生させた後の試料の様子

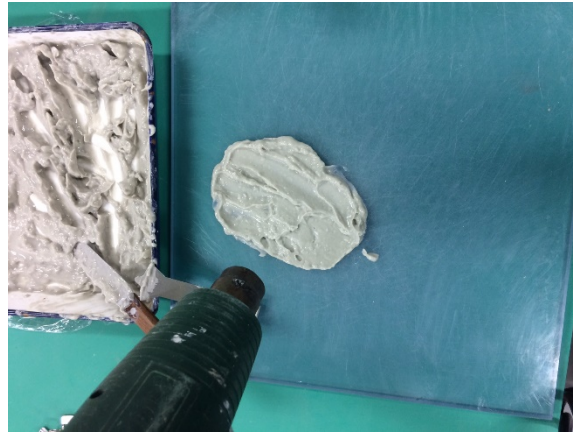


図 2-7 ドライヤーにより試料の含水比調整を行っている様子

以下に各サンプルにて得られた液性限界，塑性限界および塑性指数の値を示す。

表 2-2 液性限界，塑性限界試験結果

| | 月布産 | 劉房子産 | Ten Sleep 産 |
|----------|-------|-------|-------------|
| 液性限界 (%) | 419.1 | 541.6 | 588.2 |
| 塑性限界 (%) | 29.2 | 35.6 | 57.2 |
| 塑性指数 | 389.9 | 506.0 | 531.0 |

表 2-2 より，月布産原鉱石の液性限界は 400%を少し超えた値で，塑性限界は 30%程度の値，そして塑性指数は 400 程度の値となった。この値はクニゲル V1 原鉱石を用いた既往の研究の結果¹²⁾と比較して同程度の値となったため，信頼のおけるデータであると考えられる。劉房子産原鉱石については既往の文献¹⁴⁾において液性限界が 439%，塑性限界が 32.3%と記載されており，塑性限界は同程度の値であったものの，液性限界が約 100%異なる値であった。この理由として，試料の粒径の差異および鉱山内における採掘場所の差異の影響が

考えられる。すなわち、試料の粒径が異なると、モンモリロナイトと水分との接触の度合いが異なり、液性限界の値が変わる可能性が考えられる。Ten Sleep 産原鉱石については、同じワイオミング産ベントナイトの液性限界が 500~650%程度で、塑性限界が 40~60%と述べられている¹⁶⁾ことから、本研究で得られた値は概ね妥当な値といえる。

2.2.3 浸出陽イオン量測定試験

モンモリロナイトを含む各種粘土鉱物においては、鉱物表面に負電荷が存在しており、双極子である水分子および陽イオンを吸着している。鉱物表面の電荷総量、すなわち鉱物が吸着できる陽イオンの総量を陽イオン交換容量 (Cation Exchangeable Capacity, CEC) と呼ぶ。また、鉱物表面に吸着している陽イオンは複数種類により構成されており、これを浸出陽イオン (Leached Cation, LC) あるいは交換性陽イオン容量 (Exchangeable Cation, EXC) と呼ぶ。一般に、モンモリロナイト結晶に吸着しているイオン種は Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} である。

CEC の測定においては、鉱物表面に吸着される陽イオンよりも吸着されやすい陽イオンを含む溶液で試料を洗浄し、強制的に鉱物表面の陽イオンを交換する。洗浄前後の溶液濃度を測定し、その差分を陽イオン交換に消費されたものとして試料の陽イオン交換容量を求める。また、試料にもともと吸着していた各陽イオンは洗浄時に溶液中に溶出するため、溶液の各イオン濃度を測定することで LC を求める。以下に、各陽イオンにおけるイオン交換反応における選択性に関する順序を示す。この関係の内、右側の陽イオン程モンモリロナイトの結晶層間中に交換性陽イオンとして存在しやすくなることを表している。



CEC・LC の測定においては、イオン交換に用いる溶液が異なる複数の方法が存在する。地盤工学会基準¹⁷⁾では、塩化バリウムを用いてイオン交換を行う。しかし、本基準における溶液濃度および洗浄回数では、ベントナイトの CEC・LC を求めるには不十分であり、正確な値が求められないことが示唆されている¹⁸⁾。また、粘土科学分野で古くから行われている酢酸アンモニウムを用いる方法 (ショーレンベルジャー法) では、ベントナイト中の方解石が溶出してしまい、 Ca^{2+} イオンを過剰に評価してしまうことが指摘されている¹⁹⁾。本研究では、ベンジルトリメチルアンモニウムクロリド溶液 (以下、BTM 溶液) を用いた、SFSA (Steel Founder's Society of America) 法をクニミネ工業により改良された方法 (SFSA 改良法) を用い、CEC・LC を求めた。

—試験手順—

- ① 粒径 0.425 mm 以下に調整した粉末試料を 110°C に設定した恒温乾燥炉内にて 1 日間乾燥させ、シリカゲルを入れたデシケーター内で室温になるまで放冷させた。
- ② 試料 0.5 g を分解能 0.001 g の秤を用いて分取した。
- ③ 6%BTM 溶液 50 mL を、ホールピペットを用いて 200 mL コニカルビーカーに採取した。

- ④ 試料が壁面に付着しないよう注意しながら、コニカルビーカー内の BTM 溶液中に投入した。ビーカーを超音波分散器内に置いて 20 分間試料を分散させ、その後室温に戻るまで 1 時間程度放冷させた。
- ⑤ ルアーロック式注射器内に試料の分散した溶液を 8 mL ほど採取し、0.45 mm シリンジフィルターを取り付けて濾過し、浸出液とした。
- ⑥ 浸出液 2 mL をホールピペットにより分取し、50 mL メスフラスコに投入して蒸留水でメスアップした。
- ⑦ Na, Ca, Mg, K の標準溶液, BTM 溶液 2 mL を 50 mL メスフラスコに投入し、蒸留水 50 mL でメスアップし、検量線作成用溶液とした。
- ⑧ ICP-OES を用いて測定溶液の Na, Ca, Mg, K イオン濃度を測定し、浸出陽イオンを算出した。

以下に、各原鉱石および製品ベントナイト・クニゲル V1 (クニミネ工業製、以下 K_V1) で得られた浸出陽イオン量測定結果を示す。

表 2-3 各浸出陽イオン量測定結果

| | 月布産 原鉱石 | Ten Sleep 産 原鉱石 | 劉房子産 原鉱石 | K_V1 |
|--|------------|--------------------|-------------|---------|
| 浸出 Na ⁺ イオン量 (meq/100g) | 43.7 | 60.7 | 48.8 | 53.8 |
| 浸出 Ca ²⁺ イオン量 (meq/100g) | 5.6 | 14.4 | 21.0 | 35.5 |
| 浸出 Mg ²⁺ イオン量 (meq/100g) | 0.9 | 0.4 | 3.4 | 1.6 |
| 浸出 K ⁺ イオン量(meq/100g) | 定量下限値以下 | | 0.6 | 定量下限値以下 |

これより、各原鉱石のモンモリロナイトにおいて Na⁺イオンが最も多く、Ten Sleep 産、劉房子産においては Ca²⁺イオンも多く吸着されていることが分かった。これより、3 種類の原鉱石のいずれも、Na 型ベントナイトに区分されることが確認された。

2.2.4 モンモリロナイト含有率取得に向けたメチレンブルー吸着試験

ベントナイト試料中のモンモリロナイト含有量を明らかにすることは、試料の物理化学的性質を評価するうえで極めて重要である。モンモリロナイト含有率を求める方法として、わが国では一般にメチレンブルー吸着試験が行われている^{20),21)}。メチレンブルー吸着試験では、電離すると一価の陽イオンとなるメチレンブルーをモンモリロナイトに吸着させ、吸

着終了時の滴定量をもとにモンモリロナイト含有率を求めるものである。試験基準は JIS 規格²²⁾で規定されており、本研究は JIS 規格のうちスポット法に則って行った。

—試験手順—

- ① 粒径 0.425 mm まで粉砕した試料の含水比を測定し、乾燥試料 0.5 g に相当する量を分解能 1 mg の秤を用いて測り取った。
- ② 20 g/L ニりん酸ナトリウム溶液 50 mL をメスシリンダーにより採取し、コニカルビーカーに入れた後、①で測り取った試料を投入した。ビーカーを超音波分散器内に置き、20 分間超音波処理により分散させた。その後、室温になるまで放冷させた。
- ③ ビーカーに攪拌子を入れてマグネチックスターラー上に置き、溶液がビーカー外に跳ね出ない程度の回転数に調整した。その後、0.01 mol/L メチレンブルー溶液を 20 mL 投入し、2 分間攪拌させた。
- ④ 容量 1~2 mL のスポイトを用いて溶液を採取し、ろ紙のおもて面上に置いて直径 10 mm 程度のスポットを作製した。
- ⑤ ピペットを用いてメチレンブルー溶液を 1 mL ずつ加え 30 秒攪拌した後、溶液を採取してスポットを作製した。スポットの周囲にハロー（スポットよりも明るい青色のにじみ）が生じるまで、この操作を随時繰り返した。
- ⑥ ハローが確認された場合、溶液を更に 2 分間攪拌した後、再度スポットを作製した。この、追加の 2 分間攪拌後に作製したスポットのハロー幅が 1.5 mm 程度となった時に終点と認定した。
- ⑦ 加えたメチレンブルー溶液量 (mL) を乾燥試料質量 (g) で除して、ベントナイト 100 g 当たりのメチレンブルー吸着量 (mmol) を算出した。
- ⑧ ③の操作で最初に投入したメチレンブルー溶液量が終了時消費量の 65~85%の範囲に入っている場合、データとして採用した。入っていない場合、範囲内に入るまで③からの操作を再度行った。
- ⑨ (⑧でデータを採用した場合) ③から⑦の操作を再度行った。1 回目と 2 回目のベントナイト 100 g 当たりのメチレンブルー吸着量 (mmol) の差異が 5 mmol 以内であれば、2 回の測定値の算術平均値の四捨五入した整数値を測定結果とした。

表 2-4 に、各原鉱石の平均吸着量 (mmol/100 g)、モンモリロナイト含有率 (%) を示す。なお、モンモリロナイト含有率は、各試料の吸着量を純モンモリロナイト試料のメチレンブルー吸着量 (140 mmol/100 g)²³⁾で除すことで算出した。

表 2-4 メチレンブルー吸着試験結果

| 試料名 | 平均吸着量 (mmol/100 g) | モンモリロナイト含有率(%) |
|-------------|-----------------------|----------------|
| 月布産 | 62.6 | 44.7 |
| Ten Sleep 産 | 70.6 | 50.4 |
| 劉房子産 | 71.5 | 51.1 |

以上の結果から、月布産のモンモリロナイト含有率が約 45%と、クニゲル V1 (K_V1) のモンモリロナイト含有率 (55%程度) と比較して低い値となっている。この理由として、K_V1 を製品化する際に比重の大きい石等が除去されること (戻りぬき) を踏まえると、今回用いた原鉱石には K_V1 より随伴鉱物が多く含まれており、モンモリロナイト含有率が低くなったことが考えられる。劉房子産の値は既往の研究¹⁴⁾において 52%と述べられており、今回得られた結果は妥当な値であると言える。

2.2.5 X線回折による鉱物組成分析

ベントナイト原鉱石の性状を把握・評価するうえで、モンモリロナイトをはじめとする含有鉱物を同定し、定量評価することは極めて重要である。岩石の結晶構造を分析する方法の一つとして、鉱物同定が可能な X 線回折分析 (XRD, X-ray Diffraction) がある。XRD では、結晶のように原子の集団が周期的に配置されていて、各原子によって散乱される X 線の位相が揃った時に、互いに干渉して回折現象を起こす事を利用している。X 線が回折する条件は、Bragg の法則によって表される。すなわち、X 線の回折を光の反射と同義とし、原子で構成される層によって X 線が反射されるとしたものである。隣り合う層によって反射される X 線の行路差が、波長の整数倍に等しい時、反射 X 線の位相は一致し強くなる。その時の入射角の値から式(2-1)を用いて結晶層の間隔を把握し、結晶の物質を特定する。図 2-8 に X 線回折の原理を示す²⁴⁾。

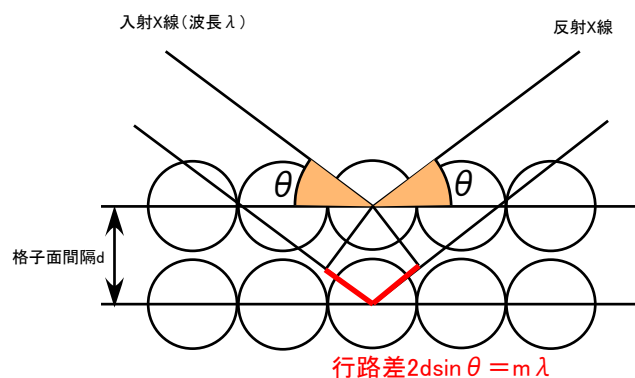


図 2-8 X線回折の原理

以下に Bragg の法則の理論式である，式(2-1) を示す．

$$2d\sin\theta = m\lambda \quad (2-1)$$

ここに， d ：結晶層間距離， θ ：回折角， λ ：波長， m ：整数である．

まず，各原鉱石の構成鉱物を定性的に把握するため，粒径 0.425 mm 以下の粉末試料に対して XRD 測定（不定方位法）を実施した．以下，本研究で用いた X 線回折装置は早稲田大学物性計測センターラボが保有する Rigaku 社製 RINT-UltimaIII（図 2-9）である．試料は図 2-10 に示すように，窪み付きガラス板に刷り込んで測定に供した．また，本試験の測定条件を表 2-5 に示す．

表 2-5 構成鉱物定性分析の測定条件

| | |
|----------|---------|
| 光学系 | 集中法 |
| 測定範囲 | 5°～60° |
| ステップ | 0.02° |
| スキャンスピード | 10°/min |
| 発散スリット | 2/3° |
| 散乱スリット | 8.00mm |
| 受光スリット | 13.00mm |



図 2-9 汎用多機能 X 線回折装置 (RINT-UltimaIII)

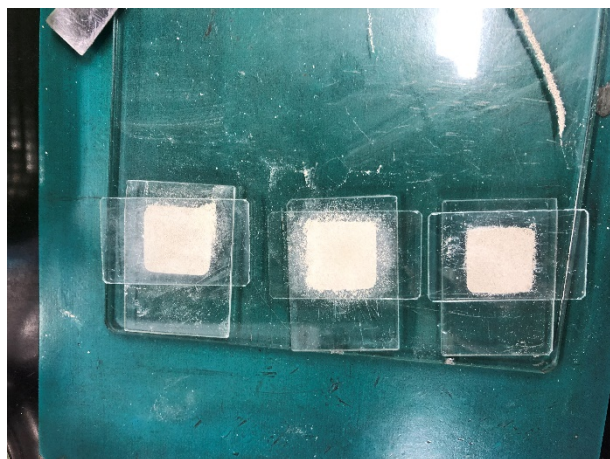


図 2-10 ガラス版に刷り込んだ試料の様子

以上の条件で得られた各原鉱石の X 線回折分析結果を図 2-11 に示す。これより、月布産原鉱石では、モンモリロナイト、石英の他に、黒雲母、斜長石、カルサイトが同定された。**Ten Sleep** 産原鉱石ではモンモリロナイト、石英、雲母、クリストバライト、斜長石、カルサイトが同定された。劉房子産原鉱石では、モンモリロナイト、石英、斜長石、カルサイトが同定された。

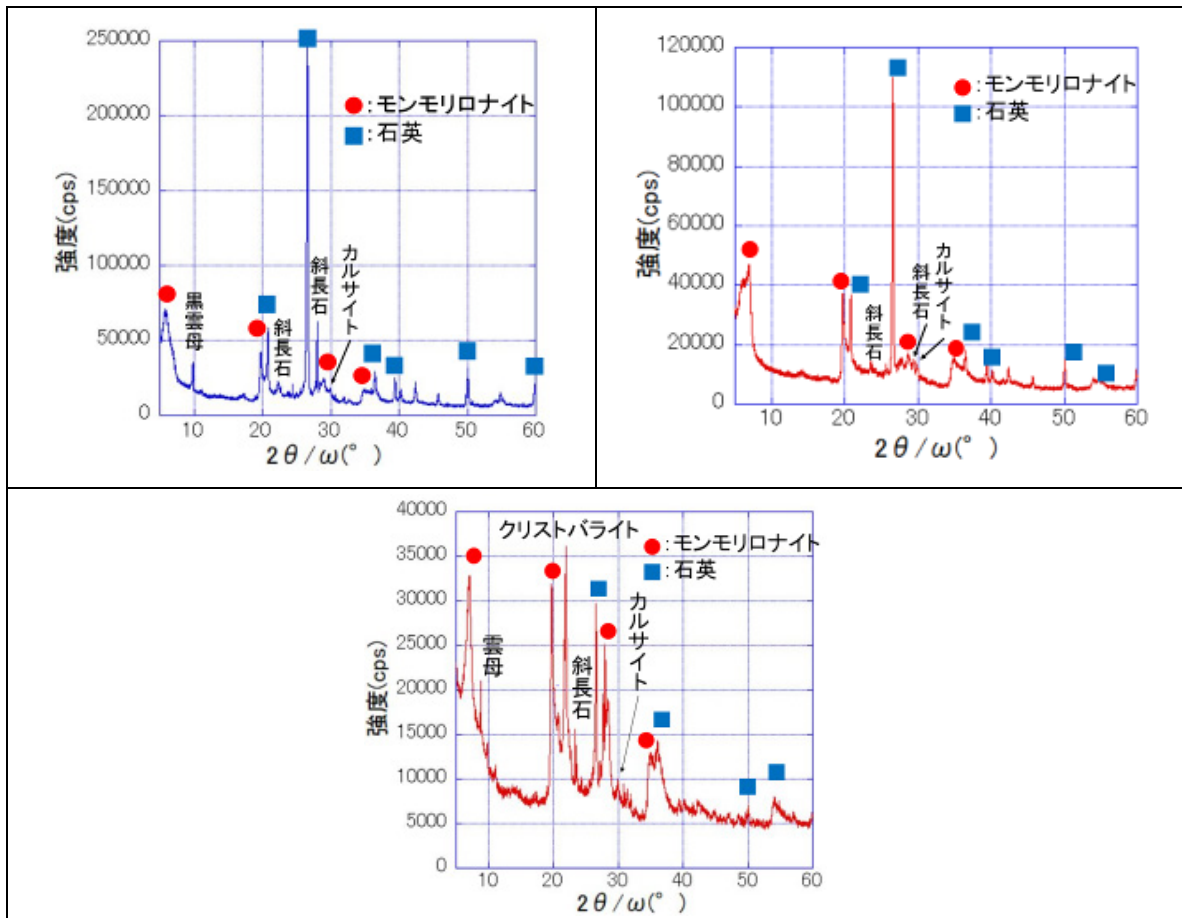


図 2-11 各原鉱石の粉末試料の鉱物組成分析結果（1 段目左：月布産，1 段目右：劉房子産，2 段目：Ten Sleep 産）

続いて、モンモリロナイトが含まれた状態では、最も含有量の多いモンモリロナイトのピークが強調されることにより、それ以外の随伴鉱物の同定が困難であると考え、モンモリロナイトを除去した状態の試料を準備し、不定方位法で随伴鉱物の定性分析を行った。

まず、湿潤状態の原鉱石試料 30 g を蒸留水 200 mL 中に 1 週間以上静置した。静置した試料を 20 μm ふるい上に移し、流水を用いてモンモリロナイトとその他の鉱物の分離を行った。その後、ふるい上に残った試料に対し、更に 5 分程度、水道水によりモンモリロナイトを洗い流した。その後、40°C に設定したインキュベータ内で 3 時間程度乾燥させ、ふるい上の試料を回収した。図 2-12 に蒸留水中に静置した試料の様子とふるい上残留分の様子を示す。



図 2-12 蒸留水中に静置した原鉍石試料の様子（左 4つの内、左から月布産，Ten Sleep 産，劉房子産）と劉房子産原鉍石の洗い出し中のふるい上残留分の様子（右）

ふるい残留試料をメノウ乳鉢によりすりつぶし，スライドガラスの窪みに充填して XRD 測定に供した．測定結果におけるバラつきを考慮して，各試料に対し 3 回測定を行った．XRD 測定条件を表 2-6 に示す．

表 2-6 測定条件

| | |
|----------|----------|
| 光学系 | 集中法 |
| 測定範囲 | 2.7°～45° |
| ステップ | 0.02° |
| スキャンスピード | 10°/min |
| 発散スリット | 1/8° |
| 散乱スリット | 8.00mm |
| 受光スリット | 13.00mm |

以下の図 2-13～図 2-15 に，月布産，Ten Sleep 産，劉房子産の随伴鉍物分析結果を示す．

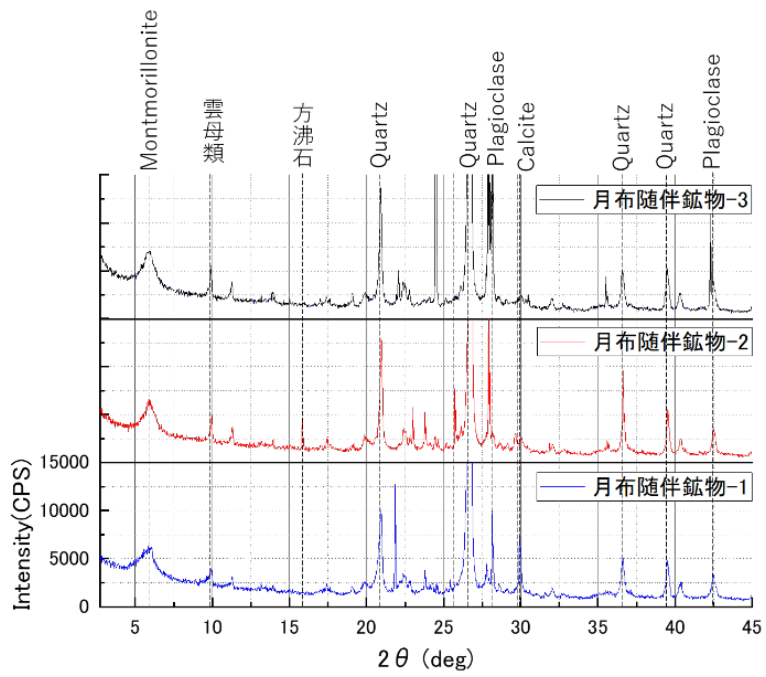


図 2-13 月布産原鉱石の随伴鉱物分析結果

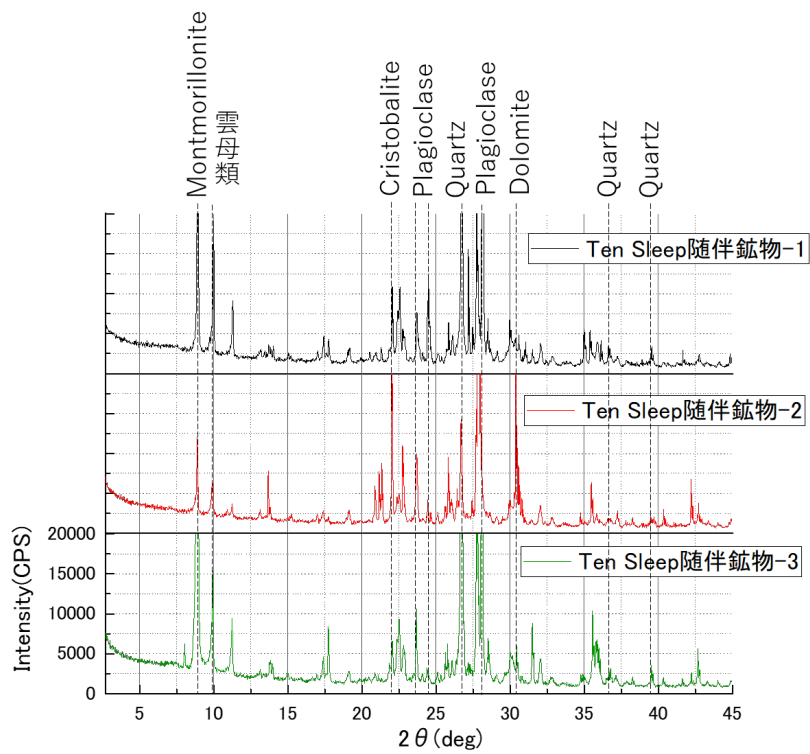


図 2-14 Ten Sleep 産原鉱石の随伴鉱物分析結果

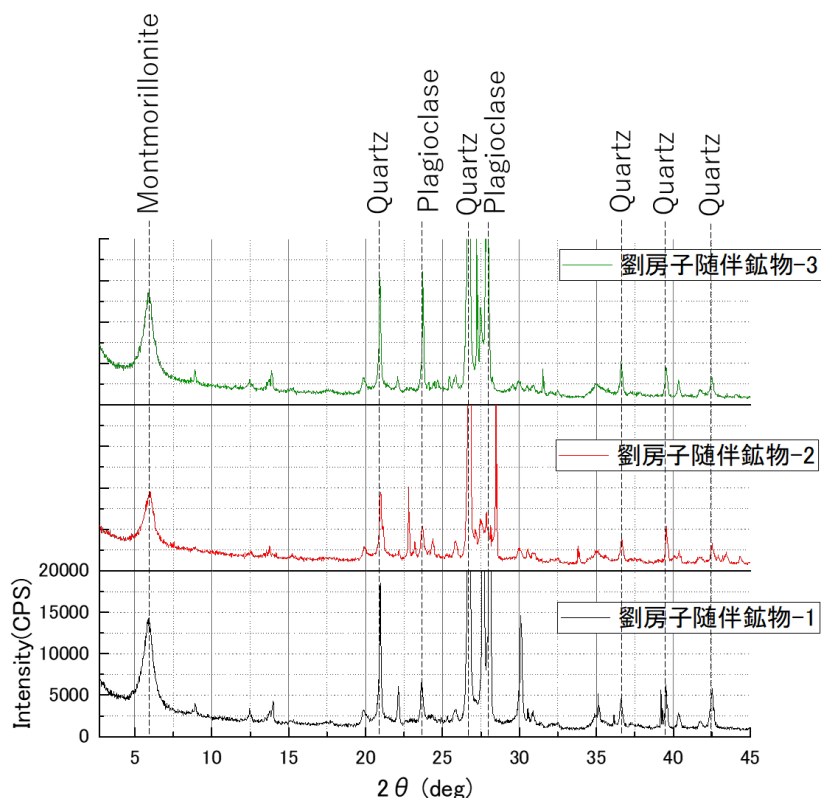


図 2-15 劉房子産原鉱石の随伴鉱物分析結果

これより、いずれの試料もモンモリロナイトが残存しているものの、随伴鉱物のピークは不定方位法 (図 2-11) より明瞭に確認できた。月布産原鉱石においては、雲母、方沸石、石英、斜長石、カルサイトが同定された。Ten Sleep 産原鉱石においては、雲母類、クリストバライト、斜長石、ドロマイトが同定され、劉房子産原鉱石においては、斜長石、石英が同定された。

また、原鉱石中の鉱物組成を定量評価するために、XRD を用いた含有鉱物の定量評価方法の一つである、内部標準法を実施した。内部標準法では、対象試料中の各鉱物の標準試料に対して一定の既知物質を加え、回折強度の面積を計算し、両者の面積比と鉱物の標準試料含有割合との関係 (検量線) を作製する。この検量線にもとづき、対象試料に対して検量線作成時と同じ既知物質を加えて、各鉱物と既知物質の回折強度面積比を計算することで、試料中の各鉱物の含有割合を求める²⁵⁾。ベントナイトに対して内部標準法を実施した研究事例として、動力炉・核燃料開発事業団による研究²³⁾や諸留らの研究²⁶⁾がある。図 2-16 に一例として、検量線を用いた石英の重量含有割合の求め方を示す。

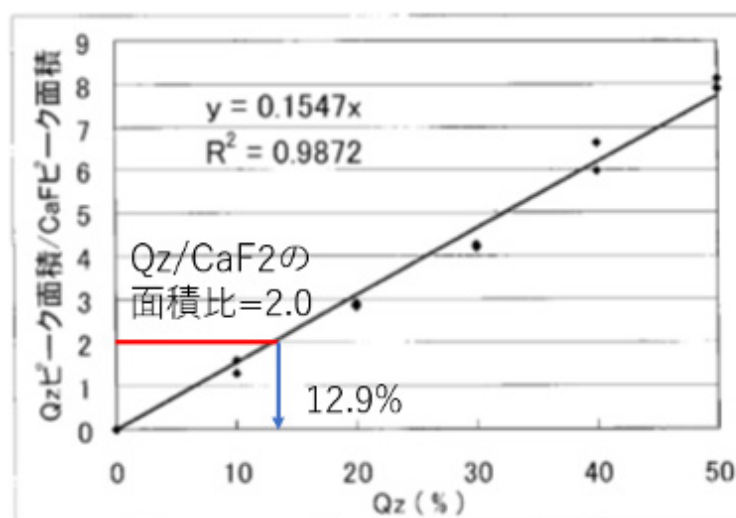


図 2-16 検量線を用いた石英の重量含有割合の算出例（参考文献 26 に加筆）

表 2-7 各鉱物の検量線データ²⁶⁾

| 鉱物名 | 検量線 (x: 各鉱物の重量割合, y: 各鉱物のピーク面積/CaF ₂ の面積) |
|-----------|--|
| 石英 | y=0.1547x |
| クリストバライト | y=0.1238x |
| 斜長石 | y=0.0496x |
| カルサイト | y=0.0815x |
| ドロマイト | y=0.1105x |
| クリノプチロライト | y=0.01x |
| パイライト | y=0.0196x |

試料の準備に当たっては、まず 110℃に設定した乾燥炉内に 24 時間置いて乾燥させたベントナイト試料 0.5 g に対して、重量比で 10%となる 0.05 g のフッ化カルシウム (CaF₂) を添加した。この混合試料をメノウ乳鉢を用いて、5 分間粉碎・混合を行い、XRD の測定に供した。表 2-8 に XRD の測定条件を示す。

表 2-8 XRD の測定条件

| | |
|-------|---------|
| 方法 | 集中法 |
| 測定範囲 | 2.7~60° |
| スピード | 10°/min |
| ステップ幅 | 0.02° |

以下に、内部標準法による鉍物定量結果について述べる。まず、図 2-17~図 2-20 に、それぞれ月布産原鉍石+CaF₂ 10%混合試料、Ten Sleep 産原鉍石+CaF₂ 10%混合試料、劉房子産原鉍石+CaF₂ 10%混合試料および CaF₂ 単体の XRD 結果を示す。

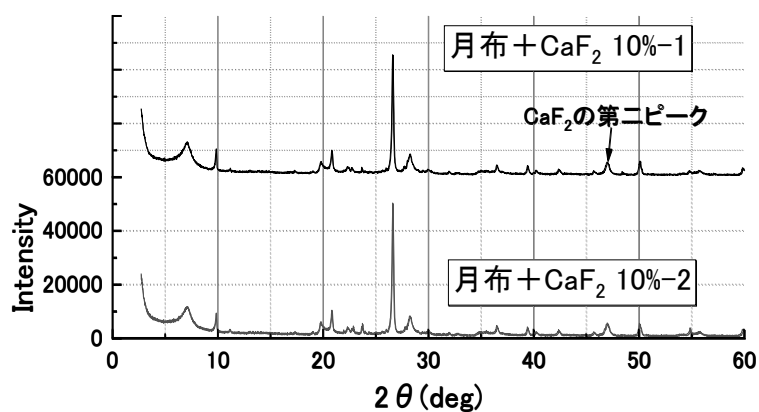


図 2-17 月布産原鉍石+CaF₂ 10%混合試料の XRD 結果

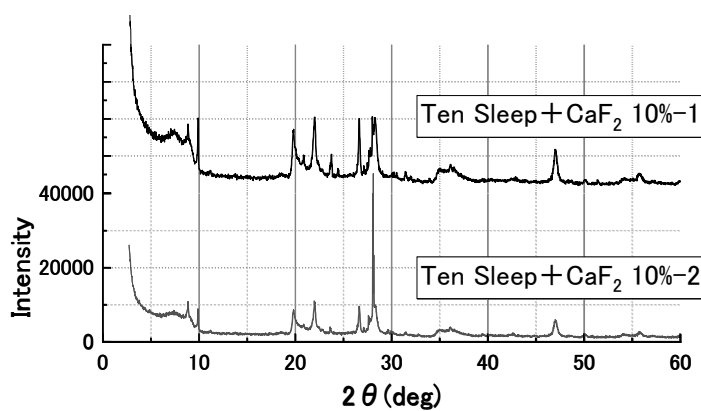


図 2-18 Ten Sleep 産原鉍石+CaF₂ 10%混合試料の XRD 結果

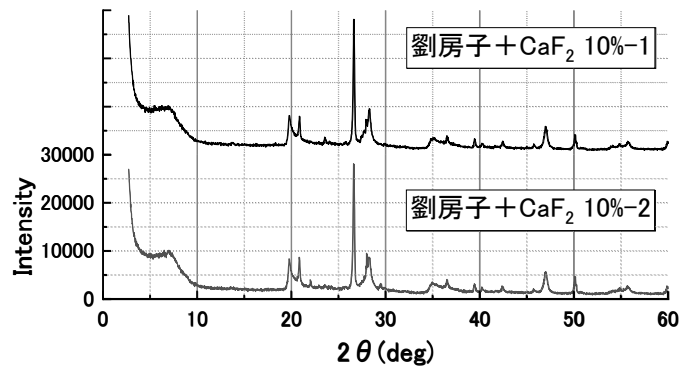


図 2-19 劉房子産原鉍石+CaF₂ 10%混合試料の XRD 結果

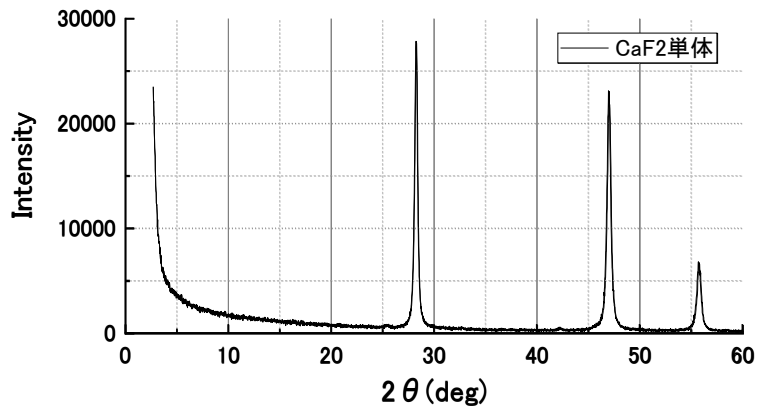


図 2-20 CaF₂ 単体試料の XRD 結果

次に、表 2-9～表 2-11 に、各原鉍石の重量比による各鉍物の含有率の算出結果を示す。また、図 2-21 に各原鉍石における、各鉍物の重量割合に関する棒グラフを示す。

表 2-9 月布産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果

| | 月布-1 | 月布-2 | 平均 | 諸留ら ²⁶⁾ (K_V1) ※ |
|---------------------------|------|------|------|--------------------------------|
| 石英 | 25.9 | 27.8 | 26.9 | 18.9 |
| カルサイト | 2.8 | 3.9 | 3.4 | 2.5 |
| 斜長石 | 11.7 | 19.7 | 15.7 | 2.2 |
| クリストバライト | - | - | - | 0 |
| ドロマイト | - | - | - | 微量 |
| クリノプチロライト | - | - | - | 微量 |
| ※モンモリロナイト (MB 吸着量より算出) | 44.7 | | | 57.3 |
| 合計 | 85.1 | 96.1 | 90.7 | 80.9 |

※K_V1 は製造過程で随伴鉱物がある程度除去されており、月布産原鉱石の粉末試料とは異なるため、参考値

- : ピークが見られなかったことを意味する

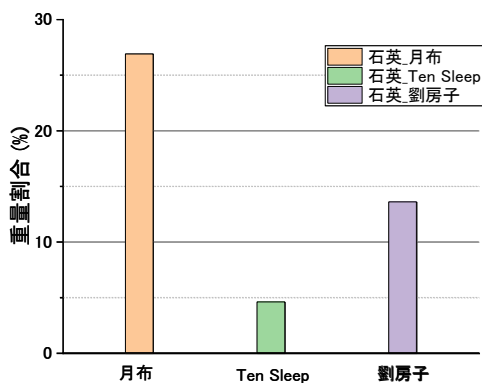
表 2-10 Ten Sleep 産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果

| | Ten Sleep-1 | Ten Sleep-2 | 平均 |
|---------------|-------------|-------------|------|
| 石英 | 4.3 | 4.9 | 4.6 |
| カルサイト | - | 4.9 | 2.5 |
| 斜長石 | 21.4 | 22.0 | 21.7 |
| クリストバライト | 11.7 | 10.2 | 11.0 |
| ドロマイト | 1.0 | 1.3 | 1.2 |
| クリノプチロライ ト | - | - | - |
| ※モンモリロナイ ト | 51.1 | | |
| 合計 | 89.5 | 94.4 | 92.1 |

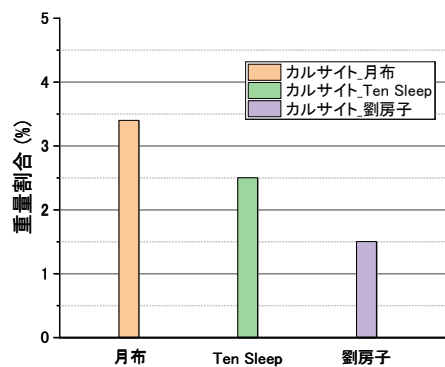
表 2-11 劉房子産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果

| | 劉房子-1 | 劉房子-2 | 平均 |
|---------------|-------|-------|------|
| 石英 | 14.1 | 13.1 | 13.6 |
| カルサイト | - | 3.0 | 1.5 |
| 斜長石 | 33.2 | 26.7 | 30.0 |
| クリストバライト | - | 0.7 | 0.4 |
| ドロマイト | - | - | - |
| クリノプチロライ ト | - | - | - |
| ※モンモリロナイ ト | 50.4 | | |
| 合計 | 97.7 | 93.9 | 95.9 |

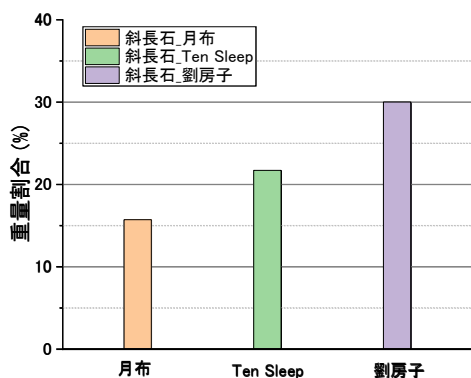
3種類の前鉱石において、斜長石（28.2°付近）のピークが強く存在しており、含有量が20%を超え、特に劉房子産では30%程度と極めて高い結果となった。その他、石英およびクリストバライトといったケイ酸鉱物の含有量も多い結果が得られた。また、本研究で得られた結果と諸留らの研究²⁶⁾のいずれにおいても、精製前のK_V1やその他のベントナイトにおいて、各鉱物の値を合計しても80~90%程度と、100%には届かない結果であった。



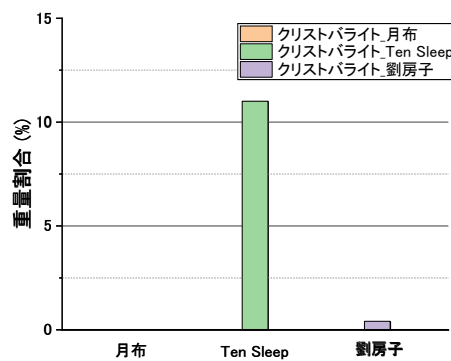
(a)石英の重量割合



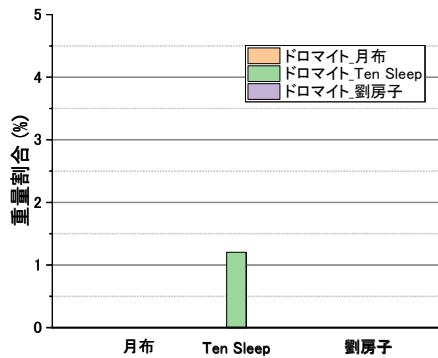
(b)カルサイトの重量割合



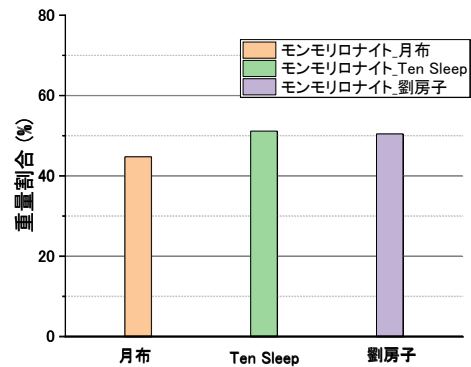
(c)斜長石の重量割合



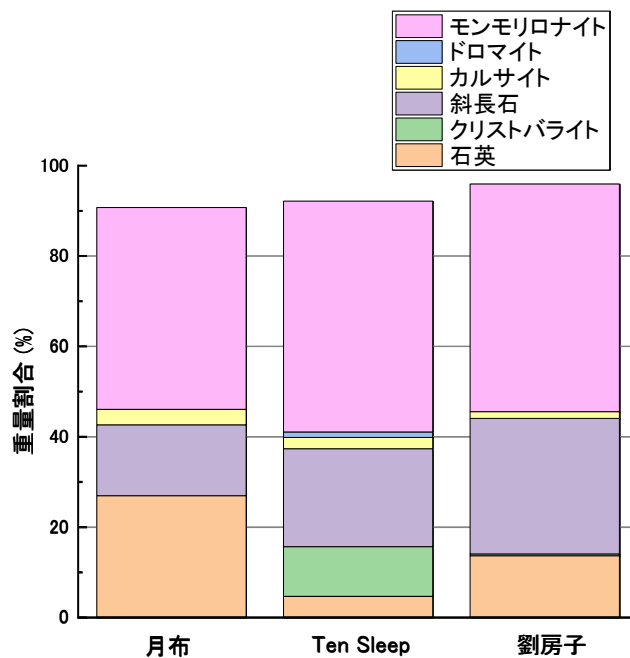
(d)クリソバライトの重量割合



(e) ドロマイトの重量割合



(f) モンモリロナイトの重量割合



(g) 各鉱物の重量割合に基づく積み上げ棒グラフ

図 2-21 各鉱物の重量割合に関する棒グラフ

これより、石英については月布産原鉱石の値が約 30%と、その他の原鉱石に比べて 2 倍以上多い割合で含有していることが分かった。カルサイトについては、いずれの原鉱石も 1~3%と微量で含有することが分かった。斜長石については、いずれの原鉱石も 15~30%と非常に多く含んでいることが示唆された。クリストバライトについては、Ten Sleep 産のみにおいて、10%程度含まれている結果となった。ドロマイトは Ten Sleep 産原鉱石のみにおいて、約 1%含まれている結果であった。

更なる精度向上の方法として、洗い出し後の XRD 測定結果も踏まえて、今回取り上げた鉱物以外にも含有されていると考えられる雲母類等の鉱物について、同様に検量線を作成し、内部標準法による定量を行うことが挙げられる。

2.2.6 膨潤力測定試験

ベントナイトの膨潤性の簡易的な評価指標として膨潤力が挙げられる。これは、所定の量のベントナイトを蒸留水 100 mL 中に投入し、24 時間体積拘束のない条件下で膨潤させた場合の体積量を読み取るものである。日本ベントナイト工業会標準試験方法²⁷⁾に則って実験を行った。以下に実験手順を示す。

- 1) 粒径 0.425 mm 以下まで粉碎した粉末状試料を室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室内に置き、乾燥させた。
- 2) 100 mL のメスシリンダー中に蒸留水を 100 mL 注ぎ、試料を 2.0 g 測り取った。
- 3) 薬さじを用いて試料を蒸留水中に加えた。試料がメスシリンダー内壁に付着しないように一回の投入量を調整し、約 10 回に分けて投入した。またこの時、前の投入試料がメスシリンダーの底まで沈着してから次の試料を投入した。
- 4) 試料を投入し終わったら、水分の蒸発を防ぐためメスシリンダーの開口部をパラフィルムで覆った。
- 5) そのまま 24 時間放置し、試料の膨潤後の体積をメスシリンダーの目盛りから読み取って、膨潤力 (mL/2 g) とした。

図 2-22 に膨潤力測定の様子を示す。また、表 3-4 に膨潤力測定結果を示す。

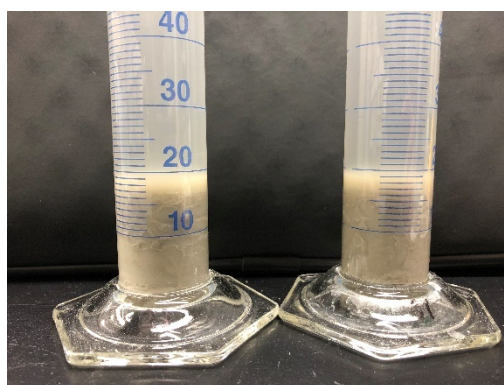


図 2-22 膨潤力測定の様子

表 2-12 膨潤力測定結果

| 試料名 | 膨潤力 (mL/2 g) |
|-------------|--------------|
| 月布産 | 12 |
| Ten Sleep 産 | 16 |
| 劉房子産 | 13 |

以上より、12～16 mL/2 g の範囲であることが分かった。既往の研究¹⁶⁾では、月布産では 18 mL/2g、ワイオミング産では 20～30 mL/2g、中国産では 16 mL/2g と求められており、いずれも本研究の方が小さく留まった。この理由として、粉碎後の粒径の影響およびモンモリロナイト含有率の差異が考えられる。膨潤力測定試験方法において、測定に供する試料の粒径については記載や制限がなく、本研究では 0.425 mm 以下と製品ベントナイトに比べて粒径の大きい状態で測定したため、モンモリロナイトと水の接触が十分になされなかった可能性が考えられる。

2.2.7 膨潤層・非膨潤層判定試験

ベントナイト試料の膨潤特性を規定するのはモンモリロナイトであるが、その結晶の一部において交換性陽イオンが K^+ イオンが支配的となる場合、膨潤性を有さないイライトに変質している可能性がある。本研究では、渡辺の研究²⁸⁾に基づき、エチレングリコール処理により試料中のモンモリロナイト層の存在割合を判定し、試料中に非膨潤層が存在することによる膨潤特性への影響について評価した。

試験手順は以下の通りである。

—ベントナイトの水籤作業—

- ① ベントナイト原鉱石を 0.425 mm 以下に破碎した試料を準備し、50 mL 遠沈管内に 0.50 g 投入した。
- ② 試料と水の合計体積が 45 mL となるよう蒸留水を加えた。
- ③ 超音波処理により目視でダマが消失するまで分散させた。この時、熱により試料の変質が懸念されるため、定期的に超音波装置より取り出して冷やした。
- ④ 遠心分離機を用いて、1000 rpm のもとで 4 分間遠心分離処理を行った。
- ⑤ 遠沈管底部の沈殿物を取らないよう注意しながら、スポイトで上澄み液を採取した。
- ⑥ 真空槽内で水分を飛ばし、残存物を水籤ベントナイト試料として用いた。

—エチレングリコール処理—

- ① 水籤試料を 5 mg, 10 mg ずつ分取し、舟型皿に測り取った。
- ② 蒸留水を 1 mL のマイクロピペットにより少量 (0.5 mL ほど) とり、試料に加えた。
- ③ ②で用いたマイクロピペットのチップを用いて、試料を超音波処理しながら分散させ

た。

- ④ 分散試料をマイクロピペットでとり，スライドガラス上に塗布した。
- ⑤ 24 時間ほど室温で乾燥させたのち，XRD 測定を行った。
- ⑥ 測定後，試料にエチレングリコールを浸透させた。この時，試料を乱さないようスポイトで試料の 4 隅にたらし，中央まで浸透後にガラスを斜めに立てかけ，余分なエチレングリコールをふき取った。
- ⑦ エチレングリコールの乾燥状況を見ながら，随時 XRD 測定を行った。
- ⑧ 試料のピーク (2θ の値) を読み取り，後述のグラフを用いて混合層割合を判定した。
なお，横軸 $\Delta 2\theta_1$ は第二ピークの 2θ 値から第一ピークの 2θ 値を引いた値であり，縦軸 $\Delta 2\theta_2$ は第三ピークの 2θ 値から第二ピークの 2θ 値を引いた値である。

図 2-23～図 2-25 にそれぞれ月布産，Ten Sleep 産，劉房子産原鉱石におけるエチレングリコール処理後の XRD の測定結果を示す。また，図 2-26 に渡辺の研究²⁸⁾に基づくモンモリロナイト層の存在割合判定結果をそれぞれ示す。

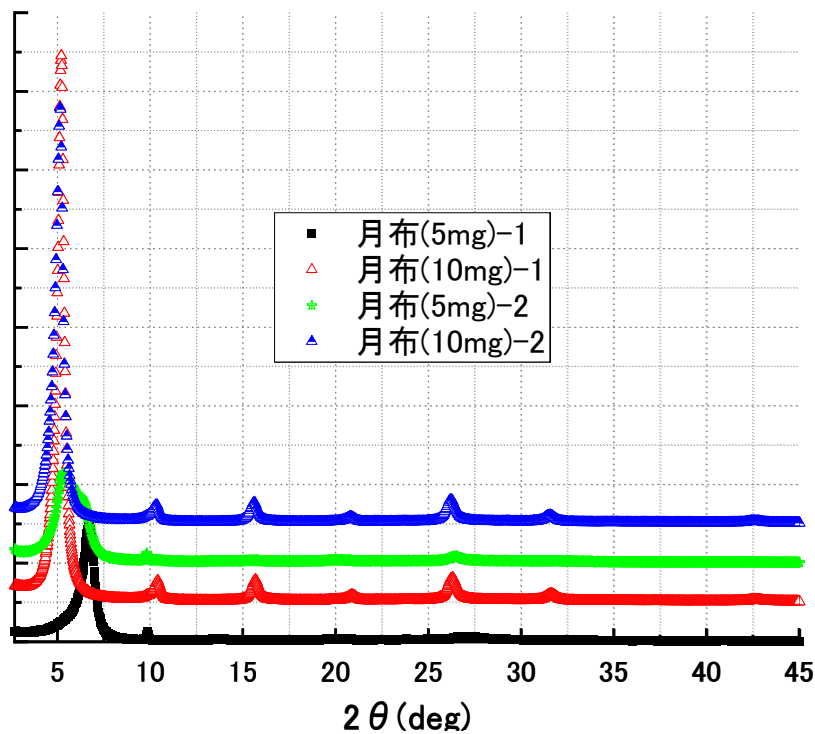


図 2-23 月布産原鉱石のエチレングリコール処理後の XRD 測定結果

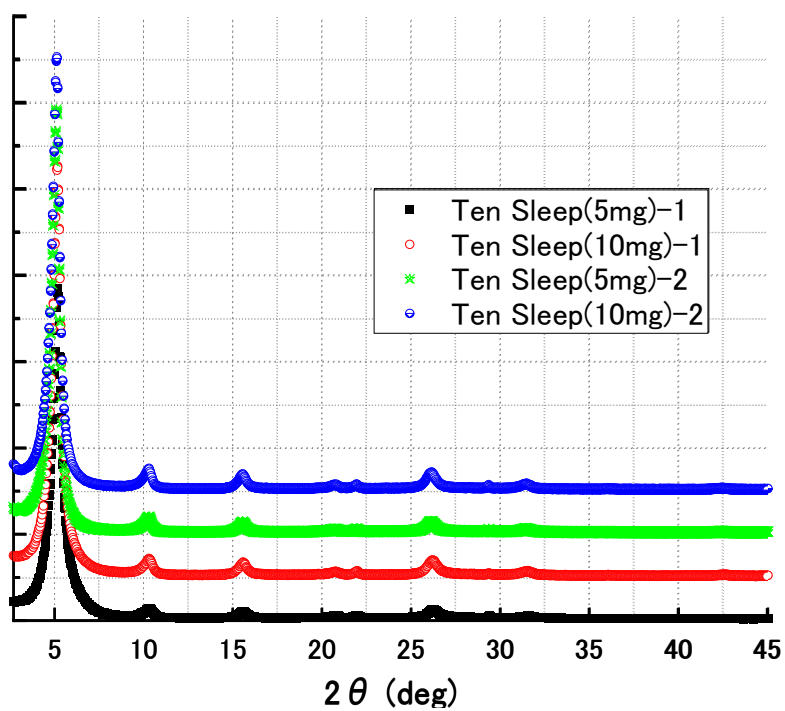


図 2-24 Ten Sleep 産原鉱石のエチレングリコール処理後の XRD 測定結果

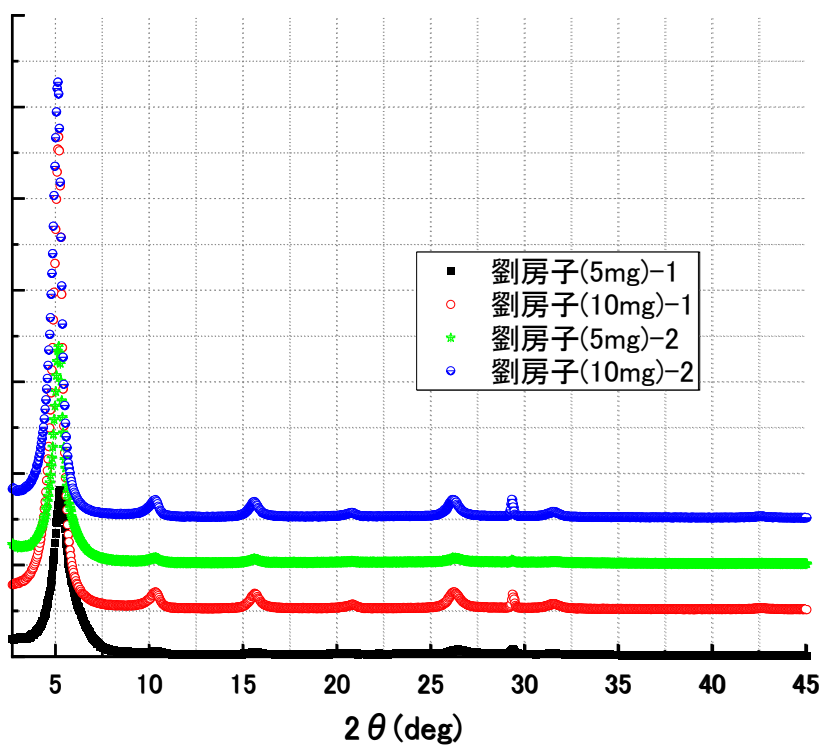


図 2-25 劉房子産原鉱石のエチレングリコール処理後の XRD 測定結果

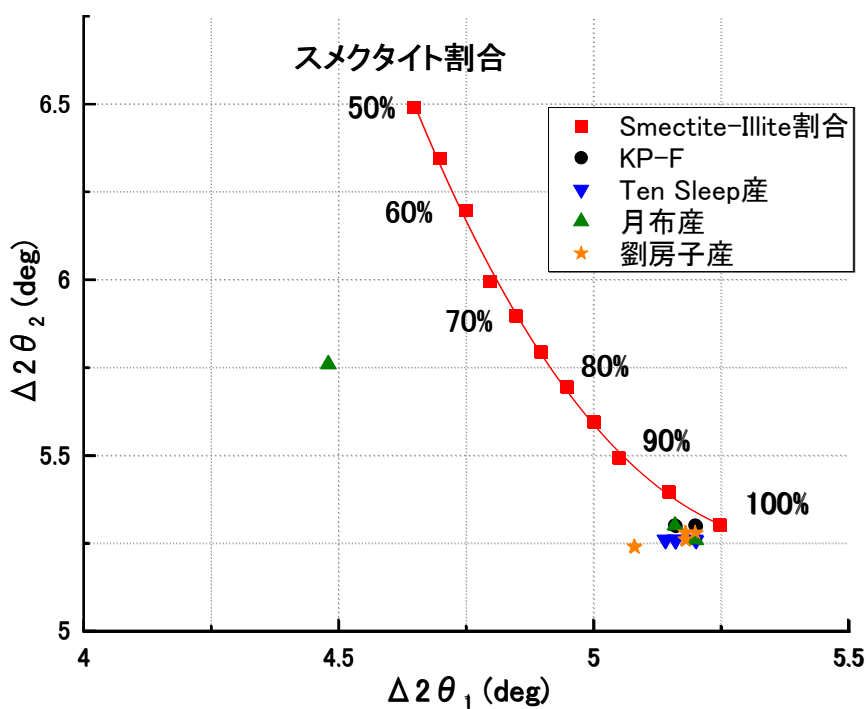


図 2-26 モンモリロナイト層の存在割合の判定図

これより、今回用いた試料（原鉱石 3 種および月布鉱山産・精製モンモリロナイトクニピア F (KP-F)）のほぼすべてにおいて、モンモリロナイト層が 95%~100% 存在している結果が得られた。なお、月布産原鉱石の一部ケースについて、混合層の理想曲線から外れているとともに、他のサンプルと大きく異なる挙動を示していることが見受けられる。この理由として、図 2-23 において、モンモリロナイトの第一ピークの位置に大きなズレや、ブロードとなっている第一ピークが存在していることが原因として考えられる。エチレングリコール処理時にモンモリロナイト結晶の定方位状態を乱してしまったことや、エチレングリコールの濁き具合の差に因るものと考えられる。以上を踏まえ、今回用いたベントナイト原鉱石試料においては、イライトのような非膨潤層は含まれず、膨潤性を有するモンモリロナイトが多く存在することが示された。

2.3 本章のまとめ

本章では、本研究で研究対象とするベントナイト原鉱石の生成環境に関する文献調査と、土質力学・粘土鉱物学における各種基本特性に関する実験結果について述べた。本章で得られた主な成果を以下にまとめる。

- 1) 月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石のいずれも、続成変質作用により生成された可能性が高く、母岩の地質年代はそれぞれ約 1000 万年，約 1 億年，約 1 億 5000 万年であることが分かった。
- 2) いずれの原鉱石も膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを約 50%含有していることが分かった。また，随伴鉱物として主に石英やクリストバライト，斜長石，カルサイトを含有しており，内部標準法により構成割合を定量的に評価した。
- 3) いずれの原鉱石も，モンモリロナイトに吸着されている陽イオンとして Na^+ イオンが支配的であることが分かった。また，膨潤層・非膨潤層判定試験により，非膨潤層であるイライトはほぼ含まれておらず，膨潤層であるモンモリロナイトが主であることがわかった。

参考文献

- 1) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック第三版，技報堂出版，p.901，2009.
- 2) 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，粘土化学第38巻第3号，pp.181-187，1999.
- 3) 澤田武夫：続成作用によるベントナイト鉱床の成因へのアプローチ，スメクタイト研究会会報第6巻第2号，pp.13-22，1996.
- 4) 石山大三，高山智史，佐々木奏，水田敏夫，相田吉昭，伊藤雅和，茂木堅一：山形県間沢一月布地域の浅熱水性鉱床とベントナイト鉱床の特徴，資源地質学会第59回年会学術講演会，2009.
- 5) Tomita K., Zhang, N.: Some natural Na-bentonites in China, 鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学, Vol. 23, pp.1-8, 1990.
- 6) 姚道坤，史素端：中国膨潤土矿床及其并发应用，地質出版社，p.80.
- 7) 吉林劉房子膨潤土科技有限公司 HP (Company Profile) : <http://www.liufangzi.com/en/col.jsp?id=101>, (2021年6月20日閲覧)
- 8) Heathman, J.H.: Bentonite in Wyoming, the geological survey of wyoming, bulletin No.28, University of Wyoming, pp.1-20, 1939.
- 9) Bremer, J. M.: Stratigraphy and sedimentology of the cretaceous mowry shale in the northern bighorn basin of Wyoming: Implications for unconventional resource exploration and development, Digital Commons @ University of Nebraska, pp.1-55, 2016.
- 10) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1—，pp.97-103，2009.
- 11) 小峯秀雄，緒方信英：塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案，土木学会論文集 No.436/III-16，pp.103-110，1991.
- 12) 伊藤弘志，鈴木啓三，小峯秀雄：粒状ベントナイトの締固め・透水特性とその簡易評価方法，土木学会論文集 C Vol.62 No.4，pp.803-813，2006.
- 13) 直井優，小峯秀雄，安原一哉，村上哲，百瀬和夫，坂上武晴：各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響，土木学会論文集 No.785/III-70，pp.39-49，2005.
- 14) 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，p.21，2011.
- 15) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1—，pp.137-152，2009.
- 16) 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.
- 17) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1—，pp.361-367，2009.
- 18) 白河部匠，王海龍，後藤茂，山本修一，小峯秀雄：塩化バリウム水溶液を用いたベントナイトの陽イオン交換容量測定方法の検討，第55回地盤工学研究発表会，21-5-5-02，2020.

- 19) 鈴木啓三, 榎戸洋之, 伊藤弘志: 山形産モンモリロナイトの交換性陽イオン組成, 粘土科学第 45 卷, 第 1 号, pp.14-18, 2005.
- 20) 渡邊保貴, 横山信吾: メチレンブルー吸着試験の測定精度を考慮したベントナイトのモンモリロナイト含有率の評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.76, No.1, pp.26-39, 2020.
- 21) 堀内悠, 高木哲一: 産総研におけるベントナイトのメチレンブルー吸着量測定方法, 地質調査総合センター研究資料集, no.555, pp.1-9, 2012.
- 22) 日本工業規格 (JIS) : ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法, JIS Z 2451:2019.
- 23) 動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所: ベントナイトの鉍物組成分析, PNC TN8430 93-003, 1993.
- 24) 加藤誠軌: セラミックス基礎講座 3 X 線回折分析, 内田老鶴圃, 343p, 1990.
- 25) 中井泉, 泉富士夫編: 粉末 X 線解析の実際 (第 2 版), 朝倉書店, pp. 65-68, 2009.
- 26) 諸留章二, 伊藤弘志: X 線内部標準法によるベントナイトの鉍物定量, 第 55 回粘土科学討論会講演要旨集, P5, pp.162-163, 2011.
- 27) 日本ベントナイト工業会: 日本ベントナイト工業会試験方法—ベントナイト (粉状) の膨潤試験方法一, JBAS-104-77, pp.7-9.
- 28) 渡辺隆: イライト/モンモリロナイト混合層鉍物の混合層構造の判定, 鉍物学雑誌, 第 15 卷 (特別号), pp.32-41, 1981.

