

高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討(その2)[†]古市光昭^{††} 奥津一夫^{†††} 田中益弘^{††††}

高レベル放射性廃棄物の地層処分では立坑・坑道および周辺岩盤の緩み域が核種の卓越移行経路とならないように埋戻し材、プラグおよびグラウトを組み合わせたシステム（以下シーリングシステム）により適切にシールする必要がある。本論文は、シーリングシステムの設計を例示したものである。また、シーリングシステムの成立性を議論する上でコンクリート支保工の埋戻し材性能への影響を評価する必要があるため、これについて実験的に検討した結果もあわせて報告する。

Keywords: 放射性廃棄物処分, 埋戻し, シーリングシステム, 埋戻し材, プラグ, グラウト, ベントナイト

In geological disposal, it is necessary to prevent shaft, tunnel and their environs to be a main passage of radioactive nuclide transfer by sealing system combined backfill, plug and grout. This paper shows an example of design of sealing system. Since calcium ion from concrete tunnel support is considered to change the property of sealing material, the effect of concrete is evaluated by experimental study.

Keywords: radioactive waste disposal, sealing, sealing system, backfill material, plug, grout, bentonite

1 はじめに

21世紀を目前にむかえた今日、開発途上国を中心とした人口増加と生活水準の向上によりエネルギー需要が増加している。一方、この増加は地球温暖化や酸性雨被害などの深刻な地球環境問題をもたらしている。この状況下、原子力発電はクリーンなエネルギーを大量に供給できることから重要なエネルギー源に位置づけられているが、その反面、高レベル放射性廃棄物（以下高レベル廃棄物）処分が世界的に最重要課題としてクローズアップされている。

わが国でも高レベル廃棄物処分は原子力開発における最重要課題に位置づけられており、2000年に高レベル廃棄物処分手業を推進するための実施主体を設立し、2030年代から遅くとも2040年代半ばまでを目途に操業を開始することとしている[1]。また、高レベル廃棄物処分に関する研究開発の中核機関に位置づけられている核燃料サイクル開発機構（以下サイクル機構）は、2000年までに研究開発の成果をとりまとめ、これを国が評価することとしている[2]。

高レベル廃棄物の地層処分においては処分地点の選定・調査後の作業を建設・操業・埋戻しに大別することができる。このうち、埋戻しとは高レベル廃棄物を処分するために地下に作られた空間のうち高レベル廃棄物と緩衝材以外の部分を所定の品質で埋ることである。またシーリングシステムとは、埋戻し部が所定の性能、すなわち、核種の卓越移行経路にならないようにするための埋戻し方法である。

シーリングシステムについては、高レベル廃棄物処分場の設計における主要項目として海外ではスウェーデンのSKB（スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社）によるKBS-3[6]および地層処分総合性能評価報告書(SK91)[7]、カナダのAECL（カナダ原子力公社）によるカナダ核燃料廃棄物の処分概念に係る環境影響評価報告書[8]、スイスのNAGRA（スイス放射性廃棄物管理共同組合）によるProject Gewähr[9]およびkristallin-1[10]などでその検討結果が述べられている。しかし、いずれも概念を示しているにすぎず定量的な検討内容は報告されていない。日本においては動力炉・核燃料開発事業団（現サイクル機構）による平成3年度第1次技術レポート[3]でシーリングシステムの概念が示され、その後の研究[4,5]によって、処分場の安全確保の考え方をもとにシーリングシステムを構成する要素技術が地下水流動および核種移行の観点から定量的に評価されている。

本報告は、処分場の安全確保の考え方をベースにシーリングシステムのレイアウト・仕様を例示したものである。また、シーリングシステムの主要材料としてベントナイト混合土を考えていることから、その成立性を議論する上でコンクリート支保工の埋戻し材性能への影響を評価する必要があるため、これについて実験的に検討した結果もあわせて報告するものである。

なお、高レベル廃棄物の定置方法については、現在坑道内定置（横置き）とピット内定置（縦置き）の2つのオプションが考えられており、本報告はピット内定置オプションをベースに検討した。

2 シーリングシステムの考え方

高レベル廃棄物の地層処分の概念は、廃棄物を地下数百メートル以深の安定な地層中に埋設し、人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、核種移行に対して長期の安全性を確保することを基本とし

[†] The study of the sealing system of high level radioactive waste repository (Part2), by Mitsunori Furuichi (furuichi@pub.kajima.co.jp), Kazuo Okutsu and Masuhiro Tanaka

