

ベントナイト系材料の飽和透水係数の 変遷評価式

(研究報告)

2005年8月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122(代表)
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式
(研究報告)

伊藤 弘之*, 三原 守弘**

要 旨

放射性廃棄物処分施設の安全評価において、ニアフィールドの水理場は地下水を移行媒体とした核種移行はもとより、人工バリアの変質等に対しても重要な意味を持つ環境条件のひとつである。また、セメント系材料が多用される TRU 廃棄物処分施設においては、セメント系材料と地下水との反応に起因して、ニアフィールドの化学的条件及び物質移動特性が変化する。このように、相互に影響しながら変遷するニアフィールドの水理場及び化学的条件を合理的に評価するためには、人工バリアの変質による透水係数の変遷過程を設定する必要がある。

本報告では緩衝材や埋戻材として使用が想定されているベントナイト系材料(ベントナイトと砂礫の混合土)を対象として、化学的変遷又は構造力学的変化が飽和透水係数に及ぼす影響に関する報告を参照し、透水係数の変遷評価式を経験的に設定した。

山形県月布産のベントナイトを用いた透水試験結果を主として参照し、透水係数に及ぼす影響をまとめた結果、

- ・ 密度及びベントナイト混合率による違いはスメクタイト部分間隙比で表される
- ・ 陽イオン交換(カルシウム型化)の影響は交換性ナトリウム率の変化で表される
- ・ 試験溶液の濃度による変化は溶液の当量イオン濃度の変化で表される
- ・ 鉱物学的変化による変化はスメクタイト部分間隙比の変化で表される
- ・ 圧密・膨潤変形による変化は変形後のスメクタイト部分間隙比の変化で表される

可能性があることから、これらの指標を用いた評価式を設定した。

設定した経験式によって、人工バリアの変質及びニアフィールド水理場の変遷を経時的に評価することが可能になった。

* 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分材料研究グループ(現:鹿島建設株式会社)

** 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分材料研究グループ

A Study on Changes in Hydraulic Conductivity of Saturated Bentonite-based Materials
(Research Document)

Hiroyuki Ito*, Morihiro Mihara**

Abstract

In the safety assessment of a radioactive waste repository, near-field hydrology is one of the important environmental conditions for the alteration of engineered barriers as well as the nuclide transport. Moreover, changes in chemical conditions and transport properties in near-field originate in the reaction of underground water and cement-based materials which is much used in a TRU waste repository. Near-field hydrology has mutual influences with its chemical conditions in such a way. Thus, the relationships between the hydraulic conductivity and alteration of barriers need to be set to evaluate the transition process.

In this study, we referred to several reports on chemical or mechanical effects on hydraulic conductivity of saturated bentonite-based material, a mixture of bentonite and sand or gravel, which is used as a buffer or a backfill. The relationships were empirically formulated to evaluate long-term transition of near-field hydrology.

The measured effects referred herein can be summarized as below;

- The influence of cation exchange (Na to Ca) is expressed by decrease of Exchangeable Sodium Percentage (ESP).
- The change due to salt concentration in solution is shown in the increasing equivalent ionic concentration.
- The effect of mineralogical change is described by smectite partial dry density.
- The consolidation and swelling deformation are also explained by smectite partial dry density.

The empirical relationships set with these indices made possible to well evaluate the alteration of the engineered barriers and near-field hydrology.

* Materials Research Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center (currently Kajima Corporation)

** Materials Research Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center

目 次

1. はじめに	1
2. 検討方法	2
3. 交換性陽イオン組成の変化による透水係数の変化	5
3.1 処分場環境における陽イオン交換	5
3.2 カルシウム型化の代替指標	5
3.3 クニゲル V1 単体試料を用いた試験	5
3.4 クニゲル V1 混合土を用いた試験	9
4. 粘土鉱物の溶解・変質による透水係数の変化	12
4.1 処分場環境における鉱物学的変化	12
4.2 クニゲル V1 を用いた試験	12
4.3 鉱物学的変化の代替指標	12
4.4 スメクタイト含有量に基づく評価式	13
5. 地下水の濃度変化による透水係数の変化	20
5.1 処分場環境における地下水の濃度変化	20
5.2 地下水の濃度変化の代替指標	20
5.3 クニゲル V1 を用いた試験	21
5.4 ベントナイト含有量に基づく評価式	24
5.5 スメクタイト含有量に基づく評価式	30
6. 変形による透水係数の変化	35
6.1 処分場環境における構造力学的変化	35
6.2 圧密中のベントナイトの透水係数	35
6.3 膨潤履歴を有するベントナイトの透水係数	38
7. ベントナイト系材料の透水係数の変遷	40
8. おわりに	41
参考文献	42
付録	付-1(1)

目 次

図 1	検討の手順	4
図 2	ESP が異なるクニゲル V1 の間隙比と透水係数	8
図 3	ESP と回帰曲線係数の関係	8
図 4	ESP に応じたクニゲル V1 混合土のベントナイト部分間隙比と透水係数の関係	11
図 5	ESP に応じたクニゲル V1 混合土の有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係	11
図 6	ESP が異なるクニゲル V1 のスメクタイト部分間隙比と透水係数	16
図 7	ESP と回帰曲線係数の関係	16
図 8	ベントナイト系材料のスメクタイト部分間隙比と透水係数の関係 (ESP が異なるクニゲル V1 混合土, アルカリ変質させたクニゲル V1)	17
図 9	ベントナイト系材料のスメクタイト部分乾燥密度と透水係数の関係 (ESP が異なるクニゲル V1 混合土, アルカリ変質させたクニゲル V1)	17
図 10	多種類のベントナイトのスメクタイト部分間隙比と透水係数	18
図 11	スメクタイト部分間隙比と透水係数の関係	19
図 12	スメクタイト部分乾燥密度と透水係数の関係	19
図 13	人工海水(SW)及び蒸留水(DW)を通水したクニゲル V1 の透水係数	22
図 14	通液の当量イオン濃度と透水係数	23
図 15	通液の当量イオン濃度と相対透水係数	23
図 16	通液の当量イオン濃度と回帰曲線係数の関係	26
図 17	交換性ナトリウム率(ESP)と相対透水係数最大値(K/K_0) _{max} の関係	27
図 18	ベントナイト部分間隙比に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係	28
図 19	ESP に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係	28
図 20	当量イオン濃度に応じたベントナイト部分間隙比と透水係数の関係	29
図 21	当量イオン濃度に応じた有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係	29
図 22	人工海水(SW)及び蒸留水(DW)を通水したクニゲル V1 の透水係数	31
図 23	通液の当量イオン濃度と回帰曲線係数の関係	32
図 24	スメクタイト部分間隙比に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係	33
図 25	ESP に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係	33
図 26	当量イオン濃度に応じたスメクタイト部分間隙比と透水係数の関係	34
図 27	当量イオン濃度に応じたスメクタイト部分乾燥密度と透水係数の関係	34
図 28	圧密中のベントナイトのベントナイト部分間隙比と透水係数	37
図 29	圧密中のベントナイトの有効ベントナイト乾燥密度と透水係数	37
図 30	膨潤供試体のベントナイト部分間隙比と透水係数	39
図 31	膨潤供試体の有効ベントナイト乾燥密度と透水係数	39

記 号 表

C_b	: Bentonite content in bentonite-sand mixture, ベントナイト混合率
C_{sme}	: Smectite content in bentonite, ベントナイト中のスメクタイト含有率
C_i	: Equivalent ionic concentration, 溶液の当量イオン濃度
C_{it}	: Threshold equivalent ionic concentration, 臨界当量イオン濃度
e	: Void ratio of bentonite-sand mixture, ベントナイト系材料の間隙比
e_{be}	: Bentonite void ratio, ベントナイト部分間隙比 (付録参照)
e_{sme}	: Smectite void ratio, スメクタイト部分間隙比 (付録参照)
ESP	: Exchangeable Sodium Percentage, 交換性ナトリウム率 (交換性ナトリウムイオンの当量濃度と CEC 陽イオン交換容量の比)
K	: Hydraulic conductivity, 透水係数
K_0	: Hydraulic conductivity in solution with C_i of 0.01 eq/dm ³ , 当量イオン濃度が 0~0.01 eq/dm ³ の溶液を用いて得られる透水係数
ρ_d	: Dry density of bentonite-sand mixture, ベントナイト系材料の乾燥密度
ρ_{db}	: Effective bentonite dry density, 有効ベントナイト乾燥密度 (付録参照)
ρ_{ds}	: Smectite partial dry density, スメクタイト部分乾燥密度 (付録参照)
ρ_{be}	: Pure density of bentonite, ベントナイトの土粒子密度
ρ_{sme}	: Pure density of smectite, スメクタイトの土粒子密度
ρ_{am}	: Pure density of accessory mineral, 随伴鉱物の土粒子密度
ρ_{ss}	: Pure density of silica sand, ケイ砂の土粒子密度

1. はじめに

放射性廃棄物処分施設の安全評価において、ニアフィールドの水理場は地下水を移行媒体とした核種移行はもとより、人工バリアの変質等に対しても重要な意味を持つ環境条件のひとつである。また、セメント系材料が多用される TRU 廃棄物処分施設においては、セメント系材料と地下水との反応に起因して、ニアフィールドの化学的条件及び物質移動特性が変化する。このように、ニアフィールドの水理場は化学的条件と相互に影響しながら変遷すると考えられる。水理場は Darcy 則によれば透水係数と動水勾配によって決定されることから、バリア材の変質による透水係数の変遷過程を設定する必要がある。

緩衝材や埋戻材として使用が想定されているベントナイトと砂礫の混合土（以下、「ベントナイト系材料」という）では、透水係数は地下水の組成・濃度の経時変化に応じて生じるベントナイトの陽イオン交換、土粒子間反発力の変化、鉱物学的変化によって変化すると考えられる。また、母岩から受ける地圧の上昇（クリープ）やコンクリート構造物（構造躯体、覆工）の剛性低下など周辺のバリア材応力の変化に応じて生じる圧密変形や膨潤変形によっても変化することが考えられる。

本報告ではベントナイト系材料の化学的な変遷又は構造力学的な変化に伴う飽和透水係数の変化に関する報告を参照し、ニアフィールド水理場の長期的変遷を評価するための透水係数変遷評価式を経験的に設定する。評価式は、主として国内の放射性廃棄物処分の研究開発において数多く報告されている山形県月布産のベントナイト（クニミネ工業製、クニゲル V1）の試験結果に基づき設定するが、試験結果が不十分な点は他のベントナイトや粘性土に関する報告により補完する。また、試験結果には産出した鉱床が異なること、低透水性土質材料の試験手法が確立されていないことに起因すると考えられる変動幅が含まれている。これらの変動幅の影響を踏まえつつ、平均的な値に基づき定性的に表現できる評価式を設定する。

2. 検討方法

緩衝材に関する研究でよく用いられている Na 型ベントナイト系材料の透水係数は、これまでに多数の研究成果が報告されている（たとえば、核燃料サイクル開発機構，1999）。近年においては試験溶液の濃度に応じた透水係数も報告されている。ただし、人工海水を用いた試験が中心であり、広範な濃度に対する試験は十分ではない。また、多量のセメント系材料の使用が想定される TRU 廃棄物処分に関する研究では、pH が高くカルシウムに富んだセメント浸出液の影響検討の一環としてカルシウム型化させたベントナイトの透水係数が報告されている（たとえば、前田ほか，1998）。一方で、スメクタイトが溶解変質した場合の透水性に及ぼす影響に関する報告事例は希少である。

本検討では、ベントナイト系材料の飽和透水係数に影響を及ぼす要因として、ベントナイトの陽イオン交換、地下水の濃度、鉱物学的変化及び変形を考慮する。しかしながら、上述したように、ベントナイト系材料の透水係数に関する報告は数多くあるものの、透水係数に及ぼす影響に関する研究の情報量は検討対象とする影響要因によって異なっている。そこで、任意の濃度の地下水における透水係数の評価式は、まず蒸留水中における透水係数の評価式を求め、これに乘じる濃度影響補正係数を別に求める手順で検討することとした。これは、蒸留水中の透水係数に関する研究報告は Na 型ベントナイト及び Ca 型化ベントナイトともに豊富であり定量的な評価がある程度可能であるのに対し、有意な濃度の地下水における透水係数の評価は、主に海水を用いた試験から推測せざるを得ないためである。また、スメクタイトが溶解変質したベントナイトの透水係数、変形履歴を受けたベントナイトの透水係数に関しては既往の研究報告がさらに限られていることから、試験結果と上述した評価式とを比較し、その妥当性を検討することとした。検討の手順を図 1 に示す。

まず 3 章では Na 型ベントナイト及び Ca 型化ベントナイトについて、蒸留水中の透水係数と間隙比の関係式を検討する。間隙比は多くの報告で用いられている乾燥密度と同義の指標である。なお、粘性土の透水係数と間隙比の関係式は対象とする粘土の種類、間隙比変化の範囲に応じて適当な形式が異なりうるが、広範囲の間隙比に対しても比較的適応性が認められる対数と対数の線形関係を採用する。この関係式の係数をカルシウム型化の代替指標で表すことを検討する。また、ベントナイト混合土の透水係数と統一して評価できるベントナイト部分間隙比（有効ベントナイト乾燥密度と同義の指標、付録参照）を指標として用いて、ベントナイト混合土の試験結果の再現性を確認する。

$$\log K_0 = \log A_0 + B_0 \log e_{be} \quad (1)$$

次に 4 章ではベントナイト部分間隙比の概念をさらに拡張させたスメクタイト部分間隙比（スメクタイト部分乾燥密度と同義の指標、付録参照）を導入して、3 章と同じ試験結果、同じ手順によって透水係数とスメクタイト部分間隙比の関係式を検討する。この関係式とスメクタイトが変質したベントナイトの透水試験結果とを比較することによって、スメク

タイト含有量が減少した試料の透水係数も統一して評価できるか検討する。

$$\log K_0 = \log A_0 + B_0 \log e_{sme} \quad (2)$$

さらに 5 章では、3 章又は 4 章で求めた蒸留水中の透水係数評価式について、それぞれ任意の濃度における透水係数を求めるための補正係数を検討する。濃度影響の補正係数はベントナイト部分間隙比（又はスメクタイト部分間隙比）及び地下水濃度の代替指標で表すことを検討する。

$$K/K_0 = \frac{A}{A_0} \cdot e_{be}^{B-B_0} \quad (3)$$

$$K/K_0 = \frac{A}{A_0} \cdot e_{sme}^{B-B_0} \quad (4)$$

この補正係数と蒸留水中の透水係数評価式を組み合わせることによって、任意の陽イオン組成、任意の地下水濃度、任意のスメクタイト含有量に対する透水係数評価式が設定できることになる。

最後に 6 章において、3~5 章で求めた透水係数の評価式と、供試体作製後に変形を受けたベントナイトの透水係数とを比較することによって、変形履歴を受けたベントナイト系材料の透水係数も間隙比によって統一して評価できるか検討する。比較する試験結果は、圧密試験結果から推定される圧密中の供試体の透水係数、並びに、試験前に一定量を膨潤させた供試体の透水係数である。

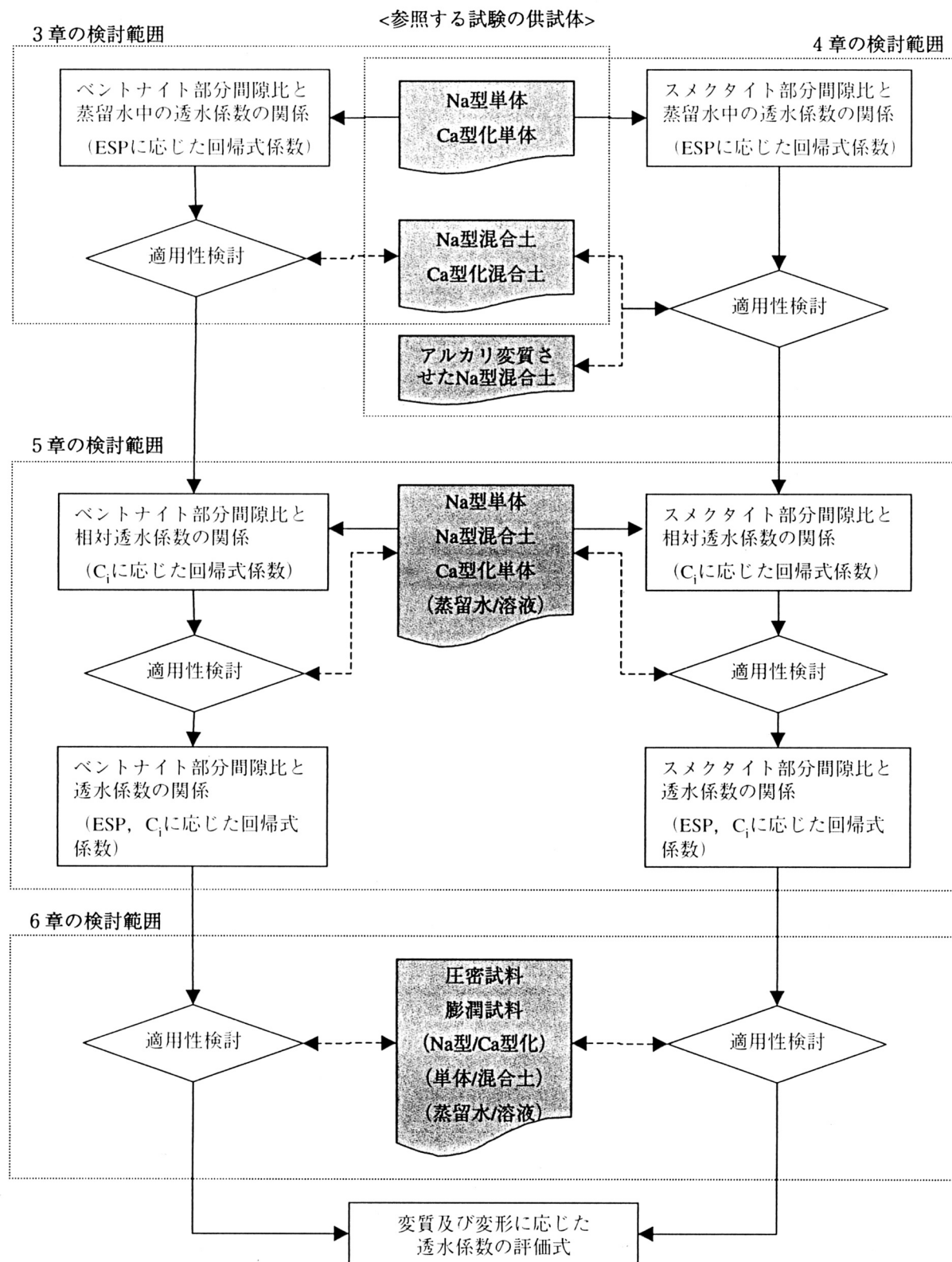


図1 検討の手順

(ESP は陽イオン組成の指標, C_i は地下水濃度の指標とする。)

3. 交換性陽イオン組成の変化による透水係数の変化

3.1 処分場環境における陽イオン交換

処分場環境における主な陽イオン交換反応としては、カルシウムイオンを含んだコンクリートの浸出液によって、ベントナイトの交換性陽イオンがナトリウムからカルシウムに変化していくこと（カルシウム型化）が考えられる。吸着イオンの価数が大きくなると拡散電気二重層が薄くなり土粒子が凝集しやすくなるため、透水係数は大きくなる。

本章では蒸留水中におけるベントナイトの透水係数について、交換性陽イオン組成の影響について検討する。まずカルシウム型化の代替指標を 3.2 節で検討する。次に 3.3 節でカルシウム型化の程度の異なるベントナイト単体試料の結果に基づき、陽イオン組成と透水係数の関係を定式化する。3.4 節で、定式化した評価式がベントナイト混合土の透水係数の評価に適用できるかを確認する。

