JAEA-Data/Code 2023-010 DOI:10.11484/jaea-data-code-2023-010



不飽和圧縮ベントナイト中での 塩水浸潤挙動データの取得

Acquisition of Saltwater Infiltration Behavior Data in Unsaturated Compacted Bentonite

佐藤 久 高山 裕介 鈴木 英明 佐藤 大介 Hisashi SATO, Yusuke TAKAYAMA, Hideaki SUZUKI and Daisuke SATO

> 核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター 基盤技術研究開発部

Department of Geological Disposal Research Nuclear Backend Technology Center Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

September 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む) は、下記までお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission. Availability and use of the results of this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

より発信されています。

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

不飽和圧縮ベントナイト中での塩水浸潤挙動データの取得

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター

基盤技術研究開発部

佐藤 久*、高山 裕介、鈴木 英明*、佐藤 大介*

(2023年7月12日受理)

高レベル放射性廃棄物の処分場を沿岸部に建設した場合、沿岸部の地下水は海水の影響を受けて塩濃度が高くなるため、海水系の地下水が緩衝材を含む人工バリアに与える影響を十分に 考慮して評価する必要がある。

本報告では、緩衝材が飽和に至るまでの過渡的な期間において、海水系の地下水が緩衝材中 での水分や溶質の移行現象に与える影響を評価することを目的として、異なる乾燥密度の圧縮 ベントナイト試料を対象に、浸潤水の NaCl 濃度を変えた一次元の塩水浸潤試験を実施し、浸 潤水の NaCl 濃度と浸潤速度の関係や浸潤試験後の圧縮ベントナイト試料中の含水比分布デー タを取得した。また、浸潤試験後の試料中の塩化物イオンの濃度分布を分析することにより、 不飽和な圧縮ベントナイト中での溶質の移行挙動の理解に資するデータを取得した。

その結果、浸潤水の NaCl 濃度が高くなるに従い浸潤は速くなり、乾燥密度 1.4 Mg/m³から 1.8 Mg/m³、浸潤水の NaCl 濃度が 0 (蒸留水)から 4.0 mol/dm³までの範囲において、浸潤時間と浸潤量の関係は浸潤水の拡散現象とみなして評価できることが確認された。また、浸潤水が蒸留水の場合、含水比は給水側から浸潤距離に応じてなだらかに低下する分布となるが、浸潤水が NaCl 水溶液の場合、含水比は給水側から浸潤の先端近くまで比較的高い状態を保ちながら浸潤の先端で低下する分布となり、NaCl 濃度が高くなるに従いその傾向が強くなることが確認された。

浸潤試験後試料の塩化物イオン濃度の分析結果から、給水側よりも浸潤方向側の領域で給水 側より塩化物イオンの濃度が部分的に高くなる現象(塩化物イオンの濃縮)が起きており、こ の傾向は供試体の乾燥密度が低くなるに従い強くなることや、浸潤水の NaCl 濃度が高くなる に従い強くなることが確認された。

また、浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する現象は供試体の初期含水比に依存することが確認 されており、浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮が生じない条件を設定可能な見通しが得られた。

核燃料サイクル工学研究所:〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33 *検査開発株式会社

JAEA-Data/Code 2023-010

Acquisition of Saltwater Infiltration Behavior Data in Unsaturated Compacted Bentonite

Hisashi SATO*, Yusuke TAKAYAMA, Hideaki SUZUKI* and Daisuke SATO*

Department of Geological Disposal Research, Nuclear Backend Technology Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 12, 2023)

When a high-level radioactive waste repository is constructed in a coastal area, it is necessary to fully evaluate the impact of seawater-based groundwater on engineered barriers, including buffer materials.

In this report, one-dimensional saltwater infiltration tests were conducted to obtain data to understand the impact of seawater-based groundwater on the migration phenomena of water and solutes in the buffer material during the transient period.

As a result, it was confirmed that the infiltration rate increased as the NaCl concentration in the infiltration solution increased. And it was confirmed that the water content ratio distribution changed as the NaCl concentration in the infiltration solution increased.

As a result of analysis of the chloride ion concentration of the post-test specimens confirmed that chloride ion enrichment was occurred with infiltration.

As a result of verifying the mechanism by which chloride ion enrichment occurs, it was confirmed that the phenomenon of chloride ion enrichment due to infiltration depends on the initial water content ratio.

Keywords: Bentonite, Unsaturated, Infiltration, Migration, Seawater-type Groundwater, Geological Disposal, Transitional Period

^{*} Inspection Development Company Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 試験の概要	2
2.1 浸潤試験装置および試験方法	2
2.2 供試体の作製	3
2.3 試験条件	6
3. 浸潤水の NaCl 濃度が浸潤速度に与える影響	8
3.1 浸潤時間と浸潤量の関係	8
3.2 水分拡散係数による評価	14
4. NaCl 濃度が含水比分布に与える影響	16
4.1 含水比分布の取得方法	16
4.2 含水比分布の取得結果	16
5. 圧縮ベントナイト試料中の塩化物イオン濃度分布の評価	20
5.1 塩化物イオン濃度の分析方法	20
5.2 塩化物イオン濃度分布の測定結果	21
5.2.1 塩水浸潤試験試料の塩化物イオン分布	21
5.2.2 浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮の現象理解	27
5.2.3 浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する要因の検証	36
5.2.4 移流による溶質の移行に寄与する間隙の割合の評価	38
6. まとめ	41
謝辞	43
参考文献	44
付録 乾燥試料中に含まれる NaCl の重量が含水比の算出結果に与える影響の評価	46

Contents

1. Introduc	tion1
2. Examina	ation overview2
2.1 Infilt	ration testing equipment and testing methods2
2.2 Speci	imen preparation3
2.3 Test o	conditions6
3. Effect of	NaCl concentration in infiltration solution on infiltration rate8
3.1 Relat	tionship between infiltration time and infiltration volume8
3.2 Evalu	uation by moisture diffusion coefficient14
4. Effect of	NaCl concentration on water content distribution16
4.1 Meth	od of obtaining moisture content distribution16
4.2 Resul	lts of obtaining moisture content distribution16
5. Evaluati	ion of chloride ion concentration distribution in compacted bentonite samples 20
5.1 Analy	ytical methods for chloride ion concentration20
5.2 Resul	lts of chloride ion concentration distribution21
$5.2.1\ { m C}$	Chloride ion distribution of salt water infiltration test samples21
5.2.2 U	Inderstanding the phenomenon of chloride ion enrichment with infiltration $\cdots 27$
$5.2.3\mathrm{V}$	Verification of the mechanism of chloride ion enrichment with infiltration 36
5.2.4 E	Evaluation of the ratio of pore space contributing to mass transport by advection
6. Summar	y41
Acknowled	gements43
References	44
Appendix 2	Evaluation of the influence of the weight of NaCl in dried samples on the
	calculated results of water content ratio46

図リスト

図 1	浸潤試験装置の概要2
$\boxtimes 2$	試験セルから抜き出した供試体4
図 3	X 線 CT による測定断面方向4
図 4	供試体の CT 値分布の測定結果5
$\boxtimes 5$	イオン強度と固有透過度の関係(有効粘土密度 1.4 Mg/m ³)7
図 6	浸潤時間と浸潤量の関係(乾燥密度 1.4 Mg/m ³)9
図 7	浸潤時間の平方根と浸潤量の関係(乾燥密度 1.4 Mg/m ³)9
図 8	浸潤時間と浸潤量の関係(乾燥密度 1.6 Mg/m ³)10
図 9	浸潤時間の平方根と浸潤量の関係(乾燥密度 1.6 Mg/m ³)11
図 10) 浸潤時間と浸潤量の関係(乾燥密度 1.8 Mg/m ³)12
図 11	l 浸潤時間の平方根と浸潤量の関係(乾燥密度 1.8 Mg/m ³)13
図 12	2 NaCl 濃度と水分拡散係数の関係15
図 13	3 NaCl 濃度毎の含水比分布(1.4 Mg/m ³)17
図 14	4 NaCl 濃度毎の含水比分布(1.6 Mg/m ³)18
図 18	5 NaCl 濃度毎の含水比分布(1.8 Mg/m ³)19
図 1	6 浸潤試験後試料中に含まれる塩化物イオンの重量分布(ケイ砂 30 %混合ベントナイト,
乾燥	密度 1.4 Mg/m ³)24
図 1	7 浸潤試験後試料中に含まれる塩化物イオンの重量分布(ケイ砂 30 %混合ベントナイト,
乾燥	密度 1.6 Mg/m ³)25
図 1	8 浸潤試験後試料中に含まれる塩化物イオンの重量分布(ケイ砂 30 %混合ベントナイト,
乾燥	密度 1.8 Mg/m ³)26
図 19	9 浸潤時間毎の含水比分布と Cl (間隙水)分布(ケイ砂 30 %混合ベントナイト, 乾燥密
度 1.	8 Mg/m³, NaCl 濃度 0.26 mol/dm³)28
図 20) 浸潤時間毎の含水比分布と Cl (間隙水)分布(全データ)
図 21	1 飽和後の含水比分布および Cl ⁻ (間隙水)分布(ベントナイト 100 %, 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ ,
NaC	1 濃度 0.7 mol/dm ³)29
図 22	2 供試体高さ 50mm と供試体高さ 100mm の浸潤時間の平方根と浸潤量の関係(ベントナ
イト	100 %, 乾燥密度 1.4 Mg/m ³)31
図 23	3 含水比分布 Cl (間隙水)分布(50 mm)(ベントナイト 100 %, 乾燥密度 1.4 Mg/m ³)
$\boxtimes 2^{\downarrow}$	4 含水比分布 Cl ⁻ (間隙水)分布(100 mm)(ベントナイト 100 %, 乾燥密度 1.4 Mg/m ³)
	33
$\boxtimes 2!$	5 供試体高さで正規化した含水比分布の比較34
図 20	3 供試体高さで正規化した Cl (間隙水)分布の比較35
$\boxtimes 2'$	7 初期含水比を変えた場合の含水比と Cl-(間隙水)の分布(ケイ砂 30%混合ベントナイ
▶, ₫	乾燥密度 1.6 Mg/m³, NaCl 濃度 0.26 mol/dm³)37