第3章 ベントナイト原鉱石の膨潤特性・自己シール性における膠結作用の影響評価

3.1 ベントナイト系緩衝材に求められる膨潤特性

オーバーパックと岩盤の間に施工されるベントナイト系緩衝材には、放射性核種を長期間処分場内に留めておくため、低透水性と水みちとなり得る隙間を充填するための膨潤性を発揮することが求められる。緩衝材の膨潤性に関する設計においては、隙間充填時の低拘束状態における変形挙動と、隙間充填後の体積拘束状態における発生圧力の評価が重要になる。本研究では、前者の状態を模擬した一次元膨潤変形実験と、後者の状態を模擬した膨潤圧実験の両者を行うことで、膨潤特性の総合的な評価を行った。そして、ベントナイト系緩衝材が膠結作用を受けた場合における膨潤特性の変化を定量的に把握することを目的として、ベントナイト原鉱石の膨潤特性を要素実験により取得し、膠結作用による膨潤特性への影響について評価した。

3.2 膨潤特性実験の概要

本実験で用いた装置を図 3-1 に示す。本研究では、体積拘束条件および非拘束条件における膨潤特性を評価するために、前者を想定した膨潤圧実験装置、後者を想定した一次元膨潤変形実験装置の2種類の装置を用いた。膨潤圧実験装置においては、クランプノブを締めることにより供試体上部のピストンの動きを抑制し、供試体の吸水に伴う膨潤変形を抑制した条件下で発生する圧力を測定した。一方、一次元膨潤変形実験装置においては、拘束圧を 19.6・100・500 kPa と設定した上で、供試体の上部に一定の死荷重を載荷し、供試体の鉛直方向の変形量を測定した。なお、拘束圧 100・500 kPa の場合は、膨潤圧実験装置と同一の載荷装置・フレームを用いて、クランプノブは締めずにシリンダーの空気圧を調整することにより載荷した。拘束圧 19.6 kPa の場合は、実験容器のピストン上部に鉛玉を入れたポリプロピレン容器を置くことで載荷した。なお、膨潤圧実験装置・一次元膨潤変形実験装置のいずれにおいても、一部ケースを除き供試体は直径 28 mm、高さは 10 mm の円柱形を目標として作製した。

また、1.6 で述べた通り、ベントナイトの膨潤特性については、水質の影響を大きく受けることが分かっているが、本研究では膨潤特性に対する膠結作用の影響のみを比較・検討するため、イオンを含まない蒸留水環境において膨潤特性を測定した。

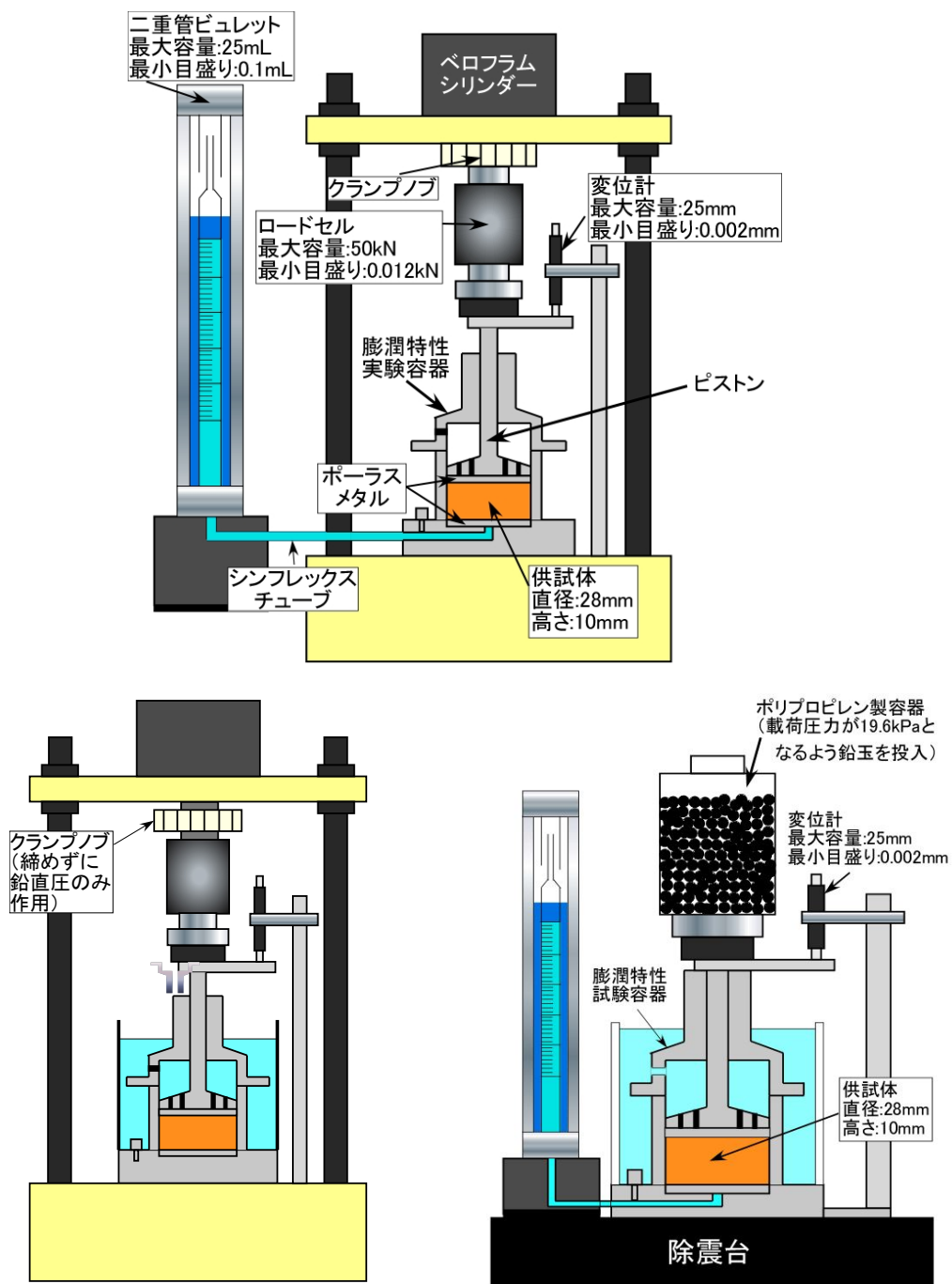


図 3-1 各膨潤特性実験装置（上段：膨潤圧実験装置，下段左：一次元膨潤変形実験装置（拘束圧 100・500 kPa の場合），下段右：一次元膨潤変形実験装置（拘束圧 19.6 kPa の場合）

3.3 供試体の作製方法

本節では、膨潤特性実験の供試体作製方法について述べる。本実験では、膠結作用の影響を考慮するため、ベントナイト原鉱石の固結を保持した不攪乱供試体と、固結を物理的に除去した再構成供試体の2種類を作製して用いた。以下に、両供試体の作製方法について述べる。

—不攪乱供試体の作製方法—

- ① 約 10 cm 程度の大きさの岩片を、原鉱石サンプルより切り出した。
- ② 切り出した岩片に対して供試体を作製する方向を決定し、上下端がその方向に対し並行となるよう端面を平滑に成形した。なお、本研究では岩石の堆積方向に対して並行（すなわち、層理に対して並行）となるよう供試体を成形した。その理由として、堆積方向に対して土粒子骨格などの試料状態や、それに伴う膨潤性・透水性等の特性も変化する異方性が考えられるため、試験条件を統一することが挙げられる。また、特に劉房子産原鉱石においては、堆積方向に対して直角方向に切り出した場合に供試体の割れが生じやすく、成形が困難であったことも理由として挙げられる。図 3-2 に原鉱石の積層方向と供試体作製方向の関係に関する概念図を示す。

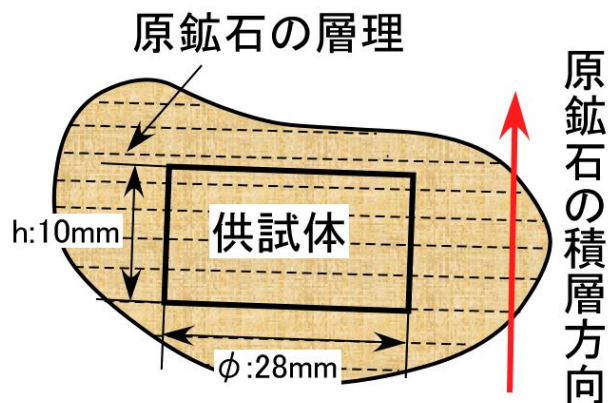


図 3-2 原鉱石の堆積方向と供試体作製方向の関係

- ③ カッターリング（内径 28 mm，高さ 10 mm）を表面に押し当て、成形する大きさの断面をけがきした。この時、強い力でリングを押し当てると、リングの変形や岩片表面における損傷が生じ、正確な供試体を作製できなくなる要因となり得るため注意を要する。なお、上記の作業はトリマーや、ドリルによるコア抜きを行う場合、不要である。
- ④ 試料が割れないように注意しながら、③で行ったけがきに基づいて不要な部分を包丁、ストレートエッジを用いて徐々に削り取っていき、カッターリングを押し込んで試料をリング内に挿入した。トリマーを用いた場合は、削る際に岩片が動かないように下部

のステージおよび上部の当て板で固定しながら行った。

—再構成供試体の作製方法—

- ① 不攪乱供試体を作製する際に生じた岩片をすりつぶした。なお、岩片をすりつぶす際には破砕機（ワンダークラッシャーWC-3（大阪ケミカル製））を用いた。図 3-3 に使用した破砕機を示す。また、表 3-1 に破砕機の仕様¹⁾を示す。



図 3-3 使用した破砕機

表 3-1 破砕機の仕様¹⁾

| | |
|--------|--------------------|
| 電源 | 100 V 50/60 Hz |
| 電気容量 | 1,200 W |
| 回転数/可変 | 0~28,000 rpm（無負荷時） |
| 定格 | 1 分 |
| 寸法 | 170×170×330 mm(H) |

- ② 粉末状となった試料を 0.425 mm・0.850 mm・2.00 mm・4.75 mm ふるいにかけた。これらにより、粒径~0.425 mm, 0.850~2.00 mm, および 2.00~4.75 mm の粒度の試料を作製した。なお、Ten Sleep 産原鉱石は初期含水比が高かったため、ゴムベラを用いて裏ごしを行った。ふるいを通過しなかった試料については再度粉砕し、全ての試料が通過するまで行った。その後、含水比を測定した。
- ③ 所定の乾燥密度の供試体を作製するため、必要な試料の量を算出した。試料の量は以下の式(3.1)により算出した。

$$m = \frac{\rho_d}{\pi \times \frac{D^2}{4} \times h \times (1 + \frac{w}{100})} \quad (3.1)$$

ここに、 m ：必要な試料の量(g)、 ρ_d ：乾燥密度(Mg/m³)、 D ：供試体直径(mm)、 h ：供試体高さ(mm)、 w ：含水比(%)である。

- ④ 図 3-4 に示す静的締固め装置を用いて、供試体高さが約 10 mm になるよう粉末状試料に 15 分間圧力を加え、供試体を作製した。

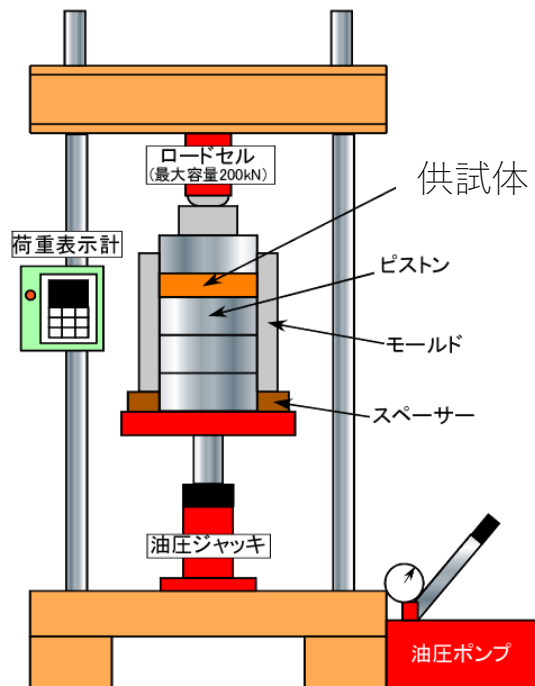


図 3-4 静的締固め装置概略図



図 3-5 ピストンおよびモールドの様子

- ⑤ 抜き取り装置を用いて供試体を締固め用モールドから膨潤特性試験装置のステンレス製リング内に移し替えた。
- ⑥ 供試体の重量および寸法、含水比を測定し、乾燥密度を算出した。所定の乾燥密度の供試体を作製できなかった場合、再度④、⑤の作業を行った。

図 3-6 に再構成供試体の作製概念図を示す。

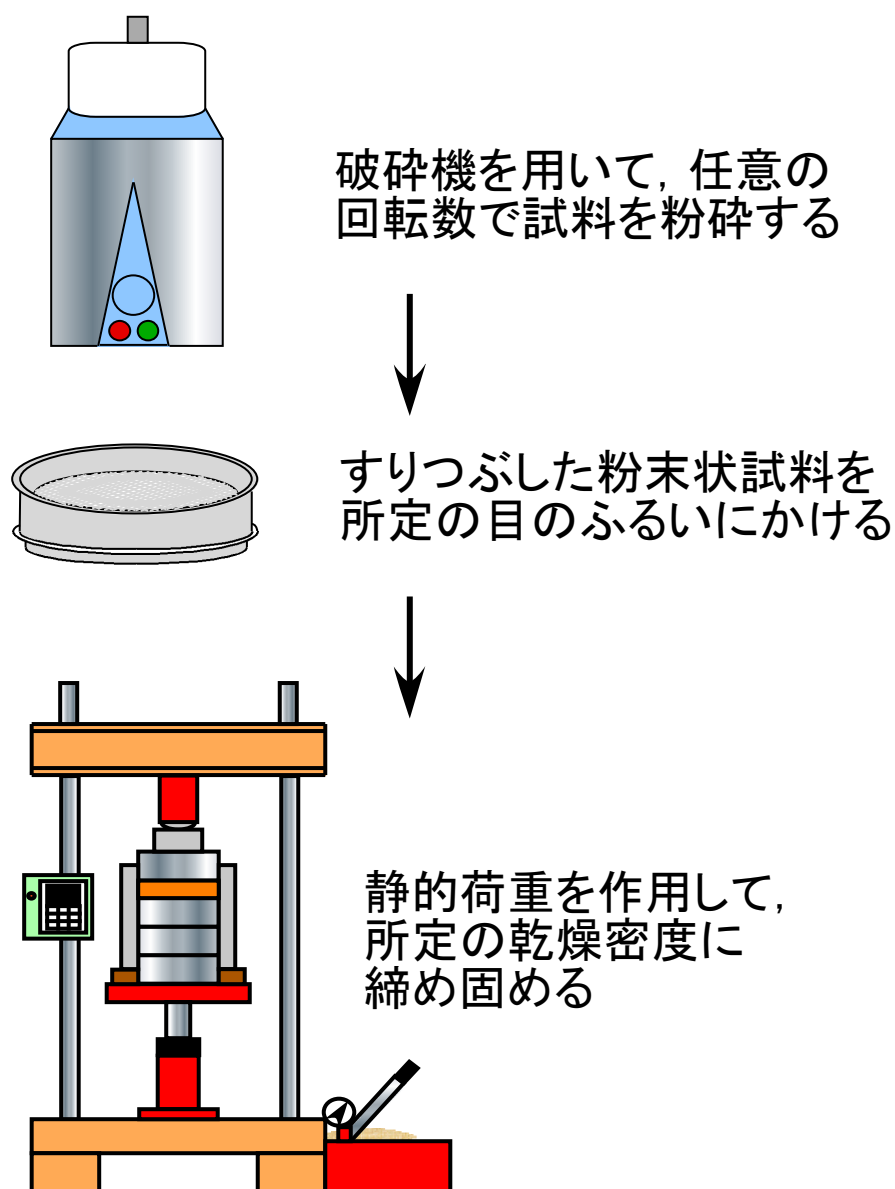


図 3-6 再構成供試体の作製概念図

3.4 膨潤特性実験の手順

3.4.1 膨潤圧実験の手順

本実験では、供試体の吸水に伴う膨潤変形を抑制した場合に発生する圧力を膨潤圧とみなし、測定する。供試体下部から蒸留水を供給し、側方方向は SUS316L 製リングにより拘束し、鉛直方向の変形はクランプノブを締めることで抑制した。

以下に本試験の詳細な手順を示す。まず、3.3 で述べた方法により作製した供試体を SUS316L 製ステンレスリングに移し替え、供試体の上下端に定性ろ紙 (No.5A) を設置し、

膨潤特性実験容器を組み立てた。実験容器底板の下部給水口と二重管ビューレットをシンプレックスチューブにより接続した。次に、ペロフラムシリンダーの空気圧を調整することによりピストンを供試体上部に接触させ、クランプノブを締めることで鉛直方向の変位を固定した。この時、20～40 kPa の鉛直圧を作用させ、ピストンと供試体上端が確実に接触するよう留意した。そのまま5分程度放置した後、供試体への給水とロードセルによる膨潤圧および変位計による膨潤変形量の測定を開始した。なお、膨潤圧の測定には、最大容量 50 kN、最小目盛 0.012 kN のロードセルを用いた。1週間以上経過して以降、膨潤圧の値が一定値に収束したことを確認次第、実験終了として計測をストップし、実験容器を解体した。その後、供試体の含水比を測定した。

3.4.2 一次元膨潤変形実験の手順

まず、3.3の方法で作製した供試体を SUS316L 製ステンレスリングに移し替え、その上下に定性ろ紙 (No.5A) を設置し、膨潤特性実験容器を組み立てた。この時、供試体と接する面は滑らかな面とした。その後、所定の荷重を載荷させ、供試体下部からの給水を開始すると同時に膨潤量の測定を開始した。一次元膨潤変形率の経時変化曲線が一定の収束挙動を示したのを確認次第、実験終了として計測をストップし、実験容器を解体した。その後、供試体の含水比を測定した。

3.5 膨潤特性実験結果の整理方法

本節では、膨潤圧測定実験、一次元膨潤変形実験で得られる結果の整理方法について述べる。

3.5.1 膨潤圧測定実験の結果の整理方法

膨潤圧実験においては、図 3-7 に示すような膨潤圧と変形量の経時変化が得られる。図 3-7 は月布産原鉱石・粒径 ~ 0.425 mm の乾燥密度 1.42 Mg/m^3 を一例として示したものである。これより、膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇しピークを迎え、その後わずかに下降して谷状となり、その後再度圧力が上昇する挙動であった。この挙動は Wang et al. (2020)²⁾でも観測されており、乾燥密度および初期含水比が低い供試体においてよく観測される。変位計により測定された変形量も、膨潤圧の発生とほぼ同様に計測されており、その後の値の推移も絶対値こそ違うものの膨潤圧の経時変化とリンクしている。これは、膨潤圧の発生によりフレームに微小な変形が生じ、それによってピストンなどの変位が許されたものが変位計により計測されたものと考えられる。膨潤圧は最終的に一定値に収束しており、その際の変形量をもとに式(3.2)により供試体の乾燥密度を補正し、最大膨潤圧発生時の乾燥密度とし

て結果の整理に用いた。

$$\rho_{d'} = \frac{m}{A \times (H_0 + \Delta d)} \times 1000 \quad (3.2)$$

ここに、 $\rho_{d'}$ ：乾燥密度補正值(Mg/m³)、 m ：供試体乾燥質量(g)、 A ：供試体断面積(mm²)、 H_0 ：供試体初期高さ(mm)、 Δd ：供試体変位量(mm)である。

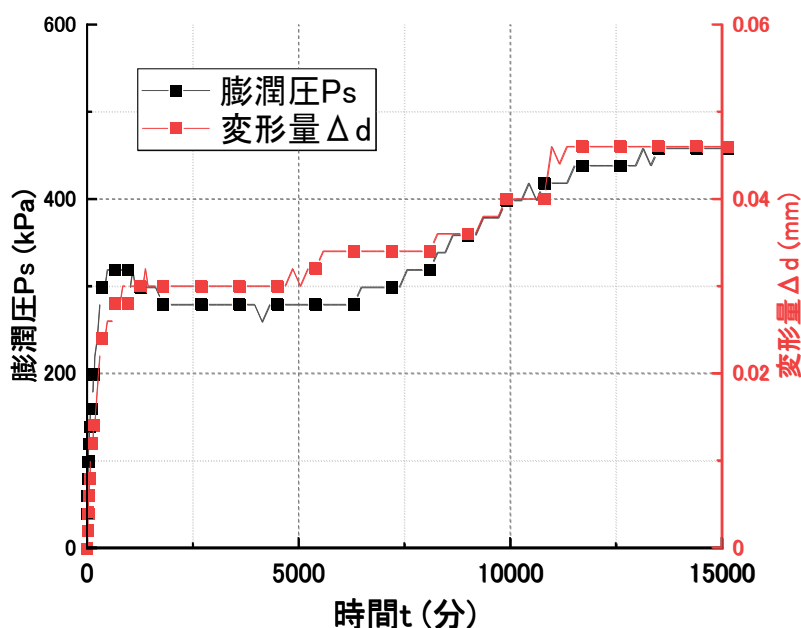


図 3-7 膨潤圧実験結果の一例

3.5.2 一次元膨潤変形実験の結果の整理方法

膨潤変形挙動については、膨潤変形量は初期供試体高さによる影響を受けて変化するため、変形量を初期供試体高さで除した値である、一次元膨潤変形率を式(3.3)により算出した。

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100 \quad (3.3)$$

ここに、 ε_s ：一次元膨潤変形率(%)、 ΔS ：膨潤変形量(mm)、 H_0 ：供試体初期高さ(mm)である。

膨潤変形実験においては、図 3-8 に示すような膨潤変形率の経時変化が得られる。図 3-8 は月布産原鉱石 ~ 0.425 mm の乾燥密度 1.43 Mg/m³ のケースを一例として示したものである。この経時変化曲線に対し、式(3.4)であらわされる双曲線で近似し、その漸近線から最大膨潤変形率を算出し、その 80%の値に達したタイミングを目安として実験を終了した。

$$\varepsilon_s(t) = \frac{t}{a + bt} (\%) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{s \max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_s(t) = \frac{1}{b} (\%) \quad (3.5)$$

ここに、 t ：時間 (min)， $\varepsilon_s(t)$ ：時間 t における膨潤変形率 (%)， a, b ：双曲線近似により求められる定数， $\varepsilon_{s \max}$ ：最大膨潤変形率 (%) である。

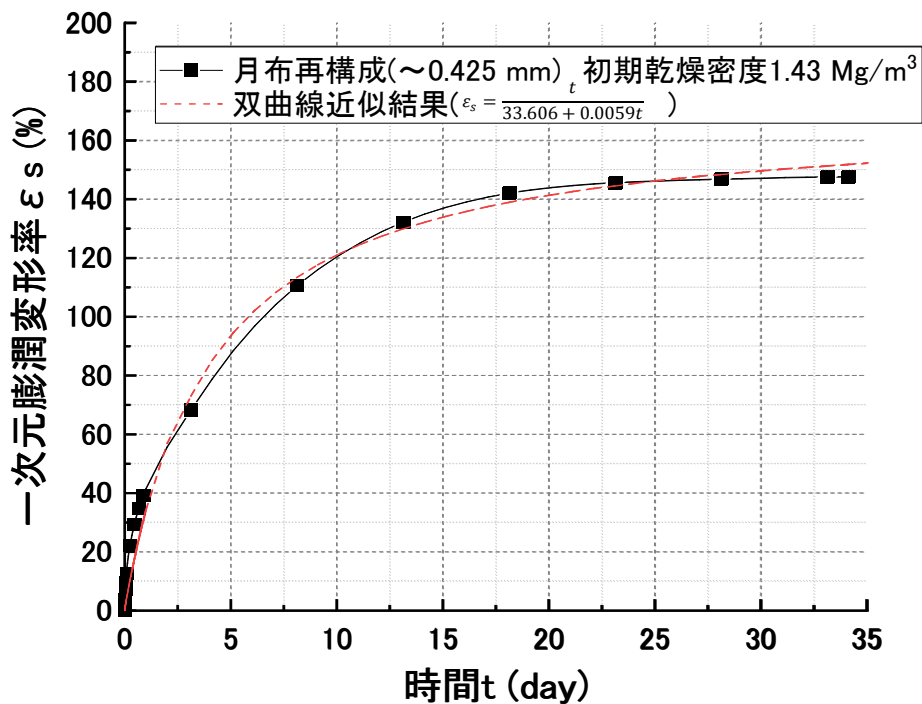


図 3-8 一次元膨潤変形率の経時変化曲線における双曲線近似の一例

3.6 膨潤特性実験結果

3.6.1 膨潤圧実験結果

各原鉱石の膨潤圧実験結果について、供試体諸元および経時変化曲線を示す。

・月布産原鉱石

表 3-2～表 3-5 に月布産原鉱石の不攪乱供試体および再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）の供試体諸元を示す。また、図 3-9～図 3-12 に不攪乱供試体、再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）の膨潤圧の経時変化曲線を示す。

表 3-2 月布産不攪乱供試体の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験（月布不攪乱） | | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------|-------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 試料名 | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.72 | 1.85 | 1.73 | 1.71 | 1.73 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥 密度(Mg/m ³) | 1.71 | 1.81 | 1.72 | 1.69 | 1.72 |
| 初期含水比(%) | 12.3 | 10.4 | 10.0 | 9.4 | 13.9 |
| 初期飽和度 (%) | 56.0 | 57.8 | 46.1 | 42.0 | 64.1 |
| 試験終了時含水比 (%) | 22.9 | 19.9 | 25.0 | 21.8 | 21.6 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 102.5 | 108.6 | 113.8 | 94.3 | 98.8 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 480 | 757 | 1036 | 833 | 677 |

表 3-3 月布産再構成供試体（～0.425 mm）の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(月布～0.425mm) | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 試料名 | | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密 度(Mg/m ³) | 1.69 | 1.80 | 1.83 | 1.42 | 1.55 | 1.76 | 1.91 | 1.12 |
| 最大膨潤圧発生時の 乾燥密度(Mg/m ³) | 1.67 | 1.71 | 1.81 | 1.42 | 1.54 | 1.73 | 1.90 | 1.14 |
| 初期含水比(%) | 9.1 | 6.1 | 9.3 | 10.8 | 10.8 | 10.8 | 10.8 | 10.0 |
| 初期飽和度 (%) | 39.4 | 31.2 | 50.7 | 31.7 | 38.4 | 52.1 | 66.9 | 18.7 |
| 試験終了時含水比 (%) | 24.2 | 20.9 | 21.4 | 33.6 | 28.8 | 21.6 | 17.0 | 54.5 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 105.0 | 104.7 | 114.8 | 97.7 | 100.7 | 98.8 | 102.8 | 106.3 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 1155 | 1593 | 2680 | 458 | 597 | 1861 | 4653 | 211 |

表 3-4 月布産再構成供試体 (0.850~2.00 mm) の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(月布 0.850~2.00 mm) | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.50 | 1.72 | 1.79 | 1.87 | 1.87 | 1.62 | 1.48 | 1.12 | 1.14 | 1.85 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.50 | 1.72 | 1.77 | 1.86 | 1.85 | 1.61 | 1.48 | 1.10 | 1.12 | 1.81 |
| 初期含水比(%) | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 11.2 | 11.2 | 11.2 | 7.6 |
| 初期飽和度 (%) | 41.0 | 57.2 | 63.3 | 72.4 | 71.8 | 48.8 | 35.7 | 21.2 | 21.7 | 42.2 |
| 試験終了時含水比 (%) | 31.1 | 22.9 | 20.2 | 19.0 | 18.2 | 25.2 | 32.0 | 53.3 | 52.7 | 19.9 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 102.3 | 103.6 | 98.8 | 107.0 | 101.5 | 97.3 | 102.4 | 98.1 | 99.7 | 104.2 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 657 | 1433 | 1923 | 2181 | 2320 | 956 | 598 | 198 | 232 | 2604 |

表 3-5 月布産再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(月布 2.00~4.75 mm) | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------|------|------|------|-------|------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.74 | 1.51 | 1.55 | 1.89 | 1.20 | 1.30 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.73 | 1.52 | 1.54 | 1.85 | 1.19 | 1.30 |
| 初期含水比(%) | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 |
| 初期飽和度 (%) | 52.9 | 37.6 | 40.1 | 67.1 | 23.9 | 28.3 |
| 試験終了時含水比 (%) | 22.4 | 29.0 | 24.5 | 15.5 | 47.8 | 38.6 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 103.8 | 97.4 | 84.9 | 87.2 | 100.8 | 95.3 |
| 最大膨潤圧 (kPa) | 1453 | 817 | 930 | 3638 | 296 | 434 |

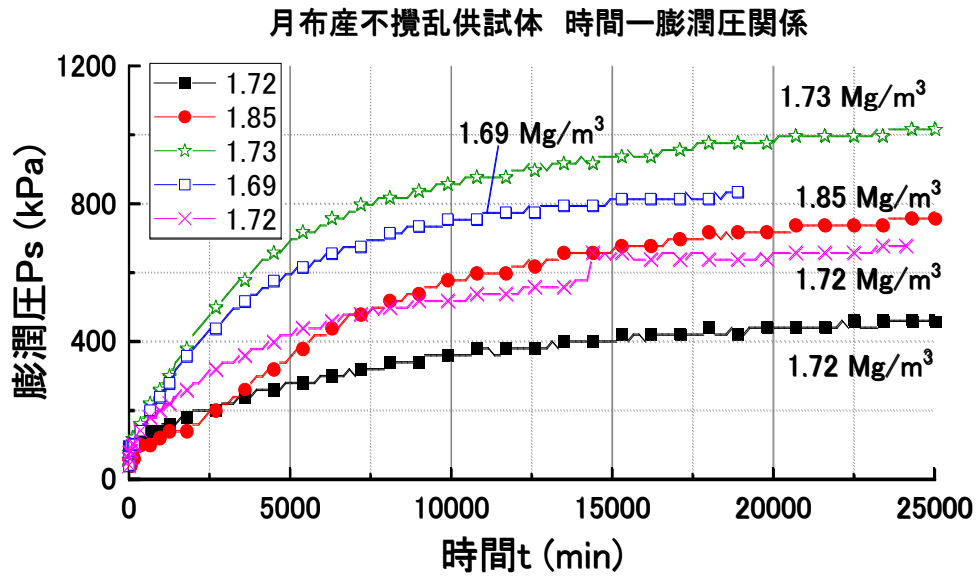


図 3-9 月布産原鉱石不攪乱供試体の膨潤圧経時変化曲線

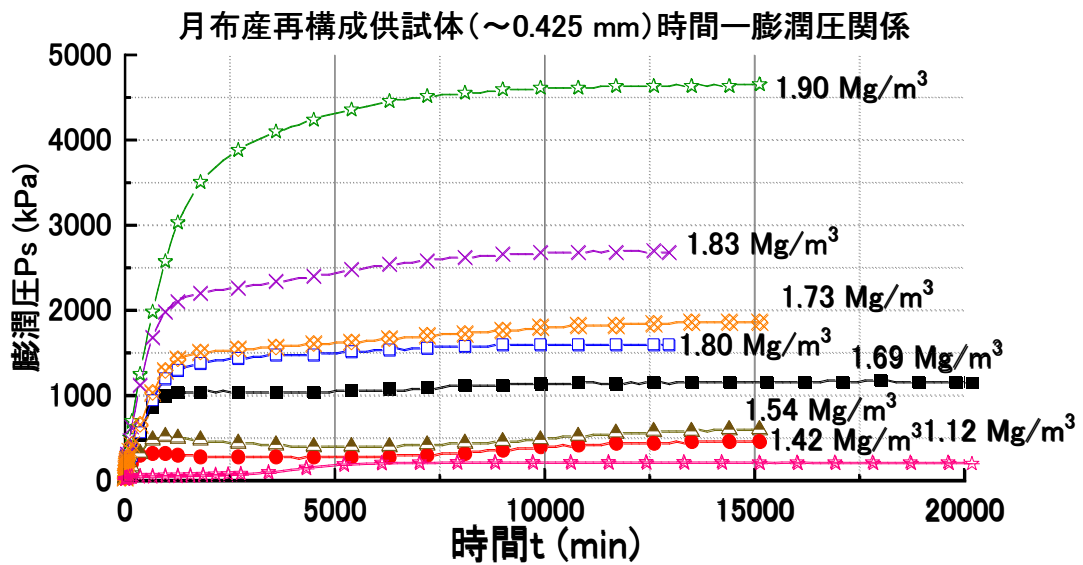


図 3-10 月布産原鉱石再構成供試体(～0.425 mm)の膨潤圧経時変化曲線

月布産再構成供試体 (0.850~2.00 mm) 時間—膨潤圧関係

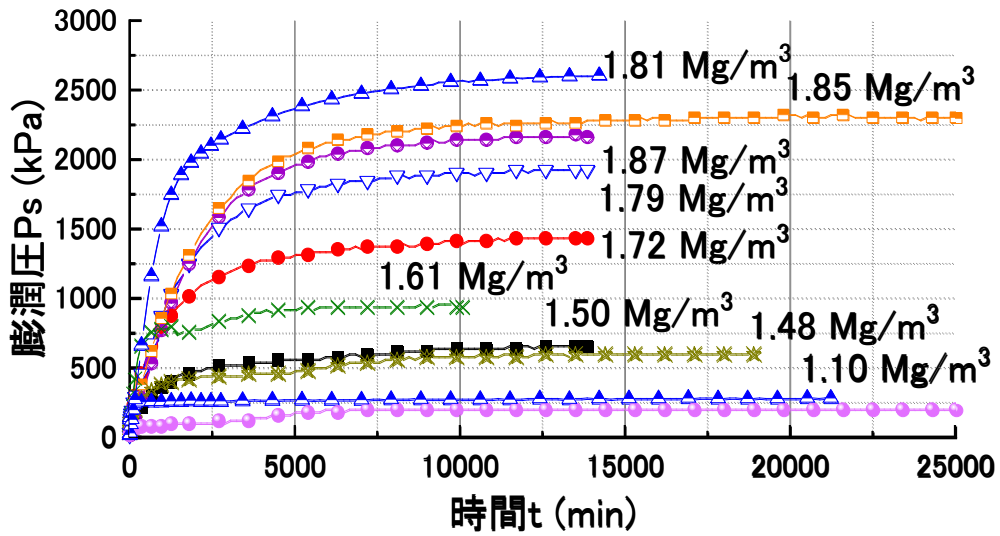


図 3-11 月布産原鉱石再構成供試体 (0.850~2.00 mm) の膨潤圧経時変化曲線

月布産再構成供試体 (2.00~4.75 mm) 時間—膨潤圧関係

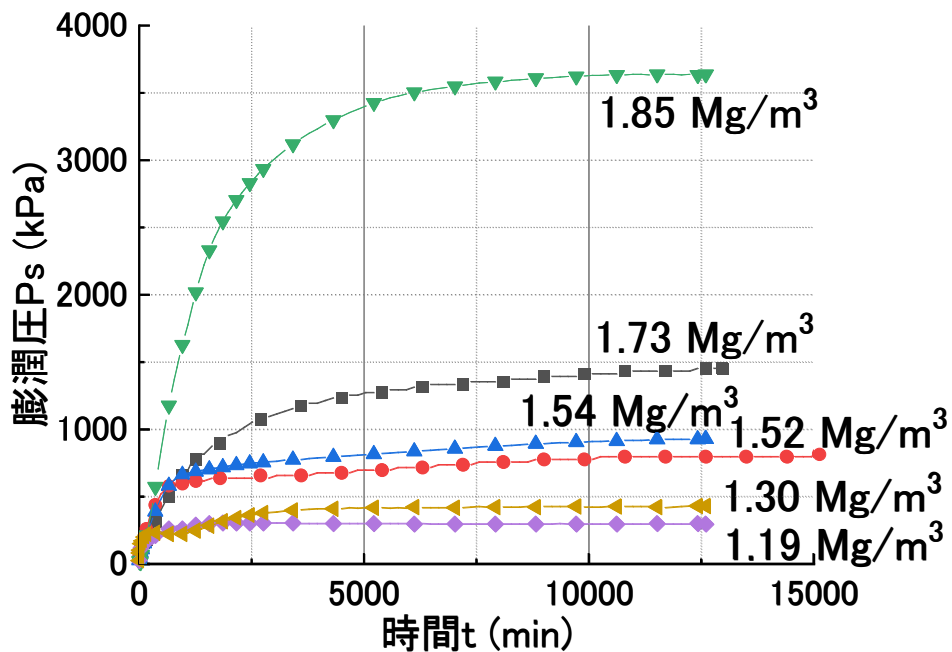


図 3-12 月布産原鉱石再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の膨潤圧経時変化曲線

不攪乱供試体において、膨潤圧の上昇は再構成供試体に比べて緩やかであり、いずれの供試体においても一定値に収束するまで 10 日（14400 分）以上要した。不攪乱供試体では、膠結作用により土粒子構造が複雑であり、吸水および膨潤圧の発現に時間を要したと推察される。

粒径 ~ 0.425 mm の再構成供試体において、膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇し、約 2000 分経過後に一定値に収束した。特に、供試体乾燥密度の比較的低い $1.42\sim 1.69$ Mg/m^3 では、3.5.1 で述べた通り約 1000 分経過後に一度膨潤圧のピークを迎えた後、約 5000 分経過時まで値が緩やかに下降し、その後また緩やかに上昇する挙動が見られた。これは小峯らの研究³⁾において、低乾燥密度・低初期含水比供試体で見られた挙動とも一致している。

粒径 $0.850\sim 2.00$ mm の再構成供試体において、膨潤圧は試験開始直後に上昇し、約 5000 分経過後は収束する傾向であった。収束に要する時間は粒径 ~ 0.425 mm のケースに比べて長く、これはベントナイトの透水性が低いために、粒径が大きい方が粒子全体の飽和とそれに伴う膨潤圧の発現に長時間を要するためと推察される。なお、粒径 ~ 0.425 mm の低乾燥密度の供試体において見られた、開始直後のピークを迎えた後の膨潤圧の一次的な低下は見られなかった。

粒径 $2.00\sim 4.75$ mm の再構成供試体においても、膨潤圧は試験開始直後に上昇した後に一定値に収束する挙動であった。収束に要する時間として、乾燥密度が比較的低い $1.19\sim 1.54$ Mg/m^3 の範囲の供試体では約 1000 \sim 2000 分程度であるのに対し、 $1.73\sim 1.85$ Mg/m^3 と乾燥密度が比較的高い供試体では約 5000 分以上と長くなっていた。これは、ベントナイトの水分移動性が低く、また乾燥密度が高くなるほど水みちとなる間隙が小さいことにより、供試体の吸水による飽和とそれに伴う膨潤圧の発現に時間を要するためと推察される。

また、ほぼ全てのケースにおいて、試験開始時・試験終了時の乾燥密度の変動は 0.03 Mg/m^3 以内に収まっており、実験中の乾燥密度の変動による膨潤圧への影響は小さいと考えられる。

図 3-13 に最大膨潤圧と試験終了時乾燥密度の関係を示す。これより、再構成供試体においてはいずれの粒径も乾燥密度の増加に対して最大膨潤圧が指数関数的に上昇する傾向であり、これは既往の研究⁴⁾と同様の傾向であった。また、不攪乱供試体においては乾燥密度 1.70 Mg/m^3 付近においてバラつきが大きく、乾燥密度との有意な相関性も見られなかった。

月布産 試験終了時乾燥密度—最大膨潤圧関係

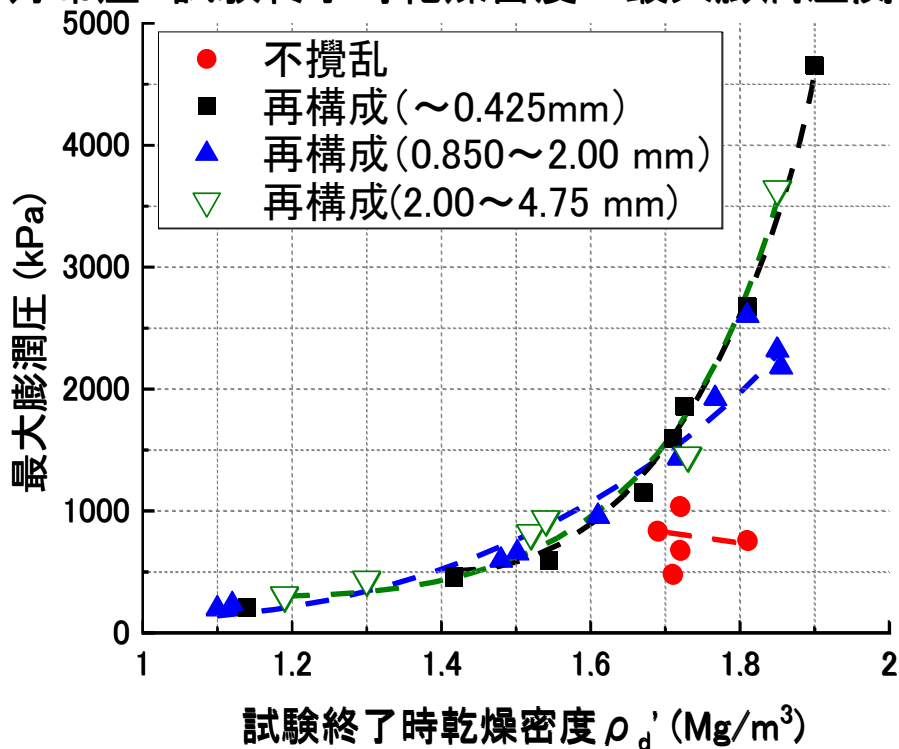


図 3-13 試験終了時乾燥密度—最大膨潤圧関係

・ Ten Sleep 産原鉱石

表 3-6～表 3-9 に Ten Sleep 産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元をそれぞれ示す。図 3-14～図 3-17 に再構成供試体（粒径：～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）および不攪乱供試体の膨潤圧の経時変化曲線をそれぞれ示す。

表 3-6 Ten Sleep 産不攪乱供試体の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験 (Ten Sleep 不攪乱) | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 試料名 | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.50 | 1.46 | 1.49 | 1.52 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.48 | 1.46 | 1.48 | 1.51 |
| 初期含水比(%) | 32.2 | 32.2 | 29.0 | 27.0 |
| 初期飽和度 (%) | 110.1 | 103.4 | 97.5 | 95.6 |
| 試験終了時含水比 (%) | 36.3 | 36.8 | 34.1 | 31.2 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 120.6 | 118.2 | 113.5 | 107.8 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 678 | 678 | 892 | 1134 |

表 3-7 Ten Sleep 産再構成供試体 (～0.425 mm) の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験 (Ten Sleep～0.425 mm) | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 試料名 | | | | | | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.48 | 1.55 | 1.49 | 1.55 | 1.60 | 1.61 | 1.30 | 1.42 | 1.43 | 1.48 | 1.52 | 1.10 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.47 | 1.52 | 1.48 | 1.51 | 1.58 | 1.59 | 1.36 | 1.40 | 1.42 | 1.46 | 1.51 | 1.09 |
| 初期含水比(%) | 22.9 | 22.9 | 22.0 | 22.0 | 22.0 | 22.0 | 29.5 | 29.5 | 29.5 | 29.5 | 29.5 | 13.8 |
| 初期飽和度 (%) | 76.6 | 84.7 | 74.8 | 81.5 | 87.5 | 90.0 | 61.6 | 66.6 | 68.0 | 72.9 | 103.7 | 26.0 |
| 試験終了時含水比 (%) | 31.0 | 30.9 | 34.1 | 31.1 | 30.2 | 29.2 | 38.9 | 37.0 | 36.3 | 33.9 | 30.0 | 61.2 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 102.0 | 109.5 | 112.6 | 108.8 | 116.5 | 115.6 | 108.4 | 108.7 | 109.8 | 108.9 | 104.4 | 113.5 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 3902 | 3683 | 3027 | 3901 | 4660 | 4819 | 1613 | 1970 | 2201 | 3332 | 3924 | 576 |

表 3-8 Ten Sleep 産再構成供試体 (0.850~2.00 mm) の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(Ten Sleep0.850~2.00 mm) | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 試料名 | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.40 | 1.46 | 1.44 | 1.47 | 1.52 | 1.59 | 1.62 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.38 | 1.44 | 1.44 | 1.45 | 1.50 | 1.56 | 1.59 |
| 初期含水比(%) | 33.5 | 33.5 | 33.5 | 27.8 | 27.8 | 21.9 | 20.3 |
| 初期飽和度 (%) | 98.3 | 109.0 | 105.4 | 90.9 | 98.0 | 86.3 | 84.1 |
| 試験終了時含水比 (%) | 38.2 | 33.8 | 31.9 | 33.2 | 32.4 | 30.8 | 31.0 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 109.4 | 106.8 | 99.6 | 105.6 | 111.7 | 116.0 | 122.3 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 1872 | 2647 | 2627 | 2408 | 2776 | 3345 | 3450 |

表 3-9 Ten Sleep 産再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(Ten Sleep2.00~4.75 mm) | | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 試料名 | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.25 | 1.26 | 1.54 | 1.48 | 1.50 | 1.44 | 1.08 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.22 | 1.24 | 1.57 | 1.52 | 1.48 | 1.42 | 1.06 |
| 初期含水比(%) | 42.6 | 42.6 | 24.4 | 24.4 | 19.4 | 19.3 | 19.3 |
| 初期飽和度 (%) | 100.9 | 102.0 | 50.0 | 45.3 | 67.1 | 60.6 | 35.2 |
| 試験終了時含水比 (%) | 44.9 | 42.4 | 33.4 | 33.9 | 34.6 | 33.6 | 63.9 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 101.7 | 99.0 | 128.1 | 119.8 | 115.6 | 101.5 | 113.1 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 975 | 1150 | 2611 | 2452 | 2443 | 2325 | 548 |

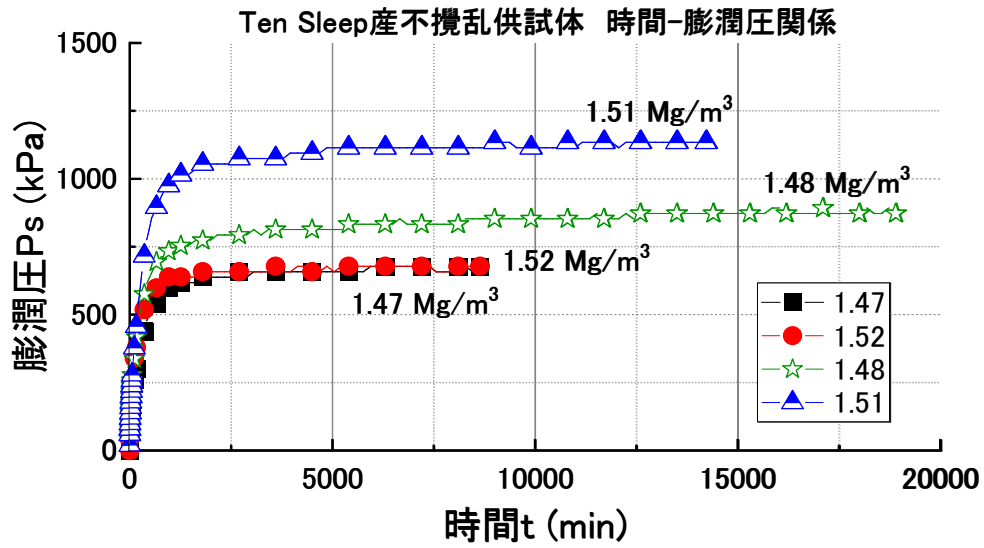


図 3-14 Ten Sleep 産原鉱石不攪乱供試体の膨潤圧経時変化曲線

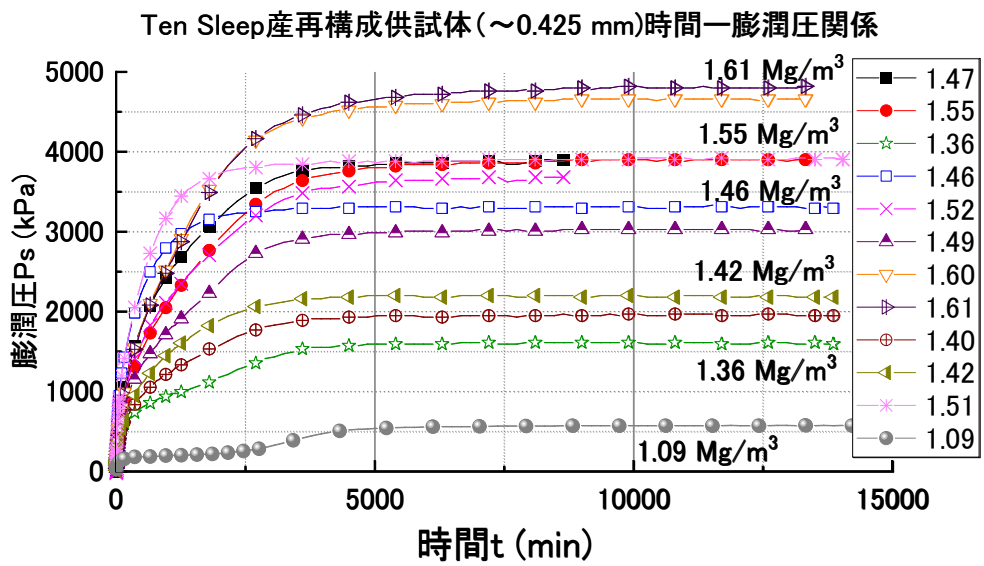


図 3-15 Ten Sleep 産原鉱石再構成供試体 (~0.425 mm) の膨潤圧経時変化曲線

Ten Sleep再構成(0.850~2.00 mm)時間一膨潤圧関係

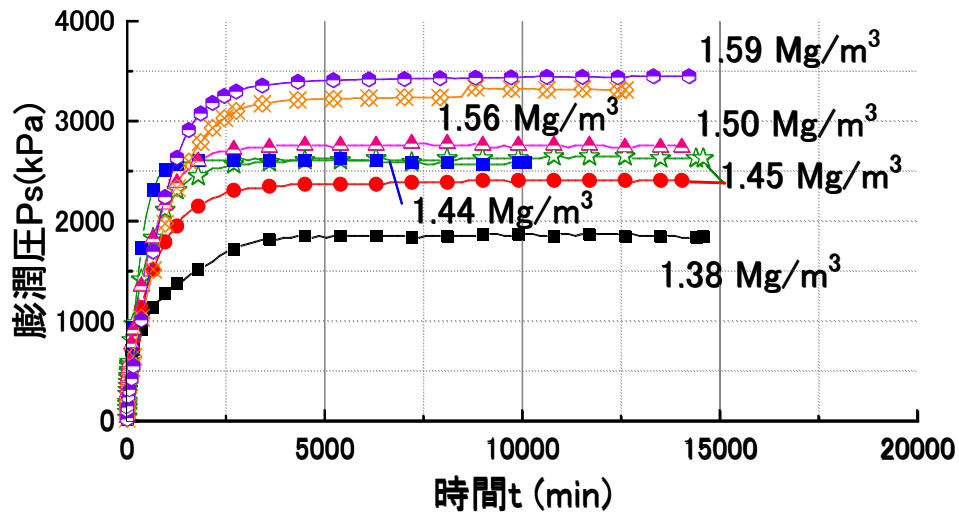


図 3-16 Ten Sleep 産原鉱石再構成供試体 (0.850~2.00 mm) の膨潤圧経時変化曲線

Ten Sleep再構成(2.00~4.75 mm)時間一膨潤圧関係

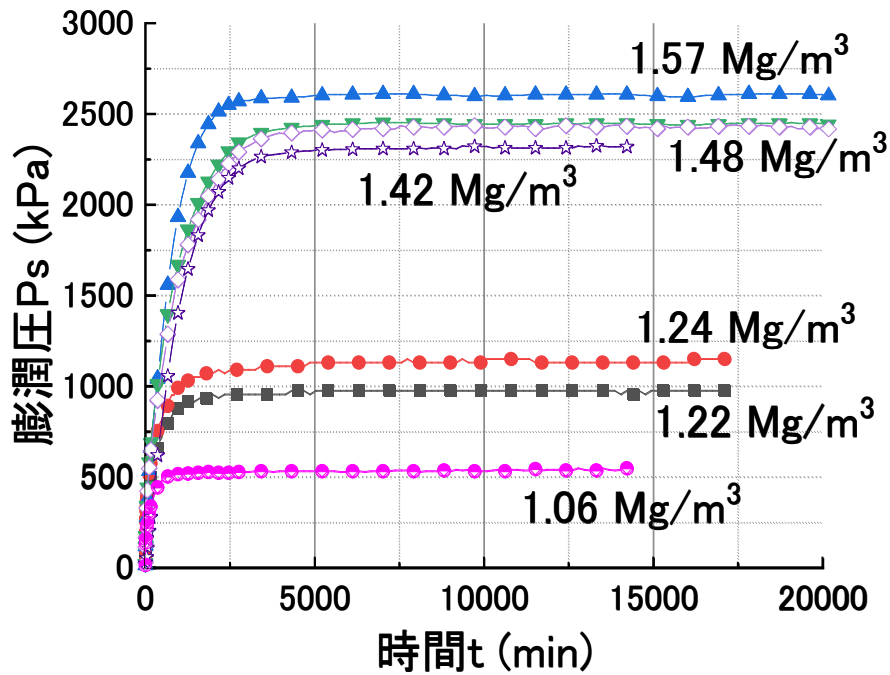


図 3-17 Ten Sleep 産原鉱石再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の膨潤圧経時変化曲線

粒径 ~ 0.425 mm の再構成供試体において、膨潤圧は試験開始直後に上昇した後、約 5000 分経過後は収束する傾向であった。供試体の乾燥密度に因らず、約 1000 分まで急上昇した後、勾配が緩やかになり、約 3000 分以降に収束するという、2 段階に分かれた上昇過程が見受けられた。

粒径 0.850 ~ 2.00 mm の再構成供試体において、試験開始直後に急激に上昇した後、約 3000 分経過後は一定値に収束する傾向であった。

粒径 2.00 ~ 4.75 mm の再構成供試体において、供試体の乾燥密度の大小によらず、膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後、約 2000 分経過以降は収束する挙動であった。粒径 0.425 mm 試料では 2 段階に分かれた上昇過程がみられたのに対し、粒径 0.850 ~ 2 mm 試料および粒径 2 ~ 4.75 mm 試料では上昇段階が分かれていない挙動であったことから、Ten Sleep 産原鉱石においては粒径が大きくなるにつれて膨潤圧の増加挙動が 1 段階の単調な増加挙動になる。

不攪乱供試体においても再構成供試体（粒径 0.850 ~ 2.00 mm、粒径 2.00 ~ 4.75 mm）と同様、約 3000 分まで膨潤圧が急激に上昇し、その後一定値に収束する挙動であった。

図 3-18 に再構成供試体および不攪乱供試体における、供試体の試験終了時の乾燥密度と最大膨潤圧の関係をそれぞれ示す。

Ten Sleep 産原鉱石 試験終了時乾燥密度—最大膨潤圧

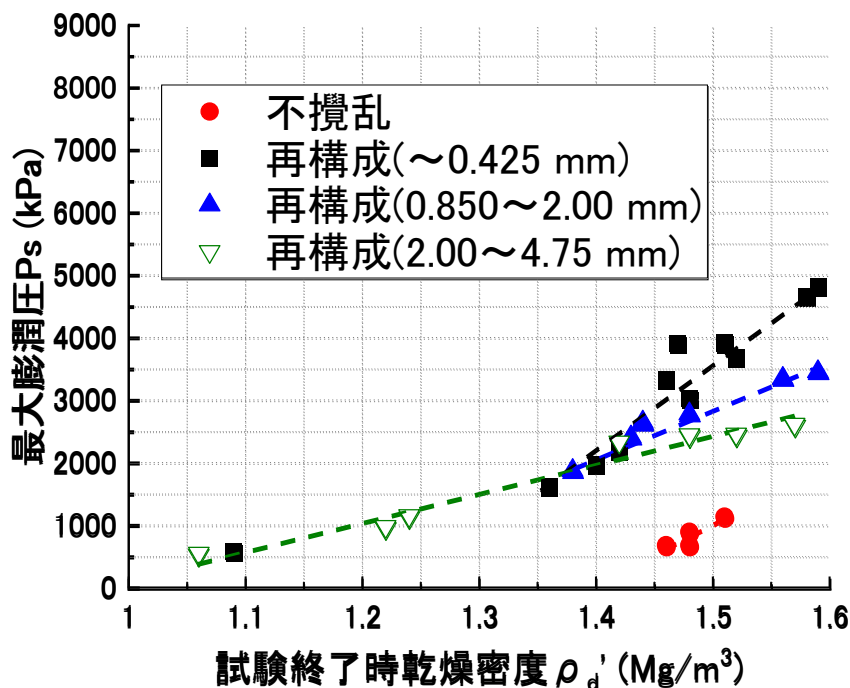


図 3-18 Ten Sleep 産原鉱石試験終了時乾燥密度—最大膨潤圧関係

これより、再構成供試体においては粒径によらず、乾燥密度と膨潤圧の間には比例関係が見られた。なお、月布産原鉱石や後述する劉房子産原鉱石に比べて供試体の乾燥密度が低い傾向であるが、これは初期含水比が他の2つに比べ22～30%と極めて高く、低乾燥密度において飽和度が100%に近くなることによるものである。なお、不攪乱供試体の値は再構成供試体に比べて約1/3程度に留まる傾向であった。

・劉房子産原鉱石

表 3-10～表 3-13 に再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元を示す。また、図 3-19～図 3-22 に再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）および不攪乱供試体の膨潤圧の経時変化曲線をそれぞれ示す。

表 3-10 劉房子産不攪乱供試体の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験（劉房子不攪乱） | | | | |
|-----------------------------------|---------------|------|------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 試料名 | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.87 | 1.89 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.82 | 1.84 | 1.83 | 1.83 | 1.83 |
| 初期含水比(%) | 15.8 | 16.7 | 15.0 | 14.4 | 14.0 |
| 初期飽和度 (%) | 83.1 | 91.1 | 82.1 | 86.3 | 86.7 |
| 試験終了時含水比(%) | NA | NA | NA | 24.6 | 24.0 |
| 試験終了時飽和度(%) | NA | NA | NA | 137.1 | 132.9 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 2086 | 560 | 2452 | 1531 | 1495 |

表 3-11 劉房子産再構成供試体（～0.425 mm）の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(劉房子～0.425 mm) | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.43 | 1.62 | 1.76 | 1.90 | 1.77 | 1.63 | 1.45 | 1.12 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.87 | 1.89 | 1.87 | 1.89 | 1.42 | 1.60 | 1.71 | 1.88 | 1.76 | 1.62 | 1.43 | 1.12 |
| 初期含水比(%) | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 13.1 |
| 初期飽和度(%) | 69.9 | 72.0 | 70.7 | 71.2 | 39.4 | 52.7 | 64.5 | 82.7 | 66.1 | 53.3 | 40.6 | 19.8 |
| 試験終了時含水比(%) | NA | NA | 20.3 | 20.5 | 37.5 | 29.4 | 25.8 | 21.7 | 23.2 | 29.8 | 32.9 | 55.0 |
| 試験終了時飽和度(%) | NA | NA | 120.6 | 126.2 | 111.5 | 114.1 | 118.9 | 131.3 | 115.2 | 119.5 | 99.6 | 105.1 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 5777 | 6220 | 8007 | 7867 | 635 | 1431 | 2604 | 6123 | 4105 | 1493 | 694 | 280 |

表 3-12 劉房子産再構成供試体（0.850～2.00 mm）の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(劉房子 0.850～2.00 mm) | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.56 | 1.59 | 1.73 | 1.81 | 1.84 | 1.43 | 1.89 | 1.11 | 1.11 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.56 | 1.59 | 1.71 | 1.80 | 1.84 | 1.43 | 1.86 | 1.11 | 1.11 |
| 初期含水比(%) | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 |
| 初期飽和度(%) | 51.8 | 54.2 | 67.6 | 76.7 | 79.7 | 42.5 | 86.7 | 26.4 | 26.6 |
| 試験終了時含水比(%) | 32.0 | 29.4 | 25.8 | 23.5 | 22.8 | 36.8 | 21.5 | 57.2 | 55.0 |
| 試験終了時飽和度(%) | 116.2 | 111.2 | 117.4 | 125.2 | 128.6 | 110.0 | 126.0 | 106.7 | 102.6 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 837 | 1154 | 1805 | 2142 | 2657 | 535 | 4264 | 258 | 279 |

表 3-13 劉房子産再構成供試体（2.00～4.75 mm）の膨潤圧実験供試体の諸元

| 実験名 | 膨潤圧実験(劉房子 2.00～4.75 mm) | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.81 | 1.49 | 1.83 | 1.13 | 1.67 | 1.73 | 1.85 | 1.89 | 1.08 |
| 最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.81 | 1.49 | 1.81 | 1.11 | 1.66 | 1.70 | 1.82 | 1.85 | 1.08 |
| 初期含水比(%) | 12.0 | 15.6 | 15.6 | 15.4 | 15.4 | 15.4 | 15.4 | 15.4 | 15.4 |
| 初期飽和度 (%) | 64.6 | 51.5 | 87.0 | 29.6 | 66.6 | 72.3 | 87.7 | 94.0 | 27.4 |
| 試験終了時含水比 (%) | 21.6 | 35.3 | 22.6 | 58.9 | 26.9 | 25.7 | 21.8 | 20.4 | 61.7 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 115.7 | 115.3 | 121.9 | 110.2 | 114.3 | 116.8 | 118.8 | 118.0 | 110.1 |
| 最大膨潤圧(kPa) | 2935 | 723 | 1887 | 219 | 1393 | 1470 | 2153 | 2389 | 195 |

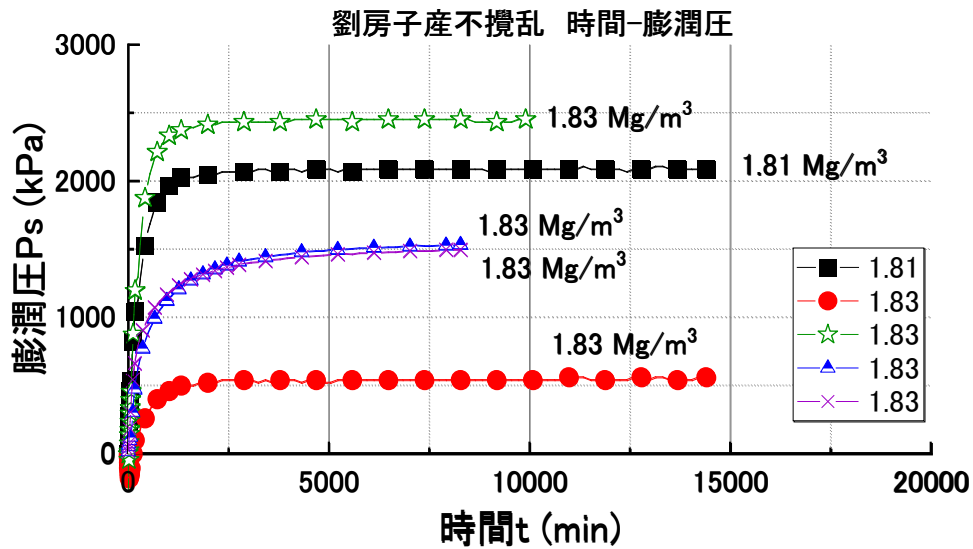


図 3-19 劉房子産原鉱石不攪乱供試体の膨潤圧経時変化曲線

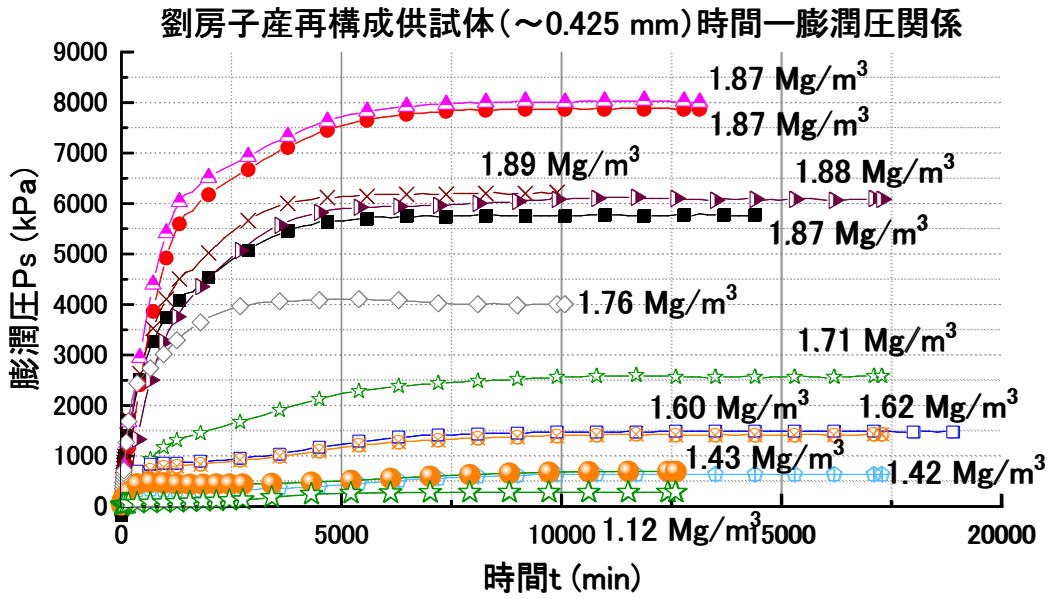


図 3-20 劉房子産原鈹石再構成供試体 (~0.425 mm) の膨潤圧経時変化曲線

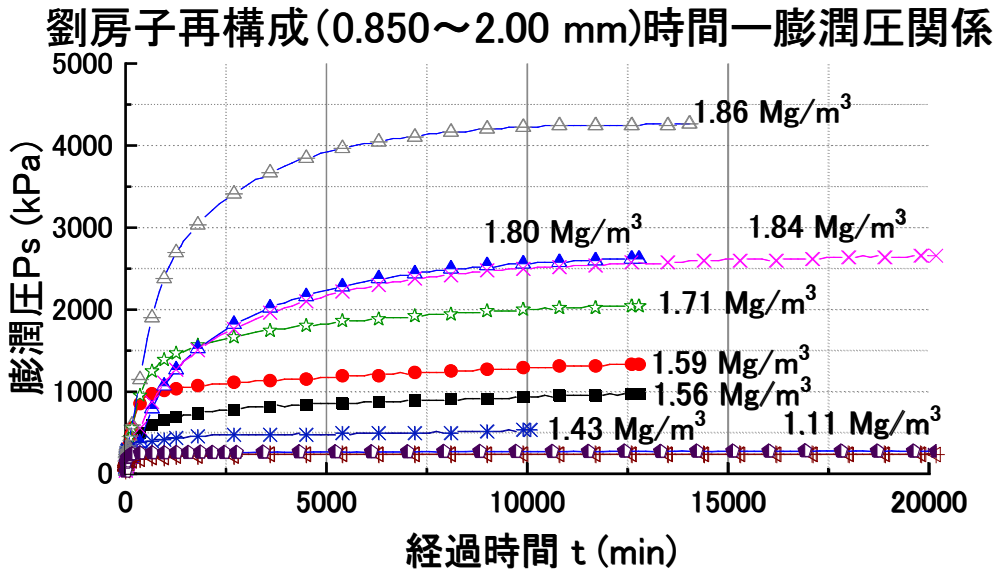


図 3-21 劉房子産原鈹石再構成供試体 (0.850~2.00 mm) の膨潤圧経時変化曲線

劉房子産再構成(2.00~4.75 mm)時間-膨潤圧関係

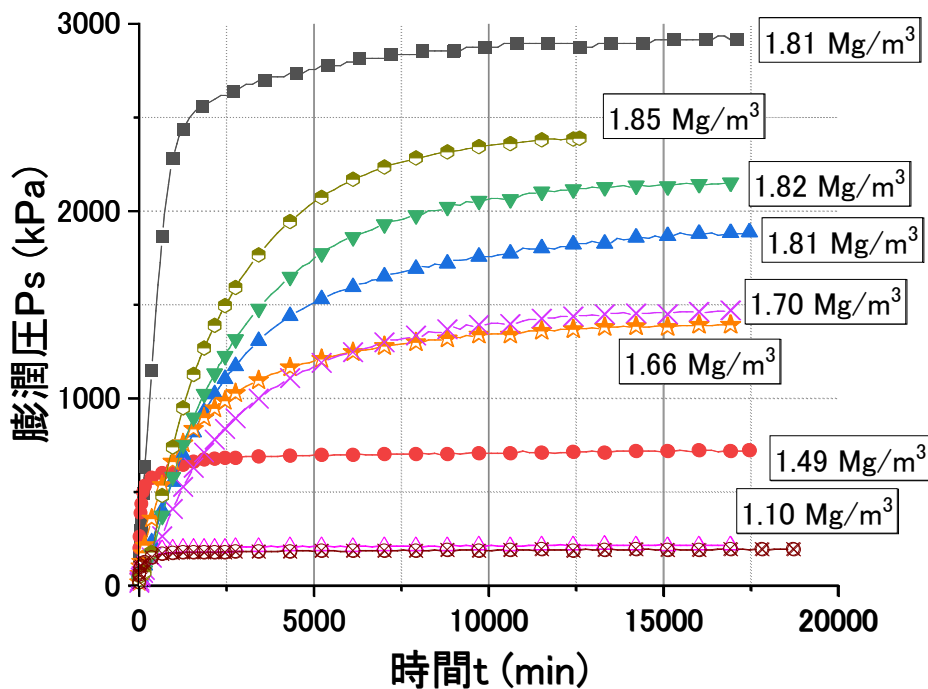


図 3-22 劉房子産原鉱石再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の膨潤圧経時変化曲線

粒径 ~ 0.425 mm の再構成供試体において、膨潤圧は試験開始直後に上昇した後、約 5000 分経過後は収束する傾向であった。乾燥密度が $1.42\sim 1.62$ Mg/m³ の比較的低乾燥密度の供試体においては、圧力の上昇ピークの後一度圧力が低下する挙動が見られ、これは月布産原鉱石の粒径 ~ 0.425 mm と同様の傾向であった。なお、乾燥密度によらず収束に要する時間に大きな差異は見られなかった。

粒径 $0.850\sim 2.00$ mm の再構成供試体において、試験開始直後に上昇した後に、約 5000 分経過後は収束する傾向であった。なお、収束に要する時間は、乾燥密度が高くなるほど長くなる傾向であった。

粒径 $2.00\sim 4.75$ mm の再構成供試体において、いずれのケースにおいても試験開始直後に上昇した後に、約 5000 分経過後は収束する傾向であった。また、粒径 $0.850\sim 2.00$ mm と同様、一定値に収束するまでに要した時間は、乾燥密度が高くなるほど長くなる傾向であった。

図 3-23 に再構成供試体および不攪乱供試体における、供試体の試験終了時の乾燥密度と最大膨潤圧の関係をそれぞれ示す。

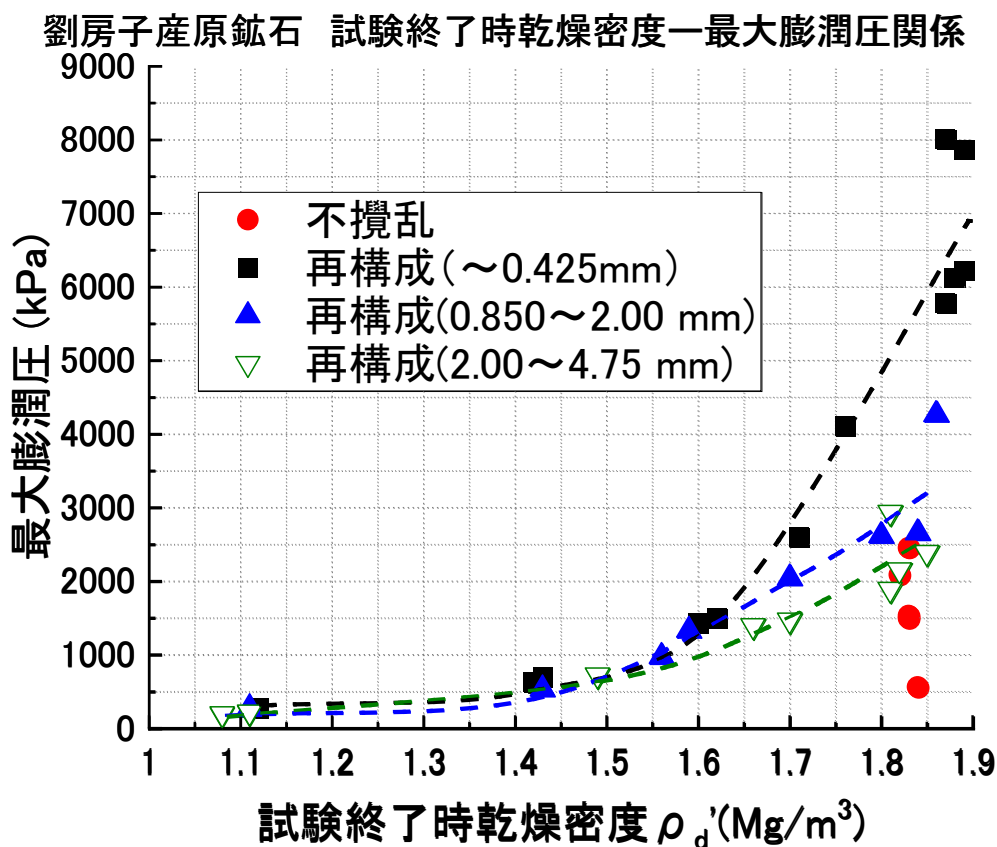


図 3-23 劉房子産原鉱石試験終了時乾燥密度—最大膨潤圧関係

これより再構成供試体においては、粒径に因らず乾燥密度が大きくなるにつれて、最大膨潤圧が上昇する傾向が見られた。粒径 ~ 0.425 mm と $0.850\sim 2.00$ mm および $2.00\sim 4.75$ mm を比較すると、月布産原鉱石と同様、比較的乾燥密度の低い $1.4\sim 1.7$ Mg/m³ の領域においては両者の値はほぼ同程度であるが、 1.7 Mg/m³ よりも高乾燥密度においては差異が大きくなる傾向であった。また、不攪乱供試体においては値のバラつきが大きく、再構成供試体に比べて値が小さい傾向であった。

3.6.2 一次元膨潤変形率実験結果

・月布産原鉱石

表 3-14～表 3-17 に再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元を示す。また、図 3-24～図 3-27 に再構成供試体および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線をそれぞれ示す。

