

幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の
基本特性試験
(試験報告)

2005 年 2 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

幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験
(試験報告)

菊池広人**，棚井憲治*

要 旨

「核燃料サイクル開発機構（以下，サイクル機構）では，「第2次取りまとめ」までに地層処分場における人工バリア，地下施設の設計および性能評価に資するため，圧縮ベントナイトの基本特性について降水系地下水（蒸留水で模擬）を想定したデータの拡充を行ってきた。

本報告書においては，これまでに得られた成果を踏まえ，実際の地質環境条件下における緩衝材および埋め戻し材の基本特性を把握するため，幌延深地層研究計画の一環として，幌延地下研究施設建設サイト近傍のボーリング孔 HDB-6，GL-300m 以深の地下水を用いて，緩衝材仕様および埋め戻し材仕様における膨潤特性（膨潤力測定試験・隙間体積膨潤試験・膨潤応力測定試験），透水特性（透水試験），熱特性（熱物性測定試験），力学特性（一軸圧縮試験・一次元圧密試験・三軸圧縮試験）試験を実施し，データを拡充するとともに，関係式の一般化を図ったので報告する。試験の結果を以下に示す。

1) 緩衝材仕様および埋め戻し材仕様における膨潤特性，透水特性，力学特性に関しては，海水系地下水条件下（幌延地下水，人工海水，NaCl 溶液）の場合，降水系地下水条件下に比して，求められる機能が低下することが示された。また，塩濃度をイオン強度にて整理し，比較した結果，各特性とともに，あるイオン強度以上においては，求められる機能は変わらない傾向を示した。さらに，有効粘土密度を用いて膨潤特性，透水特性，力学特性に関する関係式の一般化を図った。

・膨潤特性における関係式として，有効粘土密度と膨潤応力の関係を以下に示す。

$$\sigma = \exp(4.24\rho_b^3 - 20.04\rho_b^2 + 37.63\rho_b - 26.07)$$

ここで， σ [MPa]は膨潤応力， ρ_b [Mg/m³]は有効粘土密度である。

・透水特性における関係式として，有効粘土密度と固有透過度の関係を以下に示す。

$$\kappa = \exp(-41.466 + 4.316\rho_b - 4.069\rho_b^2)$$

ここで， κ [m²]は固有透過度， ρ_b [Mg/m³]は有効粘土密度である。

・力学特性における関係式として，有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係を以下に示す。

$$qu = 1.4 \times 10^{-4} \exp(5.637\rho_b)$$

ここで， qu [MPa]は一軸圧縮強度， ρ_b [Mg/m³]は有効粘土密度である。

2) 緩衝材仕様における熱特性に関しては，海水系地下水の場合においても降水系地下水条件下と同等の値が得られ，塩濃度の影響を考慮する必要がないことが示された。また，熱伝導率，比熱とともに，これまでに得られた含水比を用いた関係式にて評価できることが示された。

* 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 characteristic test of buffer / backfill material under Horonobe groundwater condition
(Testing Document)

Hirohito KIKUCHI^{**}, Kenji TANAI^{*}

Abstract

By the second progress report (H12) on research and development for the geological disposal of high-level radioactive waste (HLW) in Japan, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) extended the database on basic properties of compacted bentonite, which were mainly obtained by using distilled water as test fluid.

This report presents influence of Horonobe groundwater on the basic properties of buffer and backfill material.

The Horonobe groundwater is a type of saline groundwater.

The groundwater was sampled at GL-300m or deeper by using bore hole HDB-6 of the underground laboratory of Horonobe site.

In addition, basic properties are also obtained by using distilled water, synthetic seawater, and NaCl solution.

Experimental results are as follows ;

- 1) Swelling characteristics, hydraulic characteristics and mechanical characteristics of the buffer material and backfill material decrease by the influence of saline water.
 - The relationship between effective clay density and swelling stress is described by the following equation.

$$\sigma = \exp(2.5786\rho_b^3 - 12.238\rho_b^2 + 21.818\rho_b - 14.035)$$

where σ is swelling stress [MPa], ρ_b is effective clay density[Mg/m³].

- The relationship between effective clay density and intrinsic permeability is described by the following equation.

$$\kappa = \exp(-41.466 + 4.316\rho_b - 4.069\rho_b^2)$$

where κ is intrinsic permeability[m²], ρ_b is effective clay density[Mg/m³].

- The relationship between effective clay density and unconfined compressive strength is described by the following equation.

$$qu = 1.4 \times 10^{-4} \exp(5.637\rho_b)$$

where qu is unconfined compressive strength[MPa], ρ_b is effective clay density[Mg/m³].

- 2) Saline water doesn't influence the thermal characteristic of the buffer material.
 - The thermal conductivity and specific heat are derived by using the relationship that was obtained so far.

* 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	試験材料	2
2.1	ベントナイト	2
2.2	幌延地下水	5
3	幌延地下水環境下における緩衝材の基本特性試験	7
3.1	圧縮ベントナイトの状態量	7
3.2	膨潤力測定(容積法)	8
3.2.2	試験方法	8
3.2.3	試験条件および試験結果	8
3.3	隙間体積膨潤試験	10
3.3.1	試験方法	10
3.3.2	試験条件	10
3.3.3	試験結果	11
3.4	膨潤応力測定	12
3.4.1	膨潤応力試験装置概要および測定方法	12
3.4.2	試験条件	14
3.4.3	試験結果	16
	(a) 緩衝材仕様	16
	(b) 埋め戻し材仕様	16
	(c) 膨潤応力に関する関係式	17
3.5	透水試験	24
3.5.1	透水試験装置概要	24
3.5.2	試験条件	24
3.5.3	試験方法	25
3.5.4	試験結果	26
3.6	熱特性	32
3.6.1	測定原理	32
3.6.2	試験条件	33
3.6.3	測定結果	33
	(a) 熱伝導率測定結果	33
	(b) 熱拡散率測定結果	35
	(c) 比熱	38
3.7	一軸圧縮試験	41
3.7.1	試験条件	41
3.7.3	試験結果	42
3.8	一次元圧密試験	49
3.8.1	一次元圧密試験装置概要	49
3.8.2	試験条件	49

3.8.3	試験結果	50
(a)	膨潤過程	50
(b)	載荷過程	51
(c)	除荷過程	55
(d)	再載荷過程	57
3.8.4	圧密理論解と試験結果の比較	60
3.8.5	e-logP 関係 (間隙比-圧密応力の関係)	68
3.8.6	透水係数の算出	70
3.9	三軸圧縮試験	73
3.9.1	三軸圧縮試験装置概要	73
3.9.2	試験条件	74
3.9.3	試験手順	75
3.9.4	試験結果	75
(a)	圧縮成型および飽和	75
(b)	圧密過程	75
(c)	B 値の測定	77
(d)	せん断試験	78
1)	軸差応力と軸ひずみの関係	78
2)	過剰間隙水と軸ひずみの関係	79
3)	有効応力経路	79
4)	供試体の破壊	81
4	まとめ	82
5	おわりに	84
6	参考文献	85

表 目 次

表 2.1-1	ベントナイトの物理特性	2
表 2.1-2	ベントナイトの化学組成	3
表 2.1-3	ケイ砂の化学組成	4
表 2.2-1	分析方法一覧	5
表 2.2-2	幌延地下水組成分析結果	6
表 3.2-1	試験条件および試験結果	8
表 3.2-2	試験条件および試験結果	8
表 3.3-1	隙間体積膨潤試験条件	10
表 3.4-1	測定条件 (緩衝材仕様)	15
表 3.4-2	測定条件 (埋め戻し材仕様)	15
表 3.4-3	膨潤応力測定結果 (緩衝材)	18
表 3.4-4	膨潤応力測定結果 (埋め戻し材仕様)	18
表 3.5-1	試験条件 (緩衝材仕様)	25

表 3.5-2	測定条件（埋め戻し材仕様）	25
表 3.5-3	幌延地下水の密度および粘性	26
表 3.5-4	透水試験結果（緩衝材仕様）	28
表 3.5-5	透水試験結果（埋め戻し材仕様）	29
表 3.6-1	熱物性試験条件	33
表 3.6-2	熱物性値測定結果	40
表 3.7-1	試験条件(緩衝材仕様)	41
表 3.7-2	供試体状態量の測定結果	44
表 3.7-3	一軸圧縮試験結果	44
表 3.8-1	試験条件	49
表 3.8-2	各ステップの載荷条件	50
表 3.8-3	各供試体の最大成型圧と初期間隙比	50
表 3.8-4	各載荷ステップの載荷応力と載荷時間（載荷過程）	52
表 3.8-5	各載荷ステップの沈下量と累積沈下量（載荷過程）	55
表 3.8-6	各載荷ステップの載荷応力と載荷時間（除荷過程）	55
表 3.8-7	各載荷ステップの沈下量と累積沈下量（除荷過程）	57
表 3.8-8	各載荷ステップの載荷応力と載荷時間（再載荷過程）	58
表 3.8-9	各載荷ステップの沈下量と累積沈下量（再載荷過程）	59
表 3.8-10	$d=0$ 軸との交点	61
表 3.8-11	圧密理論解計算に用いた値	61
表 3.8-12	圧密試験結果から得られた透水係数	72
表 3.9-1	試験条件（三軸圧縮試験）	74
表 3.9-2	三軸圧縮試験装置仕様	75
表 3.9-3	供試体状態量の測定結果	76
表 3.9-4	せん断時（圧密後）の供試体状態量の測定結果	77
表 3.9-5	各供試体の B 値	78

図 目 次

図 2.1-1	ベントナイトの粒径加積曲線	2
図 2.1-2	ケイ砂の粒径加積曲線	4
図 3.1-1	供試体構成要素	7
図 3.2-1	試験概略図	9
図 3.2-2	イオン強度と膨潤力の関係	9
図 3.2-3	有効粘土密度と体積膨潤比の関係	9
図 3.3-1	試験装置図	10
図 3.3-2	有効粘土密度と体積膨潤比の関係 （海水系地下水条件；幌延地下水，人工海水）	11
図 3.3-3	イオン強度と体積膨潤比の関係（埋め戻し材仕様）	12
図 3.4-1	緩衝材仕様における膨潤応力測定装置概略図	13

図 3.4-2	埋め戻し材仕様における膨潤応力測定装置概略図	13
図 3.4-3	埋め戻し材仕様における試験カラム拡大図	14
図 3.4-4	埋め戻し材仕様における試験フロー	14
図 3.4-5	膨潤応力と経時変化（緩衝材仕様）	
(a)	有効粘土密度 1.165[Mg/m ³]	19
(b)	有効粘土密度 1.369[Mg/m ³]	19
(c)	有効粘土密度 1.584[Mg/m ³]	19
図 3.4-6	イオン強度と平衡膨潤応力の関係（緩衝材仕様）	
(a)	有効粘土密度 1.165[Mg/m ³]における比較	20
(b)	有効粘土密度 1.369[Mg/m ³]における比較	20
(c)	有効粘土密度 1.584[Mg/m ³]における比較	20
図 3.4-7	膨潤応力と経時変化（埋め戻し材仕様）	
(a)	有効粘土密度 0.540 ~ 0.642[Mg/m ³]; 蒸留水	21
(b)	有効粘土密度 0.642[Mg/m ³]; 幌延地下水	21
(c)	有効粘土密度 0.642[Mg/m ³]; 人工海水	21
図 3.4-8	X線 CT 装置を用いた密度分布測定	22
図 3.4-9	有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係	23
図 3.5-1	透水試験装置概略図	24
図 3.5-2	有効粘土密度と固有透過度の関係（緩衝材仕様）	29
図 3.5-3	イオン強度と固有透過度の関係 （有効粘土密度 1.40[Mg/m ³]における結果）	30
図 3.5-4	有効粘土密度と固有透過度の関係（埋め戻し材仕様）	30
図 3.5-5	イオン強度と固有透過度の関係 （有効粘土密度 0.64[Mg/m ³]における結果）	31
図 3.6-1	ホットディスク法熱物性測定装置のセットアップ	32
図 3.6-2	熱伝導率の測定結果（ベントナイト単体）	34
図 3.6-3	熱伝導率の測定結果（ケイ砂混合体）	34
図 3.6-4	イオン強度と熱伝導率の関係（ベントナイト単体）	35
図 3.6-5	イオン強度と熱伝導率の関係（ケイ砂混合体）	35
図 3.6-6	熱拡散率の測定結果（ベントナイト単体）	36
図 3.6-7	熱拡散率の測定結果（ケイ砂混合体）	36
図 3.6-8	イオン強度と熱拡散率の関係（ベントナイト単体）	37
図 3.6-9	イオン強度と熱拡散率の関係（ケイ砂混合体）	37
図 3.6-10	含水比と比熱の関係（ベントナイト単体）	39
図 3.6-11	含水比と比熱の関係（ケイ砂混合体）	39
図 3.7-1	応力 - ひずみ関係（蒸留水）	45
図 3.7-2	応力 - ひずみ関係（幌延地下水）	45
図 3.7-3	有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係（蒸留水, 幌延地下水）	46
図 3.7-4	有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係の近似式（蒸留水, 幌延地下水）	46
図 3.7-5	有効粘土密度と弾性係数の関係（蒸留水, 幌延地下水）	46
図 3.7-6	応力 - ひずみ関係（有効粘土密度 1.40[Mg/m ³]	47
図 3.7-7	イオン強度と一軸圧縮強度の関係（有効粘土密度 1.40[Mg/m ³]	47
図 3.7-8	イオン強度と弾性係数の関係（有効粘土密度 1.40[Mg/m ³]	47
図 3.8-1	試験装置概略図	49
図 3.8-2	膨潤応力の経時変化	51

図 3.8-3	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step1 : 膨潤応力 0.59MPa) -----	52
図 3.8-4	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step2 : 0.59 0.98MPa) -----	52
図 3.8-5	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step3 : 0.98 1.61MPa) -----	53
図 3.8-6	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step4 : 1.61 2.66MPa : 幌延地下水 1.61 4.38MPa) -----	53
図 3.8-7	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step5 : 2.66 4.38MPa) -----	53
図 3.8-8	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step6 : 4.38 7.22MPa : 幌延地下水 5.38 7.22MPa) -----	54
図 3.8-9	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step7 : 7.22 11.89MPa) -----	54
図 3.8-10	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (載荷 step8 : 11.89 19.6MPa) -----	54
図 3.8-11	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (除荷 step u1 : 19.6 7.22MPa) -----	56
図 3.8-12	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (除荷 step u2 : 7.22 2.66MPa) -----	56
図 3.8-13	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (除荷 step u2 : 2.66 0.98MPa) -----	56
図 3.8-14	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (除荷 step u2 : 0.98 0.36MPa) -----	57
図 3.8-15	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (再載荷 step r1 : 0.36 0.98MPa) -----	58
図 3.8-16	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (再載荷 step r2 : 0.98 2.66MPa) -----	58
図 3.8-17	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (再載荷 step r3 : 2.66 7.22MPa) -----	59
図 3.8-18	圧密沈下量と時間 ($\log t$) の関係 (再載荷 step r4 : 7.22 19.6MPa) -----	59
図 3.8-19	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (幌延地下水供試体 : step 3) -----	62
図 3.8-20	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (幌延地下水供試体 : step u3) -----	62
図 3.8-21	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (幌延地下水供試体 : step r3) -----	63
図 3.8-22	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step 3) -----	63
図 3.8-23	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step u3) -----	63
図 3.8-24	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step r3) -----	64
図 3.8-25	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step 3) -----	64
図 3.8-26	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step u3) -----	64
図 3.8-27	圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step r3) -----	65
図 3.8-28	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (幌延地下水供試体 : step 3) -----	65
図 3.8-29	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (幌延地下水供試体 : step u3) -----	65
図 3.8-30	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (幌延地下水供試体 : step r3) -----	66
図 3.8-31	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step 3) -----	66
図 3.8-32	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step u3) -----	66
図 3.8-33	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step r3) -----	67
図 3.8-34	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step 3) -----	67
図 3.8-35	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step u3) -----	67
図 3.8-36	試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step r3) -----	68
図 3.8-37	e-logP 関係 (補正前) -----	69
図 3.8-38	e-logP 関係 (補正後) -----	69
図 3.8-39	圧密試験結果より求めた有効粘土密度と透水係数の関係 -----	71
図 3.9-1	軸対称三軸圧縮試験概念図 -----	73
図 3.9-2	三軸試験装置概略図 -----	74
図 3.9-3	圧密曲線 -----	77
図 3.9-4	軸差応力と軸ひずみの関係 -----	78
図 3.9-5	過剰間隙水圧と軸ひずみの関係 -----	79
図 3.9-6	有効応力経路 -----	80
図 3.9-7	有効応力経路 (拡大) -----	80

写 真 目 次

写真 3.4-1	試験後供試体写真（幌延地下水）	22
写真 3.4-2	試験後供試体写真（人工海水）	22
写真 3.6-1	ホットディスク法熱物性測定装置およびセンサー部	32
写真 3.7-1	一軸圧縮試験用供試体（圧縮成型後）	42
写真 3.7-2	供試体への給水状況	42
写真 3.7-4	破壊後状況（幌延地下水供試体，有効粘土密度 1.20[Mg/m ³]	48
写真 3.7-5	破壊後状況（幌延地下水供試体，有効粘土密度 1.40[Mg/m ³]	48
写真 3.7-6	破壊後状況（幌延地下水供試体，有効粘土密度 1.60[Mg/m ³]	48
写真 3.9-1	試験終了後の供試体状況	81

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材には、止水性、自己シール性、応力緩衝性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性などが長期にわたり維持されることが期待されている。これらの要求性能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたベントナイト（以下、圧縮ベントナイト）は、非常に低い透水性による水の動きの抑制機能、水の浸潤に伴い膨潤し、圧縮ベントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目を充填する機能、陽イオン核種を吸着する陽イオン交換能などを有しており、緩衝材として最も有力な材料であると考えられている。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、「第2次取りまとめ」（サイクル機構、1999）までに地層処分場における人工バリア、地下施設の設計および性能評価に資するため、圧縮ベントナイトの基本特性について降水系（蒸留水）を中心としたデータの拡充を行った。

本報告書においては、これまでに得られた成果を踏まえ（サイクル機構 2002;2003;2004a）、実際の地質環境条件下における緩衝材および埋め戻し材の基本特性を把握するため、幌延深地層研究計画の一環（サイクル機構、2004b；栗原ほか、2004）として、幌延地下研究施設建設サイト近傍のボーリング孔 HDB-6、GL-300m 以深の地下水を用いて、緩衝材仕様（有効粘土密度 1.0 Mg/m^3 以上の比較的ベントナイト混合率の高い材料を対象）および埋め戻し材仕様（「第2次取りまとめ」（サイクル機構、1999）にて例示された乾燥密度 1.8 Mg/m^3 、ベントナイト混合率 15wt%、骨材混合率 85wt% のベントナイト混合率の低い材料を対象）における膨潤特性（膨潤力測定試験・隙間体積膨潤試験・膨潤応力測定試験）、透水特性（透水試験）、熱特性（熱物性測定試験）、力学特性（一軸圧縮試験・一次元圧密試験・三軸圧縮試験）試験を実施し、データを拡充するとともに、関係式の一般化を図ったので報告する。

なお、本報告において対象とした幌延地下水との比較溶液として蒸留水、人工海水および NaCl 濃度をパラメータとした試験も新たに実施した。

2 試験材料

2.1 ベントナイト

試験に供したベントナイトには、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。本報告に用いたクニゲル V1 の物理特性を表 2.1-1 に、粒径加積曲線を図 2.1-1 に示す。また、酢酸アンモニウム法による浸出陽イオン、イオン交換容量測定結果、メチレンブルー吸着量測定結果およびモンモリロナイト含有率計算結果を化学特性と合わせて表 2.1-2 に示す。

表 2.1-1 ベントナイトの物理特性

試料名	クニゲル V1
自然含水比 W_n [%]	6.30
土粒子密度 G_b [Mg/m ³]	2.79
液性限界 W_L [%]	517
塑性限界 W_p [%]	27.4
塑性指数 I_p [%]	489.6

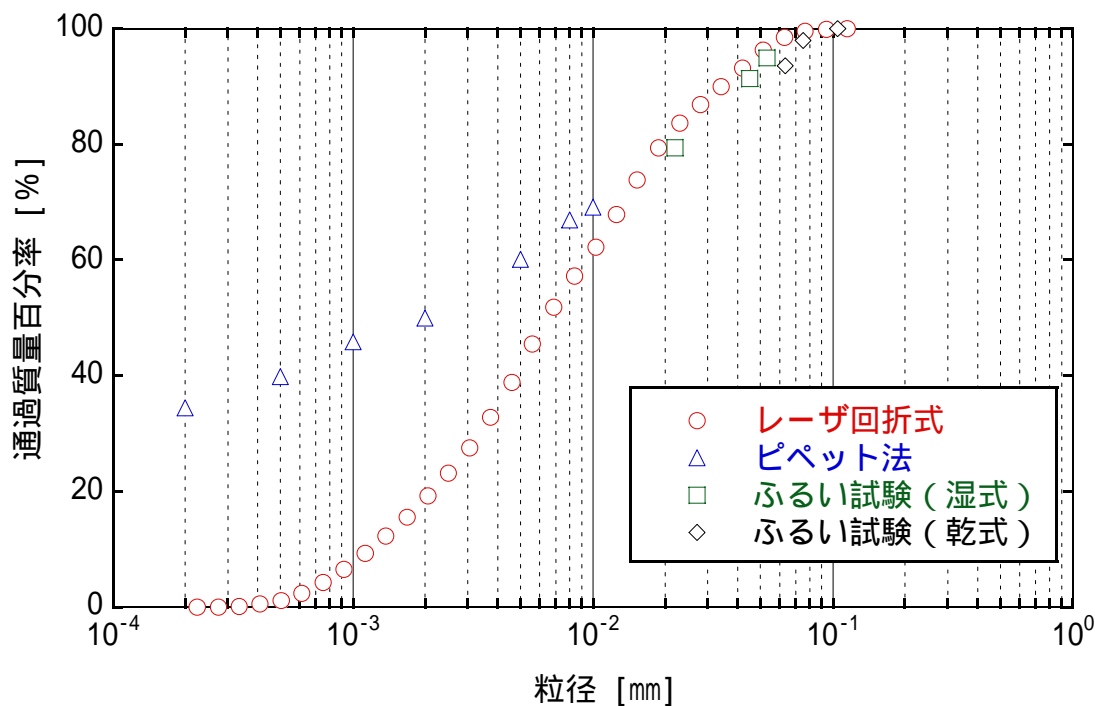


図 2.1-1 ベントナイトの粒径加積曲線

表 2.1-2 ベントナイトの化学特性

試料名	クニゲル V1	
pH	10.1	
メチレンブルー吸着量[mmol/100g]	83.0	
陽イオン交換容量[meq/100g]	75.0	
浸出陽イオン量[meq/100g]	Na ⁺	63.8
	K ⁺	3.0
	Ca ²⁺	48.0
	Mg ²⁺	5.0
	Total	119.7
化学特性[%]	SiO ₂	70.0
	TiO ₂	0.19
	Al ₂ O ₂	15.3
	Fe ₂ O ₂	1.93
	MgO	2.07
	CaO	2.19
	Na ₂ O	2.02
	K ₂ O	0.26
	MnO	0.05
	P ₂ O ₃	0.03
	Ig.loss	5.34
	Total	100.0
	Cl ⁻	< 0.01
SO ₃ ²⁻	0.64	
鉱物組成[%]	モンモリロナイト	59.3
	石英	30.0
	クリストバライト	1
	長石	6.0
	黄鉄鉱	1.0
	方解石	4.0
	その他	ドロマイト

1: 検出されず

試験には、ベントナイト（クニゲル V1）とケイ砂を混合した試料（以下、ケイ砂混合体という）を用いた。使用したケイ砂においては、3号ケイ砂と5号ケイ砂を質量比 1：1 で混合したものをを用いた。なお、埋め戻し材仕様におけるケイ砂の混合は骨材を模擬するため、やや大きめである 3号ケイ砂のみを使用した。ケイ砂の化学組成を表 2.1-3 に、粒径加積曲線を図 2.1-2 に示す。

表 2.1-3 ケイ砂の化学組成

成分 [wt%]	3号ケイ砂	5号ケイ砂
SiO ₂	94.6	99.78
Al ₂ O ₃	2.10	0.05
Fe ₂ O ₃	0.10	0.01
TiO ₂	-	0.03
MgO	-	<0.01
Na ₂ O	0.09	0.01
K ₂ O	1.16	0.01
Ig.loss	-	0.12

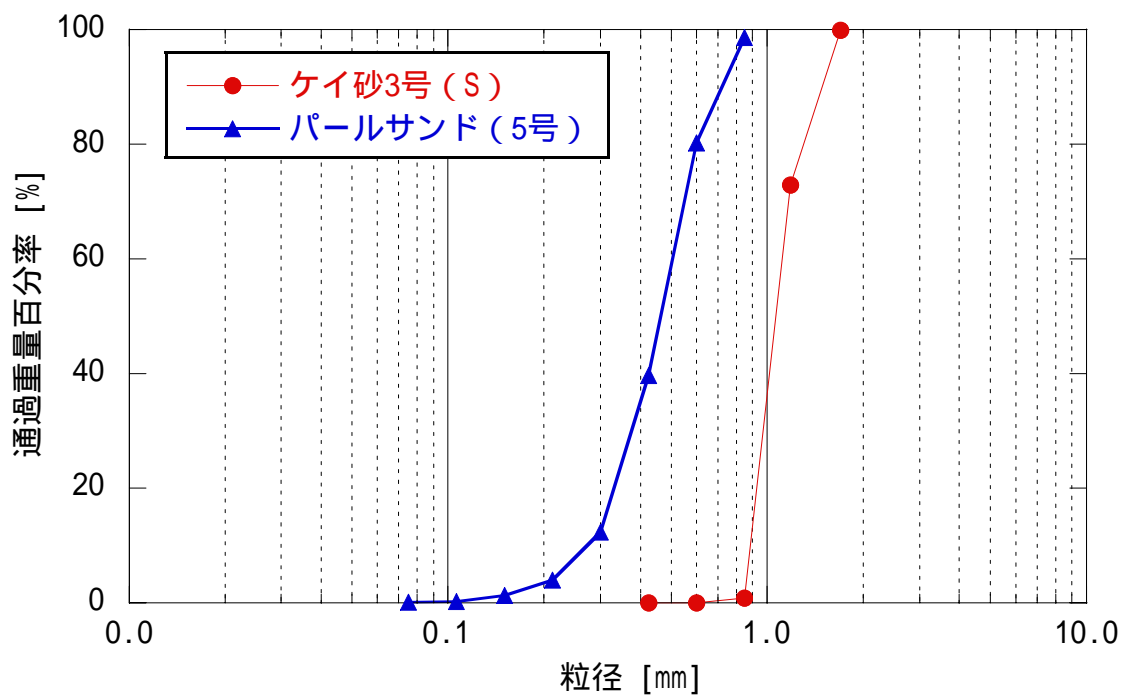


図 2.1-2 ケイ砂の粒径加積曲線

2.2 幌延地下水

幌延地下研究施設建設サイト近傍のボーリング孔 HDB-6, GL-300m 以深の地下水における水質分析を実施した。分析方法一覧および分析結果をを表 2.2-1, 表 2.2-2 に示す。なお, 本報告においては, 幌延地下水との比較試験水として溶液中のイオンの荷数が異なる人工海水 (ASTM D-1141-98 基準, イオン強度 0.64mol/l), 塩濃度をパラメータとした NaCl 水溶液を用いるため, イオン濃度の関数であるイオン強度を用いて比較を行った (WALTER J. MOORE, 1986)。

表 2.2-1 分析方法一覧

試験項目	規格番号	分析方法
pH	JIS K 0102 12	ガラス電極法
EC	JIS K 0102 13	電気伝導度計
Na ⁺	河川水質試験方法 (案) 39.3.2	ICP 発光分光法
K ⁺	JIS K 0102 49.2	フレイム原子吸光法
NH ₄ ⁺	JIS K 0102 42.1, 42.2	インドフェノール青吸光光度法
Ca ²⁺	JIS K 0102 50.3	ICP 発光分光法
Mg ²⁺	JIS K 0102 51.3	ICP 発光分光法
Total P	JIS K 0102 46.3	ペルオキシ二硫酸カリウム分解吸光光度法
I ⁻	JIS K 0102 36.1	抽出・吸光光度法
Fe ²⁺	河川水質試験方法 (案) 31.4.3	フェナントロリン吸光光度法
Fe ³⁺	-	Total Fe- Fe ²⁺
Total Fe	JIS K 0102 57.4	ICP 発光分光法
Si	-	ICP 発光分光法
Al	JIS K 0102 58.4	ICP 発光分光法
Cl ⁻	JIS K 0102 35.3	イオンクロマトグラフ法
NO ₃ ⁻	JIS K 0102 43.2.5	イオンクロマトグラフ法
SO ₄ ²⁻	JIS K 0102 41.3	イオンクロマトグラフ法
S ²⁻	JIS K 0102 39.1	メチレンブルー吸光光度法
P アルカ度	JIS K 0102 15.2	滴定法
M アルカ度	JIS K 0102 15.1	滴定法
HCO ₃ ⁻	-	イオンクロマトグラフ法
CO ₃ ²⁻	河川水質試験方法 (案) 57.3.3	滴定法
TOC	JIS K 0102 22	燃焼酸化赤外線式 TOC 分析法

表 2.2-2 幌延地下水組成分析結果

試験項目	単 位	幌延地下水 (HDB-6)
pH	-	7.70 (22.7)
EC	mS/m	2010
Na ⁺	mg/	4300
K ⁺	mg/	92
NH ₄ ⁺	mg/	124
Ca ²⁺	mg/	136
Mg ²⁺	mg/	89
Total P	mg/	0.45
I ⁻	mg/	19
Fe ²⁺	mg/	< 0.2
Fe ³⁺	mg/	0.6
Total Fe	mg/	0.6
Si	mg/	24
Al	mg/	< 1
Cl ⁻	mg/	6400
NO ₃ ⁻	mg/	< 0.1
SO ₄ ²⁻	mg/	< 0.2
H ₂ S	mg/	-
S ²⁻	mg/	< 0.5
P アルカ度	mmol/	< 0.5
M アルカ度	mmol/	22.8
HCO ₃ ⁻	mg/	1600
CO ₃ ²⁻	mg/	< 0.5
TOC	mg/	23
イオン強度	mol/	0.2075

イオン強度においては，PHREEQC を用いて求めた。

3 幌延地下水環境下における緩衝材の基本特性試験

3.1 圧縮ベントナイトの状態量

一般には、土質材料は図 3.1-1 に示すように供試体構成要素は、固相・液相・気相で構成される（中野政詩，1991）。

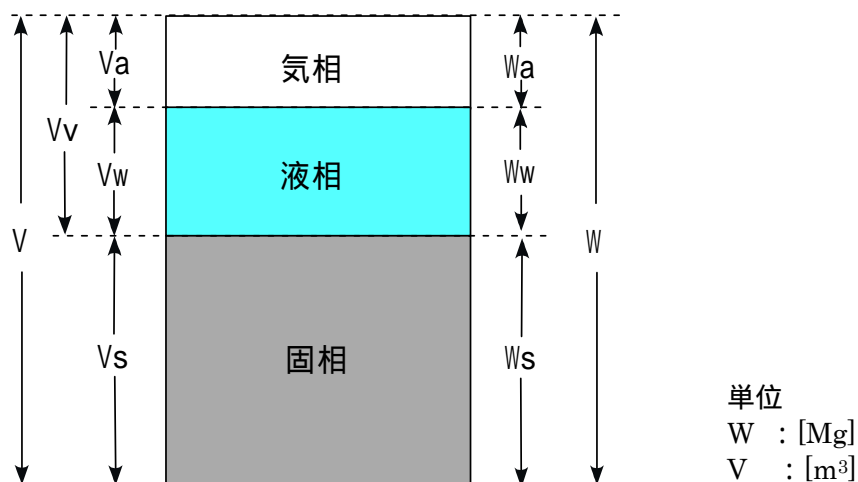


図 3.1-1 供試体構成要素

圧縮ベントナイト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・および気相の三要素に分けて考えると、供試体の含水比 w [%]、乾燥密度 ρ_d [Mg/m^3]、 n 間隙率[-]、飽和度 S_r [%] の関係は (1) 式～(4) 式のようになる。

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。

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

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

$$\text{間隙率} : n = \frac{V_v}{V} = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{飽和度} : S_r = \frac{V_w}{V_v} = \left(\frac{1}{0.01} - 1\right) \cdot w \cdot \rho_s \quad (4)$$

試験後の試料については、上記に示す式より、試験後の実乾燥密度および飽和度を求めた。飽和度を求める過程で、ベントナイトの土粒子密度 $2.70 \text{ Mg}/\text{m}^3$ を採用するが（鈴木ほか，1992）、天然の粘土質岩を精製した組成のバラツキから必ずしも土粒子密度は一定の値を示すものではないため、飽和度は必ずしも 100% になる訳ではなく、その前後に分布する。ケイ砂の土粒子密度は、3号・5号ケイ砂（重量比 1:1）で $2.64 \text{ Mg}/\text{m}^3$ （佐藤ほか，1990）を用いたが、ケイ砂もベントナイトと同様に土粒子密度のバラツキを考慮しておく必要がある。

また、本報告における有効粘土密度 ρ_b [Mg/m^3] は、ケイ砂の体積を除いたベントナイト（クニゲル V1）の乾燥密度を表す指標であり、(5) 式のように定義される。

ここで、 ρ_s [Mg/m^3] はケイ砂の土粒子密度を表す。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\rho_s}} \quad (5)$$

3.2 膨潤力測定（容積法）

3.2.2 試験方法

試料（ベントナイト）2.0g を 100ml の試験溶液を入れた共栓付メスシリンダー（100ml 用）に約 10 回に分けて入れる。ただし、先に加えた試料が内壁に付着せず、スムーズにメスシリンダー底に沈着するように 1 回に加える量を加減する。先に加えた試料がほとんど沈着した後、次の試料を加える。加え終わってから 24 時間放置し、容器内に堆積した試料の見掛け容積を測定した。なお、膨潤力の単位は[ml/2g]である（日本ベントナイト工業会，1977）（JBAS-104-77 準拠）。

次に、所定の乾燥密度に圧縮成型した供試体の膨潤力を測るため、簡易的ではあるが、図 3.2-1 に示すような膨潤力測定法（以下、「簡易型膨潤力測定」という）を用いて、各乾燥密度ごとの体積膨潤比を測定した。試験においては、所定の密度になるようにベントナイト粉末材料をプレス機により一次的に圧縮成型する方法にて供試体を作製し、試験溶液として、蒸留水、人工海水、幌延地下水および NaCl 濃度をパラメータとした溶液を 100ml 入れた共栓付メスシリンダーに設置後、測定を開始した。なお、簡易膨潤力測定にて求められた体積膨潤比は、供試体の最大膨潤体積を初期体積で割ったものとする。

3.2.3 試験条件および試験結果

JBAS-104-77 準拠した膨潤力測定条件および試験開始 24 時間後の試験結果を表 3.2-1、図 3.2-2 に示す。試験の結果から蒸留水に比して、幌延地下水の膨潤力は、約 4 割程度低下する。また、イオン強度が高くなるに伴い、膨潤力は徐々に低下し、イオン強度が 1.0mol/l 以上で、膨潤力は一定の値を示すことがわかった。

簡易型膨潤力測定条件および試験開始約一年後の試験結果を表 3.2-2 および図 3.2-3 に示す。試験の結果、本測定乾燥密度範囲において、供試体の体積膨潤比は、約 5.89～7.48 となり、体積膨潤が収束した時点の乾燥密度は約 0.204～0.241Mg/m³の範囲である。なお、本測定結果と合わせて菊池ら（菊池ほか，2003a）によって得られた埋め戻し材仕様における体積膨潤比を示す。

表 3.2-1 試験条件および試験結果

試料	ベントナイト（クニゲル V1）							
	蒸留水	人工海水	幌延地下水	NaCl 水溶液				
イオン強度 [mol/l]	0.0	0.64	0.21	0.20	0.50	1.0	2.0	3.0
膨潤力 [ml/2g]	19.0	5.3	11.0	12.0	6.0	4.7	4.6	4.6

表 3.2-2 試験条件および試験結果

試料	ベントナイト（クニゲル V1）			
乾燥密度[Mg/m ³]	1.20	1.40	1.60	1.80
ケイ砂混合率[wt%]	0			
供試体寸法[mm]	20 × h20			
試験水	蒸留水			
試験期間[年]	約 1 年			
試験後の乾燥密度[Mg/m ³]	0.204	0.220	0.240	0.241
体積膨潤比[-]	5.89	6.37	6.68	7.48

