

国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土 の基本特性データ

(NUMO-電中研共同研究)

2022年3月
原子力発電環境整備機構

2022年3月 初版発行

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

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構 / 一般財団法人 電力中央研究所
(Nuclear Waste Management Organization of Japan / Central Research Institute of
Electric Power Industry) 2022

国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土 の基本特性データ

(NUMO-電中研共同研究)

2022年3月
原子力発電環境整備機構

(空白ページ)

国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ

山本 陽一^{*1}, 後藤 考裕^{*1}, 北川 義人^{*1}
渡邊 保貴^{*2}, 横山 信吾^{*2}, 新橋 美里^{*2}

要旨

地層処分が必要とするベントナイトの量は、緩衝材として数十万トン、埋め戻し材として百万トン以上に及ぶことが見込まれる。ベントナイトは工業的に広く利用される材料であるため、将来的なベントナイトの供給不足や品質の変化などが処分事業に影響を及ぼすことが懸念される。したがって、必要な品質を満足するベントナイトを長期にわたり調達することが処分事業の円滑な推進のためには重要となる。そこで、地層処分における安全性と性能の確保を前提として、人工バリア材料の合理的な選定や仕様設定に資する多様な選択肢を示すこと、緩衝材または埋め戻し材の技術的な成立性検討に活用することを念頭に、地層処分研究開発第2次取りまとめ以降、多くの検討で用いられてきた山形県月布産のベントナイトに加え、産地や性状の異なる複数の国内産ベントナイトの特性データを取得した。

本研究で使用したベントナイトは、山形県月布産、青森県黒石産、新潟県細越産、新潟県三川産、群馬県富岡産、島根県鏡山産の6種類である。これらのベントナイトは、稼行中の日本各地の鉱山の分布と生産者から満遍なく、かつNa型とCa型で半数ずつになるように選定した。交換性陽イオン組成より、先の3種類はNa型、後の3種類はCa型に分類された。モンモリロナイトの層電荷には差があり、これを考慮すると各ベントナイトのモンモリロナイト含有率は36～64%の範囲にあると推定された。

特性データの取得に際しては、はじめに動的締固め試験を行い、最大乾燥密度と最適含水比を求めた。これをもとに供試体を作製し、透水試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験、圧密試験、三軸圧縮試験、保水性試験、熱特性測定試験を行った。ベントナイト混合率は30～100%の範囲で複数設定し、ケイ砂を混合した。多様な環境条件を考慮し、試験用水にはイオン交換水と人工海水を用いた。供試体の有効粘土密度が高くなるほど膨潤圧や膨潤率は高まり、透水係数は下がる傾向が認められ、人工海水によるこれらの変化はNa型ベントナイトにおいて顕著であった。圧縮指数はベントナイト混合率と相関があった。人工海水によりNa型ベントナイトの圧縮指数は減少した。特にNa型ベントナイトの膨張曲線は e - $\log p$ 面上で非線形性が強かったが、人工海水によりその傾向は弱まった。強度定数は乾燥密度やベントナイト混合率と関係しており、人工海水ではせん断強度はイオン交換水に比べてほぼ変わらないか、あるいは、やや高まる傾向が見られた。水分特性曲線はベントナイト混合率によって異なる傾きを示し、イオン交換水と人工海水では高含水比で収束するポテンシャルが異なることが分かった。供試体の熱伝導率は含水比およびベントナイト混合率と相関があることが分かった。

以上のデータを供試体条件や試験条件と併せて整理した。

^{*1} 原子力発電環境整備機構 技術部

^{*2} 一般財団法人 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門

Fundamental Engineering Properties of Compacted Japanese Bentonites and Bentonite-Sand Mixtures

Yoichi YAMAMOTO^{*1}, Takahiro GOTO^{*1}, Yoshito KITAGAWA^{*1}
Yasutaka WATANABE^{*2}, Shingo YOKOYAMA^{*2}, Misato SHIMBASHI^{*2}

Generally, a copious amount of bentonite is expected to be used as a buffer and backfill material for the geological disposal of radioactive waste. Owing to the widespread use of bentonite, a short supply and changeable quality of the material is likely to be a risk factor for reliable execution of geological disposal program. Therefore, it is imperative to ensure a sufficient quantity of bentonite that satisfies the quality standards for the required duration of construction. This study aims to select bentonites and design an engineered barrier that is scientifically reasonable and safe for geological disposal. In this study, the engineering properties of domestic bentonites were measured, including the reference bentonite, which has been frequently used in relevant research.

Six bentonites were sampled from Tsukinuno (Yamagata), Kuroishi (Aomori), Hosogoe (Niigata), Mikawa (Niigata), Tomioka (Gumma), and Kagamiyama (Shimane), respectively. Based on the exchangeable cation composition of montmorillonite, the first three were classified as Na-type bentonites, and the last three were classified as Ca-type bentonites. When considering the layer charge of montmorillonite in the bentonites differed, the montmorillonite content of the bentonites was estimated to be approximately 36–64%.

A dynamic compaction test was performed to measure the maximum dry density and optimum water content of each bentonite. Based on the results, the specimen was produced and used in the permeability, swelling pressure, swelling deformation, consolidation, triaxial compression, water retention tests, and the measurement of thermal properties. The mixture ratios of bentonite were 30%, 50%, 70%, and 100% by mixing silica sand. Deionized water (DW) and artificial seawater (SW) were used to consider various groundwater conditions. The swelling pressure and swelling ratio increased, and the hydraulic conductivity decreased with increasing effective clay dry density. The remarkable change in these properties by using SW was observed in the Na-type bentonites. The compression index correlated with the mixture ratio of bentonite and that of the Na-type decreased by using SW. On the e -log p plane, the unloading curve was nonlinear for Na-type; however, it became approximately more linear when SW was used. The strength parameters related to the dry density or mixture ratio of bentonite in DW and the shear strength did not change or was slightly increased in SW. Depending on the mixture ratio of bentonite, the water retention curve yielded different slope angles, and they converged to different potentials between DW and SW at higher water contents. Moreover, the thermal conductivity was related to the water content and bentonite mixture ratio. The engineering properties of the six bentonites measured in this study are expected to be used in designing the buffer and backfill specifications.

^{*1} Science and Technology Department, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

^{*2} Geology and Geotechnical Engineering Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

目次

1. はじめに.....	1
2. データ取得の対象.....	2
2.1 試験材料.....	2
2.2 試験項目.....	7
3. ベントナイトの性状分析.....	9
3.1 ベントナイトの分析方法.....	9
3.2 モンモリロナイトの分析方法.....	11
3.3 モンモリロナイト含有率の評価方法.....	13
3.4 ベントナイトの分析結果.....	14
3.5 モンモリロナイトの分析結果.....	23
3.6 モンモリロナイト含有率の評価.....	30
4. 基本特性試験.....	34
4.1 試験共通事項.....	34
4.2 締固め試験.....	45
4.3 透水・膨潤圧試験.....	54
4.4 膨潤変形試験.....	76
4.5 圧密試験.....	96
4.6 三軸圧縮試験.....	107
4.7 保水性試験.....	124
4.8 熱特性測定試験.....	142
5. 基本特性試験の試験条件および試験方法に関する検討.....	156
5.1 含水比測定.....	156
5.2 膨潤変形試験における上載圧の検討.....	161
5.3 人工海水を用いた場合の側壁漏れの検討.....	163
5.4 圧密試験における圧密終了判定方法の検討.....	166
5.5 人工海水を用いた試料調整による基本特性への影響.....	169
6. まとめ.....	171
参考文献.....	173
謝辞.....	177

List of Figures

Figure 2-1	Photos of bentonites used in this study.....	2
Figure 2-2	Location map of bentonite mines in operation	3
Figure 2-3	Relation between liquid limit and swelling power	5
Figure 2-4	Relation between amount of MB adsorbed and swelling power.....	5
Figure 2-5	Relation between Na/Ca ratio and swelling power.....	5
Figure 2-6	Relation between amount of MB adsorbed and total amount of extracted cation	5
Figure 2-7	Particle size accumulation curve of silica sand	6
Figure 3-1	XRD pattern of KV (random oriented sample)	15
Figure 3-2	XRD pattern of TG (random oriented sample).....	15
Figure 3-3	XRD pattern of SK (random oriented sample).....	16
Figure 3-4	XRD pattern of MG (random oriented sample).....	16
Figure 3-5	XRD pattern of TM (random oriented sample)	17
Figure 3-6	XRD pattern of IZ (random oriented sample)	17
Figure 3-7	Particle size accumulation curves of bentonites	19
Figure 3-8	Relative particle mass frequencies of bentonites	20
Figure 3-9	DTA and TG curves of bentonites	21~22
Figure 3-10	XRD patterns of elutriated samples.....	23
Figure 3-11	XRD pattern of KV after EG treatment (oriented sample)	24
Figure 3-12	XRD pattern of TG after EG treatment (oriented sample).....	24
Figure 3-13	XRD pattern of SK after EG treatment (oriented sample).....	24
Figure 3-14	XRD pattern of MG after EG treatment (oriented sample).....	25
Figure 3-15	XRD pattern of TM after EG treatment (oriented sample).....	25
Figure 3-16	XRD pattern of IZ after EG treatment (oriented sample)	25
Figure 3-17	XRD pattern of a bentonite after EG treatment labeled for estimation of illitization using Watanabe's diagram (Example for KV)	26
Figure 3-18	Smectite percentage of each sample evaluated using Watanabe's diagram	26
Figure 3-19	XRD pattern of each bentonite after GK test.....	27
Figure 3-20	XRD pattern of each sample after alkylammonium exchange treatment (oriented sample).....	28
Figure 3-21	AFM images of montmorillonite in each bentonite.....	29
Figure 3-22	Measurement results of montmorillonite particle in KV by AFM	30
Figure 3-23	Relation between amount of MB adsorbed on bentonite samples and CEC measured using BTM solution	31
Figure 3-24	Comparison of montmorillonite content of KV, TG and TM evaluated by different methods.....	32
Figure 3-25	Montmorillonite content of each bentonite evaluated by CEC_b/LC_m	33
Figure 4-1	Evaporation of artificial seawater by decompression	37
Figure 4-2	Relation between ion concentration of artificial seawater and time for decompression	37

Figure 4-3	Relation between mixing ratio of bentonite and effective clay dry density corresponding to 95% of the maximum dry density.....	38~40
Figure 4-4	Definitions of dry density and effective clay dry density.....	42
Figure 4-5	Schematic diagram of the specimen configuration.....	43
Figure 4-6	Automatic compaction test apparatus (Left) and a hydraulic jack to push out the specimen (Right).....	46
Figure 4-7	Compaction curves of bentonites	47~49
Figure 4-8	Optimum water content and maximum dry density of bentonite-sand mixtures.....	50
Figure 4-9	Relation between optimum water content and maximum dry density of bentonite-sand mixtures.....	50
Figure 4-10	Relation between mixing ratio of bentonite and effective clay dry density corresponding to maximum dry density.....	51~52
Figure 4-11	Whole view of apparatus for the permeability-swelling pressure test.....	56
Figure 4-12	Apparatus for the permeability-swelling pressure test.....	56
Figure 4-13	Schematic image of apparatus for permeability-swelling pressure test	56
Figure 4-14	Permeability-swelling pressure test procedure	59
Figure 4-15	Relation between equilibrium swelling pressure and effective clay dry density (DW)	60
Figure 4-16	Relation between equilibrium swelling pressure and effective clay dry density (DW & SW)	60
Figure 4-17	Comparison of equilibrium swelling pressure in SW with that in DW.....	61
Figure 4-18	Relation between coefficient of permeability and effective clay dry density (DW).....	61
Figure 4-19	Coefficient of permeability before and after applying backpressure (DW)	62
Figure 4-20	Coefficient of permeability for each bentonite (DW & SW).....	63
Figure 4-21	Relation between coefficient of permeability and effective clay dry density (DW & SW) ..	63
Figure 4-22	Coefficient of permeability before and after applying backpressure (SW).....	64
Figure 4-23	Extracted cations of samples before and after swelling pressure-permeability tests	69~70
Figure 4-24	Comparison of equilibrium swelling pressure between present study and previous study of KV (DW).....	74
Figure 4-25	Comparison of equilibrium swelling pressure between present study and previous study of KV (SW).....	75
Figure 4-26	Comparison of permeability between present study and previous study (DW)	75
Figure 4-27	Whole view of apparatus for swelling deformation test equipped a measurement system of permeability.....	78
Figure 4-28	Swelling deformation test apparatus	78
Figure 4-29	Schematic diagram of swelling deformation test apparatus equipped a measurement system of permeability.....	78
Figure 4-30	Experimental procedure of swelling deformation and permeability test.....	80
Figure 4-31	Comparison of maximum swelling rate between hyperbolic approximation and displacement measured (DW)	82
Figure 4-32	Relation between maximum swelling rate and initial effective clay dry density (DW).....	82

Figure 4-33	Relation between coefficient of permeability and effective clay dry density in swelling deformation and permeability test compared with permeability-swelling pressure test results (DW).	83
Figure 4-34	Side parts of specimen after swelling deformation tests (DW)	83
Figure 4-35	Water content distribution of specimen after swelling deformation (DW)	85
Figure 4-36	Maximum swelling rate for each bentonite (DW & SW)	87
Figure 4-37	Relation between maximum swelling rate and initial effective clay density (DW & SW)	87
Figure 4-38	Coefficient of permeability after swelling deformation (SW)	88
Figure 4-39	Side parts of specimen after swelling deformation test (SW)	88
Figure 4-40	Water content distribution of specimen after swelling deformation (SW)	90
Figure 4-41	Extracted cations of samples before and after swelling deformation tests	91~92
Figure 4-42	Schematic diagram of oedometer	97
Figure 4-43	Consolidation test apparatus	97
Figure 4-44	Relationship between void ratio and consolidation pressure (TG)	104
Figure 4-45	Relationship between void ratio and consolidation pressure (MG)	104
Figure 4-46	Relation between compression index and mixture ratio of bentonite	105
Figure 4-47	Relation between swelling index (C_{s1}) and mixture ratio of bentonite	105
Figure 4-48	Relation between swelling index (C_{s2}) and mixture ratio of bentonite	105
Figure 4-49	Relation between swelling index C_{s1} and C_{s2}	106
Figure 4-50	Schematic diagram of triaxial compression apparatus	108
Figure 4-51	Pressure chamber of triaxial compression apparatus	108
Figure 4-52	Relation between deviator stress and axial strain (TG)	110
Figure 4-53	Relation between deviator stress and axial strain (MG)	111
Figure 4-54	Mohr's stress circle of TG	112~113
Figure 4-55	Mohr's stress circle of MG	114~115
Figure 4-56	Effective stress path of TG	116
Figure 4-57	Effective stress path of MG	117
Figure 4-58	Relation between maximum deviator stress ratio and effective confining pressure	121
Figure 4-59	Relation between maximum deviator stress ratio and mixture ratio of bentonite	121
Figure 4-60	Relation between maximum deviator stress ratio and initial dry density	121
Figure 4-61	Relation between cohesion and mixture ratio of bentonite	122
Figure 4-62	Relation between maximum internal friction angle and mixture ratio of bentonite	122
Figure 4-63	Relation between critical state parameter and mixture ratio of bentonite	122
Figure 4-64	Relation between critical state parameter and initial dry density	123
Figure 4-65	Comparison of effective stress paths under DW and SW conditions	123
Figure 4-66	Measurement by vapor pressure method	126
Figure 4-67	Measurement by thermocouple psychrometer	127
Figure 4-68	Measurement by chilled mirror hygrometer	128
Figure 4-69	Measurement by pressure plate method	129
Figure 4-70	Relation between potential of soil water and water content by various methods (TG)	138
Figure 4-71	Relation between potential of soil water and water content by various methods (MG)	139

Figure 4-72	Relation between potential of soil water and water content by various methods (KV100-DW).....	140
Figure 4-73	Relation between potential of soil water and water content of various bentonite mixed soils	140
Figure 4-74	Relation between potential of soil water and water content normalized by bentonite content	140
Figure 4-75	Relation between potential of soil water and water content normalized by montmorillonite content.....	141
Figure 4-76	Comparison of water retention in deionized water with that in artificial seawater.....	141
Figure 4-77	Quick thermal conductivity meter	145
Figure 4-78	Schematic diagram of measuring device by HD method.....	146
Figure 4-79	Measuring status of thermophysical property by HD method.....	146
Figure 4-80	Setup for hot disk sensor	147
Figure 4-81	Relation between thermal conductivity and water content (QTM method).....	151
Figure 4-82	Relation between thermal conductivity and degree of saturation (QTM method).....	152
Figure 4-83	Comparison of thermal conductivity for bentonite types (QTM method).....	153
Figure 4-84	Comparison of thermal conductivity measured by QTM method and HD method.....	153
Figure 4-85	Relation between thermal diffusivity and water content (HD method)	154
Figure 4-86	Relation between thermal diffusivity and degree of saturation (HD method).....	154
Figure 4-87	Comparison of present study and previous study on the thermal conductivity of KV ...	155
Figure 5-1	Relation between apparent water content and cumulative heating time.....	157
Figure 5-2	Relation between relative water content and cumulative heating time	158
Figure 5-3	Relation between difference of evaporation mass from 110°C condition and ratios of extracted cations.....	159
Figure 5-4	Relation of water content by conventional drying and higher heating methods.....	160
Figure 5-5	Relation between swelling rate and elapsed time in preliminary swelling deformation test	162
Figure 5-6	Relation between swelling rate and elapsed time normalized by specimen height	162
Figure 5-7	Double wall permeameter.....	163
Figure 5-8	Schematic image of double wall permeameter.....	164
Figure 5-9	Coefficient of permeability measured by using the double wall permeameter (KV, SW).	165
Figure 5-10	Example of convergence judgment by Asaoka's method	166
Figure 5-11	Example of convergence judgment by $3t$ method.....	167
Figure 5-12	Example of convergence judgment by \sqrt{t} method	167
Figure 5-13	Comparison of e -log p curves obtained by each convergence judgment method.....	168
Figure 5-14	Swelling pressure-time history.....	169
Figure 5-15	Comparison of e -log p curves for different sample preparation waters	170

List of Tables

Table 2-1	Specifications of bentonite samples.....	2
Table 2-2	Physical, chemical and mineralogical properties of bentonite samples.....	4
Table 2-3	Physical properties of silica sand.....	6
Table 2-4	Chemical composition of silica sand.....	6
Table 2-5	Analysis items.....	7
Table 2-6	Test items for fundamental engineering properties.....	8
Table 3-1	Conditions for particle size analysis.....	10
Table 3-2	Mineral composition of bentonites.....	18
Table 3-3	Amount of MB adsorbed.....	18
Table 3-4	Amount of extracted cation measured in case of using BTM solution.....	19
Table 3-5	Particle density of soil for bentonites used in this study.....	23
Table 3-6	Parameters for Watanabe's diagram.....	26
Table 3-7	Mean layer charge of each bentonite (a) calculated by the equation reported in Olis et al. (1990), and (b) recalculated by the equation reported in Laird et al. (1989).....	29
Table 3-8	Amount of MB adsorbed on elutriated samples.....	31
Table 3-9	Adsorbed cation of levigated samples measured by MB adsorption test (a) and adsorbed cation of montmorillonite calculated from mean layer charge (b).....	32
Table 3-10	Comparison of montmorillonite content of KV, TG and TM evaluated by different methods.....	32
Table 3-11	Montmorillonite content of each bentonite evaluated by CEC_b/LC_m	33
Table 4-1	Component of artificial sea water.....	35
Table 4-2	Ion concentrations calculated by using composition table of the artificial sea water.....	35
Table 4-3	Basic target condition of specimens used in the laboratory tests in this study.....	41
Table 4-4	Sample preparation method for each test using artificial seawater.....	43
Table 4-5	Program of compaction test.....	45
Table 4-6	Compaction test results.....	53
Table 4-7	Program of permeability-swelling pressure test.....	54~55
Table 4-8	Permeability-swelling pressure test results (DW).....	64
Table 4-9	Permeability-swelling pressure test results (SW).....	65
Table 4-10	Pore volume ratio and ion concentration of the effluent solution (DW).....	67
Table 4-11	Pore volume ratio and ion concentration of the effluent solution (SW).....	68
Table 4-12	Amount of leachable cation before and after permeability-swelling pressure tests.....	71~73
Table 4-13	Program of swelling deformation test.....	76~77
Table 4-14	Swelling deformation test results (DW).....	81
Table 4-15	Water content distribution of specimen after swelling deformation (DW).....	84
Table 4-16	Swelling deformation test results (SW).....	86
Table 4-17	Water content distribution of specimen after swelling deformation (SW).....	89

Table 4-18	Amount of leachable cation before and after swelling deformation test.....	93~95
Table 4-19	Program of consolidation test	96
Table 4-20	Consolidation pressure in each loading step	98
Table 4-21	Results of consolidation tests (TG-DW)	100
Table 4-22	Results of consolidation tests (TG-SW).....	101
Table 4-23	Results of consolidation tests (MG-DW)	102
Table 4-24	Results of consolidation tests (MG-SW).....	103
Table 4-25	Program of undrained triaxial compression test.....	107
Table 4-26	Undrained triaxial compression test results (TG)	119
Table 4-27	Undrained triaxial compression test results (MG).....	120
Table 4-28	Program of water retention test (Vapor pressure method)	124
Table 4-29	Program of water retention test (Psychrometer method).....	125
Table 4-30	Program of water retention test (Pressure plate method).....	125
Table 4-31	Saturated salt solution used in this test	126
Table 4-32	Water retention test results by vapor pressure method.....	131
Table 4-33	Water retention test results of TG by psychrometer method.....	132~133
Table 4-34	Water retention test results of MG by psychrometer method.....	134~135
Table 4-35	Water retention test results of KV by psychrometer method	136
Table 4-36	Water retention test results by pressure plate method.....	137
Table 4-37	Program of thermophysical property measuring test.....	142~144
Table 4-38	Thermophysical property measuring test results by QTM method.....	148~149
Table 4-39	Thermophysical property measuring test results by HD method.....	150
Table 5-1	Apparent water content and cumulative heating time	157
Table 5-2	Relative water content and cumulative heating time.....	157
Table 5-3	Difference of evaporation mass from 110°C condition and ratios of extracted cations	159
Table 5-4	Apparent water content by conventional drying and higher heating methods	160
Table 5-5	Hyperbolic approximated maximum swelling rate in preliminary swelling deformation test	162
Table 5-6	Convergence time by each method	167

(空白ページ)

1. はじめに

わが国においては、地層処分研究開発第2次取りまとめ（JNC, 1999）以降、地層処分に適用するベントナイトに山形県月布産のベントナイトを選定し、これまでに多くの検討が行われてきた。原子力発電環境整備機構はサイトを特定せず、わが国における安全な地層処分の実現性について検討した結果を包括的技術報告書（NUMO, 2021）に取りまとめて公表したが、この報告書においても同様に月布産のベントナイトを緩衝材、埋め戻し材、止水プラグの材料に選定して、これらの設計例を示した。また、包括的技術報告書に例示した地下施設レイアウトにおいて、処分場に必要なたベントナイトの量は、高レベル放射性廃棄物処分場と TRU 等廃棄物処分場の合計で約 300 万トンに及ぶことが見込まれた。

ベントナイトは鋳物の砂型の粘結材、土木建設用の掘削安定液材、油脂や石油の脱色剤、化粧品、医薬品、塗料などの原料として工業的に広く利用されている。また、国内需要のベントナイトの大半は日本の鉱山で採掘されており、日本のベントナイトの総生産量は年 45 万トンから 50 万トン程度と言われている（伊藤, 2019）。こうした国内需給の状況において、地層処分では大量のベントナイトを必要とすることから、使用する材料の選択肢が制約された状態では将来見込まれる需要の増大により、ベントナイトの供給不足、品質の変化、価格の上昇などが、処分事業に影響を及ぼすリスクとして顕在化することが懸念される。このようなリスクに備えるため、緩衝材や埋め戻し材などの材料として適用性を有するベントナイトを複数確保して、安定した品質と価格のベントナイトを長期にわたり調達できるように準備しておくことが重要である。

そこで、地層処分における安全性と性能の確保を前提として、人工バリア材料の合理的な選定や仕様設定に資する多様な選択肢を示すこと（地層処分研究調整会議, 2018, NUMO, 2018）を目的とし、原子力発電環境整備機構と電力中央研究所による共同研究を実施した。ここでは、緩衝材または埋め戻し材の設計における技術的な成立性検討に活用することを念頭に、地層処分研究開発第2次取りまとめ以降、多くの検討で用いられてきた山形県月布産のベントナイトに加え、産地や性状の異なる複数の国内産ベントナイトの特性データを取得した。本報告書は、これらのベントナイトの鉱物学的な性状および水理・力学・熱的な特性にかかわるデータを技術報告書として取りまとめたものである。また、本報告書がデータ集として、地層処分のみならずベントナイト研究などにおいて広く活用されることを期待して、試験条件、供試体条件、試験結果にかかわるデータを一覧表にまとめた。

本報告書では、まず2章において、試験対象とした6種類のベントナイトと混合するケイ砂の諸元および基本物性、ベントナイトの性状分析と基本特性試験の実施項目を示す。3章では、性状分析の分析方法と分析結果を、ベントナイトの分析とモンモリロナイトの分析に分けて示す。4章では、基本特性試験（締固め試験、透水試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験、圧密試験、三軸圧縮試験、保水性試験、熱特性測定試験）の試験方法および試験結果を供試体条件や試験条件と併せて示す。また、各試験に共通する供試体仕様の考え方や試料調整方法、人工海水を用いた試験のデータ補正方法などについて詳述する。5章では、基本特性試験のデータの信頼性確保のために予備的な試験を実施して、本試験で採用する試験条件や試験方法について検討した結果を示す。6章では、本研究の実施結果を概括する。

2. データ取得の対象

2.1 試験材料

2.1.1 試験対象のベントナイト

Table 2-1に試験対象としたベントナイトの諸元を、Figure 2-1に試料の外観を示す。また、Figure 2-2には稼行中の国内ベントナイト鉱山と試験に用いたベントナイトの産地の位置図を示す。本研究では、山形県月布産（クニゲルV1）、青森県黒石産（白神）、新潟県細越産（天竜原鉱）、新潟県三川産（三川原鉱）、群馬県富岡産（富岡原鉱）、島根県鏡山産（関西ベントナイト）のそれぞれ国内の異なる鉱山で産出された6種類のベントナイトを試験の対象とした。本報告書では以降、それぞれのベントナイトに、KV, SK, TG, MG, TM, IZの略称を用いる。これらのベントナイトであるが、稼行中の日本各地の鉱山の分布と生産者から満遍なく、かつベントナイトの種類がNa型とCa型で半数ずつになるように選定した。Na型は抽出陽イオン量に占めるNaイオンの割合がCaイオンよりも多い場合で ($Na/Ca > 1.0$)、Ca型はその逆の場合としている。交換性陽イオン組成より、先の3種類はNa型、後の3種類はCa型に分類された。

Table 2-1 Specifications of bentonite samples

Sample	クニゲルV1 Kunigel V1 (KV)	天竜原鉱 Tenryu (TG)	白神 Shirakami (SK)	三川原鉱 Mikawa (MG)	富岡原鉱 Tomioka (TM)	関西ベントナイト Kansai bentonite (IZ)
Mine (Prefecture)	Tsukinuno (Yamagata)	Hosogoe (Niigata)	Kuroishi (Aomori)	Mikawa (Niigata)	Tomioka (Gunma)	Kagamiyama (Shimane)
Cation type	Na	Na	Na	Ca	Ca	Ca
Company	Kunimine Industries Co., LTD.	Kanben Mining Co., LTD.	Nihon Koken Co., LTD.	Hojun Co., LTD.	Hojun Co., LTD.	Kasanen Industry Co., LTD.
Commercial product / Sample product	Commercial product	Commercial product	Sample product	Sample product	Sample product	Commercial product
Remarks (Mesh size) *1	(250)	Not activated with Na_2CO_3 (250)	(250)	(250) *2	(250) *2	(200)

*1: 200 mesh: 75 μ m, 250 mesh: 63 μ m

*2: This sample was made from bentonite ore using the same method as commercial products.

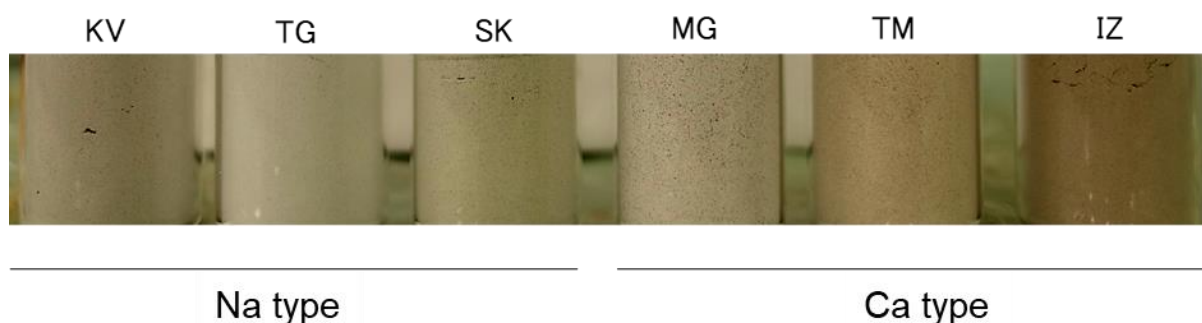


Figure 2-1 Photos of bentonites used in this study

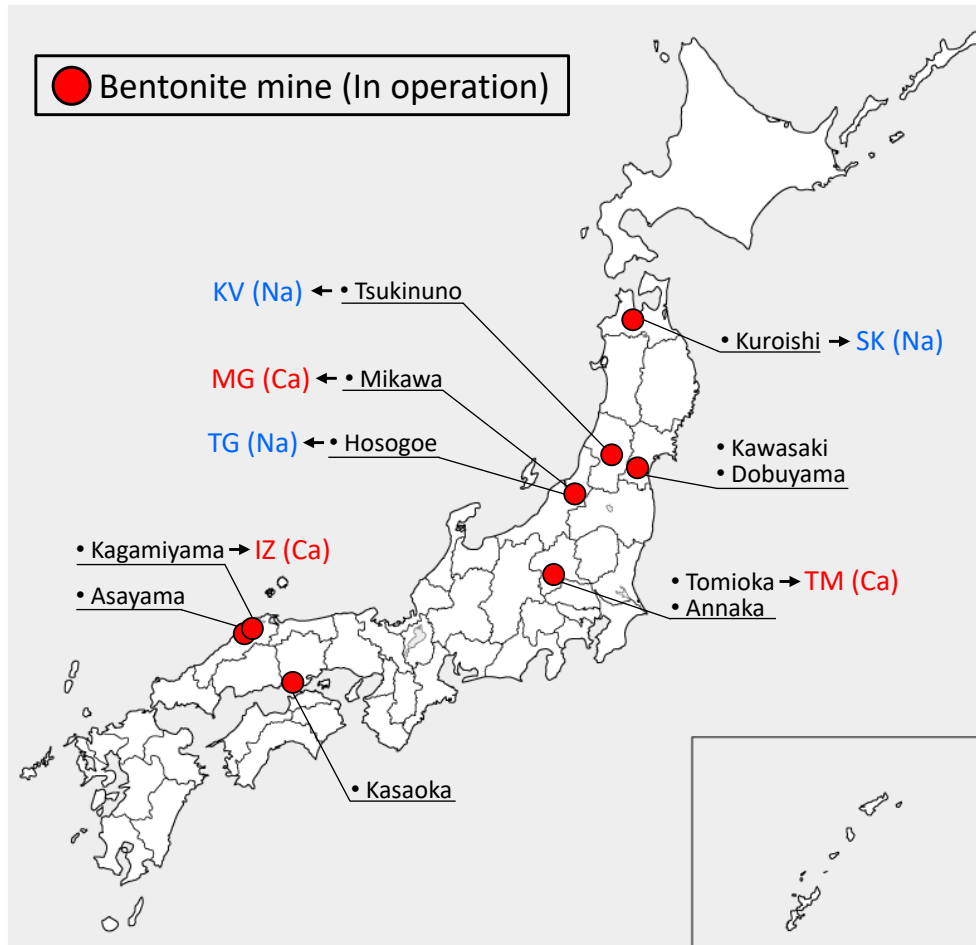


Figure 2-2 Location map of bentonite mines in operation

試料には市販品とサンプル品とが混在している。KV, IZ は市販品である。TG は市販品として購入可能であるが、生産者によると、製品の性能維持のため炭酸ナトリウムをわずかに添加する場合もあるということであったので、炭酸ナトリウムを添加されていないことが確認されたロットを用いている。SK は製品化されているが、現在は市販していないということであったのでサンプル品に分類している。MG はベントナイトの製品化が行われていない三川鉱山から採取した原鉱石を精製したサンプル品である。TM は、富岡鉱山の製品である「赤城」の原料に用いられている原鉱石を市販品と同じ製造方法で、ただし市販品では炭酸ナトリウムを添加して活性化されているが、この工程を省略した試料をサンプル品として提供されたものを用いている。

試料はいずれも粉体状に精製されているが、メッシュサイズはこれまでの地層処分研究開発での実績の多いKVの仕様も参考に、主に建設分野での用途に適していると考えられる200~250メッシュの粒度の試料を用いた。ベントナイトの粒度の規格としては、200メッシュ、250メッシュと数値が大きくなるほど使用する篩の目開きが小さくなるため、ベントナイトは細くなる。一般的に細かいほどモンモリロナイトの純度は高くなる。メッシュの篩の目開きに関しては、JISで200メッシュ：目開き75 μ m、250メッシュ：目開き63 μ mと規格化されている。

2.1.2 試料の物性

(1) ベントナイトの物性

Table 2-2 に本研究の対象とする 6 種類のベントナイトの基本物性を示す。本研究におけるベントナイトの物性値の取得方法とその結果は 3 章において詳しく述べるが，抽出陽イオン量は BTM (Benzyltrimethylammonium) 溶液を用いた抽出方法による測定結果を示している (3.4.3 項参照)。

Table 2-2 Physical, chemical and mineralogical properties of bentonite samples

Sample	Kunigel V1 (KV)	Tenryu (TG)	Shirakami (SK)	Mikawa (MG)	Tomioka (TM)	Kansai Bentonite (IZ)	
Cation type	Na	Na	Na	Ca	Ca	Ca	
Particle density of soil (Mg/m ³)	2.768	2.675	2.605	2.574	2.576	2.442	
50% Particle size D_{50} (μm)	10.1	5.9	7.0	19.4	26.7	16.7	
Natural water content (%)	7.9	8.0	4.7	7.0	9.1	7.6	
Liquid limit w_L (%)	436.4	238.9	324.5	93.6	87.2	107.3	
Consistency parameters	Plastic limit w_p (%)	26.4	39.8	28.8	28.7	31.3	
	Plasticity index I_p	410.0	199.1	295.7	63.3	58.5	76.0
Amount of methylene blue adsorbed (mmol/100g)	73	102	96	73	71	45	
pH	10.3	9.9	10.4	9.0	9.5	10.0	
Electrical conductivity (mS/m)	30.1	13.7	11.5	4.3	7.6	9.5	
Extracted cation (meq/100g)	Na ⁺	53.4	57.1	37.9	7.6	0.4	14.7
	K ⁺	0.4	2.5	3.2	2.4	3.3	1.1
	Ca ²⁺	9.3	15.0	20.1	21.5	49.7	18.2
	Mg ²⁺	0.8	3.4	4.6	19.8	3.1	1.8
	Total	63.9	78.0	65.8	51.3	56.5	35.8
Na / Ca ratio	5.74	3.81	1.89	0.35	0.01	0.81	
Swelling power (mL/2g)	20.0	15.5	16.0	7.5	5.5	7.0	

以下に，本研究に使用する 6 種類のベントナイトの物性値を比較した結果を示す。

Figure 2-3 に液性限界と膨潤力の関係を示す。ベントナイトのコンシステンシー特性において，液性限界と膨潤力との関係はベントナイトの種類によらずほぼ比例関係にあることが知られているが，図に示した試験結果についても両者の間には良好な相関があり，既往の試験結果 (水野ほか, 2003) とも整合的であることが分かった。Figure 2-4 に示す膨潤力とメチレンブルー (MB) 吸着量の関係からは，液性限界の場合のような相関性は認められなかった。本試料を含め国内外の 22 種類 (国内 15 種類，海外 7 種類) のベントナイトの膨潤力と MB 吸着量の関係を整理

した結果からは、Na型・Na置換型とCa型の二つのグループに分けると、それぞれについて膨潤力との間に正の相関があることが示されている（山本ほか，2017）。

Figure 2-5 に抽出陽イオン量から求めた Na/Ca 比と膨潤力の関係を示す。Na/Ca 比が高いほど膨潤力の高くなる傾向が認められ、相関性の高いことが分かった。Figure 2-6 に MB 吸着量と抽出陽イオン総量との関係を示すが、本試料の MB 吸着量と抽出陽イオン総量との間には良好な正の相関があることが認められた。

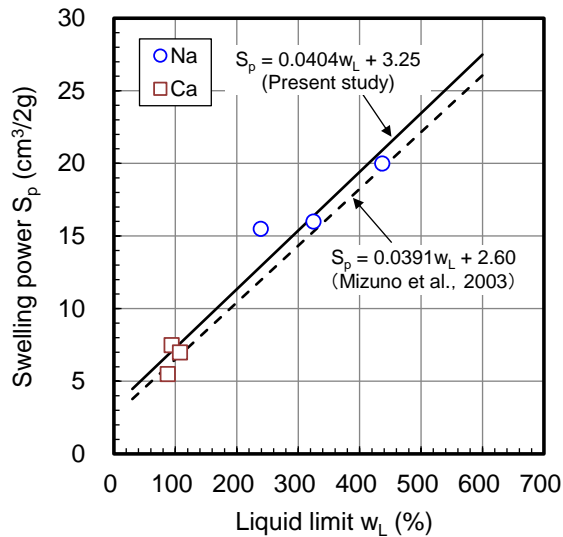


Figure 2-3 Relation between liquid limit and swelling power

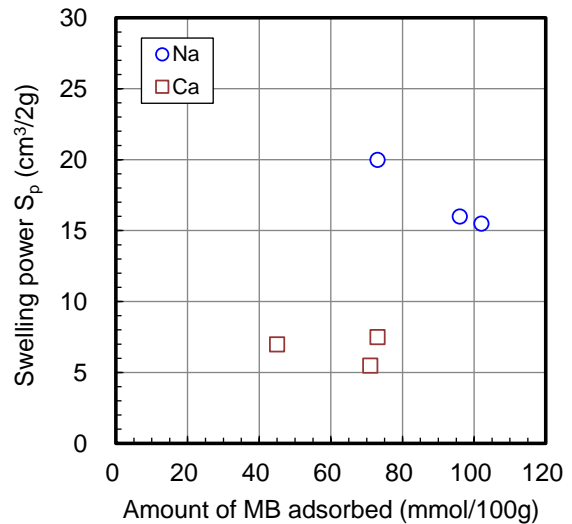


Figure 2-4 Relation between amount of MB adsorbed and swelling power

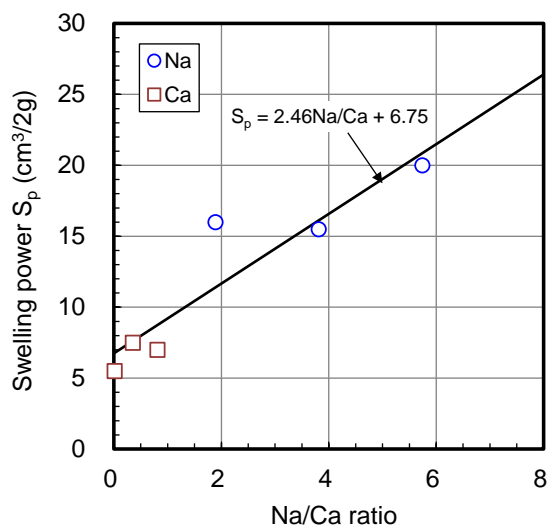


Figure 2-5 Relation between Na/Ca ratio and swelling power

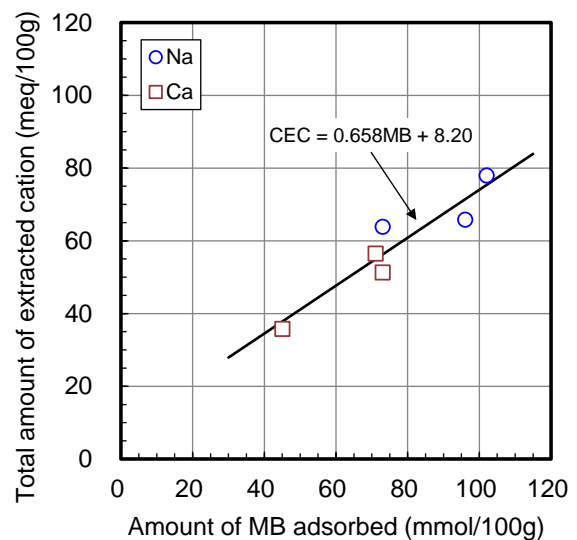


Figure 2-6 Relation between amount of MB adsorbed and total amount of extracted cation

(2) ケイ砂の物性

本研究では、ベントナイトとケイ砂の混合を考慮した。試験に用いたケイ砂は三河珪砂6号（三河珪石株式会社）である。三河珪砂の物性値をTable 2-3に、成分表をTable 2-4にそれぞれ示し、粒径加積曲線をFigure 2-7に示す。

Table 2-3 Physical properties of silica sand

Particle density of soil (Mg/m^3)	2.659
Maximum particle size D_{max} (mm)	2.0
50% Particle size D_{50} (mm)	0.24
Uniformity coefficient U_c	2.2

Table 2-4 Chemical composition of silica sand

(Source: Mikawa keiseki, 2021)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	CaO	TiO_2	Ig-loss	Unit
98.09	0.66	0.34	0.16	0.09	0.03	0.02	0.02	0.22	(%)

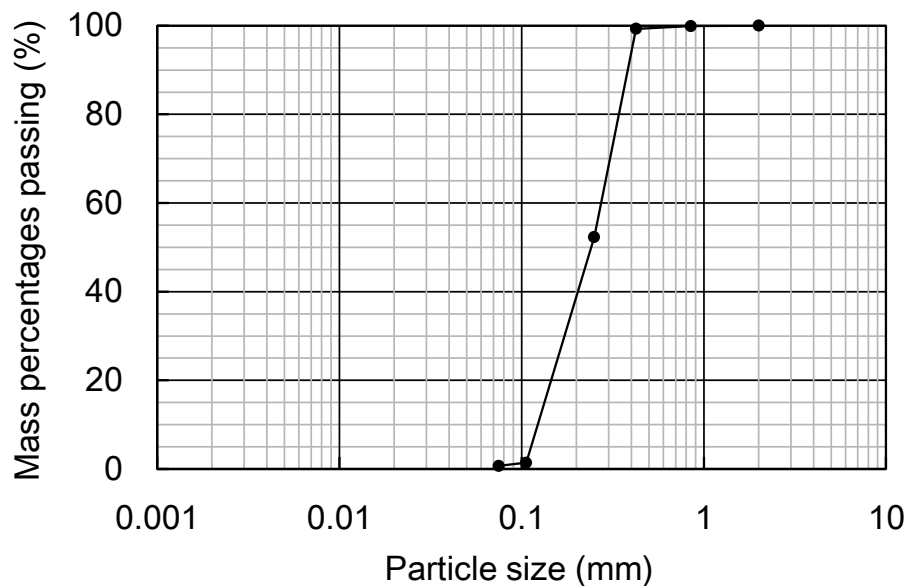


Figure 2-7 Particle size accumulation curve of silica sand

2.2 試験項目

2.2.1 ベントナイトの性状分析

人工バリアとしてのベントナイトの工学的性質は、鉱物組成、モンモリロナイトのイオン型や含有量などによって変化する。特に、モンモリロナイトの鉱物学的な性質は、その膨潤特性に影響を与え、結果としてベントナイトの透水性にも影響を与えると考えられる。そこで、基本特性試験の対象とするベントナイトの鉱物学的または物理化学的性質を把握する分析を実施した。本報告書では、この分析を性状分析と呼ぶことにする。

性状分析は、ベントナイトの分析とモンモリロナイトの分析に分けて実施した。Table 2-5 に測定項目とその対象を示す。ベントナイトの分析項目は、鉱物組成、MB 吸着量、抽出陽イオン量、粒度、脱水特性、土粒子の密度、モンモリロナイト含有率である。モンモリロナイトの分析項目は、非膨潤層の割合、層電荷発現位置、平均層電荷、粒子サイズである。

Table 2-5 Analysis items

Analysis item	Object
Mineral composition	Bentonite
Methylene blue adsorption	Bentonite
Leachable cation	Bentonite
Grain size distribution	Bentonite
Desiccation	Bentonite
Particle density of soil	Bentonite
Ratio of non-expansive layers (Illitization)	Montmorillonite
Location of layer charge (Beidelization)	Montmorillonite
Mean layer charge	Montmorillonite
Particle size	Montmorillonite
Montmorillonite content	Bentonite

2.2.2 基本特性試験

緩衝材や埋め戻し材の設計に必要なベントナイトの特性データを収集することを目的として、締固め試験、透水試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験、圧密試験、三軸圧縮試験、保水性試験、熱特性測定試験を行った。本報告書ではこれらの試験を総じて基本特性試験と呼ぶことにする。Table 2-6 に基本特性試験項目の一覧を示す。

締固め試験は、製作・施工性の検討や室内試験用の供試体を作製するうえで参考とする最適含水比や最大乾燥密度を把握するために実施した。膨潤性と透水性は地層処分に供するベントナイトに必要な最も基本的な性能になると考え、6種類すべてのベントナイトを対象に調べた。圧密試験、三軸圧縮試験、保水性試験、熱特性測定試験は、再冠水によるベントナイト系材料の飽和過程、廃棄体発熱の影響、水飽和後の力学挙動など、緩衝材や埋め戻し材などの設計要件や長期健全性などを検討するうえで重要となる。これらの試験はNa型とCa型のベントナイトの中から2~5種類のベントナイトを対象に試験を行った。

試験条件は、緩衝材から埋め戻し材の設計に幅広く利用できるようケイ砂の混合を考慮する

こととし、試験用水としては、多様な地質環境への対応を考慮して、淡水と塩水の両方の水質条件を想定した。

Table 2-6 Test items for fundamental engineering properties

Test	Properties	Design requirements, etc.	Kind of bentonite	Notes
Compaction test	Compaction curve Optimum water content Maximum dry density	Engineering practicality Restriction of swelling of buffer	6 KV, TG, SK, MG, TM, IZ	Reflected in the setting of specimen conditions (density / mixture ratio) for the following tests
Permeability test	Coefficient of permeability	Low permeability	6 KV, TG, SK, MG, TM, IZ	Same test apparatus as swelling pressure test
Swelling pressure test	Equilibrium swelling pressure	Self-sealing Physical buffer	6 KV, TG, SK, MG, TM, IZ	Same test apparatus as permeability test
Swelling deformation test	Maximum swelling rate	Self-sealing	6 KV, TG, SK, MG, TM, IZ	A permeability test was conducted after the maximum swelling rate was measured.
Consolidation test	e -log p curve Compression index Swelling index	Physical buffer Restriction of swelling of buffer Long-term stability	2 TG, MG	Step loading
Triaxial compression test	Cohesion Internal friction angle Critical state parameter	Physical buffer Restriction of swelling of buffer Long-term stability	2 TG, MG	Undrained condition
Water retention test	Water retention curve Potential of soil water	Long-term stability	3 KV, TG, MG	Vapor pressure method Psychrometer method Pressure plate method
Thermophysical property measuring test	Thermal conductivity Thermal diffusivity	High thermal conductivity	5 KV, TG, SK, MG, TM	QTM method Hot disk method

3. ベントナイトの性状分析

ここでは、6種類のベントナイトを対象として実施した性状分析の分析方法と分析結果を、ベントナイトの分析とベントナイトに含まれるモンモリロナイトの分析に分けて示す。

3.1 ベントナイトの分析方法

3.1.1 X線回折測定

ベントナイトの鉱物組成を調べるために不定方位試料を用いたX線回折（XRD）測定を行った。ここで、不定方位試料とは各鉱物の結晶面がランダムに測定面に対して並ぶように作製した試料である。具体的には、ベントナイトをメノウ乳鉢により粉砕し、粉砕試料をXRD分析用のアルミホルダーに詰めて作製した。作製した不定方位試料は、リガク製のSmartLabを用いて管電圧・管電流：45 kV，30 mA，ISスリット・RS1スリット・RS2スリット：1/12°，20 mm，開放，スキャンスピード：5°/min，スキャンステップ：0.02°の条件で測定した。

3.1.2 メチレンブルー吸着量の測定

メチレンブルー（MB）吸着量の測定手順は、試料のひょう量方法を除いて、JIS Z 2451の方法をもとに実施した。具体的には、下記の手順で実施した。

① 試料のひょう量

- ・ 試料を 110±5°Cで 18～24 時間乾燥後、デシケーター内で室温まで放冷させた試料を 0.50±0.01 g ひょう量した。

② MB 吸着量の測定

- ・ 三角フラスコに 2%ピロリン酸ナトリウム溶液を 50 mL 加え、ひょう量したベントナイト試料を溶液に分散させた。分散方法は、JIS Z 2451 に記載されている超音波法を用いて行った。
- ・ 予想される MB 吸着量の 80%に相当する量の 0.01 mol/L MB 溶液を、ピペットを用いて分散溶液に加え、2 分間攪拌した。
- ・ 攪拌後、分散溶液をスポイトで採取し、1 滴を濾紙に置いた。
- ・ ハローが認められるまで、MB 溶液 1 mL を加え、30 秒攪拌し、1 滴を濾紙に置く作業を繰り返した。
- ・ ハローが認められたら、さらに 2 分間攪拌し、スポイトで採取し、1 滴を濾紙に置いた。
- ・ 追加の 2 分間攪拌後に作成したスポットの周りに、ハローの大部分の幅が 1.5 mm を超えるまで、同様の操作を繰り返した。
- ・ 最初に加えた MB 溶液添加量が、最終の MB 溶液添加量の 65～85%の範囲に入っていることを確認し、添加量が範囲外の際は、測定値を棄却した。
- ・ 同一試料に対し、2 回の MB 吸着量測定により得られた値を算術平均し、小数点第一位以下を四捨五入し、整数値を測定結果とした。その際、各測定結果が±5 mmol の幅に収まっていることを確認し、範囲外の際は、測定値を棄却した。

3.1.3 抽出陽イオン量の測定

ベントナイトの抽出陽イオン組成は、BTM (Benzyltrimethylammonium) 溶液を用いた抽出方法により測定した。具体的には、下記の手順で実施した。

- 100 mL ポリ瓶にベントナイト試料約 0.5 g を計り取り、その時の質量を記録した。この時、ひょう量を行った室内環境において、含水比測定用のベントナイトのひょう量を行い、110±5°Cで12時間以上乾燥させることにより含水比の測定を行った。
- 試料の入ったポリ瓶に6%BTM溶液を50 mL加えた。
- 超音波分散器を用いて20分間試料の分散を行った。
- 分散後の試料を1時間静置した。
- 上澄み液を0.2 μm孔径のメンブレンフィルターで濾過した後に体積百分率で約0.1%の硝酸を添加した。
- 必要に応じて希釈をし、誘導結合プラズマ発光分光分析装置（以後、ICP-AESと記述する）による元素（Na, K, Ca, Mg）分析を行った。溶液分析の際に用いる標準液は、抽出作業に用いたBTM溶液を必要に応じて希釈したものを使って作製した。

3.1.4 粒度分析

ベントナイトの粒度測定を島津製のレーザ回折式粒子径分布測定装置 (Shimadzu SALD-2300) を使用して実施した。測定は、各ベントナイトを超純水に少量加え、超音波洗浄器にて10分間分散させたものに対して行った。測定回数は、それぞれ3回であり、その平均値を結果として示す。具体的な測定条件は、Table 3-1に示す。

Table 3-1 Conditions for particle size analysis

Sample	Weight of sample (g)	Volume of pure water (mL)	Weight of suspension (g)	Water content (%)	Dry weight of sample (g)	Solid-liquid ratio
KV	0.05	4	281.01	8.443	0.046	0.012
TG	0.03	4	287.73	8.785	0.028	0.007
SK	0.03	4	297.44	5.598	0.028	0.007
MG	0.05	4	286.72	7.140	0.047	0.012
TM	0.10	4	288.07	10.007	0.091	0.023
IZ	0.10	4	256.15	8.715	0.092	0.023

3.1.5 脱水特性

ベントナイトの脱水特性を把握するために示差熱分析 (DTA : Differential Thermal Analysis) と熱重量測定 (TG : Thermogravimetry) を行った。使用した測定装置は、リガク製の Thermo plus TG8120 である。昇温速度は 10 °C/min とし、室温 22.5~24.9°Cから 1000°Cまで昇温した。基準試料には酸化アルミニウムを用いた。雰囲気ガスは空気とした。使用した試料は、6種類のベントナイトである。熱重量の速度の変化を把握するため、TG 曲線の1次微分により得られた微分熱重量 (DTG : Differential Thermogravimetry) 曲線を作成した。

3.1.6 土粒子の密度測定

土粒子の密度は、JIS A 1202 に代表される方法により測定されることが多い。この方法をベントナイトのような膨潤性粘土にそのまま適用することは容易ではなく、例えば小峯・緒方(1991)は、ピクノメーターに投入した土の質量の測定精度や試料の脱気状態が結果として得られる土粒子の密度に影響することを述べている。本研究では、以下に記す方法により、ベントナイトの土粒子の密度を測定した。

使用した試料は、6種類のベントナイトである。JIS A 1202:2009 との相違点としては以下のとおりである。

JIS A 1202:2009 では、炉乾燥質量 10 g 以上を使用することとされているが、小峯・緒方(1991)が述べているとおり、ベントナイトは吸水により体積膨張するため、10 g をピクノメーターに投入することは難しい。そこで、自然含水比のベントナイトを 3~8 g の範囲で秤量し、ピクノメーターに投入した。電子天秤は、0.001 g まで測定できるものを用いた。試料が入ったピクノメーターを 110±5°C で 24 時間以上乾燥させ、シリカゲルを設置したデシケーター内で室温に戻してから乾燥質量を測定した。その後、ピクノメーターに半分程度までイオン交換水を入れ、試料が満遍なく水浸するまで手で振って攪拌し、超音波を当てながら分散処理を行った。試料をイオン交換水に分散させた後、減圧法により脱気を行った。試料とイオン交換水の分散液が入ったピクノメーターをデシケーター内に設置し、真空ポンプを用いてデシケーター内を減圧した。急激に減圧すると内容物が吹きこぼれるため、ゲージ圧でおよそ -25, -50, -75, -100 kPa と段階的に減圧した。ゲージ圧でおよそ -100 kPa としてから、懸濁液から気泡が生じなくなるまで減圧状態を 3 日程度維持した。ピクノメーターを脱気水で満たし、JIS A 1202:2009 に従い、土粒子の密度を測定した。湯せんによる脱気は、沸騰の程度を制御することが難しく、内容物の吹きこぼれが生じやすいため行わなかった。

3.2 モンモリロナイトの分析方法

3.2.1 モンモリロナイトの抽出

ベントナイトに含まれるモンモリロナイトを抽出するために水簸を行った。試料 0.5~1 g とイオン交換水 45 mL 程度を遠沈管に入れ、試料を超音波洗浄器で十分に分散させた。分散液は遠心分離機を用いて固液分離した。遠心分離機の回転半径は 17 cm である。この時の回転数と時間は、1000 rpm (190 G)、4 分間である。固液分離後の上澄み液(懸濁液)を新たな遠沈管に移し、再度、3000 rpm (1711 G) で 40 分間固液分離し、沈降した固相試料を回収した。この一連の処理により、粒径 0.2~2 μm の粒径フラクション(以下、水簸試料と記述する)を回収した。また、遠心分離により生じた上澄み液を 60°C で炉乾燥することにより、0.2 μm 以下の粒径フラクションを回収した(渡邊・横山, 2020)。固相試料は、デシケーター内で減圧乾燥し、メノウ乳鉢により粉碎して後述の分析に使用した。MB 吸着量測定に供するモンモリロナイト試料は、その純度が重要である。上記の水簸によって、モンモリロナイト以外の鉱物が XRD 測定によって認められたものについては、モンモリロナイトの分散性を高めるために交換性陽イオンを Na に交換して水簸を実施した。

3.2.2 非膨潤層の割合評価

水簸試料中の非膨潤層（イライト層）の存在の有無と、その割合を評価するためにエチレングリコール（EG）処理を施した定方位試料のXRD測定を行った。ここで、定方位試料とはモンモリロナイトなど層状ケイ酸塩鉱物の基底面が測定面に対して平行に並ぶように作製した試料である。具体的には、水簸試料10 mg程度をイオン交換水0.4 mLに分散させて、スライドガラスに塗布し、風乾させて作製した。EG処理は、定方位試料にEG溶液数滴を滴下し、半乾きになって状態でXRD測定を行った。リガク製のRINT2500を用いて管電圧・管電流：40 kV, 30 mA, DSスリット・SSスリット・RSスリット：1/2°, 1/2°, 0.3 mm, スキャンスピード：2 °/min, スキャンステップ：0.02°の条件で測定した。

非膨潤層の存在の判定には、Watanabe (1988)の判定図を用いた。具体的には、試料のXRDパターンからEG処理により膨張したモンモリロナイトの001, 002, 003反射の 2θ を読み取り、それらを図中にプロットすることにより判定した。

3.2.3 層電荷発現位置の評価

スメクタイトの膨潤挙動に影響を及ぼす層電荷の発現位置を調べるため（Sato et al., 1992）, Greene-Kelly (GK) テストを行った（Greene-Kelly, 1955）。GKテストでは、まず下記の手順でLi交換処理試料を作製した。

- ・ 水簸試料50 mgを1 mol/Lの塩化リチウム溶液30 mL程度に分散させ12時間以上反応させた。
- ・ 反応後の懸濁液を遠心分離により固液分離し、上澄みを破棄した。固相試料に再度1 mol/Lの塩化リチウム溶液を30 mL程度加えて分散し、12時間以上反応させた。この作業を5回繰り返した。
- ・ 5回のLi交換処理後の試料は、80%程度のアルコールを用いて過剰な塩化物イオンが認められなくなるまで洗浄した。洗浄の終了判定は、洗浄後のアルコールに硝酸銀溶液を滴下し、白濁が認められなくなるまでとした。

洗浄後のLi交換試料は、シリカガラスに塗布し、風乾させて定方位試料を作製した。定方位試料を300°Cで24時間加熱した。加熱後の試料は密閉容器内のグリセリンに浸漬しないように定置し、105°Cで一晩加熱してXRD測定に供した。作製した定方位試料は、リガク製のSmartLabを用いて管電圧・管電流：45 kV, 30 mA, 長手制限スリット・ISスリット・RS1スリット・RS2スリット：10 mm, 1/12°, 20 mm, 開放, スキャンスピード：5 °/min, スキャンステップ：0.01°の条件で測定した。

3.2.4 平均層電荷の測定

スメクタイトの平均層電荷を測定するために、Laird et al. (1989), Olis et al. (1990)およびSato et al. (1996)に準じてアルキルアンモニウム交換処理を実施した。具体的には、以下の手順で実施した。

- ・ 水簸試料30 mgを遠沈管内でイオン交換水10 mLに分散させた。
- ・ 分散液に、ドデシルアミン塩酸塩を0.1 mol/Lになるように試薬を加えた。
- ・ 65°Cの恒温器内で2日間反応させ、固液分離し、上澄みを破棄した。
- ・ 固相試料に再度10 mLのイオン交換水と試薬を加えて、65°Cの恒温器内で1日間反応させた。
- ・ 反応後の試料を80%のアルコールで4～5回、100%アルコールで2回洗浄し、過剰な塩化物イオンが存在しないことを硝酸銀溶液を用いて確認した。
- ・ 洗浄後の試料をスライドガラスに塗布して風乾させた定方位試料を65°Cの恒温器内で1～2時間程度加熱した。
- ・ 加熱後の定方位試料を用いてXRD測定を行った。

XRD測定の結果より、各試料の001ピークの格子面間隔 (d 値) を読み取り、下式3-1によって試料の平均層電荷を算出した。また、Laird et al. (1989)では、アルキルアンモニウム交換処理試料のXRD分析結果から層電荷を計算する際、アルキルアンモニウムイオンの充填密度の推定が不正確である可能性を指摘しており、そのことを補正する式3-2を提案している。本研究では、この式を用いて平均層電荷を補正した。

$$\text{Olis et al. (1990)} \quad \text{平均層電荷} = (d(001) - 5.52) / 32.98 \quad (\text{式 3-1})$$

$$\text{Laird et al. (1989)} \quad \text{平均層電荷} = 1.638 \times \text{アルキルアンモニウム交換処理により求めた平均層電荷} - 0.060 \quad (\text{式 3-2})$$

3.2.5 粒子サイズの評価

各ベントナイト中のモンモリロナイトの結晶の粒子サイズを評価するために、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた観察を行った。具体的には、試料10 mg程度を100 mL程度のイオン交換水に超音波洗浄器を用いて十分に分散させた。分散液をへき開した雲母板に塗布して数分放置し、余分な分散液を濾紙に吸わせて除去し乾燥させ、AFM観察の試料とした。雲母板上のモンモリロナイト粒子を観察して、各モンモリロナイトの粒子サイズ (面積と厚さ) を測定した。

3.3 モンモリロナイト含有率の評価方法

一般に、モンモリロナイト含有率は、ベントナイトとモンモリロナイトのMB吸着量を用いて算出することが多い。モンモリロナイトのMB吸着量を求めるためには、ベントナイトから高純度のモンモリロナイトを抽出する必要があるが、その抽出作業は難しく、また抽出された試料の純度を確認することも容易ではない。そのため、モンモリロナイトのMB吸着量として一義的な値 (例えば、140 mmol/100g) を仮定して計算されることが多いが、ベントナイトの産地が異なり、モンモリロナイトの吸着性能が異なる場合には、不確実性を有した計算となる。本研究においては、産地が異なる6種類のベントナイトを対象としており、モンモリロナイトの性状に違いがあることも考慮したうえで、モンモリロナイト含有率を同じ方法で評価できることが重要と考えた。そこで、高純度のモンモリロナイトを抽出できない試料が含まれることも想定し、以下に記すとおり、MB吸着量を用いない評価方法についても検討し、モンモリロナイト含有率を評価した。

ベントナイトの陽イオン吸着容量は、モンモリロナイトの陽イオン吸着容量を反映していると仮定すると、モンモリロナイト含有率は以下の式で評価することができる。

$$\text{ベントナイトのモンモリロナイト含有率} = \frac{\text{ベントナイトの陽イオン吸着容量} \dots (1)}{\text{モンモリロナイトの陽イオン吸着容量} \dots (2)}$$

. (式3-3)

式3-3中の(1)の値としてベントナイトのMB吸着量や陽イオン交換容量 (CEC) , 式3-3中の(2)の値としてモンモリロナイトの純度が高いと予想される0.2 μm以下画分の試料のMB吸着量や平均層電荷から計算した値を使用した。式3-3中の(2)の値の一つとして使用するモンモリロナイトのMB吸着量を測定するために、3.2.1項で述べた方法で抽出した0.2 μm以下画分のMB吸着量の測定を行った。MB吸着量測定は、3.1.2項に記載した方法で実施した。式3-3中の(2)の値のもう一つの値として、モンモリロナイトの陽イオン吸着容量を使う場合は、これを平均層電荷から計算した。具体的には、単位胞半分のモンモリロナイトの分子量を370 g/molとし、以下の式で計算した。なお、単位胞半分当たりのモンモリロナイトの平均層電荷の求め方は、3.2.4項に記載している。

$$\text{モンモリロナイトの陽イオン吸着容量} \left[\frac{\text{mmol}}{100\text{g}} \right] = \frac{\text{平均層電荷密度} \left[\frac{\text{unit cell}}{\text{half}} \right] \times 10^5}{370 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]}$$

. (式3-4)

3.4 ベントナイトの分析結果

3.4.1 X線回折測定

ベントナイトの不定方位試料のXRDパターンをFigure 3-1～Figure 3-6に示す。また、各ベントナイトの鉱物組成をTable 3-2に示す。各ベントナイトの鉱物組成は類似しており、微量な随伴鉱物種に差が認められた。今回認められた構成鉱物種は、モンモリロナイト、石英、クリストバライト、長石、カルサイト、クリノプチロライト、イライト、モルデナイト、黄鉄鉱であり、これらの組み合わせで各ベントナイトは構成されている。ただし、鉱物組成は類似しているものの、各鉱物のピーク強度比は、各ベントナイトで異なっていることから、それぞれの含有率は異なるものと推察される。

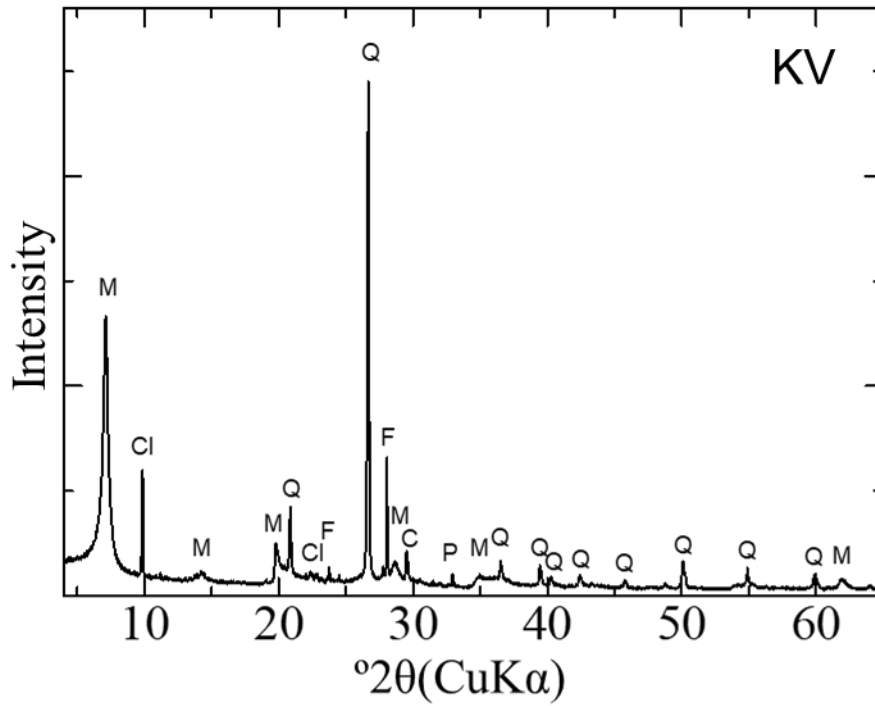


Figure 3-1 XRD pattern of KV (random oriented sample)

M: montmorillonite, Cl: clinoptilolite, Q: quartz, F: feldspar, C: calcite, P: pyrite

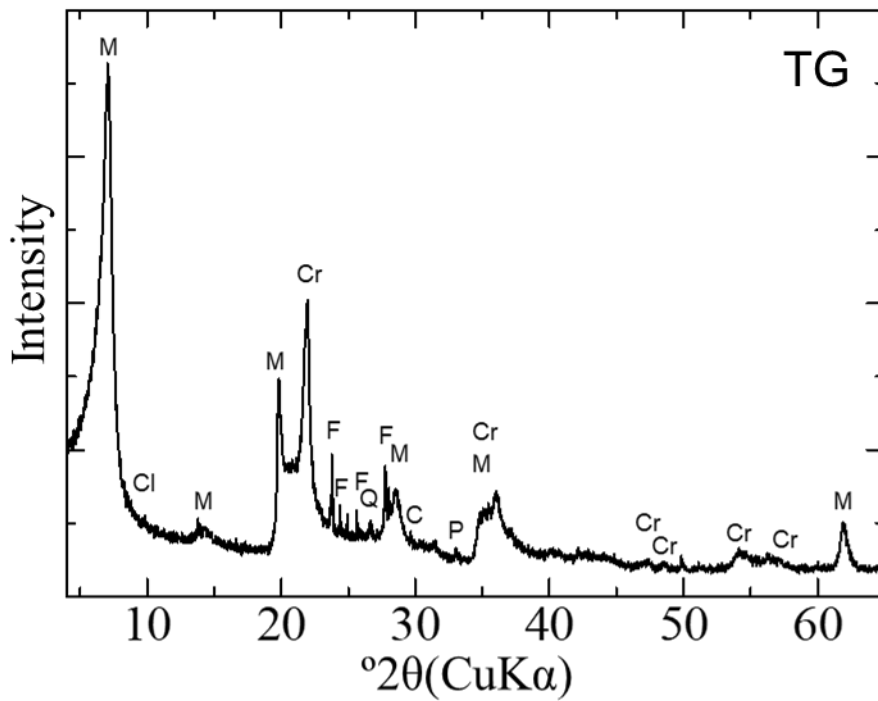


Figure 3-2 XRD pattern of TG (random oriented sample)

M: montmorillonite, Cl: clinoptilolite, Cr: cristobalite Q: quartz, F: feldspar, C: calcite, P: pyrite

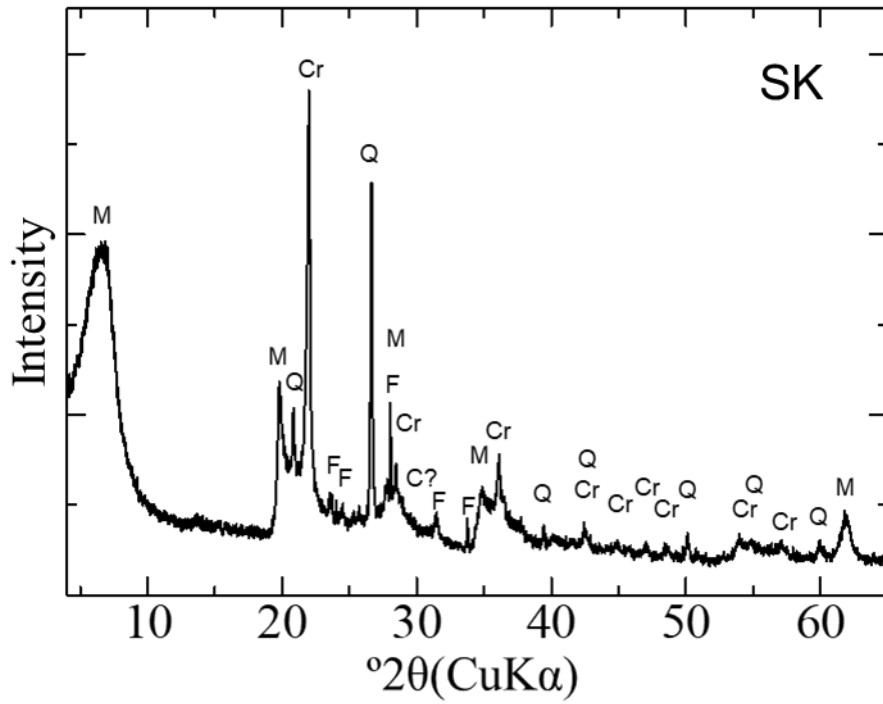


Figure 3-3 XRD pattern of SK (random oriented sample)
 M: montmorillonite, Cr: cristobalite Q: quartz, F: feldspar, C: calcite

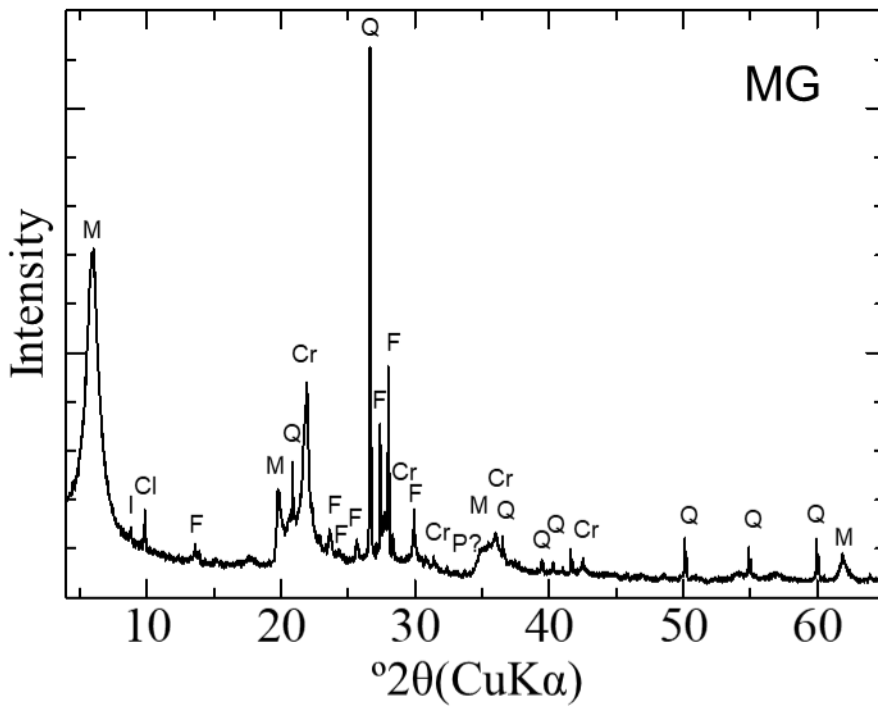


Figure 3-4 XRD pattern of MG (random oriented sample)
 M: montmorillonite, I: illite, Cl: clinoptilolite, Cr: cristobalite Q: quartz, F: feldspar, C: calcite, P: pyrite

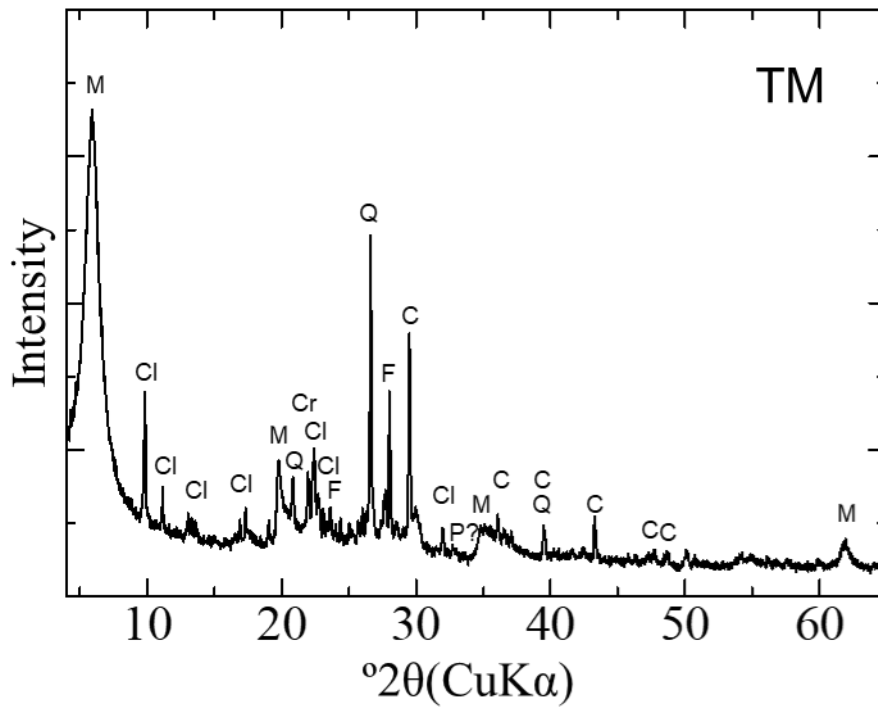


Figure 3-5 XRD pattern of TM (random oriented sample)

M: montmorillonite, Cl: clinoptilolite, Cr: cristobalite Q: quartz, F: feldspar, C: calcite, P: pyrite

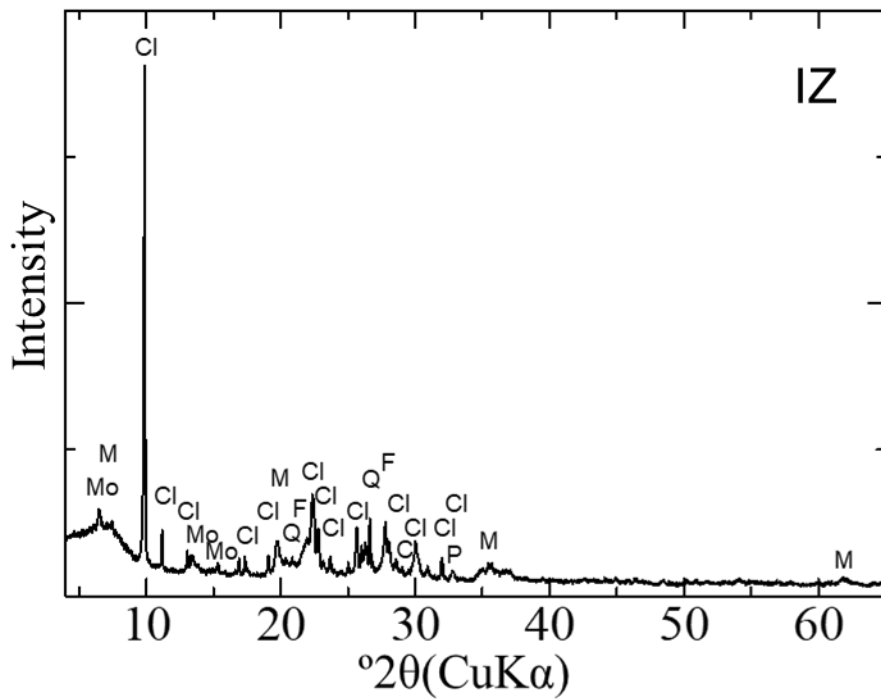


Figure 3-6 XRD pattern of IZ (random oriented sample)

M: montmorillonite, Mo: mordenite, Cl: clinoptilolite, Cr: cristobalite Q: quartz, F: feldspar, C: calcite, P: pyrite

Table 3-2 Mineral composition of bentonites

	KV	TG	MG	SK	TM	IZ
Sme	○	○	○	○	○	○
Qz	○	○	○	○	○	○
Crs		○	○	○	○	
Fel	○	○	○	○	○	○
Cal	○	○		△	○	○
Ill			○			
Cpt	○	○	○		○	○
Mor						○
Py	○	○	△		△	○

Sme: smectite or illite/smectite interstratified mineral, Qz: quartz, Crs: cristobalite, Fel: feldspar, Cal: calcite, Ill: illite, Cpt: clinoptilolite, Mor: mordenite, Py: pyrite. △: the peak intensity is extremely weak and cannot be determined.