表 3-14 月布産不攪乱供試体の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験（月布不攪乱） | | | | | | | | |
|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 試料名 | | | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.83 | 1.61 | 1.69 | 1.76 | 1.77 | 1.74 | 1.69 | 1.72 | 1.81 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.28 | 0.96 | 1.22 | 1.21 | 1.12 | 1.28 | 1.14 | 1.07 | 1.26 |
| 試験終了時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.54 | 0.77 | 0.62 | 0.65 | 0.76 | 1.19 | 0.69 | 0.66 | 0.84 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.99 | 0.36 | 0.36 | 0.33 | 0.35 | 0.77 | 0.36 | 0.34 | 0.45 |
| 試験終了時含水比(%) | 26.3 | 61.2 | 81.4 | NA | 98.2 | 66.2 | 117.8 | 117.7 | 147.9 |
| 試験終了時飽和度(%) | 91.9 | 65.9 | 64.5 | NA | 103.9 | 138.7 | 109.4 | 102.2 | 179.5 |
| 初期含水比(%) | 10.5 | 12.7 | 14.7 | 11.2 | 10.1 | 15.6 | 12.4 | 13.4 | 10.7 |
| 初期飽和度(%) | 48.7 | 56.3 | 59.6 | 54.2 | 49.3 | 71.9 | 53.9 | 60.9 | 55.9 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 18.3 [*] | 107.6 | 173.8 | 173.0 | 131.0 | 80.0 [*] | 156.3 | 166.7 | 117.6 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度 (Mg/m ³) | - [*] | 0.27 | 0.27 | 0.32 | 0.33 | - [*] | 0.34 | 0.29 | 0.44 |

※十分な収束状態に至る前に実験を終了したため、参考値

表 3-15 月布産再構成供試体（～0.425 mm）の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験（月布～0.425 mm） | | | | | | | | | |
|---|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 試料名 | | | | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.80 | 1.57 | 1.62 | 1.43 | 1.56 | 1.81 | 1.91 | 1.76 | 1.10 | 1.75 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.26 | 0.93 | 1.15 | 0.90 | 1.02 | 1.27 | 1.38 | 1.21 | 0.63 | 1.20 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.64 | 0.72 | 0.61 | 0.58 | 0.60 | 0.66 | 0.64 | 0.68 | 0.57 | 0.67 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.33 | 0.33 | 0.35 | 0.29 | 0.27 | 0.38 | 0.33 | 0.35 | 0.29 | 0.35 |
| 試験終了時含水比 (%) | NA | NA | NA | 132.0 | 129.7 | 116.1 | 121.3 | 124.6 | 140.8 | 112.8 |
| 試験終了時飽和度 (%) | NA | NA | NA | 96.6 | 99.0 | 101.5 | 101.6 | 111.6 | 102.2 | 100.6 |
| 初期含水比(%) | 10.3 | 10.4 | 11.2 | 11.0 | 11.0 | 11.0 | 11.0 | 10.3 | 10.0 | 7.4 |
| 初期飽和度 (%) | 65.4 | 38.1 | 53.9 | 32.7 | 39.6 | 57.8 | 68.1 | 49.7 | 18.3 | 34.9 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 196.1 | 122.0 | 185.2 | 169.5 | 188.7 | 208.3 | 243.9 | 200.0 | 94.3 | 238.1 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.31 | 0.32 | 0.33 | 0.27 | 0.27 | 0.30 | 0.28 | 0.34 | 0.29 | 0.26 |

表 3-16 月布産再構成供試体（0.850～2.00 mm）の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験（月布 0.850～2.00 mm） | | | | | | |
|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 試料名 | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.56 | 1.79 | 1.92 | 1.66 | 1.46 | 1.58 | 1.10 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.01 | 1.25 | 1.39 | 1.11 | 0.92 | 1.04 | 0.63 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.63 | 0.66 | 0.68 | 0.71 | 0.63 | 0.65 | 0.57 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.32 | 0.34 | 0.35 | 0.37 | 0.32 | 0.33 | 0.29 |
| 試験終了時含水比 (%) | 122.5 | 119.7 | 113.9 | 119.2 | 126.0 | 116.2 | 135.9 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 100.9 | 103.5 | 103.0 | 113.3 | 103.0 | 98.9 | 98.5 |
| 初期含水比(%) | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 11.2 | 11.2 | 11.2 | 11.2 |
| 初期飽和度 (%) | 44.7 | 63.7 | 78.2 | 46.7 | 34.6 | 42.0 | 20.3 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 169.5 | 204.1 | 217.4 | 158.7 | 156.3 | 178.6 | 93.5 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.29 | 0.30 | 0.31 | 0.33 | 0.33 | 0.29 | 0.29 |

表 3-17 月布産再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験 (月布 2.00~4.75 mm) | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.49 | 1.74 | 1.48 | 1.56 | 1.28 | 1.82 | 1.08 | 1.81 | 1.93 |
| 試験開始時有効モンモリ ロナイト密度(Mg/m ³) | 0.95 | 1.21 | 0.94 | 1.02 | 0.77 | 1.30 | 0.61 | 1.27 | 1.40 |
| 試験終了時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 0.61 | 0.61 | 0.63 | 0.61 | 0.58 | 0.64 | 0.57 | 0.69 | 0.67 |
| 試験終了時有効モンモリ ロナイト密度(Mg/m ³) | 0.35 | 0.35 | 0.32 | 0.31 | 0.29 | 0.33 | 0.29 | 0.36 | 0.34 |
| 試験終了時含水比 (%) | 131.9 | 128.2 | 124.9 | 123.3 | 132.3 | 118.8 | 135.9 | 111.0 | 115.8 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 102.9 | 100.7 | 102.1 | 97.6 | 96.6 | 98.7 | 97.5 | 101.8 | 102.2 |
| 初期含水比(%) | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 |
| 初期飽和度 (%) | 36.4 | 53.1 | 36.1 | 40.7 | 27.2 | 62.0 | 20.0 | 59.3 | 52.4 |
| 最大一次元膨潤変形率 (%) | 153.8 | 208.3 | 156.3 | 188.7 | 149.3 | 238.1 | 91.7 | 200.0 | 232.6 |
| 最大膨潤率時の有効モン モリロナイト密度 (Mg/m ³) | 0.30 | 0.28 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.31 | 0.29 |

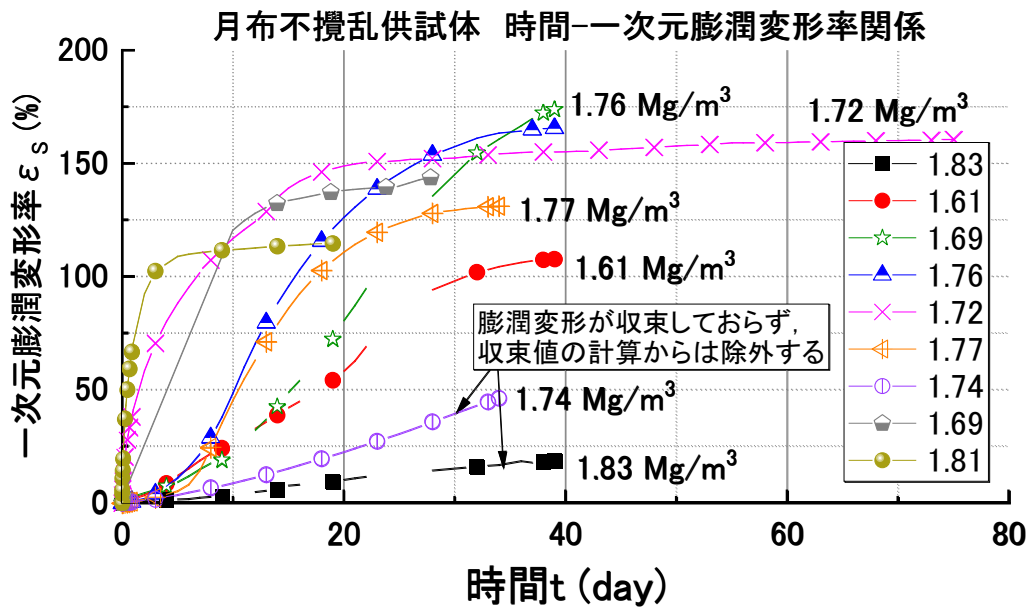


図 3-24 月布産原鉱石不攪乱供試体の一次元膨潤変形率経時変化曲線

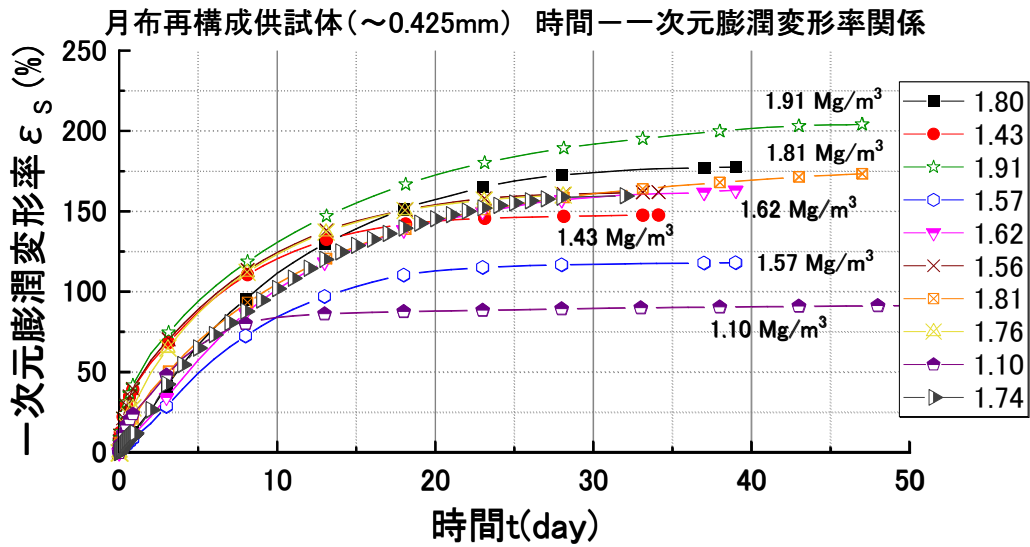


図 3-25 月布産原鉱石再構成供試体 (~0.425 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

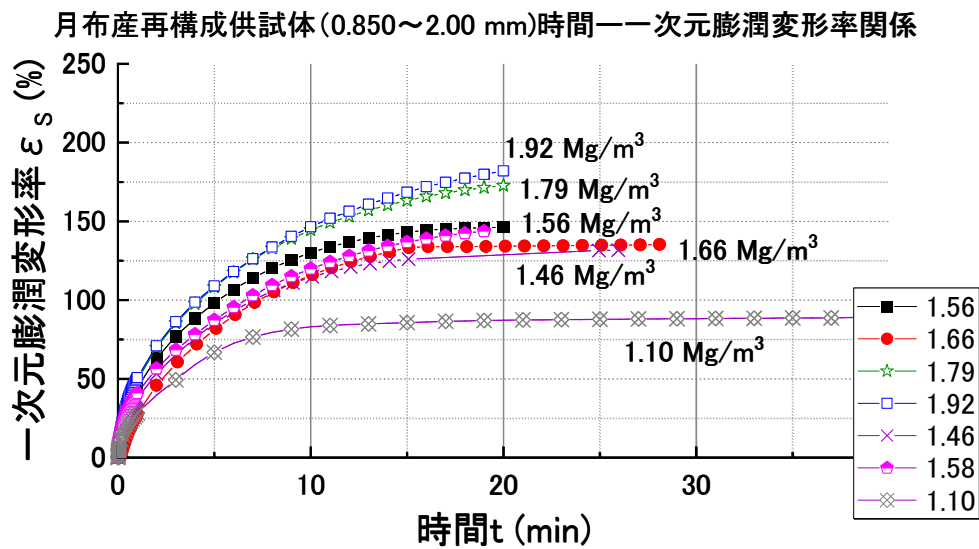


図 3-26 月布産原鉱石再構成供試体 (0.850~2.00 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

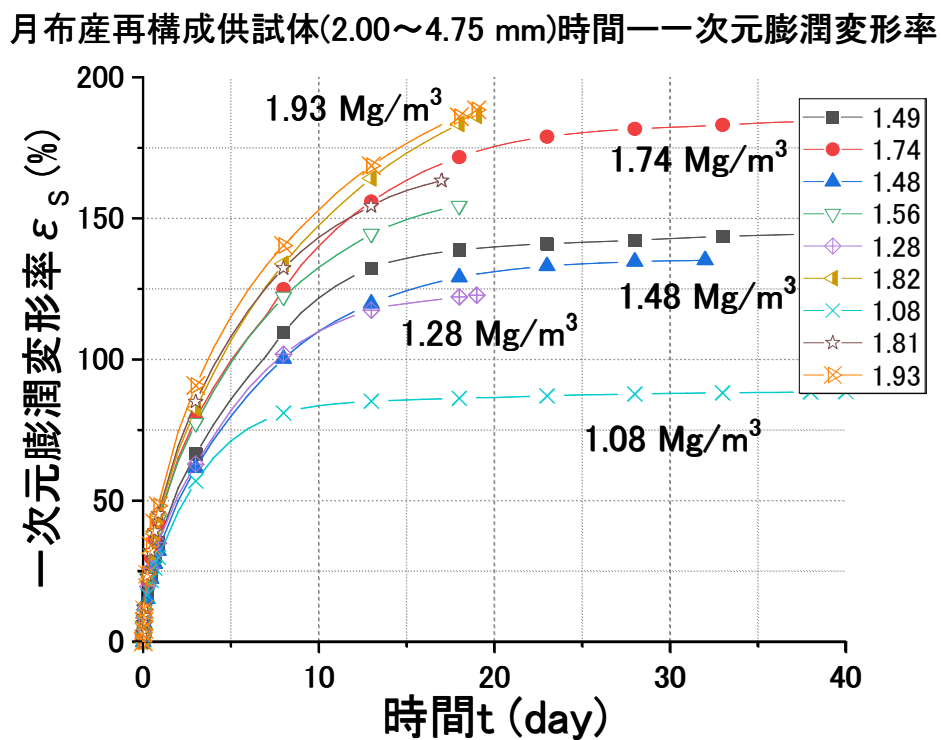


図 3-27 月布産原鉱石再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

粒径 ~ 0.425 mm, $0.850\sim 2.00$ mm および $2.00\sim 4.75$ mm の再構成供試体において, 一次元膨潤変形率の経時変化は双曲線状であり, 実験開始直後に急激に上昇し, その後収束している. また, 収束に要する時間を比較すると, 粒径 ~ 0.425 mm が他の2種の粒径に比べて10日程長い傾向が見受けられた.

不攪乱供試体において, 一次元膨潤変形率の増加挙動にはバラつきがあるものの, 大半の供試体においては, 再構成供試体に比べて試験開始直後の上昇は緩やかであり, $10\sim 20$ 日程度遅れて双曲線状に上昇する傾向が見受けられた. このことから, 不攪乱供試体においては, 膠結作用の影響により, 初期状態においてはセメンテーションにより水分と接触してもモンモリロナイトが緩やかに膨潤し, それとともにセメンテーションが消失して膨潤変形挙動を開始する挙動が生じていると推察する.

また, 図 3-28 に不攪乱供試体と再構成供試体の乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係を示す.

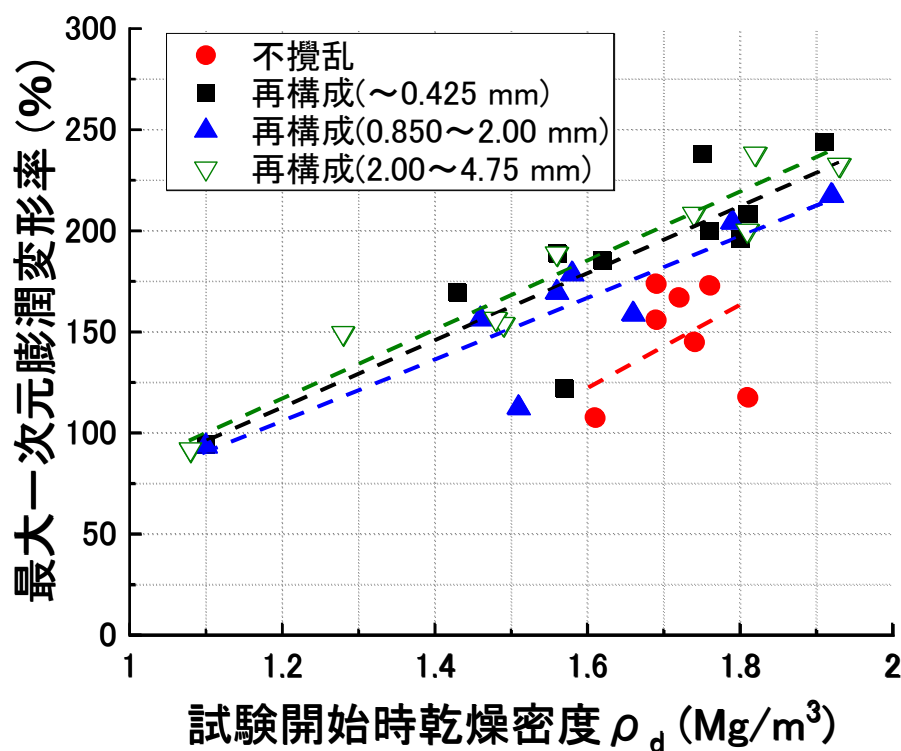


図 3-28 月布産原鉱石の試験開始時乾燥密度-最大一次元膨潤変形率関係

これより, 再構成供試体においては, 粒径 ~ 0.425 mm, $0.850\sim 2.00$ mm および $2.00\sim 4.75$ mm のいずれにおいても, 乾燥密度と最大一次元膨潤変形率には比例関係があることが見受けられる. なお, 3種類の粒径を比べると, 粒径 $2.00\sim 4.75$ mm, 粒径 ~ 0.425 mm, $0.850\sim 2$ mm の順で最大一次元膨潤変形率が大きくなっており, 粒径およびセメンテーションの影響は小さいと推察される. 一方, 不攪乱供試体では乾燥密度と最大一次元膨潤変

形率に比例関係が見られるが、バラつきが大きく、供試体内部の土粒子構造の不均質性によるものと推察される。

また、図 3-29 に再構成供試体と不攪乱供試体における、試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時乾燥密度の関係を示す。

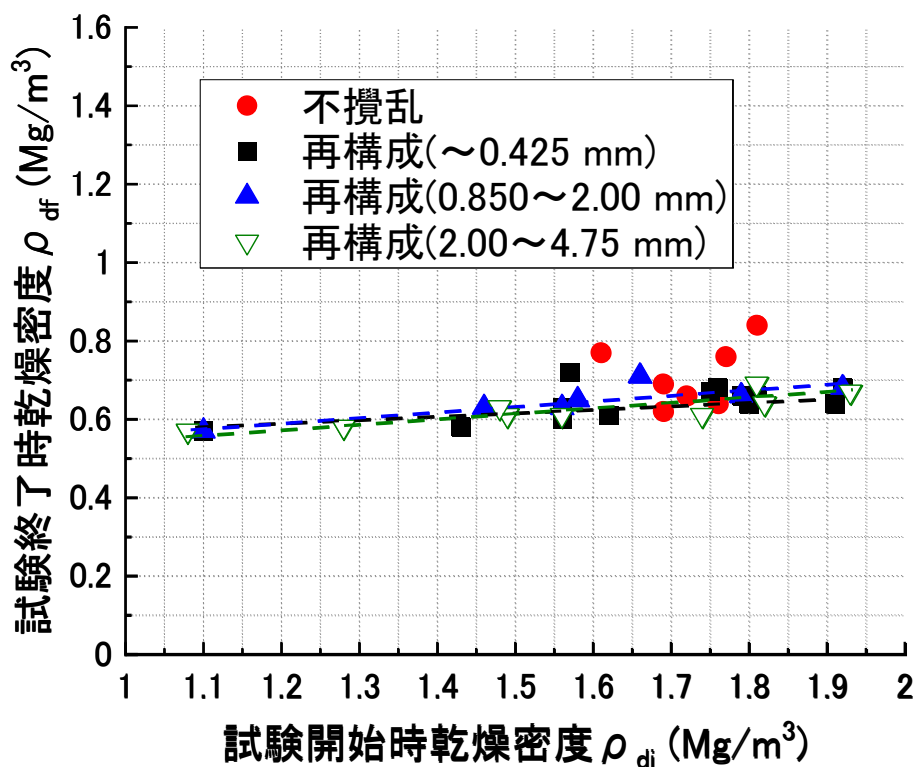


図 3-29 月布産原鉱石の試験開始時乾燥密度と試験終了時乾燥密度の関係

これより、再構成供試体においては、試験開始時の供試体乾燥密度に因らず試験終了時の乾燥密度が $0.6 \sim 0.7 Mg/m^3$ の範囲にある。一方で、不攪乱供試体においては、大半の供試体が再構成供試体と同様の終了時乾燥密度に収まるものの、一部の供試体においてはバラつきが見られた。これは、供試体内部におけるセメンテーションにバラつきがあり、固結が強い部分においては膨潤変形が阻害され、試験終了時の乾燥密度が高く留まったものと推察する。

・ Ten Sleep 産原鉱石

表 3-18～表 3-21 に再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元を示す。また、図 3-30～図 3-33 に粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm の再構成供試体および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線をそれぞれ示す。

表 3-18 Ten Sleep 産不攪乱供試体の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験 (Ten Sleep 不攪乱) | | | | | |
|--|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 試料名 | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.41 | 1.46 | 1.46 | 1.51 | 1.47 | 1.58 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.98 | 1.02 | 1.02 | 1.07 | 1.03 | 1.15 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.69 | 0.66 | 0.57 | 0.65 | 0.61 | 0.45 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.40 | 0.38 | 0.32 | 0.37 | 0.35 | 0.25 |
| 試験終了時含水比 (%) | NA | NA | 143.5 | 133.6 | 137.3 | 210.7 |
| 試験終了時飽和度 (%) | NA | NA | 103.7 | 114.3 | 108.0 | 115.4 |
| 初期含水比(%) | 34.9 | 30.0 | 30.0 | 28.0 | 28.4 | 20.3 |
| 初期飽和度 (%) | 105.2 | 96.5 | 96.6 | 97.7 | 93.2 | 79.5 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 122.0 | 137.0 | 142.0 | 112.4 | 178.6 | 263.2 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度 (Mg/m ³) | 0.37 | 0.35 | 0.28 | 0.42 | 0.30 | 0.21 |

表 3-19 Ten Sleep 産再構成供試体（～0.425 mm）の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験(Ten Sleep～0.425 mm) | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.48 | 1.53 | 1.39 | 1.48 | 1.52 | 1.09 | 1.27 | 1.34 | 1.20 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.05 | 1.09 | 0.96 | 1.04 | 1.08 | 0.70 | 0.85 | 0.91 | 0.79 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.45 | 0.36 | 0.41 | 0.39 | 0.38 | 0.56 | 0.40 | 0.44 | 0.48 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.25 | 0.19 | 0.22 | 0.21 | 0.21 | 0.32 | 0.22 | 0.24 | 0.27 |
| 試験終了時含水比 (%) | NA | 240.9 | 240.6 | 229.1 | 224.4 | 232.3 | 218.2 | 188.7 | 173.6 |
| 試験終了時飽和度 (%) | NA | 102.0 | 117.4 | 104.3 | 100.5 | 165.0 | 103.5 | 100.7 | 102.9 |
| 初期含水比(%) | 24.7 | 22.9 | 24.7 | 29.5 | 29.5 | 13.8 | 13.8 | 13.8 | 4.6 |
| 初期飽和度 (%) | 82.7 | 82.2 | 71.7 | 97.8 | 104.2 | 25.6 | 33.6 | 37.3 | 10.1 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 278.0 | 350.8 | 238.7 | 344.8 | 357.1 | 116.3 | 270.3 | 263.2 | 153.8 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.21 | 0.18 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.28 | 0.19 | 0.20 | 0.27 |

表 3-20 Ten Sleep 産再構成供試体（0.850～2.00 mm）の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験(Ten Sleep0.850～2.00 mm) | | | | | | | | |
|---|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.42 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.51 | 1.13 | 1.29 | 1.25 | 1.63 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.98 | 1.02 | 1.05 | 1.07 | 1.08 | 0.72 | 0.86 | 0.83 | 1.20 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.40 | 0.41 | 0.41 | 0.40 | 0.42 | 0.40 | 0.47 | 0.38 | 0.47 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.23 | 0.22 | 0.26 | 0.21 | 0.26 |
| 試験終了時含水比 (%) | 216.5 | 213.6 | 217.0 | 219.9 | 205.2 | 223.6 | 178.6 | 236.5 | 177.9 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 102.0 | 104.5 | 104.1 | 104.2 | 102.0 | 104.4 | 101.2 | 104.5 | 100.9 |
| 初期含水比(%) | 33.5 | 33.5 | 27.8 | 27.8 | 26.5 | 21.9 | 21.9 | 21.9 | 21.9 |
| 初期飽和度 (%) | 101.7 | 107.0 | 93.5 | 96.4 | 92.5 | 42.8 | 54.5 | 51.6 | 91.9 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 312.5 | 322.6 | 312.5 | 333.3 | 312.5 | 217.4 | 196.1 | 243.9 | 333.3 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 0.24 | 0.2 | 0.21 |

表 3-21 Ten Sleep 産再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験(Ten Sleep2.00~4.75 mm) | | | | |
|---|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.26 | 1.26 | 1.37 | 1.56 | 1.45 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.84 | 0.84 | 0.94 | 1.12 | 1.02 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.41 | 0.40 | 0.39 | 0.45 | 0.42 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.22 | 0.22 | 0.21 | 0.25 | 0.23 |
| 試験終了時含水比 (%) | 210.6 | 211.8 | 228.0 | 221.8 | 196.2 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 100.8 | 99.7 | 103.7 | 119.8 | 98.3 |
| 初期含水比(%) | 42.6 | 42.6 | 24.4 | 24.4 | 24.4 |
| 初期飽和度 (%) | 101.7 | 101.7 | 69.1 | 91.3 | 77.9 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 250.0 | 256.4 | 294.1 | 303.0 | 294.1 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.21 | 0.20 |

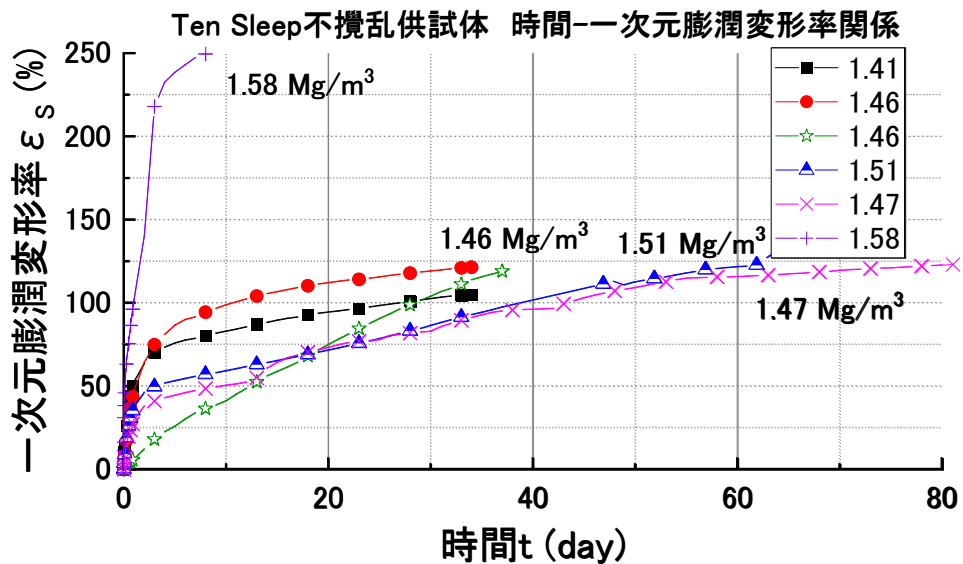


図 3-30 Ten Sleep 産原鉱石不攪乱供試体の一次元膨潤変形率経時変化曲線

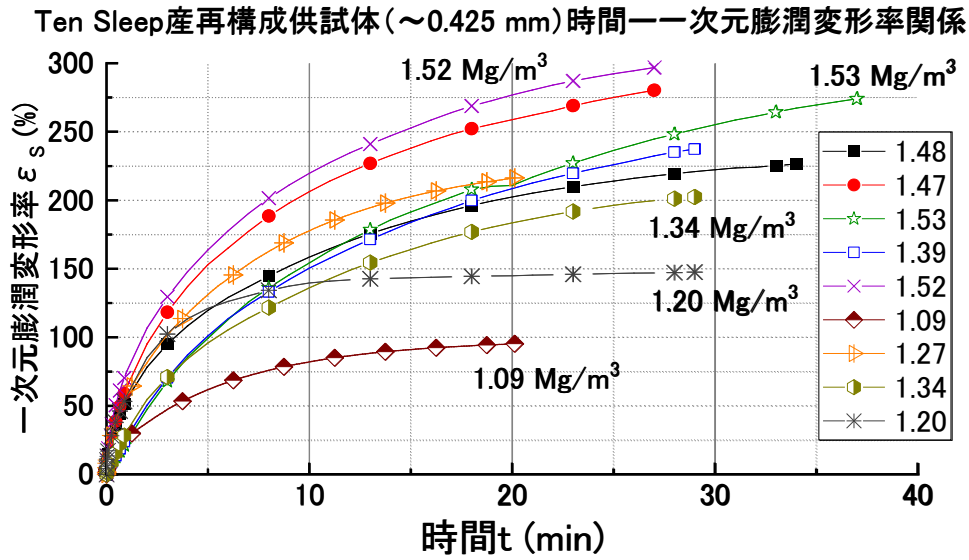


図 3-31 Ten Sleep 産原鉱石再構成供試体 (～0.425 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

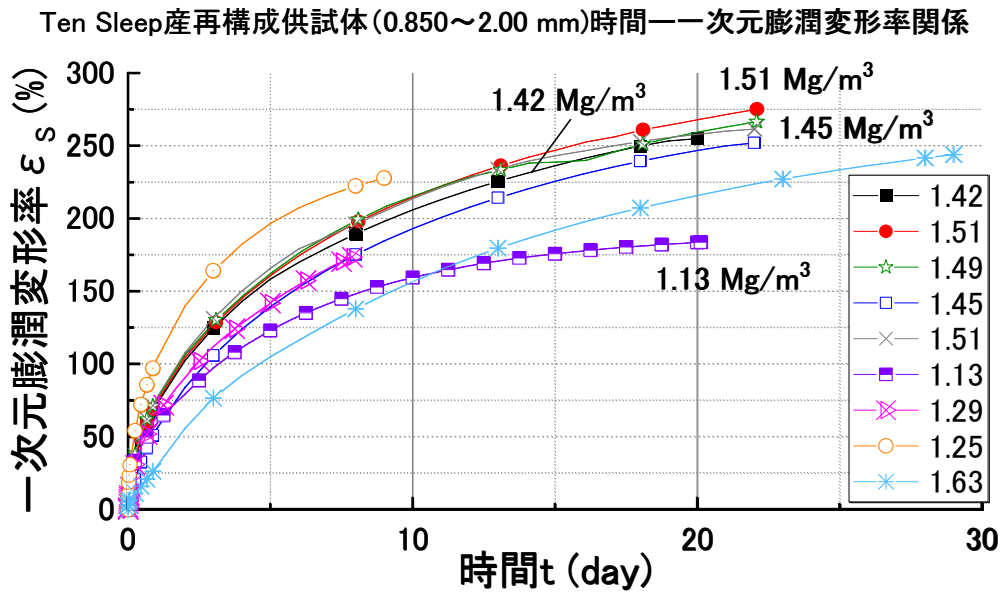


図 3-32 Ten Sleep 産原鉱石再構成供試体 (0.850～2.00 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

Ten Sleep再構成供試体(2.00~4.75 mm)時間—一次元膨潤変形率関係

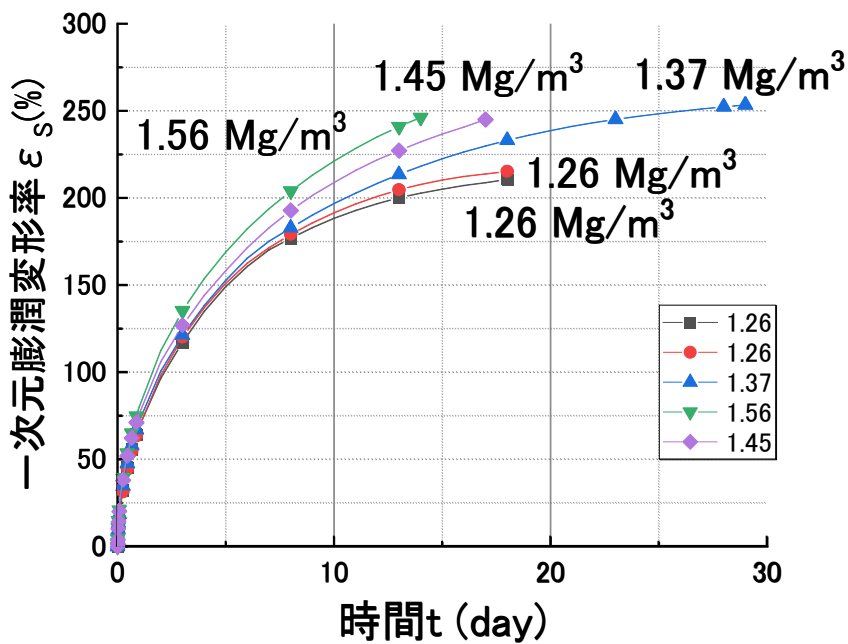


図 3-33 Ten Sleep 産原鉱石再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

再構成供試体において、いずれの粒径においても、時間経過に応じて双曲線状に一次元膨潤変形率が増加する挙動である。収束に要する時間はいずれも 20 日程度であり、大きな差異はなかった。

不攪乱供試体において、再構成供試体に比べて、一次元膨潤変形率の収束に要する時間が 40 日以上と極めて長いことが分かる。また、一部の供試体においては、再構成供試体のような双曲線状の増加挙動ではなく、直線的な増加挙動であった。このことから、不攪乱供試体においては、膠結作用の影響により、時間経過後も膨潤変形挙動が抑制されていると推察する。

また、図 3-34 に再構成供試体 (粒径: ~0.425 mm, 0.850~2.00 mm, 2.00~4.75 mm) および不攪乱供試体における、試験開始時の乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係を示す。

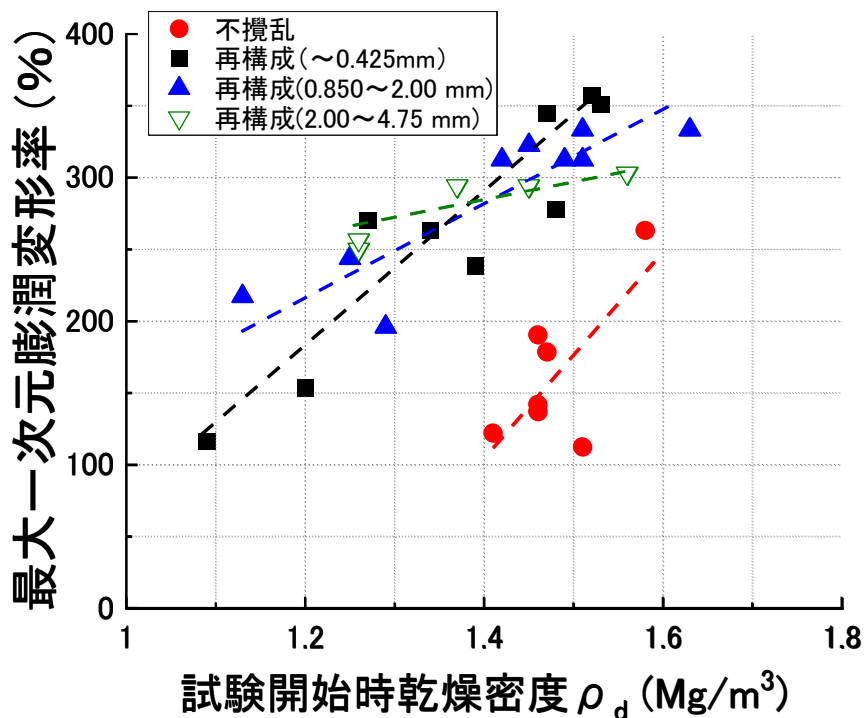


図 3-34 Ten Sleep 産原鉱石の試験開始時乾燥密度－最大一次元膨潤変形率関係

これより、再構成供試体においては、乾燥密度と最大一次元膨潤変形率には比例関係が見られた。なお、粒径～0.425 mm の供試体における近似直線の傾きが一番大きく、粒径 2.00～4.75 mm の供試体における傾きが一番小さかった。故に、粒径が小さくセメンテーションの影響が小さいほど、乾燥密度による一次元膨潤変形率の増加の感度が良いことが分かる。一方で、不攪乱供試体において、最大一次元膨潤率は乾燥密度の増加に伴い増加している傾向が見受けられるが、再構成供試体に比べてバラつきが大きい。

また、図 3-35 に再構成供試体（粒径：～0.425 mm，0.850～2.00 mm，2.00～4.75 mm）および不攪乱供試体における、試験開始時の乾燥密度と試験終了時の乾燥密度の関係を示す。

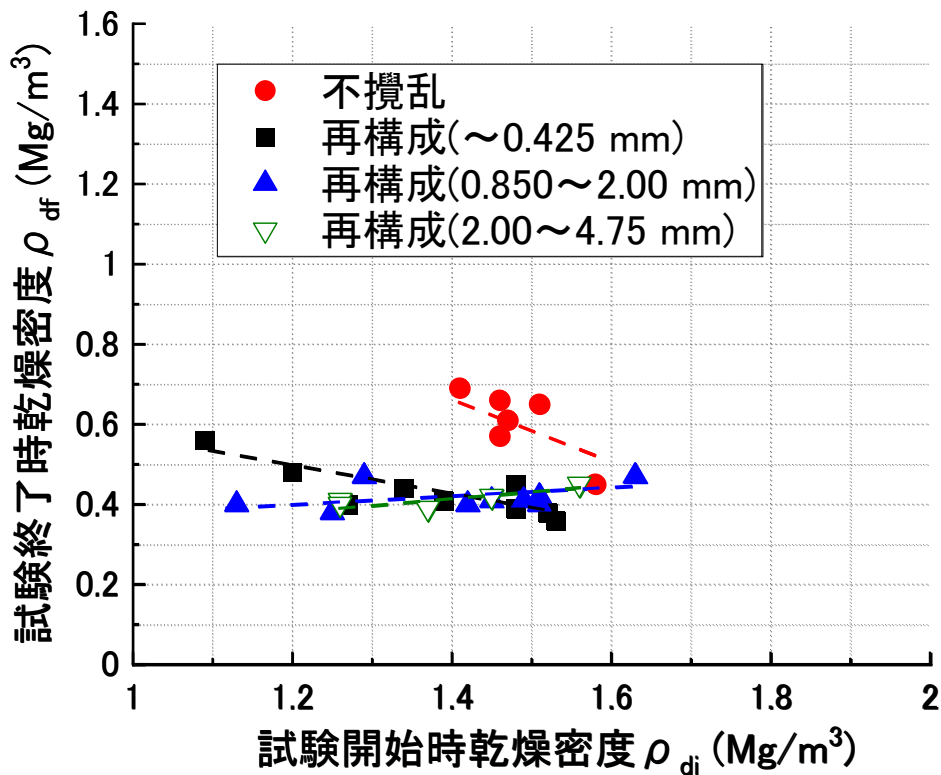


図 3-35 Ten Sleep 産原鉱石の試験開始時乾燥密度－試験終了時乾燥密度

これより、再構成供試体においては、粒径 ~ 0.425 mm の低乾燥密度 ($1.1\sim 1.2$ Mg/m³) 領域を除いて、試験終了時の乾燥密度が 0.4 Mg/m³ 程度に収束する傾向が見られた。不攪乱供試体においては、試験開始時の乾燥密度によらず、試験終了時の乾燥密度が $0.60\sim 0.65$ Mg/m³ に収束した。これより、不攪乱供試体においては、膠結作用の影響により膨潤変形が抑制され、試験終了時においても乾燥密度が高く留まったものと推察される。

・劉房子産原鉱石

表 3-22～表 3-25 に再構成供試体 (粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00 mm～4.75 mm) および不攪乱供試体の供試体諸元を示す. また, 図 3-36～図 3-39 に粒径～0.425 mm, 0.850～2.00 mm, 2.00～4.75 mm の再構成供試体および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線をそれぞれ示す.

表 3-22 劉房子産不攪乱供試体の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験 (劉房子不攪乱) | | | | | | |
|---|--------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 試料名 | | | | | | | |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.83 | 1.89 | 1.92 | 1.87 | 1.94 | 1.87 | 1.83 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.40 | 1.47 | 1.51 | 1.45 | 1.54 | 1.45 | 1.40 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.00 | 0.97 | 1.25 | 0.74 | 0.60 | 0.63 | 0.86 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.62 | 0.60 | 0.83 | 0.43 | 0.34 | 0.36 | 0.52 |
| 試験終了時含水比 (%) | NA | NA | NA | 109.5 | 144.2 | 140.0 | 82.4 |
| 試験終了時飽和度 (%) | NA | NA | NA | 112.2 | 111.4 | 114.3 | 103.3 |
| 初期含水比(%) | 16.0 | 15.8 | 13.3 | 12.5 | 11.3 | 11.3 | 13.8 |
| 初期飽和度 (%) | 89.0 | 97.3 | 99.3 | 74.3 | 76.3 | 67.0 | 77.2 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 106.4 | 101.0 | 63.8 | 166.7 | 243.9 | 222.2 | 147.1 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.54 | 0.58 | 0.76 | 0.35 | 0.27 | 0.29 | 0.44 |

表 3-23 劉房子産再構成供試体（～0.425 mm）の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験（劉房子～0.425mm） | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.84 | 1.86 | 1.84 | 1.44 | 1.61 | 1.85 | 1.70 | 1.76 | 1.96 | 1.15 | 1.79 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.41 | 1.43 | 1.41 | 0.99 | 1.16 | 1.42 | 1.26 | 1.32 | 1.55 | 0.75 | 1.35 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.69 | 0.57 | 0.61 | 0.53 | 0.54 | 0.54 | 0.55 | 0.57 | 0.57 | 0.53 | 0.64 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.40 | 0.32 | 0.35 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.33 | 0.32 | 0.30 | 0.37 |
| 試験終了時含水比 (%) | NA | NA | NA | 158.1 | 151.7 | 152.9 | 148.0 | 143.5 | 146.0 | 155.4 | 120.8 |
| 試験終了時飽和度 (%) | NA | NA | NA | 104.1 | 102.8 | 103.8 | 103.3 | 103.7 | 105.0 | 102.4 | 102.1 |
| 初期含水比(%) | 12.0 | 14.9 | 14.9 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 12.9 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 10.4 |
| 初期飽和度 (%) | 67.7 | 86.9 | 84.0 | 39.9 | 51.4 | 74.9 | 58.4 | 64.8 | 90.7 | 26.3 | 54.2 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 181.8 | 244.0 | 222.0 | 192.0 | 222.2 | 285.7 | 263.0 | 256.4 | 303.0 | 114.9 | 277.8 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.38 | 0.31 | 0.33 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.26 | 0.28 | 0.27 | 0.30 | 0.26 |

表 3-24 劉房子産再構成供試体（0.850～2.00 mm）の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験（劉房子 0.850～2.00 mm） | | | | | | | | |
|---|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.58 | 1.72 | 1.86 | 1.51 | 1.34 | 1.43 | 1.94 | 1.68 | 1.07 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.13 | 1.28 | 1.44 | 1.06 | 0.91 | 1.00 | 1.53 | 1.23 | 0.68 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.62 | 0.65 | 0.64 | 0.65 | 0.62 | 0.66 | 0.64 | 0.65 | 0.60 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.36 | 0.38 | 0.37 | 0.38 | 0.36 | 0.38 | 0.37 | 0.38 | 0.34 |
| 試験終了時含水比 (%) | 127.4 | 121.6 | 122.6 | 123.0 | 127.4 | 117.7 | 122.0 | 113.6 | 131.2 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 103.2 | 104.4 | 102.4 | 104.7 | 102.8 | 102.6 | 102.4 | 97.5 | 100.4 |
| 初期含水比(%) | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 13.9 | 14.2 | 12.2 | 12.2 | 14.2 | 14.2 |
| 初期飽和度 (%) | 53.4 | 66.2 | 83.2 | 46.8 | 37.4 | 37.1 | 81.5 | 62.4 | 25.0 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 169.5 | 185.2 | 222.2 | 151.0 | 125.0 | 125.0 | 227.3 | 188.7 | 81.3 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.34 | 0.35 | 0.33 | 0.34 | 0.34 | 0.37 | 0.34 | 0.33 | 0.34 |

表 3-25 劉房子産再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の一次元膨潤変形率実験供試体の諸元

| 実験名 | 一次元膨潤変形実験 (劉房子 2.00~4.75 mm) | | | | | | |
|---|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.85 | 1.48 | 1.67 | 1.63 | 1.14 | 1.10 | 1.92 |
| 試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 1.42 | 1.03 | 1.23 | 1.19 | 0.73 | 0.71 | 1.50 |
| 試験終了時の乾燥密度(Mg/m ³) | 0.70 | 0.72 | 0.78 | 0.81 | 0.64 | 0.62 | 0.67 |
| 試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.41 | 0.42 | 0.46 | 0.49 | 0.36 | 0.36 | 0.39 |
| 試験終了時含水比 (%) | 109.5 | 104.1 | 90.6 | 86.9 | 133.7 | 126.0 | 116.3 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 103.8 | 101.8 | 98.6 | 100.6 | 111.8 | 101.4 | 103.7 |
| 初期含水比(%) | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 15.6 | 15.6 |
| 初期飽和度 (%) | 68.9 | 39.0 | 52.3 | 49.1 | 23.6 | 28.9 | 100.4 |
| 最大一次元膨潤変形率(%) | 178.6 | 117.7 | 129.9 | 109.9 | 90.1 | 80.6 | 227.3 |
| 最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m ³) | 0.39 | 0.40 | 0.43 | 0.46 | 0.34 | 0.35 | 0.33 |

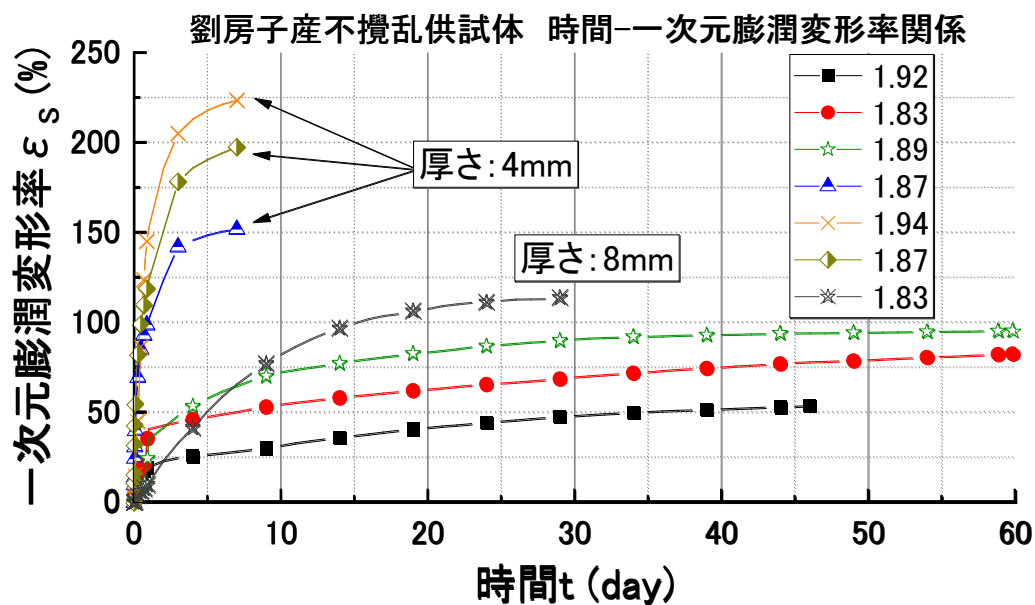


図 3-36 劉房子産原鉍石不攪乱供試体の一次元膨潤変形率経時変化曲線

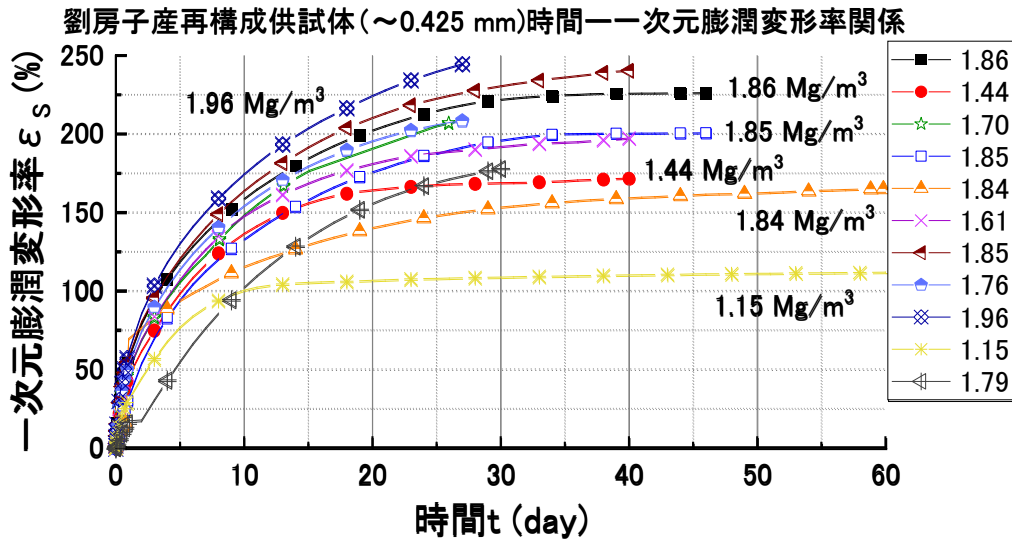


図 3-37 劉房子産原鈹石再構成供試体 (～0.425 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

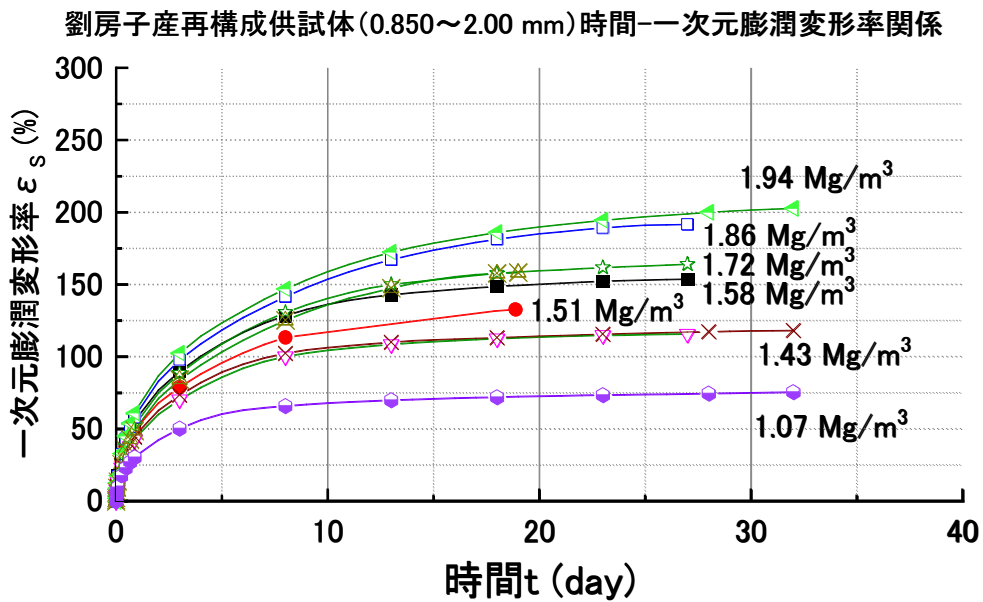


図 3-38 劉房子産原鈹石再構成供試体 (0.850～2.00 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

劉房子産再構成供試体(2.00~4.75 mm)時間-一次元膨潤変形率関係

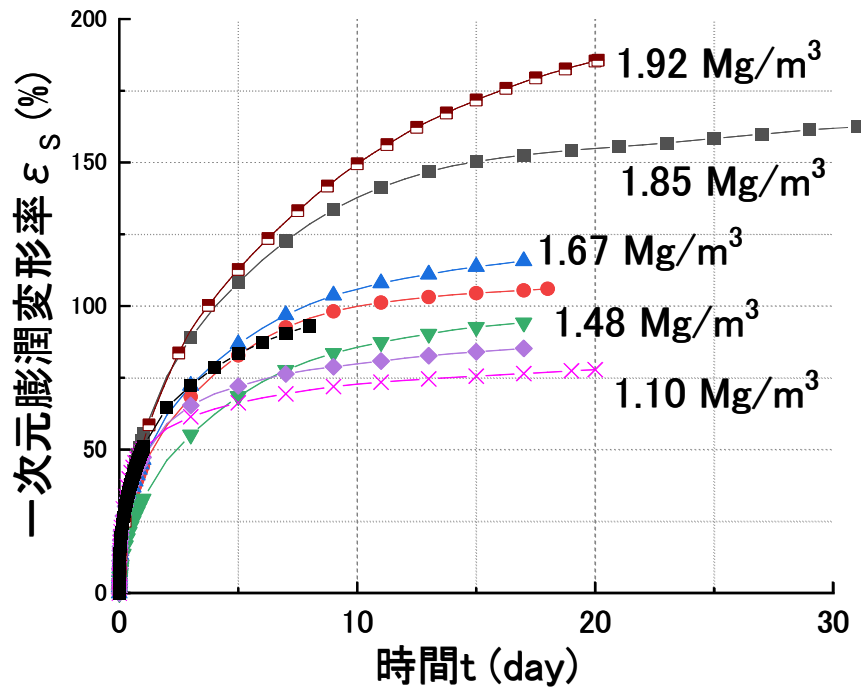


図 3-39 劉房子産原鉱石再構成供試体 (2.00~4.75 mm) の一次元膨潤変形率経時変化曲線

再構成供試体において、一次元膨潤変形率は時間経過に応じて双曲線状に増加しており、20~30 日程度で一定値に収束する傾向が見られた。不攪乱供試体においては、初期高さが 10 mm の供試体においては、一次元膨潤変形率の経時増加はより緩やかであり、一定値に収束するまでに 40~50 日と、約 2 倍程度を要した。このことから、不攪乱供試体においては、膠結作用の影響により、膨潤変形挙動が遅延されたものと推察される。

また、図 3-40 に再構成供試体 (粒径: ~0.425 mm, 0.850~2 mm, 2.00~4.75 mm) および不攪乱供試体における、試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係を示す。

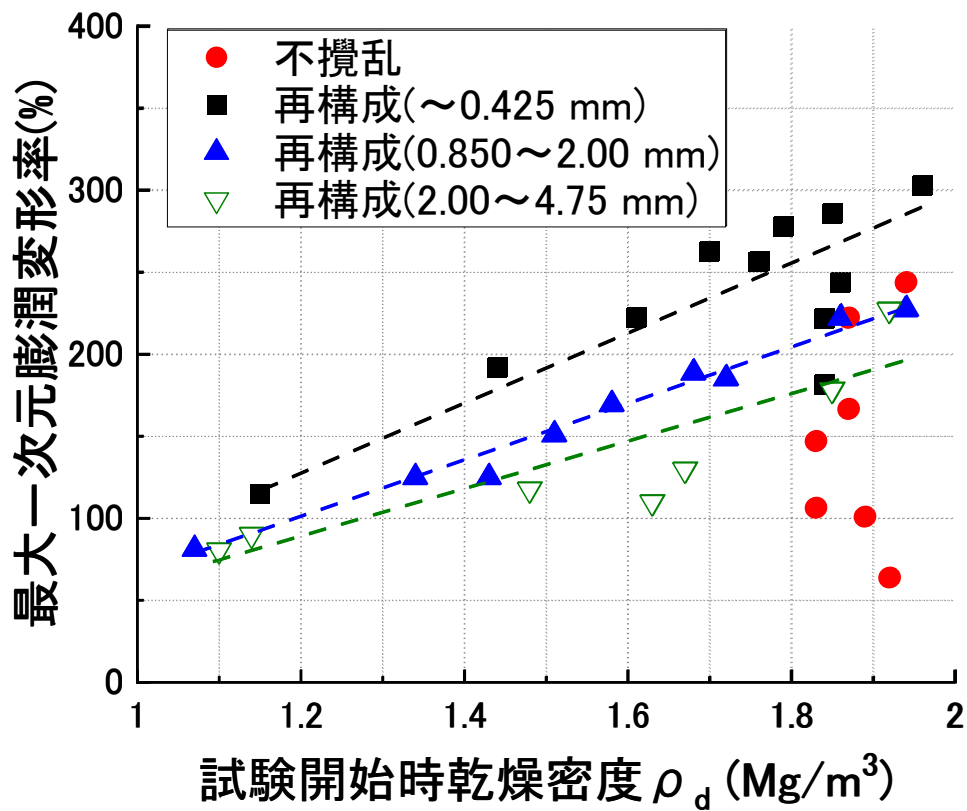


図 3-40 劉房子産原鉱石の試験開始時乾燥密度—最大一次元膨潤変形率関係

これより、再構成供試体においては、いずれも乾燥密度と最大一次元膨潤変形率には比例関係が見られた。また、いずれの乾燥密度帯においても、粒径が大きくなるにつれて最大一次元膨潤変形率が低下する傾向が見受けられた。これは粒径が大きいことで膠結作用の影響が強まり、膨潤変形性が低下したと考えられる。一方、不攪乱供試体については、乾燥密度に因らずバラつきが大きかった。

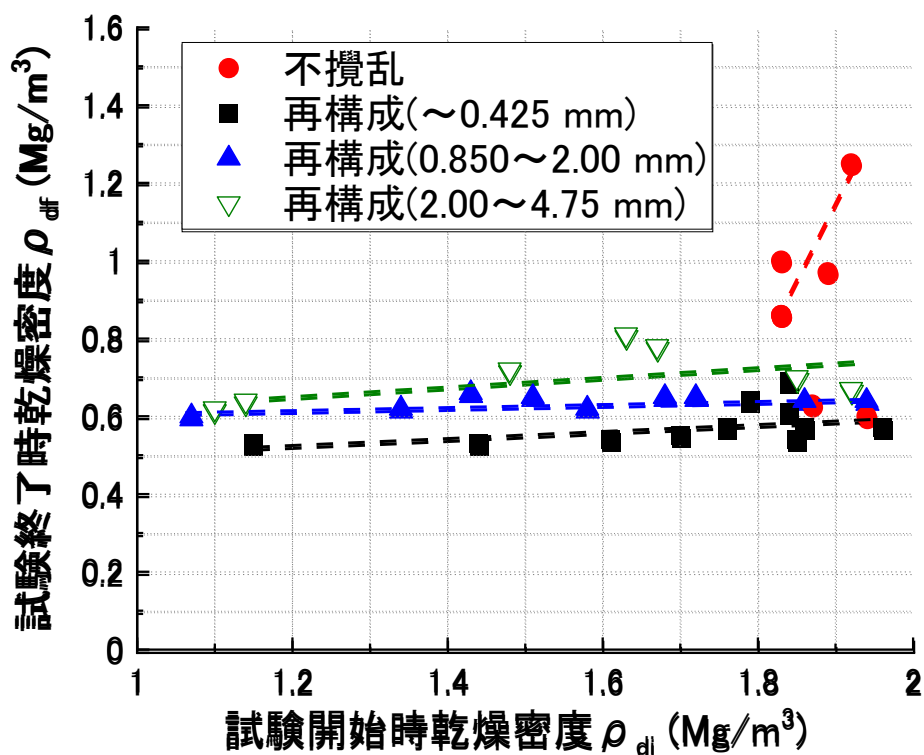


図 3-41 劉房子産原鉱石の試験開始時乾燥密度－試験終了時乾燥密度

また、図 3-41 に不攪乱供試体および再構成供試体における、試験開始時の乾燥密度と試験終了時の乾燥密度の関係を示す。これより、再構成供試体においては、試験開始時の供試体乾燥密度に因らず、試験終了時の乾燥密度は 0.50～0.70 Mg/m³ 程度に収束しており、粒径が大きいほど試験終了時乾燥密度が大きい傾向が見受けられた。これは、粒径が大きい試料ほど膠結作用の影響が強く、膨潤変形挙動が阻害されたために終了時の乾燥密度が高くどまったものと推察される。不攪乱供試体においては、試験終了時の乾燥密度にバラつきがあり、値も 1.0～1.2 Mg/m³ と再構成供試体に比べて高く留まっていた。これより、不攪乱供試体においては、膠結作用の影響により膨潤変形が抑制され、試験終了時まで乾燥密度が高く留まったものと推察される。

3.7 有効モンモリロナイト密度を用いた統一的评价

本章ではこれまで、月布産、Ten Sleep 産、劉房子産原鉱石について、膨潤圧・一次元膨潤変形率特性について議論してきた。本研究では、供試体乾燥密度に加えて試料ごとのモンモリロナイト含有率の差異を考慮した、有効モンモリロナイト密度を導入して、3種類
の原鉱石の最大膨潤圧特性について統一的评价を行う。

有効モンモリロナイト密度は以下の式(3.6)・(3.7)により求められる。

$$\rho_{em} = \frac{C_m \rho_d}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_d}{\rho_{nm}}} \quad (3.6)$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} \right\}} \quad (3.7)$$

ここに、 ρ_{em} ：有効モンモリロナイト密度 (Mg/m³)、 C_m ：モンモリロナイト含有率(%),
 ρ_d ：供試体乾燥密度 (Mg/m³)、 ρ_{solid} ：ベントナイトの土粒子密度 (Mg/m³)、 ρ_{nm} ：ベント
ナイトに含まれるモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)、 ρ_m ：ベントナ
イトに含まれるモンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m³) である。

C_m はメチレンブルー吸着量測定試験により得られた値を用いた。 ρ_{nm} は、式(3.6)に
 ρ_{solid} として土粒子の密度試験で得られた各サンプルの値を代入することにより算出した。
 ρ_m に関しては、一般的にモンモリロナイトの土粒子密度が2.75~2.78 (Mg/m³) 程度であ
ると言われており⁵⁾、この値を参考に $\rho_m=2.77$ (Mg/m³) と設定した。

図 3-42 に、以上の計算により得られた有効モンモリロナイト密度と最大膨潤圧の関係を
示す。

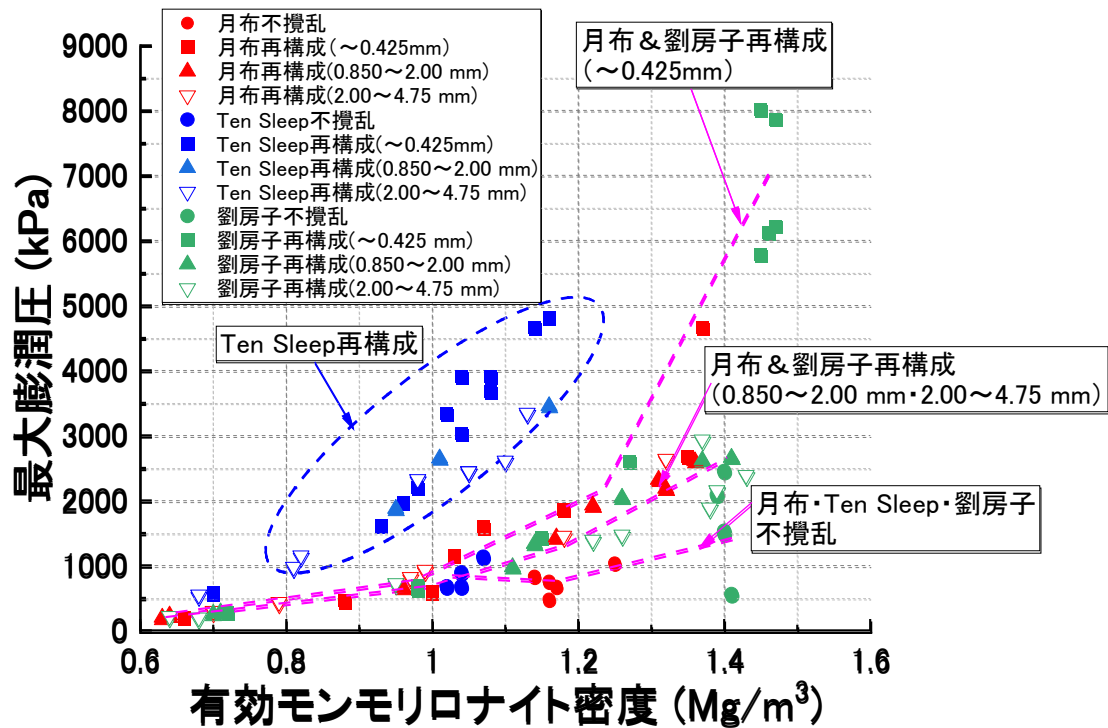


図 3-42 有効モンモリロナイト密度－最大膨潤圧関係

これより、月布産原鉱石と劉房子産原鉱石においては、不攪乱供試体および再構成供試体のいずれも共通の傾向であることが分かる。一方で、Ten Sleep 産原鉱石においては、有効モンモリロナイト密度が 0.8~1.2 Mg/m³ の範囲において、最大膨潤圧の値が他の原鉱石に比べて約 2 倍程度高い値となっていることが分かる。この理由として、Ten Sleep 産原鉱石の浸出 Na⁺イオン量が 60.7 meq/100 g と、他の原鉱石（月布産：43.7 meq/100 g，劉房子産：48.8 meq/100 g）よりも多いことが挙げられる。

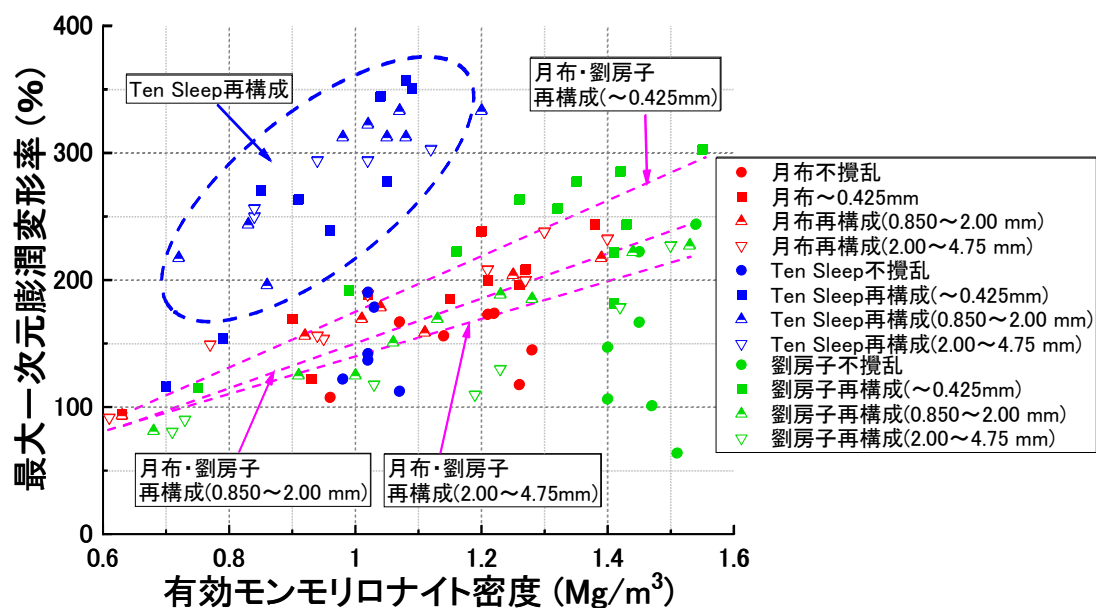


図 3-43 有効モンモリロナイト密度－最大一次元膨潤変形率関係

これより、最大一次元膨潤変形率においても、最大膨潤圧と同様、月布産と劉房子産原鉍石は不攪乱供試体・再構成供試体のいずれも同様の傾向を有していることが分かる。Ten Sleep 産原鉍石については、有効モンモリロナイト密度が $0.8 \sim 1.2 \text{ Mg/m}^3$ の範囲において、最大一次元膨潤変形率の値が他の原鉍石に比べて、2 倍ほど高いことが分かる。この理由は最大膨潤圧と同様、モンモリロナイト結晶層間に存在するイオンのうち Na^+ イオンの占める割合が高いほど膨潤性、特に膨潤変形性が上昇することが原因であると推察される。