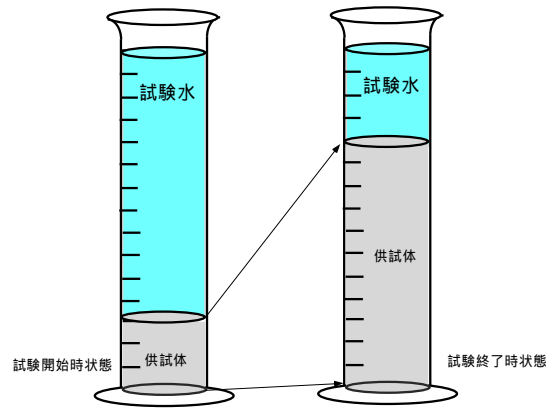


図 3.2-1 試験概略図

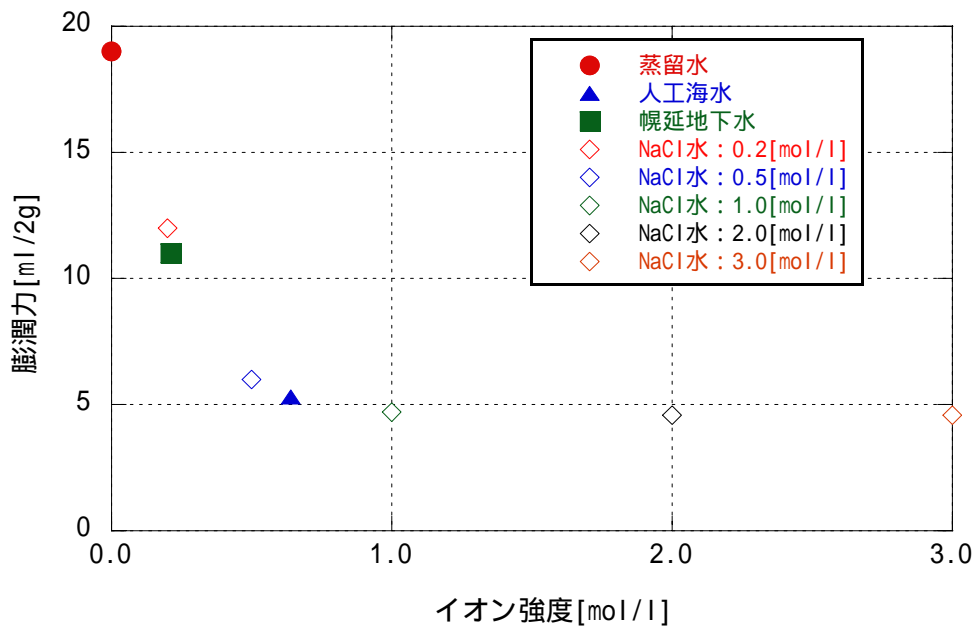


図 3.2-2 イオン強度と膨潤力の関係

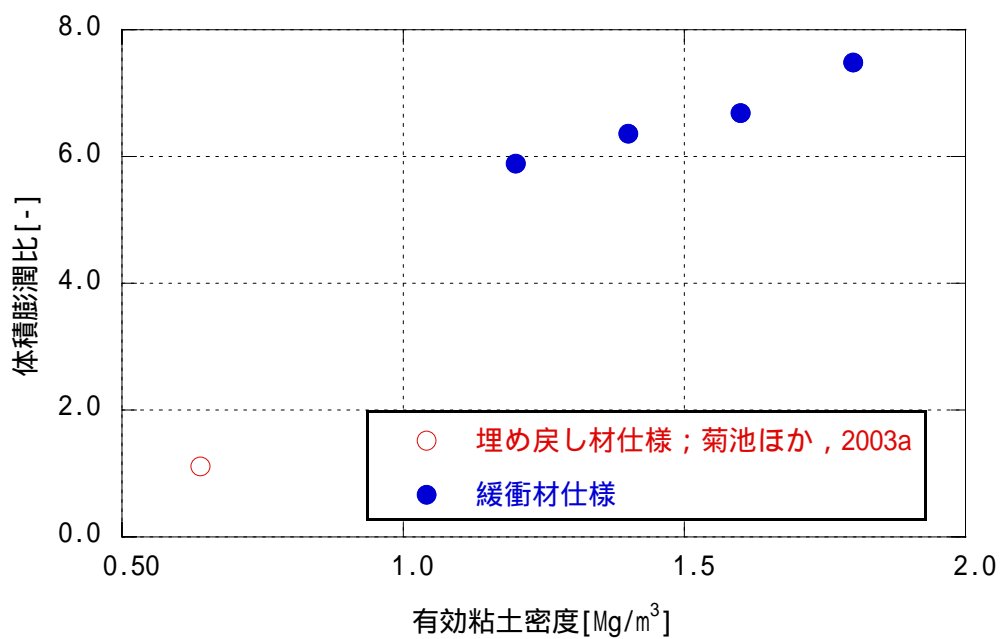


図 3.2-3 有効粘土密度と体積膨潤比の関係

3.3 隙間体積膨潤試験

3.3.1 試験方法

隙間体積膨潤試験においては、緩衝材仕様および埋め戻し材仕様に関して試験を実施した。所定の密度になるようにベントナイト粉末材料をプレス機により上下二方向から圧縮成型する方法にて供試体を作製した。作製した供試体を図 3.3-1 に示す試験コラムに設置した後、幌延地下水および人工海水を充填したデシケータ内に沈めた。試験コラムは、試験終了後 X 線 CT 装置を用いて計測するため、内径 50mm、高さ 100mm のアクリル製コラムを用いた。

試験コラムを試験水の中に沈めた後、試験コラムと供試体との間に設けた隙間をベントナイトの膨潤力によって充填する過程を測定するとともに、簡易型膨潤力測定同様、供試体の最大膨潤体積を初期体積で割った体積膨潤比を各パラメータごとに算出した。なお、試験終了後、X 線 CT 装置を用いて試験コラム内の供試体密度分布を測定した（棚井ほか，2003）。

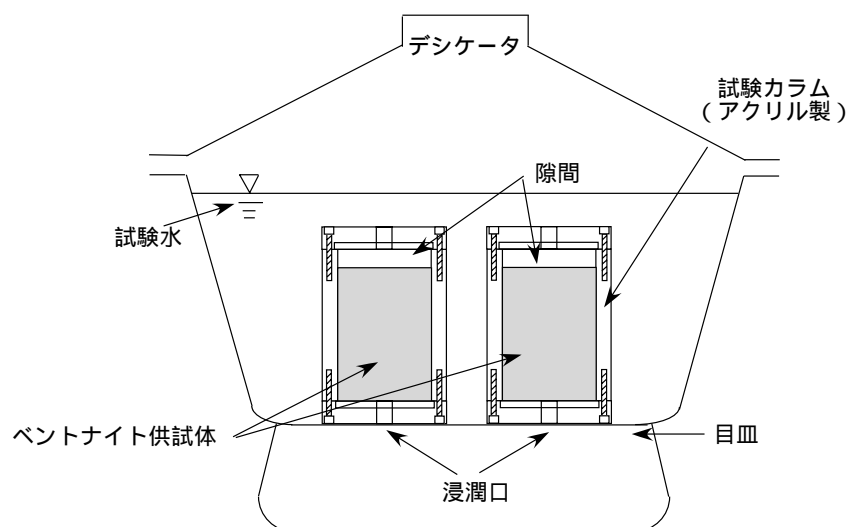


図 3.3-1 試験装置図

3.3.2 試験条件

隙間体積膨潤試験条件を表 3.3-1 に示す。緩衝材仕様に関しては、試験水として人工海水を用い、約 6 ヶ月間試験を実施した。また、埋め戻し材仕様に関しては、試験水として幌延地下水を用い、約 1 ヶ月間試験を実施した。隙間寸法に関しては、約 30mm とした。

表 3.3-1 隙間体積膨潤試験条件

	緩衝材仕様		埋め戻し材仕様
乾燥密度[Mg/m ³]	1.80		1.80
ケイ砂混合率[wt%] (3号ケイ砂使用)	45	50	85
有効粘土密度 [Mg/m ³]	1.43	1.37	0.64
初期含水比[%]	12.0		
供試体寸法[mm]	50×h70		50×h70
隙間寸法[mm]	50×h30		50×h30
試験水	人工海水 (ASTM D-1141-98 基準)		幌延地下水 (HDB-6)
試験温度[]	室温(約 20)		
試験期間[months]	約 6 ヶ月		約 1 ヶ月

3.3.3 試験結果

図 3.3-2 に緩衝材仕様および埋め戻し材仕様を対象とした幌延地下水，人工海水条件下における有効粘土密度と体積膨潤比の関係を示す。なお，図中にはこれまでに菊池らおよび田中らによって得られた成果を併せて示す（菊池ほか,2003a；田中ほか，2002）。

図 3.3-2 から幌延地下水の場合，有効粘土密度 0.64 Mg/m^3 （埋め戻し材仕様）において，体積膨潤比は約 1.14 となる。また，人工海水の場合，有効粘土密度 1.37 Mg/m^3 において，体積膨潤比は約 1.29 となり，さらに，有効粘土密度 1.43 Mg/m^3 において，体積膨潤比は約 1.33 となる。また，参考値ではあるが，緩衝材仕様において，田中らによって得られた体積膨潤比の結果と本試験結果を比較した結果，両者の体積膨潤比は，ほぼ同等の値が得られている。

次に，埋め戻し材仕様のみではあるが，図 3.3-3 に蒸留水，幌延地下水および人工海水を対象としたイオン強度と体積膨潤比の関係を示す。

図から蒸留水に比して，幌延地下水の場合，体積膨潤比は約 3 割程度上昇し，人工海水の場合，体積膨潤比は 3 割程度減少することがわかった。また，3.2 項に示した膨潤力測定同様に，イオン強度が高くなるに従い，体積膨潤比は低下する傾向があると思われるものの，菊池らの成果は，2 週間程度の試験によって得られたものであり，本試験期間に比べ，短期間の試験であるため，両者のペントナイト体積膨潤比は異なる可能性がある。よって今後統一的な試験期間を設け，データを拡充していくことが必要である。

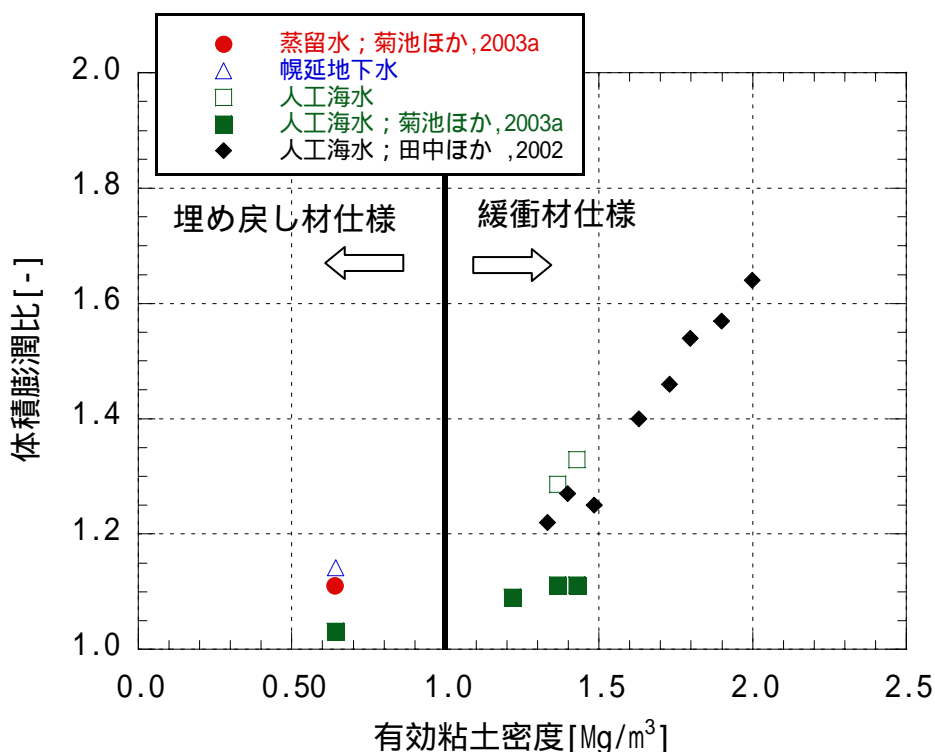


図 3.3-2 有効粘土密度と体積膨潤比の関係（海水系地下水条件；幌延地下水，人工海水）

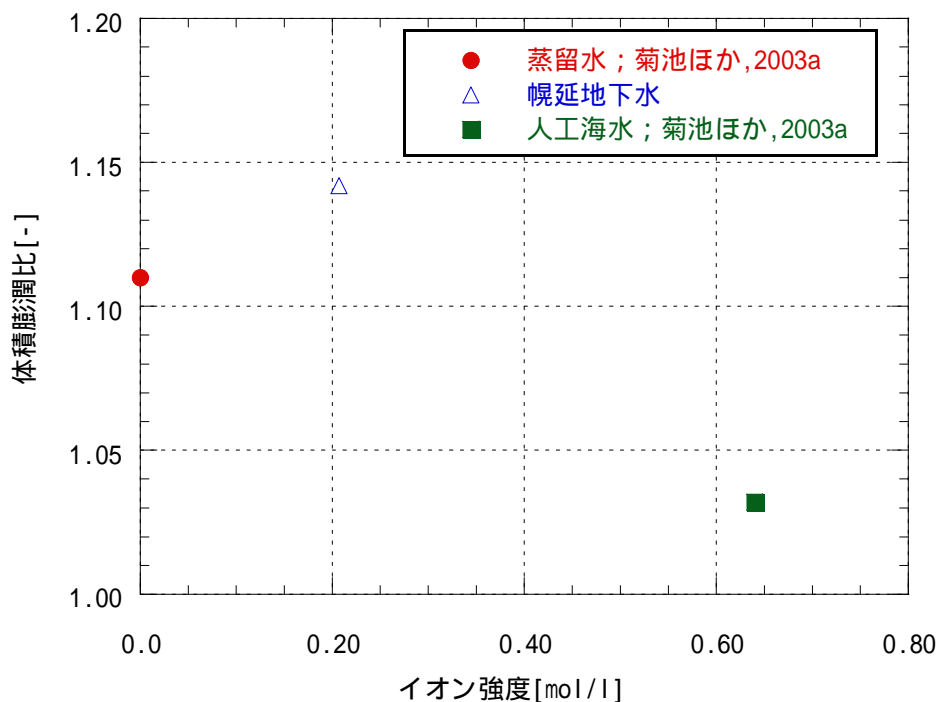


図 3.3-3 イオン強度と体積膨潤比の関係 (埋め戻し材仕様)

3.4 膨潤応力測定

3.4.1 膨潤応力試験装置概要および測定方法

膨潤性粘土の膨潤応力の測定方法に関しては、地盤工学会等で基準化されていないが、一般には土の圧密試験装置に類似した装置が用いられている（地盤工学会，2000）。

圧密試験装置は、土を一次元的に段階載荷したときの供試体鉛直方向の圧縮性を測定するために、供試体上面には、供試体が収められた圧密リング内に滑らかに動く加圧板を有し、加圧版に載荷できる構造となっている。

圧縮ベントナイトの膨潤応力に関しては、水の浸潤に伴って拘束境界面に作用する応力を測定するために、緩衝材仕様における膨潤応力測定装置として図 3.4-1 に示すように、供試体が収められた試験カラム内を滑らかに動くピストンと応力を測定するためのロードセルを反力枠で固定した構造の装置を用いた。試験装置としては、容器の材質としてステンレス鋼材（材料：SUS316L）を、また、供試体に水を吸水させるための多孔板には孔径 $5\mu\text{m}$ のフィルター（材質：ポーラスストーン）を用いた。供試体の形状は円柱状とし、試験カラム内で所定の乾燥密度になるようにベントナイト粉末材料をプレス機により一次元的に圧縮成型する方法で作製した。その際、供試体寸法および乾燥密度に合わせて、ベントナイト粉末材料の含水比を考慮し、試験カラム内に投入する材料の質量を調整した。また、試験水を加圧吸水により供給し、試験水供給後、膨潤応力を測定する。

埋め戻し材仕様に関しては、図 3.4-2 に示す膨潤応力測定装置を用いて試験を実施した。試験は、緩衝材仕様と同様に、試験カラム内で所定の乾燥密度になるようにベントナイト粉末材料をプレス機により一次元的に圧縮成型する方法で作製した。試験カラム（図 3.4-3）内に充填した後、試験水を加圧吸水により供給し、試験水供給後、膨潤応力を測定する。また、埋め戻し材仕様に関しては、膨潤応力測定後、排水バルブを開き、透水試験を実施するとともに、X 線 CT 装置を用いて密度分布を測定する（棚井ほか，2003）。埋め戻し材仕様に関する透水試験結果については、3.5 項の透水試験にて後述する。

供試体の初期寸法は、内径 50mm、高さ 50mm であり、上述した一連の測定を実施し、データを整理した後、隙間を設けてこれらの試験を繰り返し実施する。図 3.4-4 に埋め戻し材仕様における一連の試験フローを示す。

なお、試験セルは、試験終了後 X 線 CT 装置を用いて計測するため、材質をアルミ製とした。

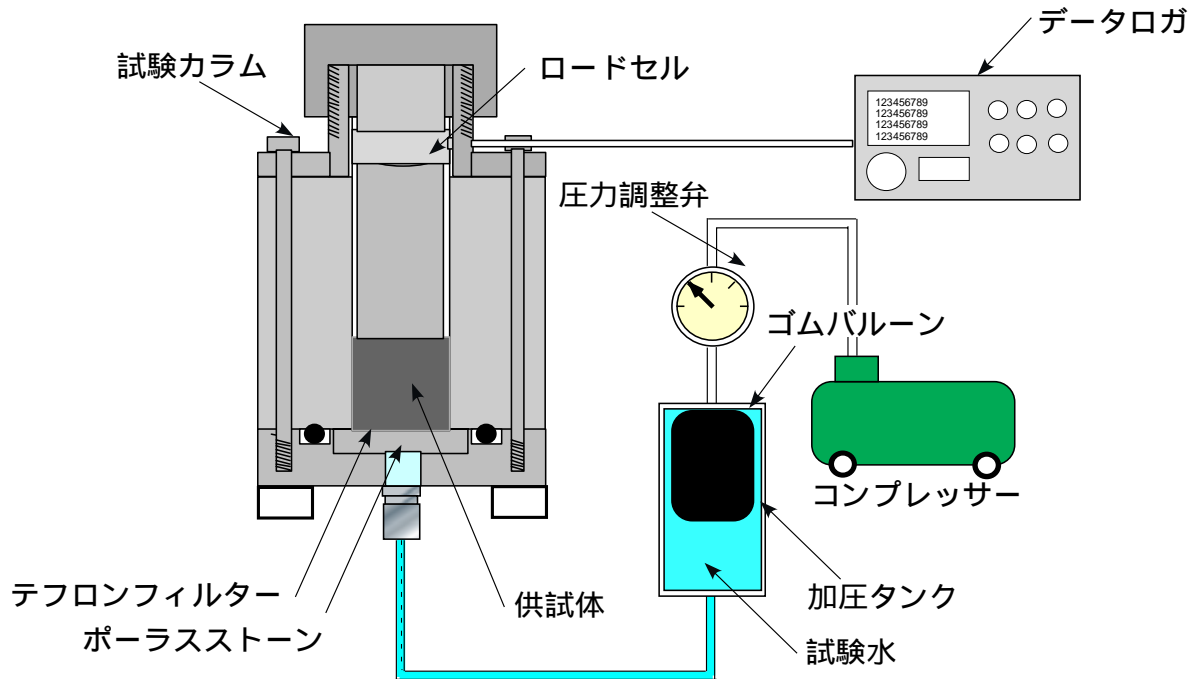


図 3.4-1 緩衝材仕様における膨潤応力測定装置概略図

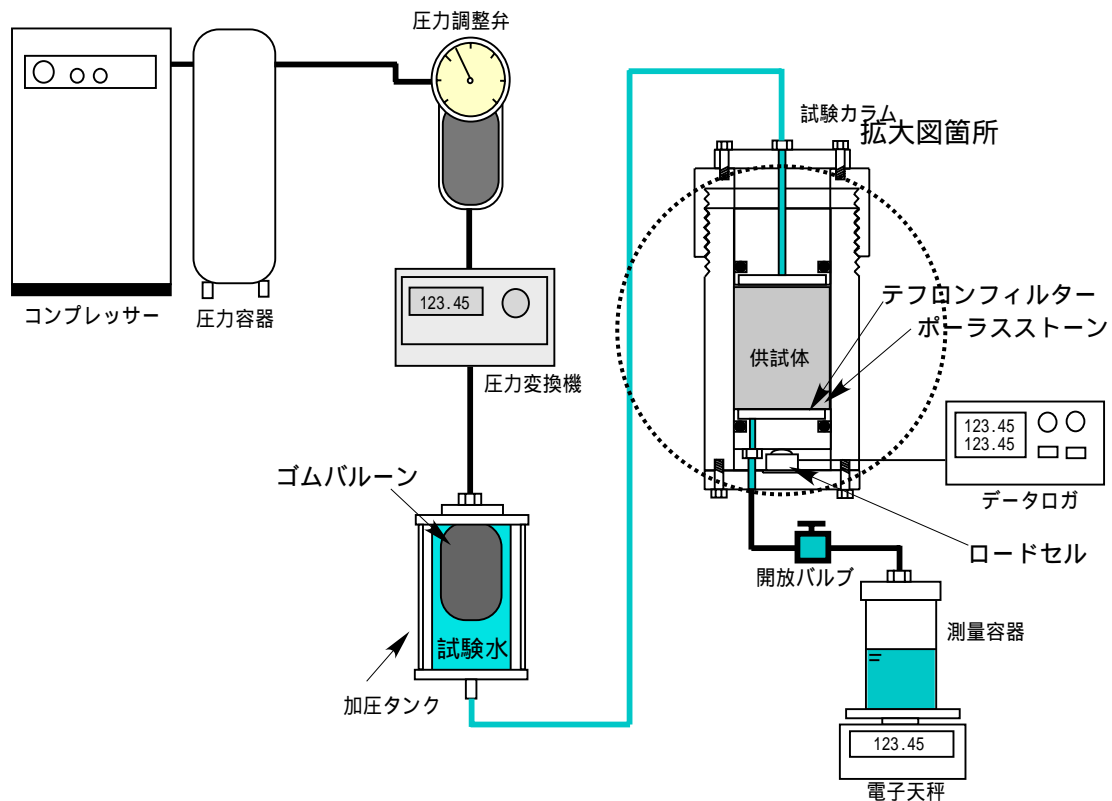


図 3.4-2 埋め戻し材仕様における膨潤応力測定装置概略図

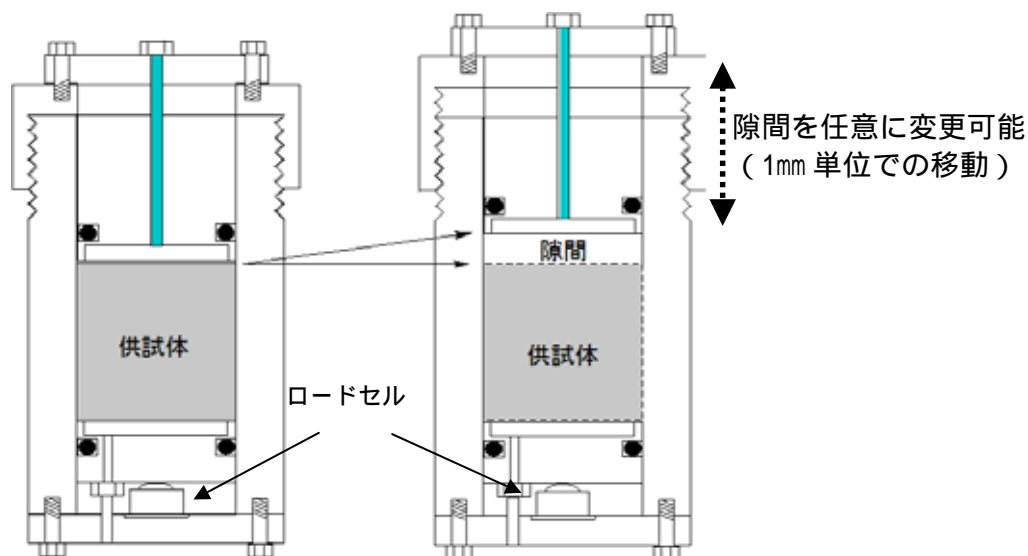


図 3.4-3 埋め戻し材仕様における試験コラム拡大図

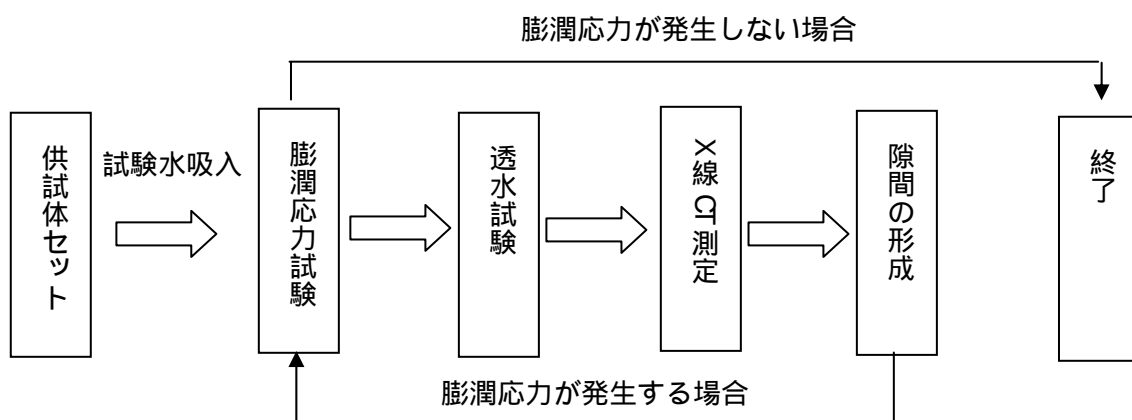


図 3.4-4 埋め戻し材仕様における試験フロー

3.4.2 試験条件

幌延地下水を用いた緩衝材仕様および埋め戻し材仕様における膨潤応力測定条件を表 3.4-1, 表 3.4-2 に示す。

緩衝材仕様においては、ベントナイト単体試料及びケイ砂混合体試料を対象に、供試体の乾燥密度をパラメータとした試験を実施した。また、幌延地下水との比較を行うため、NaCl 濃度をパラメータとした試験を同時に実施した。

埋め戻し材仕様においては、「第2次取りまとめ」にて例示されたベントナイト混合率 15wt%、ケイ砂混合率 85 wt%、初期乾燥密度 1.8Mg/m³を対象に、膨潤応力を測定した。さらに、比較試験水として蒸留水および人工海水を用いた試験も併せて実施した。

表 3.4-1 測定条件（緩衝材仕様）

	ベントナイト単体試料	ケイ砂混合体試料
試料	ベントナイト（クニゲル V1）	
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.4, 1.6, 1.8	1.4, 1.6, 1.8
ケイ砂混合率 [wt%]	0	30
供試体寸法 [mm]	20×h20	
初期含水比 [%]	約 10	
試験温度 []	室温（約 20 ）	
給水圧力（間隙水圧） [MPa]	0.05 ~ 0.20	
試験水	幌延地下水 NaCl 溶液（0.20, 0.50, 0.80, 1.70, 3.42[mol/l]）	

なお、NaCl 溶液濃度パラメータにおける膨潤応力測定においては、ケイ砂混合体試料のみの供試体に関して測定を実施した。

表 3.4-2 測定条件（埋め戻し材仕様）

	蒸留水	幌延地下水	人工海水
初期乾燥密度[Mg/m ³]	1.80	1.80	1.80
初期ケイ砂混合率[wt%] (3号ケイ砂のみ使用)	85	85	85
有効粘土密度 [Mg/m ³]	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	0.642 ^{*1} (初期有効粘土密度)	
	体積膨潤比 1.04 (隙間 2mm)	0.586 ^{*1}	
	体積膨潤比 1.08 (隙間 4mm)	0.540 ^{*1}	
	体積膨潤比 1.12 (隙間 6mm)	0.500 ^{*1}	
初期含水比[%]	15		
初期供試体寸法[mm]	50×h50 ^{*2}		
試験水	蒸留水	幌延地下水 (HDB-6)	人工海水 (ASTM D1141-98 基準)
イオン強度[mol/l]	0.0	0.207	0.64
試験温度[]	室温（約 20 ）		

* 1. 有効粘土密度欄においては、隙間充填後における供試体の有効粘土密度である。

* 2. ベントナイトの膨潤性によって隙間充填することで、供試体高さ寸法は変化する。

3.4.3 試験結果

(a) 緩衝材仕様における膨潤応力測定結果

幌延地下水，人工海水および NaCl 溶液を浸潤させた場合における緩衝材仕様の膨潤応力の経時変化を図 3.4-5(a)～(c)に示す。また，表 3.4-3 に本測定において得られた膨潤応力測定後の供試体乾燥密度，含水比，飽和度および膨潤応力が定常となった値（以下，平衡膨潤応力という）を併せて示す。図 3.4-5(a)～(c)から，これまでに鈴木ら（鈴木・藤田，1999）によって得られた結果と同様，給水開始後，各供試体ともに膨潤応力が発生するとともに圧力が上昇した。各供試体の密度およびイオン強度によって膨潤応力のピークに達する時間は違うものの約 300 時間経過後から平衡膨潤応力に達した。

各有効粘土密度におけるイオン強度と平衡膨潤応力の関係を図 3.4-6(a)～(c)に示す。図 3.4-6(a)および(b)の結果から 3.2 項にて示したイオン強度と膨潤力の関係と同様に，試験溶液のイオン強度が高くなるに従い，平衡膨潤応力が低下することが分かった。しかしながら，図 3.4-6(c)のような高密度に圧縮されたベントナイトにおいては，試験溶液のイオン強度が高くなっても平衡膨潤応力は低下しない傾向があることが示された。

(b) 埋め戻し材仕様における膨潤応力測定結果

蒸留水，人工海水および幌延地下水を浸潤させた場合における埋め戻し材仕様の膨潤応力の経時変化を図 3.4-7(a)～(c)に示す。また，表 3.4-4 に本測定において得られた膨潤応力測定後の供試体乾燥密度，含水比，飽和度および平衡膨潤応力を併せて示す。図 3.4-7(a)に示す蒸留水の場合においては，有効粘土密度 0.642 Mg/m^3 （体積膨潤比 1.00）を初期有効粘土密度として測定を開始し，図 3.4-4 に示すように，同供試体を用いて段階的に隙間を形成させつつ，膨潤応力が発生しなくなるまで測定を行った。なお，本測定における有効粘土密度 $0.642 \sim 0.50 \text{ Mg/m}^3$ は，X 線 CT 装置によって隙間充填確認後の推定有効粘土密度である。

初期有効粘土密度 0.642 Mg/m^3 においては，緩衝材仕様と同様に，給水開始後，膨潤応力が発生するとともに圧力が上昇し，膨潤応力のピークに達した後，約 600 時間経過後から平衡膨潤応力に達した。次に，有効粘土密度 0.586 Mg/m^3 においては，隙間を充填したことによって，膨潤応力が発生し始め，約 300 時間経過後から平衡膨潤応力に達した。有効粘土密度 0.540 Mg/m^3 においても，有効粘土密度 0.586 Mg/m^3 と同様に，隙間を充填したことによって，膨潤応力が発生し始め，約 200 時間経過後から平衡膨潤応力に達した。有効粘土密度 0.50 Mg/m^3 に関しては，膨潤応力は発生しなかったため，測定開始後約 400 時間後に試験を終了した。なお，図中における各有効粘土密度の圧力低下部分においては，供試体が平衡膨潤応力に達したことを確認した後，透水試験を実施するために，試験カラム下部に設置したバルブを開放したことに起因している。このことは，透水試験終了後，バルブを閉じたことにより，膨潤応力がもとの状態に戻ったことから推察される。

次に，幌延地下水および人工海水の膨潤応力については，図 3.4-7(b)，(c)に示すように膨潤応力は発生しなかった。試験終了後の幌延地下水および人工海水の供試体写真を写真 3.4-1，3.4-2 に示す。両供試体ともに，供試体上部（試験溶液供給側）のベントナイトは，膨潤せず供試体下部の方へ沈殿している状態であった。この要因としては，塩濃度の影響により，ベントナイト中の交換性陽イオン量が高くなることによって，凝集などの作用により間隙構造が変化し，層間の電気的な反発力が低下したことによって膨潤応力は，発生しなかったものと考えられる。このことは，緩衝材仕様における膨潤応力の低下に関しても同様のことが言える。

図 3.4-8 に蒸留水の場合における CT 装置を用いた各隙間充填後の密度分布測定結果を示す。なお，ケイ砂混合率 85%における CT 値と密度の関係が得られていないため，本報告においては，供試体密度の変化を CT 値の相対的な変化として捉えることとした。なお，ここでは一断面当たり 20 回のスキャンを行った値の平均値を用いている。図から有効粘土密度 0.642 Mg/m^3 に関しては，供試体距離 45mm から 50mm の領域にかけて多少 CT 値は低く測定された。これは，供試体作製時の密度勾配が原因と考えられる。また，有効粘土密度 0.586 Mg/m^3 に関しては，隙間を充填する際に，供試体距離 25mm から 54mm まで領域における CT 値が低下していることから，この部分の埋め戻し材の質量が隙間 2mm 分の密度を充填するためのソースとして利用

されたものと考えられる。この CT 値を供試体の密度勾配と考えた場合，図 3.4-7(a)における有効粘土密度 0.540Mg/m^3 の膨潤応力の低下は，供試体が均一な状態でなかったため，影響を受けた可能性があると考えられる。

(c) 膨潤応力に関する関係式

「第 2 次取りまとめ」までに得られた緩衝材（鈴木・藤田，1999）および埋め戻し材（杉田ほか，1999）仕様における結果を示すとともに，本測定において得られた測定結果を合わせて図 3.4-9 に示す。図から有効粘土密度 1.36Mg/m^3 を境に，図 3.4-7(a)～(c)に示したイオン強度と平衡膨潤応力の関係と同様に，供試体に海水系地下水を模擬した試験溶液を浸潤させた場合，平衡膨潤応力が低下することがわかる。

また，本測定結果を踏まえ，膨潤応力 σ [MPa]と有効粘土密度 ρ_b [Mg/m^3]の関係における降水系地下水条件下（蒸留水）および海水系地下水条件下（幌延地下水，人工海水，NaCl 溶液）における近似式（(6)式，(7)式）を以下に示す。なお，海水系地下水条件下における近似式に関しては，幌延地下水，人工海水及び NaCl 溶液それぞれにおいて大きな違いが見られないため，各試験水を合わせた近似式とした。

また，降水系地下水条件下における有効粘土密度と平衡膨潤応力の近似式においては，有効粘土密度 $0.5 \sim 2.0 \text{Mg/m}^3$ までの範囲とし，海水系地下水条件下における有効粘土密度と平衡膨潤応力の近似式においては，有効粘土密度 $1.17 \sim 1.8 \text{Mg/m}^3$ までの範囲とする。

・降水系地下水（蒸留水）

$$\sigma = \exp(3.94\rho_b^3 - 13.71\rho_b^2 + 18.06\rho_b - 9.60) \quad : [0.50 \quad \rho_b \quad 2.00] \quad (6)$$

・海水系地下水（幌延地下水，人工海水，NaCl 溶液）

$$\sigma = \exp(4.24\rho_b^3 - 20.04\rho_b^2 + 37.63\rho_b - 26.07) \quad : [1.17 \quad \rho_b \quad 1.80] \quad (7)$$

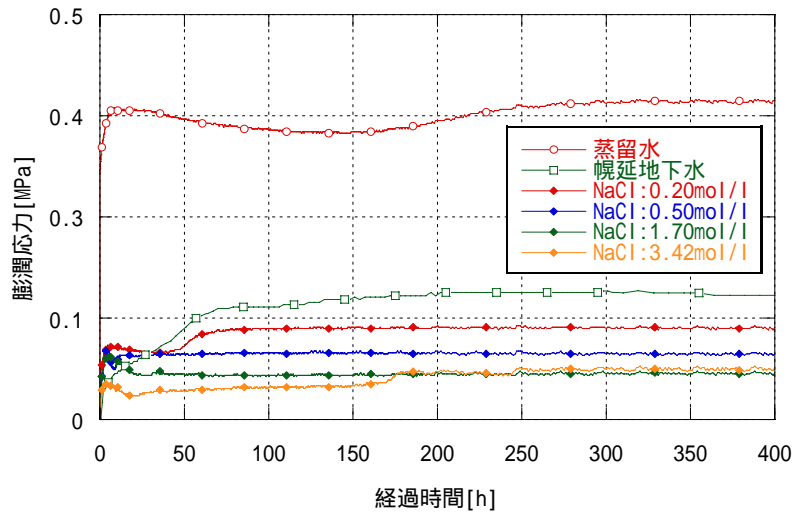
表 3.4-3 膨潤応力測定結果（緩衝材仕様）

試験水	イオン強度 [mol/l]	乾燥密度 [Mg/m ³]	ケイ砂 混合率 [wt%]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	飽和度 [%]	平衡膨潤応力 [MPa]
幌延地下水	0.207	1.40	30	1.165	99.72	1.170
		1.39		1.156	100.96	1.097
		1.40		1.165	99.93	0.060
NaCl 溶液	0.20	1.40	30	1.165	100.6	0.0922
	0.50	1.40	30	1.165	101.2	0.0811
	1.70	1.40	30	1.165	97.8	0.0561
	3.42	1.40	30	1.165	99.5	0.0607
幌延地下水	0.207	1.60	30	1.369	101.2	0.360
		1.60		1.369	100.5	0.382
		1.60		1.369	99.7	0.348
NaCl 溶液	0.20	1.60	30	1.369	100.3	0.374
	0.50	1.60	30	1.369	98.55	0.319
	0.80	1.60	30	1.369	99.67	0.294
	1.70	1.60	30	1.369	102.4	0.292
	3.42	1.60	30	1.369	101.3	0.298
幌延地下水	0.207	1.80	30	1.584	100.29	1.710
		1.81		1.595	98.77	1.540
		1.79		1.573	101.50	1.600
NaCl 溶液	0.20	1.80	30	1.584	100.2	1.170
	0.50	1.80	30	1.584	98.22	1.160
	1.70	1.80	30	1.584	116.6	1.180
	3.42	1.80	30	1.584	106.2	1.130

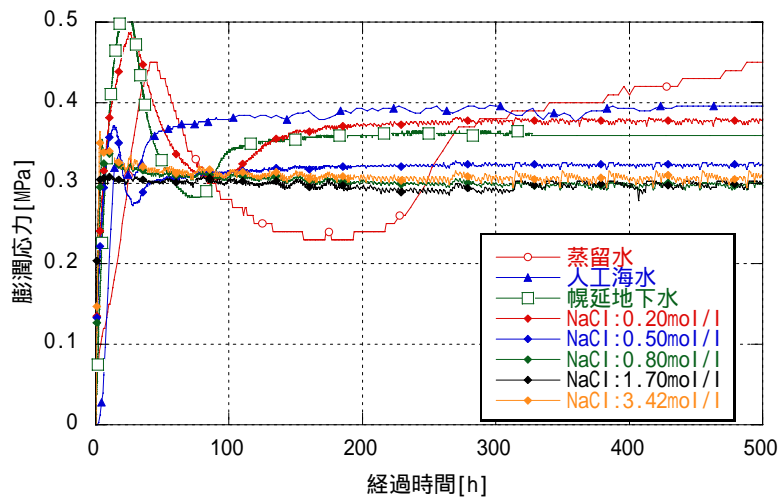
表 3.4-4 膨潤応力測定結果（埋め戻し材仕様）

	透過液	体積膨潤比[-]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	平衡膨潤応力 [MPa]
埋め戻し材仕様	蒸留水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.80	0.642	0.079
		体積膨潤比 1.04 (隙間 2mm)	1.73	0.586	0.060
		体積膨潤比 1.08 (隙間 4mm)	1.67	0.540	0.013
	人工海水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.81	0.651	
	幌延地下水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.79	0.634	

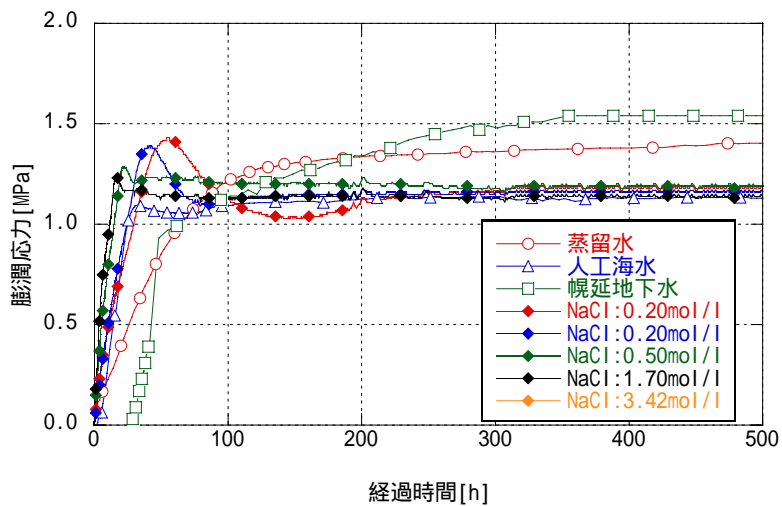
人工海水および幌延地下水において膨潤応力は測定不可



(a) 有効粘土密度 1.165[Mg/m³]