3.4.2 メチレンブルー吸着量の測定

6種類のベントナイト試料のMB吸着量を測定した結果をTable 3-3に示す。各ベントナイトのMB吸着量を2回ずつ測定した結果、同一試料では ± 2 mmol/100gの範囲に収まった。JIS Z 2451に記載があるとおり、これらの算術平均値を本研究では使用することとした。異なるベントナイト試料間で比較すると、MB吸着量は異なっており、45~102 mmol/100gの幅広い値を示した。

Table 3-3 Amount of MB adsorbed

Sample		KV	TG	SK	MG	TM	IZ
Amount of MB	N=1	72	102	96	74	72	46
adsorbed	N=2	74	102	96	72	70	44
(mmol/100g)	Average	73	102	96	73	71	45

3.4.3 抽出陽イオン量の測定

各ベントナイト100 g当たりから抽出されるNa, Ca, K, Mgイオンの総量（抽出陽イオン量）をTable 3-4に示す。Table 2-1でNa型と分類したKVとTG, SKは、Naイオンに富むものの、一定量のCaイオンも含まれていることが分かった。Ca型と分類したMGとTM, IZは、Caイオンに富むものの、MGはMgイオンを、IZはNaイオンを一定量含むことが分かった。

IZではクリノプチロライトに帰属するピークの相対強度がほかの試料と比べ強かった（Figure 3-6）。クリノプチロライトはゼオライトに分類される鉱物種であり、陽イオン交換能を有する。クリノプチロライトの骨格構造の最大細孔径は、5.97 Åである（International Zeolite Association, 2017）。一方、Weitkamp and Puppe (2013)では、BTMイオンのサイズは6.4 Å×6.9 Åと報告されている。これらのイオンサイズやゼオライト骨格の細孔サイズから、BTMイオンとクリノプチロライトの交換性Ca, Naイオンとの交換反応は起きていないことが推察される。BTM溶液中にはNaイオンが溶存しているため、BTM溶液を用いた抽出陽イオン組成に対する溶存Naイオンとクリノプチロライトの交換性Caイオンのイオン交換の影響は明らかではない。

Table 3-4 Amount of extracted cation measured in case of using BTM solution

Bentonite	Na (meq/100g)	Ca (meq/100g)	K (meq/100g)	Mg (meq/100g)	Total (meq/100g)
KV	53.4	9.3	0.4	0.8	63.9
TG	57.1	15.0	2.5	3.4	78.0
SK	37.9	20.1	3.2	4.6	65.8
MG	7.6	21.5	2.4	19.8	51.3
TM	0.4	49.7	3.3	3.1	56.5
IZ	14.7	18.2	1.1	1.8	35.8

3.4.4 粒度分析

各ベントナイトの相対粒子量（積算）と相対粒子量（頻度）をそれぞれFigure 3-7とFigure 3-8に示す。Figure 3-8より、各ベントナイトともに数 μm と数十 μm において相対粒子量が高頻度となる粒子径分布が認められた。Na型ベントナイトであるKV, TG, SKでは、数 μm の粒子径が多く、これは分散性の良いNa型モンモリロナイトに起因するものと推測される。これらの数 μm の相対粒子量を比較するとTGとSKは同程度であり、KVがほかの二つよりも少ない結果であった。これは、先述のMB吸着量の傾向とも一致しており、モンモリロナイト含有率による差であると推測される。一方、Ca型ベントナイトであるMG, TM, IZは、Ca型モンモリロナイトの分散性は劣ることに起因して、数 μm の粒子の存在割合が低い結果であった。数十 μm の粒子には、分散性の劣るモンモリロナイトに加えて、随伴鉱物も含まれると考えられる。

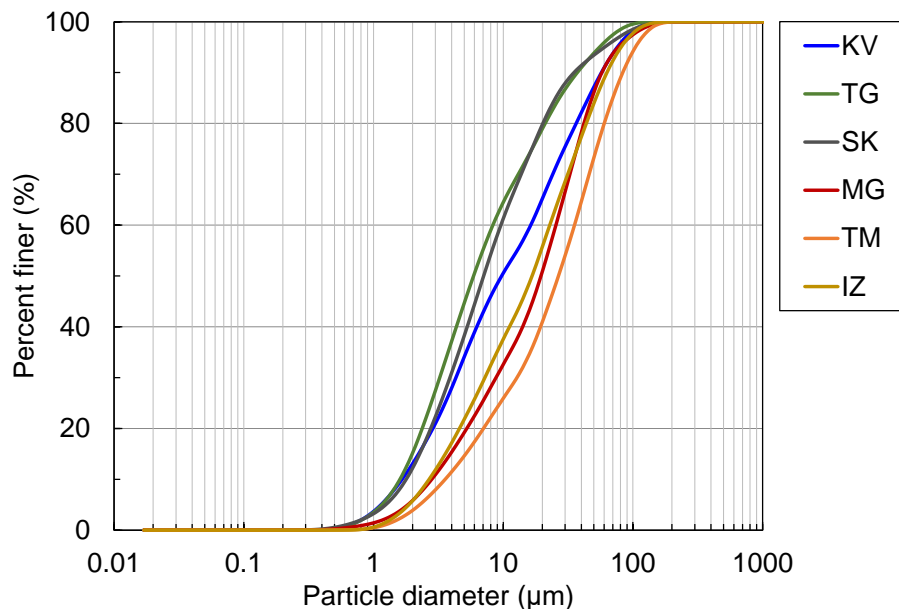


Figure 3-7 Particle size accumulation curves of bentonites

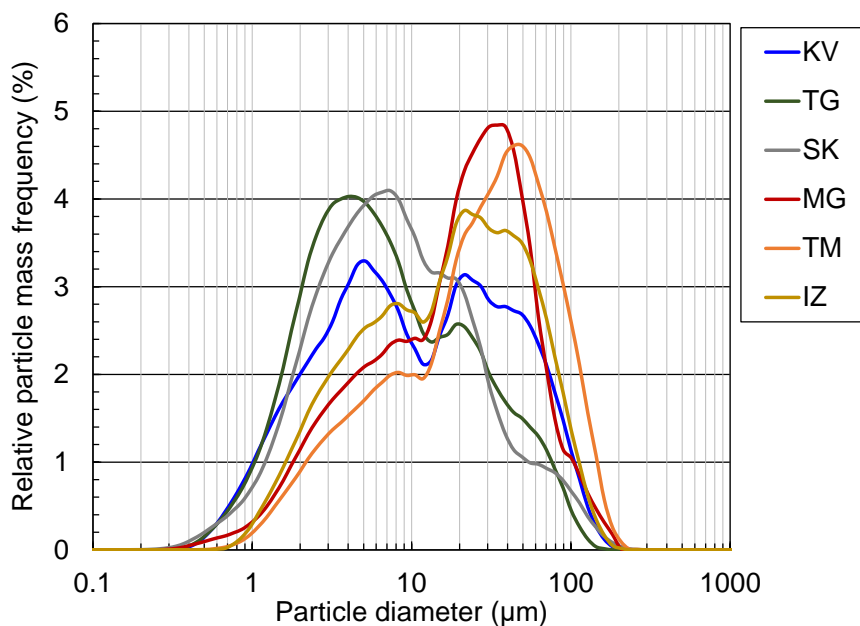
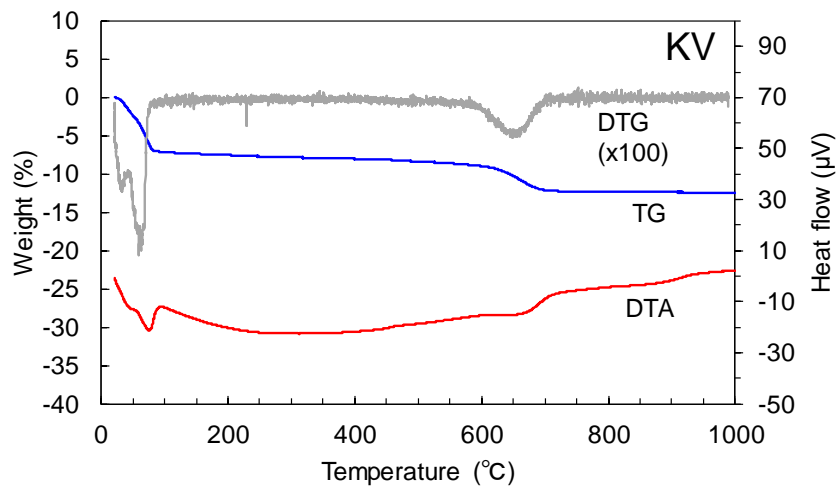


Figure 3-8 Relative particle mass frequencies of bentonites

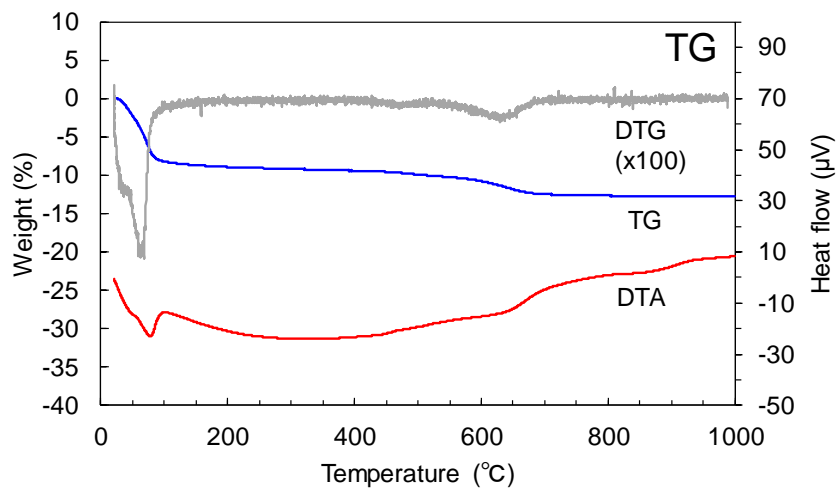
3.4.5 脱水特性

DTA-TG 曲線および DTG 曲線を Figure 3-9 に示す。すべての試料において、45～60°Cの範囲で質量変化の速度が大きくなり、70～80°Cに吸熱ピークが現れ、110°C付近までに脱水による顕著な重量減少が生じた。KV と TG に関しては、32～35°Cの範囲で質量変化の速度が一度大きくなるのが分かった。また、すべての試料において、110°C以上の昇温過程における重量減少は断続的に生じた。ただし、MG と TM については、120～130°Cに吸熱ピークが認められた。IZ については、判別が難しいが、120～130°Cにわずかに吸熱ピークの兆候が見られた。高温域では、およそ 600～700°Cにかけて質量変化の速度が増加し、特に KV, TG, TM においてその傾向が明瞭であった。

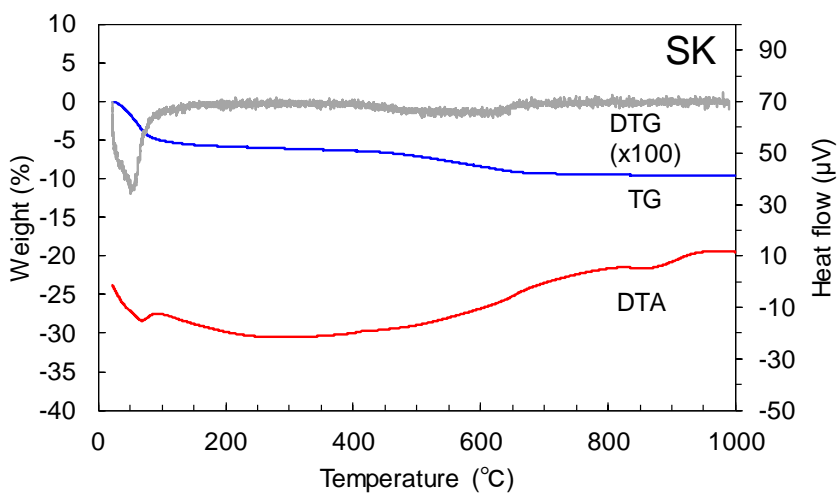
粘土ハンドブック第三版（日本粘土学会，2009）によれば、モンモリロナイトについては、およそ 100～200°Cにおいて吸熱反応が生じ、この温度範囲で層間水が失われるとされている。また、通常のモンモリロナイトの場合、700°Cに現れる吸熱ピークは構造水の脱水とされている。本研究で得られた DTA-TG 曲線においても上記と同様の傾向が認められたことから、使用した 6 試料の DTA-TG 曲線は、主にモンモリロナイトの脱水挙動が反映された結果であったと考えられる。Ca 型に分類される 3 種類のベントナイトについては、120～130°Cに吸熱ピークまたはその兆候が認められたことから、Na 型ベントナイトに分類される 3 種類と比べて、110°Cでは脱水されない層間水がわずかに多いと考えられる。



(a) KV

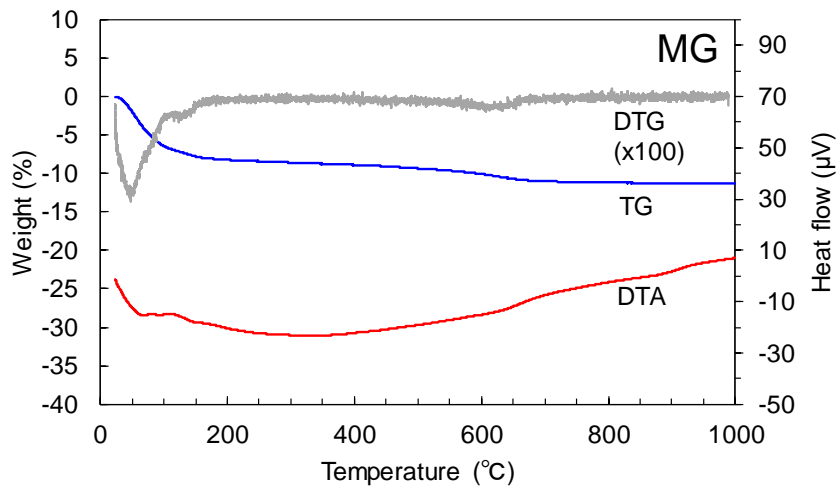


(b) TG

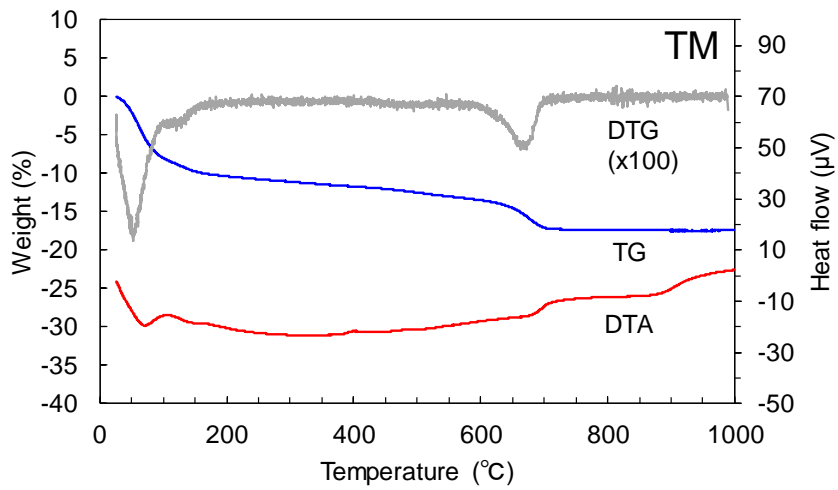


(c) SK

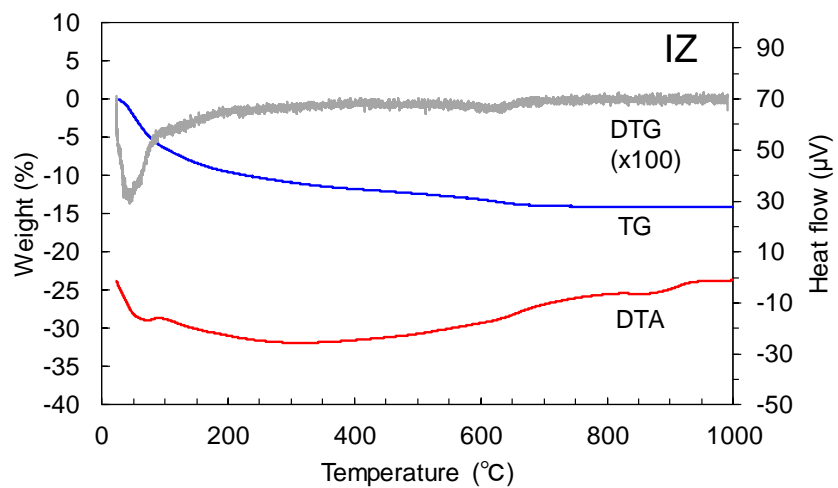
Figure 3-9 DTA and TG curves of bentonites (1/2)



(d) MG



(e) TM



(f) IZ

Figure 3-9 DTA and TG curves of bentonites (2/2)

3.4.6 土粒子の密度測定

各ベントナイトの土粒子の密度を Table 3-5 に示す。各ベントナイトの土粒子の密度を 3 回ずつ測定した結果、 $\pm 0.001 \sim 0.007 \text{ Mg/m}^3$ の範囲に収まり、再現性の高い測定値を得ることができた。これらの算術平均値を本研究では使用することとした。

Table 3-5 Particle density of soil for bentonites used in this study

Sample	KV	TG	SK	MG	TM	IZ	
Particle density of soil (Mg/m ³)	N=1	2.771	2.674	2.605	2.573	2.576	2.442
	N=2	2.767	2.677	2.606	2.568	2.576	2.442
	N=3	2.766	2.673	2.605	2.581	2.575	2.443
	Average	2.768	2.675	2.605	2.574	2.576	2.442

3.5 モンモリロナイトの分析結果

3.5.1 モンモリロナイトの抽出

粒径 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の画分、ならびに、水簸試料 ($0.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 画分) のX線回折パターンをFigure 3-10に示す。 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の試料では、 $0.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 画分と比べてモンモリロナイト以外の随伴鉱物のピークが減少した。しかし、KVではわずかに石英のピークが、TG, SK, MG, TMでは石英とクリストバライトのピークが、IZではクリノプチロライトと石英、クリストバライトのピークが認められた。 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の各試料において、KVとTG, TMでは随伴鉱物のピーク強度が微弱となっているものの、水簸により随伴鉱物を完全に除去することはできなかった。

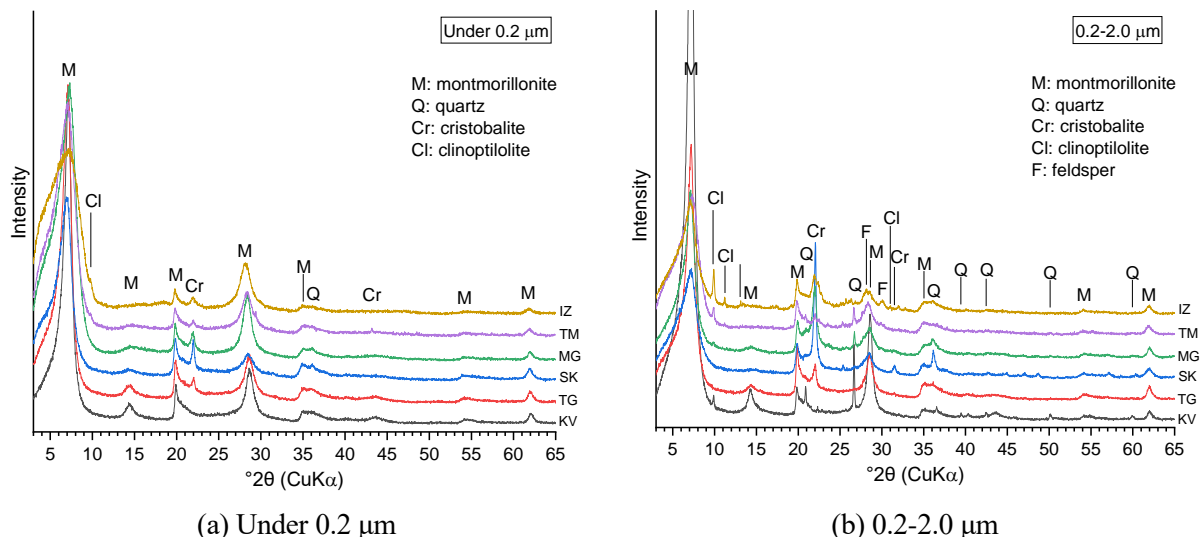


Figure 3-10 XRD patterns of elutriated samples

3.5.2 非膨潤層の割合評価

各水簸試料のXRDパターンをFigure 3-11からFigure 3-16に示す。KVのピークは、ほかの試料と比べてシャープであり、SKのピークはブロードであった。各水簸試料のEG処理後のXRDパターンをもとに、Figure 3-17に示すKVの例のように $2\theta_1$ と $2\theta_2$, $2\theta_3$ を読み取り、Watanabe (1988) の判定図に $\Delta 2\theta_1$ と $\Delta 2\theta_2$ をプロットした (Table 3-6, Figure 3-18)。Figure 3-18より、SK以外のモ

ンモリロナイトはほぼ100%がスメクタイト層で構成されており、一方、SKについては5%程度が非膨潤層（イライト層）で構成されていることが分かった。

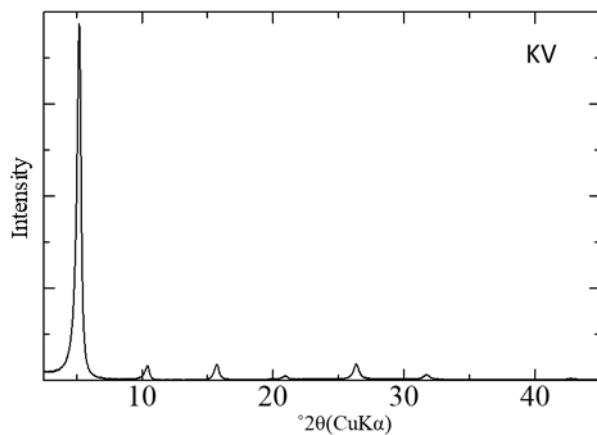


Figure 3-11 XRD pattern of KV after EG treatment (oriented sample)

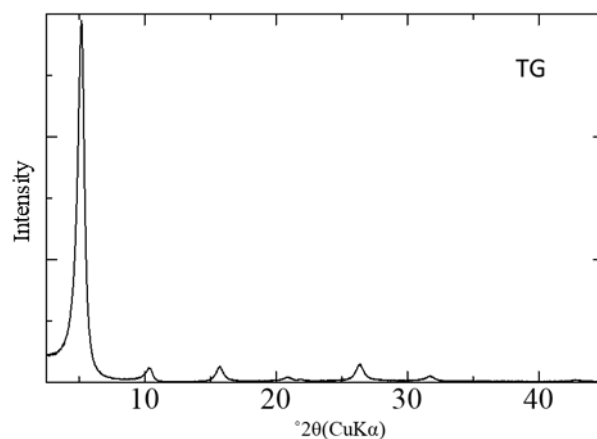


Figure 3-12 XRD pattern of TG after EG treatment (oriented sample)

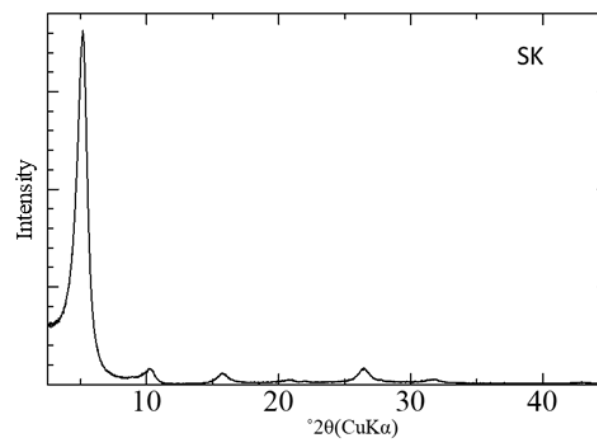


Figure 3-13 XRD pattern of SK after EG treatment (oriented sample)

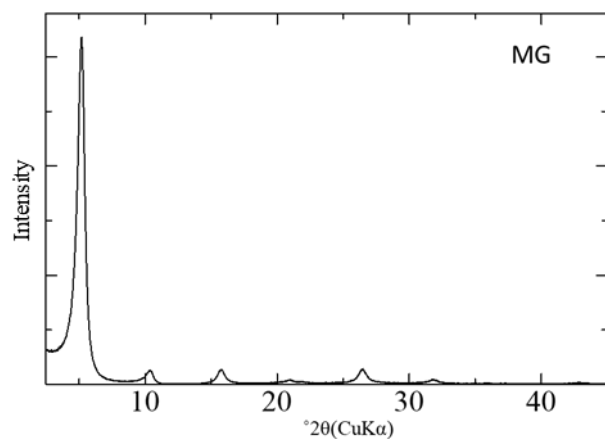


Figure 3-14 XRD pattern of MG after EG treatment (oriented sample)

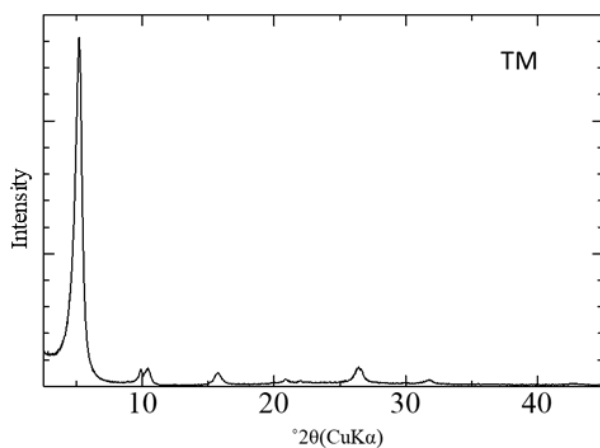


Figure 3-15 XRD pattern of TM after EG treatment (oriented sample)

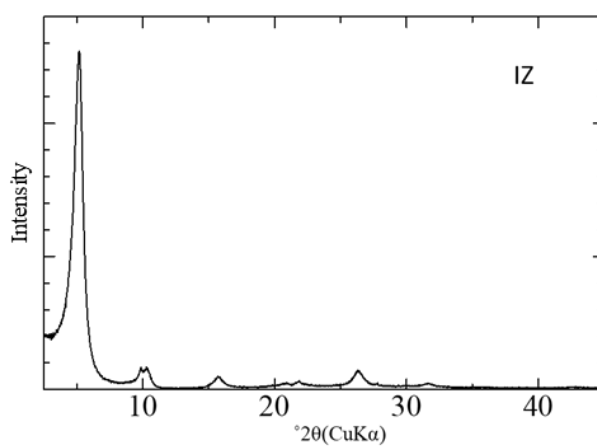


Figure 3-16 XRD pattern of IZ after EG treatment (oriented sample)

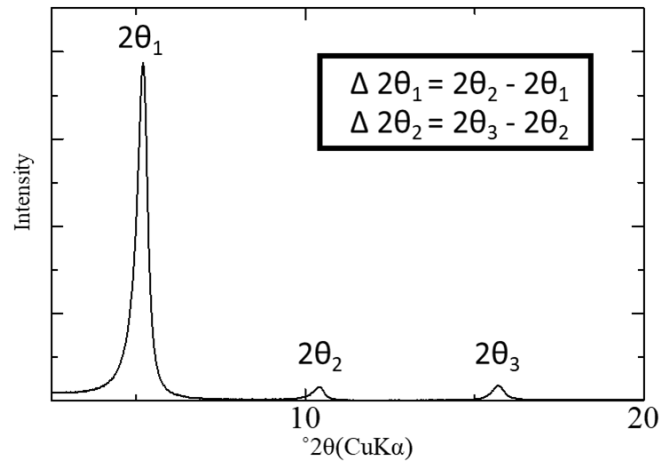


Figure 3-17 XRD pattern of a bentonite after EG treatment labeled for estimation of illitization using Watanabe's diagram (Example for KV)

Table 3-6 Parameters for Watanabe's diagram

Bentonite	$2\theta_2-2\theta_1$	$2\theta_3-2\theta_2$
KV	5.22	5.28
TG	5.20	5.32
MG	5.18	5.38
SK	5.12	5.42
TM	5.22	5.30
IZ	5.22	5.30

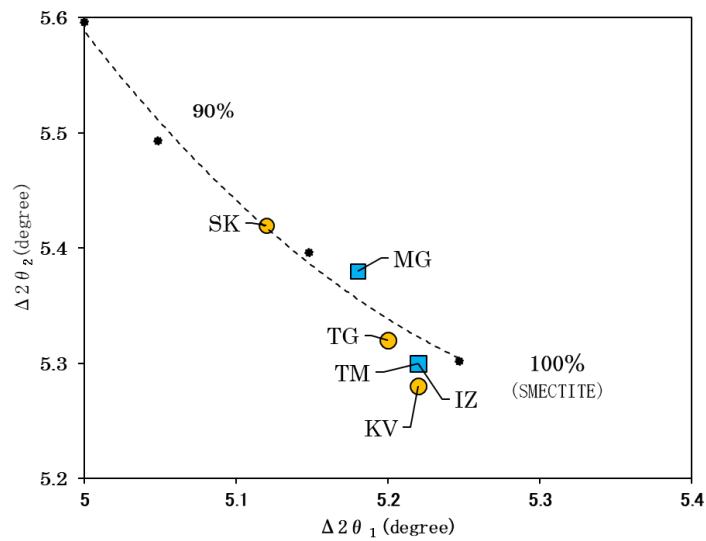


Figure 3-18 Smectite percentage of each sample evaluated using Watanabe's diagram

3.5.3 層電荷発現位置の評価

GKテスト後のXRDパターンをFigure 3-19に示す。モンモリロナイトのように八面体に層電荷を有するものは9.5 Åに、バイデライトのように四面体シートに層電荷をもつものは17.7 Åにピークを示す (MacEwan and Wilson, 1984)。GKテスト後のXRDパターンより、6種類いずれの試料も9.5 Åにピークを示したことから、層電荷発現位置は、八面体シートが主であり、モンモリロナイトであることが分かった。

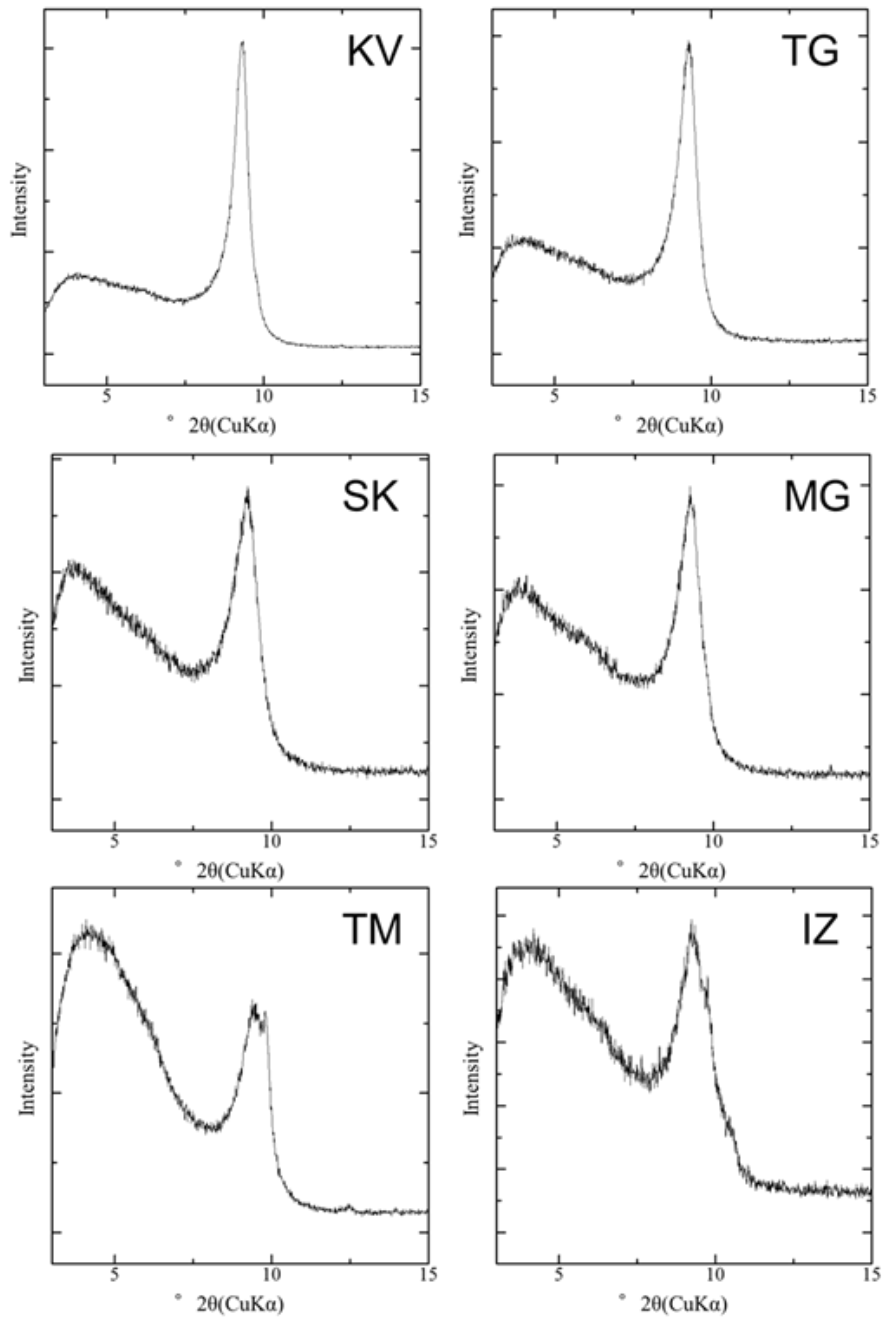


Figure 3-19 XRD pattern of each bentonite after GK test

3.5.4 平均層電荷の測定

アルキルアンモニウム交換処理試料のXRDパターンをFigure 3-20に示す。アルキルアンモニウム交換処理後の試料のXRDピークの位置や形状は、試料の層電荷を反映したものである。KVとTG、MGは左右対称のピーク形状を示し、その幅も比較的シャープであることから試料中の層電荷の不均質性は少ないと推測される。一方、そのほかの試料のピーク形状は左右非対称なものや、その幅が広いことから層電荷が不均質に存在している可能性が示唆された。各ピークの d 値を用いて算出された平均層電荷から、Laird et al., (1989)で提案されている式3-2で補正した平均層電荷をTable 3-7に示す。6種類の試料のうち、TMとIZの値がほかのものと比較して低い値であった。

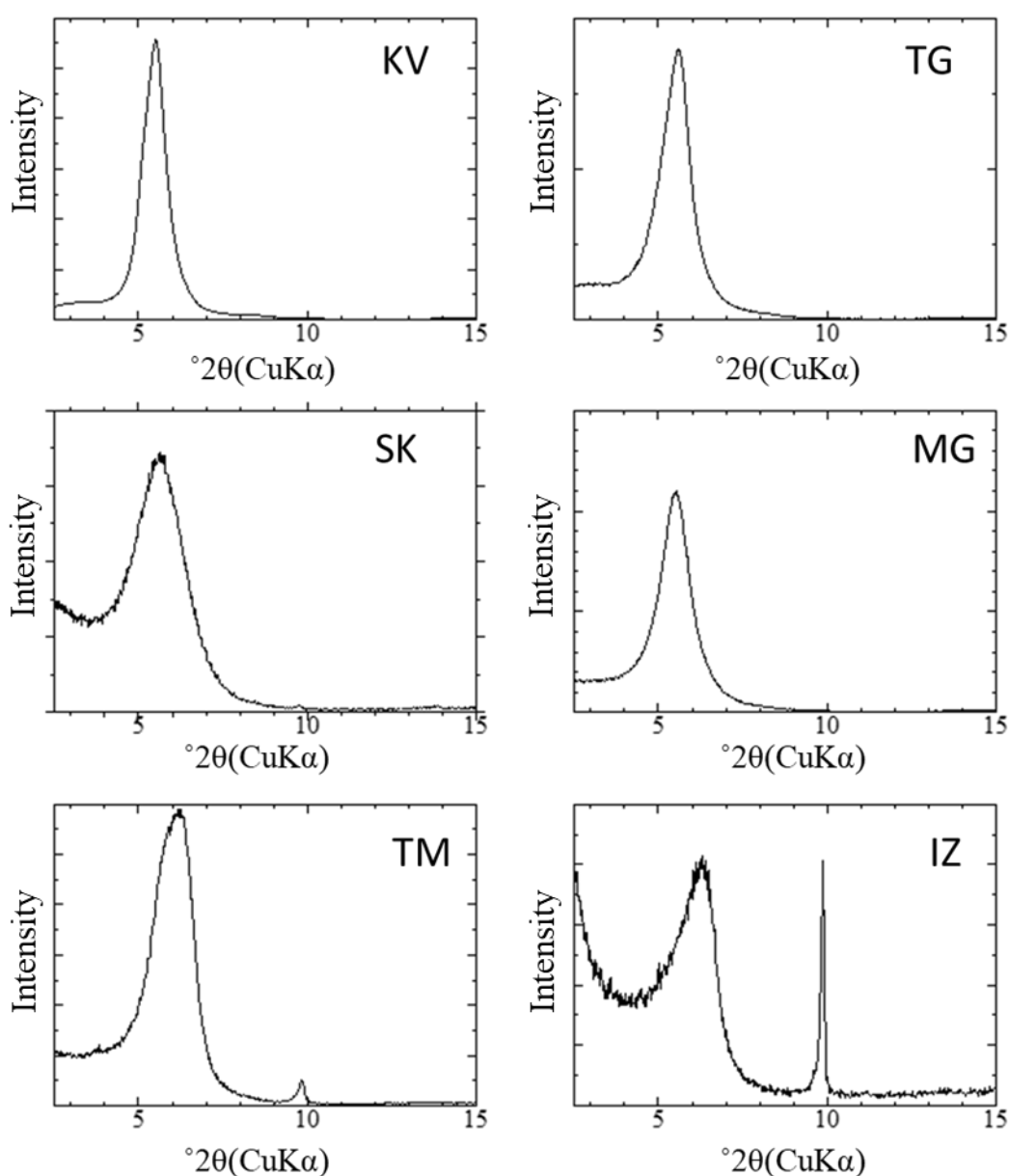


Figure 3-20 XRD pattern of each sample after alkylammonium exchange treatment (oriented sample)

Table 3-7 Mean layer charge of each bentonite (a) calculated by the equation reported in Olis et al. (1990), and (b) recalculated by the equation reported in Laird et al. (1989)

Bentonite	Mean layer charge (/half unit cell)	
	(a)	(b)
KV	0.32	0.46
TG	0.31	0.45
SK	0.31	0.45
MG	0.32	0.46
TM	0.26	0.37
IZ	0.26	0.37

3.5.5 粒子サイズの評価

Figure 3-21に各試料中のモンモリロナイトのAFM画像を示す。各画像のスケールは同じであり、一辺が2 μm である。

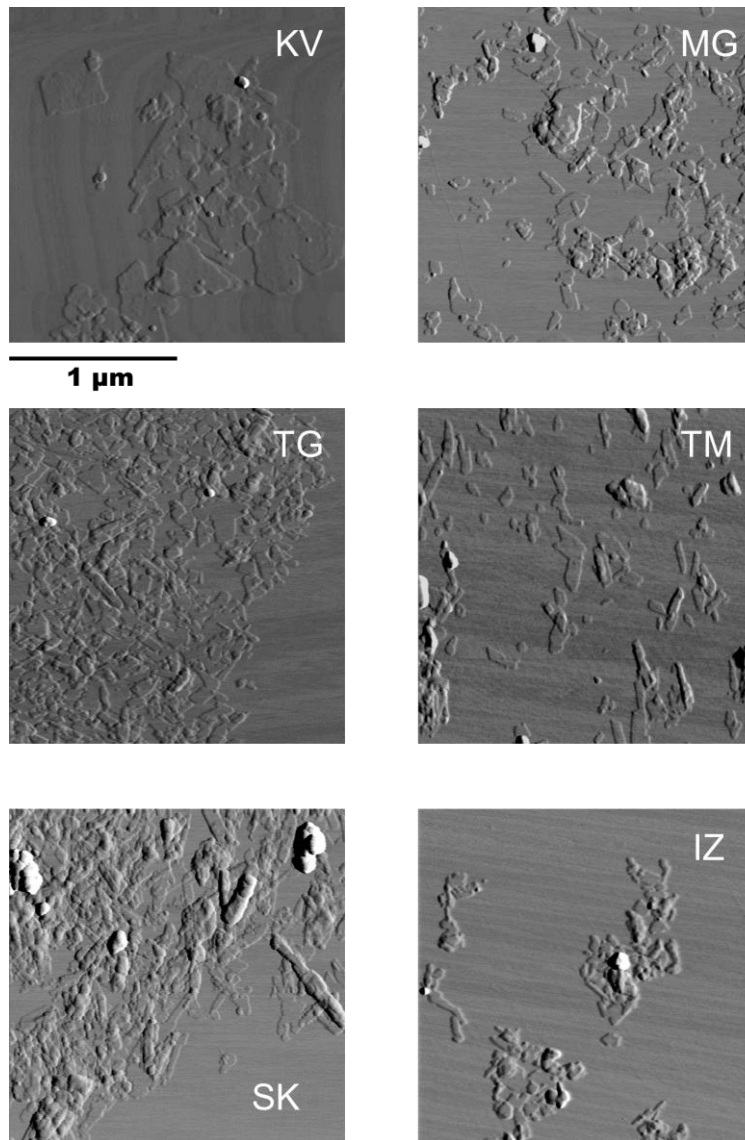


Figure 3-21 AFM images of montmorillonite in each bentonite

各モンモリロナイトの粒子サイズを比較すると、KV のみがほかのモンモリロナイトと比較して大きいことが分かった。また、Figure 3-22 の AFM 画像に示すように、KV は平板状の粒子が多く、その厚さは 1 nm 程度のものが多かった。このことから、モンモリロナイトが懸濁液中では 1 層まで分散していたことが推察される。SK は縦長の短冊状の粒子が多く、多数の粒子が凝集している状態で観察された。粒子の厚さは、1 nm のものや数 nm のものが混在しており、懸濁液中では、1 層から数層までの積層状態で分散していたものと思われる。そのほかの試料では、平板状と短冊状の粒子が混在して観察され、それぞれの粒子サイズにも大きな差は認められなかった。

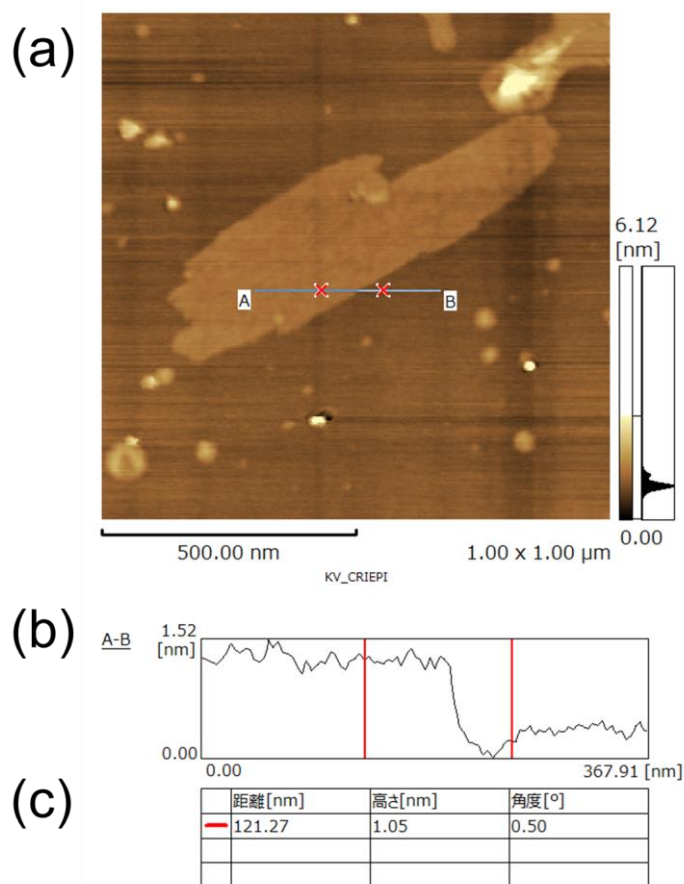


Figure 3-22 Measurement results of montmorillonite particle in KV by AFM
 (a) AFM image of montmorillonite in KV, (b) Cross section of line A-B and (c) Thickness of montmorillonite particle

3.6 モンモリロナイト含有率の評価

ベントナイト100 g当たりのMB吸着量 (MB_b) とBTM溶液を用いた抽出陽イオン総量 (CEC_b) の関係をFigure 3-23に示す。 MB_b と CEC_b には、良い線形の相関が認められた。また、 CEC_b より MB_b のほうが大きな値を示す傾向が認められた。 MB 分子の吸着時には、層電荷に対応するだけの MB 分子が静電的に吸着することに加えて、日本粘土学会 (1987) によれば分子間力による物理吸着も生じるとされている。そのため、 CEC_b より MB_b のほうが大きな値になったと考えられる。

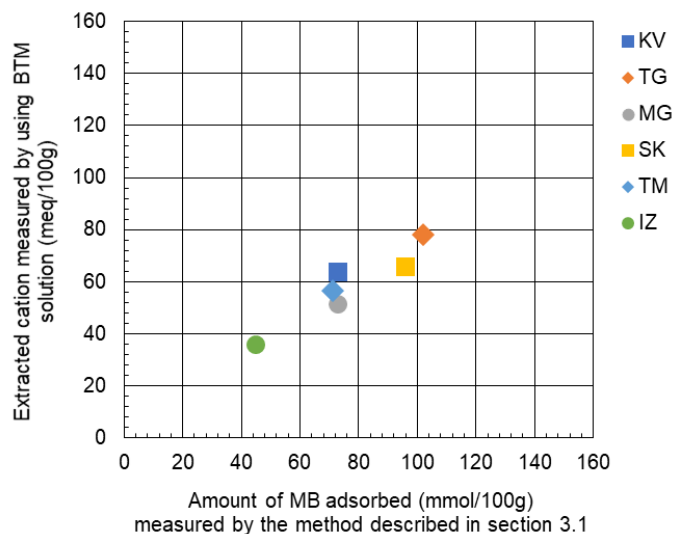


Figure 3-23 Relation between amount of MB adsorbed on bentonite samples and CEC measured using BTM solution

モンモリロナイト含有率の評価に使用するモンモリロナイトの陽イオン吸着容量は、 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下画分の試料のMB吸着量 (MB_m) と、3.5.4項で求めた層電荷から計算した値 (LC_m) の2種類を以下の検討では使用した。 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下画分のMB吸着量をTable 3-8に示す。KVとSKは $140\ \text{mmol}/100\text{g}$ 、TGとMGは 154 と $152\ \text{mmol}/100\text{g}$ であった。Table 3-7に示したように、TMとIZの平均層電荷がほかと比べて小さかったことから、TMとIZのMB吸着量はほかと比べて低い傾向を示したと考えられる。

Table 3-8 Amount of MB adsorbed on elutriated samples

Bentonite	Under $0.2\ \mu\text{m}$ (mmol/100g)
KV	140
TG	154
SK	140
MG	152
TM	134
IZ	132

XRDパターン (Figure 3-10 (a)参照) から、比較的随伴鉱物のピーク強度が弱かったKVとTG、TMについて、 MB_m と LC_m をTable 3-9に示す。 LC_m に比べて MB_m のほうが大きな値を示した理由は、上述した物理吸着などの影響と考えられる。これらの値をモンモリロナイト含有率の評価に使用する場合、 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下画分のモンモリロナイトの純度を定量的に示すことが困難であることや、上記3種以外のベントナイトのように随伴鉱物の除去が難しい場合もあることから、 MB_m を使用する場合にはこれらを課題として留意しておく必要がある。一方、モンモリロナイトの陽イオン吸着容量は、主に層電荷により決定されるものであることから、モンモリロナイト含有率の評価に LC_m を用いることは理にかなっている。しかし、層電荷の測定においても、層電荷の不均一性や計算式が有する誤差に注意する必要がある。

Table 3-9 Adsorbed cation of levigated samples measured by MB adsorption test (a) and adsorbed cation of montmorillonite calculated from mean layer charge (b)

Bentonite	Amount of adsorbed cation (mmol/100g)	
	(a) MB _m	(b) LC _m
KV	140	125
TG	154	121
TM	134	99

ベントナイトの陽イオン吸着容量としてMB_bとCEC_bを、モンモリロナイトの陽イオン吸着容量としてMB_mとLC_mを用いて、モンモリロナイト含有率を求めた。Table 3-10とFigure 3-24にそれぞれの方法から求めたKVとTG、TMのモンモリロナイト含有率を示す。モンモリロナイト含有率は、CEC_b/MB_mで求めた値が最も小さく、CEC_b/LC_mとMB_b/MB_mが同程度の値、MB_b/LC_mが大きな値を示した。ここで着目すべきは、CEC_b/LC_mとMB_b/MB_mが比較的近い値を示したことである。CEC_bは静電的に収着している陽イオン量であり、LC_mとモンモリロナイト含有率の積によって決まる。一方、MB_bは、上記のとおり物理吸着の影響を含むことからLC_mとモンモリロナイト含有率の積とは同じ値とならない。しかし、MB_b/MB_mのように分母と分子ともに物理吸着の影響がある場合には、それらは概ね相殺され、CEC_b/LC_mと同様の値を示したものと考えられる。

Table 3-10 Comparison of montmorillonite content of KV, TG and TM evaluated by different methods

Bentonite	Montmorillonite content (%)			
	MB _b /MB _m	CEC _b /MB _m	MB _b /LC _m	CEC _b /LC _m
KV	52	46	58	51
TG	66	51	84	64
TM	53	43	72	58

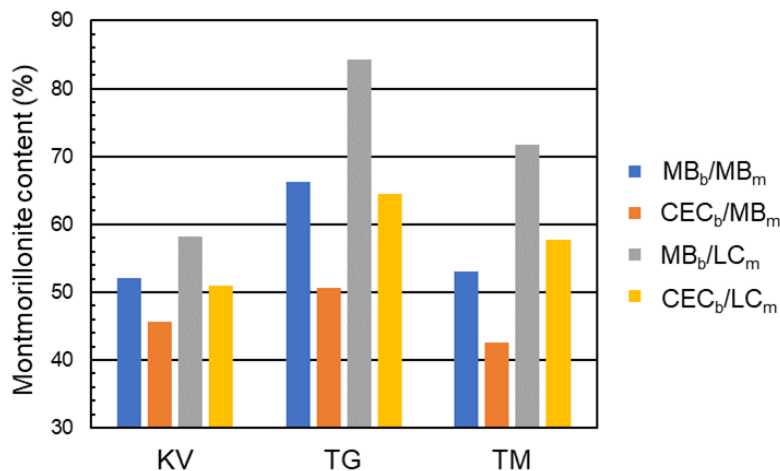


Figure 3-24 Comparison of montmorillonite content of KV, TG and TM evaluated by different methods

先述のとおり水簸により高純度のモンモリロナイトの抽出を試みたものの、特にSKとMG、IZで高純度の試料を抽出することはできなかった。そのため、本研究では、モンモリロナイトの陽イオン吸着容量として6種類すべてで値の揃っている LC_m を用いることとした。 LC_m を用いる場合には CEC_b を用いることが重要であるため、これらの値を使ってモンモリロナイト含有率を求めると、Table 3-11とFigure 3-25に示すように、KV, TG, SK, MG, TM, IZで、それぞれ51%, 64%, 55%, 41%, 58%, 36%であった。

Table 3-11 Montmorillonite content of each bentonite evaluated by CEC_b/LC_m

Bentonite	Montmorillonite content evaluated by CEC_b/LC_m (%)
KV	51
TG	64
SK	55
MG	41
TM	58
IZ	36

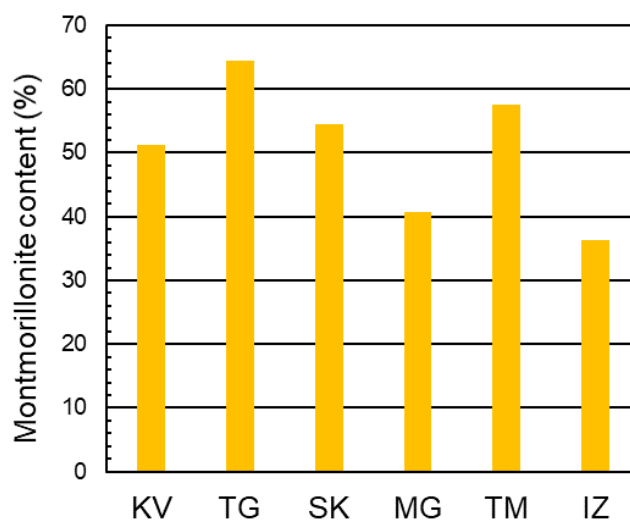


Figure 3-25 Montmorillonite content of each bentonite evaluated by CEC_b/LC_m

4. 基本特性試験

ここでは、基本特性試験（締固め試験、透水試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験、圧密試験、三軸圧縮試験、保水性試験、熱特性測定試験）の試験方法および試験結果を示す。また、各試験に共通する試料調整方法や試験用水についても詳述する。

試験条件においては、ベントナイトへのケイ砂の混合および淡水と塩水の水質条件を考慮した。試験用水にはイオン交換水と人工海水を用いた。

試験条件の表し方としては、ベントナイトの種類とベントナイト混合率を次のように表示する。例えば、KV のベントナイト混合率が 30%であれば「KV030」である。TM のベントナイト混合率が 100%であれば「TM100」である。イオン交換水を用いた場合には DW を、人工海水を用いた場合には SW の略称を付与する。

4.1 試験共通事項

4.1.1 試料調製方法

ベントナイト混合率ならびに初期含水比の調整においては、ベントナイトとケイ砂と水を混ぜた時に均質な状態を達成する必要がある。はじめに、300 mm深さのボウルを用いて、ベントナイトとケイ砂を空練りした。ゴムベラなどを用いて、ボウルの底に試料が滞留しないように、1分以上の攪拌を続けた。次に、霧吹きを用いて加水した。この時、容器内面に水滴が溜まらないように水を吹き付け、練り混ぜと加水を交互に行いながら少しずつ試料の含水比を高めた。含水比が高まるにつれて団粒（ダマ）が生成されやすくなるため、ゴムベラなどでダマを崩すように全体的に練り混ぜた。ボウル壁面やゴムベラなどに付着した試料も全体に混ぜ込むように留意した。

ダマには2種類あると考えた。一つは均等な含水比の試料が団粒化したもの、もう一方は中心部に高含水比の部分が隠れているものである。後者については、均質性の観点から好ましくないダマであると考え、目視しながらダマを潰すように練り混ぜを行うことで、高含水比の部分が局所的に残らないように努めた。練り混ぜを終えた試料は、その一部を使って含水比を測定し、残りの試料を速やかに密閉養生した。水が試料全体に馴染むよう、24時間以上の養生とした。所定の含水比の $\pm 1\%$ の範囲に収まっていることを確認した試料を各試験に用いた。本研究においては、JIS A 1202に準じ、 $110\pm 5^\circ\text{C}$ で24時間以上乾燥させることで含水比を測定した。含水比測定のための温度と乾燥時間については、5.1節に後述する検討を踏まえて決定した。

4.1.2 試験用水

本研究では、淡水と塩水の両方の水質条件を想定し、イオン交換水と人工海水を用いた。天然の海水ではなく人工海水を用いる理由は、試験ごとに安定した水質を確保するためである。人工海水として、市販の試薬（マリンアートSF-1／富田製薬）を使用した。製品の成分表に記載されていた原料と量をTable 4-1に示す。また、この成分表をもとに計算したイオン濃度をTable 4-2に示す。イオン濃度の計算では、人工海水の密度として、ピクノメーターを用いて求めた 1.022 g/mL を用いた。これより、Na, Ca, K, Mg, SO_4 , Clイオンの濃度が高いことが分かる。

人工海水の作製方法ならびに管理方法としては以下のとおりである。はじめに、室温（約 23°C ）にて製品一袋全量を25 Lのイオン交換水に一つの容器内で溶解させた。一部の溶液を水質分析

のために分取し、残りを1~2 L容量の密閉容器に空気がほとんど残らないように移し替えて、冷蔵庫内で密閉保管した。試験で使用する場合には、室温に戻してから使用した。人工海水作製直後、試験での利用時（特に後述する脱気操作を繰り返した後）には主要な元素のイオン濃度（Na, Ca, K, Mg, SO₄, Cl）を測定した。

Table 4-1 Component of artificial sea water
(Transcribe from the composition table of Marine Art SF-1)

Material	Amount (g/L)
Na ₂ SO ₄	22.1
KCl	9.9
NaHCO ₃	1.5
KBr	3.9
Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	0.61
SrCl ₂	0.19
NaF	0.096
LiCl	0.078
KI	0.013
MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.003
CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.001
AlCl ₃ · 6H ₂ O	0.0000081
FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.0000006
Na ₂ WO ₄ · 2H ₂ O	0.000002
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O	0.000008

Table 4-2 Ion concentrations calculated by using composition table of the artificial sea water

Ion species	Concentration (mg/L)	Concentration (mmol/L)
Na	9860	429
Ca	402	10
K	346	9
Mg	1165	48
Al	9 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁵
Fe	1 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁵
SO ₄	2596	27
Cl	17594	496
CO ₃	134	2
Br	63	1
F	1.3	0.07
NH ₄	2 × 10 ⁻³	9 × 10 ⁻⁵
I	6 × 10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁵
B	8.7	0.81
Sr	7.1	0.08
Li	0.2	0.02
Mn	2 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁶
Co	5 × 10 ⁻⁴	8 × 10 ⁻⁶
W	1 × 10 ⁻³	6 × 10 ⁻⁶
Mo	1 × 10 ⁻²	1 × 10 ⁻⁴

室内試験では、供試体の飽和度を高めるために脱気した水を使用することが多い。人工海水を使用する場合にも同様であり、脱気したものを使用することが好ましい。ただし、脱気の種類により蒸発が進み、イオン濃度が変動することが予想される。そこで、次の予備試験により、脱気の時間を限定することにした。

2 L容量の容器（開口部直径65 mm）に入れた人工海水2 Lの重量を計量した。ゲージ圧-100 kPa程度になるまで減圧し、所定の時間が経過した後に、蒸発量を測定するために容器と人工海水の重量を計測し、そこから水質分析のために約5 mLを分取した。この操作を負圧ゲージが-100 kPa程度に到達してから10分、30分、60分、3時間、6時間、24時間となるように繰り返した。この間、真空ポンプを稼働し続けた。さらに、24時間の減圧後の人工海水に対しては、各測定後に再度減圧し、真空デシケータのバルブを閉じ、真空ポンプを止め、この状態で4日間静置した。水質分析では、ICP-AESとイオンクロマトグラフを用いて、主要元素（Na, Ca, K, Mg, SO₄, Cl）のイオン濃度を測定した。

ゲージ圧-100 kPa程度に到達してからの経過時間を減圧時間（min）、減圧時間ごとの蒸発量を区間蒸発量（g）、これらの累積値を累積蒸発量（g）、累積蒸発量を減圧時間で除した値を蒸発速度（g/h）としてFigure 4-1に示す。減圧時間60分までは区間蒸発量の割合は0.2%以下と小さく、累積蒸発量の割合としては0.5%であった。真空ポンプを稼働している間は、減圧時間の間隔が増えるほど区間蒸発量は大きくなり、累積蒸発量は時間の経過とともに増大した。真空ポンプを停止して4日間の密閉保管をした間では、区間蒸発量は0.2%と小さかった。蒸発速度は減圧時間とともに減少する傾向が認められた。主要な元素濃度と減圧時間の関係をFigure 4-2に示す。減圧時間の増加に伴う系統的な濃度変化は認められなかった。各元素濃度の測定値は変動係数0.02~0.03の範囲であり、ばらつきの小さい結果であることが分かった。脱気操作中の外見として、著しい気泡の発生は3時間ほどで収まった。

以上より、人工海水の蒸発は減圧時間の増加に伴い進行するが、主要元素濃度の変化としては非常に小さく、本検討における脱気条件であれば最大24時間の脱気は人工海水の濃度に影響しないと考えられる。真空ポンプを停止して4日間の密閉保管を行った場合にも同様に人工海水の濃度に影響はないと考えられる。

以上の検討を踏まえて、本研究では、以下の考え方に基づいて人工海水を扱うこととした。

- ・ 一度の減圧操作は3時間以内を目安に行う。
- ・ 室内試験において給水タンクに人工海水を貯めておく場合には、給水タンク内の気相体積ができる限り小さくなるようにし、減圧後に密閉保管（真空ポンプは停止した状態）する。
- ・ 脱気回数の上限や密閉保管期間、脱気・蒸発に関する試験系統については定めにくいことから、原則としては、使用しようとする給水タンク内の人工海水の主要元素濃度が、人工海水作製直後の値と比べて有意に変化していないことを確認する。
- ・ 本検討で把握しきれていない事象への対応を考慮し、3~4ヵ月に一度の頻度で人工海水を新たに作り直す。

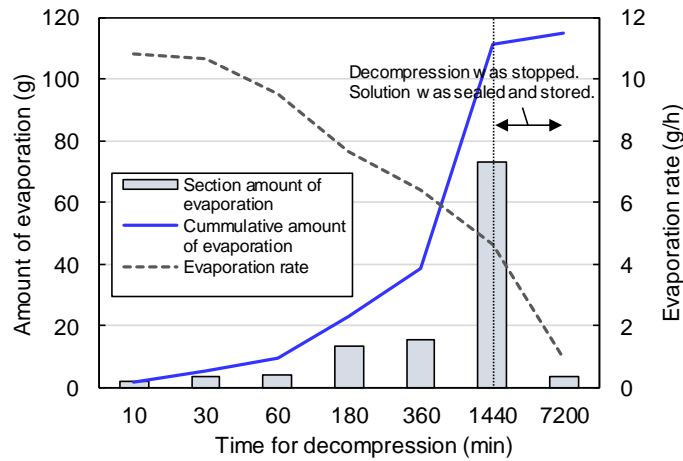


Figure 4-1 Evaporation of artificial seawater by decompression

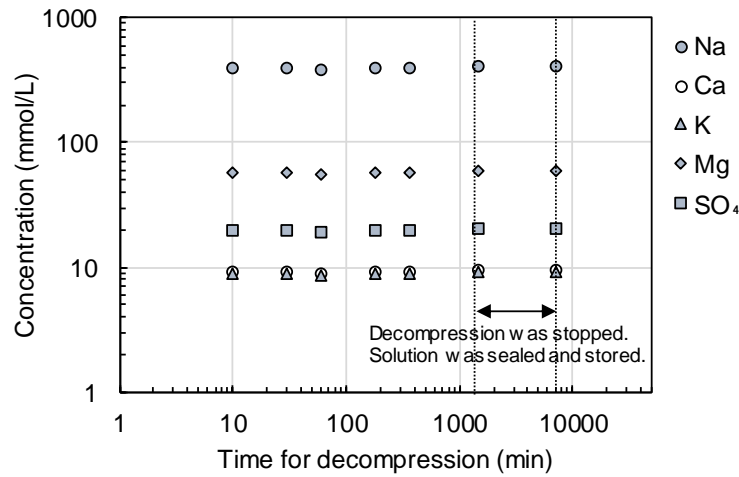


Figure 4-2 Relation between ion concentration of artificial seawater and time for decompression

4.1.3 供試体仕様の考え方

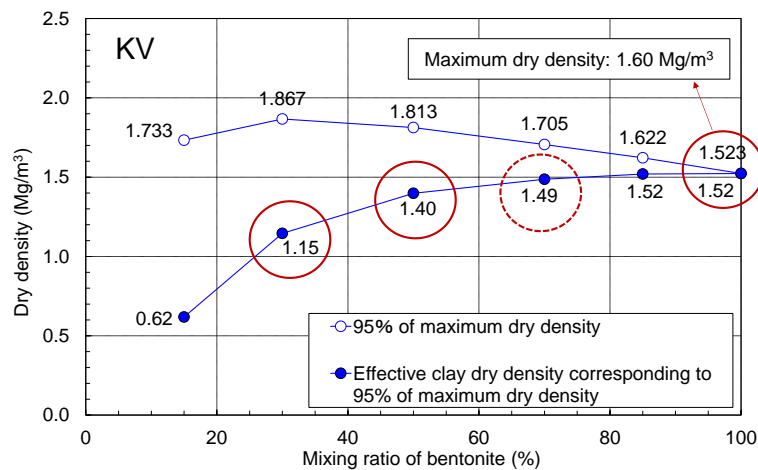
本研究では産地や種類の異なる複数のベントナイトに対して、各種室内試験を実施している。ここで得られる試験データを比較することを想定すると、供試体の仕様が重要になる。すなわち、供試体を作製する時の含水比、乾燥密度、ベントナイト混合率により、室内試験の結果は変わるため、供試体仕様の考え方を明確にしたうえで性能の比較検討を進めなければならない。土の状態により発揮される性能は異なることを考慮し、締固め試験により得られた最適含水比と最大乾燥密度を参考に室内試験用の供試体仕様を決定することを基本的な考え方とし、以下、具体的に本研究における供試体仕様について説明する。

前提として、地層処分における緩衝材・埋戻し材の施工方法ならびに要求性能（例えば透水係数や強度定数）は未知とする。例えば、ベントナイトブロックの定置や原位置締固めなど、施工方法は複数考えられ、施工方法もまた高度化されるものと考えられる。そのような現状であるため、突固めによる土の締固め試験（以後、動的締固めと呼ぶ）により達成される供試体の状態であれば、それは静的締固めでも達成し得るものであると考え、本研究では供試体条件を動的締固め試験の結果より決定した。

既往の知見より、ベントナイト混合土を用いた室内試験において、有効粘土密度などを指標に試験データを整理することで一義的な関係が認められることはすでに知られている（土木学会，2009；棚井ほか，2010；中村ほか，2011；地盤工学会，2016）。言い換えると、ベントナイト自体の性能が発揮される範囲では、ベントナイト混合率によらず一定の傾向が観察されることを意味する。そのため、有効粘土密度などに対するトレンドでベントナイトの特性を把握することが重要であると考えられる。そこで、本研究では、以下の考え方により室内試験の供試体仕様を決定した。

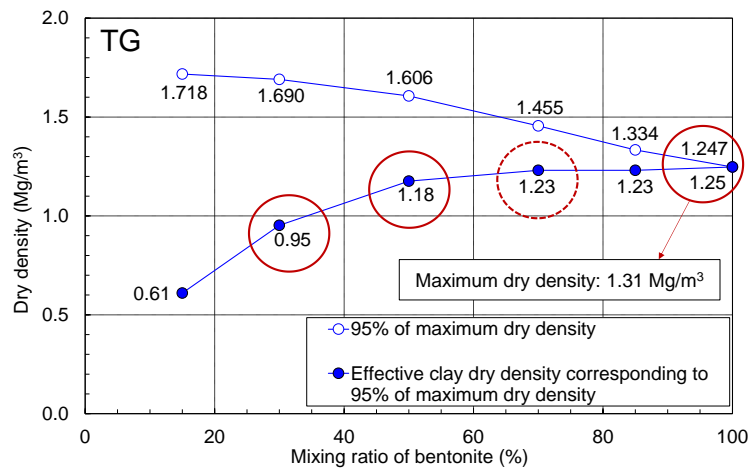
- ・ 有効粘土密度などを使ってデータを整理した際に幅広くデータが得られ、データの傾向を踏まえた検討を行えるようにベントナイト混合率は複数設定する。
- ・ 同一の締固めエネルギーにより、ベントナイトおよびベントナイト混合土が十分に締め固められる状態として最適含水比と最大乾燥密度を参考に供試体仕様を決定する。
- ・ 実際の作業を考慮し、ケイ砂を混ぜる供試体については締固め度95%とする。上記1点目を考慮し、ケイ砂を混ぜない供試体に関しては最大乾燥密度とする。

以上の考え方にに基づき、動的締固め試験により得られた締固め度95%に相当する有効粘土密度とベントナイト混合率の関係をFigure 4-3のように整理し、Table 4-3に示す各ベントナイト・各混合率の供試体仕様を決定した。ベントナイト混合率としては、30%、50%、70%、100%の4通りを基本とした（圧密試験，三軸圧縮試験，保水性試験，熱特性測定試験ではベントナイト混合率70%の条件は実施しない）。本研究で実施した締固め試験の結果は、4.2節に後述する。

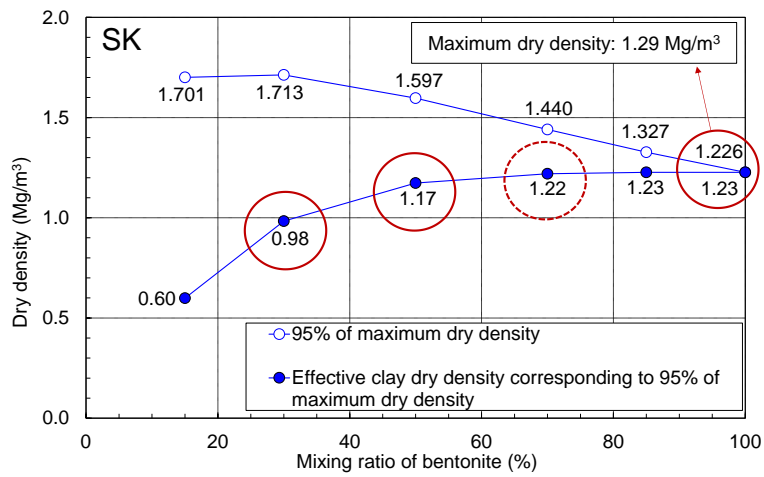


(a) KV

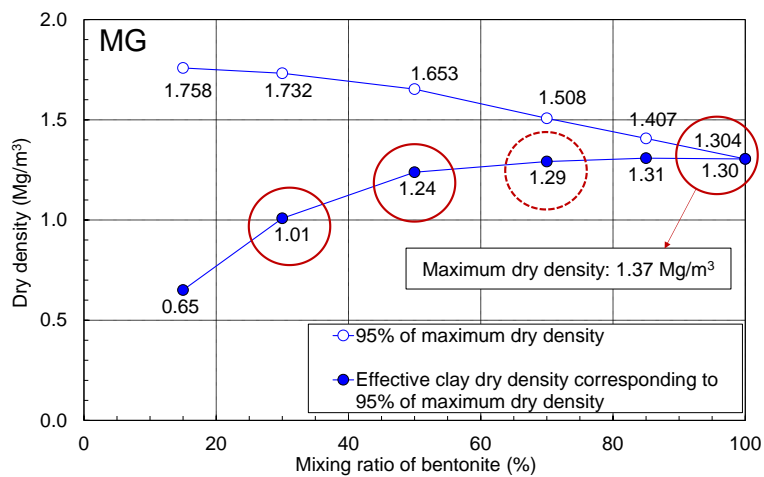
Figure 4-3 Relation between mixing ratio of bentonite and effective clay dry density corresponding to 95% of the maximum dry density (1/3)



(b) TG

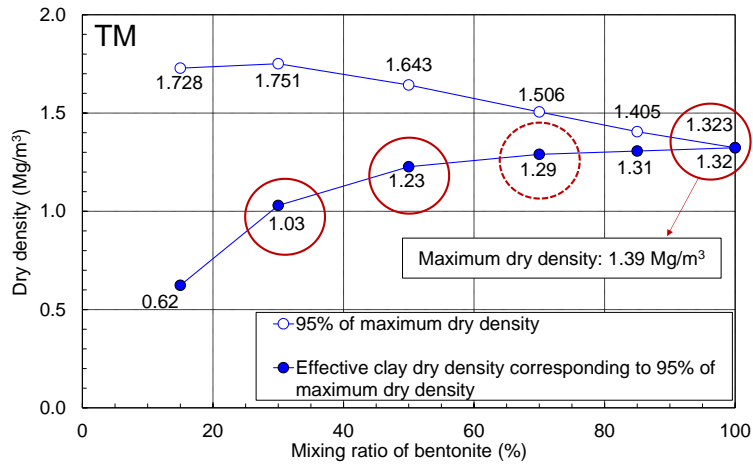


(c) SK

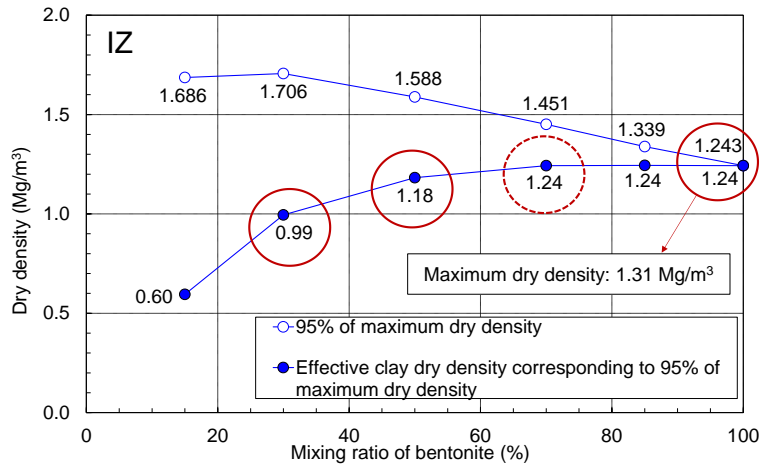


(d) MG

Figure 4-3 Relation between mixing ratio of bentonite and effective clay dry density corresponding to 95% of the maximum dry density (2/3)



(e) TM



(f) IZ

Figure 4-3 Relation between mixing ratio of bentonite and effective clay dry density corresponding to 95% of the maximum dry density (3/3)

(A broken circle in the figure means the case which has not conducted in the test series of mechanical and thermal properties.)