図 3-44 に、一次元膨潤変形実験結果の内、試験終了時の有効モンモリロナイト密度と試験開始時乾燥密度の関係を示す。

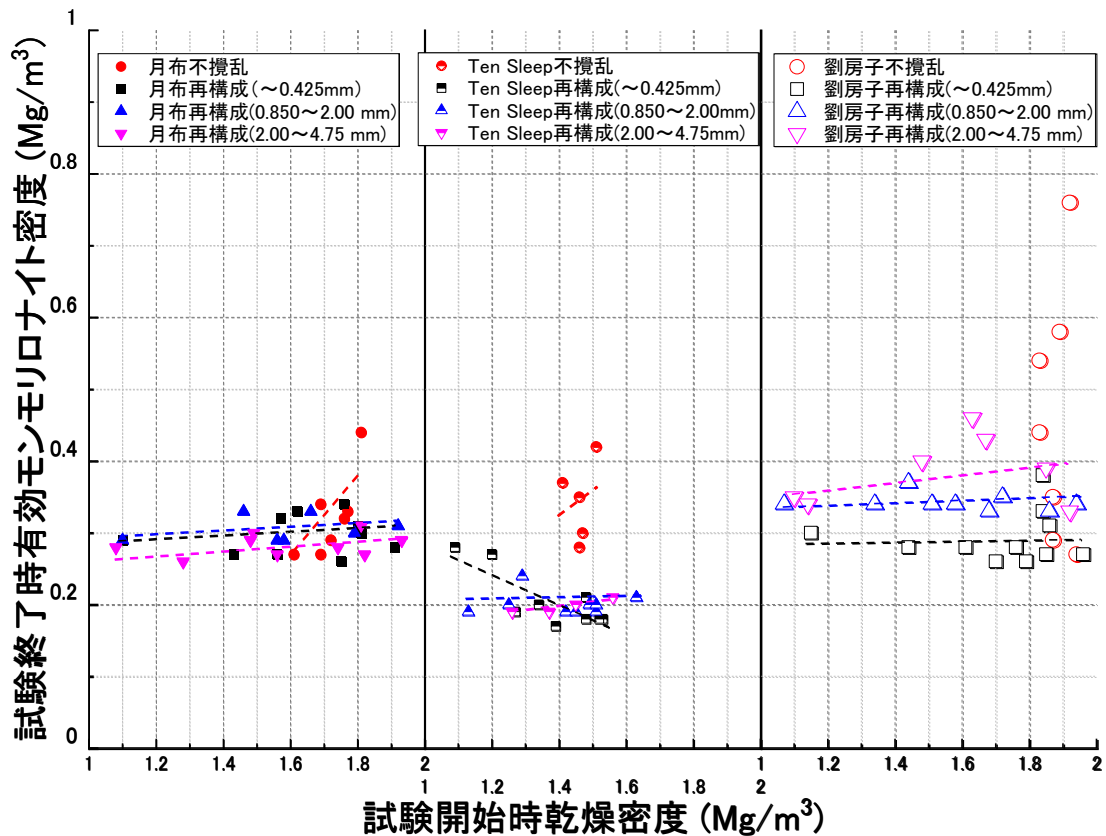


図 3-44 試験開始時乾燥密度－試験終了時有効モンモリロナイト密度関係

これより、月布産原鉱石においては不攪乱供試体・再構成供試体のいずれも試験終了時有効モンモリロナイト密度は 0.3 Mg/m^3 であり、膠結作用の影響は見受けられない。Ten Sleep 産原鉱石においては、再構成供試体の試験終了時有効モンモリロナイト密度は 0.2 Mg/m^3 程度であり、不攪乱供試体では $0.3 \sim 0.4 \text{ Mg/m}^3$ の範囲にあることから、膠結作用の影響により膨潤変形性が約 1/2 に低下している。劉房子産原鉱石では、再構成供試体 ($\sim 0.425 \text{ mm}$) において試験終了時有効モンモリロナイト密度は 0.3 Mg/m^3 と月布産原鉱石とほぼ変わらない値であるが、粒径が大きくなるほど終了時有効モンモリロナイト密度は上昇する傾向が見られた。また、不攪乱供試体はバラつきが大きいものの $0.4 \sim 0.8 \text{ Mg/m}^3$ となっており、地質年代の一番古い劉房子産原鉱石では膠結作用の影響が顕著に見受けられた。

また、全体的な傾向として、低拘束条件下においては、開始時の乾燥密度によらず収束時においては一定の有効モンモリロナイト密度に落ち着くことが見受けられた。

3.8 高拘束圧の一次元膨潤変形実験

ベントナイト系緩衝材が地下水圧やガス圧（オーバパックの腐食に伴う水素ガス発生時）などによる高拘束圧を受けた場合における、膨潤変形による隙間充填現象を想定して、高拘束圧下における一次元膨潤変形実験を実施した。与えた拘束圧は 100 kPa, 500 kPa とした。使用した実験装置は図 3-1 に示す通り、膨潤圧実験装置においてクランプノブを締めずに解放しておき、ペロフラムシリンダー内の空気圧を調整して軸圧が 100 kPa, 500 kPa で一定となる条件の下で膨潤変形量を測定した。

表 3-26 に月布産原鉱石、表 3-27 に Ten Sleep 産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形率結果を示す。また、図 3-45～図 3-48 にそれぞれのケースにおける時間—一次元膨潤変形率関係を示す。

表 3-26 月布産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果

| 供試体種別 | 拘束圧 100 kPa | | 拘束圧 500 kPa | |
|------------------------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
| | 不攪乱 | 再構成 (~0.425 mm) | 不攪乱 | 再構成 (~0.425 mm) |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.75 | 1.67 | 1.71 | 1.60 |
| 試験終了時の乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.29 | 1.16 | 1.70 | 1.52 |
| 試験終了時含水比 (%) | 41.9 | 51.6 | 31.8 | 55.9 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 102.1 | 103.0 | 139.0 | 189.9 |
| 初期含水比(%) | 8.5 | 7.2 | 8.4 | 10.0 |
| 初期飽和度 (%) | 40.7 | 30.4 | 37.5 | 37.8 |
| 最大一次元膨潤変形率 (%) | 35.3 | 44.0 | 0.6 | 4.9 |

表 3-27 Ten Sleep 産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果

| 試料名 | 拘束圧 100 kPa | | 拘束圧 500 kPa | |
|--|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
| | 不攪乱 | 再構成 (~ 0.425 mm) | 不攪乱 | 再構成 (~ 0.425 mm) |
| 試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3) | 1.53 | 1.38 | 1.54 | 1.48 |
| 試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3) | 1.47 | 0.70 | 1.44 | 1.13 |
| 試験終了時含水比 (%) | 36.0 | 109.0 | 35.7 | 56.0 |
| 試験終了時飽和度 (%) | 118.0 | 104.2 | 112.8 | 109.9 |
| 初期含水比(%) | 24.8 | 8.0 | 26.7 | 14.2 |
| 初期飽和度 (%) | 89.2 | 23.1 | 96.7 | 47.6 |
| 最大一次元膨潤変形率 (%) | 4.1 | 97.3 | 6.3 | 31.3 |

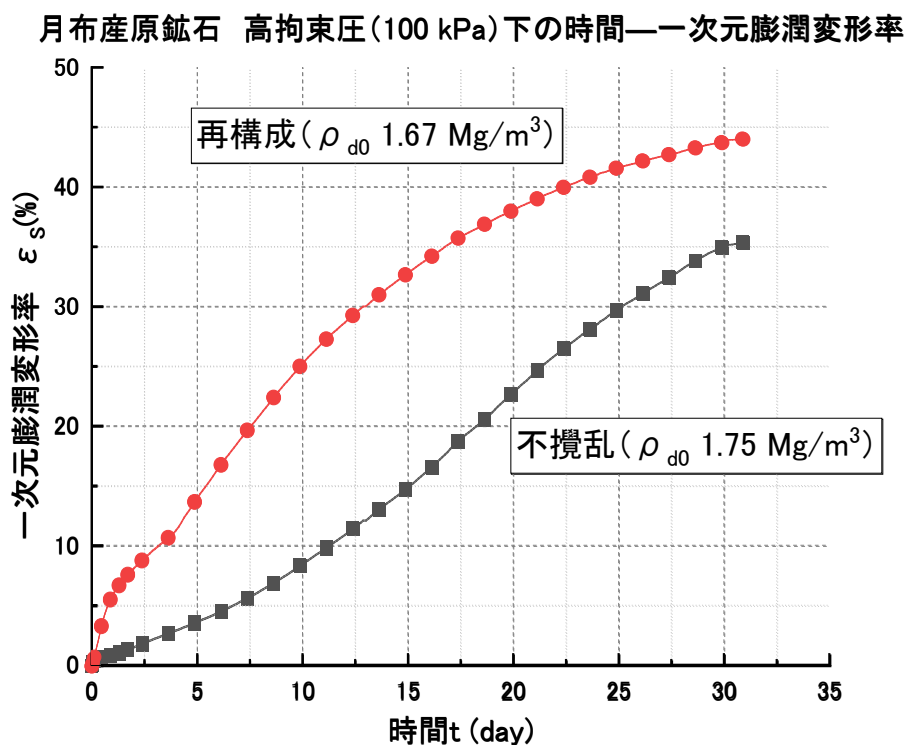


図 3-45 月布産原鉱石拘束圧 100 kPa の時間—一次元膨潤変形率関係

月布産原鉱石 高拘束圧(500 kPa)下の時間—一次元膨潤変形率

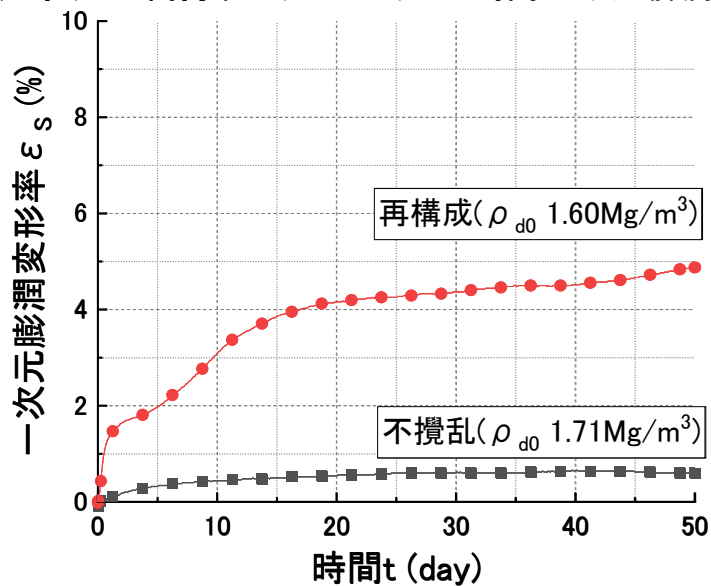


図 3-46 月布産原鉱石拘束圧 500 kPa の時間—一次元膨潤変形率関係

Ten Sleep産原鉱石の高拘束圧(100 kPa)の時間—一次元膨潤変形率

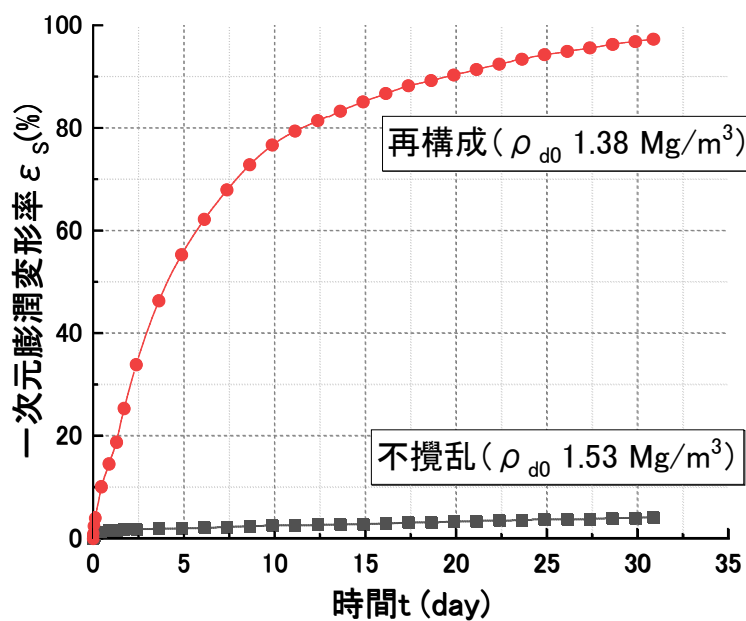


図 3-47 Ten Sleep 産原鉱石拘束圧 100 kPa の時間—一次元膨潤変形率関係

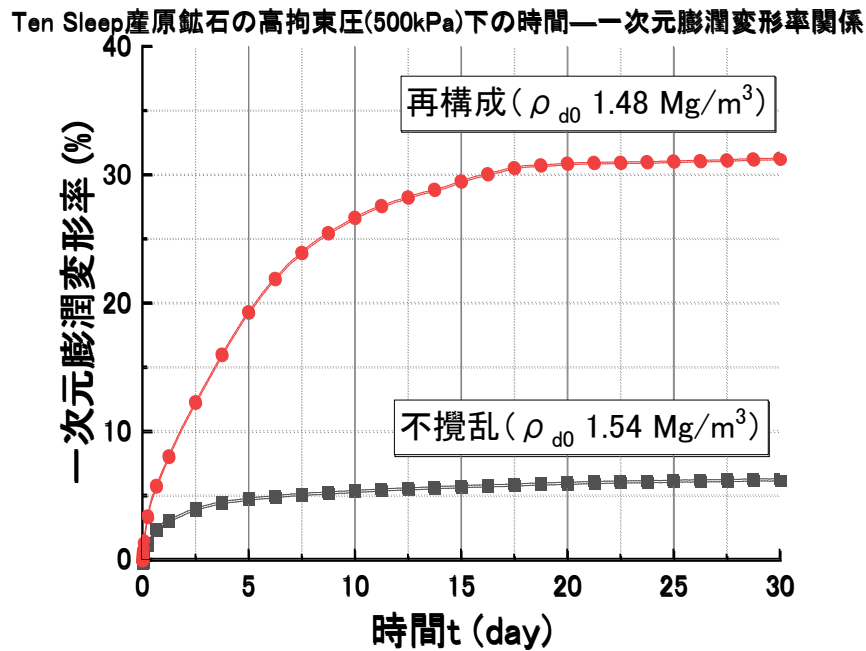


図 3-48 Ten Sleep 産原鉱石拘束圧 500 kPa の時間—一次元膨潤変形率関係

これより、再構成供試体においては、月布産・Ten Sleep 産原鉱石のいずれも低拘束圧 (19.6 kPa) と同様、試験開始直後に一次元膨潤変形率が急激に上昇し、その後収束する双曲線形の経時変化であることが分かる。ただし、一次元膨潤変形率の値自体は、拘束圧が高まるにつれて低下した。

不攪乱供試体においては、月布産原鉱石 (拘束圧 100 kPa) の条件のみ双曲線形の経時変化を示したが、それ以外のケースにおいては試験開始直後から最後に至るまで上昇が見られずほぼ一定の値に留まった。一次元膨潤変形率の値も拘束圧が高まるほど低下した。

低拘束圧下の一次元膨潤変形実験や膨潤圧実験結果との比較は、第 7 章にて示す。

3.9 自己シール性試験の概要

本実験は、ベントナイト系緩衝材が吸水膨潤により、施工の都合上生じる緩衝材ブロックと周辺岩盤との隙間や、掘削時の岩盤の損傷によるひび割れを充填する自己シール性の評価を目的とする。また、長期間を経て緩衝材が膠結作用を受けて固結した後に、断層変位等に伴い周辺岩盤と緩衝材間に水みちとなり得る隙間が生じる可能性も考えられる。そこで、不攪乱供試体および再構成供試体が隙間を膨潤変形により充填し、その後の吸水膨潤に伴い発生する圧力をロードセルにより測定し、隙間の充填に要する時間および充填後の発生圧力を比較することで、膠結作用による固結に伴う自己シール挙動変化の評価を目指す。図 3-49 に、緩衝材と周辺岩盤およびオーバーパックとの間に生じる隙間の概念図を示す。

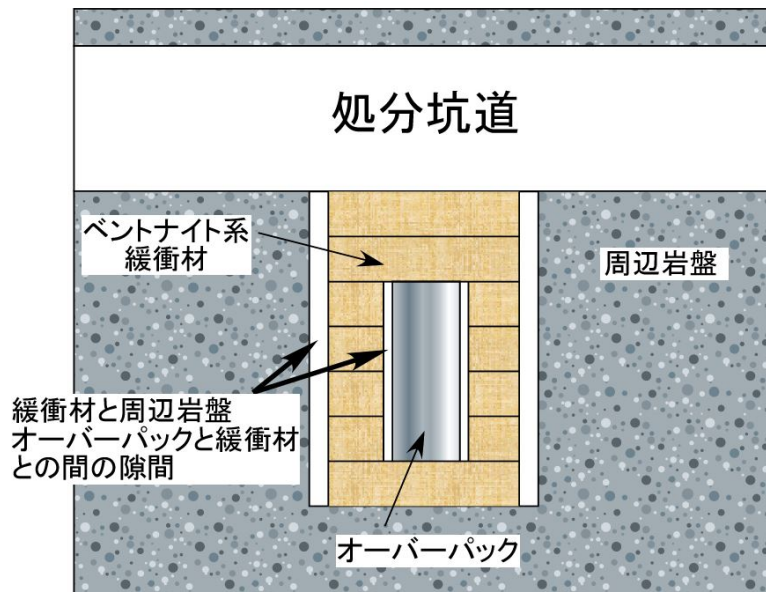


図 3-49 緩衝材と周辺岩盤およびオーバーパックとの間に生じる隙間の概念図

図 3-50 に一次元自己シール性試験の概念図を示す。実験装置および実験手順については、参考文献 6)に基づいて行った。今回、設定隙間幅を 1.250 mm とした根拠として、緒方らによる処分孔仕様の一案⁷⁾において、施工上の観点から緩衝材の幅 400 mm に対して、緩衝材と周辺岩盤との間に 40 mm、緩衝材とオーバーパックとの間に 10 mm、合計で 50 mm の隙間が生じるとされていることが挙げられる。この緩衝材の幅 400 mm と隙間 50 mm との比 (8 : 1) を基に、本実験における供試体高さが 10 mm であることから、隙間幅を 1.25 mm と、2 倍の 2.50 mm と設定した。

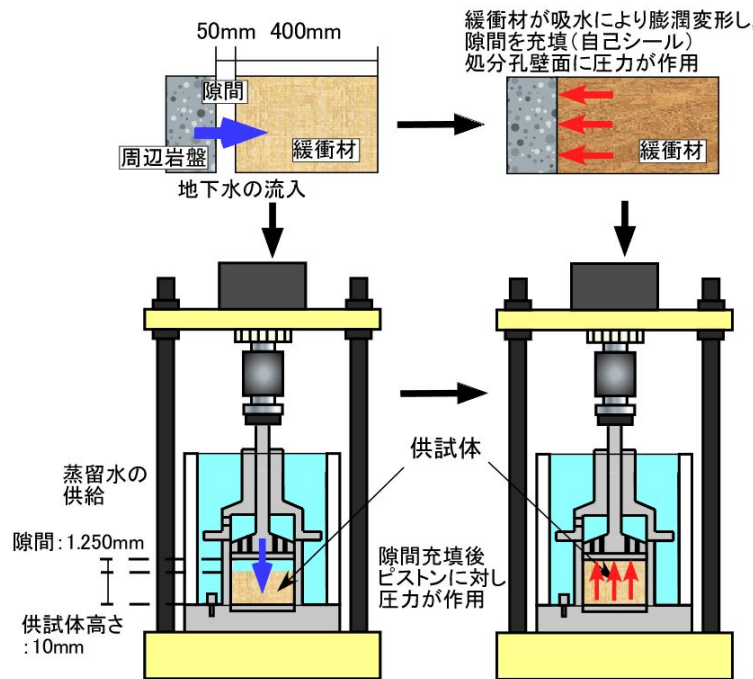


図 3-50 一次元自己シール性試験の概念図

以下に本試験の詳細な手順を示す。まず、3.3で述べた方法で作製した供試体を SUS316L 製ステンレスリングに移し替えた。供試体の上下端に定性ろ紙(5種A)を設置し、リング・底板・ペダスタル・ピストンおよびアクリルセルで構成される膨潤特性試験容器を組み立てた。データロガーを操作してロードセル・変位計のインシヤルインを行った。その後、膨潤特性試験容器をフレーム内へ移動し、ベロフラムシリンダー内の空気圧を調整して、ピストンと供試体上部を設置させた。なお、この時ロードセルの値をもとに 20~40 kPa 程度の拘束圧がかかるように調整した。そのまま 5 分程度放置した後、ネジを用いてロードセルとピストンを固定した。次に、変位計のみインシヤルインを行い、所定の隙間を設けられるように変位計の値をもとに空気圧を調整して除荷した。所定の隙間を設けられた後、クランプノブを締めることでピストンの変位を固定した。その後、ロードセルでの測定を開始するとともに、アクリルセル内に蒸留水を投入し、給水を開始した。図 3-51 に一次元自己シール性試験の手順の概念図を示す。

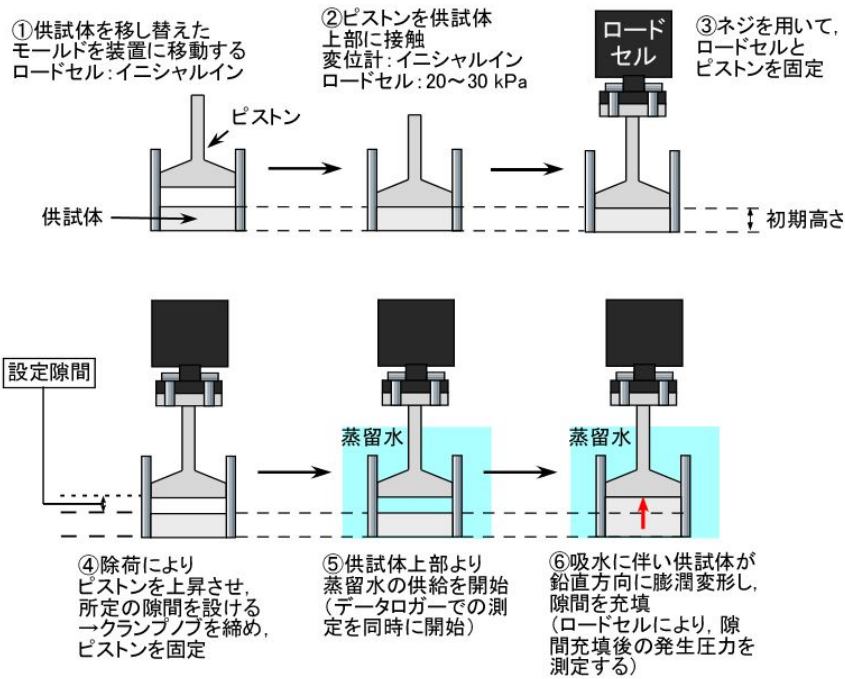


図 3-51 一次元自己シール性試験の手順の概念図

3.10 自己シール性実験結果

図 3-52~図 3-57 に、月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の隙間 1.25 mm, 2.50 mm における時間-発生圧力関係をそれぞれ示す。なお、それぞれの図中に示されている乾燥密度は試験終了時の値である。

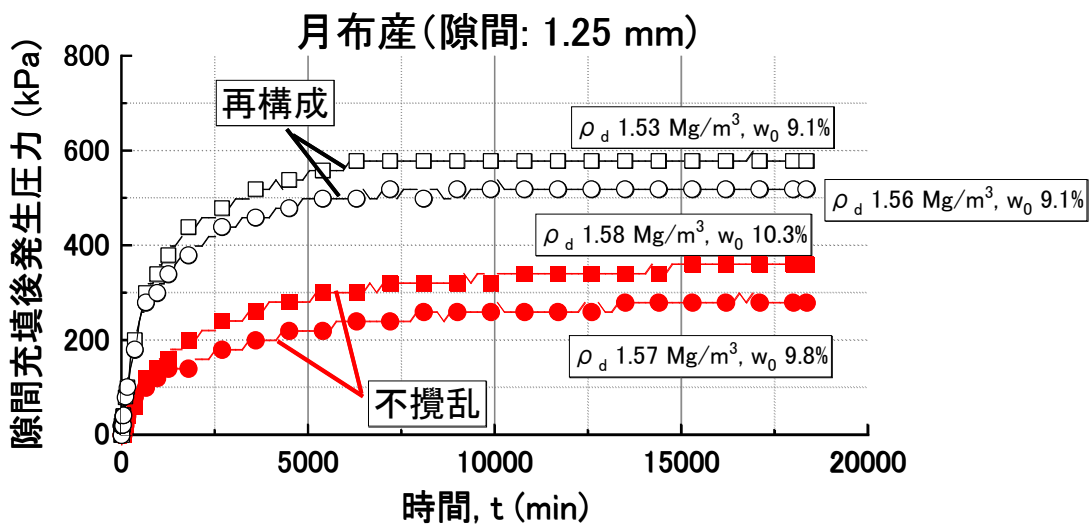


図 3-52 月布産原鉱石の時間-発生圧力関係 (隙間: 1.25 mm)

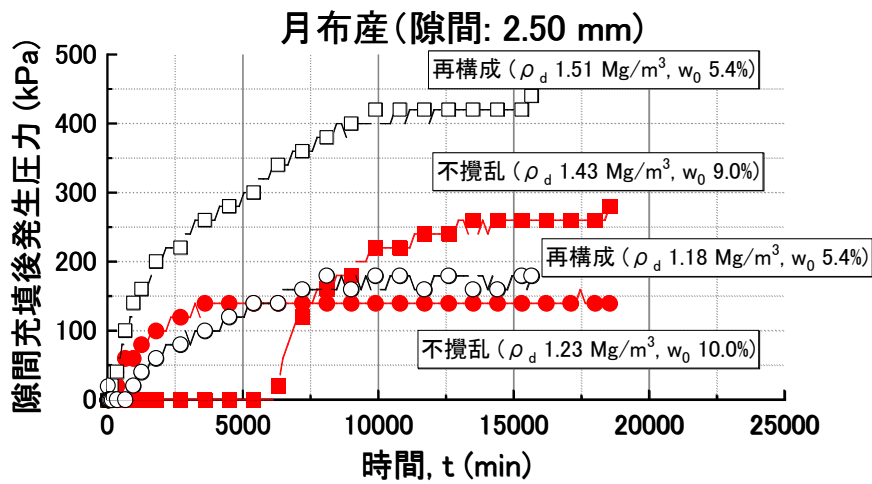


図 3-53 月布産原鉱石の時間－発生圧力関係（隙間：2.50 mm）

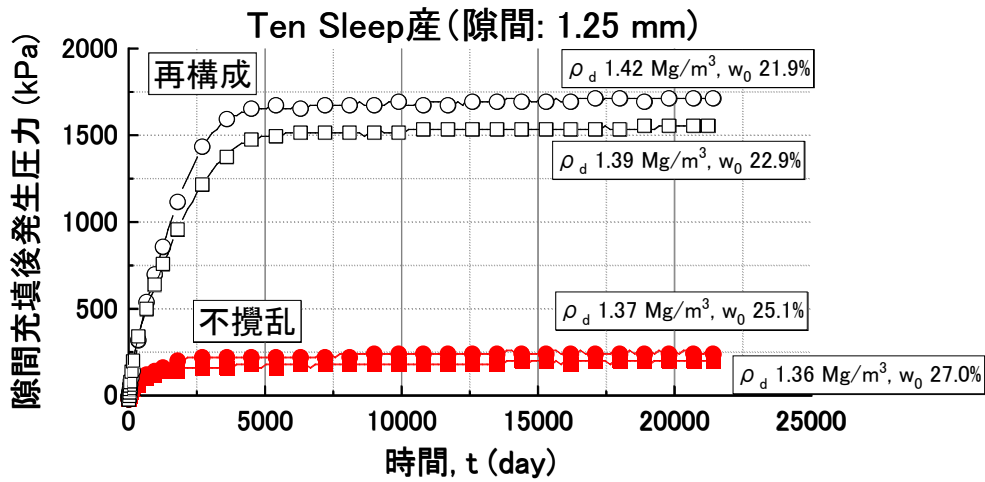


図 3-54 Ten Sleep 産原鉱石の時間－発生圧力関係（隙間：1.25 mm）

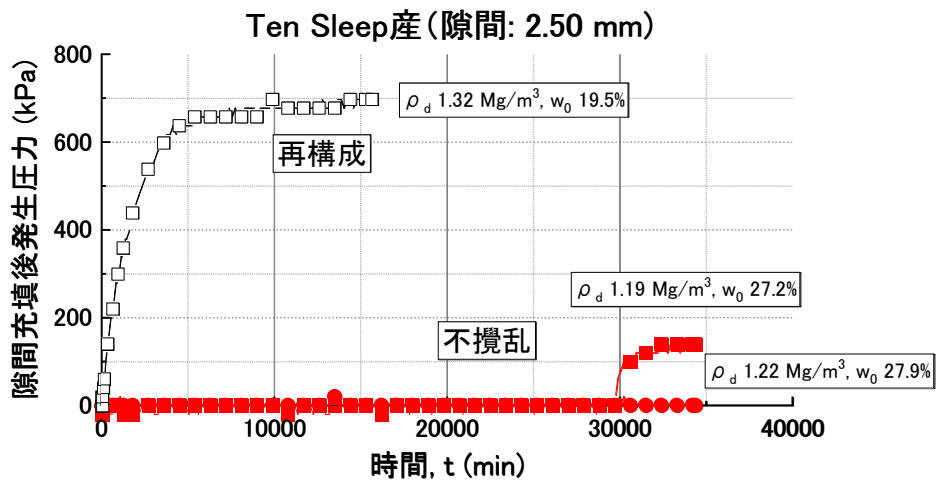


図 3-55 Ten Sleep 産原鉱石の時間－発生圧力関係（隙間：2.50 mm）

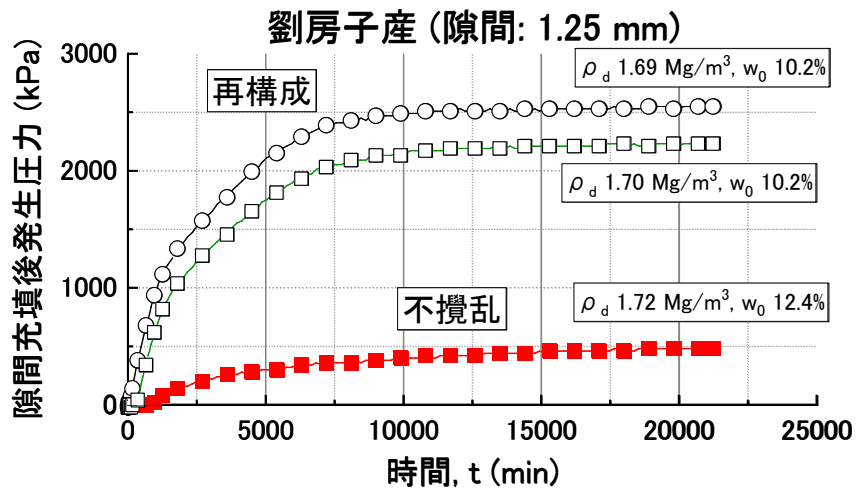


図 3-56 劉房子産原鉍石の時間－発生圧力関係 (隙間 : 1.25 mm)

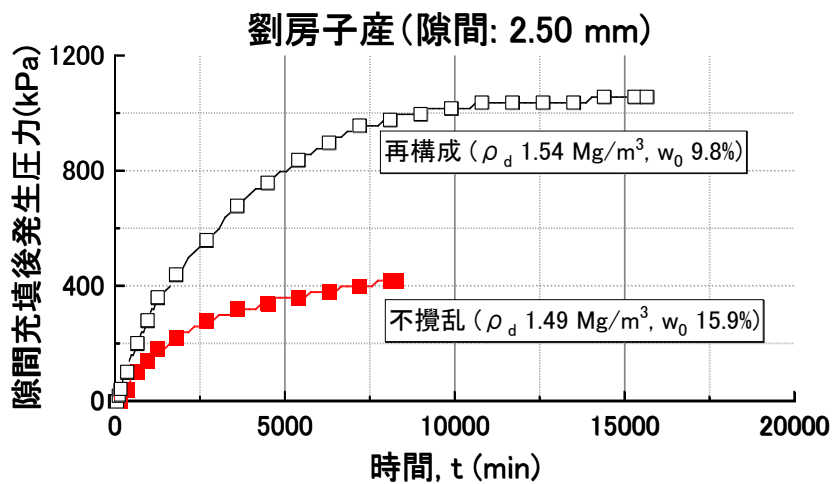


図 3-57 劉房子産原鉍石の時間－発生圧力関係 (隙間 : 2.50 mm)

表 3-28 月布産原鉱石の自己シール性実験供試体の諸元

| | 不攪乱 1 (2.50mm) | 不攪乱 2 (2.50mm) | 再構成 1 (2.50mm) | 再構成 2 (2.50mm) | 不攪乱 1 (1.25mm) | 不攪乱 2 (1.25mm) | 再構成 1 (1.25mm) | 再構成 2 (1.25mm) |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 試験開始時の乾燥 密度(Mg/m ³) | 1.79 | 1.55 | 1.87 | 1.45 | 1.77 | 1.76 | 1.71 | 1.75 |
| 試験開始時の有効 モンモリロナイト 密度(Mg/m ³) | 1.15 | 0.91 | 1.24 | 0.85 | 1.13 | 1.12 | 1.06 | 1.10 |
| 隙間充填後の乾燥 密度(Mg/m ³) | 1.43 | 1.23 | 1.51 | 1.18 | 1.58 | 1.57 | 1.53 | 1.55 |
| 隙間充填後の有効 モンモリロナイト 密度(Mg/m ³) | 0.81 | 0.65 | 0.88 | 0.63 | 0.94 | 0.93 | 0.89 | 0.91 |
| 初期含水比(%) | 9.01 | 10.0 | 5.4 | 5.4 | 10.3 | 9.80 | 9.10 | 9.10 |
| 隙間充填後の 発生圧力(kPa) | 280 | 159 | 440 | 180 | 360 | 279 | 578 | 518 |

表 3-29 Ten Sleep 産原鉱石の自己シール性実験供試体の諸元

| | 不攪乱 1 (2.50mm) | 不攪乱 2 (2.50mm) | 再構成 1 (2.50mm) | 不攪乱 1 (1.25mm) | 不攪乱 2 (1.25mm) | 再構成 1 (1.25mm) | 再構成 2 (1.25mm) |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 試験開始時の 乾燥密度(Mg/m ³) | 1.48 | 1.53 | 1.66 | 1.54 | 1.60 | 1.60 | 1.58 |
| 試験開始時の有効モ ンモリロナイト密度 (Mg/m ³) | 1.04 | 1.09 | 1.23 | 1.11 | 1.16 | 1.16 | 1.14 |
| 隙間充填後の 乾燥密度(Mg/m ³) | 1.18 | 1.22* | 1.32 | 1.37 | 1.36 | 1.42 | 1.39 |
| 隙間充填後の有効モ ンモリロナイト密度 (Mg/m ³) | 0.77 | 0.80* | 0.89 | 0.94 | 0.93 | 0.98 | 0.95 |
| 初期含水比(%) | 27.2 | 27.9 | 19.5 | 25.1 | 27.0 | 21.9 | 21.9 |
| 隙間充填後の 発生圧力(kPa) | 139 | 0 | 697 | 199 | 240 | 1713 | 1554 |

表 3-30 劉房子産原鉱石の自己シール性実験供試体の諸元

| | 不攪乱 1 (2.50mm) | 再構成 1 (2.50mm) | 不攪乱 1 (1.25mm) | 再構成 1 (1.25mm) | 再構成 2 (1.25mm) |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 試験開始時の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.84 | 1.93 | 1.93 | 1.91 | 1.92 |
| 試験開始時の有効モンモリロナイト 密度(Mg/m ³) | 1.38 | 1.49 | 1.53 | 1.50 | 1.50 |
| 隙間充填後の乾燥密度(Mg/m ³) | 1.49 | 1.54 | 1.72 | 1.69 | 1.70 |
| 隙間充填後の有効モンモリロナイト 密度(Mg/m ³) | 1.03 | 1.08 | 1.27 | 1.24 | 1.25 |
| 初期含水比(%) | 15.9 | 9.8 | 12.4 | 10.2 | 10.2 |
| 隙間充填後の 発生圧力(kPa) | 498 | 1056 | 480 | 2549 | 2231 |

月布産原鉱石（隙間：1.25 mm）において、不攪乱・再構成供試体のいずれにおいても、実験開始直後から圧力の上昇がみられ、吸水直後に隙間を充填したことが分かる。しかし、圧力の収束値において、ほぼ同程度の乾燥密度であるにも関わらず、再構成供試体では 520,580 kPa であるのに対し、不攪乱供試体では 280,360 kPa と、2/3 程度に留まっていることが分かる。

月布産原鉱石（隙間：2.50 mm）において、再構成供試体および不攪乱供試体の 1 ケースにおいて、試験開始直後より圧力の上昇がみられる一方で、不攪乱供試体の 1 ケースにおいては圧力の発現まで約 5000 分程度要していることが分かる。不攪乱供試体の内、試験開始直後から圧力の上昇が見られた供試体の初期乾燥密度は 1.55 Mg/m³、圧力の上昇に時間を要した供試体の初期乾燥密度は 1.79 Mg/m³ であり、締固めたベントナイトの膨潤特性は乾燥密度に応じて向上する一般的な傾向とは逆行するものであった。この理由として、原鉱石の内初期乾燥密度の高い部分においては、乾燥密度の低い部分に比べて固結の影響が強く、試験開始直後においては水分移動性および膨潤性に対して阻害する形で働いていたと考えられる。しかし、時間経過とともに吸水膨潤が進展したことにより、モンモリロナイト結晶層間の膨潤を阻害する固結の影響が弱まっていき、発生圧力の発現に至ったものと推察される。また、最終的な発生圧力は、初期乾燥密度 1.79 Mg/m³ の供試体で 280 kPa、初期乾燥密度 1.55 Mg/m³ の供試体で 160 kPa であり、前述した締固めたベントナイトにおける乾燥密度と膨潤特性の関係に調和的な傾向であった。月布産原鉱石においては、1.25 mm の隙間、すなわち供試体初期体積の 12.5% の体積の隙間は充填可能であるものの、2.50 mm の隙間、すなわち初期体積の 25% の体積の隙間の充填については可能性が低いことが考えられる。

Ten Sleep 産原鉱石（隙間：1.25 mm）において、不攪乱・再構成供試体のいずれにおいても、試験開始直後から圧力の発生・上昇が見られた。しかし、収束時の発生圧力に関しては、

再構成供試体で 1550, 1710 kPa であったのに対し, 不攪乱供試体で 200, 240 kPa であり, 月布産原鉱石よりも差異が大きい傾向であった.

Ten Sleep 産原鉱石 (隙間: 2.50 mm) において, 不攪乱供試体 2 ケースにおいて, 試験開始後約 30000 分まで発生圧力の発現が認められず, 1 ケースについては 35000 分経過時まで圧力の発生が見られなかった. 隙間 1.25 mm の結果と合わせると, 不攪乱供試体については初期体積の 12.5% の体積の隙間は充填可能であるものの, 初期体積の 25% の体積の隙間の充填については可能性が低いことが考えられる.

劉房子産原鉱石 (隙間: 1.25 mm) において, 不攪乱供試体と再構成供試体のいずれも試験開始直後から圧力の上昇が見受けられるが, 上昇過程における傾きは不攪乱供試体の方が緩やかであった. また, 収束時の発生圧力も再構成供試体で 2230, 2550 kPa であるのに対し, 不攪乱供試体で 480 kPa と, 約 1/5 程度に留まっていた.

劉房子産原鉱石 (隙間: 2.50 mm) において, 隙間 1.25 mm のケースと同様, 不攪乱供試体と再構成供試体のいずれも試験開始直後から圧力の上昇が見受けられた. 収束時の発生圧力は再構成供試体で 1060 kPa, 不攪乱供試体で 500 kPa と, およそ 2 倍の差異であった. 劉房子産原鉱石の不攪乱供試体については, 初期体積の 12.5%, 25% の体積の隙間についても良好な充填が期待できることが分かった.

3.11 本章のまとめ

本章では、ベントナイト系緩衝材の要求性能に係る材料特性として膨潤特性に着目し、膨潤圧・膨潤変形特性および自己シール性（膨潤変形による隙間充填性）における膠結作用の影響を要素実験的に評価した。本章で得られた主な成果を以下にまとめる。

- 1) いずれの原鉱石についても、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体よりも低く、その低下度合いは地質年代が古いほど大きくなる傾向が見られた。特に地質年代の最も古い劉房子産原鉱石では、再構成供試体の粒径が大きいほど膨潤圧が低下しており、膠結作用の影響を強く受けていることが分かった。
- 2) 地質年代の一番若い月布産原鉱石において、不攪乱供試体の一次元膨潤変形率は再構成供試体とほぼ変わらない値であった。一方、地質年代の古い Ten Sleep 産、劉房子産原鉱石では、不攪乱供試体の値は再構成供試体に比べて 1/2 程度に留まった。このことから、地質年代が古くなるにつれて膠結作用の影響を強く受けていることが分かった。また、試験開始時の乾燥密度に因らず、膨潤変形挙動収束時の乾燥密度は一定値となることが分かった。
- 3) 有効モンモリロナイト密度を用いて 3 種類の原鉱石を統一的に評価したところ、膨潤圧・一次元膨潤変形率ともに月布産・劉房子産原鉱石の傾向が一致していたのに対し、Ten Sleep 産の値が他の 2 種類に比べて 2 倍程度高い傾向が見られた。この理由として、浸出陽イオンのうち Na⁺イオン量が 1.5 倍ほど高く、膨潤性に富んだためと推察される。
- 4) 供試体体積の 12.5%、25%の隙間を設けた自己シール性実験を実施したところ、いずれの原鉱石の不攪乱供試体においても充填後の発生圧力が発生しており、膠結作用を受けた場合でも緩衝材体積に対して 12.5%、25%程度の隙間であれば良好な充填性を有することが期待される。

参考文献

- 1) 大阪ケミカル株式会社 HP : ワンダークラッシャー WC-3 / WC-3L ,
<http://www.daichem.co.jp/products/crusher/wc-3.html> (2017年10月30日アクセス)
- 2) Wang, H., Komine, H., Gotoh, T.: A swelling pressure cell for X-ray diffraction test, *Géotechnique*, <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.00005>, 2020.
- 3) 小峯秀雄, 小山田拓郎, 尾崎匠, 磯さち恵: 締固めた粉体状ベントナイト各種の水分移動特性と膨潤圧挙動に関する考察, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol. 74, No. 1, pp.63-75, 2018.
- 4) 小峯秀雄, 緒方信英: 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.
- 5) Lambe, T.W. and Whitman, R.V. : *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., pp.29-31, 1969.
- 6) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: 人工海水環境下におけるベントナイトの一次元自己シール性, *土木学会論文集 C*, Vol.65, No.2, pp.389-400, 2009.
- 7) 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, -その4 人工バリアの設計と製作-, *原子力バックエンド研究*, Vol.5, No.2, pp.103-121, 1999.

第4章 ベントナイト原鉱石の膨潤圧・XRD 連携試験

4.1 本試験実施の背景

ベントナイト系材料の膨潤圧については、国内外の諸研究機関において数多く測定されており、データベースおよび理論的解釈方法が構築されてきた。しかし、参考文献1)で報告されている通り、試験方法や試験装置の剛性の差異による影響や、同一の試験方法においても結果にバラつきが生じるなど、問題点が残っている現状である。本研究では、より小型かつ簡易で、精度の高い試験方法および装置を構築することを目的として開発・製作された、図 4-1 に示す小型膨潤圧試験装置²⁾を活用した。

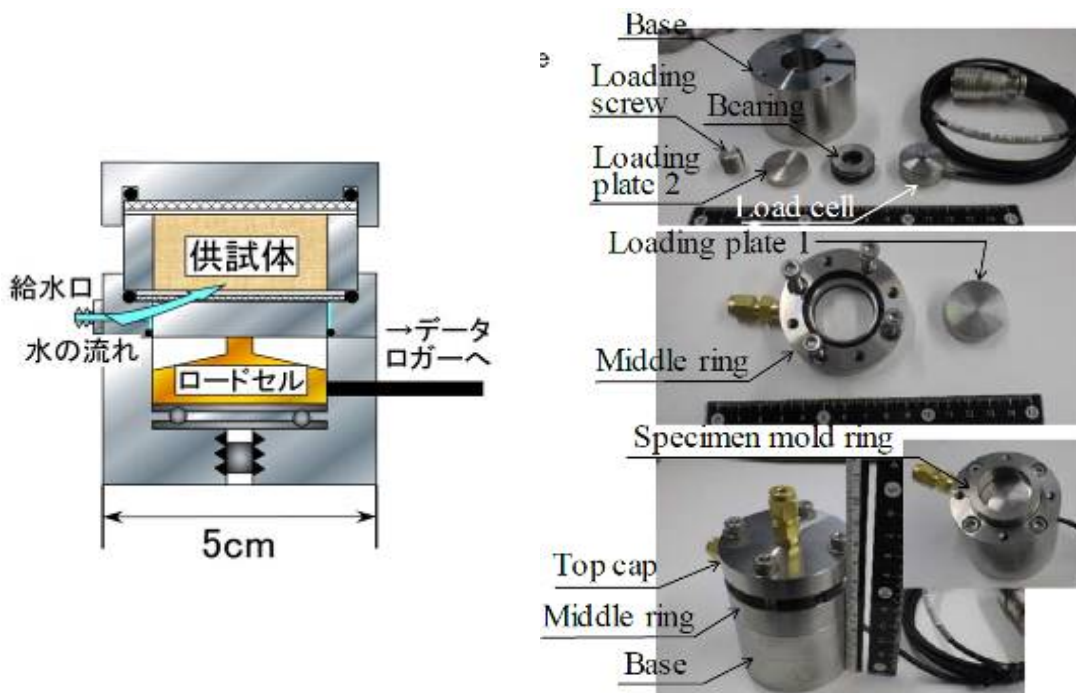


図 4-1 小型膨潤圧試験装置の概要²⁾

また本研究では、不攪乱供試体における膨潤性低下のメカニズムとして、図 4-2 に示すように、モンモリロナイト結晶層間の吸水に伴う膨潤変形がセメンテーション物質により抑制されるためと推察している。すなわち、不攪乱供試体と再構成供試体において、モンモリロナイトの単位結晶間に存在する水分子数が異なり、結晶レベルで発生する膨潤性に差異が生じていると考えられる。この単位結晶間の水は層間水と呼ばれており、底面間隔(単

位結晶間の距離)は相対湿度や給水状況の変化に応じて、層間水の量が変化することにより増減することが分かっている(図 4-3)。既往研究として、粉末状ベントナイト試料を異なる相対湿度下に置いて、層間の水分子の量の変化を実験的に測定したもの³⁾や、締固めたベントナイト供試体に蒸留水を供給し、供試体の含水比と底面間隔の関係を実験的に評価したもの⁴⁾などがある。本研究ではこの内参考文献 4)を参考とし、不攪乱供試体と再構成供試体の膨潤圧試験前後の含水比およびXRDによるモンモリロナイト結晶の底面間隔の測定を行うことで、推察の立証を行った。

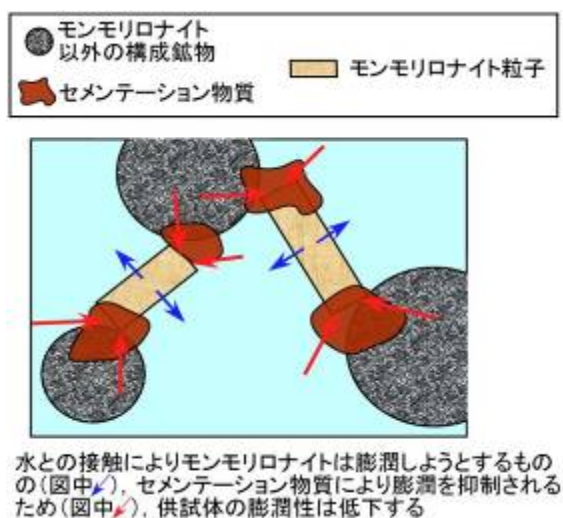


図 4-2 本研究における不攪乱供試体の膨潤圧低下メカニズムの推察

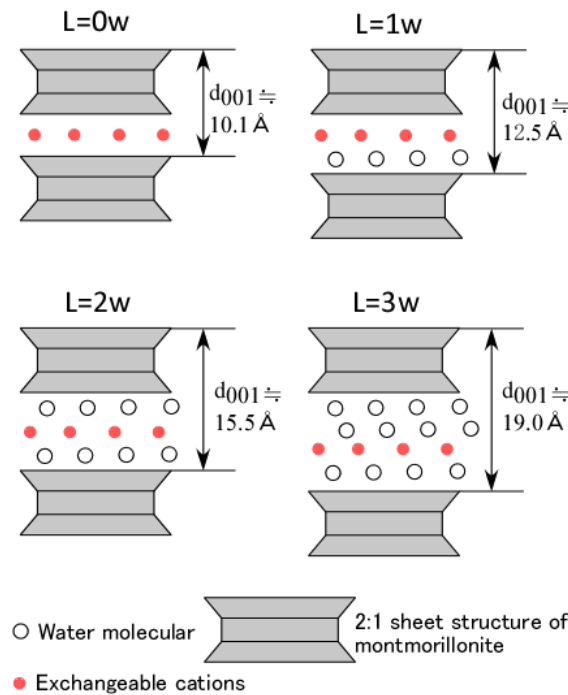


図 4-3 モンモリロナイト単位結晶の底面間隔と層間の水分子量の関係⁴⁾

4.2 本試験の概要

本試験方法は参考文献 4)を参考として行ったものである。本試験で用いた試験装置である、小型膨潤圧試験装置の概要は図 4-1 に示した。膨潤圧試験中は供試体下部より給水した。供試体の側方方向は SUS303 製リング（直径 28 mm，厚さ 2 mm）により拘束し，鉛直方向の変形は上版・下版をネジ留めするとともに，試験装置下部のネジを締め，250～300 kPa の鉛直圧を作用させることで拘束した。本試験では，厚さ 2 mm の SUS303 製リングを 2～3 枚重ね，リング間に厚さ 0.25～0.30 mm の 2 枚組リングを挟み込んでモールドとした。供試体は，3.3 で述べた方法により作製し，モールド内に移し替えた。その後，表 4-1 に示す測定条件のもとで，膨潤圧試験前のモンモリロナイトの底面間隔 (d_{001}) の XRD 測定を行った。XRD 測定後，供試体上下に定性ろ紙 (No.5A) およびステンレスメッシュを置き，膨潤圧試験装置を組み立てた。なお，ろ紙の圧縮により供試体の乾燥密度に変動を及ぼし得るため，あらかじめ圧縮しておいた。その後，装置下部のネジを締め，250～300 kPa の圧力を作用させ，底板と供試体下端を確実に接触させた。拘束状態を安定化させるため，そのまま 2 時間程度置き，その後供試体への給水と膨潤圧の測定を開始した。

膨潤圧測定終了後に，試験装置を解体し，モールドおよび供試体を取り出した。その後，モールド間の 2 枚組リングを取り出し，厚さ 0.20～0.25 mm の糸鋸を用いて供試体を厚さ 2 mm ずつに切断した。切断後の供試体は，XRD 測定時までパラフィルムを用いて密閉して

置き，水分の蒸発を防いだ．その後，表 4-1 に示す条件で膨潤圧試験後のモンモリロナイトの底面間隔の XRD 測定を行った．なお，厚さ 2 mm の供試体の両面についてそれぞれ測定を行い，測定面は図 4-4 に示すように区別した．また，図 4-5 に XRD 測定概念図⁴⁾を示す．

表 4-1 測定条件

| | |
|----------|----------|
| 光学系 | 集中法 |
| 測定範囲 | 2.7°～45° |
| ステップ | 0.02° |
| スキャンスピード | 10°/min |
| 発散スリット | 1/8° |
| 散乱スリット | 8.00 mm |
| 受光スリット | 13.00 mm |

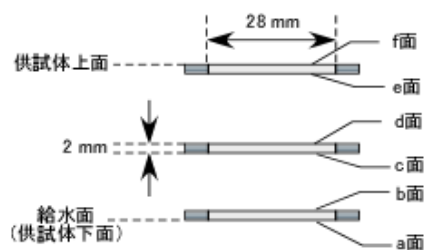


図 4-4 XRD 測定面の定義

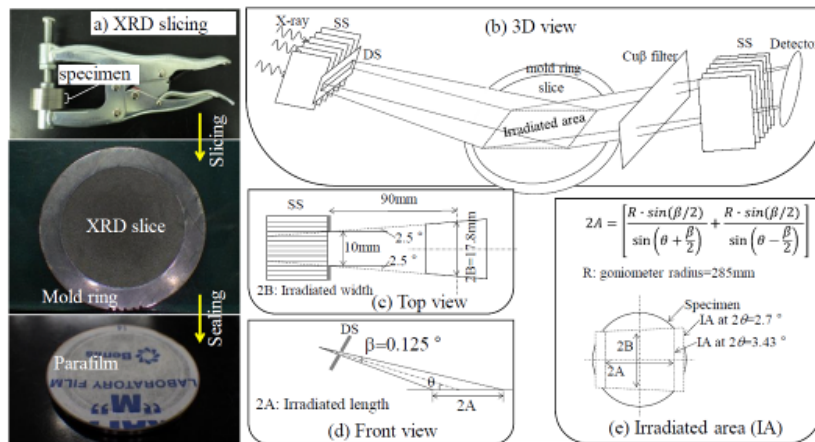


図 4-5 XRD 測定概念図⁴⁾

4.3 試験結果

本項では、各原鉱石の不攪乱供試体および再構成供試体（粒径～0.425 mm）を用いた XRD・膨潤圧連携試験の結果について述べる。

4.3.1 月布産原鉱石の XRD・膨潤圧連携試験結果

供試体の高さ（厚さ）、試験日数をパラメータとして、ほぼ同程度の乾燥密度である不攪乱供試体と再構成供試体について同時に測定した。本項では、供試体高さ・日数の等しい不攪乱供試体および再構成供試体の試験結果を比較するため、節を T-1～T-5 と設けて試験結果を示す。なお、T-1 については 3 章の膨潤圧実験装置（フレーム型膨潤圧試験装置）を用いた。

表 4-2 試験ケース

| 節 番 号 | 供試体種別 | 供試体試験後 乾燥密度 (g/cm ³) | 高さ(mm) | 試験 日数 (day) | 試験機 | 最大膨潤圧(kPa) | 膨潤圧試験前後の XRD 測定の有無 |
|-------------|-------|--|--------|-------------------|------|------------|-----------------------|
| T- 1 | 不攪乱 | 1.56 | 2 | 7 | フレーム | 416 | 前のみ |
| | 再構成 | 1.65 | 2 | 7 | フレーム | 654 | 前のみ |
| T- 2 | 再構成 | 1.77 | 4 | 5 | 小型 | 1242 | 後のみ |
| | 不攪乱 | 1.79 | 4 | 5 | 小型 | 997 | 後のみ |
| T- 3 | 不攪乱 | 1.74 | 6 | 2 | 小型 | 852 | 後のみ |
| | 再構成 | 1.77 | 6 | 2 | 小型 | 1601 | 後のみ |
| T- 4 | 再構成 | 1.84 | 4 | 5 | 小型 | 2125 | 前後 |
| | 不攪乱 | 1.75 | 4 | 5 | 小型 | 805 | 前後 |
| T- 5 | 不攪乱 | 1.72 | 4 | 6 | 小型 | 664 | 前後 |

・ T-1 (高さ 2mm, フレーム型, 7日間)

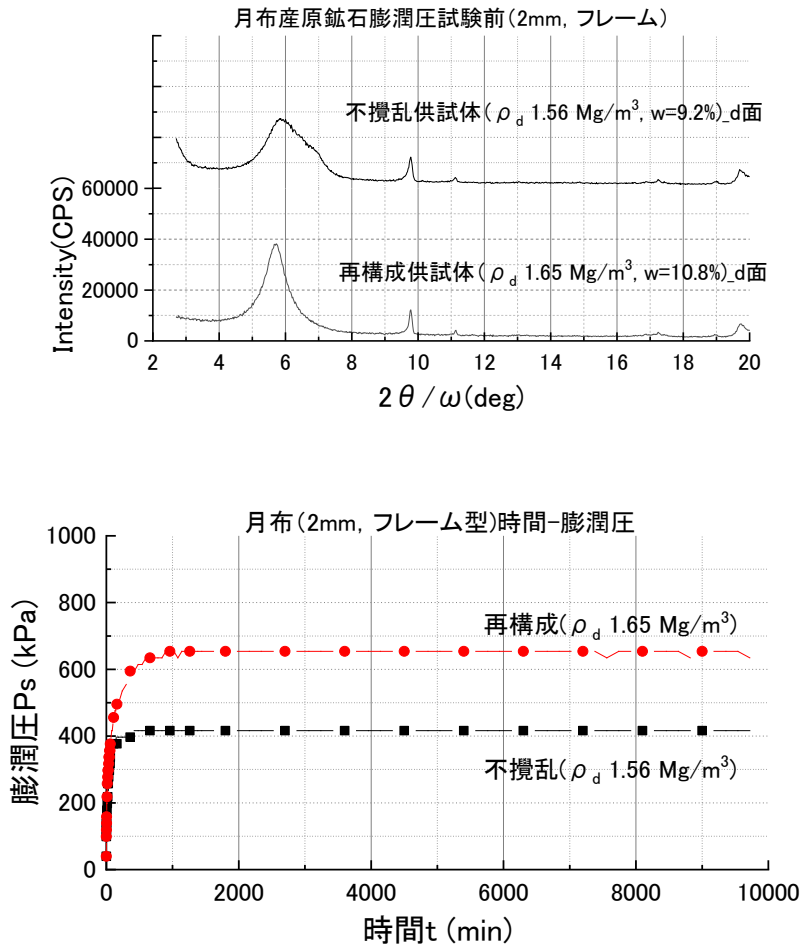


図 4-6 高さ 2 mm, フレーム型, 7日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 4-3 d₀₀₁に関する結果 (膨潤圧試験前)

| | d(Å) | 2θ(deg) | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比 (%) |
|-----|------|---------|------------------|------------|
| 不攪乱 | 15.1 | 5.86 | 2w | 9.2 |
| | 12.7 | 6.98 | 1w | |
| 再構成 | 15.4 | 5.74 | 2w | 10.8 |

図 4-6 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前）および膨潤圧の経時変化を示す。不攪乱供試体（ 1.56 Mg/m^3 , $w=9.2\%$ ）では、 $2\theta=5.8 \cdot 7.0 \text{ deg}$ 付近に 2 つのピークが重なって存在している。水分子がモンモリロナイトの結晶層間に 1 列（ $2\theta=7.07 \text{ deg}$ ）、2 列分（ $2\theta=5.7 \text{ deg}$ ）存在する場合のピーク位置に相当するため、水分子を 1 列および 2 列有するモンモリロナイトが混在していると言える。

再構成供試体（ 1.65 Mg/m^3 , $w=10.8\%$ ）においては、 $2\theta=5.8 \text{ deg}$ 付近にピークが一つ存在している。これは層間に水分子が 2 列（ 5.7 deg ）存在する底面間隔の値に相当し、本供試体中のモンモリロナイトはほぼ全てが水分子を 2 列有する状態である。

また、膨潤圧は不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも、試験開始直後に上昇し、1000 分経過以降に収束する挙動であった。膨潤圧の収束値は、不攪乱供試体において約 400 kPa 、再構成供試体において約 650 kPa であった。

・ T-2 (高さ 4 mm, 小型, 5 日間)

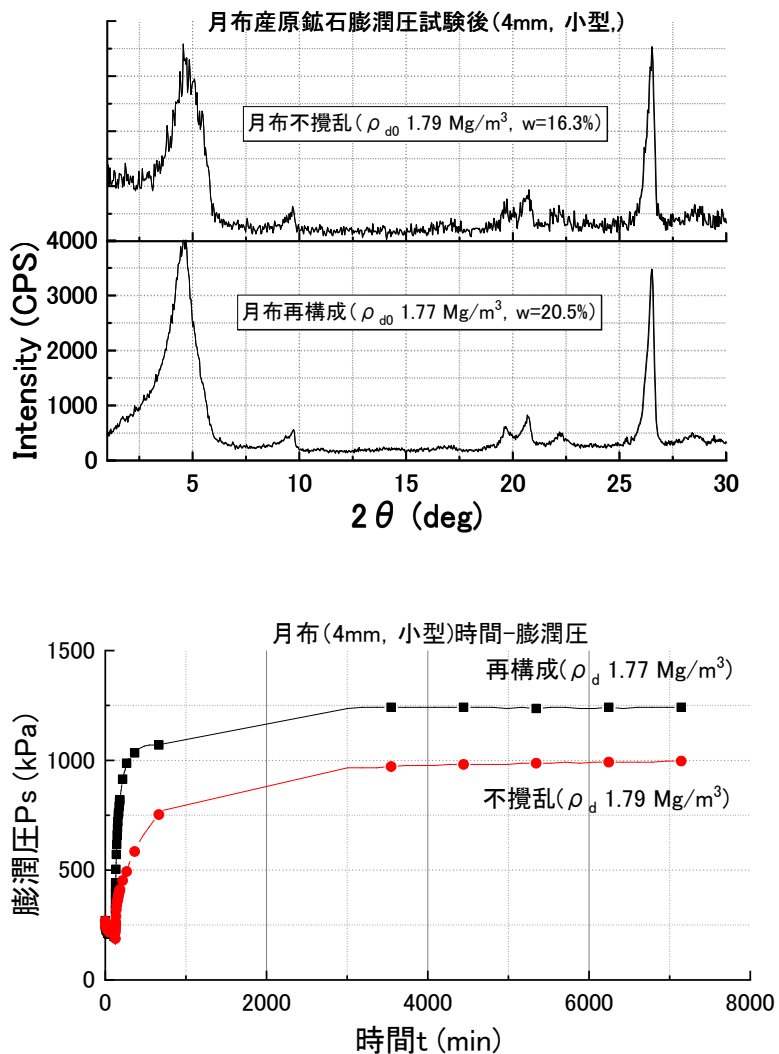


図 4-7 高さ 4 mm, 小型, 5 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 4-4 d₀₀₁に関する結果 (膨潤圧試験後)

| | d(Å) | 2θ(deg) | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-----|------|---------|------------------|--------|
| 不攪乱 | 19.4 | 4.56 | 3w | 16.3 |
| 再構成 | 18.7 | 4.72 | 3w | 20.5 |

図 4-7 に XRD 測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化を示す。これより、不攪乱供試体（ 1.79 Mg/m^3 , $w=16.3\%$ ）においては、 $2\theta=4.6 \text{ deg}$ 付近にピークが存在している。これはモンモリロナイトの結晶層間に水分子が 3 列（ 4.65 deg ）存在する底面間隔に相当するため、本供試体においては水分子が 3 層水和しているモンモリロナイトが支配的である。

再構成供試体（ 1.77 Mg/m^3 , $w=20.5\%$ ）においても、 $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近にピークが一つ存在しており、不攪乱供試体と同様、本供試体中のモンモリロナイトはほぼ全てが水分子 3 層水和状態であると考えられる。

また、膨潤圧は不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも、試験開始直後に上昇した後、4000 分経過以降は収束した。T-1 の高さ 2 mm の供試体に比べると、収束に時間を要しており、厚さが 2 倍になったことで飽和に時間を要したことためと考えられる。膨潤圧の収束値は、不攪乱供試体において約 1000 kPa、再構成供試体において約 1250 kPa であった。

・ T-3 (高さ 6 mm, 小型, 2 日間)

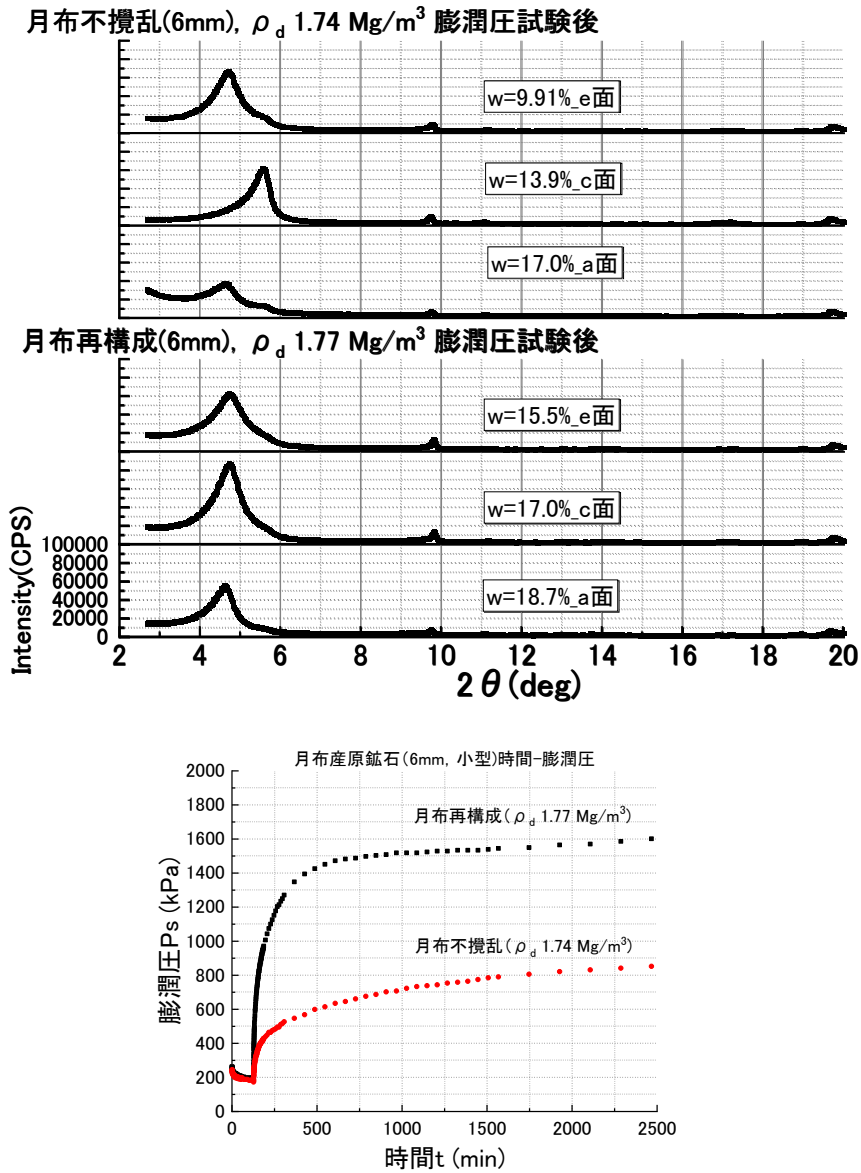


図 4-8 高さ 6 mm, 小型, 2 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 4-5 d_{001} に関する結果

| | | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(\text{deg})$ | 層間の水分子の存在数 L | 含水比(%) |
|-----|---------|-----------------|-----------------------|--------------|--------|
| 不攪乱 | 上側 | 18.8 | 4.71 | 3w | 9.9 |
| | 中間 | 15.9 | 5.56 | 2w | 13.9 |
| | 下側(給水面) | 19.0 | 4.66 | 3w | 17.0 |
| 再構成 | 上側 | 18.5 | 4.77 | 3w | 15.5 |
| | 中間 | 18.5 | 4.77 | 3w | 17.0 |
| | 下側(給水面) | 19.2 | 4.61 | 3w | 18.7 |

図 4-8 に XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化曲線を示す。これより、不攪乱供試体（ 1.74 Mg/m^3 ）においては、解体後の含水比は上側が 9.9%、中間の 2 mm 部分が 13.9%、下側（給水側）の 2 mm 部分が 17.0% であり、給水面側から飽和し始めている過程の途中である。上側において $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近、中間において $2\theta=5.6 \text{ deg}$ 付近、下側において $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近にそれぞれピークが存在しており、それぞれ水分子が 3 列（ 4.65 deg ）、2 列（ 5.7 deg ）、3 列存在する場合の底面間隔に相当する。故に、上側 2 mm 部分では水分子 3 層水和状態、中間 2 mm 部分が 2 層水和、下側（給水面側）2 mm 部分が水分子 3 層水和状態のモンモリロナイトが支配的である。下側 2 mm 部分のピークでは、 $2\theta=5.6 \text{ deg}$ 付近にもピークが存在しており、僅かに水分子 2 列を有するモンモリロナイトも存在していると考えられる。また、上側の 2 mm 部分においては、含水比が 9.9% と低いにも関わらず水分子 3 列分のピークとなっており、これは含水比が高くなるにつれて底面間隔も大きくなる傾向に反する結果であった。