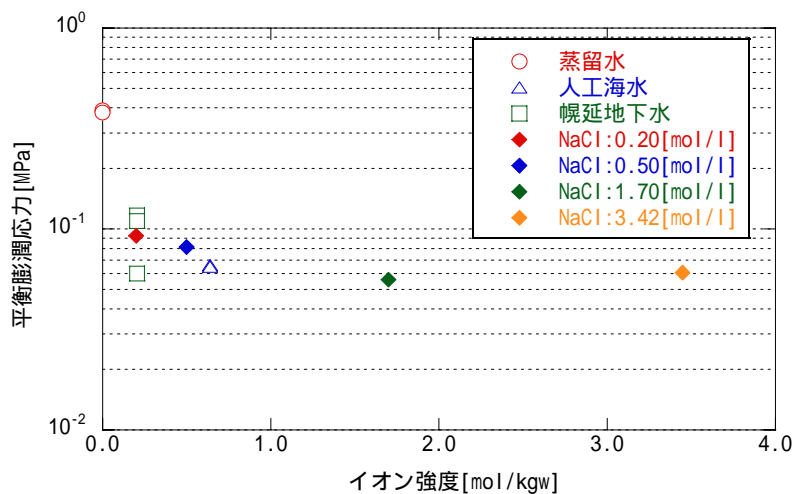


(b) 有効粘土密度 1.369[Mg/m³]

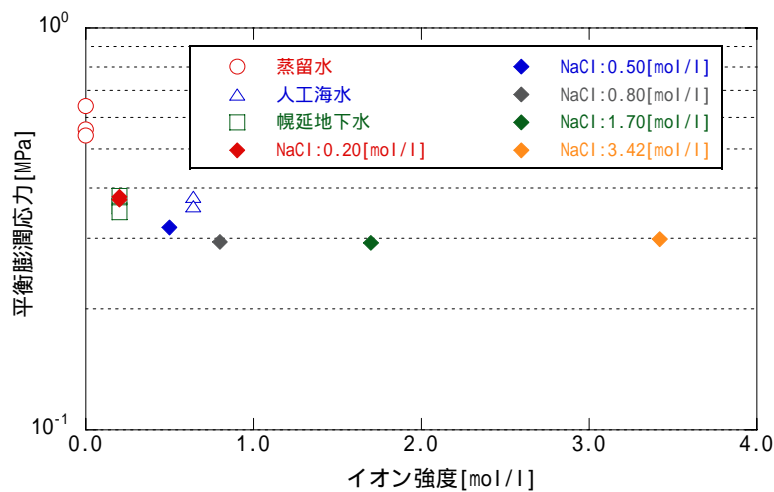


(c) 有効粘土密度 1.584[Mg/m³]

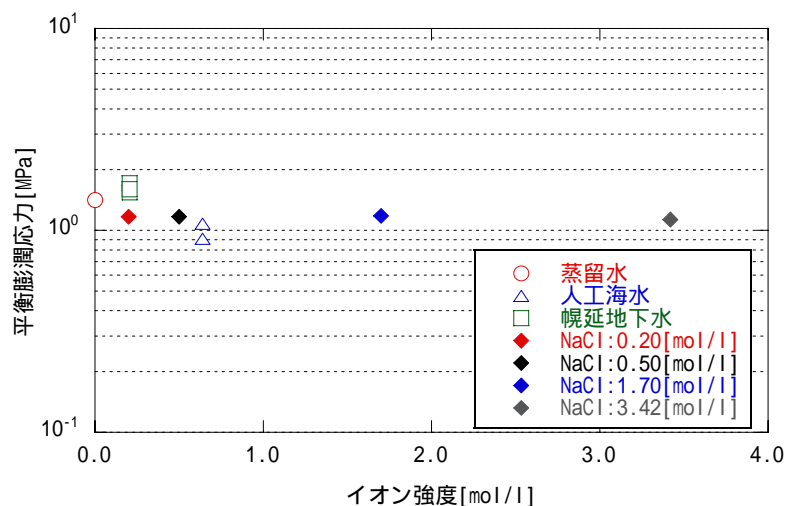
図 3.4-5 膨潤応力と経時変化 (緩衝材仕様)



(a) 有効粘土密度 1.165[Mg/ m³]における比較

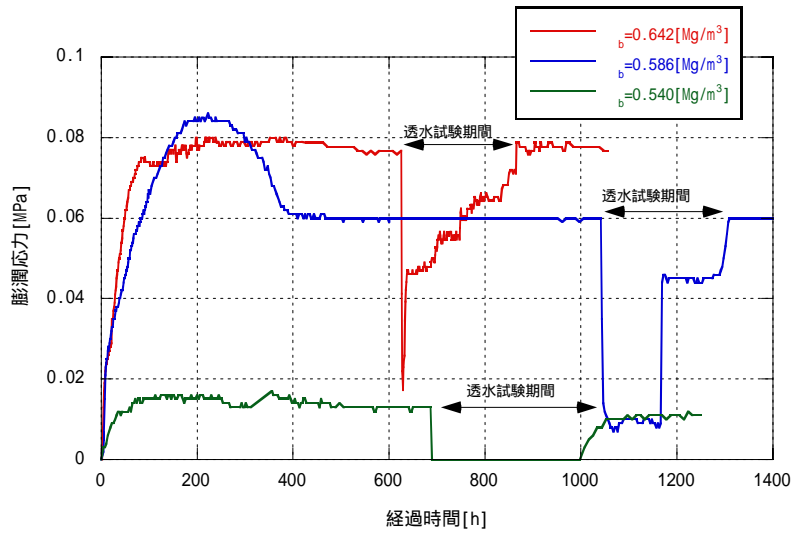


(b) 有効粘土密度 1.369[Mg/ m³]における比較

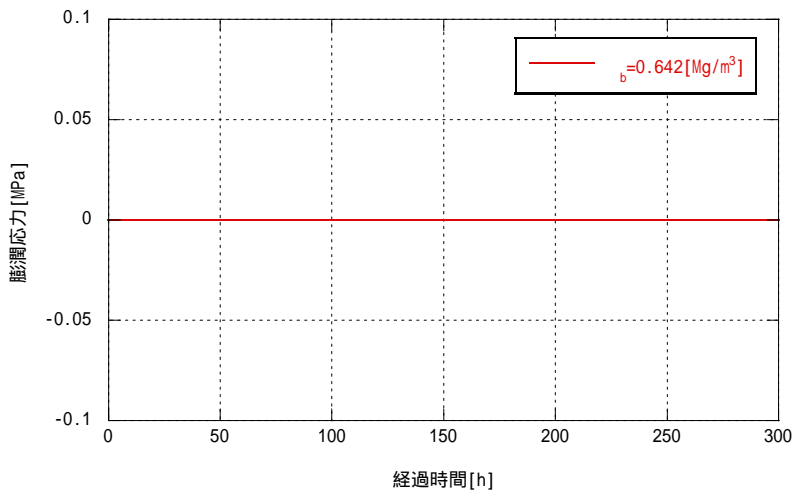


(c) 有効粘土密度 1.584[Mg/ m³]における比較

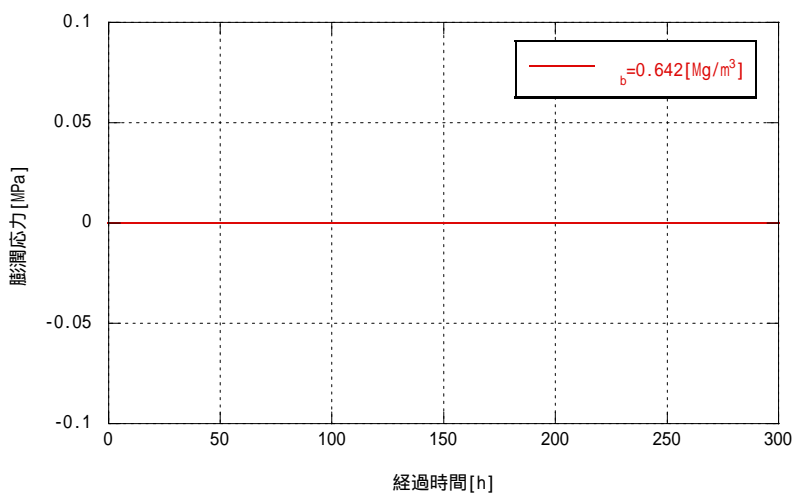
図 3.4-6 イオン強度と平衡膨潤応力の関係 (緩衝材仕様)



(a) 有効粘土密度 0.540 ~ 0.642[Mg/ m³] ; 蒸留水



(b) 有効粘土密度 0.642[Mg/ m³] ; 幌延地下水



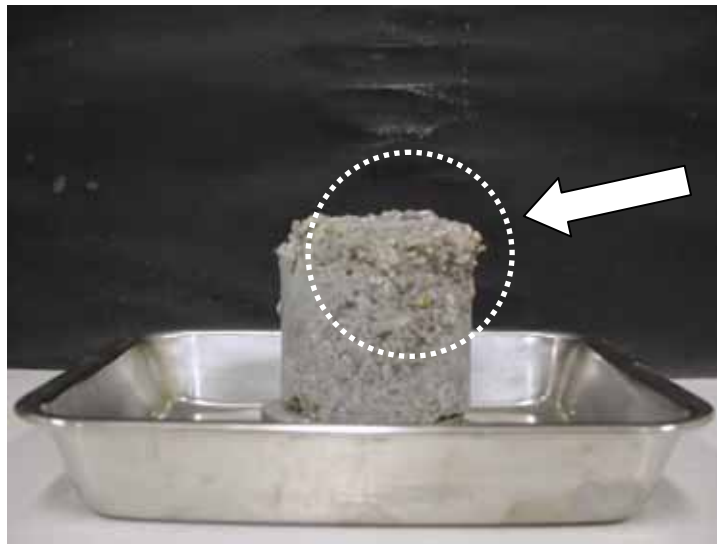
(c) 有効粘土密度 0.642[Mg/ m³] ; 人工海水

図 3.4-7 膨潤応力と経時変化 (埋め戻し材仕様)



凝集箇所

写真 3.4-1 試験後供試体写真（幌延地下水）



凝集箇所

写真 3.4-2 試験後供試体写真（人工海水）

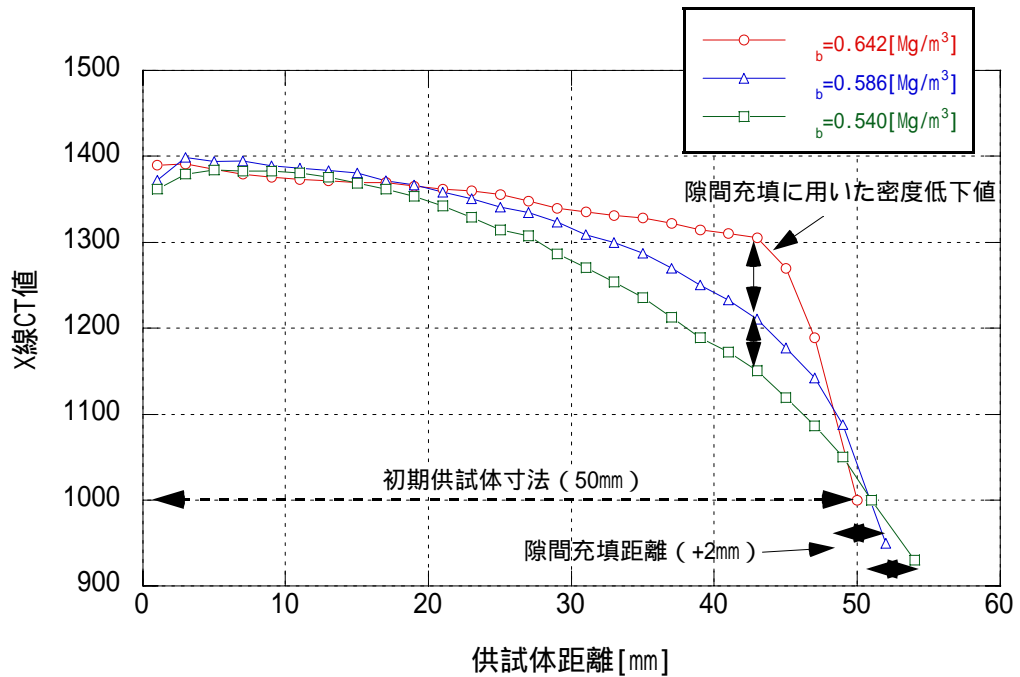


図 3.4-8 X線 CT 装置を用いた密度分布測定

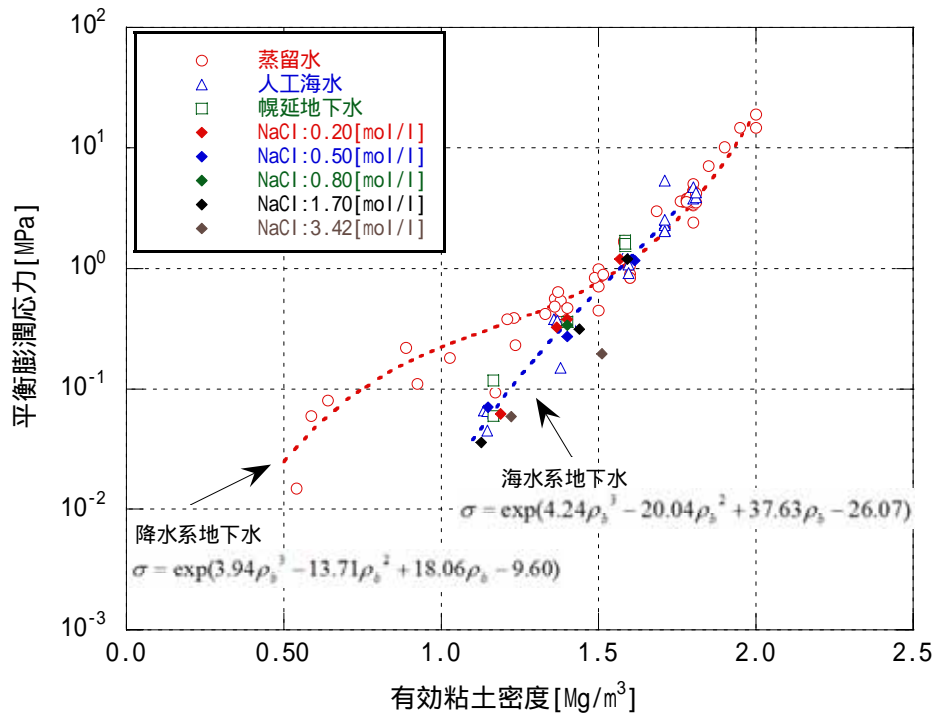


図 3.4-9 有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係

3.5 透水試験

3.5.1 透水試験装置概要

一般に土を対象とした透水試験では、水頭圧を利用した定水位あるいは変水位透水試験装置が用いられる。高密度に圧縮成型したベントナイトは、極めて低透水性であるため、本試験では、図 3.5-1 に示すようなコンプレッサーの圧縮空気圧を利用した定水位型の透水試験装置（地盤工学会，2000）を用いた。

試験装置は以下に示すとおり、コンプレッサー（圧縮空気圧：0.1～0.7[MPa]）、加圧タンク（材質：透明アクリル）、恒温槽（温度範囲：20～110 []）、試験カラム（材質：SUS316）、電子天秤（測定精度：±0.01 [g]）、から構成される。

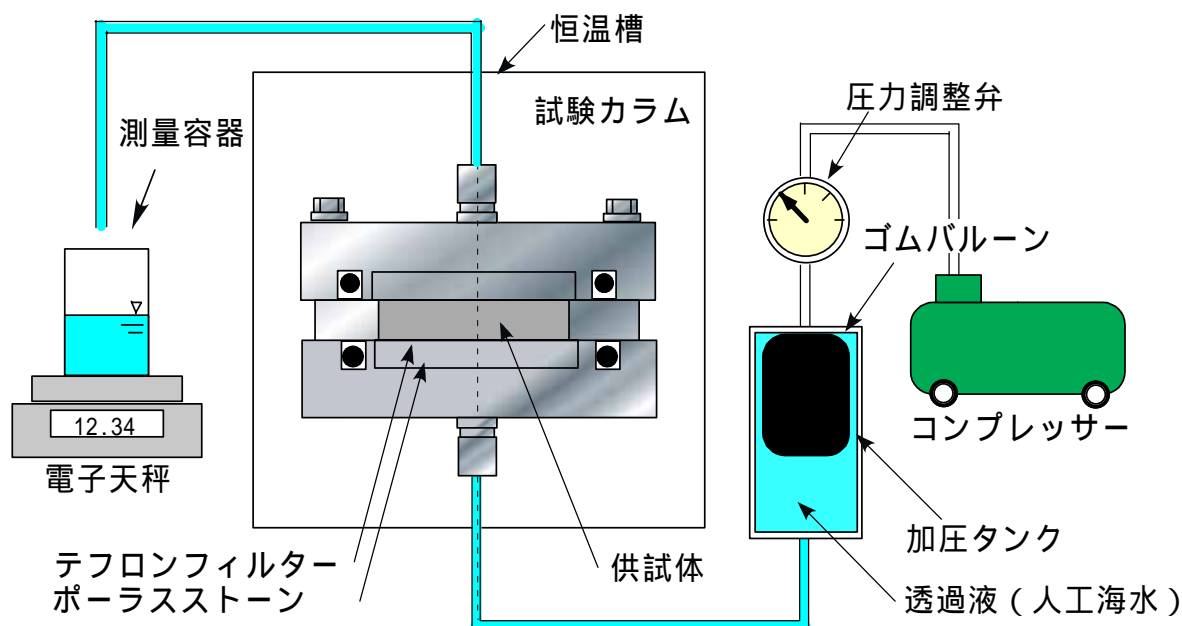


図 3.5-1 透水試験装置概略図

3.5.2 試験条件

幌延地下水を用いた緩衝材仕様および埋め戻し材仕様における透水試験条件を表 3.5-1、表 3.5-2 に示す。

緩衝材仕様に関しては、ベントナイト単体試料及びケイ砂混合体試料を対象に、供試体の乾燥密度をパラメータとした試験を実施した。また、幌延地下水との比較を行うため、NaCl 濃度をパラメータとした試験を有効粘土密度 1.40Mg/m^3 のみ実施した。

埋め戻し材仕様に関しては、3.4 項の図 3.4-4 に示された試験装置を用いて「第 2 次取りまとめ」にて例示されたベントナイト混合率 15%、ケイ砂混合率 85%、初期乾燥密度 1.8Mg/m^3 を対象に、比較試験溶液として蒸留水、人工海水および幌延地下水を用いた透水試験を実施した。

なお、試験温度に関しては、設定温度 25 とし、給水圧力においては、黒澤らによるコロイド透過試験（黒澤ほか，2003）を実施した際、試験の途中で供試体への長期間の加圧給水が原因と思われるコロイドの破過が認められたという知見があることから、給水圧力においては、緩衝材仕様に関して、膨潤応力測定結果から得られた平衡膨潤応力以下で圧力調整を行い、また、埋め戻し材仕様に関しては、一律 0.1MPa として透過液を通水した。

表 3.5-1 試験条件（緩衝材仕様）

	ベントナイト単体試料	ケイ砂混合体試料
試料	ベントナイト（クニゲル V1）	
乾燥密度[Mg/ m ³]	1.4, 1.6, 1.8	
ケイ砂混合率[wt%]	0	30
供試体寸法[mm]	50×h10	
試験温度[]	25	
給水圧力[MPa]	0.05～0.20 (各乾燥密度ごとにおける平衡膨潤応力以下の値)	
透過液	幌延地下水 NaCl 水 (0.34, 0.72, 0.86, 1.50, 2.00, 3.42 [mol/l])	

なお、NaCl 溶液の濃度をパラメータとした透水試験においては、乾燥密度 1.40[Mg/m³]、ベントナイト単体試料のみの供試体に関して試験を実施した。

表 3.5-2 測定条件（埋め戻し材仕様）

		埋め戻し材仕様		
初期乾燥密度[Mg/m ³]		1.80	1.80	1.80
初期ケイ砂混合率[wt%] (3号ケイ砂のみ使用)		85	85	85
有効粘土密度 [Mg/m ³]	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	0.642 ^{*1} (初期有効粘土密度)		
	体積膨潤比 1.04 (隙間 2mm)	0.586 ^{*1}		
	体積膨潤比 1.08 (隙間 4mm)	0.540 ^{*1}		
初期含水比[%]		15		
初期供試体寸法[mm]		50×h50 ^{*2}		
透過液	蒸留水	幌延地下水 (HDB-6)	人工海水 (ASTM D1141-98 基準)	
イオン強度[mol/l]	0.0	0.20	0.64	
試験温度[]		25		

* 1. 有効粘土密度欄においては、隙間充填後における供試体の有効粘土密度である。

* 2. ベントナイトの膨潤性によって隙間充填することで、供試体高さ寸法は変化する。

3.5.3 試験方法

透水試験は、所定の乾燥密度になるようにベントナイト粉末材料をプレス機により一次的に圧縮成型する方法で供試体を作製し、透水試験カラムで拘束後、恒温槽内に設置する。恒温槽を所定の温度条件に設定し、コンプレッサーからゴムバルーンを介して加圧タンクへ圧縮空気を送り、供試体へ透過液を供給する。供試体の両端には、フィルターとしてポラスストーン（孔径 2μm）とテフロンフィルター（孔径 1μm）を置く。ポラスストーンは、透過液を分散させベントナイト供試体に均一に浸潤させるために用いる。また、テフロンフィルターは、ベントナイト粒子がポラスストーンに侵入し、目詰まりを起こすことを防ぐために用いた。透過液がベントナイトに浸潤し、ベントナイトが飽和すると、透過した液が測量容器に排水され、電子天秤にて時間当たりの透過量を測定する。

3.5.4 試験結果

緩衝材仕様および埋め戻し材仕様に関する透水試験結果を表 3.5-4, 表 3.5-5 に示す。土壌中の水の動きは, 一般に Darcy の法則に従うといわれており, (8) 式で表される。ここで, Q [m³/s] は透過液流量, k [m/s] は透水係数, A [m²] は供試体断面積, i [-] は動水勾配を表す。

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad (8)$$

透過液流量 Q は, 電子天秤によって計測される積算透過液流量と経時時間の関係から, 時間当たりの透過液量が一定とみなせる範囲において, 最小自乗法による直線の傾きから求め, (8) 式を用いて透水係数を算出する。

なお, 本測定結果においては, これまでに得られた蒸留水および人工海水と比較するため, 供試体中を透過する透過液の物性(温度, 密度, 粘性係数)の影響を考慮した岩石等の多孔質体の透水性を評価する際に用いられる固有透過度(JACOB BEAR, 1979)の概念を用いて整理した。

固有透過度は, 粒径分布・粒子の形状・屈曲度・空隙率など多孔質体自身の構造特性に由来する透過抵抗を表すものであり, (9) 式で求められる。ここで k [m/s] は透水係数, κ [m²] は固有透過度, ρ [kg/m³] は幌延地下水の密度, g [m/s²] は重力加速度, μ [Pa·s] は幌延地下水の粘性係数を表す。試験温度(25)における幌延地下水の密度と粘性係数を表 3.5-3 に示す。

なお, 密度測定(日本工業規格, 2001; 理科年表, 2000)に関しては, 比重瓶法(ゲイリュサック形温度計・ピクノメータ)を用い, 粘性係数の測定(日本工業規格, 1991; 理科年表, 2000)に関しては, 粘性測定法(オストワルド粘度計)を用いた。また, 蒸留水, NaCl 溶液における密度および粘性係数においては, 理科年表(理科年表, 2000)における値を引用した。

$$k = \kappa \rho g / \mu \quad (9)$$

表 3.5-3 幌延地下水の密度および粘性

温度[]	ρ [g/cm ³]	μ [mPa·s]	ν [mm ² /s]
25	1.0042	1.0174	1.0131

緩衝材仕様における幌延地下水および NaCl 濃度をパラメータとした場合の有効粘土密度と固有透過度の関係をこれまでに得られた蒸留水(松本ほか, 1997)および人工海水(菊池ほか, 2003b)の結果と併せて図 3.5-2 に示す。

図から緩衝材仕様に関しては, 幌延地下水を流体とした場合, 蒸留水に比べ, 固有透過度は, 5.3 倍から 3.5 倍程度となり, 低密度から高密度になるに従って, 人工海水と同様に, 蒸留水の結果に近づく傾向があることがわかった。

本測定結果から得られた幌延地下水条件下における有効粘土密度 ρ_b [Mg/m³] と固有透過度 κ [m²] の関係式を (10) 式に示す。なお, 本式においては, 有効粘土密度 1.17 ~ 1.80 Mg/m³ の範囲のみとする。

$$\kappa = \exp(-41.466 + 4.316\rho_b - 4.069\rho_b^2) \quad (10)$$

また, 塩濃度が高くなるに従い固有透過度が変化する傾向があることから有効粘土密度 1.40 Mg/m³ に関して, イオン強度と固有透過度の関係で整理し直したものを, 蒸留水, 人工海水および幌延地下水とともに図 3.5-3 に示す。図から 2.0 mol/l までは, イオン強度が大きくなるに伴い, 固有透過度も大きくなる傾向を示す。また, イオン強度が 2.0 mol/l での固有透過度とイオン強度が 3.4 mol/l での固有透過度を比較した結果, ほぼ同程度の値を示した。このことは, 3.2 項および 3.4 項にて示した膨潤特性と同様, ある一定濃度を越えることによって, 固有透過

度も変化しないことを示している。

次に、埋め戻し材仕様における蒸留水、人工海水および幌延地下水を用いた場合の有効粘土密度と固有透過度の関係をこれまでに得られた蒸留水（松本ほか，1997）および人工海水（菊池ほか，2003b）の結果と併せて図 3.5-4 に示す。

図から埋め戻し材仕様に関しては、幌延地下水を流体とした場合、蒸留水に比べ、固有透過度が 3 桁程度大きくなる。また、人工海水を流体とした場合、蒸留水に比べ、固有透過度が 4 桁程度大きくなるのがわかる。さらに、埋め戻し材仕様のような低ベントナイト密度の場合、幌延地下水および人工海水のような海水条件下における固有透過度は、緩衝材仕様に対して、急激に高くなる傾向を示した。

次に、緩衝材仕様と同様に、埋め戻し材仕様においても（有効粘土密度 0.64Mg/m^3 のみ）蒸留水、人工海水および幌延地下水をイオン強度にて整理し、図 3.5-5 にイオン強度と固有透過度の関係を示す。図から緩衝材仕様と同様に、イオン強度が大きくなるに伴い、固有透過度も大きくなる傾向を示す。また、概略的ではあるが、埋め戻し材仕様のような低ベントナイト密度に関しては、人工海水程度のイオン強度で、固有透過度は一定になる傾向を示す。

上記の結果から、ベントナイトの透水性は、3.4 項にて記述したように、透過する溶液のイオン濃度が徐々に高くなることによって、ベントナイト中の交換性陽イオン量が高くなり、凝集などの作用により間隙構造が変化して、固有透過度も大きくなる傾向を示すが、緩衝材仕様においては、ある一定濃度を超えると、間隙構造はそれ以上変化せず、固有透過度も同程度の値を示したと考えられる。また、埋め戻し材仕様に関しては、ベントナイト密度に対して、膨潤性が低下することによって供試体中の間隙が支配的となり、3.4 項の写真 3.4-1，3.4-2 に示すように、ベントナイトは凝集し、固有透過度が急激に高くなったと推察される。

今後、両仕様ともに、有効粘土密度および塩濃度をパラメータとしたデータを拡充し、詳細に検討する必要がある。

表 3.5-4 透水試験結果 (緩衝材仕様)

	透過液	[mol/l]	乾燥密度 [Mg/m ³]	飽和度 [%]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	透水係数 [m/s]	固有透過度 [m ²]
ベントナイト単体	幌延地下水		1.38	99.42	1.38	1.81E-12	1.87E-19
	幌延地下水		1.39	102.04	1.39	1.37E-12	1.42E-19
	幌延地下水		1.40	100.66	1.40	1.89E-12	1.95E-19
	NaCl	0.20	1.40	105.93	1.40	1.55E-12	1.41E-19
	NaCl	0.20	1.41	105.18	1.41	1.45E-12	1.32E-19
	NaCl	0.20	1.40	111.01	1.40	1.65E-12	1.50E-19
	NaCl	0.72	1.40	99.45	1.40	1.61E-11	1.50E-18
	NaCl	0.72	1.41	100.98	1.41	2.51E-11	2.34E-18
	NaCl	0.72	1.40	100.02	1.40	1.59E-11	1.48E-18
	NaCl	0.86	1.40	102.11	1.40	2.27E-11	2.16E-18
	NaCl	0.86	1.40	100.36	1.40	2.60E-11	2.47E-18
	NaCl	0.86	1.40	95.63	1.40	4.75E-11	4.51E-18
	NaCl	1.50	1.40	101.92	1.40	1.96E-10	2.15E-17
	NaCl	1.50	1.40	107.29	1.40	2.63E-10	2.50E-17
	NaCl	1.50	1.40	108.20	1.40	2.85E-10	2.71E-17
	NaCl	2.00	1.42	110.92	1.42	5.93E-10	6.65E-17
	NaCl	2.00	1.38	109.27	1.38	1.01E-09	1.13E-16
	NaCl	2.00	1.40	107.87	1.40	7.52E-10	8.43E-17
	NaCl	3.42	1.41	121.23	1.41	4.40E-10	5.49E-17
	NaCl	3.42	1.38	101.17	1.38	5.40E-10	6.74E-17
	NaCl	3.42	1.40	105.62	1.40	1.14E-09	1.42E-16
	幌延地下水		1.59	102.82	1.59	2.38E-13	2.46E-20
	幌延地下水		1.61	100.56	1.61	2.49E-13	2.58E-20
	幌延地下水		1.61	102.21	1.61	2.51E-13	2.61E-20
幌延地下水		1.80	99.61	1.80	4.86E-14	5.02E-21	
幌延地下水		1.80	99.14	1.80	4.69E-14	4.85E-21	
幌延地下水		1.80	104.13	1.80	4.17E-14	4.33E-21	
(Rs = 30wt%) ケイ砂混合体	幌延地下水		1.40	99.59	1.17	3.67E-12	3.34E-19
	幌延地下水		1.39	102.14	1.16	7.36E-12	6.69E-19
	幌延地下水		1.41	97.83	1.17	6.19E-12	5.63E-19
	幌延地下水		1.61	106.04	1.38	1.93E-12	1.99E-19
	幌延地下水		1.59	101.34	1.36	2.15E-12	2.22E-19
	幌延地下水		1.58	95.36	1.35	1.50E-12	1.55E-19
	幌延地下水		1.80	112.96	1.58	2.80E-13	2.89E-20
	幌延地下水		1.80	99.65	1.58	3.34E-13	3.45E-20
	幌延地下水		1.78	104.78	1.57	2.67E-13	2.76E-20

表 3.5-5 透水試験結果（埋め戻し材仕様）

	透過液	体積膨潤比[-]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	透水係数 [m/s]	固有透過度 [m ²]
埋め戻し材仕様	蒸留水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.80	0.642	4.51E-12	4.11E-19
		体積膨潤比 1.04 (隙間 2mm)	1.73	0.586	6.83E-12	6.22E-19
		体積膨潤比 1.08 (隙間 4mm)	1.67	0.540	5.21E-12	4.74E-19
	人工海水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.81	0.651	1.28E-07	1.33E-14
	幌延地下水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.79	0.634	2.25E-08	2.32E-15

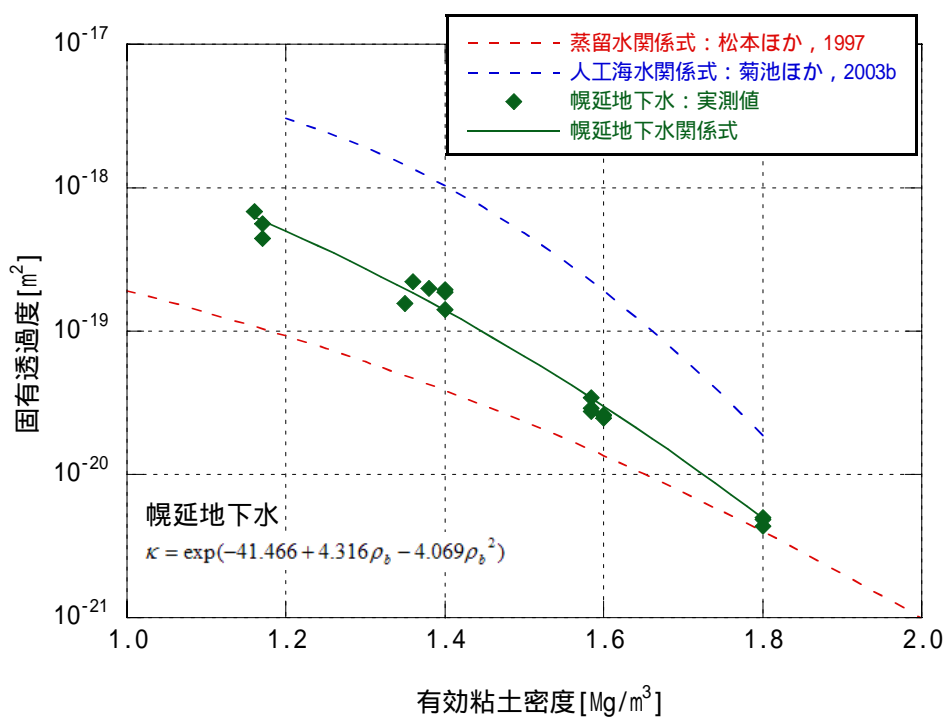


図 3.5-2 有効粘土密度と固有透過度の関係（緩衝材仕様）

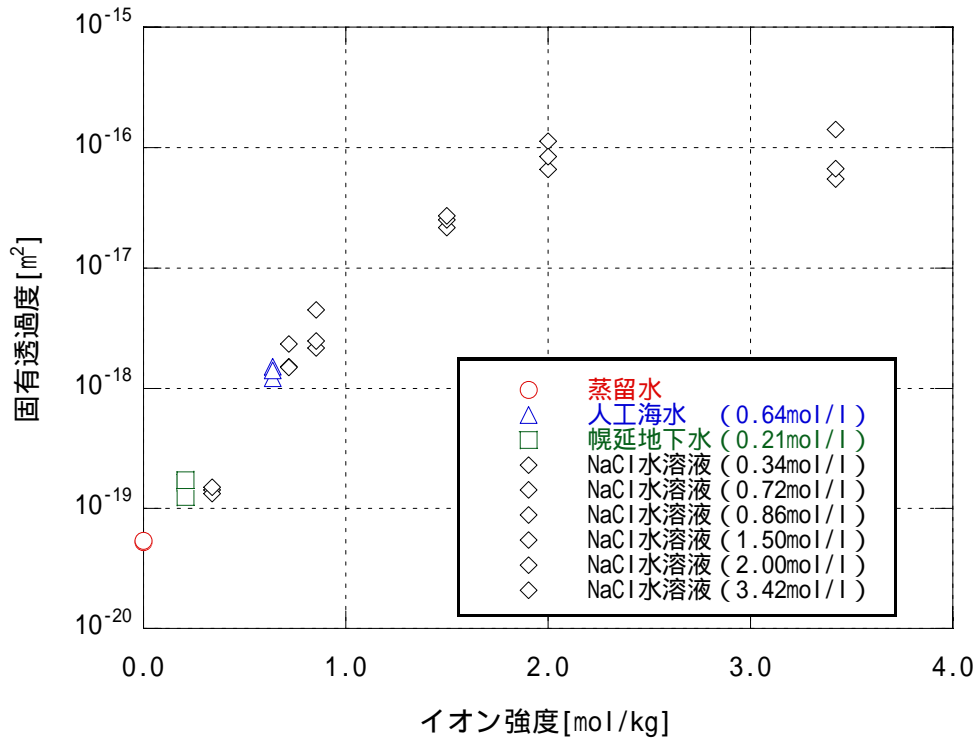


図 3.5-3 イオン強度と固有透過度の関係
(有効粘土密度 1.40[Mg/m³]における結果)

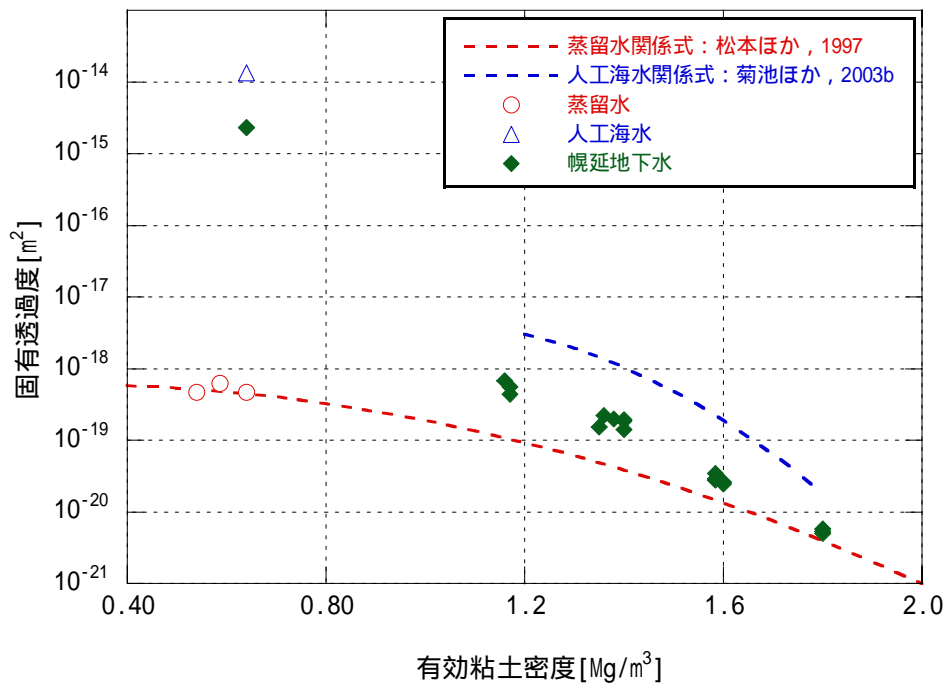


図 3.5-4 有効粘土密度と固有透過度の関係 (埋め戻し材仕様)

