

海水系地下水条件下における
埋め戻し材特性に関する基礎試験
(試 験 報 告)

2003年11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)

2003

海水系地下水条件下における埋め戻し材特性に関する基礎試験
(試 験 報 告)

菊池広人**，棚井憲治*，杉田裕*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分場の閉鎖では，人工バリアが設置された後は，その人工バリア性能を損なわないように，残された坑道は埋め戻し材によって充填されることとなる。

埋め戻し材に要求される性能は，隙間膨潤性能，低透水性，膨潤圧・剛性等である。たとえば，隙間膨潤性能に関して実際の処分環境で考えられる現象は，岩盤の変形による坑道断面の縮小，支保工のコンクリート変質に起因するベントナイトの性能の劣化等も複雑に絡み合ってくる。そして，最終的な坑道における埋め戻し材の隙間膨潤性能はこれらの相互作用を考慮して初めて評価することができる。しかしながら，現段階においてはこれらの現象を十分に説明するだけのデータが揃っておらず，また，各現象のメカニズムも十分に解明されていない。

そこで，まずは埋め戻し材単体としての隙間膨潤性能に着目した。つまり，支保工の変質を模擬した隙間を設定し，それに対する隙間膨潤性能を確認した。ここでは，第 2 次取りまとめでの埋め戻し材仕様の妥当性，隙間充填性能を確保可能なベントナイト配合割合の概略的把握を目的として海水条件下における埋め戻し材特性に関する基礎試験を実施した。

今回の結果からは，コンクリート製支保工（厚さ 50cm）が変質し，その体積の 30% が隙間となるという極端な条件を仮定した試験条件では，要求性能を担保するための隙間膨潤量を確保するために，降水系においては，第 2 次取りまとめにおける埋め戻し材仕様のベントナイト配合率である程度期待できるが，海水系においては，ベントナイト配合割合が 50% 以上必要であった。

基礎試験であり隙間を固定していることから，隙間充填時の止水性能に関するデータは今後の課題であるが，海水環境下の試験結果のプロットからは隙間許容曲線の概要を得ることができた。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

** 検査開発株式会社

**Basic experimental study on the backfilling material under saline seawater condition
(Testing Document)**

Hirohito KIKUCHI, Kenji TANAI*, and Yutaka SUGITA***

Abstract

In geological disposal of high-level radioactive waste, closure of repository is the technique of filling clearance using the backfilling material to preserve barrier performance of the engineered barrier system.

The required performances of the backfilling material are clearance filling, low permeability and swelling pressure and stiffness. The expecting behaviors of the backfilling material are very complex which are decrease of section area of the tunnel due to creep displacement, decrease of performance of bentonite due to alteration of the concrete lining and so on. And ideal assessment of the clearance filling performance in the backfilled tunnel will be performed considering the coupled behaviors described above. However, there is not enough data to explain the expecting behaviors, and mechanisms of the coupled behaviors are not clarified yet.

Therefore, the clearance filling performance of backfilling material was selected first. In this study, the clearance filling performance was tested using the clearance considering only decrease of the volume of the concrete lining due to alteration of the concrete. Basic examination of the backfilling material was performed, which focused on the feasibility of the backfilling material described in the H12 report and the adequate bentonite/sand mixture to obtain conservative filling clearance performance.

Results of the examination showed, under test conditions that 30% of the volume of concrete lining decreases due to alteration and such volume become clearance between the backfilling material and concrete lining, in distilled water condition, the specification (bentonite/sand mixture) of the backfilling material described in H12 report almost filled the clearance. However, in saline seawater, 50% and more bentonite was required to fill the clearance.

Since this examination fixed the clearance, water stopping performance will be examined in next phase. Through the saline seawater examination, the basic clearance filling curve was obtained.

* Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

** Inspection Development Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	4
3. 試験条件	5
3.1 試験パラメータ	5
3.2 X線CT撮影条件	7
3.3 試験試料	8
4. 試験結果および考察	10
4.1 膨潤変化量	10
4.2 密度変化	14
4.3 体積膨潤量	20
5. まとめ	22
6. おわりに	23
7. 参考文献	24

目 次

図-1.1	地下施設の埋め戻しの概念図	1
図-1.2	埋め戻し材の設置される坑道での相互作用	2
図-1.3	埋め戻し材の設置される坑道の時間変遷	3
図-1.4	隙間膨潤の観点からの許容隙間曲線	4
図-2.1	試験装置概略図	5
図-3.1	軟岩の処分坑道の断面	5
図-3.2	クニゲル V1 の粒径分布	8
図-3.3	ケイ砂の粒径加積曲線	9
図-4.1	膨潤量の経時変化	11
図-4.2	供試体構成要素	14
図-4.3	DW-1 供試体切り出し範囲	15
図-4.4	SW-2 供試体切り出し範囲	15
図-4.5	SW-3 および SW-4 供試体切り出し範囲	15
図-4.6	緩衝材・埋め戻し材仕様に関する透水係数比較図	18
図-4.7	実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (DW-1 供試体)	18
図-4.8	実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (SW-2 供試体)	19
図-4.9	実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (SW-3 供試体)	19
図-4.10	実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (SW-4 供試体)	20
図-4.11	骨材混合体作製時の有効粘土密度と体積膨潤量の関係	21
図-6.1	各特性における許容範囲曲線	23

表 目 次

表-1.1	要求性能と取得データ一覧	3
表-3.1	試験条件（降水系）	6
表-3.2	試験条件（海水系）	6
表-3.3	人工海水の化学分析結果	6
表-3.4	X線 CT 撮影条件	7
表-3.5	クニゲル V1 の鉱物組成	8
表-3.6	ケイ砂の化学組成	9
表-4.1	試験結果（DW-1 供試体）	16
表-4.2	試験結果（SW-2 供試体）	16
表-4.3	試験結果（SW-3 供試体）	17
表-4.4	試験結果（SW-4 供試体）	17

写 真 目 次

写真-3.1	X線 CT スキャナの概観	7
写真-4.1	試験開始 10 分後	11
写真-4.2	試験開始 336 時間後	11
写真-4.3	試験開始 10 分後	11
写真-4.4	試験開始 20 分後	11
写真-4.5	試験開始 120 分後	12
写真-4.6	試験開始 333 時間後	12
写真-4.7	試験開始後	12
写真-4.8	試験開始 10 分後	12
写真-4.9	試験開始 96 時間後	12
写真-4.10	試験開始 336 時間後	12
写真-4.11	解体中の DW-1 供試体	13
写真-4.12	解体中の SW-2 供試体	13
写真-4.13	SW-1 供試体の自立確認	13
写真-4.14	供試体切り出し	16

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の閉鎖は、人工バリア形成のために地下に掘削された坑道を埋め戻す技術である。処分場建設のために掘削された坑道を放置した場合、地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれることや、それ自体が地下水の卓越した水みちとなるなど、処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが予想される。また、地下施設と地下とを結ぶ空洞が残置されていると、処分場と生活圏とを直結する流路となることや処分場に人間が不用意に接近することも考えられる。

したがって、処分場を人間とその生圏から隔離するという、地層処分の基本概念（動力炉・核燃料開発事業団，1992；核燃料サイクル開発機構，1999）に影響を与えないように、これらの坑道を適切に処置しておく必要がある。坑道は人工バリアを設置するための輸送経路であり、人工バリアが設置された後は、その人工バリア性能を損なわないように残された坑道を埋め戻し材によって充填することとなる。

埋め戻しの対象となるのは、操業段階における主要坑道、縦置き方式の処分坑道、閉鎖段階における連絡坑道、アクセス坑道などである。また、坑道横置き方式の場合の処分坑道は、廃棄体および緩衝材が設置されているため、埋め戻し材の対象とはならない。埋め戻し材の要求性能は、核種移行遅延効果、低透水性、膨潤性及び割れ目等を充填するといった自己シール機能等が挙げられる。また、埋め戻し材の候補材料としては、ベントナイトに掘削ずりなどを混合した材料が考えられる。

地下施設の埋め戻しの概念は図-1.1 に示すようなものであり、坑道と交差する割れ目の規模あるいは岩盤の状況に応じてプラグ、グラウトなどを組み合わせる。

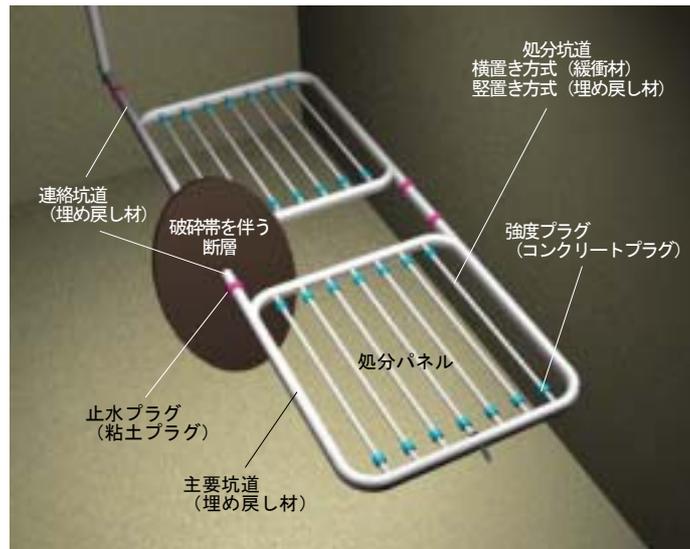


図-1.1 地下施設の埋め戻しの概念図

一方、緩衝材を対象とした試験により、以下のような知見が得られている。

- 1) 高密度ブロック材料に対して隙間膨潤後の性能に関する試験（小峯ほか，2000）では、人工バリアの廃棄体定置部の断面を縮尺したモデル試験結果から、ブロックは膨潤して隙間を充填し、そこに対して膨潤圧の4倍までの高水圧が作用しなければ膨潤後の隙間においても通水しないシール性能を確認している。
- 2) また、緩衝材基本特性データの整備（菊池ほか，2003；鈴木・藤田，1999）においては、有効粘土密度 1.2Mg/m^3 程度以上の比較的ベントナイト混合率の高い材料を対象とした試験により、海水系地下水条件下では降水系地下水条件下に比して透水性が高くなることや膨潤量が低下するといった知見が得られている。

第 2 次取りまとめで例示した埋め戻し材の仕様は、ベントナイト配合率 15%+ケイ砂配合率 85%、初期乾燥密度 1.8Mg/m³であり、これらの仕様が緩衝材同様に、様々な地下水環境下において埋め戻し材に要求されている性能を満足するかどうか、確認しておく必要がある。

仮に要求されている性能を満足できない場合、坑道そのものが核種移行経路となる恐れもあり、安全評価に影響を与えられ考えられる。したがって、海水系地下水条件下における埋め戻し材の基本特性データの取得は、同条件における埋め戻し材仕様の設定及び安全評価の観点から重要である。

