

[討議・回答]

古市 光昭
奥津 一夫
田中 俊行
糊井 憲治
共著

「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」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 594/VII-7, 1998年5月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

小峯秀雄 (財)電力中央研究所

Hideo KOMINE

1. 緒言

本論文は、高レベル放射性廃棄物処分における埋戻しの概念について、埋戻し候補材料の特性に関する実験的な検討と核種移行解析の結果を踏まえて提案したものである。高レベル放射性廃棄物処分問題に関する詳細な情報が土木工学・地盤工学の分野において未だ広く知られていないという現状において、本論文は、処分場概念を明らかにしたものと評価できる。

ところで、本論文で検討されている埋戻し候補材料の特性、特にベントナイトなどの膨潤特性や透水特性については、地盤工学の分野でも古くから実験的・理論的検討が行われており、多くの知見が得られている。既往の知見では、ベントナイトは多くの種類があり、含有されるモンモリロナイトの量や交換性陽イオンの種類により、その膨潤特性は異なることが知られている。また、ベントナイト周辺の水質などにより膨潤特性や透水特性が異なることも広く知られている。したがって、この点を踏まえて、膨潤特性や透水特性について議論されるべきものと考えられる。本論文においては、特定の条件の元で実施した特定のベントナイトの実験結果に基づき膨潤特性や透水特性について議論され予測式の提案を行っているが、今後はより一般性の高い予測式へと発展させる必要があると考える。そこで、ベントナイト系材料の特性について、既往の知見の観点からいくつかの問題点を指摘させていただき、論文中で述べられている膨潤特性や透水特性に関する予測式の適用性を明確にさせていただき、より一般性の高い予測式に発展されることを期待して、討議をさせていただく。

2. 膨潤特性とベントナイトの種類について

ベントナイトはモンモリロナイト、石英、沸石、方解

石、斜長石などから構成されている¹⁾。この内、モンモリロナイトが膨潤性に富む粘土鉱物であり、ベントナイトの膨潤挙動はモンモリロナイトの膨潤に主に起因している。したがって、ベントナイト中のモンモリロナイト含有率が異なれば、ベントナイト自身の膨潤特性が異なると考えられる。すなわち、ベントナイトは種類によって、モンモリロナイト含有率が異なるので、それぞれ膨潤圧が異なることが知られている^{2)~4)}。図-1は、この知見を示す実験データの一例であり、参考文献 8)でも、同様に、カナダ産のベントナイトと日本のベントナイトの違いを示す膨潤圧の実験データを報告している。

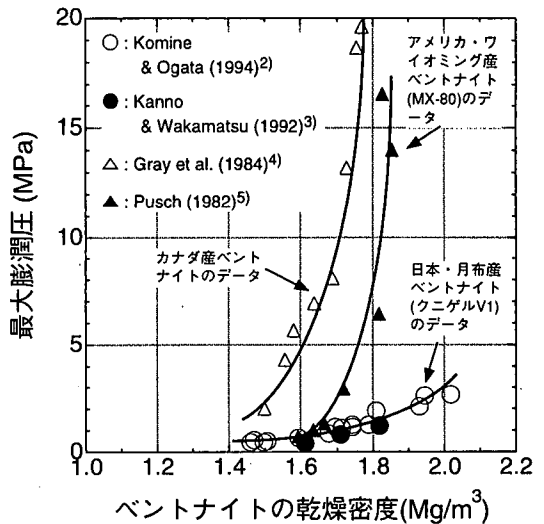


図-1 ベントナイトの種類による膨潤圧の違い (文献 2)より加筆引用)

本論文では、ベントナイト系材料の膨潤圧について、材料中のベントナイト部分の乾燥密度 ρ_{db} (有効ベントナイト乾燥密度) というパラメータを定義し膨潤圧実験の結果を整理することにより、式(d-1)を提案し、これから膨潤圧 P_{max} が予測できるとしている。

$$P_{\max} = 4.37 \times 10^{1.90\rho_{an}-10} \quad (d-1)$$

上記の式では、材料中のベントナイトの量で議論を進めているが、上述のようにベントナイトの種類が異なれば、ベントナイトそれ自身の膨潤特性が異なる。したがって式(d-1)は、あくまで本論文で用いたベントナイトの場合に成り立つ式であり、異種類のベントナイトを用いた材料の場合には、式(d-1)は利用できないものと考えられる。