Table 4-3 Basic target condition of specimens used in the laboratory tests in this study

Sample	Initial water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Notes
KV	KV100	21.0	1.60	KV070 has not conducted in the test series of mechanical and thermal properties.
	KV070	15.4	1.71	
	KV050	12.4	1.81	
	KV030	11.7	1.87	
TG	TG100	34.2	1.31	TG070 has not conducted in the test series of mechanical and thermal properties.
	TG 070	23.2	1.46	
	TG 050	19.5	1.61	
	TG 030	14.5	1.69	
SK	SK100	35.2	1.29	SK070 has not conducted in the test series of mechanical and thermal properties.
	SK 070	24.0	1.44	
	SK 050	18.7	1.60	
	SK 030	14.9	1.71	
MG	MG100	30.0	1.37	MG070 has not conducted in the test series of mechanical and thermal properties.
	MG 070	21.0	1.51	
	MG 050	16.2	1.65	
	MG 030	13.5	1.73	
TM	TM100	28.8	1.39	TM070 has not conducted in the test series of mechanical and thermal properties.
	TM 070	21.0	1.51	
	TM 050	17.7	1.64	
	TM 030	14.8	1.75	
IZ	IZ100	32.0	1.31	IZ070 has not conducted in the test series of mechanical and thermal properties.
	IZ 070	22.5	1.45	
	IZ 050	18.2	1.59	
	IZ 030	15.0	1.71	

4.1.4 有効粘土密度の定義

乾燥密度と有効粘土密度の概念図をFigure 4-4に示す。有効粘土密度は、単位体積あたりに含まれるベントナイト分の乾燥重量をそれ自身の体積で割ることにより得られるベントナイト分の密度であり、ケイ砂の混合比率を変えたベントナイト混合材料の特性を把握するときの指標の一つとされている（土木学会，2009）。有効粘土密度は次式で表される。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d R_s / \rho_{ss}} \quad (\text{式4-1})$$

ここで、 ρ_b は有効粘土密度 (Mg/m³)， ρ_d は乾燥密度 (Mg/m³)， R_s は骨材（ケイ砂）の混合率（%）， ρ_{ss} は骨材（ケイ砂）の土粒子の密度 (Mg/m³) である。

本報告書中では、日本語表記としては有効粘土密度を用い、英語表記としてはEffective clay dry densityを用いる。また、有効数字を考慮して、小数点以下2桁で有効粘土密度を表示する。

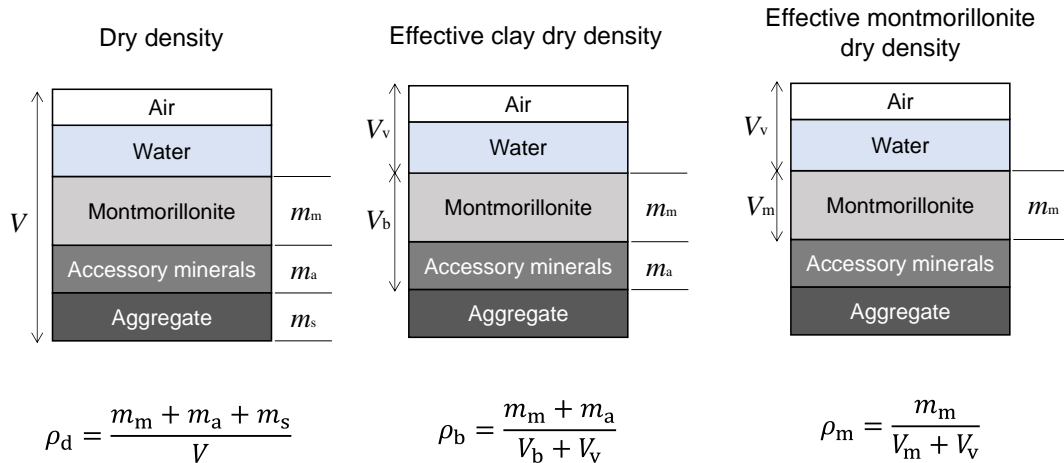


Figure 4-4 Definitions of dry density and effective clay dry density

4.1.5 人工海水を用いた試験の試料調整方法と含水比などの補正

(1) 試験毎の試料調整

人工海水を試験条件とする基本特性試験では後述する試験方法や試験期間などに起因する理由から、以下のように試料調整に用いる水をイオン交換水とするケースと人工海水とするケースに、実施する試験により使い分けた (Table 4-4)。

- ① 試料をイオン交換水で水分調整し、供試体を作製後、人工海水を通水させることにより試験を実施するケース
- ② 絶乾させた試料に対して人工海水で水分調整し、供試体を作製後、直ちに試験を実施 (通水無し) するケース
- ③ 絶乾させた試料に対して人工海水で水分調整し、供試体を作製後、人工海水で水浸脱気または通水することにより試験を実施するケース

緩衝材などの製作から処分場閉鎖後の地下水の浸透過程を想定すると、①の方法を採用するのが実際に起こると考えられる過程に忠実であるといえる。一方で、例えば、三軸圧縮試験では使用する供試体サイズが大きく、間隙水が人工海水に置換されるまでに長時間を要する。また、通水を伴わない試験 (サイクロメータ法による保水性試験) や水飽和の確認が困難な試験装置の仕様 (圧密試験, 加圧板法による保水性試験) によっては間隙水の置換を確認することが難しい、または、供試体ごとのバラツキが残存する可能性が考えられる。これらに関し、本研究では一定の試験期間や使用可能な試験装置に制約があったことから、不確実な状況を排除しそれぞれの試験条件に対する供試体の状態を一定に確保するため、試験によって②、③のように人工海水を用いて試料調整する方法も採用した。

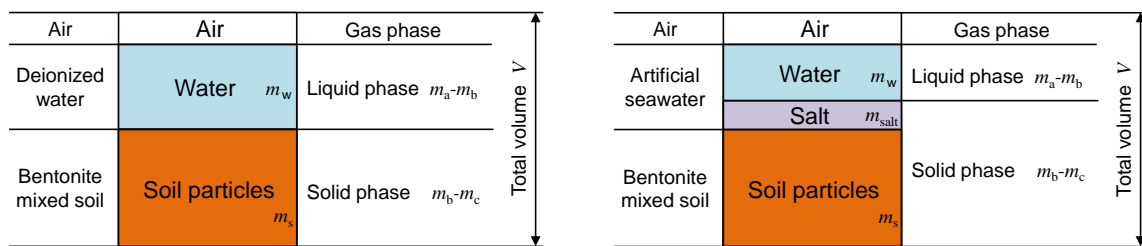
Table 4-4 Sample preparation method for each test using artificial seawater

Method	Solution		Test
	Sample preparation	Water flow process	
①	DW	SW	Permeability-swelling pressure test Swelling deformation test
②	SW	-	Water retention test (Psychrometer method)
③	SW	SW	Consolidation test Triaxial compression test Water retention test (Pressure plate method)

DW: Deionized water, SW: Artificial seawater

(2) 含水比と乾燥密度の補正

人工海水で試料調整または通水後の試料の含水比を測定するため炉乾燥すると、Figure 4-5に示すように人工海水中の塩が固相として残留する。このため、試験基準（JIS A 1203）に従った方法で測定した含水比を、固相中の質量から塩の質量を除いて、本来の定義である土中水の質量の土粒子の乾燥質量に対する比に補正する必要がある。



(Case of deionized water)

(Case of artificial seawater)

- m_w : Mass of water (g)
- m_s : Mass of soil particles (g)
- m_{salt} : Mass of salt (g)
- m_a : Mass of the sample and container (g)
- m_b : Mass of the oven-dried sample and container (g)
- m_c : Mass of container (g)

Figure 4-5 Schematic diagram of the specimen configuration

水分測定時の見かけ上の含水比（塩の質量を含む） w' （%）は次式で表せる。

$$w' = \frac{m_w}{m_s + m_{\text{salt}}} \times 100 \quad (\text{式4-2a})$$

$$w' = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \quad (\text{式4-2b})$$

ここで、 m_w は水の質量（g）、 m_s は土の質量（g）、 m_{salt} は塩の質量（g）、 m_a は試料と容器の質量（g）、 m_b は炉乾燥質量および容器の質量（g）、 m_c は容器の質量（g）である。

次に、人工海水中の塩の存在割合を x (%) とすると、 m_w と m_{salt} の比率は $(100-x) : x$ になるので m_{salt} は次式のように表せる。

$$m_{\text{salt}} = \frac{x}{100 - x} \times m_w \quad (\text{式4-3})$$

式4-2aの分母に含まれる塩の質量 m_{salt} を除いたものを補正後の含水比 w (%) とすると、 w (%) は見かけ上の含水比 w' (%) から次式で与えられる。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 = \frac{w' m_w}{1 - \frac{\alpha}{100} w'} \quad (\text{式4-4})$$

ただし、 $\alpha = x/(100 - x)$ として (x は人工海水中の塩の存在割合 (%))。

同様に乾燥密度について、水分測定時の見かけ上の乾燥密度 ρ_d' (Mg/m^3) は次式のようになる。

$$\rho_d' = \frac{m_s + m_{\text{salt}}}{V} \quad (\text{式4-5})$$

式4-5の分子に含まれる塩の質量 m_{salt} を除いたものを補正後の乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3) とすると、 $\alpha = x/(100 - x)$ として次式で与えることができる。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \rho_d' - \alpha \frac{m_w}{V} \quad (\text{式4-6})$$

本研究で使用した人工海水100 gを蒸発させた際の塩の質量は3.3 gであった。したがって、本研究で使用する人工海水中の塩の存在割合は $x=3.3\%$ として、含水比、乾燥密度の補正を行った。

4.2 締固め試験

4.2.1 試験ケース

6 種類のベントナイトを対象に、突固めによる締固め試験を実施した。試験ケースの一覧は Table 4-5 のとおりである。

Table 4-5 Program of compaction test

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	
KV	KV100	100
	KV085	85
	KV070	70
	KV050	50
	KV030	30
	KV015	15
TG	TG100	100
	TG085	85
	TG070	70
	TG050	50
	TG030	30
	TG015	15
SK	SK100	100
	SK085	85
	SK070	70
	SK050	50
	SK030	30
	SK015	15
MG	MG100	100
	MG085	85
	MG070	70
	MG050	50
	MG030	30
	MG015	15
TM	TM100	100
	TM085	85
	TM070	70
	TM050	50
	TM030	30
	TM015	15
IZ	IZ100	100
	IZ085	85
	IZ070	70
	IZ050	50
	IZ030	30
	IZ015	15

4.2.2 試験方法

6種類のベントナイトに対し、ベントナイト混合率が6通り（15%、30%、50%、70%、85%、100%）となるようにケイ砂を混合した試料を締固め試験で使用した（Table 4-5参照）。締固め試験は、JIS A 1210:2009「突固めによる土の締固め試験」に準拠して実施した。使用したランマーは4.5 kg、モールドの内径は100 mm、モールドの高さは127.3 mm、突固め層数は5層、1層当たりの突固め回数は25回、湿潤法で非繰り返し法（C-c法）とした。ランマーの落下回数が、約30回/minとなる自動締固め試験装置を使用した（Figure 4-6参照）。

JIS A 1210:2009に規定される方法では、層厚管理としては、突固め後の試料上面がモールドの上端からわずかに上になり、10 mmを超えないこととされている。本研究では、層厚を詳細に管理するため、1層当たり 26 ± 10 mmの範囲で突き固めを行い、1層ごとに状態を管理した。また、ベントナイト系材料はランマーやモールドの内壁に付着しやすいため、付着した試料は適宜モールド内の試料に混合することに留意した。

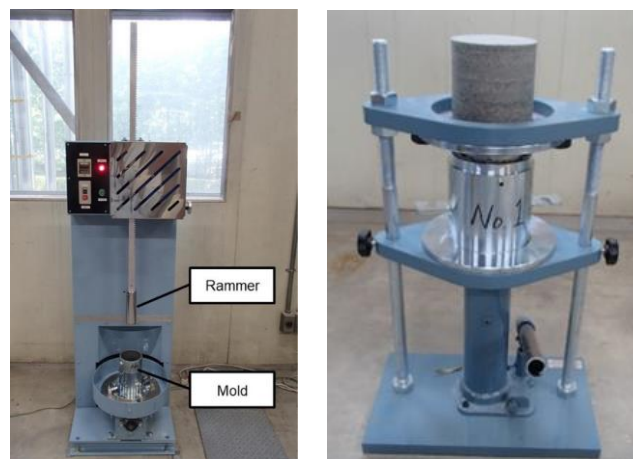
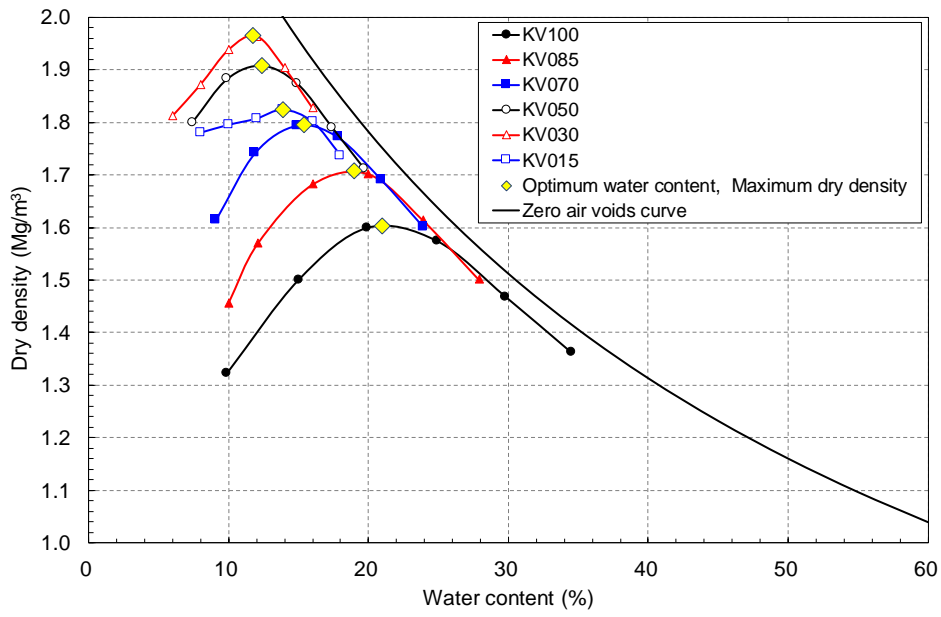


Figure 4-6 Automatic compaction test apparatus (Left) and a hydraulic jack to push out the specimen (Right)

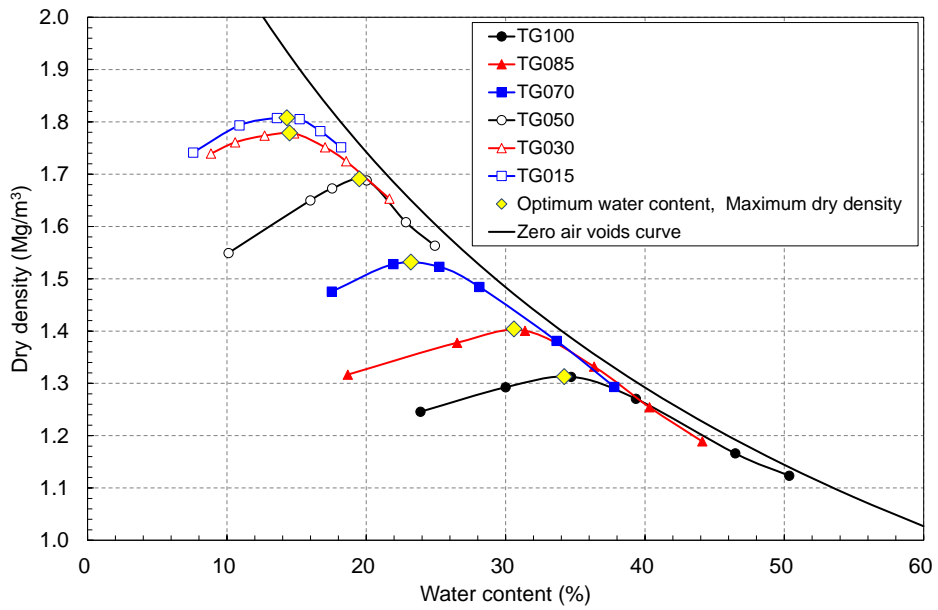
4.2.3 試験結果

各ベントナイトの締固め曲線をFigure 4-7に示す。TGとMGは、ベントナイト混合率の低下に伴い、最大乾燥密度は増加し、最適含水比は低下する傾向が認められた。KV、SK、TM、IZに関して、ベントナイト混合率30～100%の範囲では、TGとMGと同様に、ベントナイト混合率の低下に伴い、最大乾燥密度は増加し、最適含水比は低下した。しかし、ベントナイト混合率15%では、ベントナイト混合率30%ならびに50%より小さい最大乾燥密度となった。特にKVではこの変化が顕著であり、ベントナイト混合率30%で最大乾燥密度 1.965 Mg/m^3 であったが、ベントナイト混合率15%では、 1.824 Mg/m^3 に低下した。

ベントナイト混合率と最適含水比ならびに最大乾燥密度の関係をFigure 4-8に示す。KVがほか5種類のベントナイトと比べて、ベントナイト混合率30～100%の範囲において、最適含水比は最も低く、最大乾燥密度は最も高いことが分かった。最適含水比と最大乾燥密度の関係をFigure 4-9に示す。すべてのベントナイトにおいて最大乾燥密度が高くなるほど最適含水比は小さくなり、その傾向はベントナイトの種類によらずほぼ同じであった。

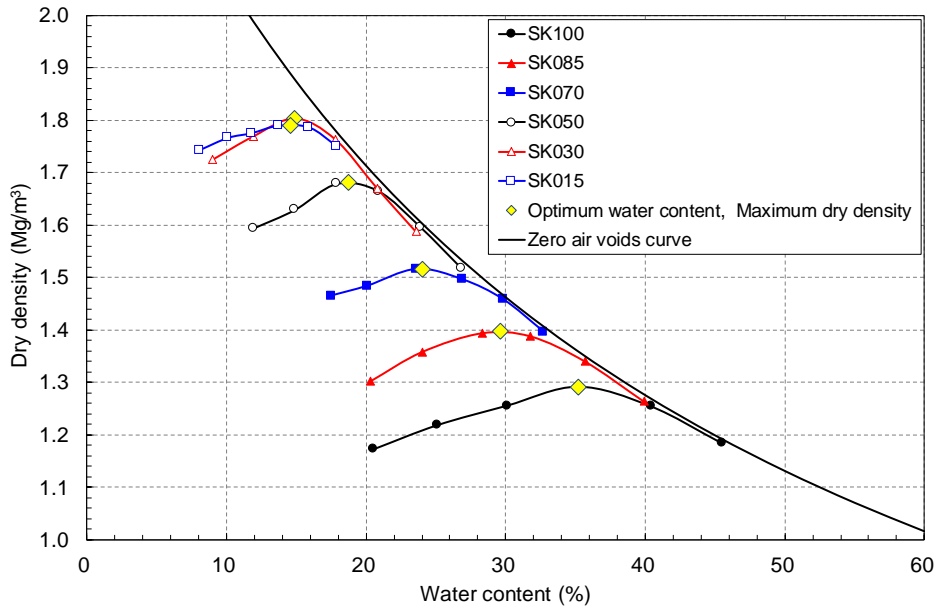


(a) KV

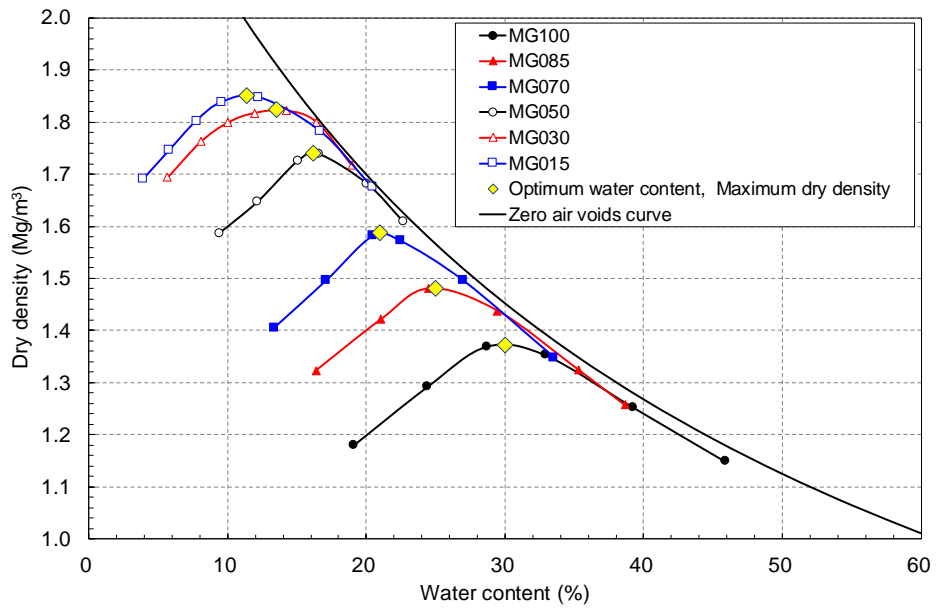


(b) TG

Figure 4-7 Compaction curves of bentonites (1/3)

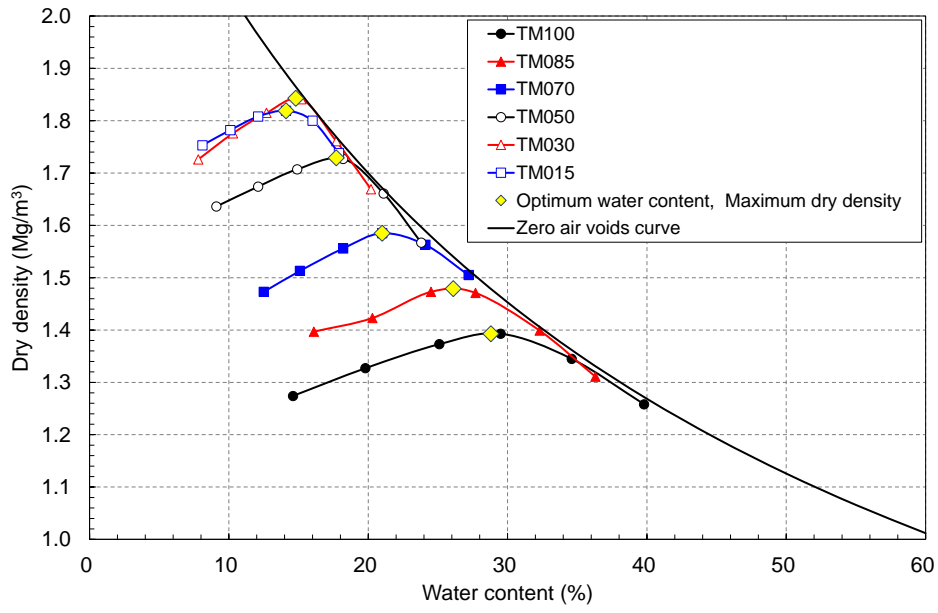


(c) SK

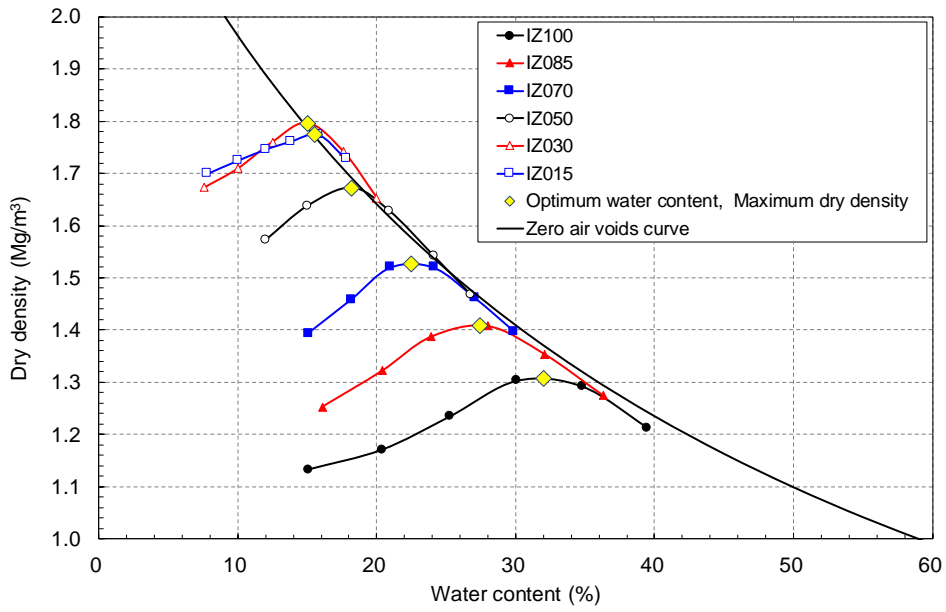


(d) MG

Figure 4-7 Compaction curves of bentonites (2/3)

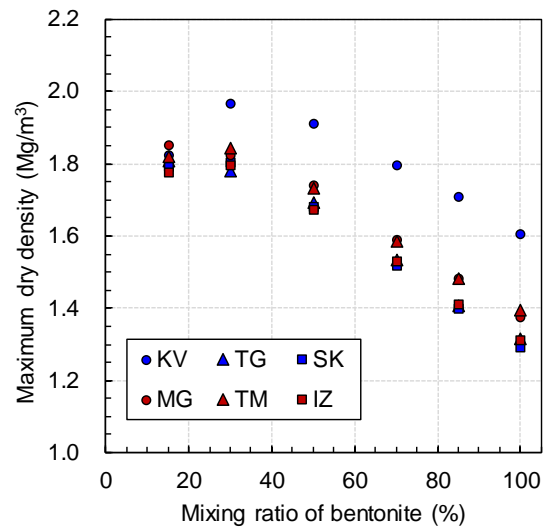
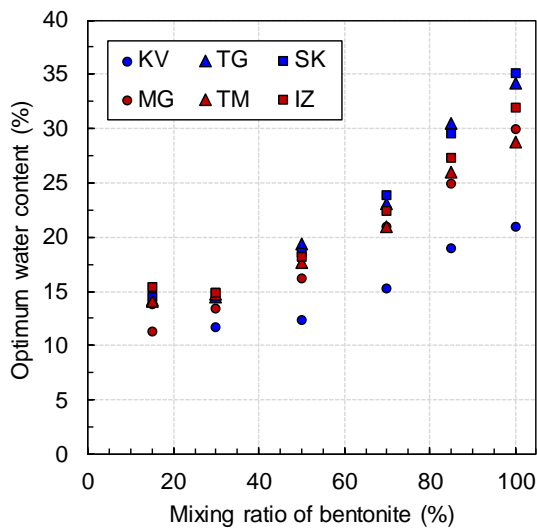


(e) TM



(f) IZ

Figure 4-7 Compaction curves of bentonites (3/3)



(a) Relation between optimum water content and mixing ratio of bentonite

(b) Relation between maximum dry density and mixing ratio of bentonite

Figure 4-8 Optimum water content and maximum dry density of bentonite-sand mixtures

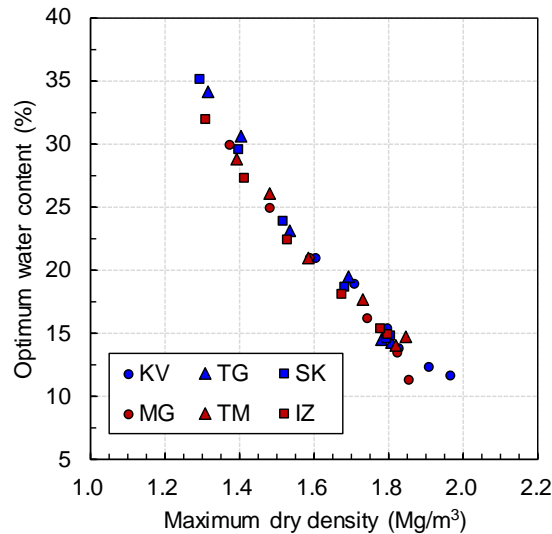
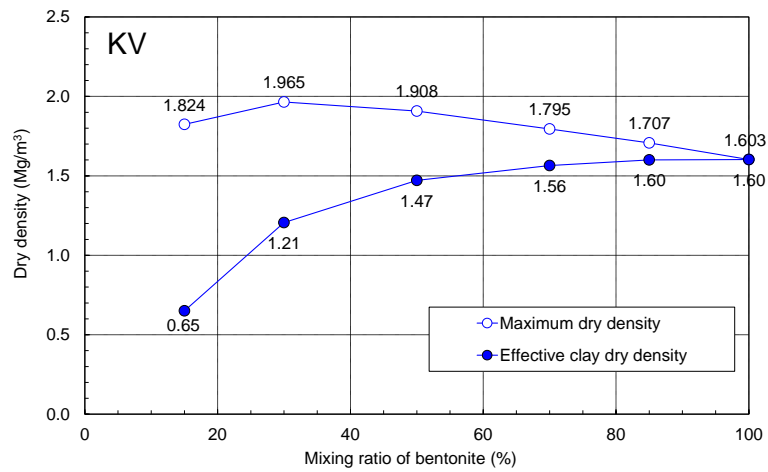


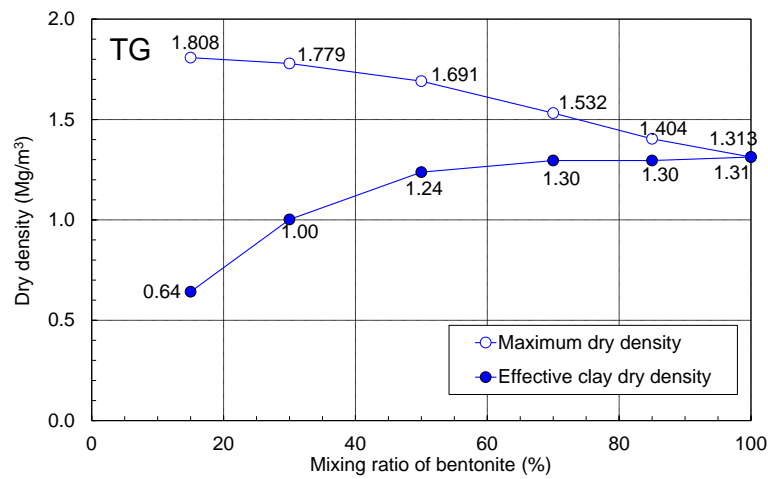
Figure 4-9 Relation between optimum water content and maximum dry density of bentonite-sand mixtures

各ベントナイト混合率において最大乾燥密度に対応する有効粘土密度をFigure 4-10(a)~(f)に示す。すべてのベントナイトにおいて、ベントナイト混合率の増加に伴い、最大乾燥密度は概ね減少する傾向にある一方で、最大乾燥密度に対応する有効粘土密度は増加する傾向が認められた。そして、概ねベントナイト混合率70%以上の範囲において、有効粘土密度の増加傾向は緩やかになり、ほぼ上限になることが分かった。

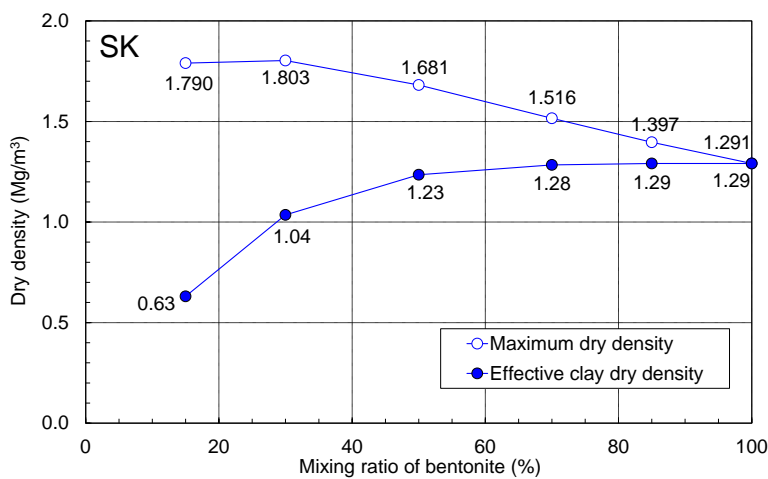
本研究で得られた各ベントナイトの最適含水比と最大乾燥密度をTable 4-6に整理した。



(a) KV

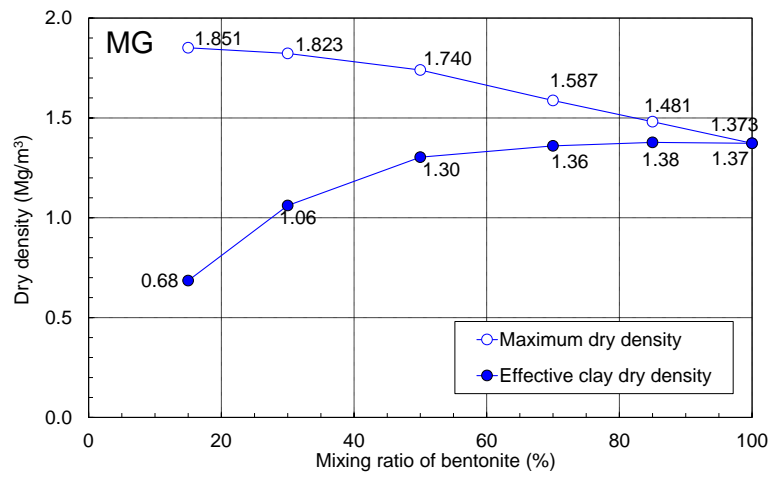


(b) TG

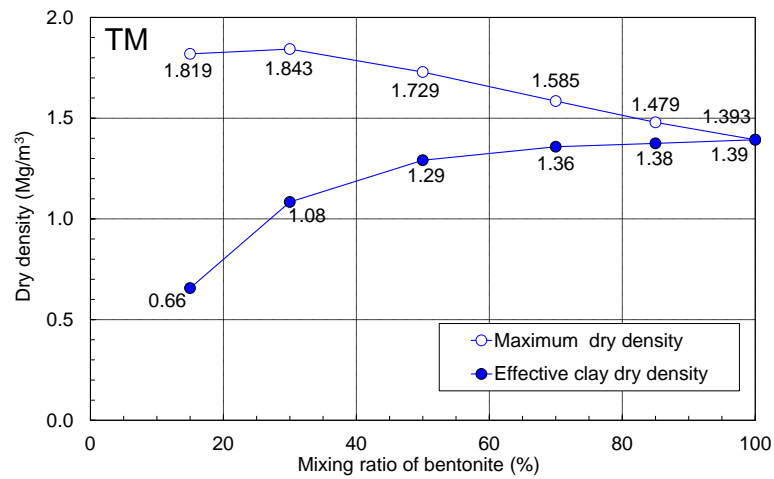


(c) SK

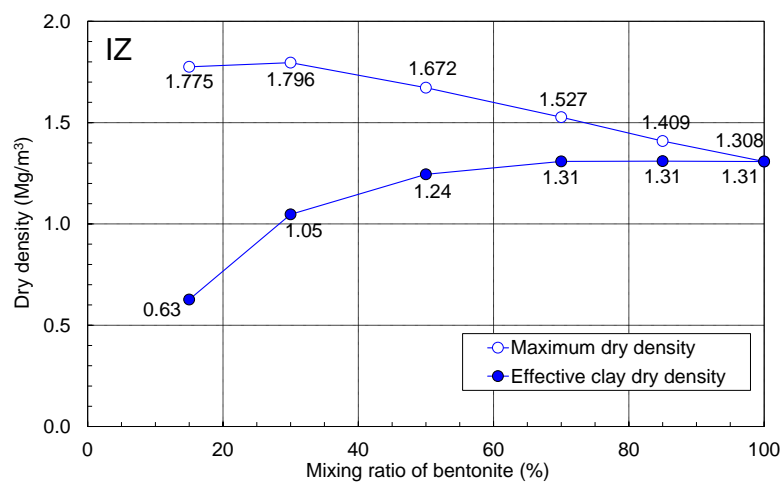
Figure 4-10 Relation between mixing ratio of bentonite and effective clay dry density corresponding to maximum dry density (1/2)



(d) MG



(e) TM



(f) IZ

Figure 4-10 Relation between mixing ratio of bentonite and effective clay dry density corresponding to maximum dry density (2/2)

Table 4-6 Compaction test results

Sample	Optimum water content (%)	Maximum dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density at the maximum dry density (Mg/m ³)	
KV	KV100	21.0	1.603	1.60
	KV085	19.0	1.707	1.60
	KV070	15.4	1.795	1.56
	KV050	12.4	1.908	1.47
	KV030	11.7	1.965	1.21
	KV015	13.9	1.824	0.65
TG	TG100	34.2	1.313	1.31
	TG085	30.6	1.404	1.30
	TG 70	23.2	1.532	1.30
	TG050	19.5	1.691	1.24
	TG030	14.5	1.779	1.00
	TG015	14.3	1.808	0.64
SK	SK100	35.2	1.291	1.29
	SK085	29.6	1.397	1.29
	SK070	24.0	1.516	1.28
	SK050	18.7	1.681	1.23
	SK030	14.9	1.803	1.04
	SK015	14.6	1.790	0.63
MG	MG100	30.0	1.373	1.37
	MG085	25.0	1.481	1.38
	MG070	21.0	1.587	1.36
	MG050	16.2	1.740	1.30
	MG030	13.5	1.823	1.06
	MG015	11.4	1.851	0.68
TM	TM100	28.8	1.393	1.39
	TM085	26.1	1.479	1.38
	TM070	21.0	1.585	1.36
	TM050	17.7	1.729	1.29
	TM030	14.8	1.843	1.08
	TM015	14.1	1.819	0.66
IZ	IZ100	32.0	1.308	1.31
	IZ085	27.4	1.409	1.31
	IZ070	22.5	1.527	1.31
	IZ050	18.2	1.672	1.24
	IZ030	15.0	1.796	1.05
	IZ015	15.5	1.775	0.63

4.3 透水・膨潤圧試験

4.3.1 試験ケース

透水性と膨潤性は締め固めたベントナイトの基本的な特性である。そこで、6種類のベントナイトを対象に、透水試験ならびに膨潤圧試験を実施した。試験ケースの一覧はTable 4-7のとおりである。6種類のベントナイトについてそれぞれ4通りのベントナイト混合率(30%, 50%, 70%, 100%)とし、試験用水にはイオン交換水(DW)と人工海水(SW)を用いた。

Table 4-7 Program of permeability-swelling pressure test (1/2)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Initial condition of test specimen			
			Water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	
KV	KV100	100	DW	20.8	1.602	1.60
	KV070	70	DW	15.3	1.704	1.48
	KV050	50	DW	12.5	1.811	1.37
	KV030	30	DW	11.9	1.865	1.10
	KV100	100	SW	20.8	1.602	1.60
	KV070	70	SW	15.4	1.704	1.48
	KV050	50	SW	12.5	1.811	1.37
	KV030	30	SW	11.6	1.866	1.10
TG	TG100	100	DW	33.9	1.308	1.31
	TG 070	70	DW	22.9	1.453	1.22
	TG050	50	DW	19.4	1.603	1.15
	TG030	30	DW	14.3	1.688	0.91
	TG100	100	SW	34.9	1.314	1.31
	TG 070	70	SW	23.0	1.456	1.22
	TG050	50	SW	19.1	1.604	1.15
	TG030	30	SW	14.3	1.690	0.91
SK	SK100	100	DW	36.0	1.289	1.29
	SK070	70	DW	23.8	1.439	1.20
	SK050	50	DW	18.6	1.596	1.14
	SK030	30	DW	14.8	1.711	0.93
	SK100	100	SW	35.4	1.291	1.29
	SK070	70	SW	24.4	1.440	1.20
	SK050	50	SW	18.7	1.596	1.14
	SK030	30	SW	14.6	1.712	0.94

Table 4-7 Program of permeability-swelling pressure test (2/2)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Initial condition of test specimen			
			Water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	
MG	MG100	100	DW	30.1	1.369	1.37
	MG070	70	DW	21.1	1.507	1.27
	MG050	50	DW	16.1	1.651	1.20
	MG030	30	DW	13.4	1.726	0.95
	MG100	100	SW	30.1	1.374	1.37
	MG070	70	SW	20.5	1.509	1.27
	MG050	50	SW	16.3	1.653	1.20
	MG030	30	SW	13.8	1.731	0.95
TM	TM100	100	DW	28.6	1.392	1.39
	TM070	70	DW	20.9	1.506	1.27
	TM050	50	DW	17.6	1.642	1.19
	TM030	30	DW	14.8	1.742	0.97
	TM100	100	SW	29.3	1.393	1.39
	TM070	70	SW	21.1	1.506	1.27
	TM050	50	SW	17.8	1.642	1.19
	TM030	30	SW	14.7	1.740	0.96
IZ	IZ100	100	DW	31.5	1.307	1.31
	IZ070	70	DW	22.4	1.450	1.21
	IZ050	50	DW	17.7	1.587	1.13
	IZ030	30	DW	15.0	1.701	0.92
	IZ100	100	SW	32.4	1.307	1.31
	IZ070	70	SW	22.2	1.451	1.21
	IZ050	50	SW	18.3	1.588	1.13
	IZ030	30	SW	14.9	1.705	0.93

4.3.2 試験方法

(1) 試験装置の構成

本研究の膨潤圧と透水係数の測定に用いた透水・膨潤圧試験装置の外観をFigure 4-11, Figure 4-12に示す。膨潤透水圧試験装置は、供試体を収容する試験セル、二重管ビュレット、脱気水槽、空気圧載荷設備、データロガーにより構成される。人工海水を使用するため、試験セルと配管はステンレス製とした。試験セルの概略図をFigure 4-13に示す。供試体リングは、内径60 mm、厚さ20 mmとした。供試体の上下部には孔径10 μm のポーラスメタルを設置した。下部のポーラスメタルおよびその台座は、セル底板に直接固定されておらず、Oリングで止水した状態で荷重計の上部に設置した。これにより、台座の微小な鉛直変位量を荷重計で検知し、供試体の膨潤圧を測定することを可能とした。

ベントナイト系材料のように低透水性の土質材料に対する透水試験では、地盤工学会基準 JGS0312-2018, ならびに、「低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会」研究報告書（地盤工学会，2016）によれば，試験中の水の蒸発により透水係数の測定にばらつきや過小評価または過大評価をもたらすことが指摘されている。本研究では，ステンレス製の配管を用いることで蒸発を抑制するほか，二重管ビュレットを用いることで蒸発量を抑制し，さらにダミーのビュレットを設置して蒸発量が測定されればそれを補正に用いることにより，流量の測定精度の向上を図った。また，2 mL容量で最小目盛0.05 mLのビュレットを用いることにより，流量の測定精度を向上させた。



Figure 4-11 Whole view of apparatus for the permeability-swelling pressure test

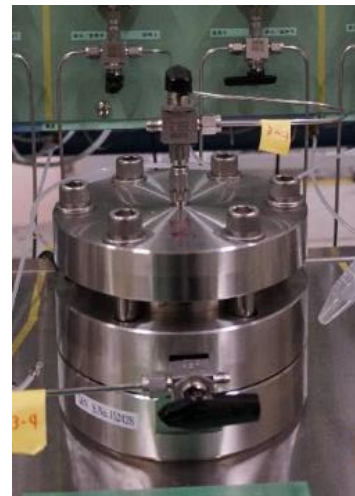


Figure 4-12 Apparatus for the permeability-swelling pressure test

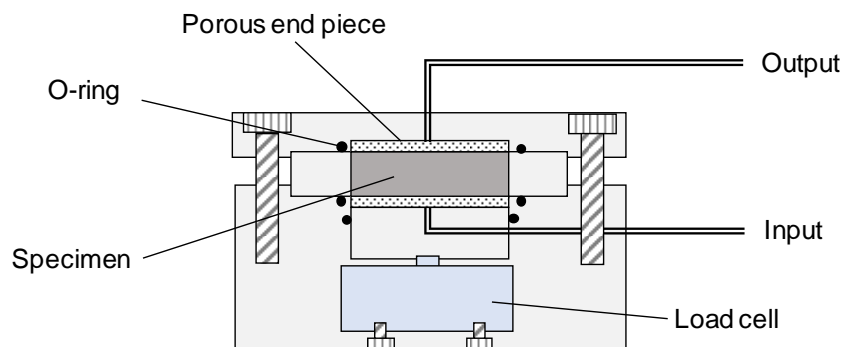


Figure 4-13 Schematic image of apparatus for permeability-swelling pressure test

(2) 試験の手順

透水・膨潤圧試験の手順をFigure 4-14に示す。試験前には，供試体部分が空の状態試験セルを組み上げ，空気圧または水圧を用いて荷重計の検定・校正を行った。供試体の作製および試験セルへの設置については以下のとおりである。含水比調整した試料を用い，1層の静的締固めにより，供試体リング内に供試体を直接圧縮成型した。これにより，供試体と供試体リング内壁との隙間が生じにくくなり，透水係数に及ぼす側壁漏れの影響は軽減されると考えた。

供試体の上下に高分子フィルター（セルガード）を設置し、試験セルを組み上げた。試験セルの上板をボルト固定した状態で荷重が検知され、なおかつ、その測定値が30 kPa以内で収まることを確認することにより、供試体がポーラスメタルと接触したと判断した。

供試体の飽和については以下のとおりである。はじめに供試体の両側から真空ポンプを用いて減圧した。段階的に減圧し、ゲージ圧で-100 kPa程度の状態を約3時間維持した。その後、供試体上部のコックは閉じた状態とし、脱気したイオン交換水または人工海水を供試体下部から給水した。給水直前からの荷重計の値（以後、鉛直圧と記述する）を測定した。また、時間当たりの吸水量を定期的に測定した。特に透水性が低く、飽和に長時間を要する供試体については、鉛直圧と吸水量の時間変化が小さくなった時期に、鉛直圧以下の水圧を作用させて、吸水を促した。吸水量の時間変化が小さくなってから、供試体上部のコックを大気圧開放した。供試体上部から流出水が確認された時点をもととして、透水試験における経過時間とした。

供試体上部から流出水が確認されてから早い段階で透水係数を参考値として測定した。この時点における透水係数は、後述する飽和の確認が取れる前段階であるため参考値扱いとした。透水係数の参考値は、通水条件を定める際に用いた。供試体の飽和状態を判断するため、河野・西垣（1982）による方法を用いて、飽和度を推定した。この方法は、間隙水圧を高めた際の間隙流体（水+空気）の圧縮量を調べることにより、ボイルーシャルルの法則により供試体内の空気量を求め、以下の式により飽和度に換算するものである。

$$S_r = \frac{1}{1-H} - \frac{P_0 \Delta V_w}{\Delta P(V - V_s)} \quad (\text{式4-7})$$

ここで、 H はヘンリーの係数、 P_0 は初期の間隙水圧（kPa）、 ΔP_0 は間隙水圧の増分（kPa）、 V は供試体の体積（ m^3 ）、 V_s は土粒子の体積（ m^3 ）、 ΔV_w は間隙流体の圧縮量（ m^3 ）である。仮に、脱気水が用いられ、供試体が飽和し、空気が残っていない状態に対して上式を適用すると、空気の溶解を H で見込む分、飽和度が100%を超えて、過大に評価される。Watanabe and Tanaka (2016)では、飽和度が高まった供試体に対する飽和判定では、 H を無視して評価を行っている。本研究においては、飽和度を過大に評価することを避けるため、 H は無視して次式を使用することとした。

$$S_r = \frac{P_0 \Delta V_w}{\Delta P(V - V_s)} \quad (\text{式4-8})$$

透水・膨潤圧試験では、上述した方法で推定された飽和度を含め、渡邊ほか（2013）を参考に、以下の4項目が達成されたことをもって、供試体の飽和度は十分に高い状態にあることを試験中に判断した。

- ・ 時間当たりの流入量と流出量の収支が合うこと
- ・ 膨潤圧がほぼ一定になること
- ・ 河野・西垣（1982）の方法を参考にして推定した飽和度が99%以上であること
- ・ 背圧の増加に伴う透水係数の増加が生じないこと（試験終了前の確認事項）

試験後の含水比から算出される飽和度についても十分に高いことが重要であると考えられるが、本研究では試験後の供試体の写真撮影と抽出陽イオン量測定のための分割作業に時間を要し、乾燥が進む可能性があるため、含水比から算出される飽和度については参考値として扱うこととした。以上の手順により供試体の飽和を確認した後、大気圧下で定常状態にある鉛直圧を平衡膨潤圧として取得するとともに、透水係数を算出した。透水係数の計算には、JGS0312-2018ならびにASTM D5084に従い、以下の式を用いた。

$$k_T = 2.303 \frac{(a_{in} \times a_{out})}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{1000} \quad (\text{式4-9})$$

ここで、 k_T : T (°C) における透水係数 (m/s) , L : 供試体の長さ (mm) , A : 供試体の断面積 (mm^2) , $t_2 - t_1$: 測定時間 (s) , h_1 : 時刻 t_1 における水位差 (mm) , h_2 : 時刻 t_2 における水位差 (mm) , a_{in} : 流入側のビュレットの断面積 (mm^2) , a_{out} : 流出側のビュレットの断面積 (mm^2) である。透水係数の測定では、5点以上の測定値が算術平均値の $\pm 50\%$ の幅に収まることをもって定常状態と判断し、算術平均値を供試体を代表する透水係数とした。透水係数は水温 15°C 基準に補正した。なお、動水勾配は原則50より小さい値とし、透水性の低い供試体については、平衡膨潤圧未満の圧力まで段階的に上昇させ、通水を行った。

透水試験終了前には、背圧を段階的に高め、透水係数を測定した。透水試験が長期に及ぶ場合には、供試体が不飽和化する可能性が考えられたため、ここで背圧上昇により透水性が上がることはなければ、供試体の飽和状態は維持されていたと判断した。また、透水試験の終了直前には、流出水を回収し、ICP-AESを用いて主要元素 (Na, K, Mg, Ca) の濃度を測定するとともに、電気伝導率を測定した。pHはHORIBA製のpHメーター D-51を用い、電気伝導率計はAS ONE製のコンパクト電気伝導率計 AS-EC-33を用いた。本研究では、流出水の水質が定常状態になるまで試験を継続することは困難であったが、試験終了直前の流出水の水質を記録した。

試験装置の解体は次のとおり行った。供試体は、油圧ジャッキを用いてリングから抜き出した後、速やかに写真撮影を行った。高さ方向に三分割して、 $1/2 \sim 1/3$ 角を用いて含水比の測定を、その残りをを用いて抽出陽イオン量の測定をした。含水比の測定では、人工海水を用いた試験においては、炉乾燥により塩が析出し、これが固相重量として測定される。このことから、あらかじめ透水試験後の流出液の蒸発残留物重量割合を測定しておき、4.1.5項の方法により、含水比の補正を行った。

抽出陽イオン量の測定は、3.1.3項に記載した方法により行った。人工海水を用いた試験について、試験後の試料中にある余分な人工海水を出来る限り除去するため、また、イオン交換水を用いた試験についてもこれと前処理を合わせるため、アルコール洗浄を行ったうえで抽出陽イオン量を測定した。アルコール洗浄の完了は、遠心分離による固液分離操作において、上澄み液に硝酸銀溶液による白色沈殿が生じなくなることを確認することとした。

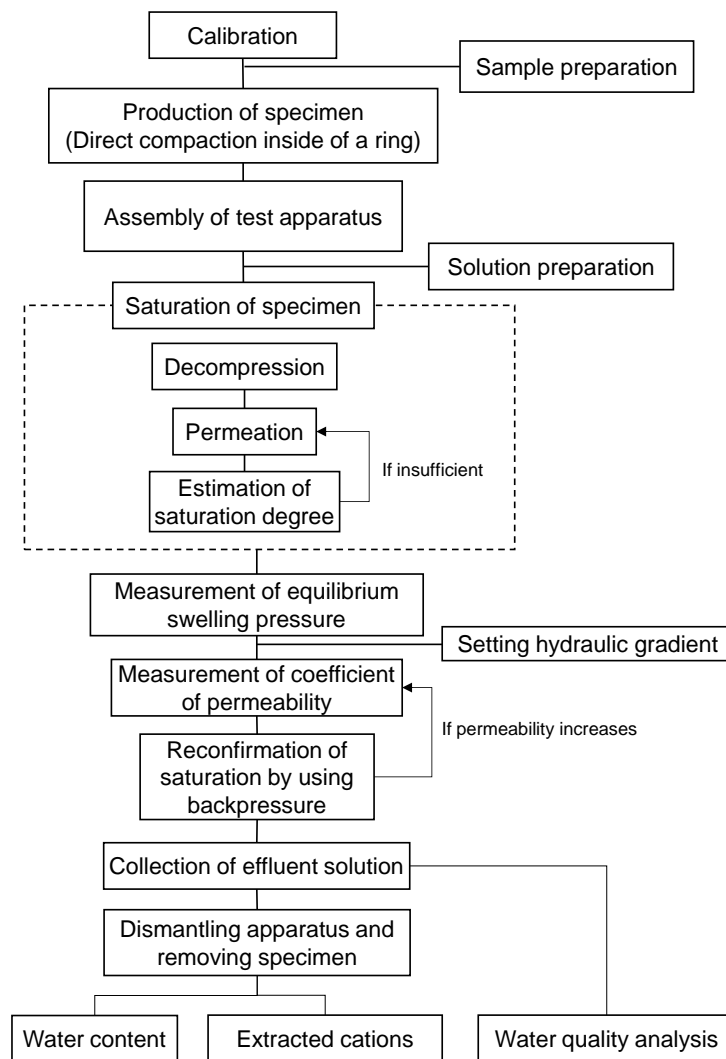


Figure 4-14 Permeability-swelling pressure test procedure

4.3.3 試験結果

(1) 膨潤圧

はじめに、イオン交換水を用いた膨潤圧試験の結果について述べる。平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係をFigure 4-15に示す。有効粘土密度の増加に伴い、平衡膨潤圧は高くなる傾向が認められた。有効粘土密度に対してTGとSKの平衡膨潤圧はほぼ同程度であり、Ca型に分類したMG, TM, IZより高い傾向であった。KVについては、およそ有効粘土密度 1.2 Mg/m^3 以下の範囲ではTGとSKと同程度であったが、それ以上の密度範囲では、TGとSKより低い平衡膨潤圧であった。有効粘土密度に対してMG, TM, IZの平衡膨潤圧に大きな差は認められなかった。

次に、人工海水を用いた膨潤圧試験の結果について述べる。人工海水を用いた場合の平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係をベントナイトの種類ごとにFigure 4-16に示す。比較のためにイオン交換水を用いた試験で得られた平衡膨潤圧についても示す。人工海水を用いた場合にも、有効粘土密度の増加に伴い、平衡膨潤圧は増加する傾向が認められた。人工海水を用いることでイオン交換水を用いた場合より平衡膨潤圧は低下する供試体がほとんどであった。TMに関しては、それを除く5種類のベントナイトと比べて、試験用水の違いによる平衡膨潤圧の変化は

非常に小さかった。

全種類のベントナイトについて、イオン交換水および人工海水を用いた場合の平衡膨潤圧を Figure 4-17 に示す。TG と SK の平衡膨潤圧は、人工海水を使用した場合に低下したものの、ほかのベントナイトと比べると高い値を示した。人工海水を使用した場合の KV の平衡膨潤圧は、特に有効粘土密度が高い範囲において、全試料の中で最も低い値であった。Ca 型に分類した MG, TM, IZ に関しては、およそ有効粘土密度 1.3 Mg/m^3 以下の範囲において、人工海水を用いた場合の平衡膨潤圧に明瞭な差は認められなかった。

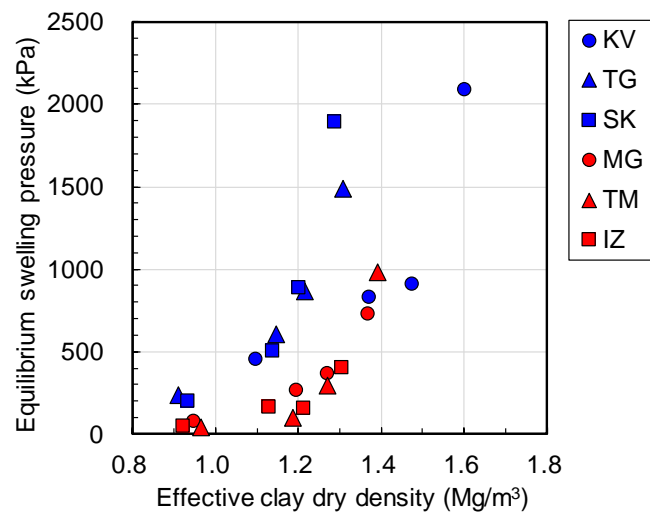


Figure 4-15 Relation between equilibrium swelling pressure and effective clay dry density (DW)

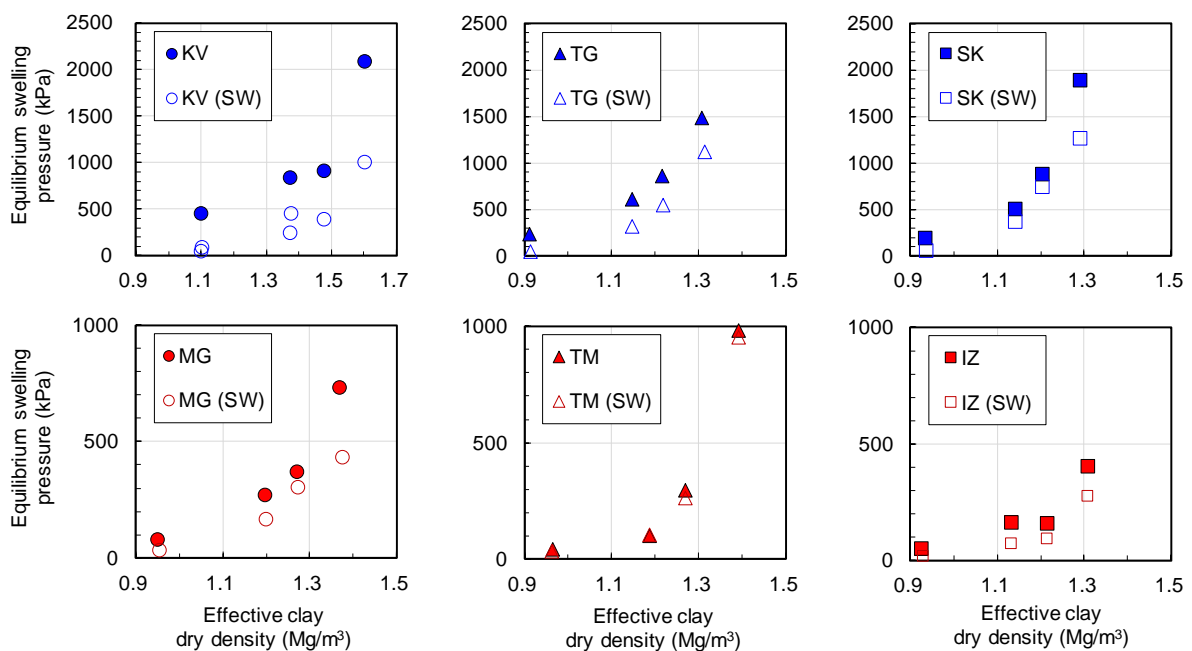


Figure 4-16 Relation between equilibrium swelling pressure and effective clay dry density (DW & SW)

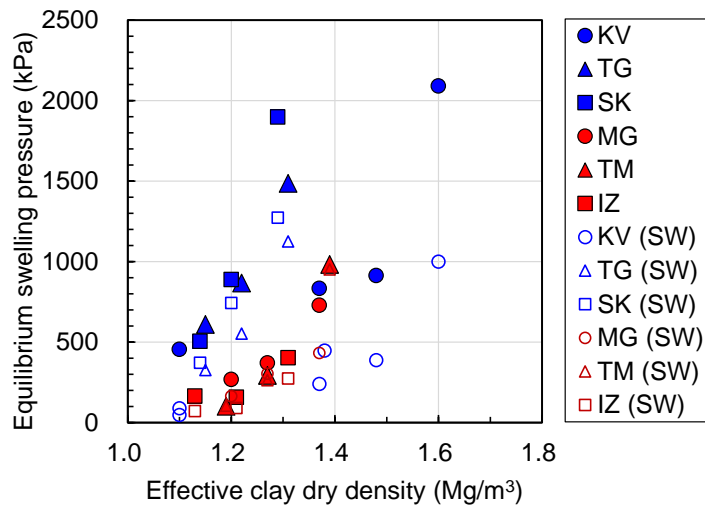


Figure 4-17 Comparison of equilibrium swelling pressure in SW with that in DW

(2) 透水係数

はじめに、イオン交換水を用いた透水試験の結果について述べる。透水係数と有効粘土密度の関係を図4-18に示す。有効粘土密度の増加に伴い透水係数は減少する傾向が認められた。Na型ベントナイトに分類したKV, TG, SKについては、有効粘土密度に対する透水係数に明瞭な差は認められなかった。一方、Ca型ベントナイトに分類した3種類については、MGとIZは有効粘土密度に対してほぼ同じ透水係数を示し、これらと比べてTMは高い透水性を示した。また、同じ有効粘土密度で透水係数を比較した時、Na型ベントナイトのほうがCa型ベントナイトより小さい傾向にあった。この差は、高密度になるほど小さくなる傾向であった。

背圧を作用させる前後の透水係数を図4-19に示す。背圧を作用させる前後の透水係数はほぼ一致した。これにより、試験終了時点においても供試体の飽和度が十分に高い状態は維持されていたと考えられる。なお、試験後の飽和度については96~106%の範囲であった。このことから、透水試験中の供試体は十分に高い飽和状態にあったと考えられる。

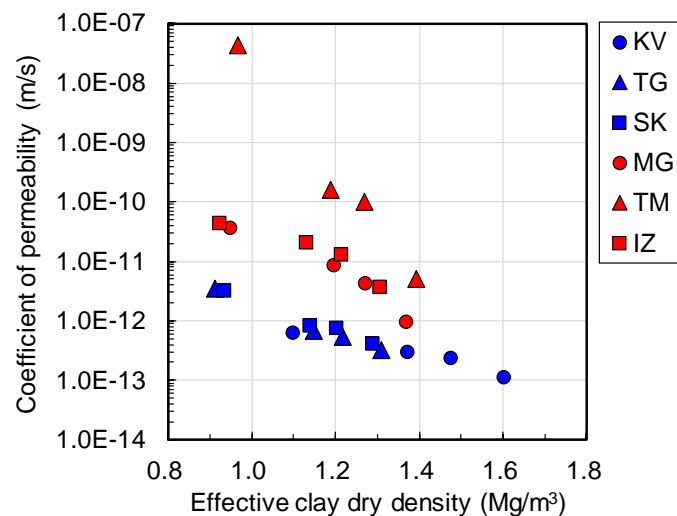


Figure 4-18 Relation between coefficient of permeability and effective clay dry density (DW)

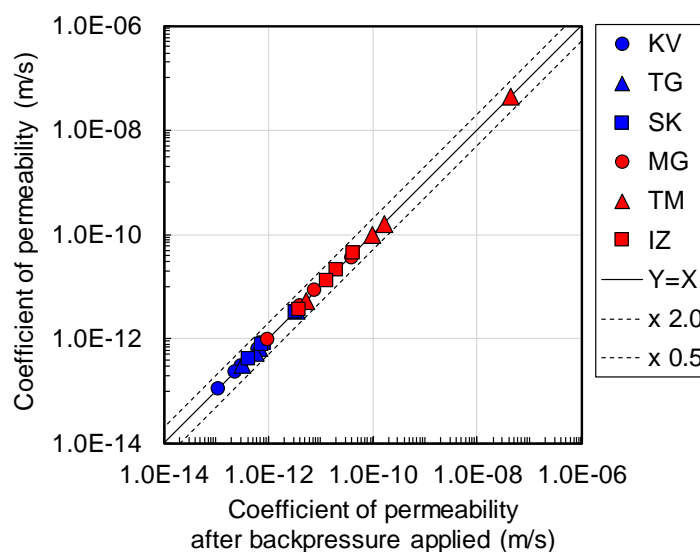


Figure 4-19 Coefficient of permeability before and after applying backpressure (DW)