図 28 透水試験装置の概要3	39
-----------------	----

表リスト

表 1	試験条件	6
表 2	試験ケース4	0
表 3	通水試料の Cl-(間隙水)4	0
表 4	総間隙に占める粒子間間隙の割合4	0

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分場の候補地の選定に際して、総合資源エネルギー調査会の「地 層処分技術ワーキンググループ」において、処分場を設置する適性が高いと考えられる地域の 科学的特性を提示するための要件・基準が議論され、その検討結果が「科学的特性マップ」[1] として取りまとめられている。この中で、島嶼部や海底下を含む沿岸部は、廃棄体の輸送の観 点から「好ましい地域」と区分されているが、処分場の地質環境の観点からは、沿岸部の地下 水が海水の影響を受けて塩濃度が高くなることが人工バリアに与える影響が懸念されている。

このため、沿岸部に高レベル放射性廃棄物の処分場を設置する際には、海水系の地下水が緩 衝材を含む人工バリアに与える影響を十分に評価した上で処分場の設計に反映する必要がある。 これまでに、海水系の地下水が飽和後の緩衝材の物性値に与える影響の評価は数多く行われて おり(鈴木ほか,1999 [2];菊池ほか,2003 [3];菊池ほか,2005 [4])、取得したデータは日本 原子力研究開発機構が整備している緩衝材基本特性データベース[5]に収録されている。これら の報告では、海水系の地下水が浸潤することにより緩衝材の透水係数の上昇や膨潤圧の低下が 起きるとしているが、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」のとりま とめ[6]では、緩衝材の乾燥密度を高めることにより、塩水環境下でも緩衝材の性能を確保でき る見通しを示している。

一方、緩衝材が再冠水に至るまでの過渡的な期間における、海水系地下水が緩衝材に与える 影響の評価については、主に塩濃縮・析出現象をはじめとする緩衝材中の化学影響に重きを置 いた熱-水-応力-化学連成解析モデル(T·H·M·C モデル)による評価(木村ほか,2010[7]) が行われており、塩濃縮試験結果との比較によりその実用性も確認されている。しかし、木村 らの評価では、海水系の地下水が不飽和な緩衝材中での水理特性や物質移行挙動に与える影響 を評価するための浸潤試験や緩衝材中の溶質の濃度分布などの基礎的な実験データが不足して いることから、溶質の移行についてはベントナイトの主要な構成物質であるモンモリロナイト の層間の影響を考慮していないモデルとなっている。

海水系の地下水が水理特性に与える影響を評価した例として、長谷川(2004)[8]は、人工海 水が圧縮ベントナイト試料への浸潤速度に与える影響を評価しており、人工海水の濃度が高く なるほど浸潤速度が速くなる結果を報告している。しかし、その際の圧縮ベントナイト試料中 の含水比分布や溶質の濃度分布データは取得されていない。

本報告では、海水系の地下水環境で緩衝材が飽和に至るまでの過渡的な期間における現象を 理解するための一環として、浸潤挙動をモデル化する際の基本的なプロセスとなる、不飽和な 圧縮ベントナイト中での水分と溶質の移行に着目した試験データの取得を目的として、複数の 乾燥密度の圧縮ベントナイト試料を対象に、浸潤水の NaCl 濃度を変えた一次元の塩水浸潤試 験を実施し、浸潤水の NaCl 濃度と浸潤速度の関係や圧縮ベントナイト試料中の含水比分布デ ータを取得した。また、浸潤試験後の試料中の塩化物イオン濃度を分析することにより、圧縮 ベントナイト試料中の塩化物イオン濃度分布データを取得した。

2. 試験の概要

海水系地下水環境下における緩衝材への浸潤挙動を把握するために、乾燥密度の異なる圧縮 成形ベントナイト試料(以下、「供試体」という)に、蒸留水、幌延地下水相当、人工海水相当 および人工海水相当以上の濃度の NaCl 濃度の溶液を浸潤させる試験を実施し、浸潤水の NaCl 濃度と浸潤速度の関係や供試体の含水比分布を取得した。

2.1 浸潤試験装置および試験方法

供試体への浸潤試験は、図1に示す浸潤試験装置を用いて実施した。浸潤試験装置は、供試体を内包した金属製の試験セルと浸潤水の注入と浸潤量を測定するためのビュレットを配管で 接続したものである。供試体と金属焼結フィルタの間には、金属焼結フィルタにベントナイト が侵入するのを防止するために、メンブレンフィルタ(孔径 1.0 µm)を設置している。

供試体の浸潤量はビュレットの目盛りを適宜目視で読み取ることにより測定する。ビュレットの上部は蒸発を防ぐためにパラフィルムで塞ぎ、最小限の大きさの通気孔を設けている。なお、供試体への浸潤に伴いビュレットの液面が下がり水頭が低下するが、この水頭の低下量は、 供試体である圧縮ベントナイトのサクションの大きさに対して極めて小さい。そのため、浸潤水の液面が低下することによる水頭の低下が試験に与える影響は無視している。

浸潤を開始する際には、初期の浸潤を確実に行うため、供試体(試験セル内)を真空引きした後に浸潤を開始した。浸潤開始初期は配管や焼結金属フィルタに浸水することにより、急速にビュレットの水面が低下するため、ビュレットの水面の低下が落ち着いた時点のビュレットの目盛りを浸潤開始の基準値とする。また、試験室内の室温は空調によりコントロールしており、試験期間を通して 20 ℃±1 ℃を維持した。



2.2 供試体の作製

浸潤試験に用いる供試体の材料には、クニミネ工業製の Na 型ベントナイトであるクニゲル V1、ケイ砂3号およびケイ砂5号を重量比0.7:0.15:0.15で混合し、規定の乾燥密度になる ように圧縮したものを使用する。供試体は、前述の材料を内径 50 mm の金属製の試験セル内 に投入し、金属製のピストンを汎用の圧縮試験機で供試体の高さ 50 mm になるまで押し込む ことにより圧縮成形した。

供試体を作製する際に1方向から圧縮した場合、密度に偏りが生じることが知られている(鈴木ほか, 1999 [2])。供試体の密度に偏りが生じていると、供試体の位置により間隙の割合が異なることから、含水比分布の評価に影響を与えることが懸念させる。このため、本検討では供試体の密度分布の偏りを低減するために、10 mm 毎に 5 段階に分けて圧縮して供試体を作製した。5 段階の圧縮で作製した供試体は、X線 CT (X-ray Computed Tomography)(キヤノンメディカルシステムズ株式会社製 Alexion Access)による測定を行うことにより、密度分布の偏りを評価した。

浸潤試験を行う際には図1に示すように金属製の試験セル内に供試体を封入しているが、金 属製の試験セルはX線を透過しないため、試験セル内に供試体を封入した状態ではX線CTに よる測定ができない。このため、X線CTで供試体を測定する際には、図2に示すように試験 セルから供試体を抜き出した状態で行った。図2に示す供試体には10mm毎の圧縮による境 目が確認できるが、各断面は強固に結合しており分離することはない。X線CTによる測定は 図3に示すように圧縮毎の境目と同じ断面とし、測定間隔は1mmとした。

図4(a)に供試体の両端を除いた47mmの範囲における測定断面毎のCT値の平均値を示す。 ここで、CT値は密度と相関した値であり、空気の値が-1000、水の値が0である。図4(a)では 供試体の密度分布を視覚化するために、縦軸のCT値は空気のCT値であり密度0を示す-1000 から表示している。図4(a)に示すCT値の最大値と最小値の差は78、CT値の標準偏差は19で あり、試料全体としては偏りの少ない密度分布となっていることが確認できたことから、供試 体の密度分布の偏りが浸潤試験結果に与える影響は少ないと考えられる。また、供試体の密度 分布の傾向を詳細に確認するために、図4(b)に示すようにCT値の範囲を1150~1300に限定 してみると、供試体の下側(ピストンを押し込む方向)に向かってCT値が高くなる傾向が見 られるのと、10mm毎にも若干の密度分布の偏りが見られる。これは、圧縮の段階毎に密度の 偏りが生じることと、下側ほど繰り返し圧縮されるためであると考えられる。