3.2 カルシウム型化の代替指標

土壌の交換性陽イオン組成を測定する方法として、現在わが国では酢酸アンモニウムを用いて浸出させる方法が標準法となっている。しかし、この測定方法はベントナイトに含まれる炭酸塩鉱物の影響が大きいため、炭酸塩鉱物の溶解度が小さいベンジルトリメチルアンモニウムクロライド溶液を用いた方法（SFSA 改良法）が提案されている。クニゲル V1 の場合、前者による測定値は、交換性陽イオンと Ca と Mg を主な金属元素とする可溶性塩の溶解によって生じた陽イオンを含んだ値となる。一方、後者による測定値では、鉱物・可溶性塩の溶解の影響は小さい（小田・柴田，1999）。

ベントナイトのカルシウム型化は、主に交換性 Na イオン及び交換性 Ca イオン量の変化である。そこで、カルシウム型化の代替指標には、交換性陽イオン組成の定量方法による影響が大きい交換性 Ca イオン量を含まず、また土壌学の分野でソーダ質化の指標としても広く用いられている交換性ナトリウム率（ESP）（足立・岩田編，2003）を採用した。

$$ESP = \frac{Na}{CEC} \quad (0 \leq ESP \leq 1) \quad (5)$$

ここで、Na：交換性ナトリウムイオンの当量濃度（meq/100g）、CEC：交換性陽イオン容量（meq/100g）である。

3.3 クニゲル V1 単体試料を用いた試験

ベントナイトの飽和透水係数に及ぼすカルシウム型化の影響については、クニゲル V1 及び人工的にカルシウム型化させたクニゲル V1 の試験結果が報告されている（鈴木ほか，1992；松本ほか，1997；前田ほか，1998；笹倉ほか，2002，2003）。これらの報告では乾燥密度あるいは間隙比について整理されている。二つの指標は同義であるが、化学変質－物質移行解析では乾燥密度が用いられ、土－水連成系の変形解析における構成式では間隙比によって記述されることが多い。本報告では既往の変形解析モデルへの組み込みの容易

さから、間隙比について整理を試みた。

各試験で得られた透水係数 K と間隙比 e の関係を図 2 に示す。図中のプロットは同じロットのクニゲル V1 を使用し Ca 型化の影響を検討した透水試験の結果（笹倉ほか，2002，2003）と，さまざまなロットのクニゲル V1 を使用した全ての透水試験結果である。間隙比が大きいくほどナトリウム型ベントナイトとカルシウム型化ベントナイトの透水係数の差は大きくなるが，間隙比が $10^{-0.2}$ から $10^{-0.3}$ の範囲では，ナトリウム型ベントナイトとカルシウム型化ベントナイトの透水係数に顕著な差はみられない。また，同じロットのクニゲル V1 を用いた笹倉らの試験結果からは，半分程度までカルシウム型化させたクニゲル V1（Ca50-V1(*1)）の透水係数は，カルシウム型化させたクニゲル V1（Ca-V1(*1)）の透水係数とクニゲル V1（V1(*1)）の透水係数の間にあり，V1(*1)の値に近いことがわかる。ただし，産出鉱床や試験手法が異なるすべての試験結果(*2)と比較するとその分布範囲内にあり，カルシウム型化の影響は顕著ではない。そこで，カルシウム型化に伴う透水係数の変遷評価式は，産出鉱床や試験手法が異なるすべての試験結果から求めた V1(*2)と Ca-V1(*2)の回帰曲線を基本とし，ESP の関数形のみは笹倉らの試験結果(*1)を参照して設定することとした。

図 2 の各直線は，笹倉らの試験結果のみに基づく回帰曲線，全ての試験結果に基づく回帰曲線を，カルシウム型化の程度（ESP の程度）ごとに求めたものである。一般に堆積状態が均質な同じ場所から採取した粘性土の間では，透水係数と間隙比を関係付けることがある程度可能であるが，粘性土の透水係数と間隙比の関係は，粘性土の種類，対象とする間隙比の範囲によって適当なモデル化方法が異なりうる。例えば，工学的な間隙比範囲においては， $e \log K$ の関係式が多く粘土に対して適用されているが，広範囲の間隙比に対しては， $\log K$ と $\log e$ の線形関係が提案されている（Tavenas et al., 1983）。本報告では，3.4 節，4 章で後述するように，広範囲のベントナイト配合率を有する試料やスメクタイト含有量が減少した試料を対象とした関係式の設定を目的としている。埋戻材の候補となる貧配合のベントナイト混合土やスメクタイトが有意に溶解したベントナイト混合土の場合，間隙比（ベントナイト部分間隙比，スメクタイト部分間隙比）は広範囲な値を示す可能性があることから， $\log K$ と $\log e$ の線形関係に基づく回帰曲線を求めた。

$$\log K = \log A + B \log e \quad (6)$$

各々の試験結果から得られた回帰曲線を式(7)～(11)に示す。

・ 笹倉らの試験結果(*1)のみに基づく回帰曲線

$$V1(ESP=0.87) \quad \log K = -12.61 + 2.27 \log e \quad (-0.15 \leq \log e \leq 0.14) \quad (7)$$

$$Ca50 \cdot V1(ESP=0.46) \quad \log K = -12.34 + 3.74 \log e \quad (-0.16 \leq \log e \leq 0.14) \quad (8)$$

$$Ca \cdot V1(ESP=0.12) \quad \log K = -10.88 + 7.20 \log e \quad (-0.18 \leq \log e \leq 0.13) \quad (9)$$

・ 全ての試験結果(*2)に基づく回帰曲線

$$V1 \quad \log K = -12.24 + 2.35 \log e \quad (-0.46 \leq \log e \leq 0.23) \quad (10)$$

$$Ca \cdot V1 \quad \log K = -10.98 + 6.94 \log e \quad (-0.30 \leq \log e \leq 0.13) \quad (11)$$

さらに、式(7)～(11)の係数 A, 係数 B と ESP との関係を図 3 に示す。係数 A, 係数 B はともに ESP の減少（カルシウム型化の進行）にしたがって増加する。係数 A は、笹倉らの試験結果(*1)に基づき求めた係数から ESP と比例関係ではないことが認められる。したがって、全ての試験結果(*2)に基づく係数 A の回帰曲線も、笹倉らの試験結果(*1)のみに基づく係数 A の回帰曲線と湾曲程度が等しくなると仮定して求めた。一方、係数 B は ESP と比例関係であるとみなして回帰曲線を求めた。得られた回帰曲線を式(12), (13)に示す。

・ 笹倉らの試験結果(*1)のみに基づく回帰曲線の係数

$$A = 2.43 \cdot 10^{-13} + 1.00 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(6.24 - 11.43ESP) \quad (12)$$

$$B = 7.61 - 6.54ESP$$

$$\text{ただし, } 0 \leq ESP \leq 1$$

・ 全ての試験結果(*2)に基づく回帰曲線の係数

$$A = 5.78 \cdot 10^{-13} + 1.00 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(5.71 - 11.43ESP) \quad (13)$$

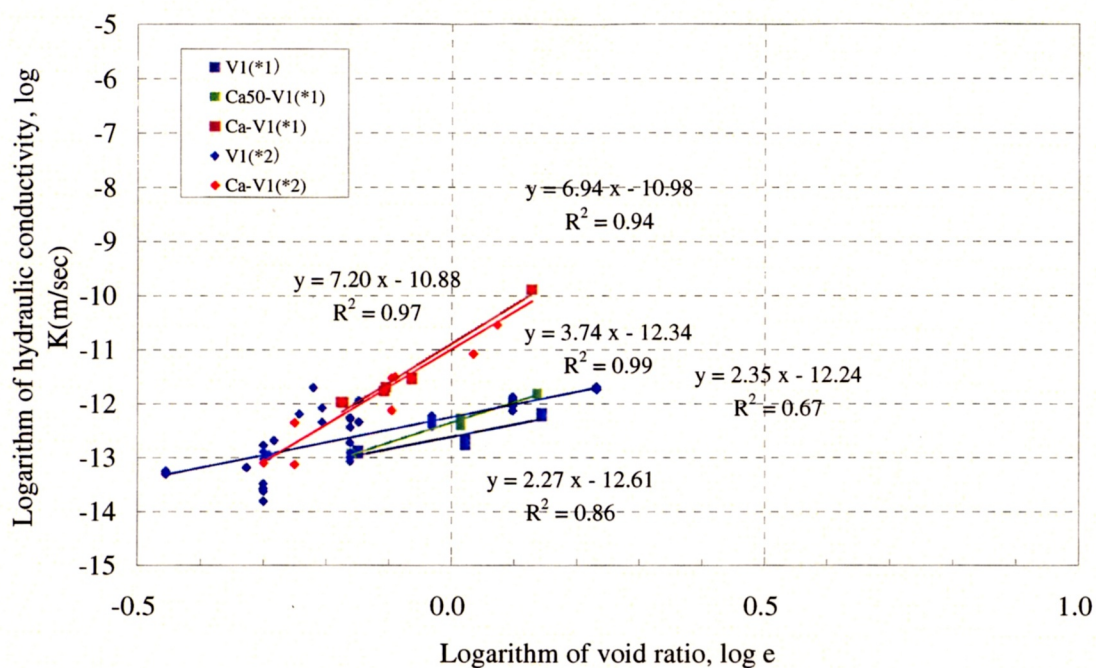
$$B = 7.51 - 5.74ESP$$

$$\text{ただし, } 0 \leq ESP \leq 1$$

全ての試験結果に基づく係数の回帰式（式(13)）と式(6)を組み合わせた式(14)によって、Ca 型化が進行したクニゲル V1 の任意の間隙比に対する透水係数を求めることが可能になる。

$$K = \{5.78 \cdot 10^{-13} + 1.00 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(5.71 - 11.43 \cdot ESP)\} \times e^{7.51 - 5.74 \cdot ESP} \quad (m/sec) \quad (14)$$

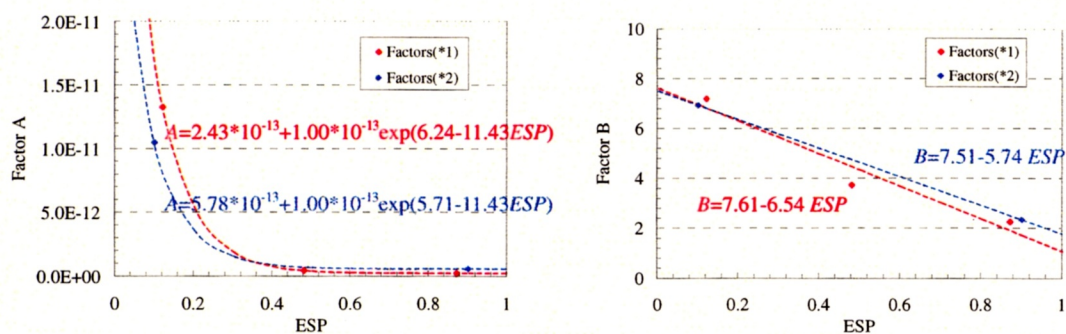
$$\text{ただし, } 0 \leq ESP \leq 1$$



*1: 笹倉ほか (2002, 2003)

*2: 笹倉ほか (2002, 2003); 鈴木ほか (1992); 松本ほか(1997); 前田ほか(1998)

図2 ESPが異なるクニゲルV1の間隙比と透水係数



*1: 笹倉ほか (2002, 2003) に基づき求めた係数

*2: 笹倉ほか (2002, 2003); 鈴木ほか (1992); 松本ほか(1997); 前田ほか(1998) に基づき求めた係数. ただし, ナトリウム型, カルシウム型の ESP を 0.85, 0.15 とした.

図3 ESPと回帰曲線係数の関係

3.4 クニゲル V1 混合土を用いた試験

ベントナイトと砂礫の混合土（以下、「ベントナイト系材料」という）の飽和透水係数に及ぼすカルシウム型化の影響についても、クニゲル V1 及び人工的にカルシウム型化させたクニゲル V1 を用いた混合土の試験結果が報告されている（鈴木ほか，1992；松本ほか，1997；前田ほか，1998；日本原子力研究所，2003；戸井田ほか，2005）。様々な混合率，密度に締め固められたベントナイト系材料の透水係数は，ナトリウム型，カルシウム型ともに有効ベントナイト乾燥密度との相関が高い（前田ほか，1998）。有効ベントナイト乾燥密度はベントナイト以外の混合物を除いて算出した乾燥密度であり，式(15)により定義される。本報告では間隙比に着目して検討していることから，ベントナイトに対する間隙の体積比であるベントナイト部分間隙比を式(16)により定義し，ベントナイト系材料の透水係数に関する評価を試みた。

$$\rho_{db} = \frac{C_b \cdot \rho_d}{1 - (1 - C_b) \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{ss}}} \quad (15)$$

$$e_{be} = \left(1 + \frac{1 - C_b}{C_b} \cdot \frac{\rho_{be}}{\rho_{ss}}\right) \cdot e \quad (16)$$

ここで， ρ_d ：ベントナイト系材料の乾燥密度（Mg/m³）， e ：ベントナイト系材料の間隙比， C_b ：ベントナイト混合率， ρ_{ss} ：砂礫の土粒子密度（Mg/m³）， ρ_{be} ：ベントナイトの土粒子密度（Mg/m³）である。

各試験で得られた透水係数 K とベントナイト部分間隙比 e_{be} との関係を図 4 に示す。また，3.3 節でクニゲル V1 単体の結果から求めたベントナイト部分間隙比と透水係数の関係式を同図に示す。3.3 節ではクニゲル V1 単体試料の結果から，間隙比と透水係数の関係として式(14)を求めた。クニゲル V1 単体試料においては，間隙比とベントナイト部分間隙比は同じ値を示すことから，ベントナイト部分間隙比と透水係数の関係は，間隙比をベントナイト部分間隙比に置き換えた式(17)によって示される。ただし，関係式に用いる ρ_{ss} ， ρ_{be} の値は 2.7 Mg/m³ とし，ESP=1 の値を下回らないものとした。

クニゲル V1，カルシウム型化させたクニゲル V1 とともに，それぞれ $\log K$ と $\log e_{be}$ には線形関係が認められ，クニゲル V1 単体の結果から求めた近似曲線と比較的よく一致している。したがって，任意の交換性ナトリウム率，任意の間隙比，任意のベントナイト混合率に対するベントナイト系材料の透水係数は，式(17)によって評価できると考えられる。

$$K = \{5.78 \cdot 10^{-13} + 1.00 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(5.71 - 11.43 \cdot ESP)\} \times e_{be}^{7.51 - 5.74 \cdot ESP} \quad (m/sec)$$

$$(0.3 \leq e_{be} \leq 3.5) \quad (17)$$

ただし, $K \geq K|_{ESP=1}$, $0 \leq ESP \leq 1$

しかしながら、ベントナイト部分間隙比が 3.5 を超えるようなベントナイト混合率が小さい混合土の透水係数は、分布範囲が大きく回帰式との相関が低い。これらはベントナイト混合率 (C_b) が 2~30% のケイ砂混合土及び C_b が 0~5% の礫・ケイ砂混合土の試験結果である。ベントナイト部分間隙比が高い範囲において透水係数の変化が大きい結果は、小峯・緒方 (2002) が考察しているように、ベントナイト混合率が小さいと飽和後も水みちとなる間隙が残存し、その透水係数は混合材の粒度特性に依存するためと考えられる。また、分布範囲が大きいことについては、混合する砂と礫の粒度分布の粒度分布が大きく違うためと考えられる。このことはベントナイト混合率が 0~15% 程度では砂の粒度特性が透水係数に与える影響は大きい (Filippo et al., 1998; 緒方ほか, 1993), ベントナイト混合率が 10% 程度以下では砂の種類により変化する (Sivapullaiah et al., 2000), とする結果と整合している。

よって、ベントナイト混合率の非常に小さい混合土の透水係数を定量的に評価するには、ベントナイト部分間隙比のほかに混合材の特性に関する指標を加える必要がある。ベントナイト部分間隙比が 3.5 を超える範囲の評価式は、スメクタイト含有量に基づく評価式 (4.4 節) で検討する。

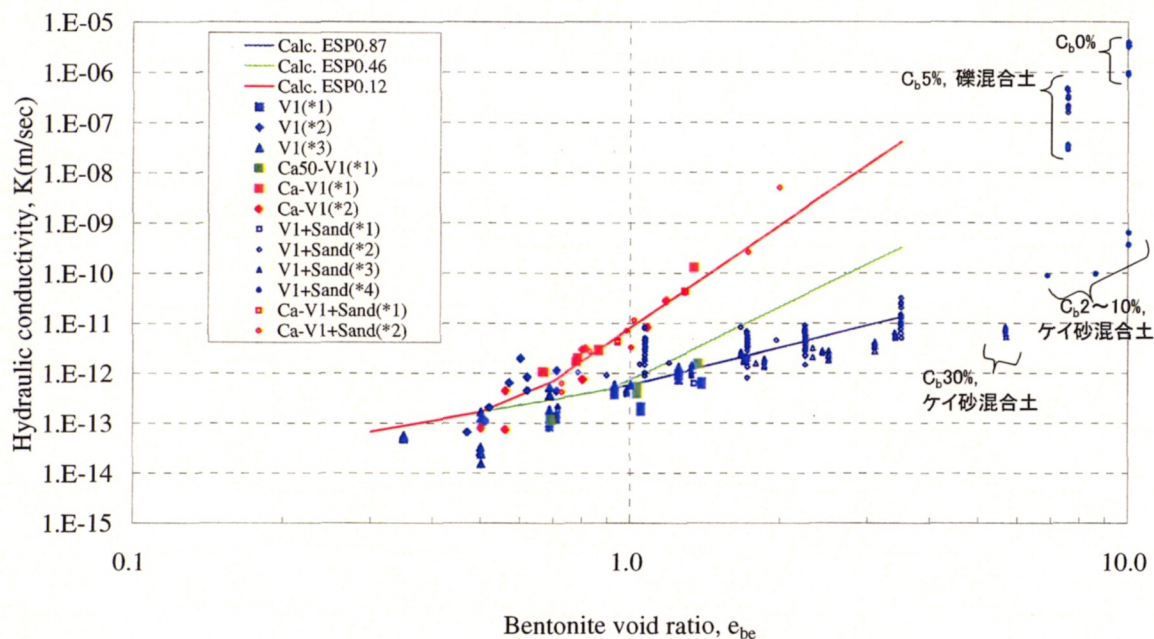


図4 ESPに応じたクニゲルV1混合土のベントナイト部分間隙比と透水係数の関係

ただし、 $e_{be} > 10$ のデータは $e_{be} = 10$ としてプロットした。

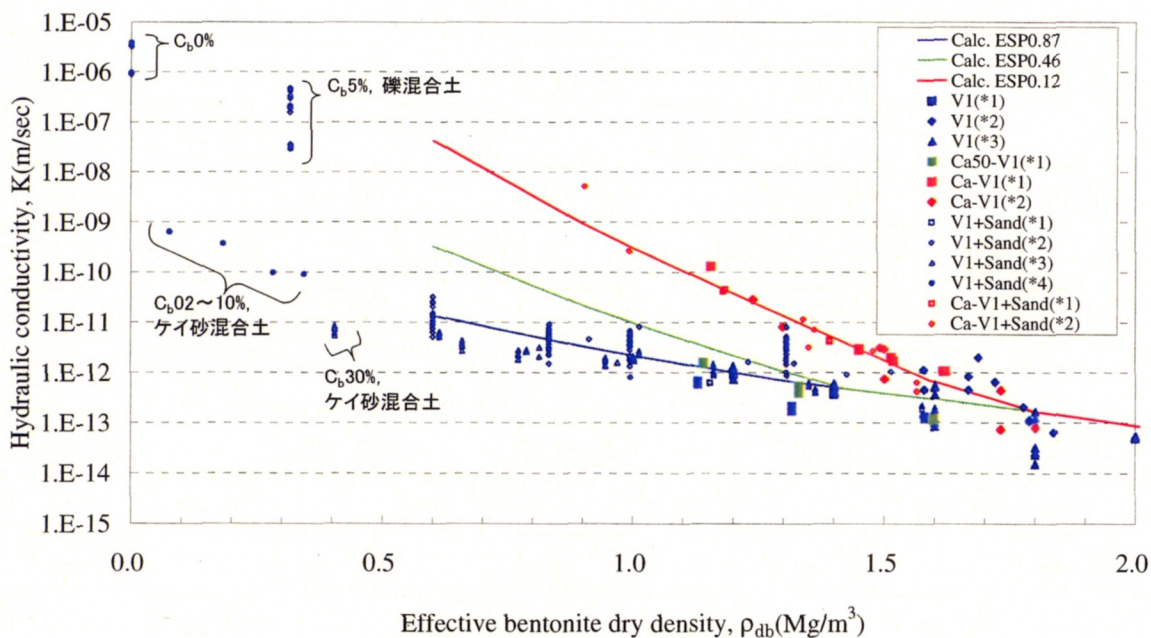


図5 ESPに応じたクニゲルV1混合土の有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係

*1：笹倉ほか（2002，2003）；戸井田ほか（2005） *2：前田ほか（1998）

*3：鈴木ほか（1992）；松本ほか（1997） *4：日本原子力研究所（2003）

4. 粘土鉱物の溶解・変質による透水係数の変化

4.1 処分場環境における鉱物学的変化

コンクリート構造物を用いた処分施設の地下水は、コンクリート中の成分の溶出によって高アルカリ性になると考えられる。高アルカリ性環境ではベントナイト構成鉱物の溶解度が上昇するため、長期的には鉱物組成が変化する可能性がある。透水係数はスメクタイト含有量や粒径分布に依存すると考えられることから、鉱物組成の変化がベントナイト系材料の透水係数に影響する可能性がある。