次に、人工海水を用いた透水係数の結果について述べる。人工海水を用いて得られた透水係数と有効粘土密度の関係をベントナイトの種類ごとにFigure 4-20に示す。なお、KV030とKV050については、5.3節に後述する再現性確認試験により得られたデータ（供試体内側の流量から計算された透水係数）も併せて示す。比較のためにイオン交換水の場合に得られた透水係数も併せて示す。人工海水を用いた場合にも、有効粘土密度の増加に伴い、透水係数は小さくなる傾向が認められた。TMを除く5種類のベントナイトに関しては、人工海水を用いた場合、イオン交換水の場合と比べて、透水係数は大きくなった。TMに関しては人工海水による透水係数の変化は0.9～1.1倍の範囲であり、人工海水による透水性の変化は極めて小さかった。

全種類のベントナイトについて、透水係数と有効粘土密度の関係をFigure 4-21に示す。イオン交換水の場合にはKV、TG、SKの透水係数はいずれも 10^{-12} ～ 10^{-13} m/sの範囲であったが、人工海水を用いた場合には上記3種類のうちKVの透水性が最も高くなった。有効粘土密度 1.5 Mg/m^3 では3倍程度の増加であったが、有効粘土密度 1.1 Mg/m^3 以上では 10^3 ～ 10^4 倍程度まで透水係数は大きくなった。TGとSKは、KVほど透水係数は増大せず、有効粘土密度 1.1 Mg/m^3 以上の範囲では約10倍以内の増加幅、有効粘土密度 0.9 Mg/m^3 付近では、透水係数は約 10^3 倍となった。MG、TM、IZに関しては、人工海水を用いた場合、有効粘土密度に対する透水係数はほぼ同等であった。これらの値は、人工海水を用いた場合のKVの透水係数とほぼ同等であった。

以上をまとめると、TM以外のベントナイトは人工海水により透水係数が大きくなり、特に、有効粘土密度が低い範囲ほど人工海水による透水性増大は著しいことが分かった。初期試料としてNa型に分類されるKV、TG、SKより、Ca型に分類されるMG、TM、IZのほうが人工海水による透水性増加は小さい傾向であった。そして、人工海水を用いた場合、有効粘土密度に対する透水係数はKV、MG、TM、IZが比較的近い値、そして、TGとSKが比較的近い値になることが分かった。

人工海水を用いた場合の背圧を作用させる前後の透水係数の比較をFigure 4-22に示す。背圧を作用させることで透水係数の増加は生じておらず、ほぼ1:1に対応していることから、飽和度が高い状態が維持されていたと考えられる。また、試験後の供試体の飽和度は、塩分析出量

の補正を行った値として94～101%の範囲であった。このことから、十分に高い飽和状態において透水試験を行えたと考えられる。

以上の透水・膨潤圧試験結果の一覧をTable 4-8, Table 4-9にまとめる。

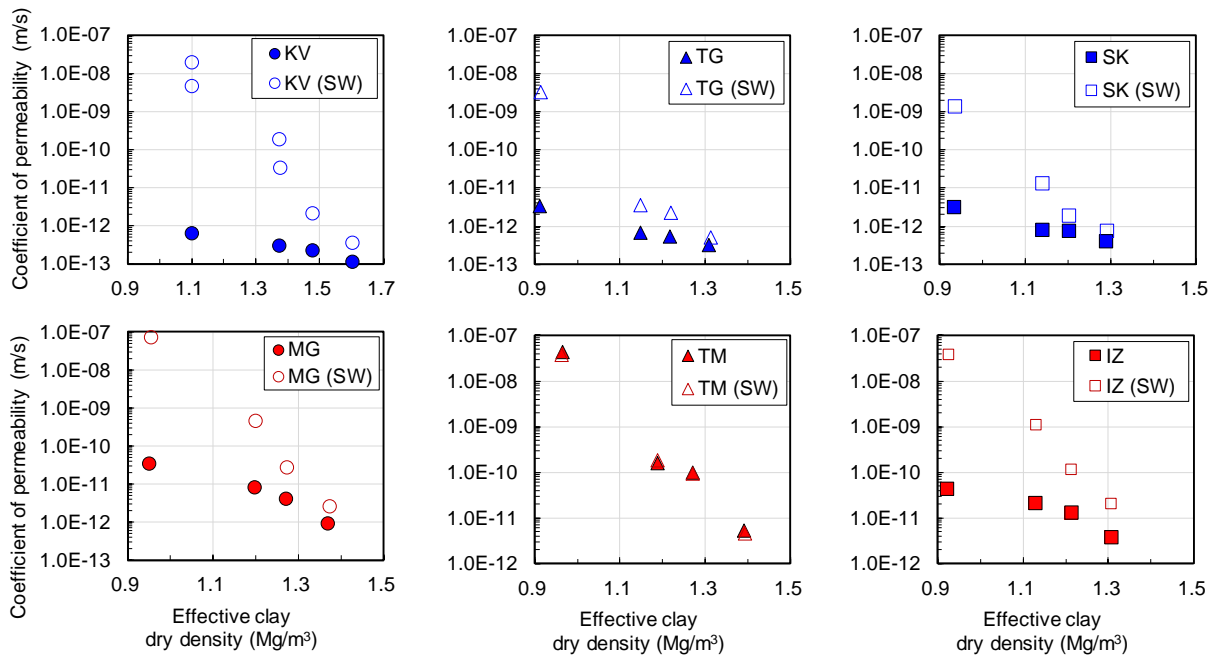


Figure 4-20 Coefficient of permeability for each bentonite (DW & SW)

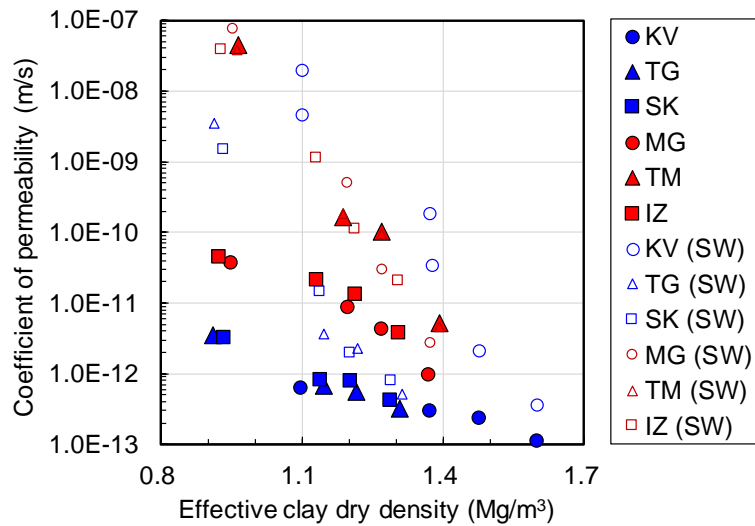


Figure 4-21 Relation between coefficient of permeability and effective clay dry density (DW & SW)

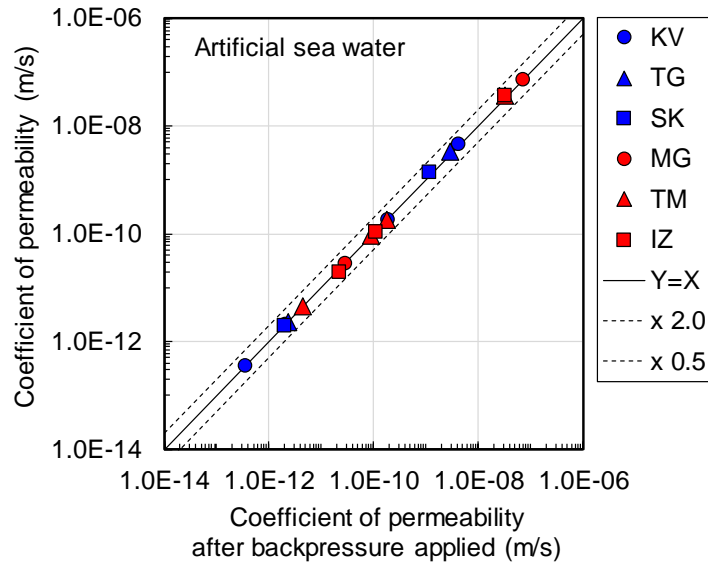


Figure 4-22 Coefficient of permeability before and after applying backpressure (SW)

Table 4-8 Permeability-swelling pressure test results (DW)

Test case	Mixture ratio of bentonite (%)	Water content at compaction (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Equilibrium swelling pressure (kPa)	Hydraulic conductivity (m/s)
KV	KV030-DW	30	1.865	1.10	455	6.3×10^{-13}
	KV050-DW	50	1.811	1.37	833	2.9×10^{-13}
	KV070-DW	70	1.704	1.48	913	2.3×10^{-13}
	KV100-DW	100	1.602	1.60	2090	1.1×10^{-13}
TG	TG030-DW	30	1.688	0.91	241	3.5×10^{-12}
	TG050-DW	50	1.603	1.15	610	6.8×10^{-13}
	TG070-DW	70	1.453	1.22	867	5.5×10^{-13}
	TG100-DW	100	1.308	1.31	1486	3.2×10^{-13}
MG	MG030-DW	30	1.726	0.95	78	3.6×10^{-11}
	MG050-DW	50	1.651	1.20	268	8.4×10^{-12}
	MG070-DW	70	1.507	1.27	370	4.2×10^{-12}
	MG100-DW	100	1.369	1.37	729	9.7×10^{-13}
SK	SK030-DW	30	1.711	0.93	201	3.2×10^{-12}
	SK050-DW	50	1.596	1.14	505	8.2×10^{-13}
	SK070-DW	70	1.439	1.20	888	7.7×10^{-13}
	SK100-DW	100	1.289	1.29	1897	4.1×10^{-13}
TM	TM030-DW	30	1.742	0.97	43	4.4×10^{-8}
	TM050-DW	50	1.642	1.19	101	1.6×10^{-10}
	TM070-DW	70	1.506	1.27	293	1.0×10^{-10}
	TM100-DW	100	1.392	1.39	982	5.2×10^{-12}
IZ	IZ030-DW	30	1.701	0.92	51	4.4×10^{-11}
	IZ050-DW	50	1.587	1.13	164	2.1×10^{-11}
	IZ070-DW	70	1.450	1.21	157	1.3×10^{-11}
	IZ100-DW	100	1.307	1.31	402	3.7×10^{-12}

Table 4-9 Permeability-swelling pressure test results (SW)

	Test case	Mixture ratio of bentonite (%)	Water content at compaction (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Equilibrium swelling pressure (kPa)	Hydraulic conductivity (m/s)
KV	KV030-SW (1)	30	11.6	1.866	1.10	48	4.6×10 ⁻⁹
	KV030-SW (2)	30	11.8	1.867	1.10	90	1.4×10 ⁻⁸
	KV050-SW (1)	50	12.5	1.811	1.37	240	1.8×10 ⁻¹⁰
	KV050-SW (2)	30	12.2	1.814	1.38	448	1.4×10 ⁻¹¹
	KV070-SW	70	15.4	1.704	1.48	388	2.1×10 ⁻¹²
	KV100-SW	100	20.8	1.602	1.60	1000	3.6×10 ⁻¹³
TG	TG030-SW	30	14.3	1.690	0.91	54	3.5×10 ⁻⁹
	TG050-SW	50	19.1	1.604	1.15	327	3.7×10 ⁻¹²
	TG070-SW	70	23.0	1.456	1.22	553	2.3×10 ⁻¹²
	TG100-SW	100	34.9	1.314	1.31	1125	5.0×10 ⁻¹³
MG	MG030-SW	30	13.8	1.731	0.95	33	7.3×10 ⁻⁸
	MG050-SW	50	16.3	1.653	1.20	165	4.9×10 ⁻¹⁰
	MG070-SW	70	20.5	1.509	1.27	304	2.9×10 ⁻¹¹
	MG100-SW	100	30.1	1.374	1.37	432	2.6×10 ⁻¹²
SK	SK030-SW	30	14.6	1.712	0.94	64	1.4×10 ⁻⁹
	SK050-SW	50	18.7	1.596	1.14	372	1.3×10 ⁻¹¹
	SK070-SW	70	24.4	1.440	1.20	743	1.9×10 ⁻¹²
	SK100-SW	100	35.4	1.291	1.29	1273	7.8×10 ⁻¹³
TM	TM030-SW	30	14.7	1.740	0.96	32	3.8×10 ⁻⁸
	TM050-SW	50	17.8	1.642	1.19	105	1.8×10 ⁻¹⁰
	TM070-SW	70	21.1	1.506	1.27	263	9.2×10 ⁻¹¹
	TM100-SW	100	29.3	1.393	1.39	951	4.5×10 ⁻¹²
IZ	IZ030-SW	30	14.9	1.705	0.93	18	3.8×10 ⁻⁸
	IZ050-SW	50	18.3	1.588	1.13	71	1.1×10 ⁻⁹
	IZ070-SW	70	22.2	1.451	1.21	90	1.1×10 ⁻¹⁰
	IZ100-SW	100	32.4	1.307	1.31	274	2.0×10 ⁻¹¹

(3) 流出水の水質および試験後供試体の抽出陽イオン量

イオン交換水および人工海水を用いた各試験について、流出水を採水するまでの通水量および流出水の水質をTable 4-10とTable 4-11にそれぞれ示す。イオン交換水を用いた場合、累積通水量を間隙体積で除したポアボリューム比として0.2~4.0の範囲であり、これの算術平均値としては0.8であった。多くの供試体では間隙水が1回置換する前に透水係数の測定を終え、流出水の分析を行っていたことになる。KVとTMのベントナイト混合率30%はそれぞれポアボリューム比で1.7と4.0であり、通水量が多かった。流出水のpHは7.1~8.7、電気伝導率は35~634 mS/mの範囲であった。電気伝導率に関しては、ベントナイト混合率が低いほど、電気伝導率は低くなる傾向が認められた。TGの電気伝導率は441~634 mS/mであり、全ベントナイトの中で最も高い水準であった一方、MGの電気伝導率は74~102 mS/mと最も低い水準であった。人工海水を用いた場合には、ポアボリューム比として0.5~2.6の範囲であり、これの算術平均値としては1.3であった。pHは7.0~7.9の範囲であり、イオン交換水の場合と比べて低い傾向が認められ

た。電気伝導率は1932～5200 mS/mの範囲であり、ベントナイトの種類による特徴や、通水量との系統的な関係性は認められなかった。

試験後の供試体の抽出陽イオン量およびその割合をFigure 4-23とTable 4-12に示す。各図において、初期試料の抽出陽イオン量をアルコール洗浄の有無でそれぞれ表示した。また、人工海水を用いてイオン交換処理を行った後の試料（以後、海水平衡ベントナイトと表記する）についても抽出陽イオン量を表示した。

KVでは、試験後には抽出Naイオン量が減り、抽出Mgイオン量と抽出Caイオン量が増加する傾向が認められた。そして、その傾向はわずかに流入面に近い供試体下部ほど顕著であった。ベントナイト混合率が低いほど、上述した傾向は明瞭に表れた。海水平衡ベントナイトでは、これよりさらに抽出Naイオン量は少なく、抽出Mgイオン量が大きかった。抽出Mgイオン量の増分としては、KVよりTGとSKのほうが大きかった。

MGについては、ベントナイト混合率30%のケースを除いて、試験後の抽出陽イオン量に変化は認められなかった。ベントナイト混合率30%に関しては、抽出Naイオン量が増し、抽出Caイオン量が減少していた。人工海水ベントナイトでは、これよりさらに抽出Naイオン量が多く、抽出Caイオン量が少なかった。TMについては、初期試料に抽出Naイオンが少なかったこともあり、MGよりも試験後の抽出Naイオン量の割合は増加しやすく、特にベントナイト混合率30%で顕著であった。IZについても、試験後は、抽出Naイオン量および抽出Mgイオン量が増加する傾向が認められ、特に、供試体の下部と中部にて顕著であった。

初期試料のうち、アルコール洗浄の有無による比較もFigure 4-23に示しており、洗浄後はわずかに総量の減少や組成の変化が見られた。これは、洗浄により可溶性塩などが減少したことが原因として考えられる。

以上より、初期試料としてNa型であった試料については、NaとMgのイオン交換が主に進行し、次第に海水平衡ベントナイトの交換性陽イオン組成に近づくものと考えられる。初期試料としてCa型であった試料については、初期状態によって挙動は異なるが、TMのように交換性陽イオンが主にCaイオンであれば、NaとMgがCaとイオン交換し、海水平衡の状態に近づくものと考えられる。MGは、初期の交換性Mgイオン量が海水平衡の状態と近いことから、交換性Mgイオン量の割合としてはあまり変わらず、NaとCaのイオン交換が進むものと考えられる。IZは、初期試料としてはCa型に分類していたが、交換性Naイオン量の割合は海水平衡の状態に近く、これによりNaとCaのイオン交換と同時に、MgとCaのイオン交換も比較的進みやすいと考えられる。

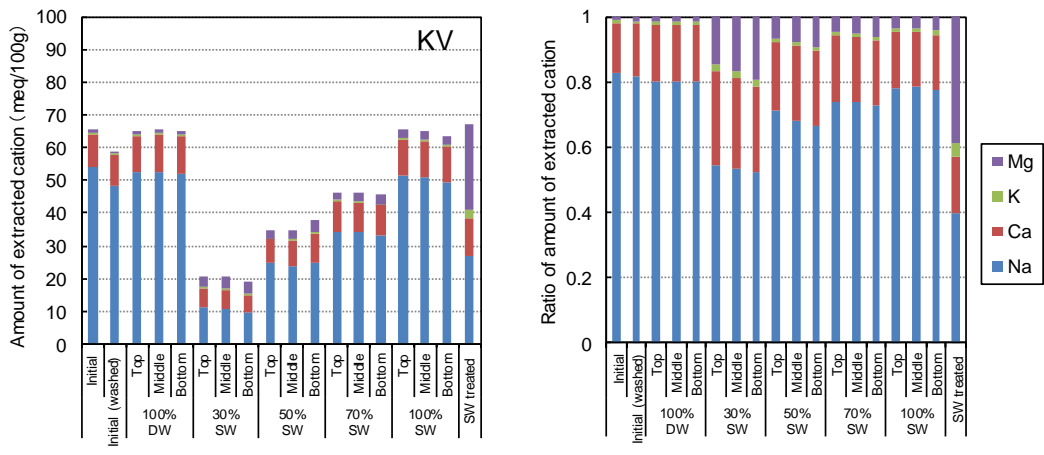
Table 4-10 Pore volume ratio and ion concentration of the effluent solution (DW)

Bentonite	Mixing ratio of bentonite (%)	Pore volume ratio of effluent solution	Ion concentration of effluent solution (mmol/L)				pH	Electric conductivity (mS/m)
			Na	Ca	K	Mg		
KV	30	1.7	20.77	0.03	0.06	N.D.	8.6	190
	50	0.9	34.90	N.D.	0.08	N.D.	8.6	283
	70	0.5	51.27	0.13	0.10	N.D.	8.6	311
	100	0.5	51.26	0.17	0.11	0.05	8.9	431
TG	30	0.2	56.44	0.40	0.46	0.11	8.2	441
	50	0.2	83.38	0.76	0.67	0.21	8.3	589
	70	0.2	83.08	1.08	0.65	0.25	8.2	625
	100	0.5	89.28	1.08	0.72	0.28	8.2	634
SK	30	0.6	22.58	0.13	0.33	0.06	8.3	198
	50	1.0	19.49	N.D.	0.24	N.D.	8.6	142
	70	0.5	26.89	0.14	0.35	0.06	7.9	246
	100	0.8	22.04	0.19	0.29	0.06	8.3	220
MG	30	0.9	7.31	0.23	0.25	0.19	8.2	74
	50	0.3	9.86	0.28	0.30	0.28	8.6	98
	70	0.2	10.08	0.37	0.32	0.31	8.7	102
	100	0.8	10.70	0.33	0.27	0.25	8.4	80
TM	30	4.0	0.84	1.23	0.09	0.15	8.2	35
	50	0.9	2.31	10.65	0.23	1.16	7.8	171
	70	0.6	2.74	14.27	0.26	1.66	6.9	237
	100	0.4	2.65	13.53	0.23	1.51	7.1	238
IZ	30	0.6	16.72	0.89	0.16	0.12	7.8	165
	50	0.7	18.44	1.01	0.15	0.14	7.7	184
	70	0.6	23.70	1.76	0.21	0.22	7.9	241
	100	1.2	12.12	0.54	0.09	0.06	8.4	129

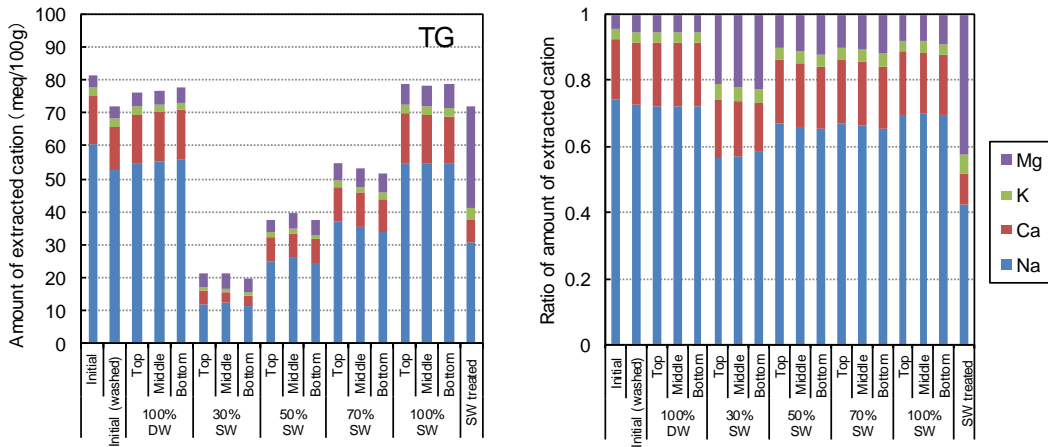
*Cases less than detection limit is listed as N.D.

Table 4-11 Pore volume ratio and ion concentration of the effluent solution (SW)

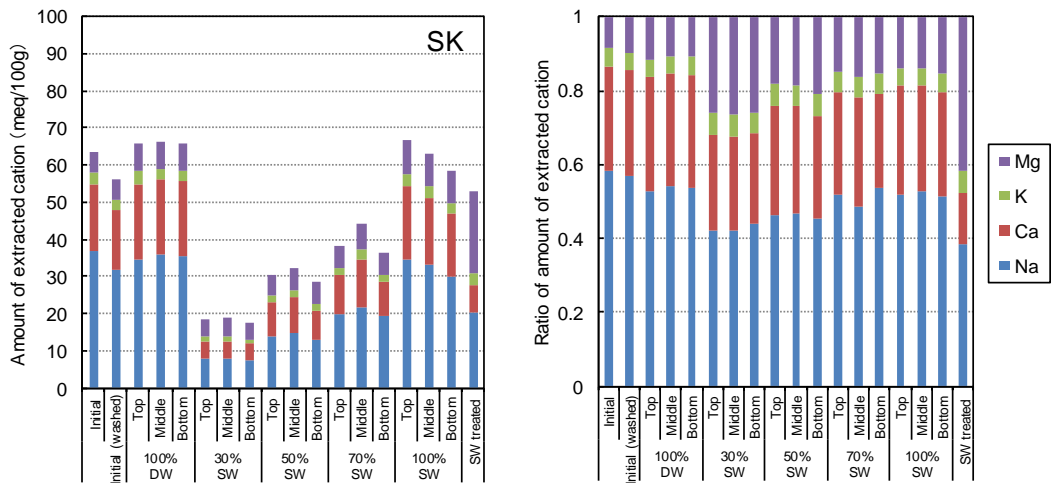
Bentonite	Mixing ratio of bentonite (%)	Pore volume ratio of effluent solution	Ion concentration of effluent solution (mmol/L)				pH	Electric conductivity (mS/m)
			Na	Ca	K	Mg		
KV	30	2.6	482.22	10.50	2.19	19.32	7.6	4800
	50	0.8	580.35	9.29	1.76	11.00	7.9	5210
	70	0.5	564.20	8.58	1.71	7.55	7.7	5010
	100	0.4	547.04	9.22	2.01	6.00	7.9	4910
TG	30	2.2	471.53	21.41	5.15	20.81	7.1	4440
	50	0.4	434.32	18.19	4.62	9.42	7.6	4340
	70	1.4	526.50	24.02	4.93	11.60	7.7	4980
	100	0.3	503.33	29.34	4.80	10.45	7.6	4850
SK	30	1.9	403.74	21.68	6.55	26.21	7.5	4490
	50	0.5	428.89	31.63	7.24	22.76	7.5	4730
	70	0.4	383.25	22.49	5.52	14.95	7.5	4110
	100	0.3	407.36	24.80	6.44	16.43	7.5	4430
MG	30	2.0	329.36	38.44	6.09	51.58	7.5	4470
	50	1.1	324.36	35.55	6.17	58.55	7.8	4470
	70	0.6	247.00	50.38	5.37	58.37	7.6	4060
	100	0.4	205.30	49.54	5.02	55.81	7.5	3620
TM	30	2.1	255.78	87.85	1.94	30.30	7.0	4260
	50	0.5	138.55	121.17	1.47	28.26	7.4	3890
	70	0.5	136.76	141.29	1.52	29.48	7.3	3990
	100	0.5	81.96	167.87	1.31	27.99	7.3	3880
IZ	30	2.1	295.69	59.58	2.19	31.29	7.1	4250
	50	1.2	272.27	86.56	2.18	27.62	7.3	4170
	70	0.6	231.22	45.42	1.92	20.34	7.5	3910
	100	1.2	245.95	122.57	1.99	19.79	7.4	3950



(a) KV

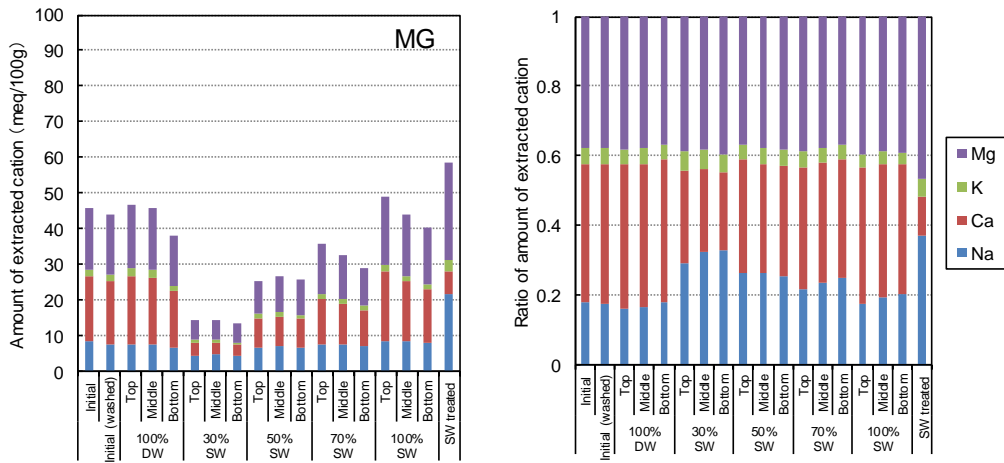


(b) TG

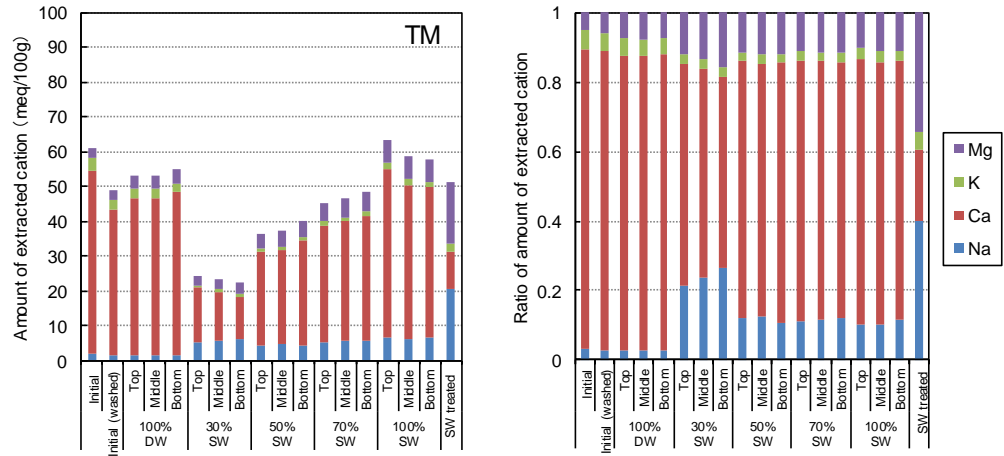


(c) SK

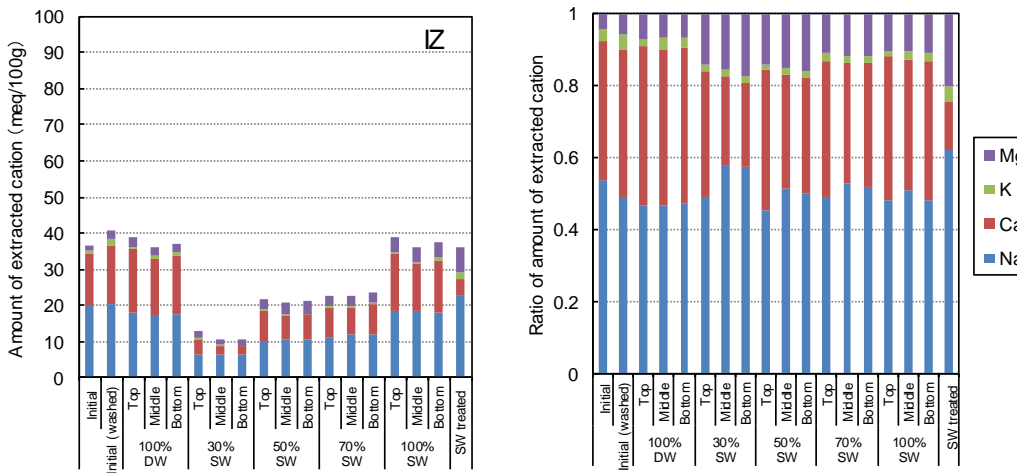
Figure 4-23 Extracted cations of samples before and after swelling pressure-permeability tests (1/2)



(d) MG



(e) TM



(f) IZ

Figure 4-23 Extracted cations of samples before and after swelling pressure-permeability tests (2/2)

Table 4-12 Amount of leachable cation before and after permeability-swelling pressure tests (1/3)

Test case*	Mixture ratio of bentonite (%)	Location of specimen**	Leachable cation (meq/100g)				
			Na	Ca	K	Mg	Total
Initial	100	Powder	54.3	10.0	0.5	0.6	65.4
Initial (washed)	100	Powder	48.1	9.5	0.5	0.7	58.8
KV100-DW	100	Top	52.5	11.2	0.6	1.0	65.3
		Middle	52.7	11.3	0.6	1.0	65.6
		Bottom	52.0	11.3	0.6	1.1	65.0
		Top	11.2	5.9	0.4	3.0	20.5
KV030-SW	30	Middle	10.9	5.6	0.5	3.4	20.4
		Bottom	9.9	4.9	0.4	3.6	18.8
KV050-SW	50	Top	24.7	7.2	0.4	2.3	34.6
		Middle	23.9	7.9	0.5	2.7	35.0
KV050-SW	50	Bottom	25.1	8.7	0.5	3.4	37.7
		Top	34.2	9.6	0.4	2.1	46.3
KV070-SW	70	Middle	34.0	9.2	0.5	2.4	46.1
		Bottom	33.2	9.1	0.5	2.8	45.6
KV100-SW	100	Top	51.4	11.1	0.8	2.3	65.6
		Middle	51.1	10.8	0.8	2.4	65.1
KV100-SW	100	Bottom	49.4	10.7	0.8	2.7	63.6
		SW treated	100	Powder	26.9	11.3	3.0
Initial	100	Powder	60.4	14.9	2.6	3.4	81.3
Initial (washed)	100	Powder	52.4	13.5	2.3	3.8	72.0
TG100-DW	100	Top	54.8	14.8	2.3	4.3	76.2
		Middle	55.4	14.9	2.3	4.4	77.0
TG100-DW	100	Bottom	55.8	15.1	2.3	4.4	77.6
		Top	12.1	3.8	1.0	4.5	21.4
TG030-SW	30	Middle	12.2	3.5	0.9	4.7	21.3
		Bottom	11.6	2.9	0.8	4.5	19.8
TG050-SW	50	Top	25.1	7.2	1.5	3.8	37.6
		Middle	26.0	7.5	1.6	4.3	39.4
TG050-SW	50	Bottom	24.5	7.0	1.5	4.5	37.5
		Top	36.8	10.6	2.1	5.5	55.0
TG070-SW	70	Middle	35.5	10.1	2.1	5.7	53.4
		Bottom	33.9	9.8	2.0	6.1	51.8
TG100-SW	100	Top	54.8	15.3	2.6	6.3	79.0
		Middle	54.9	14.5	2.6	6.4	78.4
TG100-SW	100	Bottom	54.7	14.3	2.6	7.1	78.7
		SW treated	100	Powder	30.6	6.6	4.0

* "Initial (washed)" sample was the raw bentonite that fully washed using alcohol solution. "SW treated" sample was the bentonite that the ion exchange fully proceeded using artificial seawater.

** "Powder" indicates the sample was not a part of compacted bentonite-sand mixture, but the powder bentonite was used.

Table 4-12 Amount of leachable cation before and after permeability-swelling pressure tests (2/3)

Test case*	Mixture ratio of bentonite (%)	Location of specimen**	Leachable cation (meq/100g)				
			Na	Ca	K	Mg	Total
Initial	100	Powder	37.0	18.0	3.1	5.3	63.4
Initial (washed)	100	Powder	31.9	16.1	2.7	5.5	56.2
SK100-DW	100	Top	34.6	20.4	3.3	7.5	65.8
		Middle	35.9	20.1	3.1	7.2	66.3
		Bottom	35.5	20.0	3.1	7.2	65.8
		Top	7.8	4.8	1.2	4.8	18.6
SK030-SW	30	Middle	7.9	4.7	1.1	4.9	18.6
		Bottom	7.7	4.3	1.0	4.5	17.5
SK050-SW	50	Top	14.0	9.0	1.8	5.5	30.3
		Middle	15.0	9.4	1.8	6.0	32.2
SK070-SW	70	Bottom	12.9	7.9	1.7	5.9	28.4
		Top	19.8	10.5	2.1	5.7	38.1
SK100-SW	100	Middle	21.5	13.2	2.5	7.1	44.3
		Bottom	19.5	9.2	2.0	5.6	36.3
SK100-SW	100	Top	34.5	19.7	3.2	9.2	66.6
		Middle	33.3	17.8	3.1	8.7	62.9
SK100-SW	100	Bottom	30.2	16.6	2.9	9.0	58.7
		Powder	20.3	7.4	3.3	22.0	53.0
SW treated	100	Powder	20.3	7.4	3.3	22.0	53.0
Initial	100	Powder	8.3	18.2	2.1	17.2	45.8
Initial (washed)	100	Powder	7.7	17.6	2.1	16.5	43.9
MG100-DW	100	Top	7.5	19.4	2.0	17.8	46.7
		Middle	7.6	18.8	2.0	17.4	45.8
MG100-DW	100	Bottom	6.9	15.6	1.6	13.9	38.0
		Top	4.3	3.9	0.8	5.6	14.6
MG030-SW	30	Middle	4.7	3.4	0.8	5.5	14.4
		Bottom	4.4	3.0	0.7	5.3	13.4
MG050-SW	50	Top	6.7	8.3	1.1	9.3	25.4
		Middle	7.0	8.4	1.3	10.1	26.8
MG050-SW	50	Bottom	6.6	8.2	1.2	9.8	25.8
		Top	7.7	12.5	1.6	13.8	35.6
MG070-SW	70	Middle	7.6	11.3	1.4	12.4	32.7
		Bottom	7.3	9.9	1.2	10.8	29.2
MG100-SW	100	Top	8.7	19.2	1.9	19.3	49.1
		Middle	8.5	16.6	1.7	17.0	43.8
MG100-SW	100	Bottom	8.2	15.1	1.4	15.7	40.4
		Powder	21.7	6.4	3.1	27.3	58.5
SW treated	100	Powder	21.7	6.4	3.1	27.3	58.5

* "Initial (washed)" sample was the raw bentonite that fully washed using alcohol solution. "SW treated" sample was the bentonite that the ion exchange fully proceeded using artificial seawater.

** "Powder" indicates the sample was not a part of compacted bentonite-sand mixture, but the powder bentonite was used.

Table 4-12 Amount of leachable cation before and after permeability-swelling pressure tests (3/3)

Test case*	Mixture ratio of bentonite (%)	Location of specimen**	Leachable cation (meq/100g)					
			Na	Ca	K	Mg	Total	
TM	Initial	Powder	1.9	52.7	3.5	2.9	61.0	
	Initial (washed)	Powder	1.3	42.1	2.6	2.8	48.8	
	TM100-DW	100	Top	1.5	45.2	2.7	3.8	53.2
			Middle	1.6	45.2	2.5	4.0	53.3
			Bottom	1.6	46.6	2.5	4.1	54.8
	TM030-SW	30	Top	5.2	15.6	0.7	2.9	24.4
			Middle	5.6	14.1	0.7	3.1	23.5
			Bottom	5.9	12.3	0.7	3.5	22.4
	TM050-SW	50	Top	4.3	27.0	0.9	4.2	36.4
			Middle	4.7	27.2	0.9	4.5	37.3
			Bottom	4.3	30.0	0.9	4.9	40.1
	TM070-SW	70	Top	5.0	33.6	1.4	4.9	44.9
			Middle	5.4	34.4	1.2	5.2	46.2
			Bottom	5.7	35.8	1.2	5.6	48.3
	TM100-SW	100	Top	6.4	48.4	2.3	6.3	63.4
			Middle	6.1	44.2	1.9	6.4	58.6
			Bottom	6.6	43.2	1.7	6.2	57.7
	SW treated	100	Powder	20.5	10.6	2.5	17.7	51.3
	IZ	Initial	Powder	19.7	14.3	1.1	1.7	36.8
		Initial (washed)	Powder	20.0	16.7	1.7	2.4	40.8
IZ100-DW		100	Top	18.2	17.3	0.7	2.7	38.9
			Middle	16.9	15.8	1.1	2.4	36.2
			Bottom	17.4	16.1	1.0	2.5	37.0
IZ030-SW		30	Top	6.3	4.4	0.3	1.8	12.8
			Middle	6.1	2.6	0.2	1.6	10.5
			Bottom	6.2	2.5	0.2	1.8	10.7
IZ050-SW		50	Top	9.9	8.5	0.4	3.0	21.8
			Middle	10.7	6.5	0.4	3.1	20.7
			Bottom	10.5	6.7	0.4	3.4	21.0
IZ070-SW		70	Top	11.1	8.5	0.5	2.5	22.6
			Middle	11.9	7.6	0.4	2.6	22.5
			Bottom	12.1	8.1	0.4	2.8	23.4
IZ100-SW		100	Top	18.6	15.5	0.5	4.1	38.7
			Middle	18.2	13.1	0.8	3.8	35.9
			Bottom	18.1	14.5	0.8	4.2	37.6
SW treated		100	Powder	22.4	5.0	1.5	7.3	36.2

* “Initial (washed)” sample was the raw bentonite that fully washed using alcohol solution. “SW treated” sample was the bentonite that the ion exchange fully proceeded using artificial seawater.

** “Powder” indicates the sample was not a part of compacted bentonite-sand mixture, but the powder bentonite was used.

4.3.4 既往試験結果との比較検証

(1) 膨潤圧

本研究ならびに既往の研究（鈴木ほか，1992；鈴木・藤田，1999；杉田ほか，1999；菊池・棚井，2005）で得られたイオン交換水の条件における平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係をFigure 4-24に示す。既往の研究で得られた平衡膨潤圧については，Na型ベントナイト（KV，モンモリロナイト含有率50～55%）を用いた試験結果である。有効粘土密度の増加に伴い平衡膨潤圧が増加する傾向は，既往の研究でも認められている。ロットは異なるが同じ製品のベントナイト（KV）で比較すると，同一の有効粘土密度において，本研究で得られた平衡膨潤圧は，文献値より高めの値であった。田中（2011）およびTanaka and Watanabe (2019)は，試験装置の変形性により同一密度であっても平衡膨潤圧が異なることを示している。これによると装置の変形性が小さいほど，すなわち，供試体の拘束が強いほど，同一密度であっても平衡膨潤圧は高くなる傾向にある。本研究では，荷重計を試験容器に内蔵し，供試体の上側に位置する上蓋をボルトで固定し，ステンレス製で十分な耐圧性を確保した装置を使用した。これは，田中（2011）に示される変形性が極めて小さい試験装置とほぼ同等である。一方，既往の研究では荷重計を反力枠に固定した試験装置（圧密試験類似法）を使用しており，田中（2011）によれば試験装置の変形性は比較的高い。これより，仮に同一のベントナイトを使用した場合にも，本研究による平衡膨潤圧が高めに測定されることは合理的な結果と考えられる。人工海水を用いた場合についても同様に既往の研究（鈴木・藤田，1999）との比較をFigure 4-25に示す。人工海水を用いた時の平衡膨潤圧は，同じベントナイト（KV）で比較すると，既往の研究で得られた値とほぼ一致していた。

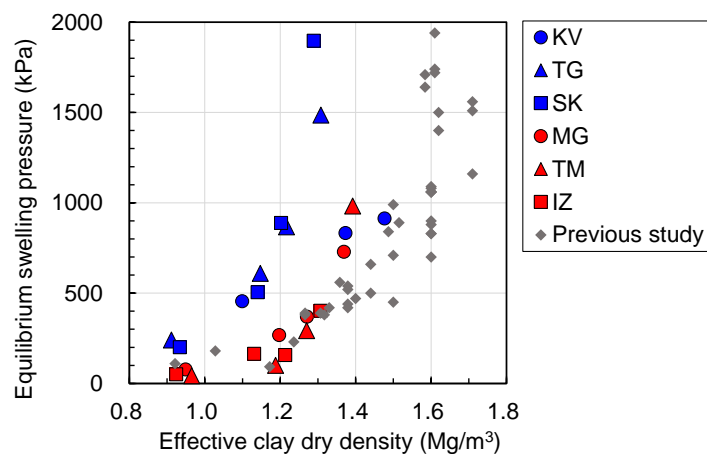


Figure 4-24 Comparison of equilibrium swelling pressure between present study and previous study of KV (DW)

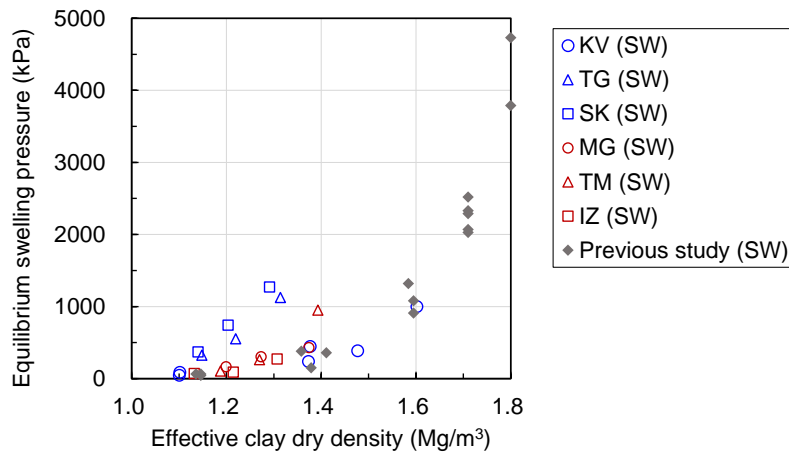


Figure 4-25 Comparison of equilibrium swelling pressure between present study and previous study of KV (SW)

(2) 透水係数

本研究ならびに既往の研究（鈴木ほか，1992；松本ほか，1997；Cho et al., 2000）で得られたイオン交換水における透水係数と有効粘土密度の関係をFigure 4-26に示す。既往の研究で得られた透水係数については，Na型ベントナイト (KV) およびCa型ベントナイト (Kyungju bentonite) のデータを示した。モンモリロナイト含有率については，鈴木ほか（1992）では50～55%，松本ほか（1997）では46～49%とされている。有効粘土密度の増加に伴い透水係数が小さくなる傾向は既往の研究でも認められている。文献値では，同一密度において約1オーダーの透水係数のばらつきがあるようであった。同じベントナイト (KV) で比べると，本研究で得られた値は，前述したばらつきの下限側にあることが分かった。同一密度で比較した時に，主に低密度の範囲において，Na型ベントナイトよりCa型ベントナイトのほうが透水係数は大きくなる点も，既往の研究において認められている。本研究で得られたデータの傾向もまたこれと調和的であった。また，高密度になるほど，イオン型によらず概ね同等の透水係数に収束する傾向が見られた。なお，Table 2-2に示したように交換性陽イオンの組成はベントナイトの種類によってさまざまであるが，ここでは単純にNa型/Ca型の区別で比較している点には注意されたい。

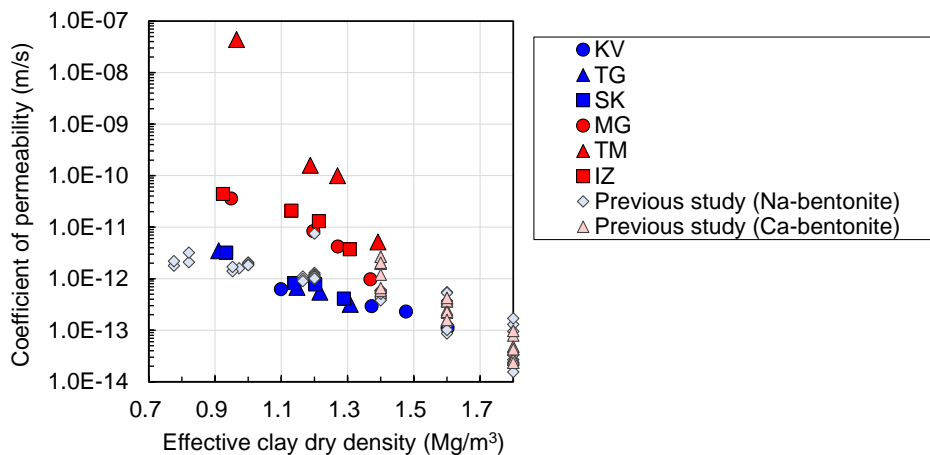


Figure 4-26 Comparison of permeability between present study and previous study (DW)

4.4 膨潤変形試験

4.4.1 試験ケース

締め固めたベントナイトの膨潤変形は、緩衝材の設計において自己シール性を検討するうえで重要な特性である。そこで、6種類のベントナイトを対象に、膨潤変形試験を実施した。また、膨潤後の供試体の透水性についても把握するため、膨潤変形後の供試体に対して透水試験も行った。試験ケースの一覧は Table 4-13 のとおりである。6種類のベントナイトについてそれぞれ4通りのベントナイト混合率（30%、50%、70%、100%）とし、試験用水にはイオン交換水（DW）と人工海水（SW）を用いた。

Table 4-13 Program of swelling deformation test (1/2)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Initial condition of test specimen			
			Water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	
KV	KV100	100	DW	21.0	1.601	1.60
	KV070	70	DW	15.2	1.714	1.49
	KV050	50	DW	12.3	1.814	1.38
	KV030	30	DW	11.6	1.857	1.09
	KV100	100	SW	21.4	1.608	1.61
	KV070	70	SW	15.1	1.708	1.48
	KV050	50	SW	11.8	1.808	1.37
	KV030	30	SW	11.8	1.855	1.09
TG	TG100	100	DW	34.0	1.311	1.31
	TG 070	70	DW	22.8	1.464	1.23
	TG050	50	DW	19.6	1.616	1.16
	TG030	30	DW	14.3	1.695	0.92
	TG100	100	SW	34.6	1.319	1.32
	TG 070	70	SW	23.3	1.457	1.22
	TG050	50	SW	18.7	1.612	1.16
	TG030	30	SW	14.4	1.707	0.93
SK	SK100	100	DW	35.6	1.284	1.28
	SK070	70	DW	24.1	1.440	1.20
	SK050	50	DW	19.2	1.593	1.14
	SK030	30	DW	15.1	1.724	0.95
	SK100	100	SW	29.9	1.292	1.29
	SK070	70	SW	20.8	1.439	1.20
	SK050	50	SW	16.3	1.593	1.14
	SK030	30	SW	13.6	1.728	0.95

Table 4-13 Program of swelling deformation test (2/2)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Initial condition of test specimen			
			Water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	
MG	MG100	100	DW	30.2	1.366	1.37
	MG070	70	DW	21.2	1.508	1.27
	MG050	50	DW	15.8	1.658	1.21
	MG030	30	DW	13.5	1.727	0.95
	MG100	100	SW	35.4	1.374	1.37
	MG070	70	SW	23.8	1.510	1.27
	MG050	50	SW	18.9	1.654	1.20
	MG030	30	SW	14.9	1.727	0.95
TM	TM100	100	DW	28.7	1.384	1.38
	TM070	70	DW	21.0	1.499	1.26
	TM050	50	DW	17.8	1.660	1.21
	TM030	30	DW	14.9	1.741	0.96
	TM100	100	SW	29.1	1.388	1.39
	TM070	70	SW	21.0	1.502	1.27
	TM050	50	SW	17.7	1.633	1.18
	TM030	30	SW	14.8	1.746	0.97
IZ	IZ100	100	DW	31.6	1.295	1.30
	IZ070	70	DW	22.3	1.448	1.21
	IZ050	50	DW	18.3	1.590	1.13
	IZ030	30	DW	14.9	1.700	0.92
	IZ100	100	SW	32.4	1.293	1.29
	IZ070	70	SW	22.5	1.443	1.21
	IZ050	50	SW	18.5	1.576	1.12
	IZ030	30	SW	15.0	1.689	0.91

4.4.2 試験方法

(1) 試験装置の構成

膨潤変形試験装置の外観をFigure 4-27, Figure 4-28に示す。膨潤変形試験では、一定の上載圧を供試体に作用させた状態で給水し、供試体の鉛直変位量を測定する。本研究で用いた膨潤変形試験装置は、供試体を収容する試験セル、上載圧を与えるための重錘、給水のための二重管ビュレット、脱気水槽、空気圧載荷設備、データロガーにより構成される。人工海水を使用するため、試験セルはステンレス製とした。配管にはテフロン製チューブを使用し、変位計測に影響しないようにした。試験セルの概略図をFigure 4-29に示す。供試体リングは、内径60 mm、厚さ10 mmとした。供試体の上下部には孔径10 μ mのポーラスメタルを設置した。供試体上部に位置するピストンは、鉛直方向に可動域を有し、ボールベアリングにより摩擦を低減した。上載圧は後述するとおり19.6 kPaであり、空気圧では圧力変動が生じることが予想されたため、

重錘により一定荷重を与えることとした（5.2節参照）。

本研究で使用した膨潤変形試験装置は、膨潤変形後に変位固定し、透水試験を行うことが可能である。透水操作を行う際には、供試体上部のピストンは試験セル本体に固定できるようにした。空気圧荷重装置は透水試験用であり、ビュレットに圧力を作用させるほか、ピストン内のラインに水圧を作用させることで、ピストン下側にあるOリングを試験セル側に張り出し、透水試験の間はその箇所を止水できるようにした。



Figure 4-27 Whole view of apparatus for swelling deformation test equipped a measurement system of permeability



Figure 4-28 Swelling deformation test apparatus

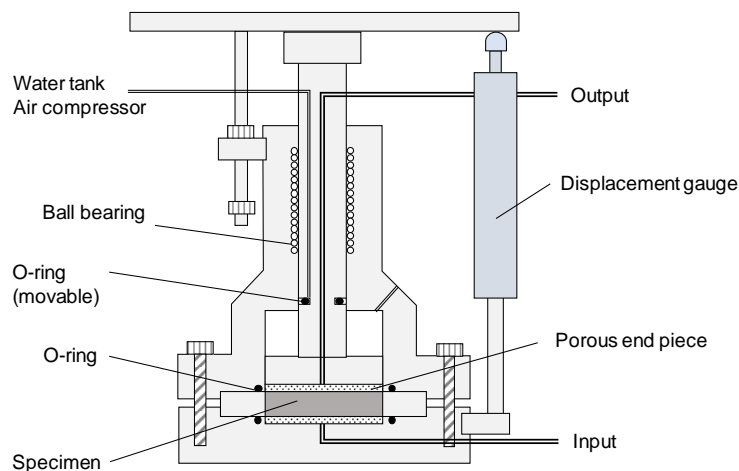


Figure 4-29 Schematic diagram of swelling deformation test apparatus equipped a measurement system of permeability

(2) 試験の手順

膨潤変形試験の手順をFigure 4-30に示す。供試体の作製および試験セルへの設置については以下のとおりである。含水比調整した試料を用い、1層の静的締固めにより、内径59.5 mmのモールドに供試体を圧縮成型した。供試体側面の摩擦を軽減するため、モールド内の供試体を試験用の供試体リングに移し替えた。移し替えた後の供試体の高さを測定した。供試体の上下に

高分子フィルター（セルガード）を設置し、試験セルを組み上げ、変位計を設置した。施工時に生じる隙間に対する自己シールでは、拘束圧がほとんど作用していない状態での膨潤変形になると予想し、上載圧は出来る限り小さい値とするため、19.6 kPaとした。上載圧を作用させてから給水せずに、供試体の圧縮変形が収まるまで待ち、この間の変位量を用いて供試体の高さを補正し、初期高さ（ H_0 ）とした。この値を用いて初期乾燥密度を計算した。

給水から膨潤変形量測定までの手順は以下のとおりである。供試体下部からイオン交換水または人工海水を給水した。給水時の水頭は、供試体上面より数cmだけ高くなるように設定した。給水を開始してから約14日間、給水を止めずに膨潤変形を観察した。膨潤変形は、既往の研究では、約1ヵ月経過しても膨潤変形は収束しない例（渡邊・田中，2015）もある。そこで、小峯・緒方（2002）を参考に、膨潤率と経過時間の関係を双曲線近似し、これの極限值を求めることで最大膨潤率とした。

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100 \quad (\text{式4-10})$$

$$\varepsilon_s = \frac{t}{a + bt} \quad (\text{式4-11})$$

$$\varepsilon_{s\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_s(t) = \frac{1}{b} \quad (\text{式4-12})$$

ここで、 ε_s は膨潤率（%）、 $\varepsilon_{s\max}$ は最大膨潤率（%）、 ΔS は一次元膨潤変形量（mm）、 t は経過時間（min）、 a と b は近似により定められる定数である。本研究では、約14日間の試験により、双曲線近似に十分なデータ数が得られることを近似パラメータ（ a と b ）の変化から確認した（5.2節参照）。参考事例としては、小峯・緒方（2002）は、クニゲルV1のベントナイト混合率60～100%、初期乾燥密度1.19～2.27 Mg/m³、供試体高さ5 mm、最大膨潤圧以下の上載圧で膨潤変形試験を行っており、試験期間は7日間で、いずれの供試体も試験後の飽和度は98～124%の範囲であったことを報告している。本研究においては、膨潤変形試験を行った後に、以下に記すとおり透水試験を行うため、即時に供試体を解体し、含水比から飽和度を求めることはできない。そのため、飽和に時間を要すると考えられる一部の試験条件（例えばNa型かつベントナイト混合率100%）については、同一の仕様にて供試体を作製し、約14日間の吸水による供試体の含水比ならびに飽和度を測定し、飽和度が十分に高まっていることを事前に確認した。

膨潤変形試験の後、鉛直変位を固定し、 ε_s だけ膨潤変形した後の供試体の透水係数を測定した。膨潤変形後の透水係数の測定のためには、供試体上部ピストンと容器の間の空間、ならびに、排水ラインに空気が残らないように溶液で充填する必要がある。流出水だけでこれらの空間を満たすには長時間を要し、その間に供試体の状態が変化することが懸念されたため、膨潤変形後に変位固定したうえで、イオン交換水または人工海水を流出側より注入することで空気を排除した。膨潤透水圧試験で得られた平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係を参考に、密度低下した場合を想定して、想定される平衡膨潤圧を超えない範囲の透水圧となるように動水勾配を設定した。透水係数の算出方法は、透水・膨潤圧試験と同じである。

試験装置の解体以降の手順は次のとおりである。供試体リングから供試体を抜き出し、側面から写真撮影を行った。その後、供試体を高さ方向に三分割して、1/2～1/3角を用いて含水比

を測定した。含水比の測定において、人工海水を用いた場合には、炉乾燥時に塩が析出し、これが固相質量として測定される。そのため、試験容器内（供試体上部）に溜まった溶液の蒸発残留物の質量割合を用いて、4.1.5節に記載の方法で含水比を補正した。

人工海水を使用した試験については、イオン交換が進行していると考えられるため、アルコール洗浄後に抽出陽イオン量の測定を行った。抽出陽イオン量の測定は、3.1.3項に記載した方法により行った。なお、透水試験のために溶液を流出側から供給する操作を行ったことにより、流出水の水質は不確かな状況となるため、膨潤変形後の透水試験においては、流出水の水質分析は行わなかった。

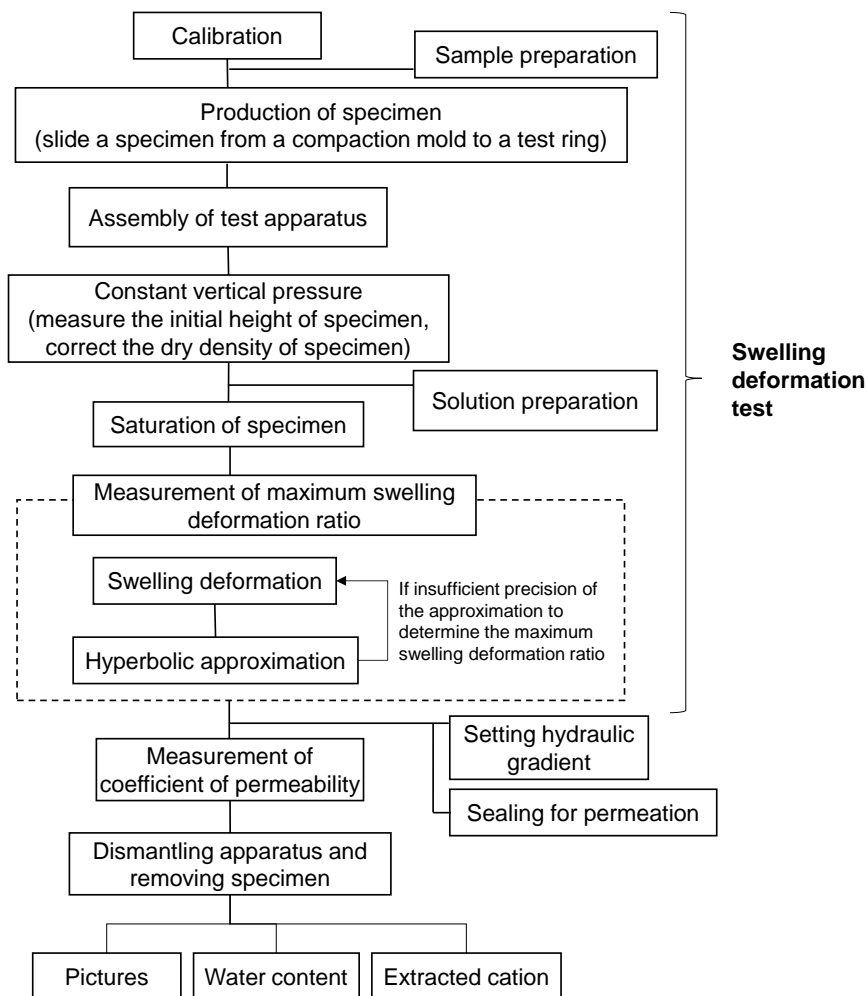


Figure 4-30 Experimental procedure of swelling deformation and permeability test

4.4.3 試験結果

はじめに、イオン交換水を用いた場合の試験結果について述べる。Table 4-14に試験結果の一覧を示す。また、膨潤変形試験終了間際に外部変位計で測った鉛直変位量から求めた膨潤率と、双曲線近似により求めた最大膨潤率の比較をFigure 4-31に示す。Ca型ベントナイト (MG, TM, IZ) やベントナイト混合率の低いNa型ベントナイト (KV, TG, SK) のように、最大膨潤率が小さい範囲においては、鉛直変位量から求めた膨潤率と双曲線近似により求めた最大膨潤率はほぼ等しい結果となった。一方、最大膨潤率が高くなる供試体については、例えばKVのベントナイト混合率50~100%のように、鉛直変位量から求めた膨潤率より、双曲線近似により求めた最大膨潤率のほうが高い結果となった。これは、膨潤変形が収束する前に鉛直変位量の計測を止めたためである。以後、双曲線近似により求めた最大膨潤率を統一して用いることとする。

Table 4-14 Swelling deformation test results (DW)

Test case	Mixture ratio of bentonite (%)	Vertical pressure (kPa)	Water content at compaction (%)	Initial dry density (Mg/m ³)	Initial effective clay dry density (Mg/m ³)	Average dry density after swelling deformation (Mg/m ³)	Maximum swelling rate* (%)	Hydraulic conductivity after swelling deformation** (m/s)
KV	KV030-DW	30	19.6	11.6	1.857	1.09	1.275	4.9×10 ⁻¹²
	KV050-DW	50	19.6	12.3	1.814	1.38	0.971	1.0×10 ⁻¹¹
	KV070-DW	70	19.6	15.2	1.714	1.49	0.805	6.7×10 ⁻¹²
	KV100-DW	100	19.6	21.0	1.601	1.60	0.621	1.0×10 ⁻¹¹
TG	TG030-DW	30	19.6	14.3	1.695	0.92	1.414	9.9×10 ⁻¹²
	TG050-DW	50	19.6	19.6	1.616	1.16	1.171	6.1×10 ⁻¹²
	TG070-DW	70	19.6	22.8	1.464	1.23	0.998	5.1×10 ⁻¹²
	TG100-DW	100	19.6	34.0	1.311	1.31	0.786	4.9×10 ⁻¹²
MG	MG030-DW	30	19.6	13.5	1.727	0.95	1.717	2.2×10 ⁻¹⁰
	MG050-DW	50	19.6	15.8	1.658	1.20	1.539	3.0×10 ⁻¹¹
	MG070-DW	70	19.6	21.2	1.508	1.27	1.339	3.2×10 ⁻¹¹
	MG100-DW	100	19.6	30.2	1.366	1.37	1.176	9.8×10 ⁻¹²
SK	SK030-DW	30	19.6	15.1	1.724	0.95	1.510	1.8×10 ⁻¹¹
	SK050-DW	50	19.6	19.2	1.593	1.14	1.198	8.6×10 ⁻¹²
	SK070-DW	70	19.6	24.1	1.440	1.20	1.013	7.5×10 ⁻¹²
	SK100-DW	100	19.6	35.6	1.284	1.28	0.810	7.9×10 ⁻¹²
TM	TM030-DW	30	19.6	14.9	1.741	0.96	1.741	8.9×10 ⁻⁹
	TM050-DW	50	19.6	17.8	1.660	1.21	1.585	3.2×10 ⁻⁹
	TM070-DW	70	19.6	21.0	1.499	1.26	1.365	9.1
	TM100-DW	100	19.6	28.7	1.384	1.38	1.201	15.8
IZ	IZ030-DW	30	19.6	14.9	1.700	0.92	1.692	0.5
	IZ050-DW	50	19.6	18.3	1.590	1.13	1.547	2.6
	IZ070-DW	70	19.6	22.3	1.448	1.21	1.353	7.2
	IZ100-DW	100	19.6	31.6	1.295	1.30	1.170	10.5

* Maximum swelling rate was the limit value of hyperbolic approximation of the relationship between the swelling rate and elapsed time.

** Hydraulic conductivity after swelling deformation was measured for the specimen having the average dry density after swelling deformation.

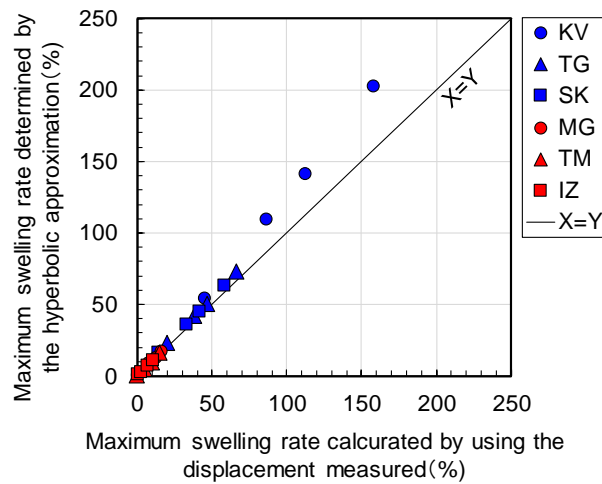


Figure 4-31 Comparison of maximum swelling rate between hyperbolic approximation and displacement measured (DW)

最大膨潤率と有効粘土密度の関係をFigure 4-32に示す。有効粘土密度の増加に伴い、最大膨潤率は増加する傾向が認められた。ベントナイトのイオン型に着目すると、Ca型ベントナイトよりNa型ベントナイトのほうが最大膨潤率は高い傾向にあった。Na型およびCa型ベントナイトの各3種類では、有効粘土密度に対する最大膨潤率に明瞭な差異は認められなかった。4.3節において、KVと比べてTGやSKの平衡膨潤圧は高めであることを示したが、その順列は最大膨潤率においては同一ではなかった。

Figure 4-33は、膨潤変形後の透水係数を4.3節の透水試験の結果と併せて表示したものである。すべてのベントナイトについて、4.3節の透水試験と同様に、有効粘土密度が増加するほど、透水係数は小さくなる傾向が認められた。そして、膨潤変形後の透水係数は、4.3節の透水試験で得られた透水係数と有効粘土密度の関係を内挿または外挿した位置におおよそプロットされた。

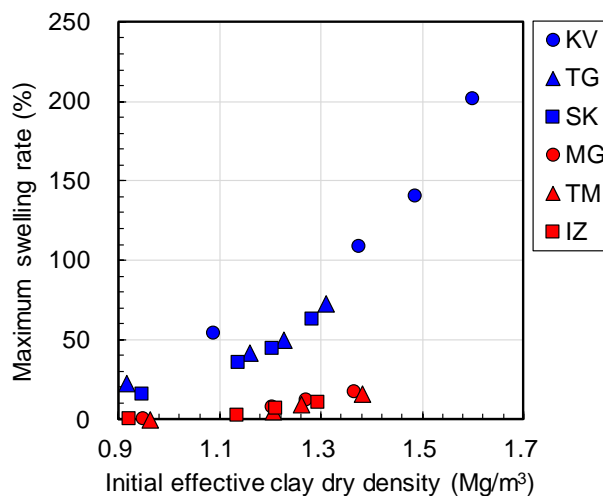


Figure 4-32 Relation between maximum swelling rate and initial effective clay dry density (DW)

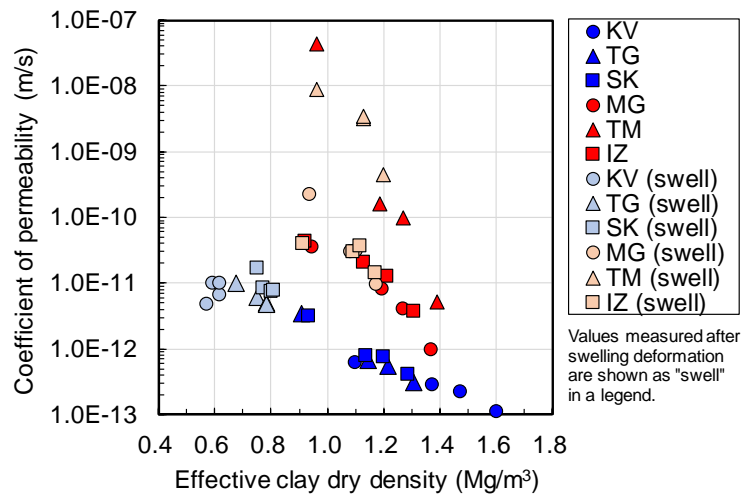


Figure 4-33 Relation between coefficient of permeability and effective clay dry density in swelling deformation and permeability test compared with permeability-swelling pressure test results (DW)

試験後の供試体をリングから押し抜き、側部から撮影した写真をFigure 4-34に示す。樹脂製の土台の上に初期高さが10 mmであった試験後供試体が載っている様子である。図中のB/Sはベントナイト混合率(%),そして、写真上部の数字は外部変位計の計測値から求めた膨潤率(%)である。ベントナイト混合率が高いほど膨潤量が大きいことが分かる。ケイ砂を混合した供試体については、黒色や茶色の砂粒子が点在していることが目視により判別できた。ケイ砂を混合した供試体については試験後供試体の上部において、下部と比べて白色が強く、供試体内に様相の異なる部位が混在することが観察された。

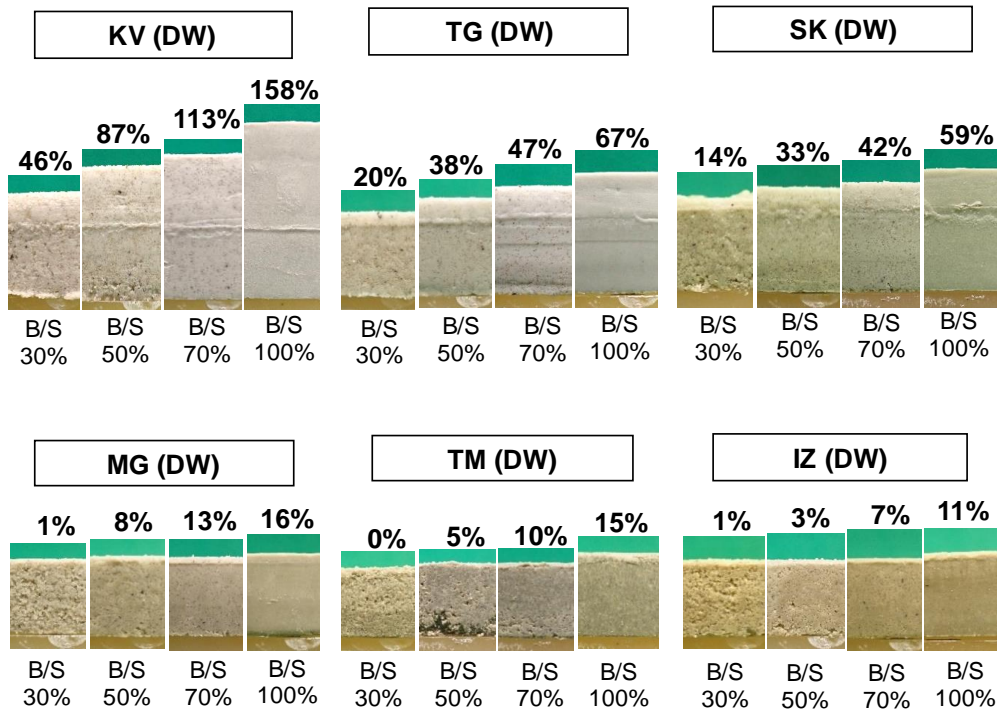


Figure 4-34 Side parts of specimen after swelling deformation tests (DW)
B/S is the mixing ratio of bentonite. Upper values of each photo mean the swelling rate.