^{††} 鹿島建設建設総事業本部原子力室 Kajima Corporation Nuclear Power Department 〒107-8502 港区赤坂 6-5-30

^{†††} 鹿島建設建設総事業本土木設計本部 Kajima Corporation Civil Engineering Design Dept. 〒107-8502 港区赤坂 6-5-30

^{††††} 鹿島建設技術研究所 Kajima Technical Research Institute 〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1

ている。

これまでの研究では、人工バリアおよび周辺岩盤（ニアフィールド）には核種の封じ込め性能が大きく期待できるとされており、天然バリアの核種封じ込め性能に影響を与えるような大きな断層破砕帯に至るまでの天然バリアの核種移行評価が重要とされている (Fig.1) [3,6,10]。

多重バリアとしての性能を期待する範囲内において、天然バリアへの期待の度合は天然バリアの条件、すなわち、岩盤の透水係数や割れ目状況によって決められるものであるが、評価点と処分エリアを結ぶ埋戻し部 (Fig.1 斜線部) の核種移行遅延性能を天然バリアと同等以上にしておくことによって安全評価においては埋戻し部と天然バリアを一体として取り扱うことが可能になる。

このため、シーリングシステムの設計においては、安全評価の地下水シナリオに対する安全性確保の観点から、掘削した空間を適切に埋戻し、多重バリアとしての性能を期待する範囲内に核種の卓越移行経路を作らないことが重要である。また、接近シナリオに対する安全性確保の観点から、処分場に人間を不用意に接近させないことが重要である。さらに、施工中に埋戻し材の品質を低下させないために、埋戻し材が地下水によってはらみ出しあるいは流出するのを防ぐ必要がある。

これらの要求性能のうち、埋戻し部を核種の卓越移行経路にしないためには以下の3つの要素技術 (Fig.2) を合理的に組み合わせることが現時点で最も有効なシーリングシステムと考える[5]。

- ① 難透水性／膨潤性材料による立坑・坑道の充填
- ② 難透水性／高膨潤性材料のプラグによる岩盤緩み域および埋戻し材と岩盤の境界部の地下水流れの遮断
- ③ グラウトによるプラグ周辺岩盤緩み域の透水性の改善

また、人間侵入の抑制および施工中の埋戻し材の保護に対しては力学的に優れているコンクリートプラグの採用を考える。

これらの要素技術をもとに処分場の要求性能と要求性能に対応するシーリングシステムをとりまとめると Fig.3 のようになる。すなわち、多重バリアとしての性能

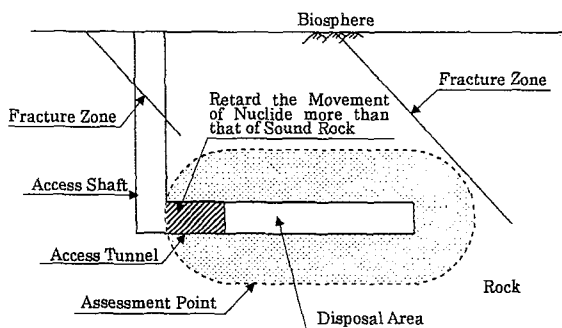


Fig.1 Assessment area of sealing system

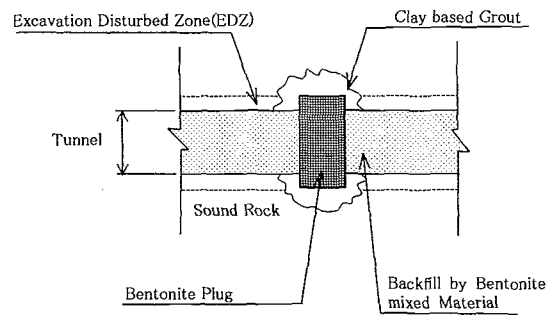


Fig.2 Components of sealing technology

を期待する範囲内の坑道埋戻し部の地下水流れが健全岩盤部より速くならないようにアクセス立坑に接続するアクセス坑道にはベントナイトプラグを設置する。アクセス立坑上部には人間が不用意に処分場に侵入することを防ぐためにコンクリートプラグを設置する。また、処分坑道の両端には施工中の埋戻し材を保護する目的でコンクリートプラグを設置する。

断層破砕帯については、基本的にサイト選定段階において大きい断層破砕帯は避けるが、小さい断層破砕帯は存在する可能性もあることから、処分場内に断層破砕帯が存在する場合も考慮してシーリングシステムを考える。すなわち、処分場内に断層破砕帯が存在する場合、断層破砕帯を通過する坑道にベントナイトプラグを設置する。ベントナイトプラグの個数については、周辺岩盤の透水係数や水理学的緩み状況に依存するが、日本の平均的地質（透水係数 $k=10^{-8}$ m/sec）においては片側1個づつで有効であると考え[5]。