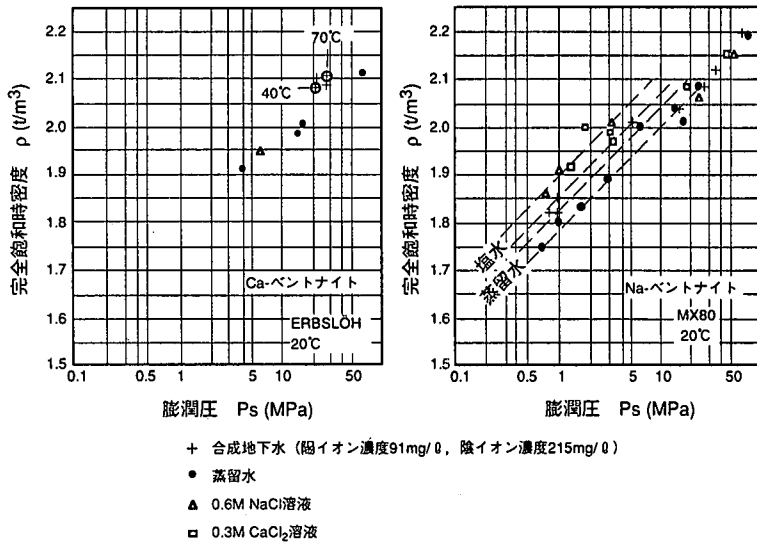
以上の観点から、式(d-1)が膨潤圧の予測式として、どの程度一般性があるものなのかお伺いしたい。可能であれば、適用できる条件、例えば、どのようなベントナイトに対して適用性があり、どのようなベントナイトには適用困難かを実験データなどを持って明確に示していた

だきたい。

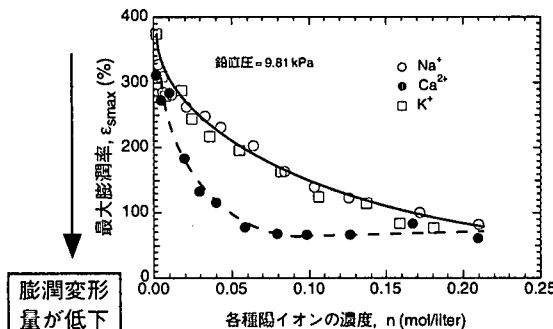
討議者も、参考文献として引用していただいた論文⁹⁾において、ベントナイト量に着目した評価を試みていた。しかし、上記のような問題点があることを認識し、新たに「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」というパラメータを定義し、ベントナイト系材料の膨潤特性の評価法を提案している^{10)~12)}。これによれば、膨潤特性に及ぼすベントナイトの種類の影響をモンモリロナイト含有率により考慮できると考えている。詳細は文献 10)~12)を参照されたい。

3. 膨潤特性に及ぼす間隙水の水質の影響

ベントナイトの膨潤は、間隙水の水質に大きく影響されることが多くの実験データを持って明らかにされている



(a) 膨潤圧に及ぼす水質の影響 (文献5, 6)より加筆引用)



(b) 膨潤変形に及ぼす水質の影響 (文献16)より加筆引用)

図-2 膨潤特性に及ぼす水質の影響

る^{5),6),13)~17)}。図-2は、一例ではあるが、間隙水の水質によるベントナイトの膨潤特性の変化について示している。このように、ベントナイトの膨潤特性は、間隙水の水質に大きく影響されるものであるから、その評価においても、それを考慮しなければならない。式(d-1)では、この間隙水の水質の影響をどのように考慮しているのかお伺いしたい。

膨潤に関する研究では、この間隙水の水質の影響を考慮できるように、拡散二重層理論などを応用して、その膨潤特性を評価しようとする試みが古くから行われている^{18)~20)}。討議者も、間隙水の水質の影響を考慮すべく、モンモリロナイトの膨潤挙動や膨潤に伴う環境条件の変化を評価できる式を新たに構築し、先の「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」と拡散二重層理論に基づく理論式とを組み合わせることにより、膨潤評価式を提案している^{21), 22)}。詳細は参考文献2), 21), 22)を参照されたい。