再構成供試体（ 1.77 Mg/m^3 ）において、解体後の含水比は上側が 15.5%、中間が 17.0%、下側が 18.7% であった。いずれも $2\theta=4.6\sim 4.8 \text{ deg}$ 付近にピークが存在していることが分かり、本供試体におけるモンモリロナイトはほぼ全てが水分子を 3 列有する状態である。

以上より、再構成供試体と不攪乱供試体を比較すると、不攪乱供試体の方が含水比の上昇およびモンモリロナイトの底面間隔の増加に時間を要しており、膠結作用の影響で水分移動とモンモリロナイトの膨潤が阻害されているためと考えられる。

また、膨潤圧は不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも、試験開始直後に上昇した後、試験終了時（約 2 日経過時）まで緩やかに上昇した。膨潤圧の値は、不攪乱供試体において約 850 kPa、再構成供試体において約 1600 kPa であった。

・ T-4 (高さ 4 mm, 小型, 5 日間)

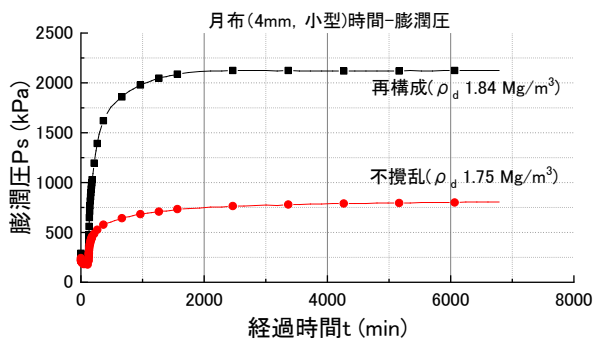
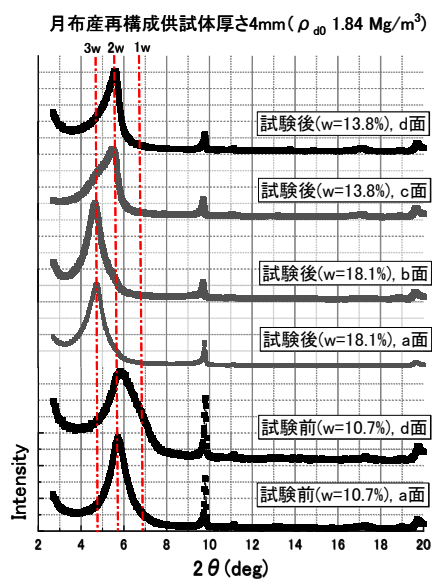
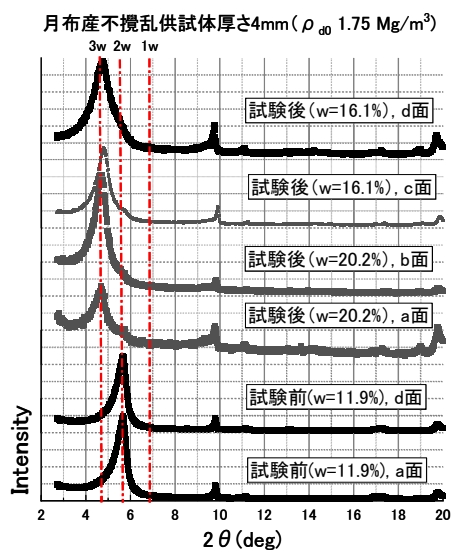


図 4-9 高さ 4 mm, 小型, 5 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 4-6 d_{001} に関する結果

| | | d(Å) | 2θ(deg) | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-----|-------|------|---------|------------------|--------|
| 不攪乱 | 試験前上側 | 15.6 | 5.68 | 2w | 11.9 |
| | 試験前下側 | 15.7 | 5.64 | 2w | |
| | 試験後上側 | 18.6 | 4.74 | 3w | 16.1 |
| | 試験後下側 | 19.0 | 4.66 | 2w と 3w 混在 | 20.2 |
| 再構成 | 試験前上側 | 15.1 | 5.86 | 1w と 2w 混在 | 10.7 |
| | 試験前下側 | 15.5 | 5.72 | 2w | |
| | 試験後上側 | 15.9 | 5.56 | 2w と 3w 混在 | 13.8 |
| | 試験後下側 | 19.0 | 4.64 | 3w | 18.1 |

図 4-9 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。これより、不攪乱供試体（ 1.75 Mg/m^3 ）においては、膨潤圧試験前において含水比 11.9%で、 $2\theta=5.7 \text{ deg}$ 付近にピークが存在している。試験後は上側が含水比 16.1%、ピークが $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近であり、下側（給水側）が含水比 20.2%、ピークが $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近であった。これより、試験前はモンモリロナイトの結晶層間に水分子 2 列（ 5.7 deg ）、試験後は 3 列（ 4.65 deg ）存在していると考えられる。

再構成供試体（ 1.84 Mg/m^3 ）において、膨潤圧試験前において含水比 10.7%で、 $2\theta=5.7\sim 5.8 \text{ deg}$ 付近にピークが存在している。試験後は上側が含水比 13.8%、ピークは $2\theta=5.6 \text{ deg}$ 付近にあり、下側は含水比 18.1%、ピークは $2\theta=4.6 \text{ deg}$ 付近に存在している。これより、試験前は水分子 2 列分存在しており、試験後は上側において水分子 2 列分、下側において水分子 3 列分存在している。以上より、給水面側からの水分移動に伴い含水比が増加し、それに応じてモンモリロナイトの底面間隔も増大する挙動が示された。

膨潤圧は不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも、試験開始直後に上昇した後、4000 分経過以降は収束した。膨潤圧の収束値は、不攪乱供試体において約 750 kPa、再構成供試体において約 2250 kPa であった。

・ T-5 (不攪乱, 高さ 4 mm, 小型, 6 日間)

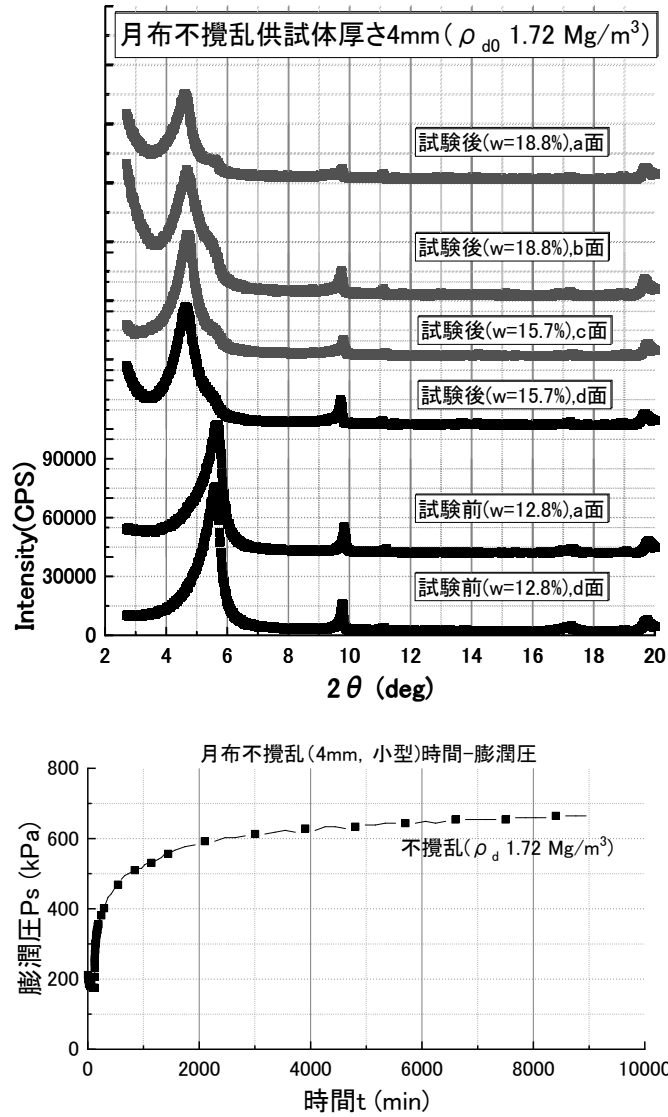


図 4-10 不攪乱高さ 4 mm, 小型, 6 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

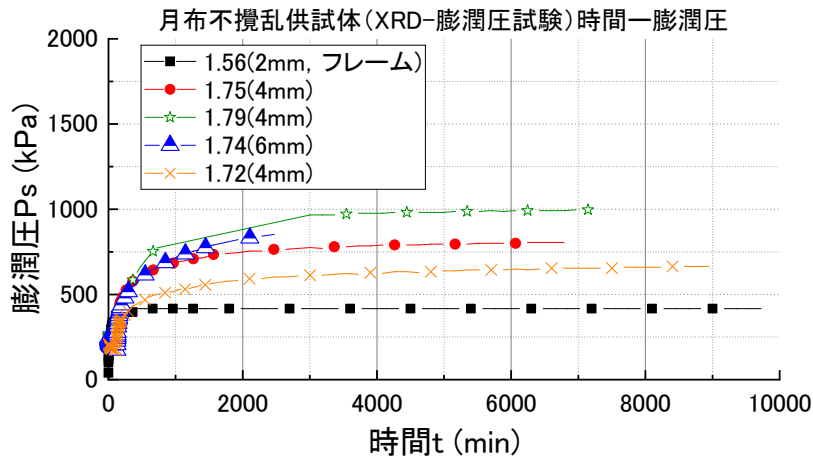
表 4-7 d_{001} に関する結果

| | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(\text{deg})$ | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-------|-----------------|-----------------------|------------------|--------|
| 試験前上側 | 15.8 | 5.58 | 2w | 12.8 |
| 試験前下側 | 15.6 | 5.66 | 2w | |
| 試験後上側 | 18.9 | 4.68 | 2w と 3w 混在 | 15.7 |
| 試験後下側 | 19.2 | 4.60 | 2w と 3w 混在 | 18.8 |

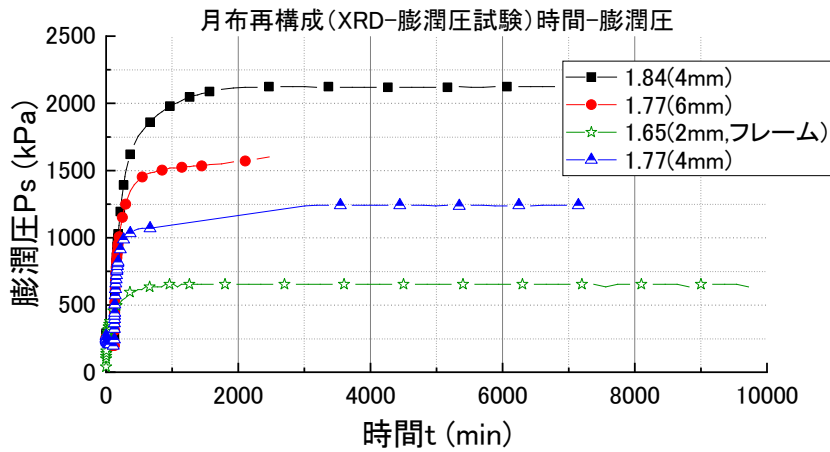
図 4-10 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。これより、不攪乱供試体（ 1.72 Mg/m^3 ）において、試験前は含水比 12.8%、ピークは $2\theta=5.6\sim 5.7 \text{ deg}$ 付近に存在している。試験後は上側において含水比 15.7%、ピークは $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近に存在しており、下側（給水側）において含水比 18.8%、ピークは $2\theta=4.6 \text{ deg}$ 付近に存在している。これより、試験前においてはモンモリロナイト層間に水分子 2 列が存在しており、試験後は水分子 3 列が存在していることが分かる。なお、試験後のピークにおいては、 $2\theta=5.7 \text{ deg}$ 付近にピークが残存しており、一部のモンモリロナイトは水分子 2 列分を有していることが推察される。

また、膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後、4000 分経過以降は一定値に収束する挙動であった。膨潤圧の収束値は、約 680 kPa であった。

図 4-11 に、ケース T-1～T-5 における、不攪乱供試体および再構成供試体の膨潤圧の経時変化曲線をまとめて示す。これより、不攪乱供試体では乾燥密度が高いほど、膨潤圧の定常化に要する時間が長くなる傾向が見られた。高さ 6 mm、試験期間 2 日間のケースにおいては、不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも膨潤圧の上昇途中である。また、不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも、フレーム型膨潤圧試験装置を用いて実施したケースは、小型膨潤圧試験装置を用いた他の供試体に比べて、膨潤圧が低下していることが分かる。これは、フレーム型膨潤圧試験装置の方が試験装置の構造上、小型膨潤圧試験装置に比べて供試体の変形に対する剛性が低く、変形を許容しやすいことによって膨潤圧が低下したと推察する。試験装置の剛性に着目した同様の考察を田中⁵⁾も行っており、上記の結果はこれに一致するものと考えられる。



(a)不攪乱供試体 時間-膨潤圧関係



(b) 月布産再構成供試体 時間-膨潤圧関係

図 4-11 月布産原鉱石 時間-膨潤圧関係

図 4-12 に供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係を示す。これより、不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも、乾燥密度と最大膨潤圧は比例関係にある。また、供試体乾燥密度が 1.7 Mg/m^3 より高い領域において、不攪乱供試体の乾燥密度に対する最大膨潤圧の増加割合は、再構成供試体に比べて低くなっている。

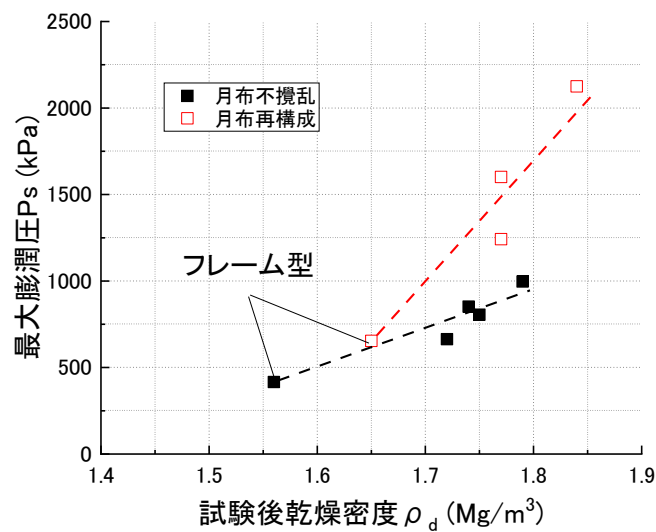


図 4-12 供試体の試験後乾燥密度と最大膨潤圧の関係

図 4-13 に供試体の含水比とモンモリロナイトの底面間隔 (d_{001}) の関係を示す。
 なお、モンモリロナイトの底面間隔は、最も強度の高いピークの 2θ の値を用いている。

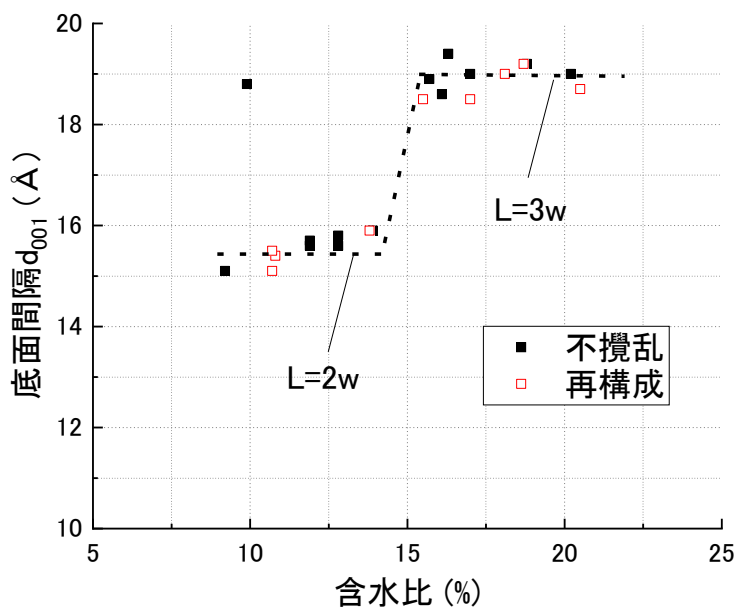


図 4-13 供試体の含水比とモンモリロナイトの底面間隔の関係

これより、不攪乱供試体および再構成供試体において、含水比が10～15%の領域において底面間隔が約15.5Å（水分子2層に相当）であり、含水比15～20%の領域において底面間隔が約19.0Å（水分子3層に相当）である。なお、含水比10～15%の範囲では、含水比の増加に伴い底面間隔が比例増加している。以上より、不攪乱供試体と再構成供試体内のモンモリロナイトへの水分子の浸入挙動については大きな差異がないように見えるが、水分子2列水和・3列水和の混在状況など、詳細な浸入状況の差異は反映されていない。

図4-14～図4-16では、不攪乱供試体と再構成供試体における、水分子の詳細な浸入状況の差異を比較するために、供試体の含水比の差異が±0.2%以内と、極めて近い状態の2θ-Intensity関係グラフをそれぞれ抽出し、比較して示す。

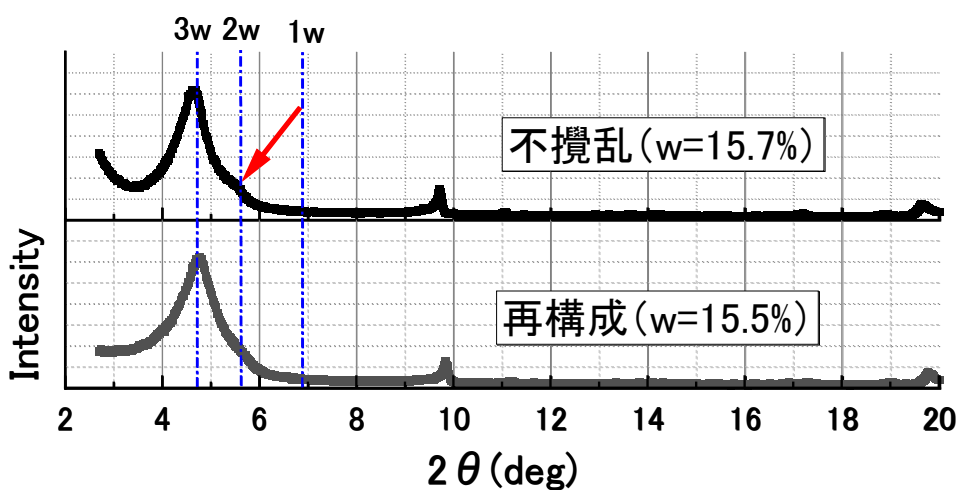


図 4-14 不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較 (w=15.5～15.7%)

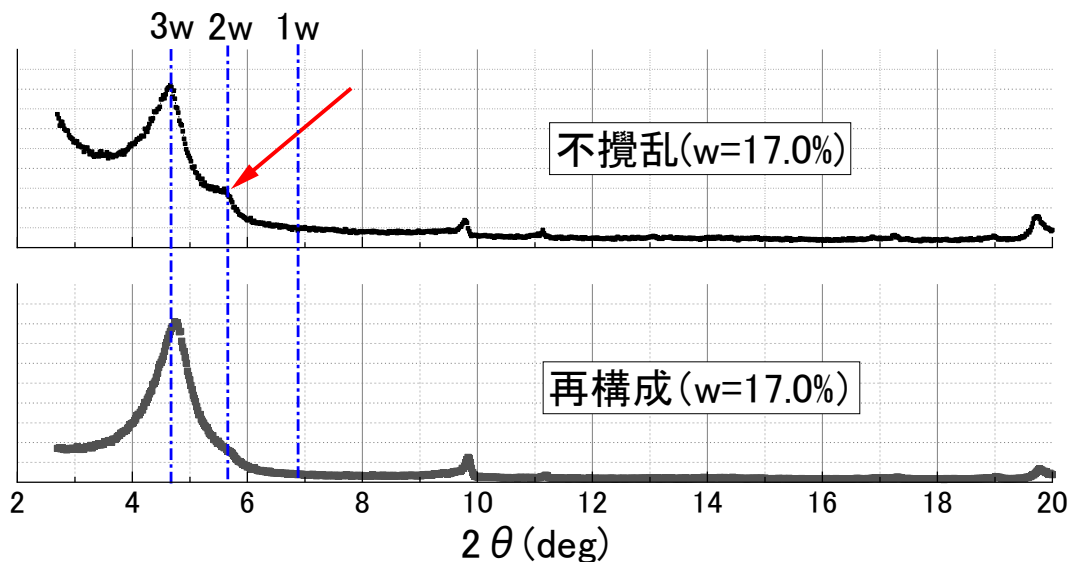


図 4-15 不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較 (w=17.0%)

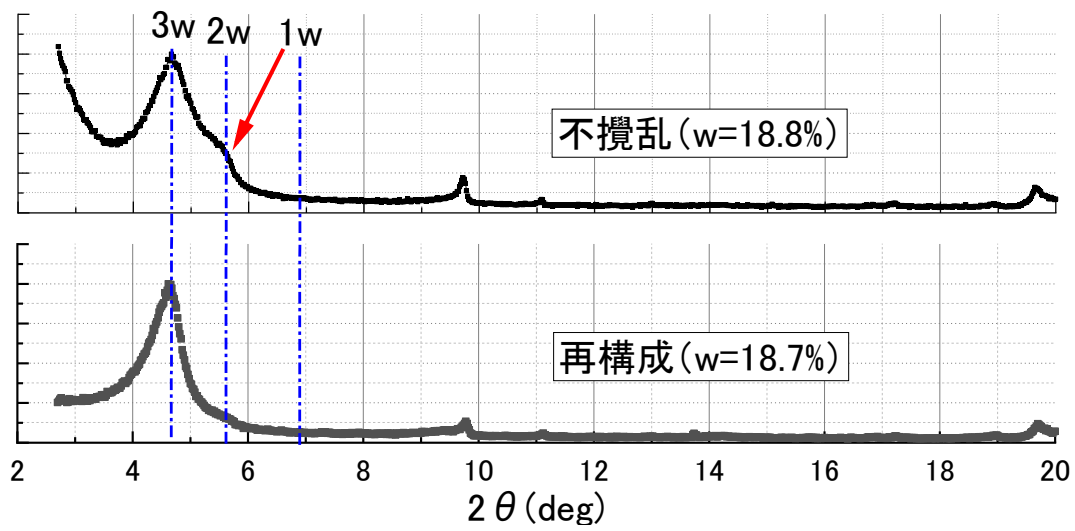


図 4-16 不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較 (w=18.7~18.8%)

それぞれ、図 4-14 では含水比 15.5~15.7%、図 4-15 では含水比 17.0%、図 4-16 では含水比 18.7~18.8%における不攪乱供試体と再構成供試体のピークを比較している。なお、これらの含水比においては、いずれも水分子が 3 列存在するモンモリロナイトが優勢である。以上のいずれのグラフにおいても、不攪乱供試体では水分子 3 列 ($2\theta=4.65$ deg) のピークのみならず、水分子 2 列に等しい $2\theta=5.7$ deg 付近のピークが明確に存在する。このことは、含水比が 15.5~18.8%の範囲において、同一の含水比であっても、不攪乱供試体の方がモンモリロナイトの層間に存在する水分子の量が少ないことを示唆していると考えられる。すなわち、不攪乱供試体においてはセメンテーションの影響により、モンモリロナイトの結晶層間への水の浸入とそれに伴う膨潤が阻害されていることを意味し、不攪乱供試体では再構成供試体よりも膨潤圧が低下したと考えられる。以上は、本研究がこれまでに主張してきた、図 4-2 に示す膨潤特性低下のメカニズムを実験的に裏付ける一つの根拠となり得る。

4.3.2 Ten Sleep 産原鉱石の XRD・膨潤圧連携試験結果

本項では、Ten Sleep 産原鉱石の不攪乱供試体および再構成供試体（粒径：～0.425 mm）を用いて XRD・膨潤圧連携試験の結果について述べる。表 4-8 に、乾燥密度・供試体高さ（高さ）・試験日数・最大膨潤圧および XRD 測定条件を示す。節番号を A-1～A-4（アメリカ・Ten Sleep 産原鉱石）と振り、供試体高さ・試験日数の等しい不攪乱供試体・再構成供試体の試験結果を比較する。

表 4-8 Ten Sleep 産原鉱石の試験ケース

| 節番号 | 供試体種別 | 供試体 乾燥密度 (g/cm ³) | 高さ(mm) | 試験日数 (day) | 試験機 | 最大膨潤圧(kPa) | 膨潤圧試験前後の XRD 測定の有無 |
|-----|-------|-------------------------------------|--------|---------------|-----|------------|-----------------------|
| A-1 | 再構成 | 1.49 | 4 | 5 | 小型 | 2364 | 後のみ |
| | 不攪乱 | 1.47 | 4 | 5 | 小型 | 1138 | 後のみ |
| A-2 | 不攪乱 | 1.48 | 4 | 2 | 小型 | 1088 | 後のみ |
| A-3 | 不攪乱 | 1.53 | 4 | 5 | 小型 | 1447 | 前後 |
| | 再構成 | 1.45 | 4 | 5 | 小型 | 2025 | 前後 |
| A-4 | 不攪乱 | 1.52 | 4 | 40 | 小型 | 1630 | 前後 |
| | 再構成 | 1.50 | 4 | 40 | 小型 | 2155 | 前後 |

・ A-1 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 5 日, XRD は平行法で実施)

Ten Sleep産原鉱石膨潤圧試験後(4mm, 小型)

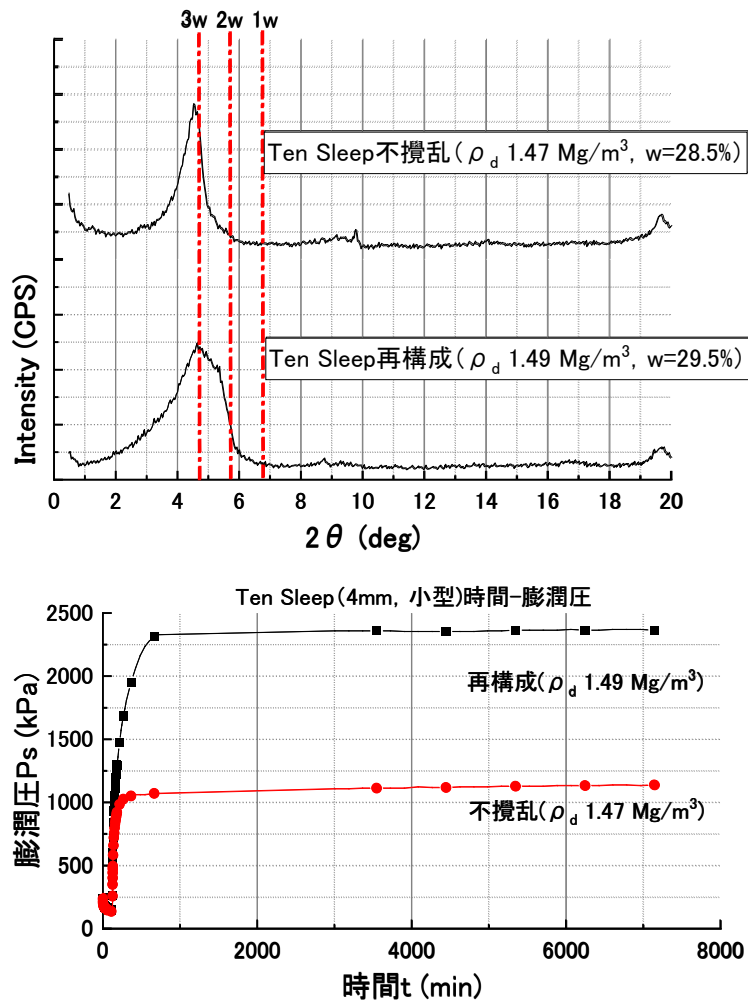


図 4-17 XRD の測定結果 (膨潤圧試験後) および膨潤圧の経時変化曲線 (A-1)

表 4-9 d₀₀₁ に関する結果 (膨潤圧試験後, A-1)

| | d(Å) | 2θ(°) | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-----|------|-------|------------------|--------|
| 不攪乱 | 19.4 | 4.56 | 3w | 28.5 |
| 再構成 | 19.0 | 4.64 | 3w | 29.5 |
| | 16.6 | 5.32 | 2w | |

図 4-17 に XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化を示す。これより、不攪乱供試体（ 1.47 Mg/m^3 , $w=28.5\%$ ）において、 $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近にピークが存在している。これは水分子 3 層水和状態に相当する。再構成供試体（ 1.49 Mg/m^3 , $w=29.5\%$ ）において、 $2\theta=4.7 \text{ deg}$ および 5.8 deg にピークが混在している。これらはそれぞれ水分子が 3 列（ 4.7 deg ）、2 列（ 5.8 deg ）存在する場合の底面間隔である。

また、膨潤圧は不攪乱・再構成供試体のいずれも、試験開始直後に上昇し、約 1000 分経過以降は収束した。膨潤圧の収束値は、不攪乱供試体において 1138 kPa 、再構成供試体において 2364 kPa であった。

・ A-2 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 2 日)

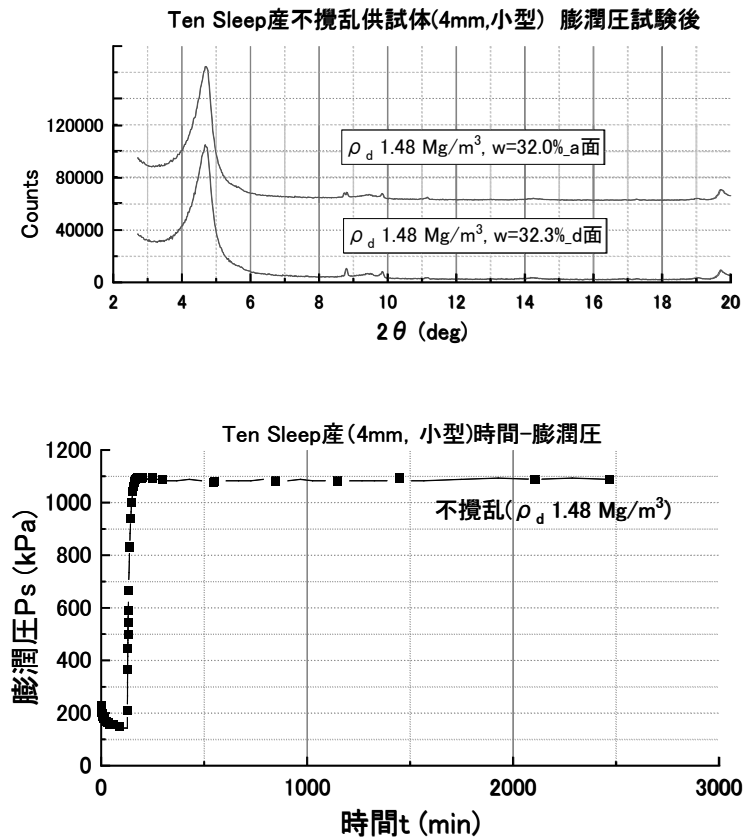


図 4-18 XRD の測定結果 (膨潤圧試験後) および膨潤圧の経時変化曲線(A-2)

表 4-10 d_{001} に関する結果 (膨潤圧試験後, A-2)

| | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|----|-----------------|---------------------|------------------|--------|
| 上面 | 19.0 | 4.66 | 3w | 32.3 |
| 下面 | 18.8 | 4.69 | 3w | 32.0 |

図 4-18 に XRD 測定結果 (膨潤圧試験後) および膨潤圧の経時変化を示す. これより, 不攪乱供試体 (1.48 Mg/m^3 , $w=32.0\%$ (吸水面側), 32.3% (上面側)) において, $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近にピークが存在しており, 水分子 3 層水和状態に相当する.

また, 膨潤圧は試験開始直後に上昇し, 約 500 分経過以降は一定値に収束する挙動であった. 膨潤圧の収束値 (最大膨潤圧) は 1088 kPa であった.

・ A-3 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 5 日)

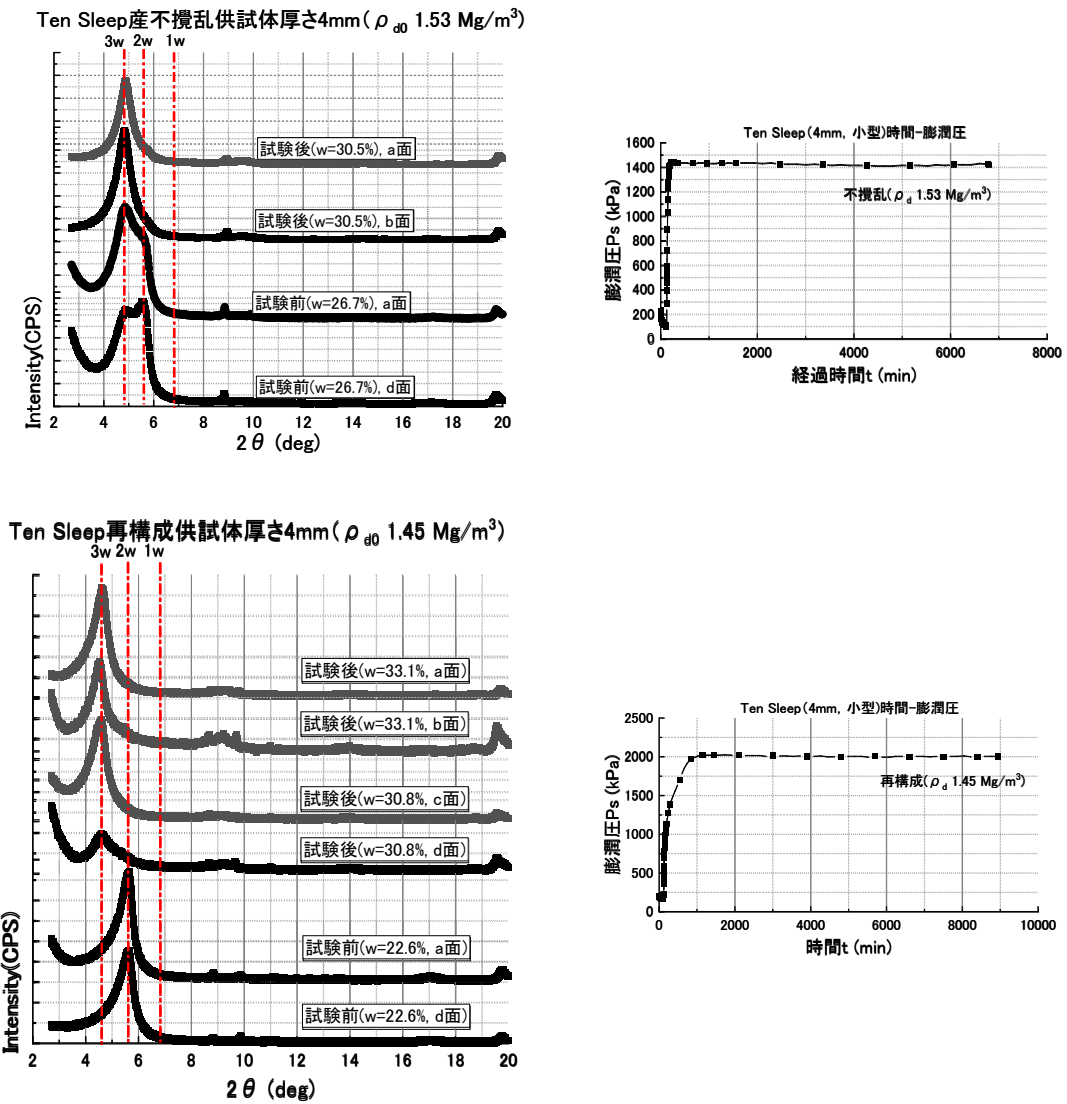


図 4-19 XRD の測定結果 (膨潤圧試験前後) および膨潤圧の経時変化曲線(A-3)

表 4-11 d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，A-3）

| | | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-----|-------|-----------------|---------------------|------------------|--------|
| 不攪乱 | 試験前上側 | 15.8 | 5.6 | 2w と 3w 混在 | 26.7 |
| | 試験前下側 | 18.4 | 4.8 | 2w と 3w 混在 | |
| | 試験後下側 | 18.3 | 4.84 | 3w | 30.5 |
| 再構成 | 試験前上側 | 15.6 | 5.66 | 2w | 22.6 |
| | 試験前下側 | 15.7 | 5.64 | 2w | |
| | 試験前上側 | 19.2 | 4.6 | 3w | 30.8 |
| | 試験後下側 | 18.8 | 4.7 | 3w | 33.1 |

図 4-19 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。不攪乱供試体（ 1.53 Mg/m^3 ， $w=26.7\%$ （試験前）， 30.5% （試験後））において，膨潤圧試験前は $2\theta=4.7 \text{ deg}$ および 5.8 deg 付近にピークが混在しており，膨潤圧試験後は $2\theta=4.7 \text{ deg}$ のみにピークが存在している。これより，膨潤圧試験前は水分子 2 層水和と 3 層水和のモンモリロナイト結晶層が混在しており，膨潤圧試験後は吸水により水分子 3 層水和の結晶層が支配的である。再構成供試体（ 1.44 Mg/m^3 ， $w=22.6\%$ （試験前）， 30.8% （試験後上側）， 33.1% （試験後吸水面側））において，膨潤圧試験前は $2\theta=5.8 \text{ deg}$ にピークが存在し，膨潤圧試験後は $2\theta=4.7 \text{ deg}$ にピークが存在している。これより，膨潤圧試験前は水分子 2 層水和の結晶層が支配的であり，試験後には水分子 3 層水和に推移している。

また，膨潤圧は試験開始直後に上昇し，約 1000 分経過以降収束した。膨潤圧の収束値（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 1447 kPa ，再構成供試体では 2025 kPa であった。

・ A-4 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 40 日)

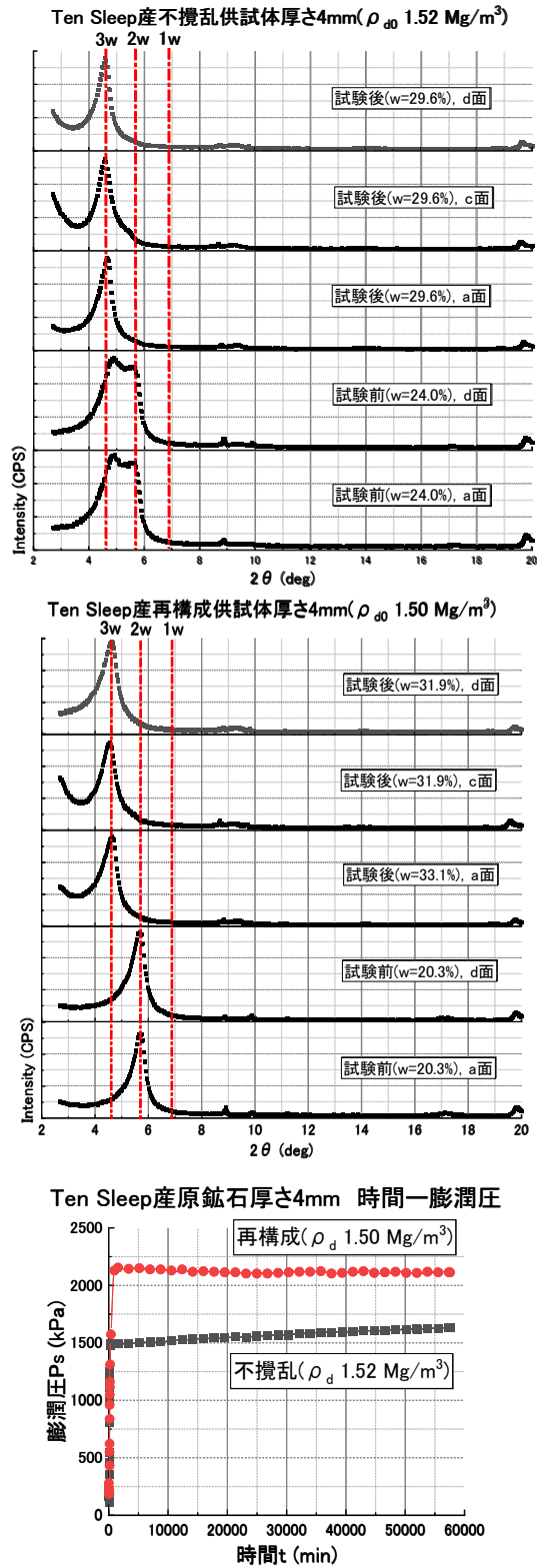


図 4-20 XRD の測定結果 (膨潤圧試験前後) および膨潤圧の経時変化曲線(A-4)

表 4-12 d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，A-4）

| | | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-----|-------|-----------------|---------------------|------------------|--------|
| 不攪乱 | 試験前上側 | 18.0 | 4.90 | 2w と 3w 混在 | 24.0 |
| | 試験前下側 | 17.9 | 4.95 | 2w と 3w 混在 | |
| | 試験後上側 | 19.2 | 4.6 | 3w | 29.6 |
| | 試験後下側 | 18.9 | 4.67 | 3w | 29.6 |
| 再構成 | 試験前上側 | 15.5 | 5.7 | 2w | 20.3 |
| | 試験前下側 | 15.6 | 5.68 | 2w | |
| | 試験後上側 | 19.2 | 4.61 | 3w | 31.9 |
| | 試験後下側 | 19.0 | 4.66 | 3w | 33.1 |

図 4-20 に XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。不攪乱供試体 (1.52 Mg/m^3 , $w=24.0\%$ (試験前), 29.6% (試験後)) において、膨潤圧試験前は $2\theta=4.7 \text{ deg}$ および 5.8 deg にピークが混在しており、膨潤圧試験後は $2\theta=4.7 \text{ deg}$ に存在している。これより、膨潤圧試験前は水分子 2 層水和、3 層水和のモンモリロナイト結晶層が混在し、膨潤圧試験後は吸水により水分子 3 層水和の結晶層が支配的である。再構成供試体 (1.52 Mg/m^3 , $w=20.3\%$ (試験前), 31.9% (試験後上側), 33.1% (試験後吸水面側)) において、膨潤圧試験前は $2\theta=5.8 \text{ deg}$ にピークが存在し、膨潤圧試験後は $2\theta=4.7 \text{ deg}$ にピークが存在している。これより、膨潤圧試験前は水分子 2 層水和の結晶層が支配的であり、試験後は水分子 3 層水和へと推移している。

また、膨潤圧は試験開始直後に上昇した後に、約 1000 分経過以降は収束する挙動であった。膨潤圧の収束値（最大膨潤圧）は、不攪乱供試体では 1630 kPa 、再構成供試体では 2155 kPa であった。

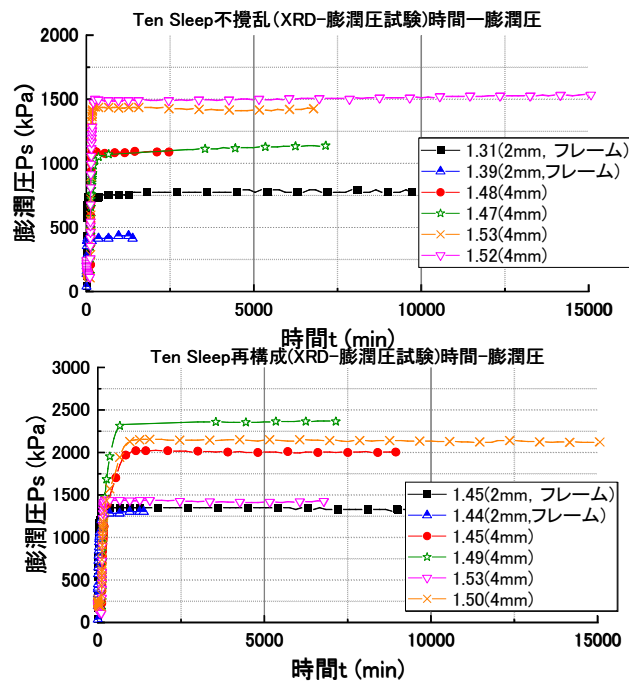


図 4-21 Ten Sleep 産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線

図 4-21 に A-1～A-4 の結果を総合した，Ten Sleep 産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線を示す。これより，膨潤圧の経時変化に関して，試験開始後 500 分程度で膨潤圧がピークに到達し，その後は収束する挙動であった。また，月布産原鉱石の場合と同様，フレーム型試験装置で測定した膨潤圧は小型膨潤圧試験装置のケースに比べて低い傾向が見られた。

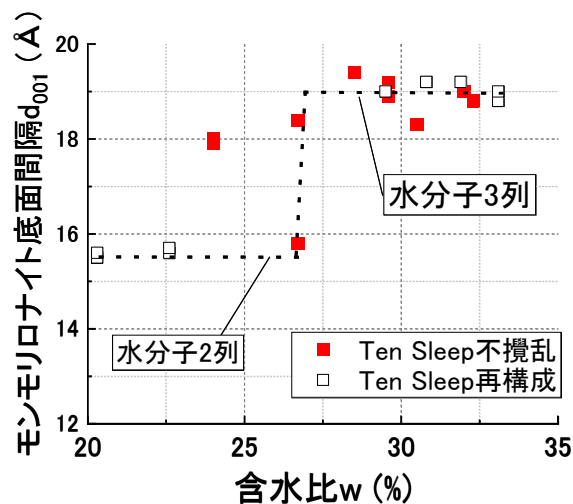


図 4-22 Ten Sleep 産原鉱石の供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔関係

図 4-22 に Ten Sleep 産原鉱石の供試体含水比とモンモリロナイト底面間隔の関係を示す。これより，不攪乱供試体においてバラつきがみられるものの，概ね含水比 27%以下の

場合は水分子2層水和であり、それ以上の含水比の場合は水分子3層水和に移行する傾向が見受けられる。月布産原鉱石と同様、不攪乱供試体と再構成供試体の含水比—モンモリロナイト底面間隔の関係には大きな差異は見受けられなかった。

4.3.3 劉房子産原鉱石のXRD・膨潤圧連携試験結果

本項では、劉房子産原鉱石の不攪乱供試体および再構成供試体（粒径：～0.425 mm）を用いてXRD・膨潤圧連携試験の結果について述べる。表 4-13 に、乾燥密度・供試体高さ（厚さ）・試験日数・最大膨潤圧およびXRD測定条件を示す。本項では、これ以降節番号をC-1～C-5（中国・劉房子産原鉱石）と振り、供試体高さ・試験日数の等しい不攪乱供試体・再構成供試体の試験結果を比較する。

表 4-13 劉房子産原鉱石の試験ケース

| 節番号 | 供試体種別 | 供試体 乾燥密度 (g/cm ³) | 高さ (mm) | 試験日数 (day) | 試験機 | 最大膨潤圧 (kPa) | 膨潤圧試験前後の XRD測定の有無 |
|-----|-------|-------------------------------------|------------|---------------|-----|----------------|----------------------|
| C-1 | 再構成 | 1.94 | 4 | 2 | 小型 | 6035 | 後のみ |
| | 不攪乱 | 1.96 | 4 | 2 | 小型 | 1797 | 後のみ |
| C-2 | 再構成 | 1.88 | 4 | 5 | 小型 | 6055 | 前後 |
| | 不攪乱 | 1.96 | 4 | 5 | 小型 | 2008 | 前後 |
| C-3 | 再構成 | 1.79 | 4 | 6 | 小型 | 4536 | 前後 |
| C-4 | 不攪乱 | 1.81 | 4 | 40 | 小型 | 1442 | 前後 |
| | 再構成 | 1.85 | 4 | 40 | 小型 | 4441 | 前後 |
| C-5 | 再構成 | 1.93 | 4 | 3 | 小型 | 6070 | 前後 |

・ C-1 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 2 日)

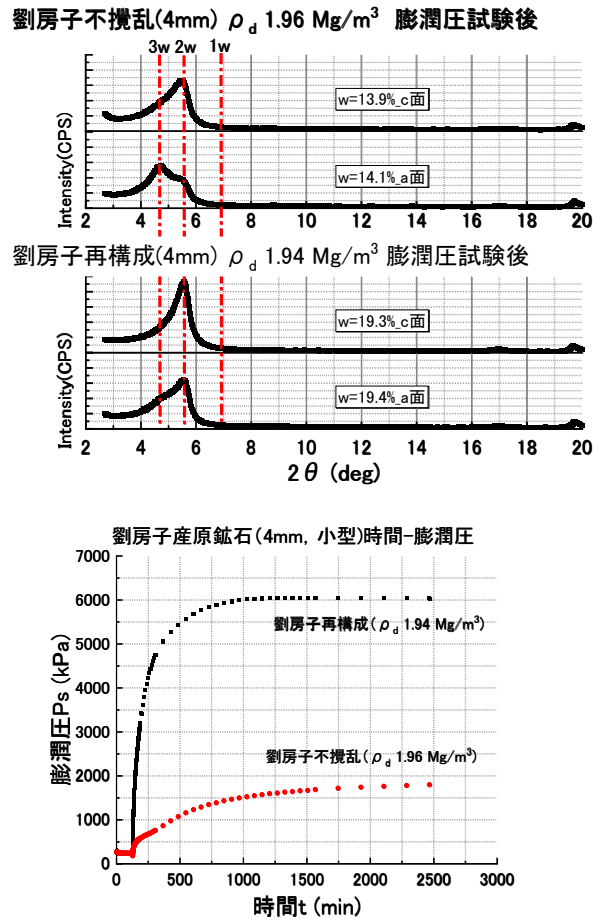


図 4-23 XRD の測定結果 (膨潤圧試験後) および膨潤圧の経時変化曲線(C-1)

表 4-14 d_{001} に関する結果 (膨潤圧試験後, C-1)

| | | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の存在数 L | 含水比(%) |
|-----|-------|-----------------|---------------------|--------------|--------|
| 不攪乱 | 試験後上側 | 15.5 | 5.70 | 2w | 13.9 |
| | 試験後下側 | 18.8 | 4.70 | 3w | 14.1 |
| 再構成 | 試験後上側 | 15.8 | 5.58 | 2w | 19.3 |
| | 試験後下側 | 15.9 | 5.57 | 2w | 19.4 |

図 4-23 に XRD 測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化を示す。これより、不攪乱供試体（ 1.96 Mg/m^3 , $w=14.1\%$ ）において、吸水面側では $2\theta=4.7 \text{ deg}$ および 5.8 deg 付近にピークが混在しており、上面側では $2\theta=4.7 \text{ deg}$ 付近に存在している。これより、吸水面側では水分子 2 層水和と 3 層水和の結晶層が混在し、上面側では水分子 2 層水和の結晶層が支配的である。再構成供試体（ 1.94 Mg/m^3 , $w=19.4\%$ ）において、吸水面側・上面側のいずれも $2\theta=5.8 \text{ deg}$ にピークが存在しており、水分子 2 層水和の結晶層が支配的である。

また膨潤圧については、再構成供試体では試験開始直後に上昇し、約 1000 分経過以降は収束する挙動であったのに対し、不攪乱供試体では試験開始後約 2000 分まで緩やかに増加する挙動であった。膨潤圧の収束値は、不攪乱供試体では 1797 kPa 、再構成供試体では 6035 kPa であった。

・ C-2 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 5 日)

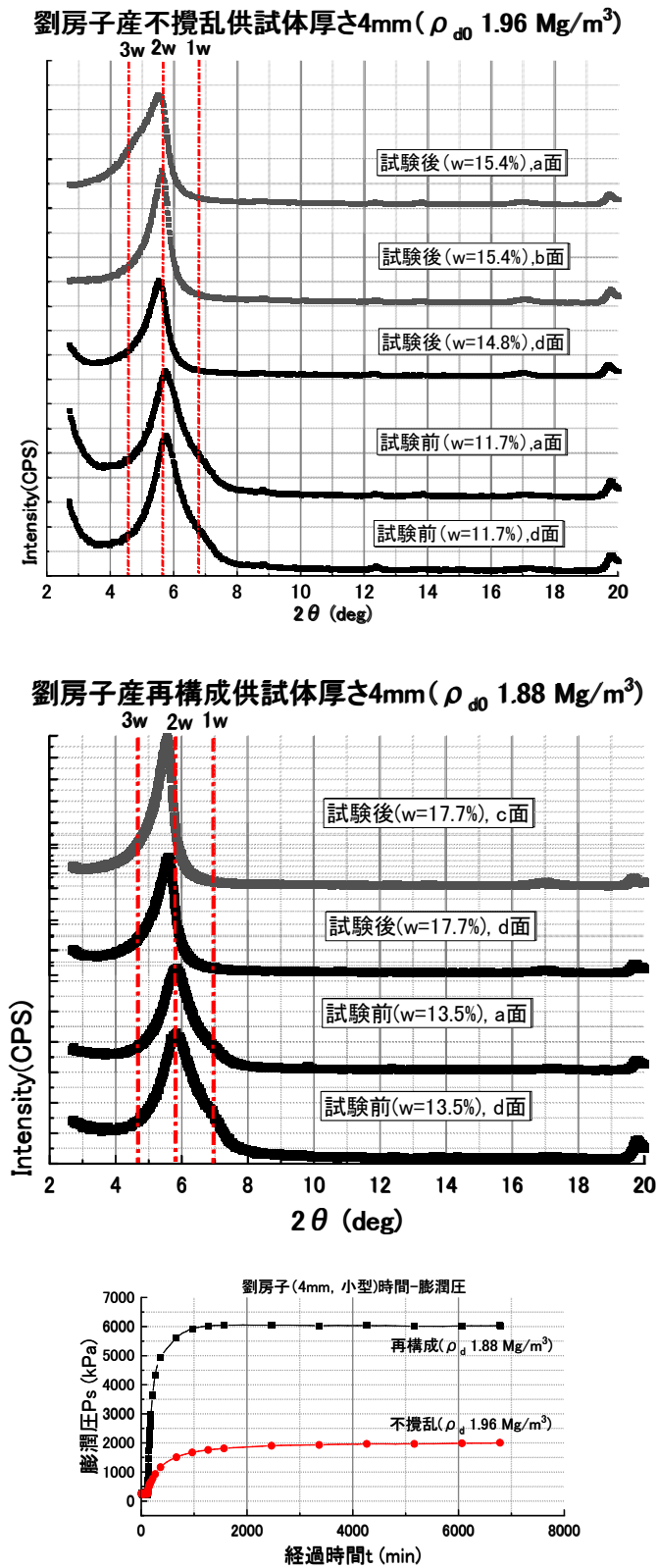


図 4-24 XRD の測定結果 (膨潤圧試験前後) および膨潤圧の経時変化曲線(C-2)

表 4-15 d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-2）

| | | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-----|-------|-----------------|---------------------|------------------|--------|
| 不攪乱 | 試験前上側 | 15.3 | 5.76 | 2w | 11.7 |
| | 試験前下側 | 15.4 | 5.74 | 2w | |
| | 試験後上側 | 15.8 | 5.60 | 2w | 14.8 |
| | 試験後下側 | 16.1 | 5.48 | 2w | 15.4 |
| 再構成 | 試験前上側 | 15.1 | 5.86 | 1w と 2w 混在 | 13.5 |
| | 試験前下側 | 15.0 | 5.90 | 1w と 2w 混在 | |
| | 試験後上側 | 15.8 | 5.60 | 2w | 17.7 |
| | 試験後下側 | 15.8 | 5.60 | 2w | |

図 4-24 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。不攪乱供試体（ 1.96 Mg/m^3 ， $w=11.7\%$ （試験前）， $w=14.8\%$ （試験後上面）， $w=15.4\%$ （試験後吸水面側））において，膨潤圧試験前後のいずれも $2\theta=5.8 \text{ deg}$ にピークが存在している。これより，試験前後いずれも，水分子 2 層水和の結晶層が支配的である。再構成供試体（ 1.88 Mg/m^3 ， $w=13.5\%$ （試験前）， $w=17.7\%$ （試験後））においても，膨潤圧試験前は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=6.9 \text{ deg}$ および 5.8 deg に混在しており，試験後は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=5.8 \text{ deg}$ に存在している。これより，試験前は水分子 1 層水和，2 層水和の結晶層が混在しており，試験後は吸水に伴い水分子 2 層水和が支配的である。

また，膨潤圧は不攪乱供試体，再構成供試体のいずれも，試験開始直後に上昇し約 1000 分経過以降は収束する挙動であった。膨潤圧の収束値（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 2008 kPa ，再構成供試体では 6055 kPa であった。

・ C-3 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 6 日)

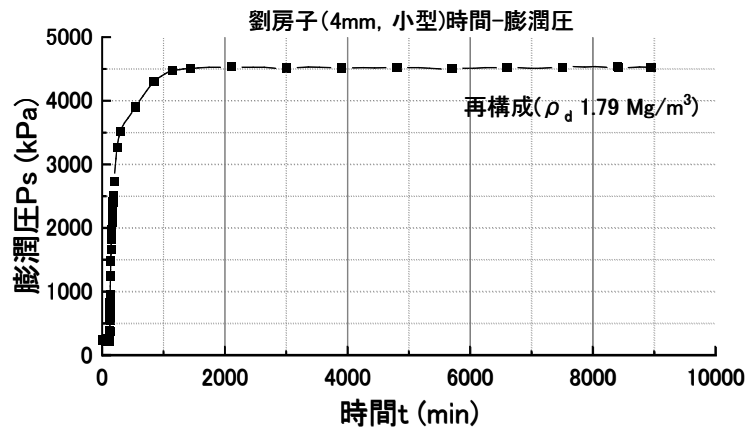
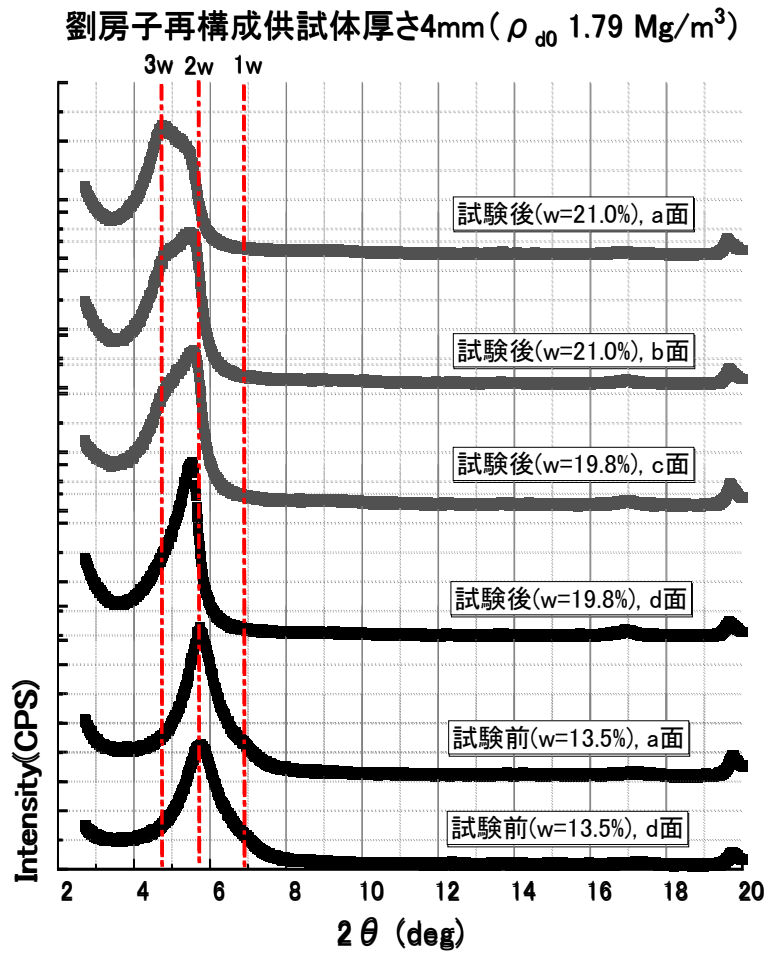


図 4-25 XRD の測定結果 (膨潤圧試験前後) および膨潤圧の経時変化曲線(C-3)

表 4-16 d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-3）

| | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-------|-----------------|---------------------|------------------|--------|
| 試験前上側 | 15.5 | 5.72 | 2w | 13.5 |
| 試験前下側 | 15.2 | 5.80 | 2w | |
| 試験後上側 | 15.7 | 5.62 | 2w と 3w 混在 | 19.8 |
| 試験後下側 | 18.2 | 4.86 | 2w と 3w 混在 | 21.0 |

図 4-25 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。再構成供試体（ 1.79 Mg/m^3 , $w=13.5\%$ （試験前）， $w=19.8\%$ （試験後上面）， $w=21.0\%$ （試験後吸水面））において，膨潤圧試験前は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=5.8 \text{ deg}$ にピークが混在しており，試験後は吸水面・上面側いずれも $2\theta=6.9 \text{ deg}$ および 5.8 deg にピークが混在している。これより，試験前は水分子 2 層水和であり，試験後は吸水に伴い水分子 2 列水和，3 層水和が混在している。

また，膨潤圧は試験開始直後に上昇し，1000 分経過以降は収束する挙動であった。膨潤圧の収束値（最大膨潤圧）は 4536 kPa であった。

・ C-4 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 40 日)

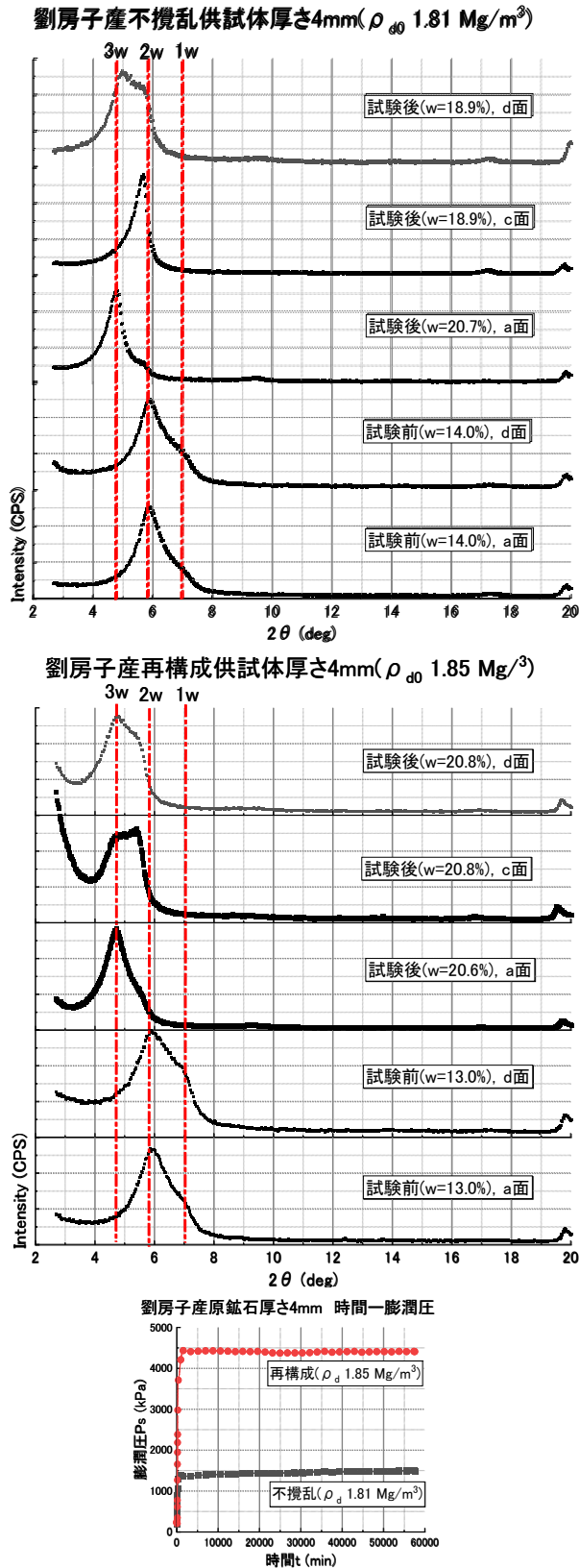


図 4-26 XRD の測定結果 (膨潤圧試験前後) および膨潤圧の経時変化曲線(C-4)

表 4-17 d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-4）

| | | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の 存在数 L | 含水比(%) |
|-----|-------|-----------------|---------------------|------------------|--------|
| 不攪乱 | 試験前上側 | 15.1 | 5.85 | 1w と 2w 混在 | 14.0 |
| | 試験前下側 | 15.1 | 5.85 | 1w と 2w 混在 | |
| | 試験後上側 | 18.0 | 4.91 | 2w と 3w 混在 | 18.9 |
| | 試験後下側 | 18.4 | 4.8 | 2w と 3w 混在 | 20.7 |
| 再構成 | 試験前上側 | 15.0 | 5.91 | 1w と 2w 混在 | 13.0 |
| | 試験前下側 | 15.0 | 5.89 | 1w と 2w 混在 | |
| | 試験後上側 | 18.8 | 4.71 | 2w と 3w 混在 | 20.8 |
| | 試験後下側 | 18.8 | 4.71 | 2w と 3w 混在 | 20.8 |

図 4-26 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。不攪乱供試体（ 1.81 Mg/m^3 , $w=14.0\%$ （試験前）， $w=18.9\%$ （試験後上面）， $w=20.7\%$ （試験後吸水面側））において，膨潤圧試験前は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=5.8 \text{ deg}$ および 6.9 deg にピークが混在しており，試験後は $2\theta=4.7 \text{ deg}$ および 5.8 deg に混在している。これより，試験前は水分子 1 層水和および 2 層水和が混在しており，試験後は水分子が 2 層水和と 3 層水和が混在している。再構成供試体（ 1.85 Mg/m^3 , $w=13.0\%$ （試験前）， $w=20.8\%$ （試験後））において，試験前は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=6.9 \text{ deg}$ および 5.8 deg に混在しており，試験後は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=4.7 \text{ deg}$ および 5.8 deg に混在している。これより，試験前は水分子 1 層水和および 2 層水和が混在しており，試験後は水分子 2 層水和，3 層水和が混在している。

また，膨潤圧は不攪乱供試体，再構成供試体のいずれも試験開始直後に上昇して約 1000 分経過以降に収束する挙動であった。膨潤圧の収束値（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 1442 kPa ，再構成供試体では 4441 kPa であった。

・ C-5 (供試体高さ : 4 mm, 試験日数 3 日)

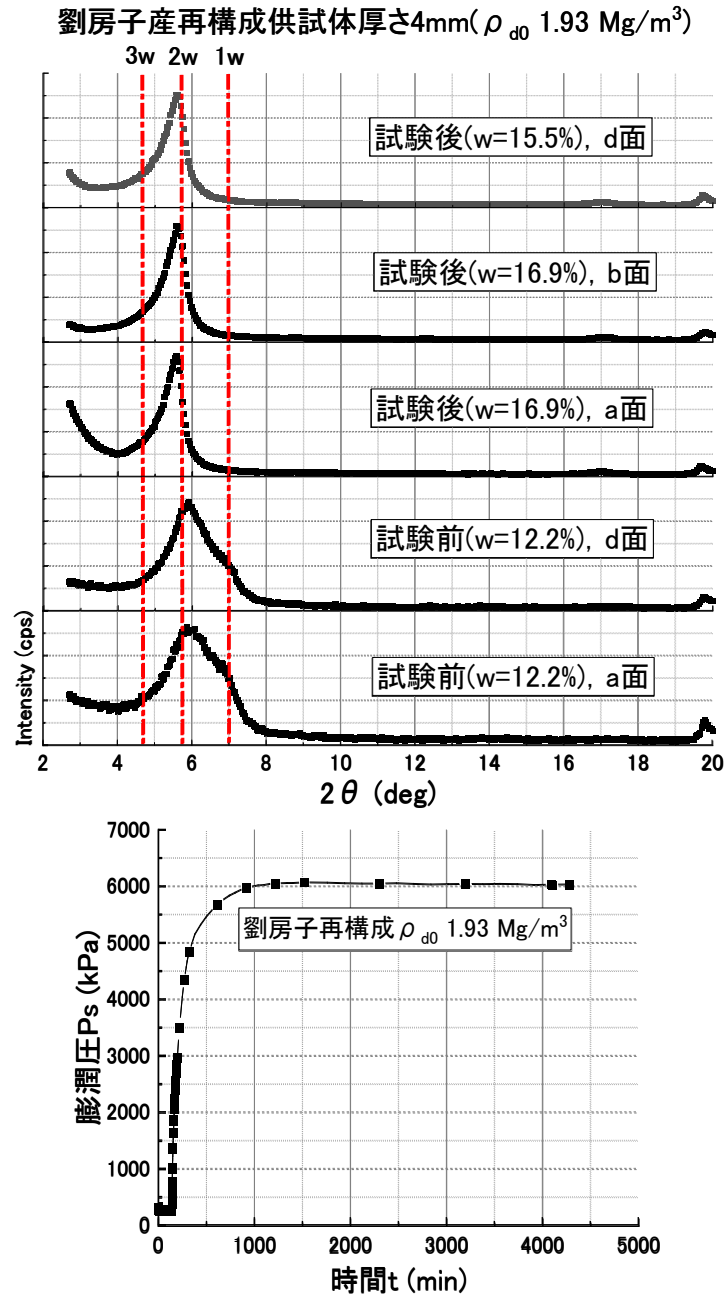


図 4-27 XRD の測定結果 (膨潤圧試験前後) および膨潤圧の経時変化曲線(C-5)