3 シーリングシステムの仕様検討

2 で示したシーリングシステムを具体化するために埋戻し材とプラグの材料仕様について検討する。

3.1 埋戻し材

3.1.1 埋戻し材の透水性

埋戻し材中の地下水流れは、ベントナイト混合土の透水係数に支配されるが既往研究[4]によると、ベントナイト配合率と透水係数の間には基本的に Fig.4 の関係がある。すなわち、ベントナイトまたは砂・ベントナイトにおいて乾燥密度が $\rho_d=1.6$ t/m³以上、礫・砂・ベントナイトにおいて乾燥密度が $\rho_d=1.8$ t/m³以上のベントナイト混合土の場合、ベントナイト配合率が $B_m=15$ %程度で透水係数は $k=10^{-11}$ m/sec 以下となり、それ以上ベントナイト配合率を増加させても透水係数は大きく改善されることがわかる。また、日本の地下100 m以深の岩盤の透水

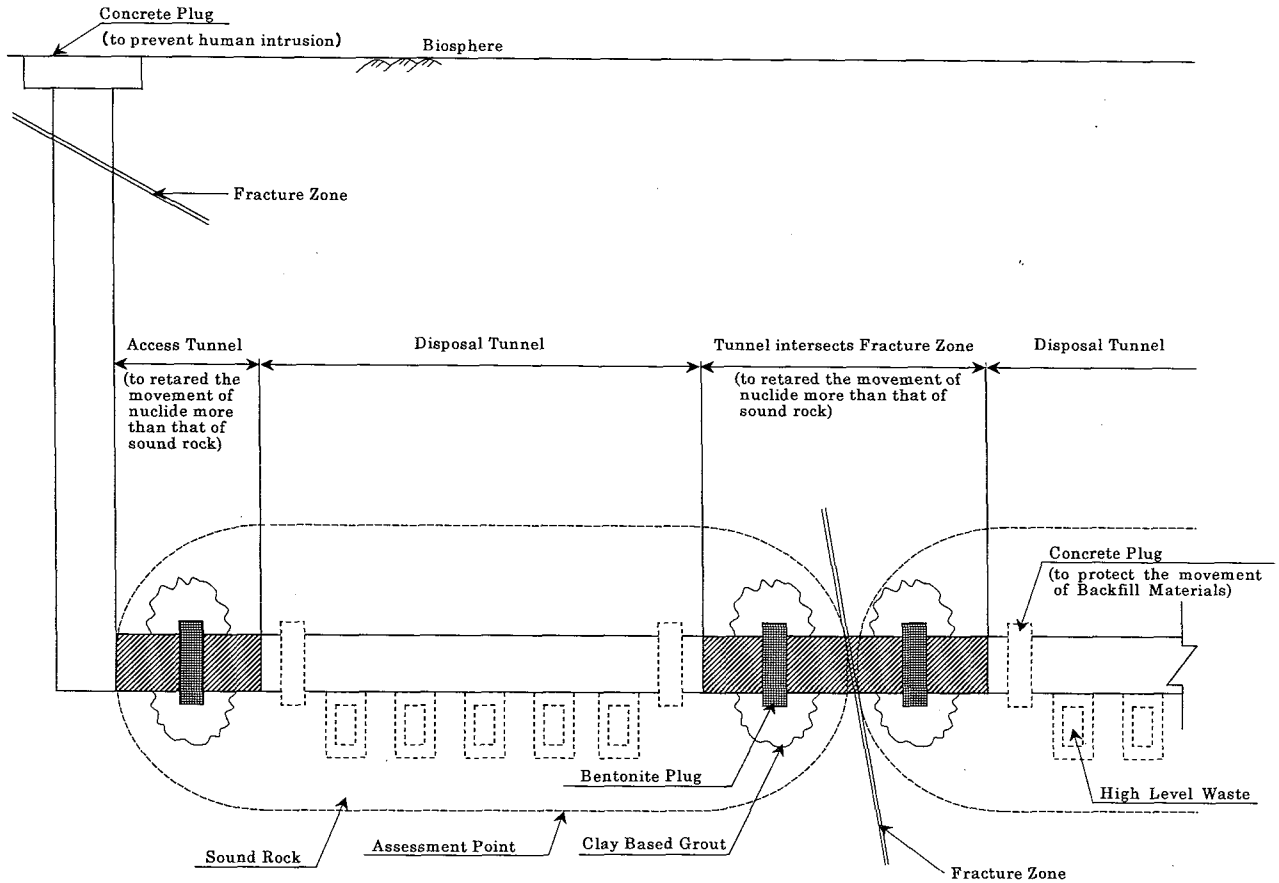


Fig.3 Requirements for sealing system

係数は文献[3]の調査の範囲では $k=10^{-5} \sim 10^{-9}$ m/sec の範囲に分布し、 $k=10^{-6} \sim 10^{-8}$ m/sec の範囲が支配的であるが、これと比較しても所定の密度で締め固めたベントナイト配合率が $B_m=15$ %のベントナイト混合土の透水係数(10^{-11} m/sec)は十分低い値と言える。

3.1.2 埋戻し材の膨潤性

埋戻し材と周辺岩盤の隙間の地下水流れは、ベントナイト混合土の膨潤による自己シール性に支配される。

ベントナイト混合土の膨潤圧はベントナイトの種類、ベントナイト配合率、レキ・砂混入率、乾燥密度、含水比などによって変化する。既往の研究[4]によると Na ベントナイトの最大膨潤圧はベントナイト配合率と Fig.5 に示す関係がある。この Fig.5 から、例えばベントナイト配合率が $B_m=15\%$ の砂・ベントナイト混合土またはレキ・砂・ベントナイト混合土に発生する最大膨潤圧は $P_{max} = 0.1$ Mpa 程度が得られることがわかる。