4. 透水特性に関する評価

ベントナイト系材料の透水係数 k については、式(d-1)から予測される膨潤圧 P_{max} を介して以下の式により予測されるという論旨になっている。

$$P_{max} = 1.23 \times 10^{-10} k^{-0.82} \quad (d-2)$$

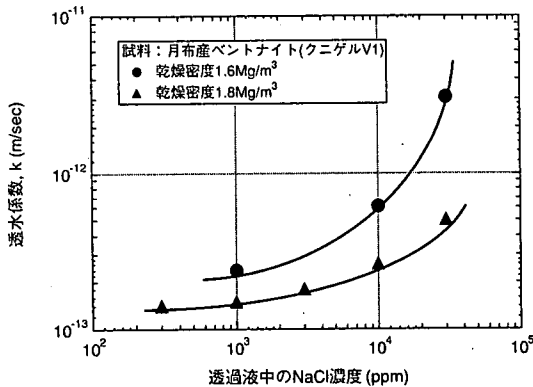


図-3 透水係数に及ぼす透過液の水質の影響 (文献23)より加筆引用)

この場合にも、上述の膨潤特性と同様、ベントナイトの種類や間隙水の水質の影響を考慮しなければならない。図-3に示すように、ベントナイトの透水係数は透過液のNaCl濃度に依存するという報告もある²³⁾。Kenneyらも参考文献24)において、砂・ベントナイト混合土の透水係数が水の塩分濃度に強く依存することを実験的に調

べている²⁴⁾。式(d-2)では、ベントナイト系材料の透水係数は、単に膨潤圧だけの関数となっているが、上記の点を踏まえて、この式による透水係数の予測式の適用性についてお伺いしたい。

5. オーバーパックの材質について

本論文中において、オーバーパックの材質がステンレス製と記述されている(22ページ)。しかし、討議者は、現段階においてオーバーパックの材質は決定してないと理解している。実際、炭素鋼を基本とした検討も進められている²⁵⁾。また、ステンレスは、すきま腐食に対する耐久性が、他の候補材料と比べて低いという報告もある²⁵⁾。以上の観点から、ステンレス製のオーバーパックと記述された根拠、出典を明らかにしていただきたい。

参考文献

- 1) Grim, R.E. : Clay Mineralogy (Second Edition), McGraw-Hill Book Co., New York., pp. 77-92, 1968.
- 2) Komine, H. and Ogata, N. : Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, No.4, pp.478-490, 1994.
- 3) Kanno, T. and Wakamatsu, H. : Water uptake and swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, Vol.29, pp.1102-1107, 1992.
- 4) Gray, M.N., Cheung, S.C.H. and Dixon, D.A. : The influence of sand content on swelling pressures and structure developed in statically compacted Na-bentonite, Atomic Energy of Canada Limited, Vol.7825 Pinawa, Manitoba, pp.1-24, 1984.
- 5) Pusch, R. : Mineral-water interactions and their influence on the physical behavior of highly compacted Na bentonite, Canadian Geotechnical Journal, Vol.19, No.3, pp.381-387, 1982.
- 6) Pusch, R. : Swelling pressure of highly compacted bentonite, SKBF/KBS Technical report 80-13, Stockholm, Sweden, 1980.
- 7) 嘉門雅史, 浅川美利 : 土木学会編新体系土木工学 16 土の力学(I)-土の分類・物理化学的性質-, pp.161-168, 1988.
- 8) Dixon, D.A. and Gray, M.N. : Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and the USA, Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics (IS-Osaka), Vol. 1, pp.43-48, 1996.
- 9) 緒方信英, 小峯秀雄 : ベントナイト砂混合材料の透水係数に関する一考察, 第29回土質工学研究発表会 3分冊の3, pp.1883-1884, 1994.
- 10) 小峯秀雄, 緒方信英 : 放射性廃棄物処分のための砂・ベントナイト混合材料の膨潤特性とその評価法, 電力中央研究所報告・研究報告 U96029, 1997.
- 11) Komine, H. and Ogata, N. : Evaluation of swelling characteristics of bentonite-sand mixture, Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp.1839-1842, 1997.
- 12) 小峯秀雄, 緒方信英 : 砂・ベントナイト混合材料の膨潤特性とその評価法, 第2回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 79-84, 1997.
- 13) Yong, R. N. : The swelling of a montmorillonite clay at elevated temperatures, Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference

on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 124-127, 1967.