図2 試験セルから抜き出した供試体





(a) 供試体の CT 値分布 (CT 値の範囲が-1000~1500)



(b) 供試体の CT 値分布 (CT 値の範囲が 1150~1300)

図4 供試体の CT 値分布の測定結果

2.3 試験条件

表1に試験条件を示す。浸潤試験に用いる供試体の乾燥密度は「地層処分研究開発第2次取りまとめ」(核燃料サイクル開発機構, 1999 [9])において緩衝材仕様の一例として設定されている乾燥密度1.6 Mg/m³、ベントナイトの重量比70%、ケイ砂の重量比30%に対して乾燥密度を変化させたケースを設定した。浸潤水には蒸留水に加えて複数の濃度のNaCl水溶液を用いた。

浸潤水に用いる NaCl 水溶液の濃度はイオン強度を基準に設定しており、幌延地下水相当 (HDB-6 孔、深度 450 m) (藤田ほか, 2007 [10])として、0.26 mol/dm³、人工海水 (ASTM D-1141-98)相当として、0.70 mol/dm³、人工海水以上の高塩濃度として、1.0 mol/dm³、1.5 mol/dm³、2.0 mol/dm³、3.0 mol/dm³、4.0 mol/dm³とした。2.0 mol/dm³以上の濃度は、図 5 に示すようにベントナイトの固有透過度がイオン強度 2 以上でほぼ一定となる結果が得られて いることから (菊池ほか, 2005 [4])、浸潤試験でも同様の傾向を示すかどうかを確認するため に設定している。なお、乾燥密度 1.4 Mg/m³のケースでは浸潤速度が試験後の後処理にかかる 時間に比べて無視できないほど速くなると想定されることから、NaCl 濃度が 1.5 mol/dm³以 上の試験は実施していない。

それぞれの試験ケースにおいて、試験に用いる総浸潤量は初期間隙の約 40 %を満たす量と した。この浸潤量は浸潤の先端が給水面と反対側に到達する量を目安に設定した。

ベントナイト	クニゲル V1			
ケイ砂混合率(%)	30	30	30	
乾燥密度(Mg/m³)	1.4	1.6	1.8	
初期含水比(%)	5. 72	5. 72	5.69	
浸潤水の NaCl 濃度	0、0.26、	0、0.26、0.70、1.0、	0、0.26、0.70、1.0、	
(mo / dm³)	0.70、1.0	1.5、2.0、3.0、4.0	1.5、2.0、3.0、4.0	

表1 試験条件



図5 イオン強度と固有透過度の関係(有効粘土密度1.4 Mg/m³)(菊池ほか, 2005 [4])

3. 浸潤水の NaCl 濃度が浸潤速度に与える影響

浸潤水の塩濃度が浸潤速度に与える影響を評価した例として、長谷川(2004)[8]による報告がある。長谷川は、産地や層間陽イオンの異なるベントナイト試料を対象に、乾燥密度を変化させた試験ケースや蒸留水、人工海水を蒸留水で10%に希釈した溶液、人工海水を蒸留水で50%に希釈した溶液および人工海水を用いた浸潤試験を実施し、浸潤時間に対する浸潤量のデータを取得している。その結果、浸潤水の塩濃度が高くなるに従い浸潤速度(単位時間あたりの浸潤量)が速くなることや、浸潤水が蒸留水か人工海水かにかかわらず、浸潤時間の平方根と浸潤量の関係は直線関係となることから、圧縮ベントナイト試料への浸潤における浸潤時間と浸潤量の関係は拡散現象とみなして評価できると考えられることを報告している。

本報告では、乾燥密度を変化させた供試体を対象に、長谷川より高い NaCl 濃度(最大 4.0 mol/dm³) までの試験を実施した。

3.1 浸潤時間と浸潤量の関係

図 6 に乾燥密度が 1.4 Mg/m³の場合における浸潤時間と浸潤量の関係を示す。浸潤速度は浸 潤開始直後が最も速く、次第に浸潤速度は低下する傾向を示している。また、浸潤水の濃度が 高くなるに従い浸潤速度が速くなっていることがわかる。図 7 に浸潤時間の平方根と浸潤量の 関係を示す。長谷川(2004)[8]の報告と同様に、浸潤時間の平方根と浸潤量は直線関係となっ ており、蒸留水、NaCl 水溶液を問わずベントナイトへの浸潤現象は拡散現象とみなして評価 可能なことが確認できた。

図8に乾燥密度1.6 Mg/m³の浸潤時間と浸潤量の関係、図9に浸潤時間の平方根と浸潤量の 関係を示す。試験ケース数が多いので、図を蒸留水から NaCl 濃度 1.0 mol/dm³までと NaCl 濃度 1.5 mol/dm³から NaCl 濃度 4.0 mol/dm³までの2つに分けている。乾燥密度 1.4 Mg/m³ の場合と同様に、浸潤時間の平方根と浸潤量は直線関係となっているが、浸潤水の NaCl 濃度 の上昇に対する浸潤時間の平方根と浸潤量の傾きの増加率は乾燥密度 1.4 Mg/m³の場合よりも 小さくなっている。また、浸潤水の NaCl 濃度が 2.0 mol/dm³程度で、浸潤速度の上昇が低下 している。

図 10 に乾燥密度 1.8 Mg/m³の浸潤時間と浸潤量の関係、図 11 に浸潤時間の平方根と浸潤量 の関係を示す。乾燥密度 1.6 Mg/m³と同様に試験ケース数が多いので、図を蒸留水から NaCl 濃度 1.0 mol/dm³までと NaCl 濃度 1.5 mol/dm³から NaCl 濃度 4.0 mol/dm³までの 2 つに分 けている。浸潤時間の平方根と浸潤量は直線関係となっているが、浸潤水の NaCl 濃度の上昇 に対する浸潤時間の平方根と浸潤量の傾きの増加率は、乾燥密度 1.4 Mg/m³、1.6 Mg/m³の場 合よりもさらに小さくなっている。また、浸潤水の NaCl 濃度が 2.0 mol/dm³以上では、浸潤 速度がほぼ一定となっている。

これらの結果より、乾燥密度 1.4 Mg/m³から 1.8 Mg/m³、浸潤水の NaCl 濃度が 0(蒸留水) から 4.0 mol/dm³までの範囲において、浸潤時間の平方根と浸潤量の関係は直線関係となって いることから、浸潤水の NaCl 濃度が高い場合でも圧縮ベントナイト試料への浸潤は拡散現象 とみなして評価できることが確認できた。



図6 浸潤時間と浸潤量の関係(乾燥密度1.4 Mg/m³)



図7 浸潤時間の平方根と浸潤量の関係(乾燥密度1.4 Mg/m³)



(a) 蒸留水、0.26 mol/dm³、0.70 mol/dm³、1.00 mol/dm³



(b) 1.50 mol/dm³, 2.00 mol/dm³, 3.00 mol/dm³, 4.00 mol/dm³

図8 浸潤時間と浸潤量の関係(乾燥密度1.6 Mg/m³)



(a) 蒸留水、0.26 mol/dm³、0.70 mol/dm³、1.00 mol/dm³



(b) 1.50 mol/dm³, 2.00 mol/dm³, 3.00 mol/dm³, 4.00 mol/dm³

図9 浸潤時間の平方根と浸潤量の関係(乾燥密度1.6 Mg/m³)



(a) 蒸留水、0.26 mol/dm³、0.70 mol/dm³、1.00 mol/dm³



(b) 1.50 mol/dm³, 2.00 mol/dm³, 3.00 mol/dm³, 4.00 mol/dm³

図10 浸潤時間と浸潤量の関係(乾燥密度1.8 Mg/m³)



(a) 蒸留水、0.26 mol/dm³、0.70 mol/dm³、1.00 mol/dm³



(b) 1.50 mol/dm³, 2.00 mol/dm³, 3.00 mol/dm³, 4.00 mol/dm³

図 11 浸潤時間の平方根と浸潤量の関係(乾燥密度 1.8 Mg/m³)

3.2 水分拡散係数による評価

前節で浸潤時間の平方根と浸潤量の関係は直線関係となっていることから、圧縮ベントナイト ト試料への浸潤は拡散現象とみなして評価できることが確認できたが、小峯ほか(2018)[11] は理論的に浸潤量と水分拡散係数の関係式を導いており、累積浸潤量と水分拡散係数の関係は 式(1)で表せる。

$$Q = 2An'_e \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \tag{1}$$

ここで、*Q*は累積浸潤量(m³)、*n*'eは有効間隙率(飽和の体積含水率と初期状態の体積含水率の差)、*A*は断面積(m²)、*D*は水分拡散係数(m²/s)、t は経過時間(s)である。