また、Na ベントナイトからなるベントナイト混合土の最大膨潤率 S_{max} については、所定の密度が得られるように計量した自然含水比 6.2 % の Na ベントナイトとケイ砂 (3号・5号) を加圧成型した供試体 (径 6 cm × 厚さ 0.5 cm) を用いて膨潤量試験を実施した。供試体を上下から吸水させ膨潤量の経時変化を測定した。膨潤量の増加割合が

0.01 mm/day になった時点でほぼ平衡状態に達したと判断して試験を終了し、測定された最終の膨潤量を供試体作製時の供試体厚さで除して最大膨潤率 S_{max} とした。この結果、Fig.6 に示すベントナイト配合率 (B_m) と最大膨潤率 (S_{max}) の関係が得られた。この Fig.6 から乾燥密度が $\rho_d = 1.8$ t/m³、ベントナイト配合率が $B_m=15$ % のベントナイト混合土の場合、自由膨潤率として $S_{max}=40 \sim 50$ % が期待できることがわかる。

以上より、埋戻し部に仮にすき間が生じてもベントナイト混合土の膨潤性によって自己シールされるものと考

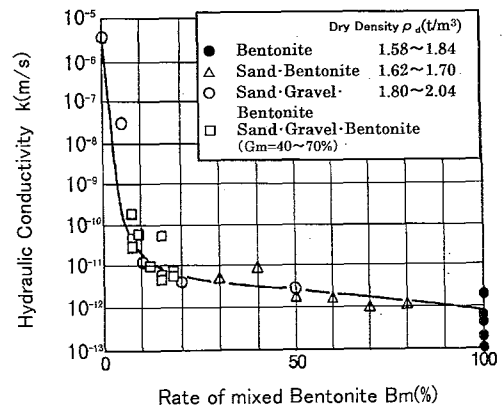


Fig.4 Relationship between hydraulic conductivity (k) and rate of mixed bentonite (Bm)

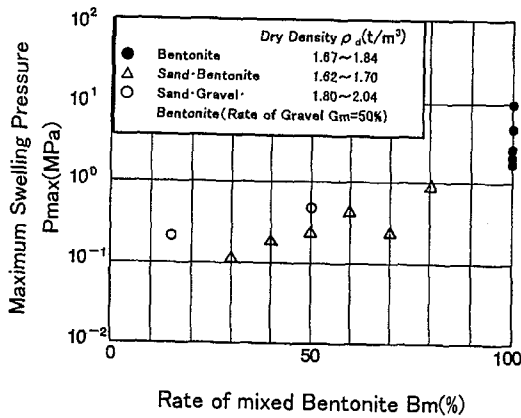


Fig.5 Relationship between maximum swelling pressure (P_{max}) and rate of mixed bentonite (B_m)