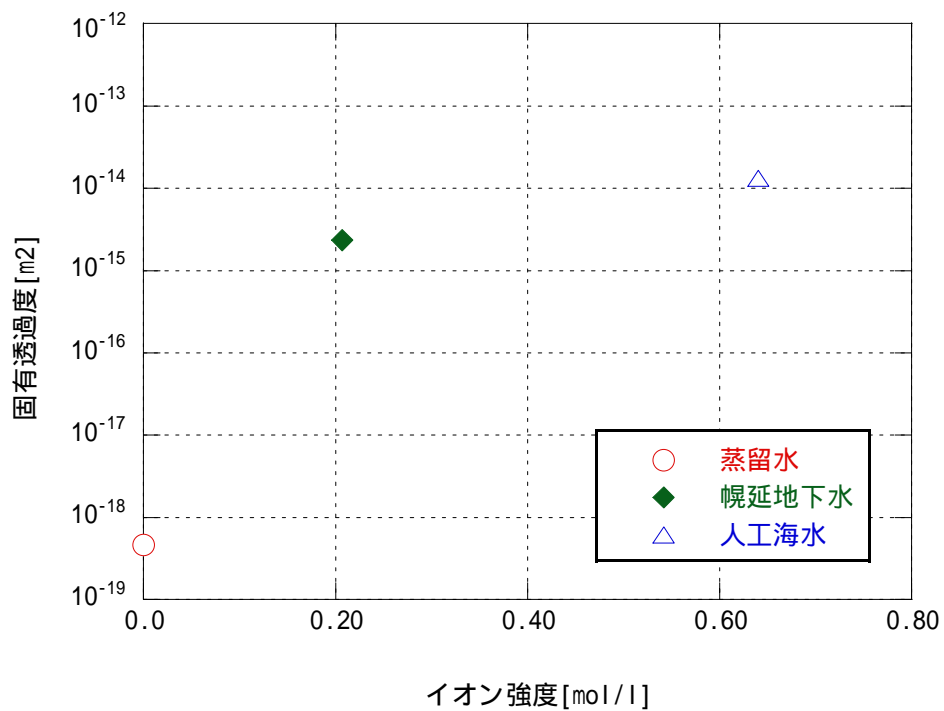


図 3.5-5 イオン強度と固有透過度の関係
(有効粘土密度 0.64[Mg/m³]における結果)

3.6 熱特性

3.6.1 測定原理

ホットディスク法熱物性測定装置は、図 3.6-1 に示すようにセンサーを 2 個の試料で挟み込みセンサーに定電流を流すことによって一定量を発熱させ、センサーの温度上昇から熱物性を求めるものである。センサーは、二重らせん構造になっており、発熱源であるとともに、温度変化をセンサーの電気抵抗変化として捉えることができる。また、写真 3.6-1 にホットディスク法熱物性測定装置およびセンサー部を示す。

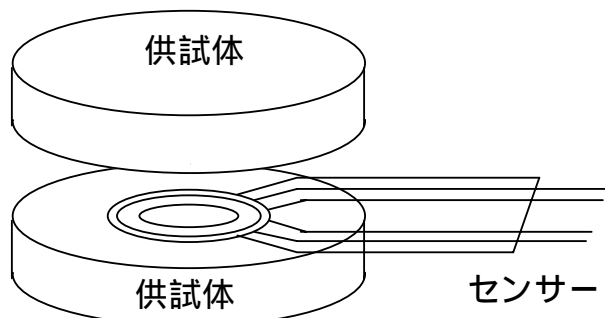


図 3.6-1 ホットディスク法熱物性測定装置のセットアップ

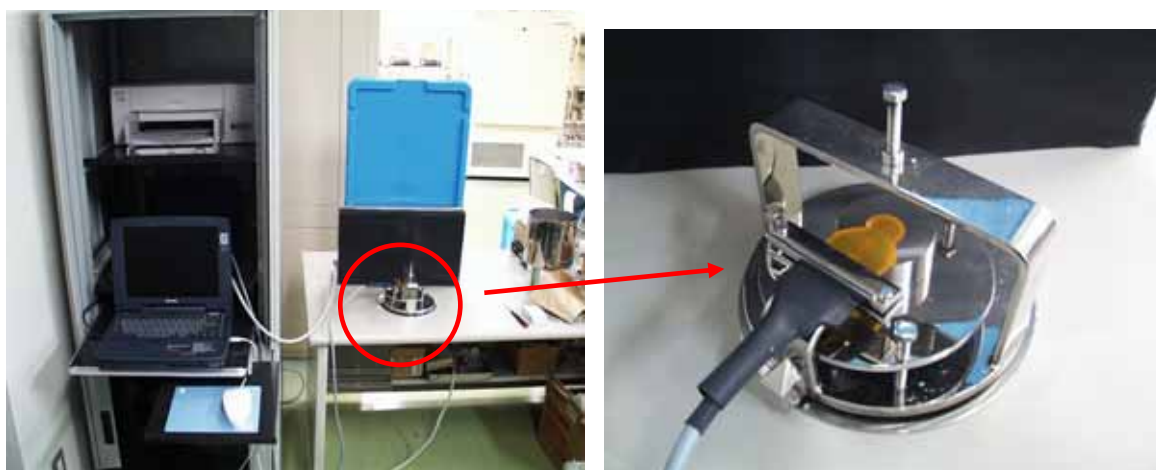


写真 3.6-1 ホットディスク法熱物性測定装置およびセンサー部

温度に依存する温度上昇 ΔT_{avg} は (11) 式により与えられる。

$$\Delta T_{avg}(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r \lambda} D(\tau) \quad (11)$$

ここで、 P_0 はセンサーに加えられた一定出力[W]、 r はセンサー半径[m]、 λ は試料の熱伝導率[W/mK]、 $D(\tau)$ は無次元化された時間 (12) 式の関数である。

$$\tau = \sqrt{\frac{t}{r^2 / \alpha}} \quad (12)$$

ここで、 t は、記録開始から測定される時間[sec]、 α は供試体の熱拡散率[mm²/s]である。

したがって、熱拡散率 α が正確であるならば、横軸に対して記録された温度を入力すれば、傾きが $P_0/\pi^{3/2}r\lambda$ の直線が得られる。すなわち、熱拡散率を変化させて直線が得られるように逐次近似を行い、熱伝導率と熱拡散率を同時に決定することになる。このように一度の測定で両物性値を同時に求めることができる。

3.6.2 試験条件

緩衝材仕様における熱物性試験条件を表 3.6-1 に示す。熱物性測定に関しては、緩衝材仕様のみ測定し、海水系地下水条件下(人工海水、幌延地下水)におけるベントナイト単体及びケイ砂混合体を対象に、供試体の乾燥密度をパラメータとして試験を実施した。なお、測定に使用した供試体においては、透水試験後の飽和試料を使用した。

表 3.6-1 熱物性試験条件

	ベントナイト単体	ケイ砂混合体
試料	ベントナイト(クニゲルV1)	
乾燥密度[Mg/m ³]	1.4, 1.6, 1.8	1.4, 1.6, 1.8
ケイ砂混合率[wt%]	0	30
試験水	人工海水, 幌延地下水	
飽和度[%]	100	
供試体寸法[mm]	50×h10	
装置発熱量[W]	0.3	0.3
測定時間[sec]	40	40
雰囲気温度[]	室温(約 20)	
測定回数[回]	3	
測定方法	非定常面熱源法	

3.6.3 測定結果

(a) 熱伝導率測定結果

幌延地下水および人工海水条件下でのベントナイト単体およびケイ砂混合体に関する熱伝導率の測定結果を図 3.6-2, 図 3.6-3 にそれぞれ示す。なお、これまでに得られた降水系地下水条件下(蒸留水)における各乾燥密度の熱伝導率の関係式に関する結果も併せて示す(菊池・棚井, 2003)

飽和含水比(飽和度 100%)におけるベントナイト単体試料およびケイ砂混合体試料ともに各乾燥密度における熱伝導率は、これまでに得られた降水系地下水条件下における関係式の結果とほぼ等しい値を示した。なお、幌延地下水条件下での乾燥密度 1.8Mg/m³、ケイ砂混合体試料においては、含水比測定の際、供試体表面に表面張力などによる薄い水膜が付着した影響により飽和含水比より高い値を示したため、関係式から外れたと考えられる。

また、図 3.6-4, 図 3.6-5 にベントナイト単体およびケイ砂混合体におけるイオン強度と熱伝導率の関係をそれぞれ示す。図からベントナイト単体およびケイ砂混合体試料ともに、幌延地下水および人工海水を用いた場合においても、蒸留水に比して同等の値を示すことが分かった。

一般に、土の熱伝導率は、固相率・含水率・石英含有量・有機物含有量に依存して変化するとされており(Gaylon S Campbell 著, 中野政詩, 東山勇訳, 1987), ベントナイト単体の供試体およびケイ砂混合の供試体ともに、液相における水分量のみの影響であるため、両者の熱伝導率に大きな差異はない結果になったと考えられる。

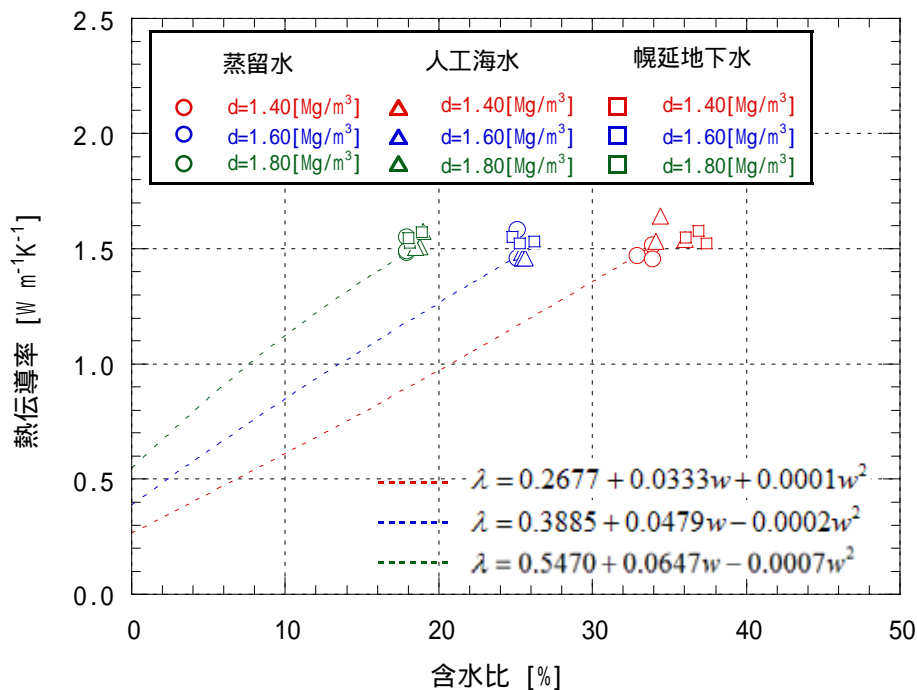


図 3.6-2 熱伝導率の測定結果（ベントナイト単体）

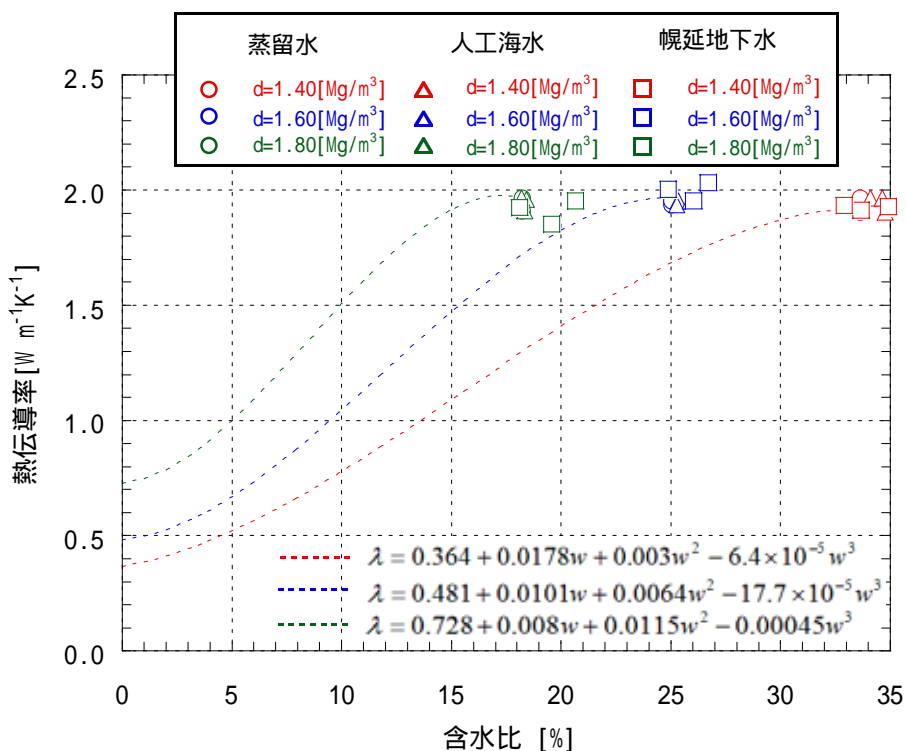


図 3.6-3 熱伝導率の測定結果（ケイ砂混合体）

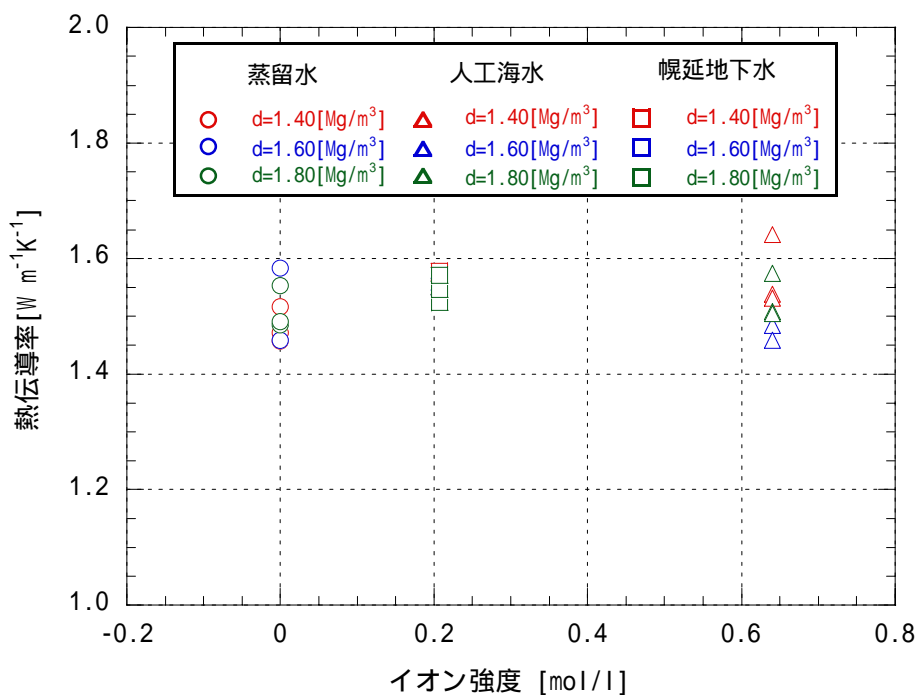


図 3.6-4 イオン強度と熱伝導率の関係 (ベントナイト単体)

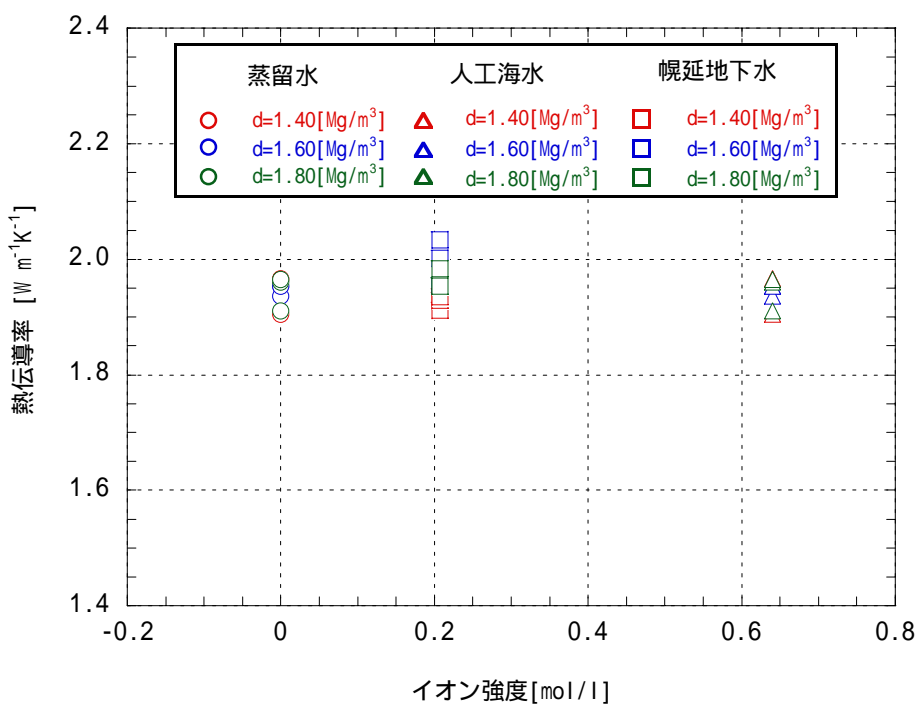


図 3.6-5 イオン強度と熱伝導率の関係 (ケイ砂混合体)

(b) 熱拡散率測定結果

幌延地下水および人工海水を用いた場合におけるベントナイト単体およびケイ砂混合体に関する熱拡散率の測定結果を図 3.6-6, 図 3.6-7 にそれぞれ示す。なお, これまでに得られた降水系地下水条件下 (蒸留水) における含水比と熱拡散率との関係 (菊池・棚井, 2003) も併せて示す。

上記の熱伝導率測定結果と同様, 熱拡散率においてもベントナイト単体試料およびケイ砂混合

体試料ともに各乾燥密度における飽和含水比（飽和度 100%）の熱拡散率は，これまでに得られた降水系地下水条件下における結果と同等となった。

また，図 3.6-8，図 3.6-9 にベントナイト単体およびケイ砂混合体におけるイオン強度と熱拡散率の関係をそれぞれ示す。図からベントナイト単体およびケイ砂混合体試料ともに，幌延地下水および人工海水を用いた場合においても，熱伝導率と同様に，蒸留水に比して同等の値を示すことがわかった。

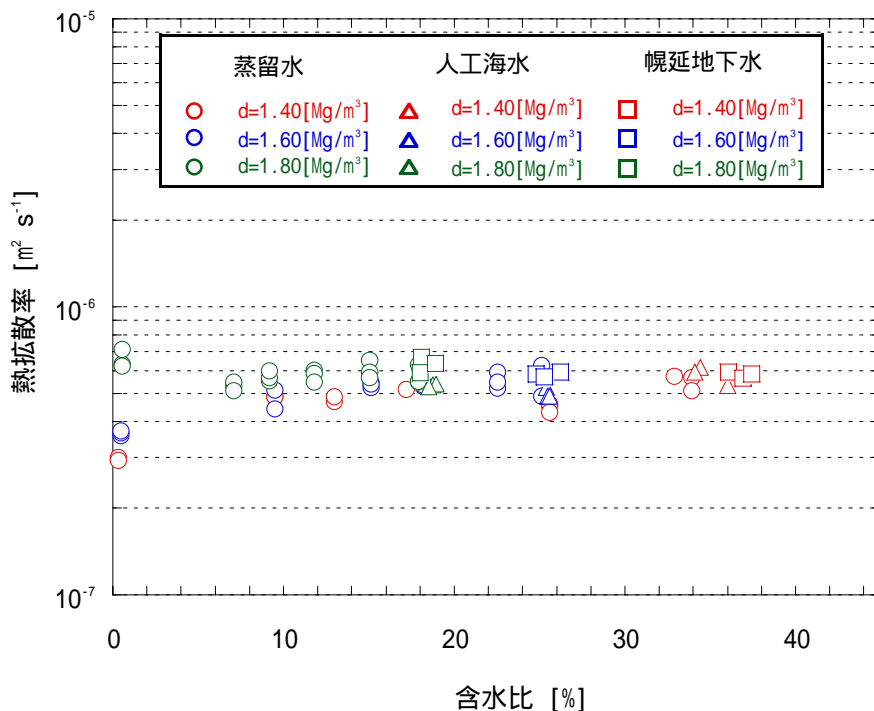


図 3.6-6 熱拡散率の測定結果（ベントナイト単体）

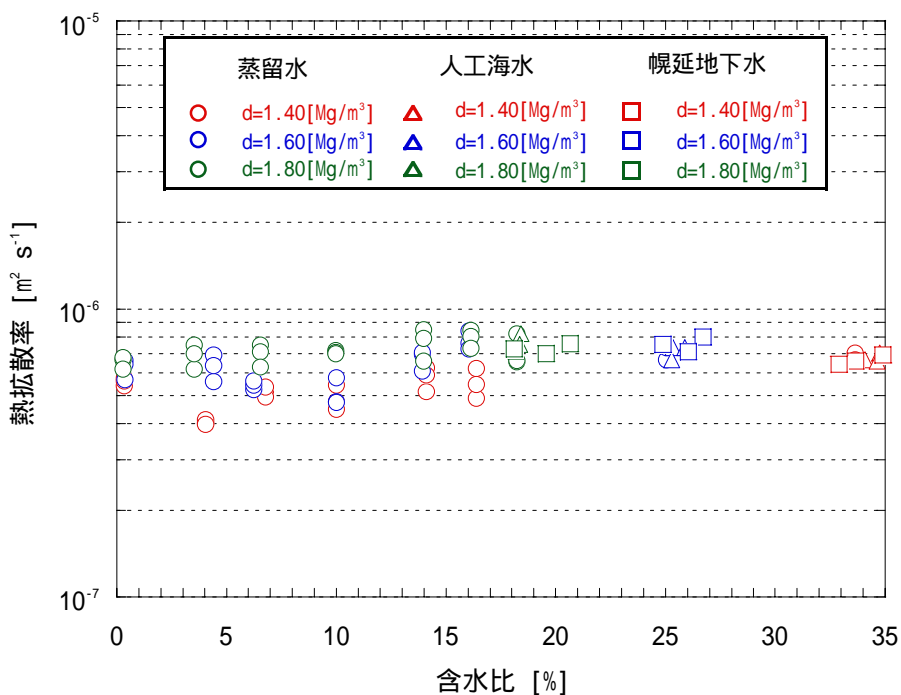


図 3.7-7 熱拡散率の測定結果（ケイ砂混合体）

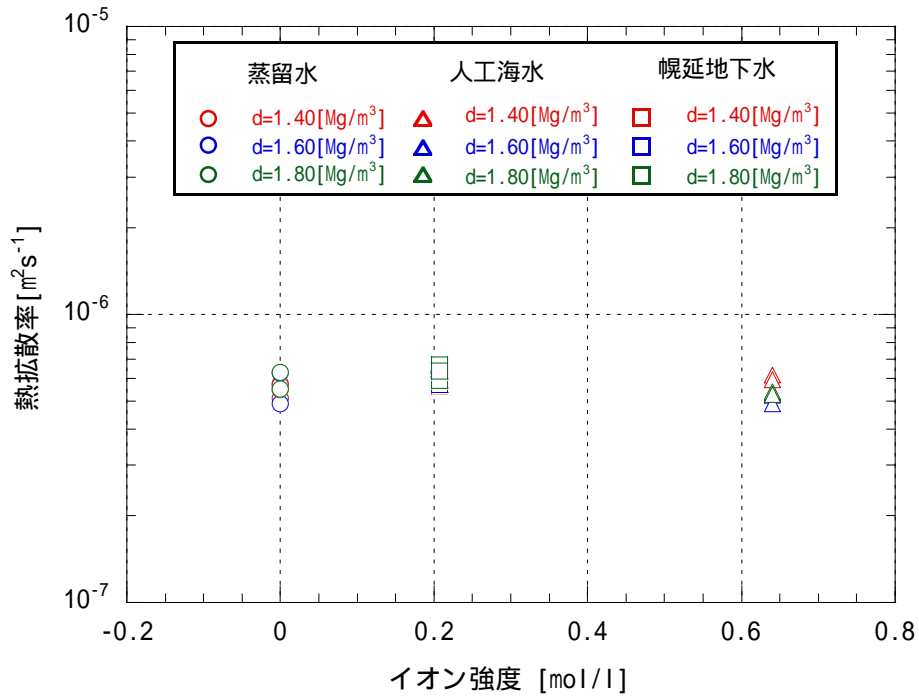


図 3.6-8 イオン強度と熱拡散率の関係 (ベントナイト単体)

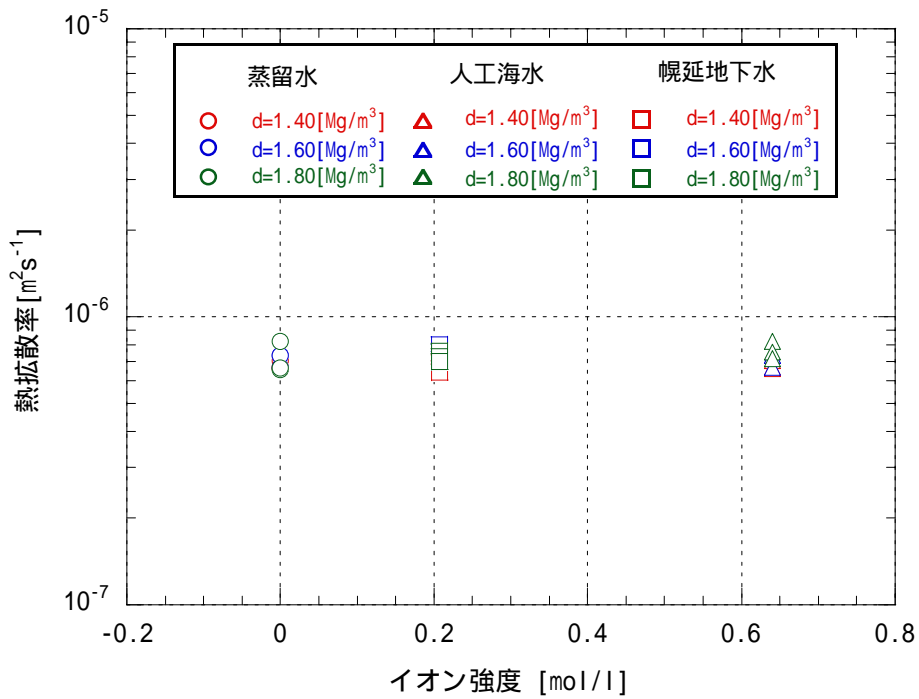


図 3.6-9 イオン強度と熱拡散率の関係 (ケイ砂混合体)

(c) 比熱

比熱と熱拡散率および熱伝導率の間には (13) 式の関係がある。

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (13)$$

ここで、熱拡散率 α [m²/s] は、熱伝導率 λ [W/mK] を比熱 c [kJ/kgK] と単位体積重量 ρ [kg/m³] で除したものであり、物質内の温度が非定常状態分布となる場合の熱拡散性の程度を示す係数である。

表 3.6-2 に本測定によって得られた熱物性値測定結果（熱伝導率，熱拡散率，比熱）を示すとともに図 3.6-10，図 3.6-11 に、熱伝導解析の際のモデル化に用いられる方法にて、これまでに菊池ら（菊池・棚井，2003）によって得られたベントナイト単体試料およびケイ砂混合体試料における理論値との比較を示す。

両図からベントナイト単体試料およびケイ砂混合体試料ともにこれまでに得られた降水系地下水条件下における比熱と同等の値が得られた。この結果から海水系地下水条件下においても菊池ら（菊池・棚井，2003）によって得られた (14) 式，(15) 式を用いて、圧縮ベントナイトの比熱を予測することができると考えられる。

・ベントナイト単体の場合

$$c = \frac{63.10 + 4.18w}{100 + w} \quad (14)$$

・ケイ砂混合体の場合

$$c = \frac{67.32 + 4.18w}{100 + w} \quad (15)$$

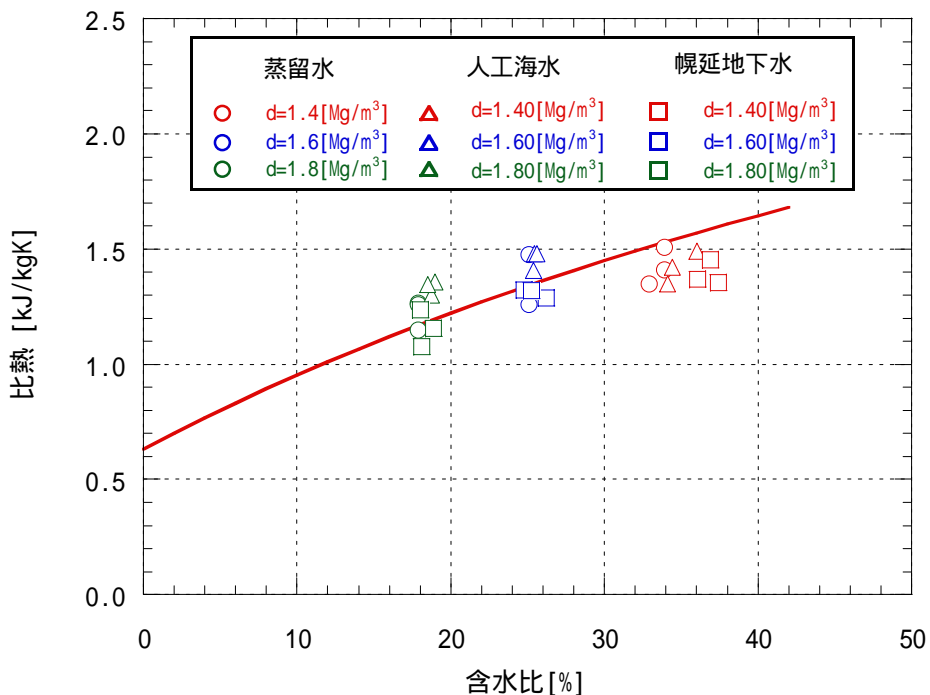


図 3.6-10 含水比と比熱の関係 (ベントナイト単体)

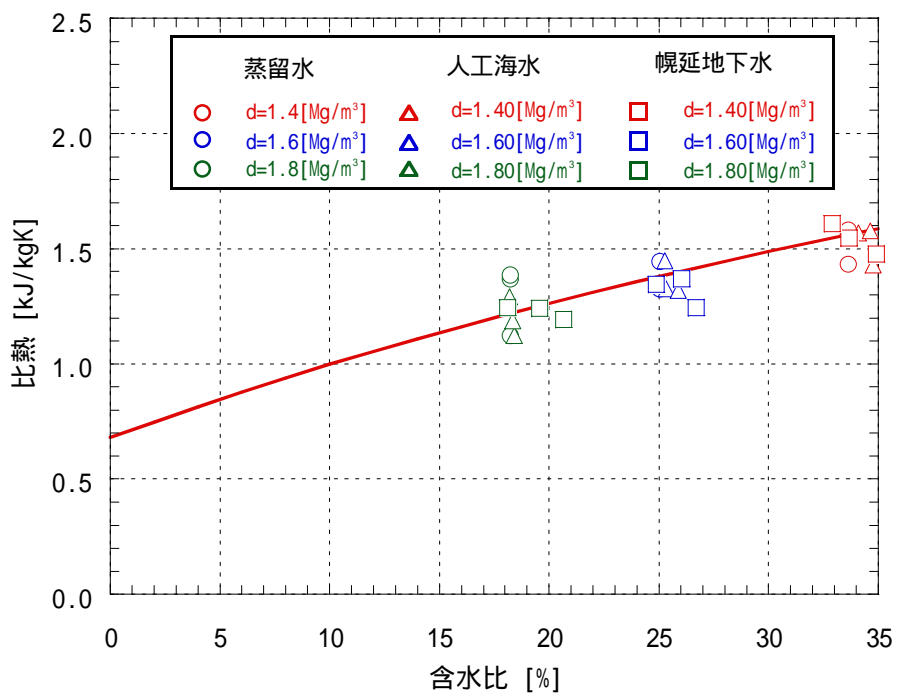


図 3.6-11 含水比と比熱の関係 (ケイ砂混合体)

表 3.6-2 熱物性値測定結果

NO.	乾燥密度 [Mg/m ³]	ケイ砂混合率 [wt%]	試験水	含水比 [%]	湿潤密度 [Mg/m ³]	熱伝導率 λ [W/mk]	熱拡散率 α [mm ² /s]	比熱 C [KJ/kgK]
1	1.40	0	人工海水	34.40	1.88	1.642	0.6149	1.420
	1.42			36.02	1.93	1.539	0.5351	1.490
	1.42			34.11	1.91	1.532	0.5941	1.350
2	1.60	0	人工海水	25.40	2.01	1.484	0.525	1.406
	1.60			25.45	2.01	1.459	0.491	1.478
	1.60			25.60	2.01	1.459	0.491	1.478
3	1.82	0	人工海水	18.74	2.16	1.508	0.5369	1.300
	1.81			18.96	2.15	1.574	0.5396	1.357
	1.79			18.51	2.12	1.505	0.5277	1.345
4	1.40	30	人工海水	34.76	1.89	1.905	0.706	1.430
	1.40			34.10	1.88	1.966	0.667	1.570
	1.40			34.64	1.88	1.965	0.660	1.579
5	1.60	30	人工海水	25.34	2.01	1.953	0.734	1.327
	1.60			25.29	2.00	1.936	0.667	1.448
	1.60			25.89	2.01	1.953	0.734	1.321
6	1.80	30	人工海水	18.42	2.13	1.961	0.820	1.122
	1.80			18.35	2.13	1.911	0.756	1.187
	1.80			18.21	2.13	1.965	0.716	1.290
7	1.40	0	幌延地下水	36.07	1.90	1.549	0.5944	1.368
	1.40			36.91	1.92	1.578	0.5671	1.452
	1.40			37.41	1.92	1.523	0.5848	1.354
8	1.59	0	幌延地下水	26.23	2.00	1.531	0.5932	1.288
	1.61			24.80	2.01	1.552	0.5841	1.322
	1.61			25.27	2.01	1.523	0.5722	1.321
9	1.80	0	幌延地下水	18.08	2.13	1.525	0.6669	1.076
	1.80			18.00	2.12	1.547	0.5893	1.236
	1.80			18.90	2.14	1.571	0.6356	1.155
10	1.40	30	幌延地下水	33.67	1.87	1.912	0.6602	1.545
	1.39			34.90	1.88	1.929	0.6946	1.476
	1.41			32.90	1.87	1.935	0.6437	1.609
11	1.61	30	幌延地下水	26.72	2.04	2.033	0.8007	1.245
	1.59			26.04	2.00	1.955	0.7122	1.370
	1.58			24.89	1.97	2.002	0.7545	1.345
12	1.80	30	幌延地下水	20.65	2.17	1.955	0.757	1.192
	1.80			18.12	2.12	1.924	0.727	1.246
	1.78			19.57	2.13	1.853	0.7001	1.242

3.7 一軸圧縮試験

3.7.1 試験条件

幌延地下水を用いた緩衝材仕様の一軸圧縮試験条件を表 3.7-1 に示す。試験は、供試体の有効粘土密度をパラメータとして、ケイ砂混合体（ケイ砂混合率 $R_s=30\text{wt}\%$ ）を対象に実施した。また、有効粘土密度 1.40Mg m^{-3} の供試体については、幌延地下水との比較および力学特性に及ぼす塩濃度の影響を確認するため、比較試験溶液として NaCl 濃度 0.2, 0.4, 0.8mol/l の 3 種類の試験も実施した。さらに、一軸圧縮試験に関しては、定量的な比較を行うために、蒸留水による試験も実施した（高治ほか，2004）。

表 3.7-1 試験条件(緩衝材仕様)

試料	ケイ砂混合体		
	ベントナイト（クニゲル V1）		
乾燥密度 [Mg/m^3]	1.43	1.63	1.82
ケイ砂混合率 [wt%]	30	30	30
目標有効粘土密度 [Mg/m^3]	1.20	1.40	1.60
供試体寸法 [mm]	30×h60		
初期含水比 [%]	6.04		
試験数	同一供試体条件で 3 本（計 27 本）		
載荷速度 [$\% \text{min}^{-1}$]	0.17		
試験水	蒸留水, 幌延地下水, NaCl 溶液(0.2, 0.4, 0.8[mol/l])		

3.7.2 試験方法

供試体は、所定の乾燥密度になるようにあらかじめ重量を計測したベントナイト粉末材料をケイ砂と攪拌して円筒形の鋼製容器内に投入し、プレス機を用いて側方拘束条件で一方向からある程度圧縮する。その後もう一方から圧縮成型して作製した。この時の圧縮成型圧は目標有効粘土密度 $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ で約 7～8MPa，目標有効粘土密度 $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$ で約 23～26MPa，目標有効粘土密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ で約 55～65MPa であった。圧縮成型した直後の供試体を写真 3.7-1 に示す。

圧縮成型した供試体を孔径 $2\mu\text{m}$ のテフロンシートで包み、飽和セルにセットした。飽和セルは供試体の全面から水を供給できるような仕組みとなっている。飽和セルに供試体をセットした後、セルにサクシオンポンプをつなぎ数十分間～1時間程度の間飽和セル内の空気を真空引きし、その後セルからサクシオンポンプを外し、水圧約 0.3MPa で供試体に給水を行った。供試体への給水状況を写真 3.7-2 に示す。

飽和開始後 1 ヶ月程度経過した後セルより供試体を取り出し、重量を測定した後一軸試験装置にセットし、載荷速度 $0.17[\% \text{min}^{-1}]$ で、軸ひずみが 15%になるまで試験を実施した。また、試験終了後 110 の恒温槽で 48 時間炉乾燥し、乾燥重量を測定した。

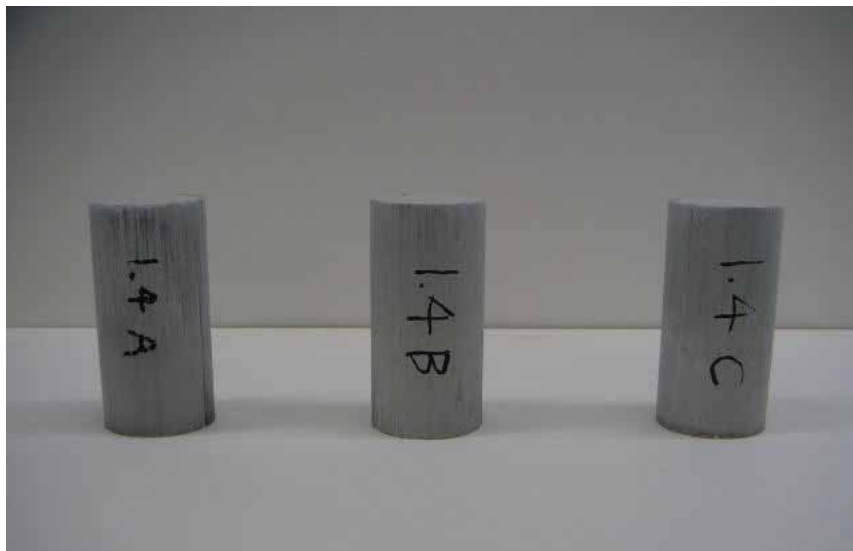


写真 3.7-1 一軸圧縮試験用供試体（圧縮成型後）



写真 3.7-2 供試体への給水状況

3.7.3 試験結果

圧縮成型直後，飽和セルからの取出し時の寸法および重量，試験終了後に求めた乾燥重量およびそれらの値から求めた飽和含水比および飽和度，有効粘土密度を表 3.7-2 に示す。