表 4-18 d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後、C-5）

| | $d(\text{\AA})$ | $2\theta(^{\circ})$ | 層間の水分子の存在数 L | 含水比(%) |
|-------|-----------------|---------------------|--------------|--------|
| 試験前上側 | 15.3 | 5.79 | 1w と 2w | 12.2 |
| 試験前下側 | 15.1 | 5.86 | 1w と 2w | |
| 試験後上側 | 15.9 | 5.56 | 2w | 15.5 |
| 試験後下側 | 16.0 | 5.53 | 2w | 16.9 |

図 4-27 に XRD 測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化を示す。再構成供試体（ 1.93 Mg/m^3 , $w=12.2\%$ （試験前）, $w=15.5\%$ （試験後上側）, $w=16.9\%$ （試験後吸水面側））において、試験前は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=6.9\text{deg}$ および 5.8 deg に混在しており、試験後は吸水面側・上面側いずれも $2\theta=5.8 \text{ deg}$ に存在している。これより、試験前は水分子 1 層水和および 2 層水和が混在しており、試験後は水分子 2 層水和である。

また、膨潤圧について、約 1000 分経過以降は収束する挙動であった。膨潤圧の収束値（最大膨潤圧）は 6070 kPa であった。

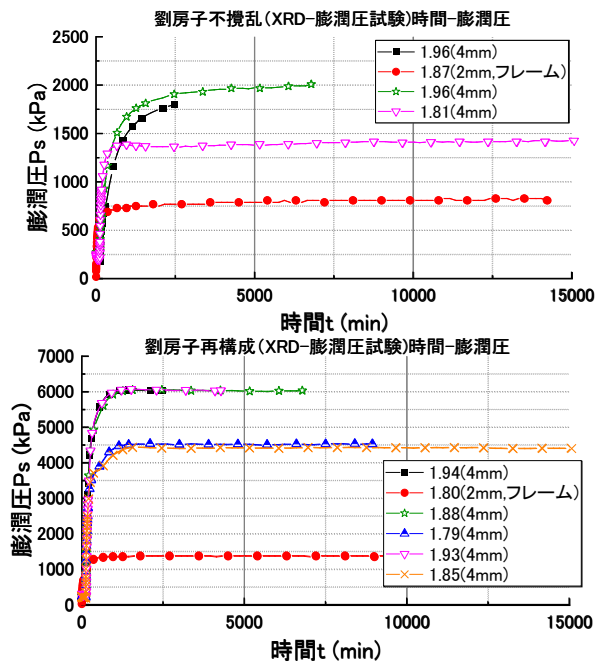


図 4-28 劉房子産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線

図 4-28 に、ケース C-1 から C-5 における劉房子産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線を示す。これより、供試体乾燥密度が高くなるにつれて膨潤圧の収束に要する時間が長くなる挙動が見られた。また、劉房子産原鉱石でも他の原鉱石と同様、フレーム型試験装置で計

測された膨潤圧の値は小型膨潤圧試験装置に比べて小さい傾向が見られた。

膨潤圧試験前後の供試体含水比と、最大ピークの 2θ の値から算出したモンモリロナイト底面間隔 d_{001} の関係を図 4-29 に示す。

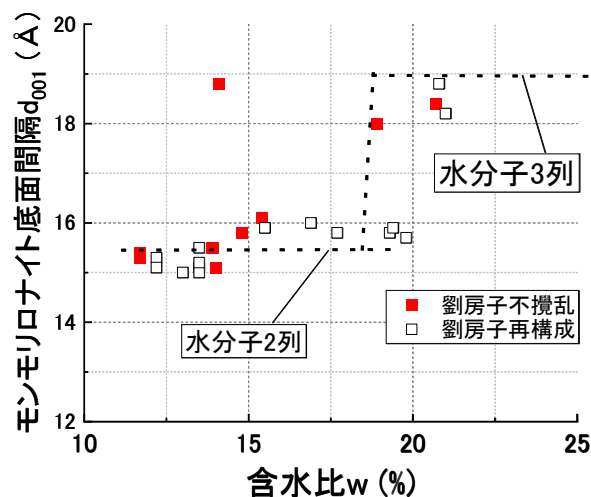


図 4-29 劉房子産原鉍石の供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔関係

劉房子産原鉍石では、約 18% 付近を境として、低い場合は水分子 2 層水和、高い場合は水分子 3 層水和であった。以上から、供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔の関係においては、不攪乱供試体と再構成供試体とを比較して、大きな差異は見られなかった。

4.4 膨潤圧およびモンモリロナイト底面間隔の統一的评价

図 4-30 に、月布産、Ten Sleep 産、劉房子産原鉱石の結果を総記した、供試体の初期乾燥密度—最大膨潤圧関係を示す。

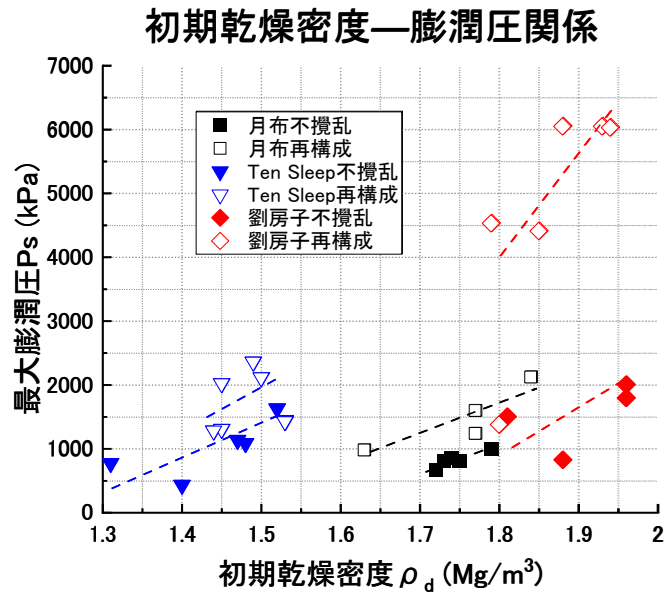


図 4-30 供試体の初期乾燥密度—最大膨潤圧関係

これより、いずれの原鉱石においても、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体に比べて低く留まっていた。両者の膨潤圧の差異は月布産<Ten Sleep 産<劉房子産の順に大きくなっており、これは各原鉱石の地質年代の古さの順に対応しており、膠結作用の影響を表していると推察される。

図 4-31 に、月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の結果を総記した、供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔関係を示す。

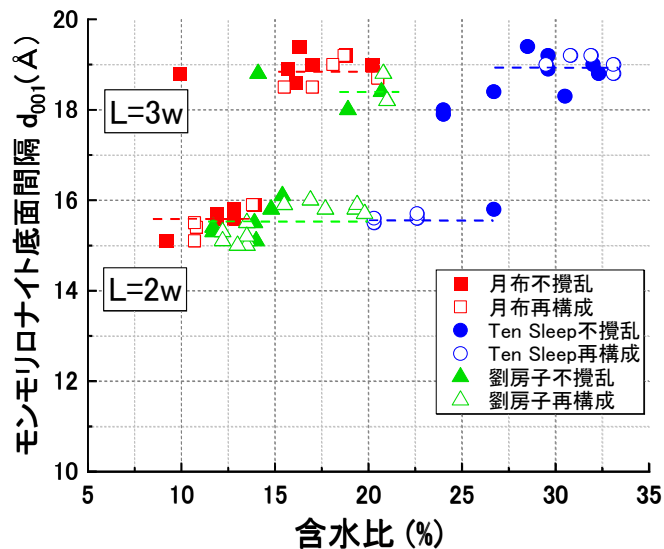


図 4-31 供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔関係

これより、含水比 15～20%の範囲において、月布産原鉱石では水分子 3 層水和が支配的であるのに対し、劉房子産原鉱石では水分子 2 層水和が支配的である。これは、劉房子産原鉱石の方が乾燥密度において 0.1～0.2 Mg/m³ 程度高いことや、モンモリロナイト含有率が 6%程度高いことにより、同じ含水比でも個々のモンモリロナイト層間に含まれる水分子数が少ないことが推察される。

また、図 4-32 に劉房子産原鉱石の含水比 20.7%、15.4%、13.9%における、不攪乱供試体・再構成供試体のピーク形状を比較して示す。なお、いずれのものも不攪乱供試体の最大ピーク値で正規化した強度で示している。これらから、いずれの含水比においてもピーク形状に大きな差異は見られなかった。

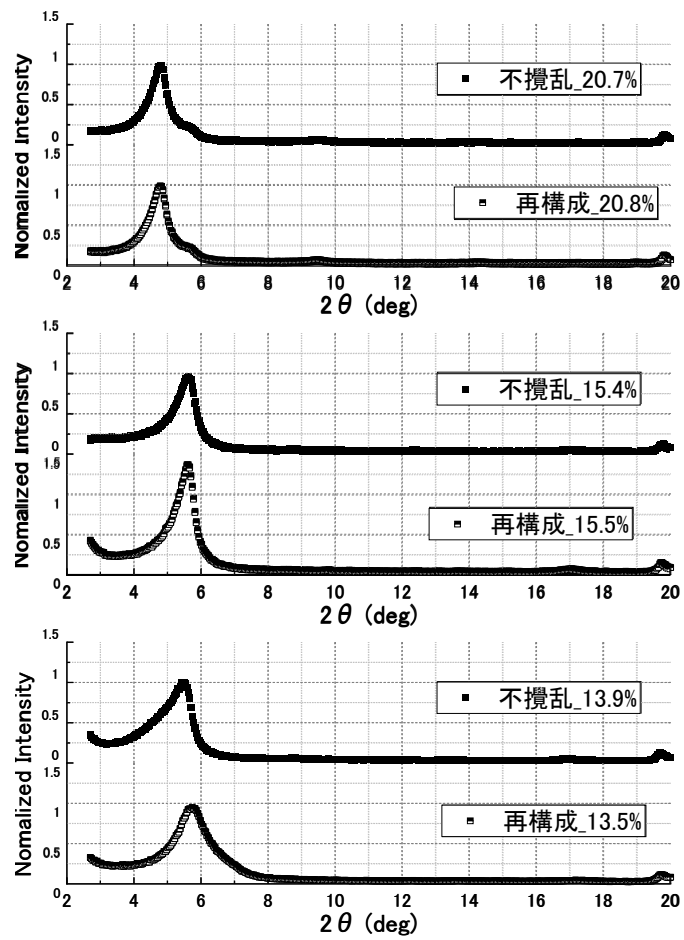


図 4-32 劉房子産原鉍石の含水比 20.7%, 15.4%, 13.9%における不攪乱供試体・再構成供試体のピーク形状比較

4.5 本章のまとめ

本章では、XRD・膨潤圧連携試験を実施し、不攪乱供試体と再構成供試体における膨潤圧の差異についてモンモリロナイト底面間隔の観点から考察を行った。本章で得られた主な成果を以下にまとめる。

- 1) XRD・膨潤圧連携試験を行うことにより、膨潤圧試験前後の含水比変化とモンモリロナイト底面間隔の推移をリンクして捉えることができ、モンモリロナイト結晶層間の水和状態の変化により膨潤圧が増加していることを確認できた。
- 2) 含水比－モンモリロナイト底面間隔の関係において、いずれの原鉱石においても不攪乱供試体と再構成供試体の間に差異は見受けられなかった。すなわち、底面間隔が大きく変わるほどの水和状態の差は生じてはいないものの、膨潤圧に大幅な差異が生じることが推察された。
- 3) 月布産原鉱石において、含水比 15.7%・17.0%・18.8%の不攪乱供試体と再構成供試体のピーク形状を比較したところ、いずれのケースにおいても再構成供試体は水分子 3 層水和状態であったのに対し、不攪乱供試体は水分子 3 層・2 層水和の層間が混在していた。すなわち、同一の含水比ではあるものの、不攪乱供試体の方がモンモリロナイト結晶層間中に存在している水分子数が少なく、モンモリロナイト結晶層間の膨潤が低下していると考えられ、これにより膨潤圧が低下したと推察された。

参考文献

- 1) 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦: ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討—日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究成果報告—(共同研究), JAEA-Research 2010-025, pp.1-186, 2010.
- 2) 王海龍, 白河部匠, 小峯秀雄: 締固めたベントナイトの膨潤圧計測装置の開発, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-5-5-01, 2020.
- 3) Morodome, S., Kawamura, K. : Swelling behavior of Na- and Ca montmorillonite up to 150°C by IN SITU X-ray diffraction experiments, Clays and Clay Minerals, Vol. 57, No. 2, pp. 150-160, 2009.
- 4) Wang, H., Shirakawabe, T., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., Ichikawa, Y., Chen, Q. : Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure, Canadian Geotechnical Journal, 57, 921-932, 2019.
- 5) 田中幸久: ベントナイトの吸水膨潤モデルによる膨潤圧試験における試験条件の影響評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No. 4, pp. 513-531, 2011.

第5章 ベントナイト原鉱石の土粒子骨格の評価

5.1 本検討の目的

本論文では、膠結作用によるベントナイト系材料の膨潤特性・透水特性への影響について評価しているが、そのためには図 4-2 で示した膠結物質の解明や、土粒子構造・骨格の固着状況等のメカニズムを明らかにすることが肝要である。そこで本章では、岩片の SEM 観察および薄片試料の偏光顕微鏡・SEM 観察を実施し、ベントナイト原鉱石の土粒子骨格を評価した。

5.2 岩片の SEM 観察

SEM (Scanning Electron Microscope, 走査型電子顕微鏡) はレンズで絞った電子線を試料の表面に走査させ、試料より放出される二次電子, 反射電子, X 線, カソードルミネッセンス等を検出して試料表面の顕微鏡像を得るものである。今回使用した SEM-EDX 分析装置は (株) 日立ハイテク製 S-4500 であり, 図 5-1 に示す。S4500 の対象倍率は 50 倍~50000 倍で, 分解能は 1.5 nm である。

本検討では, SEM により不攪乱供試体および再構成供試体における土粒子骨格の微視的構造を観察した。観察に供した試料は, 各原鉱石の不攪乱供試体および再構成供試体 (いずれも直径 28 mm×10 mm) を作製した後, 供試体を割り内部の新鮮な面を露出させ, 5 mm×5 mm 程度まで成形したものである。観察対象面としたのは, 不攪乱供試体については堆積方向に対して水平方向, 再構成供試体については供試体底面に対して水平方向の面である。試料は SEM 観察用の円形の金属製試料台 (直径 26 mm) に両面テープをはり, その上に粘着させて設置した。ステージ上に設置した試料の様子を図 5-2 に示す。なお, 上段が不攪乱供試体, 下段が再構成供試体から作製した試料であり, 左から 2 番目が劉房子産, 右から 2 番目が月布産, 一番右が Ten Sleep 産原鉱石の試料である。その後, イオンスパッタコーティング用の装置内に設置し, 真空引きを行ったあと, 試料表面の導電性を高めて精密な像を得るため Pt をコーティングさせた。その後, SEM 装置内に試料を設置し, 18 時間ほど真空引きを行った。その後, 電子線の照射を開始し, 観察部分が明瞭に見えるよう倍率やピント, コントラストを調整し, 観察や撮影を行った。



図 5-1 S-4500

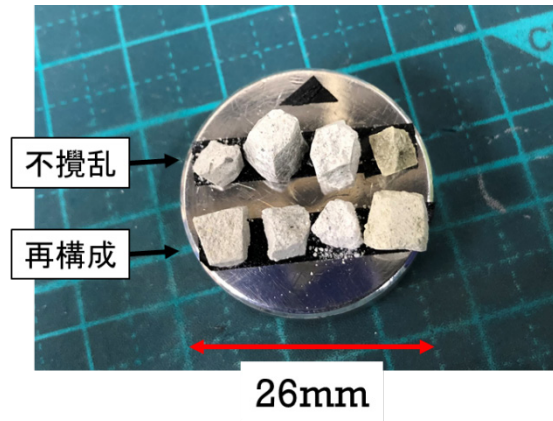
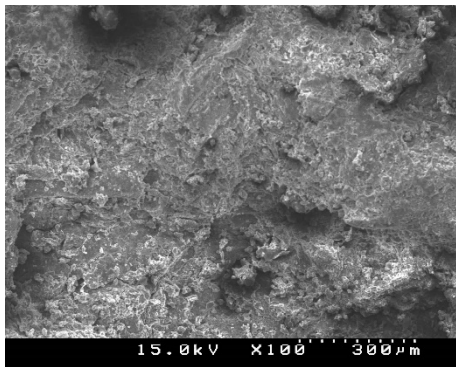
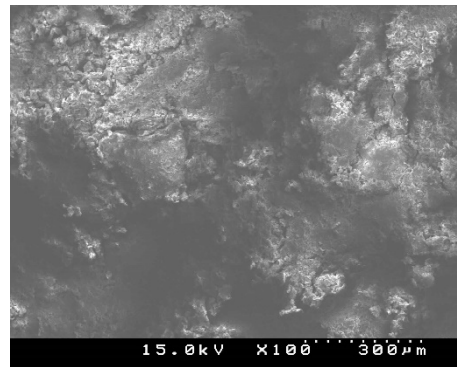


図 5-2 SEM 観察に供した試料

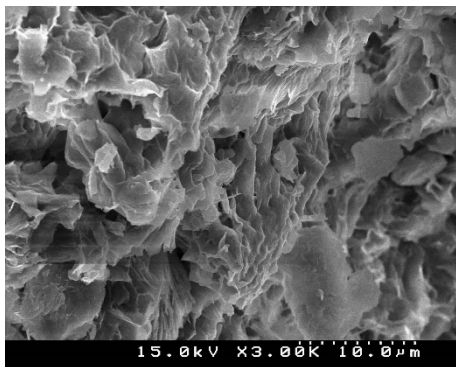
以下に、SEM 観察により得られた結果を示す。



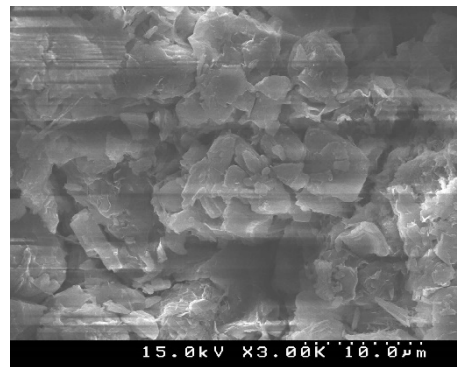
月布産不攪乱 (×100 倍)



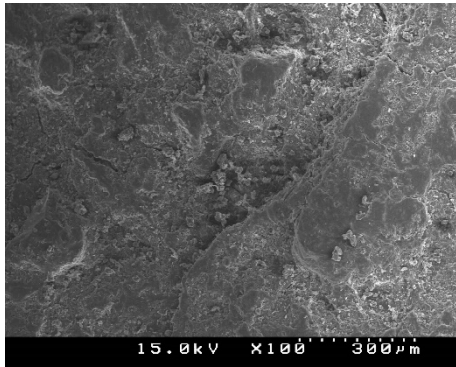
月布産再構成 (×100 倍)



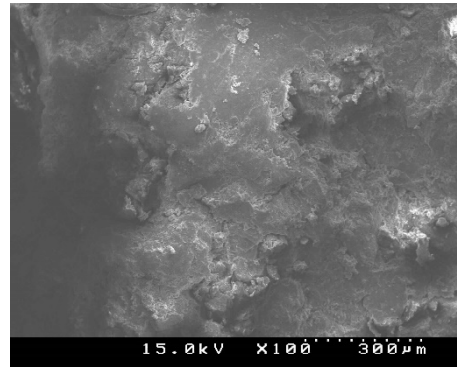
月布産不攪乱 (×3000 倍)



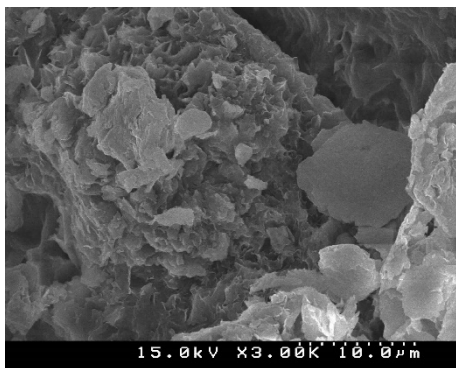
月布産再構成 (×3000 倍)



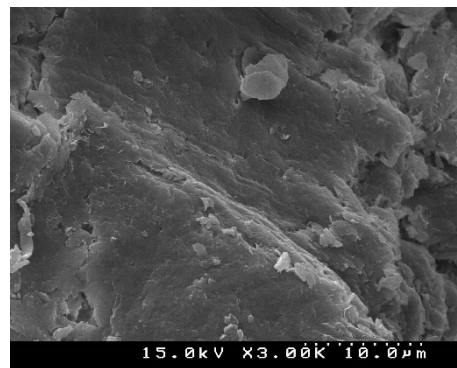
劉房子產不攪乱 (×100 倍)



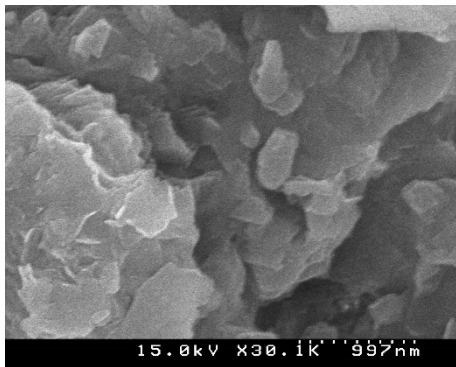
劉房子產再構成 (×100 倍)



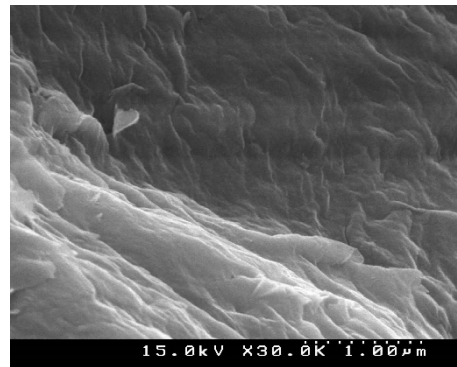
劉房子產不攪乱 (×3000 倍)



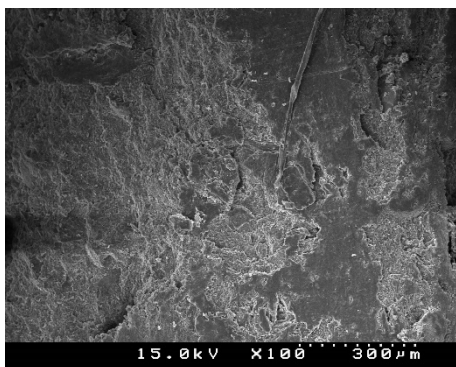
劉房子產再構成 (×3000 倍)



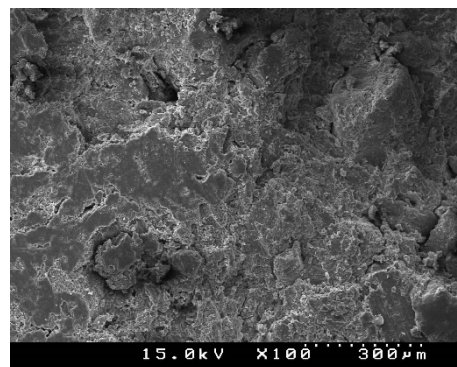
劉房子產不攪乱 (×30000 倍)



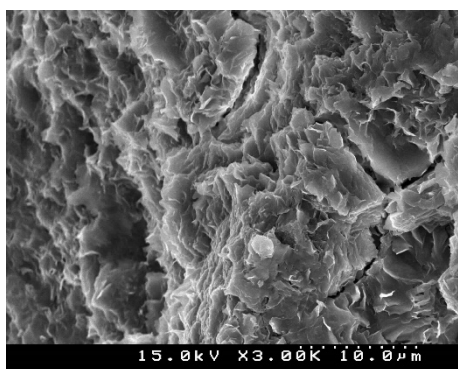
劉房子產再構成 (×30000 倍)



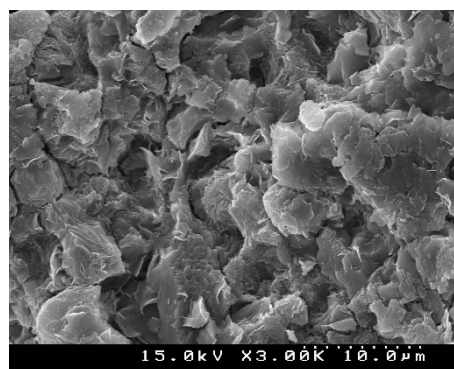
Ten Sleep 產不攪乱 (×100 倍)



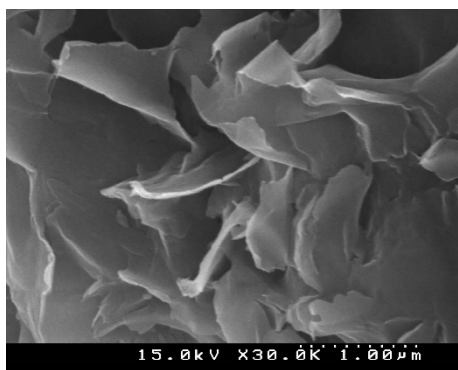
Ten Sleep 產再構成 (×100 倍)



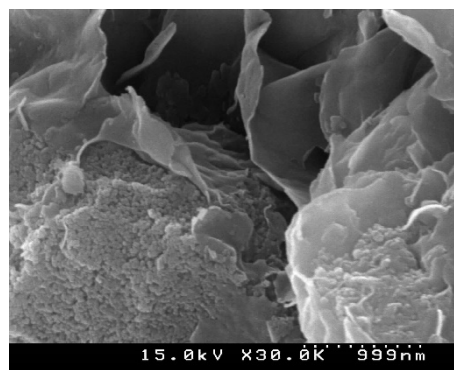
Ten Sleep 産不攪乱 (×3000倍)



Ten Sleep 産再構成 (×3000倍)



Ten Sleep 産不攪乱 (×30000倍)



Ten Sleep 産再構成 (×30000倍)

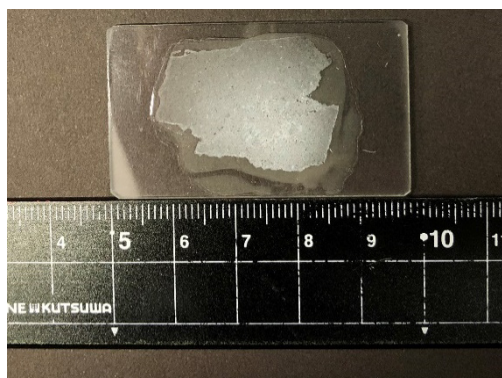
図 5-3 岩片の SEM 観察結果

以上の観察結果から、シートが層状もしくはハチの巣状に重なった構造を確認することができた。この構造は、既往の SEM によるモンモリロナイトの観察結果と類似しており、メチレンブルー吸着量試験及び X 線回折分析の結果と組み合わせて考えると、原鉱石に含まれる主要鉱物であるモンモリロナイトと考えられる。月布産原鉱石において、不攪乱供試体と再構成供試体の観察結果を比べると、特に 3000 倍の画像において、同程度の乾燥密度であるにもかかわらず、再構成供試体の方が大きな空隙を有していることが分かる。また、再構成供試体の方が試料のすりつぶしを経ているため、粒子の表面が滑らかになっていると同時に、モンモリロナイトの積層状況が平行にそろっている傾向が見受けられる。このことから、不攪乱供試体の土粒子の構造は再構成供試体に比べて複雑であり、モンモリロナイトと水分子の接触が制限されることが推察される。劉房子産原鉱石において、間隙の大きさなど土粒子構造に関する差異に関する違いは見られないものの、月布産と同様、再構成供試体において粒子表面が平滑になっている様子が分かる。Ten Sleep 産原鉱石においても、3000 倍の画像において月布産原鉱石と同様、再構成供試体において不攪乱供試体に比べて粒子表面が滑らかになっていると同時に、モンモリロナイトの積層状況がそろっている傾向が見受けられる。以上を踏まえると、いずれの原鉱石においても、不攪乱供試体においては再構成供試体に比べて粒子の表面および土粒子の構造が複雑であると同時に、間隙が小さい

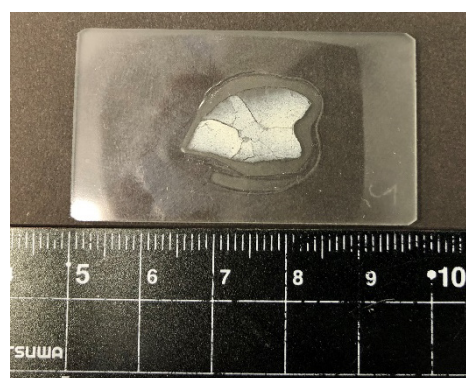
という傾向が見られた。このような点が、不攪乱供試体と再構成供試体の膨潤特性に影響を及ぼす可能性が考えられる。

5.3 薄片の偏光顕微鏡および SEM 観察

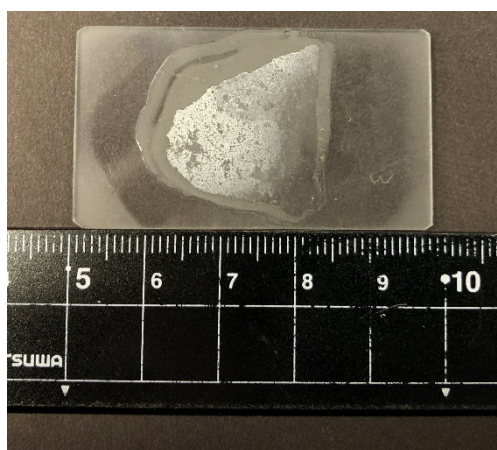
岩石に含まれる鉱物の同定や組織を評価する場合、薄片試料を作製して偏光顕微鏡を用いて観察する手法が用いられる。薄片試料とは、観察対象とする岩石をガラス板に貼り付けたのちに厚さ 0.03 mm 程度まで極めて薄く削り、磨いたものである²⁾。本研究では、原鉱石におけるセメンテーションのメカニズム解明のため、岩石の結晶組織評価で一般に用いられる薄片試料を作製し、その観察を行った。本項では薄片試料の概要および観察方法について述べる。薄片試料の作製は、早稲田大学教育・総合科学学術院薄片室のテキスト³⁾に基づき行った。作製された薄片試料の外観を図 5-4 に示す。



月布産



Ten Sleep 産



劉房子産

図 5-4 薄片試料の外観

月布産原鉱石から作製した薄片試料の偏光顕微鏡観察結果を図 5-5 に示す。

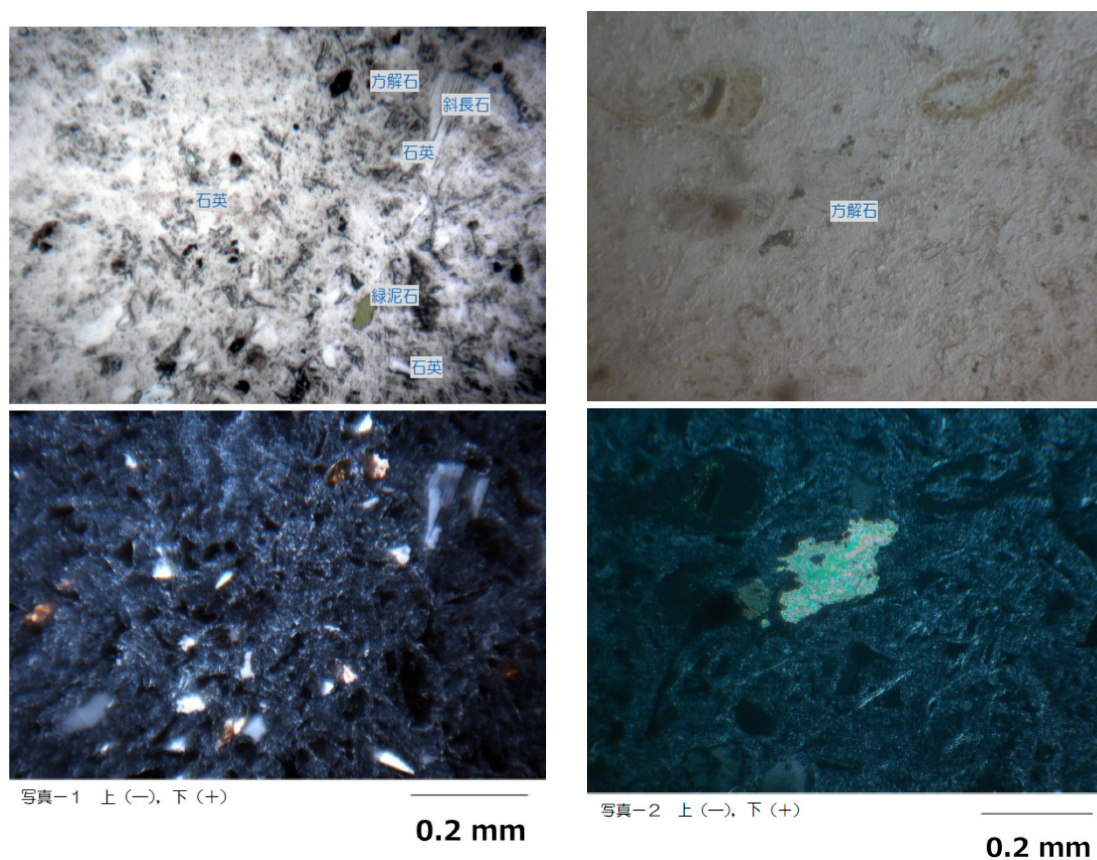


図 5-5 偏光顕微鏡観察結果（月布産）

これより、構成鉱物として不定形な石英や累帯構造を示す斜長石、方解石、緑泥石および微粒状の硫化鉱物（黄鉄鉱や白鉄鉱など）が同定され、基質はモンモリロナイトによって充填されていることが分かった。

図 5-6 に Ten Sleep 産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果を示す。

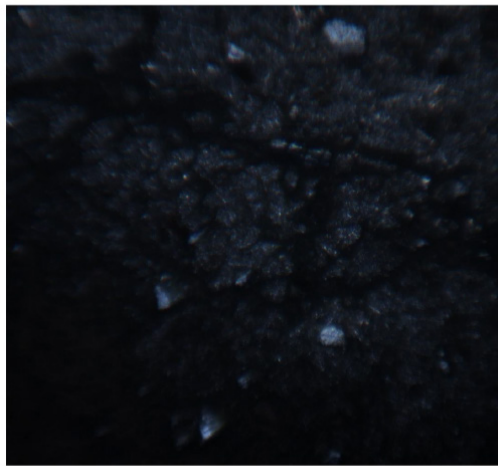
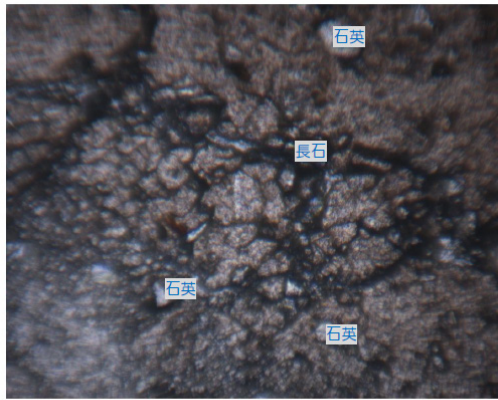


写真-3 上 (-), 下 (+)

0.5 mm

その1

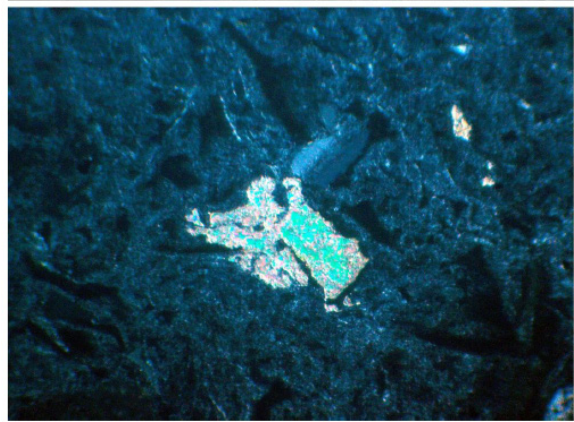
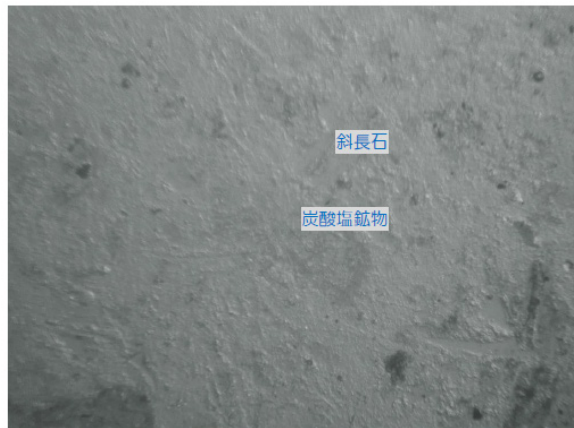


写真-5 上 (-), 下 (+)

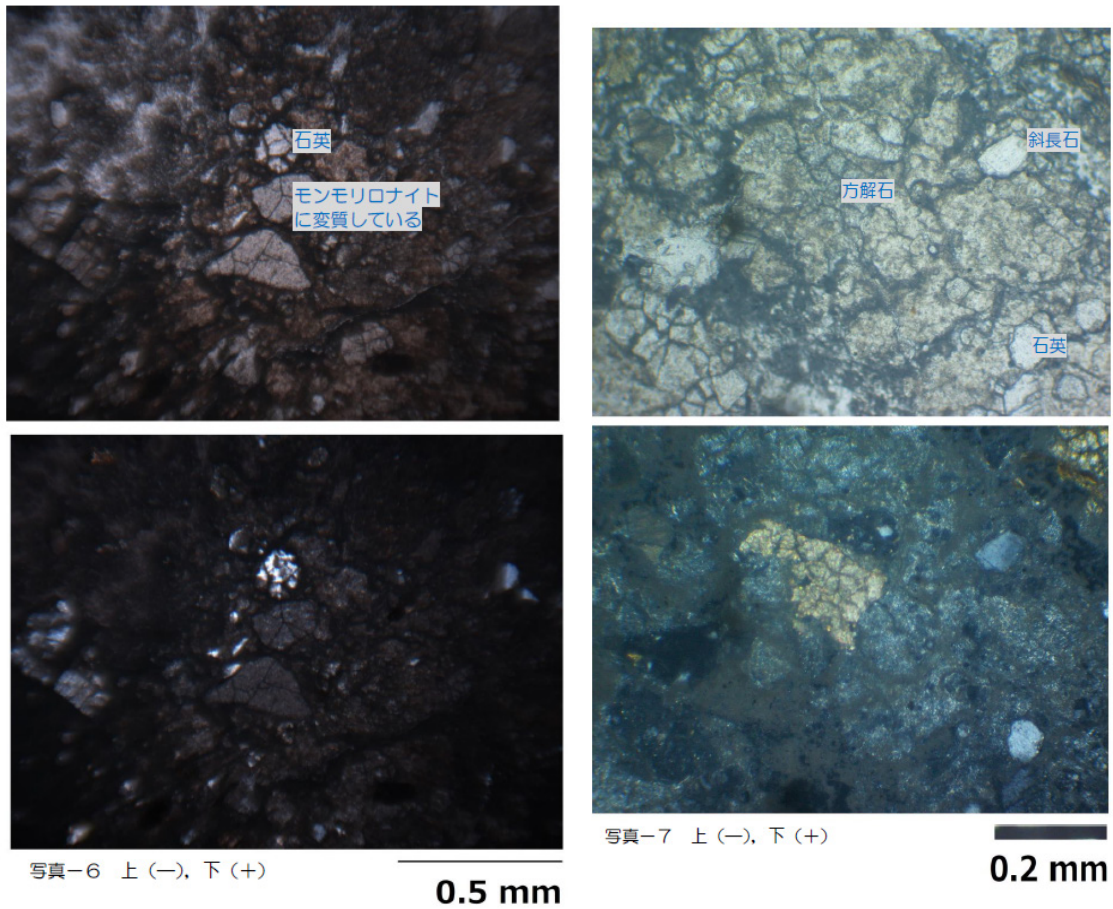
0.2 mm

その2

図 5-6 偏光顕微鏡観察結果 (Ten Sleep 産)

これより、構成鉱物として不定形な石英や、累帯構造を示す斜長石、褐鉄鉱、炭酸塩鉱物（方解石、ドロマイト）やクリストバライト、微粒状の硫化鉱物（黄鉄鉱や白鉄鉱）が同定された。基質はモンモリロナイトで充填されていることが分かった。

図 5-7 に劉房子産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果を示す。



その1

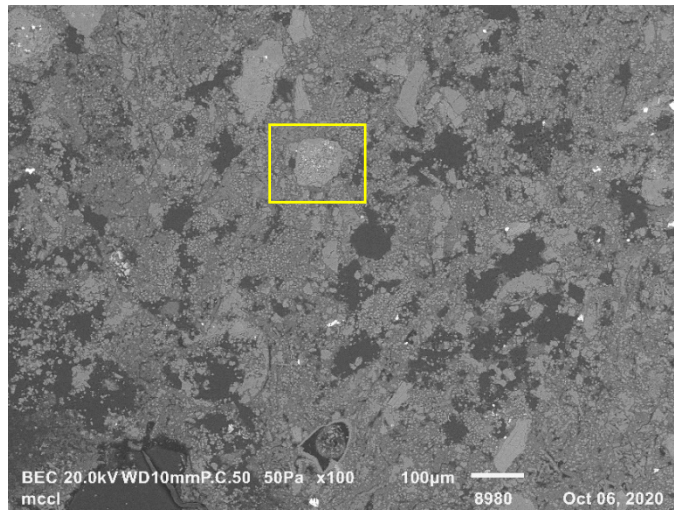
その2

図 5-7 偏光顕微鏡観察結果（劉房子産）

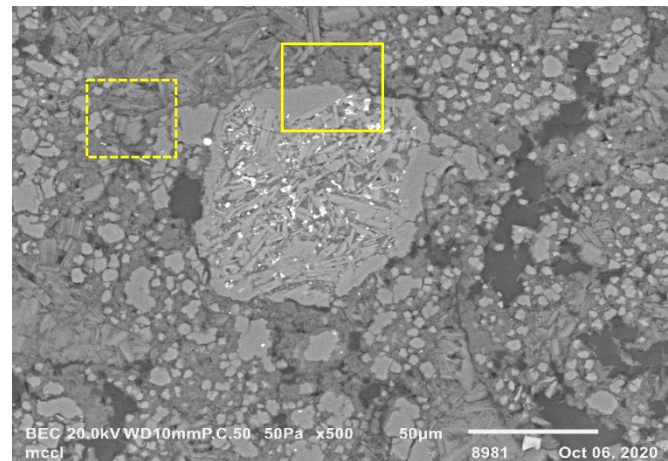
これより、構成鉱物として不定形な石英や累帯構造を示す斜長石、方解石、微粒状の硫化鉱物（黄鉄鉱や白鉄鉱）が同定された。基質はモンモリロナイトにより充填されていることが分かった。

また、月布産の薄片試料を用いて SEM 観察を行った。観察に用いたのは、早稲田大学物性計測センターラボが保有する、JSM-IT100（日本電子株式会社製）である。今回、鉱物の同定を行うため、EDS 分析も同時に実施し、元素の定量評価も行った。

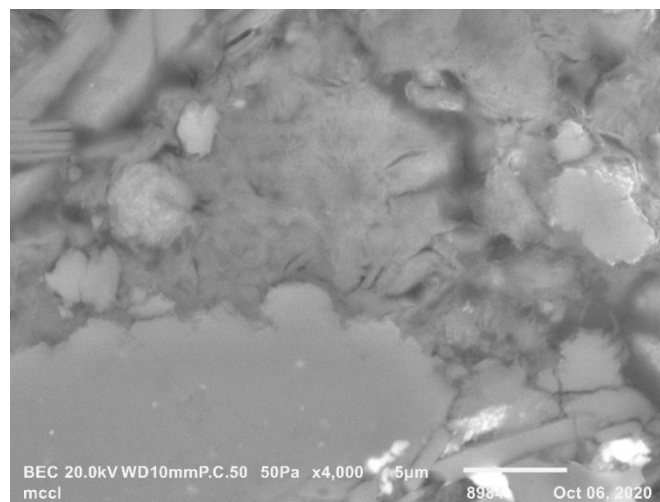
図 5-8 に SEM による観察結果（倍率：100～4000 倍）を示す。



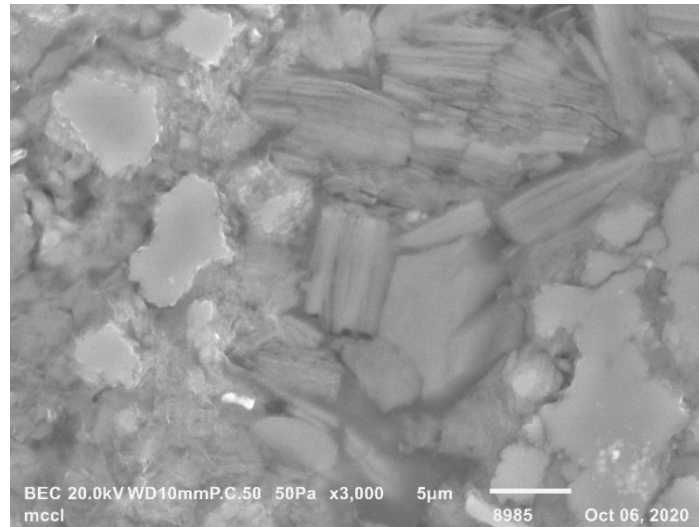
倍率：100倍（□は下の倍率500倍の領域を示す）



倍率：500倍



倍率：4000倍（倍率500倍の図中実線の□に該当）



倍率：3000倍（倍率500倍の図中破線□に該当）

図 5-8 SEMによる観察結果

これより、鉍物粒子の構造として大きく分けて2種類が存在していることがわかる。一つは、倍率4000倍の図中左下部に存在するような、断面が平滑で輪郭の明瞭な構造を有する粒子である。二つ目として、倍率4000倍の図中央部や倍率3000倍の図中右上部等に存在するような、断面や輪郭の形状が不明瞭で、所々に長方形の細かい粒子が重なるような構造を有する粒子である。また、倍率4000倍の図右下部等に存在するように、白く光るような粒子も点在している。

次に、倍率4000倍の図の範囲において、EDS分析を実施した結果を示す。

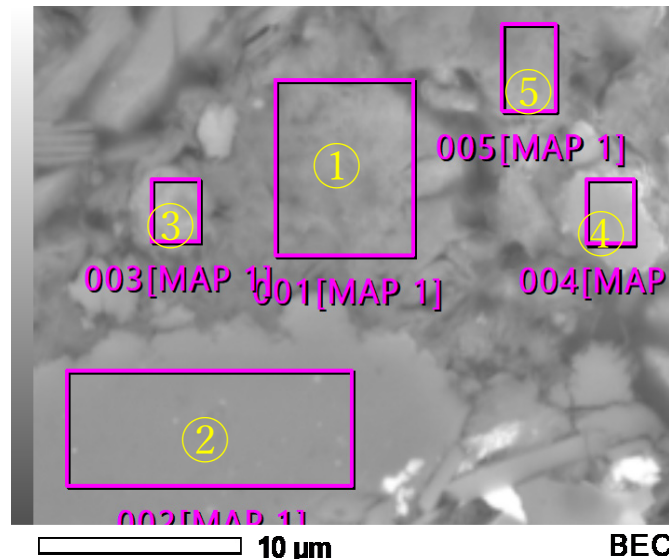


図 5-9 倍率4000倍の図における元素定量分析箇所

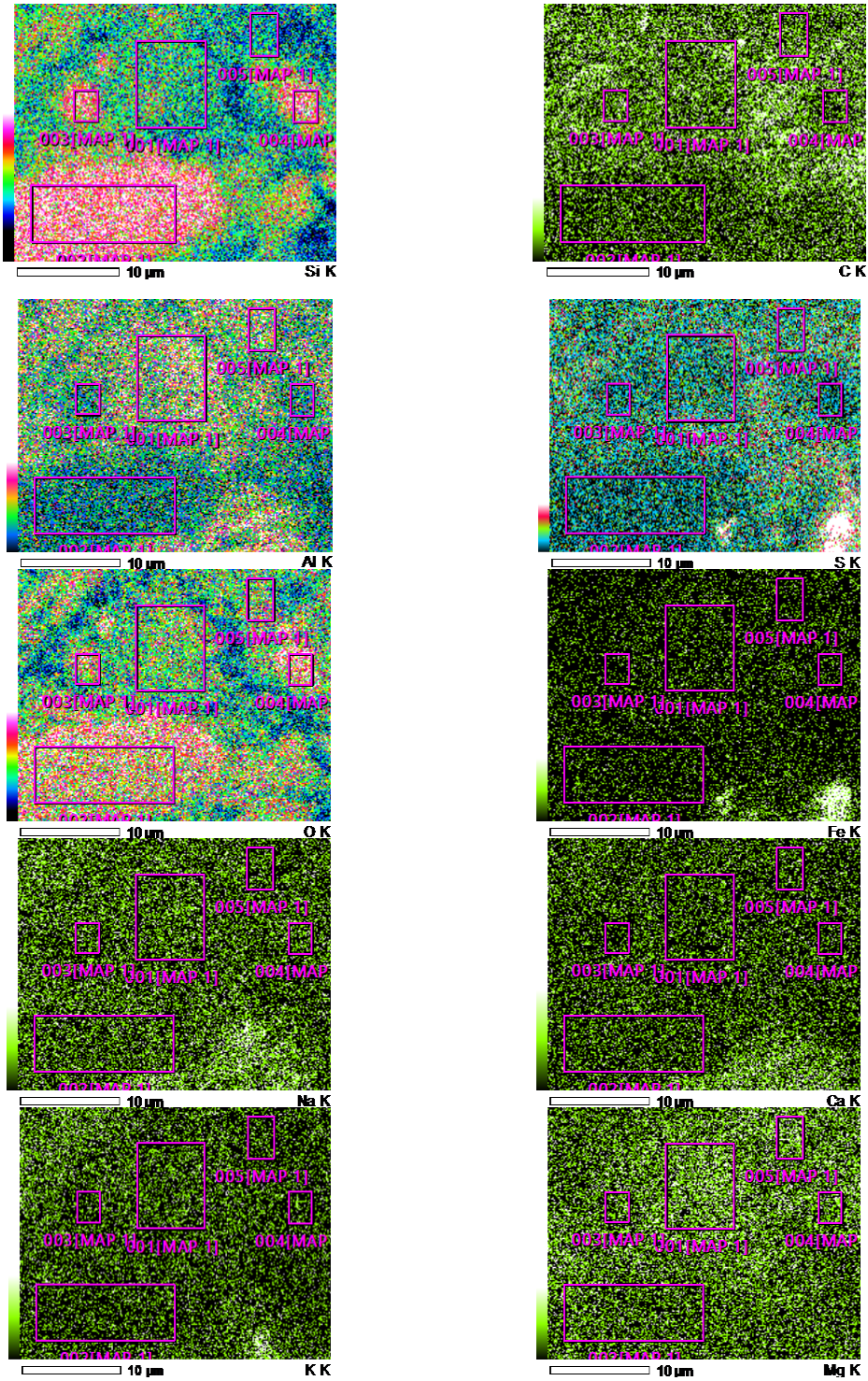


図 5-10 元素分布のマッピング結果 (倍率 4000 倍の図)

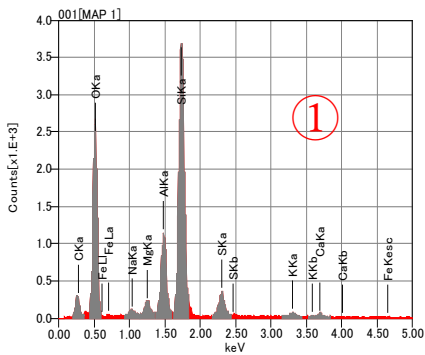


図 5-9 中①の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| C | | |
| O* | 51.90 | 64.98 |
| Na* | 0.96 | 0.85 |
| Mg* | 1.71 | 1.49 |
| Al* | 9.14 | 6.86 |
| Si* | 34.21 | 24.69 |
| S | | |
| K* | 0.80 | 0.42 |
| Ca* | 0.79 | 0.37 |
| Fe* | 1.15 | 0.42 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-9 中①の元素定量結果 (左：質量比, 右：数量比)

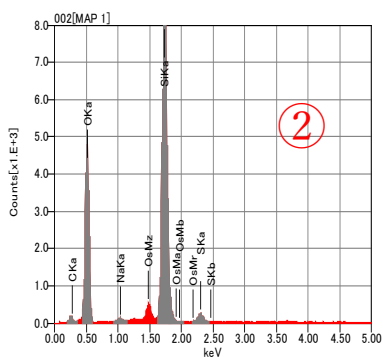


図 5-9 中②の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| C | | |
| O* | 54.95 | 68.15 |
| Na* | 0.56 | 0.49 |
| Si* | 42.16 | 30.11 |
| S* | 1.81 | 1.19 |
| Os* | 1.12 | 0.12 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-9 中②の元素定量結果 (左：質量比, 右：数量比)

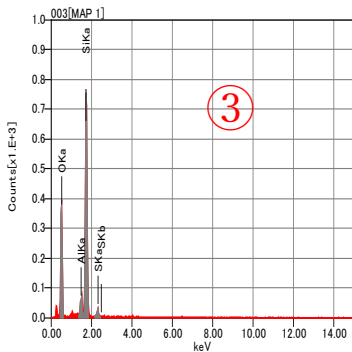


図 5-9 中③の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| O* | 52.76 | 66.30 |
| Al* | 9.12 | 2.99 |
| Si* | 41.80 | 29.92 |
| S* | 2.92 | 1.46 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-9 中③の元素定量結果 (左：質量比, 右：数量比)

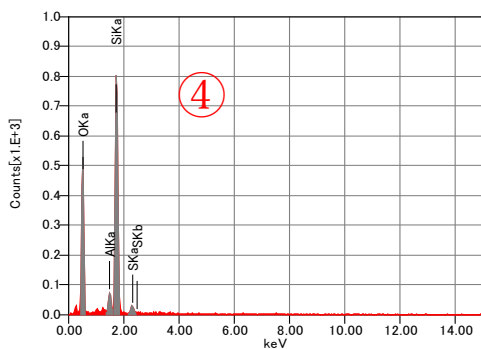


図 5-9 中④の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| O* | 55.78 | 68.99 |
| Al* | 3.04 | 2.29 |
| Si* | 39.42 | 27.75 |
| S* | 1.76 | 1.09 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-9 中④の元素定量結果 (左：質量比, 右：数量比)

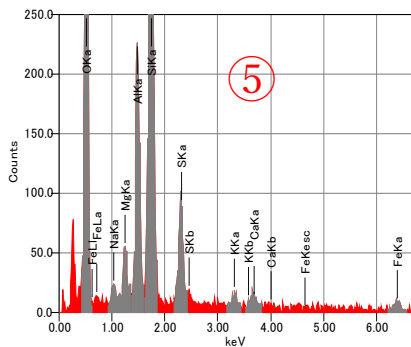


図 5-9 中⑤の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| O* | 51.36 | 65.42 |
| Na* | 1.05 | 0.93 |
| Mg* | 1.79 | 1.50 |
| Al* | 8.80 | 6.65 |
| Si* | 28.52 | 20.70 |
| S* | 5.56 | 3.53 |
| K* | 0.62 | 0.32 |
| Ca* | 0.80 | 0.41 |
| Fe* | 1.49 | 0.54 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-9 中⑤の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

図 5-11 倍率 4000 倍の図における元素定量分析結果

表 5-1 原鉱石の代表的な構成鉱物の化学式⁴⁾

| 鉱物名 | 化学式 |
|----------|---|
| モンモリロナイト | $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |
| 石英 | SiO_2 |
| クリストバライト | |
| 斜長石 | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8, \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ |
| カルサイト | CaCO_3 |
| 緑泥石 | $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ni})_{6-x-y}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Cr}, \text{Ti})_y\text{O}_x(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ |
| ドロマイト | $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ |
| 黄鉄鉱 | FeS_2 |

図 5-9 に倍率 4000 倍の図における元素定量分析箇所を、図 5-10 に元素分布のマッピング結果（倍率 4000 倍の図）を、図 5-11 に倍率 4000 倍の図における元素定量分析結果をそれぞれ示す。また、表 5-1 に原鉱石の代表的な構成鉱物の化学式を示す。

まず、図 5-9 の①について、図 5-11 の元素定量結果と表 5-1 の構成鉱物化学式を照らし合わせると、Si と O の存在個数の比がおおよそ 2:5~1:3 程度であることから、化学式と合わせてモンモリロナイトと同定した。図 5-9 の⑤についても、同様の理由からモンモリロナイトと同定した。

図 5-9 の②について、Si と O でほぼすべて構成されており、その比がおおよそ 1:2 程度であることから石英と同定した。図 5-9 の③および④についても、②と同様の理由から石英と同定した。

また、図 5-12 に以上の結果を踏まえた鉱物の分布を記載したものを示す。①~⑤に加えて、図中右下部の Na・Ca の存在が比較的多い部分が斜長石、Fe・S の存在が比較的多い部分が黄鉄鉱と同定された。

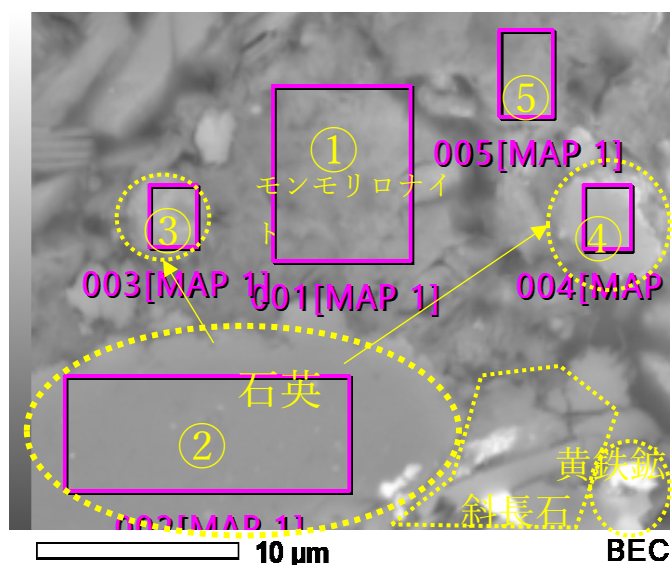


図 5-12 倍率 4000 倍の図における鉱物分布

次に、同様に倍率 3000 倍の図の範囲において、EDS 分析を実施した結果を示す。

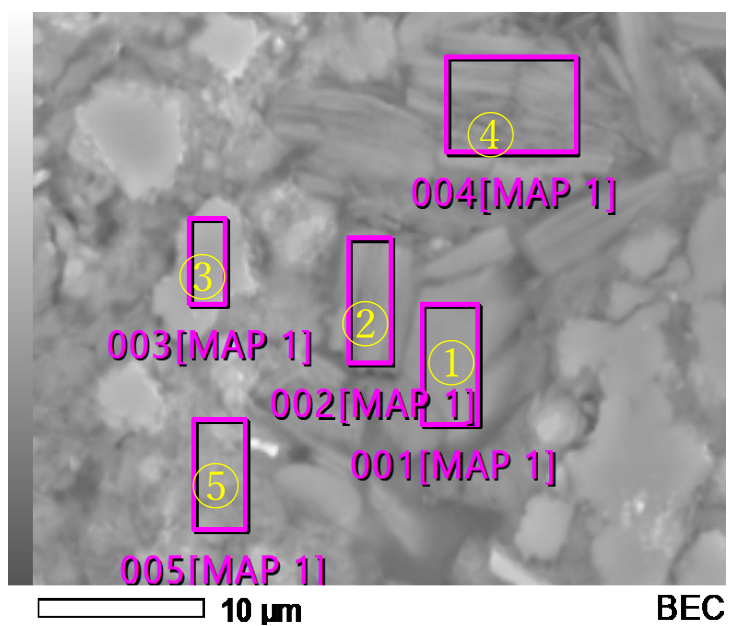


図 5-13 倍率 3000 倍の図における元素定量分析箇所

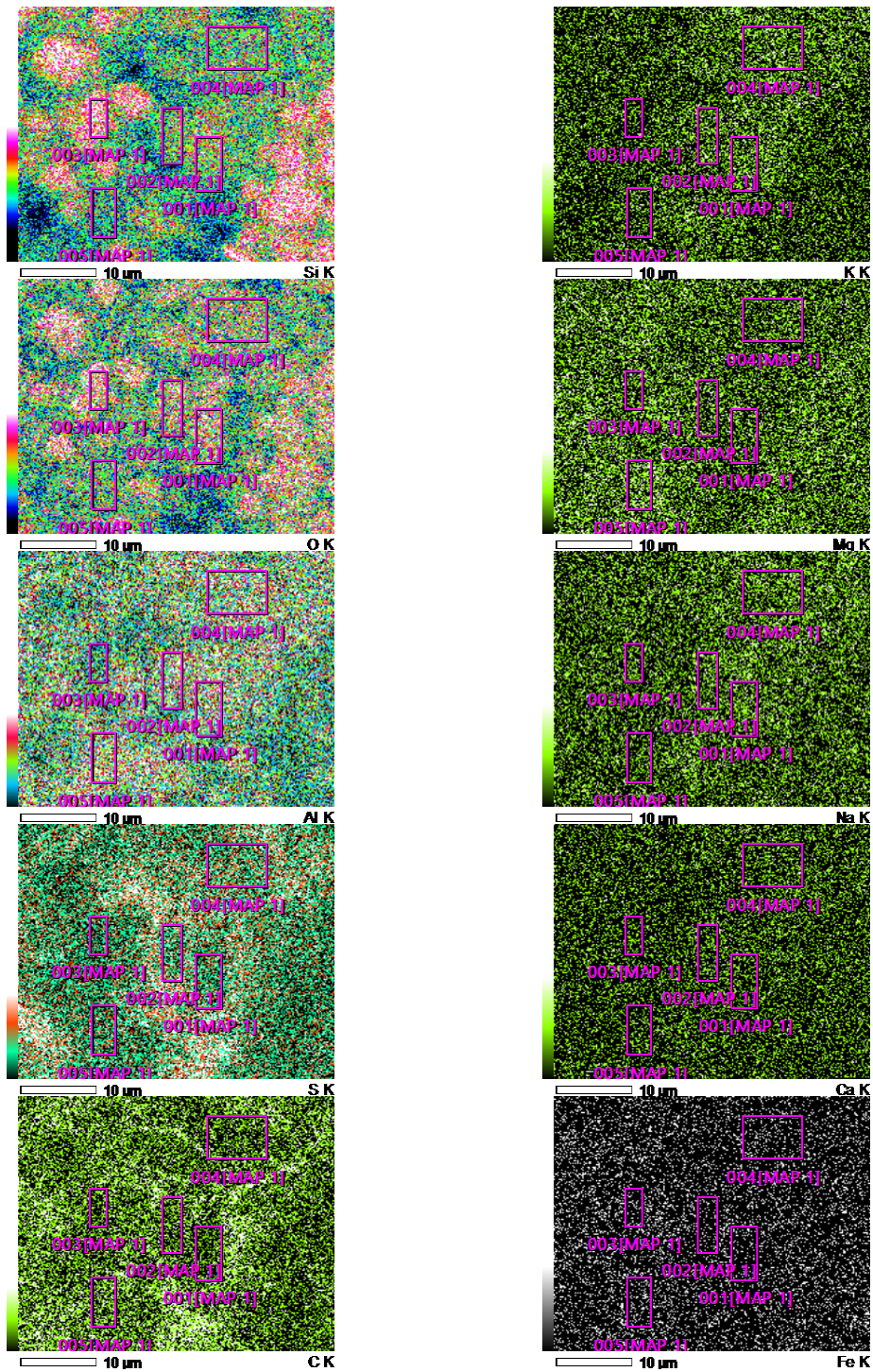


図 5-14 元素分布のマッピング結果 (倍率 3000 倍の図)

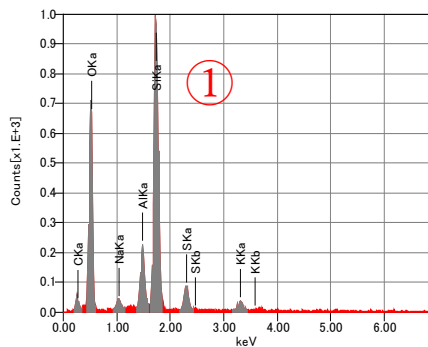


図 5-13 中①の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| C* | 11.99 | 18.21 |
| O* | 50.55 | 57.64 |
| Na* | 1.26 | 1.00 |
| Al* | 5.43 | 3.67 |
| Si* | 26.18 | 17.01 |
| S* | 3.24 | 1.84 |
| K* | 1.36 | 0.64 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-13 中①の元素定量結果 (左 : 質量比, 右 : 数量比)

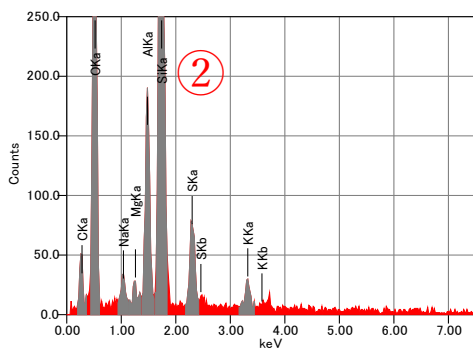


図 5-13 中②の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| C* | 16.20 | 23.89 |
| O* | 49.15 | 54.41 |
| Na* | 0.96 | 0.74 |
| Mg* | 0.61 | 0.45 |
| Al* | 5.27 | 3.46 |
| Si* | 23.11 | 14.57 |
| S* | 3.51 | 1.94 |
| K* | 1.18 | 0.53 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-13 中②の元素定量結果 (左 : 質量比, 右 : 数量比)

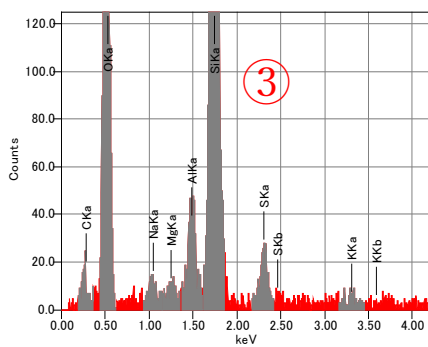


図 5-13 中③の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| C | | |
| O* | 53.66 | 67.06 |
| Na* | 0.89 | 0.77 |
| Mg* | 0.94 | 0.28 |
| Al* | 2.06 | 1.53 |
| Si* | 40.16 | 28.59 |
| S* | 2.58 | 1.61 |
| K* | 0.31 | 0.16 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-13 中③の元素定量結果 (左 : 質量比, 右 : 数量比)

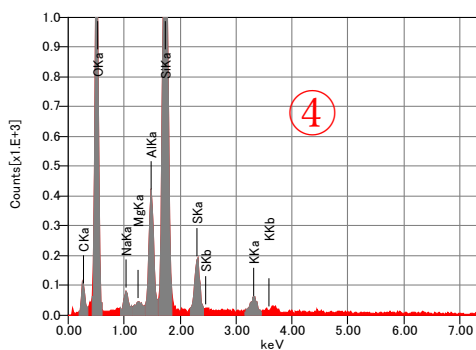


図 5-13 中④の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| C | | |
| O* | 52.09 | 65.83 |
| Na* | 1.55 | 1.36 |
| Mg* | 0.24 | 0.20 |
| Al* | 6.68 | 5.01 |
| Si* | 32.68 | 23.53 |
| S* | 5.10 | 3.22 |
| K* | 1.66 | 0.86 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-13 中④の元素定量結果 (左 : 質量比, 右 : 数量比)

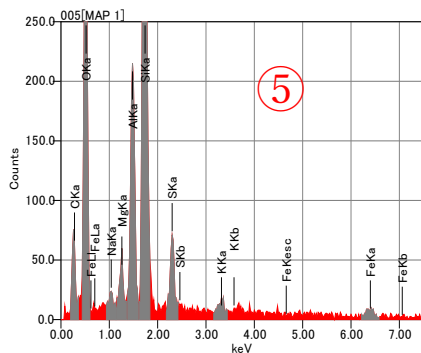


図 5-13 中⑤の元素ピーク

| Formula | mass% | Atom% |
|---------|--------|--------|
| C | | |
| O* | 50.85 | 64.72 |
| Na* | 0.81 | 0.71 |
| Mg* | 1.73 | 1.45 |
| Al* | 8.61 | 6.50 |
| Si* | 31.69 | 22.98 |
| S* | 4.59 | 2.92 |
| K* | 0.62 | 0.32 |
| Fe* | 1.09 | 0.40 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

図 5-13 中⑤の元素定量結果 (左: 質量比, 右: 数量比)

図 5-15 倍率 3000 倍の図における元素定量分析結果

図 5-13 に倍率 3000 倍の図における元素定量分析箇所を, 図 5-14 に元素分布のマッピング結果を, 図 5-15 に倍率 3000 倍の図における元素定量分析結果をそれぞれ示す。

まず, 図 5-13 の①について, C と O の存在数が約 1:3 であることより, 炭酸塩鉱物であることが考えられるが, Ca や Mg, Fe といった炭酸イオンと結合する陽イオンが検出されておらず, 同定はできなかった。また, Si も一定数 (約 17%) 存在していることから, 石英やモンモリロナイトといった鉱物も混在していることが推察される。図 5-13 の②についても, ほぼ同様の鉱物組成であり, ①と同様の鉱物が存在していることが考えられる。

図 5-13 の③について, ほぼ Si と O で構成されており, 石英と同定した。

図 5-13 の④, ⑤について, Si と O の存在個数の比がおおよそ 2:5~1:3 程度であることから, 化学式と合わせてモンモリロナイトと同定した。

また, 図 5-16 に以上の結果を踏まえた鉱物の分布を記載したものを示す。①~⑤に加えて, 図中右下部の Si と O のみが存在数が多い部分は石英と同定された。

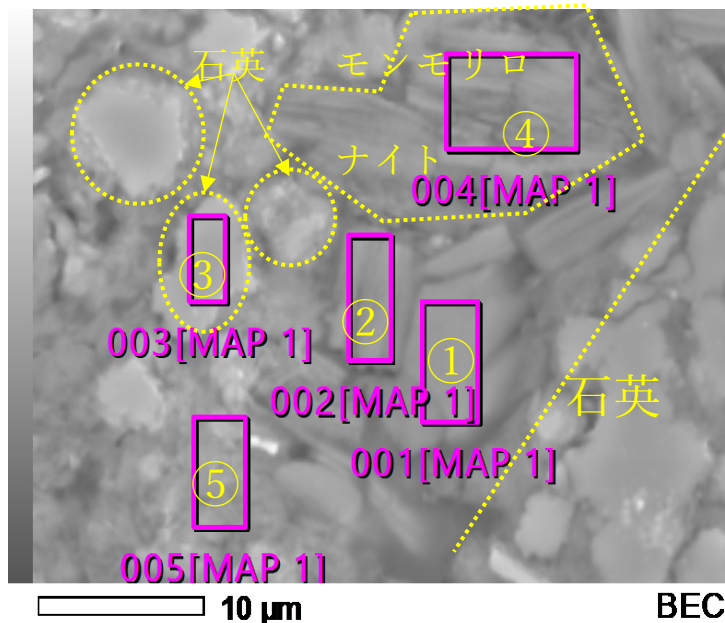


図 5-16 倍率 3000 倍の図における鉱物分布

以上の結果から、断面が平滑で輪郭の明瞭な構造を有する粒子は石英等の随伴鉱物であり、断面や輪郭の形状が不明瞭で、所々に長形状の細かい粒子が重なるような構造を有する粒子はモンモリロナイトであると判断できることが示された。また、白く光るような粒子は黄鉄鉱等の点在する硫化鉱物であることが示された。

EDS 分析による元素マッピングの結果、元素別で存在割合が多く、試料観察面の全体的に広く存在しているのが Si・O であることと、既往検討^{5,6)}でみられるシリカセメンテーションの発生も踏まえると、原鉱石中の土粒子間は石英などシリカ系鉱物の微小粒子・結晶により膠着されていると推察される。また、特に石英や長石等の粗粒鉱物間においては、松尾・嘉門⁷⁾によりまとめられている粘土の構造種別で述べられている粘土粒子の被覆作用や粘土粒子の支柱作用と同様、モンモリロナイトがこれらの粗粒鉱物の表面に吸着したり、粗粒間隙に集中的に存在したりすることによって、膠着に寄与していると考えられる。すなわち、図 4-2 で示した膠着物質として、モンモリロナイト間、およびモンモリロナイトと随伴鉱物間においては石英等のシリカ系鉱物の微小粒子が有力であり、粗粒鉱物間では一部モンモリロナイトが有力であると考えられる。

5.4 本章のまとめ

本章では、ベントナイト原鉱石の岩片・薄片試料を作製し、前者については SEM による土粒子骨格観察を、後者については偏光顕微鏡観察と SEM・EDS 分析による鉱物同定と元素マッピングを行った。本章で得られた主な成果を以下にまとめる。

- 1) 岩片の SEM 観察を行ったところ、粒子のすりつぶしを経ている再構成供試体に比べて、不攪乱供試体の方が土粒子・鉱物表面の形状が複雑であることや、同一の乾燥密度においても再構成供試体の方がマクロな空隙が見られた。このことから、不攪乱供試体の方が膠結作用により土粒子構造が複雑化しており、モンモリロナイト結晶層間の吸水・膨潤が阻害されたものと推察される。
- 2) 薄片の偏光顕微鏡観察を行ったところ、いずれの原鉱石においても基質はモンモリロナイトで構成され、斜長石や石英、方解石、硫化鉱物が随伴鉱物として存在することが確認された。
- 3) 月布産原鉱石から作製した薄片に対して SEM・EDS 分析を行ったところ、鉱物粒子の形状の観察と同定を行うことができた。また、元素マッピング結果も踏まえると、土粒子間の膠着物質として有力なのは石英等のシリカ系鉱物であり、粗粒鉱物間においてはモンモリロナイトも膠着に寄与していると推察された。

参考文献

- 1) 地下まゆみ, 上野宏共, 王濱濱, 坂本尚史: 沖縄県中城村で発生した地すべりと粘土鉱物の関係, 土木学会西部支部第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2008.
- 2) 山下浩之: 岩石薄片を簡単につくり観察する, 自然科学のとびら, 第25巻1号, 2019.
- 3) 早稲田大学教育・総合科学学術院薄片室: 薄片製作のテキスト, 2019.
- 4) Michell, J.K. and Soga, K.: Fundamentals of soil behavior (Third edition), John Wiley & Sons, Inc., pp.52-53, 2005.
- 5) 横山信吾, 田中幸久: イオン交換水で飽和したベントナイト系材料の透水性と膨潤特性に及ぼす熱影響に関する実験的検討, 電力中央研究所報告, N11021, 2012.
- 6) Pusch, R.: Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance, KBS Teknisk Rapport, 14, 1977.
- 7) 松尾新一郎, 嘉門雅史: 粘土の構造に関する用語について, 土と基礎, 24-1, pp.59-64, 1976.