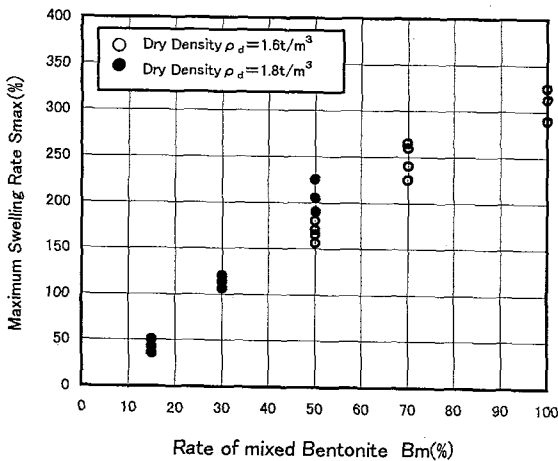


Fig.6 Relationship between maximum swelling rate (S_{max}) and rate of mixed bentonite (B_m)

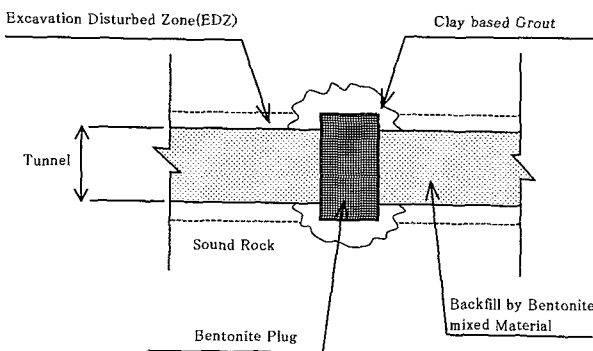


Fig.7 Concept of bentonite plug

えられるが、コンクリート支保工の劣化部や岩盤ゆるみ域の透水性の改善への寄与についてはさらに検討が必要である。

3.2 プラグ

立坑・坑道に設置されるプラグには以下の2項に要約される水理学的役割と力学的役割が期待される。また、欧米主要国で候補材料としてコンクリートとベントナイト混合土を選択している[6,8-10].

- ① 掘削による岩盤緩み域や埋戻し材と周辺岩盤の境界部に生じ得る水みちの遮断
- ② シーリング完了部分のベントナイト混合土の地下水によるはらみ出し・流出に対する保護(仮設的役割)

① については止水性能の確保が目的であるので透水性を低く抑えられるベントナイト系プラグが優れている。すなわち、ベントナイトプラグを設置し、プラグ周辺岩盤にグラウトを注入することで、シーリング部が健全岩盤と同オーダーの難透水性を確保することを目標とする(Fig.7)。例として多孔質媒体近似モデルを用いた研究[5]では透水系数 ($k=10^{-8}$ m/sec) を持つような岩盤に対して埋戻し材(ベントナイト混合土, ベントナイト配合率 $B_m=15\%$, 透水系数 $k=10^{-9}$ m/sec) とベントナイトプラグ(ベントナイト混合土, ベントナイト配合率 $B_m=70\%$, 透水系数 $k=10^{-10}$ m/sec) を組み合わせることによって周辺健全岩盤と同等の難透水性と核種移行遅延性を確保できることが示されている。なお、本論文ではコンクリート支保工の透水系数が長期的に岩盤緩み域と同等以下(透水系数 $k=10^{-6}$ m/sec 以下) に維持されるものと考えている。

② についてはプラグ自体が埋戻し材の膨潤圧に耐えられる強度が必要なことより力学的強度の面で優れているコンクリート系プラグの採用が望ましい。ただし、コンクリートのベントナイト系材料への化学的影響について検討しておく必要があり、これについては4で述べる。

3.3 グラウト

グラウトの目的としては以下の①, ②があげられるが、建設段階の工事対策(止水対策)の役割もあわせて考えると③が追加されることになる。

- ① プラグ周辺岩盤に生じ得る緩み域の透水性の改善
- ② 予測しきれない割れ目・断層破碎帯の透水性の改善
- ③ 建設段階の一時的な止水対策

①, ②に対しては候補材料としてセメント系材料と粘土系材料が考えられるが、天然材料であり、一般的な地下環境下で安定性が長期にわたり期待できる粘土系材料を採用することが適切であると考えられる。一方、③の建設段階の止水対策に対してはセメント系材料の採用も十分考えられる。

なお、本研究の一環として実施した釜石鉱山における粘土系グラウトの原位置試験では $k=10^{-6} \sim 10^{-7}$ m/sec の岩盤の透水性を $k=10^{-8} \sim 10^{-9}$ m/sec まで改善することが可能との見通しが得られている[11].