- 14) Warkentin, B.P. and Schofield, R.K. : Swelling pressure of Na-montmorillonite in NaCl solutions, Jour. Soil Science, Vol. 13, No. 1, pp. 98-105, 1962.
- 15) Karnland, O. : Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions—Correlation between model calculations and experimentally determined data, SKB technical report 97-31, 1997.
- 16) 小峯秀雄, 緒方信英, 田代勝浩: 締固めたベントナイトの膨潤変形に及ぼす水質の影響—Na⁺, Ca²⁺, K⁺イオンの影響—, 第31回地盤工学研究発表会2分冊の1, pp.339-340, 1996.
- 17) 伊藤驍: 土の膨潤挙動からみた地盤災害, 土と基礎, Vol. 28, No. 2, pp.31-38, 1980.
- 18) Iwata, S. and Tabuchi, T. : Soil-water interactions, Marcel Dekker, Inc., pp.131-193, 1988.
- 19) Mitchell, J. K. : Fundamentals of soil behavior (Second Edition), John Wiley & Sons, Inc., pp.111-130, 1993.
- 20) Olphen, H. V. : An introduction to clay colloid chemistry, John

Wiley & Sons, Inc., pp.251-279, 1963.

- 21) Komine, H. and Ogata, N. : Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, Vol.33, No.1, pp.11-22, 1996.
- 22) 小峯秀雄, 緒方信英: ベントナイトを含有する緩衝材の膨潤評価式と自己シール性評価, 土と基礎, Vol.46, No. 10, pp. 23-26, 1998.
- 23) 動力炉・核燃料開発事業団: 緩衝材の特性試験(I), PNC TN8410 92-057, pp.53-54, 1992.
- 24) Kenney, T. C., Van Veen, W. A., Swallow, M. A. and Sungaila, M. A. : Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures, Canadian Geotechnical Journal, Vol.29, pp.364-374, 1992.
- 25) 例えば, 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—平成3年度—, PNC TN 1410 92-081, 1992.

(1998. 8.25 受付)

▶回答者 (Closure)

古市光昭 (鹿島建設)・奥津一夫 (鹿島建設)・

田中俊行 (鹿島建設)・棚井憲治 (核燃料サイクル開発機構)

Mitsuaki FURUIUCHI, Kazuo OKUTSU, Toshiyuki TANAKA and Kenji TANAI

1. 結論

本論文「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」に対し御討議を頂き、謝意を表す。

高レベル放射性廃棄物(以下高レベル廃棄物)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(シーリング)に大別することができる。このうち、「埋戻し(シーリング)」とは高レベル廃棄物を処分するために地下に造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めることである。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の方法である。

本論文は、埋戻しの性能を評価する上で従来解析的検討が不十分だったシーリングシステムの構成要素であるプラグ、グラウトなどの効果を核種移行の観点から評価し、シーリングシステムの成立性を概観的に考察したものである。性能評価上必要なベントナイト混合土の特性については基礎実験によって評価した。結論として多重バリアとしての性能を期待する範囲内に位置する埋戻し部の核種移行遅延性能を天然バリアと同等以上にする(埋戻し部が核種の卓越移行経路にならない)ためには、一般埋戻し(説明の都合上、埋戻しのうちプラグ部以外の埋戻しを「一般埋戻し」と称することとする。), プラグ, グラ

ウトを組み合わせたシーリングシステムが有効であるとしている。今回の討議はこれらのうちベントナイト混合土の透水性・膨潤性についての基礎実験に関するものである。

回答の前に本論文の間違い(2箇所)を修正させて頂くこととする。

① p.22のステンレス製のオーバーパック

本論文の引用文献 1)ではオーバーパックとして炭素鋼を提案しており、本論文における「ステンレス製」の記載は「炭素鋼」の間違いである。

② p.25 式(3)

本論文中の図-9を回帰したものであるが本論文中の記載は間違いであり、以下が正しい表現である。

$$P_{\max} = 1.82 \times 10^{1.83\rho_{\text{sl}} - 3} \quad (1)$$

次に今回の議論の基礎になる本論文における「ベントナイト混合土に対する基礎実験」の試験条件をあらためて以下に示す。

- ① ベントナイト: Na型ベントナイト クニゲルV1
- ② 間隙水の水質: 蒸留水
- ③ 混合材料

・珪砂: (最大粒径 1mm)

・コンクリート用粗骨材: (最大粒径 20mm)