本章ではベントナイトの鉱物学的変化が透水係数に及ぼす影響を検討する。

4.2 クニゲル V1 を用いた試験

鉱物組成の変化は国際的にも関心の高い研究課題であるが、その透水係数に及ぼす影響を定量的に測定した事例は少ない。クニゲル V1 を用いた数少ない報告として、高アルカリ溶液で変質させたベントナイト・ケイ砂混合土に関する研究では、スメクタイトが約 4 割減少した試料の透水係数は $3.5 \times 10^{-12} \text{m/sec}$ で変質前の値（約 $5 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ ）の 7 倍に上昇したことが報告されている（黒澤ほか，2002）。

4.3 鉱物学的変化の代替指標

ベントナイトに含まれるスメクタイトは、石英などその他の含有鉱物の隙間を埋めるように存在している。ベントナイト中の透水経路となりうる粒子間隙はスメクタイトの膨潤に依存することから、透水性はスメクタイト部分の特性、密度により大きな影響を受けると考えられる。したがって、溶解・変質による透水係数の変化も、スメクタイトの部分のみの密度と相関関係があると考えられる。スメクタイト部分乾燥密度 (Sato and Miyamoto, 2001) はスメクタイト以外の混合物を除いて算出した乾燥密度であり、式(18)により定義される。本報告では間隙比に着目して検討していることから、スメクタイト部分に対する間隙の体積比であるスメクタイト部分間隙比を式(19)により定義し、スメクタイト含有量が増加したベントナイト系材料の透水係数に関する評価を試みた。

$$\rho_{ds} = \frac{C_b C_{sme} \cdot \rho_d}{1 - C_b (1 - C_{sme}) \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{am}} - (1 - C_b) \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{ss}}} \quad (18)$$

$$e_{sme} = \left(1 + \frac{1 - C_{sme}}{C_{sme}} \cdot \frac{\rho_{sme}}{\rho_{am}} + \frac{1 - C_b}{C_b C_{sme}} \cdot \frac{\rho_{sme}}{\rho_{ss}} \right) \cdot e \quad (19)$$

ここで、 ρ_d はベントナイト系材料の乾燥密度 (Mg/m^3)、 e はベントナイト系材料の間隙比、 C_b はベントナイト混合率、 C_{sme} はベントナイト中のスメクタイト含有率、 ρ_{ss} は砂礫の土粒子密度 (Mg/m^3)、 ρ_{am} は随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m^3)、 ρ_{sme} ：スメクタイトの土粒子密度 (Mg/m^3) である。

4.4 スメクタイト含有量に基づく評価式

3.3 節で式(14)を求めた手順と同様に、まずベントナイトの透水試験結果からスメクタイト部分間隙比との相関関係式を求め、次にベントナイト系材料並びに高アルカリ変質ベントナイトの透水試験結果と比較してその妥当性を検討する。

図2に示す各試験で得られた透水係数 K とスメクタイト部分間隙比 e_{sme} の関係を図6に示す。ただし、関係式に用いる C_{sme} の値は 50% とし、 ρ_{ss} , ρ_{sme} , ρ_{am} の値は 2.7 Mg/m^3 とした。図中の各直線は、笹倉らの試験結果(*1)のみに基づく回帰曲線、全ての試験結果(*2)に基づく回帰曲線を、それぞれカルシウム型化の程度 (ESP の程度) ごとに求めたものである。 $\log K$ と $\log e_{sme}$ の線形関係に基づく回帰曲線を求めた。

$$\log K = \log A + B \log e_{sme} \quad (20)$$

各々の試験結果から得られた回帰曲線を式(21)～(25)に示す。

・ 笹倉らの試験結果(*1)のみに基づく回帰曲線

$$\text{V1(ESP=0.87)} \quad \log K = -13.33 + 2.27 \log e_{sme} \quad (0.17 \leq \log e_{sme} \leq 0.46) \quad (21)$$

$$\text{Ca50-V1(ESP=0.46)} \quad \log K = -13.53 + 3.74 \log e_{sme} \quad (0.16 \leq \log e_{sme} \leq 0.45) \quad (22)$$

$$\text{Ca-V1(ESP=0.12)} \quad \log K = -13.17 + 7.20 \log e_{sme} \quad (0.14 \leq \log e_{sme} \leq 0.45) \quad (23)$$

・ 全ての試験結果(*2)に基づく回帰曲線

$$\text{V1} \quad \log K = -12.95 + 2.32 \log e_{sme} \quad (-0.15 \leq \log e_{sme} \leq 0.53) \quad (24)$$

$$\text{Ca-V1} \quad \log K = -13.11 + 6.87 \log e_{sme} \quad (0.00 \leq \log e_{sme} \leq 0.45) \quad (25)$$

さらに、式(21)～(25)の係数 A 、係数 B と ESP との関係を図7に示す。全ての試験結果(*2)に基づく係数 A 、 B の回帰曲線は、笹倉らの試験結果(*1)のみに基づく係数 A 、 B の回帰曲線と湾曲程度が等しくなると仮定して求めた。

・ 笹倉らの試験結果(*1)のみに基づく回帰曲線の係数

$$A = 0.92 \cdot 10^{-13} - 2.26 \cdot 10^{-13} \cdot \text{ESP} + 2.00 \cdot 10^{-13} \cdot \text{ESP}^2 \quad (26)$$

$$B = 7.61 - 6.54 \text{ESP}$$

ただし、 $0 \leq \text{ESP} \leq 1$

・ 全ての試験結果(*2)に基づく回帰曲線の係数

$$A = 0.91 \cdot 10^{-13} - 1.57 \cdot 10^{-13} \cdot \text{ESP} + 2.00 \cdot 10^{-13} \cdot \text{ESP}^2 \quad (27)$$

$$B = 7.44 - 5.69 \text{ESP}$$

ただし、 $0 \leq \text{ESP} \leq 1$

全ての試験結果に基づく係数の回帰式（式(27)）と式(20)の回帰式を組み合わせた式(28)によって、任意の交換性ナトリウム率及びスメクタイト部分間隙比に対するベントナイト系材料の透水係数を求めることが可能になる。

$$K = (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \quad (m/sec) \\ (0.6 \leq e_{sme} \leq 7.3) \quad (28)$$

$$\text{ただし, } K \geq K|_{ESP=1}, \quad 0 \leq ESP \leq 1$$

式(28)による透水係数を図 8, 図 9 に示す。図中のプロットは図 4, 図 5 に示す試験結果及び黒澤ら(2002)の試験で得られた透水係数である。ここでも Na 型及び Ca 型化させたケイ砂混合クニゲル V1 の結果においては、ベントナイト中に占めるスメクタイト含有率 C_{sme} は 50%, スメクタイト及び随伴鉱物の土粒子密度は 2.7 Mg/m^3 として図示した。クニゲル V1 のスメクタイト含有量は 46~49%と報告されているが（伊藤ほか, 1993）, 近年産出している鉱床では 60%程度の例もある。含有量が 60%とするとスメクタイト部分間隙比は 10~15%異なった値になることに注意する必要がある。また、黒澤らの結果においては、スメクタイト減少分はすべて随伴鉱物と同一の鉱物に変質したと仮定して図示した。

黒澤ら(2002)の値はスメクタイトが溶解・変質したベントナイト系材料の結果であるが、式(28)のほぼ線上に位置する。また、スメクタイトが溶解したベントナイトの結果ではないが、Na 型及び Ca 型化させたケイ砂混合クニゲル V1 の結果は同様に式(28)のほぼ線上に位置する。式(28)は Na 型及び Ca 型化ベントナイト単体試料の結果から求めたスメクタイト部分間隙比と透水係数の関係式であるが、任意のスメクタイト部分間隙比（任意のベントナイト混合率、任意のスメクタイト含有率）に対するスメクタイトが溶解したベントナイト系材料の透水係数は、式(28)によって評価できると推察される。ただし、スメクタイトが溶解したベントナイトの試験結果が不十分であり、今後検証する必要がある。

スメクタイト部分間隙比と透水係数の相関が高いことは、他のベントナイトの試験結果との比較からも推測できる。例として、MX-80, Avonseal, S-2, Fo-Ca, Montigel, クニボンド, Friedland Ton の透水係数(Pusch, 2001a; Lajudie, 1996; 前田ほか, 1998; Pusch, 2001b)を図 10 に示す。図のようにベントナイトの種類が異なっているクニゲル V1 の結果から求めた評価式と同様の傾向を示すことから、溶解・変質したベントナイトの透水係数はスメクタイト部分間隙比によってある程度評価できると考えられる。ベントナイトの種類による差異の一因としては、粘土分の含有量やコンシステンシー限界（含水量による状態変化の変移点）の違いが挙げられる。一般に粘性土の特性は、粘土分の含有量とコンシステンシー限界で分類されることが多い。ベントナイトの種類による差異をコンシステンシー限界や粘土分の含有量で分類できれば、溶解変質したベントナイトや種類の異なる

ベントナイトの透水係数を統一して表現できる、より汎用性の高い評価式が得られる可能性がある。

一方、処分場の環境によってはスメクタイトの溶解が著しく進行することもある。スメクタイト部分間隙比が非常に大きい場合の透水係数は、3.4 節で述べたベントナイト混合率が小さい混合土と同様に、混合材であるケイ砂や礫あるいは生成した非膨潤性鉱物など、スメクタイト以外の物性、性状に近づくと考えられる。

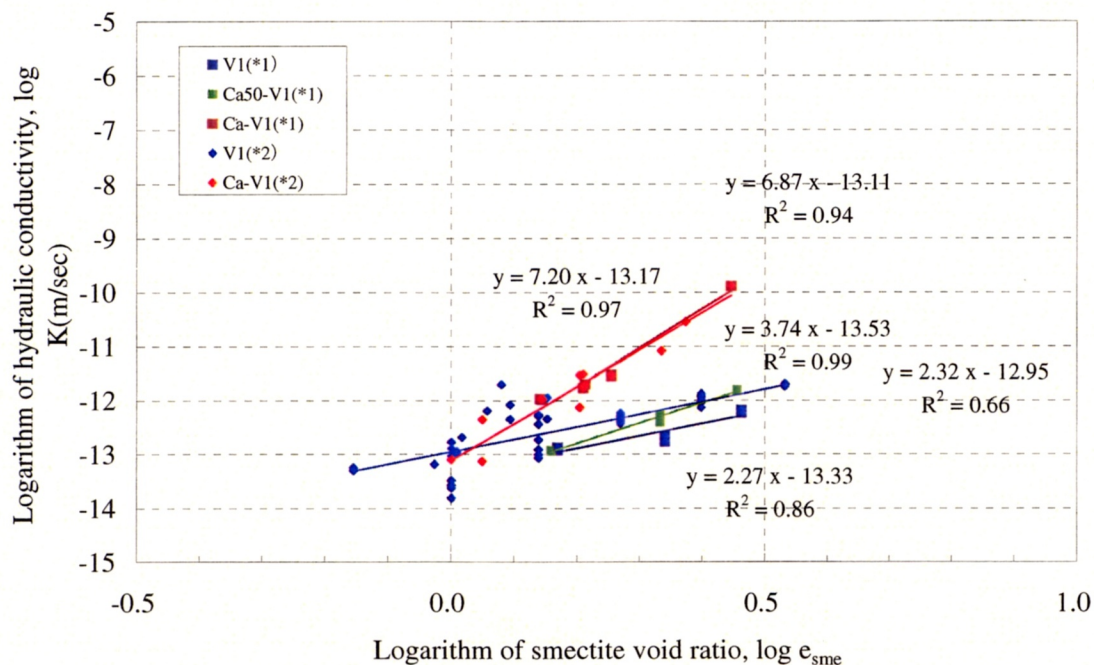
混合材として使用が想定されるケイ砂のような砂質土の透水係数は粒子の大きさ、粒度分布、粒子の形、相対密度などによって支配される。例えば、試験に用いられるケイ砂の20%径 d_{20} は 0.4mm (核燃料サイクル開発機構, 1999) であり、Creager がまとめている粒径が比較的均質な砂質土の透水係数と 20%径の関係 (土質工学会, 1986) を用いると、透水係数は $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ である。この値は砂礫のみ ($C_b 0\%$) の試験結果と同程度である。生成した非膨潤性鉱物の粒径はケイ砂の粒径と同等かより小さいと考えられることから、カルシウム型化や溶解・変質が進行したケイ砂混合土の透水係数は、最大で $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 程度と推定される。

以上の検討から、スメクタイトが溶解変質したベントナイト系材料の透水係数 (K) はベントナイト混合土の透水係数と同様に交換性ナトリウム率 (ESP) 及びスメクタイト部分間隙比 (e_{sme}) を用いて表せるとし、 $e_{sme} < 7.0$ では式(28)を評価式とした。 $e_{sme} > 7.0$ ではスメクタイト以外の物性、性状に大きく依存すると考えられる。ケイ砂混合土及び礫混合土の試験結果の分布範囲を保守的に包含するように、 $d(\log K)/d(\log e_{sme}) = 11.4$ と設定した。また、最大値を $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ とした。設定した評価式(29)による透水係数とスメクタイト部分間隙比、スメクタイト部分乾燥密度との関係をそれぞれ図 11, 図 12 に示す。図中のプロットは図 8 又は図 9 に示す試験結果である。

$$K = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \cdots e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \cdot \left(\frac{e_{sme}}{7.0} \right)^{11.4} \cdots e_{sme} > 7.0 \end{cases} \quad (29)$$

(m/sec)

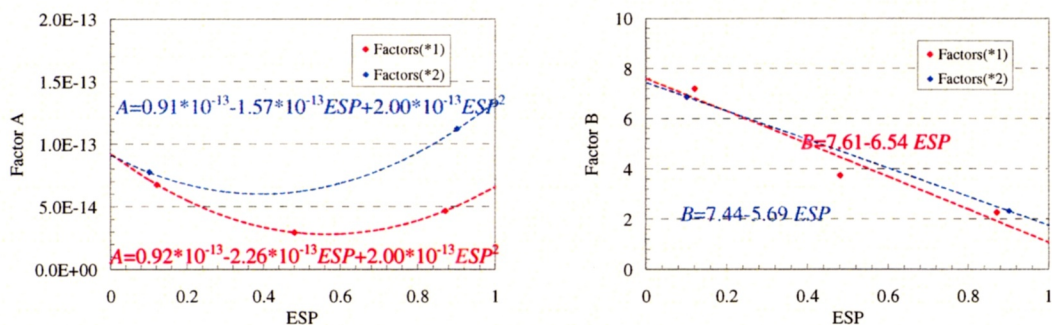
ただし、 $K \geq K|_{ESP=1}$, $K \leq 1.0 \cdot 10^{-5}$, $0 \leq ESP \leq 1$



*1: 笹倉ほか (2002, 2003)

*2: 笹倉ほか (2002, 2003); 鈴木ほか (1992); 松本ほか(1997); 前田ほか(1998)

図6 ESPが異なるクニゲルV1のス멕タイト部分間隙比と透水係数



*1: 笹倉ほか (2002, 2003) に基づき求めた係数

*2: 笹倉ほか (2002, 2003); 鈴木ほか (1992); 松本ほか(1997); 前田ほか(1998) に基づき求めた係数. ただし, ナトリウム型, カルシウム型の ESP を 0.85, 0.15 とした.