また、浸潤時間の平方根と累積浸潤量の比例係数を a とすると、水分拡散係数は式(2)となる。

$$D = \pi \left(\frac{a}{2An'_e}\right)^2 \tag{2}$$

そこで、図7、図9、図11に示す浸潤時間の平方根と浸潤量の傾きからそれぞれのNaCl濃 度における水分拡散係数を算出した。図12にNaCl濃度と水分拡散係数の関係を示す。浸潤 水が蒸留水の場合、長谷川(2004)[8]、小峯ほか(2018)[11]の結果と同様に、乾燥密度を問 わず水分拡散係数はほぼ一定の値となった。一方、浸潤水がNaCl水溶液の場合、NaCl濃度の 上昇に対する水分拡散係数の上昇の割合は乾燥密度により異なり、乾燥密度が低いほど水分拡 散係数の上昇の割合が高くなる結果となった。また、NaCl濃度が2.0 mol/dm³以上で水分拡 散係数がほぼ一定となっている。この傾向は図5に示す菊池ほか(2005)[4]が取得したイオン 強度と固有透過度の関係の傾向と同様である。この理由として、式(3)に示すように水分拡散係 数は飽和透水係数の関数となっていることが挙げられる(中野,1991[12])。

$$D = k_s k_r / \frac{\partial \theta}{\partial \Psi} \tag{3}$$

ここで k_s は飽和透水係数 (m/s)、 k_r は比透水係数 (-)、 θ は体積含水率 (-)、 Ψ はサクション (m)、 $\partial \theta / \partial \Psi$ は比水分容量 (m⁻¹) である。



図 12 NaCl 濃度と水分拡散係数の関係

4. NaCl 濃度が含水比分布に与える影響

圧縮ベントナイト試料に蒸留水を浸潤させた場合、含水比分布は下に凸の分布となり(鈴木 ほか,1999 [13];長谷川,2004 [8])、圧縮ベントナイト中の水分の移行は、水分の拡散による 移行とみなして評価できることが報告されている(長谷川,2004 [8])。しかし、鈴木らや長谷 川の結果は蒸留水を浸潤させた場合であり、塩水を浸潤させた場合の含水比分布は取得してい ない。そこで、浸潤試験を実施した後に浸潤距離毎の含水比分布の測定を行うことにより、浸 潤水の NaCl 濃度が含水比分布に与える影響を評価した。

4.1 含水比分布の取得方法

浸潤試験終了後、速やかに試験セル内の供試体をピストンで 5mm 毎に押し出し、スクレー パーで試料を切り出す。その際の供試体の重量(湿潤重量)と、110℃で24時間以上の炉乾燥 した後の供試体の重量(乾燥重量)から浸潤距離毎の含水比を算出した。なお、浸潤水が NaCl 水溶液の場合、乾燥試料の重量には NaCl の重量も含まれるが、その重量は供試体の重量と比 較して十分に小さいので本検討では NaCl の重量が含水比に与える影響は考慮していないが、 付録で塩化物イオン濃度の分析結果から乾燥試料中に含まれる NaCl の重量が含水比の算出結 果に与える影響の評価を行っている。

4.2 含水比分布の取得結果

図 13 に乾燥密度 1.4 Mg/m³における含水比分布を示す。浸潤水が蒸留水の場合、含水比分 布は給水側から浸潤距離に従いなだらかに低下する下に凸の形状となっており、 鈴木ほか(1999)[13]や長谷川(2004)[8]の結果と同様に拡散現象とみなせる分布となってい る。また、含水比分布形状を詳細に確認すると、若干ではあるが給水側から奇数番目の含水比 が低く、偶数番目の含水比が高い傾向が見られる。これは、圧縮試料を作製する際に 10 mm 毎 に圧縮しているのに対して供試体の切り出しは 5 mm 毎のため、奇数番目の断面にはケイ砂が 露出しているのに対して、偶数番目の断面にはケイ砂が露出していないことが影響していると 考えられる。このため、奇数番目の断面ではスクレーパーの歯にケイ砂が引っ掛かりケイ砂が 多く捕獲されることでケイ砂の割合が多くなるため含水比が少なく評価されるのに対して、偶 数番目の断面ではケイ砂が少なくなることでベントナイトの割合が多くなることにより、含水 比が高く評価されていると考えられる。

一方、浸潤水が NaCl 水溶液の場合、蒸留水の場合と異なった含水比分布形状となっている。 NaCl 濃度が 1.0 mol/dm³のケースでは、試験時間の都合上他のケースよりも浸潤量が多いこ とから、含水比が全体的に高く他のケースとは異なる含水比分布となっているが、その他のケ ースでは含水比分布が上に凸の曲線形状となっており、浸潤水の NaCl 濃度が高いほどその傾 向は強くなることが確認できる。

図 14 に乾燥密度 1.6 Mg/m³における含水比分布を示す。試験ケース数が多いので、図を蒸 留水から NaCl 濃度 1.0 mol/dm³までと NaCl 濃度 1.5 mol/dm³から NaCl 濃度 4.0 mol/dm³ までの 2 つに分けている。乾燥密度 1.4 Mg/m³の場合と同様に NaCl 濃度が高くなると含水比 分布が上に凸の曲線形状となる傾向がみられるが、乾燥密度 1.4 Mg/m³の場合よりもその傾向 は弱い。また、NaCl 濃度が 1.5 mol/dm³以上ではほぼ同じような分布形状となっている。図 15 に乾燥密度 1.8 Mg/m³における含水比分布を示す。試験ケース数が多いので、図を蒸留水か ら NaCl 濃度 1.0 mol/dm³までと NaCl 濃度 1.5 mol/dm³から NaCl 濃度 4.0 mol/dm³までの 2 つに分けている。乾燥密度 1.6 Mg/m³と同様の傾向を示しているが、NaCl 濃度の上昇により 含水比分布が上に凸の曲線形状となる傾向は乾燥密度 1.6 Mg/m³の場合よりも弱くなってい る。また、乾燥密度 1.6 Mg/m³と同様に NaCl 濃度が 1.5 mol/dm³以上ではほぼ同じような分 布形状となっている。

浸潤水の NaCl 濃度が高い場合に、含水比分布が上に凸の曲線形状となる要因として、浸潤 した溶液の NaCl 濃度に応じて供試体の透水性が変化することが挙げられる。図5に示すよう に、ベントナイトの透水性は透水する溶液のイオン強度に応じて透水性が高くなるため、NaCl 水溶液が浸潤した領域の透水性が高くなり浸潤が促進される。これにより、給水面側の含水比 が速やかに高くなる傾向を有することで上に凸の曲線形状になると考えられる。また、図5に 示すように、ベントナイトの透水性は溶液のイオン強度が高くなるに従い高くなることから、 溶液の NaCl 濃度が高くなるほど給水面側の含水比が速やかに高くなり、含水比分布が上に凸 の曲線形状になる傾向が強くなると考えられる。また、供試体の乾燥密度が低いほど、低い NaCl 濃度で含水比分布が上に凸の曲線形状となることについては、乾燥密度が低いほど NaCl 濃度の上昇に対する透水性の増加の割合が高くなるためであると考えられる(菊池ほか, 2003 [3])。



図 13 NaCl 濃度毎の含水比分布 (1.4 Mg/m³)



(a) 蒸留水~1.0 mol/dm³



(b) 1.5 mol/dm³~4.0 mol/dm³

図 14 NaCl 濃度毎の含水比分布(1.6 Mg/m³)



(a) 蒸留水~1.0 mol/dm³



(b) 1.5 mol/dm³~4.0 mol/dm³

図 15 NaCl 濃度毎の含水比分布 (1.8 Mg/m³)

5. 圧縮ベントナイト試料中の塩化物イオン濃度分布の評価

圧縮ベントナイト試料中の物質移行特性については、主に再冠水後を想定した飽和試料中の 拡散による移行特性が評価されており(鈴木,2002[14])、再冠水に至るまでの過渡期を対象と した不飽和な圧縮ベントナイト中での物質移行挙動の実験的な検討は限られている。不飽和な 圧縮ベントナイト中での物質移行挙動を評価した例として、木村ほか(2010)[7]は温度勾配下 での塩濃縮試験を実施し、熱-水-応力-化学(T-H-M-C)連成解析モデルによるシミュレー ションを行っている。その結果、概ね塩濃縮現象を再現できているが、現象理解の複雑さやデ ータ数が十分ではないことなどから、不飽和状態を含めた物質移行に関する現象理解やデータ の拡充を今後の検討課題の一つであるとしている。

本試験では、浸潤水に塩化ナトリウム水溶液を用いていることから、塩化物イオンをトレー サーとした圧縮ベントナイト試料中での移流による溶質の移行挙動の評価が可能である。なお、 ベントナイト中での物質移行を評価する際に、拡散による物質移行では核種により拡散係数が 異なることが報告されている(鈴木, 2002 [14])が、移流による溶質の移行では、溶存イオン に収着性が無い場合、溶存イオンの種類を問わず間隙中を同じ割合で移行すると考えられる。

このため、浸潤距離毎に含水比分布を測定した試料中に含まれる塩化物イオン濃度を分析す ることにより、塩化物イオンをトレーサーとした不飽和なベントナイト中での移流による溶質 の移行挙動を評価した。なお、クニゲル V1 にも塩化カルシウム等の形で塩化物イオンが含ま れているが、クニゲル V1 に含まれる塩化物イオンの割合は 0.001%以下(石川ほか, 1993 [15]) であり、蒸留水で 100 倍に希釈した際の塩化物イオン濃度は 0.1ppm 以下となる。これに対し、 浸潤溶液の塩化物イオン濃度は、塩化ナトリウム水溶液の濃度が 1.49%の場合でも 9000ppm 以上なので、ベントナイトに含まれている塩化物イオンの影響は無視できる。また、クニゲル V1 は Na 型のため、塩化ナトリウム水溶液を浸潤させても層間陽イオンのイオン交換は起きな いと仮定している。