表より，飽和度は 96.48～102.69[%]の範囲となっており，飽和状態であったことを確認した。また，飽和セル内の供試体高さが 60mm より若干大きいことが主要因で，有効粘土密度は当初の目標とした密度より全体的に若干小さくなった。

図 3.7-1 に蒸留水供試体における各有効粘土密度の応力 - ひずみ関係を示すとともに，図 3.7-2 に幌延地下水供試体における各有効粘土密度の応力 - ひずみ関係を示す。

なお，一軸圧縮応力 σ の算出時には，軸ひずみ ε_a により (14) 式を用いて補正した。

$$\sigma = (1 - \varepsilon_a) \frac{F}{A_0} \quad (14)$$

ここで， F は載荷荷重， A_0 は試験開始時（飽和セル取出し時）の断面積である。

図 3.7-3 に蒸留水および幌延地下水を用いた供試体の有効粘土密度と一軸圧縮強度 qu の関係を示す。また，図 3.7-4 から一軸圧縮強度 qu と有効粘土密度 ρ_b との近似式は(17)式および(18)

式のようになる。

蒸留水

$$qu = 1.0 \times 10^{-3} \exp(4.4565 \rho_b) \quad (17)$$

幌延地下水

$$qu = 1.4 \times 10^{-4} \exp(5.637 \rho_b) \quad (18)$$

qu : 一軸圧縮強度 [MPa]

ρ_b : 有効粘土密度 [Mg/m³]

図 3.7-5 に蒸留水および幌延地下水を用いた供試体の有効粘土密度と弾性係数 E_{50} の関係を示す。なお、図 3.7-3、図 3.7-5 には蒸留水を用いた既報データ（高治・鈴木，1999）も併せて示している。

図 3.7-3 および図 3.7-5 から一軸圧縮強度および弾性係数ともに、幌延地下水を用いた場合、蒸留水に比して、目標有効粘土密度 1.6 Mg/m³ においては、ほぼ同等の値を示すものの、密度が低下するに従い、一軸圧縮強度、弾性係数ともに低下する傾向があることが示された。

次に、目標有効粘土密度 1.4 Mg/m³ の供試体のみに関して、イオン強度をパラメータとした試験を実施した。図 3.7-6 に各溶液の応力 - ひずみの関係を示す。また、図 3.7-7 にイオン強度と一軸圧縮強度の関係を、また、図 3.7-8 にイオン強度と弾性係数の関係を示す。図 3.7-7 から、蒸留水供試体に比して、NaCl 0.2 mol/l の場合一軸圧縮強度は、ほぼ同等の値を示すものの、NaCl 0.4 mol/l の場合、平均値で約 1 割程度低下し、NaCl 0.8 mol/l の場合、平均値で約 4 割程度低下する。さらに、幌延地下水を用いた場合、NaCl 0.2 mol/l と同等のイオン強度にも係わらず、平均値で約 3 割程度低下する結果となった。

次に、図 3.7-8 から、NaCl 0.2 mol/l の弾性係数以外は、蒸留水に比して、低い値を示し、NaCl 0.4 mol/l の場合、平均値で約 3 割程度低下し、NaCl 0.8 mol/l の場合、平均値で約 2 割程度低下する。さらに、幌延地下水を用いた場合、平均値で約 2 割程度低下する結果となった。以上の結果から一軸圧縮強度、弾性係数ともに、多少ばらつきはあるものの、概ね塩濃度に依存して強度、剛性ともに低下することがわかった。しかしながら、幌延地下水に関しては、NaCl 以外の地下水成分が力学挙動に影響している可能性もあり、今後より詳細に検討する必要がある。

試験終了後の供試体状況として、各有効粘土密度の幌延地下水供試体の破壊状況を写真 3.7-3 ~ 写真 3.7-5 に示す。ほぼ全ての供試体で一方の端部から載荷に伴って軸方向に亀裂が進展しながら押し広げていくような圧縮破壊となった。

表 3.7-2 供試体状態量の測定結果

目標有効粘土密度 [Mg/m ³]	試験水	No	圧縮成型時			飽和セル取出後			炉乾燥後	含水比	飽和度 [%]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	
			重量[g]	直径[cm]	高さ[cm]	重量[g]	直径[cm]	高さ[cm]	重量[g]	[%]			
1.20	蒸留水	1	63.42	2.95	5.91	81.40	3.00	6.14	60.27	35.06	100.98	1.15	
		2	63.44	2.95	5.98	8.130	3.00	6.10	60.30	34.83	101.68	1.16	
		3	63.43	2.95	6.01	82.00	3.01	6.12	60.62	35.27	102.69	1.16	
	幌延地下水	1	63.31	2.98	5.99	78.62	2.97	6.00	58.79	33.73	100.97	1.17	
		2	63.42	2.98	5.96	80.51	2.97	6.08	60.91	32.18	100.47	1.21	
		3	63.38	2.98	5.93	80.55	2.97	6.10	60.70	32.70	100.71	1.20	
1.40	蒸留水	1	72.15	2.95	5.95	87.05	3.00	6.17	68.59	26.91	102.36	1.34	
		2	72.18	2.95	5.96	86.70	3.00	6.15	68.62	26.35	101.31	1.35	
		3	72.06	2.95	5.98	86.80	3.02	6.14	68.46	26.79	99.90	1.32	
		4	7202	295	5.95	86.54	3.01	6.11	68.53	26.28	101.19	1.35	
	幌延地下水	1	71.91	2.95	5.91	86.68	3.00	6.12	69.03	25.57	100.26	1.36	
		2	71.88	2.95	5.95	86.49	3.01	6.15	68.80	25.71	98.21	1.34	
		3	7190	295	5.94	86.56	3.01	6.13	69.00	25.45	98.96	1.35	
	NaCl溶液 [mol/l]	0.2	1	72.12	2.95	5.97	87.06	3.00	6.15	69.39	25.46	100.28	1.37
			2	7217	295	5.97	86.80	3.00	6.10	69.74	24.95	100.54	1.38
			3	72.05	2.95	5.99	86.90	3.00	6.11	69.36	25.29	101.32	1.30
		0.4	1	72.11	2.95	5.94	87.14	3.00	6.12	69.58	25.24	101.00	1.38
			2	72.11	2.95	5.96	87.18	3.00	6.14	69.56	25.33	100.40	1.37
			3	72.14	2.95	5.96	87.08	3.00	6.12	69.47	25.35	100.88	1.37
		0.8	1	71.69	2.95	5.95	87.08	3.00	6.18	69.16	25.91	99.66	1.35
			2	71.79	2.95	5.95	86.69	3.00	6.13	69.29	25.11	99.67	1.37
			3	72.01	2.95	5.95	86.87	3.02	6.14	69.46	25.06	96.48	1.35
	1.60	蒸留水	1	80.09	2.95	5.94	91.86	3.01	6.19	76.13	20.66	100.70	1.50
			2	80.15	2.95	5.95	91.39	3.02	6.14	76.15	20.01	98.72	1.51
3			8026	295	6.01	91.74	3.01	6.18	76.24	20.33	99.58	1.51	
幌延地下水		1	79.46	2.98	5.91	91.00	3.00	6.13	76.16	19.49	99.89	1.54	
		2	79.81	2.98	5.94	91.30	3.00	6.15	76.36	19.57	100.25	1.54	
		3	79.79	2.98	5.94	91.30	3.00	6.17	76.27	19.71	99.69	1.53	

表 3.7-3 一軸圧縮試験結果

目標有効粘土密度 [Mg/m ³]	試験水	NO.	有効粘土密度 [Mg/m ³]	一軸圧縮強度 [MPa]	弾性係数 [MPa]	
1.20	蒸留水	1	1.15	0.17	11.22	
		2	1.16	0.18	11.89	
		3	1.16	0.19	16.27	
	幌延地下水	1	1.17	0.09	4.81	
		2	1.21	0.15	10.73	
		3	1.20	0.13	7.91	
1.40	蒸留水	1	1.34	0.36	19.01	
		2	1.35	0.34	21.51	
		3	1.32	0.32	25.42	
		4	1.35	0.37	21.39	
	幌延地下水	1	1.36	0.28	15.58	
		2	1.34	0.20	19.84	
		3	1.35	0.27	17.90	
	NaCl溶液 [mol/l]	0.2	1	1.37	0.32	22.04
			2	1.38	0.35	27.62
			3	1.38	0.32	23.22
		0.4	1	1.38	0.31	17.58
			2	1.37	0.30	13.22
			3	1.37	0.30	16.05
		0.8	1	1.35	0.26	13.89
			2	1.37	0.20	18.65
3			1.35	0.18	12.02	
1.60	蒸留水	1	1.50	0.87	38.28	
		2	1.51	0.88	41.23	
		3	1.51	0.85	40.03	
	幌延地下水	1	1.54	0.87	82.79	
		2	1.54	0.83	47.09	
		3	1.53	0.80	46.98	

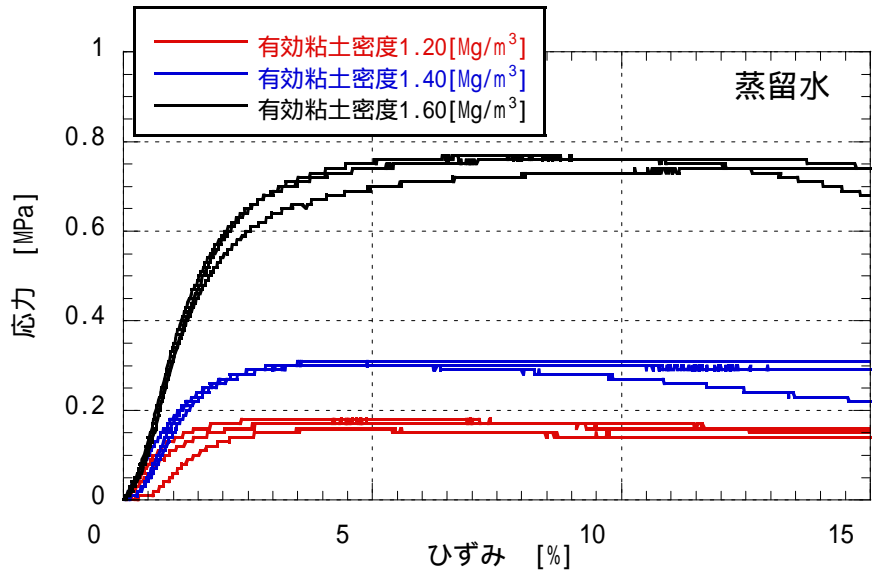


図 3.7-1 応力 - ひずみ関係 (蒸留水)

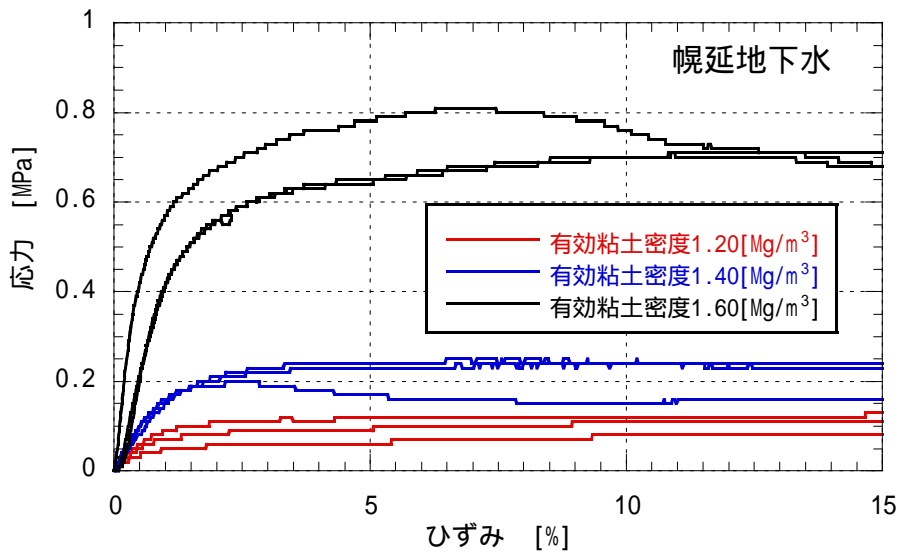


図 3.7-2 応力 - ひずみ関係 (幌延地下水)

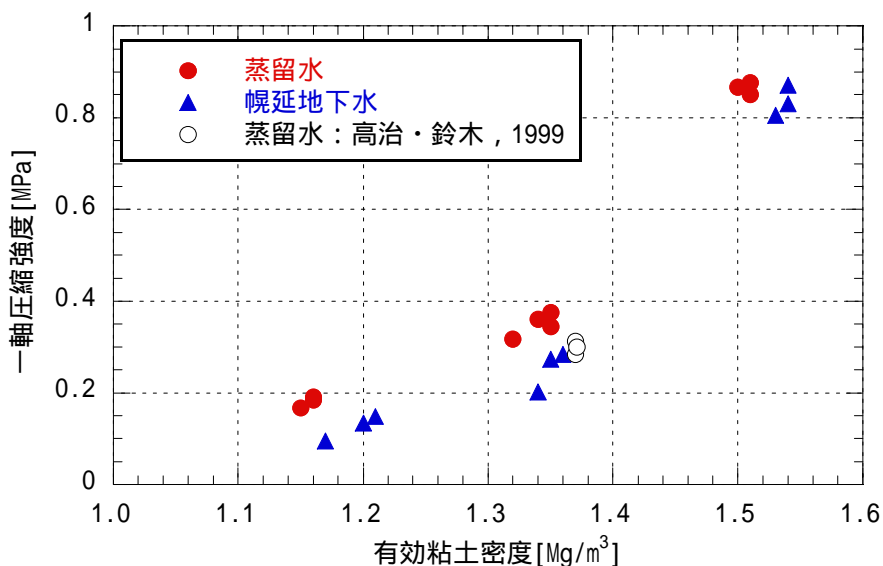


図 3.7-3 有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係 (蒸留水, 幌延地下水)

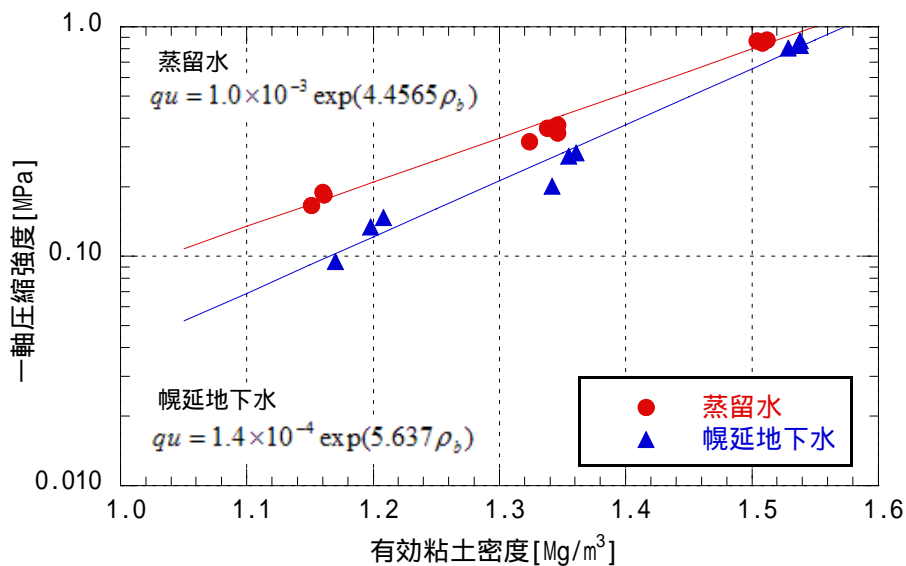


図 3.7-4 有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係の近似式 (蒸留水, 幌延地下水)

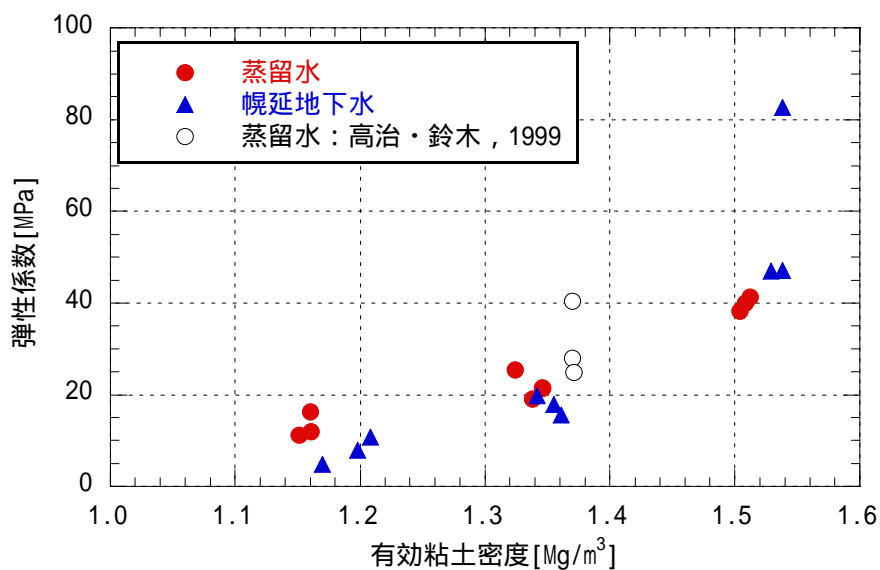


図 3.7-5 有効粘土密度と弾性係数の関係 (蒸留水, 幌延地下水)

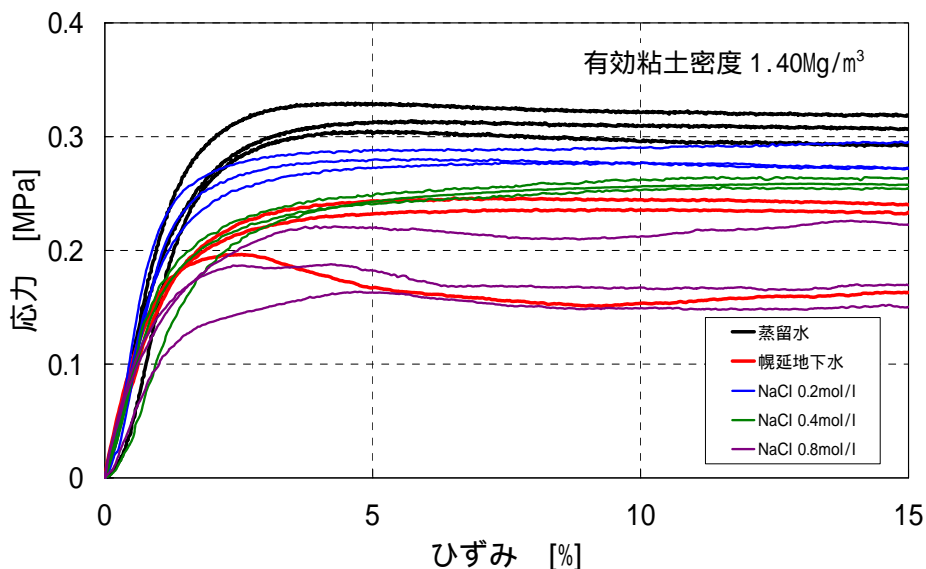


図 3.7-6 応力 - ひずみ関係 (有効粘土密度 1.40[Mg/m³])

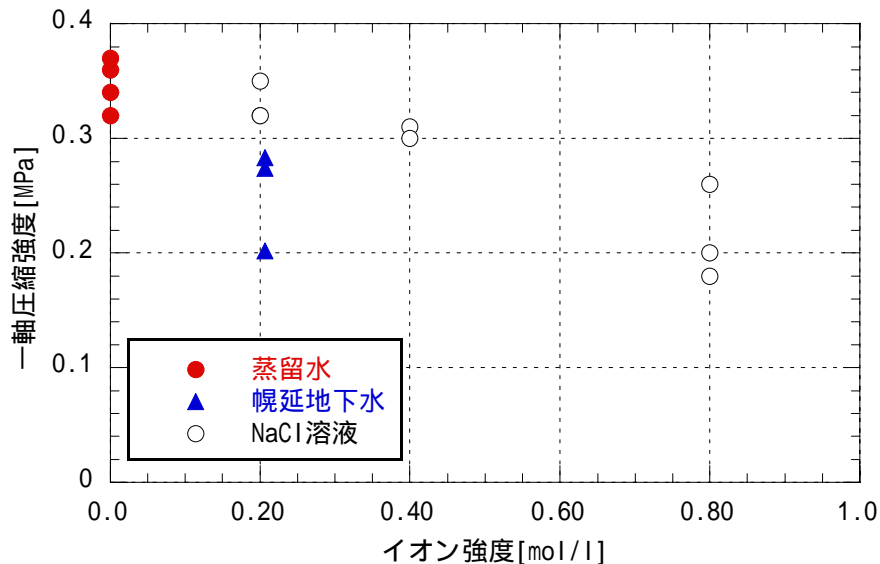


図 3.7-7 イオン強度と一軸圧縮強度の関係 (有効粘土密度 1.40[Mg/m³])

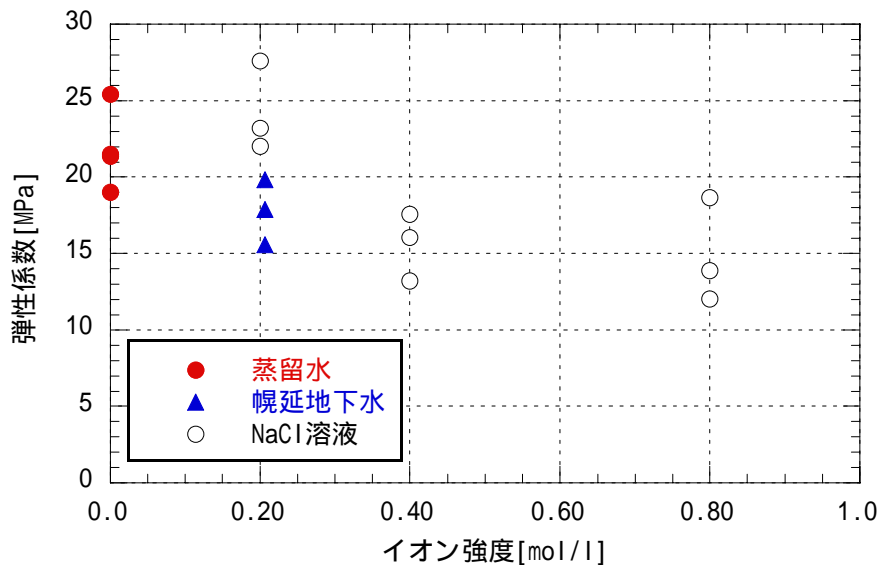


図 3.7-8 イオン強度と弾性係数の関係 (有効粘土密度 1.40[Mg/m³])



写真 3.7-3 破壊後状況（幌延地下水供試体，有効粘土密度 $1.20[\text{Mg}/\text{m}^3]$ ）

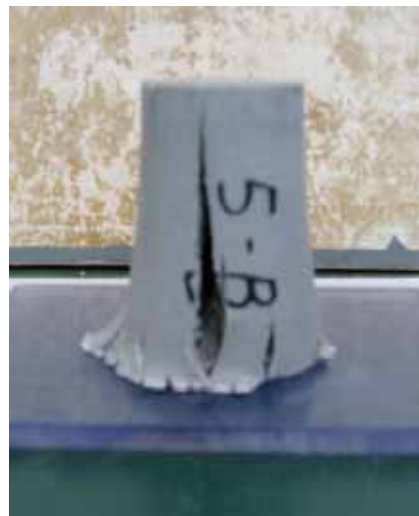


写真 3.7-4 破壊後状況（幌延地下水供試体，有効粘土密度 $1.40[\text{Mg}/\text{m}^3]$ ）



写真 3.7-5 破壊後状況（幌延地下水供試体，有効粘土密度 $1.60[\text{Mg}/\text{m}^3]$ ）

3.8 一次元圧密試験

3.8.1 一次元圧密試験装置概要

一次元圧密試験は、側方拘束条件下で試料の圧縮および膨潤に対する変形挙動を調べる試験である。側方変位を拘束した飽和供試体に段階的に荷重を載荷し、その変位を計測することにより、圧密沈下量と時間の関係 ($\Delta d \sim \log t$ 曲線) や間隙比と圧密応力の関係 ($e \sim \log P$ 曲線) 等が得られる。本試験は、高圧圧密試験装置を用いて行った。装置概略図を図 3.8-1 に示す。軸荷重の載荷は、空圧載荷式である。荷重の計測はロードセル、軸変位はダイヤルゲージより得られた電気信号をデータロガーで指定したインターバルで取り込むようになっている。

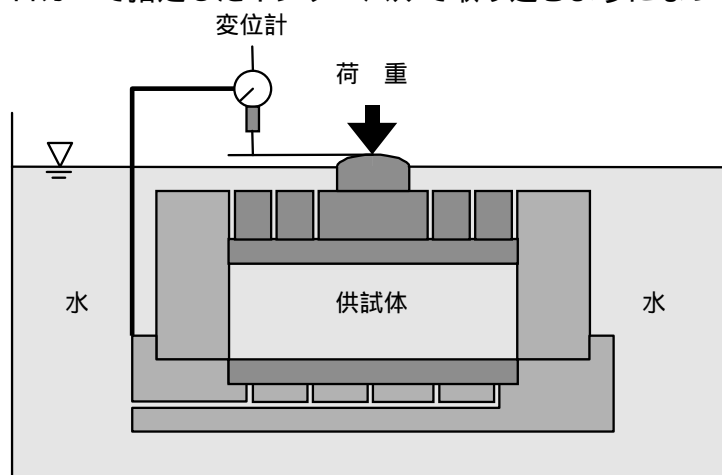


図 3.8-1 試験装置概略図

3.8.2 試験条件

一次元圧密試験条件を表 3.8-1 に、各ステップの載荷条件を表 3.8-2 に示す。試験は、有効粘土密度 1.40Mg/m^3 のケイ砂混合体 (ケイ砂混合率 $R_s=30\text{wt}\%$) 材料を対象とした。ケイ砂材料および配合は、3号 15wt%、5号 15wt% である。試験水は、幌延地下水および、NaCl 溶液濃度 0.2, 0.8mol/l を対象とした。

飽和供試体は側方拘束条件でプレス機にて圧縮成型した後、体積拘束条件で給水することによって作製した。供試体寸法は直径 $\phi=60\text{mm}$ 、高さ $h=20\text{mm}$ である。

給水により発生する膨潤応力がほぼ一定になった時点初期条件とし、19.6MPa まで 8 段階で荷重を載荷した。その後、初期膨潤応力相当まで 4 段階で除荷し、再び 19.6MPa まで 4 段階で再載荷した。各段階の載荷応力是对数軸上で載荷応力の間隔が等しくなるよう設定した。また、各載荷段階での圧密終了は 3t 法により判断した。試験方法および手順などは、基本的に地盤工学会基準 JGS T411 (地盤工学会, 2000) に準拠しているが、上記載荷応力などについて若干の変更を行った。

表 3.8-1 試験条件

試料	ケイ砂混合体 ベントナイト (クニゲル V1)
乾燥密度 [Mg/m^3]	1.63
ケイ砂混合率 [wt%]	30 (3号と5号を重量比 1対1で混合)
有効粘土密度 [Mg/m^3]	1.40
供試体寸法 [mm]	60×h20
初期含水比 [%]	6.04
試験数	同一供試体条件で 1本 (計 3本)
試験温度 []	室温
試験水	幌延地下水, NaCl 溶液 (0.2, 0.8[mol/l])
載荷条件	表 3.8-2 参照

表 3.8-2 各ステップの载荷条件

载荷過程

载荷ステップ	初期	step1	step2	step3	step4	step5	Step6	step7	step8
载荷応力[MPa]	膨潤応力 0.36	0.59	0.98	1.61	2.66	4.38	7.22	11.89	19.60

除荷過程

载荷ステップ	step u1	step u2	step u3	step u4
载荷応力[MPa]	7.22	2.66	0.98	0.36

再载荷過程

载荷ステップ	step r1	step r2	step r3	step r4
载荷応力[MPa]	0.98	2.66	7.22	19.60

3.8.3 試験結果

それぞれの供試体の最大成型圧と各供試体の乾燥重量，乾燥密度および間隙比を表 3.8-3 に示す。

表 3.8-3 各供試体の最大成型圧と初期間隙比

供試体	幌延地下水	NaCl 0.2mol/l	NaCl 0.8mol/l
最大成型圧[MPa]	10.4	10.4	10.4
载荷前乾燥重量 [g]	92.0	92.0	92.3
载荷前乾燥密度 [Mg/m ³]	1.63	1.63	1.63
载荷前有効粘土密度 [Mg/m ³]	1.40	1.40	1.40
圧密前間隙比	0.647	0.649	0.642

(a) 膨潤過程

圧密を行う前に圧縮成型した供試体に，それぞれの試験溶液による給水を行い飽和させた。飽和時は加圧板を固定し，軸方向の荷重をロードセルにより測定した。給水開始後，各供試体ともに膨潤応力が発生し，各供試体に発生した膨潤応力の経時変化を図 3.8-2 に示す。図より，各供試体とも給水直後から膨潤応力は上昇し，イオン強度がほぼ同じである幌延地下水と NaCl 0.2 mol/l は 0.5MPa 前後のピークに達した後低下し，再度上昇した後 70～100 時間経過後，幌延地下水は約 0.36MPa，NaCl 0.2 mol/l は約 0.38MPa でほぼ平衡膨潤応力となった。NaCl 0.8 mol/l の膨潤応力は約 0.4MPa のピークに達した後低下し，その後，約 0.34MPa で平衡膨潤応力となった。

また，本測定条件における平衡膨潤応力に関しては，前記した幌延地下水条件下における膨潤応力測定結果とほぼ同等の値を示す結果となった。

各供試体とも約 330 時間経過後時において，供試体はほぼ飽和したと判断し，圧密試験に移行することとした。

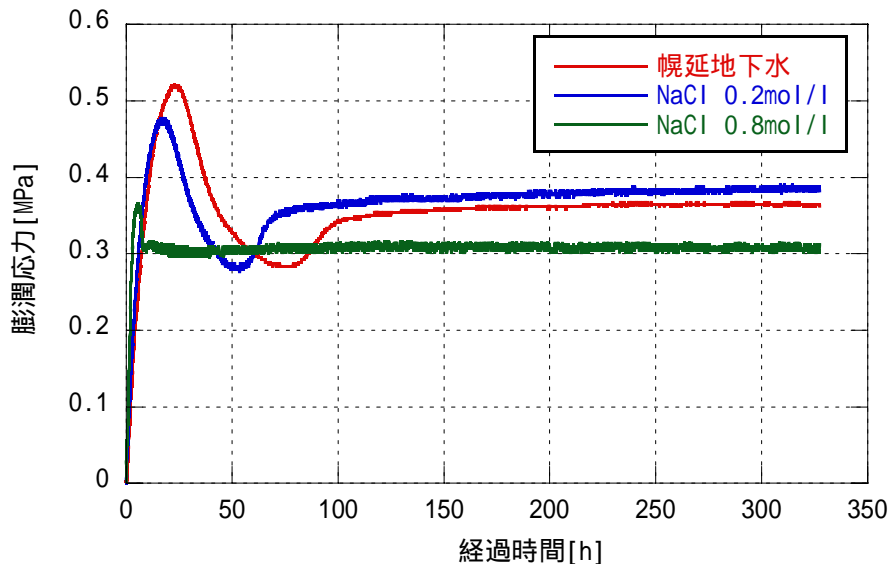


図 3.8-2 膨潤応力の経時変化

(b) 載荷過程

圧密試験では、膨潤応力から 19.6MPa まで 8 段階に分けて表 3.8-4 (載荷過程) に示す圧密応力を軸方向に載荷した。膨潤応力は(a)項に示すように各供試体で 0.36 ~ 0.40MPa の差が見られたが、最も低い 0.36MPa を各供試体共通の膨潤応力として各ステップの載荷応力を設定した。各ステップでの圧密終了は 3t 法 (地盤工学会, 2000) により確認した。

ただし、step 4 (2.66MPa) の載荷時に、幌延地下水供試体のみレギュレーターが故障し、載荷途中から 5.38MPa の過負荷状態となってしまった。そこで、一旦 2.66MPa まで除荷してしばらく変位計測を行ったが、既に 5.38MPa までの過圧密状態となっていたため、再度 5.38MPa まで載荷し、その載荷応力を step 4 の応力とし、3t 法によって圧密終了判定を行った。5.38MPa は step 5 の載荷応力 4.38MPa をも上回っていたため、次ステップは幌延地下水供試体のみ step 6 の載荷応力 7.22MPa を載荷することとした。実質的には幌延地下水供試体のみ載荷ステップが 1 ステップ少なくなっただけであり、供試体の構造上の乱れが生じたわけではないため、e-logP 関係等には影響を及ぼしていないものと考えられる。

各供試体が各ステップに要した載荷軸応力と載荷時間を表 3.8-4 に示す。1 ステップ当たりの載荷時間は約 44 時間 ~ 264 時間である。表中の幌延地下水供試体の step4 の載荷時間が“114+160”とあるが、“過負荷から一旦 2.66MPa まで戻して載荷した時間+再度 5.38MPa まで載荷した時間”に分けた表記である。表より NaCl 0.8mol/l 供試体の載荷時間が相対的に短いことが分かる。これは、イオン強度が高いほど透水係数が大きくなるため圧密が早く終了したと考えられる (図 3.5-2 参照)。

各載荷ステップでの供試体の圧密沈下量の経時変化 (時間軸は対数軸としている) を図 3.8-3 ~ 図 3.8-10 にそれぞれ示す。なお、前述のように幌延地下水供試体のみ step4 は過負荷から一旦 2.66MPa まで戻して載荷した時の経時変化と再度 5.38MPa まで載荷した時の経時変化とに分けて同一グラフ上に示している (図 3.8-6 参照)。また、各 step の初期値は前 step の最終沈下量としているため、各ステップの沈下量の合計が累積沈下量に相当する。表 3.8-5 に、各ステップの沈下量と累積沈下量を示す。

最初のステップは載荷応力の変化が小さかったことから変形量がかなり小さくほとんど変形しなかったが、それ以降の各ステップでは圧密沈下量と時間の関係の傾向はほぼ同じであり、一般の粘土の圧密現象と同様な関係となっていることがわかる。また、圧密の前半では一次圧密が生じ、一次圧密が終了した後も二次圧密に相当すると考えられる経過時間の対数にほぼ比例する沈下が認められる。step6 までは各供試体の累積沈下量に大きな差は無く、間隙水の違いの影響は小さい。step7, 8 では相対的に NaCl 0.2 mol/l 供試体、幌延地下水供試体の変形量が NaCl 0.8mol/l 供試体に比して大きく、特に step8 において幌延地下水供試体は NaCl 0.8 mol/l 供試体に比して 2 倍以上の変形を示した。ただし、図 3.8-9、図 3.8-10 から分かるように、幌延地下

水供試体および NaCl 0.2mol/l 供試体はそれ以前のステップの挙動と異なり，载荷と同時に 0.1mm 以上の有為な変形を示しており，特に NaCl 0.2 mol/l 供試体の step8 では前ステップの変形量の約 1/2 に相当する変形が载荷と同時に生じていることになる。これは，単なる材料特性ではなく，加圧板部のわずかなねじのゆるみがあったこと等により，载荷荷重が大きくなるにつれてその影響による有為な変形量が加わったものと思われる。

表 3.8-4 各载荷ステップの载荷応力と载荷時間（载荷過程）

载荷ステップ	初期	step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8	Total 载荷時間 (hour)	
载荷応力 [MPa]	膨潤応力 0.36	0.59	0.98	1.61	2.66 (5.38)*	4.38	7.22	11.89	19.60		
载荷時間 (hour)	幌延地下水	-	264	97	94	115 +160	-	163	142	100	1133
	0.2mol/l	-	264	97	94	115	96	95	121	113	994
	0.8mol/l	-	264	97	94	50	44	68	96	68	781

*幌延地下水供試体の载荷応力

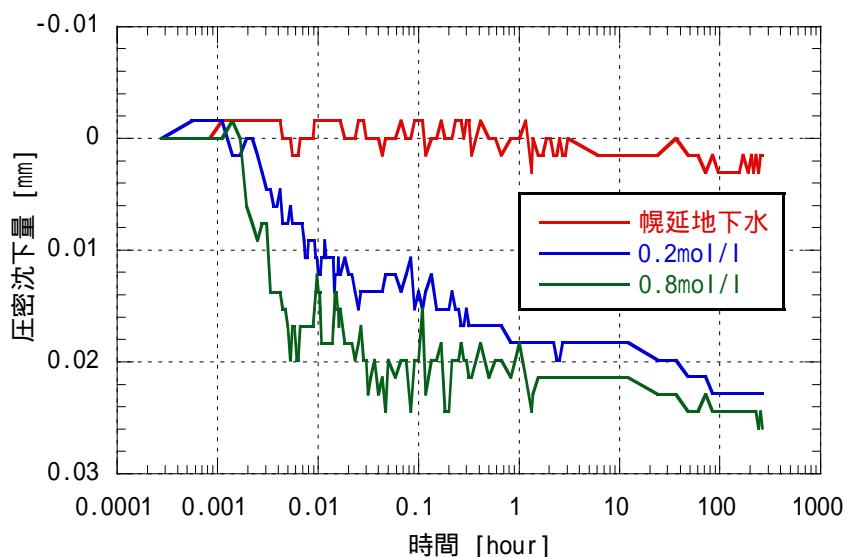


図 3.8-3 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step1 : 膨潤応力→0.59MPa)

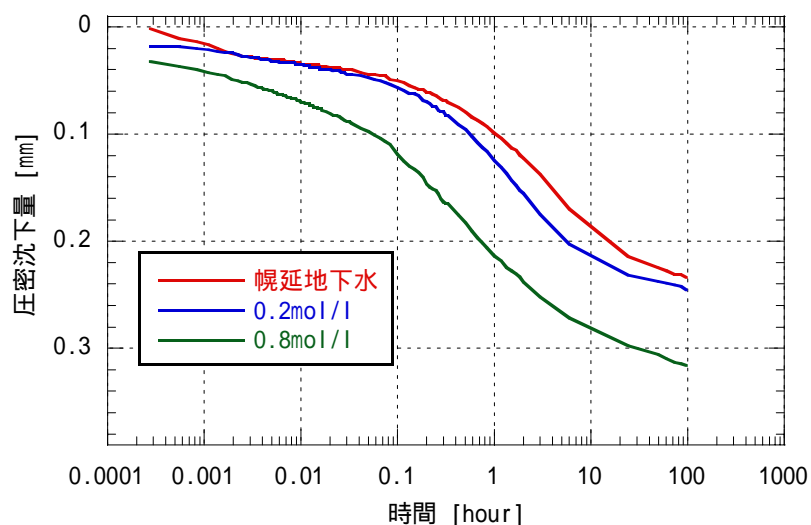


図 3.8-4 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step2 : 0.59→0.98MPa)