図7 ESPと回帰曲線係数の関係

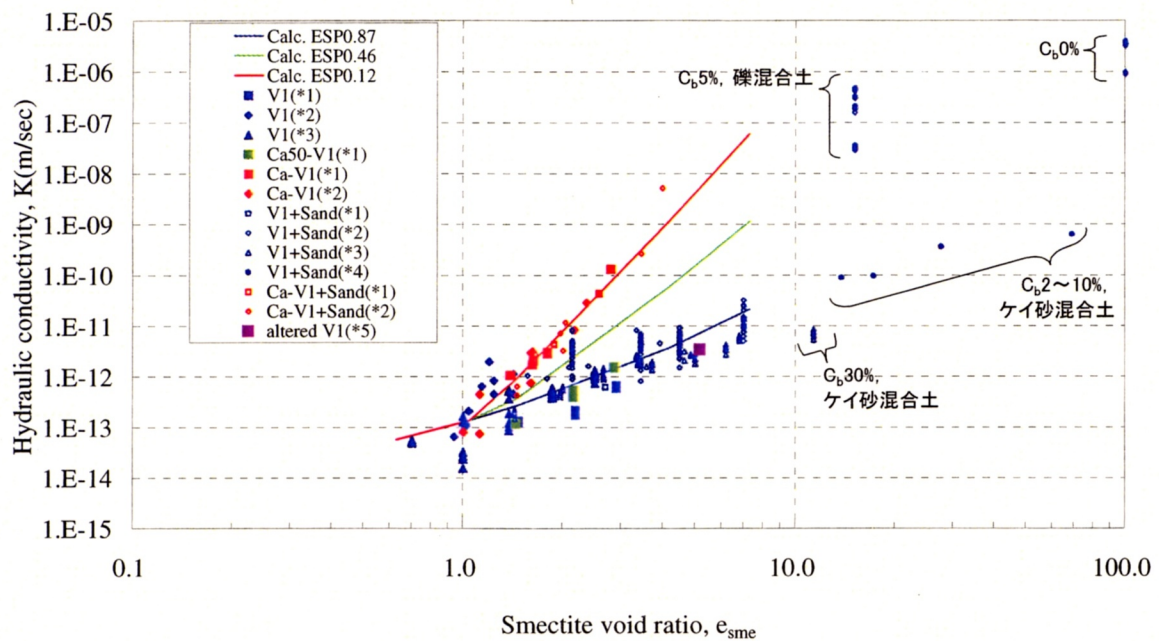


図8 ベントナイト系材料のスメクタイト部分間隙比と透水係数の関係
(ESP が異なるクニゲル V1 混合土, アルカリ変質させたクニゲル V1)

ただし, $e_{sme} > 100$ のデータは $e_{sme} = 100$ としてプロットした。

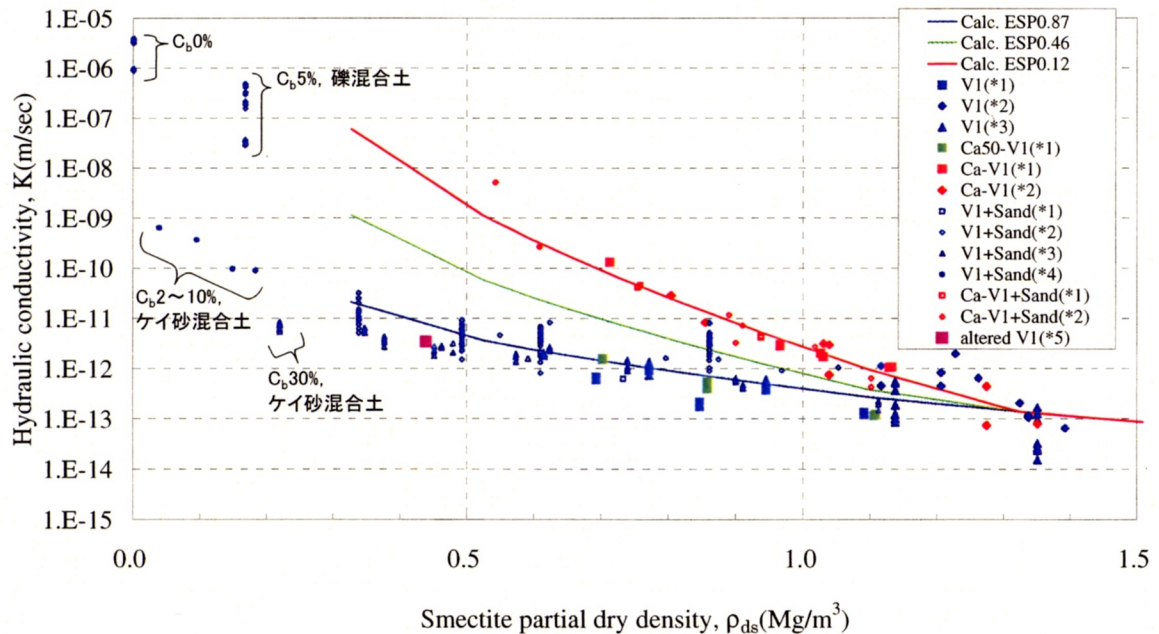


図9 ベントナイト系材料のスメクタイト部分乾燥密度と透水係数の関係
(ESP が異なるクニゲル V1 混合土, アルカリ変質させたクニゲル V1)

*1: 笹倉ほか (2002, 2003); 戸井田ほか (2005) *2: 前田ほか(1998)

*3: 鈴木ほか (1992); 松本ほか(1997) *4: 日本原子力研究所 (2003) *5: 黒澤ほか(2002)

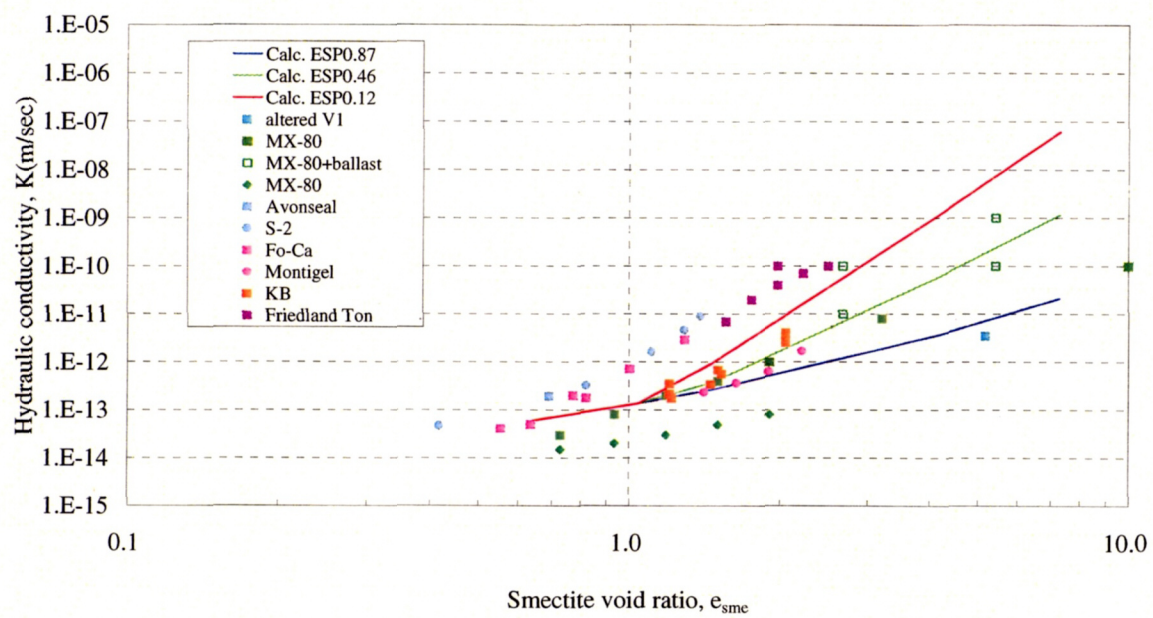


図 10 多種類のベントナイトのスメクタイト部分間隙比と透水係数

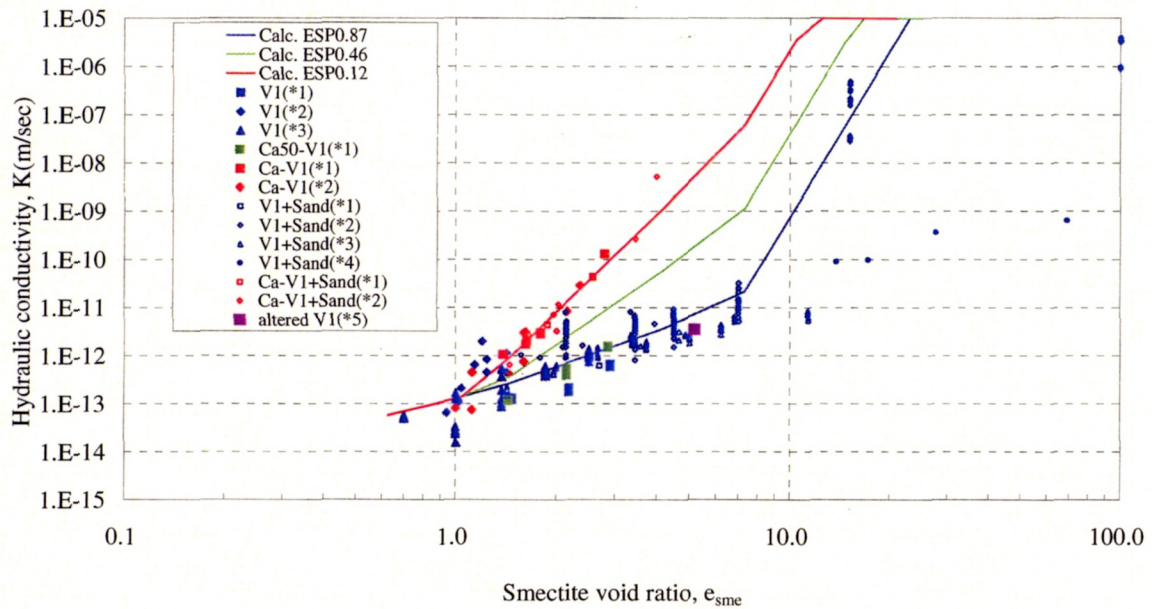


図 11 スメクタイト部分間隙比と透水係数の関係

ただし、 $e_{sme} > 100$ のデータは $e_{sme} = 100$ としてプロットした。

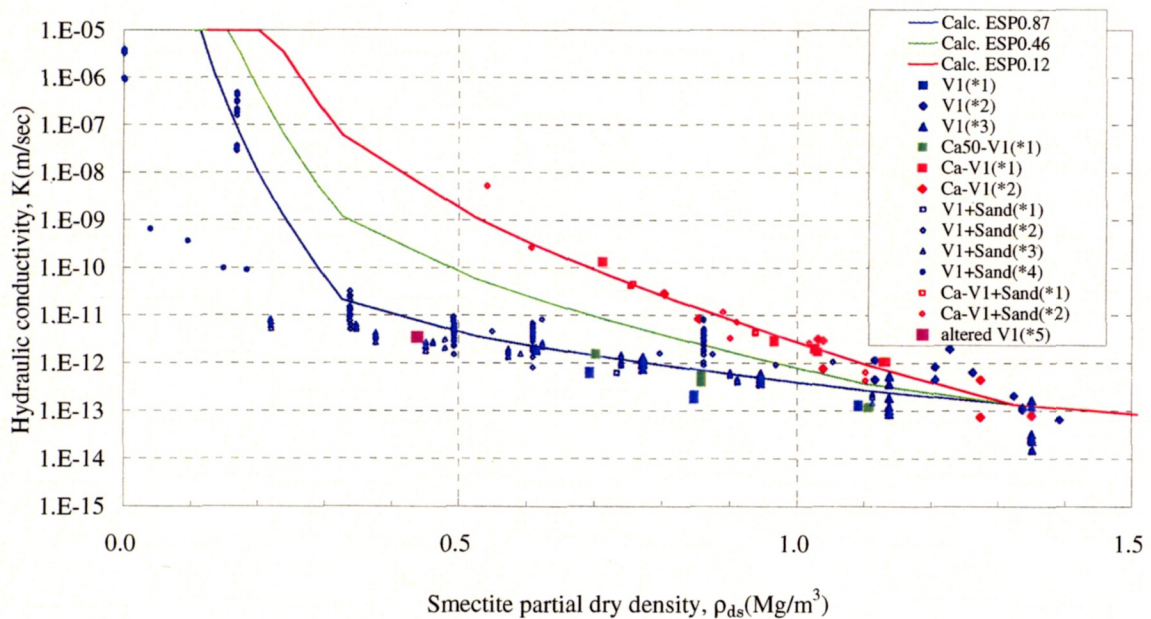


図 12 スメクタイト部分乾燥密度と透水係数の関係

*1: 笹倉ほか (2002, 2003); 戸井田ほか (2005) *2: 前田ほか (1998)

*3: 鈴木ほか (1992); 松本ほか (1997) *4: 日本原子力研究所 (2003) *5: 黒澤ほか (2002)

5. 地下水の濃度変化による透水係数の変化

5.1 処分場環境における地下水の濃度変化

処分場環境においては、海水系地下水による再冠水、コンクリート中の成分の溶出、廃棄体中の易溶性物質の溶出によって、ベントナイト系材料の地下水濃度が変化することが考えられる。荷電を持った粒子を含む粘土は、土粒子と土中溶液の相互作用が大きく、土粒子の持つ電荷の質と量、土に付着している陽イオンの価数のほかに、粒子の周辺に存在する電解質溶液の塩濃度、pHにより透水係数も変化する。

この章では、地下水の濃度が透水係数に及ぼす影響を考慮した評価式について検討する。まず地下水の濃度変化の代替指標について5.2節で述べる。次に、蒸留水中の透水係数評価式に対して、濃度の影響を考慮するための補正係数を既往の試験結果を参照して設定する。参照する試験研究では、ベントナイト及び混合するケイ砂の量を管理しているため、ベントナイト部分間隙比（有効ベントナイト乾燥密度）と透水係数の関係に着目したものが多し。本報告では4章のようにスメクタイト量が増加した場合を含めた透水係数評価式の設定を目的としていることから、スメクタイト部分間隙比（スメクタイト部分乾燥密度）と透水係数の関係についても検討することとした。5.3節及び5.4節でベントナイト部分間隙比と透水係数の関係式を、5.5節でスメクタイト部分間隙比と透水係数の関係式を設定する。

5.2 地下水の濃度変化の代替指標

蒸留水以外の試験溶液を用いて透水係数を測定した試験研究では、試験溶液の影響の指標として塩濃度又はイオン強度を用いていることが多い。本報告では、バルク試料に通水させる溶液の当量イオン濃度で整理を試みることにした。高濃度溶液を用いた透水試験では、試験期間中に陽イオン交換や鉱物の溶解・変質が進行している可能性もある。しかし、蒸留水及び人工海水に浸漬させた供試体の底面間隔をX線回折装置で測定した結果に顕著な差が見られないこと（菊池ほか、2003）、蒸留水及び硝酸ナトリウム溶液を通水させた供試体の固相分析結果にも顕著な差が見られないことから（入矢ほか、2004）、これらの影響は小さいと考えて当量イオン濃度のみに着目した。

また、高濃度溶液中で測定した透水係数には溶液の粘性の影響が含まれる。粘性の影響が大きい場合は、構造特性に由来する透過抵抗を示す固有透過度について検討する方法がある。透水係数、固有透過度、粘性は式(30)に示す関係を有する。

$$K = \frac{\kappa \rho g}{\mu} \quad (30)$$

ここで、K: 透水係数(m/s)、 κ : 固有透過度(m²)、 ρ : 溶液の密度(kg/m³)、g: 重力加速度(m/s²)、 μ : 溶液の粘性率(Pa・s)である。粘性係数 ν ($\equiv \mu/\rho$)は濃度が高くなるほど大きくなるが、室温で、通常用いる溶液濃度の範囲においてはその差は小さい(NaCl 溶液や CaCl₂ 溶液 3mol/kg で水の 1.2~1.35 倍)。よって、透水性に及ぼす影響を評価する観点からは透水係数と固有透過度はほぼ同義の指標にとらえて、透水係数についてのみ検討した。

5.3 クニゲル V1 を用いた試験

ベントナイトの飽和透水係数に及ぼす通液の影響について、有効ベントナイト乾燥密度 $1.2 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ のクニゲル V1 (V1) 及びそのケイ砂混合土 (V1+Sand) に蒸留水 (DW) 及び人工海水 (SW) を通水した試験結果が報告されている (菊池ほか, 2003)。試験で得られた透水係数とベントナイト部分間隙比の関係を図 13 に示す。図中に $\log K$ と $\log e_{be}$ の線形関係による回帰曲線を示す。人工海水を通水した透水係数はそれぞれ同じ密度で蒸留水を通水した値の 10~40 倍であり、間隙比が大きいほど (密度が低いほど) 影響は大きい。各々の試験結果から得られた回帰曲線を式(31), (32)に示す。

・ 蒸留水を通水した試験結果に基づく回帰曲線

$$\log K = -12.31 + 3.44 \log e_{be} \quad (-0.30 \leq \log e_{be} \leq 0.23) \quad (31)$$

・ 人工海水を通水した試験結果に基づく回帰曲線

$$\log K = -10.81 + 5.66 \log e_{be} \quad (-0.30 \leq \log e_{be} \leq 0.11) \quad (32)$$

また、通液の濃度がベントナイト (クニゲル V1) の飽和透水係数に及ぼす影響について、クニゲル V1 (V1) 及びそのケイ砂混合土 (V1+Sand) に様々な濃度の塩化ナトリウム (NaCl) または人工海水 (SW) を通水した試験結果 (鈴木ほか, 1992; 日本原子力研究所, 2003; 核燃料サイクル開発機構, 2004) が報告されている。さらに、TRU 廃棄物処分に関する研究では、セメント系材料や硝酸塩を含む廃棄体からの浸出液を模した溶液をクニゲル V1 のケイ砂混合土 (V1+Sand) に通水した試験結果 (入矢ほか, 2004) が報告されている。通液は水酸化カルシウム飽和溶液 (CW), CW に NaOH, KOH を添加した高アルカリ溶液 (AW), AW に硝酸ナトリウムを添加した溶液 (AWN), 硝酸ナトリウム溶液 (NaNO_3) である。また、人工的にナトリウム型化させたクニゲル V1 (Na-V1) に NaCl を通水した試験結果や人工的にカルシウム型化させたクニゲル V1 (Ca-V1) に CaCl_2 を通水した試験結果が報告されている (戸井田ほか, 2005)。

各試験で用いられた通液の当量イオン濃度と透水係数の関係を図 14 に示す。これらの測定結果 (K) のうち、それぞれの報告の中で同じ有効ベントナイト乾燥密度の供試体に当量イオン濃度 $0 \sim 0.01 \text{ eq/dm}^3$ の通液を通水した透水係数 (K_0) が測定されている結果については、 K_0 で正規化した値 K/K_0 (以下、「相対透水係数」という) を求めた。相対透水係数を図 15 に示す。クニゲル V1 及びそのケイ砂混合土の透水係数の対数は、通液 (NaCl, 人工海水, AW, CW, AWN, NaNO_3) の当量イオン濃度 1 eq/dm^3 程度までは当量イオン濃度にほぼ比例する。その増加率は有効ベントナイト乾燥密度によって異なるが 10~100 倍程度で、有効ベントナイト乾燥密度が低いほど大きい。有効ベントナイト乾燥密度 1.4 Mg/m^3 の圧縮ベントナイトに NaCl 及び SW を通水した試験結果からは、通液の種類による影響は小さ

いことが認められる。また、当量イオン濃度が 1eq/dm^3 を超えると当量イオン濃度の影響は小さくなることが認められる。有効ベントナイト乾燥密度 1.36Mg/m^3 の圧縮ベントナイトに CW, AW, Awn 及び NaNO_3 を通水した試験結果も同様に、通液の種類による影響は小さい。また、当量イオン濃度が 2eq/dm^3 を超えると当量イオン濃度の影響は小さくなる。一方、カルシウム型化させたベントナイトの結果では、通液 (CaCl_2) の当量イオン濃度が透水係数に及ぼす影響は小さい。