試験後の供試体の含水比の一覧をTable 4-15に、含水比の分布をFigure 4-35に示す。ベントナイト混合率が高いほど試験後供試体の含水比は高く、Na型ベントナイトのほうが含水比は高かった。ほとんどの供試体において、供試体の上部・中部・下部で含水比の変動は認められないが、KV100、KV070、TG100では供試体の下部ほど高い含水比であった。一方、SK030やIZ100では、供試体の上部ほど高い含水比であった。全体を通して供試体の飽和度は、99～124%の範囲であった。

Table 4-15 Water content distribution of specimen after swelling deformation (DW)

Test case	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Water content (%)			
			Top	Middle	Bottom	Average
KV	KV030-DW	DW	45.2	42.8	42.1	43.3
	KV050-DW	DW	66.7	65.9	65.1	65.8
	KV070-DW	DW	83.5	86.3	91.9	87.4
	KV100-DW	DW	118.6	123.3	137.8	125.6
TG	TG030-DW	DW	36.0	32.4	33.8	34.0
	TG050-DW	DW	51.0	47.1	49.1	49.1
	TG070-DW	DW	65.4	63.6	61.8	63.3
	TG100-DW	DW	86.4	87.1	90.4	88.1
MG	MG030-DW	DW	23.1	21.4	21.7	21.9
	MG050-DW	DW	27.8	26.5	27.4	27.2
	MG070-DW	DW	35.7	36.0	35.9	35.9
	MG100-DW	DW	45.9	45.4	46.1	45.7
SK	SK030-DW	DW	47.1	29.8	30.5	35.3
	SK050-DW	DW	56.6	46.8	44.1	49.2
	SK070-DW	DW	63.1	60.9	60.3	61.4
	SK100-DW	DW	85.1	83.9	86.6	85.1
TM	TM030-DW	DW	21.1	20.9	20.5	20.9
	TM050-DW	DW	25.2	25.1	28.6	26.0
	TM070-DW	DW	38.3	37.7	37.1	37.6
	TM100-DW	DW	47.0	46.3	46.0	46.6
IZ	IZ030-DW	DW	21.0	19.7	21.4	20.7
	IZ050-DW	DW	26.4	24.6	25.3	25.6
	IZ070-DW	DW	34.6	34.0	34.0	34.3
	IZ100-DW	DW	46.9	44.3	42.9	44.3

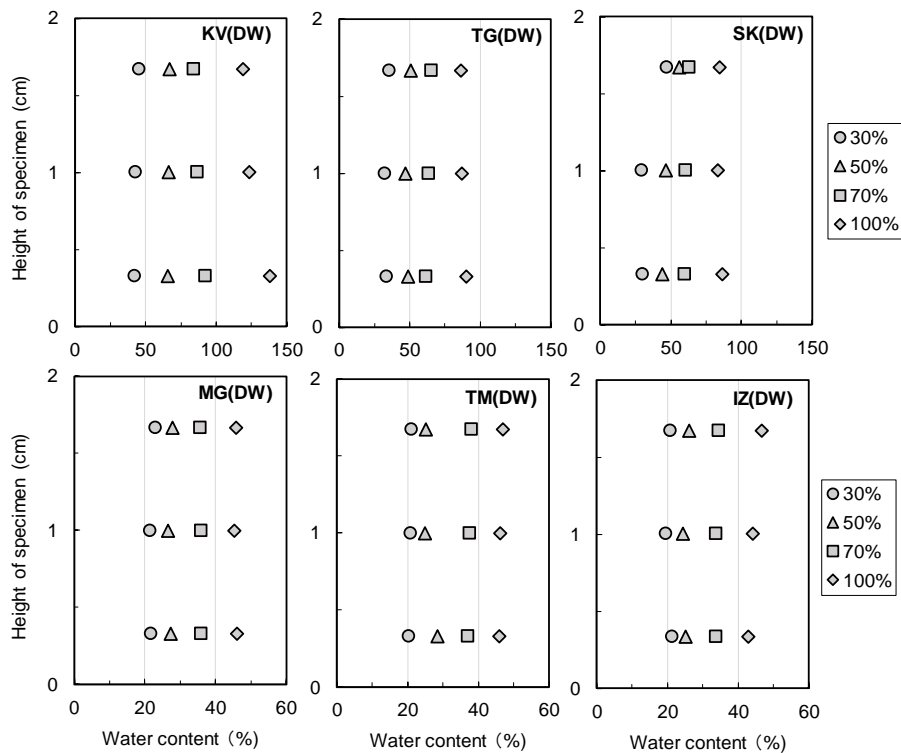


Figure 4-35 Water content distribution of specimen after swelling deformation (DW)

次に、人工海水を用いた場合の試験結果について述べる。Table 4-16に試験結果の一覧を示す。また、人工海水を用いた場合の最大膨潤率と有効粘土密度の関係をベントナイトの種類ごとにFigure 4-36に示す。比較のためにイオン交換水を用いた場合の最大膨潤率を併せて示す。人工海水を用いた場合にも、有効粘土密度が増加するほど最大膨潤率は増加する傾向が認められた。そして、TMでは変化が小さかったが、ほぼすべての供試体において、人工海水を用いることで最大膨潤率は低下することが分かった。有効粘土密度が増加するほど人工海水による最大膨潤率の低下は顕著であった。最大膨潤率の低下率としては、KVは87～95%となり最も高く、次いで、TGが65～84%、SKが58～76%であった。MG、TM、IZについてはベントナイト混合率100%であっても最大膨潤率の低下は48%以下でありKV、TG、SKより、人工海水の影響は相対的に小さかった。

全供試体について最大膨潤率と有効粘土密度の関係をFigure 4-37に示す。有効粘土密度に対する最大膨潤率は、人工海水を用いた場合にKV、MG、TM、IZはほぼ同じであり、TGとSKはやや高めの値であった。

Table 4-16 Swelling deformation test results (SW)

Test case	Mixture ratio of bentonite (%)	Vertical pressure (kPa)	Water content at compaction (%)	Initial dry density (Mg/m ³)	Initial effective clay dry density (Mg/m ³)	Average dry density after swelling deformation (Mg/m ³)	Maximum swelling rate* (%)	Hydraulic conductivity after swelling deformation** (m/s)	
KV	KV030-SW	30	19.6	11.8	1.855	1.09	1.808	2.8	4.8×10 ⁻¹⁰
	KV050-SW	50	19.6	11.8	1.808	1.37	1.644	10.5	4.8×10 ⁻¹⁰
	KV070-SW	70	19.6	15.1	1.708	1.48	1.464	17.9	6.1×10 ⁻¹¹
	KV100-SW	100	19.6	21.4	1.608	1.61	1.298	26.2	1.2×10 ⁻¹¹
TG	TG030-SW	30	19.6	14.4	1.707	0.93	1.649	3.6	2.1×10 ⁻⁹
	TG050-SW	50	19.6	18.7	1.612	1.16	1.461	10.7	1.8×10 ⁻¹⁰
	TG070-SW	70	19.6	23.3	1.457	1.22	1.252	17.3	7.6×10 ⁻¹¹
	TG100-SW	100	19.6	34.6	1.319	1.32	1.083	23.0	9.0×10 ⁻¹²
MG	MG030-SW	30	19.6	14.9	1.727	0.95	1.724	0.1	2.4×10 ⁻⁸
	MG050-SW	50	19.6	18.9	1.654	1.20	1.552	6.5	2.2×10 ⁻⁹
	MG070-SW	70	19.6	23.8	1.510	1.27	1.388	8.7	5.6×10 ⁻¹⁰
	MG100-SW	100	19.6	35.4	1.374	1.37	1.243	10.7	2.9×10 ⁻¹¹
SK	SK030-SW	30	19.6	13.6	1.728	0.95	1.663	3.9	3.3×10 ⁻⁹
	SK050-SW	50	19.6	16.3	1.593	1.14	1.410	13.2	6.2×10 ⁻¹⁰
	SK070-SW	70	19.6	20.8	1.439	1.20	1.214	19.0	1.7×10 ⁻¹⁰
	SK100-SW	100	19.6	29.9	1.292	1.29	1.041	25.2	4.1×10 ⁻¹¹
TM	TM030-SW	30	19.6	14.8	1.746	0.97	1.736	0.6	1.6×10 ⁻⁸
	TM050-SW	50	19.6	17.7	1.633	1.18	1.572	3.6	4.6×10 ⁻⁹
	TM070-SW	70	19.6	21.0	1.502	1.27	1.379	8.4	3.0×10 ⁻⁹
	TM100-SW	100	19.6	29.1	1.388	1.39	1.229	12.9	1.2×10 ⁻¹⁰
IZ	IZ030-SW	30	19.6	15.0	1.689	0.91	1.686	0.1	1.8×10 ⁻⁸
	IZ050-SW	50	19.6	18.5	1.576	1.12	1.545	1.9	5.2×10 ⁻⁹
	IZ070-SW	70	19.6	22.5	1.443	1.21	1.378	4.5	1.7×10 ⁻⁹
	IZ100-SW	100	19.6	32.4	1.293	1.29	1.224	5.5	7.3×10 ⁻¹¹

* Maximum swelling rate was the limit value of hyperbolic approximation of the relationship between the swelling rate and elapsed time.

** Hydraulic conductivity after swelling deformation was measured for the specimen having the average dry density after swelling deformation.

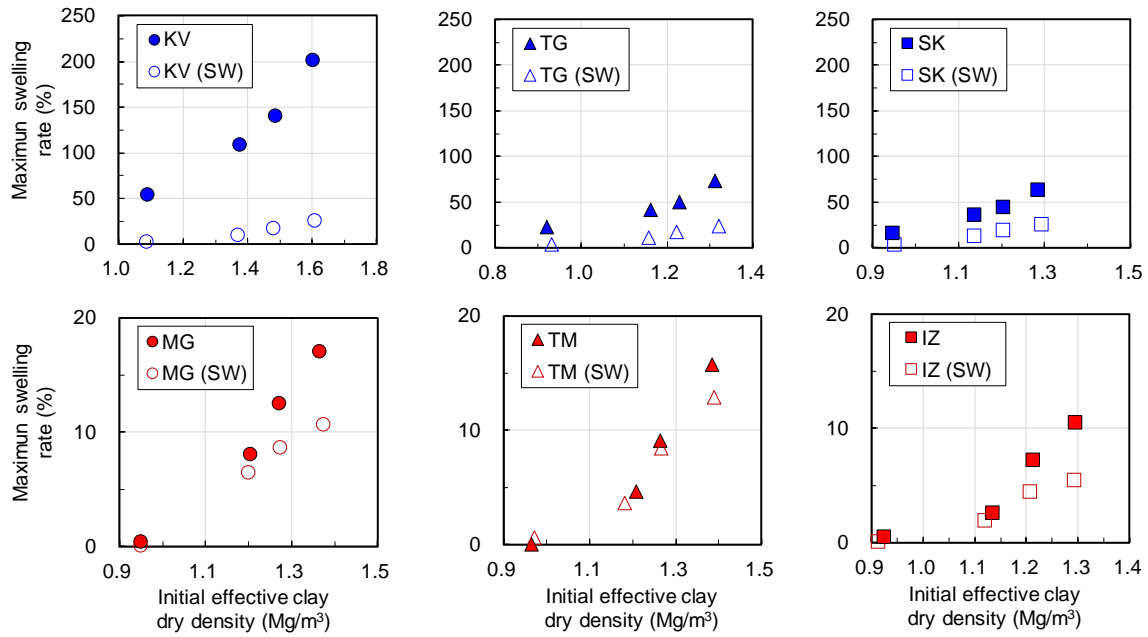


Figure 4-36 Maximum swelling rate for each bentonite (DW & SW)

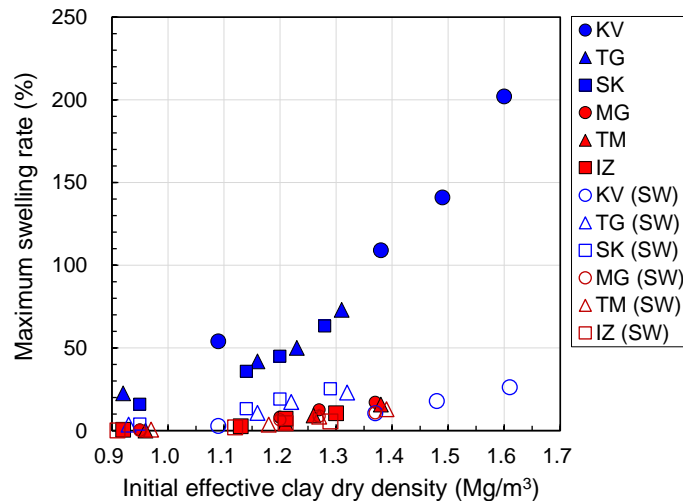


Figure 4-37 Relation between maximum swelling rate and initial effective clay density (DW & SW)

人工海水を用いた場合における膨潤変形後の透水係数をFigure 4-38に示す。人工海水を用いた場合においても、イオン交換水の時と同様に、膨潤変形後の透水係数は、4.3節の透水試験で得られた透水係数と有効粘土密度の関係を内挿または外挿した範囲にあった。すなわち、本研究における試験条件では、膨潤変形後の透水係数と有効粘土密度の関係は、膨潤変形を伴わない透水試験から得られる関係と概ね一致する結果であった。両試験の結果を統合した時に、有効粘土密度を軸で考えるのであれば、「TG, SK」は透水性が比較的低いグループ、「KV, MG, TM, IZ」は透水性が比較的高いグループとして傾向ごとに大別されるようであった。

試験後供試体の側部の写真をFigure 4-39に示す。イオン交換水の場合と比べて膨潤率が小さいために判別は難しいが、TG100, SK100, SK070, SK050, MG100では供試体上部に白色の部分が見られた。そのほかの供試体については外見に明瞭な色の違いは見られなかった。

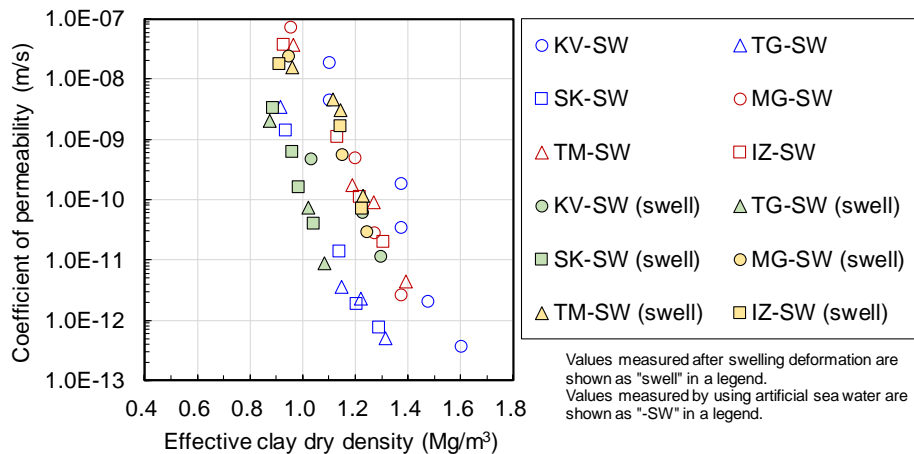


Figure 4-38 Coefficient of permeability after swelling deformation (SW)

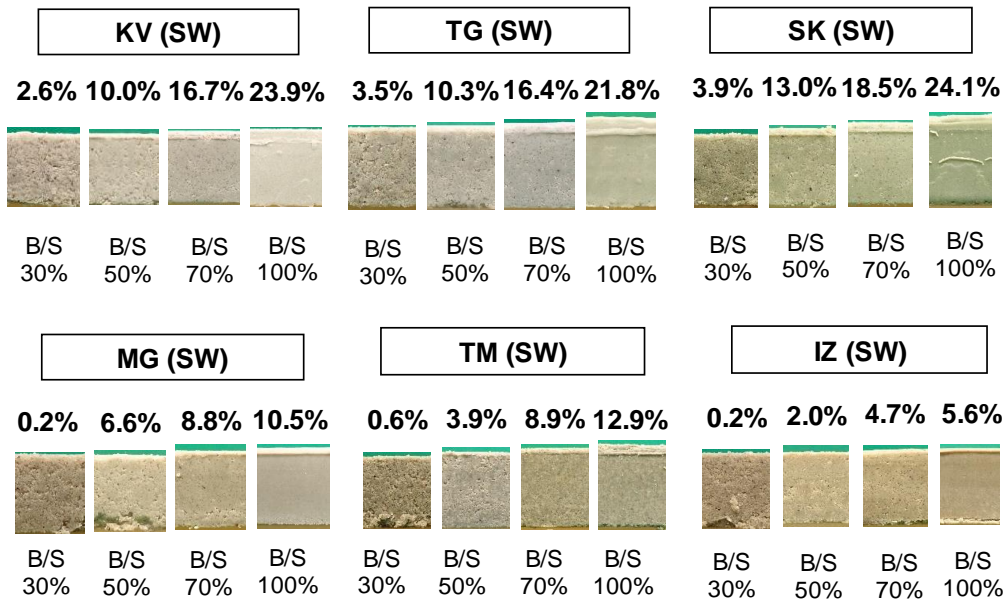


Figure 4-39 Side parts of specimen after swelling deformation test (SW)

B/S is the mixing ratio of bentonite. Upper values of each photo mean the swelling rate.

試験後の供試体の含水比の一覧をTable 4-17に、含水比の分布をFigure 4-40に示す。ベントナイト混合率が高いほど試験後供試体の含水比は高く、供試体の部位によらずベントナイト混合率ごとにほぼ同等の含水比であった。イオン交換水の場合とは異なり、初期試料のイオン型による含水比の差異は小さく、KV, MG, TM, IZは20~40%程度の含水比を示した。TGとSKのベントナイト混合率70%と100%はほかより試験後含水比が高く、40~60%程度の含水比であった。全条件を通して供試体の飽和度は、塩析出量により補正した含水比を用いて計算した結果として、88~103%の範囲であった。

以上より、人工海水の条件においても高い有効粘土密度ほど最大膨潤率は高くなることが分かった。TMでは変化が小さかったが、ほぼすべての供試体において、人工海水により最大膨潤率は低下し、特に、有効粘土密度が高い範囲ほど、人工海水による膨潤率の低下は絶対値として大きいことが分かった。

Table 4-17 Water content distribution of specimen after swelling deformation (SW)

Test case	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Water content (%)				
			Top	Middle	Bottom	Average	
KV	KV030-SW	30	SW	17.7	16.4	17.2	17.1
	KV050-SW	50	SW	23.1	22.6	22.5	22.7
	KV070-SW	70	SW	32.3	31.4	30.3	31.4
	KV100-SW	100	SW	40.4	39.4	38.9	39.7
TG	TG030-SW	30	SW	20.7	20.2	20.5	20.5
	TG050-SW	50	SW	32.4	31.6	31.4	31.9
	TG070-SW	70	SW	42.9	41.9	42.9	42.6
	TG100-SW	100	SW	54.9	54.5	54.7	54.7
MG	MG030-SW	30	SW	18.7	18.2	18.2	18.4
	MG050-SW	50	SW	25.7	25.2	25.9	25.5
	MG070-SW	70	SW	33.6	32.6	33.1	33.0
	MG100-SW	100	SW	42.3	41.4	41.0	41.5
SK	SK030-SW	30	SW	21.3	20.8	21.1	21.0
	SK050-SW	50	SW	32.1	32.0	33.0	32.3
	SK070-SW	70	SW	45.7	45.5	45.8	45.7
	SK100-SW	100	SW	59.3	58.5	59.7	59.2
TM	TM030-SW	30	SW	19.0	19.1	18.9	19.0
	TM050-SW	50	SW	27.0	26.5	26.2	26.6
	TM070-SW	70	SW	37.4	36.7	37.1	37.0
	TM100-SW	100	SW	46.2	44.7	45.7	45.6
IZ	IZ030-SW	30	SW	20.1	19.7	19.7	19.9
	IZ050-SW	50	SW	24.1	23.6	23.7	23.8
	IZ070-SW	70	SW	33.8	32.7	32.0	32.9
	IZ100-SW	100	SW	40.5	39.7	39.7	40.0

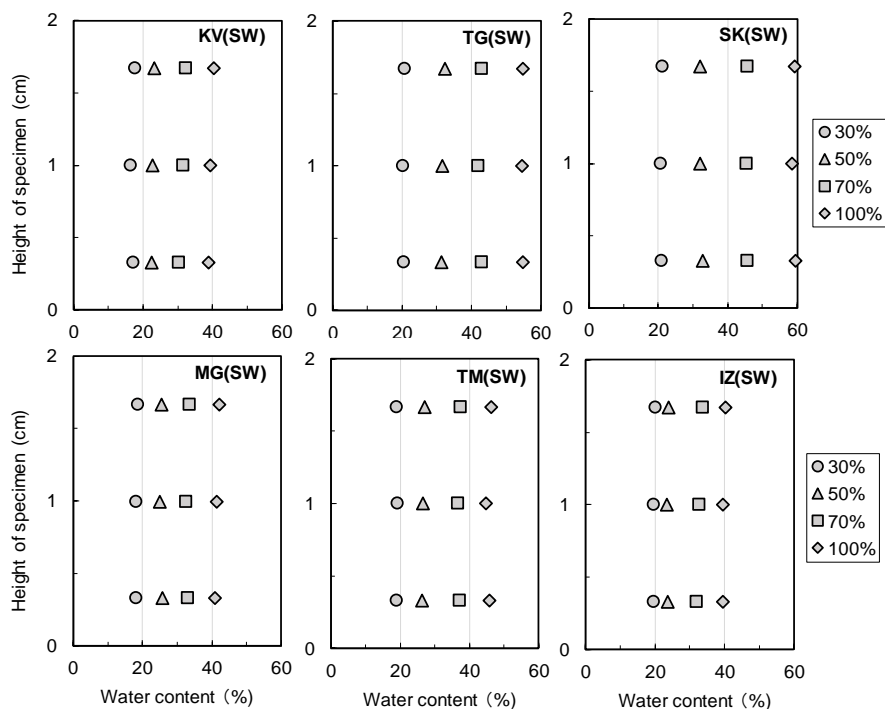
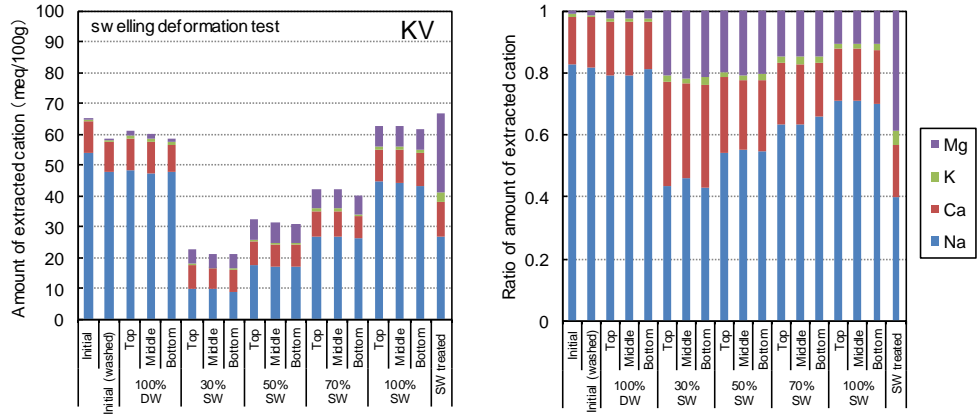


Figure 4-40 Water content distribution of specimen after swelling deformation (SW)

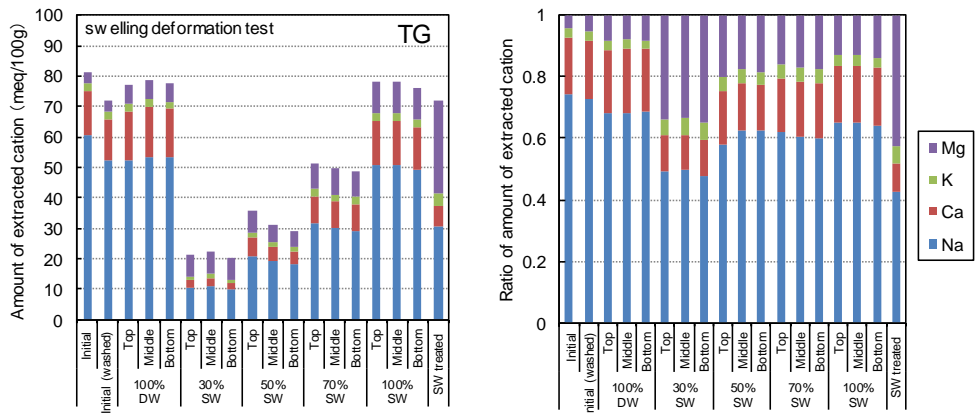
試験後供試体の抽出陽イオン量をFigure 4-41, Table 4-18に示す。初期試料としてNa型に分類していたKV, TG, SKについては、膨潤変形試験後には抽出Naイオン量が減り、一方で抽出Mgイオン量が増加する傾向が認められた。初期試料としてCa型に分類していたMG, TM, IZに関しては、ほぼすべての供試体で抽出Naイオン量が増す傾向にあった。IZに関しては初期試料の時点で抽出Naイオン量が多く、ベントナイト混合率70%および50%の供試体についてのみ抽出Naイオン量の増加が確認された。MGについては初期試料の抽出Mgイオン量が高く、試験後に抽出Mgイオン量の明瞭な変化は認められなかった。初期試料と比べて抽出Naイオンが増えた供試体については、抽出Caイオンが減る傾向であった。TMについては抽出Naイオンと抽出Mgイオンの割合が増えた一方、抽出Caイオンの割合が減っていた。IZに関しては前述したとおり、多くの供試体において抽出Naイオンの割合に有意な変化はあまり認められなかったが、抽出Mgイオンの割合が増えた一方、抽出Caイオンの割合は減っていた。全ベントナイトにおいて、いずれの供試体においても、抽出Kイオン量の明瞭な変化は見られなかった。

ここで測定された抽出陽イオン量は、アルコール洗浄後に抽出操作を行った結果であることから、交換性陽イオン量に近づいた値であると考えられる。初期試料としてNa型であった試料については、NaとMgのイオン交換が主に進行し、次第に海水平衡ベントナイトの交換性陽イオン組成に近づくものと考えられる。初期試料としてCa型であった試料については、初期状態によって挙動は異なるが、TMのように交換性陽イオンが主にCaイオンであったものでは、NaとMgがCaとイオン交換し、海水平衡の状態に近づくものと考えられる。MGは、初期の交換性Mgイオン量が海水平衡の状態と近く、交換性Mgイオン量の割合としてはあまり変わらず、NaとCaのイオン交換が進むものと考えられる。IZは、初期試料としてはCa型に分類していたが、交換性Naイオン量の割合は海水平衡の状態に近く、これによりMgとCaのイオン交換が進みやすいと考えられる。

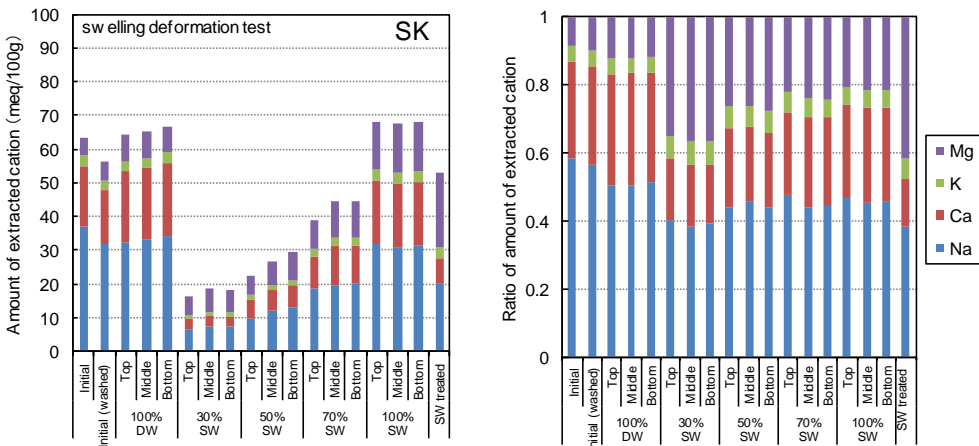
膨潤変形試験では、透水試験を速やかに実施するために流出水の分析を正確に行える手順にできなかったことは試験方法として前述したとおりである。そのため、試料と人工海水の接触状態を4.3節の透水・膨潤圧試験と同じとみなすことはできない。イオン交換の傾向は、透水・膨潤圧試験後の供試体と類似している部分は多かったが、固液反応の条件が膨潤変形試験の供試体によって異なることには注意されたい。



(a) KV

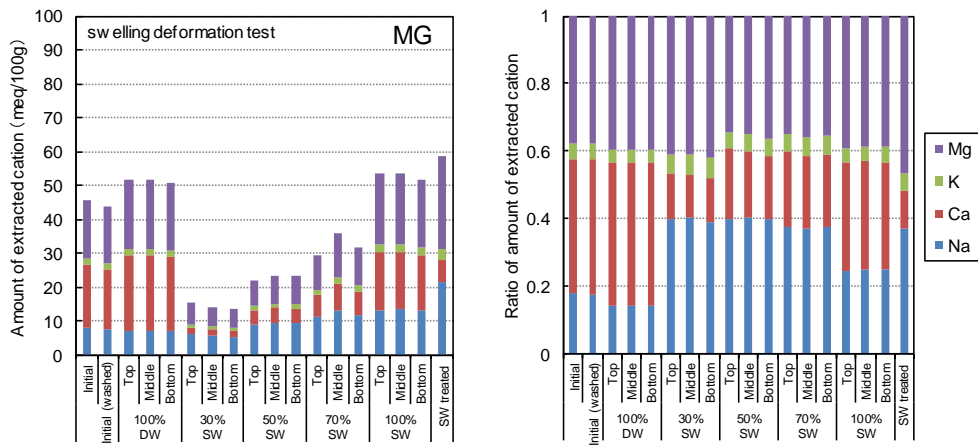


(b) TG

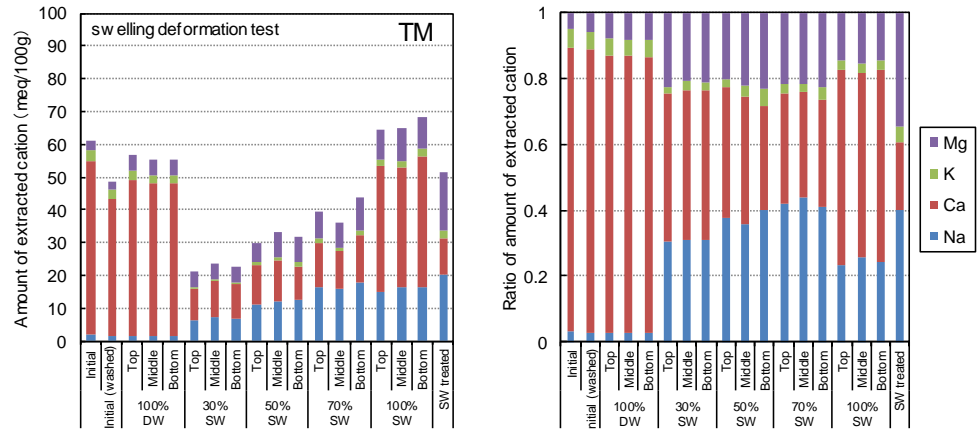


(c) SK

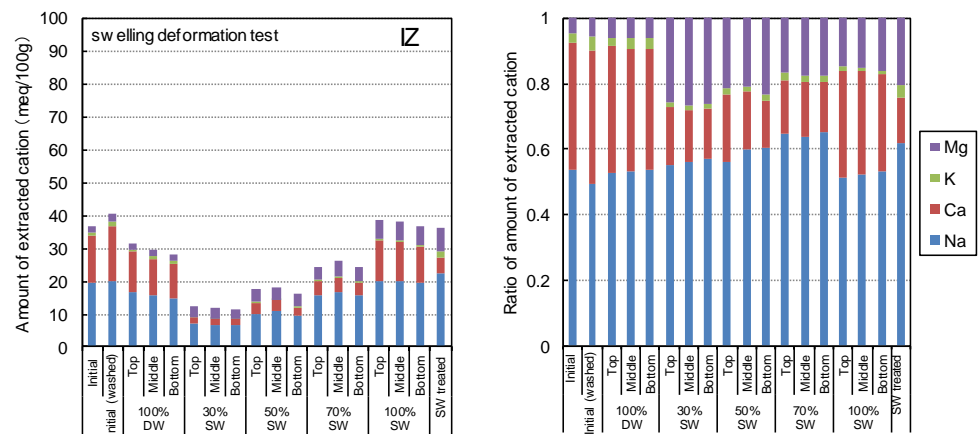
Figure 4-41 Extracted cations of samples before and after swelling deformation tests (1/2)



(d) MG



(e) TM



(f) IZ

Figure 4-41 Extracted cations of samples before and after swelling deformation tests (2/2)

Table 4-18 Amount of leachable cation before and after swelling deformation test (1/3)

Test case*	Mixture ratio of bentonite (%)	Location of specimen**	Leachable cation (meq/100g)					
			Na	Ca	K	Mg	Total	
KV	Initial	Powder	54.3	10.0	0.5	0.6	65.4	
	Initial (washed)	Powder	48.1	9.5	0.5	0.7	58.8	
	KV100-DW	100	Top	48.5	10.4	0.8	1.4	61.1
			Middle	47.6	10.3	0.7	1.4	60.0
			Bottom	47.9	8.9	0.8	1.3	58.9
			Top	9.8	7.7	0.5	4.7	22.7
	KV030-SW	30	Middle	9.9	6.5	0.4	4.6	21.4
			Bottom	9.1	7.0	0.5	4.5	21.1
			Top	17.5	8.0	0.4	6.4	32.3
			Middle	17.3	7.1	0.5	6.5	31.4
	KV050-SW	50	Bottom	16.9	7.2	0.5	6.3	30.9
			Top	26.9	8.3	1.0	6.1	42.3
			Middle	26.7	8.4	0.9	6.2	42.2
			Bottom	26.4	7.0	0.8	5.9	40.1
	KV070-SW	70	Top	44.8	10.4	1.1	6.7	63.0
			Middle	44.6	10.6	1.0	6.5	62.7
			Bottom	43.2	10.7	1.0	6.7	61.6
			Top	26.9	11.3	3.0	25.9	67.1
	KV100-SW	100	Powder	26.9	11.3	3.0	25.9	67.1
	TG	Initial	Powder	60.4	14.9	2.6	3.4	81.3
Initial (washed)		Powder	52.4	13.5	2.3	3.8	72.0	
TG100-DW		100	Top	52.4	16.0	2.3	6.4	77.1
			Middle	53.5	16.4	2.4	6.4	78.7
			Bottom	53.5	15.8	2.2	6.4	77.9
			Top	10.4	2.5	1.1	7.1	21.1
TG030-SW		30	Middle	11.2	2.6	1.2	7.6	22.6
			Bottom	9.8	2.4	1.1	7.2	20.5
			Top	20.7	6.2	1.6	7.1	35.6
			Middle	19.3	4.9	1.3	5.5	31.0
TG050-SW		50	Bottom	18.2	4.4	1.3	5.4	29.3
			Top	31.8	8.9	2.3	8.4	51.4
			Middle	30.0	8.8	2.3	8.4	49.5
			Bottom	29.3	8.7	2.2	8.5	48.7
TG070-SW		70	Top	50.8	14.5	2.7	10.0	78.0
			Middle	50.8	14.5	2.8	10.3	78.4
			Bottom	49.0	14.2	2.6	10.5	76.3
			Top	30.6	6.6	4.0	30.6	71.8
TG100-SW		100	Powder	30.6	6.6	4.0	30.6	71.8

* “Initial (washed)” sample was the raw bentonite that fully washed using alcohol solution. “SW treated” sample was the bentonite that the ion exchange fully proceeded using artificial seawater.

** “Powder” indicates the sample was not a part of compacted bentonite-sand mixture, but the powder bentonite was used.

Table 4-18 Amount of leachable cation before and after swelling deformation test (2/3)

Test case*	Mixture ratio of bentonite (%)	Location of specimen**	Leachable cation (meq/100g)					
			Na	Ca	K	Mg	Total	
SK	Initial	Powder	37.0	18.0	3.1	5.3	63.4	
	Initial (washed)	Powder	31.9	16.1	2.7	5.5	56.2	
	SK100-DW	100	Top	32.4	21.1	2.9	7.8	64.2
			Middle	33.1	21.4	2.9	7.9	65.3
			Bottom	34.2	21.7	3.1	7.8	66.8
	SK030-SW	30	Top	6.5	3.0	1.1	5.7	16.3
			Middle	7.2	3.4	1.3	6.8	18.7
			Bottom	7.2	3.1	1.2	6.6	18.1
	SK050-SW	50	Top	9.9	5.2	1.5	6.0	22.6
			Middle	12.2	5.9	1.6	7.0	26.7
			Bottom	12.9	6.5	1.9	8.1	29.4
	SK070-SW	70	Top	18.4	9.5	2.3	8.5	38.7
			Middle	19.6	11.7	2.5	10.6	44.4
			Bottom	19.9	11.5	2.4	10.8	44.6
	SK100-SW	100	Top	31.8	18.7	3.5	13.9	67.9
			Middle	30.7	18.9	3.5	14.5	67.6
			Bottom	31.3	18.7	3.5	14.5	68.0
	SW treated	100	Powder	20.3	7.4	3.3	22.0	53.0
	MG	Initial	Powder	8.3	18.2	2.1	17.2	45.8
		Initial (washed)	Powder	7.7	17.6	2.1	16.5	43.9
MG100-DW		100	Top	7.4	22.0	1.9	20.6	51.9
			Middle	7.3	22.0	1.9	20.5	51.7
			Bottom	7.3	21.5	1.9	20.1	50.8
MG030-SW		30	Top	6.2	2.0	0.9	6.3	15.4
			Middle	5.7	1.8	0.8	5.8	14.1
			Bottom	5.4	1.8	0.8	5.7	13.7
MG050-SW		50	Top	8.8	4.5	1.1	7.6	22.0
			Middle	9.5	4.6	1.2	8.2	23.5
			Bottom	9.5	4.4	1.3	8.5	23.7
MG070-SW		70	Top	11.2	6.5	1.6	10.4	29.7
			Middle	13.3	7.8	2.0	12.9	36.0
			Bottom	12.0	6.9	1.7	11.3	31.9
MG100-SW		100	Top	13.1	17.2	2.4	21.0	53.7
			Middle	13.5	17.1	2.4	20.6	53.6
			Bottom	13.0	16.3	2.3	20.0	51.6
SW treated		100	Powder	21.7	6.4	3.1	27.3	58.5

* "Initial (washed)" sample was the raw bentonite that fully washed using alcohol solution. "SW treated" sample was the bentonite that the ion exchange fully proceeded using artificial seawater.

** "Powder" indicates the sample was not a part of compacted bentonite-sand mixture, but the powder bentonite was used.

Table 4-18 Amount of leachable cation before and after swelling deformation test (3/3)

Test case*	Mixture ratio of bentonite (%)	Location of specimen**	Leachable cation (meq/100g)					
			Na	Ca	K	Mg	Total	
TM	Initial	Powder	1.9	52.7	3.5	2.9	61.0	
	Initial (washed)	Powder	1.3	42.1	2.6	2.8	48.8	
	TM100-DW	100	Top	1.5	47.8	2.8	4.5	56.6
			Middle	1.4	46.6	2.7	4.4	55.1
			Bottom	1.4	46.5	2.8	4.6	55.3
	TM030-SW	30	Top	6.5	9.5	0.5	4.8	21.3
			Middle	7.3	10.9	0.7	4.9	23.8
			Bottom	7.0	10.3	0.6	4.8	22.7
	TM050-SW	50	Top	11.3	12.0	0.8	6.1	30.2
			Middle	11.9	12.8	1.1	7.3	33.1
			Bottom	12.6	10.1	1.6	7.4	31.7
	TM070-SW	70	Top	16.6	13.4	1.1	8.5	39.6
			Middle	16.0	11.6	1.0	7.8	36.4
			Bottom	18.1	14.2	1.6	9.9	43.8
	TM100-SW	100	Top	15.1	38.2	1.9	9.2	64.4
			Middle	16.5	36.4	1.9	9.9	64.7
			Bottom	16.5	40.0	2.1	9.9	68.5
	SW treated	100	Powder	20.5	10.6	2.5	17.7	51.3
	IZ	Initial	Powder	19.7	14.3	1.1	1.7	36.8
		Initial (washed)	Powder	20.0	16.7	1.7	2.4	40.8
IZ100-DW		100	Top	16.6	12.2	0.8	1.9	31.5
			Middle	15.6	10.9	1.0	1.8	29.3
			Bottom	15.0	10.4	1.0	1.7	28.1
IZ030-SW		30	Top	6.9	2.2	0.2	3.2	12.5
			Middle	6.7	1.9	0.2	3.2	12.0
			Bottom	6.6	1.7	0.2	3.0	11.5
IZ050-SW		50	Top	9.8	3.6	0.3	3.8	17.5
			Middle	10.9	3.2	0.3	3.8	18.2
			Bottom	9.6	2.3	0.3	3.8	16.0
IZ070-SW		70	Top	15.8	4.0	0.5	4.1	24.4
			Middle	16.7	4.4	0.5	4.6	26.2
			Bottom	15.7	3.7	0.5	4.2	24.1
IZ100-SW		100	Top	19.9	12.6	0.6	5.7	38.8
			Middle	19.9	12.1	0.5	5.7	38.2
			Bottom	19.6	10.9	0.5	5.9	36.9
SW treated		100	Powder	22.4	5.0	1.5	7.3	36.2

* "Initial (washed)" sample was the raw bentonite that fully washed using alcohol solution. "SW treated" sample was the bentonite that the ion exchange fully proceeded using artificial seawater.

** "Powder" indicates the sample was not a part of compacted bentonite-sand mixture, but the powder bentonite was used.

4.5 圧密試験

4.5.1 試験ケース

緩衝材の設計において物理的緩衝性などを検討するうえで圧密特性は重要である。そこで、2種類のベントナイトを対象に、一次元圧密試験を実施した。試験ケースの一覧は Table 4-19 のとおりである。TG と MG の2種類のベントナイトについてそれぞれ3通りのベントナイト混合率（30%、50%、100%）とし、試験用水にはイオン交換水（DW）と人工海水（SW）を用いた。Table 4-19 に示す含水比、乾燥密度、有効粘土密度は供試体作製時の初期状態における値であり、SW 条件については、4.1.5 項に説明した方法で固相中の質量から塩の質量を除いて補正した値を示している。

Table 4-19 Program of consolidation test

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Initial condition of test specimen			
			Water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	
TG	TG100	100	DW	34.0	1.310	1.31
	TG050	50	DW	19.0	1.637	1.18
	TG030	30	DW	14.6	1.700	0.92
	TG100	100	SW	34.2	1.325	1.33
	TG050	50	SW	19.5	1.611	1.16
	TG030	30	SW	14.5	1.688	0.91
MG	MG100	100	DW	34.0	1.357	1.36
	MG050	50	DW	16.7	1.661	1.21
	MG030	30	DW	13.5	1.730	0.95
	MG100	100	SW	29.1	1.369	1.37
	MG050	50	SW	15.1	1.650	1.20
	MG030	30	SW	12.7	1.730	0.95

4.5.2 試験方法

(1) 試験装置の構成

本研究で使用した圧密試験装置は Figure 4-42 に示すように、圧密リングと底板からなる圧密容器と、圧密容器上端部に所定の荷重を一様にさせる载荷ロッドから構成され、供試体の水飽和過程においては膨潤に伴う鉛直圧の変化を荷重計により計測し、载荷過程においては圧密に伴う変位量の変化を軸変位計により計測する。供試体の側方変形を許容しない円筒状の剛な圧密容器を使用した。本試験では錘を载荷フレームに吊り下げ、载荷フレームと剛結した载荷ロッドから圧密リングに対して所定の荷重を作用させた。圧密リングのサイズは、ベントナイト混合率 100%の試験ケースでは内径 40 mm、厚さ 10 mm、それ以外のケースでは内径 60 mm、厚さ 10 mm である。圧密試験装置の外観を Figure 4-43 に示す。

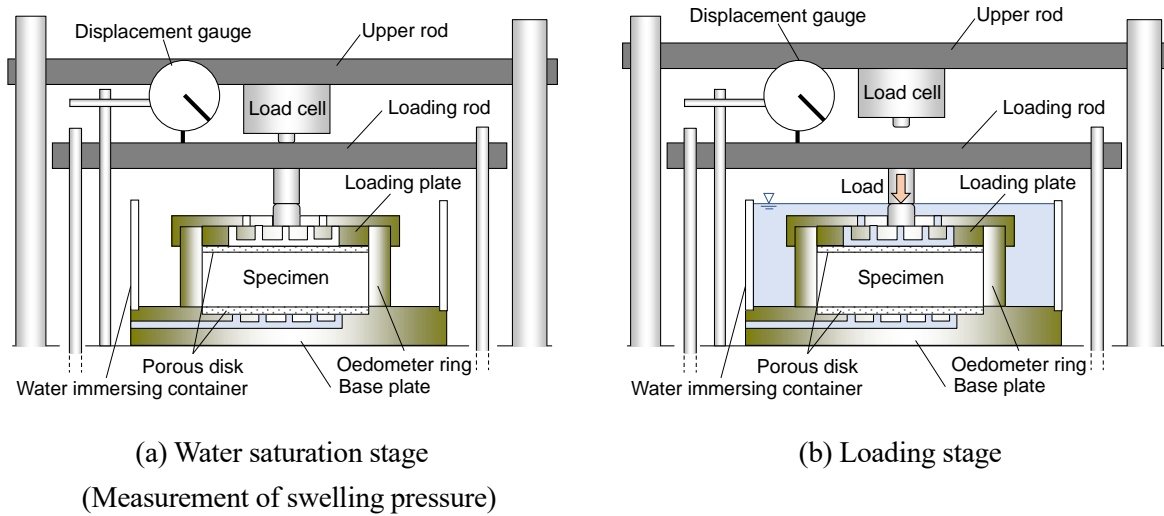


Figure 4-42 Schematic diagram of oedometer



Figure 4-43 Consolidation test apparatus

(2) 試験の手順

圧密試験は日本産業規格「土の段階載荷による圧密試験方法」(JIS A 1217)を参照した。膨潤性粘土であるベントナイトを用いて試験を行うため、供試体の飽和過程において膨潤による体積膨張が発生しないように、軸方向の変位を拘束した状態でまず給水し、この時に発生する膨潤圧を測定してから載荷することで圧密試験を実施した。そして、ここで測定された膨潤圧を参考に、圧密圧力を決定した。以下に、圧密試験の試験手順を述べる。

はじめに、最適含水比に調整した試料(DW条件はイオン交換水, SW条件は人工海水で含水比調整を実施)を供試体作製のモールドに所定量投入し、1層の静的締固めにより供試体を圧縮成型した。供試体側面の摩擦を軽減するため、モールド内の供試体を試験用の圧密リングに移し替えた後に、供試体の高さを測定した。試験中の試料の流出を防ぐために、供試体の上下面にフィルターを設置したうえで、圧密リングを圧密試験装置に設置した。供試体に圧縮力が作用しないように載荷ロッドを供試体上面に密着させた。この状態で、変位が生じないように載荷ロッドを固定した。変位計と給水ビュレットを設置して、それぞれの初期値を記録し、荷重計により給水開始直後からの鉛直圧の変化を測定した(Figure 4-42 (a)参照)。鉛直圧がほぼ一定の値に収束した時に、これを供試体の平衡膨潤圧とした。このことに加えて、供試体の吸水量が供試体作製時点における間隙空気量を概ね上回ったことを確認して、供試体の飽和度が十分に高い状態であると判断した。

供試体が乾燥しないように圧密リングを水浸し、載荷ロッドの変位固定を解除し、後述する圧密圧力となるように錘を載せ、圧密段階に着手した(Figure 4-42 (b)参照)。圧密中は、経過時間、排水量、供試体の圧縮変位量を所定の間隔で計測した。圧密終了の収束判定方法は、 $3t$ 法、 \sqrt{t} 法、浅岡法(Asaoka, 1978)についてそれぞれの判定法の適用性を検討した(検討結果は5.4節参照)。この検討結果から、 $3t$ 法を基本として収束判定することとし、収束に1週間を超えて長期間に及ぶ場合には浅岡法の適用も可能とした。

最初の載荷による圧密が終了した後、圧密圧力を段階的に増加させ、同様の計測を行った。各載荷段階の圧密圧力は測定した供試体の平衡膨潤圧を参考に、所有する錘の組み合わせも考慮したうえで、平衡膨潤圧を上回る圧力を基準にして設定した。基準とする圧力を p_0 とした時の段階載荷の圧力の設定をTable 4-20に示す。平衡膨潤圧の測定を行った後に3段階の載荷、その後、5段階の除荷を行った。

試験終了後、供試体を圧密リングから取り出し、供試体全量を炉乾燥させて乾燥重量を測定した。そして、含水比から供試体の飽和度を計算した。

結果の整理においては、 $e-\log p$ 曲線の正規圧密領域の線形勾配を表す圧縮指数 C_c と除荷過程の線形勾配を表す膨潤指数 C_s を求めた。

Table 4-20 Consolidation pressure in each loading step

State	Swelling	Loading			Unloading				
Loading step	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Load	Equilibrium swelling pressure	p_0	$2 p_0$	$4 p_0$	$2 p_0$	p_0	$p_0/2$	$p_0/4$	$p_0/8$

4.5.3 試験結果

TG および MG の圧密応力 p , 間隙比 e , 圧縮指数 C_c , 膨潤指数 C_s , 圧縮ひずみの増分 Δe の一覧を Table 4-21, Table 4-22, Table 4-23, Table 4-24 に示す。膨潤性粘土の正規圧密線や除荷過程の膨張曲線は e - $\log p$ 関係上で非線形性が強いことが先行研究(笹倉ほか, 2002) から予想された。そこで C_c および C_s については, 各載荷ステップの傾きから求める場合と, 圧縮過程と膨潤過程での複数区間の傾きから求める場合とを整理した。

Figure 4-44, Figure 4-45 に e - $\log p$ 曲線をイオン交換水と人工海水の場合とで比較して示す。 e - $\log p$ 曲線であるが, TG の DW 条件の除荷過程の膨張曲線において強い非線形性が認められた。これは Na 型のベントナイトに特徴的な傾向である。それ以外の試料および条件での膨張曲線は直線性を示していることが分かった。

圧密開始の初期状態となる平衡膨潤圧であるが, MG については DW 条件よりも SW 条件のほうが大きな値を示した。4.3 節に示した透水・膨潤圧試験の MG の平衡膨潤圧は DW 条件のほうが大きな値を示していたことから両試験で整合した結果とはなっていないが, この理由については以下のように推察される。Figure 4-41 に示した膨潤変形試験後供試体の抽出陽イオン量については初期試料として Na 型に分類していた TG の抽出 Na イオン量が減り抽出 Mg イオン量が増加する一方で, 初期試料として Ca 型に分類していた MG に関しては抽出 Na イオン量が増す傾向にあったこと, SW 条件の試料の含水比調整に透水・膨潤圧試験では DW を圧密試験では SW を用いていることから, SW 条件の圧密試験に用いた供試体のほうが Na イオンへの置換が進行してより高い平衡膨潤圧を発現した可能性がある。

Figure 4-46 に圧縮過程の載荷ステップ区間 2~3 (TG050-SW は載荷ステップ区間 3~4) の圧縮指数 C_c とベントナイト混合率の関係を示す。最初の載荷ステップ 1 の圧縮曲線は正規圧密領域に至っていない可能性が考えられたため, ここでは次ステップ以降の圧縮曲線の勾配を採用した。 C_c はいずれのケースについても, ベントナイト混合率との間に比例増加関係があることが認められた。その値は TG の DW 条件の場合が最も大きく, 次いで TG の SW 条件, MG の DW 条件, SW 条件の順となっているが, MG では DW 条件と SW 条件の値の違いはわずかであり, 両者の C_c は同等であることが分かった。

膨潤指数については膨張曲線の非線形性を考慮して, 除荷過程を二つの区間に分けて整理した。膨潤過程の載荷ステップ区間 4~6 (TG050-SW は載荷ステップ区間 5~7) の膨潤指数を C_{s1} とし, ベントナイト混合率との関係を Figure 4-47 に, 載荷ステップ区間 7~8 (TG050-SW は載荷ステップ区間 8~9) の膨潤指数を C_{s2} とし, ベントナイト混合率との関係を Figure 4-48 にそれぞれ示す。 C_{s1} は C_c での傾向と同様に, ベントナイト混合率との間の比例増加関係を認めることができた。また, これらの条件の中では膨潤性が高いと考えられる Na 型ベントナイトに分類する TG の DW 条件を除けば, C_{s1} は同程度の値とみなすことができるもののほか, ベントナイト混合率の低い 30% では試験ケースによる違いはより生じ難くなっていることが分かった。 C_{s2} は Figure 4-49 の C_{s1} との比較からも明らかなように, C_{s1} よりも大きくなっており膨張曲線の非線形性を確認することができるが, その程度は TG の DW 条件のように膨潤性が高いと考えられるケース程大きかった。Ca 型に分類した MG の膨潤指数は水質による差が生じ難い結果となっていること, また C_{s1} と C_{s2} は同程度で膨張曲線の直線性を表した。

Table 4-21 Results of consolidation tests (TG-DW)

Test case	Loading step	Consolidation pressure p (kPa)	Void ratio e (-)	Compression index: C_c Swelling index: C_s		Compressive strain $\Delta\varepsilon$ (%)
				(Each step)	(Section)	
				(-)	(-)	
TG100-DW	0	1067	1.042	-	-	-
	1	2804	0.901	3.36×10^{-1}	-	7.16
	2	5608	0.741	5.32×10^{-1}	4.94×10^{-1} (2 to 3)	8.79
	3	11236	0.603	4.57×10^{-1}		8.22
	4	5608	0.641	1.26×10^{-1}	2.25×10^{-1} (4 to 6)	-2.34
	5	2804	0.712	2.36×10^{-1}		-4.24
	6	1402	0.806	3.12×10^{-1}	4.63×10^{-1} (7 to 8)	-5.33
	7	701	0.918	3.72×10^{-1}		-6.01
8	350	1.085	5.54×10^{-1}		-8.34	
TG050-DW	0	362	0.629	-	-	-
	1	1246	0.590	7.26×10^{-2}	-	2.47
	2	2484	0.539	1.70×10^{-1}	2.08×10^{-1} (2 to 3)	3.24
	3	4968	0.465	2.46×10^{-1}		4.91
	4	2484	0.476	3.65×10^{-2}	8.87×10^{-2} (4 to 6)	-0.76
	5	1246	0.501	8.35×10^{-2}		-1.68
	6	623	0.545	1.46×10^{-1}	3.11×10^{-1} (7 to 8)	-2.85
	7	312	0.614	2.29×10^{-1}		-4.38
8	156	0.732	3.92×10^{-1}		-7.08	
TG030-DW	0	210	0.567	-	-	-
	1	623	0.520	9.96×10^{-2}	-	3.00
	2	1246	0.486	1.13×10^{-1}	1.40×10^{-1} (2 to 3)	2.27
	3	2493	0.436	1.66×10^{-1}		3.41
	4	1246	0.440	1.33×10^{-2}	3.21×10^{-2} (4 to 6)	-0.28
	5	623	0.447	2.33×10^{-2}		-0.48
	6	312	0.465	5.98×10^{-2}	2.96×10^{-1} (7 to 8)	-1.23
	7	156	0.525	1.99×10^{-1}		-3.98
8	78	0.643	3.92×10^{-1}		-7.50	

Table 4-22 Results of consolidation tests (TG-SW)

Test case	Loading step	Consolidation pressure p (kPa)	Void ratio e (-)	Compression index: C_c Swelling index: C_s		Compressive strain $\Delta\varepsilon$ (%)
				(Each step)	(Section)	
				(-)	(-)	
TG100-SW	0	762	1.019	-	-	-
	1	2804	0.890	2.28×10^{-1}	-	6.61
	2	5608	0.781	3.62×10^{-1}	3.75×10^{-1} (2 to 3)	5.94
	3	11236	0.664	3.88×10^{-1}		6.80
	4	5608	0.693	9.61×10^{-2}	1.44×10^{-1} (4 to 6)	-1.71
	5	2804	0.735	1.40×10^{-1}		-2.50
	6	1402	0.794	1.96×10^{-1}		-3.34
	7	701	0.861	2.23×10^{-1}	2.27×10^{-1} (7 to 8)	-3.65
8	350	0.931	2.32×10^{-1}	-3.66		
TG050-SW	0	193	0.655	-	-	-
	1	623	0.625	5.88×10^{-2}	-	1.86
	2	1246	0.588	1.23×10^{-1}	1.60×10^{-1} (2 to 3)	2.27
	3	2483	0.529	1.97×10^{-1}		3.78
	4	1246	0.535	2.00×10^{-2}	4.22×10^{-2} (4 to 6)	-0.37
	5	623	0.547	3.99×10^{-2}		-0.77
	6	312	0.567	6.65×10^{-2}		-1.30
	7	156	0.589	7.31×10^{-2}	1.73×10^{-1} (7 to 8)	-1.36
8	78	0.671	2.72×10^{-1}	-5.08		
TG030-SW	0	87	0.578	-	-	-
	1	312	0.556	3.98×10^{-2}	-	1.39
	2	623	0.533	7.64×10^{-2}	8.51×10^{-2} (2 to 3)	1.49
	3	1238	0.505	9.40×10^{-2}		1.85
	4	623	0.508	1.01×10^{-2}	1.33×10^{-2} (4 to 6)	-0.19
	5	312	0.512	1.33×10^{-2}		-0.25
	6	156	0.517	1.66×10^{-2}		-0.38
	7	78	0.525	2.66×10^{-2}	2.82×10^{-2} (7 to 8)	-0.52
8	39	0.534	2.98×10^{-2}	-0.60		

Table 4-23 Results of consolidation tests (MG-DW)

Test case	Loading step	Consolidation pressure p (kPa)	Void ratio e (-)	Compression index: C_c Swelling index: C_s		Compressive strain $\Delta\varepsilon$ (%)
				(Each step) (-)	(Section) (-)	
MG100-DW	0	735	0.896	-	-	-
	1	2804	0.812	1.44×10^{-1}	-	4.52
	2	5589	0.722	3.00×10^{-1}	3.43×10^{-1} (2 to 3)	5.12
	3	11177	0.606	3.85×10^{-1}		6.98
	4	5589	0.636	9.97×10^{-2}	1.38×10^{-1} (4 to 6)	-1.84
	5	2804	0.680	1.47×10^{-1}		-2.66
	6	1402	0.730	1.66×10^{-1}	1.76×10^{-1} (7 to 8)	-2.97
	7	701	0.779	1.63×10^{-1}		-2.75
8	351	0.836	1.89×10^{-1}		-3.16	
MG050-DW	0	129	0.575	-	-	-
	1	312	0.557	4.70×10^{-2}	-	1.19
	2	623	0.530	8.97×10^{-2}	1.08×10^{-1} (2 to 3)	1.76
	3	1246	0.492	1.26×10^{-1}		2.50
	4	623	0.497	1.66×10^{-2}	2.66×10^{-2} (4 to 6)	-0.34
	5	312	0.504	2.33×10^{-2}		-0.50
	6	156	0.516	3.99×10^{-2}	6.47×10^{-2} (7 to 8)	-0.79
	7	78	0.532	5.32×10^{-2}		-1.03
8	39	0.555	7.63×10^{-2}		-1.51	
MG030-DW	0	33	0.522	-	-	-
	1	78	0.515	1.90×10^{-2}	-	0.46
	2	156	0.506	2.99×10^{-2}	3.32×10^{-2} (2 to 3)	0.64
	3	312	0.495	3.65×10^{-2}		0.72
	4	156	0.497	6.64×10^{-3}	1.11×10^{-2} (4 to 6)	-0.14
	5	78	0.501	1.33×10^{-2}		-0.24
	6	39	0.505	1.33×10^{-2}	2.16×10^{-2} (7 to 8)	-0.32
	7	22	0.512	2.74×10^{-2}		-0.46
8	11	0.517	1.66×10^{-2}		-0.30	

Table 4-24 Results of consolidation tests (MG-SW)

Test case	Loading step	Consolidation pressure p (kPa)	Void ratio e (-)	Compression index: C_c Swelling index: C_s		Compressive strain $\Delta\varepsilon$ (%)
				(Each step)	(Section)	
				(-)	(-)	
MG100-SW	0	745	0.880	-	-	-
	1	2804	0.764	2.01×10^{-1}	-	6.40
	2	5589	0.654	3.67×10^{-1}	3.38×10^{-1}	6.40
	3	11177	0.561	3.09×10^{-1}	(2 to 3)	5.80
	4	5589	0.581	6.64×10^{-2}	-	-1.27
	5	2804	0.618	1.24×10^{-1}	1.11×10^{-1}	-2.33
	6	1402	0.661	1.43×10^{-1}	(4 to 6)	-2.61
	7	701	0.709	1.59×10^{-1}	1.49×10^{-1}	-2.81
8	351	0.751	1.40×10^{-1}	(7 to 8)	-2.44	
MG050-SW	0	279	0.585	-	-	-
	1	623	0.573	3.44×10^{-2}	-	0.76
	2	1246	0.555	5.98×10^{-2}	9.49×10^{-2}	1.13
	3	2484	0.516	1.30×10^{-1}	(2 to 3)	2.58
	4	1246	0.519	1.00×10^{-2}	-	-0.21
	5	623	0.525	1.99×10^{-2}	2.00×10^{-2}	-0.42
	6	312	0.534	2.99×10^{-2}	(4 to 6)	-0.58
	7	156	0.548	4.65×10^{-2}	4.65×10^{-2}	-0.86
8	78	0.562	4.65×10^{-2}	(7 to 8)	-0.96	
MG030-SW	0	72	0.523	-	-	-
	1	156	0.519	1.19×10^{-2}	-	0.20
	2	312	0.514	1.66×10^{-2}	2.49×10^{-2}	0.34
	3	623	0.504	3.32×10^{-2}	(2 to 3)	0.71
	4	312	0.505	3.32×10^{-3}	-	-0.06
	5	156	0.506	3.32×10^{-3}	4.43×10^{-3}	-0.10
	6	78	0.508	6.64×10^{-3}	(4 to 6)	-0.14
	7	39	0.511	9.95×10^{-3}	1.26×10^{-2}	-0.18
8	22	0.515	1.57×10^{-2}	(7 to 8)	-0.28	

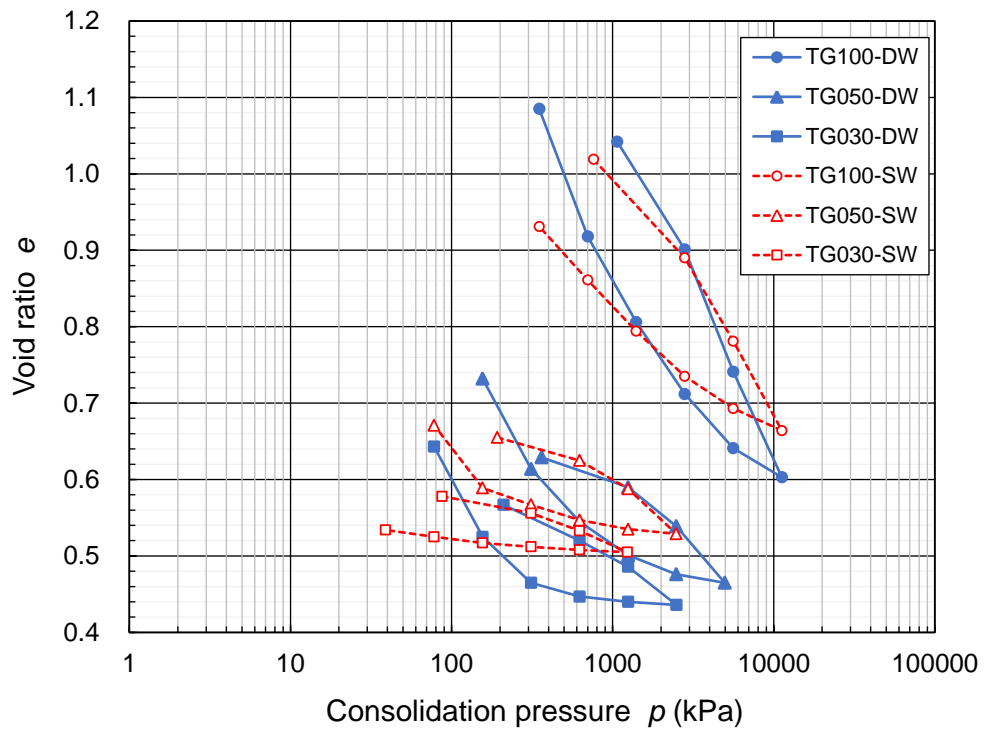


Figure 4-44 Relationship between void ratio and consolidation pressure (TG)

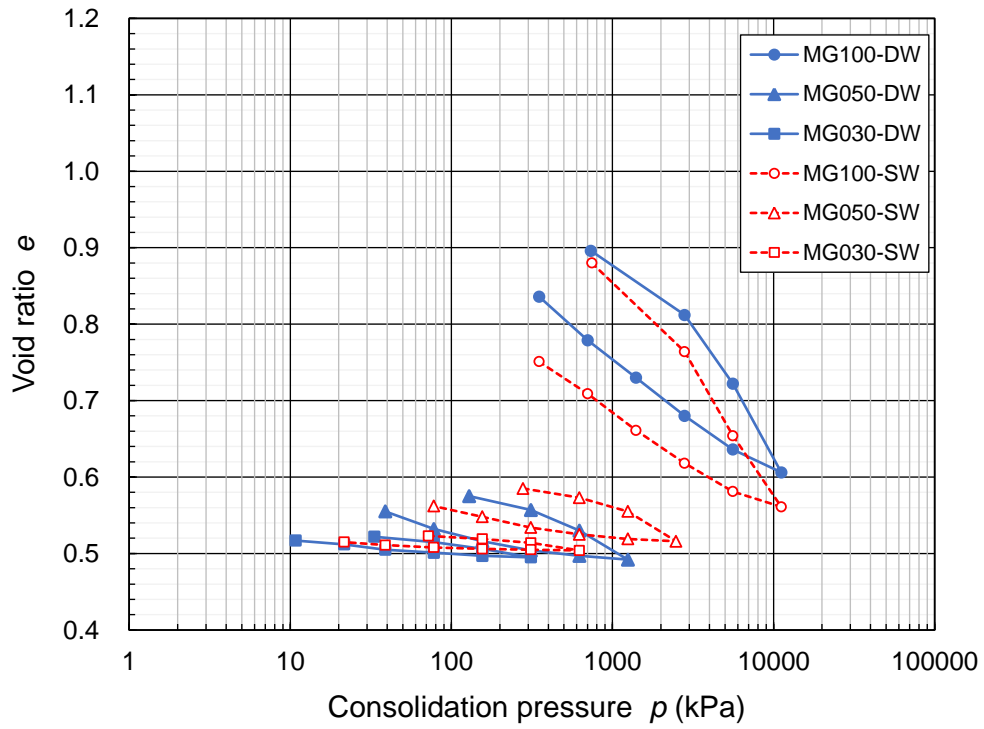


Figure 4-45 Relationship between void ratio and consolidation pressure (MG)

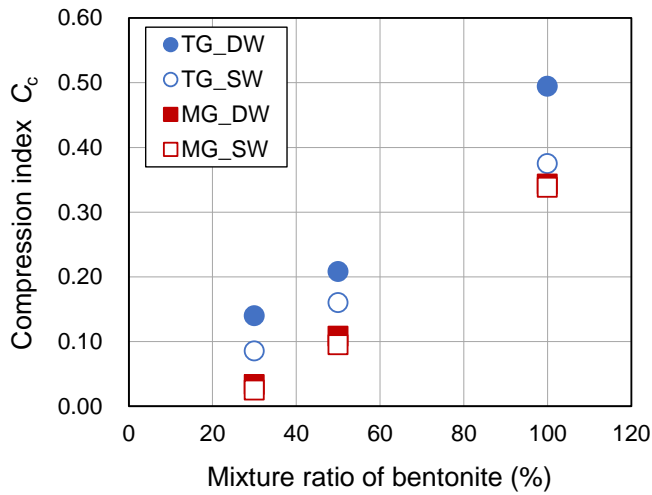


Figure 4-46 Relation between compression index and mixture ratio of bentonite

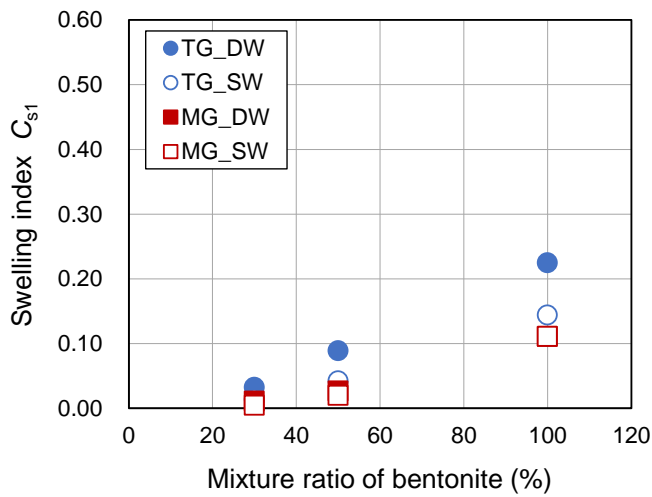
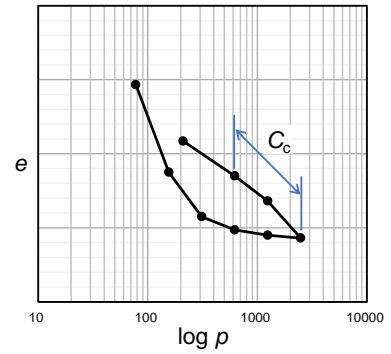


Figure 4-47 Relation between swelling index (C_{s1}) and mixture ratio of bentonite

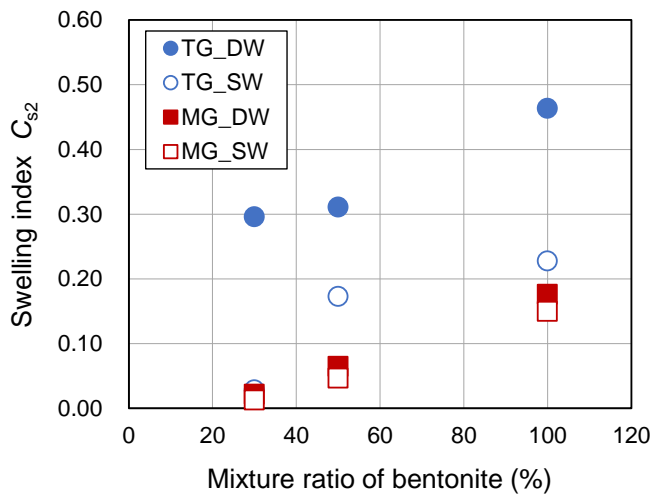
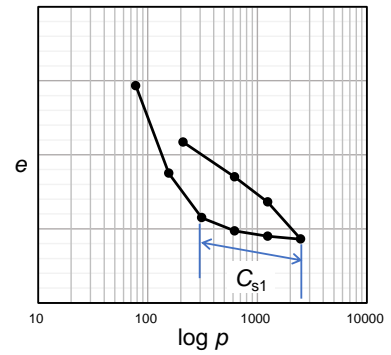
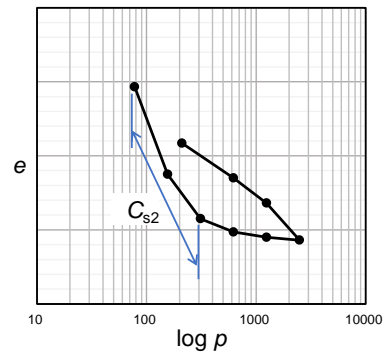