5.1 塩化物イオン濃度の分析方法

塩化物イオン濃度の分析には、イオンクロマトグラフ(サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社製 Dionex Integrion HPIC System)を使用した。

- 分析に用いる試液の調整方法は以下の通りである。
- 1) 含水比測定後の炉乾燥したベントナイト試料を乳鉢で粉末化する。
- 2) 粉末試料1gをポリ瓶に秤量する。
- 3) ポリ瓶に蒸留水 100 g を加えてベントナイトが完全に水に分散するまで十分に攪拌する。
- 4) しばらく静置した後に溶液の上澄みを採取し、0.45 µm のフィルタでろ過する。
- 5) 浸潤水の NaCl 濃度に応じて 2 次希釈し分析用のバイアル瓶に封入する。
- 6) イオンクロマトグラフにより塩化物イオンの濃度を分析する。

分析した塩化物イオン濃度の値(ppm)から、式(4)により、乾燥試料1gあたりの塩化物イオンの重量を算出する。また、式(5)により、間隙水1gあたりの塩化物イオンの重量を算出した。ここで、圧縮ベントナイト試料の間隙には、モンモリロナイトの層間間隙と層間間隙以外の粒子間間隙にわけられるが(木村ほか,2010[7])、ここでは、両者を区別せず圧縮ベントナイト試料に含まれる水分を間隙水としている。

$$R_{sd} = \frac{C_{Cl} \cdot DR}{10^6} \tag{4}$$

ここで、 R_{sd} は乾燥試料 1g あたりの塩化物イオンの重量(g)、 C_{Cl} は塩化物イオン濃度(ppm)、 DR は希釈倍率である。

$$R_w = \frac{R_{sd}}{\frac{w}{100}} \tag{5}$$

ここで、 R_w は、間隙水1gあたりの塩化物イオンの重量(g)、wは含水比(%)である。

5.2 塩化物イオン濃度分布の測定結果

5.2.1 塩水浸潤試験試料の塩化物イオン分布

図 16、図 17、図 18 に乾燥密度毎の塩水浸潤試験後試料の浸潤距離毎の乾燥試料 1g あたり の塩化物イオンの重量(以下、「Cl·(乾燥)」という)および間隙水 1g あたりの塩化物イオン の重量(以下、「Cl·(間隙水)」という)の分布を示す。図には、水分の移動と塩化物イオンの 移動を比較するために含水比分布および初期含水比も併せて記載している。また、Cl·(間隙水) の分布には、浸潤水の水 1g あたりの塩化物イオンの重量(以下、「Cl·(浸潤水)」という)も 記載している。なお、Cl·(浸潤水)は式(6)により算出した。

$$R_i = \frac{C_{NaCl}}{100 - C_{NaCl}} \times \frac{M_{Cl}}{M_{NaCl}} \tag{6}$$

ここで、 R_i は浸潤水の水 1g あたりの塩化物イオンの重量(g)、 C_{NaCl} は浸潤水の NaCl 濃度(%)、 M_{NaCl} は NaCl の分子量、 M_{Cl} は塩化物イオンの原子量である。

一般的な多孔質媒体では、溶質に収着性が無い場合、浸潤水中の水分と溶質は同じ割合で移動すると考えられる。しかし、図 16、図 17、図 18 より全てのケースにおいて含水比分布と Cl (乾燥)の分布形状には明らかな違いが見られることから、圧縮ベントナイト試料中の水分と 塩化物イオンの移行挙動はそれぞれ異なっていることが確認された。

また、Cl·(間隙水)の分布に着目すると、飽和に近い給水側のCl·(間隙水)よりも浸潤の中 央付近のCl·(間隙水)の値が大きくなっていることから、給水側よりも供試体の中央付近で間 隙水中の塩化物イオンの濃度が高くなっていることがわかる。本報告では、このような給水側 よりも塩化物イオンの濃度が高い領域が生じる現象を塩化物イオンの濃縮と呼ぶこととする。

全てのケースにおいて浸潤の中央付近で塩化物イオンが濃縮されることにより、乾燥密度 1.4 Mg/m³および 1.6 Mg/m³のケースでは Cl⁻(浸潤水)よりも高い値となっている。一方、給 水面側のほぼ飽和している領域の Cl⁻(間隙水)は Cl⁻(浸潤水)よりも低く、Cl⁻(浸潤水)の 半分から 2/3 程度となっている。また、浸潤の先端では水分が増加しているのに対して NaCl がほぼ検出されていない領域がある。これは、不飽和ベントナイト中の水は、液状水と水蒸気 の二相で移動する(鈴木ほか,2002 [16])ため、飽和度の低い浸潤の先端では水は主に水蒸気 として移動しているためであると考えられる。

同じ乾燥密度で浸潤水の NaCl 濃度の違いを比較すると、浸潤水の NaCl 濃度が高くなると Cl (間隙水)のピークが狭くなる傾向が見られる。また、同じ浸潤水の NaCl 濃度で乾燥密度 の違いを比較すると、乾燥密度が低いほど給水側の Cl-(間隙水)に対するピークの Cl (間隙 水)が高くなる傾向が見られる。

このように浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する現象は、ベントナイトの主要な構成物質であ るモンモリロナイトの層間の特性に起因するものであると考えられる。モンモリロナイトは、 層間に水分子を取り込む特性を有しており、Na型のモンモリロナイトでは、乾燥密度や溶液 のNaCl濃度に応じて飽和状態で2~3層の水和層を有することが知られている(Kozaki et al., 2001 [17]; Kozaki et al., 2008 [18])。また、供試体の間隙はモンモリロナイトの層間間隙と層 間間隙以外の粒子間間隙に分けられるが、供試体に水分が浸潤した際には、層間に優先的に水 分子を取り込むと考えられている(竹内ほか, 1995 [19])。このため、浸潤に伴う塩化物イオン の濃縮の現象理解を深めることや、浸潤に伴い塩化物イオンの濃縮が生じる要因を検証するた めに、以下に示す追加の試験を実施した。

1) 浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮の現象理解

・浸潤時間を変えた浸潤試験

浸潤の進行に伴う塩化物イオンの濃度分布の推移を確認するために、浸潤時間を変えた 浸潤試験の実施及び飽和まで浸潤させた浸潤試験を実施する。

・供試体のスケール依存性

浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮が供試体のスケールに依存するのかを確認するために、
 供試体の高さを変えた浸潤試験を実施し、含水比分布や Cl (間隙水)の分布を比較する。
 2)浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する要因の検証

浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮は、浸潤水中の水分子が層間に優先的に取り込まれること が要因の一つと考えられることから、層間間隙の飽和度が浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮に 与える影響を確認するために、供試体の初期含水比を変えた浸潤試験を実施し、Cl (間隙水) の分布を評価する。

また、塩水浸潤試験試料の塩化物イオン濃度の分析結果から、塩化物イオンの濃縮の他にも 給水面側のほぼ飽和している領域の Cl·(間隙水)が Cl·(浸潤水)よりも低くなることが確認 されているが、この要因としてモンモリロナイトの層間は負に帯電していることから陰イオン である塩化物イオンが層間に侵入できないこと(陰イオン排除)の影響により、層間間隙は塩 化物イオンの移行に寄与していないことが考えられる。このような現象は、飽和条件での拡散 試験で確認されており(鈴木,2002 [14])、本試験結果から不飽和での移流による溶質の移行で も同様の現象が起きていると考えられる。また、陽イオンについては、層間に侵入することは 可能であるが、水和層が3層程度の場合、層間に保持されている陽イオンの量は一定であるこ とや、層間間隙の幅は粒子間間隙と比較して非常に狭く(Kozaki et al., 2001 [17]) 不透水と みなせることから、陽イオンについても層間間隙は移流による溶質の移行に寄与しないと考え られる。このため、移流による溶質の移行に寄与するのは粒子間間隙であると仮定して、移流 による溶質の移行に寄与する間隙の割合の評価するために、以下に示す追加の試験も実施した。

3) 移流による溶質の移行に寄与する間隙の割合の評価

移流による溶質の移行に寄与する間隙の割合を評価するために、通水により供試体内の粒 子間間隙を浸潤水で完全に置換した試料を対象に、Cl-(間隙水)を測定し、Cl-(浸潤水)と 比較する。



図 16 浸潤試験後試料中に含まれる塩化物イオンの重量分布 (ケイ砂 30 %混合ベントナイト,乾燥密度 1.4 Mg/m³)



図 17 浸潤試験後試料中に含まれる塩化物イオンの重量分布 (ケイ砂 30 %混合ベントナイト,乾燥密度 1.6 Mg/m³)



図 18 浸潤試験後試料中に含まれる塩化物イオンの重量分布 (ケイ砂 30 %混合ベントナイト,乾燥密度 1.8 Mg/m³)