4 コンクリート支保工のベントナイト混合土への化学的影響

処分場の立坑・坑道を掘削するとき、岩盤の力学的安定性を確保するために一般的に支保工が設置される。

支保工としてコンクリート部材を使用する場合、埋戻し材中のベントナイトが Ca 化されることによって透水係数の増大、膨潤性の低下などのシーリング性能の低下が懸念される。そこで、Na 型ベントナイトとしてクニゲル V1 (Na⁺ 55.6 meq/100g, Ca²⁺ 49.4 meq/100g) を CaCl₂ により強制的に Ca 化させたベントナイト (浸出陽イオン量: Na⁺ 5.2 meq/100g, Ca²⁺ 102.8 meq/100g) を用いて透水係数と膨潤性能 (最大膨潤圧, 最大膨潤率) の比較を行った [12-14]。なお、最大膨潤率については比較のために Ca 型ベントナイトのクニボンド (浸出陽イオン量: Na⁺ 18.1 meq/100g, Ca²⁺ 74.2 meq/100g) の結果についても示す。

4.1 Ca 化型ベントナイトの透水係数と最大膨潤圧

4.1.1 試験方法及び条件

所定の密度が得られるように計量した自然含水比約 7 % のベントナイトを加圧成型した供試体 (径 4 cm × 高さ 2 cm) を用いて透水試験および膨潤圧試験を実施した。透水試験は供試体の飽和度を高めるため供試体上下から吸水脱気し、水頭差 10 cm で供試体の下部から通水させて透水量の測定を開始した。透水量が定常状態になるのを確認後、順次通水圧を上げる方法を繰り返した。透水係数は Darcy 法則に従うと仮定して算定した。膨潤圧試験は供試体の飽和度を高めるため真空脱気し、水頭差 100 cm で上下より吸水させて、膨潤圧の測定を開始し、膨潤圧が一定になった後約 5 日間測定して試験を終了した。測定された最大の膨潤圧を最大膨潤圧とした。各試験は供試体作製時の乾燥密度をパラメータとして実施した。

4.1.2 試験結果

透水試験結果と膨潤圧試験結果を乾燥密度 ρ_d と透水係数 k および最大膨潤圧 P_{max} の関係として片対数座標で示したのが Fig.8, 9 で、 $\rho_d \cdot k$ と $\rho_d \cdot P_{max}$ は線形関係にあることがわかる。透水係数はベントナイトの種類に関係なく乾燥密度が大きくなるほど小さくなり、膨潤圧は大きくなることわかる。Na 型ベントナイトと Ca 化型ベントナイトを比較すると、① 乾燥密度が $\rho_d=1.6 \text{ t/m}^3$ 以上では透水係数と最大膨潤圧ともほぼ同じ値である、② 乾燥密度が $\rho_d=1.6 \text{ t/m}^3$ 以下では Ca 化型ベントナイトの方が透水係数は大きく、また最大膨潤圧は小さくなる。

4.2 Ca 化型ベントナイトの最大膨潤率

4.2.1 試験方法および条件

所定の密度が得られるように計量した自然含水比 (Na 型 6.2%, Ca 化型 1.6%, Ca 型 8.6%) のベントナイトを加

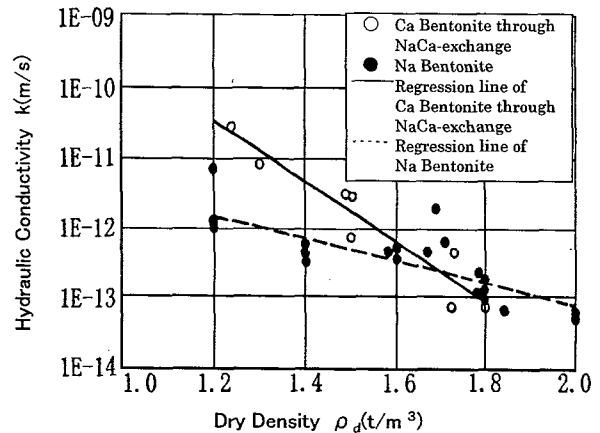


Fig.8 Relationship between hydraulic conductivity (k) and dry density (ρ_d)

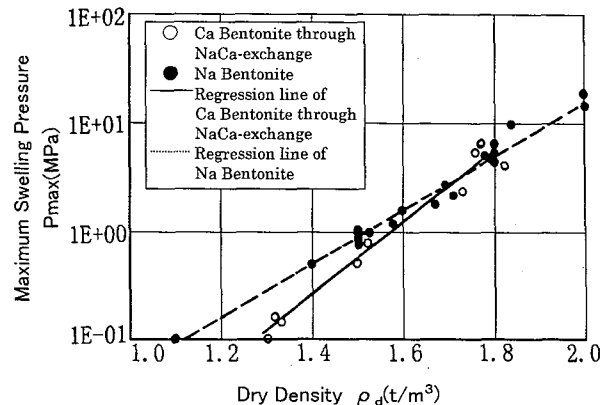


Fig.9 Relationship between maximum swelling pressure (P_{max}) and dry density (ρ_d).