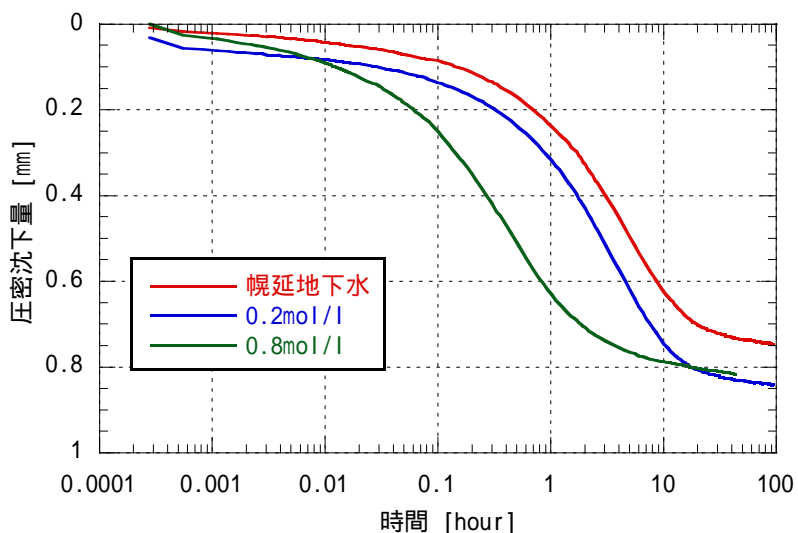


図 3.8-5 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (載荷 step3 : 0.98 1.61MPa)

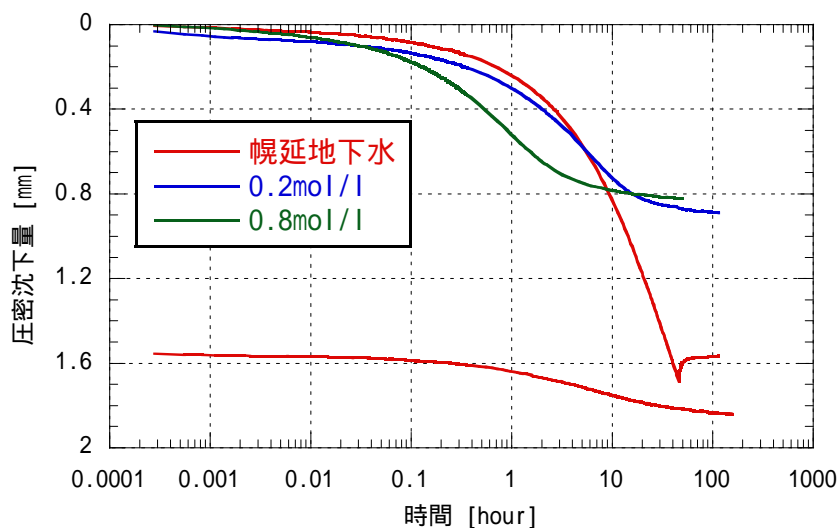


図 3.8-6 圧密沈下量と時間 (log t) の関係
(載荷 step4 : 1.61 2.66MPa : 幌延地下水 1.61 4.38MPa)

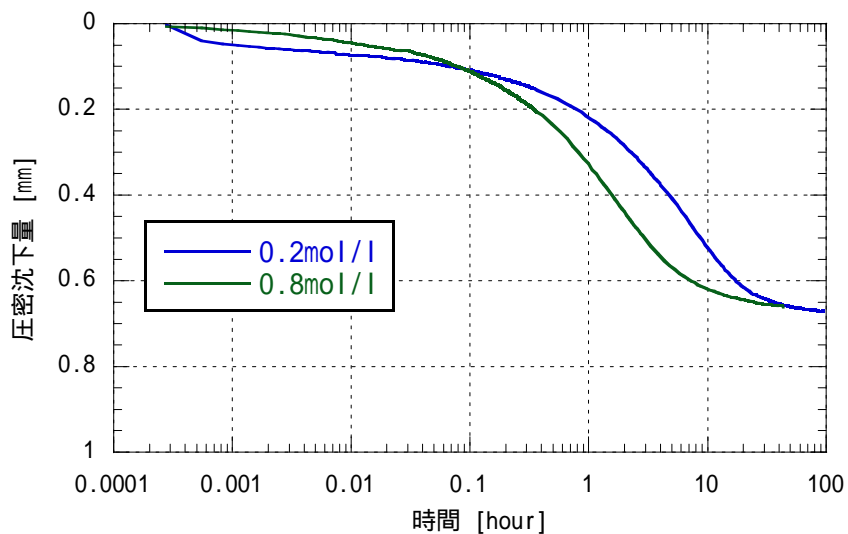


図 3.8-7 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (載荷 step5 : 2.66 4.38MPa)

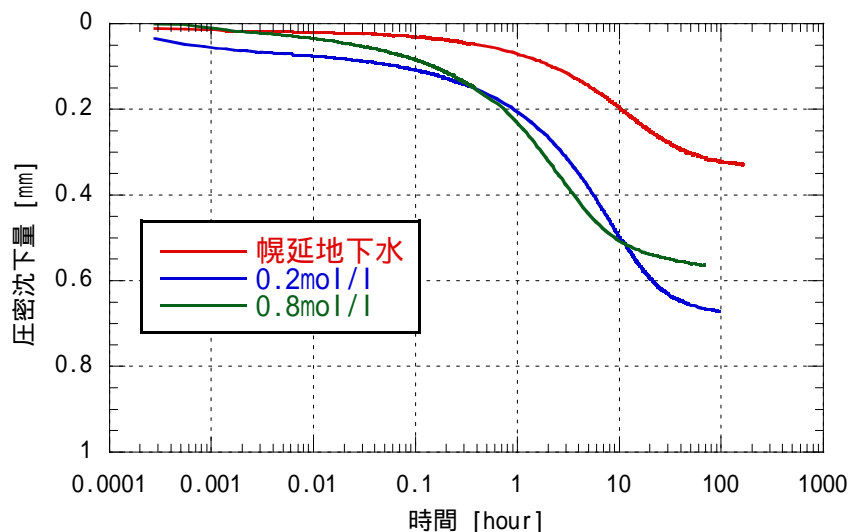


図 3.8-8 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (載荷 step6 : 4.38 7.22MPa : 幌延地下水 5.38 7.22MPa)

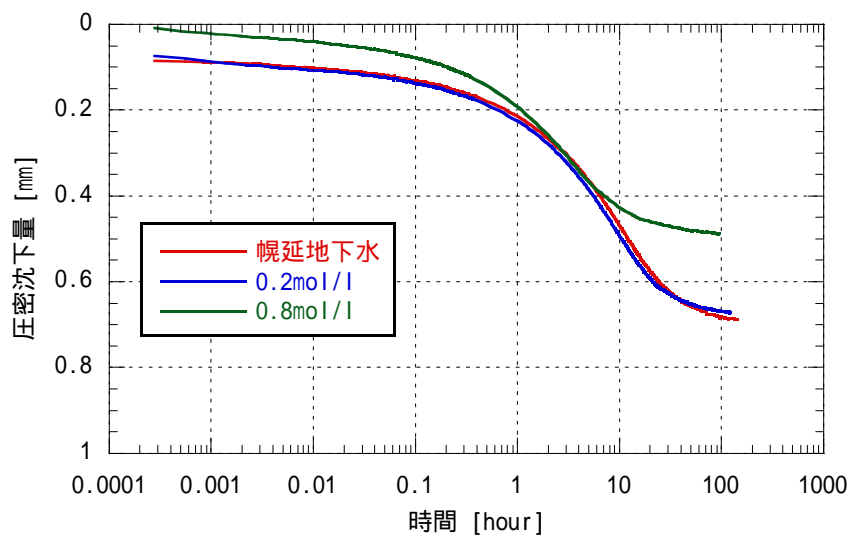


図 3.8-9 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (載荷 step7 : 7.22 11.89MPa)

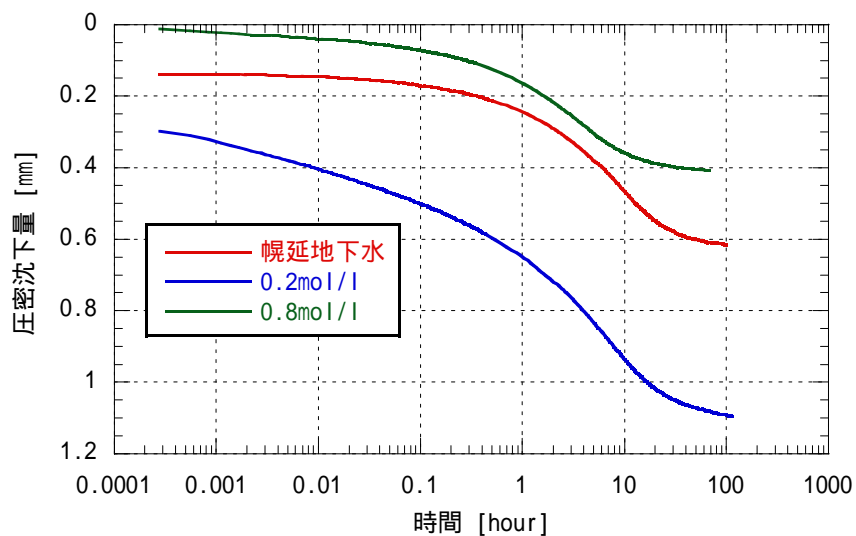


図 3.8-10 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (載荷 step8 : 11.89→19.6MPa)

表 3.8-5 各载荷ステップの沈下量と累積沈下量（载荷過程）

载荷ステップ		初期	step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8
载荷応力[MPa]		膨潤応力 0.36	0.59	0.98	1.61	2.66 (5.38)*	4.38	7.22	11.89	19.60
圧密沈下量 [mm]	幌延地下水	0	0.002	0.234	0.748	1.841	-	0.330	0.690	0.618
		0	0.002	0.235	0.983	2.824	-	3.154	3.844	4.461
	0.2mol/l	0	0.023	0.245	0.841	0.890	0.672	0.671	0.674	1.096
		0	0.023	0.268	1.110	2.000	2.672	3.343	4.016	5.112
	0.8mol/l	0	0.026	0.316	0.817	0.821	0.661	0.565	0.489	0.408
		0	0.026	0.342	1.159	1.980	2.642	3.207	3.695	4.103

*幌延地下水供試体の载荷応力

[上段：各ステップ沈下量 下段：累積沈下量]

(c) 除荷過程

供試体に 19.6MPa まで圧密応力を载荷した後、4 段階に分けてもとの膨潤応力（0.36MPa）まで载荷応力を除荷した。各ステップでの载荷軸応力と除荷時間を表 3.8-6 に示す。1 ステップ当たりの除荷期間は約 70 時間～360 時間である。表より、载荷過程と同様に NaCl 0.8mol/l 供試体の载荷時間が相対的に短いことが分かる。

各载荷ステップでの圧密沈下量の経時変化（時間軸は対数軸としている）を図 3.8-11～図 3.8-14 に示す。また、各ステップの初期値は前ステップの最終沈下量としているため、载荷最終ステップの沈下量と各ステップの沈下量の合計が累積沈下量に相当する。表 3.8-7 に各ステップの沈下量と累積沈下量を示す。

図 3.8-11 より、step u1 の幌延地下水供試体と NaCl 0.2mol/l 供試体で、ほぼ载荷と同時に単なる材料特性によるものとは考えられない変形が約 0.15mm 生じている。これは、前項でも示した加圧板部のわずかなねじのゆるみ等の影響によるものと考えられる。その後のステップでは幌延地下水供試体と NaCl 0.2mol/l 供試体でほぼ同じ変形挙動を示し、その圧密沈下量は NaCl 0.8mol/l 供試体より大きい。これは、NaCl 0.8mol/l 供試体の膨潤圧が他の供試体に比して低いため、膨潤変形によって付加される圧密沈下量が小さいためと考えられる。

表 3.8-6 各载荷ステップの载荷応力と载荷時間（除荷過程）

载荷ステップ		初期	step u1	step u2	step u3	step u4	Total 载荷時間 [hour]
载荷応力[MPa]		19.6	7.22	2.66	0.98	0.36	
[hour]	幌延地下水	-	72	337	284	360	1052
	0.2mol/l	-	70	263	335	335	1003
	0.8mol/l	-	96	96	144	263	599

[上段：各ステップ沈下量 下段：累積沈下量]

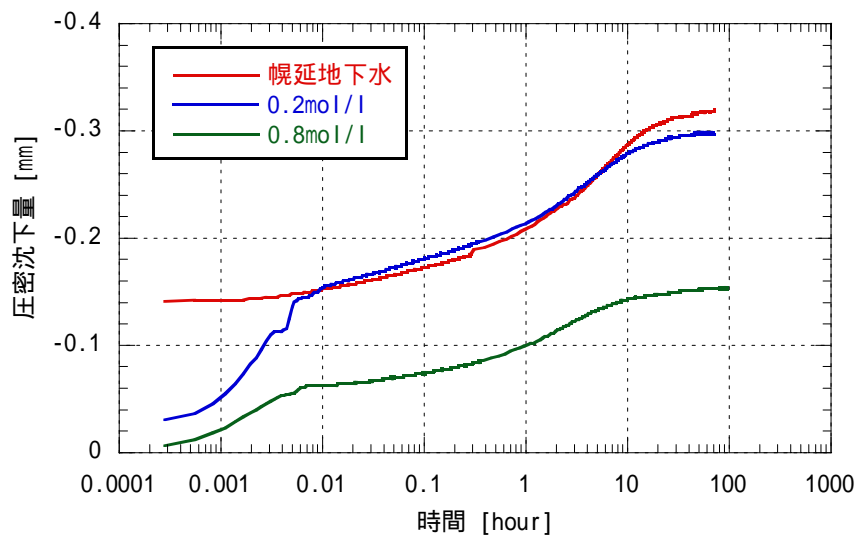


図 3.8-11 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u1 : 19.6 7.22MPa)

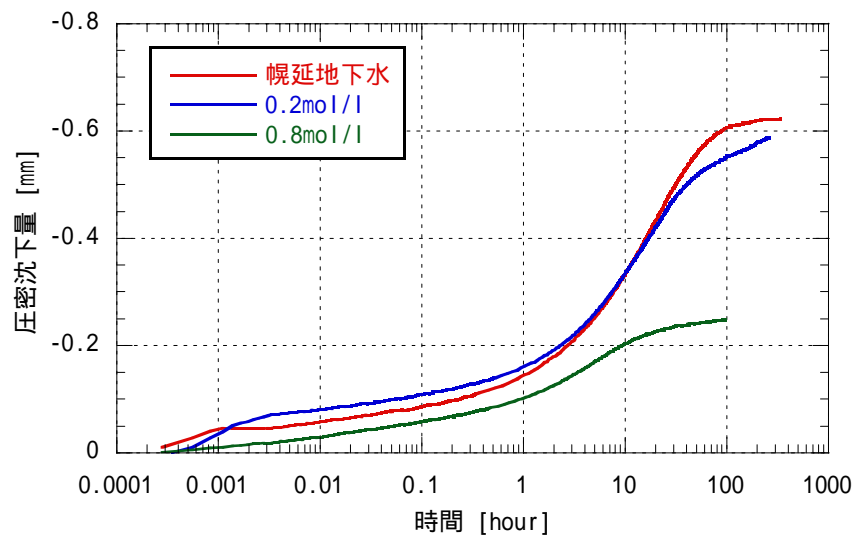


図 3.8-12 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u2 : 7.22 2.66MPa)

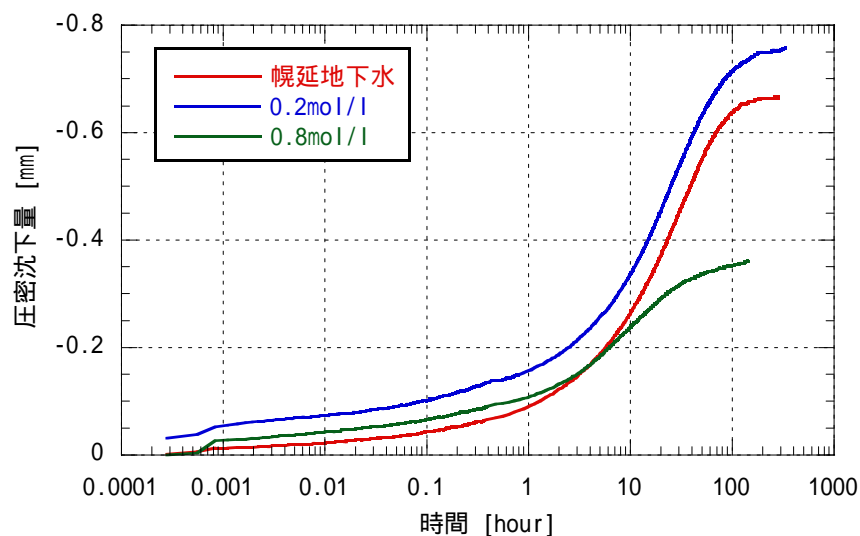


図 3.8-13 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u3 : 2.66 0.98MPa)

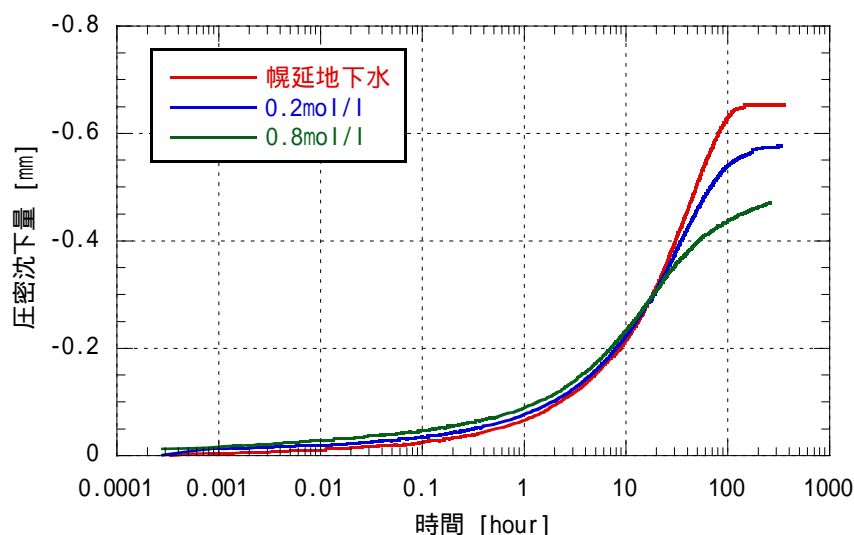


図 3.8-14 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u4 : 0.98→0.36MPa)

表 3.8-7 各载荷ステップの沈下量と累積沈下量 (除荷過程)

载荷ステップ		初期	step u1	step u2	step u3	step u4
载荷応力[MPa]		19.6	7.22	2.66	0.98	0.36
圧密沈下量 [mm]	幌延地下水	-	-0.318	-0.624	-0.665	-0.653
		4.461	4.143	3.520	2.855	2.202
	0.2mol/l	-	-0.299	-0.588	-0.758	-0.578
		5.112	4.813	4.225	3.468	2.890
	0.8mol/l	-	-0.154	-0.246	-0.360	-0.472
		4.103	3.949	3.703	3.342	2.871

[上段：各ステップ沈下量 下段：累積沈下量]

(d) 再载荷過程

膨潤応力まで除荷した後に、再び 19.6MPa まで 4 段階に分けて再载荷した。各ステップでの载荷軸応力と载荷時間を表 3.8-8 に示す。1 ステップの载荷期間は約 70 時間～480 時間である。表より、NaCl 0.8mol/l 供試体の最終ステップの载荷時間が最も長くなっている。これは 3t 法による圧密終了を確認した後もしばらく载荷を続けたためであり、载荷過程、除荷過程同様 NaCl 0.8mol/l 供試体の载荷時間は相対的に短い。

各载荷ステップでの供試体の沈下量の経時変化を図 3.8-15～図 3.8-18 に示す。また、各ステップの初期値は前ステップの最終沈下量としているため、除荷最終ステップの沈下量と各ステップの沈下量の合計が累積沈下量に相当する。表 3.8-9 に各ステップの沈下量と累積沈下量を示す。

step r1 では各供試体で変形量に大きな差はないが、その後のステップでは幌延地下水供試体と NaCl 0.2mol/l 供試体でほぼ同じ変形挙動を示し、その変形量は NaCl 0.8mol/l 供試体より大きい。これは、除荷時の膨潤によるリバウンド量が多い幌延地下水供試体と NaCl 0.2mol/l 供試体が、再载荷によって戻る変形量が相対的に大きいためであると考えられる。

また、図 3.8-18 より幌延地下水供試体、NaCl 0.2mol/l 供試体の再载荷最終ステップでは、载荷、除荷過程でも認められた単なる材料特性によるものとは考えられない変形が、载荷とほぼ同時に約 0.2mm 生じている。表 3.8-5 および表 3.8-9 より、载荷最終ステップと再载荷最終ステップの累積沈下量がほぼ等しいため、この加圧板部のわずかなねじのゆるみ等の影響により付加された変形は再現性があり、各最終ステップにおいてほぼ同量生じたものと考えられる。

表 3.8-8 各载荷ステップの载荷応力と载荷時間（再载荷過程）

载荷ステップ		初期	step r1	step r2	step r3	step r4	Total 载荷時間 [hour]
载荷応力[MPa]		0.36	0.98	2.66	7.22	19.6	
[hour] 载荷時間	幌延地下水	-	119	168	168	172	627
	0.2mol/l	-	215	119	168	168	670
	0.8mol/l	-	242	92	71	480	884

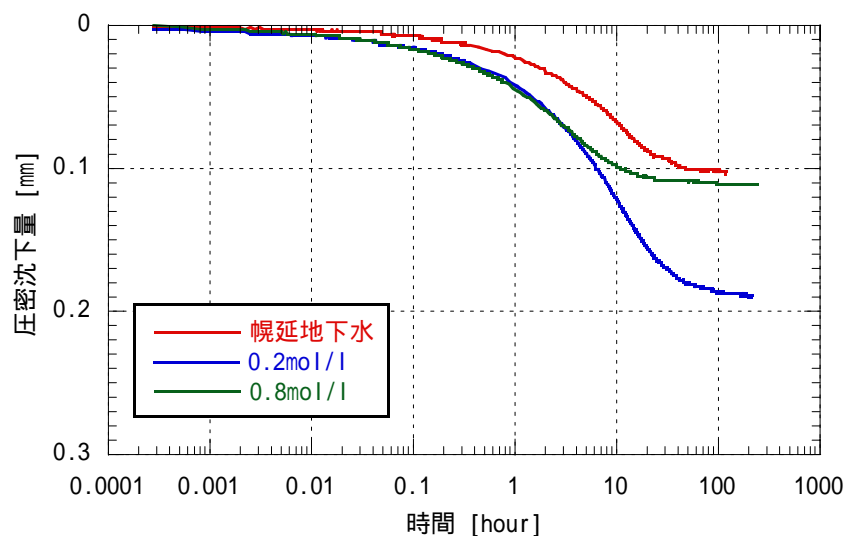


図 3.8-15 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再载荷 step r1 : 0.36 0.98MPa)

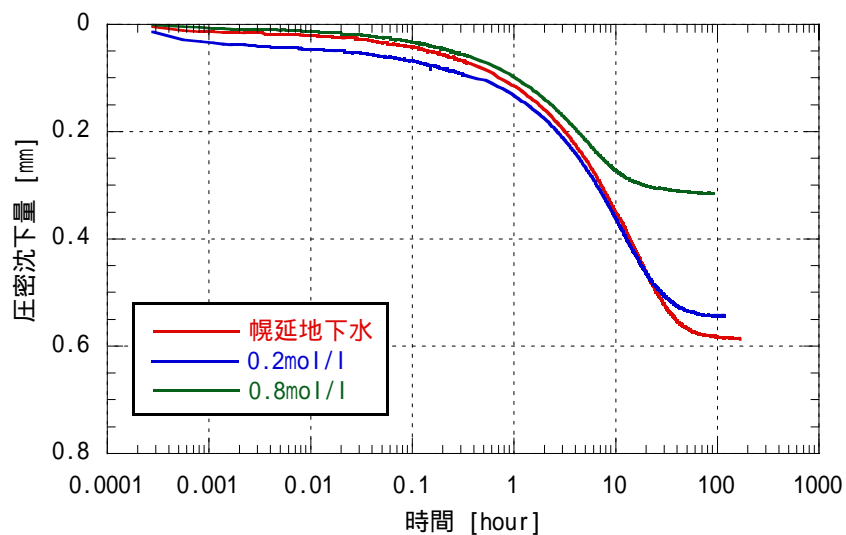


図 3.8-16 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再载荷 step r2 : 0.98 2.66MPa)

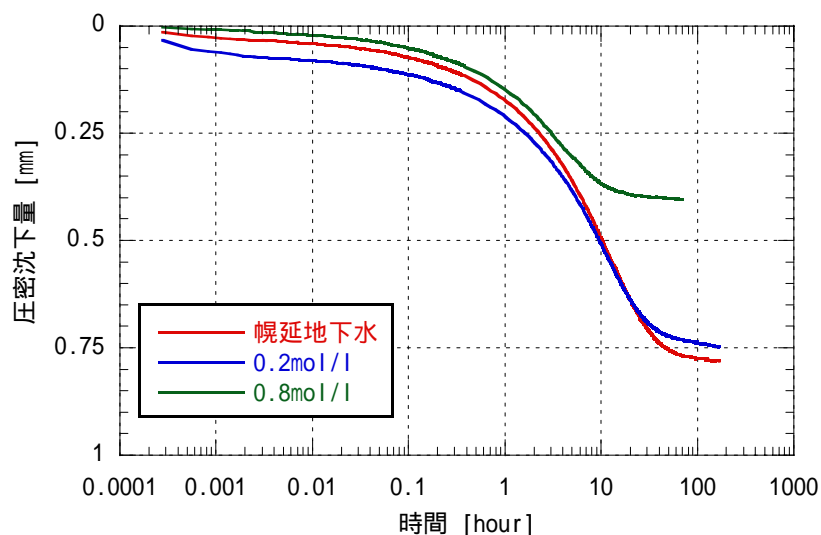


図 3.8-17 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再載荷 step r3 : 2.66 7.22MPa)

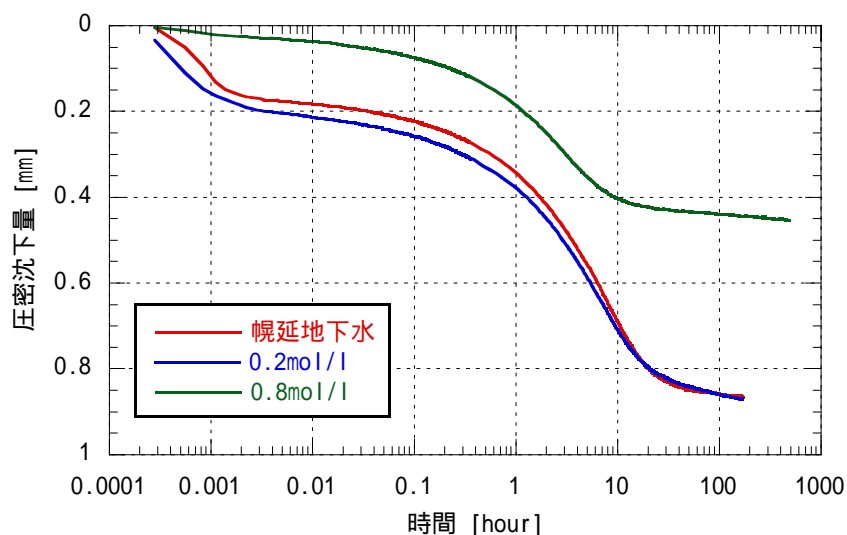


図 3.8-18 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再載荷 step r4 : 7.22→19.6MPa)

表 3.8-9 各載荷ステップの沈下量と累積沈下量 (再載荷過程)

載荷ステップ		初期	step r1	step r2	step r3	step r4
載荷応力[MPa]		0.36	0.98	2.66	7.22	19.6
圧密沈下量 [mm]	幌延地下水	0.104	0.587	0.781	0.865	
		2.202	2.306	2.893	3.674	4.539
	0.2mol/l	0.189	0.544	0.748	0.872	
		2.890	3.079	3.623	4.371	5.243
	0.8mol/l	0.111	0.316	0.403	0.454	
		2.871	2.982	3.298	3.701	4.155

[上段：各ステップ沈下量 下段：累積沈下量]

3.8.4 圧密理論解と試験結果の比較

3.8.3 項の圧密沈下量 d と時間 t の関係に関して, Terzaghi の圧密理論解 (Terzaghi, 1924; 足立・龍岡, 1981) と試験結果の比較を行う。本試験のような一次元圧密条件での Terzaghi の圧密理論方程式 ((19) 式) は以下のようになる (Terzaghi, 1924)。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (19)$$

u : 間隙水圧

t : 時間

C_v : 圧密係数

z : 排水面からの距離

排水距離が H と仮定した境界条件で, 式を解くと圧密沈下量と時間の関係は (20) 式で表現することができる。

$$d = d_{100} \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_n \cdot C_v \cdot t}{H^2}\right) \right\}$$

$$\lambda_n = \left(\frac{2n+1}{2} \cdot \pi \right)^2 \quad (20)$$

d : 沈下量

d_{100} : 圧密度 100% の時の沈下量

H : 排水距離

圧密理論解との比較に関しては, 幌延地下水供試体の step3, step u3, stepr3, NaCl 0.2mol/l 供試体の step3, step u3, stepr3, NaCl 0.8mol/l 供試体の step3, step u3, stepr3 での結果を用いた。Terzaghi の圧密理論解の計算には式中の圧密係数 C_v の値が必要となるが, ここでは Taylor 法 (足立・龍岡, 1981; Taylor, 1948) における t 法により各試験結果の圧密係数 C_v の値を決定した。

試験結果の圧密沈下量 d と t の関係を図 3.8-19 ~ 3.8-27 に示す。 d - t 関係において, 圧密理論解は圧密初期 (圧密度 $U < 53\%$) の部分で原点を通る直線となる。試験結果では図に示すように, 圧密初期において d - t 関係は圧密理論通りほぼ直線となっていることが分かる。しかし, その直線は原点より若干ずれている。これは, 荷重載荷初期において, 理論解に比して試験では供試体の沈下が遅れて発生していることを示している。

供試体からの排水が排水面のフィルターを通過するのに時間がかかったことが原因のひとつとして推測されるが, 本試験から明確な原因はわからなかった。

試験結果における載荷初期の沈下の遅れの原因は明らかではないが, この沈下の遅れを補正した場合の Terzaghi の圧密理論解と試験結果の比較を行った。図 3.8-19 ~ 3.8-27 に示す d - t 関係において圧密初期の直線部分を延長し, $d=0$ 軸との交点を求めると表 3.9-10 に示す結果となる。これを初期補正值として, この点を通り試験結果の初期部分とラップする直線 1 を引き, この傾きの $1/1.15$ 倍の直線 2 を引く。直線 2 と試験結果の d - t 関係の交点が圧密度 90% の位置となる。圧密度 90% の時点のそれぞれの圧密沈下量を d_{90} と, その値より算出した d_{100} および図から得られる t_{90} , また, t_{90} からの初期補正值を引き, 2 乗することによって t_{90} が得られる。次に, 補正後の t_{90} の値より式中の C_v/H^2 を (21) 式により求めることができる。上記方法にて理論解の計算に用いた値を表 3.8-11 に示す。なお, 表 3.8-11 においては, 3.8.6 項にて Taylor 法を用いた透水係数の算出を行うため, 本一次元圧密試験にて得られた全ての結果における理論解の計算に用いた値を示す。なお, 各試験における step1, step2 においては,

過圧密領域と考えられるため除くこととする。

$$\frac{C_v}{H^2} = \frac{0.848}{t_{90}} \quad (21)$$

表 3.8-10 $d=0$ 軸との交点

	幌延地下水	NaCl 0.2mol/l	NaCl 0.8mol/l
step 3	-0.11	-0.20	-0.02
step u3	0.01	-0.95	-0.81
step r3	-0.18	-0.47	-0.04

表 3.8-11 圧密理論解の計算に用いた値

	step	d ₉₀ [mm]	d ₁₀₀ [mm]	t ₉₀	補正 t ₉₀ [hour]	C _v /H ²
幌延地下水	step 3	0.658	0.732	3.616	13.892	0.061
	step 6	0.271	0.301	5.178	29.423	0.029
	step 7	0.5794	0.644	4.546	27.459	0.031
	step 8	0.396	0.439	4.382	18.078	0.047
	step u1	-0.145	-0.161	3.579	14.843	0.057
	step u2	-0.541	-0.601	6.598	52.977	0.016
	step u3	-0.596	-0.663	8.219	67.369	0.013
	step u4	-0.618	-0.686	9.542	83.194	0.010
	step r1	0.092	0.102	4.859	24.017	0.035
	step r2	0.527	0.586	5.586	32.175	0.026
	step r3	0.696	0.773	5.281	29.824	0.028
	step r4	0.604	0.671	3.769	14.864	0.057
NaCl 0.2mol/l	step 3	0.719	0.799	2.928	9.800	0.087
	step 4	0.712	0.791	3.055	10.765	0.079
	step 5	0.558	0.619	3.545	15.144	0.056
	step 6	0.561	0.623	3.919	18.772	0.045
	step 7	0.587	0.652	4.356	25.563	0.033
	step 8	0.818	0.909	3.553	29.734	0.029
	step u1	-0.129	-0.143	3.199	14.649	0.058
	step u2	-0.485	-0.539	5.841	46.968	0.018
	step u3	-0.675	-0.750	8.305	85.732	0.009
	step u4	-0.515	-0.572	8.773	80.373	0.011
	step r1	0.160	0.178	4.722	23.250	0.036
	step r2	0.497	0.552	5.206	30.811	0.028
step r3	0.658	0.732	4.799	27.832	0.030	
step r4	0.586	0.651	3.435	13.786	0.062	
NaCl 0.8mol/l	step 3	0.591	0.657	0.882	0.822	1.032
	step 4	0.614	0.682	1.281	1.673	0.507
	step 5	0.495	0.549	1.682	2.958	0.287
	step 6	0.429	0.477	2.102	4.655	0.182
	step 7	0.388	0.431	2.463	6.804	0.125
	step 8	0.318	0.353	2.389	6.606	0.128
	step u1	-0.137	-0.153	2.590	18.429	0.046
	step u2	-0.205	-0.227	3.198	15.124	0.056
	step u3	-0.299	-0.333	4.758	31.009	0.027
	step u4	-0.382	-0.424	6.458	47.136	0.018
	step r1	0.084	0.093	2.229	5.255	0.161
	step r2	0.281	0.312	3.375	11.652	0.073
step r3	0.348	0.387	2.782	7.993	0.106	
step r4	0.373	0.414	2.489	6.911	0.123	

これらの値を式に代入し、求めた圧密理論解と試験結果を $d-\log t$ 関係で比較したものを図 3.8-28～図 3.8-36 に示す。図より、載荷過程、除荷過程、再載荷過程ともに圧密理論解と試験結果はよく一致していることがわかる。また、圧密の後半において試験結果の沈下量が理論値より大きくなっているのは、一般の粘土の圧密挙動にも見られる二次圧密が原因であると考えられる。通常の圧密現象において上記の圧密理論で表現できる圧密現象を一次元圧密、それ以降の圧密現象を二次圧密と呼んでいる。再載荷過程では、全般にわたり理論解と試験結果はよく一致しており、他に比べて二次圧密挙動が小さくなっている。以上のことより、試験における載荷直後の沈下遅れを補正すると、通常の粘土と同様に一次元圧密の範囲において、海水環境下におけるベントナイトの圧密挙動は Terzaghi の圧密理論で表現することができる。

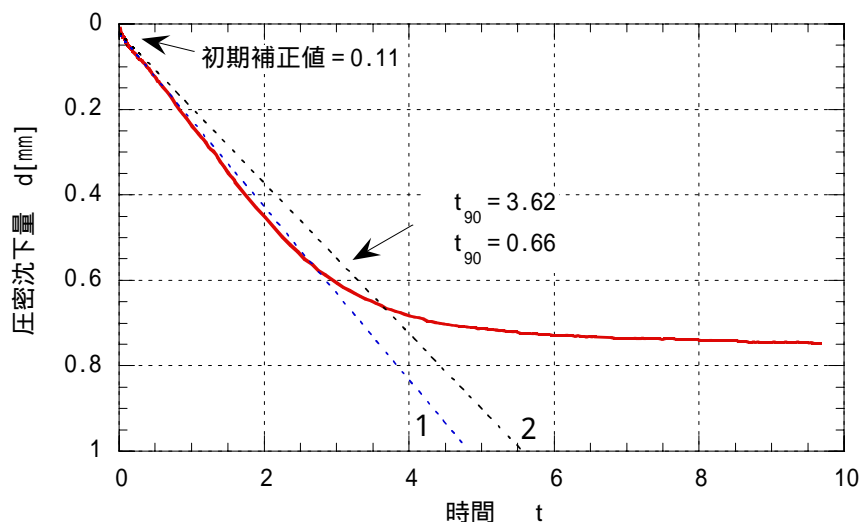


図 3.8-19 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (幌延地下水供試体 : step 3)

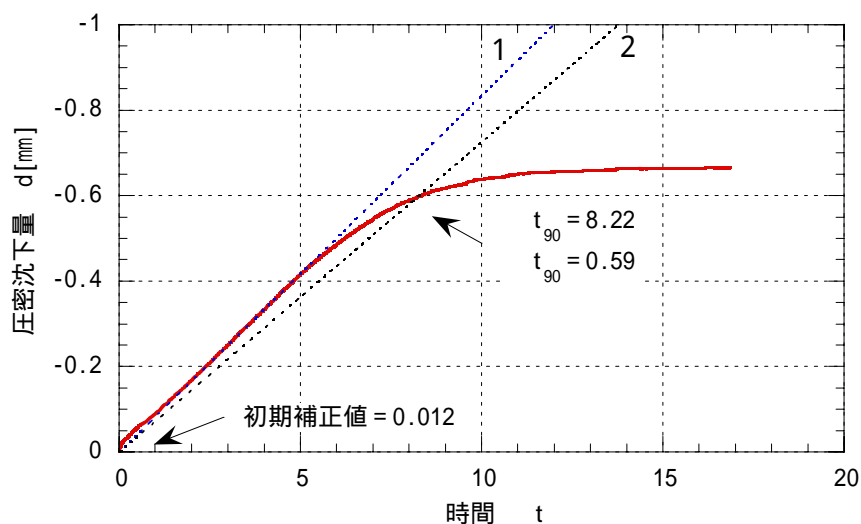


図 3.8-20 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (幌延地下水供試体 : step u3)