2. ベントナイトを高レベル廃棄物処分場に適用するに当り評価すべき特性

ベントナイトを高レベル廃棄物処分場へ適用する場合、以下の観点からベントナイトの特性を評価しておく必要がある。

(1) ベントナイトの種類

御指摘の通り、ベントナイトは種類が異なるとその特性は異なったものになり、特に、モンモリロナイト含有量と交換性陽イオン量の影響が大きい。ベントナイトは交換性陽イオン量によって便宜的にNa型ベントナイト、Ca型ベントナイト、Ca化型ベントナイトに分類することができ、さらに産地の違いなどにより特性が異なる。

(2) ベントナイトに接する地下水の水質

これまでの研究²⁾で述べられている通り、ベントナイトに接する間隙水がベントナイトの組織構造に化学的変化を与え、ベントナイトの特性も変化する可能性がある。高レベル廃棄物処分場にベントナイトを適用する場合、考慮すべき化学的環境条件の主なものとしてCa²⁺イオンと海水が挙げられる。

Ca²⁺イオンは空洞掘削に用いられるコンクリート支保工によって生じるものであり、海水は処分場を沿岸部に設置する場合を想定したものである。

(3) 掘削土砂とベントナイトを混合したベントナイト混合土の特性³⁾

高レベル廃棄物処分場の埋戻しにベントナイトを適用する場合、経済性および埋戻し材の特性改善(施工性、流出に対する安定性など)のために掘削土砂を適切に粒度調整し、ベントナイトと混合するのが現実的である。ベントナイト混合土の特性は上述(1)、(2)の影響に加えてベントナイト配合率、掘削土砂の特性などの影響を受ける。

(4) ベントナイトの施工品質

高レベル廃棄物処分場の埋戻しにベントナイト混合土を適用する場合、ベントナイトブロックの集合体(プラグ)として設置したり、ベントナイト混合土を機械転圧(一般埋戻し部)することになる。埋戻し部が所定の性能を確保するためには、設計において想定した品質(透水性、膨潤性)を実際の施工に際して確保・保持しうることを確認していく必要がある。

3. 膨潤特性および透水特性の予測式の適用範囲

本論文の予測式は1.でのべた試験条件のもとでの試験結果を傾向的に示したものであり、試験条件以外への適用性については評価していない。他の試験条件への適用可能性についての評価の一例として、文献4)においてNa型ベントナイト、Ca型ベントナイトおよびCa化型ベントナイトに対し膨潤特性と透水特性を比較しており、結果を要約すると以下のようになる。

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図-1, 2で、 ρ_d-k と ρ_d-P_{max} は相関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型とCa化ベントナイトを比較すると、①乾燥密度が $\rho_d=1.6g/cm^3$ 以上では透水係数と最大膨潤圧共にほぼ同じ値である、②乾燥密度が $\rho_d=1.6g/cm^3$ 以下ではCa化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。

最大膨脹率 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)との間には図-3, 4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は小さく、最大膨潤率はNa型ベントナイトの1/5程度(ただし、乾燥密度が $\rho_d=1.6g/cm^3$ の場合)であり、またCa型ベントナイトよりも小さくなっている。

以上の通り、ベントナイトの種類によって膨潤特性および透水特性が異なることがこの一例からも明らかであり、また、間隙水は前述のとおりベントナイトの組織構造を変化させる可能性があることから本論文の予測式は前述の試験条件以外への適用性を持たないと判断される。

4. 「より一般性の高い予測式」への発展について

高レベル廃棄物処分場に用いられるベントナイト混合土への影響因子の主なものとしては上述の通りベントナイトの種類、間隙水の特性、ベントナイト配合率、乾燥密度などが挙げられる。より一般性の高い予測式を構築するためには、これらすべての因子をパラメトリックに取り込むべきであるが、現実的には困難である。このため、高レベル廃棄物処分場におけるベントナイト混合土の使用条件および環境条件を絞り込んで以下の方向でデ