Figure 4-48 Relation between swelling index (C_{s2}) and mixture ratio of bentonite



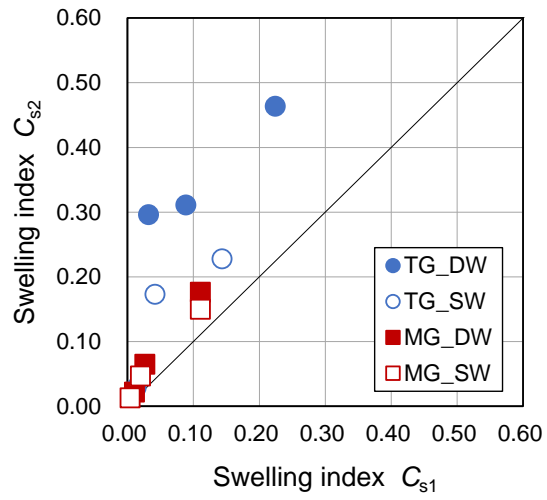


Figure 4-49 Relation between swelling index C_{s1} and C_{s2}

4.6 三軸圧縮試験

4.6.1 試験ケース

TG と MG の 2 種類のベントナイトを対象に、圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。試験ケースは Table 4-25 のとおりである。2 種類のベントナイトについてそれぞれ 3 通りのベントナイト混合率（30%、50%、100%）とし、試験用水にはイオン交換水（DW）と人工海水（SW）を用いた。Table 4-25 に示す含水比、乾燥密度、有効粘土密度は供試体作製時の初期状態における値であり、SW 条件については、4.1.5 項に説明した方法で固相中の質量から塩の質量を除いて補正した値を示している。

Table 4-25 Program of undrained triaxial compression test

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Effective confining pressure (kPa)	Initial condition of test specimen			
				Water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	
TG	TG100	100	DW	1300	34.1	1.310	1.31
		100	DW	2000	34.1	1.310	1.31
	TG050	50	DW	500	19.3	1.611	1.16
		50	DW	2000	19.3	1.611	1.16
	TG030	30	DW	200	14.7	1.691	0.91
		30	DW	2000	14.7	1.689	0.91
	TG100	100	SW	1200	35.4	1.286	1.29
		100	SW	1600	34.2	1.309	1.31
	TG050	100	SW	2000	30.6	1.296	1.30
		50	SW	500	20.2	1.614	1.16
	TG030	50	SW	1300	19.0	1.610	1.16
		50	SW	2000	20.2	1.613	1.16
TG030	30	SW	200	13.4	1.683	0.91	
	30	SW	1100	14.4	1.690	0.91	
MG	MG100	100	DW	500	29.3	1.371	1.37
		100	DW	2000	29.3	1.372	1.37
	MG050	50	DW	200	16.7	1.652	1.20
		50	DW	2000	16.7	1.653	1.20
	MG030	30	DW	100	13.3	1.730	0.95
		30	DW	2000	13.3	1.730	0.95
	MG100	100	SW	500	26.4	1.359	1.36
		100	SW	1300	30.2	1.359	1.36
	MG050	100	SW	2000	30.7	1.356	1.36
		50	SW	200	16.6	1.650	1.20
	MG030	50	SW	1100	17.3	1.650	1.20
		50	SW	2000	16.6	1.651	1.20
MG030	30	SW	100	12.6	1.716	0.94	
	30	SW	1100	14.4	1.726	0.95	
MG030	30	SW	2000	13.9	1.728	0.95	

4.6.2 試験方法

(1) 装置の構成

本研究で使用した三軸圧縮試験装置は Figure 4-50 に示すように、三軸圧力室、セル圧・背圧・負圧供給タンク、圧縮装置、二酸化炭素ボンベから構成される。圧密中および軸圧縮中の供試体の変形は外部変位計、間隙水圧は供試体下部に出来る限り近づけて設置した間隙水圧計、体積変化は吸排水量を排水ビュレットにより計測した。荷重計は三軸圧力室の内部と外部にそれぞれ設置してあり、圧密圧力や軸圧縮力は内部荷重計により測定し、外部荷重計の値は参考とした。Figure 4-51 に三軸圧力室の外観を示す。低い拘束圧を作用させる場合にはアクリル製の三軸圧力室を、高い拘束圧を作用させる場合にはステンレス製の三軸圧力室を使用した。

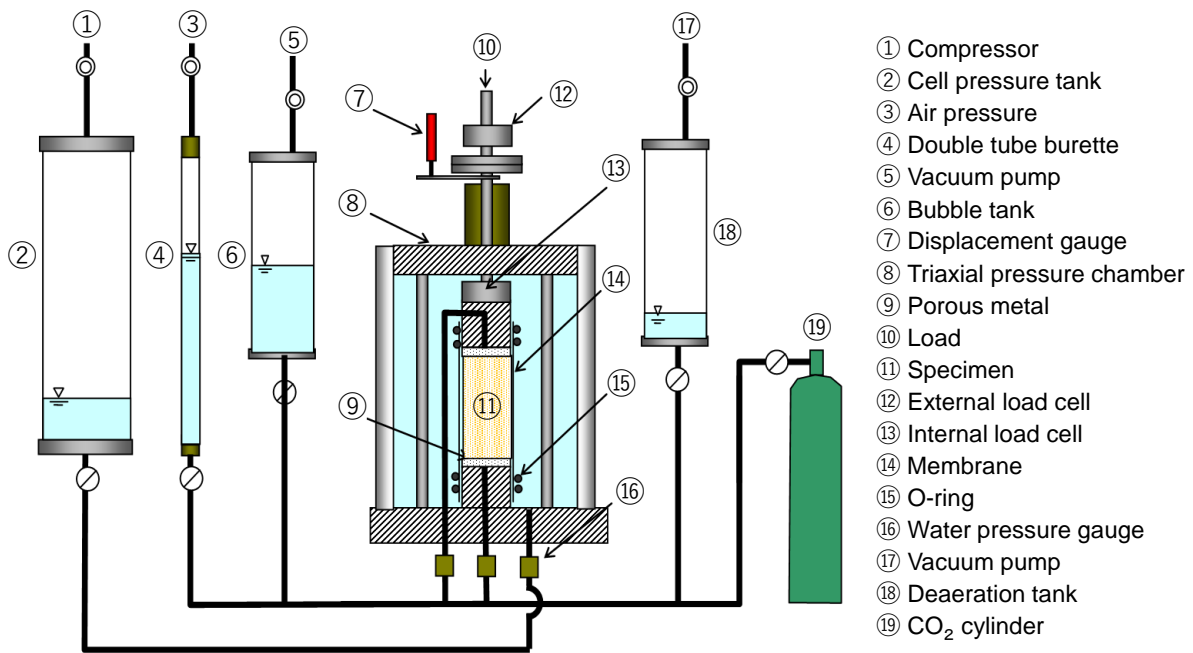
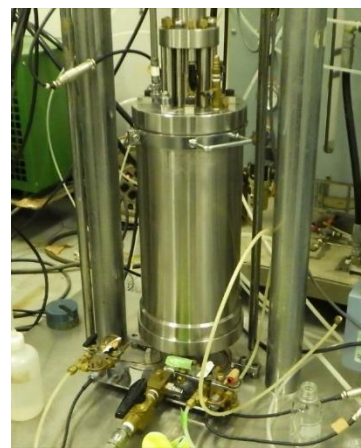


Figure 4-50 Schematic diagram of triaxial compression apparatus



(a) For low pressure



(b) For high pressure

Figure 4-51 Pressure chamber of triaxial compression apparatus

(2) 試験の手順

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験方法」(JGS 0523-2000)を参照して実施した。以下、試験の手順を示す。

はじめに、含水比調整した試料 (DW 条件はイオン交換水, SW 条件は人工海水で含水比調整を実施) を用いて、静的締固めにより所定の乾燥密度で直径 50 mm, 高さ 100 mm の供試体を作製した。供試体の寸法 (直径, 高さ) および湿潤質量を測定した後, ステンレス製の飽和セルに収容し, 水浸脱気法により供試体に給水した。飽和度を高めた供試体を脱型し, 寸法 (直径, 高さ) および湿潤質量を測定した。供試体側面に短冊状の濾紙を巻きつけ, 供試体上下面に濾紙を敷いた状態で, 供試体にラテックス製のメンブレンを被せて三軸圧力室に設置した。メンブレンはキャップとペDESTALに各 2 本の O リングで固定した。

三軸圧力室を三軸圧縮試験機に設置し, 供試体に圧縮力が作用しないように上部載荷板を密着させ, 荷重計と外部変位計の初期値を記録した後, 圧力室下部より注水を開始した。この時, 圧力室上部は大気開放とし, 上部からの漏水が確認された時点で注水を終了し, 上部コックを閉めた。ペDESTALを通して 5 kPa 程度の圧力で二酸化炭素を通水経路および供試体に流し, 60 分程度循環させた。この時の流量は気泡槽での気泡発生状況を確認しながら行った。二酸化炭素を止め, 供試体に脱気水を給水した。この時の圧力は 5 kPa 程度とし, バルブをゆっくりと開くことで通水経路を水で満たすように流した。配管を水で満たした後, 間隙水圧計の初期値を計測し, セル圧と供試体内部との圧力差が 20 kPa になるまでセル圧を上昇させた。具体的には, セル圧 20 kPa, 背圧 0 kPa とし, この圧力差を保ったまま背圧 600 kPa まで段階的に増圧した。

背圧を高めた後は即時に非排水状態にして, 所定の圧密圧力となるようセル圧を高めた。圧密過程における初期値として外部変位計と排水ビュレットの値を記録し, 排水状態にして等方圧密を開始した。圧密中は圧密時間, 排水量, 供試体の鉛直変位量を計測した。圧密終了は 3 t 法により判定した。圧密終了の判定後には再び非排水状態にし, 過剰間隙水圧の上昇がないことを確認し, 圧密を終了した。

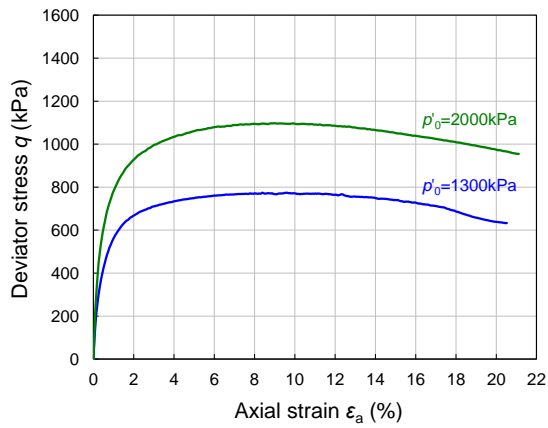
圧密後, 供試体の飽和状態を確認するため, 間隙圧係数 B 値を測定した。ここでは, 非排水状態でセル圧を減圧した際の間隙水圧の変化を測定することで B 値を求め, この値が 0.95 以上であることで飽和とみなした。飽和確認後, 非排水状態を維持したまま, 再びセル圧を減圧前の圧密圧力まで増圧した。

圧密後, 非排水条件のもと, 0.01 %/min の軸ひずみ速度で軸圧縮を行った。軸圧縮中は鉛直変位量, 間隙水圧, 軸荷重を計測し供試体の軸ひずみが 20%に達したら圧縮を終了した。圧縮終了後, 供試体の破壊状況を写真撮影し, 供試体を炉乾燥させて乾燥重量を測定した。

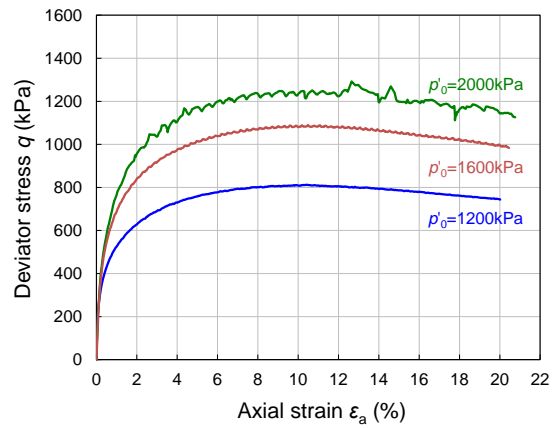
結果の整理においては, 軸差応力 q ($=\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ ε_a の関係, モールの応力円, 軸差応力 q と平均有効主応力 p' ($=(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$) の関係における有効応力経路を作図し, モールの応力円から内部摩擦角 ϕ および粘着力 c' , 有効応力経路における限界状態線の傾きを限界状態パラメータ M として取得した。

4.6.3 試験結果

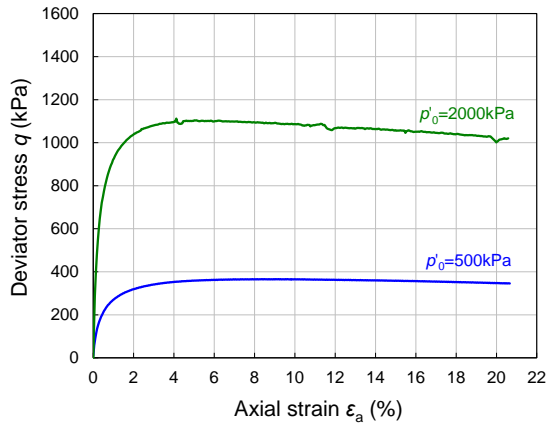
軸差応力と軸ひずみの関係をFigure 4-52, Figure 4-53に, モールの応力円をFigure 4-54, Figure 4-55に, 有効応力経路をFigure 4-56, Figure 4-57に示す。



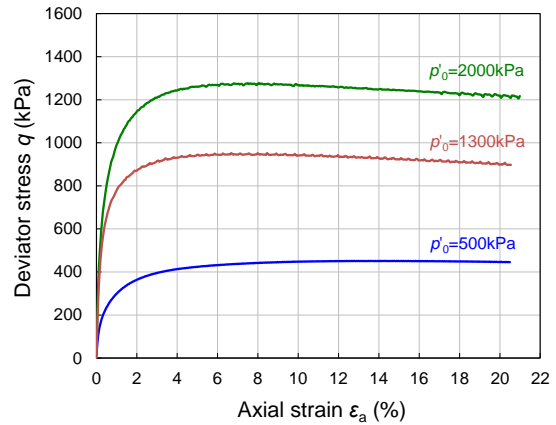
(a) TG100-DW



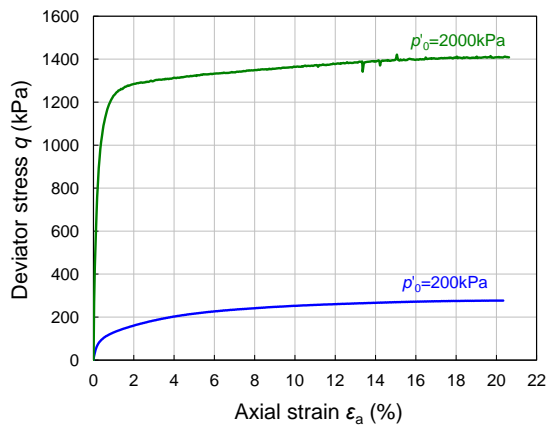
(d) TG100-SW



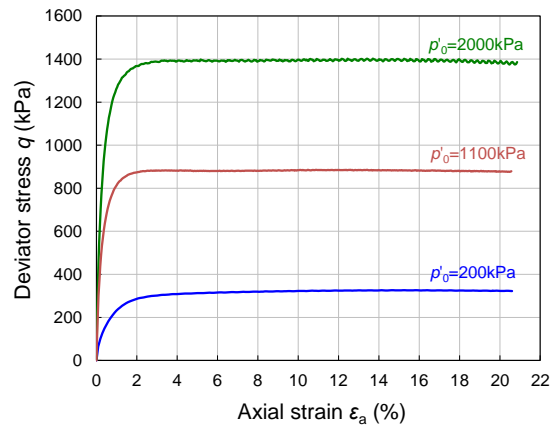
(b) TG050-DW



(e) TG050-SW

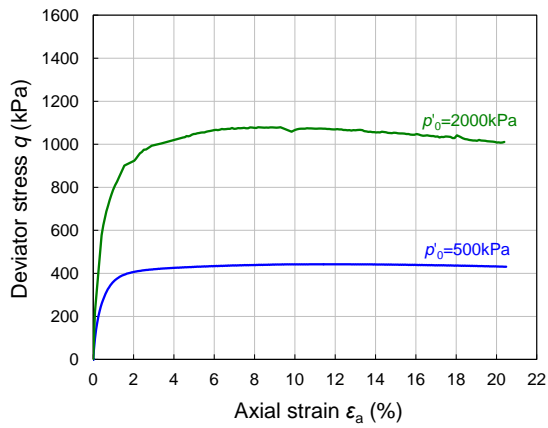


(c) TG030-DW

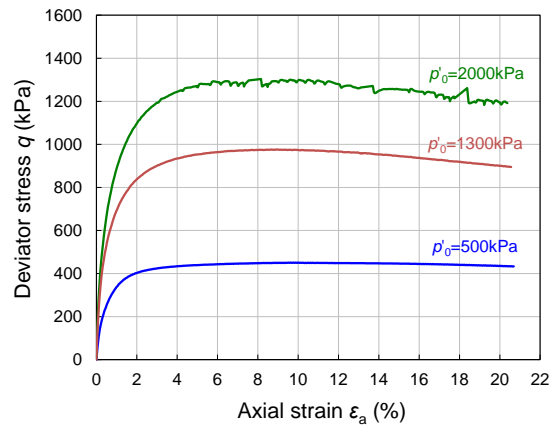


(f) TG030-SW

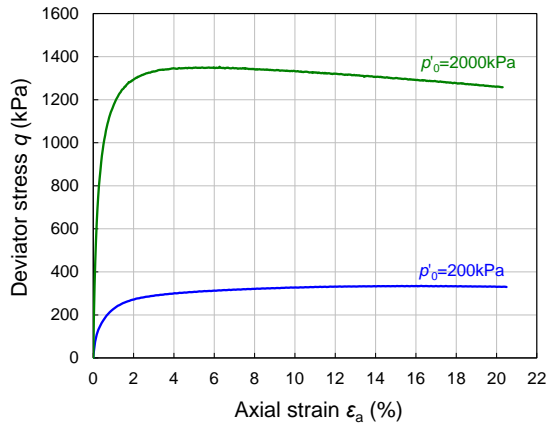
Figure 4-52 Relation between deviator stress and axial strain (TG)



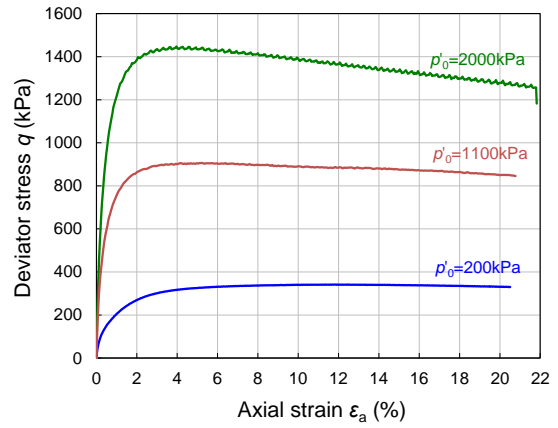
(a) MG100-DW



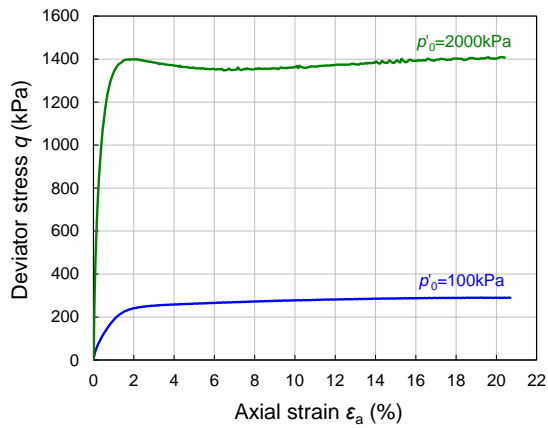
(d) MG100-SW



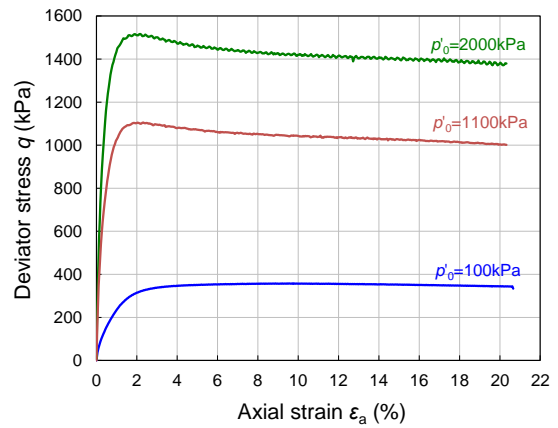
(b) MG050-DW



(e) MG050-SW

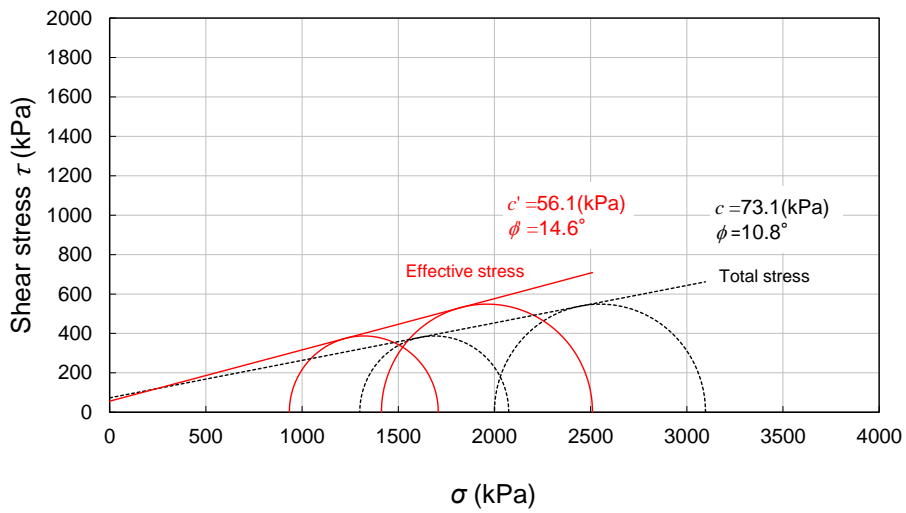


(c) MG030-DW

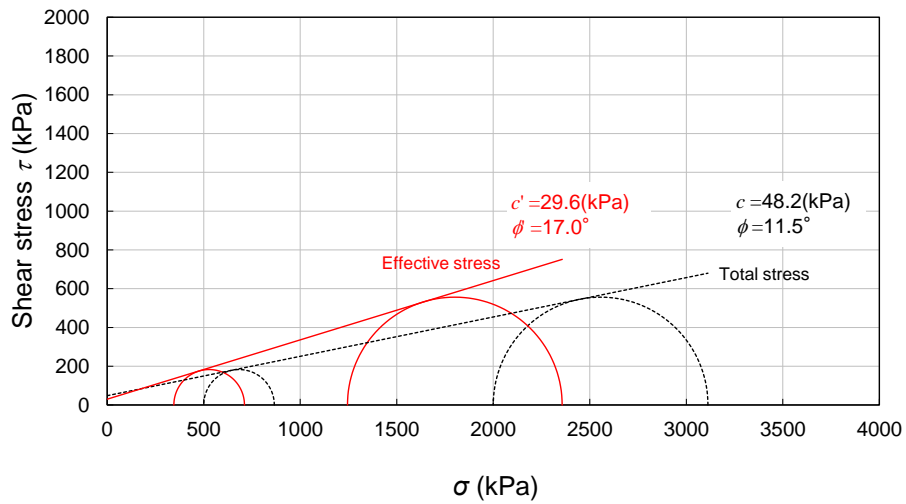


(f) MG030-SW

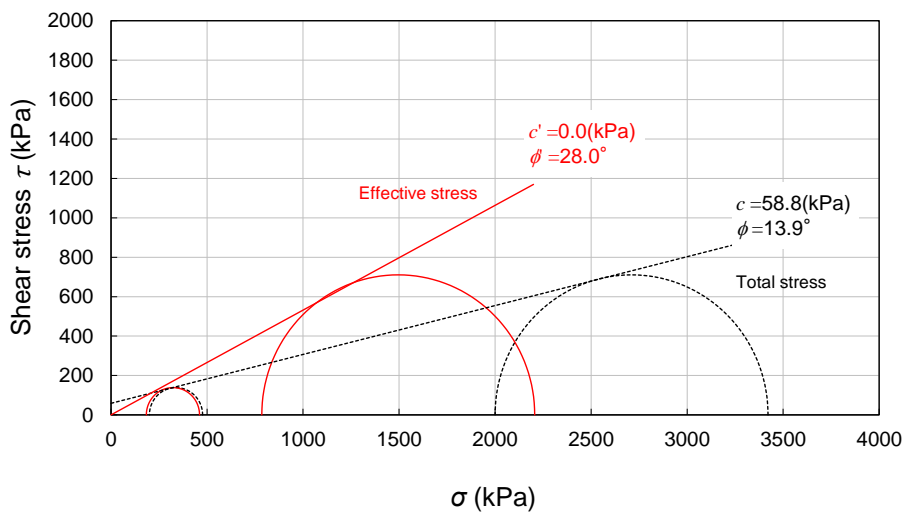
Figure 4-53 Relation between deviator stress and axial strain (MG)



(a) TG100-DW

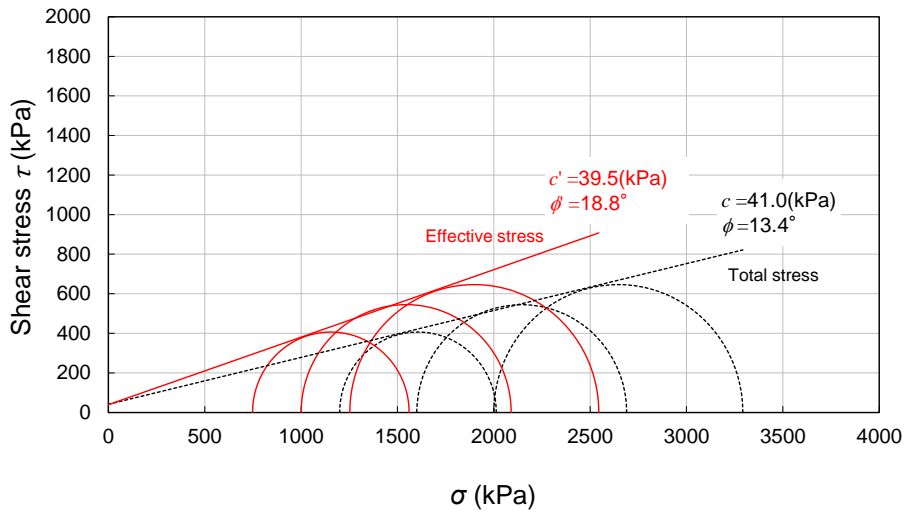


(b) TG050-DW

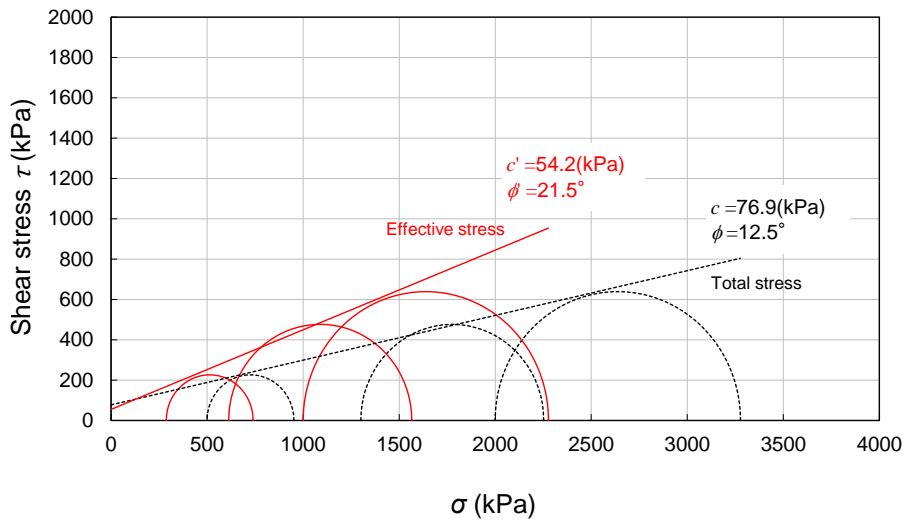


(c) TG030-DW

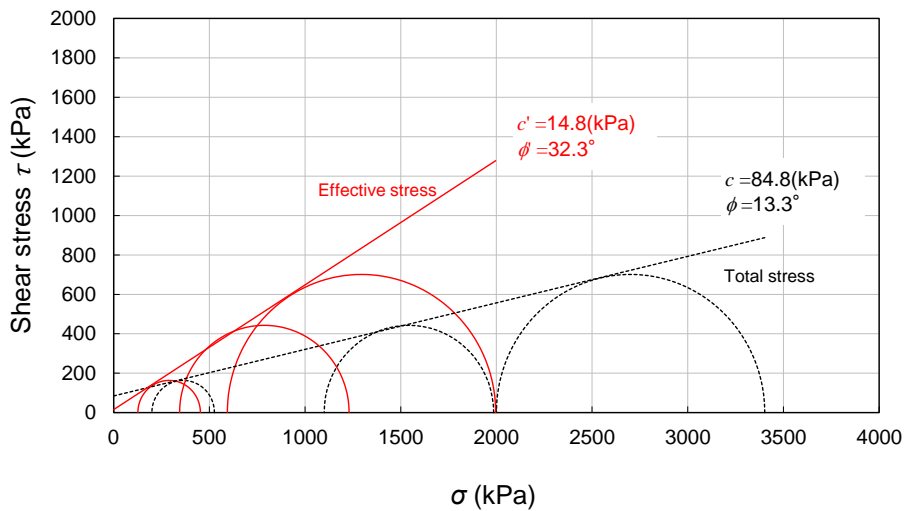
Figure 4-54 Mohr's stress circle of TG (1/2)



(d) TG100-SW

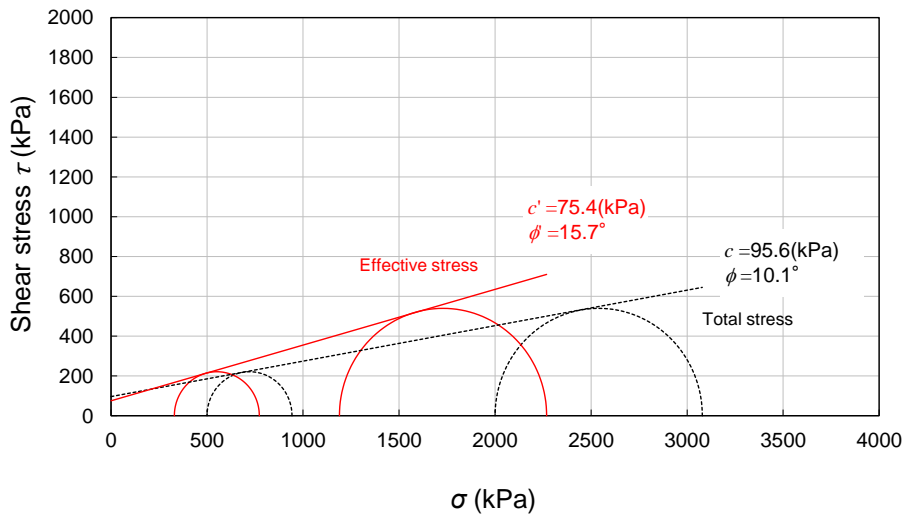


(e) TG050-SW

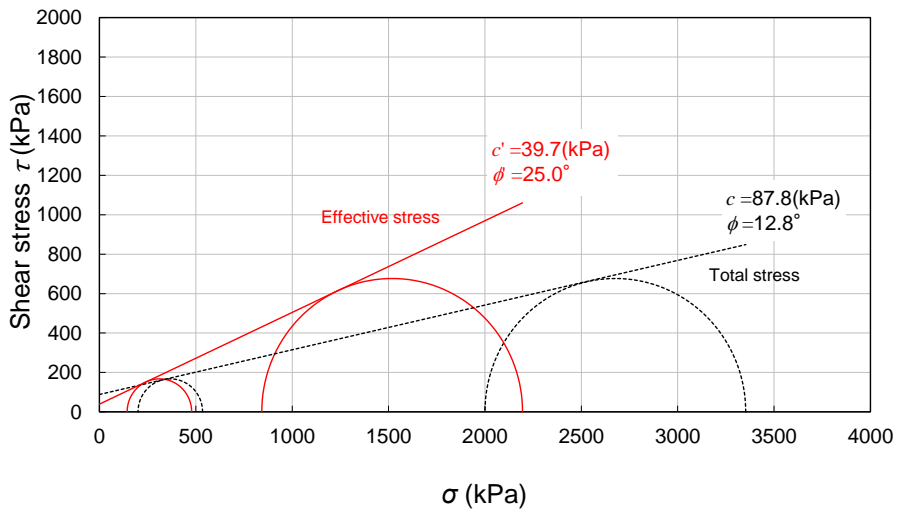


(f) TG030-SW

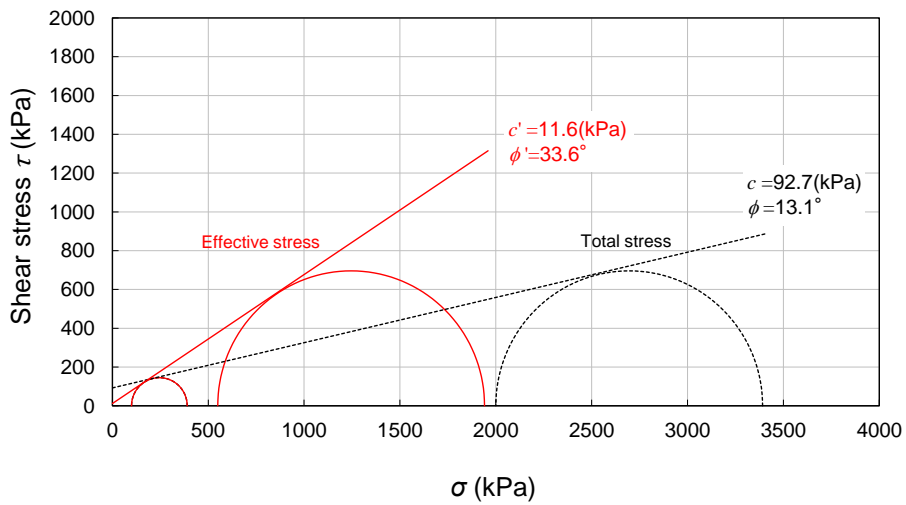
Figure 4-54 Mohr's stress circle of TG (2/2)



(a) MG100-DW

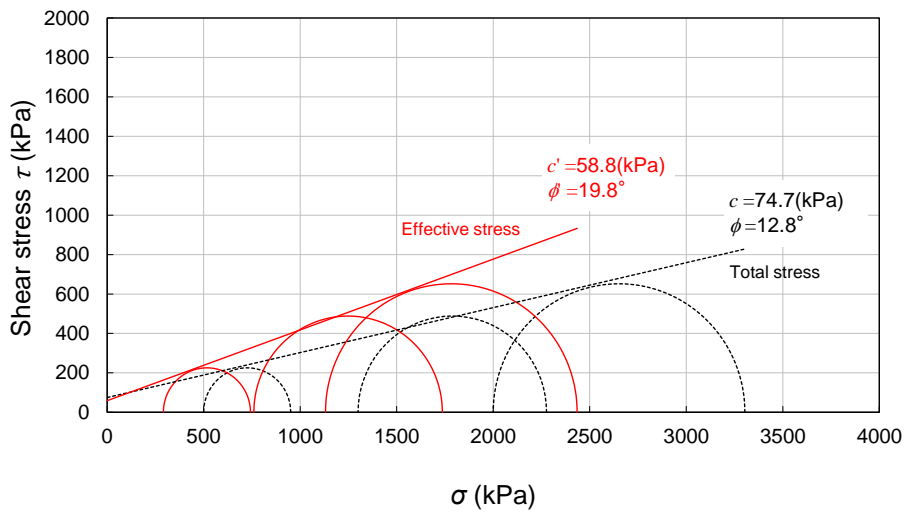


(b) MG050-DW

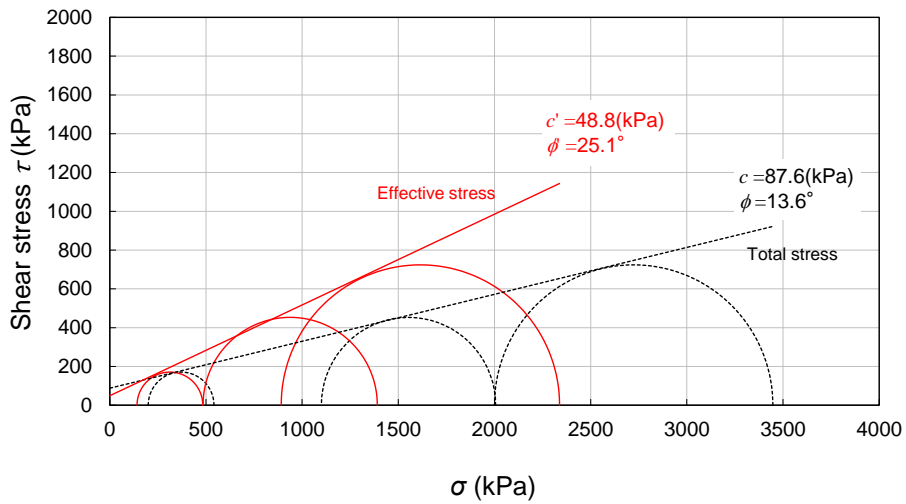


(c) MG030-DW

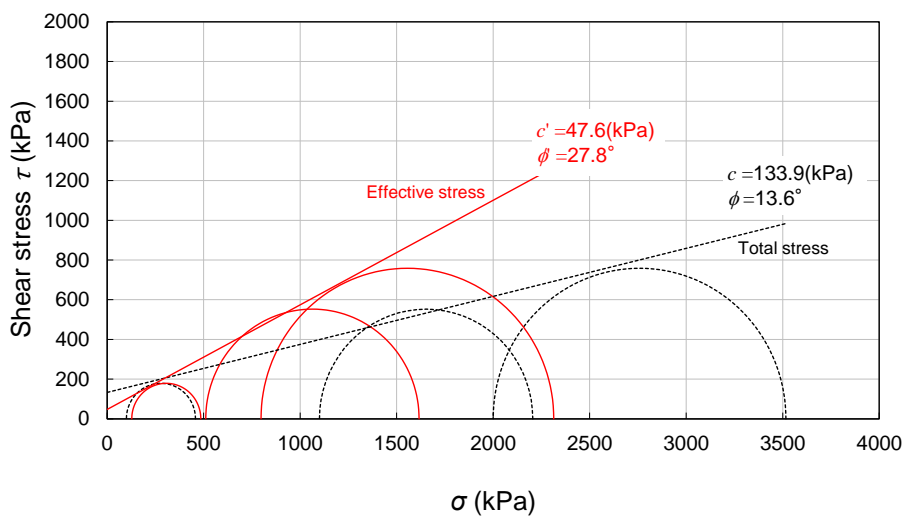
Figure 4-55 Mohr's stress circle of MG (1/2)



(d) MG100-SW

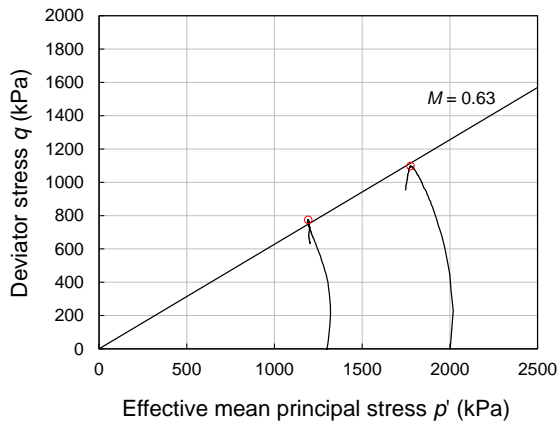


(e) MG050-SW

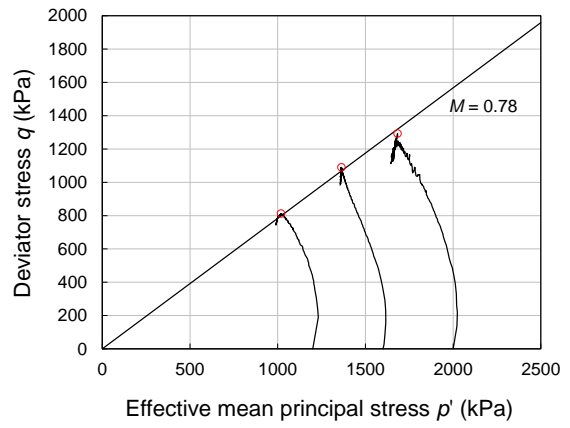


(f) MG030-SW

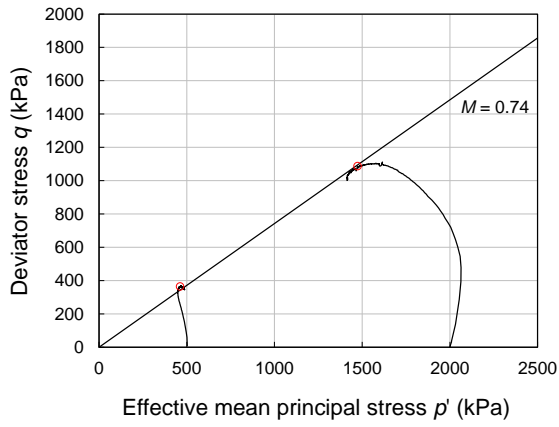
Figure 4-55 Mohr's stress circle of MG (2/2)



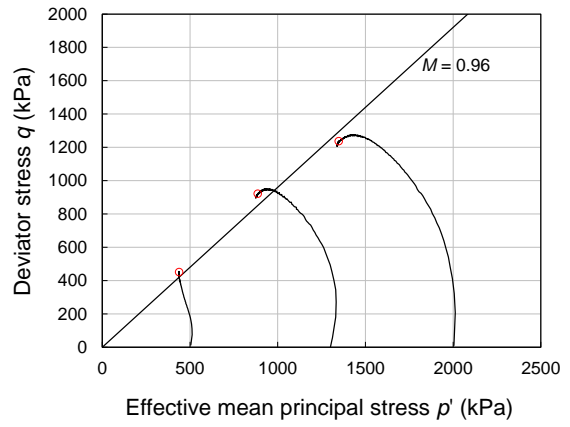
(a) TG100-DW



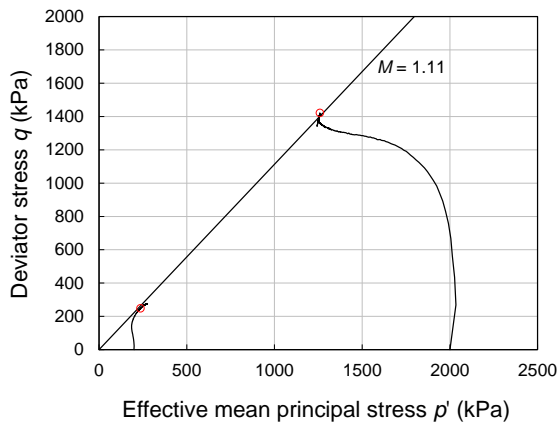
(d) TG100-SW



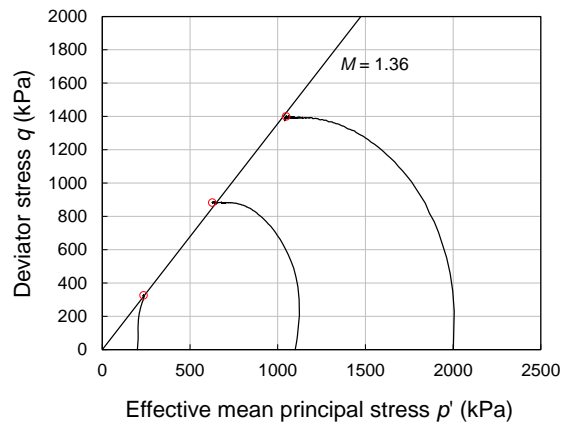
(b) TG050-DW



(e) TG050-SW

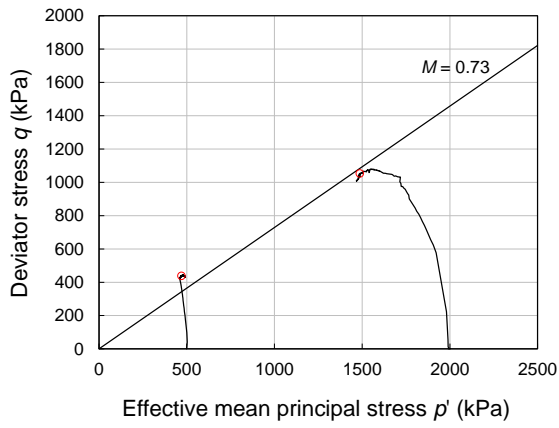


(c) TG030-DW

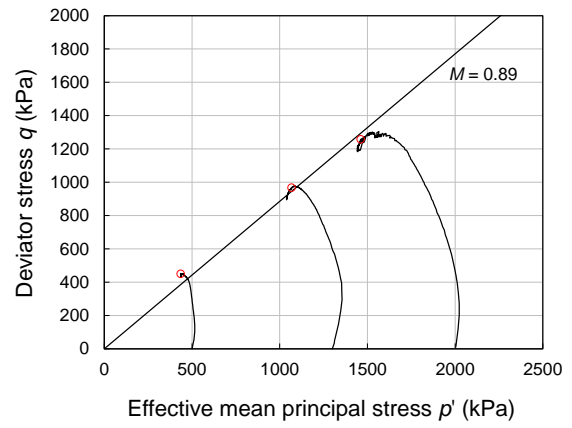


(f) TG030-SW

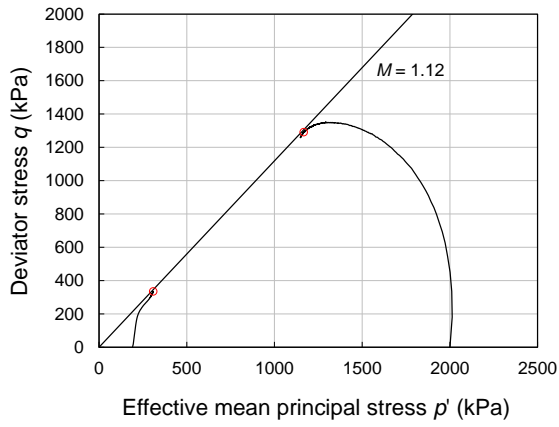
Figure 4-56 Effective stress path of TG



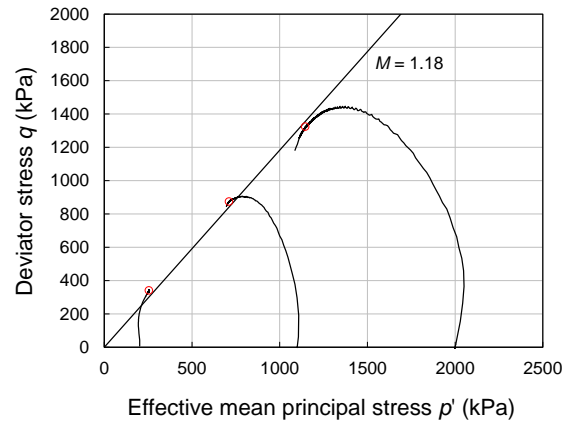
(a) MG100-DW



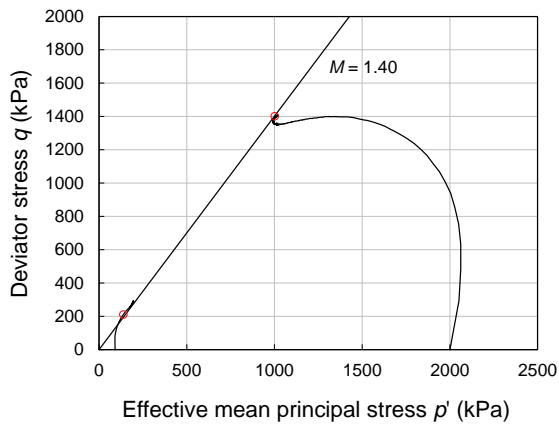
(d) MG100-SW



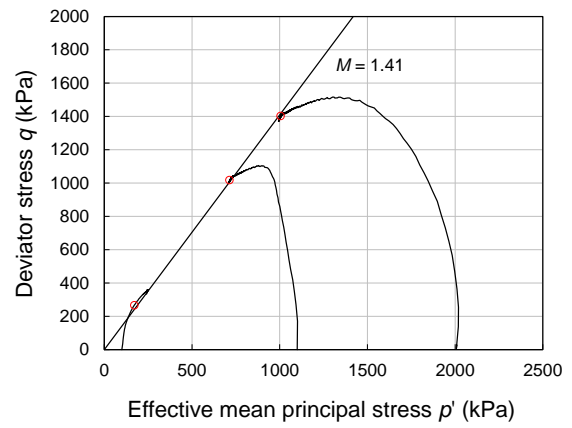
(b) MG050-DW



(e) MG050-SW



(c) MG030-DW



(f) MG030-SW

Figure 4-57 Effective stress path of MG

以上の三軸圧縮試験結果から求めた TG および MG の強度定数などの一覧を、Table 4-26, Table 4-27 にそれぞれまとめた。

Figure 4-58 に軸差応力の最大値 q_{\max} を有効拘束圧 p'_0 で正規化した最大軸差応力比 q_{\max}/p'_0 と有効拘束圧 p'_0 の関係を示す。 q_{\max}/p'_0 は有効拘束圧が高くなるほど低下する傾向を表した。この低下傾向であるが、 p'_0 が 500 kPa 以上の場合には拘束圧に対する q_{\max}/p'_0 の差は大きくなかった。一方で、 p'_0 が 200 kPa 以下と低い場合には、 q_{\max}/p'_0 はそれ以上の拘束圧に比べて顕著に高くなる傾向にあることが分かった。試験では供試体の膨潤圧以上の有効拘束圧を加えるように条件設定したが、Figure 4-56, Figure 4-57 に示した有効応力経路から、低い拘束圧の条件では正のダイラタンシーを示す過圧密の挙動が認められたことから、膨潤圧に近い拘束圧では正規圧密状態になっていないことが考えられた。Figure 4-59 に q_{\max}/p'_0 とベントナイト混合率の関係を、Figure 4-60 に q_{\max}/p'_0 と供試体製作時の乾燥密度である初期乾燥密度との関係を、いずれも有効拘束圧 2000 kPa の場合について示した。4.1.3 項の供試体仕様の考え方の中で述べたように、本研究では異なるベントナイト混合率に対して締固めエネルギーが同程度になるように、最大乾燥密度を参考に供試体の密度を設定したが、 q_{\max}/p'_0 は概ねベントナイト混合率に対しては低下、乾燥密度に対しては増加する傾向を示した。また、 q_{\max}/p'_0 は TG においてはベントナイト混合率 50% と 100% で同程度であるのに対し、MG においては q_{\max}/p'_0 はベントナイト混合率と乾燥密度との間にそれぞれ比例的な関係を認めることができた。イオン交換水と人工海水との条件の比較では、最大軸差応力は人工海水のほうが高い値を示す傾向にあるが、水質による差は大きくなかった。

有効応力に対する強度定数とベントナイト混合率の関係として、Figure 4-61 に粘着力 c' との関係を示す。Figure 4-62 に内部摩擦角 ϕ との関係を示す。さらに、Figure 4-63 に限界状態パラメータ M とベントナイト混合率の関係を示す。ベントナイト混合率が大きくなると、概ね、粘着力は高くなる傾向を、内部摩擦角と限界状態パラメータは低くなる傾向を示した。これらは、異なるベントナイト混合率に対して、締固めエネルギーを同程度とした場合の試験結果であることを注意する必要があると考えられた。

Figure 4-64 に限界状態パラメータ M と初期乾燥密度との関係をすべての試験ケースについて比較して示す。 M は乾燥密度とともに増加する傾向を示した。その値はイオン交換水の場合に比べて人工海水のほうがやや高い値を示した。また、TG と MG とベントナイトの種類が違っても、乾燥密度との関係において M は同程度の値を示していることが分かった。

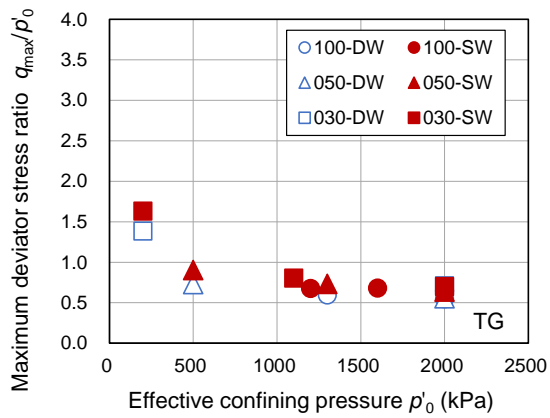
Figure 4-65 ではベントナイト混合率 100% のケースについて、イオン交換水と人工海水の有効応力経路を比較して示した。上述したように、 M は人工海水の場合のほうがイオン交換水の場合よりもやや大きい。限界状態に至る過程のイオン交換水と人工海水の経路は、ほぼ一致していることが分かった。このように、試験水によるせん断挙動への影響は小さいようであった。

Table 4-26 Undrained triaxial compression test results (TG)

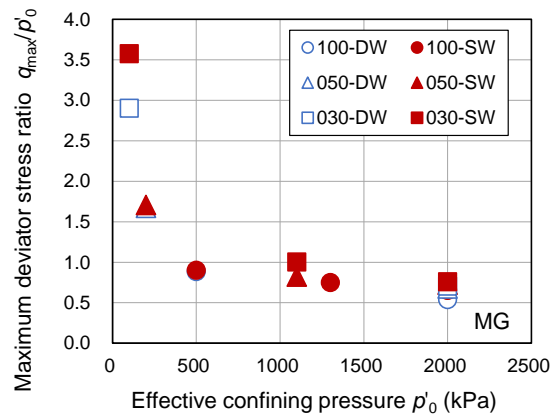
Test case	Mixture ratio of bentonite	Initial condition		Effective confining pressure	Maximum deviator stress	Maximum deviator stress ratio	Total stress		Effective stress		Critical state parameter																																																																																	
		Dry density	Effective clay dry density				Cohesion	Internal friction angle	Cohesion	Internal friction angle																																																																																		
		(%)	(Mg/m ³)	(Mg/m ³)	p'_0 (kPa)	q_{max} (kPa)	q_{max} / p'_0 (-)	c (kPa)	ϕ (deg)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	M (-)																																																																																
TG100-DW	100	1.31	1.31	1300	774	0.60	73.1	10.8	56.1	14.6	0.63																																																																																	
				2000	1097	0.55						TG050-DW	50	1.61	1.16	500	366	0.73	48.2	11.5	29.6	17.0	0.74	2000	1112	0.56	TG030-DW	30	1.69	0.91	200	277	1.38	58.8	13.9	0.0	28.0	1.11	2000	1421	0.71	TG100-SW	100	1.30	1.30	1200	813	0.68	41.0	13.4	39.5	18.8	0.78	2000	1292	0.65	TG050-SW	50	1.61	1.16	500	452	0.90	76.9	12.5	54.2	21.5	0.96	1300	953	0.73	TG030-SW	30	1.69	0.91	2000	1277	0.64	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	200	327	1.63	TG030-SW	30	1.69	0.91	1100	886
TG050-DW	50	1.61	1.16	500	366	0.73	48.2	11.5	29.6	17.0	0.74																																																																																	
				2000	1112	0.56						TG030-DW	30	1.69	0.91	200	277	1.38	58.8	13.9	0.0	28.0	1.11	2000	1421	0.71	TG100-SW	100	1.30	1.30	1200	813	0.68	41.0	13.4	39.5	18.8	0.78	2000	1292	0.65	TG050-SW	50	1.61	1.16	500	452	0.90	76.9	12.5	54.2	21.5	0.96	1300	953	0.73	TG030-SW	30	1.69	0.91	2000	1277	0.64	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	200	327	1.63	TG030-SW	30	1.69	0.91	1100	886	0.81	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	2000	1402	0.70						
TG030-DW	30	1.69	0.91	200	277	1.38	58.8	13.9	0.0	28.0	1.11																																																																																	
				2000	1421	0.71						TG100-SW	100	1.30	1.30	1200	813	0.68	41.0	13.4	39.5	18.8	0.78	2000	1292	0.65	TG050-SW	50	1.61	1.16	500	452	0.90	76.9	12.5	54.2	21.5	0.96	1300	953	0.73	TG030-SW	30	1.69	0.91	2000	1277	0.64	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	200	327	1.63	TG030-SW	30	1.69	0.91	1100	886	0.81	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	2000	1402	0.70																					
TG100-SW	100	1.30	1.30	1200	813	0.68	41.0	13.4	39.5	18.8	0.78																																																																																	
				2000	1292	0.65						TG050-SW	50	1.61	1.16	500	452	0.90	76.9	12.5	54.2	21.5	0.96	1300	953	0.73	TG030-SW	30	1.69	0.91	2000	1277	0.64	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	200	327	1.63	TG030-SW	30	1.69	0.91	1100	886	0.81	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	2000	1402	0.70																																				
TG050-SW	50	1.61	1.16	500	452	0.90	76.9	12.5	54.2	21.5	0.96																																																																																	
				1300	953	0.73						TG030-SW	30	1.69	0.91	2000	1277	0.64	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	200	327	1.63	TG030-SW	30	1.69	0.91	1100	886	0.81	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	2000	1402	0.70																																																			
TG030-SW	30	1.69	0.91	2000	1277	0.64	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36																																																																																	
				200	327	1.63						TG030-SW	30	1.69	0.91	1100	886	0.81	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36	2000	1402	0.70																																																																		
TG030-SW	30	1.69	0.91	1100	886	0.81	84.8	13.3	14.8	32.3	1.36																																																																																	
				2000	1402	0.70																																																																																						

Table 4-27 Undrained triaxial compression test results (MG)

Test case	Mixture ratio of bentonite	Initial condition		Effective confining pressure	Maximum Deviator stress	Maximum Deviator stress ratio	Total stress		Effective stress		Critical state parameter																																																																																										
		Dry density	Effective clay dry density				Cohesion	Internal friction angle	Cohesion	Internal friction angle																																																																																											
		(%)	(Mg/m ³)	(Mg/m ³)	p'_0	q_{max}	q_{max} / p'_0	c	ϕ	c'	ϕ'	M																																																																																									
			(kPa)	(kPa)	(-)	(kPa)	(deg)	(kPa)	(deg)	(-)																																																																																											
MG100-DW	100	1.37	1.37	500	442	0.88	95.6	10.1	75.4	15.7	0.73																																																																																										
				2000	1079	0.54						MG050-DW	50	1.65	1.20	200	335	1.67	87.8	12.8	39.7	25.0	1.12	2000	1353	0.68	MG030-DW	30	1.73	0.95	100	290	2.90	92.7	13.1	11.6	33.6	1.40	2000	1410	0.70	MG100-SW	100	1.36	1.36	500	451	0.90	74.7	12.8	58.8	19.8	0.89	2000	1304	0.65	MG050-SW	50	1.65	1.20	200	342	1.71	87.6	13.6	48.8	25.1	1.18	1100	906	0.82	MG030-SW	30	1.72	0.95	2000	1447	0.72	133.9	13.6	47.6	27.8	1.41	100	358	3.58					1100	1105	1.00								
MG050-DW	50	1.65	1.20	200	335	1.67	87.8	12.8	39.7	25.0	1.12																																																																																										
				2000	1353	0.68						MG030-DW	30	1.73	0.95	100	290	2.90	92.7	13.1	11.6	33.6	1.40	2000	1410	0.70	MG100-SW	100	1.36	1.36	500	451	0.90	74.7	12.8	58.8	19.8	0.89	2000	1304	0.65	MG050-SW	50	1.65	1.20	200	342	1.71	87.6	13.6	48.8	25.1	1.18	1100	906	0.82	MG030-SW	30	1.72	0.95	2000	1447	0.72	133.9	13.6	47.6	27.8	1.41	100	358	3.58					1100	1105	1.00										2000	1517	0.76											
MG030-DW	30	1.73	0.95	100	290	2.90	92.7	13.1	11.6	33.6	1.40																																																																																										
				2000	1410	0.70						MG100-SW	100	1.36	1.36	500	451	0.90	74.7	12.8	58.8	19.8	0.89	2000	1304	0.65	MG050-SW	50	1.65	1.20	200	342	1.71	87.6	13.6	48.8	25.1	1.18	1100	906	0.82	MG030-SW	30	1.72	0.95	2000	1447	0.72	133.9	13.6	47.6	27.8	1.41	100	358	3.58					1100	1105	1.00										2000	1517	0.76																										
MG100-SW	100	1.36	1.36	500	451	0.90	74.7	12.8	58.8	19.8	0.89																																																																																										
				2000	1304	0.65						MG050-SW	50	1.65	1.20	200	342	1.71	87.6	13.6	48.8	25.1	1.18	1100	906	0.82	MG030-SW	30	1.72	0.95	2000	1447	0.72	133.9	13.6	47.6	27.8	1.41	100	358	3.58					1100	1105	1.00										2000	1517	0.76																																									
MG050-SW	50	1.65	1.20	200	342	1.71	87.6	13.6	48.8	25.1	1.18																																																																																										
				1100	906	0.82						MG030-SW	30	1.72	0.95	2000	1447	0.72	133.9	13.6	47.6	27.8	1.41	100	358	3.58					1100	1105	1.00										2000	1517	0.76																																																								
MG030-SW	30	1.72	0.95	2000	1447	0.72	133.9	13.6	47.6	27.8	1.41																																																																																										
				100	358	3.58										1100	1105	1.00										2000	1517	0.76																																																																							
				1100	1105	1.00																																																																																															
				2000	1517	0.76																																																																																															

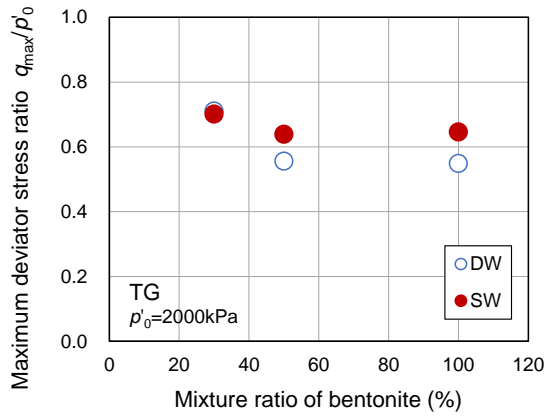


(a) TG

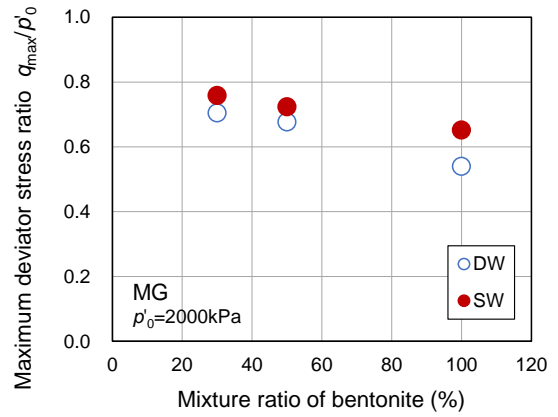


(b) MG

Figure 4-58 Relation between maximum deviator stress ratio and effective confining pressure

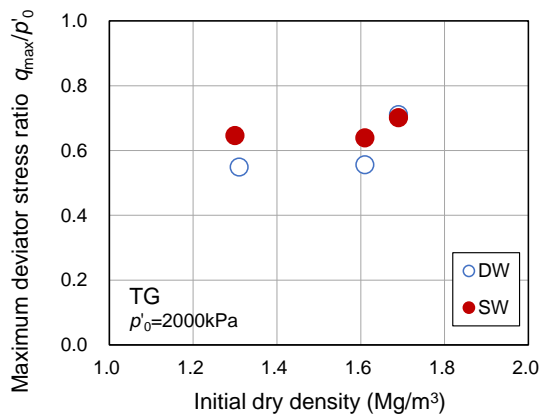


(a) TG

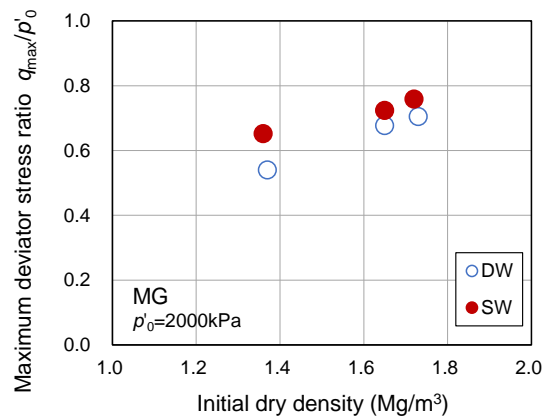


(b) MG

Figure 4-59 Relation between maximum deviator stress ratio and mixture ratio of bentonite ($p'_0=2000$ kPa)

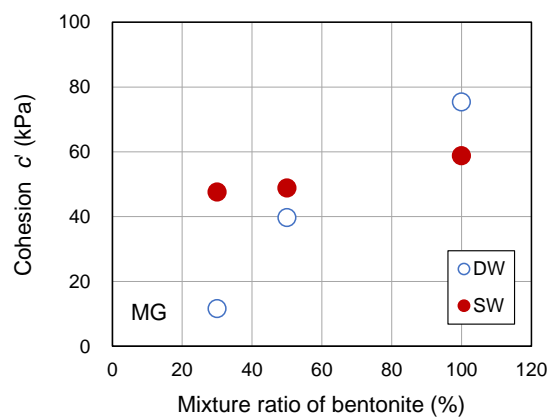
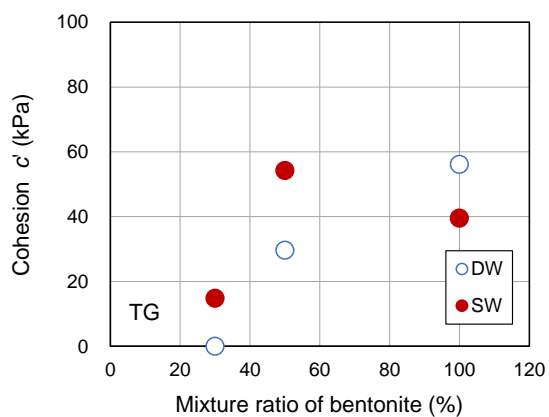


(a) TG



(b) MG

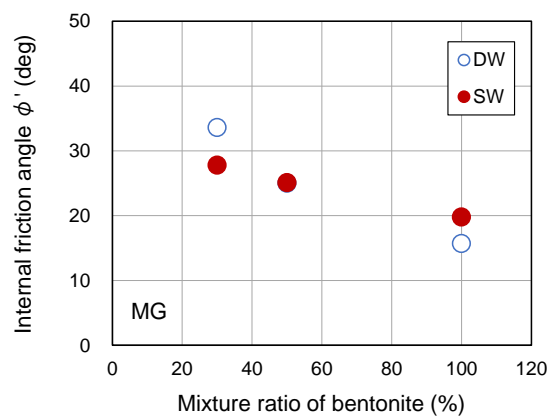
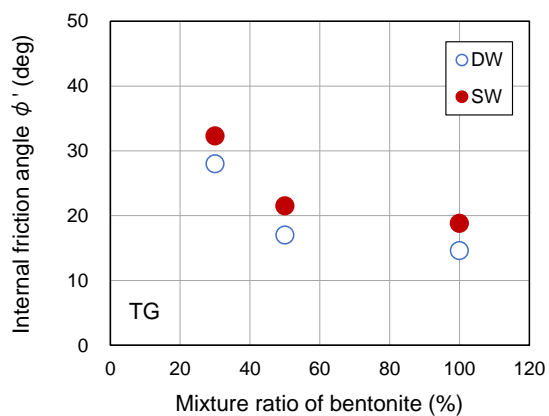
Figure 4-60 Relation between maximum deviator stress ratio and initial dry density ($p'_0=2000$ kPa)



(a) TG

(b) MG

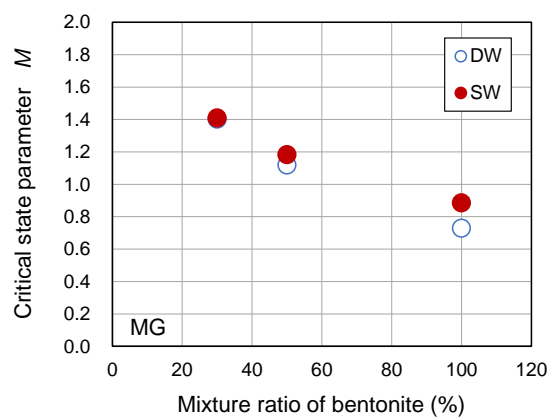
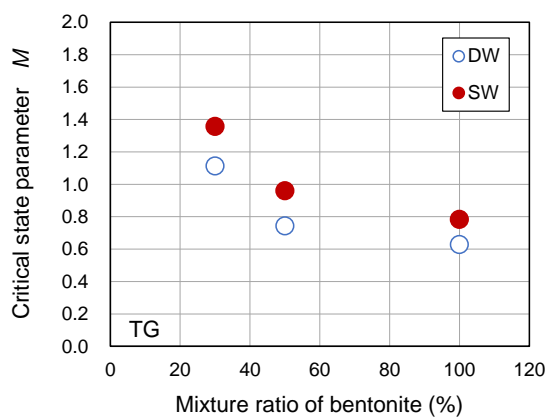
Figure 4-61 Relation between cohesion and mixture ratio of bentonite



(a) TG

(b) MG

Figure 4-62 Relation between maximum internal friction angle and mixture ratio of bentonite



(a) TG

(b) MG

Figure 4-63 Relation between critical state parameter and mixture ratio of bentonite

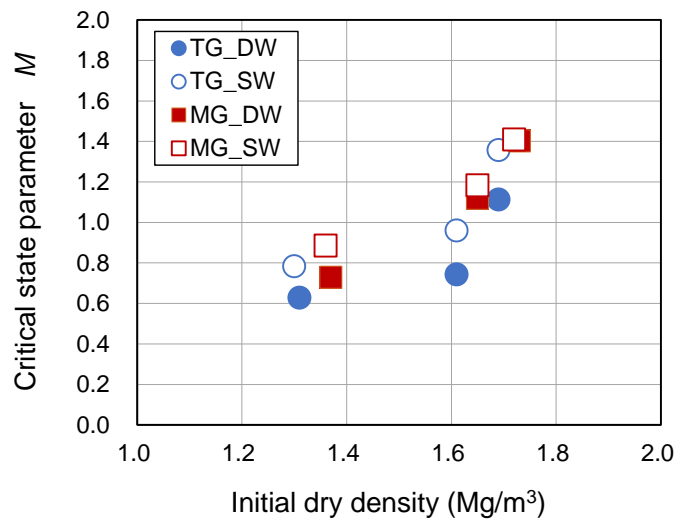
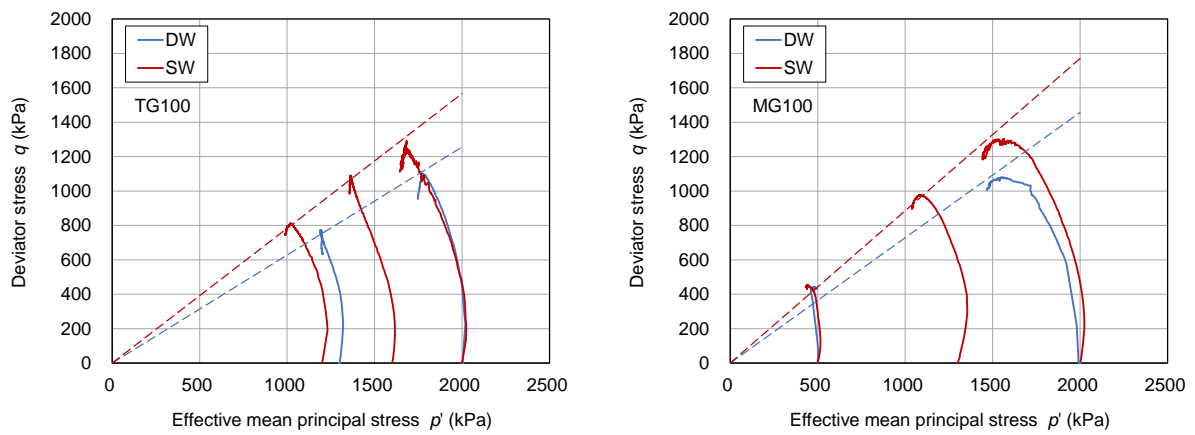