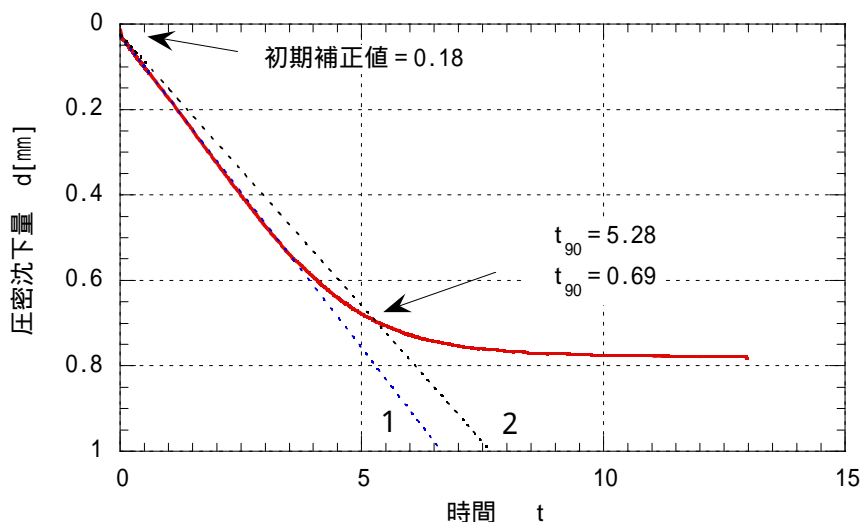


図 3.8-21 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (幌延地下水供試体 : step r3)

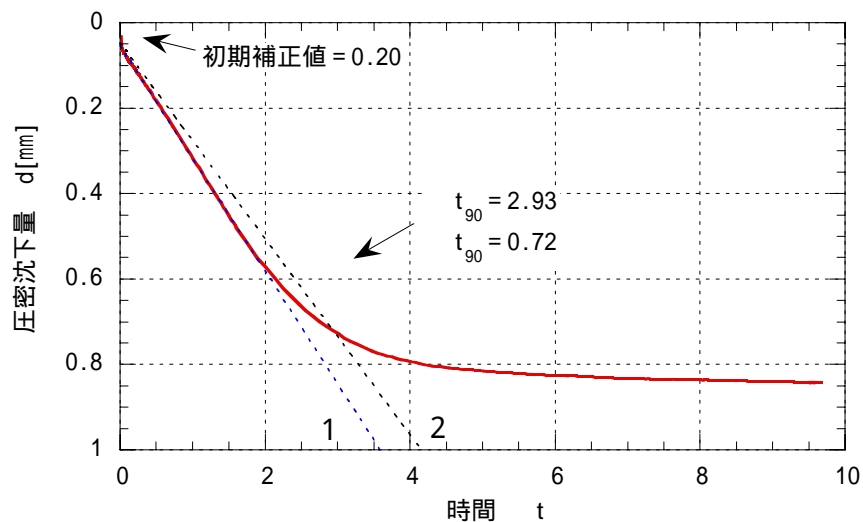


図 3.8-22 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step 3)

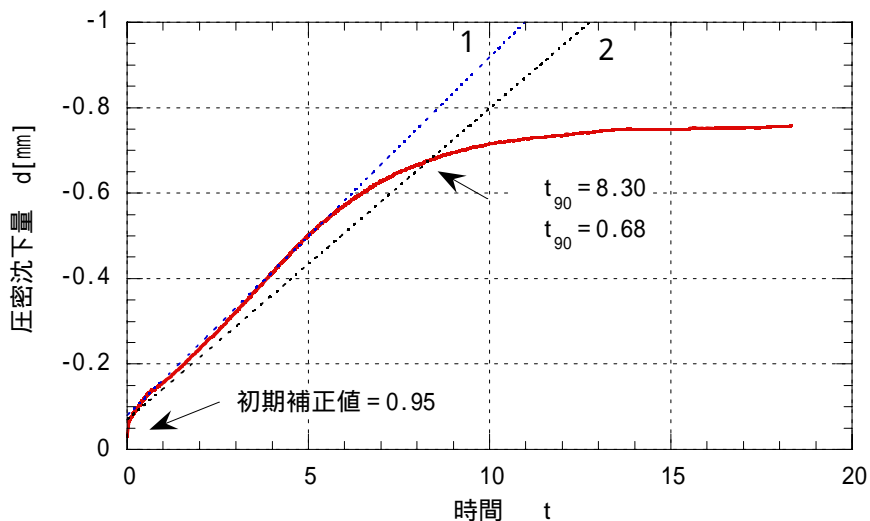


図 3.8-23 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step u3)

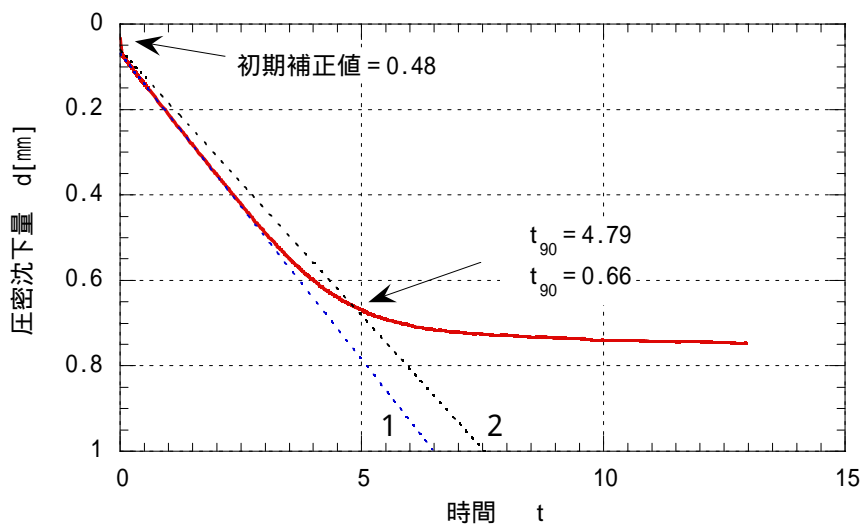


図 3.8-24 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step r3)

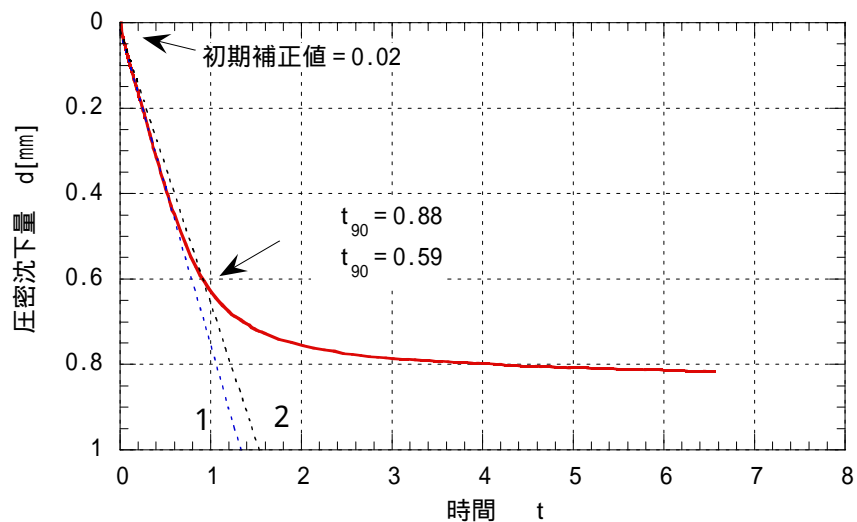


図 3.8-25 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step 3)

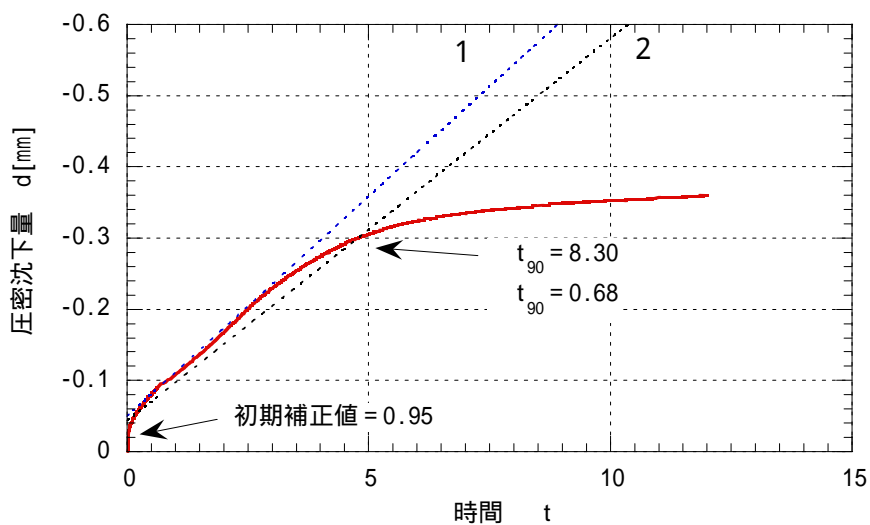


図 3.8-26 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step u3)

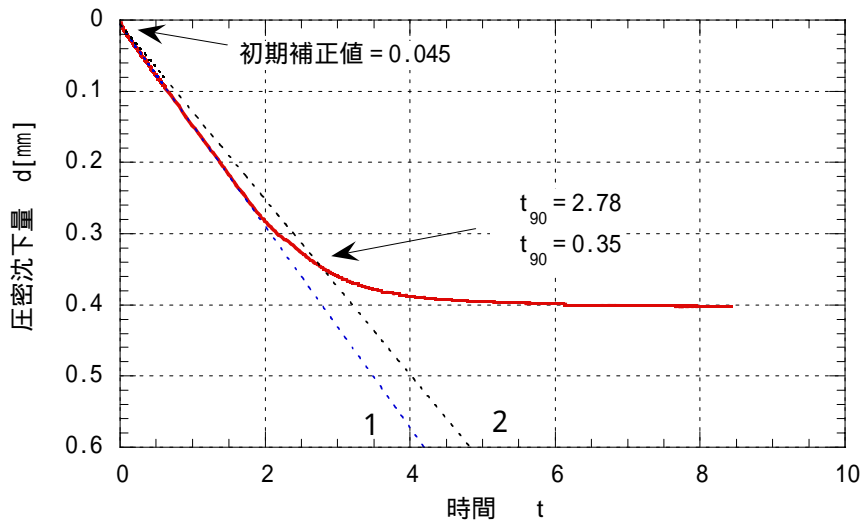


図 3.8-27 圧密沈下量と時間 (t) の関係 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step r3)

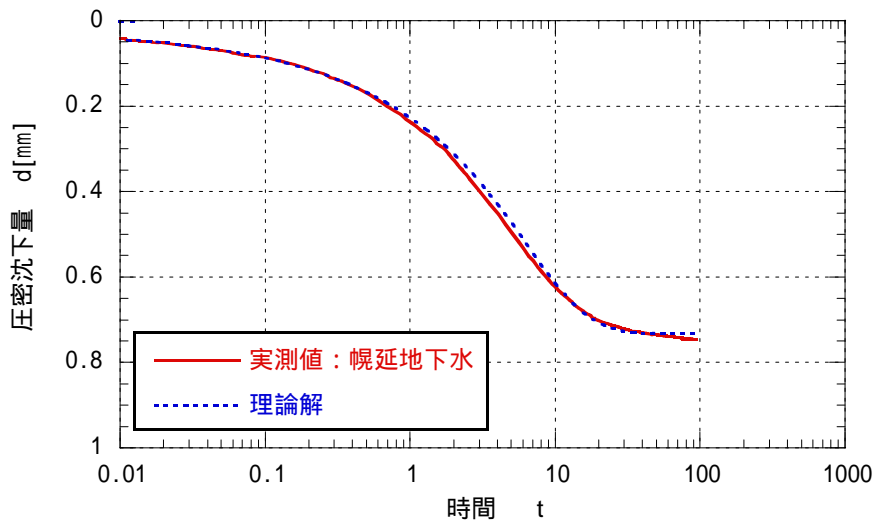


図 3.8-28 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (幌延地下水供試体 : step 3)

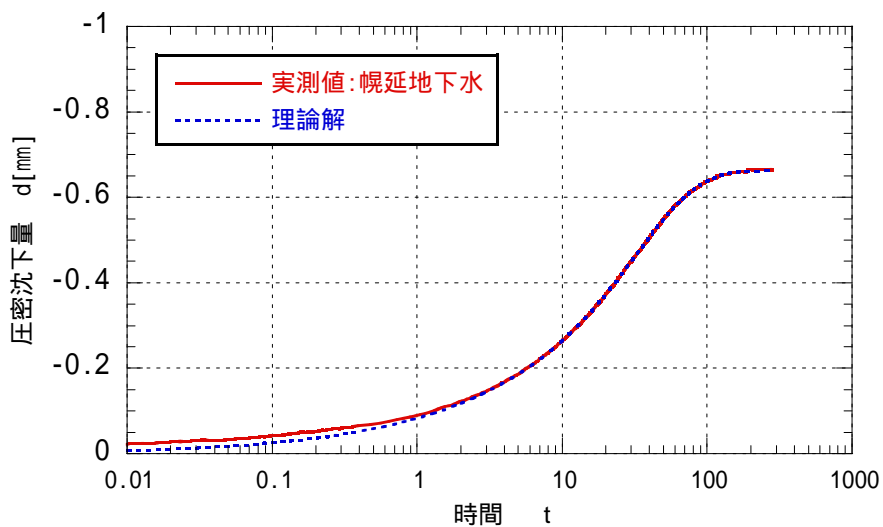


図 3.8-29 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (幌延地下水供試体 : step u3)

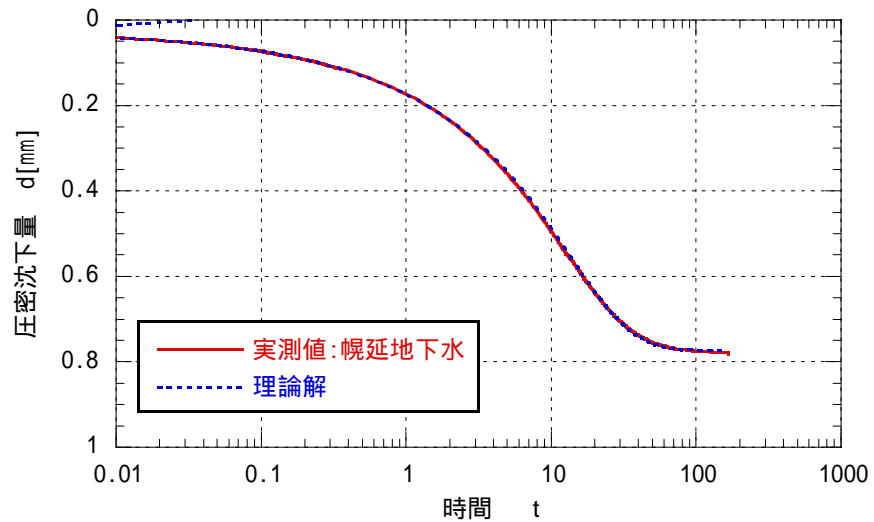


図 3.8-30 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (幌延地下水供試体: step r3)

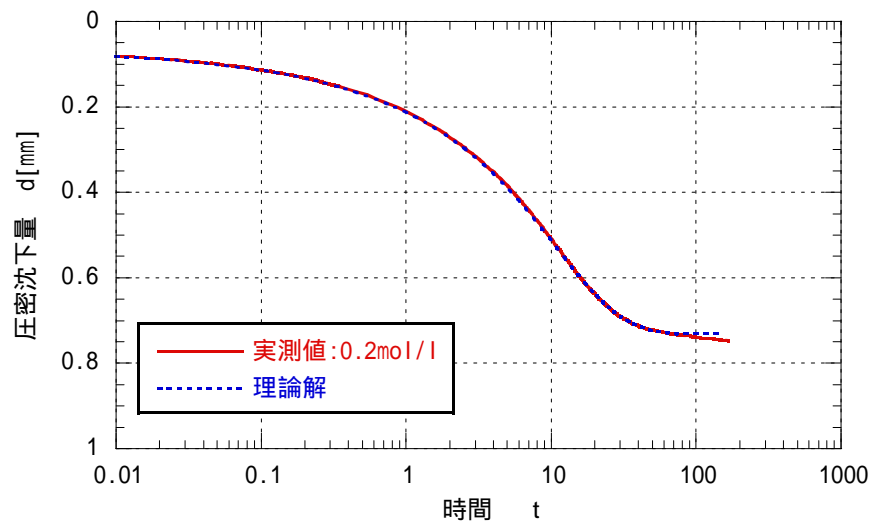


図 3.8-31 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.2mol/l 供試体: step 3)

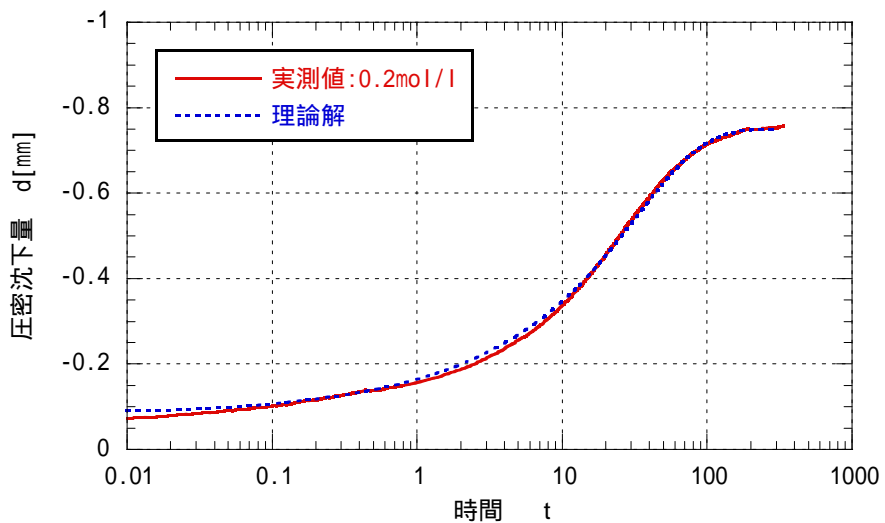


図 3.8-32 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.2mol/l 供試体: step u3)

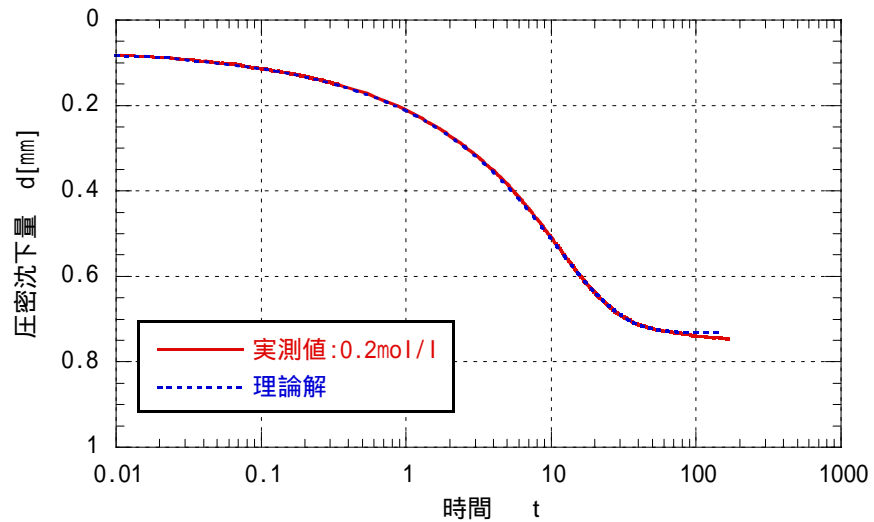


図 3.8-33 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.2mol/l 供試体 : step r3)

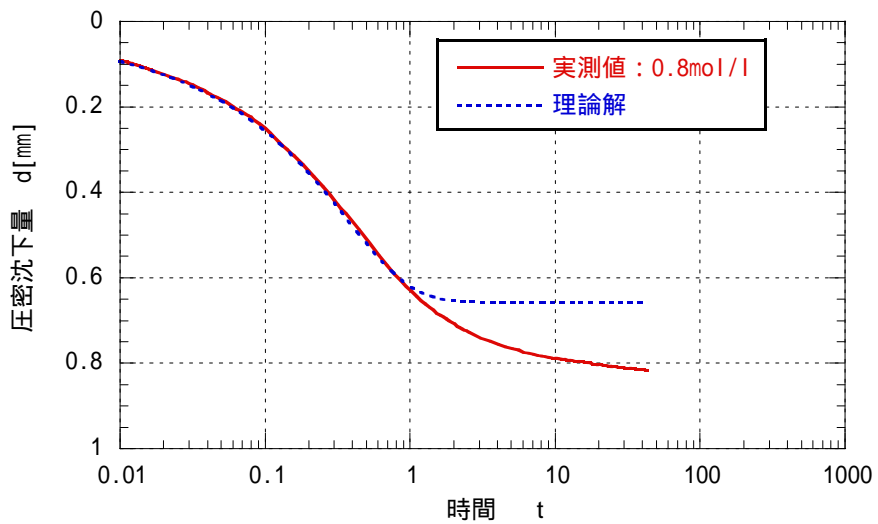


図 3.8-34 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step 3)

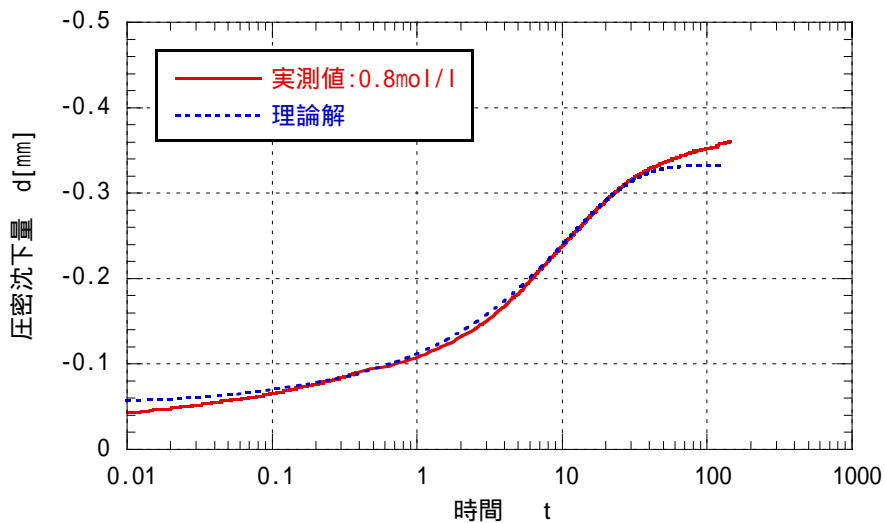


図 3.8-35 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step u3)

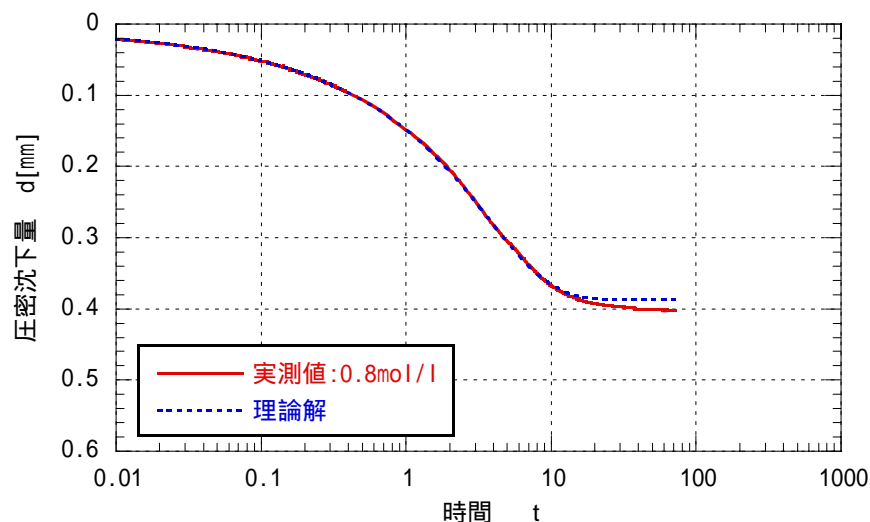


図 3.8-36 試験結果と Terzaghi の理論解との比較 (NaCl 0.8mol/l 供試体 : step r3)

3.8.5 e-logP 関係 (間隙比 - 圧密応力の関係)

圧縮成型後の供試体の重量とベントナイト，ケイ砂の土粒子密度より，(22) 式によって各 step の間隙比 $e[-]$ を算出した。

$$e = \frac{V_{step}}{V_s} - 1 = \frac{V_{step}}{V_{s-bent} + V_{s-soil}} - 1 = \frac{V_{step}}{\frac{W_{s-bent}}{\rho_{s-bent}} + \frac{W_{s-soil}}{\rho_{s-soil}}} - 1 \quad (22)$$

ここで， V_{step} は各載荷 step 終了時の供試体体積， V_s は土粒子体積で，ベントナイトの土粒子体積 V_{s-bent} とケイ砂の土粒子体積 V_{s-soil} の和である。このうち V_{s-bent} はベントナイト重量 W_{s-bent} とベントナイト土粒子密度 ρ_{s-bent} から求め， V_{s-soil} はケイ砂重量 W_{s-soil} とケイ砂土粒子密度 ρ_{s-soil} から求めた。なお，土粒子密度 ρ_{s-bent} は $2.70[\text{Mg}/\text{m}^3]$ ， ρ_{s-soil} は $2.64[\text{Mg}/\text{m}^3]$ とした。

各 step の載荷応力 (圧密応力) p と間隙比 e の関係 ($e-\log p$ 関係) を図 3.8-37 に示す。また，降水系の結果も併せて示す (高治・鈴木，1999)。図より載荷 step7 までは供試体間の差がほとんどなくほぼ同一の曲線を示している。ただし，先述のように最終載荷ステップで幌延地下水供試体，NaCl 0.2mol/l 供試体は，材料特性によるものとは考えられない変形の影響により，前ステップまでの連続的な関係からやや外れた大きな変化率を示している。この影響を補正するために図 3.8-10，図 3.8-11，図 3.8-18 を参考に，瞬時変形量として 0.15mm 分の調整を行った。すなわち，step8 の変形量を -0.15mm，step u1 の変形量を +0.15mm，step r1 の変形量を -0.15mm 補正することとした。図 3.8-38 に補正後の $e-\log p$ 関係を示す。

図より，NaCl 0.2mol/l 供試体はまだ過大な材料特性以外の変形が付加されている可能性があるが，載荷過程は試験溶液条件によらずほぼ同一の関係を示した。また，降水系試験結果ともほぼ同じ挙動を示した。

除荷・再載荷過程では，20MPa 載荷時からの相対的な変形の戻りが総じて降水系よりも小さく，特に NaCl 0.8mol/l 供試体が最も小さい。また，除荷・再載荷による $e-\log p$ 曲線のヒステリシスも降水系よりも小さい。一般的な粘土材料は圧密除荷時の変形は弾性変形であり， $e-\log p$ 関係はほぼ直線的になるが，ベントナイト材料は除荷が進むとそれに加えて膨潤による変形も加わり，下に凸のラインを描く。降水系供試体の圧密除荷時の膨潤変形量は，小峯らにより提案されている膨潤評価式 (小峯・緒方，1999) から求められる膨潤変形量とよく整合しているという結果も得られている (平井ほか，2003)。膨潤圧 (変形量) が小さい海水系供試体ではこの傾向が降水系供試体に比して小さいため，除荷時の勾配が降水系に比して小さくなったものと考えられる。

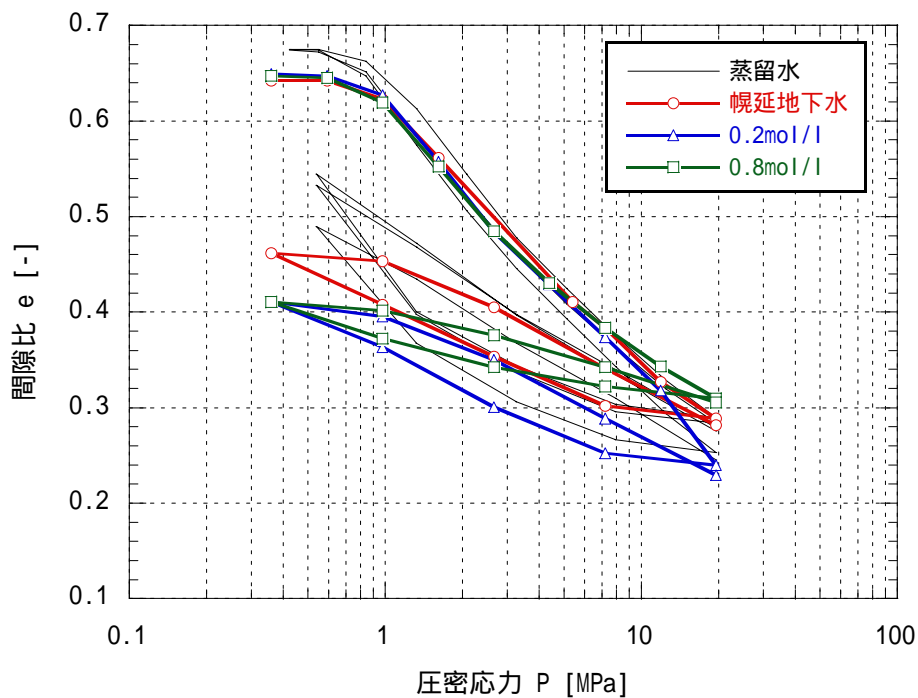


図 3.8-37 e-logP 関係 (補正前)

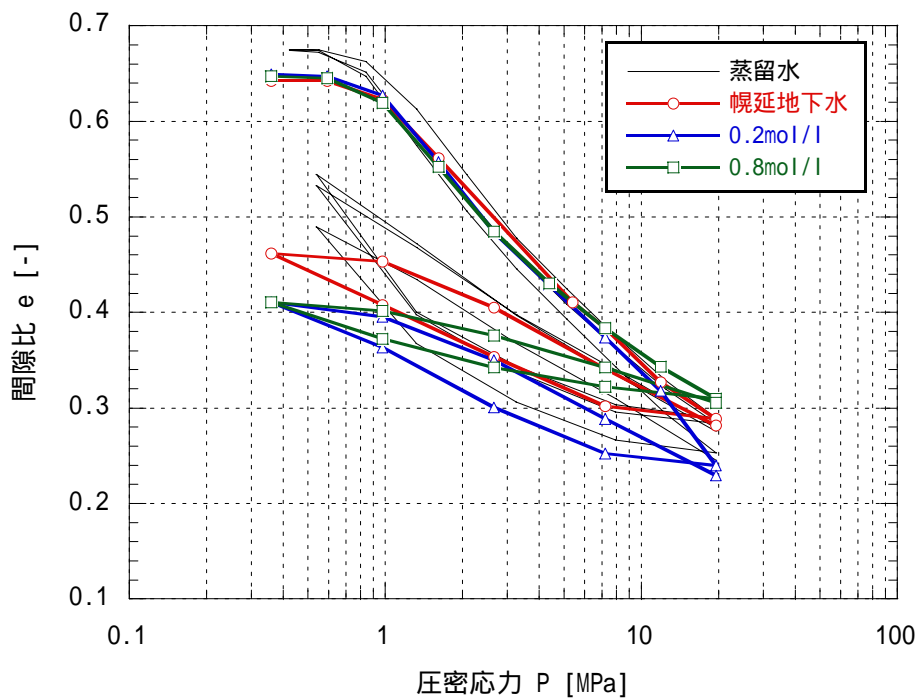


図 3.8-38 e-logP 関係 (補正後)

3.9.6 透水係数の算出

圧密試験結果より，各ステップにおける透水係数を 3.9.4 項にて述べた Taylor 法を用いて算出した。透水係数の算出においては， $d-t$ 関係より得られる圧密係数 C_v より (23) 式にて求められる。

$$k = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v \quad (23)$$

k : 透水係数

γ_w : 水の単位体積重量

m_v : 体積圧密係数

ここで，体積圧密係数 m_v は， $d-t$ 関係により得られる d_{100} より軸ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_a$ を算出し，(24) 式により計算した。

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\sigma_a} \quad (24)$$

$\Delta\varepsilon_a$: 軸ひずみ増分

$\Delta\sigma_a$: 軸応力増分

上記式より求めた各ステップでの有効粘土密度と透水係数の関係を図 3.8-39 に示す。図には，これまでに得られた蒸留水および人工海水における有効粘土密度と透水係数の関係式(菊池ほか，2003)，ならびに 3.5 項にて得られた幌延地下水条件下における有効粘土密度と透水係数の関係式(25 式)を併せて示す。

幌延地下水

$$k = \exp(-23.593 + 2.0653\rho_b - 3.3675\rho_b^2) \quad (25)$$

なお，幌延地下水条件下における一次元圧密試験において過剰な載荷応力をかけたため，載荷 step4 から step5 の透水係数は，評価の対象外とした。

図から圧密試験により得られた幌延地下水，NaCl 0.2mol/l および NaCl 0.8mol/l の透水係数は，3.5 項にて得られた透水試験同様，有効粘土密度が高くなるに従って低下する傾向を概ね示した。また，step8 から stepu1 で著しい透水係数の変化においては、除荷後，弾性変形的に変形し，近似曲線の原点が大きくなりすぎたため，原点補正の値が大きくなり，計算上圧密に時間を要してしまつたためと推察される。

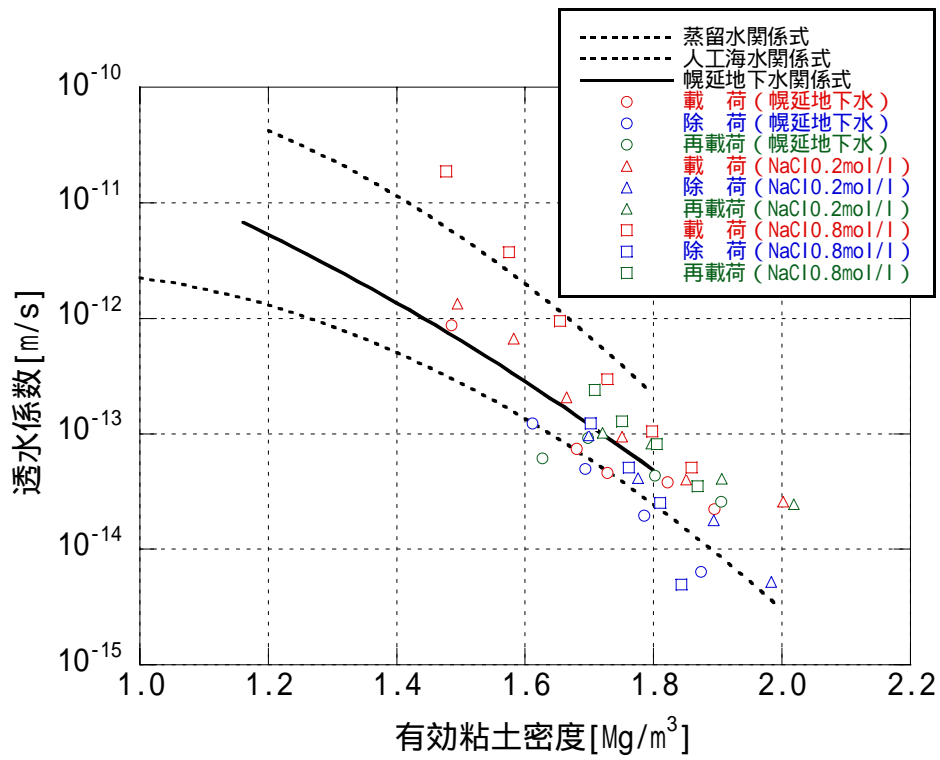


図 3.8-39 圧密試験結果より求めた有効粘土密度と透水係数の関係

表 3.9-1 圧密試験結果から得られた透水係数

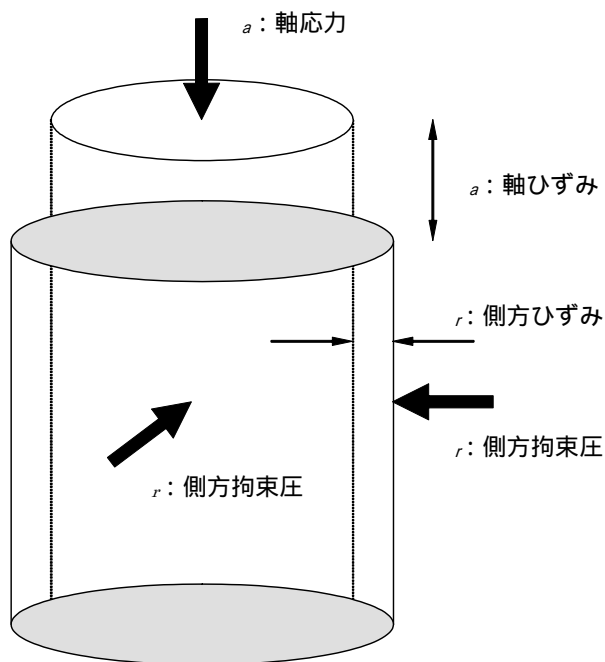
		有効粘土密度 [Mg/m ³]	載荷応力[MPa]	体積圧縮係数 [1 / MPa]	透水係数 [m/s]
幌延地下水	Step 3	1.485	1.612	0.05774	8.689E-13
	Step 6	1.680	5.380	0.02340	7.431E-14
	Step 7	1.728	7.216	0.00819	4.575E-14
	Step 8	1.822	11.892	0.00688	3.798E-14
	Step u1	1.895	19.600	0.00285	2.250E-14
	Step u2	1.874	7.216	0.00065	6.357E-15
	Step u3	1.785	2.657	0.00660	1.946E-14
	Step u4	1.694	0.978	0.01973	4.967E-14
	Step r1	1.611	0.360	0.05549	1.224E-13
	Step r2	1.627	0.978	0.00824	6.200E-14
	Step r3	1.698	2.657	0.01746	9.165E-14
Step r4	1.802	7.216	0.00848	4.377E-14	
NaCl 0.2mol/l	Step 3	1.495	1.612	0.06304	1.331E-12
	Step 4	1.582	2.657	0.03785	6.648E-13
	Step 5	1.665	4.378	0.01801	2.073E-13
	Step 6	1.751	7.216	0.01098	9.419E-14
	Step 7	1.851	11.892	0.00697	4.031E-14
	Step 8	2.002	19.600	0.00589	2.600E-14
	Step u1	1.983	7.216	0.00058	5.253E-15
	Step u2	1.894	2.657	0.00591	1.795E-14
	Step u3	1.776	0.978	0.02234	4.107E-14
	Step u4	1.699	0.360	0.04628	9.723E-14
	Step r1	1.721	0.978	0.01438	1.023E-13
	Step r2	1.797	2.657	0.01644	8.253E-14
	Step r3	1.906	7.216	0.00802	4.072E-14
Step r4	2.019	19.600	0.00263	2.469E-14	
NaCl 0.8mol/l	Step 3	1.477	1.61	0.04268	1.884E-11
	Step 4	1.575	2.66	0.03264	3.712E-12
	Step 5	1.654	4.38	0.01597	9.510E-13
	Step 6	1.728	7.22	0.00840	2.967E-13
	Step 7	1.798	11.89	0.00461	1.046E-13
	Step 8	1.859	19.60	0.00229	5.089E-14
	Step u1	1.844	7.22	0.00062	4.973E-15
	Step u2	1.810	2.66	0.00249	2.521E-14
	Step u3	1.761	0.98	0.00990	5.097E-14
	Step u4	1.702	0.36	0.03430	1.225E-13
	Step r1	1.708	0.98	0.00754	2.404E-13
	Step r2	1.751	2.66	0.00930	1.285E-13
	Step r3	1.805	7.22	0.00424	8.153E-14
Step r4	1.869	19.60	0.00167	3.522E-14	