実際の処分環境下を考慮した場合、埋め戻し材が設置される坑道においては、図-1.2 に示すような岩盤の変形による坑道断面の縮小、コンクリート変質に起因するベントナイトの性能の劣化等が複雑に絡み合ってくる。そして、最終的な坑道における埋め戻し材の性能はこれらの相互作用を考慮して初めて評価することができる。また、これは、“埋め戻し”という一つの要素技術を対象として例示したものであるが、同様にプラグについても種々の相互作用を考慮しなければならない。さらに、これらの要素技術を個別に評価するだけでなく、各要素技術の役割及び性能を整理した上で、閉鎖システムという観点でその閉鎖性能を評価していくことも必要である。なお、現段階においては、図-1.2 に示す各現象を十分に説明するだけのデータが揃っておらず、また、それらのメカニズムも十分に解明されていない。

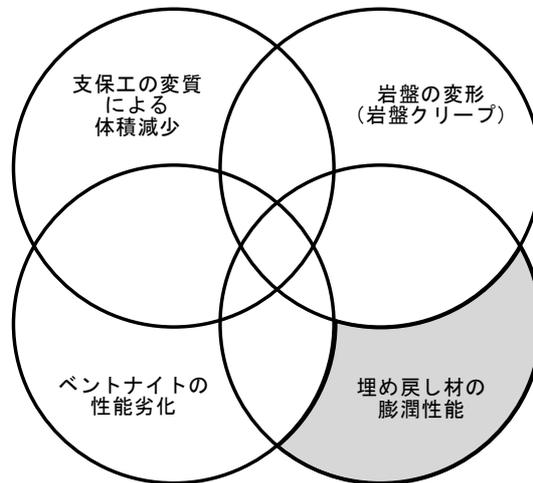


図-1.2 埋め戻し材の設置される坑道での相互作用

そこで、ここでは図-1.2 におけるこれらの複合現象のうち、コンクリート製支保工の変質による体積減少に着目した場合の埋め戻し材と支保工との時間的変遷プロセス、埋め戻し材に求められる性能及びそれらの性能を定量的に評価するために必要となるデータを以下のように整理した。

すなわち、坑道に設置されたコンクリート製支保工は、長期的な変質によりセメントペースト分の溶解によりその体積が減少すると考えられることから、図-1.3 に示すように時間の変遷とともに、コンクリート製支保工の変質による体積減少 隙間の発生 埋め戻し材の膨潤による隙間の充填のようなプロセスが考えられる。

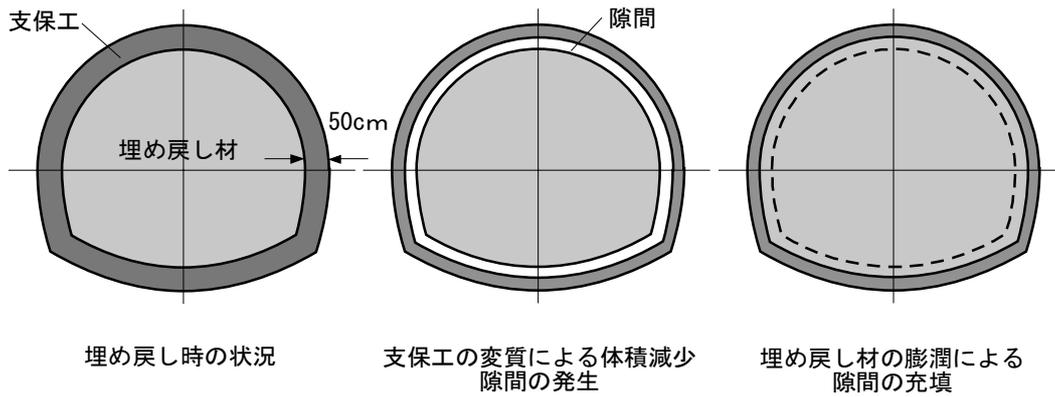


図-1.3 埋め戻し材の設置される坑道の時間変遷

このとき、埋め戻し材に要求される性能としては、
 隙間充填性能：処分坑道に設置されたコンクリート製支保工は、変質によってセメントペースト分が喪失することにより、体積が減少すると考えられる。この体積減少分が隙間として存在することとなり、この領域が水みちとなる。したがって、この隙間を埋め戻し材の膨潤によって閉塞（自己シール性）することが必要となる。
 低透水性： の隙間充填後における透水性を安全評価上問題ない範囲とすることが必要となる。
 膨潤圧・剛性： を満足する材料であり、緩衝材のはらみだしを考慮した場合でも問題のない範囲であることが必要となる。
 が挙げられる。また、これらの要求性能を定量的に評価するために必要となるデータは、表-1.1 に示すようなものとなる。

表-1.1 要求性能と取得データ一覧

要求性能	取得データ	試験方法
隙間充填性能	膨潤量	隙間膨潤試験
低透水性	透水係数	透水試験
膨潤圧・剛性	膨潤応力	膨潤応力試験
	弾性係数	一軸圧縮試験

したがって、上記で示した一つのプロセスを対象として、コンクリート製支保工の変質を模擬した隙間を設定し、それに対する隙間膨潤性能を考慮した場合、有効粘土密度と充填できる隙間との関係は、図-1.4 に示すような許容隙間曲線を得ることができる。この曲線は、図-1.3 で示したベントナイトの変質による膨潤性能の低下や岩盤クリープによる坑道の変形により曲線が上下することとなる。また、通水媒体によって曲線は上下する。

なお、これらのデータを計画的かつ効率的に取得していくためには、主要因となる要求性能について、おおよその傾向を把握することが必要である。そこで、本報告においては、核種移行経路上重要な要求性能である隙間充填性能に着目して、

第2次取りまとめでの埋め戻し材仕様の妥当性
 隙間充填性能を確保可能なベントナイト配合割合の概略的把握

を目的として海水系地下水条件下における埋め戻し材特性に関する基礎試験を実施した。

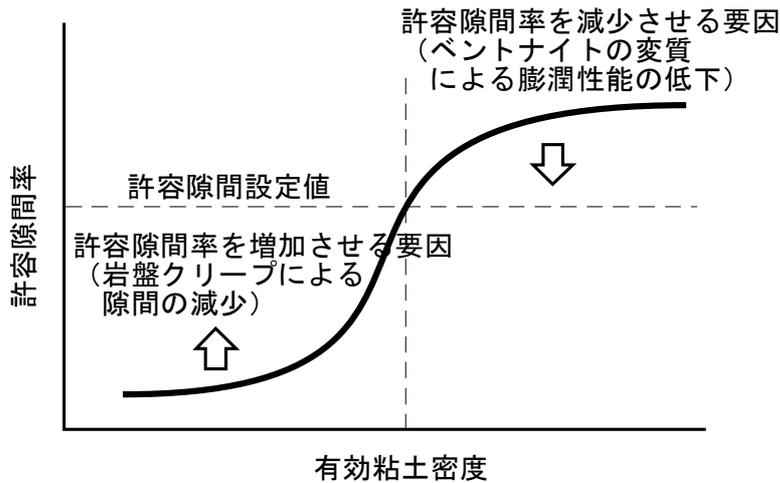


図-1.4 隙間膨潤の観点からの許容隙間曲線

2 試験方法

本試験は、図-2.1 に示す装置を用いた。試験セルはアクリル製で、内径 50mm、高さ 100mm である。このセルを一つの処分坑道領域と仮定して内部に埋め戻し材を模擬した供試体（以下、骨材混合体）を設置した。骨材混合体として、海水系地下水条件下における骨材混合率の影響を把握するため、初期乾燥密度 1.8Mg/m^3 、側方拘束条件で上下二方向からの圧縮成型した骨材混合体を用い、試験セルに設置した。設置後、骨材混合体の両側面には孔径 $2\ \mu\text{m}$ のプラスチックフィルターを設置し、上下蓋を取り付けた。試験セルを組み上げた後、デシケータ内に試験水（蒸留水および人工海水）を充填し、試験セルを沈め、試験セル内に残された空気を除去した後、自然給水によって試験を開始した。なお、人工海水は、具体的地質環境条件を想定した場合に考えられる一つの代表例として用いている。

試験は、試験セルを試験水中に約 14 日程度沈め、骨材混合体の隙間充填過程を撮影して、写真上で隙間膨潤量を計測した。また、隙間充填後の骨材混合体の自立状況の確認および試験後の骨材混合体各要素の乾燥密度を切り出しにて行い、密度分布の測定を実施した。

さらに、本基礎試験にて得られた成果を踏まえ、隙間充填膨潤試験、透水試験、膨潤圧試験を同時に計測し、かつ、X 線 CT 撮影にて隙間充填過程等を経時的に追従するため、X 線 CT 装置（棚井ほか、2003；Tanai and Yamamoto, 2003）を用いて試験セル内の骨材混合体密度分布測定を実施し、上記試験を非破壊にて測定可能かの有無を確認した。

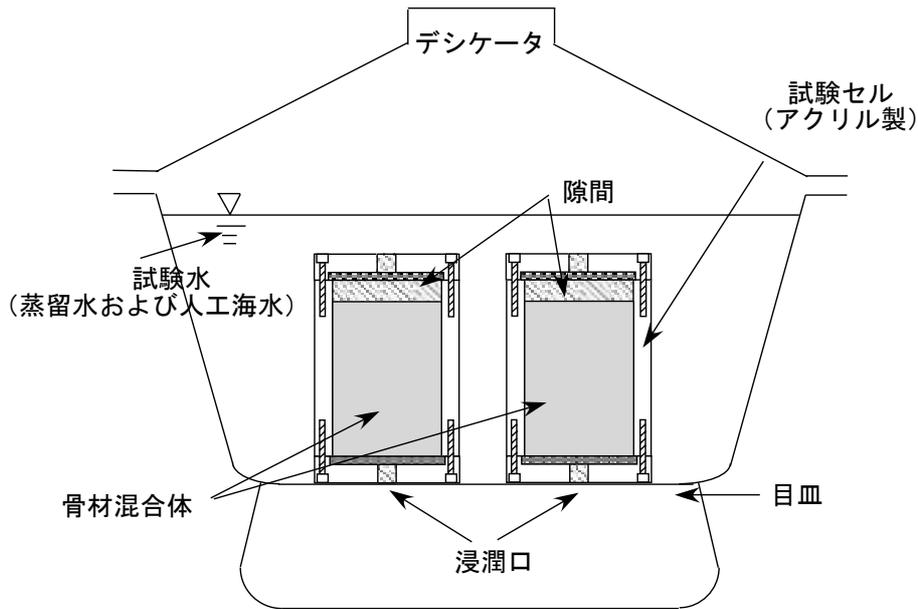


図-2.1 試験装置概観図

3 試験条件

3.1 試験パラメータ

埋め戻し材の基本材料には、地下施設建設時に発生する大量の掘削ずりを用いることが考えられている。しかしながら、掘削ずりの物性や組成は、処分場の建設される場所での地質条件に依存し、それに応じて変化する。そのため、各地質条件に対応する埋め戻し材の物性を把握しなければならず、具体的なサイトが決定していない現状でこれらを検討することは不可能である。したがって、ここでは岩盤の破碎物として、3号ケイ砂を骨材として模擬することとした。また、混合したベントナイトは、クニゲル V1 (クニミネ工業製 山形県月布産 Na型ベントナイト) を用いた。