第6章 ベントナイト原鉱石の透水特性評価

6.1 ベントナイト系材料の透水試験に関する現状

地層処分におけるベントナイト系緩衝材に求められるバリア性能のうち、最も主要な機能の一つが低透水性である。これは、廃棄物中の放射性核種が地下水と接触し、処分場外へ漏出することをできる限り遅延させるのに重要な機能である。低透水性を定量的に評価する物理的指標が透水係数である。1章で述べた通り、膠結作用のような長期的な変質を経た際に、透水係数が初期性能から変化するかを評価する必要がある。そこで本研究では、ベントナイト原鉱石の不攪乱供試体・再構成供試体の透水係数を測定し、透水特性に対する膠結作用の影響を調査し、緩衝材の低透水性における年代変化に関して定量的な評価を試みた。

ベントナイト系材料の透水試験は、これまでに各国・各研究機関により行われており、試験方法の基準化も ISO¹⁾や ASTM²⁾、JIS³⁾および JGS⁴⁾により行われている。しかし、それらの基準において、ISO・ASTM では透水係数の適用下限値が 1×10^{-11} m/s、JGS では 1×10^{-13} m/s であり、それよりも低い透水係数を有する材料を用いて試験する際は、供試体寸法の変更や温度コントロール等の、測定精度向上のための対策が求められる。一方で、特に締固めたベントナイトについては、圧密試験結果を用いた透水係数の算出も数多く行われている。しかし、圧密試験においては 10 日程度と比較的短期間で終了することが述べられている⁵⁾。一方で、高膨潤性試料においては壁面摩擦等による試験精度の懸念も指摘されている⁶⁾。

締固めたベントナイトの透水試験における最大の懸念点は、試験期間の長期化である。地盤工学会・低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会のとりまとめ⁷⁾結果によれば、既往検討の供試体寸法として直径は 50 mm、60 mm および 100 mm で、供試体高さは直径の 0.2~1.2 倍のものが多くと述べている。また、作用させる動水勾配も最大で 1000 程度であることも述べられており、試験期間も数か月から年単位の長期間を要することが指摘されている。しかし、供試体高さを減少させることにより、供試体の飽和期間の短縮、作用できる動水勾配の上昇、および供試体間隙体積と同等の流量を早期に確保できることに基づいた試験期間の短縮化、が可能である。このことから、本研究ではまず、JGS 基準に則りつつ、供試体の厚さを 2 mm と短縮した透水試験装置を開発し、ベントナイト K_V1 を用いて試験期間の短縮効果および測定結果の妥当性について議論した。その後、ベントナイト原鉱石から作製した供試体を用いて試験を行い、透水係数を測定した結果から膠結作用による透水特性への影響について推察した。

なお、1.6 で述べた通り、膨潤特性と同様透水特性についても水質の影響を受けることが分かっているが、本研究では膠結作用の影響を比較・検討することを目的としており、イオンを含まない蒸留水環境での測定を行った。

6.2 本研究で開発した厚さ 2 mm 供試体を用いた透水試験装置および試験方法の概要

図 6-1 に、本研究で開発した変水位透水試験装置の全体図を示す。本試験装置は、供試体リング（外径 38 mm，内径 28 mm，高さ 2 mm），給水用のポーラスメタル付き上版および下版で構成される SUS303 製試験容器（図 6-2），流入水量・流出水量測定用二重管ビュレット，およびレギュレータ（最大容量 3500 kPa，供給範囲：15～1000 kPa）で構成される。供試体寸法に関して，JGS 基準⁴⁾においては，試料の最大粒径の 10 倍以上，もしくは均等係数 $U \geq 10$ の粒度配合のよい試料については最大粒径の 5 倍以上と定めている。本研究において使用している試料はいずれも 0.425 mm 以下に調整したものであり，上記の記述をほぼ満たしているといえる。また，ベントナイトにおける透水挙動を考えた場合，供試体中の水分子の移動はモンモリロナイト結晶層間中の流れに支配されている⁸⁾と考えられ，モンモリロナイト結晶のサイズはナノメートルスケールであることを考慮すれば，厚さが 2 mm の供試体はベントナイト単体の透水試験に適用可能であるといえる。レギュレータは空気圧载荷による動水勾配・背圧の付加を目的として使用しており，デジタル圧力計（最大容量：1000 kPa，最小目盛り：1 kPa）を取り付けて圧力を可視化した。二重管ビュレットは供試体の間隙体積および流入・流出水量と測定間隔を考慮して，最大容量 10 mL，最小目盛り 0.1 mL，内径 8.0 mm のものを採用した。

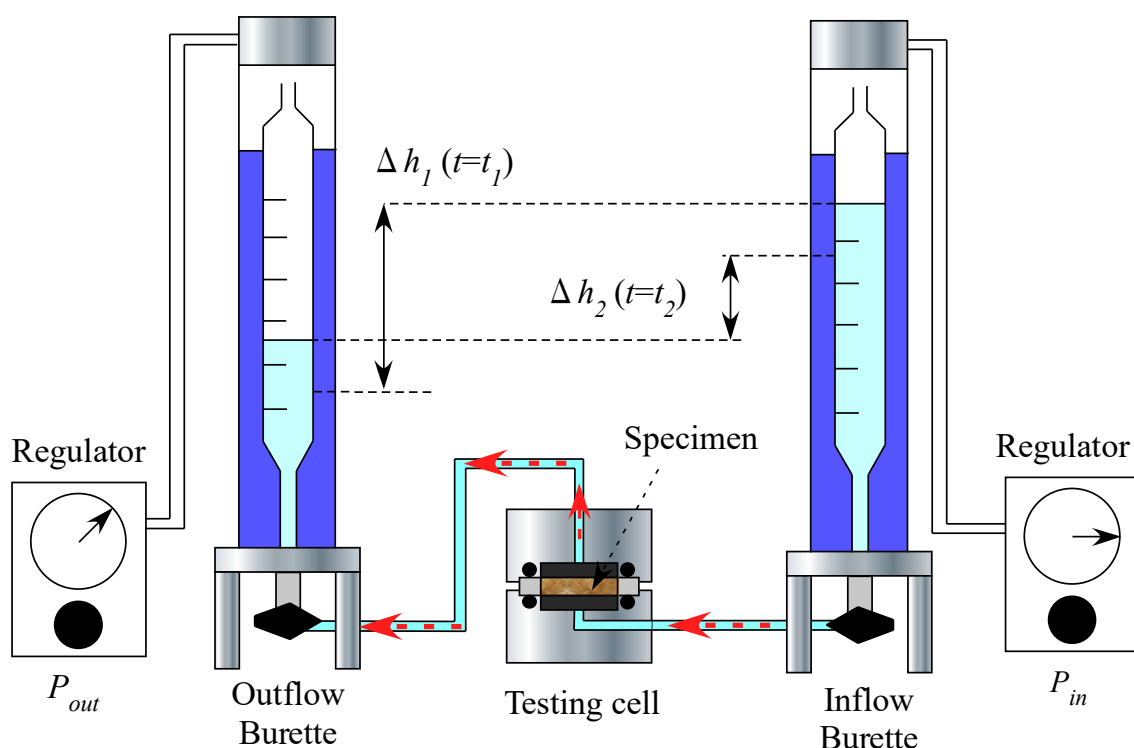


図 6-1 透水試験装置の全体図

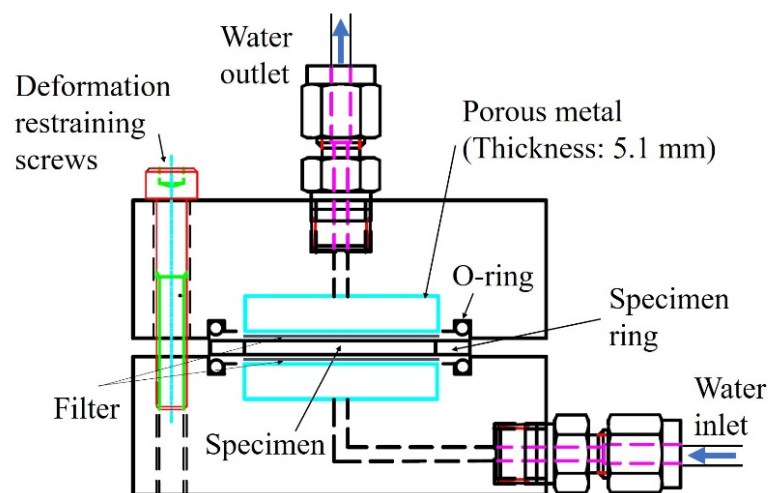


図 6-2 透水試験容器の断面図

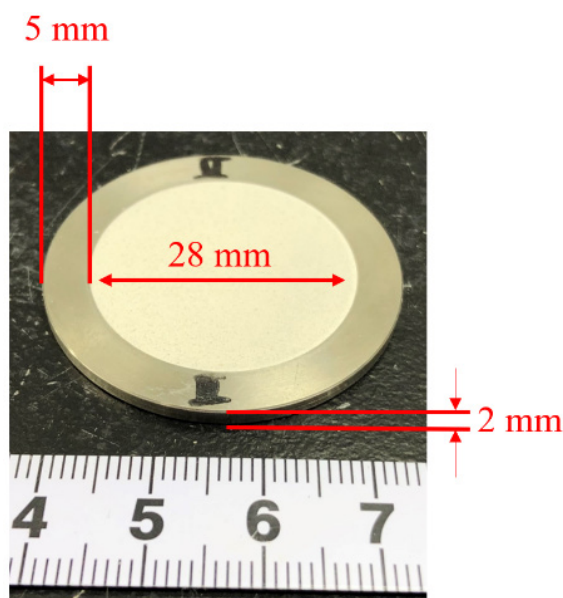


図 6-3 厚さ 2 mm のステンレス製リングに収めた締固めたベントナイト供試体の様子

次に、変水位透水試験の試験手順について述べる。

- ① K_V1 試料および原鉱石の再構成供試体については、ステンレス製リングに試料を投入して静的荷重を加えることで締固めて供試体を作製した（図 6-3）。原鉱石の不攪乱供試体については、カッターリングを用いて直径 28 mm×高さ 2 mm の円柱形に成形し、リング内に収めて供試体とした。供試体上下にメンブレンフィルター（PALL 製スーポア、孔径 0.45 mm）をおいて、SUS303 製試験容器を組み立てた。
- ② 試験容器を蒸留水中に浸漬し、上版・下版の両面から給水させた。
- ③ 試験容器および蒸留水の入った 500 mL ビーカーをデシケーター内に移動させ、真空ポン

プによりおよそ-98 kPa まで減圧し、飽和を促進した。所定の期間経過後、デシケータを大気圧に戻し、試験容器を取り出した。なお、減圧期間については表 6-1 に示すように飽和度確認試験を実施した。その結果、供試体厚さ 2 mm の本試験においては、1 日間減圧下で給水したケースで飽和度が 100%を超えており、飽和が完了していることが確認された。なお、締固めたベントナイトの飽和度が 100%を超える事象は既往の研究^{9),10)}においても確認されており、モンモリロナイト結晶層間中に吸着されている水分子の密度が 1.0 g/cm³を超えることが原因として考えられている。厚さ 10 mm の試験装置では、飽和に 2 週間程度を要しているため、厚さ 2 mm の供試体を用いることで大幅な飽和期間の短縮が可能であることが明らかとなった。

表 6-1 飽和度確認試験結果

| | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 供試体乾燥密度 (Mg/m ³) | 1.48 | 1.68 | 1.78 | 1.66 | 1.81 | 1.52 |
| 給水日数 (日) | 1 | 1 | 1 | 4 | 5 | 5 |
| 供試体飽和度 (%) | 116.7 | 146.3 | 152.3 | 123.1 | 153.7 | 125.9 |

- ④ 脱気した蒸留水を流入・流出側二重管ビュレットに投入し、ビュレット～試験容器間の配管類に気泡が入らないよう注意しながら、脱気した蒸留水で満たした。
- ⑤ 試験容器と二重管ビュレットをつなぎ、バルブを開放して接続した。シンフレックスチューブにより二重管ビュレットとレギュレータを接続し、レギュレータのネジを調節して徐々に二重管ビュレット内部に空気圧を付加した。流入・流出水量が安定したことを確認した後に、流入側・流出側二重管ビュレットの目盛りを測定した。
- ⑥ 試験期間中は随時二重管ビュレットの目盛りおよび水温を測定した。
- ⑦ ⑥の測定を繰り返し行い、透水係数算出に用いるデータを取得した。また、レギュレータを操作して背圧および差圧を適宜変更した。なお、作用させる透水圧の値は、Wang et al¹¹⁾で計測された厚さ 2 mm の K_V1 供試体で測定された膨潤圧を超えない範囲とした。
- ⑧ 供試体の初期間隙体積以上の通水量を確認した後に試験終了とし、試験容器を解体した。供試体を抜き出して含水比を測定した。
- ⑨ 試験終了後、JGS 基準⁴⁾に準拠して式(6.1)および(6.2)を用いて水温 15 度における透水係数 k_{15} を算出した。

$$k_T = 2.303 \frac{(a_{in} \times a_{out})L}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1 \gamma_w \times 10 + P}{h_2 \gamma_w \times 10 + P} \times \frac{1}{100} \quad (6.1)$$

$$k_{15} = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad (6.2)$$

ここに、 k_T : T°Cにおける透水係数(m/s), a_{in} : 流入側の二重管ビュレットの断面積(cm²), a_{out} : 流出側の二重管ビュレットの断面積(cm²), L : 供試体の厚さ(cm), A : 供試体断面積(cm²), t_2-t_1 : 測定時間(s), h_1 : 時刻 t_1 における水位差(cm), h_2 : 時刻 t_2 における水位差(cm), γ_w : 水の単位体積重量(kN/m³), P : 流入側透水圧 (P_{in}) と流出側透水圧 (P_{out}) の差圧(Pa), k_{15} : 15°Cにおける透水係数(m/s), η_T/η_{15} : 15°Cにおける透水係数算出のための補正係数である。

6.3 変水位透水試験結果

本節では、厚さ 2 mm 供試体を用いた変水位透水試験の結果について述べる。

6.3.1 ベントナイト K_V1 を用いた厚さ 2 mm 供試体の適用性確認

表 6-2 に供試体の仕様および試験条件を示す。本検討においては、供試体の乾燥密度を 1.34~1.79 Mg/m³ と地層処分における緩衝材の設計乾燥密度として想定される値よりも広範な範囲に振り、試験を行った。いくつかのケースでは、試験期間中に作用させる透水圧を変化させることにより動水勾配を随時変化させた。

表 6-2 K_V1 供試体を用いた適用性確認試験の試験条件

| 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³) | 供試体 高さ L (mm) | 流入・流出側の作用 透水圧 $\begin{pmatrix} P_{in} \\ P_{out} \end{pmatrix}$ (kPa) | 動水勾配 i (-) | 間隙体積 V_v (cm ³) |
|--|--------------------------|--|---------------------------|-------------------------------------|
| 1.34 | 2 | $\begin{pmatrix} 100 \\ 20 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 200 \\ 40 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 300 \\ 60 \end{pmatrix}$ | 4000→8000→12000 | 0.637 |
| 1.51 | 2 | $\begin{pmatrix} 100 \\ 20 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 200 \\ 40 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 300 \\ 60 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 400 \\ 80 \end{pmatrix}$ | 4000→8000→ 12000→16000 | 0.563 |
| 1.62 | 2 | $\begin{pmatrix} 440 \\ 120 \end{pmatrix}$ | 16000 | 0.523 |
| 1.70 | 2 | $\begin{pmatrix} 100 \\ 20 \end{pmatrix}$ | 4000 | 0.490 |
| 1.77 | 2 | $\begin{pmatrix} 100 \\ 20 \end{pmatrix}$ | 4000 | 0.456 |
| 1.77 | 10 | $\begin{pmatrix} 500 \\ 100 \end{pmatrix}$ | 4000 | 2.21 |
| 1.79 | 2 | $\begin{pmatrix} 100 \\ 20 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 220 \\ 60 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 340 \\ 100 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 440 \\ 120 \end{pmatrix}$ | 4000→8000→ 12000→16000 | 0.449 |

図 6-4 に、乾燥密度 1.34, 1.51, 1.62, 1.70, 1.79 Mg/m³ のケースにおける、経過時間と供試体間隙体積で正規化した流入量・流出量の関係を示す。本図においては、動水勾配の変化も記載している。1.34 Mg/m³ や 1.70 Mg/m³ のケースでは流入量と流出量の増加量に多少の差異が見受けられるが、全体的な傾向として流入量と流出量は調和的に増加していることが見受けられる。

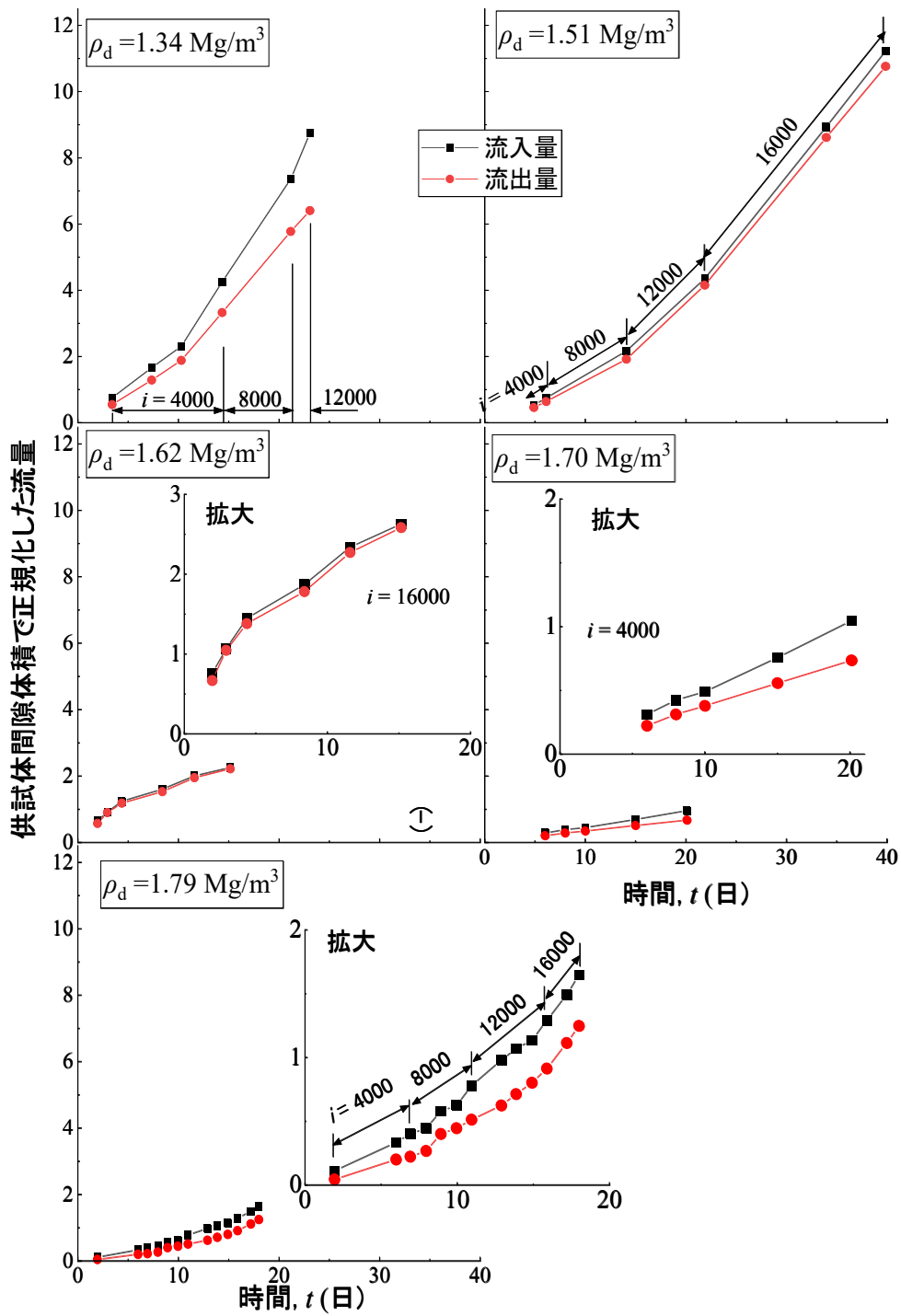


図 6-4 1.34 Mg/m^3 , 1.51 Mg/m^3 , 1.62 Mg/m^3 , 1.70 Mg/m^3 , and 1.79 Mg/m^3 のケースにおける経過時間と間隙体積で正規化した流入量・流出量の関係

図 6-5 に、経過時間と供試体間隙体積で正規化した流入量・流出量の関係について、供試体厚さ 2 mm と 10 mm を比較したものを示す。なお、同一の試験系を用いて、同一の乾燥密度 (1.77 Mg/m^3)、初期含水比 (9.2%)、動水勾配 (4000) の条件下での測定結果である。供試体間隙体積は厚さ 2 mm 供試体で 0.456 cm^3 、厚さ 10 mm 供試体で 2.21 cm^3 であった。厚さ 2 mm 供試体において、試験開始直後に流入量と流出量に大きな乖離が見受けられるが、このような乖離がある場合は安定した透水挙動ではないと考えられるため、透水係数の算出対象から外した。しかし、流入量と流出量の増加傾きはすぐに並行となっており、収支が取れていることが分かる。一方で厚さ 10 mm 供試体の場合、試験期間中一貫して流入量の増加割合が流出量に対して大きくなっており、並行ではないことが分かる。変水位透水試験においては流入量と流出量の釣り合いが取れていることが試験精度上きわめて重要であることから、厚さ 2 mm 供試体の方が良好な測定精度を有していることが示唆される。

また、厚さ 2 mm 供試体においては、9 日程度で間隙体積と同様の流入量が得られ、31 日程度で間隙体積の 2 倍の流入量が得られている。一方で、厚さ 10 mm 供試体においては、間隙体積の 1/2 の流入量を得るのに約 53 日程度を要している。これらを比較すると、厚さを 1/5 に薄くすることで、試験期間を 1/10 程度と大幅に短縮可能であることが示された。

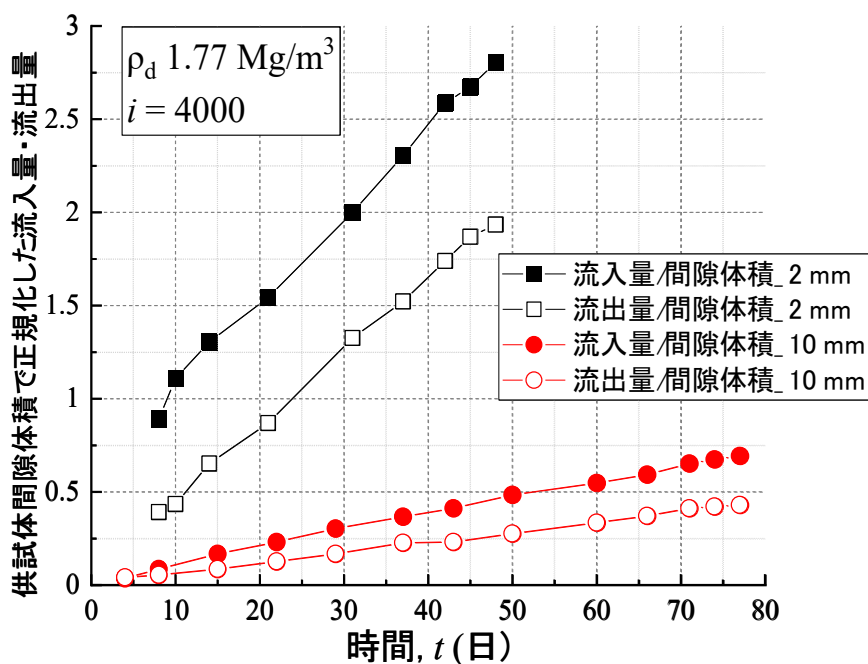


図 6-5 厚さ 2 mm と 10 mm 供試体における経過時間と間隙体積で正規化した流入量・流出量関係の比較

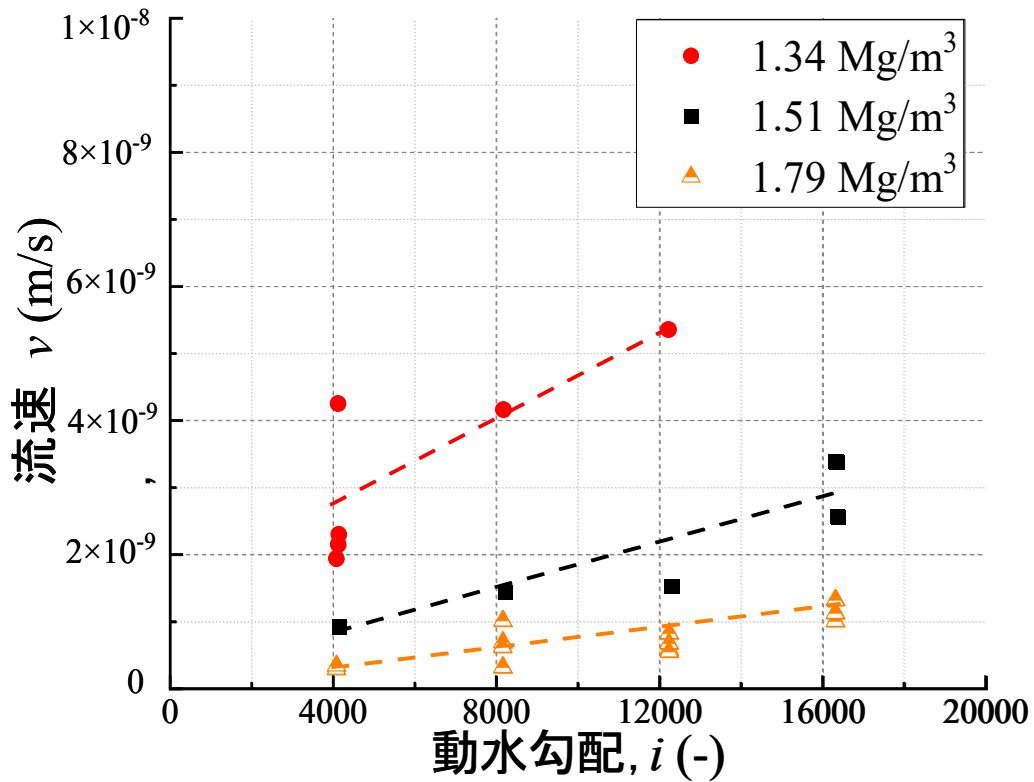


図 6-6 流速と動水勾配の関係

図 6-6 に、試験途中で動水勾配を変えたケースにおける、流速と動水勾配の関係を示す。これより、 1.34 Mg/m^3 、 1.51 Mg/m^3 、および 1.79 Mg/m^3 のケースにおいて、いずれも動水勾配の増加に比例して流速が比例的に増加していることが分かる。流速において多少のバラつきが見られるが、いずれも 2 倍以内の範囲に収まっている。これらのことから、今回変化させた動水勾配の範囲（4000～16000）において、供試体の変形や欠損、乱流化などの現象は起こらず、巨視的な透水係数に影響を及ぼすことなくダルシーの法則を満たしているといえる。

また、本試験結果の妥当性を確認するため、図 6-7 に供試体厚さ 10 mm の変水位透水試験結果¹²⁾と、長谷川の実施した定圧透水試験¹³⁾により得られた結果、佛田・小峯の実施した高圧圧密試験⁵⁾により得られた結果、および Komine によるベントナイト系材料の透水係数理論評価式¹⁴⁾による算出結果について、透水係数と乾燥密度の関係として比較して示した。

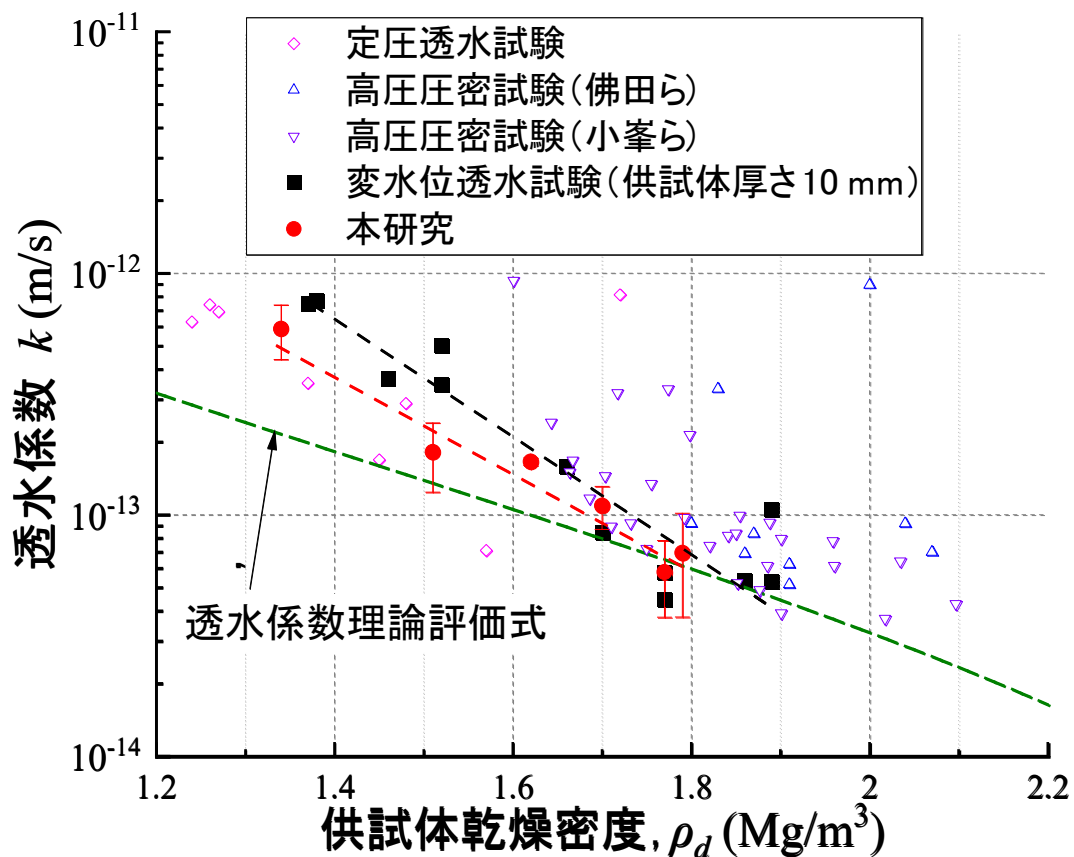


図 6-7 透水係数と乾燥密度の関係

これより、透水係数の対数値と乾燥密度の間には負の相関があり、他の研究の結果と比較しても、本検討で得られた透水係数—乾燥密度関係は、概ね同じ傾向上にあることがわかる。特に、本研究と同様の試験系で、供試体厚さが 10 mm の検討結果（黒い四角のプロット）と比較して同様の結果が得られており、供試体厚さ 2 mm の本試験装置の精度および妥当性が示されたといえる。また、試験方法ごとのデータのバラつきに着目すると、高圧圧密試験により得られたデータのバラつきが著しく大きく、定圧透水試験および変水位透水試験のデータのバラつきは相対的に小さいことが見て取れる。高圧圧密試験では、ベントナイトの高い膨潤性に由来する壁面摩擦の影響などにより精度が低くとどまってしまうことが推察され、透水係数を求める際は透水試験を実施することでより精度の良い値を得ることができると考えられる。

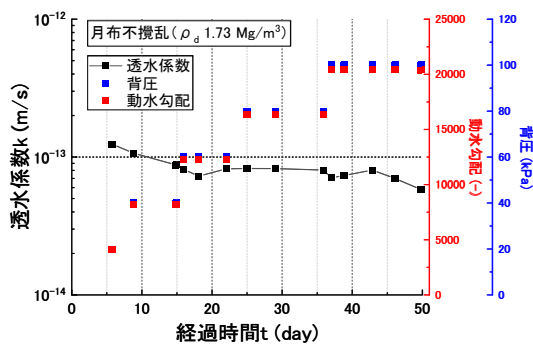
6.3.2 月布産原鉱石の変水位透水試験結果

表 6-3 に供試体の仕様および試験条件を示す。月布産原鉱石についても、ベントナイト K_V1 と同様、試験期間中に背圧および動水勾配を変更しながら測定を行った。不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも 3 ケースずつ試験を実施した。

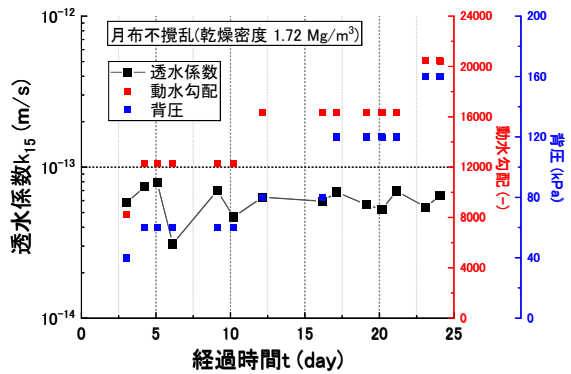
表 6-3 月布産原鉱石の試験条件

| 供試体種別 | 供試体乾燥密度 (Mg/m ³) | 背圧(kPa) | 動水勾配(-) | 透水係数 k_{15} の算術平均値(m/s) |
|-------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 不攪乱 | 1.73 | 20→40→60→ 80→100 | 4000→8000→12000→ 16000→20000 | 8.24×10^{-14} |
| | 1.72 | 40→60→80→ 120→160 | 8000→12000→ 16000→20000 | 6.06×10^{-14} |
| | 1.66 | 100 | 20000 | 6.54×10^{-14} |
| 再構成 | 1.56 | 20→40→60→ 80→100 | 4000→8000→12000→ 16000→20000 | 2.24×10^{-13} |
| | 1.77 | 40→60→80→ 120→160 | 8000→12000→ 16000→20000 | 6.59×10^{-14} |
| | 1.73 | 100 | 20000 | 6.28×10^{-14} |

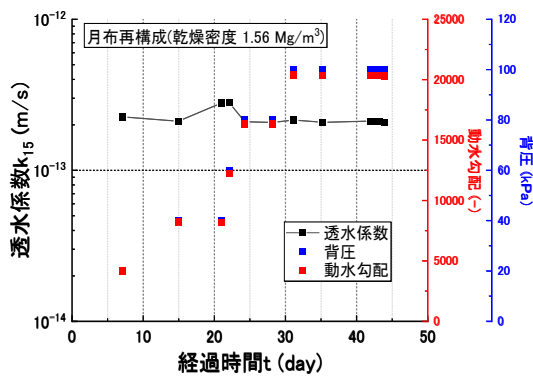
図 6-8 に試験期間中に動水勾配・背圧を変化させた 4 ケースの透水試験結果を示す。これより、いずれのケースにおいても、透水係数の経時変化はおよそ 2 倍以内のバラつきで収まっており、10 倍以上のオーダーが変わるほどの変化はないことがわかる。いずれのケースにおいても、透水係数 k_{15} は $10^{-13} \sim 10^{-14}$ (m/s)オーダーにあることがわかる。また、いずれのケースも、試験中に背圧および動水勾配を変化させているが、透水係数の大きな変動は見受けられなかった。ゆえに、本検討で設定した動水勾配、背圧の範囲であれば、透水係数の測定に大きな影響を与えないといえる。



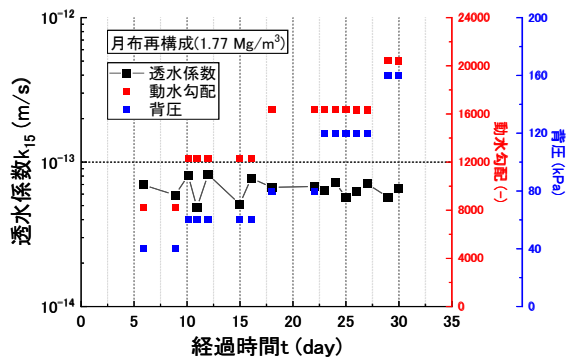
(a)不攪乱供試体 (1.73 Mg/m³) のケース



(b)不攪乱供試体 (1.72 Mg/m³) のケース



(c)再構成供試体 (1.56 Mg/m³) のケース



(d)再構成供試体 (1.77 Mg/m³) のケース

図 6-8 月布産原鉱石の透水係数の経時変化

図 6-9 に透水係数と背圧の関係を、図 6-10 に透水係数と動水勾配の関係をそれぞれ示す。これらから、不攪乱 (1.73 Mg/m³) では背圧および動水勾配の上昇に応じて、透水係数が僅かに低下する傾向が見受けられる。しかし、もう一方の不攪乱 (1.72 Mg/m³) や再構成供試体 2 つにおいてはそのような傾向はみられず、透水係数はほぼ一定の値であることがわかる。このことから、今回設定した背圧および動水勾配の範囲においては、供試体の透水挙動に影響を及ぼさず、供試体を巨視的に見て、動水勾配に比例して流量も増加する、すなわちダルシーの法則の適用範囲内にあるといえる。

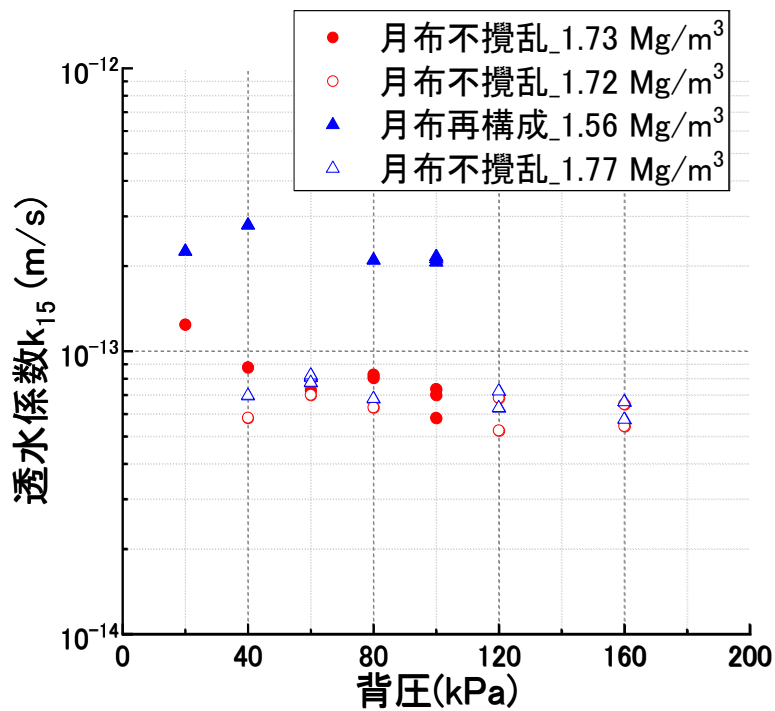


図 6-9 透水係数と背圧の関係

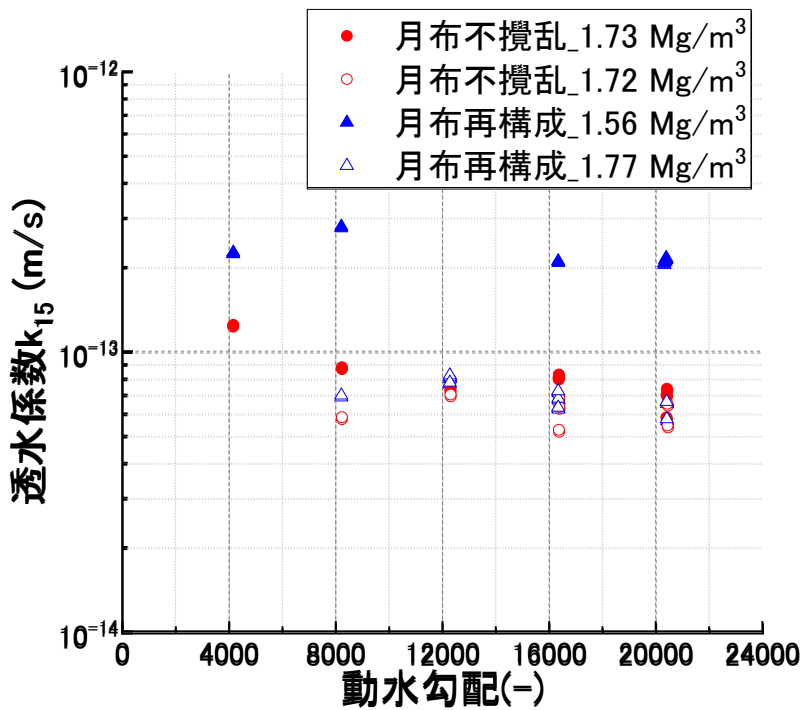


図 6-10 透水係数と動水勾配の関係

図 6-11 に、透水係数 k_{15} の平均値と供試体乾燥密度の乾燥密度の関係を示す。

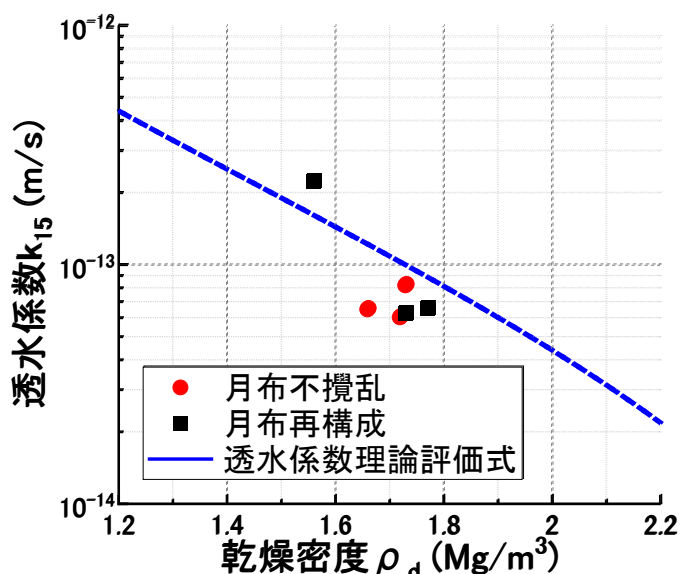


図 6-11 月布産原鉱石の透水係数と乾燥密度の関係

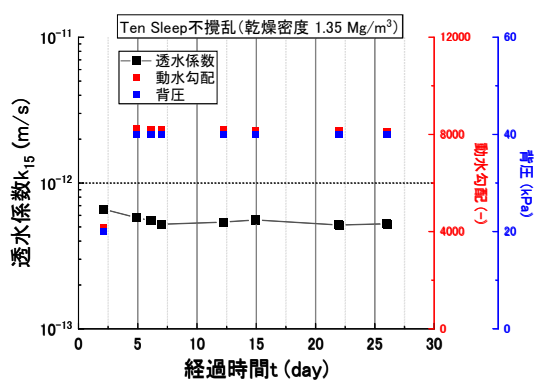
上図では、ベントナイト系材料の透水係数理論評価式¹⁴⁾による算出結果も併せて示してある。上記より、不攪乱供試体の透水係数は理論評価式の計算結果に比べて僅かに低いことがわかるが、その差異は2倍の範囲内に収まっている。また、再構成供試体の透水係数は、おおむね理論評価式と同様の傾向であるといえる。以上から、月布産原鉱石の不攪乱供試体では膠結作用に伴う土粒子構造の複雑化により、わずかに透水性が低下しているとみられるが、その際はオーダーの変わるほど大きな影響ではないことがわかった。

6.3.3 Ten Sleep 産原鉱石の変水位透水試験結果

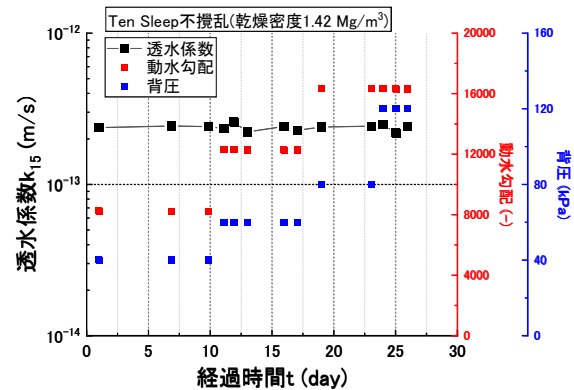
表 6-4 に供試体の仕様および試験条件を示す。Ten Sleep 産原鉱石についても、試験期間中に背圧や動水勾配を変化させながら測定を行った。不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも 3 ケースずつ試験を実施した。

表 6-4 Ten Sleep 産原鉱石の試験条件

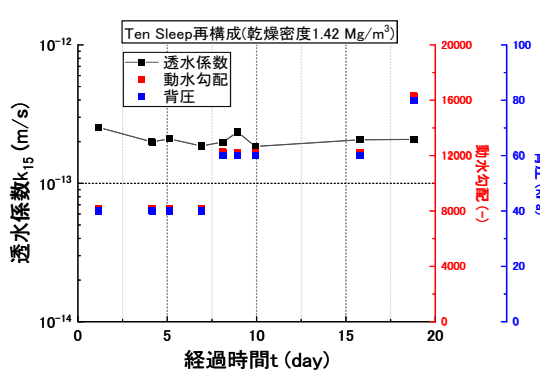
| 供試体種別 | 供試体乾燥密度 (Mg/m ³) | 背圧(kPa) | 動水勾配(-) | 透水係数 k_{15} の算術平均値(m/s) |
|-------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------------------|
| 不攪乱 | 1.35 | 20→40 | 4000→8000 | 5.57×10^{-13} |
| | 1.42 | 40→60→ 80→120 | 8000→12000→ 16000 | 2.38×10^{-13} |
| | 1.41 | 100 | 20000 | 5.19×10^{-13} |
| 再構成 | 1.42 | 40→60→80 | 8000→12000→ 16000 | 2.09×10^{-13} |
| | 1.33 | 40→60→ 80→120 | 8000→12000→ 16000 | 2.70×10^{-13} |
| | 1.59 | 100 | 20000 | 1.75×10^{-13} |



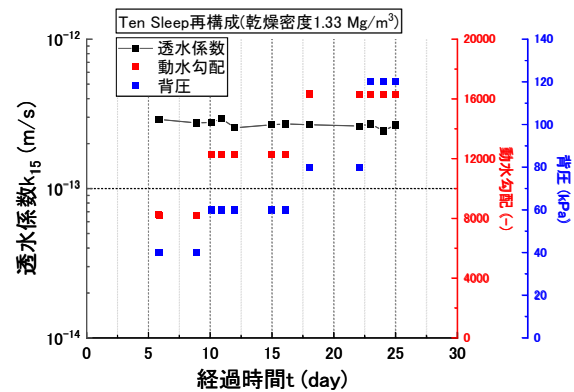
(a)不攪乱供試体 (1.35 Mg/m³) のケース



(b)不攪乱供試体 (1.42 Mg/m³) のケース



(c)再構成供試体 (1.42 Mg/m³) のケース



(d)再構成供試体 (1.33 Mg/m³) のケース

図 6-12 Ten Sleep 産原鉱石の透水係数の経時変化

図 6-12 に、試験期間中に背圧・動水勾配を変更させたケースの透水試験結果を示す。これより、いずれのケースにおいても、透水係数の経時変化はおよそ 2 倍以内のバラつきで収まっており、10 倍以上のオーダーが変わるほどの変化はないことがわかる。ベントナイト K_V1 や月布産原鉱石と比較しても、透水係数のバラつきが著しく小さいことから、安定した透水挙動であると考えられる。いずれのケースにおいても、透水係数 k_{15} は $10^{-13}(\text{m/s})$ オーダーにあることがわかる。また、いずれのケースも、試験中に背圧および動水勾配を変化させているが、透水係数の大きな変動は見受けられなかった。ゆえに、本検討で設定した動水勾配、背圧の範囲であれば、透水係数の測定に大きな影響を与えないといえる。

図 6-13 に透水係数と背圧の関係を、図 6-14 に透水係数と動水勾配の関係をそれぞれ示す。これらから、不攪乱 (1.35 Mg/m^3) では背圧および動水勾配を増加させることでわずかに透水係数が低下しているが、その差異は 1.5 倍以内であり、ほぼ無視できる差異であるといえる。そのほかの供試体においては、背圧および動水勾配に因らずほぼ一定の透水係数が得られていることから、Ten Sleep 産原鉱石においても月布産原鉱石と同様、巨視的に見てダルシーの法則に基づいた透水挙動であることがわかる。

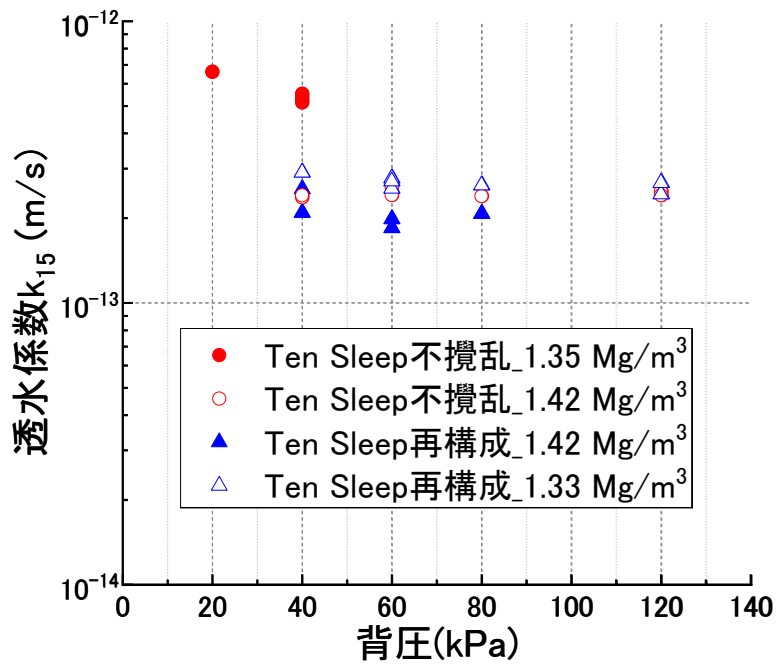


図 6-13 透水係数と背圧の関係

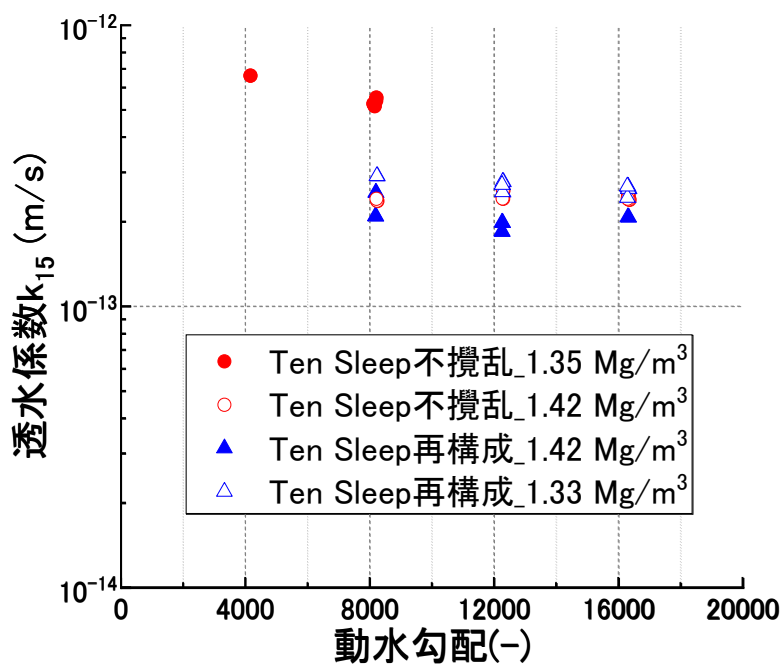


図 6-14 透水係数と動水勾配の関係

図 6-15 に、透水係数と乾燥密度の関係を示す。実測値の他に、透水係数理論評価式⁴⁰⁾による計算値も併記している。

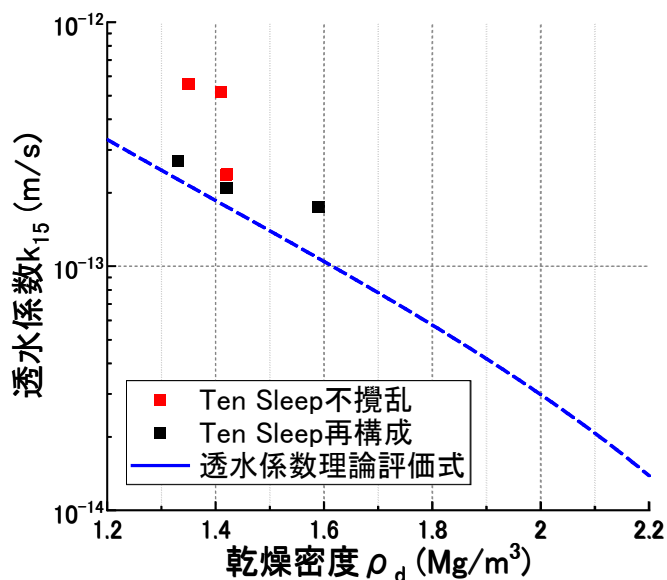


図 6-15 Ten Sleep 産原鉍石の透水係数と乾燥密度の関係

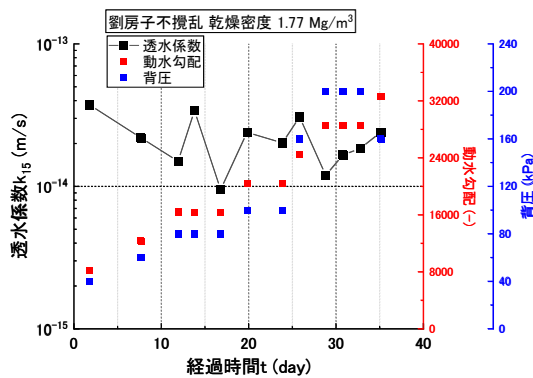
以上より、再構成供試体については理論評価式による計算結果とほぼ同様の値であったが、不攪乱供試体においては 1.35 Mg/m³ のケースにおいて、再構成供試体と理論評価式に比して 2 倍程度高い透水係数となっていた。しかし、不攪乱供試体・再構成供試体いずれも 10⁻¹³ (m/s) オーダーにあり、理論評価式による計算結果と比較しても大幅な差異はないといえる。また、不攪乱供試体における透水挙動に対する膠結作用の影響は、Ten Sleep 産原鉍石においてはほぼ無いものと見ることができる。

6.3.4 劉房子産原鉱石の変水位透水試験結果

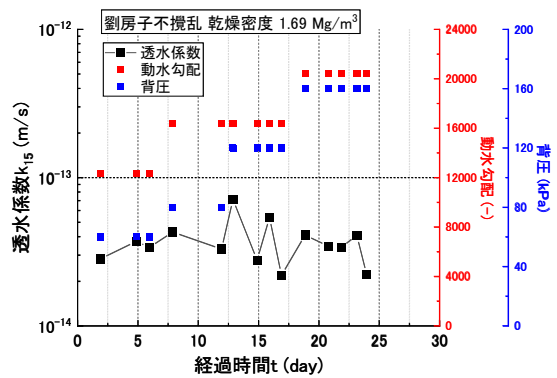
表 6-5 に供試体の仕様および試験条件を示す。劉房子産原鉱石についても、試験中に背圧および動水勾配を変更させながら測定を行った。不攪乱供試体、再構成供試体のいずれも3ケースずつ試験を行った。

表 6-5 劉房子産原鉱石の試験条件

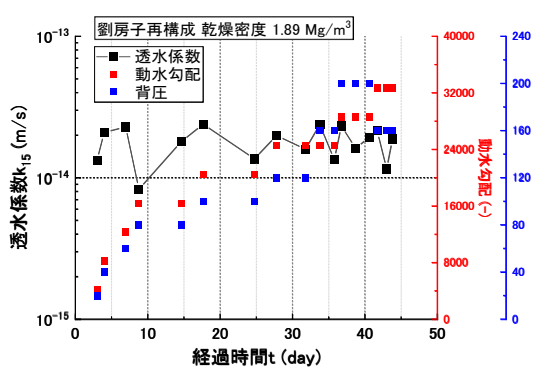
| 供試体種別 | 供試体乾燥密度 (Mg/m ³) | 背圧(kPa) | 動水勾配(-) | 透水係数 k_{15} の算術平均値 (m/s) |
|-------|------------------------------|---|---|----------------------------|
| 不攪乱 | 1.77 | 40→60→80→ 100→160→ 200→160 | 8000→12000→16000→ 20000→24000→ 28000→32000 | 2.20×10^{-14} |
| | 1.69 | 60→80→ 120→160 | 12000→16000→20000 | 3.73×10^{-14} |
| | 1.82 | 100 | 20000 | 5.31×10^{-14} |
| 再構成 | 1.89 | 20→40→60→ 80→100→120→ 160→200→160 | 4000→8000→12000→ 16000→20000→24000→ 28000→32000 | 1.79×10^{-14} |
| | 1.75 | 40→60→80→ 120→160 | 8000→12000→ 16000→20000 | 3.57×10^{-14} |
| | 1.69 | 100 | 20000 | 4.35×10^{-14} |



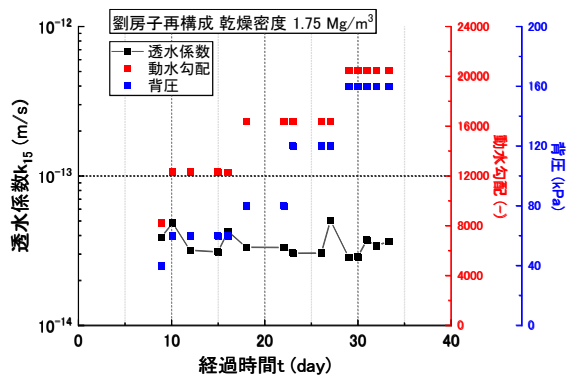
(a)不攪乱供試体 (1.77 Mg/m³) のケース



(b)不攪乱供試体 (1.69 Mg/m³) のケース



(c)再構成供試体 (1.89 Mg/m³) のケース



(d)再構成供試体 (1.75 Mg/m³) のケース

図 6-16 劉房子産原鉱石の透水係数の経時変化

図 6-16 に、試験期間中に背圧・動水勾配を変更させたケースの透水試験結果を示す。これより、全てのケースにおいて、試験期間中の透水係数のバラつきは概ね 5 倍以内に収まっており、透水係数は 10^{-14} (m/s) オーダーにあることがわかる。また、全ての試験ケースにおいて、試験中に背圧および動水勾配を変更しているが、透水係数に連動した大幅な変化は見受けられなかった。ゆえに、本研究で設定した背圧および動水勾配の範囲においては、供試体中の透水挙動を著しく乱すことなく試験を実施することができたと考えられる。

図 6-17 に透水係数と背圧の関係を示し、図 6-18 に透水係数と動水勾配の関係をそれぞれ示す。背圧および動水勾配のいずれにおいても、バラつきがあるものの、透水係数との明確な相関性は見受けられない。ゆえに、劉房子産原鉱石においても、他の試料と同様、ダルシーの法則が成立しているといえる。

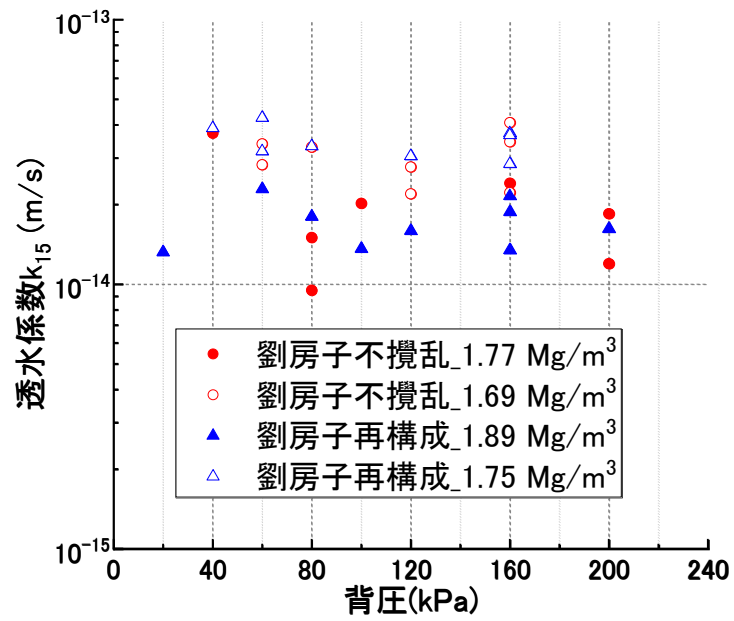


図 6-17 透水係数と背圧の関係

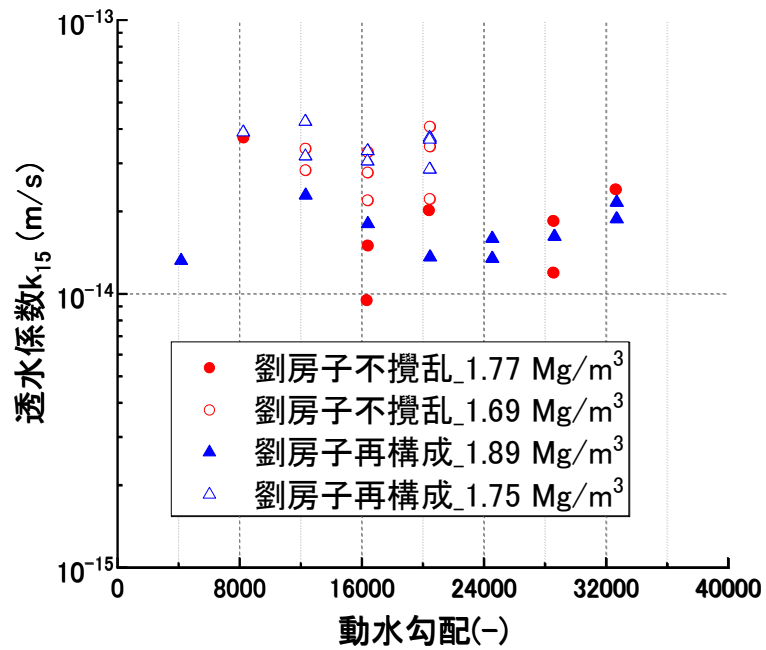


図 6-18 透水係数と動水勾配の関係

図 6-19 に、透水係数と乾燥密度の関係を示す。

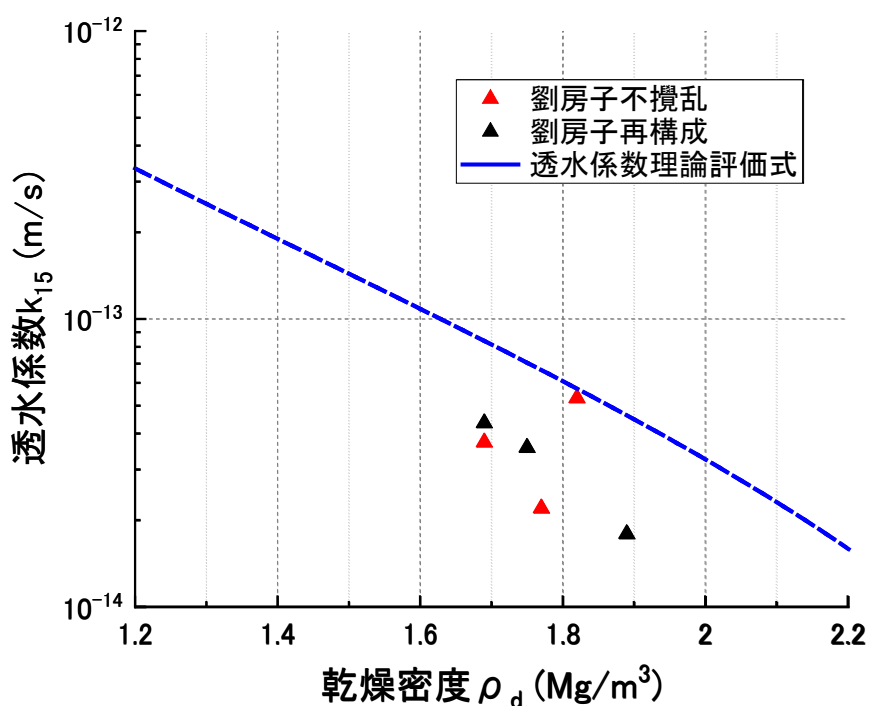


図 6-19 劉房子産原鉍石の透水係数と乾燥密度の関係

これより、不攪乱供試体の方が再構成供試体に比べて僅かに透水係数が低いものの、概ね同程度の値であることがわかる。また、不攪乱・再構成供試体ともに透水係数理論評価式の計算結果に比べて約 1/2 程度の値となっていることがわかる。この理由として、計算の際に用いている間隙水のイオン濃度 (=20 mol/m³ と仮定) や、層間水と自由水の粘性の比率 (=79 と仮定) 等のパラメータの仮定値が、実際の供試体の状況と異なっていることが推察される。しかし、現時点では明確な原因は不明であり、今後この点について実験・理論の両面から追究する必要がある。