Figure 4-64 Relation between critical state parameter and initial dry density



(a) TG100

(b) MG100

Figure 4-65 Comparison of effective stress paths under DW and SW conditions

4.7 保水性試験

4.7.1 試験ケース

緩衝材の再冠水に関する理解や予測など，緩衝材の過渡的な状態から長期にわたる挙動評価を実施するうえでベントナイトの水分保持特性は重要である。そこで，2～3種類のベントナイトを対象に，含水比と土中水のポテンシャルとの関係で表される水分特性曲線の取得を目的として，蒸気圧法，サイクロメータ法，加圧板法による保水性試験を実施した。試験ケースの一覧を蒸気圧法，サイクロメータ法，加圧板法について Table 4-28, Table 4-29, Table 4-30 にそれぞれ示す。サイクロメータ法に関しては，測定原理の異なる熱電対式の測定装置と冷却鏡露点法の測定装置の2種類の装置を用いた（以下，熱電対式測定，冷却鏡露点法測定という）。蒸気圧法とサイクロメータ法による試験は3種類のベントナイト（TG, MG, KV），加圧板法による試験は2種類のベントナイト（TG, MG）に対して実施した。また，3通りのベントナイト混合率（30%，50%，100%）を設定し，試験用水にはイオン交換水（DW）と人工海水（SW）を用いた。表中の含水比であるが，SW条件については，4.1.5項に説明した方法で固相中の質量から塩の質量を除いて補正した値を示している。Table 4-30 に示す加圧板法による試験の含水比，乾燥密度，有効粘土密度は供試体作製時の初期状態における値である。

Table 4-28 Program of water retention test (Vapor pressure method)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Sample preparation	Potential range (kPa)	
TG	TG100	100	-	Bentonite powder in natural water content	-2830 to -296000
	TG050	50	-	Mixing of bentonite and sand in natural water content	
	TG030	30	-		
MG	MG100	100	-	Bentonite powder in natural water content	-2830 to -296000
	MG050	50	-	Mixing of bentonite and sand in natural water content	
	MG030	30	-		
KV	KV100	100	-	Bentonite powder in natural water content	-2830 to -296000

Table 4-29 Program of water retention test (Psychrometer method)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Water content (%)		
			Thermocouple psychrometer	Chilled mirror hygrometer	
TG	TG100	100	DW	30.7 to 46.6	1.1 to 46.1
	TG050	50	DW	13.0 to 23.5	0.9 to 24.6
	TG030	30	DW	8.4 to 18.1	0.4 to 20.5
	TG100	100	SW	34.2 to 40.6	1.3 to 40.1
	TG050	50	SW	19.1 to 23.8	1.1 to 23.6
	TG030	30	SW	12.6 to 20.5	1.1 to 20.4
MG	MG100	100	DW	21.6 to 41.7	1.5 to 45.8
	MG050	50	DW	10.0 to 19.9	2.7 to 21.9
	MG030	30	DW	6.6 to 16.8	0.7 to 18.9
	MG100	100	SW	29.7 to 40.1	1.7 to 39.6
	MG050	50	SW	13.4 to 24.4	1.4 to 24.2
	MG030	30	SW	10.0 to 20.7	1.1 to 20.6
KV	KV100	100	DW	20.3 to 36.9	1.1 to 46.0

Table 4-30 Program of water retention test (Pressure plate method)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Solution	Initial condition of test specimen			
			Water content (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	
TG	TG100	100	DW	33.6	1.307	1.31
	TG050	50	DW	19.0	1.609	1.15
	TG030	30	DW	14.4	1.688	0.91
	TG030	30	SW	15.2	1.690	0.91
MG	MG100	100	DW	29.8	1.368	1.37
	MG050	50	DW	16.3	1.650	1.20
	MG030	30	DW	13.5	1.730	0.95
	MG030	30	SW	14.2	1.729	0.95

4.7.2 試験方法

保水性試験では、蒸気圧法、サイクロメータ法、加圧板法の3種類の測定方法を用いた。また、サイクロメータ法に関しては、熱電対式測定と冷却鏡露点法測定の測定原理の異なる2種類の装置を用いた。これらの測定方法や測定機器の違いにより、土中水ポテンシャルの測定可能範囲が異なる。蒸気圧法やサイクロメータ法は浸透ポテンシャルとマトリックポテンシャルの和である化学ポテンシャルを測定できるのに対し、加圧板法ではマトリックポテンシャルのみが測定可能である。一つの方法で水分特性曲線を描くことは困難であるため、これらの複数の測定手法を併用した。以下、蒸気圧法、サイクロメータ法、加圧板法について試験方法を示す。

(1) 蒸気圧法

蒸気圧法による土中水のポテンシャル測定は、地盤工学会基準「土の保水性試験方法」(JGS 0151-2009)を参考にした。この方法では所定の土中水のポテンシャルに相当する塩の飽和溶液を準備し、デシケーターの底に設置する。本試験で使用した塩の飽和溶液は Table 4-31 に示すとおりである。溶液を常に飽和に保つため、溶液中に未溶解の結晶が残っている状態で使用した。試料をガラスシャーレに薄く広げるようにして入れ、蓋は外した状態で、デシケーターの中に設置した。その後、デシケーターに蓋をして密閉し、静置した。測定状況を Figure 4-66 に示す。試験中、恒温室の温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った。

Table 4-31 Saturated salt solution used in this test

Salt	Relative humidity (%)	Potential (kPa)	pF
K_2SO_4	98	-2830	4.46
KNO_3	95	-6940	4.85
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	93.1	-9800	5.00
KCl	85	-21900	5.35
NaCl	75	-39000	5.60
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	54	-83400	5.93
$\text{MgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33	-148000	6.18
LiCl	11	-296000	6.48



Figure 4-66 Measurement by vapor pressure method

試料の吸湿を防ぐため、デシケーターの蓋を開けたら即時にガラスシャーレに蓋をして、デシケーターから取り出し、ガラスシャーレ全体の質量を速やかに測定した。この操作をガラスシャーレ全体の質量が一定になるまで繰り返した。ガラスシャーレ全体の質量が一定になった時点で試験を終了し、試料の含水比を測定した。これらの操作を Table 4-31 に示す各種塩の飽和溶液に対して繰り返して水分特性曲線を求めた。

(2) サイクロメータ法

サイクロメータ法では、熱電対式測定と冷却鏡露点法測定の二つの方法を用いた。

(i) 熱電対式測定

熱電対式のサイクロメータ装置は、マイクロボルトメータと熱電対湿度計を備えたサンプルチャンバー（試料箱）からなり、熱電対接点に電流を流して冷却させ、接点上に露を凝縮させてからサンプルホルダー内の相対湿度を測定する。本研究では、WESCOR 社製のサイクロメータ（PSYPRO Dew Point Microvoltmeter）を使用した。測定状況を Figure 4-67 に示す。本装置はサンプルチャンバーを 8 器備えており、複数の試料を同時に測定することが可能である。

はじめに、イオン交換水を用いて含水比調整した試料とサンプルホルダーの質量を計量した。同時に含水比測定用の試料を別途計量しておき、含水比を測定した。約 0.1 g の試料をサンプルホルダーに投入し、サンプルチャンバーを密閉した。測定中に装置ならびに装置周辺の温度が変動しないように、恒温室の温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った。サイクロメータによる測定を開始し、試料が水分平衡に達したら測定を終了した。本試験では同条件で含水比調整した複数の試料を同時に測定した。この操作を、複数の含水比のもとで繰り返し実施した。結果の整理においては、水ポテンシャルと出力電圧とのキャリブレーションカーブを用いて、得られた出力電圧から試料の土中水のポテンシャルを求めた。



Figure 4-67 Measurement by thermocouple psychrometer

(ii) 冷却鏡露点法測定

この方法は土の保水性試験方法（JGS 0151-2009）の規格・基準以外の試験方法になる。その原理はサイクロメータの露点降下による相対湿度を求めるものであるが、熱電対の代わりに鏡を用いることにより、広い面で計測することができる特徴を有している（地盤工学会，2020）。本研究ではこの測定装置に Decagon Devices 社製のサイクロメータ（WP4C）を使用した。本装置のポテンシャル測定範囲は $-0.1 \sim -300 \text{ MPa}$ である。測定状況を Figure 4-68 に示す。

はじめに、イオン交換水により含水比調整した試料を約 2 g、サンプルホルダーの高さ 1/2 程

度まで投入し，サンプルチャンバーを閉じ，電圧測定を開始した。測定終了後，赤外線水分計へ試料を移し，含水比を測定した。この操作を，複数の含水比のもとで繰り返し実施した。結果の整理においては，水ポテンシャルと出力電圧とのキャリブレーションカーブを用いて，得られた出力電圧から試料の土中水のポテンシャルを求めた。



Figure 4-68 Measurement by chilled mirror hygrometer

(3) 加圧板法

加圧板法による土中水のポテンシャル測定は，地盤工学会基準「土の保水性試験方法」(JGS 0151-2009)を参考にした。試験装置は，供試体を収容するステンレス製試験セル，空気圧载荷設備，吸水量測定用二重管ビュレット，排水量測定用定水位容器と排水量を測定するための電子天秤から構成される。測定状況を Figure 4-69 に示す。

はじめに，ペDESTルにセットしたセラミックディスクを3日間程度脱気し，セラミックディスクを十分に飽和させた。そして，試験容器のうち下部フランジを水浸させ，セラミックディスクを設置した。空気が入らないように脱気水の中で作業し，下部フランジの通水経路の空気を除外した。ゴム板にグリースを塗布しフランジに設置した。

イオン交換水または人工海水を用いて含水比調整した試料を用いて，静的締固めにより所定の乾燥密度の供試体を試験セル内に作製した。供試体の乾燥密度が高くない場合は，試験セルを下部フランジに固定し，試験セル内(セラミックディスク上)にて供試体を突き固めにより作製した。試験セルを下部フランジに固定した。試験セルの上にグリースを塗布したゴム板を設置し，試験セルに仮上蓋をした。脱気水がセラミックディスクに常に供給できる状態を維持した。供試体の飽和度を高めるため，水浸脱気を行った。水浸脱気の後，仮上蓋を取り，供試体上部に浮き出た水をふき取り，フランジ上部を設置し，試験容器を組み上げた。

排水量測定のため，電子天秤上に排水量測定用定水位容器を設置した。また，吸水量測定用二重管ビュレットを設置した。供試体の中心位置における土中水のポテンシャルがゼロになるように排水位置を調整した後，そのまま放置して余剰水分を十分に排水させた。試験容器と排水量測定用の定水位容器および吸水量測定用の二重管ビュレットを接続した。レギュレータを通じて所定の土中水のポテンシャルに相当する圧力を負荷し，水分平衡に達して排水が完了するまで，排水を続けた。排水が完了した後，排水質量を測定した。段階的に圧力を上げて，同様の操作を繰り返した。排水過程が完了した後は，吸水過程に移行した。減圧し，水分平衡に達して吸水が完了するまで，吸水を続けた。吸水が完了した後，吸水量を測定した。飽和状態から目標の圧力まで，4～6程度のポテンシャル段階で排水過程と吸水過程を繰り返した。最終

圧力段階終了後に供試体の質量および炉乾燥質量を測定した。結果の整理においては、試験後含水比と吸排水量から計算された含水比およびポテンシャル値を用いて、水分特性曲線を描いた。

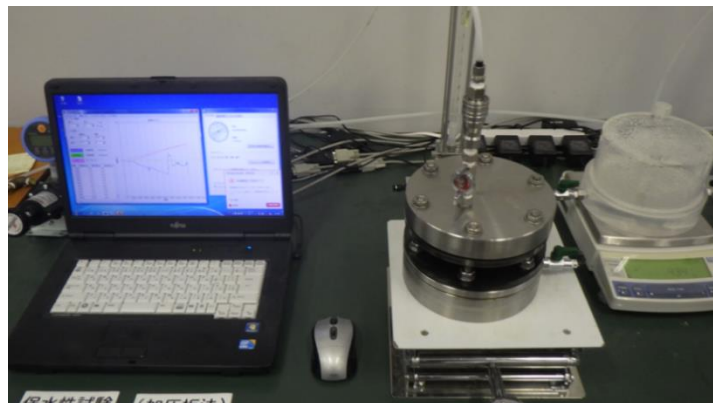


Figure 4-69 Measurement by pressure plate method

4.7.3 試験結果

蒸気圧法による保水性試験結果の一覧を Table 4-32 に、サイクロメータ法による保水性試験結果の一覧を Table 4-33, Table 4-34, Table 4-35 に、加圧板法による保水性試験結果の一覧を Table 4-36 に示す。上記のさまざまな方法で測定した TG, MG, KV の土中水のポテンシャルと含水比の関係を Figure 4-70, Figure 4-71, Figure 4-72 にそれぞれ示す。測定方法に関して、粉末試料で測定した蒸気圧法とサイクロメータ法（冷却鏡露点法測定）の結果と、サイクロメータ法（熱電対式測定）とサイクロメータ法（冷却鏡露点法測定）の測定結果は良い一致を示した。このことから、サイクロメータ法（冷却鏡露点法測定）は蒸気圧法とサイクロメータ法（熱電対式測定）の両方の測定範囲をカバーして広範囲のポテンシャル測定に適用できることが分かった。人工海水で試料の含水比調整した SW 条件の測定結果の図中には、本研究で使用した人工海水の水ポテンシャル値（-2230 kPa）を破線で表示した。土中水のポテンシャルは、主に土の吸着能力や表面張力によって決まるマトリックスポテンシャルと、土中水が含むイオン濃度によって決まる浸透ポテンシャルに分けられるが、粉末試料を用いた蒸気圧法とサイクロメータ法の測定結果は主に後者の浸透ポテンシャルを測定していると考えられることから、これらの測定方法による SW 条件の土中水のポテンシャルの絶対値は、人工海水の水ポテンシャル値を下回っていなかった。また、加圧板法に用いた圧縮成型した供試体の目標とした乾燥密度の飽和含水比を図中の破線で示したが、圧縮成型した供試体の場合は、この値より大きな含水比の範囲に測定値がプロットされることはなかった。実際に各図中に示されている加圧板法の結果を見ると、飽和含水比付近で土中水のポテンシャルが縦軸方向に分布していた。

試験したベントナイトの種類とベントナイト混合率の測定結果を DW 条件と SW 条件についてそれぞれまとめたものを Figure 4-73 に示す。いずれも、同一含水比において、ベントナイト混合率が高くなるほど土中水のポテンシャルの絶対値は大きくなった。また、ベントナイトの種類に対しては、同一含水比において、TG, MG, KV の順で土中水のポテンシャルの絶対値は大きかった。

土粒子の大きさからも明らかなように、ベントナイトとケイ砂ではベントナイトの土中水の

ポテンシャルのほうが大きな絶対値を有すると考えられる。したがって、ベントナイト混合土の保水はベントナイトの含有量に依存することが考えられる。そこで、次式のように含水比をベントナイト混合率で正規化したものを、ベントナイト基準含水比と定義する。

$$w_{be} = \frac{w}{C_b} \quad (\text{式4-13})$$

ここで、 w_{be} はベントナイト基準含水比(%), w は含水比(%), C_b はベントナイト混合率(-)である。Figure 4-74にサイクロメータ法(冷却鏡露点法測定)で測定した土中水のポテンシャルとベントナイト基準含水比の関係をDW条件とSW条件について示す。TGとMGの異なるベントナイト混合率の結果が、ベントナイト基準含水比を用いることにより、土中水のポテンシャルとの間にベントナイト混合率に関係なく一義的な関係で表せることが認められた。ただし、この関係ではベントナイトの種類に対しては、同一含水比において、TG, MG, KVの順で土中水のポテンシャルの絶対値が大きいことは変わらない。

このことに関して、鈴木ら(1996)はベントナイトの土中水のポテンシャルがモンモリロナイト含有量に大きく支配されていることを、モンモリロナイト基準含水比を定義して示している。ここでは、モンモリロナイト基準含水比をベントナイト混合率についても考慮するように次式で定義する。

$$w_{mo} = \frac{w}{C_b C_m} \quad (\text{式4-14})$$

ここで、 w_{mo} はモンモリロナイト基準含水比(%), w は含水比(%), C_b はベントナイト混合率(-), C_m はモンモリロナイト含有率(-)である。Figure 4-75にサイクロメータ法(冷却鏡露点法測定)で測定した土中水のポテンシャルとモンモリロナイト基準含水比の関係をDW条件とSW条件について示す。モンモリロナイト含有率はTable 3-11に示した評価結果の値を用いた。モンモリロナイト基準含水比を用いることにより、鈴木ら(1996)が示したのと同様に、土中水のポテンシャルとの関係をベントナイトの種類によらない一本の曲線で概ね表されることが分かった。このことに完全な一致を見たわけではないが、これらの関係からベントナイト混合土の水分保持特性は、モンモリロナイトのイオン型に関係なく、その含有量に依存していることが示唆された。

Figure 4-76にTG030とMG030について、サイクロメータ法(冷却鏡露点法測定)と加圧板法で測定した値を用いて、DW条件とSW条件の土中水のポテンシャルと含水比の関係を比較して示す。サイクロメータ法(冷却鏡露点法測定)の測定結果において低含水比の領域ではDWとSWで含水比調整した試料の土中水のポテンシャルに大きな差は見られないが、含水比が大きくなると、SW条件の浸透ポテンシャルが人工海水の水ポテンシャルを下回ることができないこともあり、DWとSWの水分保持特性の乖離が大きくなった。DW条件とSW条件の水分保持特性の差が生じ始める含水比は10%以下の所にあり、TGとMGの自然含水比(Table 2-2参照)に相当していた。マトリックスポテンシャルを主に表している加圧板法の結果はDW条件とSW条件で大きな差は認められなかった。

Table 4-32 Water retention test results by vapor pressure method

Test case	Water content (%)	Potential of soil water (kPa)	Test case	Water content (%)	Potential of soil water (kPa)	Test case	Water content (%)	Potential of soil water (kPa)
TG100	4.7	296000	TG050	2.3	296000	TG030	1.3	296000
	5.6	296000		2.9	296000		1.7	296000
	8.0	148000		3.9	148000		2.4	148000
	9.3	148000		4.7	148000		2.9	148000
	10.7	83400		5.3	83400		3.2	83400
	14.0	83400		7.1	83400		4.3	83400
	17.0	39000		8.4	39000		5.1	39000
	17.9	39000		8.9	39000		5.4	39000
	20.5	21900		10.2	21900		6.1	21900
	21.1	21900		10.6	21900		6.4	21900
	25.4	9800		12.8	9800		7.7	9800
	26.1	9800		13.1	9800		8.0	9800
	26.1	6940		13.0	6940		7.9	6940
	26.3	6940		13.2	6940		8.0	6940
	29.4	2830		15.0	2830		9.2	2830
30.3	2830	15.1	2830	9.3	2830			
MG100	4.5	296000	MG050	1.9	296000	MG030	1.1	296000
	5.0	296000		2.7	296000		1.7	296000
	7.3	148000		3.5	148000		2.1	148000
	8.3	148000		4.4	148000		2.6	148000
	9.1	83400		4.6	83400		2.7	83400
	10.6	83400		5.5	83400		3.3	83400
	12.5	39000		6.2	39000		3.6	39000
	12.8	39000		6.7	39000		4.0	39000
	15.4	21900		7.6	21900		4.4	21900
	15.5	21900		7.9	21900		4.7	21900
	20.3	9800		10.0	9800		5.9	9800
	20.7	9800		10.4	9800		6.2	9800
	20.8	6940		10.3	6940		6.1	6940
	20.8	6940		10.4	6940		6.2	6940
	24.2	2830		12.0	2830		7.1	2830
24.5	2830	12.0	2830	7.2	2830			
KV100	3.2	296000						
	3.8	296000						
	6.1	148000						
	7.1	148000						
	8.7	83400						
	10.1	83400						
	12.0	39000						
	12.5	39000						
	13.9	21900						
	14.4	21900						
	16.2	9800						
	16.5	9800						
	16.5	6940						
16.6	6940							
18.8	2830							
19.8	2830							

Table 4-33 Water retention test results of TG by psychrometer method (1/2)

Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer	
	Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water
	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)
TG100 -DW	30.7	5860	1.1	461000	TG050 -DW	13.0	9130	0.9	438000	TG030 -DW	8.4	6740	0.4	443000
	30.7	5900	1.7	376000		15.0	6400	0.9	397000		8.4	7460	2.3	123000
	30.7	5760	3.6	237000		15.0	5930	2.8	178000		9.4	5610	3.9	75500
	32.7	4680	3.7	220000		16.3	6460	4.3	112000		9.4	6310	5.9	41300
	32.7	4740	6.6	155000		16.3	5950	5.9	85900		9.4	5020	7.0	17900
	32.7	4450	7.1	141000		17.0	5470	8.1	56200		9.4	5200	9.0	7400
	34.7	3690	8.4	115000		17.0	4920	9.9	33100		10.4	4250	10.1	5420
	34.7	3410	10.1	98000		17.4	4270	11.9	20100		10.4	4540	11.2	3350
	34.7	3600	10.1	98500		17.4	3730	12.9	11600		11.0	2830	12.4	1810
	37.4	2700	13.3	71800		19.1	5630	14.1	7850		11.0	3180	12.9	1810
	37.4	2820	14.9	60300		19.1	4860	14.4	6910		11.7	2810	14.0	1430
	37.4	2650	18.7	39100		19.4	3430	16.9	4850		11.7	3420	15.0	1020
	40.8	2410	25.2	14500		19.4	2800	18.3	3230		12.5	1660	16.1	950
	40.8	2140	31.7	5740		19.4	2620	19.3	2580		12.5	2200	17.4	720
	40.8	2070	35.6	3430		19.4	2520	20.5	1610		13.1	2140	18.4	680
	40.9	2000	38.7	2270		19.8	2450	20.9	2170		13.1	2100	20.5	570
	40.9	1950	46.1	1400		19.8	2280	21.8	1800		14.4	1420	-	-
	40.9	2060	-	-		20.3	2230	22.7	1320		14.4	1710	-	-
	46.6	1600	-	-		20.3	2120	24.6	1200		15.1	1200	-	-
	46.6	1520	-	-		20.9	2040	-	-		15.1	1600	-	-
46.6	1390	-	-	20.9	1880	-	-	15.9	1060	-	-			
-	-	-	-	21.7	2270	-	-	15.9	1360	-	-			
-	-	-	-	21.7	1920	-	-	15.9	1540	-	-			
-	-	-	-	22.1	1740	-	-	15.9	1800	-	-			
-	-	-	-	22.1	1720	-	-	16.1	1070	-	-			

Table 4-33 Water retention test results of TG by psychrometer method (2/2)

Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer	
	Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water
	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)
TG100-DW	-	-	-	-	TG050-DW	23.2	1480	-	-	TG030-DW	16.1	1540	-	-
	-	-	-	-		23.2	1360	-	-		16.4	1100	-	-
	-	-	-	-		23.5	2300	-	-		16.4	1740	-	-
	-	-	-	-		23.5	2040	-	-		17.0	969	-	-
	-	-	-	-		-	-	-	-		17.0	1200	-	-
	-	-	-	-		-	-	-	-		18.1	986	-	-
	-	-	-	-		-	-	-	-		18.1	1190	-	-
TG100-SW	34.2	9230	1.3	433000	TG050-SW	19.1	8380	1.1	342000	TG030-SW	12.6	8780	1.1	193000
	34.2	8790	3.5	216000		19.1	8010	3.2	155000		12.6	8290	2.8	96000
	34.2	7260	4.3	195000		19.1	7340	4.5	106000		12.6	7280	4.8	57300
	40.6	8180	6.8	143000		21.7	7340	7.1	74600		14.2	7050	6.7	35100
	40.6	7400	9.0	112000		21.7	6850	8.5	56600		14.2	6750	8.7	14100
	40.6	7370	10.5	95000		21.7	6490	10.4	34900		14.2	6200	9.5	8550
	-	-	12.8	80300		23.8	6710	12.3	25500		16.6	5710	12.5	6450
	-	-	15.0	69300		23.8	6510	14.8	13700		16.6	5620	14.2	5410
	-	-	16.3	59400		23.8	5680	15.5	8930		16.6	4840	16.5	4500
	-	-	17.9	48600		-	-	18.6	7930		18.2	4950	18.1	4150
	-	-	20.2	38600		-	-	19.0	6840		18.2	4830	20.4	3840
	-	-	24.5	22500		-	-	21.5	5770		18.2	4780	-	-
	-	-	29.7	12200		-	-	23.6	5260		20.5	4750	-	-
-	-	33.8	7710	-	-	-	-	20.5	4740	-	-			
-	-	40.1	6260	-	-	-	-	20.5	4460	-	-			

Table 4-34 Water retention test results of MG by psychrometer method (1/2)

Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer	
	Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water
	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)
MG100-DW	21.6	8990	1.5	406000	MG050-DW	10.0	8750	2.7	207000	MG030-DW	6.6	8070	0.7	487000
	21.6	8210	3.3	282000		11.2	9180	4.2	104000		6.6	7050	2.0	137000
	21.6	5890	3.9	270000		11.2	8910	6.2	51900		7.7	6060	3.3	47100
	24.6	8600	4.9	221000		11.6	9390	7.8	30500		7.7	5790	4.8	27200
	24.6	7970	5.2	185000		11.6	2270	9.2	20900		7.9	4920	6.6	10100
	24.6	7910	5.5	183000		12.1	5980	11.0	10600		7.9	4610	7.6	5510
	28.1	5320	6.6	138000		12.1	4680	11.2	8310		8.6	4240	8.2	3680
	28.1	5110	9.2	88400		13.8	5060	13.3	4890		8.6	3620	10.3	1190
	28.1	3830	9.9	82700		13.8	4950	14.0	2560		9.0	2080	10.5	1120
	28.6	2870	10.8	69700		13.9	4530	14.6	2840		9.0	1970	11.0	1140
	28.6	2630	13.1	44600		13.9	3900	14.8	1560		9.4	2110	12.7	540
	28.6	2250	14.7	33400		15.7	3170	18.1	790		9.4	1730	12.9	310
	29.7	2230	19.8	17100		15.7	2120	19.3	530		9.6	1880	14.5	280
	29.7	2000	24.0	7820		15.7	1770	20.3	590		9.6	1660	16.8	170
	29.7	1600	29.5	2790		15.7	1660	20.4	790		11.7	692	18.9	100
	34.0	1230	34.3	1060		16.7	2410	21.9	390		11.7	600	-	-
	34.0	1220	39.4	552		16.7	1420	-	-		11.9	886	-	-
	34.0	1190	45.8	230		17.1	1060	-	-		11.9	880	-	-
	35.5	1370	-	-		17.1	910	-	-		12.8	559	-	-
	35.5	1070	-	-		18.4	1100	-	-		12.8	398	-	-
35.5	1020	-	-	18.4	600	-	-	13.7	1030	-	-			
35.6	1190	-	-	19.4	681	-	-	13.7	812	-	-			
35.6	939	-	-	19.4	600	-	-	15.3	245	-	-			
35.6	888	-	-	19.6	571	-	-	15.3	197	-	-			
41.7	559	-	-	19.6	473	-	-	16.1	530	-	-			

Table 4-34 Water retention test results of MG by psychrometer method (2/2)

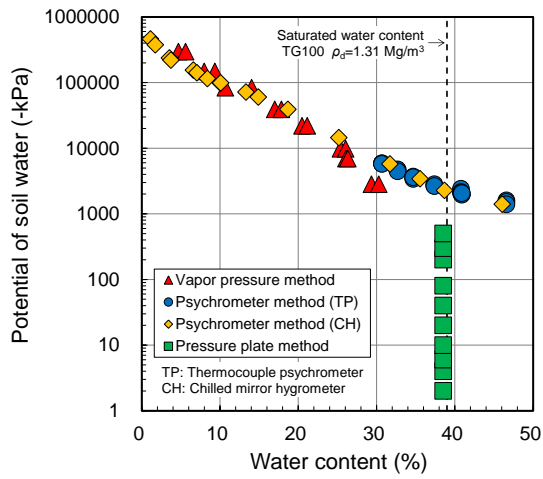
Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer		Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer	
	Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water		Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water
	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)		(%)	(kPa)	(%)	(kPa)
MG100-DW	41.7	524	-	-	MG050-DW	19.9	1270	-	-	MG030-DW	16.1	327	-	-
	41.7	319	-	-		19.9	1200	-	-		16.1	292	-	-
	-	-	-	-		19.9	1110	-	-		16.1	175	-	-
	-	-	-	-		19.9	1030	-	-		16.8	225	-	-
MG100-SW	29.7	8490	1.7	466000	MG050-SW	13.4	7920	1.4	312000	MG030-SW	10.0	8590	1.1	294000
	29.7	8330	3.8	258000		15.8	8600	2.8	169000		10.0	8320	2.8	91800
	29.7	7730	5.7	178000		18.7	6620	4.7	87900		10.0	7460	4.4	44200
	34.6	6430	7.2	136000		20.2	4990	6.7	52700		12.6	6040	5.8	21200
	34.6	5890	8.6	100000		22.0	4450	8.3	32600		12.6	5770	7.0	8270
	34.6	5670	10.7	76300		24.4	3860	10.0	21100		12.6	5440	9.9	5630
	40.1	5290	12.1	57400		13.4	5230	11.8	12900		13.7	4660	12.6	4200
	40.1	4990	13.8	46000		13.4	7780	13.4	7260		13.7	4300	13.6	3740
	40.1	4790	15.5	35700		15.8	8460	15.8	5950		13.7	4300	16.5	3430
	-	-	17.6	28300		15.8	9150	18.6	4720		16.5	4200	19.1	3250
	-	-	19.9	21100		18.7	7020	20.0	4200		16.5	3940	20.6	3150
	-	-	25.4	9920		18.7	6610	21.8	3840		16.5	3870	-	-
	-	-	29.4	6750		20.2	5690	24.2	3550		19.3	3750	-	-
	-	-	34.2	4810		20.2	5310	-	-		19.3	3710	-	-
	-	-	39.6	3990		22.0	4450	-	-		19.3	3350	-	-
	-	-	-	-		22.0	4500	-	-		20.7	3560	-	-
-	-	-	-	24.4	4090	-	-	20.7	3510	-	-			
-	-	-	-	24.4	4390	-	-	20.7	3170	-	-			

Table 4-35 Water retention test results of KV by psychrometer method

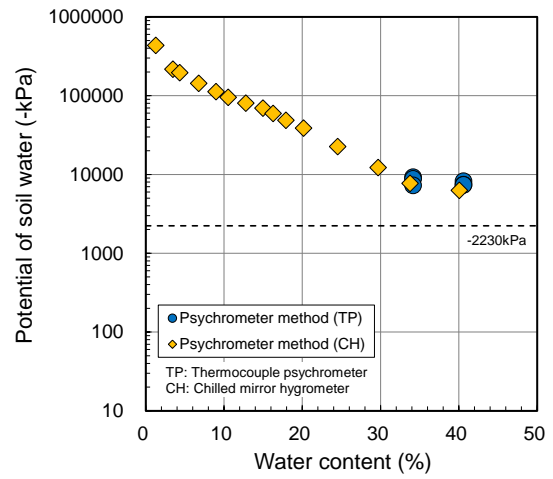
Test case	Thermocouple psychrometer		Chilled mirror hygrometer	
	Water content	Potential of soil water	Water content	Potential of soil water
	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)
KV100-DW	20.3	8500	1.1	368000
	20.3	8420	1.4	280000
	20.6	8010	3.1	168000
	20.6	7680	3.8	150000
	22.0	6700	5.3	115000
	22.0	6510	5.8	101000
	27.1	3030	9.4	68900
	27.1	2860	9.6	70700
	28.4	2930	10.3	60100
	28.4	2540	12.9	30200
	31.4	2010	15.4	12100
	31.4	1870	18.0	7240
	32.8	4010	26.0	2810
	32.8	3760	29.1	1650
	34.2	1670	30.0	1500
	35.2	1300	33.5	1120
	36.9	1380	44.7	850
36.9	1300	46.0	780	

Table 4-36 Water retention test results by pressure plate method

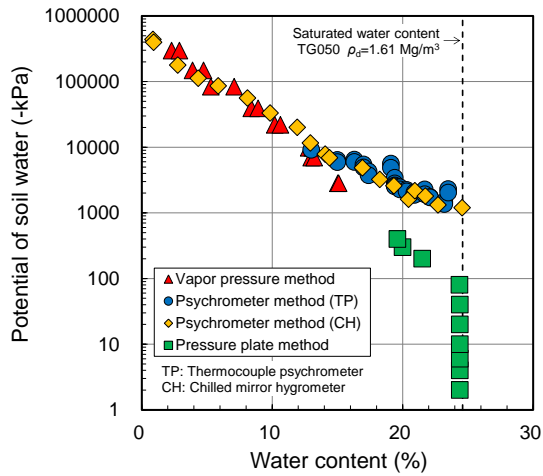
Test case	Water content (%)	Potential of soil water (kPa)	Test case	Water content (%)	Potential of soil water (kPa)	Test case	Water content (%)	Potential of soil water (kPa)	Test case	Water content (%)	Potential of soil water (kPa)
TG100-DW	38.5	2	TG050-DW	24.4	2	TG030-DW	21.5	2	TG030-SW	21.4	2
	38.5	4		24.4	4		21.5	4		21.4	4
	38.5	6		24.4	6		21.5	6		21.4	6
	38.5	10		24.4	10		21.5	10		21.4	10
	38.5	20		24.4	20		21.5	20		21.3	20
	38.5	40		24.4	40		21.5	40		15.6	50
	38.5	80		24.4	80		17.1	80		14.0	100
	38.5	200		21.5	200		-	-		-	-
	38.5	300		20.0	300		-	-		-	-
	38.5	500		19.6	400		-	-		-	-
MG100-DW	34.1	2	MG050-DW	22.4	2	MG030-DW	19.8	2	MG030-SW	19.9	2
	34.1	4		22.4	4		19.8	4		19.9	4
	34.1	6		22.4	6		16.9	8		19.9	6
	34.1	10		22.4	10		16.6	20		19.9	10
	34.1	20		22.4	20		16.2	40		19.6	20
	34.1	40		20.6	40		12.5	80		13.5	50
	34.1	80		20.3	80		7.4	200		12.5	100
	34.1	200		19.5	200		-	-		-	-
	34.1	300		16.9	300		-	-		-	-



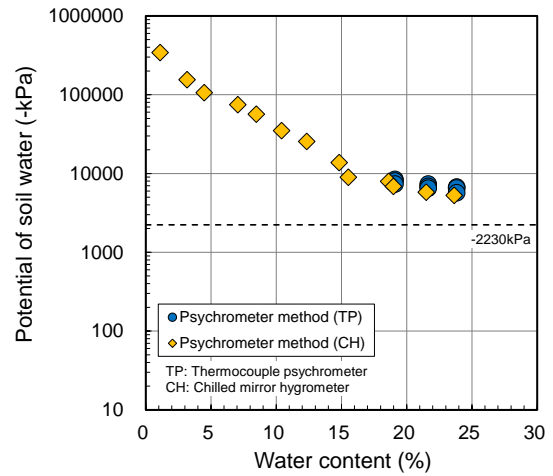
(a) TG100-DW



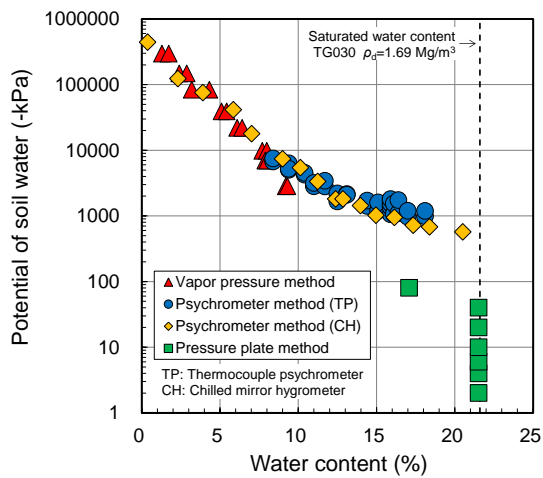
(d) TG100-SW



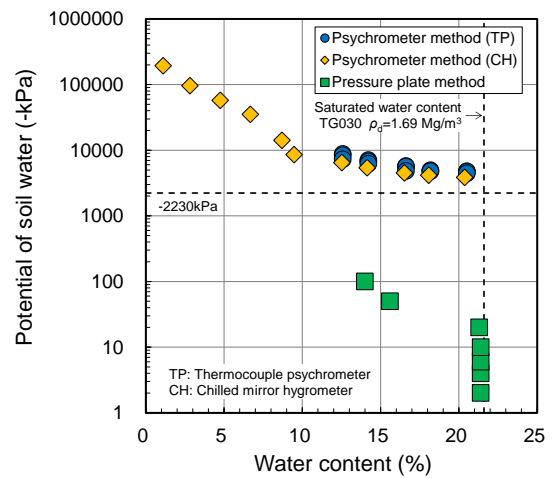
(b) TG050-DW



(e) TG050-SW

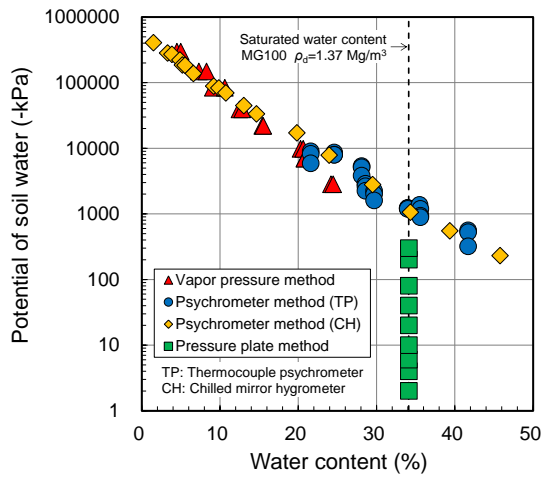


(c) TG030-DW

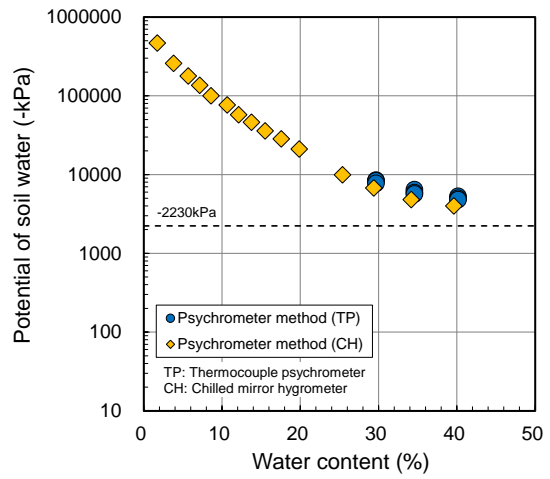


(f) TG030-SW

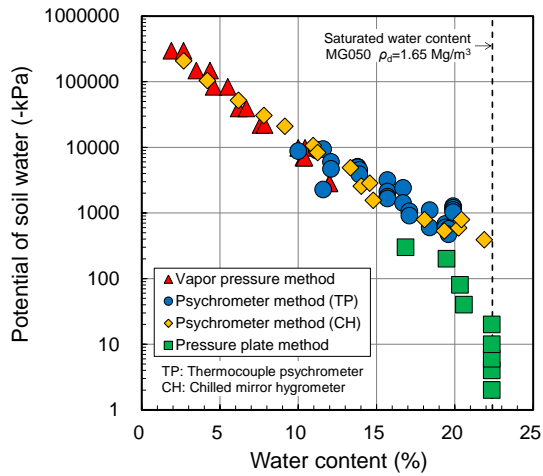
Figure 4-70 Relation between potential of soil water and water content by various methods (TG)



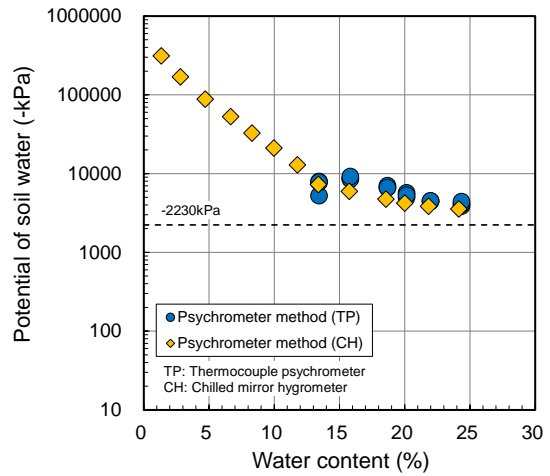
(a) MG100-DW



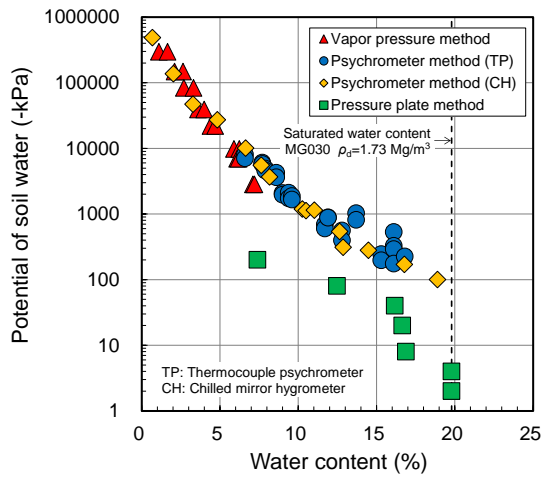
(d) MG100-SW



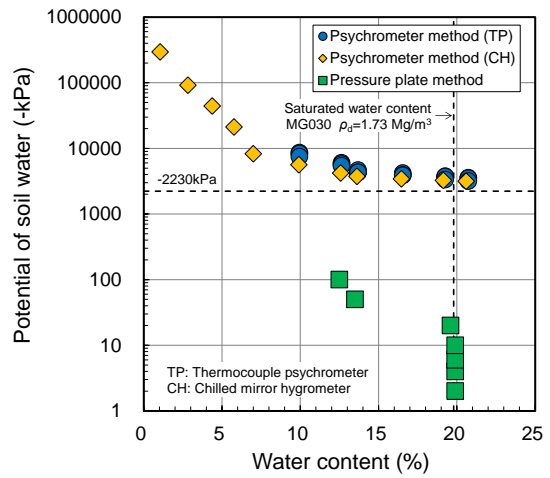
(b) MG050-DW



(e) MG050-SW



(c) MG030-DW



(f) MG030-SW

Figure 4-71 Relation between potential of soil water and water content by various methods (MG)

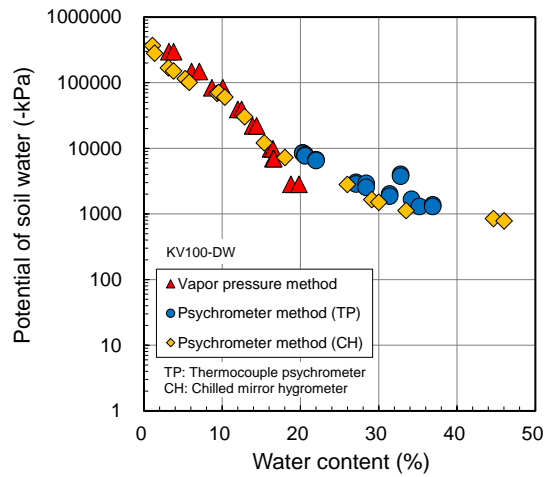


Figure 4-72 Relation between potential of soil water and water content by various methods (KV100-DW)

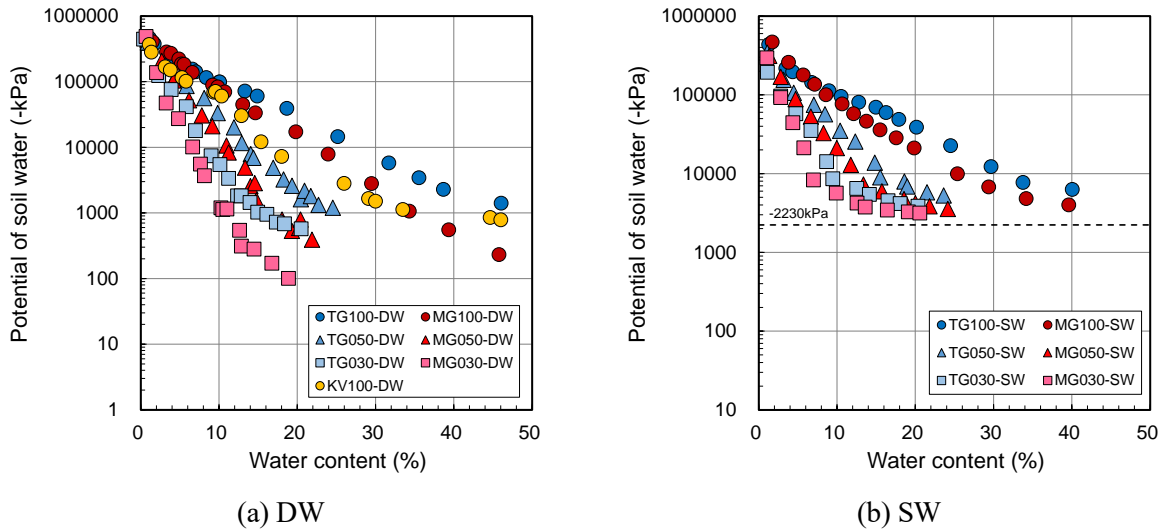


Figure 4-73 Relation between potential of soil water and water content of various bentonite mixed soils

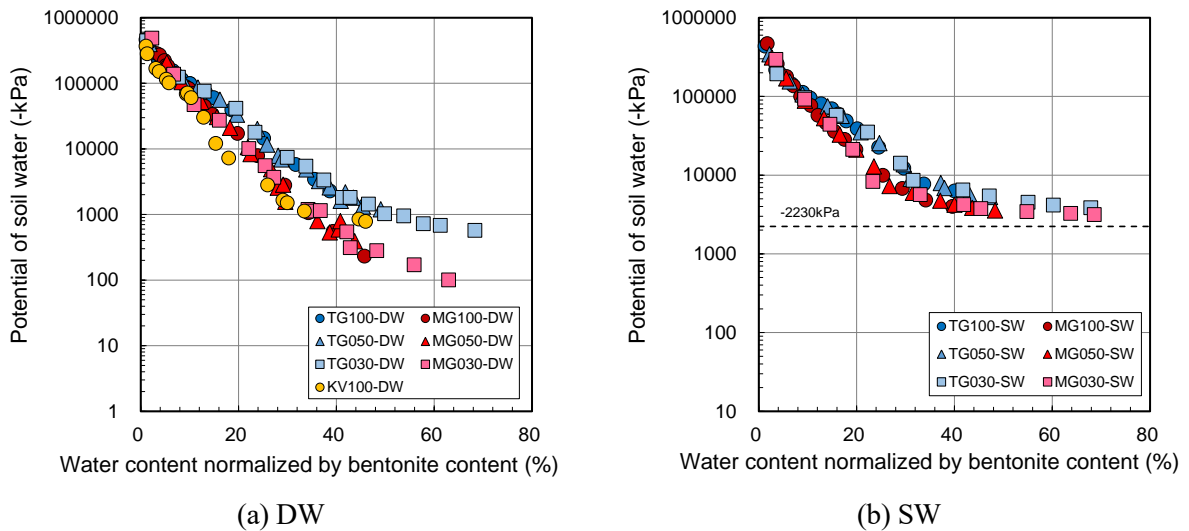
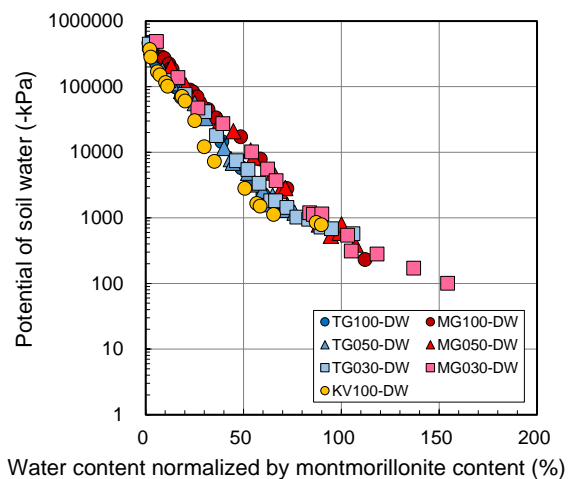
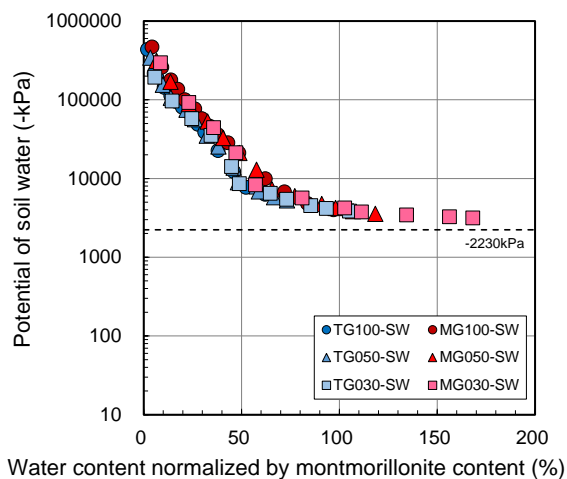


Figure 4-74 Relation between potential of soil water and water content normalized by bentonite content

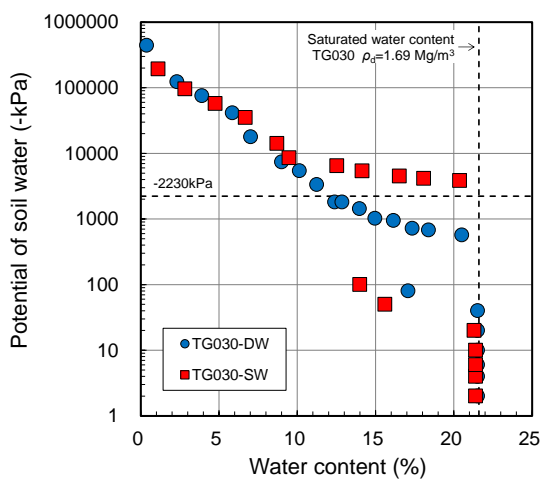


(a) DW

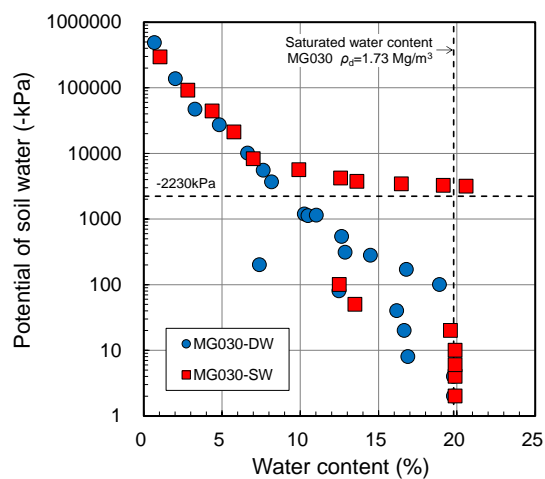


(b) SW

Figure 4-75 Relation between potential of soil water and water content normalized by montmorillonite content



(a) TG030



(b) MG030

Figure 4-76 Comparison of water retention in deionized water with that in artificial seawater

4.8 熱特性測定試験

4.8.1 試験ケース

5種類のベントナイトを対象に、熱特性測定試験を実施した。本研究で測定したのは熱伝導率と熱拡散率である。熱伝導率は物体内における熱の伝わりやすさを表し、熱拡散率は物体内における熱の拡がりやすさの度合いを表す物性値である。ここで、熱伝導率を λ 、熱拡散率を α 、物体の密度を ρ 、比熱を c とすると、これらの物性値の関係は次式のように表される。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{式4-15})$$

本研究では、熱伝導率を QTM (Quick Thermal Conductivity Meter) 法と HD (Hot Disk) 法により、熱拡散率を HD 法により測定した。

Table 4-37 に試験ケースの一覧を示す。QTM 法による測定は TG, MG, KV, SK, TM の 5 種類のベントナイトを、HD 法による測定は TG, MG の 2 種類のベントナイトを対象とした。試験条件は、ベントナイトとケイ砂の混合率のほか、供試体の飽和度と乾燥密度を複数設定した。試料の含水比調整にはイオン交換水を用いた。

Table 4-37 Program of thermophysical property measuring test (1/3)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Target values of test specimen				Measuring method	
		Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Degree of saturation (%)	Water content (%)	QTM	HD
TG TG100	100	1.20	1.20	100	46.0	●	
				80	36.8	●	
				60	27.6	●	
				40	18.4	●	
				20	9.2	●	
		1.31	1.31	100	39.0	●	●
				80	31.2	●	●
				60	23.4	●	●
				40	15.6	●	●
				20	7.8	●	●
		1.40	1.40	100	34.0	●	●
				80	27.2	●	●
				60	20.4	●	●
				40	13.6	●	●
				20	6.8	●	●
		1.60	1.60	100	25.1	●	●
				80	20.1	●	●
				60	15.1	●	●
				40	10.0	●	●
				20	5.0	●	●

Table 4-37 Program of thermophysical property measuring test (2/3)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Target values of test specimen				Measuring method		
		Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Degree of saturation (%)	Water content (%)	QTM	HD	
TG	TG050	50	1.61	1.16	100	24.6	●	●
					80	19.7	●	●
					60	14.8	●	●
					40	9.8	●	●
					20	4.9	●	●
	10	2.5	●	●				
	TG030	30	1.69	0.91	100	21.6	●	●
					80	17.3	●	●
					60	13.0	●	●
					40	8.7	●	●
20					4.3	●	●	
10	2.2	●	●					
MG	MG100	100	1.37	1.37	100	34.1	●	●
					80	27.3	●	●
					60	20.5	●	●
					40	13.7	●	●
					20	6.8	●	●
	10	3.4	●	●				
	MG050	50	1.65	1.20	100	22.4	●	●
					80	17.9	●	●
					60	13.4	●	●
					40	9.0	●	●
20					4.5	●	●	
10	2.2	●	●					
MG030	30	1.73	0.95	100	19.8	●	●	
				80	15.9	●	●	
				60	11.9	●	●	
				40	7.9	●	●	
				20	4.0	●	●	
10	2.0	●	●					
KV	KV100	100	1.20	1.20	100	47.2	●	-
					80	37.8	●	-
					60	28.3	●	-
					40	18.9	●	-
					20	9.4	●	-
	KV100	100	1.40	1.40	100	35.3	●	-
					80	28.2	●	-
					60	21.2	●	-
					40	14.1	●	-
					20	7.1	●	-
KV100	100	1.60	1.60	100	26.4	●	-	
				80	21.1	●	-	
				60	15.8	●	-	
				40	10.5	●	-	
				20	5.3	●	-	

Table 4-37 Program of thermophysical property measuring test (3/3)

Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Target values of test specimen				Measuring method	
		Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Degree of saturation (%)	Water content (%)	QTM	HD
SK SK100	100	1.20	1.20	100	44.9	●	-
				80	36.0	●	-
				60	27.0	●	-
				40	18.0	●	-
				20	9.0	●	-
		1.40	1.40	100	33.0	●	-
				80	26.4	●	-
				60	19.8	●	-
				40	13.2	●	-
				20	6.6	●	-
		1.60	1.60	100	24.1	●	-
				80	19.3	●	-
				60	14.5	●	-
				40	9.6	●	-
				20	4.8	●	-
TM TM100	100	1.20	1.20	100	44.5	●	-
				80	35.6	●	-
				60	26.7	●	-
				40	17.8	●	-
				20	8.9	●	-
		1.40	1.40	100	32.6	●	-
				80	26.1	●	-
				60	19.6	●	-
				40	13.0	●	-
				20	6.5	●	-
		1.60	1.60	100	23.7	●	-
				80	18.9	●	-
				60	14.2	●	-
				40	9.5	●	-
				20	4.7	●	-

4.8.2 試験方法

熱伝導率の測定方法としては、大きく定常法と非定常法の二つに分けられる。定常法は、測定対象の物質中に水分が含有されていない場合には精度が良い測定方法となるが、水分を含有している場合には、定常の温度勾配によって、物質中の水分の再配分が生じる可能性がある。そこで、本研究では、非定常熱線法である QTM 法および非定常点熱源法である HD 法により熱伝導率の測定を行った。

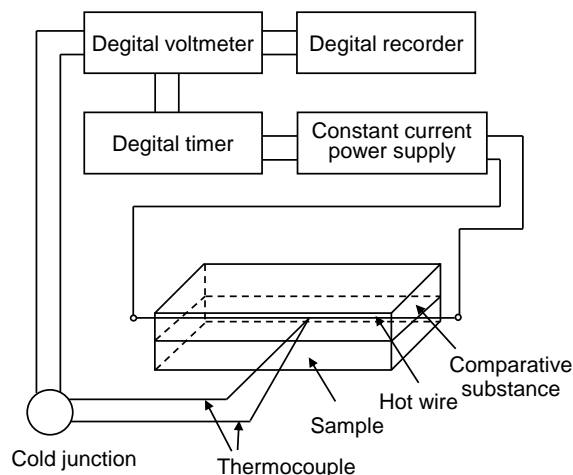
(1) QTM (Quick Thermal Conductivity Meter) 法

非定常熱流法による熱伝導率測定は、非定常熱線法 (Transient hot wire method) と呼ばれる。本研究では、この応用としての比較法による非定常熱線法を用いた。これは、測定機器の名称である迅速熱伝導率計 (Quick thermal conductivity meter) に因んで QTM 法と呼ばれる。迅速熱伝導率計は、あらかじめ熱伝導率が既知の比較物質に、熱線と熱電対が取り付けられ、一つの

プローブを構成している。このプローブを測定試料に押し当てて、熱線の発熱による温度上昇から、熱伝導率を計算するものである。QTM法は、異種の物質との境界面が測定面となるため測定の誤差要因が増す。また、試料の測定面の粗さの影響を受けるなどの問題点もある。しかし、軟岩に近い強度を持つ含水物質の熱伝導率の測定手法としては優れたものであり、ベントナイトの熱伝導率の測定にも用いられている（藤田ほか，1992，鈴木・谷口，1999）。

通常の変位熱線法は供試体に孔を開けそこに線熱源を挿入するか、もしくは、二つの供試体で線熱源を挟む方法によって設置するが、迅速熱伝導率計は一方の熱伝導率が既知の断熱性に富んだ材料に置き換えて測定するものである。

Figure 4-77 に本測定で使用した迅速熱伝導率計を示す。測定に使用した供試体の寸法は、プローブの寸法を考慮し、150 mm×60 mm×20 mm とした。締め固めた状態における飽和度を 0～100%の間で複数点設定し、その飽和度になるようにイオン交換水で含水比調整した試料を所定の乾燥密度に締め固めて供試体を製作した。QTMによる測定は、供試体の上面 5 回、下面 5 回の計 10 回実施し、その平均値を供試体の熱伝導率の値とした。



(a) Schematic diagram



(b) Measuring device

Figure 4-77 Quick thermal conductivity meter

(2) HD (Hot Disk) 法

信太ほか（1997）によって緩衝材の熱物性の取得に用いられた点熱源法（HD法）は、熱源に微小のサーミスタを用いることにより、供試体中にサーミスタをあらかじめ埋め込み、その後供試体の乾燥密度や含水状態を調整できること、供試体が線熱源法に比べて十分小さく、また、発熱量を小さく、測定時間を短くできることなどの利点がある。

Figure 4-78 に HD 法熱物性測定装置の概要を示す。測定では、回路中のサーミスタおよび可変抵抗の電圧の時間変化を取得し、その結果から、サーミスタの温度および発熱量の時間変化を算出する。その後、サーミスタ、サーミスタの被膜（ガラス）および銅線を含んだ系で実測データと合うように熱拡散率をパラメータにした逆解析を行い、供試体の熱拡散率を同定する。

Figure 4-79 には HD 法による測定中の状況をホットディスクセンサーの拡大図とともに示す。HD 法熱物性測定装置は、Figure 4-80 に示すようにホットディスクセンサーを 2 個の供試体で

挟み込みホットディスク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、ホットディスクセンサーの温度上昇から熱物性を求めるものである。ホットディスクセンサーは二重螺旋構造になっており、発熱源であるとともに、温度変化をホットディスクセンサーの電気抵抗変化として捉えることができる。

HD法の供試体サイズは、ホットディスクセンサーの直径を D とすると、供試体直径は $3D$ 以上100 mm以下、厚さは $1D$ 以上と規定されている。本研究に用いたホットディスクセンサーの直径は14 mmであり、供試体の寸法は直径50 mm、厚さ20 mmとした。供試体は飽和度を0~100%の間で複数点設定し、イオン交換水で含水比調整した試料を所定の乾燥密度に締め固めて作製した。

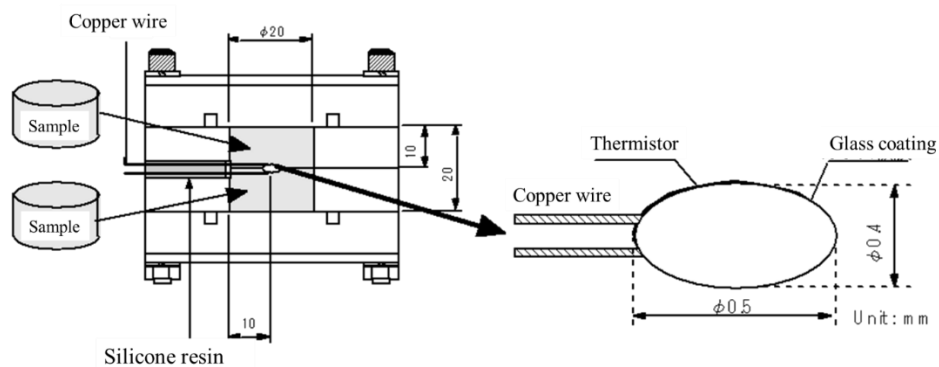


Figure 4-78 Schematic diagram of measuring device by HD method



Figure 4-79 Measuring status of thermophysical property by HD method

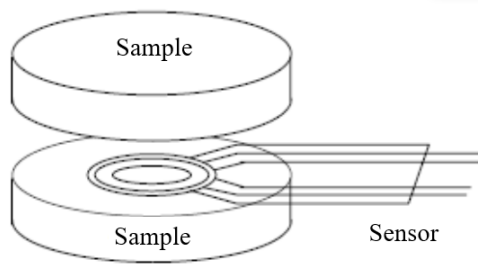


Figure 4-80 Setup for hot disk sensor

4.8.3 試験結果

QTM法による熱特性の測定結果の一覧を Table 4-38 に、HD法による熱特性の測定結果の一覧を Table 4-39 にそれぞれ示す。

QTM法で測定したTG, MG, KV, SK, TMの各供試体の熱伝導率と含水比の関係をFigure 4-81に示す。いずれの試験ケースについても含水比の増加に伴い熱伝導率は大きくなる結果となった。また、両者の間には概ね直線増加の傾向があることが認められた。同一の含水比では乾燥密度が大きい場合ほど、ベントナイト混合率が小さくケイ砂の割合が多い場合ほど熱伝導率は高い値を示した。同じ条件の測定結果である熱伝導率を飽和度との関係で示すとFigure 4-82のようになった。TG, KV, SK, TMのベントナイト単体（ベントナイト混合率100%）の試験条件では、緩衝材で想定されるような乾燥密度の範囲（1.2~1.6 Mg/m³）に対して、同じ配合条件で熱伝導率を比較することができる。この場合、飽和度との関係においては、大きな乾燥密度のほうが熱伝導率は高くなる傾向を認めることができるものの、含水比との関係で整理した場合ほど試験した範囲の乾燥密度による熱伝導率の差は大きくなかった。一方で、ベントナイト混合率による熱伝導率の差は顕著であった。Figure 4-83ではベントナイト単体での熱伝導率と飽和度の関係を、乾燥密度を揃えてベントナイトの種類に対して比較した。同じ飽和度に対して、TMの熱伝導率が最も低く、KVの熱伝導率が最も高い傾向を求めることができるものの、ベントナイトの種類に対する熱伝導率の差は小さかった。

Figure 4-84にQTM法による熱伝導率の測定結果とHD法による熱伝導率の測定結果を比較して示す。TGとMGともに、両測定法による熱伝導率は良い一致を示しており、今回測定した試料の熱伝導率が妥当な値であることを表していると考えられた。

Figure 4-85にHD法により測定したTGとMGの熱拡散率と含水比の関係を示す。熱拡散率は含水比の増加に伴い大きくなる傾向が得られた。TGとMGともに、この熱拡散率の増加傾向はケイ砂が混合している試料で顕著であり、ベントナイト単体では含水比に対して微増する程度に止まっていた。同じ条件の測定結果である熱拡散率を飽和度との関係で示すとFigure 4-86のようになった。同じ飽和度に対して熱拡散率はTGよりMGのほうが若干大きい程度で、飽和度に対する熱拡散率の増加傾向はTGとMGで同様であった。

以上の結果から、ベントナイトの熱特性として、熱伝導率と熱拡散率ともにベントナイト単体での種類や密度による違いは少なく、ケイ砂および水分の混入率による影響がより大きいと考えられた。

Table 4-38 Thermophysical property measuring test results by QTM method (1/2)

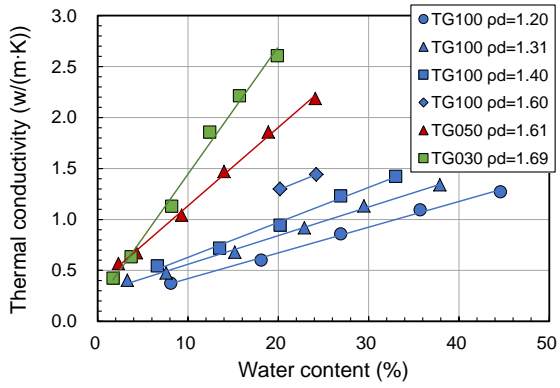
Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Thermal conductivity (w/(m·K))	
TG	TG100	100	44.6	96	1.19	1.19	1.27
			35.7	77	1.19	1.19	1.09
			26.9	57	1.19	1.19	0.86
			18.1	39	1.19	1.19	0.60
			8.1	17	1.19	1.19	0.38
			37.9	98	1.31	1.31	1.34
			29.5	76	1.31	1.31	1.13
			22.9	59	1.31	1.31	0.92
			15.2	39	1.31	1.31	0.68
			7.6	19	1.31	1.31	0.47
	3.3	8	1.31	1.31	0.40		
	33.0	96	1.39	1.39	1.42		
	26.9	77	1.39	1.39	1.23		
	20.2	60	1.41	1.41	0.95		
	13.5	38	1.38	1.38	0.72		
	6.6	19	1.39	1.39	0.54		
	24.2	92	1.57	1.57	1.44		
	20.2	76	1.57	1.57	1.30		
	NG	NG	NG	NG	NG		
	NG	NG	NG	NG	NG		
NG	NG	NG	NG	NG			
TG050	50	24.1	97	1.61	1.15	2.19	
		18.9	76	1.60	1.15	1.86	
		14.0	56	1.60	1.15	1.47	
		9.3	38	1.61	1.15	1.04	
		4.3	17	1.61	1.15	0.67	
		2.3	9	1.60	1.15	0.57	
		19.9	92	1.69	0.91	2.61	
		15.7	72	1.69	0.91	2.21	
		12.4	57	1.69	0.91	1.86	
		8.2	37	1.68	0.91	1.13	
3.7	17	1.68	0.91	0.63			
1.7	8	1.68	0.90	0.43			
TG030	30	32.6	95	1.37	1.37	1.37	
		26.5	78	1.37	1.37	1.23	
		20.5	60	1.37	1.37	0.98	
		13.6	41	1.38	1.38	0.75	
		6.7	20	1.38	1.38	0.50	
		1.6	5	1.39	1.39	0.38	
MG	MG100	100	21.8	95	1.64	1.18	2.02
			17.0	76	1.65	1.20	1.84
			13.5	60	1.65	1.20	1.64
			9.2	41	1.65	1.19	1.21
			5.1	23	1.65	1.20	0.76
			2.0	9	1.63	1.17	0.56
MG050	50	19.0	96	1.73	0.95	2.63	
		16.1	81	1.73	0.95	2.36	
		11.7	59	1.73	0.96	2.03	
		7.7	40	1.74	0.96	1.44	
MG030	30	19.0	96	1.73	0.95	2.63	
		16.1	81	1.73	0.95	2.36	
		11.7	59	1.73	0.96	2.03	
		7.7	40	1.74	0.96	1.44	

Table 4-38 Thermophysical property measuring test results by QTM method (2/2)

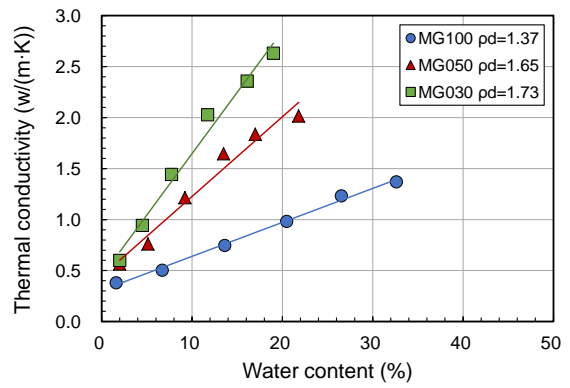
Sample		Mixture ratio of bentonite (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Thermal conductivity (w/(m·K))
MG	MG030	30	4.5	24	1.75	0.97	0.94
			2.0	10	1.74	0.96	0.60
KV	KV100	100	45.5	95	1.19	1.19	1.26
			36.7	78	1.20	1.20	1.19
			27.4	58	1.20	1.20	0.90
			19.0	40	1.20	1.20	0.74
			9.8	20	1.19	1.19	0.36
			33.3	92	1.39	1.39	1.38
			27.4	77	1.40	1.40	1.27
			20.6	58	1.39	1.39	1.04
			13.4	37	1.38	1.39	0.70
			7.5	21	1.39	1.39	0.50
			24.4	92	1.60	1.60	1.47
			20.2	75	1.59	1.59	1.40
			14.6	54	1.59	1.59	1.07
			10.0	38	1.60	1.60	0.87
5.3	20	1.61	1.61	0.65			
SK	SK100	100	41.3	91	1.19	1.19	1.23
			35.7	79	1.20	1.20	1.09
			27.2	59	1.19	1.19	0.83
			18.1	40	1.20	1.20	0.60
			8.9	19	1.17	1.17	0.32
			33.2	98	1.38	1.38	1.35
			27.2	79	1.37	1.37	1.16
			19.8	58	1.38	1.38	0.92
			12.7	37	1.37	1.37	0.64
			6.5	17	1.32	1.32	0.40
			24.3	92	1.55	1.55	1.36
			19.8	79	1.57	1.57	1.22
			14.7	54	1.53	1.53	0.94
			9.7	36	1.54	1.54	0.71
5.1	21	1.59	1.59	0.52			
TM	TM100	100	45.7	98	1.17	1.17	1.16
			37.0	82	1.19	1.19	1.06
			27.9	61	1.18	1.19	0.78
			18.9	42	1.19	1.19	0.57
			9.9	21	1.16	1.16	0.29
			34.3	100	1.37	1.37	1.26
			27.9	84	1.39	1.39	1.13
			20.6	61	1.38	1.38	0.85
			13.7	40	1.37	1.37	0.61
			7.4	22	1.38	1.38	0.46
			24.8	98	1.56	1.56	1.29
			20.6	84	1.58	1.58	1.20
			15.3	60	1.56	1.56	0.91
			10.6	41	1.55	1.55	0.71
NG	NG	NG	NG	NG			