3.9 三軸圧縮試験

3.9.1 三軸圧縮試験装置概要

三軸圧縮試験は軸対称応力境界条件下で、材料の圧縮特性やせん断特性を調べる要素試験である。三軸圧縮試験において、供試体に作用する応力、ひずみの概念を図 3.9-1 に示す。圧密非排水三軸圧縮試験では供試体を圧密した後せん断を行う。せん断前の圧密段階では、供試体に σ_a (軸応力) = σ_r (側方拘束圧) = σ_c (圧密応力) を負荷し等方圧密する。圧密後、 σ_r を一定に保ち σ_a を増加させることにより、供試体にせん断力 $\tau = (\sigma_a - \sigma_r) / 2$ を作用させ、供試体のせん断特性および強度を調べるのである。今回の試験のような非排水せん断試験の場合、せん断中供試体内の体積は一定となるため、体積ひずみ v は 0 となる。

本試験は三軸圧縮試験装置を用いて行った。装置概要図を図 3.9-2 に示す。本装置は、空気圧で側圧を、また、メカニカルジャッキにより軸荷重を載荷する仕組みとなっており、軸荷重は荷重制御と変位制御により載荷が可能である。



平均応力 : $p = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3}$
 軸差応力 : $q = \sigma_a - \sigma_r$
 せん断応力 : $\tau = (\sigma_a - \sigma_r) / 2$
 体積ひずみ : $v = 1 - (1 - \epsilon_a)(1 - \epsilon_r)^2$

図 3.9-1 軸対称三軸圧縮試験概念図

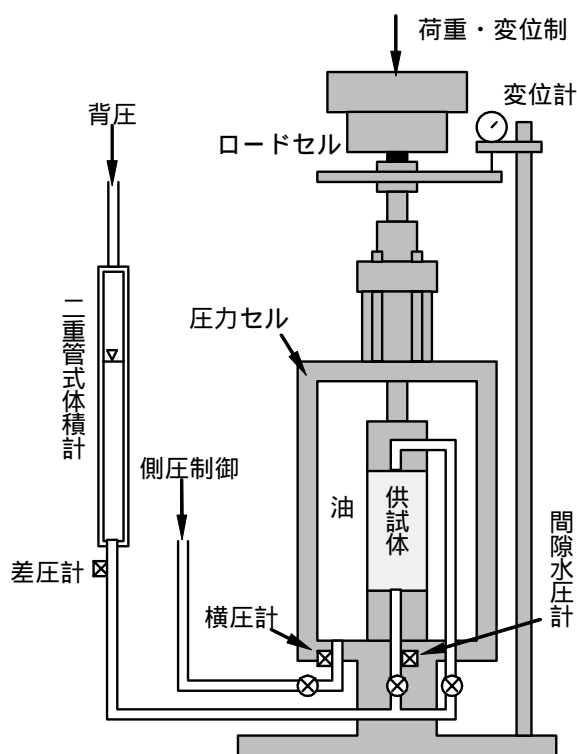


図 3.9-2 三軸試験装置概略図

3.9.2 試験条件

試験は、有効粘土密度 1.4 Mg/m^3 のケイ砂混合体（ケイ砂混合率 30wt%）を対象に実施した。供試体は側方拘束条件で上下二方向から圧縮成型した後、体積拘束条件で給水し、飽和供試体を作製した。供試体寸法は、直径 $\phi=30\text{mm}$ 、高さ $h=60\text{mm}$ である。

有効拘束圧は 0.4MPa 、ひずみ速度は $0.01\% \text{ min}^{-1}$ （载荷速度 0.006mm min^{-1} ）で軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ に達するまで载荷した。試験溶液は、一軸圧縮試験同様に幌延地下水および NaCl 水溶液 $0.2, 0.4, 0.8\text{mol/l}$ とした。試験数は 1 種類の試験溶液に対して 1 本としたが、予備試験として実施した NaCl 0.4 mol/l 供試体の試験が良好な結果を得たため、本試験結果として採用した。したがって、NaCl 0.4 mol/l のケースのみ 2 本のデータを得た。試験方法および手順などは基本的に地盤工学会基準（JGS T 523）に準拠している。試験条件を表 3.9-1 に、三軸試験機の仕様を表 3.9-2 に示す。

表 3.9-1 試験条件（三軸圧縮試験）

		幌延地下水	NaCl 0.2mol/l	NaCl 0.4mol/l	NaCl 0.8mol/l
供試体条件	ベントナイト	クニゲル V1			
	ケイ砂混合率[wt%]	30			
	有効粘土密度[Mg/m ³]	1.40			
	ケイ砂混合率[-]	30			
	供試体寸法[mm]	30 × h60			
	初期含水比[%]	6.04			
試験数		1	1	2	1
試験温度[]		室温（約 20 ）			
条件 載荷	拘束圧[MPa]	0.575			
	背圧[MPa]	0.175			
	ひずみ速度[% min ⁻¹]	0.01（载荷速度 0.006mm min^{-1} ）			

表 3.9-2 三軸圧縮試験装置仕様

側圧	使用最大圧力 0.8MPa
ロードセル	2kN, 10 kN, 20 kN 一軸圧縮強度, 拘束圧によって選択
間隙水圧	容量 1.0MPa
軸変位	容量 50mm
体積計	容量 25cc

3.9.3 試験手順

試験の概略手順を以下に示す。

1. 所定の含水比のケイ砂混合ベントナイト試料をプレス機を用いて所定の供試体寸法および密度となるよう圧縮成型する。
2. 圧縮成型した供試体を飽和セルに入れ, 1 ヶ月以上かけて加圧給水し, 供試体を飽和させる。
3. 飽和セルから供試体を取り出し, 重量を計測し簡易的に飽和を確認する。
4. 飽和した供試体を三軸試験装置にセットし, 排水経路を水で満たす。
5. 膨潤圧相当の側圧を載荷し, 試験装置セット時に供試体が吸収した余分な水を排水させる。
6. 段階的に背圧(間隙水圧)を負荷する。これに合わせて側圧も背圧相当分増圧する。
7. 供試体からの水の出入りが収まったのを確認し, 所定の圧密荷重を供試体に載荷し圧密を開始する。
8. 数日間圧密を行い, 圧密終了を 3t 法により確認し排水バルブを閉じる。
9. 非排水状態で拘束圧を上昇させ B 値を測定する。
10. 拘束圧を圧密時の圧力まで戻した後, 軸方向に $0.01\% \text{ min}^{-1}$ のひずみ速度でせん断試験を開始する。
11. 軸ひずみが 15%を超えた時点を目安に, 供試体は破壊したとみなし, 試験を終了する。
12. 供試体破壊後セルより供試体を取り出し, 破壊状況を写真撮影及び観察する。
13. 恒温槽で乾燥させ, 乾燥重量を測定する。

3.9.4 試験結果

(a) 圧縮成型および飽和

供試体は, 所定の乾燥密度になるようあらかじめ重量を計測したベントナイト粉末材料をケイ砂と攪拌して円筒形の鋼製容器内に投入し, プレス機を用いて側方拘束条件で一方向からある程度圧縮する。その後もう一方から圧縮成型して作製した。

圧縮成型した供試体を孔径 $2 \mu\text{m}$ のテフロンシートで包み, 飽和セルにセットした。飽和セルは供試体の全面から水を供給できるような仕組みとなっている。飽和セルに供試体をセットした後, セルにサクシオンポンプをつなぎ数十分間~1時間程度の間飽和セル内の空気を真空引きし, その後セルからサクシオンポンプを外し, 水圧約 0.3MPa で供試体に給水を行った。

(b) 圧密過程

飽和開始から 1 ヶ月程度経過後, 飽和セルより取り出し, 供試体の重量および寸法等を測定した後試験装置にセットした。排水経路を水で満たした後, 拘束圧 0.575MPa, 背圧 0.175MPa を負荷し, 有効拘束圧 0.4MPa の状態で圧密した。この有効拘束圧 0.4 MPa は, 3.4 項および 3.8 項で示す膨潤応力測定および一次元圧密試験で得られた膨潤圧より若干高い値であり, また, 圧密降伏より若干小さい過圧密領域である。

圧縮成型後，飽和セルから取り出した時の供試体寸法および重量，試験終了後に求めた乾燥重量およびそれらの値から求めた飽和含水比および飽和度，実有効粘土密度を表 3.9-3 に示す。実有効粘土密度は，3.7 項にて定義したとおりである。表より，飽和度は全ての供試体において 100%以上であり飽和状態であることが確認できる。また，飽和セルの内径が予定供試体寸法である 60mm より若干大きいことが主要因で実有効粘土密度は当初目標とした密度より若干小さくなった。

圧密時における供試体体積の経時変化を図 3.9-3 に示す。圧密に要した期間は，約 12 日間であった。なお，圧密時の供試体体積変化量は，本来，体積変化計により計測するが，本試験では排水経路の飽和等の作業過程において，圧縮ベントナイト供試体が若干試験溶液を吸収した可能性があり，また，体積変化量が微量でかつ排水経路が長い為，体積変化計での測定値が信頼を欠くものであった。したがって，圧密中の軸変位量 H_1 より供試体に等方的なひずみが生じたものと仮定して，(23) 式により体積変化量 V_1 を算定した。

$$\Delta V_1 = \frac{3\Delta H_1}{H_0} V_0 \quad (23)$$

ここで， H_0 は飽和セル取出し時の供試体高さ， V_0 は飽和セル取出し時の供試体体積である。図より，膨潤圧より若干高いと予想されていた有効拘束圧 0.4MPa 載荷より，1.5 ~ 3.3cm³ 程度の排水が確認された。

H_0 ， V_0 ， ΔH_1 ， ΔV_1 より求めた各試験の圧密終了後，すなわちせん断開始時の供試体体積 $V_1 (= V_0 - \Delta V_1)$ ，高さ $H_1 (= H_0 - \Delta H_1)$ ，直径 $D_1 (= 2\sqrt{V_1 - \pi H_1})$ を表 3.9-4 に示す。

表 3.9-3 供試体状態量の測定結果

有効粘土密度 [Mg/m ³]	試験水	供試体	圧縮成型時			飽和セル取出後			炉乾燥後 重量[g]	含水比 [%]	飽和度 [%]	実有効粘土密度 [Mg/m ³]	
			重量[g]	直径 [cm]	高さ [cm]	重量[g]	直径 [cm]	高さ [cm]					
1.40	幌延地下水	1	71.84	2.95	5.93	86.83	3.00	6.12	69.05	25.75	101.62	1.37	
		0.2	72.05	2.95	5.95	86.89	3.00	6.10	69.32	25.35	101.28	1.37	
	NaCl溶液 [mol/l]	1	72.10	2.95	5.97	87.17	3.00	6.15	69.3	25.79	102.40	1.37	
		0.4	2	71.91	2.95	5.97	87.14	3.00	6.15	69.13	26.05	101.66	1.36
			0.8	71.92	2.95	5.94	86.98	3.00	6.12	69.31	25.49	101.01	1.37

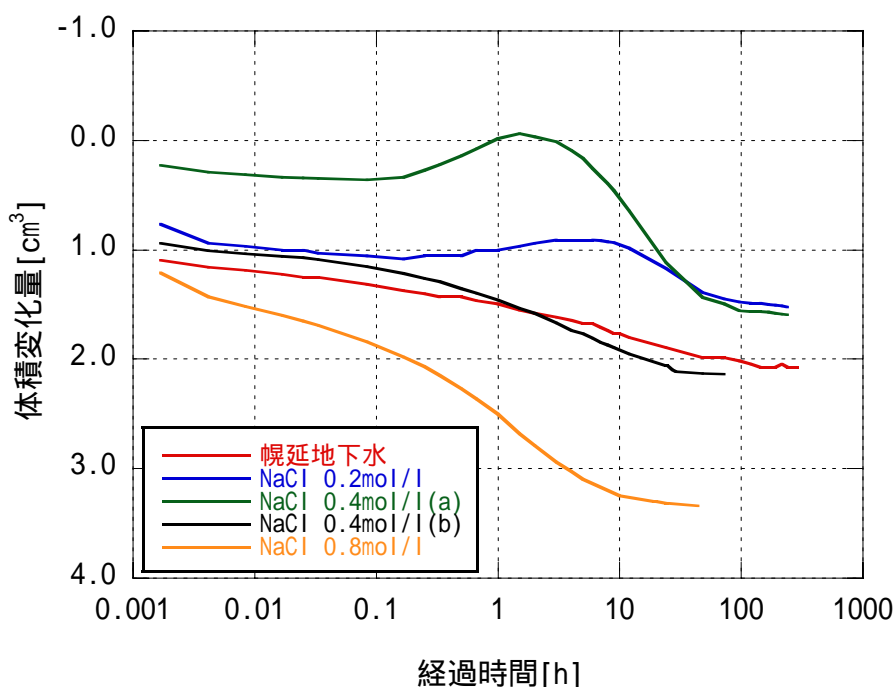


図 3.9-3 圧密曲線

表 3.9-4 せん断時（圧密後）の供試体状態量の測定結果

	試験溶液				
	幌延地下水	NaCl 溶液[mol/l]			
		0.2	0.4 (a)	0.4 (b)	0.8
圧密応力[MPa]	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
圧密中の軸変位量 H_l [cm]	0.098	0.072	0.075	0.101	0.158
体積変化 V_l [cm ³]	2.076	1.525	1.594	2.136	3.344
体積 V_l [cm ³]	41.17	41.67	41.70	41.36	39.99
高さ H_l [cm]	6.02	6.03	6.07	6.04	5.97
直径 D_l [cm]	2.95	2.97	2.96	2.95	2.92

(c) B 値の測定

体積変化が確認されなくなった時点で圧密を終了し、排水バルブを閉じ供試体を非排水状態とした。間隙水圧の安定性を確認した後、B 値の測定を行った。B 値の測定は、非排水状態で拘束圧を約 0.03MPa 低下させ、その時の間隙水圧の低下を測定する方法で行った。このようにして求められた拘束圧と間隙水圧と間隙水圧の変化量より、B 値を(24)式により算出した。

$$B \text{ 値} = \frac{p.p.}{e} \quad (24)$$

$p.p.$: 間隙水圧の変化量

e : 拘束圧の変化量

B 値の測定結果一覧を表 3.9-5 に示す。表中に示すように各供試体の B 値は 0.27 ~ 0.64 となり、土質試験における B 値 = 0.95 以上という基準（地盤工学会，2000）を大幅に下回った。同条件にて飽和させた一軸圧縮試験用の供試体における飽和セル取出し時の重量、寸法および試験終了後の乾燥重量から求めた飽和度（表 3.7-2）は、ほぼ 100%前後で飽和状態を確認しており、本三軸圧縮試験終了後に同様に求めた飽和度も表 3.9-3 に示すように飽和度 100%を超えた値を示しているため、供試体自体が不飽和であったとは考えにくい。原因としては、間隙

水圧計が供試体の外側に取付けられており、耐海水系仕様のものでなかったこと等による試験装置上の問題、間隙水が海水系であることから何らかの影響を及ぼしている等の化学的要因、背圧や B 値測定時の拘束圧の減圧の程度が小さかったことによる影響等が考えられるが詳細な原因は不明である。本報告においては、これらの供試体を用いてせん断試験を実施することとしたが、拘束圧の変化に間隙水圧が十分に追従していないことはせん断試験中の間隙水圧にも影響を及ぼしている可能性があるため、本データに関する取扱には十分注意を要するとともに本原因に関して今後精査する必要がある。

表 3.9-5 各供試体の B 値

	試験溶液				
	幌延地下水	NaCl 溶液[mol/l]			
		0.2	0.4 (a)	0.4 (b)	0.8
B 値	0.27	0.37	0.33	0.40	0.64

(d) せん断試験結果

1) 軸差応力と軸ひずみの関係

B 値測定終了後、非排水および側圧一定条件下において、供試体を軸ひずみ制御によるせん断試験を実施した。せん断試験中、軸方向変位速度一定とし、各試験ともひずみ速度 $0.01\% \text{ min}^{-1}$ (载荷速度を $0.006 \text{ mm min}^{-1}$) として試験を実施した。試験開始後、軸ひずみ $\varepsilon_a = 15\%$ の時点で試験を終了した。

せん断中の軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係を図 3.9-4 に示す。なお、軸差応力 q は軸ひずみ ε_a から半径方向ひずみ ε_r 、供試体半径、断面積を計算し、軸荷重と断面積より算出している。

図より軸ひずみと軸差応力の関係は、非線形関係となっており、各試験とも ε_a は 5% に達したあたりで q が最大となり、その後はほぼ一定もしくは若干低下している。この挙動は高治ら (高治・鈴木, 1999) によって得られた降水系の三軸試験結果とほぼ同等の挙動を示した。また、イオン強度の違いとピーク強度の関わりに明確な相関関係は得られなかったが、ピーク強度は $0.35 \sim 0.4 \text{ MPa}$ 程度の範囲内にある。

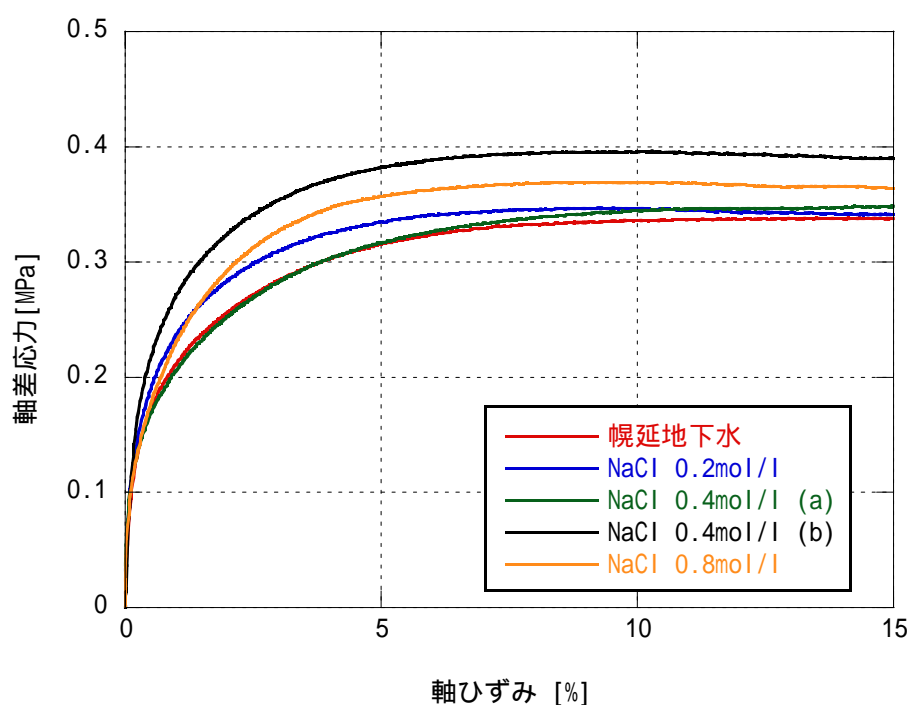


図 3.9-4 軸差応力と軸ひずみの関係

2) 過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

せん断試験中の過剰間隙水圧 Δu と軸ひずみ ε_a の関係を図 3.9-5 に示す。ここでいう過剰間隙水圧 Δu は、載荷により発生する間隙水圧増分 Δu_{all} から試験材料を弾性体とした場合の軸差応力による間隙水圧発生分 Δu_E を差し引いた値である。つまり、(25) 式で表すことができる。

$$\Delta u = \Delta u_{all} - \Delta u_E = \Delta u_{all} - q/3 \quad (25)$$

NaCl 0.2mol/l, 0.4mol/l(a)(b)供試体は、せん断初期に Δu が減少から増加に転じており、また、NaCl 0.8mol/l 供試体はせん断初期から Δu は上昇していき、それぞれ 0.04MPa 程度で収束している。

また、幌延地下水供試体においては、載荷初期において、NaCl 0.2mol/l, 0.4mol/l(a)(b)供試体と同様に Δu は減少し、その後漸増するが載荷過程全般にわたって負のままであった。表 3.9-5 に示すように、規定に満たない状態の B 値が相対的に高い NaCl 0.8mol/l 供試体は全般的に正の過剰間隙水圧が発生し、相対的に低い幌延地下水供試体が全般的に負の過剰間隙水圧が発生した。その他の供試体はその中間的挙動といえるため、B 値の大小が過剰間隙水圧の発生程度に影響している可能性があると考えられる。ただし、水圧の絶対値自体は小さく、有効拘束圧の 1/10 程度である。

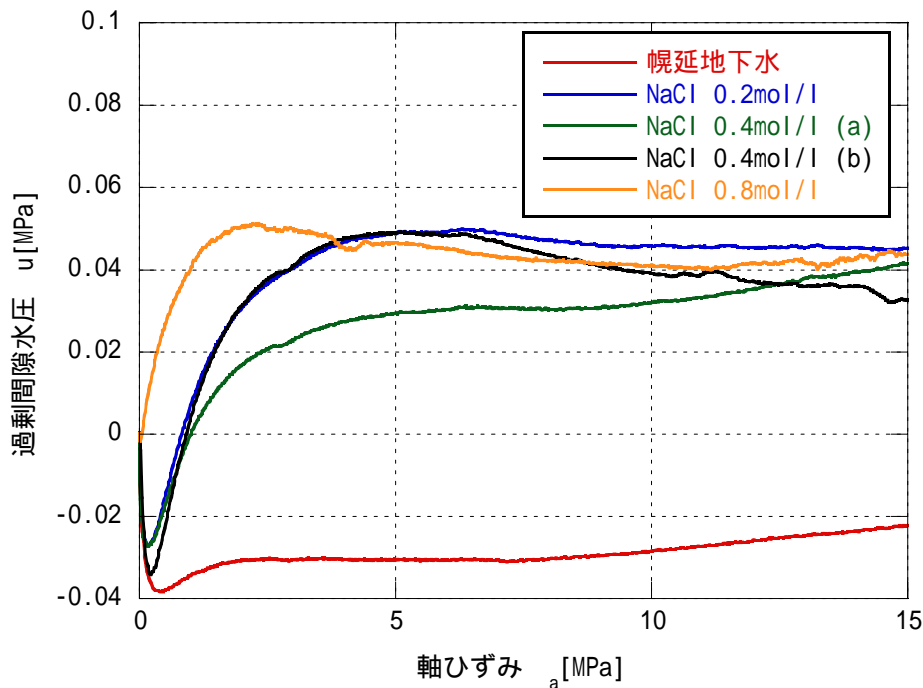


図 3.9-5 過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

3) 有効応力経路

せん断過程における有効応力経路を図 3.9-6 に示す。なお、本図には高治らによって得られた全降水系試験結果（高治・鈴木，1999）も併せて示す。また、平均有効応力 0.5MPa までを拡大したものを図 3.9-7 に示す。

前述したように各試験のピーク強度に大きな差異は見られないが、過剰間隙水圧の発生状況が若干異なるため、各試験溶液条件で応力経路の傾向は異なり、明確な相関関係は認められない。

ピーク強度を示す点は、降水系過圧密供試体より若干大きい、降水系供試体の初期乾燥密

度は 1.60Mg/m^3 であり，有効粘土密度に換算すると 1.36Mg/m^3 であるため，本試験条件より有効粘土密度は低い。膨潤圧より若干大きい有効拘束圧の過圧密領域ではこの密度差がほぼ保たれていると考えられ，単純に海水系の方が三軸圧縮強度が高いとは言えない。

本試験においては，各試験溶液条件で過圧密領域の 1 本の試験結果であるため，降水系供試体との挙動の違いやイオン強度間の差に関して明確な考察を与えることはできなかった。

今後，三軸応力下の挙動を検討するためには，より有効拘束圧の高い正規圧密領域での複数の試験データが必要である。

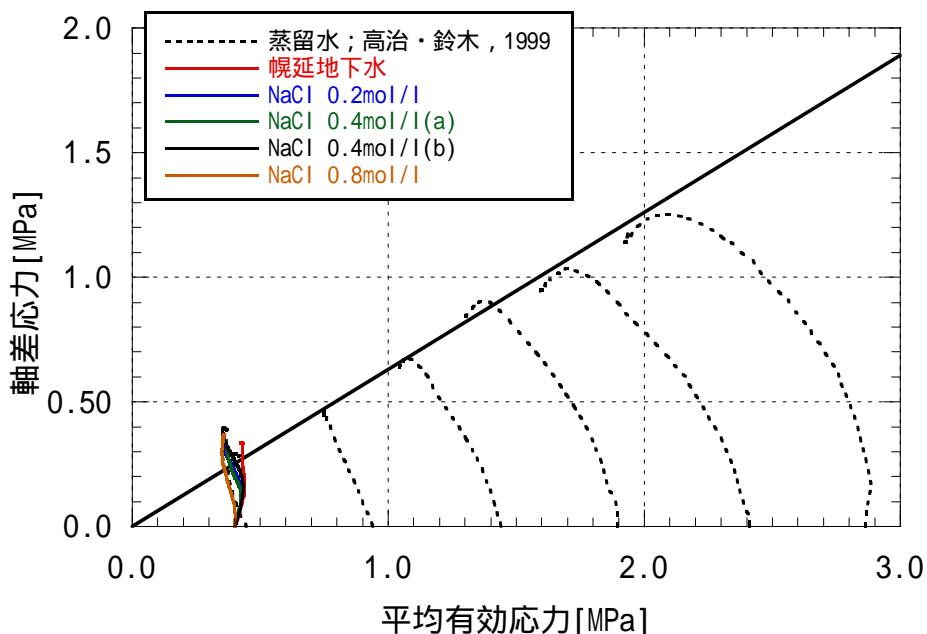


図 3.9-6 有効応力経路（蒸留水を用いた全試験データ（高治・鈴木，1999）との比較）

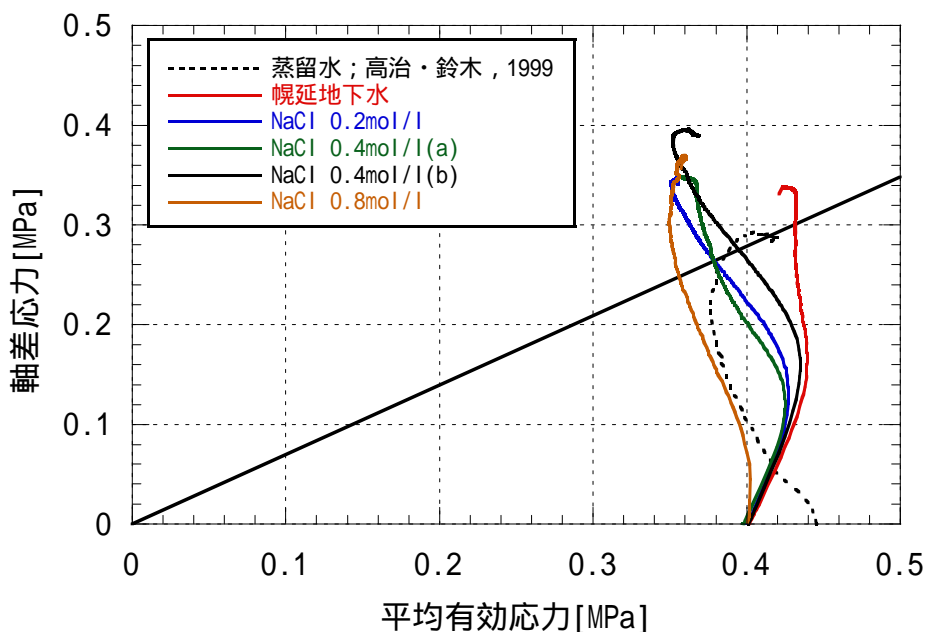


図 3.9-7 有効応力経路（拡大）

4) 供試体の破壊

せん断試験終了後の供試体の破壊状況例を写真 3.9-1 に示す。供試体においては肉眼にて識別できる明確な破損面は確認されず樽状の変形をしていた。



写真 3.9-1 試験終了後の供試体状況

4. まとめ

本研究においては、幌延地下水条件下における、緩衝材設計仕様および埋め戻し材仕様に関する基本特性試験を実施し、データの拡充を行った。さらに、幌延地下水条件下でのデータと比較するために必要となる蒸留水、人工海水および NaCl 濃度をパラメータとした試験も実施した。

以下に、各特性ごとに得られた知見を列挙する。

(1) 膨潤特性

- 幌延地下水条件下における粉末ベントナイトの膨潤力は、蒸留水に比して約 4 割程度低下する。また、イオン強度にて整理した場合、粉末ベントナイトの膨潤力は、イオン強度が高くなるに従い、膨潤力は徐々に低下し、イオン強度 1.0mol/l 以上においては、一定の値を示すことがわかった。
- 蒸留水条件下における圧縮ベントナイトの体積膨潤比は、初期乾燥密度 1.20 ~ 1.80Mg/m³ の範囲において、約 5.89 ~ 7.48 となり、体積膨潤が収束した時点の乾燥密度は、約 0.204 ~ 0.241Mg/m³ の範囲である。
- 幌延地下水条件下における圧縮ベントナイトの体積膨潤比は、有効粘土密度 0.64 Mg/m³ において、約 1.14 になることがわかった。また、人工海水条件下における圧縮ベントナイトの体積膨潤比は、有効粘土密度 1.37Mg/m³ において、体積膨潤比は約 1.29 となり、有効粘土密度 1.43Mg/m³ において、体積膨潤比は約 1.33 となることがわかった。また、イオン強度が高くなるに従い、体積膨潤比は低下する傾向があることが示された。なお、試験期間によってベントナイトの体積膨潤比は異なる可能性があるため、今後統一的な試験期間を設け、データを拡充していくことが必要である。
- 幌延地下水、人工海水および NaCl 試験溶液を用いた場合、圧縮ベントナイトの膨潤応力は、蒸留水に比して、有効粘土密度 1.60Mg/m³ 以下を境に低下することがわかった。また、粉末ベントナイトの膨潤力と同様に、イオン強度 1.0mol/l 以上においては、膨潤応力も一定の値を示すことがわかった。
- 有効粘土密度 0.5 ~ 2.0Mg/m³ の範囲において、降水系地下水条件下（蒸留水）における有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係式を得た。
また、有効粘土密度 1.1 ~ 2.0Mg/m³ の範囲において、海水系地下水条件下（幌延地下水、人工海水、NaCl 溶液）における有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係式を得た。

(2) 透水特性

- 緩衝材仕様に関しては、幌延地下水を流体とした場合、蒸留水に比べ、固有透過度は、有効粘土密度 1.17 ~ 1.80Mg/m³ の範囲において、5.3 倍 ~ 3.5 倍程度と高くなり、人工海水と同様に低密度から高密度になるに従って、蒸留水に近づく傾向があることがわかった。
- 埋め戻し材仕様に関しては、幌延地下水を流体とした場合、蒸留水に比べ、固有透過度が 3 桁程度大きくなる。また、人工海水を流体とした場合、蒸留水に比べ、固有透過度が 4 桁程度大きくなる。さらに、埋め戻し材仕様のような低ベントナイト密度の場合、幌延地下水および人工海水のような海水条件下における固有透過度は、緩衝材仕様に対して、急激に高くなる傾向があることが示された。
- イオン強度が 2.0mol/l までは、イオン強度が大きくなるに伴い、固有透過度も大きくなる傾向を示す。また、イオン強度が約 2.0 mol/l 条件下での固有透過度とイオン強度が約 3.4 mol/l

条件下での固有透過度を比較した結果，同程度の値を示すことがわかった。

- ・有効粘土密度 $1.17 \sim 1.80 \text{Mg/m}^3$ の範囲において，幌延地下水条件下における有効粘土密度と固有透過度の関係式を得た。

(3) 熱特性

- ・海水系地下水条件下（幌延地下水，人工海水）における緩衝材仕様の熱伝導率は，ベントナイト単体試料およびケイ砂混合体試料ともに，これまでに得られた降水系地下水条件下における成果と同等の値を示した。また，ベントナイト単体およびケイ砂混合体試料ともに，幌延地下水および人工海水を用いた場合においても，蒸留水に比して同等の値を示すことが分かった。一般に，土の熱伝導率は，固相率・含水率・石英含有量・有機物含有量に依存して変化すると言われており，ベントナイト単体およびケイ砂混合体ともに，液相における水分量のみの影響であるため両者の熱伝導率に大きな差異はない結果となったと考えられる。
- ・海水系地下水条件下（幌延地下水，人工海水）における緩衝材仕様の熱拡散率は，熱伝導率測定と同様に，ベントナイト単体およびケイ砂混合体ともに，これまでに得られた降水系地下水条件下における成果と同等値を示した。また，ベントナイト単体およびケイ砂混合体試料ともに，幌延地下水および人工海水を用いた場合においても，蒸留水に比して同等の値を示すことがわかった。
- ・海水系地下水条件下（幌延地下水，人工海水）における緩衝材仕様の比熱は，これまでに菊池らによって得られたベントナイト単体およびケイ砂混合体における熱解析の際に用いられる理論式で評価できると考えられる。

(4) 力学特性

- ・一軸圧縮強度，弾性係数とともに，多少ばらつきはあるものの，概ね塩濃度に依存して強度，剛性とともに低下することがわかった。しかしながら，幌延地下水に関しては，NaCl 以外の地下水成分が力学挙動に影響している可能性もあり，今後より詳細に検討する必要がある。
- ・ $e\text{-log}P$ 関係において，載荷過程は試験溶液条件によらずほぼ同一の関係を示し，また，降水系試験結果ともほぼ同じ挙動を示す。しかしながら，除荷，再載荷過程では， 20MPa での載荷時から相対的な変形の戻りが生じて降水系地下水よりも小さくなる。また，除荷，再載荷過程による $e\text{-log}P$ 曲線のヒステリシスは，降水系地下水に比べ小さくなる。
- ・圧密試験により得られた幌延地下水，NaCl 0.2mol/l および NaCl 0.8mol/l の透水係数は，透水試験結果と同様に，有効粘土密度が高くなるに従って低下する傾向を概ね示した。
- ・圧密非排水三軸試験における軸差応力と軸ひずみの関係は非線形関係となっており，試験溶液を変えた各試験ともに軸ひずみが 5% に達したあたりで軸差応力が最大となり，その後一定もしくは若干低下しており，降水系地下水条件とほぼ同等の挙動を示した。
- ・圧密非排水三軸試験における軸差応力と軸ひずみの関係においては，イオン強度とピーク強度の関係に明確な相関関係は認められなかった。
- ・圧密非排水三軸試験における応力経路の傾向においては，各試験溶液で異なり，明確な相関関係は認められなかった。

(5) 海水系地下水濃度に関する各特性との評価

- ・膨潤，透水，力学特性に関する試験結果を踏まえ，イオン強度を用いて海水系地下水濃度に関する影響について評価した場合，緩衝材仕様および埋め戻し材仕様ともに，降水系地下水条件下に比して，各特性におけるベントナイトの性能は，イオン強度が高くなるに従い，低

下し、約 1.0～2.0mol/l の範囲において低下率は一定になる傾向があることが示された。

これらの理由として、イオン強度（塩濃度）が徐々に高くなるに従い、ベントナイト中の交換性陽イオン量が高くなり、例えば、ベントナイトの凝集などの作用により間隙構造が変化したことによる影響と推察される。

5. おわりに

本研究において、幌延深地層研究計画を事例とした人工バリア設計および各原位置試験計画
上必要となる物性値の取得を実施した。

今後、本研究結果を踏まえ、幌延深地層研究計画における人工バリアの試設計を行うとともに、信頼性向上のため、幌延地下水を対象とした緩衝材と埋め戻し材の基本特性における不足データおよび処分ピットにコンクリート支保（低アルカリコンクリートなど）を用いた場合におけるデータの拡充を進める。また、得られたデータに関しては、web 公開を念頭とした緩衝材基本特性データベースに反映する。

6. 参考文献

- 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”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022. (1999)
- 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に関する研究開発 - 平成13年度報告 - ”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-003. (2002)
- 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に関する研究開発 - 平成14年度報告 - ”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2003-004. (2003)
- 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に関する研究開発 - 平成15年度報告 - ”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2004-007. (2004a)
- 核燃料サイクル開発機構：“幌延深地層研究計画 平成15年度調査研究成果報告”，サイクル機構技術資料，JNC TN5400 2004-001 (2004b)
- 栗原雄二，油井三和，棚井憲治，川上進，杉田裕，谷口直樹，平井卓，小川豊和，三原守弘，松井裕哉，藤島敦，盛口洋，宮野前俊一，本間信之：“幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2004-002. (2004)
- 菊池広人，棚井憲治，杉田裕：“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”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-008. (2003a)
- 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”，動燃技術資料，PNC TN8410 97-296. (1997)
- 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. (2003b)
- 黒澤進，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 3wt%NaCl 溶液及びCa型ベントナイトを用いた検討 ”サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-006. (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)
- 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)
- 菊池広人，棚井憲治：“緩衝材の熱物性試験(III) - 面熱源法による緩衝材熱物性の取得 - ”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-009. (2003)

高治一彦，鈴木英明：“緩衝材の静的力学特性”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-041. (1999)

高治一彦，重野喜政，下河内隆文：“幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性に関する研究”，竹中工務店 業務委託報告書，JNC TJ5400 2003-007 (2004)

WALTER J.MOORE：BASIC PHYSICAL CHEMISTRY，Prentice-Hall,Inc. (1986)

(社)地盤工学会：土質試験の方法と解説，丸善株式会社 (2000)

日本ベントナイト工業会：日本ベントナイト工業会標準会標準試験方法. (1977)

粘土ハンドブック第二版：日本粘度学会編. 技報堂出版 (1987)

中野政詩：土の物質移動学，東京大学出版会 (1991)

JACOB BEAR：Hydraulics of Groundwater，McGraw-hill publishing company (1979)

日本工業規格：化学製品の密度及び比重測定方法，JIS K 0061. (2001)

日本工業規格：液体の粘度-測定方法，JIS Z 8803 (1991)

国立天分台編：理科年表，丸善株式会社 (2000)

Gaylon S Campbell，中野政詩，東山勇訳：パソコンで学ぶ土の物理学，鹿島出版会. (1987)

田中幸久，中村邦彦，小峯秀雄，川西光弘：“ベントナイトの膨潤性に及ぼす人工海水濃度の影響”，土木学会，土木学会第 57 回年次学術講演会 CS10-037，pp.455-456 (2002)

Terzaghi, K.：Die Theorie der Hydrodynamischen Spannungerscheinungen und Ihr Eedbautechnisches Anwendungsgebiet, Proc. Int. Cong. Appl. Mech., pp.1-288 (1924)

足立紀尚，龍岡文夫：新体系土木工学 18 土の力学 ()-圧密・せん断・動的解析-，技報堂出版 (1981)

Taylor,D.W.：Fundamentals of Mechanics, John Wiley and Sons, New York (1948)

小峯秀雄，緒方信英：“高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋め戻し材の膨潤評価式の提案 - 砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響 -”，電力中央研究所報告，U99013 (1999)

平井卓，棚井憲治，高治一彦，大沼敏：“圧縮ベントナイトを用いた緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する研究”，地盤工学会，第 48 回地盤工学シンポジウム，pp.389-396 (2003)