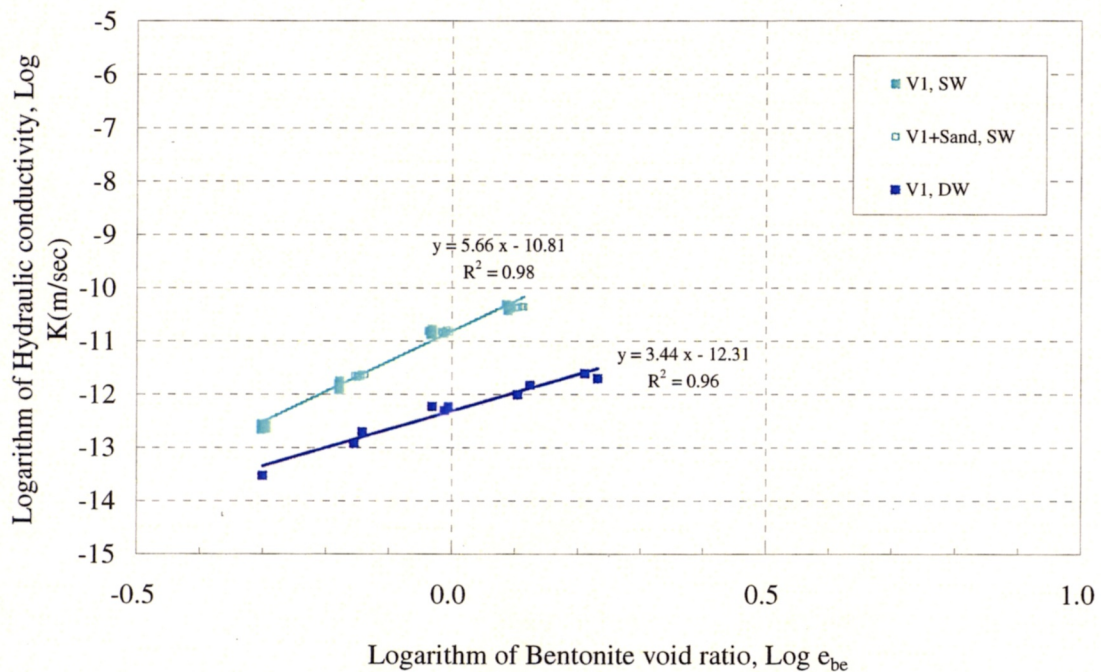


図 13 人工海水(SW)及び蒸留水(DW)を通水したクニゲル V1 の透水係数

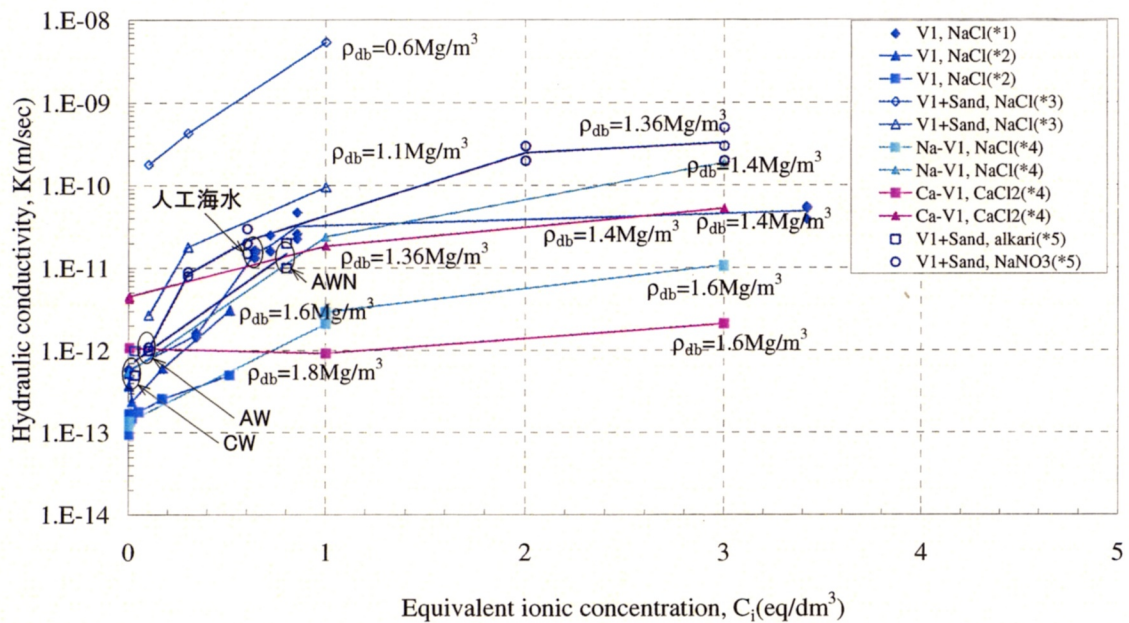


図 14 通液の当量イオン濃度と透水係数

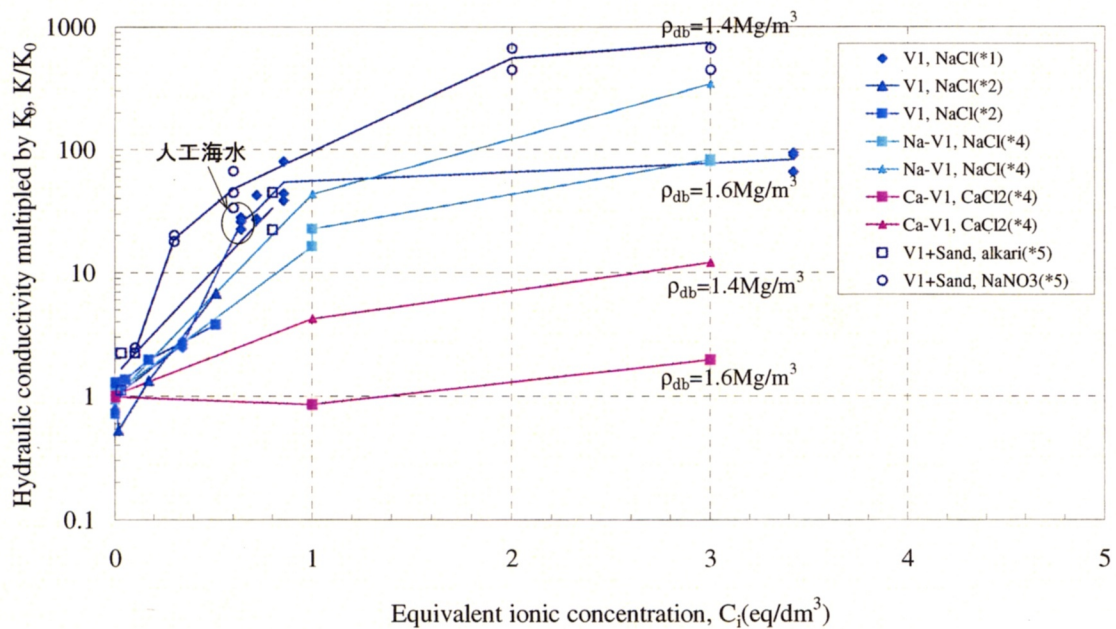


図 15 通液の当量イオン濃度と相対透水係数

*1:核燃料サイクル開発機構(2004) *2:鈴木ほか(1992) *3:日本原子力研究所(2003)

*4:戸井田ほか(2005) *5:入矢ほか(2004)

5.4 ベントナイト含有量に基づく評価式

前節で参照した試験結果から、試験溶液の当量イオン濃度が高いほど透水係数は上昇し、相対透水係数はベントナイトの有効ベントナイト乾燥密度が低いほど、また粘土鉱物中の吸着イオンの価数が小さいほど大きいことが推察される。この傾向はクニゲル V1 では限られた範囲の試験条件でしか示されていないが、溶液濃度と緩衝材の飽和透水係数の関係に関する研究 (Pusch, 2001) やスメクタイトの透水係数と溶液濃度に関する研究 (Mesri and Olson, 1971) にも同様に認められる。

ある有効ベントナイト乾燥密度のベントナイトについて、蒸留水中での透水係数を K_0 、任意の当量イオン濃度での透水係数を K とし、相対透水係数 K/K_0 を以下のように濃度影響の補正係数として表すことを考える。

$$\frac{K}{K_0} = \frac{A}{A_0} \cdot e_{be}^{B-B_0} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \log K &= \log A + B \log e_{be} \\ \log K_0 &= \log A_0 + B_0 \log e_{be} \end{aligned}$$

菊池ら(2003)の結果に基づく回帰曲線の係数 $\log A$ 、係数 B (式(31), (32)) と通液の当量イオン濃度との関係を図 16 に示す。係数 $\log A$ 、係数 B はともに当量イオン濃度の増加にしたがって増加する。当量イオン濃度に比例して増加すると仮定すると、任意の当量イオン濃度に対する係数 $\log A$ 、係数 B は式(34)で表すことができ、その増分は式(35)となる。

$$\begin{aligned} \log A &= -12.31 + 2.34 \cdot c_i \\ B &= 3.44 + 3.47 \cdot c_i \end{aligned} \quad (34)$$

$$\log \frac{A}{A_0} = 2.34 \cdot c_i \quad (35)$$

$$B - B_0 = 3.47 \cdot c_i$$

式(33)と式(35)により、任意のベントナイト部分間隙比及び当量イオン濃度に対する相対透水係数 K/K_0 を求めることが可能になる。

一方で、相対透水係数 K/K_0 は当量イオン濃度が臨界値 (以下、「臨界当量イオン濃度 C_{it} 」という) を超えると一定になることが図 15 より示唆される。このときの値 (以下、相対透水係数最大値 K/K_{0max}) は有効ベントナイト密度 (ρ_{ab}) に依存していることから、 $\rho_{ab}=1.4 \sim 1.6 \text{Mg/m}^3$ ($e_{be}=0.7 \sim 0.93$) の結果に基づき式(36)とした。ただし、有効ベントナイト乾燥密度が 1.4Mg/m^3 以下で当量イオン濃度が 1.0eq/dm^3 を超えるときの適用性は確認できていないので、今後検討する必要がある。実際の相対透水係数は評価式より大きい可能性がある一方で、有効ベントナイト乾燥密度がある値より低いと (すなわち、粘土分がある程度

減少すると) 粒子と溶液の相互作用が小さくなることから評価式より小さいと考えられる。

$$\left(\frac{K}{K_0}\right)_{\max} = 10^{3.26 \cdot e_{be} - 0.24} \quad (36)$$

また、カルシウム型化させたクニゲル V1 の結果は、 $(K/K_0)_{\max}$ は交換性陽イオン組成にも依存することを示唆している。このことは、Na・Ca 混合溶液の溶液濃度、交換性ナトリウム率 (ESP) と飽和透水係数との関係に関する研究 (McNeal and Coleman, 1966) から支持される。McNeal and Coleman は、溶液濃度が及ぼす影響は ESP の増加とともに顕著になること、透水係数が濃度によらず一定となり始める濃度 (臨界濃度; C_{it}) は ESP の増加とともに大きくなる結果を示している。

そこで、 $(K/K_0)_{\max}$ 、 C_{it} に及ぼす ESP の影響は、乾燥密度 1.4~1.6 Mg/m³ のクニゲル V1 と Ca 型化クニゲル V1 の結果及び McNeal and Coleman (1966) の結果を参考に、式 (37) のように規定することとした。ただし、この式も式 (36) と同様、乾燥密度 1.4~1.6 Mg/m³ の結果から推測できるだけで、 C_{it} と間隙比の関係は確認できていないことから、広範囲の間隙比を対象とする場合は、 C_{it} の設定方法も見直す必要がある。

$$\log c_{it} = 1.49 \cdot ESP - 1.0 \quad (37)$$

以上の検討から、地下水の塩濃度の影響を表す補正係数を式 (33)、(35)~(37) をまとめた式 (38) で表すこととした。

$$\frac{K}{K_0} = 10^{2.34 \cdot c_i} \cdot e_{be}^{3.47 \cdot c_i} \quad (38)$$

ただし、 $C_i > C_{it} = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $C_i = C_{it}$

$$\frac{K}{K_0} > \left(\frac{K}{K_0}\right)_{\max} = 10^{3.26 \cdot e_{be} - 0.24} \text{ のとき, } \frac{K}{K_0} = \left(\frac{K}{K_0}\right)_{\max}$$

ここで、 K_0 : 当量イオン濃度が 0~0.01 eq/dm³ の溶液を用いて得られる透水係数、 C_i : 溶液の当量イオン濃度 (eq/dm³)、 C_{it} : 臨界当量イオン濃度 (eq/dm³)、ESP: 交換性ナトリウム率である。

式 (38) による相対透水係数を図 18、図 19 に示す。また、式 (38) と式 (17) によって、任意の当量イオン濃度、任意のベントナイト部分間隙比に対するクニゲル V1 の透水係数を求めることが可能になる。この評価式によって求めた透水係数と当量イオン濃度の段階別に示したすべての試験結果を図 20、図 21 に示す。

評価式は、ベントナイト部分間隙比 0.7~1.3 (有効ベントナイト乾燥密度 1.2~1.6 Mg/m³) の試験結果と比較的一致している。ただし、上述したようにより広範囲の間隙比を対象と

する場合は、クニゲル V1 を用いた試験結果を蓄積し、それぞれの有効ベントナイト乾燥密度に応じた当量イオン濃度の影響を検証する必要がある。

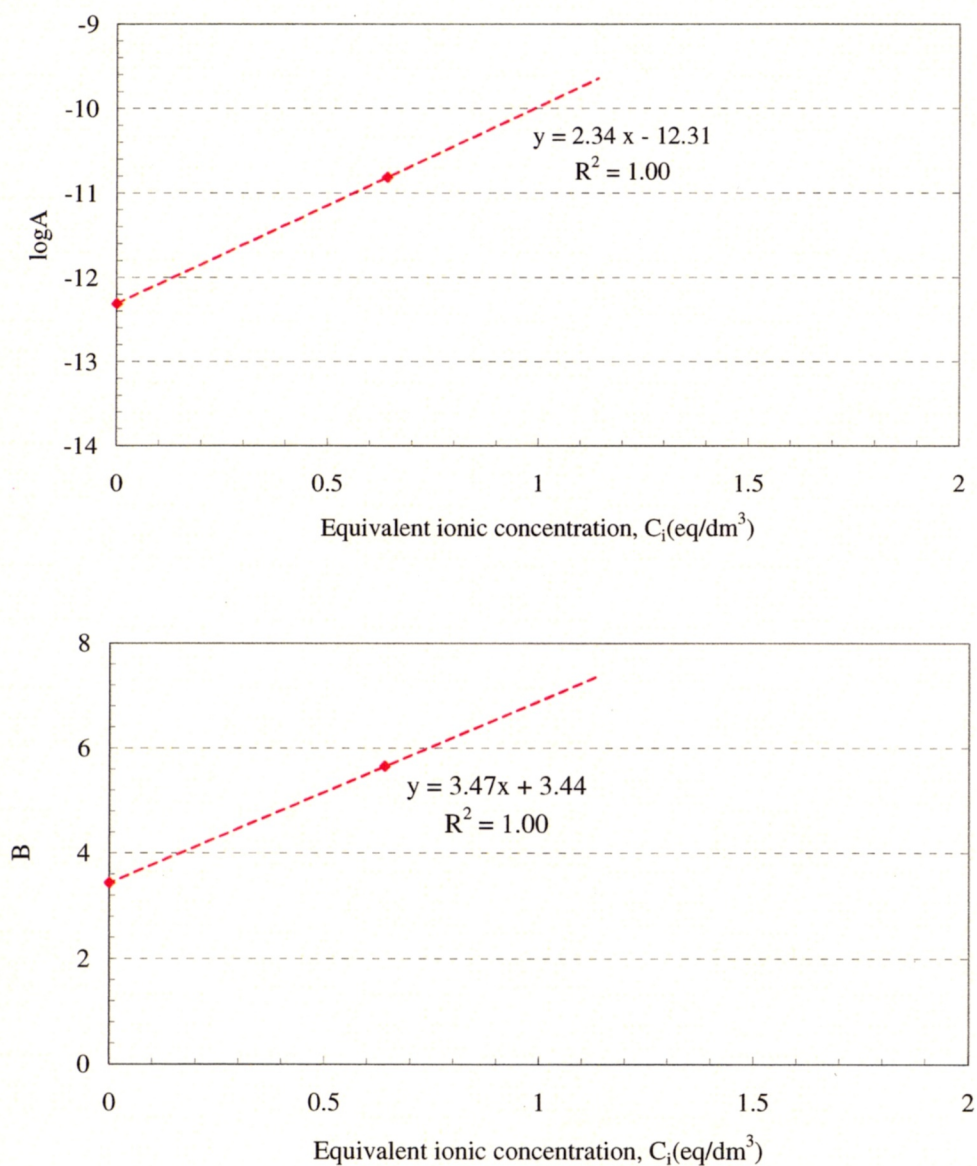


図 16 通液の当量イオン濃度と回帰曲線係数の関係

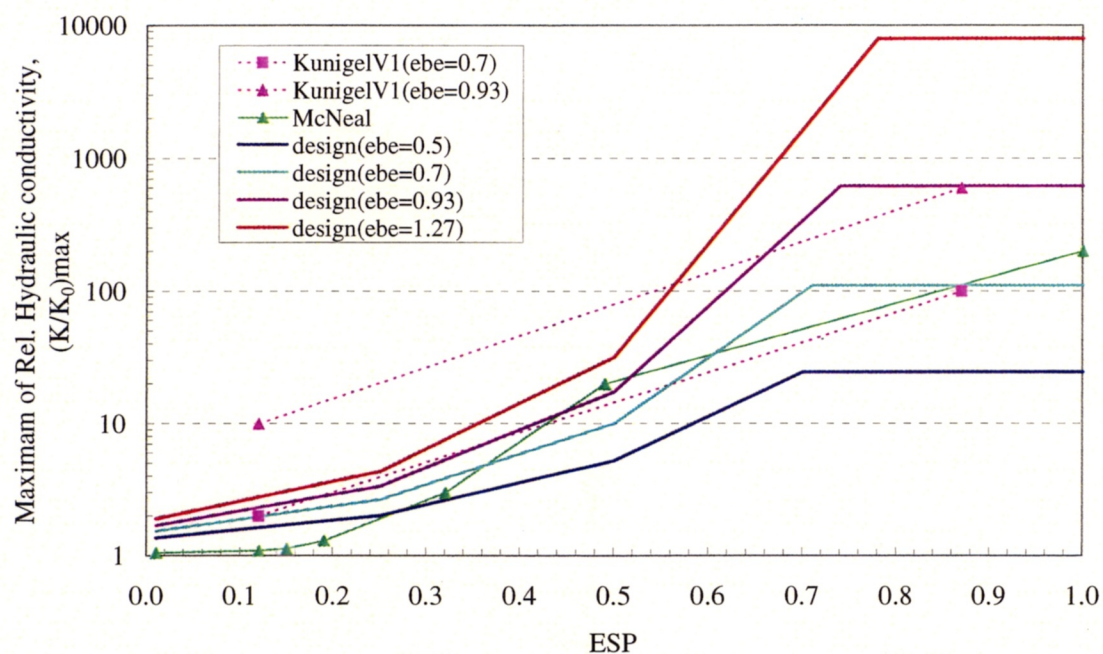


図 17 交換性ナトリウム率(ESP)と相対透水係数最大値 $(K/K_0)_{\max}$ の関係

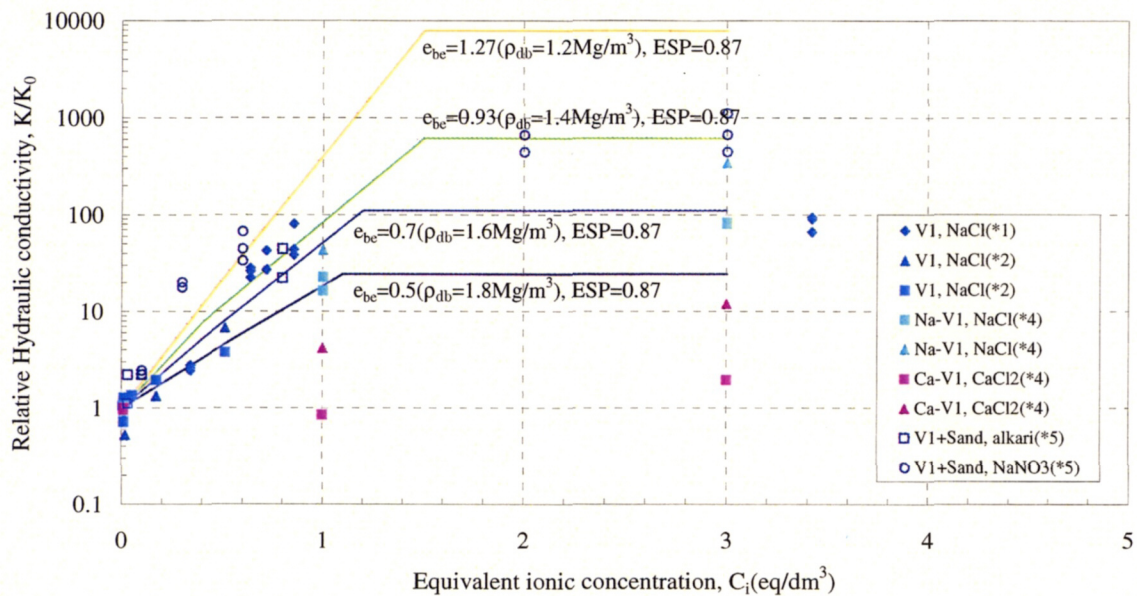


図 18 ベントナイト部分間隙比に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係

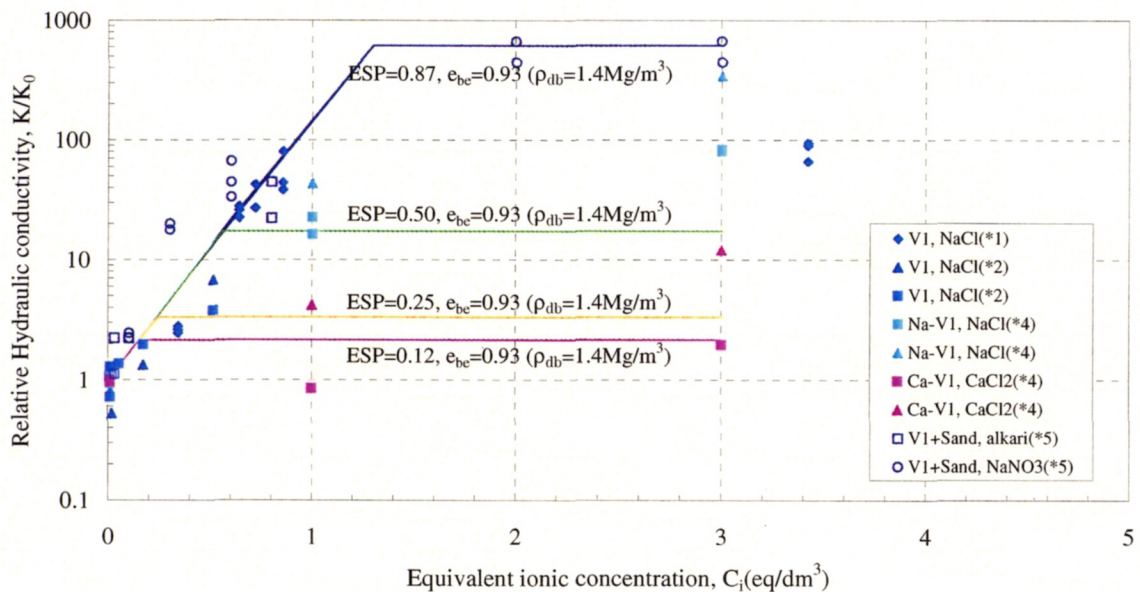


図 19 ESP に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係

*1: 核燃料サイクル開発機構(2004) *2: 鈴木ほか(1992) *3: 日本原子力研究所(2003)