圧所定の密度が得られるように計量した自然含水比 (Na 型 6.2%, Ca 化型 1.6%, Ca 型 8.6%) のベントナイトを加圧成型した供試体 (径 6 cm × 厚さ 0.5 cm) を用いて膨潤率試験を実施した。供試体を上下から吸水させ膨潤量の経時変化を測定した。膨張量の増加割合が 0.01 mm/day になった時点でほぼ平衡状態に達したと判断して試験を終了し、測定された最終の膨潤量を供試体作製時の供試体厚さで除して最大膨潤率 S_{max} とした。各試験は供試体作製時の乾燥密度をパラメータとして実施した。

4.2.2 試験結果

最大膨張率 S_{max} と乾燥密度 ρ_d および試験後の含水比の増分 Δw (吸水量) との間には Fig.10, 11 に示すようにほぼ線形関係が認められる。膨潤率はベントナイトの種類に関係なく乾燥密度が大きくなるほど大きくなり、また、吸水量に比例することがわかる。Ca 化型ベントナイトについては密度に対する膨潤率の増加割合が小さく、最大膨潤率は Na 型ベントナイトの 1/5 程度であり、また Ca 型ベントナイトよりも小さくなっている。

4.3 試験結果に対する考察

コンクリート支保工の存在による埋戻し材（ベントナイト混合土）の性能低下について、ベントナイトのCa化の観点から実験的に評価した。

その結果、想定している埋戻し材の仕様（ベントナイト混合土、乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ t/m}^3$ 以上、ベントナイト配合率 $B_m = 15\%$ ）においては、透水係数および最大膨潤圧の観点からほとんど性能が低下しないとの結果を得たが、最大膨潤率についてはNaベントナイトがCa化することによって著しく低下することが明らかになった。ベントナイトの種類によって膨潤量が異なる理由として、ベントナイトの膨潤量がベントナイト中の層間の大きさに支配されることが挙げられる。Na型とCa型またはCa化型とでは層間の大きさが異なるため、膨潤量も異なっているものと考えられる（Na型のほうが層間が大きい）。膨潤量は拘束圧が大きくなるにしたがって小さくなり、Na型とCa型またはCa化型との差も小さくなる傾向にある。また、最大膨潤量と最大膨潤圧との間で相関が見られなかった理由については、膨潤圧試験が完全拘束条件下で実施されており、層間の大きさが試験結果に影響を与えなかったことによるものと考えられる。

埋戻し材の膨潤性能は埋戻し材と周辺岩盤との間には水みちとなり得る隙間を生じさせないためのものであり、埋戻し材が所定の密度で充てんされている以上、埋戻し材のCa化により膨潤量は低下するものの膨潤圧の低下が見られないことから、隙間の発生は懸念はないものと考えられる。以上より、今回の試験の結果から仮に埋戻し材中のNaベントナイトがコンクリート支保工によってCa化したとしても埋戻し材は健全性を保ち得るものと想定される。

5 結論

本論文では透水係数が $k=10^{-8} \text{ m/sec}$ 程度の岩盤（緩み域の透水係数は $k=10^{-6} \text{ m/sec}$ ）を対象として、処分場の安全性を確保するためのシーリングシステムの設計法を例示した。また、シーリングシステムの成立性を議論する上でコンクリート支保工が埋戻し材の性能に及ぼす影響を評価する必要があるため、セメント成分の溶出に伴うベントナイトのCa化に着目してその影響の傾向を実験的に評価した。その結果、埋戻し材としてベントナイト混合土を採用した場合、コンクリート支保工からのCa溶出によってベントナイト混合土の特性が変化しても埋戻し材としての性能は確保できることがわかった。

今後シーリングシステムの信頼性の向上および具体化のための主な課題を列挙すると以下ようになる。

- ① 化学的環境条件に対する埋戻し材の長期健全性の確認

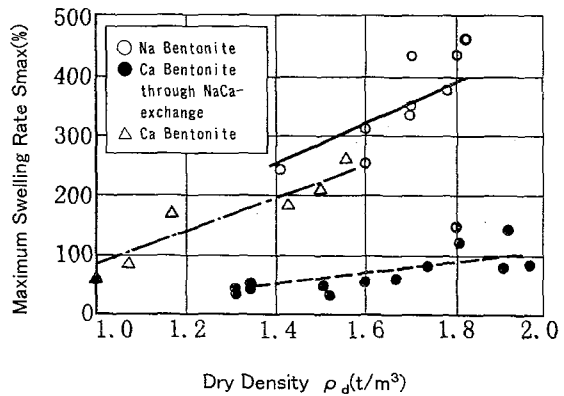


Fig.10 Relationship between maximum swelling rate (S_{max}) and dry density (ρ_d).