5.2.2 浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮の現象理解

a) 浸潤時間を変えた試験

前項の結果より、浸潤の中央付近で NaCl が濃縮する傾向が確認されたが、試験時間の都合 上、浸潤量が多くなった乾燥密度 1.4 Mg/m³、NaCl 濃度 1.0 mol/dm³のケースを除いて、Cl (間隙水)分布を取得したのは、供試体の初期間隙の約 40 %まで浸潤させたケースのみであ る。このため、浸潤の進行に伴い NaCl が濃縮する傾向を確認することを目的として、ベント ナイトの重量比 70%、ケイ砂の重量比 30%、乾燥密度 1.8 Mg/m³の供試体を対象に、NaCl 濃 度が 0.26 mol/dm³の浸潤水を用いて浸潤時間を変えた浸潤試験を実施し、含水比分布と Cl (間 隙水)分布を取得した。なお、着目している領域の測定間隔の分解能を高くするため、浸潤時 間が短いケースでは、給水側の供試体を切り出す間隔を狭くしている。

図 19 に浸潤時間毎の含水比分布と Cl (間隙水)分布、図 20 に各浸潤時間のデータをまと めたものを示す。浸潤初期は塩化物イオンの濃縮の幅が狭くピークも低いが、浸潤が進むに従 い塩化物イオンの濃縮の幅が広くなりピークも高くなる傾向を示した。また、浸潤の先端が給 水面の反対側まで達すると、塩化物イオンの濃縮の幅がさらに広くなりピークは低くなってい る。一方、給水面側の Cl (間隙水)の値は、各浸潤時間でほぼ同じ値となっていることから、 給水面側の間隙は浸潤の早い段階で浸潤水に置換されていると考えられる。

浸潤が進むに従い塩化物イオンの濃縮の幅が広くなりピークも高くなる傾向が確認できたが、 浸潤がさらに進み飽和に至った後の供試体内の Cl·(間隙水)分布の推移を確認することを目的 として、供試体が飽和に至るまでの浸潤試験を実施した。本試験ではベントナイト 100 %で供 試体を作製し、乾燥密度は 1.4 Mg/m³とした。また、浸潤水の NaCl 濃度は 0.70 mol/dm³とし た。浸潤量は供試体の初期間隙の 40%まで浸潤したケース(試験時間 4 日)に加えて、同条件 で浸潤量の増加が無くなり飽和したと判断されるケース(試験時間 13 日)と飽和後 27 日間経 過したケースの供試体について含水比分布と Cl·(間隙水)分布を取得した。

図 21 に試験時間毎の含水比分布と Cl (間隙水)分布を示す。試験時間 13 日の供試体が飽 和したと判断されるケースでは、浸潤が進むに従い塩化物イオンの濃縮のピークが給水面の反 対側まで移動することにより、給水面の反対側が最も Cl (間隙水)の値が高い状態となってい る。また、飽和後 27 日間経過したケースでは、Cl (間隙水)分布はほぼ一定になっている。 これは、拡散により NaCl の濃度が均質化したためであると考えられる。

- 27 -



図 19 浸潤時間毎の含水比分布と Cl⁻(間隙水)分布 (ケイ砂 30 %混合ベントナイト,乾燥密度 1.8 Mg/m³, NaCl 濃度 0.26 mol/dm³)



図 20 浸潤時間毎の含水比分布と Cl⁻(間隙水)分布(全データ)



図 21 飽和後の含水比分布および Cl⁻(間隙水)分布 (ベントナイト 100 %,乾燥密度 1.4 Mg/m³, NaCl 濃度 0.7 mol/dm³)

b)供試体のスケール依存性

浸潤が進むに従い塩化物イオンの濃縮の幅は広くピークも高くなる傾向が確認されたが、供 試体のスケールが大きくなると、浸潤距離が増加することにより NaCl がより濃縮されること が考えられる。このため、供試体のスケールが塩化物イオンの濃縮に与える影響を確認するた めに、供試体の高さが 50 mm のケースに加えて供試体の高さが 100 mm のケースで浸潤試験 を行い、含水比分布および Cl (間隙水)分布を取得した。

5.2.1 項で圧縮ベントナイト試料にケイ砂を混合した場合、スライス毎に含水比のばらつき が生じることが確認され、その要因の一つとしてケイ砂の混合が影響していると考えられたこ とから、本試験ではベントナイト 100%で供試体を作製し、乾燥密度は 1.4 Mg/m³とした。ま た、浸潤水の NaCl 濃度は 0.26 mol/dm³ と 0.70 mol/dm³の 2 ケースを設定した。浸潤量は初 期間隙の 40%を目安として、供試体の高さが 50 mm のケースと 100 mm のケースで飽和度の 平均がほぼ一致するように設定した。

図 22 に浸潤時間の平方根と浸潤量の関係を示す。供試体高さが 50 mm と 100 mm の浸潤 時間の平方根と浸潤量の関係はほぼ重なっており、その傾きもほぼ一致しているこのことから、 試料の高さが変わっても浸潤時間と浸潤量の関係は変化しないことが確認できた。また、この 関係は浸潤水の NaCl 濃度が変わっても変化しないことも確認できた。

図 23 に浸潤水の濃度毎の供試体高さ 50 mm の含水比分布と Cl⁻(間隙水)分布、図 24 に浸 潤水の濃度毎の供試体高さ 100 mm の含水比分布と Cl⁻(間隙水)分布を示す。供試体にケイ 砂を混合していないため、含水比分布に凹凸は見られず滑らかな形状となっている。供試体高 さ 50mm の浸潤水の NaCl 濃度に対する含水比分布と Cl⁻(間隙水)分布は有効粘土密度が近 い 5.2.1 項の乾燥密度が 1.6 Mg/m³のケースと同様の分布となっている。また、供試体高さ 50 mm と 100mm のケースで含水比分布と Cl⁻(間隙水)分布はほぼ同様の分布形状となってい る。

供試体高さの違いが含水比分布や Cl·(間隙水)分布に与える影響を詳細に比較するため、図 25 に浸潤距離を供試体高さで正規化した含水比分布の比較、図 26 に浸潤距離を供試体高さで 正規化した Cl·(間隙水)分布の比較を示す。浸潤水の NaCl 濃度が 0.26 mol/dm³のケースで は、含水比分布および Cl·(間隙水)分布はほぼ一致していることから、含水比や Cl·(間隙水)の分布形状は供試体の高さの影響を受けていないと言える。一方、浸潤水の NaCl 濃度が 0.70 mol/dm³のケースでは、供試体高さが 100 mm の方が試験時間の都合上若干飽和度が高くなっ ているため、全体的に含水比が高く、Cl·(間隙水)分布も塩化物イオンの濃縮のピークの位置 が若干進んだ位置であるが、全体的な傾向はほぼ一致している。これらの結果より、供試体の高さは含水比や Cl·(間隙水)の分布形状に影響を与えないことから、供試体のスケール違いは 塩化物イオンの濃縮の傾向に影響を与えないことが確認できた。



(a) NaCl 濃度 0.26 mol/dm³



(b) NaCl 濃度 0.70 mol/dm³

図 22 供試体高さ 50 mm と供試体高さ 100 mm の浸潤時間の平方根と浸潤量の関係 (ベントナイト 100 %, 乾燥密度 1.4 Mg/m³)





図 23 含水比分布 Cl⁻(間隙水)分布(50 mm) (ベントナイト 100 %, 乾燥密度 1.4 Mg/m³)



図 24 含水比分布 Cl⁻(間隙水)分布(100 mm) (ベントナイト 100 %, 乾燥密度 1.4 Mg/m³)





図 25 供試体高さで正規化した含水比分布の比較





図 26 供試体高さで正規化した Cl⁻(間隙水)分布の比較

5.2.3 浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する要因の検証

浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する現象が生じる要因の一つとして、圧縮ベントナイト試料 に浸潤した NaCl 水溶液中の水分子がモンモリロナイトの層間に優先的に取り込まれること (竹内ほか,1995[19])が考えられる。供試体の初期含水比が高い場合、層間間隙の飽和度が高 くなることから、浸潤に伴い層間に取り込まれる水量が少なくなるため塩化物イオンの濃縮が 起こりにくくなると考えられる。この仮説を検証するため、5.2.1 項で実施した乾燥密度 1.6 Mg/m³、NaCl 濃度 0.26 mol/dm³の浸潤試験結果(初期含水比 5.72%)に加えて、初期含水比 が 2 層飽和相当(8.36%)および 3 層飽和相当(12.54%)の供試体を対象に浸潤試験を実施 し、含水比分布および Cl⁻(間隙水)分布を取得した。

図 27 に初期含水比を変えた場合の含水比分布と Cl (間隙水)分布を示す。初期含水比が 5.72%のケースでは明確に塩化物イオンの濃縮が見られるが、初期含水比が 8.36% (2層飽和 相当)のケースでは試料中心付近まで塩化物イオン濃度がほぼ一定となっており、塩化物イオ ンの濃縮の傾向が弱くなっている。また、初期含水比が 12.54% (3層飽和相当)では Cl (間 隙水)と含水比はほぼ同様の分布形状となっていることから塩化物イオンの濃縮はほぼ起きて いない。この結果より、浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する現象は初期含水比の影響を強く受 けていることから、浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮は層間に水分子が優先的に取り込まれるこ とに起因していると推察された。また、初期含水比が 3 層飽和相当では浸潤に伴い塩化物イオ ンが濃縮する現象が確認できないことから、浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮が生じない条件を 設定可能な見通しが得られた。