*4: 戸井田ほか(2005) *5: 入矢ほか(2004)

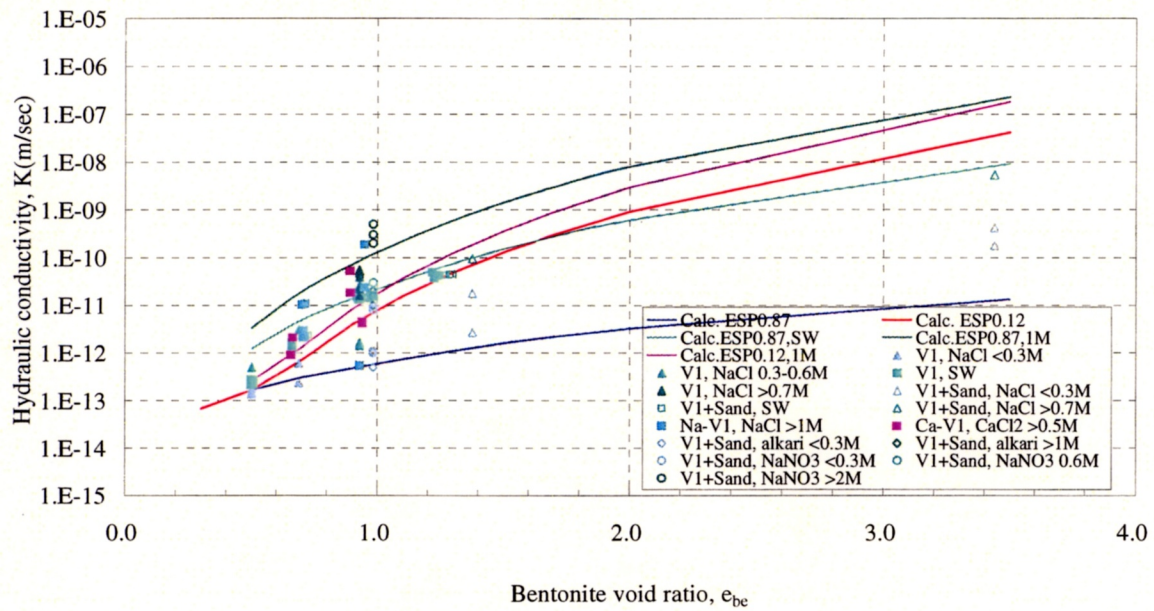


図 20 当量イオン濃度に応じたベントナイト部分間隙比と透水係数の関係

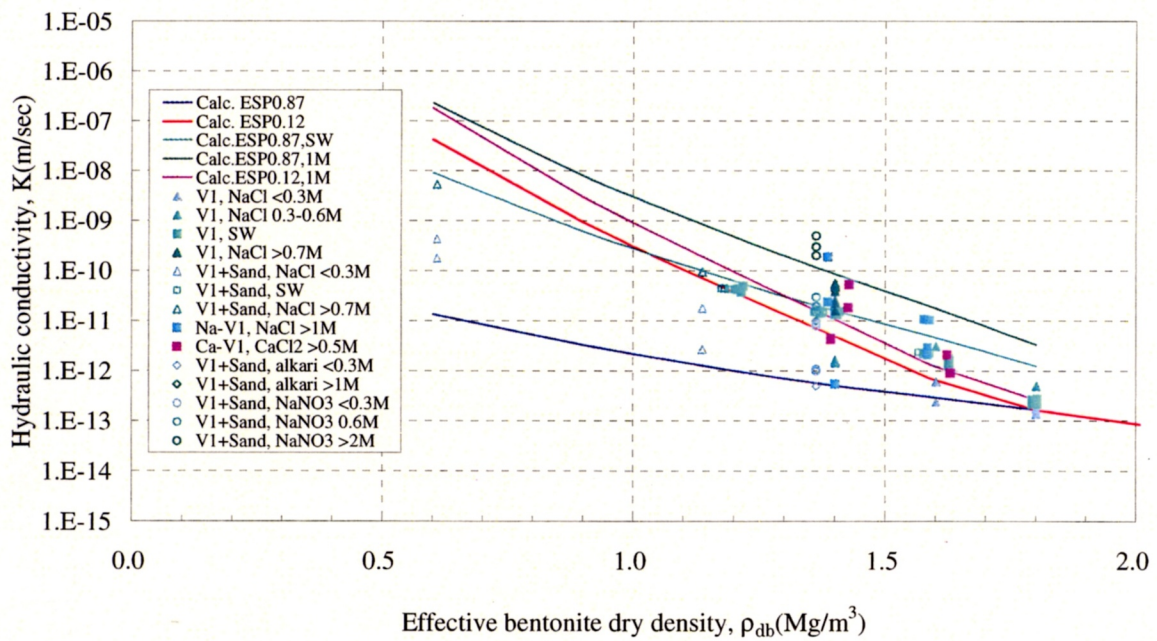


図 21 当量イオン濃度に応じた有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係

5.5 スメクタイト含有量に基づく評価式

ここでは、前節で式(38)を求めた手順と同様に、スメクタイト部分間隙比を用いた評価式を設定する。

有効ベントナイト乾燥密度 $1.2 \sim 1.8 \text{Mg/m}^3$ のクニゲル V1 及びそのケイ砂混合土に蒸留水 (DW) 及び人工海水 (SW) を通水して得られた透水係数 (菊池ほか, 2003) を図 22 に示す。図中では $\log K$ と $\log e_{sme}$ の線形関係に基づく回帰曲線を求めている。各々の試験結果から得られた回帰曲線を式(39), (40)に示す。

・ 蒸留水を通水した試験結果に基づく回帰曲線

$$\log K = -13.34 + 3.44 \log e_{sme} \quad (0.00 \leq \log e_{sme} \leq 0.53) \quad (39)$$

・ 人工海水を通水した試験結果に基づく回帰曲線

$$\log K = -12.51 + 5.67 \log e_{sme} \quad (0.00 \leq \log e_{sme} \leq 0.41) \quad (40)$$

ここで、あるスメクタイト部分間隙比のベントナイト系材料について、蒸留水中での透水係数を K_0 、任意の当量イオン濃度での透水係数を K とし、その相対透水係数 K/K_0 を以下のように濃度影響の補正係数として表すことを考える。

$$\frac{K}{K_0} = \frac{A}{A_0} \cdot e_{sme}^{B-B_0} \quad (41)$$

$$\log K = \log A + B \log e_{sme}$$

$$\log K_0 = \log A_0 + B_0 \log e_{sme}$$

図 22 に示す回帰曲線の係数 $\log A$ 、係数 B (式(39), 式(40)) と試験溶液中の当量イオン濃度との関係を図 23 に示す。係数 $\log A$ 、係数 B はともに当量イオン濃度に比例して増加すると仮定すると、任意の当量イオン濃度に対する係数 $\log A$ 、係数 B の増分は下式で表すことができる。

$$\log \frac{A}{A_0} = 1.30 \cdot C_i \quad (42)$$

$$B - B_0 = 3.48 \cdot C_i$$

ただし、相対透水係数 K/K_0 は、当量イオン濃度が臨界当量イオン濃度 (C_{it}) を超えると一定になり、また、ESP に依存することが示唆されている。よって、相対透水係数最大値と臨界当量イオン濃度を式(43), (37)のように規定した。

$$\left(\frac{K}{K_0} \right)_{\max} = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \quad (43)$$

$$\log C_{it} = 1.49 \cdot \text{ESP} - 1.0 \quad (37 \text{ 再掲})$$

式(41), (42), (43), (37)をまとめると, 地下水の塩濃度の影響を表す補正係数は式(44)で表される。

$$\frac{K}{K_0} = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 C_i} \quad (44)$$

ただし, $C_i > C_{it} = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき, $C_i = C_{it}$

$$\frac{K}{K_0} > \left(\frac{K}{K_0} \right)_{\max} = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \text{ のとき, } \frac{K}{K_0} = \left(\frac{K}{K_0} \right)_{\max}$$

ここで, K_0 : 当量イオン濃度が $0 \sim 0.01 \text{ eq/dm}^3$ の溶液を用いて得られる透水係数, C_i : 溶液の当量イオン濃度(eq/dm^3), C_{it} : 臨界当量イオン濃度(eq/dm^3), ESP : 交換性ナトリウム率である。

式(44)による相対透水係数を図 24, 図 25 に示す。また, 式(44)と式(28)によって, 任意の当量イオン濃度, 任意のベントナイト部分間隙比に対するクニゲル V1 の透水係数を求めることが可能になる。この評価式によって求めた透水係数と当量イオン濃度の段階別に示したすべての試験結果を図 26, 図 27 に示す。

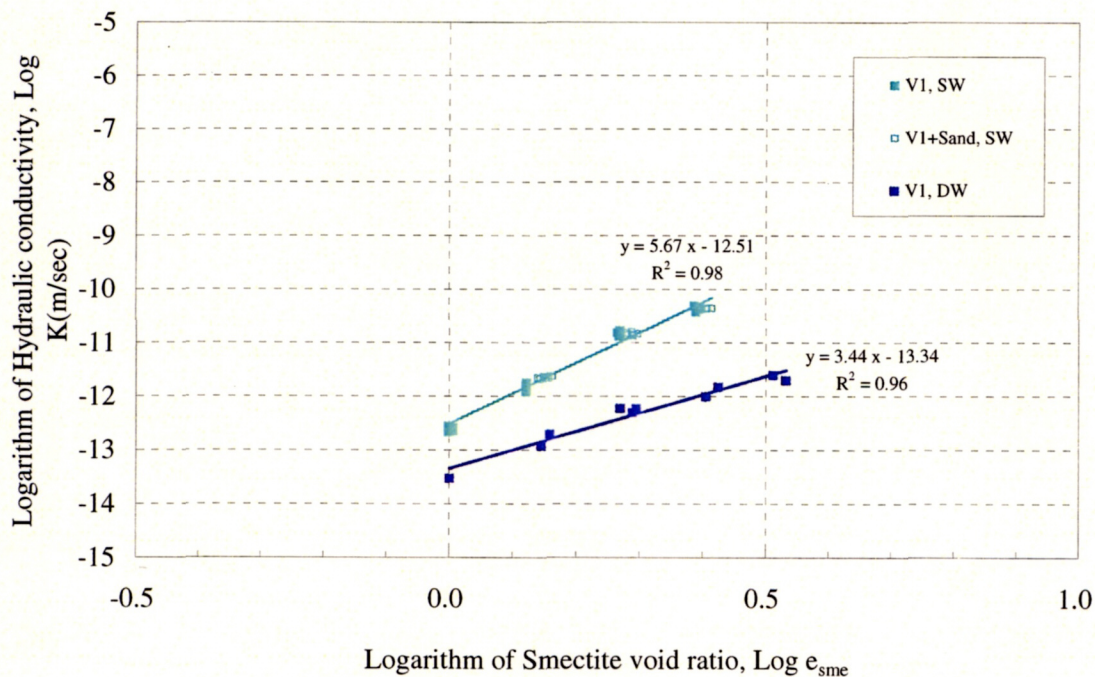


図 22 人工海水(SW)及び蒸留水(DW)を通水したクニゲル V1 の透水係数

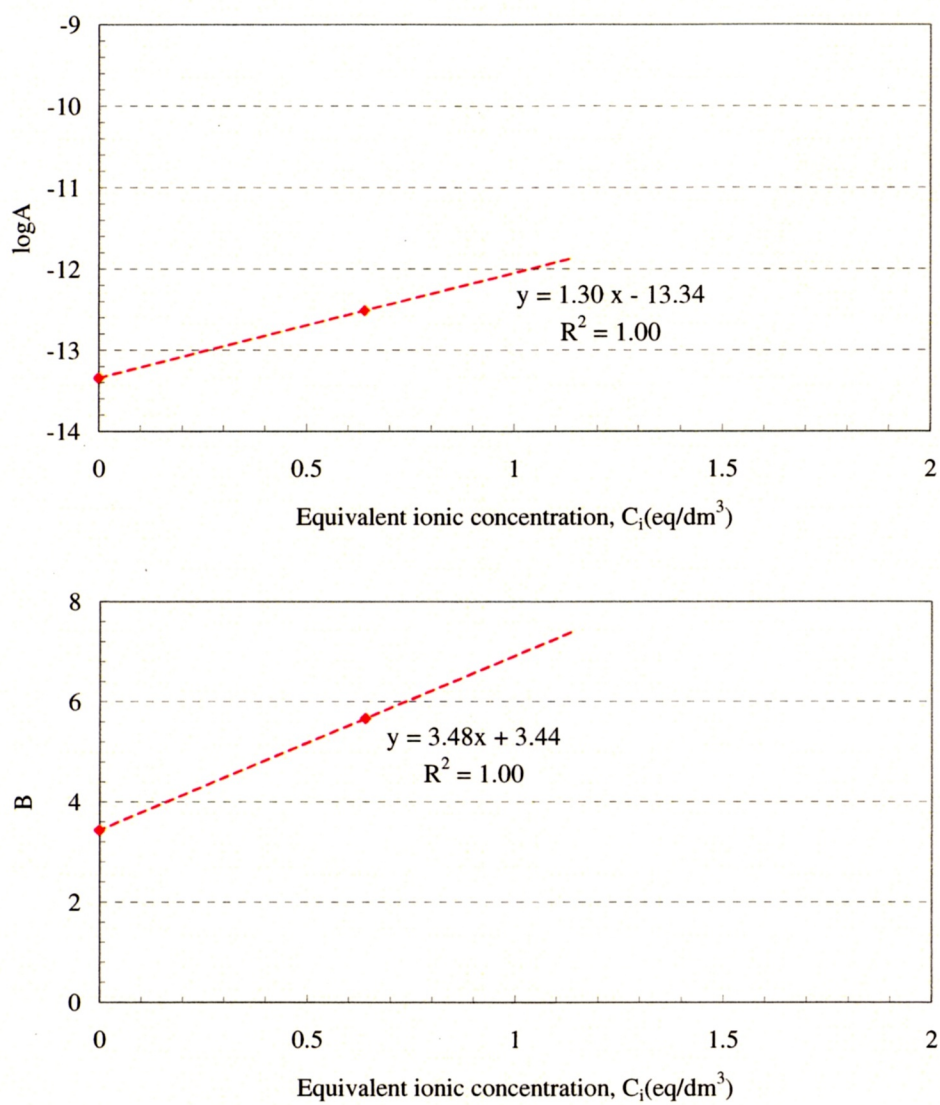


図 23 通液の当量イオン濃度と回帰曲線係数の関係

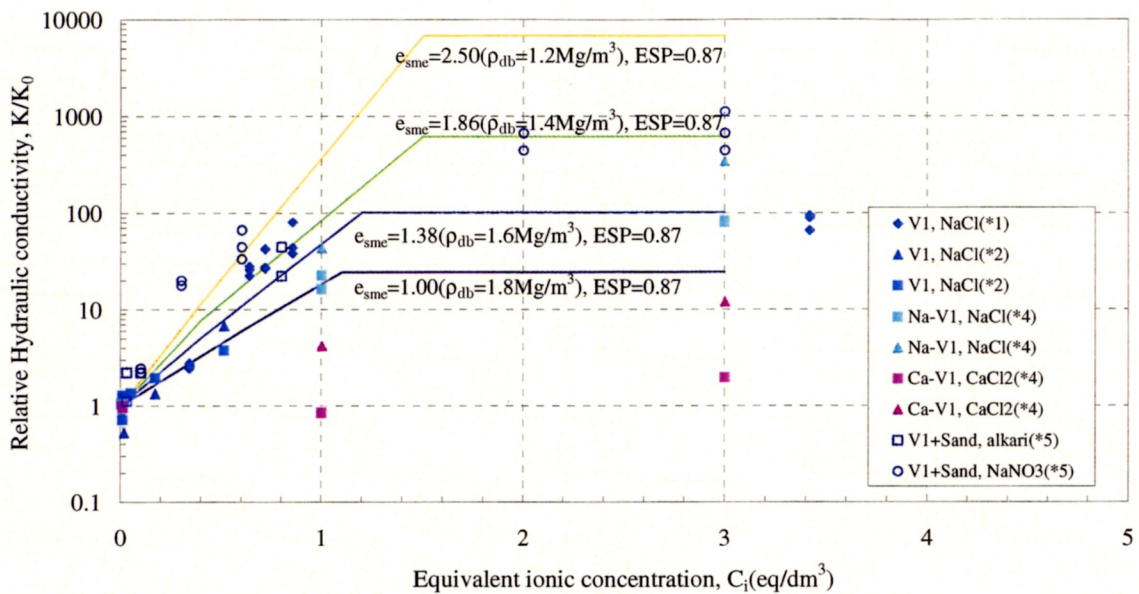


図 24 スメクタイト部分間隙比に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係

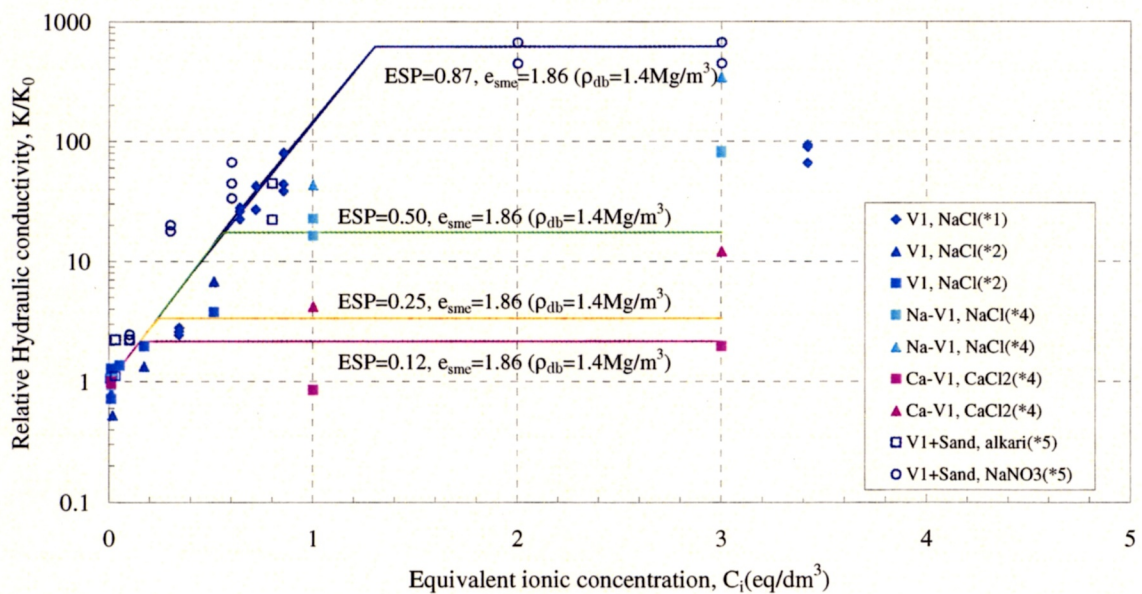


図 25 ESP に応じた当量イオン濃度と相対透水係数の関係

*1:核燃料サイクル開発機構(2004) *2:鈴木ほか(1992) *3:日本原子力研究所(2003)