隙間の設定に関しては、第2次取りまとめにおける軟岩の処分坑道のコンクリート製支保工(厚さ50cm)(核燃料サイクル開発機構, 1999)が変質し、セメントペースト分の全てが体積減少すると仮定した。即ち、処分坑道は図-3.1に示すように3芯円の断面であることから、坑道周囲に厚さ50cmのコンクリート製支保工が設置された場合、坑道断面積は27m²となる。そこで、コンクリート製支保工の変質によりセメントペースト分が喪失すると支保工の30%の断面積は26m²となる。この断面積の比率を円柱形の試験セルに当てはめ、隙間を設定した。

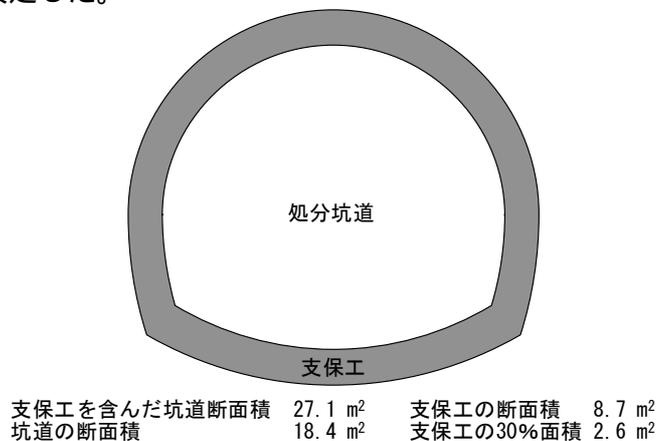


図-3.1 軟岩の処分坑道の断面

表-3.1 試験条件（降水系）

供試体名	DW-1
初期乾燥密度[Mg/m ³]	1.80
ケイ砂混合率[%]（3号ケイ砂）	85
有効粘土密度[Mg/m ³]	0.64（0.51） ¹
初期含水比[%]	15 ²
供試体寸法[mm]	50×h90
隙間寸法[mm]	50×h10
試験水	蒸留水
試験温度[]	室温（約20）
試験期間[day]	約14

- 1：有効粘土密度欄における（ ）内においては、隙間充填後の供試体有効粘土密度である
 2：供試体作製上、低含水比では作製することが困難であったため、高含水比にて作製を行った。

表-3.2 試験条件（海水系）

供試体名	SW-1	SW-2	SW-3	SW-4
初期乾燥密度[Mg/m ³]	1.80			
有効粘土密度[Mg/m ³]	0.64 （0.51） ¹	1.22 （1.03） ¹	1.37 （1.17） ¹	1.43 （1.23） ¹
ケイ砂混合率[%] （3号ケイ砂）	85	60	50	45
初期含水比[%]	15 ²	10	10	10
供試体寸法[mm]	50×h90			
隙間寸法[mm]	50×h10			
試験水	人工海水（ASTM D-1141-98 基準）			
試験温度[]	室温（約20）			
試験期間[day]	約14			

- 1：有効粘土密度欄における（ ）内においては、隙間充填後の供試体有効粘土密度である
 2：供試体作製上、低含水比では作製することが困難であったため、高含水比にて作製を行った。

試験条件を表-3.1（降水系）、表-3.2（海水系）に示す。なお、隙間寸法に関しては、埋め戻し材の要求性能において記述したとおり、コンクリート製支保工の変質によって体積が30%減少すると仮定して約10mmとした。また、試験水に使用した人工海水の化学分析結果を表-3.3に示す。

表-3.3 人工海水の化学分析結果

分析項目	含有量[ppm]	分析法
Cl ⁻	19,200	JIS-K-0102 35.1
SO ₄ ²⁻	2740	JIS-K-0102 41.2
HCO ₃ ⁻	140	JIS-K-0102 25.2
F ⁻	1.2	JIS-K-0102 34.1
Br ⁻	65	JIS-K-0102 37.1
BO ₃ ³⁻	26	JIS-K-0102 47.1
Na ⁺	10,300	JIS-K-0102 48.2
K ⁺	410	JIS-K-0102 49.2
Ca ²⁺	420	JIS-K-0102 50.2
Mg ²⁺	1,310	JIS-K-0102 51.2
Sr ²⁺	61	鉱泉試験法

人工海水のイオン強度：約0.72（NaCl：約0.42）

3.2 X線 CT 撮影条件

今日、非破壊検査手法、即ち可視化手法の適用としては、地盤の内部挙動や変形場の評価、地盤材料の隙間や密度、さらには岩盤内部の亀裂評価や水の浸透現象、せん断帯の発生機構の解明などに用いる試みが行われている。(例えば、高野ほか、1976；中山ほか、1995)。

また、このような可視化技術は、地盤工学のみならず地層処分技術開発の面でも十分適用可能であると考えられている(棚井ほか、2003；Tanai and Yamamoto, 2003)。

X線 CT 撮影においては、前述したように今回得られた試験結果を踏まえ、隙間充填膨潤試験、透水試験、膨潤圧試験を同時に計測し、かつ、隙間充填過程等を経時的に追従するため、X線 CT 装置を用いて試験セル内の骨材混合体密度分布測定を実施し、上記試験を非破壊にて測定可能かの有無を確認した。

本 X線 CT 撮影条件を表-3.4 に示す。また、X線 CT 撮影に用いた X線 CT スキャナの概観を写真-3.1 に示す。

表-3.4 X線 CT 撮影条件

装置名	Asteion VI (東芝メディカル)	
撮影条件	スキャン方法	360°連続回転方式
	スキャン時間	1.0s
	スライス厚	5.0mm
	ガントリ傾斜角度	±0°
X線条件	管電圧	135kV
	管電流	250mA

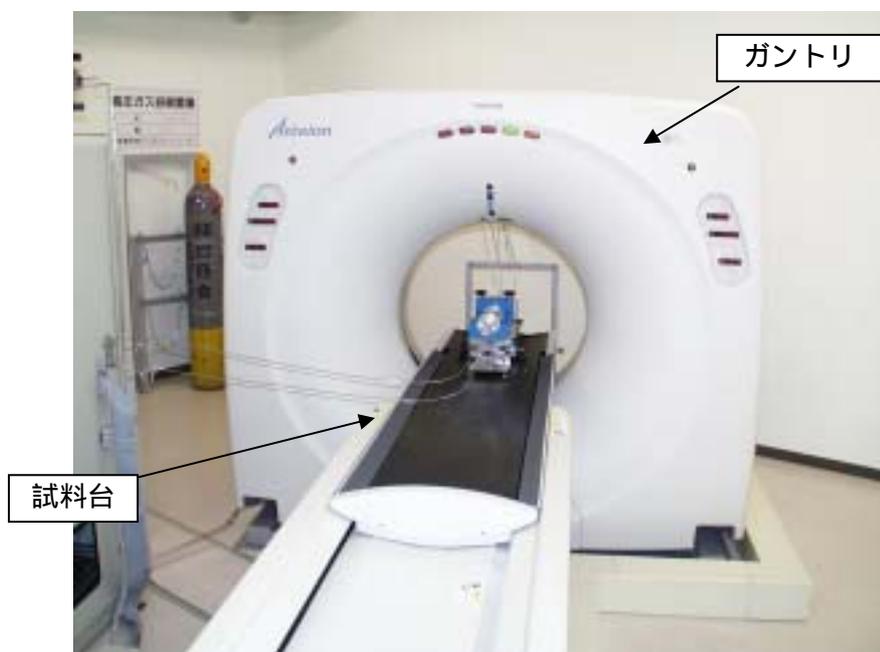


写真-3.1 X線 CT スキャナの概観

3.3 試験材料

クニゲル V1 の鉱物組成（伊藤ほか，1993）を表-3.5 に，クニゲル V1 の粒径分布を図-3.2 に示す。本測定においては，ふるい試験（日本ベントナイト工学会，1977）とピペット法（粘度ハンドブック，1987）で求めたベントナイトの粒径分布とレーザ回折式粒度分布測定装置（島津製作所 測定方式：レーザ回折/散乱法，測定範囲：0.03 ~ 700 μm）による 3 方法によってベントナイト（クニゲル V1）の粒径分布測定を行った。

表-3.5 クニゲル V1 の鉱物組成

鉱物種	定量結果[wt%]	
スメクタイト	46 ~ 49	
石英	29 ~ 38	(0.5 ~ 0.7)
玉髄		(37 ~ 38)
斜長石	2.7 ~ 5.5	
方解石	2.1 ~ 2.6	
苦灰石	2.0 ~ 2.8	
方沸石	3.0 ~ 3.5	
黄鉄鉱	0.5 ~ 0.7	

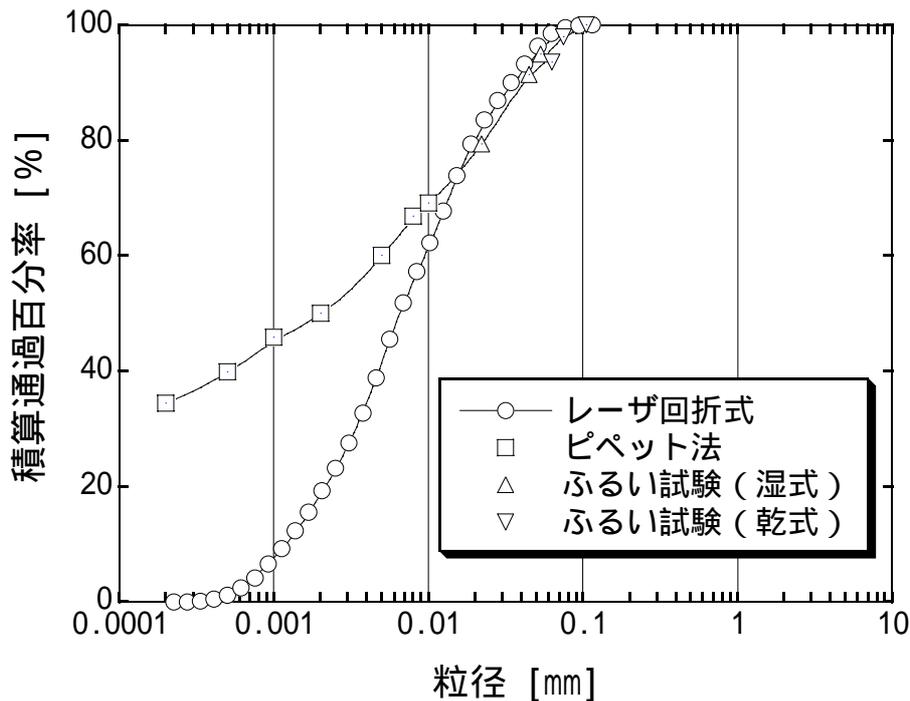


図-3.2 クニゲル V1 の粒径分布

また、試験に使用したケイ砂においては、3号ケイ砂を用いた。ケイ砂の化学組成（佐藤ほか，1990）を表-3.6 に、粒径加積曲線を図-3.3 に示す。

表-3.6 ケイ砂の化学組成

成分[wt%]	3号ケイ砂
SiO ₂	94.6
Al ₂ O ₃	3.32
Fe ₂ O ₃	0.13
TiO ₂	-
MgO	-
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
Ig.loss	-