6.4 有効モンモリロナイト密度による透水係数の評価

本検討で得られた、異なるベントナイトにおける透水係数を統一的に評価するために、式(6.3)・(6.4)を用いて、供試体中のモンモリロナイト乾燥質量をモンモリロナイトおよび空隙の体積で除した値である有効モンモリロナイト密度を算出し、整理した。

$$\begin{aligned}\rho_{em} &= \frac{M_m}{V_m + V_v} \\ &= \frac{\rho_d C_m}{100 - \rho_d(100 - C_m) / \rho_{nm}}\end{aligned}\quad (6.3)$$

$$\rho_s = \frac{\frac{100}{C_m} \rho_m}{1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1\right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}}}\quad (6.4)$$

ここに、 ρ_{em} ：有効モンモリロナイト密度 (Mg/m³)、 C_m ：モンモリロナイト含有率 (%)、 ρ_d ：供試体乾燥密度 (Mg/m³)、 ρ_s ：ベントナイトの土粒子密度 (Mg/m³)、 ρ_{nm} ：ベントナイトに含まれるモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)、 ρ_m ：ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m³) である。 C_m 、 ρ_s は2章で求めた値を用い、 ρ_m は2.75～2.78 (Mg/m³) 程度であると言われており¹⁵⁾、この値を参考に $\rho_m=2.77$ (Mg/m³) と設定した。

図 6-20 に、透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係を示す。

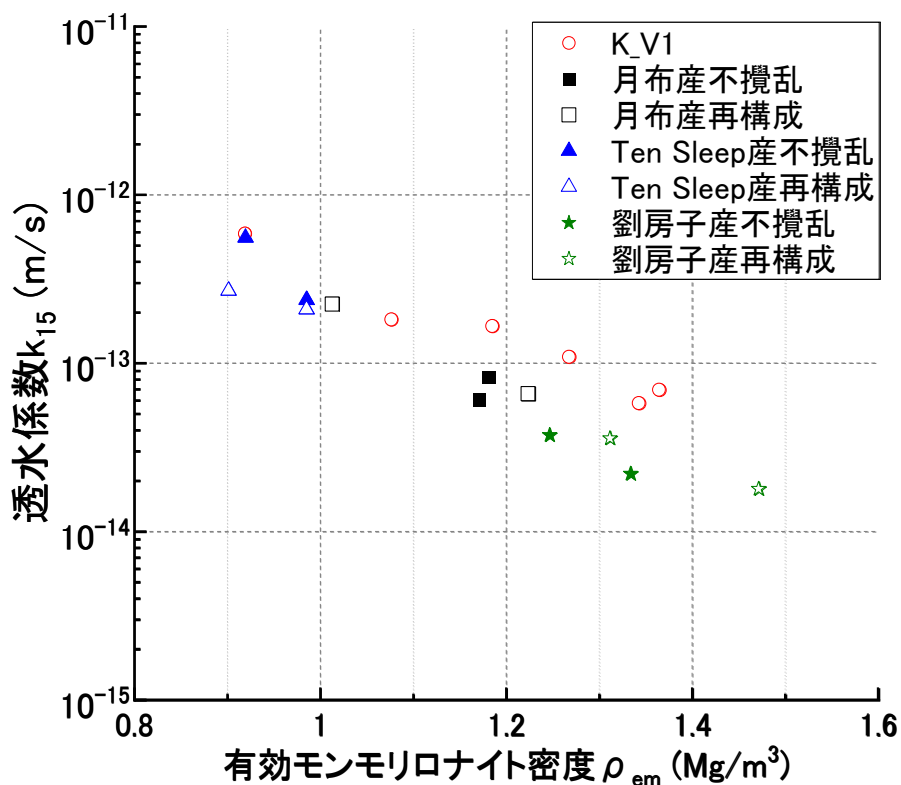


図 6-20 透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係

これより、透水係数の対数値と有効モンモリロナイトの間には負の相関があり、試料の種類に因らずほぼ一定の傾向がみられる。このことから、既往の検討⁹⁾と同様に、有効モンモリロナイト密度を指標として導入することで、本研究で使用した産地の異なる試料の透水係数を統一的に評価できることが示された。また、不攪乱供試体と再構成供試体の透水係数を比較すると、月布産原鉱石と劉房子産原鉱石においては不攪乱供試体の方が僅かに透水係数の値は低く、Ten Sleep 産原鉱石においては再構成供試体の方が僅かに透水係数の値は低いという結果であった。このことを踏まえると、ベントナイト原鉱石の透水挙動に対する膠結作用の影響は、透水係数のオーダーを変えるほどの影響はなく、2 倍程度の変動に収まるといえる。この理由として、膠結作用によりモンモリロナイト結晶の膨潤が阻害される一方、間隙形状が複雑化することで、結果として透水特性としては初期状態と大きく変わらないと推察される。これより、地層処分におけるベントナイト系緩衝材が地下深部で長期的な膠結作用を受けて固結した場合においても、緩衝材中の地下水の移流的移動に対してはほぼ影響を与えず、バリア機能は操業直後と同水準を保てる可能性が示唆される。

6.5 本章のまとめ

本章では、ベントナイト系材料の透水試験方法の現状について述べ、試験期間の短縮化を目的として供試体厚さを2 mmと極めて薄くした変水位透水試験装置を新たに開発した。その適用性を評価するとともに、ベントナイト原鉱石の不攪乱供試体・再構成供試体の透水係数を測定し、ベントナイト系材料の透水特性に及ぼす膠結作用の影響について評価した。本章で得られた主な成果を以下にまとめる。

- 1) 日本国内で標準的に用いられているベントナイト K_V1 を用いて、新たに開発した厚さ2 mm 供試体を用いた変水位透水試験装置の適用性を評価した。その結果、厚さ10 mm の場合に比べて試験期間をおよそ1/10 程度に短縮できることが明らかになるとともに、流速と動水勾配の関係から巨視的な水分移動現象はダルシー則を満たしていることがわかった。また、乾燥密度と透水係数の関係において既往検討と比較したところ、同様の傾向を示すとともに、特に圧密試験結果と比較して値のバラつきが小さいことが明らかになった。以上から、厚さ2 mm 供試体を用いた変水位透水試験装置は適用性を有していると判断できた。
- 2) 月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体の透水係数を測定したところ、いずれの原鉱石においても透水係数はオーダーが変わるほどの差異や、地質年代に応じた差異の増大は見受けられなかった。この理由として、膠結作用によりモンモリロナイト結晶の膨潤が阻害される一方、間隙構造の複雑化により結果として透水特性が大きく変化しないためと推察される。また、有効モンモリロナイト密度で整理したところ、K_V1 も含めて共通した負の相関がみられ、透水特性を統一的に評価できた。

参考文献

- 1) ISO : Soil quality—Determination of hydraulic conductivity if saturated porous materials using a flexible wall permeameter. ISO17313, 2004.
- 2) ASTM : Standards Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. D5084, 2016.
- 3) JIS : 土の透水試験方法, JIS A 1218:2009, 2009.
- 4) JGS : 低透水性材料の透水試験方法, JGS0312-2018, 2018.
- 5) 佛田理恵, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲 : 高圧圧密試験装置を用いたベントナイトの透水係数算出における試験方法の高度化, 土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 3, pp.573-578, 2006.
- 6) 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦 : ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討—日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究成果報告—(共同研究), JAEA-Research 2010-025, p. 43, 2010.
- 7) 地盤工学会 : 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会 研究報告書, pp.92-97, 2016.
- 8) Komine, H. : Predicting hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes, Engineering Geology, 114, pp. 123-134, 2010.
- 9) Villar, M. V., Lloret, A. : Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite, Applied Clay Science, 26, No. 1-4, pp.337-350, 2004.
- 10) Jacinto, A. C., Villar, M. V., Ledesma, A. : Influence of water density on the water-retention curve of expansive clays, Géotechnique, 62, No. 8, pp. 657-667, 2012.
- 11) Wang, H., Komine, H., Gotoh, T. : A swelling pressure cell for X-ray diffraction test, Géotechnique, doi.org/10.1680/jgeot20.0005, 2021.
- 12) 貞松暁大, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 関口高志, 北原慎也, 伊藤大知, 市川雄太 : 変水位透水試験による締固めたベントナイト供試体の透水係数の測定および試験方法, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-1-3-07, 2020.
- 13) 長谷川琢磨 : ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所報告, N04005, 2004.
- 14) Komine, H : Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 134, No. 4, pp. 497-508, 2008.
- 15) Lambe, T.W. and Whitman, R.V. : Soil Mechanics, John Wiley & Sons Inc., pp.29-31, 1969.

第7章 ベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法の提案

7.1 ベントナイト系緩衝材の設計フロー

本章では、地層処分システムの安全評価への本研究の成果の適用方法について述べる。

図 7-1 に、ベントナイト系緩衝材の設計フロー¹⁾を示す。本フローにおいては、低透水性や自己シール性等の要件項目に基づいた材料・厚さを設定した後に緩衝材単独の設計仕様を確定する。この時、低透水性など個別の性能ごとに、関連する物理指標の基準値を求め、それを満たす仕様(材質・厚さ・乾燥密度など)を設定する。例えば、低透水性に関しては、放射性核種移行を考慮して緩衝材が拡散場を保持できる条件として、透水係数 $k=1 \times 10^{-8}$ cm/s、および厚さ 30 cm が解析的に求められる。透水係数の値については、バラつき等の測定精度や緩衝材の製作技術レベルを考慮して、1/100 をかけた $k=1 \times 10^{-10}$ cm/s が設計透水係数として設定される。この値よりも低い透水係数を有する条件(ベントナイトの種類や砂混合率等の材質・乾燥密度)を室内実験等により明らかにし、緩衝材の仕様を決定する。最終的には、自己シール性や自己修復性など、そのほかの性能についても同様に検討し、全ての性能を満たす仕様を設定される。その後、応力緩衝性や熱伝導性等の要件項目に基づいた、緩衝材単独ではなく人工バリアシステム全体における設計仕様を確定する。最後に化学的緩衝性や長期健全性といった、性能評価に係る確認を行い緩衝材の設計仕様を確定するものである。このうち、本研究で対象としている、ベントナイトの膨潤特性における膠結作用の影響評価は、緩衝材の設計フロー内の「性能評価等における確認」の内、長期健全性の評価に該当する。原子力発電環境整備機構(2011)²⁾では、長期健全性に関わる緩衝材の技術要件として、自己修復性(施工後に生じる変形や損傷に伴い発生する隙間を充填すること)や耐熱性、緩衝材流出の抑制、自己シール性(施工時の隙間を充填すること)など、10項目が挙げられている。このうち、自己修復性や自己シール性に関しては、緩衝材の膨潤圧や膨潤変形特性が密接に関わる性能である。特に前者については、施工から長期間経過後に生じた隙間の充填も対象となるため、本研究で得られた成果は、超長期的な変質現象である膠結作用を受けた場合においても自己修復性が満たされるか否かを照査する上で有用な結果となりうる。

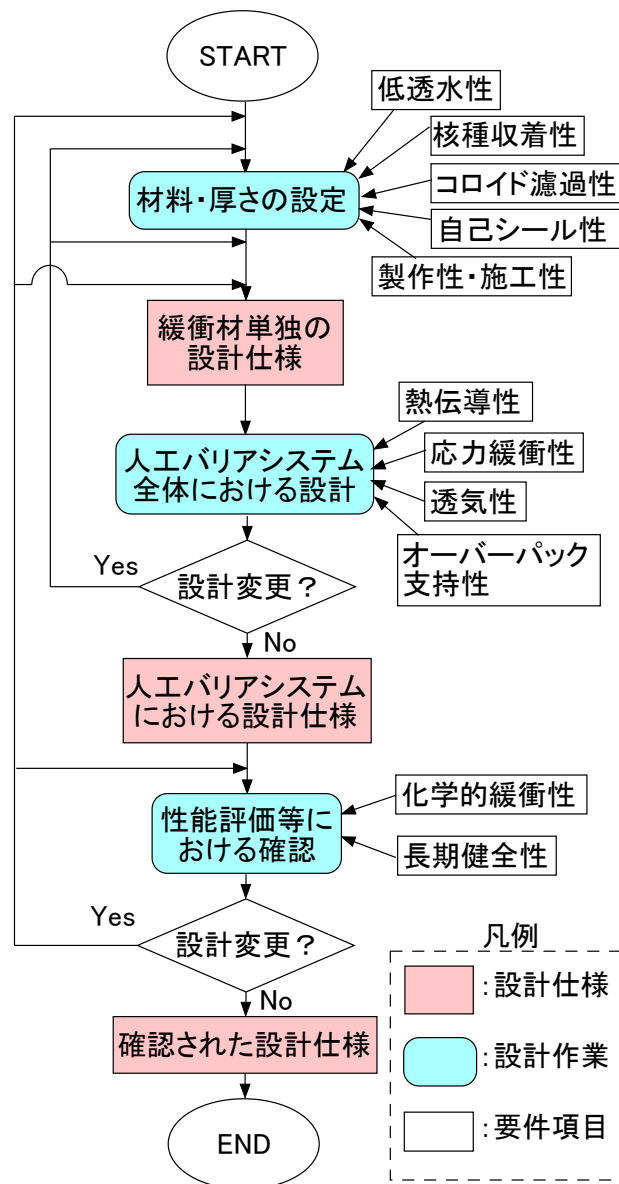


図 7-1 緩衝材の設計フローの一例¹⁾

自己修復性に焦点を当てて、本研究成果の適用方法について述べる。まず、自己修復性において想定される緩衝材の主な損傷要因として、処分後 1000 年経過以降に発生すると想定されている、オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過現象が挙げられる³⁾。図 7-2 に本現象の概念図を示す。還元環境下において、オーバーパックの構成分子である鉄が水と接触した場合、水素ガスが発生する。ベントナイト系緩衝材は透気性が低いため、水素ガスが発生した場合、はじめは緩衝材中の間隙水を置換するように緩衝材間隙にたまっていくと考えられる。しかし、ガスの発生量（供給量）が過大となるときに、透気できずに破過現象が発生し、水みちとなりうる割れ目が発生することが懸念される⁴⁾。この割れ目を膨潤変形により再充填することが、安全確保の上で緩衝材には長期的に求められる。

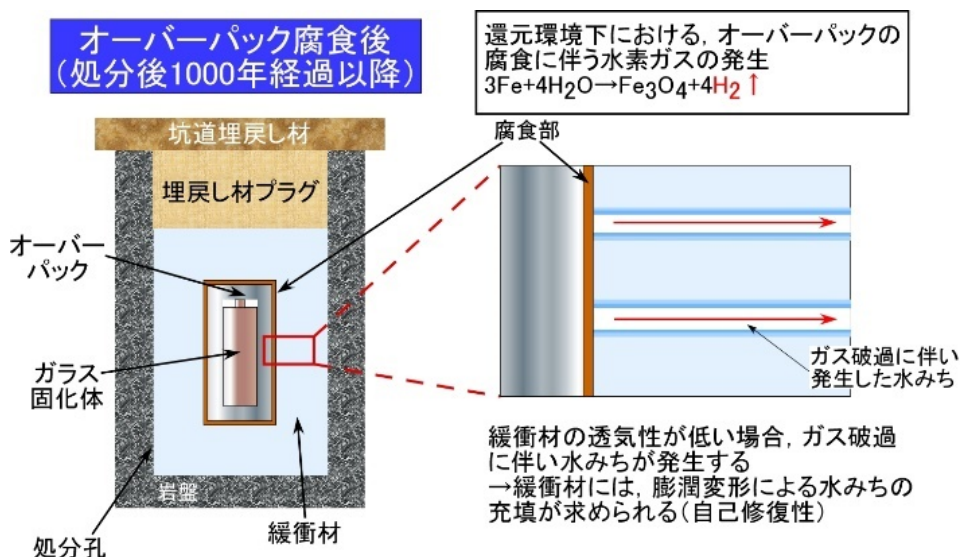


図 7-2 オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過に関する概念図

7.2 膨潤特性・自己シール性実験結果に基づく供試体乾燥密度と拘束圧関係

本研究で得られた供試体乾燥密度—拘束圧関係のデータを用いながら、ベントナイト系緩衝材における膠結作用の影響を加味した、自己修復性の担保における膨潤挙動の評価手法を提案する。図 7-3～図 7-5 に、各原鉱石における膨潤圧・一次元膨潤変形率の測定結果および自己シール性実験の結果を、横軸を試験終了時の供試体乾燥密度、縦軸を拘束圧として統一的に示したグラフを示す。なお、ここでの拘束圧は、膨潤圧および自己シール性実験の場合は最大膨潤圧および最大の発生圧力を、一次元膨潤変形率測定実験の場合は実験期間中の拘束圧 (19.6 kPa・100 kPa・500 kPa) をそれぞれ指している。

図 7-3～図 7-5 より、いずれの原鉱石において、不攪乱・再構成供試体のいずれも拘束条件の差異に因らず、試験後乾燥密度と拘束圧の間には一意な関係が見受けられた。再構成供試体において、粒度の差異による拘束圧への影響は見受けられなかった。また、乾燥密度が大きくなるにつれて、拘束圧が指数関数的に上昇する傾向が見受けられた。

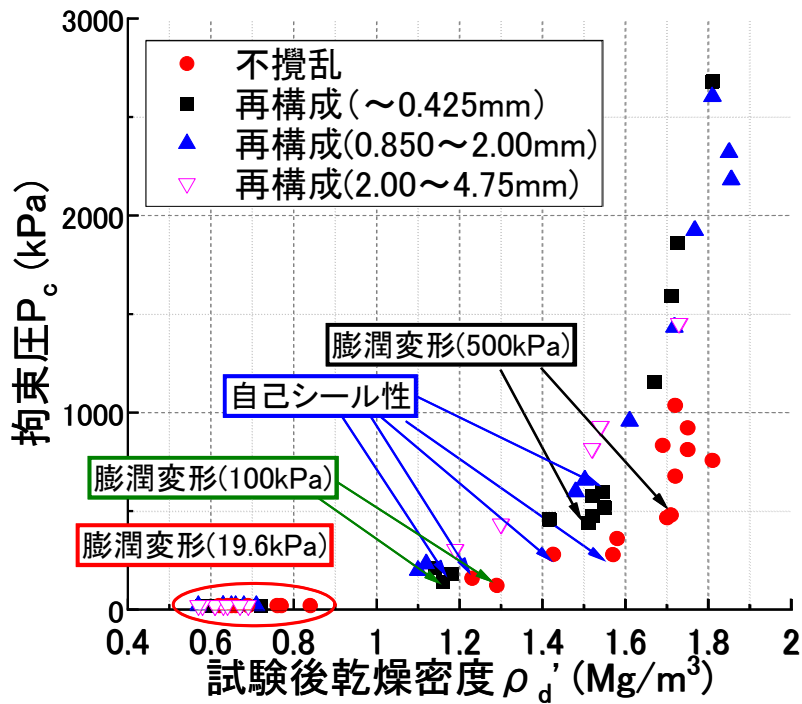


図 7-3 月布産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

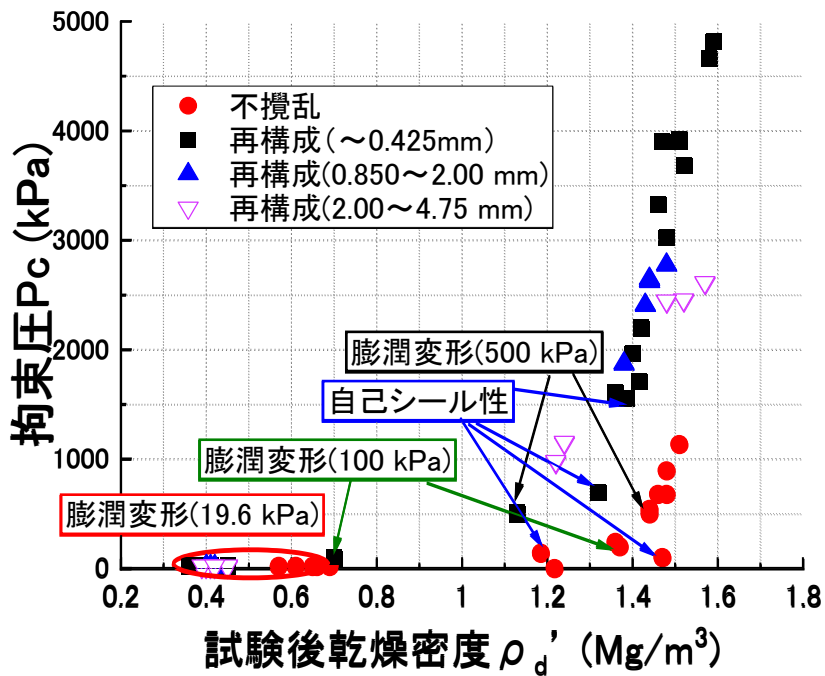


図 7-4 Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

劉房子産原鈇石 試験終了時乾燥密度—拘束圧関係

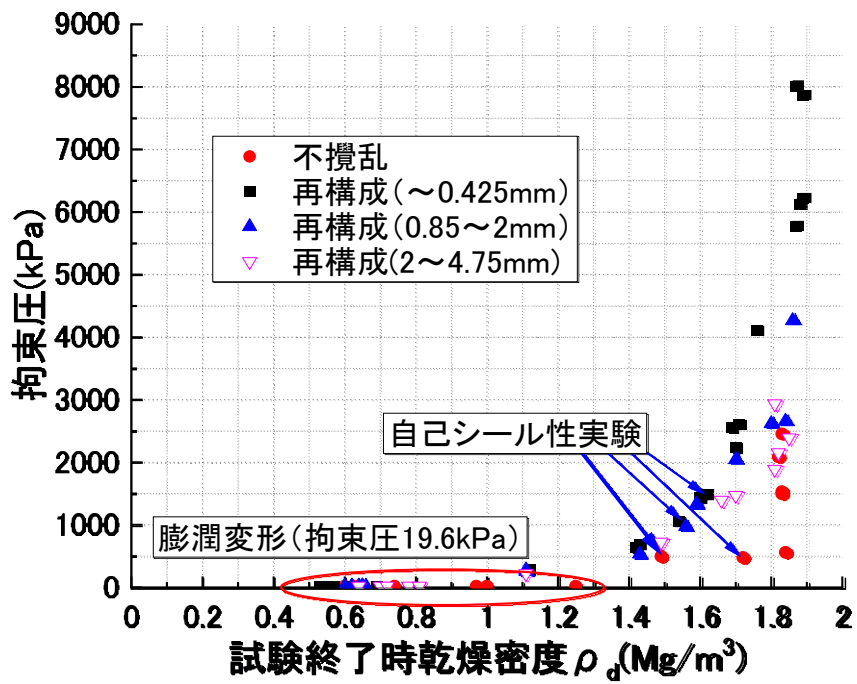


図 7-5 劉房子産原鈇石の拘束圧—試験終了時乾燥密度関係

また、図 7-6～図 7-8 に、図 7-3～図 7-5 の縦軸を対数軸化したグラフを示す。この理由として、ベントナイト系材料の膨潤圧を対数化した場合、乾燥密度に対して相関性を有することが既往の検討⁹⁾において提案されているためである。

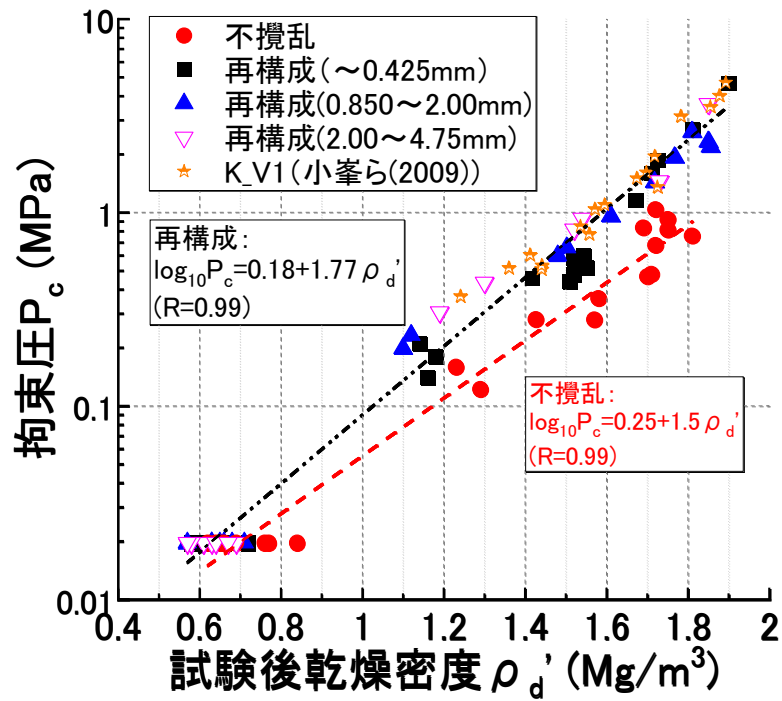


図 7-6 月布産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

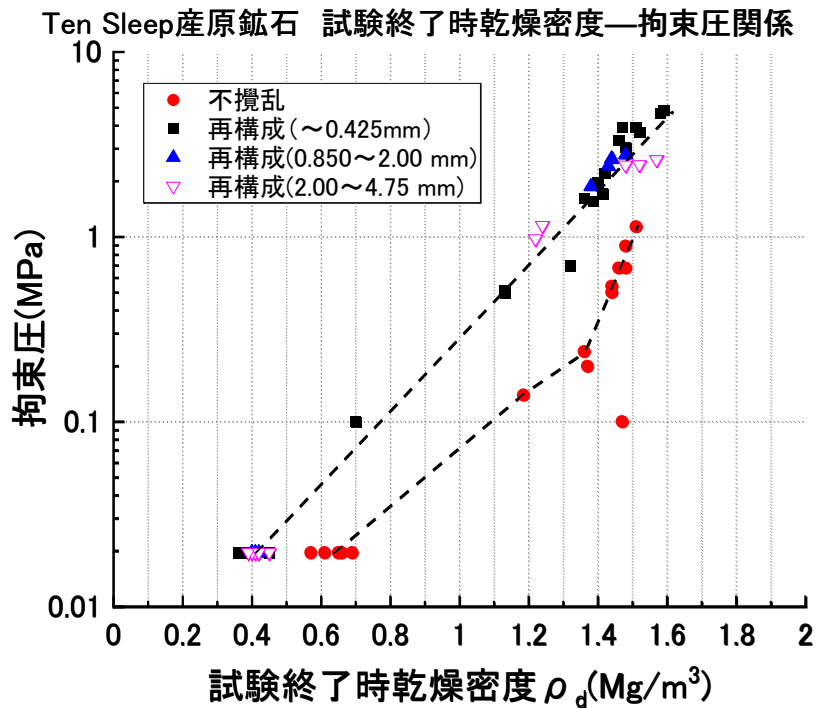


図 7-7 Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

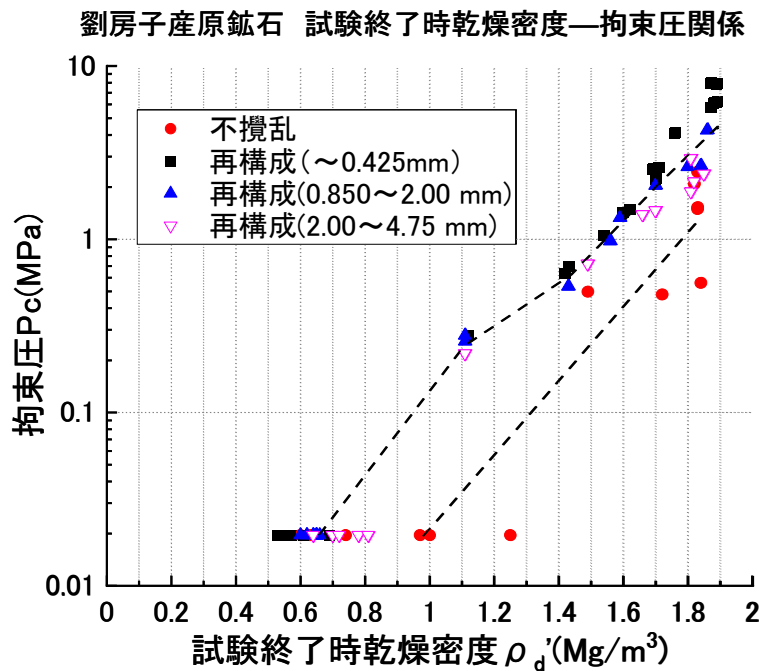


図 7-8 劉房子産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

図 7-6 には、K_V1 の自己シール性実験結果⁹⁾を併記した。これより、再構成供試体と K_V1 供試体の拘束圧—乾燥密度関係には高い整合性が見受けられる。また、再構成供試体と K_V1 供試体、および不攪乱供試体における、 P_c と ρ_d' の実験関係式が一義的に示された。このことから、拘束条件に伴う乾燥密度の変動範囲が想定されれば、膠結作用を受けて変質した場合の発生圧力（拘束圧）の応答をこの関係から示すことができる。

そして、図 7-6～図 7-8 中に示している、再構成供試体と不攪乱供試体のプロットに関する近似折れ線を見ると、月布産原鉱石に比べて、Ten Sleep 産原鉱石・劉房子産原鉱石の方が折れ線間のギャップが大きくなっている傾向が見取れる。これは、原鉱石の地質年代が古くなるにつれてギャップが大きくなっており、地質年代に応じて原鉱石中の膠結作用の影響が強まり、膨潤特性の低下幅が大きくなったと推察する。本検討における拘束条件下では、不攪乱供試体の拘束圧は再構成供試体に比べて 1/2 程度であったが、緩衝材が膠結作用を受けた場合でも、膨潤変形に伴う一定の圧力の発揮が期待できることが示された。

7.3 本研究で想定するシナリオと自己修復性評価手法

続いて、地層処分事業の開始から数千年～数万年が経過し、オーバーパックスの腐食、水素ガスの破過、緩衝材中の膠結作用の進行に伴う膨潤特性の低下の一連の経時変化を、図を用いながら説明する。一例として、緩衝材が図 7-9 のような経時に伴う状態変化をたどると想定した場合に、緩衝材の乾燥密度—拘束圧の関係に基づいた自己修復性の設計に関して、月布産原鉱石の試験終了時乾燥密度—拘束圧関係（図 7-6）を用いた概念を図 7-10 として

示す。

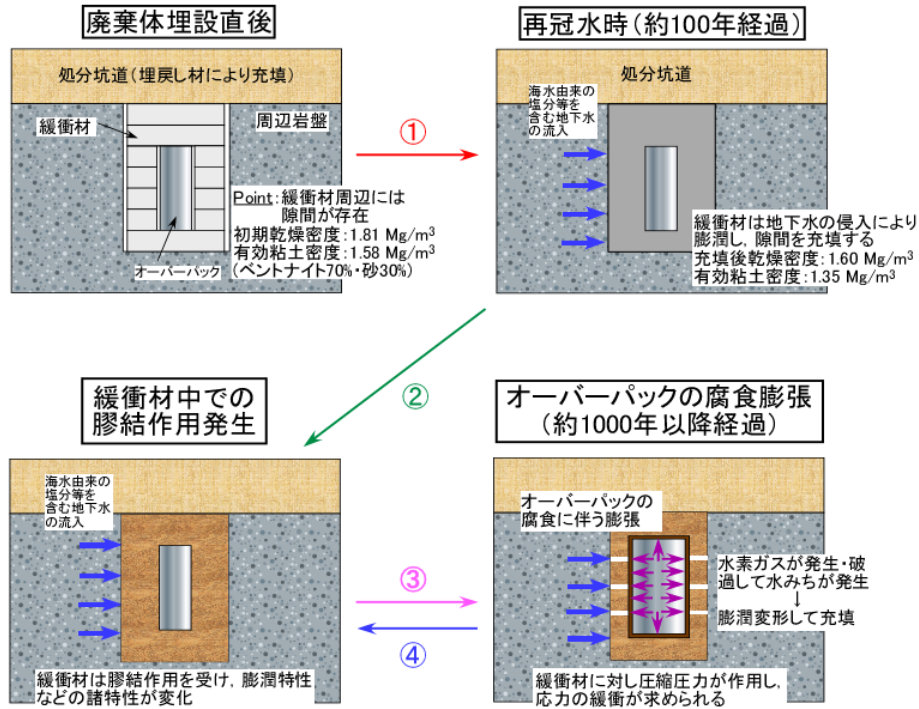


図 7-9 想定される緩衝材の経時的な状態変化

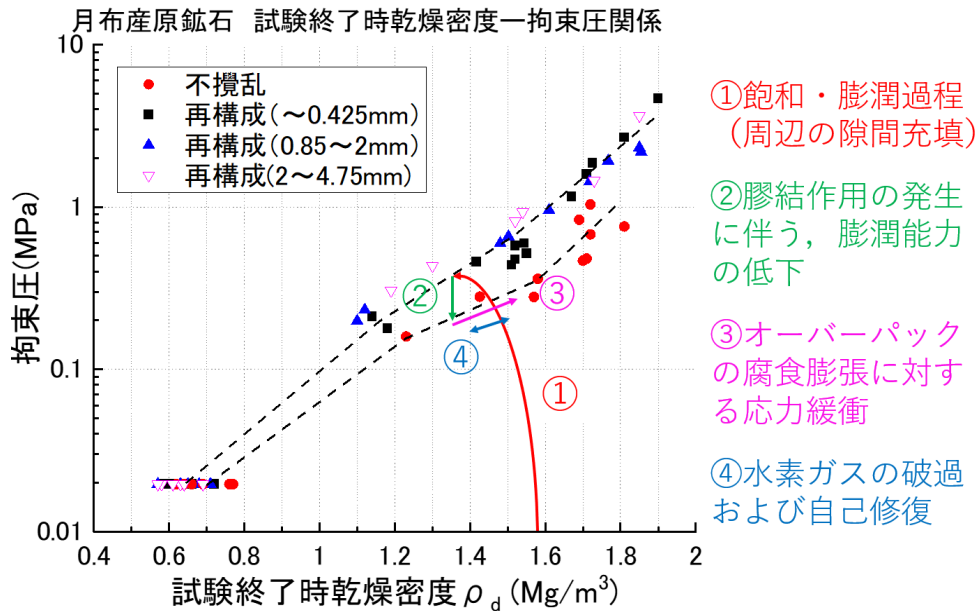


図 7-10 緩衝材の経時的な状態変化に伴う乾燥密度-拘束圧関係の変化概念図

ベントナイト系材料が締固められてブロックとして製作され、緩衝材として処分孔に設置される場合、参考文献1)および3)を踏まえると、初期の乾燥密度は 1.81 Mg/m^3 であり、ベントナイト：砂=7：3の配合であるため、有効粘土密度（ベントナイトのみの乾燥密度）は 1.58 Mg/m^3 と計算される。再冠水に伴って膨潤変形し、緩衝材とオーバーパック・周辺岩盤との間の隙間を充填し、岩盤等の変形を考慮しない場合、充填後の乾燥密度は 1.60 Mg/m^3 、有効粘土密度は 1.35 Mg/m^3 となる^{1),3)}（図7-9、図7-10中の①に該当）。時間経過とともに、緩衝材中において膠結作用が発生し、膨潤特性などの諸特性が変化する（②に該当）。その後、1000年経過以降においてオーバーパックの腐食・膨張が発生し、膨張に伴って緩衝材に対して圧縮方向に働く圧力が作用して応力を緩衝することが求められる（③に該当）。また、腐食とともに発生した水素ガスが破過して、水みちとなりうる隙間が発生した場合、一時的に隙間周囲の乾燥密度が上昇し、その後膨潤変形により乾燥密度が戻るという応答があると考えられる（④に該当）。このように、本研究で得られた乾燥密度—拘束圧の関係を用いて、緩衝材の自己修復性に関して、膠結作用のような長期的な変質現象を考慮した設計を行うことができると考えられる。なお、本提案においては、膠結作用の発生に伴う変質がオーバーパックの腐食・膨張に先立って発生すると想定しているが、これは膠結作用によって緩衝材の膨潤特性が低下してしまった場合を工学的に危険側で想定したものであり、どちらの現象が先立って発生するかは今後解明すべき課題である。

最後に、図7-6～図7-8で示した、各原鉱石における試験終了時乾燥密度—拘束圧の関係において、緩衝材が周辺の隙間を充填した際の実効粘土密度である 1.35 Mg/m^3 における不攪乱供試体と再構成供試体の拘束圧の比率を算出し、原鉱石の地質年代を用いて整理したのが図7-11である。

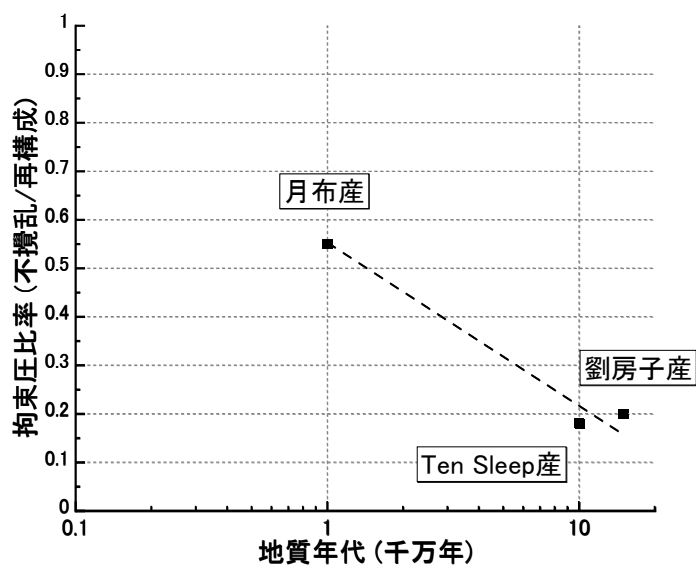


図 7-11 原鉱石の地質年代-拘束圧の比率（不攪乱供試体/再構成供試体）関係

これより、原鉱石の地質年代が古くなるにつれて、拘束圧の比率（不攪乱/再構成）が低下していることが分かる。このことから、ベントナイト系緩衝材においても、時間経過とともに膠結作用が進行して、同程度の乾燥密度においても拘束圧が低下することが考えられる。今後、地質年代の測定精度の問題や、原鉱石の置かれてきた環境等による影響を考慮することにより、本研究で提案した膠結作用の影響を考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を高精度化することが可能になる。

7.4 本章のまとめ

本章では、ベントナイト系緩衝材の設計フローを参照しながら本研究成果の適用先について述べるとともに、膨潤特性・自己シール性実験結果に基づく試験終了時供試体乾燥密度－拘束圧関係について整理した。そして、供試体乾燥密度－拘束圧関係と緩衝材の状態変化シナリオを組み合わせた、ベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法を構築した。本章で得られた主な成果を以下に示す。

- 1) 膨潤特性・自己シール性実験結果を試験終了時乾燥密度－拘束圧関係で整理したところ、いずれの原鉱石においても、不攪乱供試体・再構成供試体ともに拘束条件によらず拘束圧と試験終了時乾燥密度は一意的な関係にあることが分かった。このことから、本研究成果を適用すれば、緩衝材が膠結作用を場合においても乾燥密度が想定できれば、拘束圧（膨潤に伴う発生圧力）を予測することができると考えられる。
- 2) 操業初期→再冠水→膠結作用発生→オーバーパック腐食といった、緩衝材の状態変化シナリオを構築し、試験終了時乾燥密度－拘束圧関係と組み合わせることで、緩衝材の状態変化と拘束圧・乾燥密度の変化を紐づけ、ベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法を提案した。
- 3) 緩衝材の設計における、処分孔内の隙間充填後乾燥密度である 1.35 Mg/m^3 において、各原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体の拘束圧の比率を取ったところ、地質年代が古くなるのに応じて拘束圧の比率（不攪乱/再構成）が小さくなる傾向が見られた。このことから、年代を経るごとに膠結作用の影響が強まり、拘束圧（発生圧力）は低下するものと推察される。

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, -その4 人工バリアの設計と製作-, 原子力バックエンド研究, Vol.5, No.2, pp.103-121, 1999.
- 2) 原子力発電環境整備機構 (NUMO): 処分場の安全機能と技術要件 (2010年度), NUMO-TR-10-11, p. 24, 2011.
- 3) 核燃料サイクル開発機構: 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, -地層処分研究開発第2次取りまとめ-, 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- 4) 穂刈利之, 沖原光信, 石井卓, 小島圭二: ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察, 放射性廃棄物研究, Vol.3, No.1, 1996.
- 5) 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦: ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討—日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究成果報告— (共同研究), JAEA-Research 2010-025, pp.1-186, 2010.
- 6) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: 人工海水環境下におけるベントナイトの一次元自己シール性, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.2, 389-400, 2009.

第8章 結論

8.1 結論

本研究では、高レベル放射性廃棄物の地層処分において緩衝材として用いられる、ベントナイト系材料の超長期的変質現象として想定される膠結作用に伴う、膨潤特性・透水特性に及ぼす影響を定量的に評価するとともに、膠結作用に伴う緩衝材の特性変化を考慮した自己修復性評価手法を提案した。本研究において得られた成果を、以下に章ごとに示す。

第1章では、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の概要と、ベントナイト系材料に係る研究の現状について述べた。その中で、現状として初期性能の評価が鋭意進められている一方、地層処分では高温・高圧・塩類を含む地下水の流入など、バリア材は複雑な地下環境下において長期的に要求性能を満たすことを照査する必要がある、変質を考慮した材料特性・性能の評価方法を構築するための研究を行う必要性を述べた。そして、本研究の目的と構成を示した。

第2章では、使用したベントナイト原鉱石の基本的な性質および生成環境に関する文献調査について論じた。その結果、月布産・Ten Sleep産・劉房子産原鉱石のいずれも、続成変質作用により生成された可能性が高く、母岩の地質年代はそれぞれ約1000万年、約1億年、約1億5000万年であることが分かった。いずれの原鉱石も膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを約50%含有しており、随伴鉱物として石英やクリストバライト、斜長石、カルサイトが含有されており、それぞれの鉱物の構成割合を定量的に示した。吸着されている交換性陽イオンは Na^+ イオンが優勢であることが分かった。

第3章では、ベントナイト系緩衝材の要求性能に係る材料特性である膨潤特性に着目し、膨潤圧・膨潤変形特性および自己シール性における膠結作用の影響を実験的に評価した。その結果、いずれの原鉱石においても、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体よりも低く、その低下度合いは地質年代が古いほど大きくなる傾向が見られた。膨潤変形特性においては、地質年代の一番若い月布産原鉱石において、不攪乱供試体の一次元膨潤変形率は再構成供試体とほぼ変わらなかった一方、地質年代の古いTen Sleep産、劉房子産原鉱石では、不攪乱供試体の値は再構成供試体に比べて1/2程度に留まった。これらのことから、膨潤圧・膨潤変形特性において、地質年代が古くなるにつれて膠結作用の影響を強く受けていることが分かった。有効モンモリロナイト密度を用いて3種類の原鉱石を統一的に評価したところ、膨潤圧・一次元膨潤変形率ともに月布産・劉房子産原鉱石の傾向が一致していたのに対

し、Ten Sleep 産の値が他の 2 種類に比べて 2 倍程度高い傾向が見られた。この理由として、浸出陽イオンのうち Na⁺イオン量が 1.5 倍ほど高く、膨潤性に富んだためと推察された。また、供試体体積の 12.5%、25%の隙間を設けた自己シール性実験を実施したところ、いずれの原鉱石の不攪乱供試体においても充填後の発生圧力が発生しており、膠結作用を受けた場合でも緩衝材体積に対して 12.5%、25%程度の隙間であれば良好な充填性を有することが期待されることが分かった。

第 4 章では、膨潤圧特性とモンモリロナイト底面間隔との関係性を明らかにするため、膨潤圧実験前後に XRD 測定を行う XRD・膨潤圧連携試験を実施した。その結果、XRD・膨潤圧連携試験を行うことにより、膨潤圧試験前後の含水比変化とモンモリロナイト底面間隔の推移をリンクして捉えることができ、モンモリロナイト結晶層間の水和状態の変化により膨潤圧が増加していることを確認できた。含水比－モンモリロナイト底面間隔の関係において、いずれの原鉱石においても不攪乱供試体と再構成供試体の間に差異は見受けられなかった。すなわち、底面間隔が大きく変わるほどの水和状態の差は生じてはいないものの、膨潤圧に大幅な差異が生じることが推察された。また、月布産原鉱石において同一含水比の不攪乱供試体と再構成供試体のピーク形状を比較したところ、不攪乱供試体の方がモンモリロナイト結晶層間中に存在している水分子数が少ないことが示された。これより、膠結作用によりモンモリロナイト結晶層間の膨潤が低下していると考えられ、これにより膨潤圧が低下したと推察された。

第 5 章では、ベントナイト原鉱石の岩片・薄片試料を作製し、前者については SEM による土粒子骨格観察を、後者については偏光顕微鏡観察と SEM・EDS 分析による鉱物同定と元素マッピングを行った。その結果、岩片の SEM 観察により、粒子のすりつぶしを経ている再構成供試体に比べて、不攪乱供試体の方が土粒子・鉱物表面の形状が複雑であることや、同一の乾燥密度においても再構成供試体の方がマクロな空隙が見られた。このことから、不攪乱供試体の方が膠結作用により土粒子構造が複雑化しており、モンモリロナイト結晶層間の吸水・膨潤が阻害されたものと推察された。また、月布産原鉱石から作製した薄片に対して SEM・EDS 分析を行ったところ、土粒子間の膠着物質として有力なのは石英等のシリカ系鉱物であり、粗粒鉱物間においてはモンモリロナイトも膠着に寄与していると推察された。

第 6 章では、ベントナイト系材料の透水試験方法の現状について述べ、試験期間の短縮化を目的として供試体厚さを 2 mm と極めて薄くした変水位透水試験装置を新たに開発した。その適用性を日本国内で標準的に用いられているベントナイト K_V1 を用いて確認したところ、厚さ 10 mm の供試体に比べて試験期間をおよそ 1/10 程度に短縮できることが明らかになるとともに、流速と動水勾配の関係から巨視的な水分移動現象はダルシー則を満たし

ていることがわかった。また、乾燥密度と透水係数の関係において既往検討と比較したところ、同様の傾向を示すとともに、特に圧密試験と比較して値のバラつきが小さいことが明らかになった。以上から、厚さ 2 mm 供試体を用いた変水位透水試験装置は適用性を有していると判断できた。また、月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体の透水係数を測定したところ、いずれの原鉱石においても透水係数はオーダーが変わるほどの差異や、地質年代に応じた差異の増大は見受けられなかった。この理由として、膠結作用によりモンモリロナイト結晶の膨潤が阻害される一方、間隙構造の複雑化により結果として透水特性が大きく変化しないためと推察された。また、有効モンモリロナイト密度で整理したところ、K_V1 も含めて共通した負の相関がみられ、透水特性を統一的に評価できることが示された。

第 7 章では、ベントナイト系緩衝材の設計フローを参照しながら本研究成果の適用先について述べるとともに、膨潤特性・自己シール性実験結果に基づく試験終了時供試体乾燥密度－拘束圧関係について整理した。その結果、いずれの原鉱石においても、不攪乱供試体・再構成供試体ともに拘束条件によらず拘束圧と試験終了時乾燥密度は一意的な関係にあることが分かった。このことから、本研究成果を適用することで、緩衝材が膠結作用を場合においても乾燥密度が想定できれば、拘束圧（膨潤に伴う発生圧力）の予測可能性が示された。また、操業初期→再冠水→膠結作用発生→オーバーパック腐食といった、緩衝材の状態変化シナリオを構築し、試験終了時乾燥密度－拘束圧関係と組み合わせることで、緩衝材の状態変化と拘束圧・乾燥密度の変化を紐づけ、ベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法を提案した。最後に、緩衝材の設計における、処分孔内の隙間充填後乾燥密度である 1.35 Mg/m^3 において、各原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体の拘束圧の比率を取ったところ、地質年代が古くなるのに応じて拘束圧の比率（不攪乱/再構成）が小さくなる傾向が見られた。このことから、年代を経るごとに膠結作用の影響が強まり、拘束圧（発生圧力）が低下する傾向が定量的に示された。

以上の研究成果より，以下の結論を得た．

- 1) ベントナイト系材料の膨潤特性・自己シール性においては，膠結作用により年代変化が生じ，初期状態に比べて低下する．しかし，低下度合いは最大でも 1/2 程度と失われる訳ではなく，体積に対して 25%程度の間隙や損傷が生じた場合においても，良好な充填性を期待できる．
- 2) ベントナイト系材料の透水特性においては，膠結作用を受けた場合でも初期状態とほぼ変わらない性能を期待できる．膠結作用を受けた場合，モンモリロナイト結晶層間の吸水・膨潤が阻害されるものの，土粒子構造が複雑化することにより低透水性は維持されると考えられる．
- 3) 拘束条件の差異に因らず，膠結作用を受けた場合と受けていない場合において，それぞれ拘束圧と乾燥密度の間には一意な関係がある．これにより，膠結作用を受けた場合においても，乾燥密度の変動が予測できれば拘束圧の低下も考慮した評価ができる．また，高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト系緩衝材の状態変化シナリオと本研究で得られた拘束圧－乾燥密度関係を組み合わせることで，膠結作用の影響を考慮した自己修復性評価手法が構築可能である．

本研究成果から，長期的な変質現象を室内実験のみで再現・評価することは困難であるが，地質学的アプローチであるナチュラルアナログを援用して自然環境中から類似物・類似現象を見出して特性を評価することにより，長期的な変質現象に伴う特性・性能の年代変化について評価可能であることが示された．本研究成果は，長期的なバリア性能評価が必要不可欠である高レベル放射性廃棄物の地層処分事業に対して，安全性評価の観点から有用な成果である．現状の土木工学・地盤工学において，土質材料を含めた各種材料の変質に伴う年代変化を考慮した性能評価方法や概念は未だ確立されておらず，モニタリングによる性状変化の把握のみが，材料や構造物の性能における年代変化の評価に対する有効策である．しかし，本研究のようなアプローチをとることにより，材料や構造物の設計や建設段階から，将来的な性能変化の把握や，定量性を持った供用期間の設定が可能になると考えられる．このように，地層処分事業のみならず，土木工学全般における設計・性能評価方法の高度化に対して，本研究成果は有意義なものである．

謝 辞

本論文は、筆者が早稲田大学・地盤工学研究室に所属した学部4年生から約6年間の研究成果を取りまとめたものです。

本論文の執筆にあたり、6年間ご指導・ご鞭撻を頂きました早稲田大学理工学術院教授・小峯秀雄先生に感謝申し上げます。先生からは、研究者としての心構えを教わりました。先生のもとで研究を行う機会を得られたからこそ、今の自分があります。これから先、独立した一人の研究者として、また教育者として活動していきますが、地盤研で学んだことをもとに、真に社会に貢献できる人材になれるよう一層努力してまいります。これからも宜しくお願い致します。

早稲田大学理工学術院教授・赤木寛一先生、岩波基先生、山崎淳司先生には、本論文の作成において、貴重なご意見やご指導を賜りました。誠に有難うございました。

早稲田大学 後藤茂先生には、常に貴重なご意見とあたたかいお言葉を頂きました。多くのご心配をお掛けしてしまっただけかと思いましたが、最終的に公聴会にたどり着くことができたことを報告できた時は、とても嬉しく、ほっとした気持ちになりました。ご指導を頂き、ありがとうございました。

早稲田大学理工学術院国際理工学センター准教授・王海龍先生には、研究のいろはを教え込んで頂きました。実験装置や測定へのこだわり、データの整理方法や示し方、論文を書く上での作法など、先生から学ばせて頂いたことは本論文の作成に必要不可欠でした。本当にありがとうございました。

共同研究者であるクニミネ工業株式会社・伊藤雅和様、諸留章二様には、ベントナイト原鉱石サンプルの入手にご尽力いただくとともに、粘土鉱物学の基本や各種試験方法を懇切丁寧にご指導いただきました。戸田建設株式会社・関口高志様には、DMや論文投稿の度にご意見やご添削を賜りました。心より感謝申し上げます。

早稲田大学物性計測センターラボ、そして環境保全センターの皆様には、各種化学分析の測定に際し、多大なご助力を賜りました。丁寧に装置の取り扱い方法をご教示頂いたおかげで、本研究を行う上で必要不可欠であったXRDやSEM、ICPなどを用いた分析を遂行し、貴重なデータを得ることができました。ありがとうございました。

林岩石鉱物特殊技術研究所・林政彦先生には、岩石の薄片試料作製および分析において多

大なお尽力を賜りました。薄片試料の作製について懇切丁寧にご指導頂き、偏光顕微鏡で岩石の組織観察や黄鉄鉱などの含有鉱物の同定ができた時は、とても感動したことを覚えております。貴重な技術をご教示頂き、ありがとうございました。

早稲田大学工作実験室の皆様には、精密な試験装置を迅速にご作製頂くとともに、装置製作のアドバイスを頂きました。皆様のお力がなければ、2020年上半期における研究活動維持の極めて困難な状況の中、透水試験装置を拡充して成果を挙げることは絶対にできませんでした。本当にありがとうございました。

誠研舎・日暮秀光様には、高圧圧密実験装置や膨潤圧実験装置、静的締固め装置など、各種装置の製作・メンテナンスにおいて多大なお助力を賜りました。最初は装置の取り扱いについて全く分からない状況でしたが、幾度となくお越しいただいて教えて頂いたことで、着実に理解を深めて操作できるようになりました。あたたかいご指導を頂き、ありがとうございました。

地盤工学研究室 DM メンバーの皆様には、常に DM にて真剣なご意見・ご指摘を頂きました。4年生時は、皆様との議論に耐えうる資料を作りたいと、緊張感をもって資料作成にあたっていたことを今でも時折思い出します。学会等でも発表や質疑応答は経験しておりますが、今の自分の基礎を作って頂いたのは間違いなく DM メンバーの皆様のご指導の賜物です。コロナ禍によりなかなか対面でお会いできないのが残念ですが、これから色々な場面で皆様にお目にかかれるのを楽しみにしております。

地盤工学研究室の先輩、後輩、そして同期の皆様には、いつも楽しい時間と刺激を頂きました。また、皆様が OB・OG になられた後も、ご活躍ぶりを伺うたびに、自分も負けていけないと奮起させて頂きました。これからも、宜しくお願い致します。

そして、これまでの27年の人生において、惜しみなく愛情を注いで頂き、私の決断やわがままを受け入れてくれた父・伊藤永喜、母・伊藤幸絵、弟・伊藤光矢には、感謝の申しようもありません。たくさん迷惑をかけましたが、ここまで育ててくれて本当にありがとうございました。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名：伊藤 大知

印

(2022年 1月 現在)

| 種類別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------|--|
| 1. 論文 | |
| ○論文 | <u>Daichi Ito</u> , Hideo Komine, "Experimental study to elucidate cementation effect on swelling pressure and montmorillonite basal spacing of bentonite ore", 20th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering (20th ICSMGE), 2022, 5, Sydney, Australia (掲載決定) |
| ○論文 | 伊藤大知, 小峯秀雄: ベントナイト原鉱石の測定結果に基づく膨潤特性における膠結作用の影響評価, 土木学会論文集C(地圏工学), 76, 3, 295-305, 2020, 9. |
| ○論文 | Hailong Wang, Takumi Shirakawabe, Hideo Komine, <u>Daichi Ito</u> , Takahiro Gotoh, Yuta Ichikawa, Qiao Chen, "Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure", Canadian Geotechnical Journal, 57, 921-932, 2019, 8. |
| 2. 講演 | |
| ○講演 | 伊藤大知, 貞松暁大, 小峯秀雄, 王海龍: 締固めたベントナイトの透水係数測定に向けた厚さ2mm供試体を用いた変水位透水試験の適用性評価, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS12-27, 2021, 9. |
| ○講演 | 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄: 種々の拘束条件におけるベントナイト原鉱石の拘束圧—乾燥密度関係の評価, 第56回地盤工学研究発表会(オンライン), 13-6-4-02, 2021, 7. |
| ○講演 | <u>Daichi Ito</u> , Hideo Komine, Hailong Wang, "Experimental study on effect by cementation on self-sealing capability of bentonite buffer material", E3S Web of Conferences 205, 10004, 2nd International conference on energy geotechnics (ICEGT2020), 2020, 11, San Diego, United States of America. |
| ○講演 | 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂: モンモリロナイト底面間隔から観たベントナイト原鉱石の膨潤圧における膠結作用の影響評価, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会(オンライン), CS12-49, 2020, 9. |
| ○講演 | 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂: 破碎により粒径を変化させたベントナイト原鉱石の膨潤圧測定結果に基づく膠結作用の影響評価, 第55回地盤工学研究発表会(オンライン), 23-7-4-02, 2020, 7. |
| ○講演 | 伊藤大知, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 諸留章二, 関口高志, 北原慎也: 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, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会(高松), VII-134, 2019, 9. |
| ○講演 | 伊藤大知, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 諸留章二, 関口高志, 北原慎也: 固結したベントナイト系緩衝材の自己シール性能の維持に関する一考察, 第54回地盤工学研究発表会(さいたま), D-05, 1066, 2019, 7. |
| ○講演 | <u>Daichi Ito</u> , Hideo Komine, Shoji Morodome, Takashi Sekiguchi, Genta Miura, "Evaluating influence of cementation in bentonite buffer material based on the swelling properties of bentonite ore", Proceedings of the 8th International congress on environmental geotechnics, Vol.3, 97-104, Hanzhou, China, 2018, 11. |
| ○講演 | 伊藤大知, 小峯秀雄, 諸留章二, 関口高志, 三浦玄太: 生成年代の異なるベントナイト原鉱石の膨潤変形特性に基づく膠結作用の定量評価, 第53回地盤工学研究発表会(高松), D-05, 1149, 2295-2296, 2018, 7. |
| ○講演 | 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発表論文集(長崎), 16-6, 547-552, 2017, 9. |
| ○講演 | 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固結が高压圧密実験による透水係数測定に及ぼす影響, 土木学会第72回年次学術講演会(福岡), VII-056, 111-112, 2017, 9. |
| ○講演 | 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圧特性から観た緩衝材における膠結作用の定量評価の試み, 第52回地盤工学研究発表会(名古屋), D-05, 1036, 2067-2068, 2017, 7. |

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名：伊藤 大知

印

(2022年 1月 現在)

| 種類別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|--------|--|
| ○講演 | 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結晶構造分析による緩衝材の固結等長期変化の推察, 第13回地盤工学会関東支部発表会(東京), 364-367, 2016,10. |
| 3. その他 | |
| (研究費) | 日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究C 研究代表者(2021年4月～ 3か年) |
| (研究費) | 原子力環境整備促進・資金管理センター 放射性廃棄物の地層処分に係る萌芽的・基礎的な研究テーマに係る研究 研究代表者(2021年4月～ 2か年) |
| (研究費) | 鹿島学術振興財団 研究助成 研究代表者(2021年4月～ 2か年) |
| (研究費) | 環境地盤工学研究所 若手研究者研究助成金 研究代表者(2020年4月～ 1か年) |
| (講演) | 横井亨朱, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 鈴木清彦, 國弘彩, 疋田貴大: 各種産業副産物によるCO ₂ 固定化に関する実験的研究～CO ₂ 固定化の反応速度に及ぼす平均粒径とCa ²⁺ 溶出量の影響～, 第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集(オンライン), 6-3, 195-200, 2021,9. |
| (講演) | 國府田隆, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 氏家伸介, 成島誠一: 福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた超重泥水の電気比抵抗・比誘電率を用いたモニタリング技術の提案に関する基礎的研究, 第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集(オンライン), 5-6, 177-182, 2021,9. |
| (講演) | 根本大志, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 阿部慎太郎, 鈴木忠勝, 本間美湖, 氏家伸介, 成島誠一: 超重泥水を活用した燃料デブリの収納缶付き地下式中間保管施設の試案と収納缶取り出し可能性評価のための要素試験, 第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集(オンライン), 5-3, 163-168, 2021,9. |
| (講演) | 原崎智, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 氏家伸介, 成島誠一: 福島第一原子力発電所廃止措置に資する土質系材料「超重泥水」の処理・処分方法の構築—メチレンブルー溶液消費量の測定による超重泥水の含有粘土鉱物および構成材料の乾燥質量の定量評価方法—, 第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集(オンライン), 5-2, 155-162, 2021,9. |
| (講演) | 藤縄凱, 伊藤大知, 近藤誠, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 工藤寛史, 中村洋一, 高岡一章: 膨潤性粘土鉱物を含有する地盤を模擬した混合供試体の体積膨張に及ぼすスメクタイト含有率および初期含水比の影響, 第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集(オンライン), 4-4, 135-138, 2021,9. |
| (講演) | 根本大志, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 阿部慎太郎, 鈴木忠勝, 本間美湖, 氏家伸介, 成島誠一: 燃料デブリの中間保管状況における超重泥水からの収納缶取り出し時を想定した引き抜き抵抗測定, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS11-19, 2021,9. |
| (講演) | 横井亨朱, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂, 鈴木清彦, 國弘彩, 疋田貴大: 焼却炉由来の煤塵によるCO ₂ 固定化における含水比と反応速度の関係性の実験的評価, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), VII-14, 2021,9. |
| (講演) | 工藤寛史, 中村洋一, 藤縄凱, 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄, 亀谷裕志, 若林徹: 風化の影響を受けた自然地盤材料を対象とした膨潤特性の評価, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, III-321, 2021,9. |
| (講演) | 國府田隆, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 氏家伸介, 成島誠一: 燃料デブリの取り出しや中間保管に資する超重泥水の状態把握における電気比抵抗の有効性に関する調査, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), III-166, 2021,9. |
| (講演) | 山本有雅, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂, 伊藤大知, 関口高志, 北原慎也: 締固めたベントナイトの自己シール性に及ぼす吸水方向および隙間幅の影響の実験的調査, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), III-345, 2021,9. |
| (講演) | 藤縄凱, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 工藤寛史: スメクタイト系粘土鉱物含有地盤の体積膨張を想定した膨潤変形挙動に及ぼす初期乾燥密度および有効スメクタイト密度の影響評価, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), III-320, 2021,9. |
| (講演) | 原崎智, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 氏家伸介, 成島誠一: 燃料デブリ取り出しに資する超重泥水の処理・処分方法の提案—遠心分離による超重泥水の含有粘土鉱物および構成材料の分離・回収の試み—, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), III-330, 2021,9. |

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名：伊藤 大知

印

(2022年 1月 現在)

| 種類別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|------|---|
| (講演) | 木全祐輔, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知: 処分孔プラグを想定した砂・鉛玉・Na型ベントナイト混合土の放射線遮蔽性能に関する実験的調査, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS12-21, 2021,9. |
| (講演) | 近藤誠, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂, 山田淳夫: ベントナイト混合土の含水比調整における締固めを想定した色調の利用可能性, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), III-167, 2021,9. |
| (講演) | 金田舜, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知: 一次元的な熱移動を制御した熱伝導率測定方法によるNa型ベントナイトの熱伝導率の測定, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), III-335, 2021,9. |
| (講演) | 阮坤林, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍: 限定浸潤下で異なる溶液によって飽和したナトリウムベントナイトの膨潤圧と水拡散係数, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS2-38, 2021,9. |
| (講演) | 王海龍, 小峯秀雄, 伊藤大知: 締固めたベントナイトの膨潤圧発生に伴うモンモリロナイト底面間隔の遷移—その2, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS12-46, 2021,9. |
| (講演) | 龍原毅, 金丸奈美, 斉藤泰久, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知, 渡部厚, 園田真帆, 村田航大: 高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発(その1)～教材開発の研究開発スキームの紹介～, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS12-01, 2021,9. |
| (講演) | 園田真帆, 村田航大, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知, 渡部厚, 龍原毅, 金丸奈美, 斉藤泰久: 高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発(その2)～学生ブレインストーミングの結果に基づく必要事項抽出～, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS12-02, 2021,9. |
| (講演) | 村田航大, 園田真帆, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知, 渡部厚, 龍原毅, 金丸奈美, 斉藤泰久: 高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発(その3)～地盤中の水分移動の可視化と定量的理解のための手段～, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会(オンライン), CS12-03, 2021,9. |
| (講演) | 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知, 渡部厚, 龍原毅, 金丸奈美, 斉藤泰久, 園田真帆, 村田航大: 高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発(その4)～ベントナイト系緩衝材の材質感を実感する締固めデモ実験装置の試作～, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, CS12-04, 2021,9. |
| (講演) | 根本大志, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 阿部慎太郎, 鈴木忠勝, 本間美湖, 氏家伸介, 成島誠一: 超重泥水からの燃料デブリ収納缶取り出しを想定した引き抜き抵抗の要素測定のための実験条件の影響評価, 第56回地盤工学研究発表会(オンライン), 13-4-4-01, 2021,7. |
| (講演) | 國府田隆, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂, 伊藤大知, 氏家伸介, 成島誠一: 燃料デブリの取り出しや中間保管に資する超重泥水の電気比抵抗を用いた状態把握モデルの提案, 第56回地盤工学研究発表会(オンライン), 12-2-3-03, 2021,7. |
| (講演) | 横井亨朱, 伊藤大知, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 鈴木清彦, 國弘彩, 疋田貴大: 遊離Caを含む産業副産物を用いたCO ₂ 固定化における攪拌の有無によるCO ₂ 固定化量の比較, 第56回地盤工学研究発表会(オンライン), 13-3-1-02, 2021,7. |
| (講演) | 齋藤七菜子, 伊藤大知, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 関口高志, 北原慎也: 高レベル放射性廃棄物の地層処分における隙間充填材料を想定した珪砂のベントナイトろ過特性に関する実験的研究, 第56回地盤工学研究発表会(オンライン), 12-4-2-06, 2021,7. |
| (総説) | 王海龍, 小峯秀雄, 伊藤大知, 後藤隆弘: 締固めたベントナイトの膨潤圧特性の究明に向けたX線回折を用いた実験手法の開発, 地盤工学会誌, 69(1), 48-51, 2021,1. |
| | その他, 講演33件 |