*4:戸井田ほか(2005) *5:入矢ほか(2004)

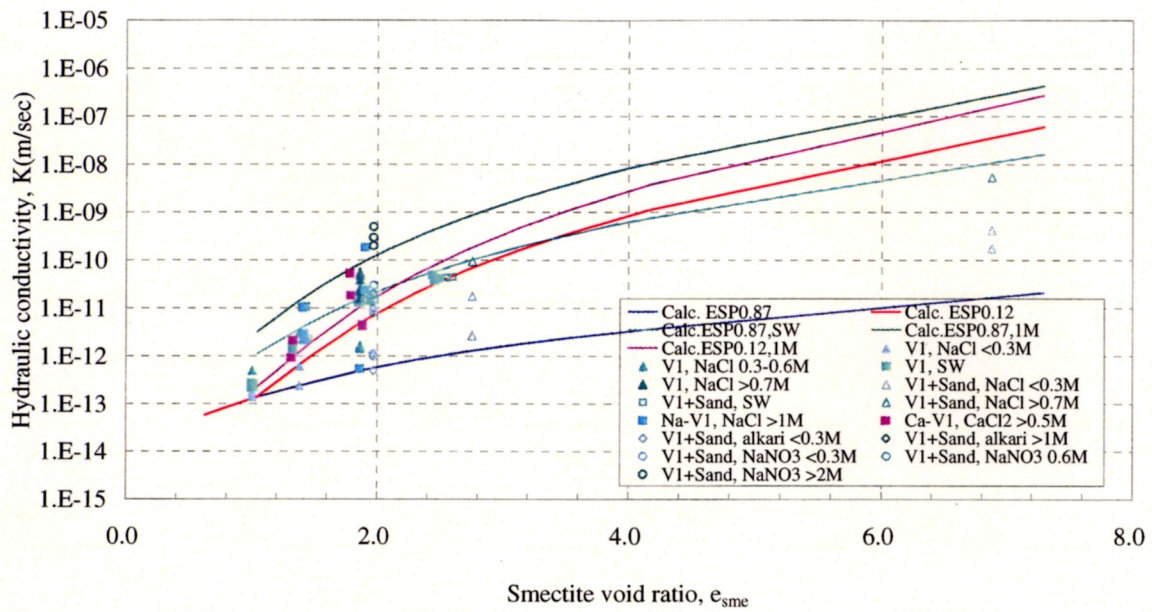


図 26 当量イオン濃度に応じたスメクタイト部分間隙比と透水係数の関係

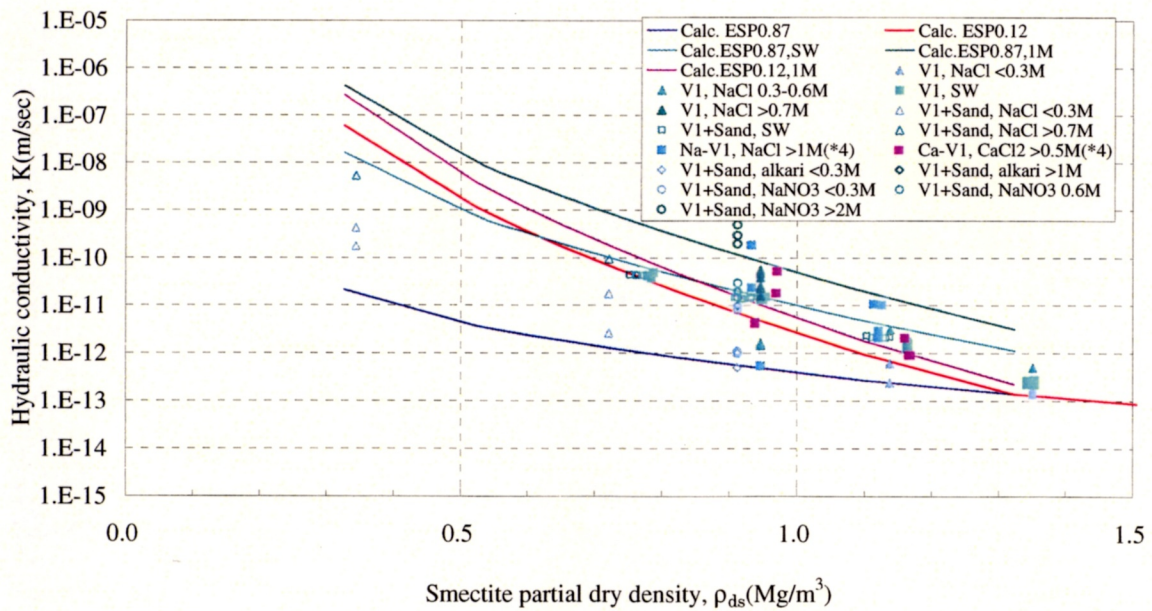


図 27 当量イオン濃度に応じたスメクタイト部分乾燥密度と透水係数の関係

6. 変形による透水係数の変化

6.1 処分場環境における構造力学的変化

坑道周辺の岩盤が埋め戻し後もクリープ挙動を示す場合、ベントナイト系材料は母岩から受ける地圧の上昇によって圧縮変形すると考えられる。一方、構造躯体、覆工などに用いられるコンクリート構造物の剛性や強度が長期的な変質によって低下すると、自重や膨潤圧の作用を受けている応力場が不均衡となり、ベントナイト系材料が膨潤変形することが考えられる。こうした応力履歴を受けたベントナイト系材料の飽和透水係数は、体積変化による間隙比の変化のみならず、間隙構造の変化によっても異なる可能性がある。

本章では、応力履歴を受けたベントナイト系材料の飽和透水係数について検討する。前章までに、自然含水状態で圧縮成形したベントナイト系材料の透水試験に基づき、飽和透水係数の評価式を設定した。この評価式と、圧縮成型後に変形させた供試体の透水係数とを比較することによって、間隙構造の変化による影響を検討する。6.2 節で圧密履歴を受けた供試体の透水係数との比較を、6.3 節で膨潤履歴を受けた供試体の透水係数との比較を行う。

6.2 圧密中のベントナイトの透水係数

圧密履歴を受けた供試体の透水係数として、圧密試験中の透水係数を考える。段階載荷による圧密試験結果からは、圧密の過程で変化していく透水係数を推定することができる。圧密試験から推定した透水係数と透水試験による透水係数との比較によって、圧密履歴が及ぼす影響を検討する。

笹倉ら（2002, 2003）及び戸井田ら（2005）は、同じロットのクニゲル V1 を用いて透水試験及び段階載荷による圧密試験の双方を実施している。この試験で用いたクニゲル V1 は、クニゲル V1 (V1)、カルシウム型化させたクニゲル V1 (Ca-V1) 並びにそれらのケイ砂混合土 (V1+Sand, Ca-V1+Sand)、半分程度までカルシウム型化させたクニゲル V1 (Ca-50V1) を蒸留水で飽和させた供試体のほか、人工的にナトリウム型化させたクニゲル V1 (Na-V1) を NaCl で飽和させた供試体、カルシウム型化させたクニゲル V1 (Ca-V1) を CaCl₂ で飽和させた供試体である。

圧密排水中の透水係数 (k) は、Terzaghi の一次元圧密理論に用いられる圧密係数 (c_v)、体積圧縮係数 (m_v) との間に式(45)に示す関係を有する。各載荷段階の圧密量と時間の関係から地盤工学会基準 JGS 0411-2000 (地盤工学会, 2000) に準拠して c_v , m_v の値を求め、透水係数を算出した。なお、透水係数は正規圧密状態と認められてから以降の載荷段階において求めた。

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \quad (45)$$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量である。

圧密試験中の各載荷段階の透水係数と定水位通水中の透水係数を図 28, 図 29 に示す。また、式(17)及び式(38)を組み合わせた評価式による透水係数を同図に示す。各供試体ともに透水試験結果と圧密試験結果は同じ相関関係を有しており、試験手法による差異は小さい。また、ベントナイト単体供試体とケイ砂混合土それぞれに認められる相関関係はほぼ同一線上にある。このことは、圧密中の透水係数はその時点のベントナイト間隙比によって評価できることを示唆している。低透水性を有するベントナイトの圧密試験には長い時間がかかりゆっくりとした段階載荷ではあるが、特に間隙比の大きい領域では非定常浸透場であり、定常浸透場である透水試験とは性格が異なる。しかしながら、この試験で実施したベントナイト部分間隙比の範囲では、圧密されたベントナイト系材料の透水係数はベントナイト部分間隙比によって同一の近似曲線で表すことができると考えられる。

蒸留水で飽和した供試体が有する相関関係は、評価式による近似曲線とほぼ近い値を示している。一方、高濃度の水溶液で飽和させた供試体が有する相関関係は、間隙比の小さい範囲で評価式のほうが大きな値を示している。評価式は限られた範囲の間隙比における透水試験結果から推測したものであるためと考えられる。このように間隙比の小さい範囲で評価式の精度の高める場合は、圧密試験から求めた透水係数を参考に設定する方法が考えられる。

以上より、圧密変形を受けたベントナイト系材料の透水係数は、圧密後のベントナイト部分間隙比を式(17)及び式(38)に代入することで評価することとした。圧密後のベントナイト部分間隙比は、ベントナイト部分間隙比の増分と体積ひずみが有する式(46)の関係によって求められる。

$$d\varepsilon_v = -\frac{de_{be}}{1+e_{be0}} \quad (46)$$

ここで、 ε_v は体積ひずみ(圧縮を正とする)、 e_{be} はベントナイト部分間隙比、 e_{be0} は変形前のベントナイト部分間隙比である。圧密による体積ひずみ(変形量)は応力変形解析等によって求めることができる。

本節で参照した透水係数は同一ロットのベントナイトを用いた試験結果であるため、スメクタイト部分間隙比によっても統一して表すことができる。圧密変形を受けたベントナイト系材料の透水係数は、圧密後のスメクタイト部分間隙比を式(29)及び式(44)に代入することで評価することとした。圧密後のスメクタイト部分間隙比は、スメクタイト部分間隙比の増分と体積ひずみが有する式(47)の関係によって求められる。

$$d\varepsilon_v = -\frac{de_{sme}}{1+e_{sme0}} \quad (47)$$

ここで、 ε_v は体積ひずみ(圧縮を正とする)、 e_{sme} はスメクタイト部分間隙比、 e_{sme0} は変形前のスメクタイト部分間隙比である。

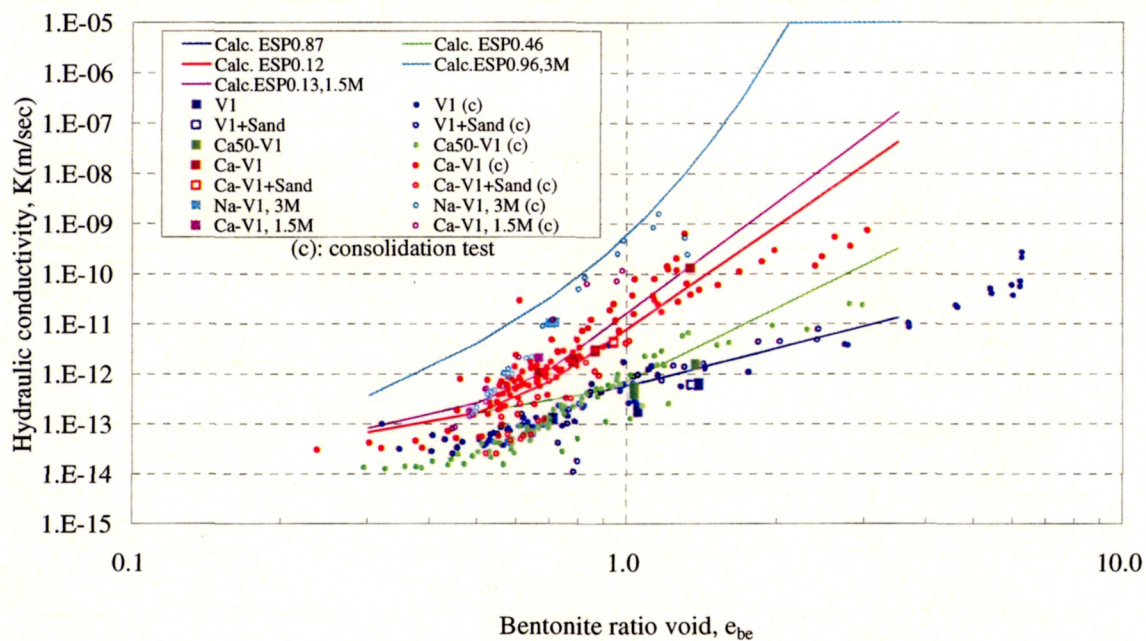


図 28 圧密中のベントナイトのベントナイト部分間隙比と透水係数

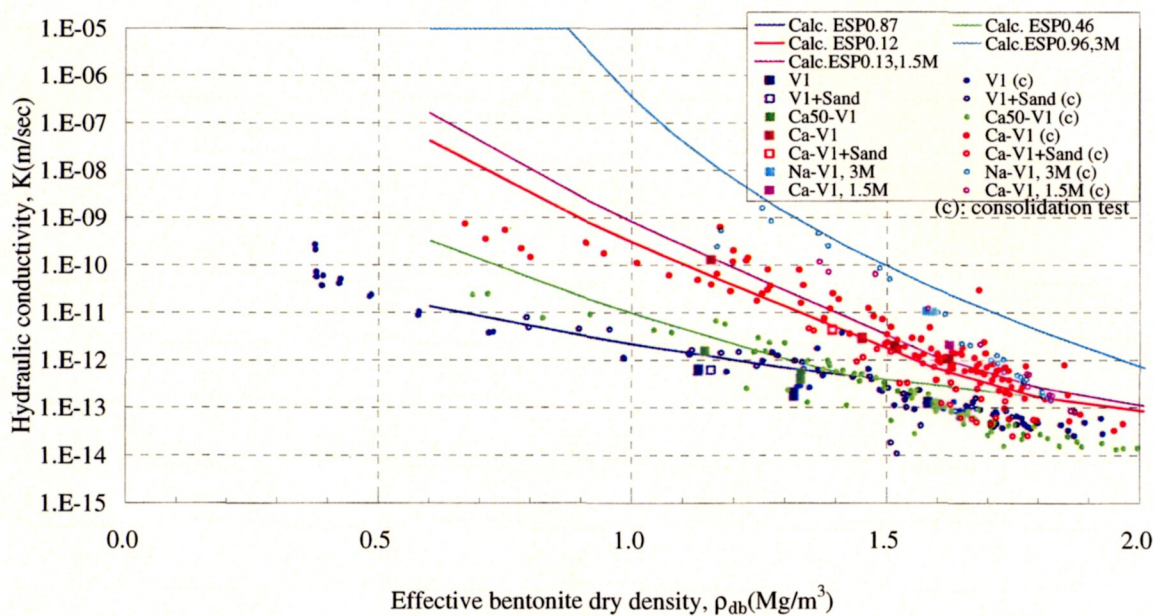


図 29 圧密中のベントナイトの有効ベントナイト乾燥密度と透水係数

6.3 膨潤履歴を有するベントナイトの透水係数

飽和透水係数に及ぼす膨潤履歴の影響について、膨潤履歴を与えた供試体を用いた透水試験結果が報告されている（笹倉ほか，2002）。この試験では、自然含水状態の圧縮成型ベントナイトを一度飽和させた後、さらに所定量まで膨潤させた供試体（以下、「膨潤供試体」という）が用いられている。膨潤供試体は、乾燥密度 1.6Mg/m^3 となるよう自然含水状態で圧縮成型したベントナイトを体積拘束下で飽和させた後に、あらかじめ設けたスパーサーを除去することで5～40%体積膨潤させて作製している。使用したベントナイトはクニゲル V1 及び人工的にカルシウム型化させたクニゲル V1 である。

試験で得られた膨潤供試体の透水係数を図 30、図 31 に示す。ベントナイト部分間隙比及び有効ベントナイト乾燥密度は、膨潤後の透水試験直前の値で示している。同図には、図 4 又は図 5 に示す圧縮成形ベントナイトの透水試験結果、式(17)による透水係数をあわせて示す。クニゲル V1、カルシウム型化させたクニゲル V1 とともに、膨潤供試体の結果は圧縮ベントナイトの結果の分布範囲内にあり、膨潤履歴の有無の影響はみられない。したがって、ベントナイト系材料の飽和透水係数は膨潤履歴の有無によらず、通水時のベントナイト部分間隙比によって評価できると考えられる。（このことから、式(17)のベントナイト部分間隙比と透水係数の関係を設定する際、膨潤供試体の結果も含めて回帰式を求めた（図 2）。）

以上の検討より、膨潤変形を受けたベントナイト系材料の透水係数は、膨潤後のベントナイト部分間隙比を式(17)及び式(38)に代入することで評価することとした。膨潤後のベントナイト部分間隙比は、前節の圧密履歴を受けたベントナイト系材料と同様に、ベントナイト部分間隙比の増分と体積ひずみが有する式(46)の関係によって求められる。また、膨潤による体積ひずみ（変形量）は応力変形解析等によって求めることが考えられる。