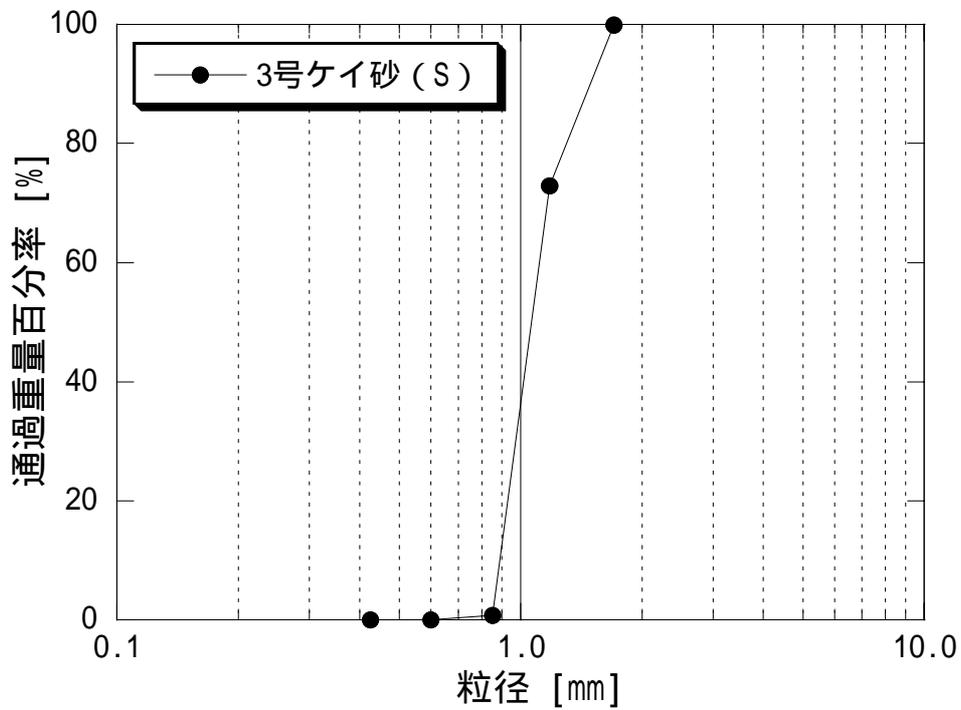


図-3.3 ケイ砂の粒径加積曲線

4 試験結果および考察

本試験に関する結果の指標について以下に記載する。

膨潤変化量

埋め戻し材の膨潤性能による隙間の閉塞（自己シール）状況を確認するため、写真撮影にて骨材混合体の隙間充填過程および膨潤量を経時的に把握する。また、海水系による骨材混合体の自立状況を確認する。

密度変化

本試験期間における各骨材混合体の密度分布ならびに飽和度の確認を行うとともに、今後の試験に向けた X 線 CT 装置を用いた非破壊測定値の妥当性を確認する。

体積膨潤量

コンクリート製支保工の変質を模擬した隙間を設定し、有効粘土密度と充填できる隙間との関係から、埋め戻し材の隙間膨潤性能に関する許容隙間曲線を取得することにより、海水系地下水条件下における第 2 次取りまとめでの埋め戻し材仕様の妥当性および隙間充填に確保可能なベントナイト配合割合の概略的把握を行う。

4.1 膨潤変化量

試験は、試験セルを試験水中に約 14 日程度沈め、骨材混合体の隙間充填過程を撮影して、写真上で隙間膨潤量を測定した。図-4.1 に降水系および海水系骨材混合体の経時時間における膨潤変化量を示す。また、降水系に関しては、写真-4.1～4.2 に DW-1 供試体の試験開始 10 分経過後および 336 時間経過後の試料の状態を、海水系に関しては、写真-4.3～4.6 に SW-1 および SW-2 供試体の試験開始 10 分経過後、20 分経過後、120 分経過後ならびに 333 時間経過後の試料の状態を、写真-4.7～4.10 に SW-3 および SW-4 供試体の試験開始 10 分経過後、20 分経過後、120 分経過後ならびに 336 時間経過後の試料の状態をそれぞれ示す。

降水系における DW-1 供試体に関しては、試験開始 10 分後（写真-4.1）に膨潤し、時間の経過とともに隙間を充填した。しかしながら、336 時間経過後（写真-4.2）では隙間を全て充填することはできておらず、写真-4.11 に示すように供試体中心部に亀裂および隙間があるような状態であった。

海水系における SW-1 供試体に関しては、試験開始 120 分後の膨潤し、かつ写真-4.5 に示すように供試体下部に亀裂が生成された。その後 24 時間後以降に約 3mm 程度膨潤し膨潤挙動は収束した。また、SW-1 供試体に関しては、供試体の自立状況を確認するため、試験終了後に試験セルを静かに横に倒した。その結果、写真-4.13 に示すように供試体は自立せず流動を起こす結果となった。

一方、SW-2 供試体に関しては、試験開始 20 分後（写真-4.4）に膨潤し、24 時間経過後には膨潤により隙間を充填し、333 時間経過後（写真-4.6）に、密度分布測定を目的に X 線 CT 撮影を行った。しかしながら、X 線 CT 撮影の結果から SW-2 供試体の隙間は充填されておらず、写真-4.12 に示すような状態となっていたことが分かった。

SW-3 および SW-4 に関しては、試験開始 10 分経過後（写真-4.8）には膨潤により両供試体ともに隙間のほぼ 5 割を充填し、96 時間経過後（写真-4.9）には隙間を充填した。その後、336 時間経過後（写真-4.10）に密度分布測定のため、X 線 CT 撮影を行った。X 線 CT 撮影の結果、SW-3 および SW-4 供試体ともに隙間を充填していることを確認した。

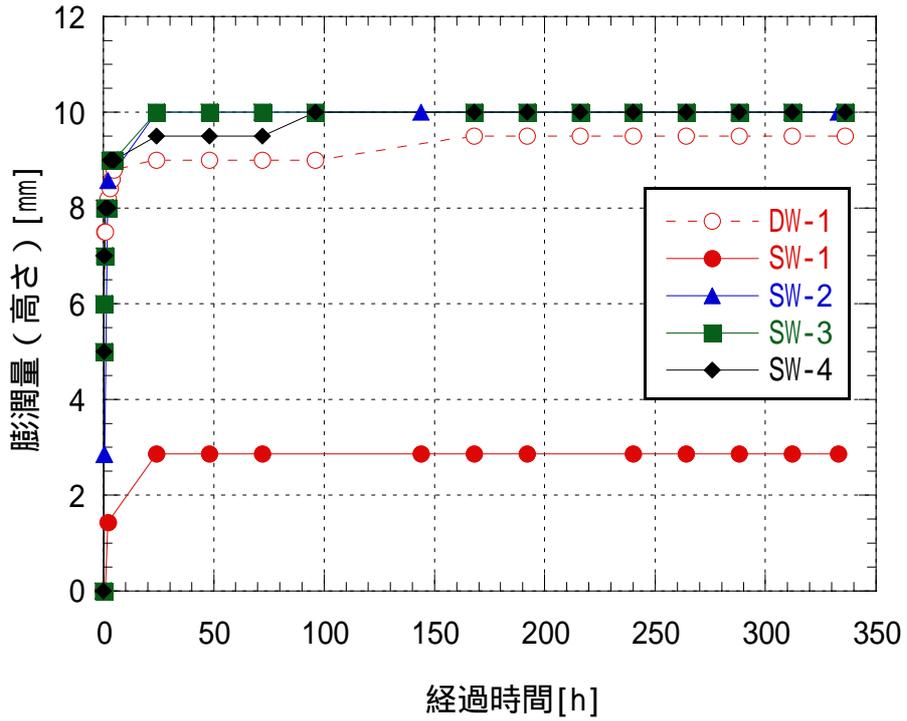
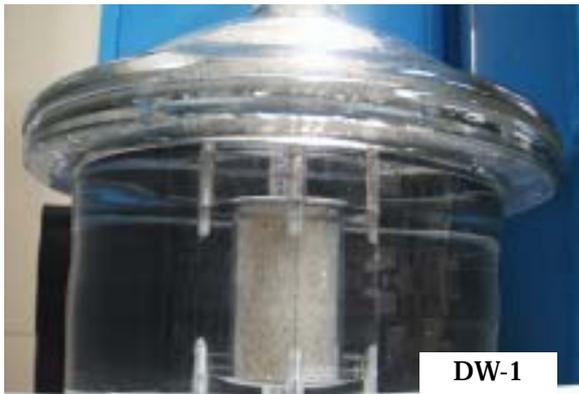