図 27 初期含水比を変えた場合の含水比と Cl⁻(間隙水)の分布 (ケイ砂 30 %混合ベントナイト,乾燥密度 1.6 Mg/m³, NaCl 濃度 0.26 mol/dm³)

5.2.4 移流による溶質の移行に寄与する間隙の割合の評価

ベントナイトの間隙はモンモリロナイトの層間間隙と粒子間間隙に分けられるが(木村ほか, 2010[7])、陰イオンである塩化物イオンがモンモリロナイトの層間に侵入できない場合、塩化 物イオンは粒子間間隙にのみ存在すると考えられる。なお、粒子間間隙でもモンモリロナイト との界面付近の水はバルク水と物性が異なると考えられるが(鈴木ほか,2003[20])、ここでは 単純化し、塩化物イオンが存在する間隙を層間外間隙として評価する。

塩化物イオンが粒子間間隙にのみ存在すると仮定した場合、Cl (間隙水)の値と Cl (浸潤水)の値の比により総間隙に占める粒子間間隙の割合を算出できる。

供試体の総間隙は次式に示すように粒子間間隙と層間間隙を足し合わせたものである(鈴木 ほか, 2001 [21])

$$V_{v} = V_{vp} + V_{vi} \tag{7}$$

ここで、Vvは総間隙、Vvpは粒子間間隙 Vviは層間間隙である。

また、層間間隙に塩化物イオンが侵入できず、粒子間間隙は浸潤水で満たされていると仮定 した場合、Cl⁻(間隙水)は次式に示すように、Cl⁻(浸潤水)に総間隙に占める粒子間間隙の割 合を掛けたものとなる。

$$C_p = C_i \times \frac{V_{vp}}{V_v} \tag{8}$$

ここで、 C_p は Cl⁻(間隙水)、 C_i は Cl⁻(浸潤水) である。

式(8)より、総間隙に占める粒子間間隙の割合は式(9)により求めることができる。

$$\frac{V_{\nu p}}{V_{\nu}} = \frac{C_p}{C_i} \tag{9}$$

式(9)により求められる総間隙に占める粒子間間隙の割合は、総間隙に対する塩化物イオンの 移行に寄与する間隙の割合と考えられる。このため、供試体に通水することにより粒子間間隙 を浸潤水で置換した試料を対象としたイオンクロマトグラフによる塩化物イオン濃度の分析結 果から式(5)により求めた Cl⁻(間隙水)と式(6)により求めた Cl⁻(浸潤水)から式(9)により粒 子間間隙の割合を算出した。

試料への通水は図 28 に示す透水試験装置を用いた。透水試験を実施する際に通水圧が高い と圧縮ベントナイト試料内に選択的な移行経路が生じて透水量が増大することが報告されてい る(黒澤ほか,2003 [22])。このため、通水圧は圧縮ベントナイト試料を対象とした膨潤圧試験 結果(菊池ほか,2005 [4])を参考にして、膨潤圧を超えない範囲で設定した。なお、供試体の 厚さは試験時間の観点から 10 mm とした。

表2に試験ケースを示す。通水を行う供試体は、浸潤試験で塩化物イオン濃度の分析を行っ

た供試体と同じケイ砂混合率、乾燥密度とした。供試体の総間隙の3倍を目安として通水を行った後に、供試体を試験セルから抜き出して供試体全体の含水比を測定した。また、含水比測 定後の乾燥試料の全量を粉末化し、イオンクロマトグラフによる塩化物イオン濃度の分析を行 うことにより、試料全体の平均的なCl-(間隙水)を算出した。

表3に通水試料のCl⁻(間隙水)の値を示す。どのNaCl濃度でも供試体の乾燥密度が高くなるほどCl⁻(間隙水)の値は小さくなっている。これは、乾燥密度が高いほど総間隙に占める粒子間間隙の割合が低くなるためである。また、有効粘土密度が近い乾燥密度1.6 Mg/m³、ケイ砂混合率30%の供試体と乾燥密度1.4 Mg/m³、ケイ砂混合率0%の供試体のCl⁻(間隙水)の値はほぼ一致していることから、有効粘土密度が同じであれば、総間隙に占める粒子間間隙の割合もほぼ同じとなる。

表4に式(9)により算出した総間隙に占める粒子間間隙の割合を示す。供試体の乾燥密度や通水した NaCl 濃度により割合は異なるが、試料の乾燥密度と構成粒子の真密度から計算される 総間隙に対して、塩化物イオンが移流により移行できる間隙の割合は総間隙の 30 %~70 %程 度であることが確認できた。

また、総間隙に占める粒子間間隙の割合の傾向として、NaCl 濃度が高くなるほど大きくなっている。この原因として、高いイオン強度により層間水が減少することで粒子間間隙の割合が増加することや(小崎ほか,2004[23])、モンモリロナイトの表面に形成された電気2重層の厚さが減少することが考えられる(Kozaki et al. 2008 [18])。また、この傾向は Van Loon et al., (2007) [24]が実施した塩化物イオンの拡散試験結果から評価したイオン強度と粒子間間隙の割合の関係とも整合的である。



図 28 透水試験装置の概要

ベントナイト クニゲル V1 乾燥密度(Mg/m³) 1.4 1.6 1.8 1.4 0 ケイ砂混合率(%) 30 30 30 0.26、 0.26、 0.26、 浸潤水の NaCl 濃度(mol/dm³) 0.26, 0.70 0.70, 1.00 0.70, 1.00 0.70, 1.00

表2 試験ケース

表3 通水試料の Cl⁻(間隙水)

通水試験ケース	1.4 Mg/m ³	1.6 Mg/m ³	1.8 Mg/m ³	1.4 Mg/m ³
NaCl 濃度(mol/dm³)	ケイ砂 30 %	ケイ砂 30 %	ケイ砂 30 %	ケイ砂0%
0. 26	0. 0084	0.0063	0. 0048	0.0060
0. 70	0. 0260	0. 0222	0. 0179	0. 0212
1.00	0. 0400	0. 0339	0. 0274	-

表4 総間隙に占める粒子間間隙の割合

通水試験ケース	1.4 Mg/m ³	1.6 Mg/m ³	1.8 Mg/m ³	1.4 Mg/m ³
NaCl 濃度(mol/dm³)	ケイ砂 30 %	ケイ砂 30 %	ケイ砂 30 %	ケイ砂0%
0. 26	0. 558	0. 416	0. 317	0.397
0. 70	0. 626	0. 535	0. 431	0. 512
1.00	0. 670	0. 569	0. 459	-

6. まとめ

本検討では、不飽和圧縮ベントナイト中での水分および溶質の移行挙動の理解を目的として、 乾燥密度の異なる圧縮ベントナイト試料を対象に、浸潤水の NaCl 濃度を変えた浸潤試験を実 施した。また、浸潤試験後の試料中に含まれる塩化物イオンの濃度を分析することにより、供 試体中の NaCl の濃度分布データを取得した。

その結果、人工海水以上の高い濃度を含む幅広い範囲の NaCl 濃度の浸潤水が、圧縮ベント ナイト試料への浸潤速度に与える影響を評価するためのデータを取得することができた。また、 浸潤試験後の圧縮ベントナイト試料中の含水比分布を評価した結果からは、浸潤水の NaCl 濃 度の違いが含水比の分布形状に影響を与えることが確認された。

浸潤試験後の試料の塩化物イオン濃度を分析した結果からは、水分と塩化物イオンの移行挙動はそれぞれ異なっており、浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する現象が確認された。また、この現象は供試体の初期含水比の影響を受けており、塩化物イオンの濃縮が生じない条件を設定可能な見通しが得られた。

従来のモデルを用いた不飽和な緩衝材中での移流による溶質の移行評価では、水分と溶質が 同じ割合で移行するとしており、本試験で観察されたような浸潤に伴い溶質が濃縮する挙動を 評価できていなかった。このため、本試験で得られた溶質の濃度分布データに基づいた浸潤に 伴い溶質が濃縮する挙動を再現できるような移流による溶質の移行モデルを構築することは、 海水系の地下水により緩衝材が飽和に至るまでの過渡的な期間における緩衝材中での溶質の移 行の評価の信頼性の向上に寄与すると考えられる。

以下に、個別の試験結果から得られた知見をまとめる。

- 1) 浸潤水の NaCl 濃度が水理特性に与える影響の評価
 - 1-1) 浸潤水の NaCl 濃度が浸潤速度に与える影響の評価
 - ・浸潤水の NaCl 濃度が高くなるに従い浸潤速度は速くなるが、2.0 mol/dm³以上ではほ ぼ一定の浸潤速度となる。
 - ・乾燥密度 1.4 Mg/m³から 1.8 Mg/m³、浸潤水の NaCl 濃度が 0 (蒸留水) から 4.0 mol/dm³
 までの範囲において、浸潤時間と浸潤量の関係は拡散現象とみなして評価できる。
 - ・浸潤水が蒸留水の場合、乾燥密度を問わず水分拡散係数はほぼ一定の値となる。
 - ・浸潤水の NaCl 濃度が高くなるに従い水分拡散係数は大きくなるが、NaCl 濃度が 2.0 mol/dm³以上では水分拡散係数がほぼ一定となる。
 - 1-2) 浸潤水の NaCl 濃度が供試体の含水比分布に与える影響の評価
 - ・浸潤水が蒸留水の場合、含水比分布は下に凸の形状であるが、浸潤水の NaCl 濃度が高 くなるに従い、含水比分布は下に凸から上に凸の曲線形状となる。
 - ・供試体の乾燥密度が低いほど浸潤水の NaCl 濃度の変化に対して含水比分布が下に凸か ら上に凸の曲線形状となる傾向は強くなる。