Table 4-39 Thermophysical property measuring test results by HD method

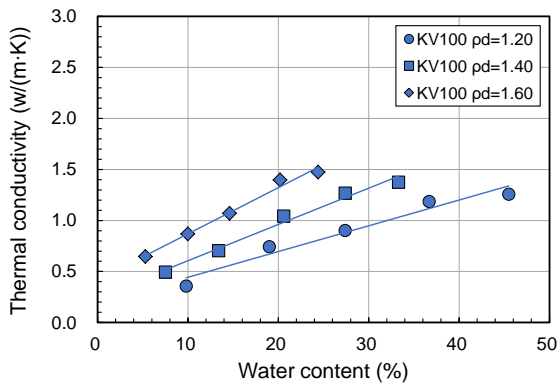
Sample	Mixture ratio of bentonite (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	Dry density (Mg/m ³)	Effective clay dry density (Mg/m ³)	Thermal conductivity (w/(m·K))	Thermal diffusivity (mm ² /s)	
TG	TG100	100	37.9	98	1.31	1.31	1.29	0.37
			29.5	76	1.31	1.31	1.07	0.39
			22.9	59	1.32	1.32	0.83	0.35
			15.2	39	1.30	1.30	0.64	0.33
			7.6	19	1.30	1.30	0.44	0.28
			3.3	8	1.31	1.31	0.38	0.27
	TG050	50	24.1	98	1.61	1.16	2.15	0.82
			18.9	76	1.61	1.15	1.85	0.71
			14.0	57	1.61	1.16	1.48	0.68
			9.3	38	1.61	1.15	1.02	0.60
			4.3	17	1.61	1.15	0.67	0.43
			2.3	9	1.60	1.15	0.57	0.41
	TG030	30	19.9	91	1.69	0.91	2.48	0.95
			15.7	73	1.69	0.91	2.26	1.02
			12.4	58	1.70	0.92	1.93	0.86
			8.2	38	1.69	0.91	1.24	0.81
			3.7	17	1.69	0.91	0.75	0.46
			1.7	8	1.69	0.92	0.44	0.28
MG	MG100	100	32.6	96	1.37	1.37	1.38	0.49
			26.5	78	1.37	1.37	1.16	0.39
			20.5	60	1.37	1.37	0.93	0.38
			13.6	40	1.38	1.38	0.71	0.36
			6.7	20	1.37	1.37	0.49	0.31
			2.0	6	1.37	1.37	0.38	0.32
	MG050	50	21.8	97	1.65	1.19	NG	NG
			17.0	76	1.65	1.20	1.94	0.72
			13.5	61	1.66	1.21	1.66	0.71
			8.9	39	1.64	1.19	1.16	0.66
			4.9	22	1.65	1.20	0.73	0.46
			2.0	9	1.66	1.20	0.59	0.45
	MG030	30	19.0	96	1.73	0.96	2.63	1.27
			16.1	82	1.73	0.96	2.44	0.91
			11.7	59	1.73	0.96	2.03	1.02
			7.7	39	1.73	0.95	1.50	0.80
			4.5	23	1.73	0.95	0.85	0.56
			2.0	10	1.72	0.94	0.58	0.36



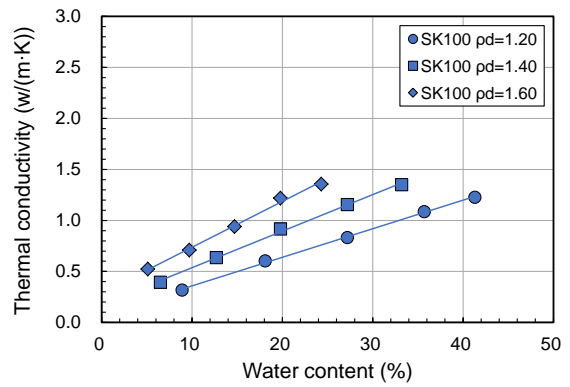
(a) TG



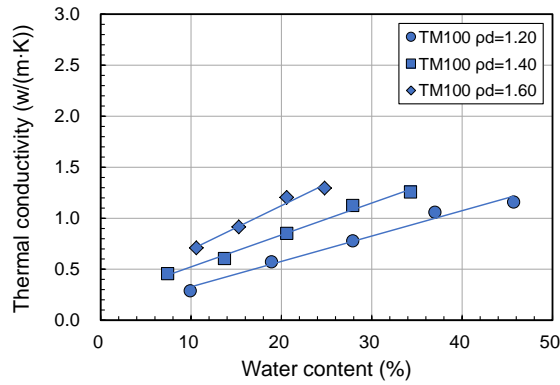
(b) MG



(c) KV

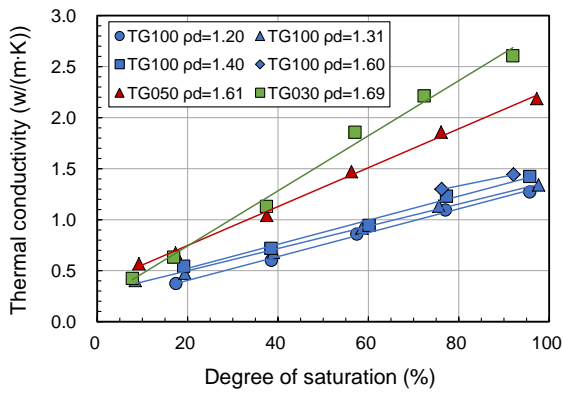


(d) SK

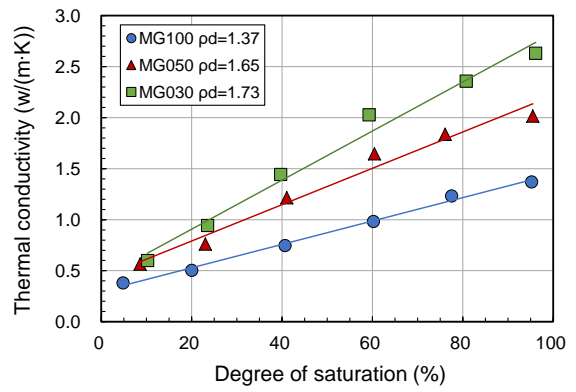


(e) TM

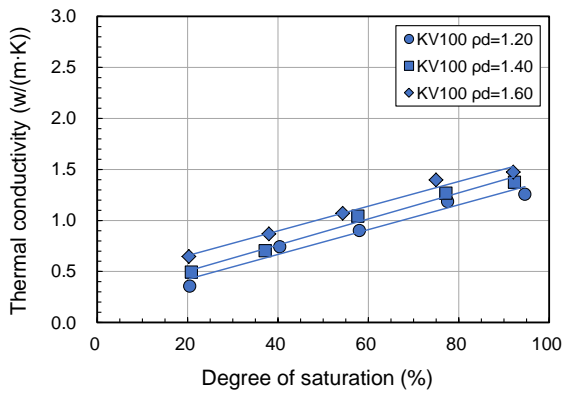
Figure 4-81 Relation between thermal conductivity and water content (QTM method)



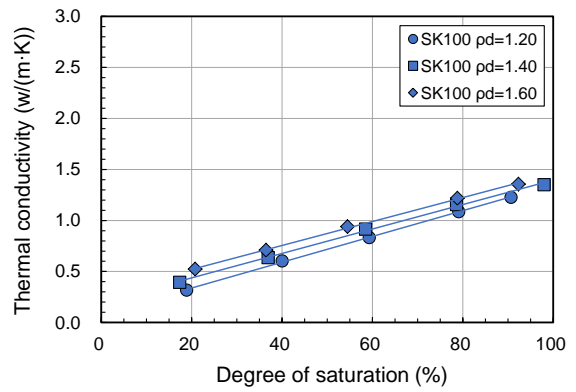
(a) TG



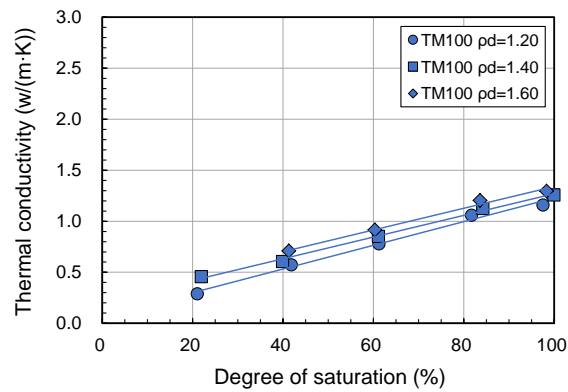
(b) MG



(c) KV

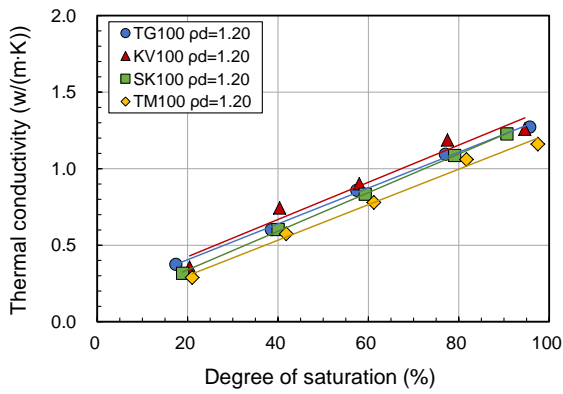


(d) SK

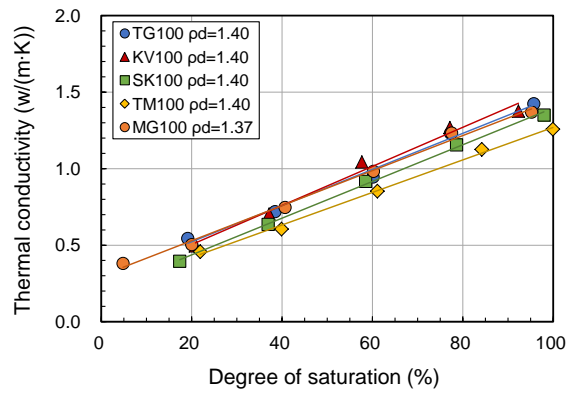


(e) TM

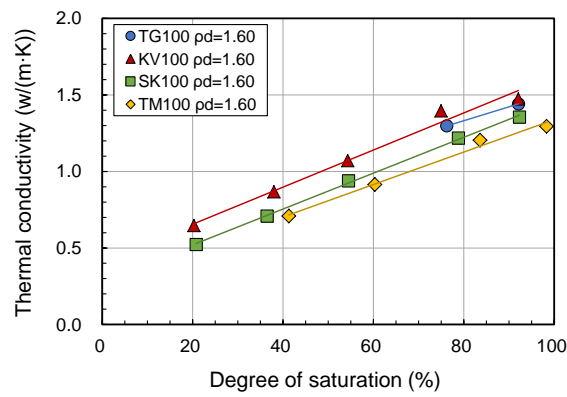
Figure 4-82 Relation between thermal conductivity and degree of saturation (QTM method)



(a) $\rho_d = 1.2 \text{ Mg/m}^3$

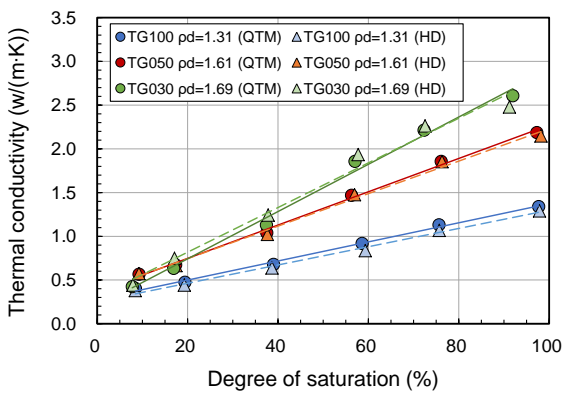


(b) $\rho_d = 1.4 \text{ Mg/m}^3$

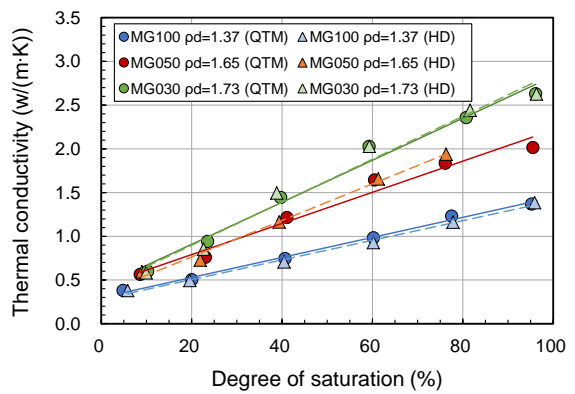


(c) $\rho_d = 1.6 \text{ Mg/m}^3$

Figure 4-83 Comparison of thermal conductivity for bentonite types (QTM method)

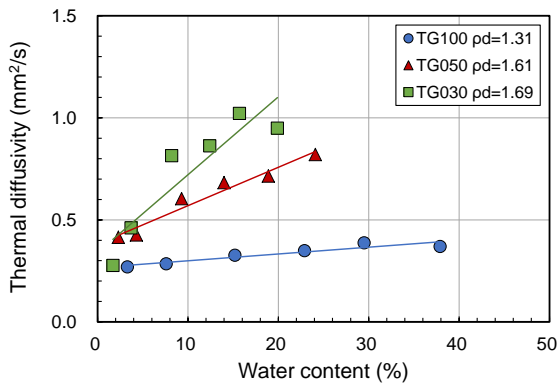


(a) TG

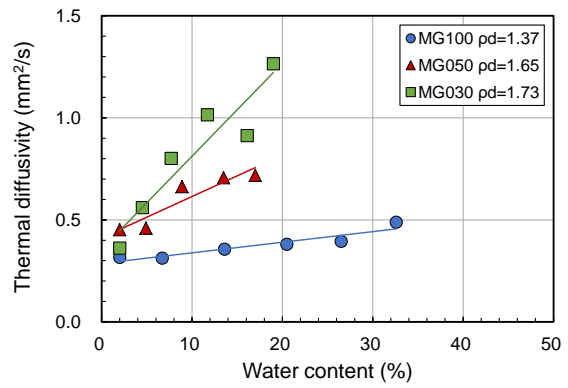


(b) MG

Figure 4-84 Comparison of thermal conductivity measured by QTM method and HD method



(a) TG



(b) MG

Figure 4-85 Relation between thermal diffusivity and water content (HD method)

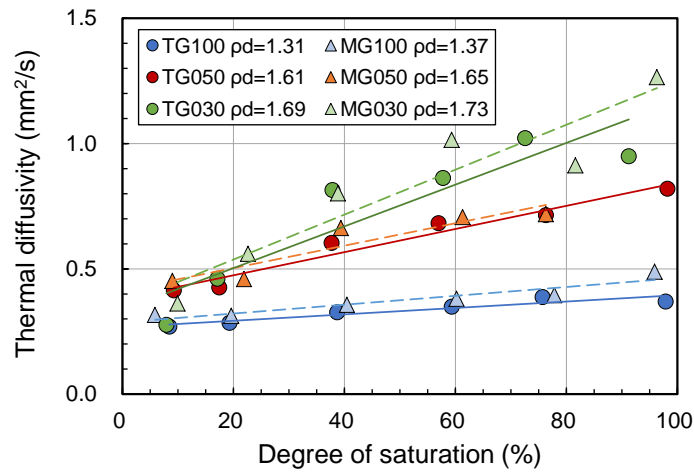


Figure 4-86 Relation between thermal diffusivity and degree of saturation (HD method)

4.8.4 既往試験結果との比較検証

菊池・棚井（2003）による試験結果との比較を行った。Figure 4-87 に本研究で測定した熱伝導率と比較した結果を示す。比較の対象としたベントナイトはKVである。いずれもベントナイト単体（ベントナイト混合率 100%）における乾燥密度 1.2, 1.4, 1.6 Mg/m³ の供試体の含水比をパラメータに測定を行っている。菊池・棚井（2003）による測定は HD 法によるものであり、本研究は QTM 法による測定結果である。多少のばらつきはあるが、熱伝導率と含水比の関係において両方の結果は良い一致を示していることが認められた。

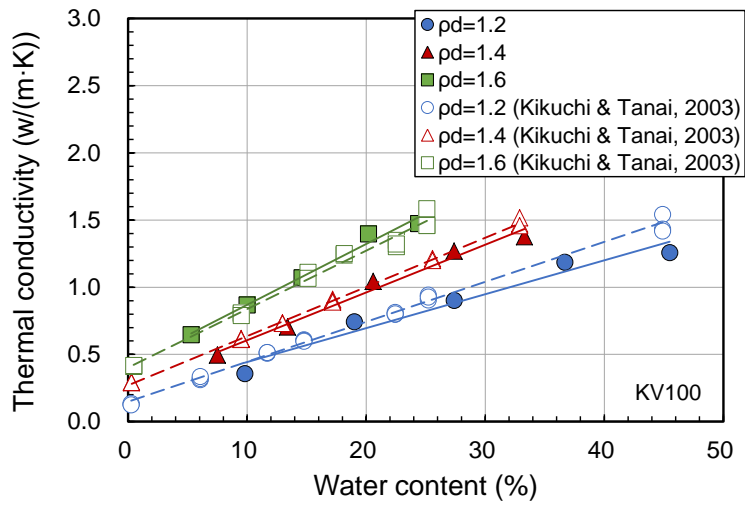


Figure 4-87 Comparison of present study and previous study on the thermal conductivity of KV

5. 基本特性試験の試験条件および試験方法に関する検討

本研究で実施したいいくつかの基本特性試験については予備試験を行って、採用する試験方法を検討した。これらの検討結果は、本試験で設定した条件や取得した試験データの信頼性に資する検討と考えることから、以下にまとめる。

5.1 含水比測定

土の含水比は、JIS A 1203 に代表される方法により測定されることが多い。これは、試料を $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ で一定質量になるまで乾燥させる方法である。一定質量になるまでの乾燥時間は、一般には、18～24 時間程度とされている。ここでは、ベントナイトについても同様の方法により測定することの妥当性を検討する。

使用した試料は、6 種類のベントナイトならびにモンモリロナイト試料 (KP-F : クニピア F / クニミネ工業製) である。これらの試料を、恒温乾燥炉を用いることにより 60°C 、 110°C 、 130°C 、 150°C で加熱し、質量変化を測定した。加熱時間は、1～7 日の範囲とした。容器としてガラス製の秤量瓶を用いた。電子天秤は、0.001 g まで測定できるものを用いた。加熱後の放冷ではシリカゲルを設置したデシケーター内において、秤量瓶の蓋をした状態で静置した。

ここでは、見かけの含水比を以下の式により計算した。

$$w' = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \quad (\text{式5-1})$$

ここに、 w' は見かけの含水比 (%), m_a は試料と容器の質量 (g), m_b は炉乾燥後試料と容器の質量 (g), m_c は容器の質量 (g) である。本節においては、含水比の測定条件を定める前の検討という位置付けにより、見かけの含水比と呼称して論述する。

各温度条件で得られた見かけの含水比と累積加熱時間の関係を Table 5-1 と Figure 5-1 に示す。同図において、比較のために 110°C -24 時間の加熱により得られた見かけの含水比の箇所に破線でマーキングした。 60°C においては、すべての試料においてほかの温度条件と比べて見かけの含水比が低いことが分かった。 110°C 、 130°C 、 150°C に昇温した後の見かけの含水比の変動としては、加熱時間によらず $\pm 0.1\%$ の範囲内であり、24 時間以上の加熱により見かけの含水比が系統的に増加することはなかった。Na 型ベントナイトに分類される KV, TG, SK, および KP-F については、 110°C から 130°C に昇温することで見かけの含水比は 0.1～0.2% の増加、 110°C から 150°C に昇温することで 0.2～0.4% の増加が認められた。一方、Ca 型ベントナイトに分類される MG, TM, IZ については 110°C から 130°C に昇温することで見かけの含水比は 0.6～0.7% の増加、 110°C から 150°C に昇温することで 0.8～1.3% の増加が認められた。相対的に Na 型より Ca 型ベントナイトのほうが昇温による見かけの含水比の増加は大きかった。

110°C -24 時間乾燥時を基準とした見かけの含水比の比率として整理した結果を Table 5-2 と Figure 5-2 に示す。これによると、見かけの含水比は 130°C において、KV, TG, SK, KP-F は 1.01～1.05 倍に、MG, TM, IZ については 1.07～1.11 倍に増加したことが分かった。また、 150°C において、KV, TG, SK, KP-F は 1.02～1.08 倍に、MG, TM, IZ については 1.10～1.17 倍に増加した。

Table 5-1 Apparent water content and cumulative heating time

Temperature (°C)	Cumulative heating time (days)	Apparent water content w'_T (%)						
		KV	TG	SK	MG	TM	IZ	KP-F
60	4.92	7.41	6.96	3.58	4.39	6.37	5.25	7.58
110	5.92	7.88	8.03	4.66	7.01	9.12	7.63	8.26
110	7.04	7.88	8.02	4.67	7.05	9.15	7.56	8.25
110	10.83	7.88	8.02	4.66	7.11	9.28	7.61	8.27
130	11.82	7.99	8.22	4.89	7.72	9.88	8.45	8.38
130	13.79	7.96	8.18	4.84	7.68	9.80	8.27	8.33
130	13.92	7.96	8.17	4.84	7.67	9.77	8.22	8.36
130	16.75	7.98	8.18	4.87	7.69	9.79	8.25	8.37
150	17.75	8.07	8.29	5.01	7.88	10.07	8.94	8.40
150	19.87	8.06	8.24	5.02	7.86	10.03	8.85	8.38
150	23.69	8.03	8.13	5.02	7.86	9.92	8.88	8.44

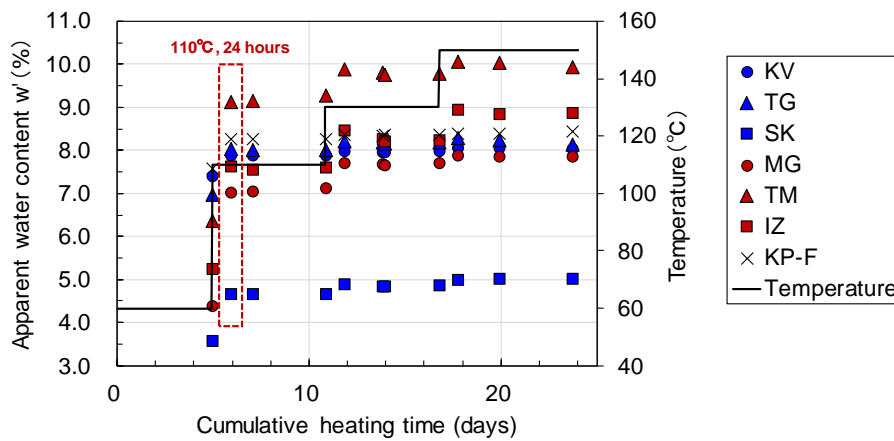


Figure 5-1 Relation between apparent water content and cumulative heating time

Table 5-2 Relative water content and cumulative heating time

Temperature (°C)	Cumulative heating time (days)	Relative water content w'_T/w'_{110}						
		KV	TG	SK	MG	TM	IZ	KP-F
60	4.92	0.94	0.87	0.77	0.63	0.70	0.69	0.92
110	5.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
110	7.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
110	10.83	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.00	1.00
130	11.82	1.01	1.02	1.05	1.10	1.08	1.11	1.01
130	13.79	1.01	1.02	1.04	1.09	1.07	1.08	1.01
130	13.92	1.01	1.02	1.04	1.09	1.07	1.08	1.01
130	16.75	1.01	1.02	1.04	1.10	1.07	1.08	1.01
150	17.75	1.02	1.03	1.07	1.12	1.10	1.17	1.02
150	19.87	1.02	1.03	1.08	1.12	1.10	1.16	1.01
150	23.69	1.02	1.01	1.08	1.12	1.09	1.16	1.02

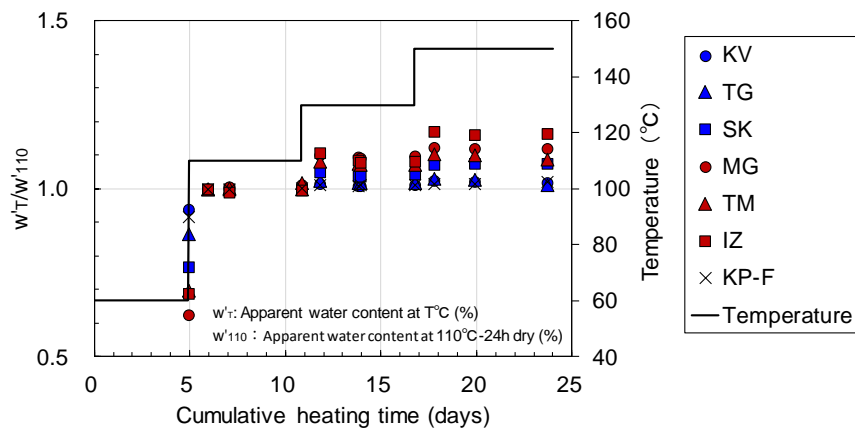


Figure 5-2 Relation between relative water content and cumulative heating time

次に、ベントナイトのイオン型により重量変化の傾向が異なることが示されたことから、抽出陽イオンの比を用いて結果を再整理した。ここでは、抽出陽イオン量 (Na, K, Ca, Mg) の総和を CEC として、Na/CEC と (Ca+Mg)/CEC をパラメータとした。110°Cを基準として、130°Cおよび 150°Cで測定された水分蒸発量を百分率で表した。水分蒸発量と抽出陽イオン比率の関係を Table 5-3 と Figure 5-3 に示す。Na/CEC や (Ca+Mg)/CEC と水分蒸発量の間には明瞭な相関関係は認められなかったが、II 価イオンの割合が高いほど水分蒸発量は最大 0.07% ほど大きいことが示された。

Na 型ベントナイトに分類される 3 種類 (KV, TG, SK) と、Ca 型ベントナイトに分類される 3 種類 (MG, TM, IZ) のそれぞれについて、110°C-24 時間の乾燥により得られた見かけの含水比と、130°Cおよび 150°Cの乾燥において得られた見かけの含水比の平均値の関係を Table 5-4 と Figure 5-4 に示す。両者の相関関係は次式にて整理することができる。

Na 型ベントナイト (KV, TG, SK)

$$w_{130} = 0.9755 \cdot w_{110} + 0.3114 \quad (130^\circ\text{Cの場合}) \quad (\text{式5-2})$$

$$w_{150} = 0.9457 \cdot w_{110} + 0.6054 \quad (150^\circ\text{Cの場合}) \quad (\text{式5-3})$$

Ca 型ベントナイト (MG, TM, IZ)

$$w_{130} = 1.0087 \cdot w_{110} + 0.6099 \quad (130^\circ\text{Cの場合}) \quad (\text{式5-4})$$

$$w_{150} = 0.9681 \cdot w_{110} + 1.2535 \quad (150^\circ\text{Cの場合}) \quad (\text{式5-5})$$

ここに、 w_{130} と w_{150} は 130°Cまたは 150°Cにおける見かけ含水比の平均値 (%), w_{110} は 110°C-24 時間における見かけ含水比 (%) である。平均値の算出には、本節で示した各温度の加熱時間における全測定値を用いた。相関係数は一部を除いて 0.999 以上であった。Ca 型ベントナイトの 150°C条件については、相関係数が 0.956 とほかと比べてやや低かったが、熱分析の結果を踏まえると、復水による影響で見かけの含水比の測定値がばらついたためと考えられる。

以上の検討より、本研究に反映できる含水比測定の要点を整理すると以下ようになる。

- ・ 昇温後に加熱時間を 24 時間以上に延ばしても見かけの含水比に系統的な増加傾向は認められないことから、炉乾燥の時間は 24 時間以上であれば良い。
- ・ 130～150℃の乾燥による見かけの含水比の変化は限定的な範囲であること、150℃条件においては復水が乾燥重量測定に及ぼす影響が懸念されたことから、加熱温度は JIS A 1203 で規定される 110±5℃に統一することで測定の再現性が得られる。

以上より、本研究においては、110±5℃で 24 時間以上乾燥させて得られたものについて含水比と記載することとした。

Table 5-3 Difference of evaporation mass from 110°C condition and ratios of extracted cations

Temperature (°C)	Difference of evaporation mass from 110°C (%)						
	KV	TG	SK	MG	TM	IZ	KP-F
130	0.08	0.08	0.07	0.13	0.14	0.14	0.17
150	0.15	0.15	0.14	0.15	0.17	0.17	0.31

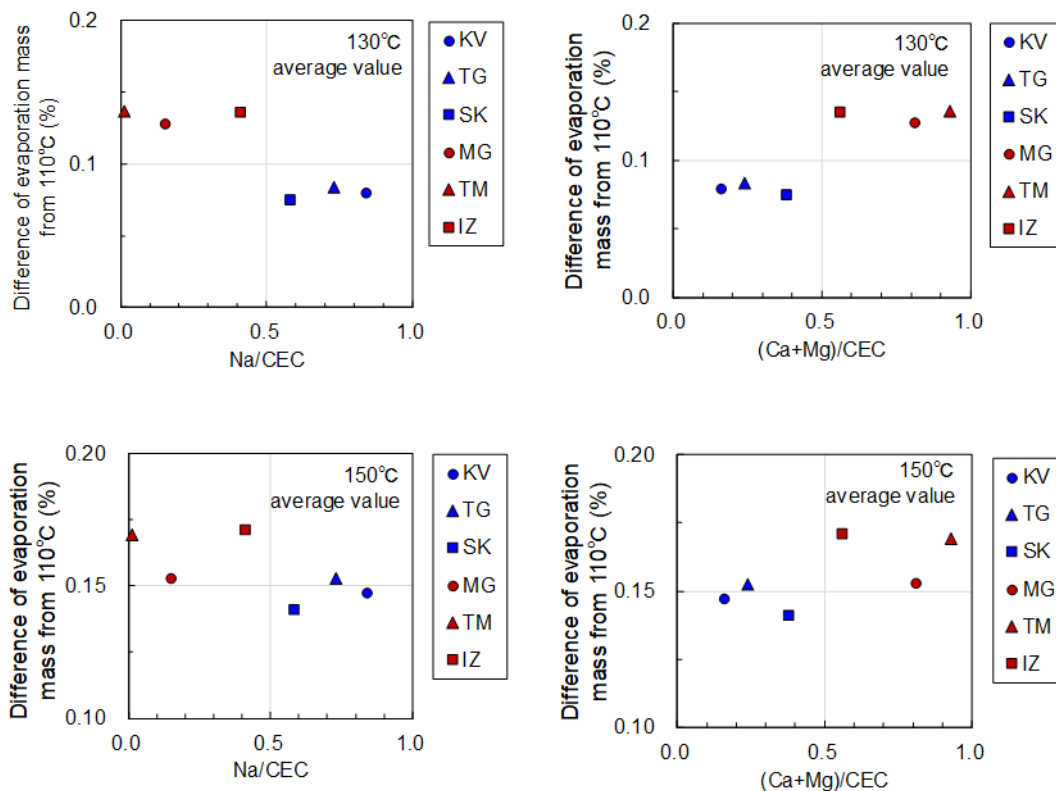
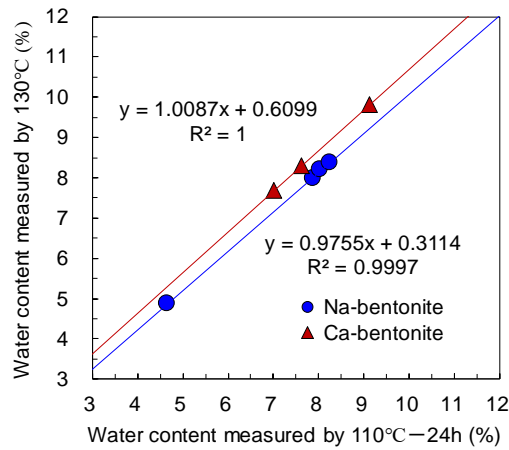


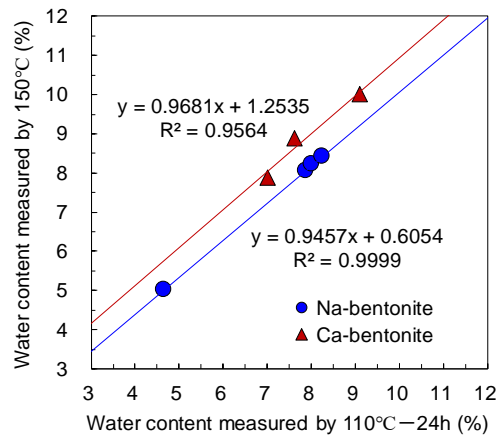
Figure 5-3 Relation between difference of evaporation mass from 110°C condition and ratios of extracted cations

Table 5-4 Apparent water content by conventional drying and higher heating methods

Temperature (°C)	Average of apparent water content (%)						
	KV	TG	SK	MG	TM	IZ	KP-F
110	7.88	8.02	4.66	7.06	9.18	7.60	8.26
130	7.97	8.19	4.86	7.69	9.81	8.30	8.36
150	8.05	8.22	5.01	7.87	10.01	8.89	8.40



(a) 130°C



(b) 150°C

Figure 5-4 Relation of water content by conventional drying and higher heating methods

5.2 膨潤変形試験における上載圧の検討

膨潤変形試験では、膨潤率は上載圧によって異なることから、試験結果の活用も考慮して上載圧を定める必要がある。本研究では、ベントナイト系材料に対する拘束力が比較的弱い状態を想定することとした。例えば、ベントナイト系材料の施工時に生じる隙間に対して、再冠水により不飽和から飽和へ至る過程で膨潤により隙間を埋める現象（自己シール）である。既往の研究では、低荷重の条件としては5～20 kPaで行われている（小峯・緒方，2002，田中・中村，2005）。膨潤変形に伴う鉛直変位量を測定するため、鉛直方向の変位に対して摩擦の影響を軽減し、供試体の一次元変形を生じさせる必要がある。荷重が小さすぎると、こうした影響が顕著に表れ、試験結果の変動や再現性の低下につながるものが懸念される。本研究では、上載圧を決定するため、上載圧を変えた予備試験を実施した。また、膨潤変形が収束するまでに長時間を要することから、双曲線近似による最大膨潤率の評価方法と寸法効果についても検討した。

予備試験で使用した供試体はKV070とKV100であり、供試体の高さは1.0 cmならびに0.5 cmとした。上載圧は12.7 kPaならびに19.6 kPaとした。本研究で使用した膨潤変形試験装置では、ピストンなどの重量により、上載圧は12.7 kPaが最小値となる。試験装置は4.4.2節に示したとおりである。試験結果の整理において、膨潤率の時系列データを双曲線近似した。これについても4.4.2節に示したとおりの方法である。

予備試験の結果をFigure 5-5に示す。上載圧は12.7 kPaの場合には、膨潤率と経過時間の関係に不規則な傾きの変化が観察された。一方、上載圧を19.6 kPaとすることにより、不規則な傾きの変化はない滑らかな膨潤率と経過時間の関係が得られた。これらの結果の違いは、摩擦などの影響によるものと考えられる。再現性の高い試験を行えるよう、上載圧の下限として、本研究では上載圧を19.6 kPaとした。

Table 5-5より、KV100で比較すると、供試体の高さによらず双曲線近似より求めた最大膨潤率は±5%の幅に収まる結果となった。供試体の高さが0.5 cmのケースについては、約10日時点で膨潤変形はほぼ終了していたことを考慮すると、10日以上の時系列データを用いて双曲線近似を行うことにより、供試体の高さ0.5～1.0 cmの範囲であれば、最大膨潤率を再現性良く評価できると考えられる。供試体の高さについては、高さが低いほど、試験期間を短縮できることが予想される。一方、本研究では、ケイ砂を混合することから、供試体高さが小さい時に粒径の影響が生じる可能性もある。これらの点を踏まえ、本研究では、供試体高さは約1.0 cmとし、双曲線近似に用いるデータとしては14日以上を確保することとした。

膨潤変形試験の寸法効果について検討した既往研究（田中ほか，2002）では、膨潤ひずみ（本研究における膨潤率と同意）と時間（ t ）の間に寸法則が存在し、膨潤ひずみと t/H^2 の関係は初期供試体厚さ（ H ）に依存しないと示されている。これをもとに経過時間を初期の供試体高さで基準化した値を用いて整理すると、Figure 5-6に示すように、たしかに膨潤率と t/H^2 の関係には供試体寸法の影響がほとんどないことが確かめられた。

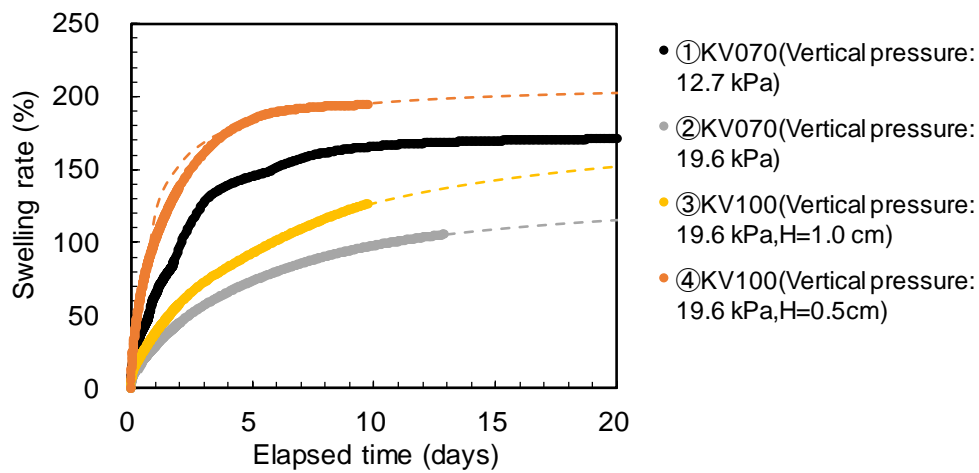


Figure 5-5 Relation between swelling rate and elapsed time in preliminary swelling deformation test
(Broken line: hyperbolic approximation)

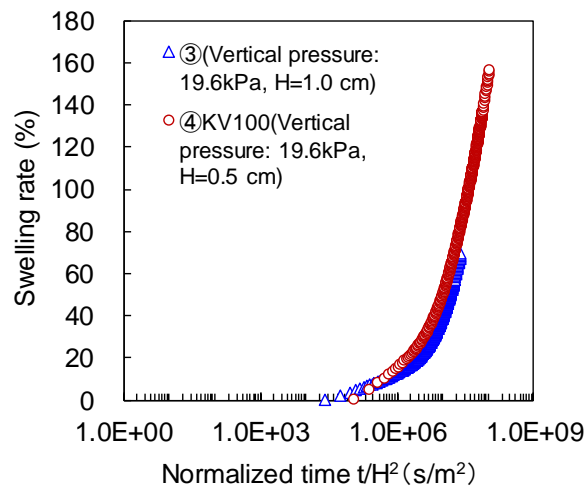


Figure 5-6 Relation between swelling rate and elapsed time normalized by specimen height

Table 5-5 Hyperbolic approximated maximum swelling rate in preliminary swelling deformation test

Sample	Specimen height (cm)	Vertical pressure (kPa)	Maximum swelling rate based on the hyperbolic approximation (%)
KV070	1.0	12.7	No data
KV070	1.0	19.6	140
KV100	1.0	19.6	190
KV100	0.5	19.6	210

5.3 人工海水を用いた場合の側壁漏れの検討

JIS A 1218:2009 に記載されている透水試験では、特に乱さない試料を用いる際に、供試体と供試体リングの境界付近の漏水が問題になることがあり、漏水防止のために止水材による充填や三軸圧縮試験機を用いて供試体をゴム膜で包んで試験を行うことが解説の注意事項とされている。JGS 0312-2018 に記載されている低透水性材料の透水試験では、供試体側面と容器内側面の境界近傍の流れ（側壁漏れ）が想定される場合には、前述した方法のほかに、供試体周囲付近と供試体中心の流量を別々に測定する方法により、影響の有無を確認することが好ましいとされている。本研究では、人工海水を用いて透水係数の測定を行う。人工海水を用いると、粘土は凝集しやすく、この時、側壁漏れが起きやすい状況になると予想される。低透水性材料の透水試験においては、側壁漏れが生じることで、透水性を過大に評価する可能性がある。そこで、本研究では、供試体の流出側断面を内側と外側で分割した透水セルを用い、人工海水条件における側壁漏れの影響を検討した。この試験の対象は KV030 と KV050 である。

試験装置の写真を Figure 5-7 に示す。また、試験装置の概略図を Figure 5-8 に示す。基本的な構造は Figure 4-13 で示した透水・膨潤圧試験装置と同じである。供試体上部に位置するポーラスメタルが直径 48 mm の位置で分割されており、これの内側と外側の流量を区別して計測することが可能となっている。ポーラスメタルの内側と外側にそれぞれ容量 2 mL のビュレットが接続されており、各ビュレットの読み値から透水係数を算出した。特に、透水圧を作用させない場合は、一方の両ビュレットに水位差が生じると、供試体の内側と外側に対して同等の動水勾配とみなすことができなくなる。そのため、流量計測では、両ビュレットの水位差が開かないように、短い計測インターバルとなるようにした。透水係数の算出においては、動水勾配と流出流量だけを用いて、供試体の内側と外側の断面積に対して、それぞれダルシー則に基づいて計算した。

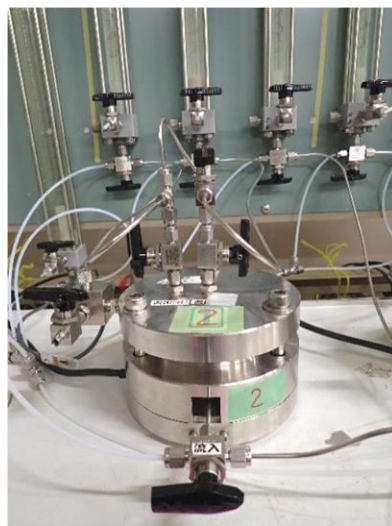


Figure 5-7 Double wall permeameter

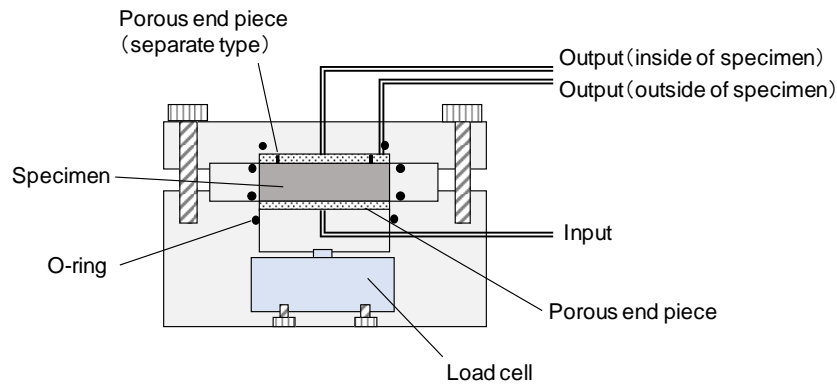
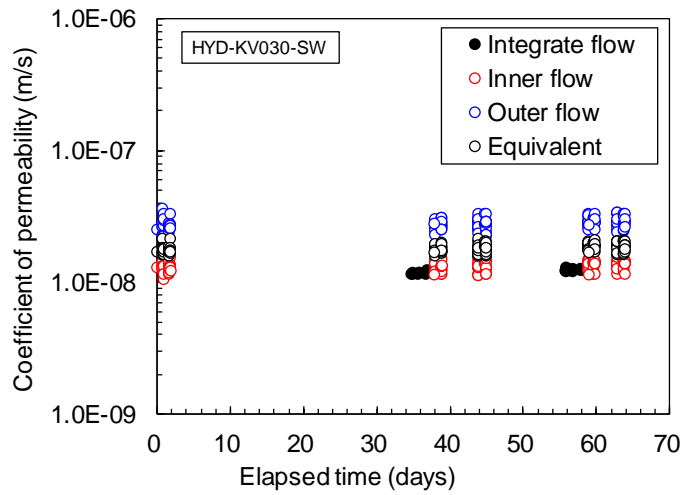


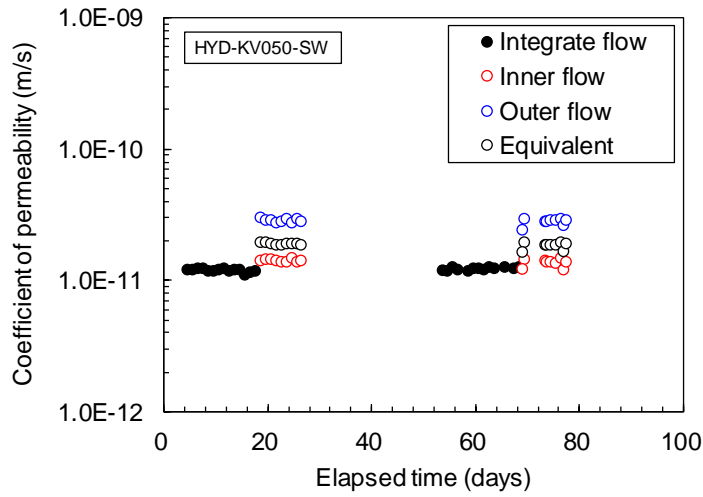
Figure 5-8 Schematic image of double wall permeameter

透水係数と経過時間の関係をFigure 5-9に示す。供試体外側の流量より計算された透水係数は、供試体内側の値と比べて約2~3倍大きな値となった。側壁漏れを完全に抑制することはできず、供試体外側の流量のほうがわずかに高くなることが分かった。断面積を用いて等価透水係数に換算した値も図中に示したが、これは供試体の内側および外側流量による透水係数の間にプロットされ、供試体内側の透水係数とは2倍以内であった。透水試験の精度として、透水係数がほぼ一定とみなす時の判断基準が±50%の幅に収まることを考慮すると、供試体内側の透水係数と等価透水係数はほとんど変わらないとみなすことができる。供試体の内側と外側につながる排水ラインを統合して一本のビュレットで測定した時の値は、供試体の内側とほぼ同じ値となった。原理的には、統合時の計測値は等価透水係数と一致するはずである。本装置においては、流出側ポーラスメタルには内外分割のためのスリットがあるため、流入側と流出側で厳密には断面積が一致していないこと、また、流出側のポーラスメタル内外で別々に流出した溶液が配管を統合することにより合流している。そのため、定量化できない損失水頭が生じた結果、統合時の透水係数は比較的小さい値を示した可能性がある。

以上より、人工海水を用いた場合に、側壁漏れにより供試体外側の透水性が供試体内側の2~3倍になることはあるが、透水係数をオーダーで変化させるほどではないと考えられる。供試体内側の流量から算出された透水係数が側壁漏れの影響を除外した値として信頼性が高いと考えられることから、供試体内側の透水係数を4.3節において使用することとした。



(a) Mixing ratio of bentonite 30%



(b) Mixing ratio of bentonite 50%

Figure 5-9 Coefficient of permeability measured by using the double wall permeameter (KV, SW)

5.4 圧密試験における圧密終了判定方法の検討

圧密収束の判定方法として、 $3t$ 法、 \sqrt{t} 法と浅岡法 (Asaoka, 1978) の3つの方法で、収束時間の比較を行った。浅岡法は一定のデータ測定間隔におけるデータにおける j 番目と $j+1$ 番目の変位量の値をプロットし、この関係が直線になるとして $j=j+1$ の直線と交じり合う点を最終沈下量すなわち圧密収束と判定する方法である。

TG050-DW の試験条件で予備的に圧密試験を実施し、浅岡法、 $3t$ 法、 \sqrt{t} 法のそれぞれの方法で収束判定を行った結果の例を Figure 5-10, Figure 5-11, Figure 5-12 に示す。また、それぞれの判定法による収束時間と収束時の変位量を Table 5-6 にまとめる。浅岡法では、データ測定間隔を6時間として整理した。各載荷段階で最も長い収束時間となった判定法の値を朱書きで示した。 \sqrt{t} 法が最も収束時間は短かったが、1~2日程度で変位量の変化がほぼ収束する荷重段階では $3t$ 法のほうが浅岡法よりも収束時間は短く、変形の収束に7日程度以上かかる場合には浅岡法のほうが $3t$ 法よりも収束時間は短くなった。

各収束判定法で整理した $e\text{-log } p$ 曲線を Figure 5-13 に示す。収束までの時間が短いほど発生する変位量が小さくなるため、 \sqrt{t} 法で判定した各載荷段階における収束時の間隙比は相対的に小さくなった。そのため、 $e\text{-log } p$ 曲線は載荷・除荷の間で $3t$ 法や浅岡法と比較して小さいループとなった。 $3t$ 法と浅岡法との間に有意な差は見られなかった。

収束までに1週間以上を要する荷重段階では、浅岡法を選択するのが合理的であると考えられた。そこで本研究の圧密試験では、 $3t$ 法を基本として収束判定することとし、収束に1週間を超えるような場合には、浅岡法の適用も可能とした。

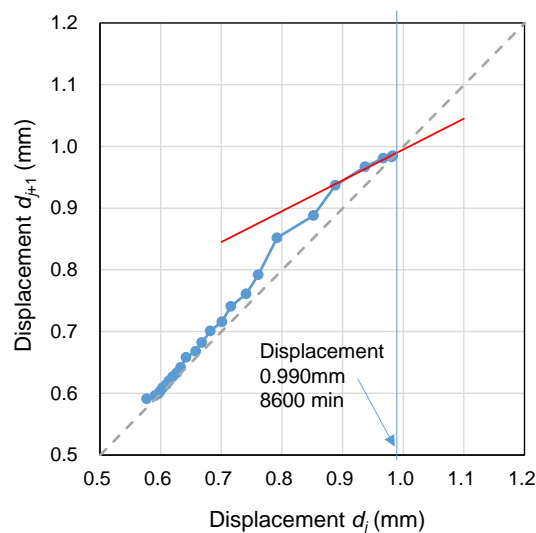


Figure 5-10 Example of convergence judgment by Asaoka's method

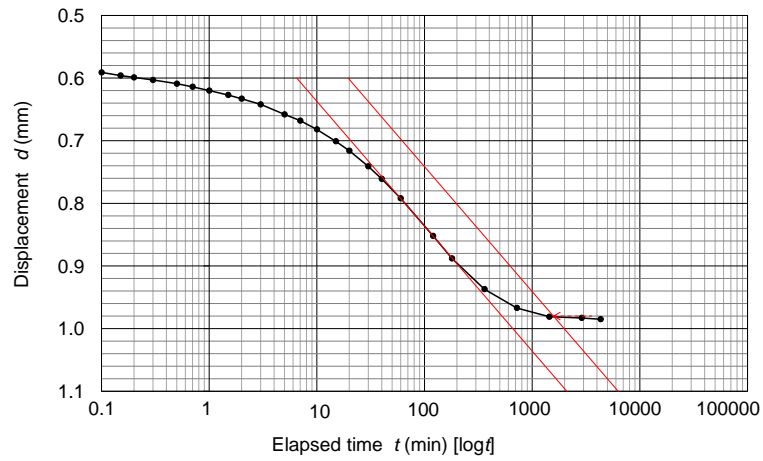


Figure 5-11 Example of convergence judgment by $3t$ method

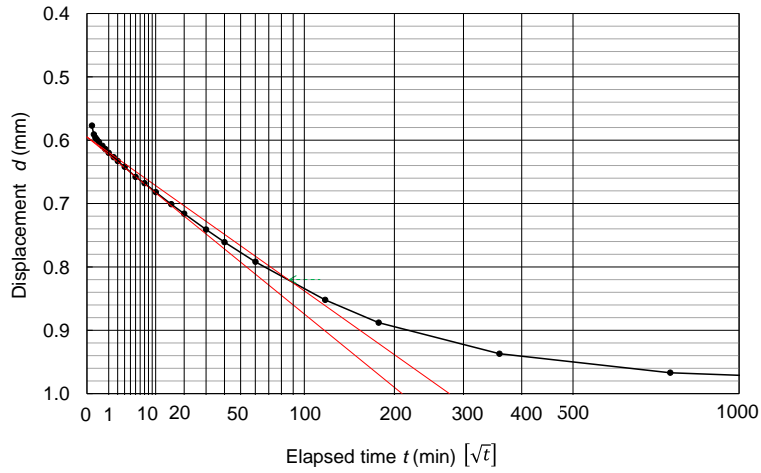


Figure 5-12 Example of convergence judgment by \sqrt{t} method

Table 5-6 Convergence time by each method

Loading step	\sqrt{t} method				$3t$ method				Asaoka's method			
	Final disp.	Convergence time	Volume ratio	Void ratio	Final disp.	Convergence time	Volume ratio	Void ratio	Final disp.	Convergence time	Volume ratio	Void ratio
	(mm)	(min)	(-)	(-)	(mm)	(min)	(-)	(-)	(mm)	(min)	(-)	(-)
1	0.398	130	1.588	0.588	0.490	1300	1.573	0.573	0.528	11520	1.566	0.566
2	0.911	255	1.502	0.502	0.980	1550	1.490	0.490	0.990	8600	1.488	0.488
3	1.517	300	1.399	0.399	1.617	1900	1.382	0.382	1.626	2800	1.381	0.381
4	1.556	88	1.393	0.393	1.548	560	1.394	0.394	1.545	2160	1.394	0.394
5	1.441	180	1.412	0.412	1.409	2000	1.417	0.417	1.403	4320	1.418	0.418
6	1.209	1080	1.451	0.451	1.173	5600	1.457	0.457	1.170	7200	1.458	0.458
7	0.831	2680	1.515	0.515	0.768	16000	1.526	0.526	0.783	7920	1.523	0.523
8	0.178	24500	1.625	0.625	0.157	65000	1.629	0.629	0.165	46080	1.628	0.628
	Total min.	29213			Total min.	93910			Total min.	90600		
	days	20.3			days	65.2			days	62.9		

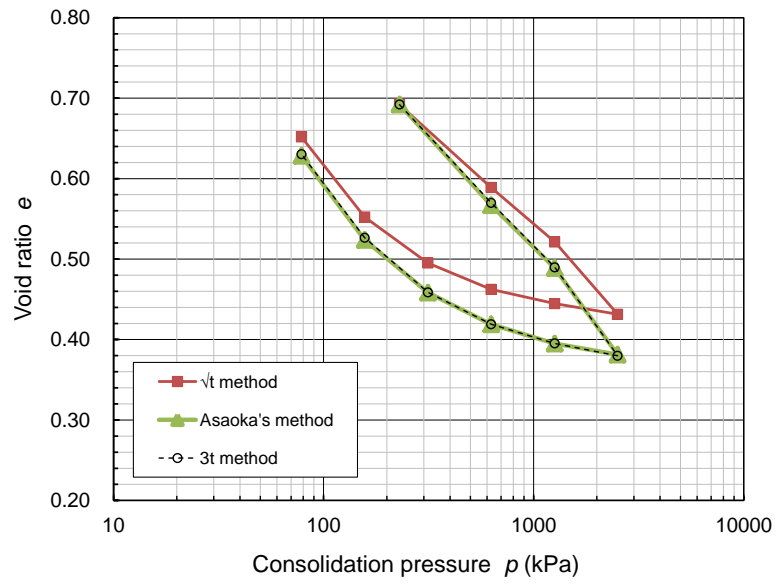


Figure 5-13 Comparison of e - $\log p$ curves obtained by each convergence judgment method

5.5 人工海水を用いた試料調整による基本特性への影響

本研究で実施した圧密試験，三軸圧縮試験，保水性試験（加圧板法）の人工海水を試験条件とする試験では，4.1.5 項に述べた理由により，絶乾させた試料に対して人工海水で水分調整して供試体を作製後，人工海水で水浸脱気または通水することにより試験を実施した。しかしながら，実際に起こり得るであろう，緩衝材の製作から処分場閉鎖後の地下水の浸透過程を想定すると，イオン交換水で水分調整した試料を用いて供試体を作製し，人工海水を通水させることにより試験を実施するのが好ましい。そこで，両方の方法で作製した供試体を用いて圧密試験を実施して，人工海水を用いた試料調整による特性値への影響を検討した。

Figure 5-14 に圧密試験装置にセットしてからの通水中に測定した膨潤圧の変化を示す。使用した供試体は TG100 であり，乾燥密度は共に 1.325 Mg/m^3 であった。図の凡例の TG100-SW_DW はイオン交換水で水分調整した試料を用いたケースで，TG100-SW_SW は人工海水で水分調整した試料を用いたケースである。いずれも，通水による飽和化は人工海水によるものである。図の最終時刻の膨潤圧を平衡膨潤圧とすると，TG100-SW_DW は 854 kPa で，TG100-SW_SW は 762 kPa であり，人工海水で試料調整した場合のほうが小さい膨潤圧であった。

Figure 5-15 に両方の試料調整方法による $e\text{-log } p$ 曲線を比較して示す。載荷過程の圧縮量と除荷過程の膨潤量ともに，イオン交換水で試料調整した場合の TG100-SW_DW のほうが大きかった。したがって，試験用水を人工海水とする条件であっても，人工海水で調整した試料を用いた場合には，その差は大きくはないものの，イオン交換水で試料調整した試料を用いた場合に比べて圧縮性，膨潤性にかかわる特性値は小さな値を示すことが分かった。本研究データの利用においては，この点に注意する必要がある。

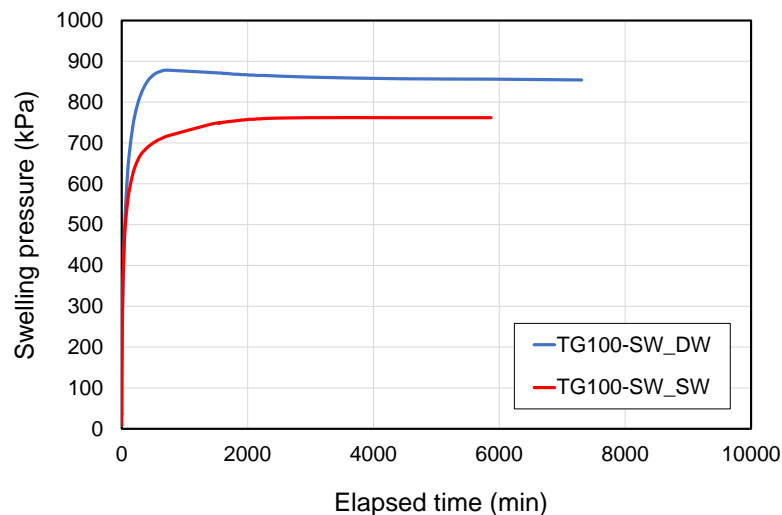


Figure 5-14 Swelling pressure-time history

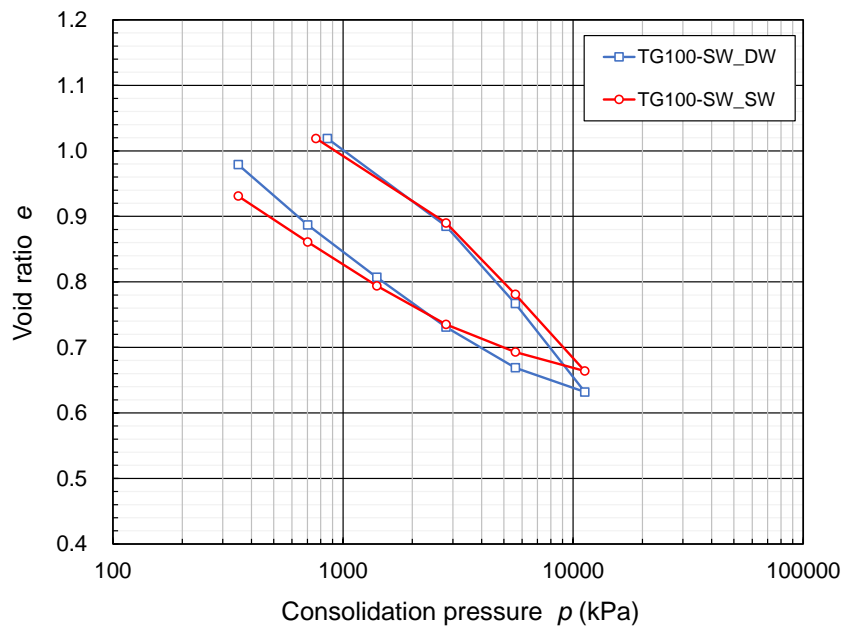


Figure 5-15 Comparison of e - $\log p$ curves for different sample preparation waters

6. まとめ

本研究では、国内産の6種類のベントナイトを対象に、鉱物学的観点からの性状分析を行うとともに、イオン交換水または人工海水を用いた各種試験を実施した。そして、試験条件や供試体条件と併せて得られたデータを整理した。試験結果について要約すると以下のとおりとなる。

① ベントナイトの性状分析

基本特性試験で対象とするベントナイトの鉱物学的または物理化学的性質を把握するため、試料の性状分析を行った。ここでは、ベントナイトの分析項目として鉱物組成、メチレンブルー吸着量、抽出陽イオン量、粒度、脱水特性、土粒子の密度、モンモリロナイト含有率を、モンモリロナイトの分析項目として非膨潤層の割合、層電荷発現位置、平均層電荷、粒子サイズを調べた。これらの結果から、ベントナイトの種類によって交換性陽イオン組成やモンモリロナイト含有率などが異なることが分かった。この結果は、基本特性試験データの解釈または活用において参考情報になることが期待される。

② 基本特性試験

人工バリア設計に資するため、基本特性試験として締固め試験、透水試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験、圧密試験、三軸圧縮試験、保水性試験、熱特性測定試験を実施した。

- ・ ベントナイトおよびベントナイト-ケイ砂混合土について締固め試験を実施した。一定のエネルギーで最も締め固まる条件を明らかにし、これより各種試験における供試体仕様を決定した。
- ・ 高い有効粘土密度ほど平衡膨潤圧は高くなる傾向が得られた。人工海水を用いることにより、平衡膨潤圧はイオン交換水を用いた時よりも低下した。その傾向はベントナイト混合率が高く、有効粘土密度が高い条件ほど顕著であった。
- ・ 高い有効粘土密度ほど透水係数は小さくなる傾向が得られた。TMを除いた5種類については、人工海水を用いることにより透水係数は増大し、その傾向はベントナイト混合率が低く、有効粘土密度が低い条件ほど顕著であった。
- ・ 高い有効粘土密度ほど最大膨潤率は大きくなる傾向が得られた。人工海水を用いることにより、最大膨潤率はイオン交換水を用いた時よりも低下し、Na型に分類したベントナイトで顕著であった。膨潤変形後の透水係数は、透水・膨潤圧試験により得られた透水係数-有効粘土密度の関係を内挿または外挿した範囲にあった。
- ・ 圧密試験において浅岡法、 $3t$ 法、 \sqrt{t} 法のそれぞれの収束判定について検討した。また、ベントナイトのイオン型やベントナイト混合率による圧縮性の違いを把握した。Na型に分類したベントナイトでは、イオン交換水を用いた場合に $e\text{-log } p$ 面上の非線形性が見られたが、人工海水を用いた場合には、その非線形性は弱くなる結果が得られた。
- ・ 圧密非排水三軸圧縮試験により、応力-ひずみ関係、有効応力経路、強度定数、ならびに、限界状態パラメータを取得した。人工海水を用いることで、強度定数は、わずかに低下する、もしくは、ほとんど変わらない結果となった。
- ・ 蒸気圧法とサイクロメータ法により水分特性曲線を取得した。モンモリロナイト含有率

で補正した含水比と水分ポテンシャルには相関性がみられる結果となった。

- HD 法と QTM 法により熱伝導率を測定し、これが含水比と相関があること、両者が同等の結果となることを確認した。

今後、本研究で得られたデータを研究や技術開発、ならびに設計などで活用する。

参考文献

- Asaoka, A. (1978) : Observational procedure of settlement prediction, SOILS AND FOUNDATIONS, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.18, No.4, pp.87-101.
- 地層処分研究開発調整会議 (2018) : 地層処分研究開発に関する全体計画 (平成30年度～平成34年度) .
- Cho, W. J., Lee, J. O. and Kang, C. H. (2000) : Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository, Annals of Nuclear Energy, 27, pp. 1271-1284.
- 土木学会 (2009) : 余裕深度処分における地下施設的设计, 品質管理および検査の考え方, 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会.
- 藤田朝雄, 杉田裕, 納多勝, 幾世橋広 (1992) : 緩衝材の熱物性試験, 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN1410 92-052.
- Greene-Kelly, R. (1955) : Dehydration of montmorillonite minerals, Mineral. Mag., 30, pp. 604-615.
- International Zeolite Association (2017) : Database of Zeolite Structure, <http://www.iza-structure.org/databases/> (2022年3月1日閲覧)
- 伊藤雅和 (2019) : ベントナイト資源及び工業の現状と将来, 原環センタートピックス, No. 130, pp. 3-12.
- 地盤工学会 (2016) : 「低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会」研究報告書.
- 地盤工学会 (2020) : 地盤材料試験の方法と解説 (第一回改訂版) , p. 195.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999) : 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—総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- 菊池広人, 棚井憲治 (2003) : 緩衝材の熱物性測定試験 (III) —面熱源法による緩衝材熱物性の取得— (試験報告), サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-009.
- 菊池広人, 棚井憲治 (2005) : 幌延地下水を用いた緩衝材・埋戻し材の基本特性試験, サイクル機構技術資料, JNC-TN8430 2004-005.
- 河野伊一郎, 西垣誠 (1982) : 室内透水試験法に関する2, 3の考察, 土質工学会論文報告集, Vol. 22, No. 4, pp. 181-190.
- 小峯秀雄, 緒方信英 (1991) : 塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案, 土木学会論文集, 436, III-16, 103-110.
- 小峯秀雄, 緒方信英 (2002) 砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性, 土木学会論文集, No. 701, III -58, pp. 373-385.

- Laird, D. A., Scott, A. D. and Fenton, T. E. (1989) : Evaluation of the alkylammonium method of determining layer charge, *Clays and Clay Minerals*, 37, pp. 41-46.
- MacEwan, D. M. C. and Wilson, M. J. (1984) : Interlayer and intercalation complexes of clay minerals. In *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification*; Brindley, G.W., Brown, G., Eds.; Mineralogical Society: London, UK, pp. 197-248.
- 松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明 (1997) : 緩衝材の飽和透水特性, 動力炉・核燃料開発事業団報告書, PNC-TN8410 97-296.
- 三河珪石 (2021) : 製品紹介三河珪砂普通品, <http://www.mikawakeiseki.co.jp/fuhin.htm> (2022年2月9日閲覧)
- 水野 克己, 近藤 三二, 嘉門 雅史 (2003) : 各種ベントナイトのコンシステンシー特性およびその他の基礎的特性に関する研究, *粘土科学*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-13.
- 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦 (2011) : ベントナイト系材料に対する透水試験と膨潤圧試験の現状調査と試験による検討, 電力中央研究所報告, N10026.
- 日本粘土学会 (1987) : 粘土ハンドブック第二版, 技報堂出版.
- 日本粘土学会 (2009) : 粘土ハンドブック第三版, 技報堂出版.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2018) : 地層処分事業の技術開発計画 (2018年度~2022年度), NUMO-TR-18-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03.
- Olis, A. C., Malla, P. B. and Douglas, L. A. (1990) : The rapid estimation of layer charge of 2:1 expanding clays from a single alkylammonium ion expansion, *Clay Minerals*, 25, pp. 39-50.
- 笹倉剛, 畔柳幹雄, 岡本道孝 (2002) ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ8400-2002-025.
- Sato, T., Murakami, T. and Watanabe, T. (1996) : Change in layer charge of smectites and smectite layers in illite/smectite during diagenetic alteration, *Clays and Clay Minerals*, 44, pp. 460-469.
- Sato, T., Watanabe, T. and Otsuka, R. (1992) : Effects of layer charge, charge location, and energy change on expansion properties of dioctahedral smectites, *Clays and Clay Minerals*, 40, pp. 103-113.
- 信太拓, 坂下弘人, 熊田俊明 (1997) : 点熱源法による緩衝材の熱物性値測定法の開発, 日本原子力学会, 1997 秋の大会.
- 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 (1999) : 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.

- 鈴木英明, 藤田朝雄 (1999) : 緩衝材の膨潤特性, サイクル機構技術資料, JNC-TN8400 99-038.
- 鈴木英明, 藤田朝雄, 菅野毅 (1996) : 緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数, 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN8410 96-117.
- 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬 (1992) : 緩衝材の特性試験 (I), 動力炉・核燃料開発事業団報告書, PNC TN8410 92-057.
- 鈴木英明, 谷口航 (1999) : 緩衝材の熱物性試験 (II) (試験報告), サイクル機構技術資料, JNC TN8430 99-6.
- 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦 (2010) : ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討—日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究成果報告—, JAEA-Research 2010-025.
- 田中幸久 (2011) : ベントナイトの吸水膨潤モデルによる膨潤圧試験における試験条件の影響評価, 土木学会論文集C, Vol. 67, No. 4, pp.513-531.
- 田中幸久・中村邦彦 (2005) : 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響とその評価, 土木学会論文集, No. 806, III-73, pp. 93-111.
- 田中幸久・中村邦彦・川西光弘 (2002) : ベントナイト膨潤変形試験における寸法則, 第37回地盤工学研究発表会, pp. 283-284.
- Tanaka, Y. and Watanabe, Y. (2019) : Modelling the effects of test conditions on the measured swelling pressure of compacted bentonite, Soils and Foundations, Vol. 59, No. 1, pp. 136-150.
- Watanabe, T. (1988) : The structure model of illite/smectite interstratified mineral and the diagram for its identification, Clay Science, 7, pp. 97-114.
- 渡邊保貴, 田中幸久 (2015) : 締固め時の含水比に着目した微小変位制御によるベントナイトの膨潤特性試験, 土木学会第71回年次学術講演会講演集.
- Watanabe, Y. and Tanaka, Y. (2016) : Hydraulic conductivity test for Ca-type bentonite using rigid wall permeameter, 第60回地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp. 1-4.
- 渡邊保貴, 田中幸久, 中村邦彦, 廣永道彦 (2013) : Ca型ベントナイト混合土の透水試験方法 (その1) —室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法—, 電力中央研究所研究報告, N13005.
- 渡邊保貴, 横山信吾 (2020) : メチレンブルー吸着試験の測定精度を考慮したベントナイトのモンモリロナイト含有率の評価, 土木学会論文集C, Vol.76, No.1, pp.26-39.
- Weitkamp, J. and Puppe, L. (Eds.). (2013) : Catalysis and zeolites: fundamentals and applications, Springer Science & Business Media.
- 山本陽一, 後藤考裕, 窪田茂, 千々松正和, 雨宮清 (2017) : ベントナイトの基礎的特性に関

する比較検討，第72回土木学会年次学術講演会講演概要集，VII-040，pp. 79-80.

謝辞

本研究の推進に当たっては、質の高い成果の創出を目的として専門家委員会を設置し、試験計画ならびに試験結果の妥当性について多角的に議論していただいた。本委員会の委員を快く引き受けてくださった、早稲田大学教授 小峯秀雄先生、名城大学教授 小高猛司先生、ESEコンサルティングLLC代表（元京都大学大学院教授）榊利博様に深く感謝します。

また、本研究の対象としたベントナイトに関しては、各メーカー様より鉱山や製品に関する情報のほか、サンプルの提供をしていただいた。カサネン工業株式会社、関ベン鉱業株式会社、クミネ工業株式会社、日本砥研株式会社、株式会社ホージュンの関係者の皆様に対して、厚く感謝申し上げます。

最後に、試験の実施などに多大なご協力をいただいた神戸大学准教授 橘伸也先生、株式会社 安藤・間、株式会社セレス、東電設計株式会社の関係各位に深く感謝します。

(空白ページ)

(空白ページ)

原子力発電環境整備機構

(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)