図-4.1 膨潤量の経時変化



DW-1

試験開始後

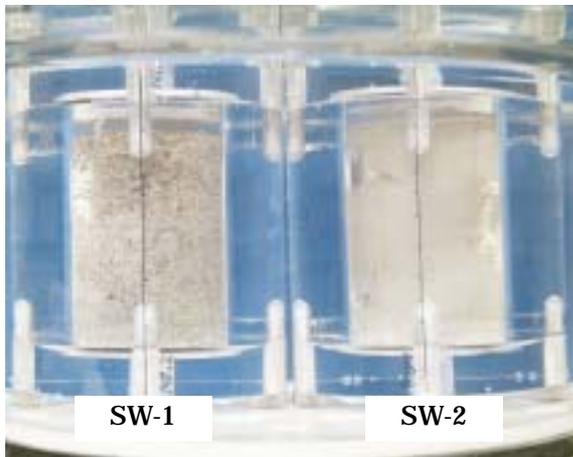
写真-4.1 試験開始 10 分後



DW-1

336 時間後

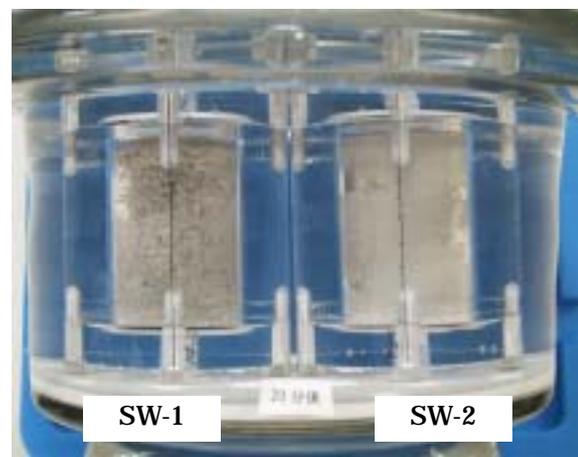
写真-4.2 試験開始 336 時間後



SW-1

SW-2

写真-4.3 試験開始 10 分後



SW-1

SW-2

写真-4.4 試験開始 20 分後

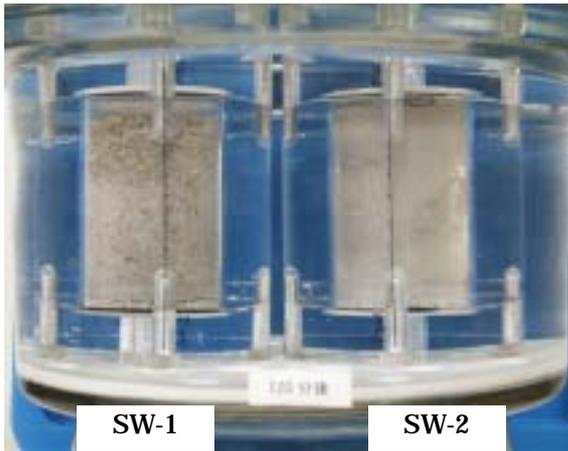


写真-4.5 試験開始 120 分後

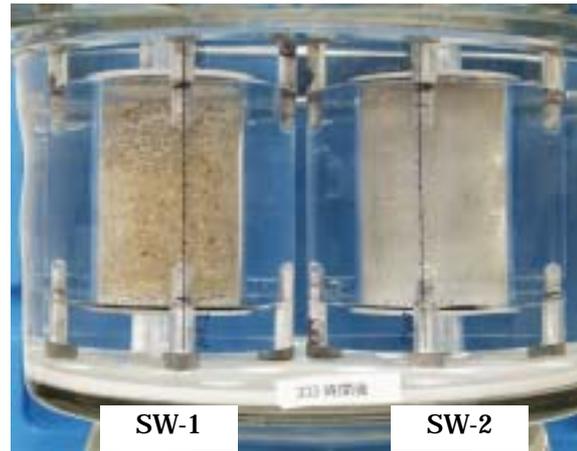
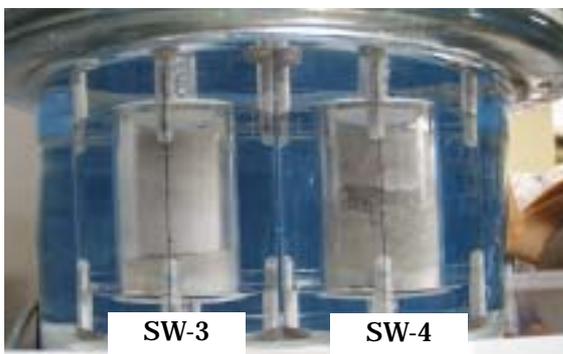
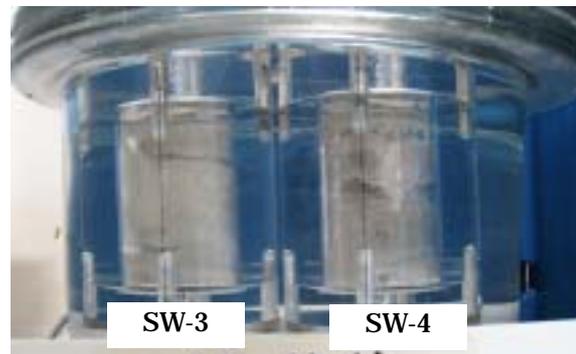


写真-4.6 試験開始 333 時間後



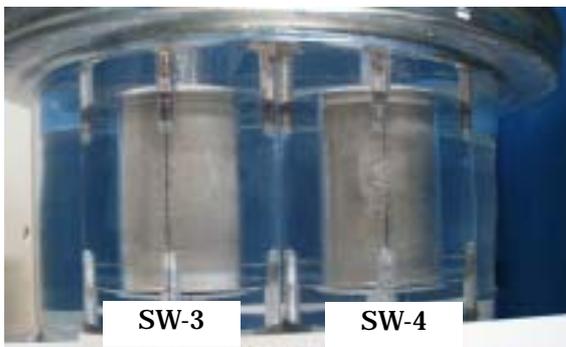
試験開始後

写真-4.7 試験開始後



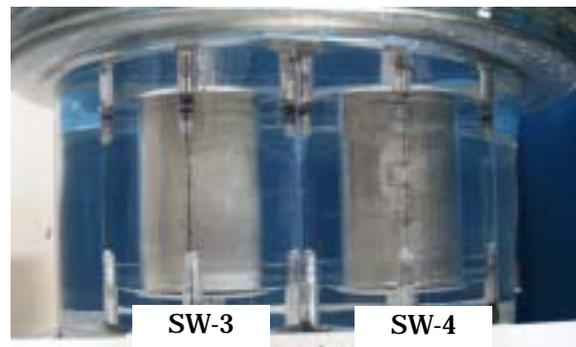
10 分後

写真-4.8 試験開始 10 分後



96 時間後

写真-4.9 試験開始 96 時間後



336 時間後

写真-4.10 試験開始 336 時間後

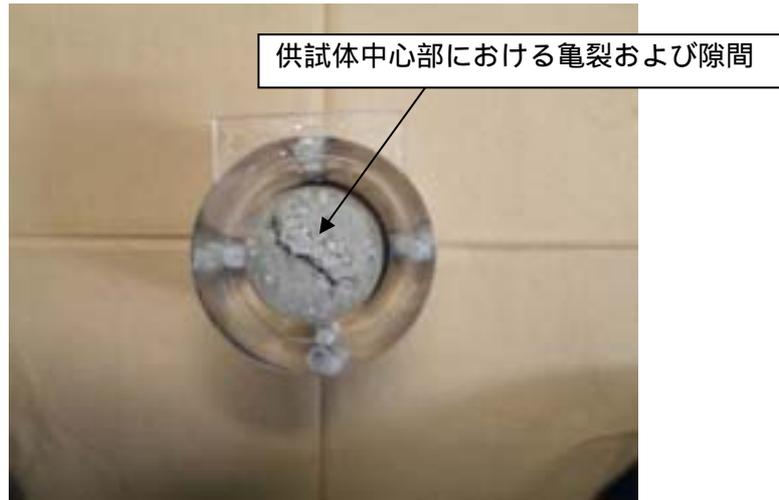
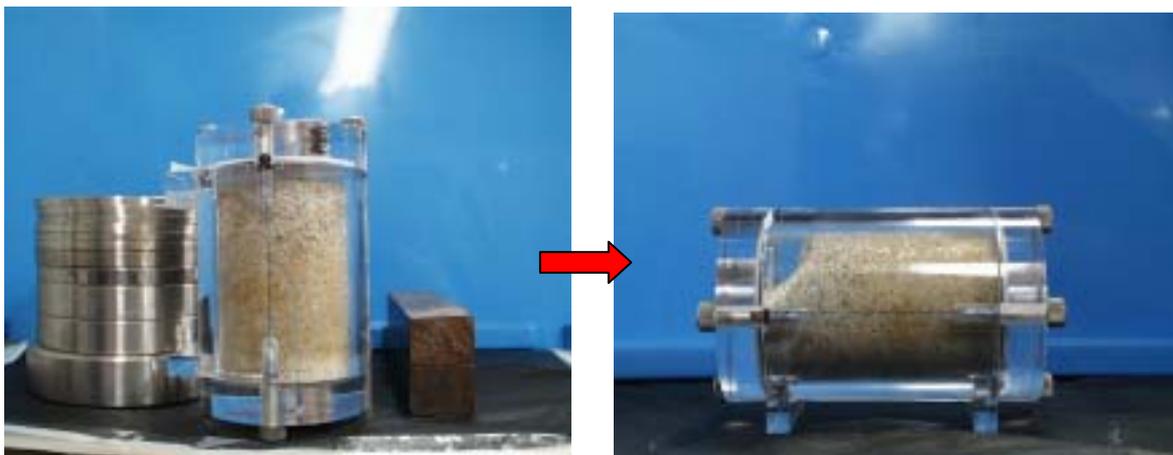


写真-4.11 解体中の DW-1 供試体



写真-4.12 解体中の SW-2 供試体



横置き前 SW-1 供試体

横置き 24 時間後の SW-1 供試体

写真-4.13 SW-1 供試体の自立確認

4.2 密度変化

4.1 の結果より，SW-1 供試体が自立しないことから，ここでは，DW-1 供試体（降水系）および SW-2，SW-3，SW-4 供試体（海水系）を対象に密度分布ならびに飽和度に関する測定を行った。

一般には，土質材料は図-4.2 示すように供試体構成要素は（中野，1991），固相・液相・気相で構成される。

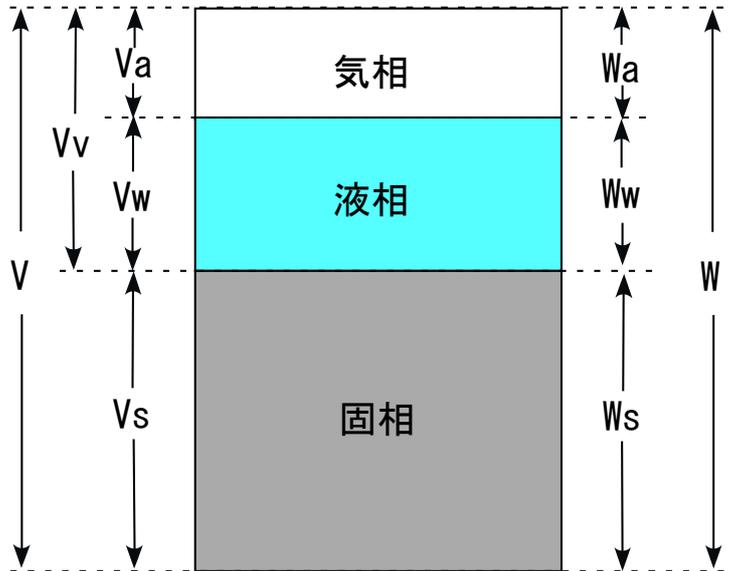


図-4.2 供試体構成要素

骨材混合体の構成要素をベントナイト粒子およびケイ砂からなる固相・液相・気相の三要素に分けて考えると，骨材混合体の含水比 w [%]，乾燥密度 ρ_d [Mg/m^3]，湿潤密度 ρ_t [Mg/m^3]，間隙率 n [-]，飽和度 S_r [%]の関係は次式（(1)～(5)）のようになる。ここで， ρ_s [Mg/m^3]はベントナイト（または，ベントナイトとケイ砂）の土粒子密度である。

$$\text{含水比} : w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{乾燥密度} : \rho_d = \frac{W_s}{V} \quad (2)$$

$$\text{湿潤密度} : \rho_t = \frac{W_s + W_w}{V} = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100} \right) \quad (3)$$

$$\text{間隙率} : w = \frac{V_v}{V} = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{飽和度} : S_r = \frac{V_w}{V_v} = \left(\frac{1}{0.01} - 1 \right) \cdot w \cdot \rho_s \quad (5)$$

図-4.3 に DW-1 供試体の切り出し範囲を，図-4.4 に SW-2 供試体の切り出し範囲を，図-4.5 に SW-3，SW-4 供試体の切り出し範囲をそれぞれ示す。また，表-4.1～4.4 に各供試体の測定結果を示す。なお，各供試体の切り出しに関しては，写真-4.14 に示すように試験セルから所定の長さには押し出したところで円盤状に切り出しを行い，炉乾燥（温度：110）後，含水比および乾燥密度等を求めた。