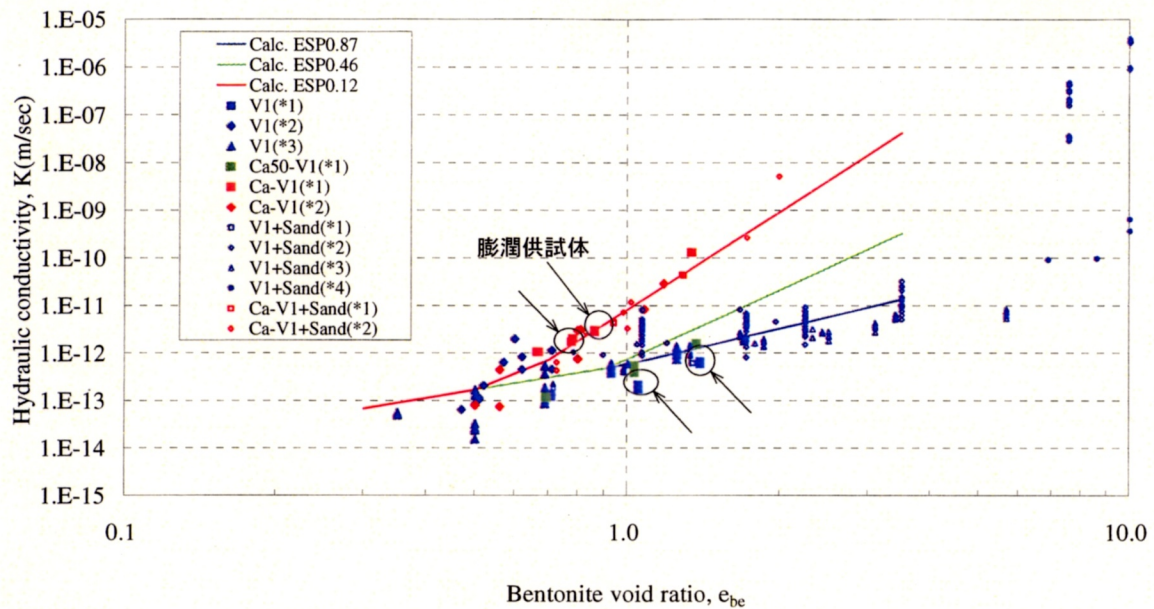


図 30 膨潤供試体のベントナイト部分間隙比と透水係数

ただし、 $e_{be} > 10$ のデータは $e_{be} = 10$ としてプロットした。

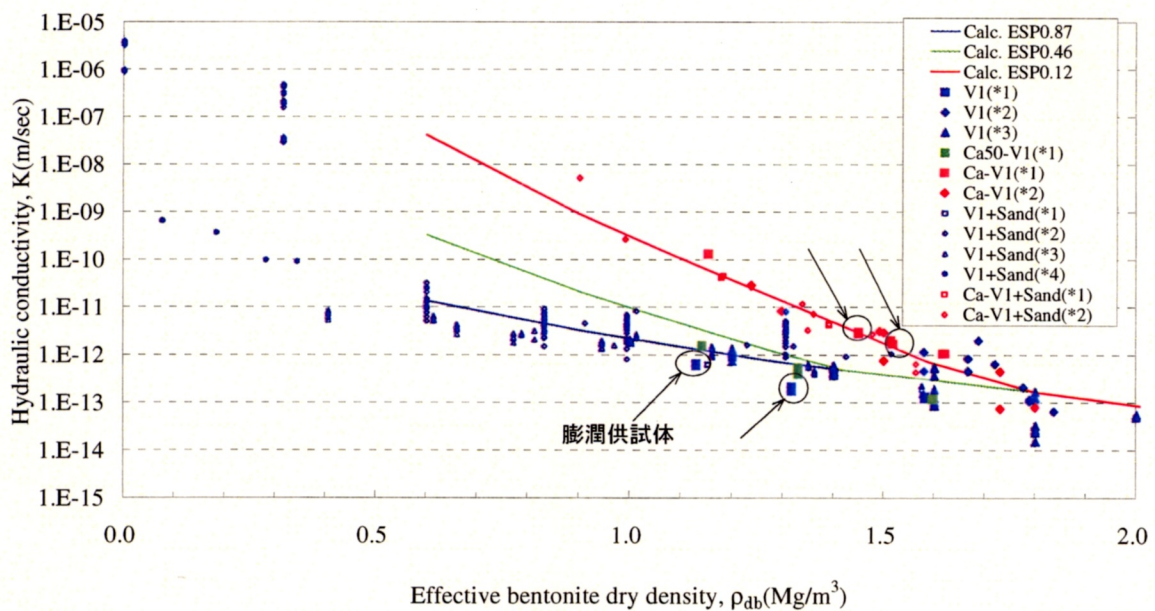


図 31 膨潤供試体の有効ベントナイト乾燥密度と透水係数

*1: 笹倉ほか (2002, 2003); 戸井田ほか (2005) *2: 前田ほか (1998)

*3: 鈴木ほか (1992); 松本ほか (1997) *4: 日本原子力研究所 (2003)

7. ベントナイト系材料の透水係数の変遷

前章までの検討結果を総括すると、処分サイトのベントナイト系材料の飽和透水係数は、化学的な変遷及び構造力学的変化によって以下のように変化すると考えられる。

- ・ ベントナイト系材料の飽和透水係数は、スメクタイト部分間隙比、交換性陽イオン組成、地下水中の当量イオン濃度に応じて決定され、間隙比が大きいほど（密度が小さいほど）、陽イオンの価数が大きいほど、地下水中の当量イオン濃度が高いほど増大する。
- ・ セメント浸出液によりカルシウムイオンが支配的な地下水環境では、陽イオン交換反応（カルシウム型化）が進行に伴い透水係数は増大するが、地下水中の当量イオン濃度の影響は小さい。
- ・ 海水系地下水または廃棄体より浸出した硝酸ナトリウムによりナトリウムイオンが支配的な地下水環境では、陽イオン交換反応（ナトリウム型化）の進行に伴い透水係数は減少するが、地下水中の当量イオン濃度が高いと増大する。
- ・ 高アルカリ性の地下水環境でスメクタイト部分間隙比が増加する場合や、膨潤変形によって間隙比が増加すると、透水係数はスメクタイト部分間隙比の増加に応じて増大する。

これらの変遷指標とベントナイト系材料の飽和透水係数の関係は、式(29)と式(44)をまとめた式(48)により評価できるとした。ニアフィールドの水理場変遷の評価に当たっては、化学変遷評価によって示される交換性陽イオン組成（交換性ナトリウム率；ESP）、地下水濃度（当量イオン濃度； C_i ）、スメクタイト残存量（スメクタイト部分乾燥密度； ρ_{ds} ）と、力学変遷評価によって示される変形（スメクタイト部分間隙比； e_{sme} ）を入力値とする方法が考えられる。

$$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 C_i} \cdot K_0 \quad (m/sec) \quad (48)$$

ただし、 $C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$$K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0 \text{ のとき、 } K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$$

$$K > 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ のとき、 } K = 1.0 \cdot 10^{-5}$$

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \cdots e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \cdot \left(\frac{e_{sme}}{7.0} \right)^{11.4} \cdots e_{sme} > 7.0 \end{cases}$$

ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

8. おわりに

本報告ではベントナイト系材料の化学的な変遷及び構造力学的な変化に伴う飽和透水係数の変化に関する報告を参照し、ニアフィールド水理場の長期的変遷評価に用いる変遷評価式を経験的に設定した。

評価式は山形県月布産のベントナイト（クニミネ工業製，クニゲル V1）を用いた試験結果を基本として設定したが，地下水濃度の影響，鉱物組成の変化の影響に関しては試験結果が不十分なため，他のベントナイトや粘性土に関する報告などにより補完して設定した。これまでに得られている試験結果と評価式による値を比較すると若干の差があるものの，透水係数と影響要因の関係をよく表現できている。化学的な変遷評価及び力学的な変遷評価とこの評価式を組み合わせることによって，バリア材の変質を考慮したニアフィールドの水理場の長期的な変遷を経時的に評価することが可能になった。

今後，透水係数の変遷評価式の設定が水理場の評価に重要な影響を与えるなど，より厳密で定量的な評価を行う必要性が明らかになったときには，不十分なデータの蓄積を行っていくほか，得られているデータのバラツキの要因を把握し，粘土分などの影響も加味することが必要と考えられる。

参考文献

2章

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
ー地層処分研究開発第2次取りまとめー 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400
99-022 (1999)

前田宗宏, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘：“カルシウム型化及びカルシウム型ベ
ントナイトの基本特性 ー膨潤性, 透水係数, 一軸圧縮強度及び弾性係数ー”, PNC
TN8410 98-021 (1998)

3章

足立泰久, 岩田進午 編：土のコロイド現象, 学会出版センター (2003)

小田治恵, 柴田雅博：“ベントナイトー水相互作用の実験とモデル化”, JNC TN8400 99-032
(1999)

緒方信英, 小峯秀雄, 堀江芳博, 石井卓, 三谷泰浩：“ベントナイト混合土の透水性と骨材
との関係について”, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集(第3部門),
pp.1080-1081 (1993)

小峯秀雄, 緒方信英：“ベントナイト緩衝材・埋戻し材の透水特性と簡易評価法の提案”,
土木学会論文集, No.708/III-59, pp.133-144 (2002)

笹倉剛, 畔柳幹雄, 岡本道孝：“ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び
調査”, JNC TJ8400 2002-025 (2002)

笹倉剛, 畔柳幹雄, 小林一三, 岡本道孝：“ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデー
タ取得Ⅱ”, JNC TJ8400 2003-048 (2003)

鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬：“緩衝材の特性試験(I)”, PNC TN8410
92-057 (1992)

戸井田克, 笹倉剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一：“人工バリア材料の力学的
物性取得試験”, JNC TJ8400 2004-036 (2005)

日本原子力研究所：平成14年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書 [確率
論的アプローチによる長期的評価手法の調査], pp.4-23 - 4-29 (2003)

前田宗宏, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘：“カルシウム型化及びカルシウム型ベ
ントナイトの基本特性 ー膨潤性, 透水係数, 一軸圧縮強度及び弾性係数ー”, PNC
TN8410 98-021 (1998)

松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明：“緩衝材の飽和透水特性”, PNC TN8410 97-296
(1997)

Santucci de Magistris, F., Silvestri, F. and Vinale, F.: “Physical and mechanical
properties of compacted silty sand with low bentonite fraction”, Canadian

Geotechnical Journal, Vol.35, PP.909-925 (1998)

Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A. and Stalin, V.K.: "Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures", Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, pp.406-413 (2000)

Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S.: "The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics", Canadian Geotechnical Journal, Vol.20, No.4, pp.645-660 (1983)

4 章

伊藤雅和, 岡本真由美, 柴田雅博, 佐々木康雄, 壇原徹, 鈴木啓三, 渡辺隆: "ベントナイトの鉱物組成分析", PNC TN8430 93-003 (1993)

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—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)

黒澤進, 柴田雅博, 上田真三, 市毛悟, 林賢一, 油井三和: "高アルカリ性条件でのベントナイトの変質とコロイドろ過効果に及ぼす影響", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, No.2, pp.244-248 (2002)

戸井田克, 笹倉剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一: "人工バリア材料の力学的物性取得試験", JNC TJ8400 2004-036 (2005)

土質工学会: 土質工学ハンドブック, p.70 (1986)

前田宗宏, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘: "カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性—膨潤性, 透水係数, 一軸圧縮強度及び弾性係数—", PNC TN8410 98-021 (1998)

Lajudie, A., Raynal, J., Petit, J.C. and Toulhoat, P.: "Clay-based Materials for Engineered Barriers: a Review", MRS Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, Vol.353, pp.221-229 (1996)

Pusch, R.: "The Buffer and Backfill Handbook Part2: Materials and techniques", SKB TR-02-12 (2001a)

Pusch, R.: "Experimental study of the effect of high porewater salinity on the physical properties of a natural smectitic clay", SKB TR-01-07 (2001b)

Sato, H. and Miyamoto, S.: "A Study on Diffusion and Migration of Lead in Compacted Bentonite -The Effect of Dry Density, Silica Sand Content and Temperature on Diffusion and Migration of Pb-210 in Sodium Bentonite-", JNC TN8400 2001-018 (2001)

5 章

足立泰久, 岩田進午 編: 土のコロイド現象, 学会出版センター (2003)

入矢桂史郎, 久保博: “高アルカリと硝酸塩の影響を受けたベントナイトおよび岩石の水理特性評価(III)”, JNC TJ8400 2005-002 (2004)

核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成15年度報告—, JNC TN1400 2004-007, pp.4-9 – 4-13 (2004)

菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鐵剛志: “緩衝材の飽和透水特性II”, JNC TN8430 2003-002 (2003)

鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬: “緩衝材の特性試験(I)”, PNC TN8410 92-057 (1992)

戸井田克, 笹倉剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一: “人工バリア材料の力学的物性取得試験”, JNC TJ8400 2004-036 (2005)

日本原子力研究所: 平成14年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書 [確率的アプローチによる長期的評価手法の調査], pp.4-23 – 4-29 (2003)

McNeal, B.L. and Coleman, N.T.: “Effect of Solution Composition on Soil Hydraulic Conductivity”, American Society of Soil Science, Vol.30, pp.308-312 (1966)

Mesri, G. and Olson, R.E.: “Mechanisms Controlling the Permeability of Clays”, Clays and Clay Minerals, Vol.19, pp.151-158 (1971)

Pusch, R.: “The Buffer and Backfill Handbook Part2: Materials and techniques”, SKB TR-02-12 (2001a)

6 章

笹倉剛, 畔柳幹雄, 岡本道孝: “ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査”, JNC TJ8400 2002-025 (2002)

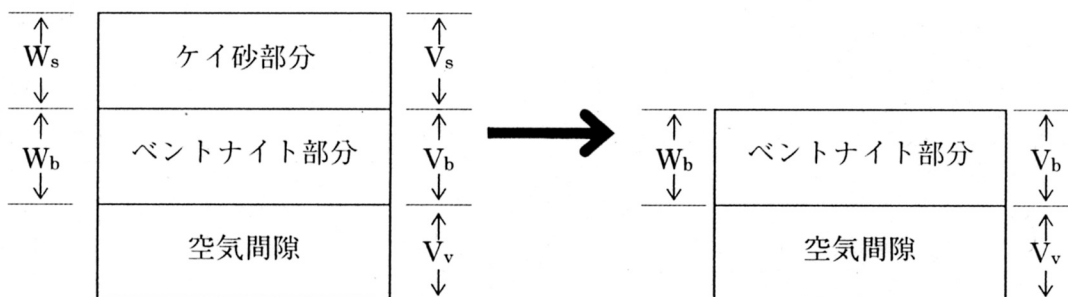
笹倉剛, 畔柳幹雄, 小林一三, 岡本道孝: “ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得II”, JNC TJ8400 2003-048 (2003)

地盤工学会: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版) (2000)

戸井田克, 笹倉剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一: “人工バリア材料の力学的物性取得試験”, JNC TJ8400 2004-036 (2005)

付録. ベントナイト部分間隙比及びスメクタイト部分間隙比の定義

ケイ砂部分を除いたベントナイトと空気間隙で構成される乾燥密度を有効ベントナイト乾燥密度 ρ_{db} 、ベントナイトと空気間隙で構成される間隙比をベントナイト部分間隙比 e_{be} と定義して、試験結果の整理を試みた。有効ベントナイト乾燥密度の概念を付図-1に示す。図中の W は重量、 V は体積を示し、添え字の v , b , s はそれぞれ空気間隙部分、ベントナイト部分、ケイ砂部分の諸量を示す。



$$\text{乾燥密度 } \rho_d = \frac{W_b + W_s}{V_v + V_b + V_s}$$

$$\text{間隙比 } e = \frac{V_v}{V_b + V_s}$$

(a) 通常の乾燥密度

$$\rho_{db} = \frac{W_b}{V_v + V_b}$$

$$e_{be} = \frac{V_v}{V_b}$$

(b) 有効ベントナイト乾燥密度

付図-1 有効ベントナイト乾燥密度の概念

有効ベントナイト乾燥密度 ρ_{db} 及びベントナイト部分間隙比 e_{be} は、それぞれ通常概念における乾燥密度 ρ_d 、間隙比 e と次式の関係有する。

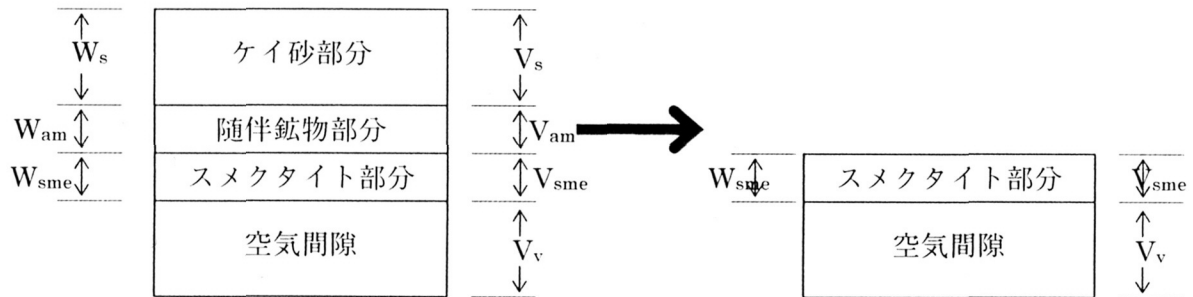
$$\rho_{db} = \frac{C_b \cdot \rho_d}{1 - (1 - C_b) \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{ss}}} \quad (15)$$

$$e_{be} = \left(1 + \frac{1 - C_b}{C_b} \cdot \frac{\rho_{be}}{\rho_{ss}}\right) \cdot e \quad (16)$$

ここで、 ρ_d ：ベントナイト系材料の乾燥密度 (Mg/m^3)、 e ：ベントナイト系材料の間隙比、 C_b ：ベントナイト混合率、 ρ_{ss} ：ケイ砂の土粒子密度 (Mg/m^3)、 ρ_{be} ：ベントナイトの土粒子密度 (Mg/m^3) である。

$$e_{be} = \frac{\rho_{be}}{\rho_{db}} - 1$$

ケイ砂部分及び随伴鉱物部分を除いたスメクタイトと空気間隙で構成される乾燥密度をスメクタイト部分乾燥密度 ρ_{ds} 、スメクタイトと空気間隙で構成される間隙比をスメクタイト部分間隙比 e_{sme} と定義して、試験結果の整理を試みた。スメクタイト部分乾燥密度の概念を付図-2 に示す。図中の W は重量、 V は体積を示し、添え字の v , sme , am , s はそれぞれ空気間隙部分、スメクタイト部分、ベントナイトに含まれる随伴鉱物部分、ケイ砂部分の諸量を示す。



$$\text{乾燥密度 } \rho_d = \frac{W_{sme} + W_{am} + W_s}{V_v + V_{sme} + V_{am} + V_s}$$

$$\text{間隙比 } e = \frac{V_v}{V_{sme} + V_{am} + V_s}$$

(a) 通常の乾燥密度

$$\rho_{ds} = \frac{W_{sme}}{V_v + V_{sme}}$$

$$e_{sme} = \frac{V_v}{V_{sme}}$$

(b) スメクタイト部分乾燥密度

付図-2 スメクタイト部分乾燥密度の概念

スメクタイト部分乾燥密度 ρ_{ds} 及びスメクタイト部分間隙比 e_{sme} は、それぞれ通常概念における乾燥密度 ρ_d 、間隙比 e と次式の関係有する。

$$\rho_{ds} = \frac{C_b C_{sme} \cdot \rho_d}{1 - C_b (1 - C_{sme}) \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{am}} - (1 - C_b) \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{ss}}} \quad (18)$$

$$e_{sme} = \left(1 + \frac{1 - C_{sme}}{C_{sme}} \cdot \frac{\rho_{sme}}{\rho_{am}} + \frac{1 - C_b}{C_b C_{sme}} \cdot \frac{\rho_{sme}}{\rho_{ss}} \right) \cdot e \quad (19)$$

ここで、 ρ_d ：ベントナイト系材料の乾燥密度 (Mg/m^3)、 e ：ベントナイト系材料の間隙比、 C_b ：ベントナイト混合率、 C_{sme} ：ベントナイト中のスメクタイト含有率、 ρ_{ss} ：ケイ砂の土粒子密度 (Mg/m^3)、 ρ_{am} ：随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m^3)、 ρ_{sme} ：スメクタイトの土粒子密度 (Mg/m^3) である。

$$e_{sme} = \frac{\rho_{sme}}{\rho_{ds}} - 1$$