- 2) 浸潤水の NaCl 濃度が溶質の移行挙動に与える影響の理解
 - 2-1) 塩水浸潤試験試料の塩化物イオン濃度の分析結果
 - ・圧縮ベントナイト試料中の水分の移行挙動と塩化物イオンの移行挙動はそれぞれ異なっていることが確認された。
 - ・浸潤に伴い塩化物イオンの濃縮が起きており、塩化物イオンが濃縮する傾向は供試体の 乾燥密度が低くなることや、浸潤水の NaCl 濃度が高くなるに従い強くなる。
 - 2-2) 塩化物イオンの濃縮現象を理解するための追加試験結果
 - ・浸潤時間を変えた試験の結果、浸潤が進むに従い塩化物イオンの濃縮の幅が広くなりピークも高くなるが、浸潤の先端が給水面の反対側まで達すると、塩化物イオンの濃縮のピークは低くなる。
 - ・供試体が飽和した直後は給水面の反対側の塩化物イオン濃度が高くなるが、その後飽和 状態下でのイオンの拡散により塩化物イオンの濃度は均質化する。
 - ・供試体の高さが変化しても供試体高さで正規化した浸潤量が同じであれば、供試体高さで正規化した含水比分布や間隙水中の塩化物イオンの重量の分布形状はほぼ一致することから、供試体のスケール違いは塩化物イオンの濃縮の傾向に影響を与えない。
 - ・浸潤に伴い塩化物イオンが濃縮する現象は初期含水比に依存しており、初期含水比が 3 層飽和以上では浸潤に伴う塩化物イオンの濃縮は生じない。
 - ・供試体の乾燥密度や通水した NaCl 濃度により割合は異なるが、塩化物イオンが移流により移行できる間隙の割合は総間隙の 30%~70%程度である。

謝辞

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁から日本原子力研究開発機構が受託した「令和4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(JPJ007597)(ニアフィールド システム評価確証技術開発)の成果の一部を含むものである。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁,科学的特性マップ,https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricit y_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/ (参照:2023年3月10日).
- [2] 鈴木英明,藤田朝雄,緩衝材の膨潤特性,JNC TN8400 99-038, 1999, 98p.
- [3] 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, 47p.
- [4] 菊池広人, 棚井憲治, 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験, JNC TN8430 2004-005, 2005, 96p.
- [5] 日本原子力研究開発機構,緩衝材基本特性データベース, https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/
 (参照: 2023 年 3 月 10 日).
- [6] 経済産業省,沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ, https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/rep ort_01.html (参照: 2023年3月10日).
- [7] 木村誠,九石正美,藤田朝雄,中間茂雄,鈴木英明,緩衝材中の化学影響評価に向けた熱-水-応力-化学連成解析モデルの開発,JAEA-Research 2010-034, 2010, 131p.
- [8] 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, 研究報告 N04005, 2004, 24p.
- [9] 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, 704p.
- [10]藤田朝雄,谷口直樹,松井裕哉,棚井憲治,西村繭果,小林保之,平本正行,前川恵輔,澤田淳,牧野仁史,笹本広,吉川英樹,柴田雅博,若杉圭一郎,濱克宏,操上広志,國丸貴紀,石井英一,竹内竜史,中野勝志,太田久仁雄,瀬尾俊弘,宮原要,内藤守正,油井三和,幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書分冊「地層処分研究開発」,JAEA-Research 2007-045, 2007, 140p.
- [11] 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, Vol.74, No.1, 2018, pp.63-75.
- [12] 中野政詩, 土の物質移動学, 東京大学出版会, 第 112 号, 1991, 200p.
- [13] 鈴木英明,藤田朝雄,緩衝材の不飽和水理特性, JNC TN8430 99-010, 1999, 76p.
- [14] 鈴木覚,人工バリアにおける核種拡散過程に関する研究,JNC TN8400 2002-006, 2002, 296p.
- [15] 石川博久, 間野正, 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, 114p.
- [16] 鈴木英明, 千々松正和, 藤田朝雄, 中野政詩, 不飽和圧縮ベントナイト中の水分移動パラ メータに関する考察, 土木学会論文集, No.701/Ⅲ-58, 2002, pp.107-120.
- [17] Kozaki, T., Inada, K., Sato, S., Ohashi, H., Diffusion mechanism of chloride ions in sodium montmorillonite, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.47, 2001, pp.159-170.

- [18] Kozaki, T., Liu, J., Sato, S., Diffusion mechanism of sodium ions in compacted montmorillonite under different NaCl concentration, Physics and Chemistry of the Earth, Vol.33, 2008, pp.957-961.
- [19] 竹内真司, 原啓二, 中野政詩, 圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態, 地盤工学会論文報告集, Vol.35, No.3, 1995, pp.129-137.
- [20] 鈴木覚,河村雄行,中島善人,市川康明,粘土鉱物-水界面における水の分光学的性質と動 的性質の関係,資源と素材, Vol.119, 2003, pp.581-586.
- [21] 鈴木覚,藤島敦,上野健一,市川康明,河村雄行,藤井直樹,柴田雅博,佐藤治夫,圧縮ベントナイトの微細構造のモデル化と MD-HA 結合解析法の拡散問題への適用一先行基礎工学研究に関連した共同研究の研究開発状況一, JNC TY8400 2001-003, 2001, 66p.
- [22] 黒澤進, 久野義夫, 諸岡幸一, 上田真三, 圧縮成型ベントナイト中のコロイドの移行試験, JNC TN8430 2003-006, 2003, 31p.
- [23] 小崎完, 佐藤正知, 緩衝材中の核種移行挙動に及ぼす処分環境因子に関する基礎的研究, JNC TJ8400 2003-075, 2004, 31p.
- [24] Van Loon, L. R., Glaus, M. A., Müller, W., Anion exclusion effects in compacted bentonites, Applied Geochemistry, Vol.22, 2007, pp.2536-2552.

付録

乾燥試料中に含まれる NaCl の重量が含水比の算出結果に与える影響の評価

試料中の含水比は、試料の湿潤重量と乾燥重量から求めるが、NaCl 水溶液を浸潤させた試 料を乾燥させた場合、乾燥重量に NaCl の重量が含まれていることから、乾燥重量が過大評価 されることにより含水比が低く評価される恐れがある。そこで、イオンクロマトグラフにより 分析した供試体中の塩化物イオン濃度のデータを用いて、最も含水比が高く NaCl の重量の影 響が大きいと考えられる乾燥密度 1.4 Mg/m³、ケイ砂混合率 30%の供試体に 1.0 mol/dm³の NaCl 水溶液を浸潤させた試験ケースを対象に、乾燥試料中に含まれる NaCl の重量が含水比 の算出に与える影響を評価した。

粒子間間隙に塩化物イオンと同じ濃度のナトリウムイオンが存在すると仮定すると、供試体の乾燥試料 1gに含まれる NaClの重量 *R*_{sd}は式(A1)から算出できる。

$$R_{sd} = \frac{C_{Cl} \cdot DR}{10^6} \times \frac{M_{NaCl}}{M_{Cl}} \tag{A1}$$

ここで、 C_{Cl} は塩化物イオン濃度 (ppm)、DRは希釈倍率、 M_{NaCl} は NaCl の分子量、 M_{Cl} は 塩化物イオンの原子量である。

図 A1 に NaCl 水溶液で飽和した供試体の構成要素を重量比で示す。ここで、 W_{sd} を 1g とすると $W_{c}=1$ - R_{sd} となり、NaCl の重量を含む供試体の含水比 w_{d} (%) は、式(A2)、NaCl の重量を除いた供試体の含水比 w_{s} (%) は、式(A3)で表せる。

$$w_d = \frac{W_w}{W_{sd}} \times 100 = W_w \times 100 \tag{A2}$$

$$w_s = \frac{W_w}{W_c} \times 100 = \frac{W_w}{1 - R_{sd}} \times 100 = \frac{w_d}{1 - R_{sd}}$$
 (A3)

図 A2 に乾燥密度 1.4 Mg/m³の供試体に 1.0 mol/dm³の NaCl 水溶液を浸潤した際の NaCl を含む重量から算出した含水比と NaCl の重量を除いて算出した含水比の比較を示す。NaCl を除いた重量から算出した含水比の方が若干大きな値となっているが、その差は小さく含水比の差が最も差の大きい給水面側でも 0.45%程度であることから、乾燥試料中に含まれる NaCl の 重量が含水比に与える影響は限定的であることが確認できた。



図 A1 NaCl 水溶液で飽和した供試体の構成要素の重量比



図 A2 NaCl を含む重量から算出した含水比と NaCl の重量を除いて算出した含水比の比較

This is a blank page.