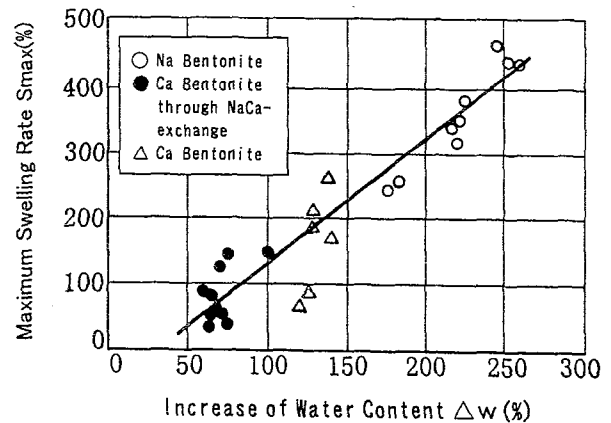


Fig.11 Relationship between maximum swelling rate (S_{max}) and increase of water content (Δw).

- ・セメント環境下におけるベントナイト中のモンモリロナイトの溶解・ゼオライト化
- ・塩水環境下におけるCl⁻イオンのベントナイト混合土への影響
- ② ベントナイトプラグ設置部の施工法の確立
 - ・支保工の撤去方法
 - ・プラグ設置のための岩盤の緩みをおさえる掘削方法
 - ・高水圧下における粘土系グラウトの注入方法
 - ・ベントナイトプラグの設置方法
- ③ コンクリート支保工の劣化時の透水係数の評価
- ④ 埋戻し材の膨潤特性がコンクリート支保工の劣化部や岩盤緩み域の透水性の改善にどの程度寄与できるかの評価
- ⑤ 岩盤の不均質性を考慮したシーリングシステムの性能評価

なお、シーリングシステムのうちプラグについては現在、カナダ原子力公社 (AECL) の URL にて実規模の実証実験を実施中である[13]。

謝辞

本研究は動力炉・核燃料開発事業団（現サイクル機構）からの受託研究として実施したものであり、御指導頂いた関係各位に深く感謝する次第である。

型ベントナイトの Ca 化による最大膨潤率の変化、
日本原子力学会 秋の大会, M32 (1998).

参考文献

- [1] 原子力委員会：原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画 (1994).
- [2] 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について (1997).
- [3] 動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－，PNC TN 1410 92-081 (1992).
- [4] 古市光昭，奥津一夫，田中俊行，棚井憲治：高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻し（シーリング）概念に関する検討．土木学会論文集，No.594/VII-7, 21-33 (1998).
- [5] 古市光昭，奥津一夫，平和男，原啓二：高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討，原子力バックエンド研究，5, 51-58 (1998).
- [6] Swedish Nuclear Fuel and Waste management Company: Final storage of spent nuclear fuel (KBS3), (1983).
- [7] Swedish Nuclear Fuel and Waste management Company: Final disposal of spent nuclear fuel Importance of the bedrock for safety, SKB Technical Report 92-20 (SKB91) (1992).
- [8] AECL: Environmental impact statement on the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste, AECL-10700, COG-93-1 Atomic Energy Canada Limited. (1994).
- [9] National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste: Project Gewähr NGB85-09 (1985).
- [10] National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste: Safety assessment report (Kristallin-1), Nagra Technical Report 93-22 (1994).
- [11] 杉田裕，藤田朝雄：原位置における粘土グラウト試験，第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム pp.276-280 (1996).
- [12] 田中益弘，山本博之：Na 型ベントナイトの Ca 化による透水係数と最大膨潤圧の変化，日本原子力学会 秋の大会 I32, pp.674 (1997).
- [13] 藤田朝雄，杉田裕：JNC/AECL 共同研究－トンネルシーリング性能試験の現状について－，サイクル機構技法 1, JNC TN1340 98-001, pp79-84 (1998).
- [14] 三原守弘，青柳孝義，田中益弘，山本博之：Na