表-4.1～4.4 に各供試体切り出し範囲の試験結果を示す。また、同表には X 線 CT 撮影によって測定された平均 CT 値を用いて、棚井らによって取得された飽和度、乾燥密度と CT 値の関係式から湿潤密度に換算したデータを併記した（棚井ほか，2003；Tanai and Yamamoto，2003）。試験の結果，各供試体切り出し範囲において，初期乾燥密度 1.8[Mg/m³]にて試験を開始したが，膨潤による隙間充填により各切り出し範囲で乾燥密度が違ってくる。また，各切り出し範囲における飽和度の確認を行った結果，降水系（DW-1 供試体）に関しては，飽和に至っておらず，図-4.6 に示す透水係数の比較図を見ても分かるように，海水系の方が降水系に比べ，透水係数が低いことから今回の試験期間では隙間充填ならびに飽和期間が短かったと考えられる。海水系（SW-2，SW3，SW-4 供試体）に関しては，各供試体の飽和度が 100%を超えていることが分かった。

X 線 CT 撮影においては，各供試体切り出し範囲と同じ箇所を CT スキャンしており，図-4.7～4.10 に供試体切り出し部の実測値および X 線 CT 値により換算した湿潤密度比較図を示す。各図から両者の値はほぼ等しい結果が得られ，今後，埋め戻し材隙間膨潤の経時変化を追従する際，X 線 CT 撮影による非破壊測定の妥当性を確認することができた。

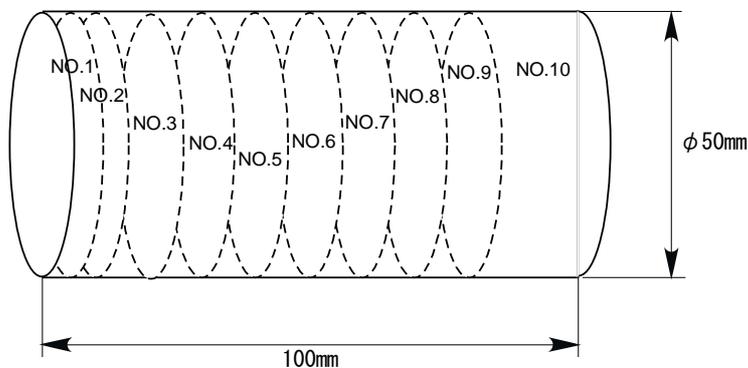


図-4.3 DW-1 供試体切り出し範囲

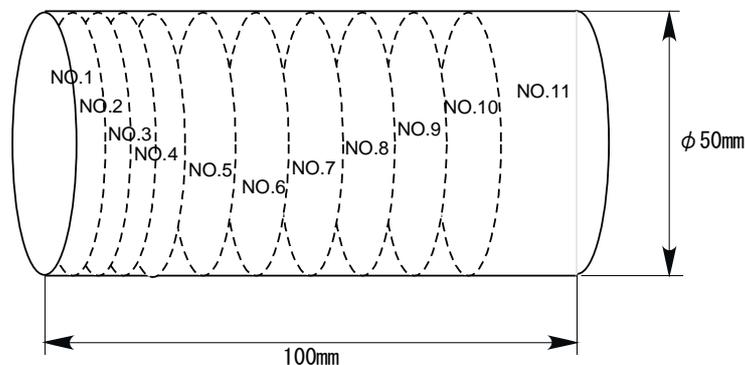


図-4.4 SW-2 供試体切り出し範囲

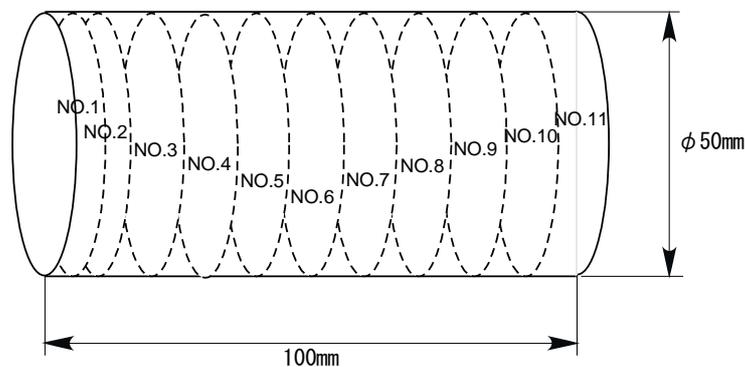


図-4.5 SW-3 および SW-4 供試体切り出し範囲



写真-4.14 供試体切り出し

表-4.1 試験結果 (DW-1 供試体)

NO.	供試体 切出範囲 [mm]	高さ [mm]	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m ³]	湿潤密度 [Mg/m ³]	CT 値 湿潤密度 [Mg/m ³]	間隙率 [-]	飽和度 [%]
NO.1	0 ~ 5	2.5	52.10	0.678	1.032	0.980	74.71	108.97
NO.2	5 ~ 10	7.5	55.58	0.968	1.506	1.462	63.92	84.14
NO.3	10 ~ 20	15	41.61	1.108	1.569	1.706	58.70	78.53
NO.4	20 ~ 30	25	18.97	1.704	2.027	1.827	36.47	88.61
NO.5	30 ~ 40	35	13.76	1.699	1.933	1.856	36.65	63.79
NO.6	40 ~ 50	45	17.14	1.748	2.047	1.849	34.84	85.96
NO.7	50 ~ 60	55	10.23	1.799	1.983	1.849	32.93	55.86
NO.8	60 ~ 70	65	11.89	1.799	2.013	1.889	32.91	65.00
NO.9	70 ~ 80	75	14.06	1.793	2.045	1.928	33.14	76.04
NO.10	80 ~ 100	90	17.99	1.802	2.126	1.928	32.81	98.79

表-4.2 試験結果 (SW-2 供試体)

NO.	供試体 切出範囲 [mm]	高さ [mm]	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m ³]	湿潤密度 [Mg/m ³]	CT 値 湿潤密度 [Mg/m ³]	間隙率 [-]	飽和度 [%]
NO.1	0 ~ 5	2.5	44.10	0.276	0.511	0.446	89.71	131.86
NO.2	5 ~ 10	7.5	49.81	1.070	1.602	1.152	60.12	222.20
NO.3	10 ~ 15	12.5	42.91	1.206	1.724	1.481	55.03	209.10
NO.4	15 ~ 20	17.5	32.05	1.379	1.821	1.771	48.58	176.98
NO.5	20 ~ 30	25	24.34	1.576	1.959	1.913	41.25	158.26
NO.6	30 ~ 40	35	19.58	1.665	1.991	1.944	37.92	138.46
NO.7	40 ~ 50	45	18.95	1.817	2.161	1.942	32.26	157.54
NO.8	50 ~ 60	55	18.96	1.765	2.100	1.928	34.18	148.74
NO.9	60 ~ 70	65	18.67	1.658	1.968	1.956	38.17	131.21
NO.10	70 ~ 80	75	18.90	1.733	2.060	1.966	35.40	143.21
NO.11	80 ~ 100	90	18.17	1.688	1.994	1.971	37.07	131.44

表-4.3 試験結果 (SW-3 供試体)

NO.	供試体 切出範囲 [mm]	高さ [mm]	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m ³]	湿潤密度 [Mg/m ³]	CT 値 湿潤密度 [Mg/m ³]	間隙率 [-]	飽和度 [%]
NO.1	0 ~ 5	2.5	21.38	1.239	1.503	1.521	53.82	106.56
NO.2	5 ~ 10	7.5	39.76	1.119	1.565	1.611	58.26	183.05
NO.3	10 ~ 20	15	31.06	1.361	1.784	1.674	49.26	169.13
NO.4	20 ~ 30	25	23.17	1.590	1.958	1.766	40.73	152.53
NO.5	30 ~ 40	35	20.75	1.610	1.945	1.917	39.95	139.27
NO.6	40 ~ 50	45	16.74	1.768	2.064	1.927	34.09	131.71
NO.7	50 ~ 60	55	19.49	1.651	1.973	1.931	38.43	136.03
NO.8	60 ~ 70	65	15.34	1.817	2.095	1.958	32.26	127.48
NO.9	70 ~ 80	75	16.74	1.728	2.017	1.976	35.57	126.23
NO.10	80 ~ 90	85	14.42	1.809	2.069	1.961	32.57	118.74
NO.11	90 ~ 100	95	13.91	1.894	2.157	1.955	29.40	126.87

表-4.4 試験結果 (SW-4 供試体)

NO.	供試体 切出範囲 [mm]	高さ [mm]	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m ³]	湿潤密度 [Mg/m ³]	CT 値 湿潤密度 [Mg/m ³]	間隙率 [-]	飽和度 [%]
NO.1	0 ~ 5	2.5	19.44	1.320	1.577	1.540	50.78	102.70
NO.2	5 ~ 10	7.5	18.94	1.345	1.599	1.630	49.87	101.86
NO.3	10 ~ 20	15	30.39	1.607	1.676	1.720	40.09	203.31
NO.4	20 ~ 30	25	16.99	1.595	1.866	1.780	40.54	112.40
NO.5	30 ~ 40	35	21.60	1.573	1.912	1.910	41.36	140.07
NO.6	40 ~ 50	45	20.21	1.716	2.063	1.910	36.02	150.50
NO.7	50 ~ 60	55	18.01	1.708	2.016	1.940	36.31	133.03
NO.8	60 ~ 70	65	18.32	1.771	2.095	1.940	33.97	144.64
NO.9	70 ~ 80	75	14.92	1.829	2.102	1.970	31.79	125.90
NO.10	80 ~ 90	85	16.92	1.841	2.152	1.970	31.36	144.59
NO.11	90 ~ 100	95	13.99	1.731	2.171	1.970	35.45	105.82

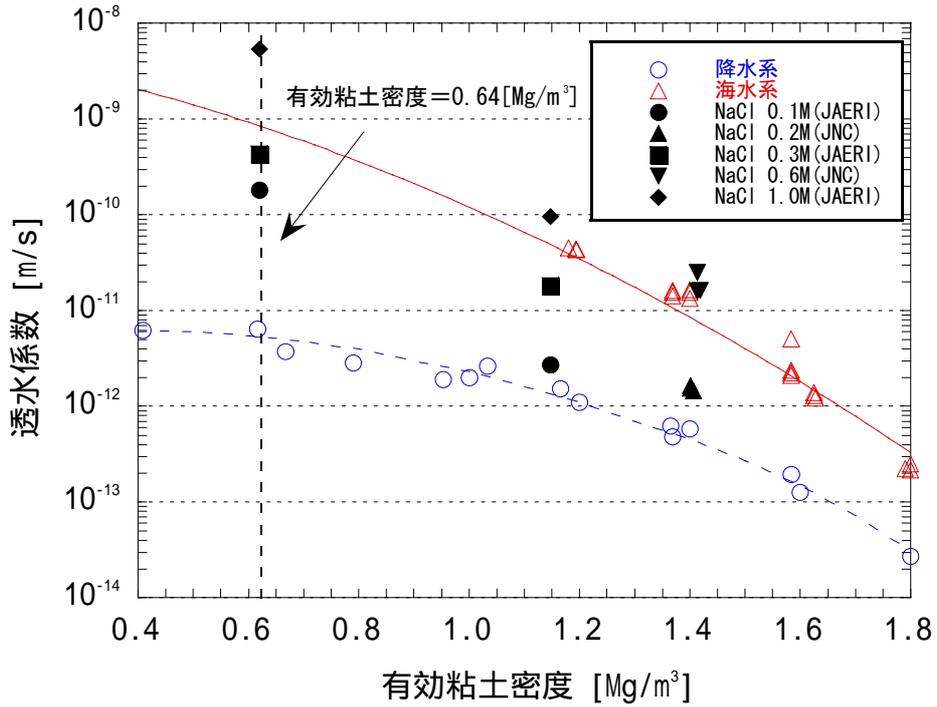


図-4.6 緩衝材・埋め戻し材仕様に関する透水係数比較図
(菊池ほか, 2003; 日本原子力研究所, 2003)