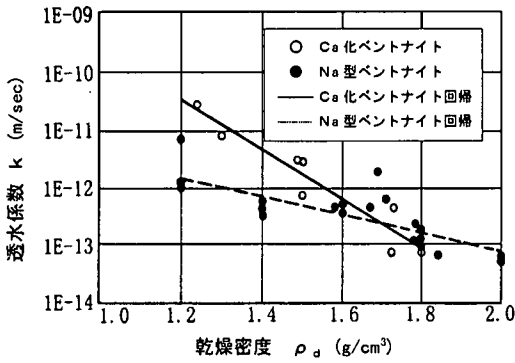


図-1 透水係数と乾燥密度の関係

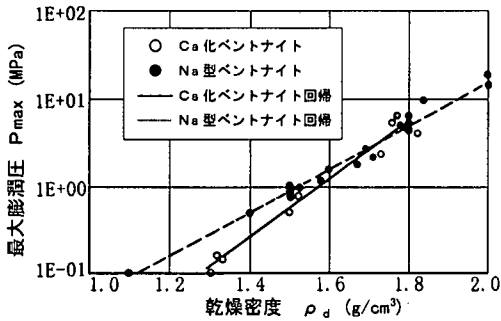


図-2 最大膨潤圧と乾燥密度の関係

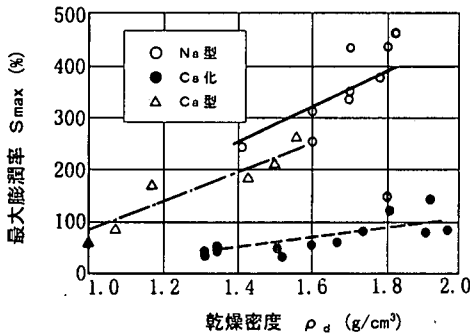


図-3 最大膨潤率と乾燥密度の関係

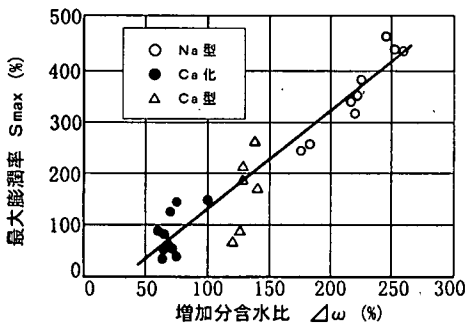


図-4 最大膨潤率と増加含水比の関係

ータを取得していくのが現実的対応と考えられる。なお、施工品質については予測式で取り扱うべき因子ではないと考え、ここでは触れないこととする。

① ベントナイトの種類

本論文では Na 型のみを取り上げている。②で示す間隙水による Na 型ベントナイトの変質を考えると Ca 型、Ca 化型についても評価すべきと考えられ、現在物性を取得中である。本回答ではこれまでに取得したデータのうち 100%ベントナイトに対する結果を紹介した。

② 間隙水の特性

本論文では蒸留水のみで評価している。高レベル廃棄物処分場におけるベントナイトの設置環境を考えると、影響要因は Ca^{2+} イオンと海水に絞るのが適当と考えられる。 Ca^{2+} イオンの影響評価については Ca 型、Ca 化型ベントナイトの物性評価で代表できると考えられる。海水の影響については現在物性試験を準備中である。

③ ベントナイト配合率

本論文ではベントナイト配合率の範囲として 0~100%を評価している。高レベル廃棄物処分場の緩衝材のみを対象にするのであれば 70~100%に絞ってもよいと考えられるが、埋戻しへの適用も含めて議論するならば 0~100%で評価しておくべきと考えられる。

④ 乾燥密度

本論文では 1.6~2.0 の範囲を評価している。Na 型ベントナイトの乾燥密度と特性の関係からこの範囲は妥当と考えられる。

5. まとめ

本論文は前述の通りシーリングシステムの成立性について概観的に考察したものであり、一般埋戻しおよびプラグの候補材料は本論文で想定したものが必ずしも最適なものとするものではない。また、候補材料の物性取得も限られた条件のもとで行われたもので、想定されるすべての環境条件に適用しうるものではない。今後、現実的なシーリングシステムを構築するために長期的な化学的環境条件の変化も考慮してシーリングシステムの性能に関わる候補材料の物性を取得することが必要と考えられる。さらに、御指摘の通り、これらの結果を含めてベントナイト混合土の特性を想定される条件との対応においてより一般的に把握できる予測式の構築も重要と考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ第2ドラフト, JNC TN1400 99-006,1999.
- 3) 平和男, 深沢栄造, 田中俊行：礫・砂・粘土混合土の透水係数の推定方法, 鹿島技術研究所年報第45号,1997.
- 4) 古市光昭,奥津一夫,田中益弘：高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討(その2), 日本原子力学会 原子力バックエンド研究,Vol.5 No.2,1999.

(1999. 6. 4 受付)