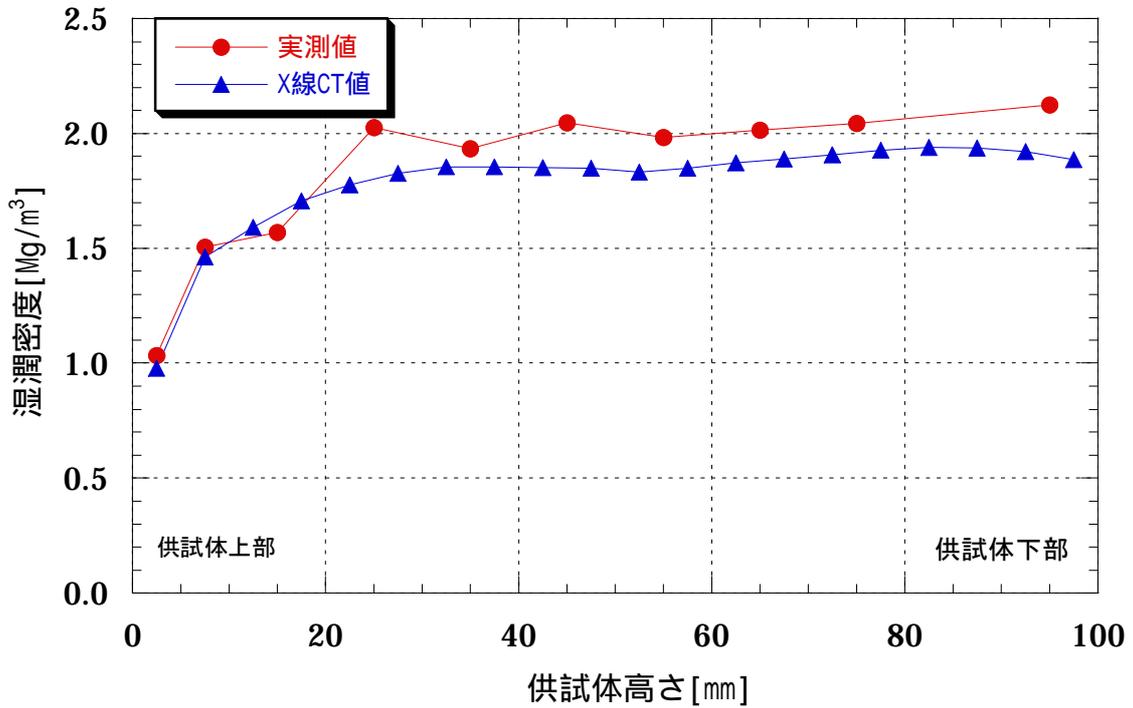


図-4.7 実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (DW-1 供試体)

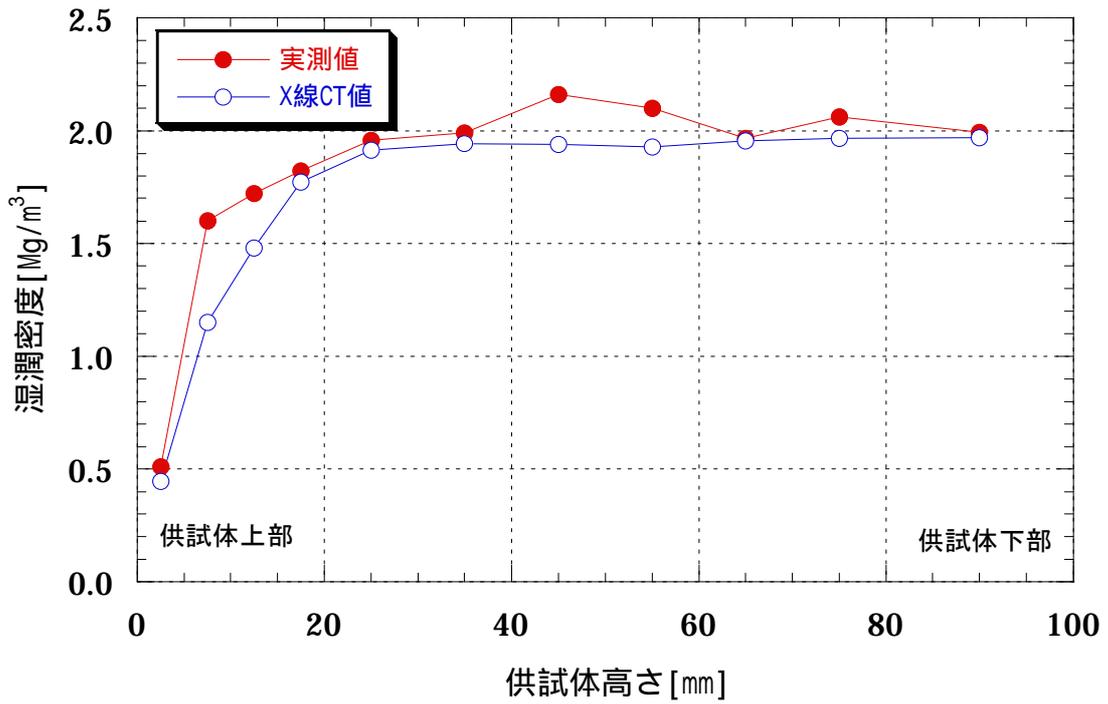


図-4.8 実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (SW-2 供試体)

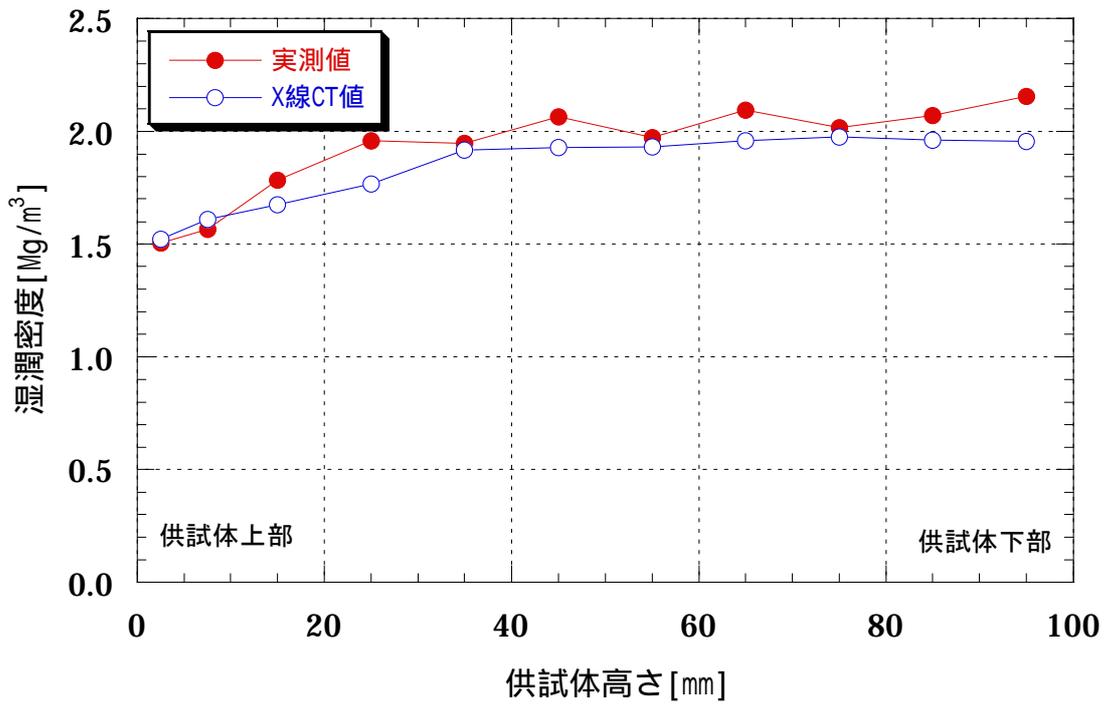


図-4.9 実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (SW-3 供試体)

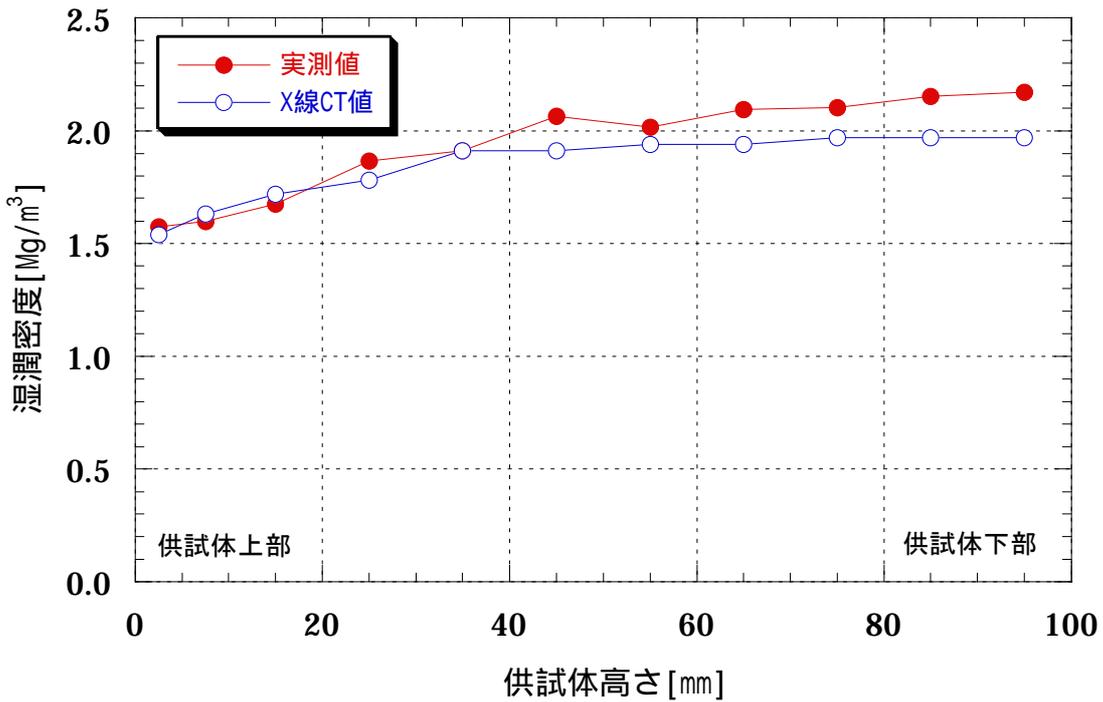


図-4.10 実測値と X 線 CT 値における湿潤密度の比較図 (SW-4 供試体)

4.3 体積膨潤量

骨材混合体作製時の有効粘土密度と体積膨潤量の関係を図-4.11 に示す。図から降水系における第 2 次取りまとめでの埋め戻し材仕様 (DW-1 供試体) においては、コンクリート製支保工の変質による隙間を設けた場合、隙間を充填することはできなかった。しかしながら、ベントナイト配合率 (有効粘土密度 0.64Mg/m^3) が低く、膨潤応力が低いことや試験結果から DW-1 供試体自体が飽和に至っていないことから、今回の試験期間では、十分に隙間充填ラインを埋めることができなかったと考えられ、緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎試験 (杉田・菊池, 2002) にあるように隙間充填期間を長期化することにより、隙間を埋められるものと予想される。

海水系においては、第 2 次取りまとめにおける埋め戻し材仕様 (SW-1 供試体) およびケイ砂混合率 60% (SW-2 供試体) とした仕様では、海水系のような高イオン強度の水溶液が浸潤した場合、膨潤量および膨潤応力が低下するとともに、凝集してコロイドの安定性も悪くなることが知られており、スメクタイト積層体が凝集して隙間を充填することができなかったものと考えられる。しかしながら、埋め戻し材仕様に関して、乾燥密度 1.8Mg/m^3 、ケイ砂混合率 50% 以下 (SW-3 および SW-4 供試体) であれば、ベントナイトが海水系の影響により多少スメクタイト積層体が凝集しても、モンモリロナイト密度が高いため、隙間を充填することが可能であることが分かった。

また、図-4.11 の縦軸を隙間許容率に置き換えることで、海水系地下水条件下における図-1.4 で示した隙間許容曲線の概要を取得することができる。今回の試験では、隙間充填のみを確認しており、今後はその条件下での止水性能を把握することが必要となる。

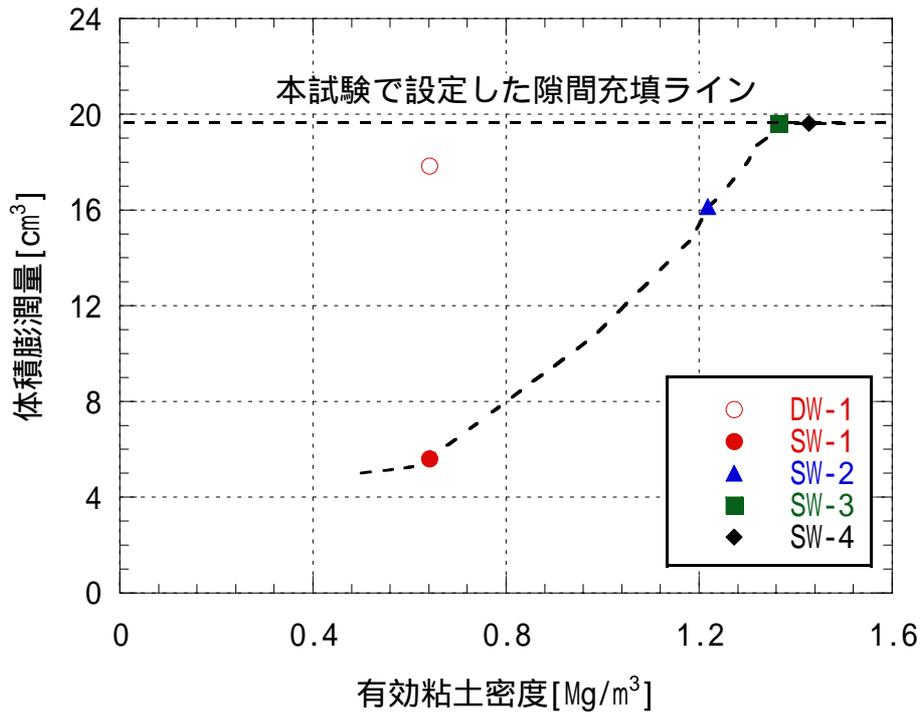


図-4.11 骨材混合体作製時の有効粘土密度と体積膨潤量の関係

5 まとめ

本研究では、実際の地質環境条件下を考慮するため、人工海水を用いた埋め戻し材仕様に関する隙間充填性能の基礎試験を実施した。設定した隙間は、第2次取りまとめ軟岩での処分坑道のコンクリート製支保工（厚さ50cm）が変質し、その体積の30%が隙間となるという条件である。

以下に得られた知見を示す。

降水系地下水条件下に関しては、

第2次取りまとめにおける埋め戻し材仕様（ベントナイト配合率15%+ケイ砂配合率85%、初期乾燥密度 18Mg/m^3 ）では、隙間を充填するために必要な膨潤量は、期待できると考えられるが、今回の試験期間では、隙間を充填できない（DW-1 供試体）。

海水系地下水条件下に関しては、

第2次取りまとめにおける埋め戻し材仕様（ベントナイト配合率15%+ケイ砂配合率85%、初期乾燥密度 18Mg/m^3 ）では、隙間を充填するために必要な膨潤量は期待できない（SW-1 供試体）。

ベントナイト配合率40%+ケイ砂配合率60%、初期乾燥密度 18Mg/m^3 の骨材混合体については、第2次取りまとめにおける埋め戻し材仕様に比して、膨潤量は有しているものの、隙間を閉塞するには不十分である（SW-2 供試体）。

ベントナイト配合率50%+ケイ砂配合率50%、初期乾燥密度 18Mg/m^3 以上の有効粘土密度を有した骨材混合体については、隙間を閉塞することが可能である（SW-3 および SW-4 供試体）。

厚さ50cmのコンクリート製支保工の変質によって、30%が隙間となるという条件では、隙間膨潤量を確保するために、降水系地下水条件下においては、ベントナイト配合率15%以上、海水系地下水条件下においては、ベントナイト配合率50%以上が必要であった。また、海水系地下水条件下の隙間許容曲線の概要をえることができた。

今後、止水性能を把握する試験セルでの試験を実施することにより、有効粘土密度をパラメータとした隙間許容曲線を取得し、埋め戻し材の設計に資する。

6 おわりに

本研究では、高レベル放射線廃棄物の地下施設埋め戻し概念に対して、核種移行経路上重要な要求性能である埋め戻し材の隙間充填性能に関して、海水系地下水条件下における第2次取りまとめでの埋め戻し材仕様の妥当性および確保可能なベントナイト配合割合の概略的把握として基礎試験を実施し、試験結果から隙間許容曲線の概略を得ることができた。

今後、海水系地下水条件下における埋め戻し材仕様にに関して、埋め戻し材に要求される性能を定量的に評価するために必要となるデータの拡充を行い、図-6.1 に示すような各特性における許容範囲曲線を明示する。また、岩盤クリープの評価、支保工変質による体積減少、ベントナイトの変質による性能劣化に関する情報が整備された段階で、これらの影響を考慮した相互評価を行い、経済性や安全評価上の観点から埋め戻し材の設計に反映する。

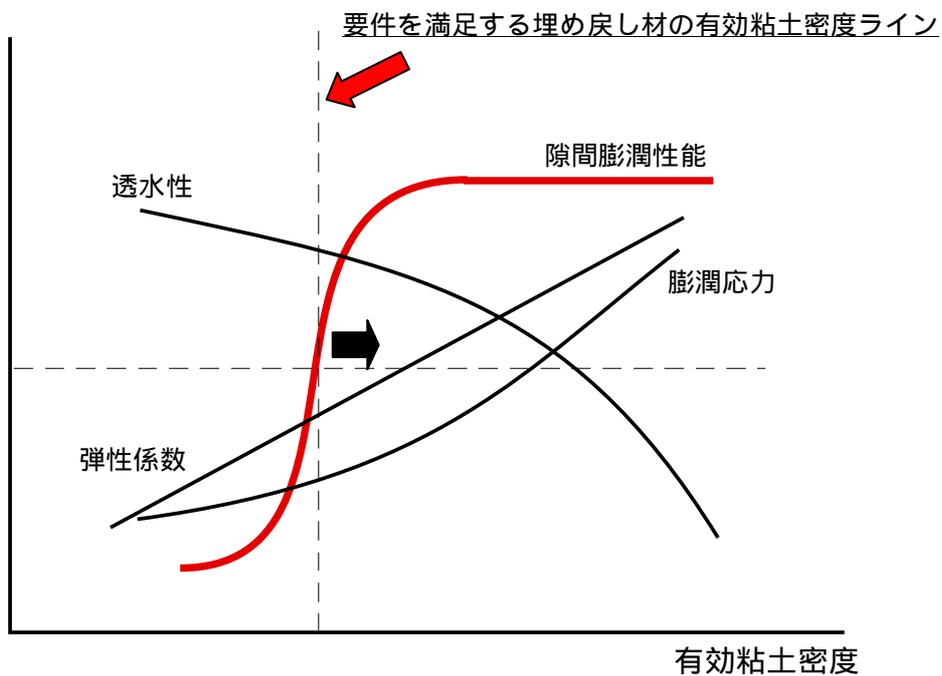


図-6.1 各特性における許容範囲曲線

7 参考文献

- 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基盤研究開発の技術報告書 -平成3年度-”，動燃技術資料，PNC TN1410 92-081（1992）
- 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”，動燃技術資料，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-”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-020～024（1999）
- 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 - 海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響 -”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-002（2003）
- 小峯秀雄，長田徹，高尾肇，中島晃，植田浩義，木元崇宏：“処分孔モデル実験による緩衝材の自己シール性能に関する評価”，土木学会第55回年次学術講演会，CS-187（2000）
- 中野政詩：土の物質移動学，東京大学出版会（1991）
- 粘土ハンドブック第二版：日本粘土学会編（1987）
- 日本ベントナイト工学会：日本ベントナイト工業標準会標準試験方法（1977）
- 日本原子力研究所：“平成14年度 放射性廃棄物処分の長期評価手法の調査報告書(1/2) [確立的アプローチによる長期的評価手法の調査]”，（2003）
- 佐藤信二，雨宮清，山形順二，広瀬郁郎，原啓二，石川博久，湯佐泰久，佐々木憲明：“緩衝材の熱-水-応力連成試験 -緩衝材大型試験設備の概要および加熱試験計画について-”，動燃技術資料，PNC TN8410 90-060（1990）
- 杉田裕，藤田朝雄，棚井憲治，長谷川宏，古市光昭，奥津一夫，三浦一彦：“地層処分場における地下施設の埋め戻し”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-039（1999）
- 杉田裕，菊池広人：“人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎試験”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2002-003（2002）
- 鈴木英明，藤田朝雄：“緩衝材の膨潤特性”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-038（1999）
- 棚井憲治，松本一浩，菊池広人：“X線CT法の適用性に関する検討”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-001（2003）
- Tanai,K. and Yamamoto,M:“Experimental and Modeling studies on Gas Migration in Kunigel V1 Bentonite”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-024（2003）