

緩衝材の乾燥収縮特性

(研究報告)

1999年3月

核燃料サイクル開発機構

東海事業所

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

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 3 3

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,

Japan

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

1999

緩衝材の乾燥収縮特性

(研究報告)

報告者：鈴木英明**，藤田朝雄*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおける人工バリアは、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材を基本として構成され、このうち、緩衝材には膨潤性粘土のベントナイトを高密度に締固めた圧縮ベントナイトを用いることが考えられている。

圧縮ベントナイトは、地下水の浸潤にともない膨潤し、圧縮ベントナイト中の隙間や隣接する岩盤の割れ目への充填や、非常に低い透水性により地下水の移動を抑制する機能を有している。しかし、ガラス固化体が核種の崩壊により熱を発生するため、圧縮ベントナイトが乾燥し収縮やひび割れを生じた場合には、地下水の部分的な侵入など物質移動抑制の観点から人工バリアの密閉性の低下や機械的強度の低下などが懸念される。

本報告書では、圧縮ベントナイトの乾燥収縮特性について報告する。土の収縮現象は、土が水分などの放出によってその体積を減少させることであり、干拓地の地表のひび割れなどは典型的な例である。収縮の程度には土の構造が大きく関与しており、粘性土の特徴的な物理化学的性質の中でも、収縮現象は膨潤現象と並んで基本的な特性のひとつである。実験では、圧縮ベントナイトの供試体を製作する際の初期含水比をパラメータに、乾燥によるひび割れの発生状態の確認を行い、収縮限界や体積収縮率などの収縮定数を求めた。その結果、供試体製作時の含水比が約13%以下の条件では、乾燥によるひび割れの発生はほとんどないことが分かった。また、供試体の初期含水比が大きいほど、乾燥による体積変化が大きく、収縮限界、線収縮などの収縮定数は初期含水比に依存することが分かった。さらに、乾燥によって生じたひび割れや亀裂の機械的強度への影響を確認するため、乾燥前後の供試体の一軸圧縮強さを比較した。その結果、乾燥後のひび割れを持つ供試体の一軸圧縮強さ、および E_{50} は湿潤状態の供試体よりも大きく、乾燥によってひび割れが生じた場合でも機械的強度は低下しないことが分かった。

* 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

** 検査開発(株)

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 試験方法	2
第3章 試験結果	3
3.1 ひび割れ	3
3.2 収縮定数	5
3.3 一軸圧縮試験	13
第4章 おわりに	16
【参考文献】	17
【別添資料1】	18
【別添資料2】	31

第1章 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおける人工バリアは、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材を基本として構成され、このうち、緩衝材には、膨潤性粘土のベントナイトを高密度に締固めた圧縮ベントナイトを用いることが考えられている。

圧縮ベントナイトは、地下水の浸潤にともない膨潤し、圧縮ベントナイト中の隙間や隣接する岩盤の割れ目への充填や、非常に低い透水性により地下水の移動を抑制する機能を有している。しかし、ガラス固化体が核種の崩壊により熱を発生するため、圧縮ベントナイトが乾燥し収縮やひび割れを生じた場合には、地下水の部分的な侵入など物質移動抑制の観点から人工バリアの密閉性の低下や機械的強度の低下などが懸念される。

土の収縮現象は、土が水分などの放出によってその体積を減少させることであり、干拓地の地表のひび割れなどは典型的な例である。収縮の程度には土の構造が大きく関与しており、粘性土の特徴的な物理化学的性質の中でも、収縮現象は膨潤現象と並んで基本的な特性のひとつである。一般に、飽和粘性土を乾燥させると、水分脱水量と同じ体積の減少がおこる正規収縮、水分脱水量よりも体積減少量が小さくなる残留収縮、水分の減少に対応する体積変化のみられない無収縮の三過程の収縮挙動を示すことが知られている（土質工学会，1990）。このうち、正規収縮と残留収縮の境界は収縮限界と言われ、収縮限界に対する含水比は土の力学的性質に関わるものであり物理的重要性を持つ（土壌物理研究会，1979）。

本論では、圧縮ベントナイトの供試体を製作する際の初期含水比をパラメータに、乾燥によるひび割れの発生状態の確認を行い、収縮限界や体積収縮率などの収縮定数を求めた。また、乾燥によって生じたひび割れや亀裂の機械的強度への影響を確認するために、一軸圧縮強さの測定を実施したのでその結果について報告する。

第2章 試験方法

乾燥収縮試験は、圧縮ベントナイトの乾燥によるひび割れの観察、および収縮量などを定量的に把握することを目的に、土の収縮定数試験方法（JSF T 145-1990）に準拠して実施した。試験条件を表2.1に示す。

また、ひび割れによる機械的強度への影響を確認するために、乾燥前後の供試体を用いて一軸圧縮強さを測定した。試験は、土の一軸圧縮試験（JIS A 1216-1977）に準拠して実施した。試験装置は島津製作所社製精密万能試験機を使用した。試験条件を表2.2に示す。

試験材料は、ベントナイトKunigel V1にケイ砂を30wt%混合したもの（以下、ケイ砂混合体という）、ベントナイトKunigel V1、ベントナイトKunigel OT-9607を用いた。

供試体は、成型用の金型を用いて、あらかじめ含水比を調整した試験材料を所定の乾燥密度に圧縮成型して作製した。供試体の乾燥密度は、ケイ砂混合体が 1.6g/cm^3 、ベントナイトKunigel V1が 1.6g/cm^3 と 1.8g/cm^3 、ベントナイトKunigel OT-9607が 1.65g/cm^3 に設定した。圧縮成型後に金型より供試体を抜取り、供試体の直径と高さおよび質量を測定した。その後、供試体を 110°C の恒温槽で一定質量になるまで炉乾燥させ、乾燥後の供試体の直径と高さおよび質量を測定した。供試体の直径と高さはそれぞれ5ヶ所ずつ最小目盛 0.05mm のノギスを用いて測定した。

表2.1 乾燥収縮試験条件

種類	ケイ砂混合体	ベントナイト Kunigel V1		ベントナイト KunigelOT-9607
		1.6	1.8	1.65
供試体乾燥密度 [g/cm^3]	1.6	1.6	1.8	1.65
供試体含水比 [%]	2~25	10~25	10~18.5	5~24
供試体寸法 [mm]	$\phi 30 \times$ 高さ60			
乾燥条件	110°Cで炉乾燥			
試験数	3			

表2.2 一軸圧縮試験条件

種類	ベントナイトKunigel V1	ベントナイトKunigel V1
供試体乾燥密度 [g/cm^3]	1.6	1.8
供試体含水比 [%]	10~25の乾燥前後	10~19の乾燥前後
供試体寸法 [mm]	$\phi 30 \times$ 高さ60	
圧縮速度 [%/min]	1	

第3章 試験結果

3.1 ひび割れ

土の収縮現象は、土が水分などの放出によってその体積を減少させることであり、干拓地の地表のひび割れなどは典型的な例である。収縮の程度には土の構造が大きく関与しており、粘性土の特徴的な物理化学的性質のなかでも、収縮現象は膨潤現象と並んで基本的な特性のひとつである。

初期含水比をパラメータとして製作した供試体を含水比が0%まで乾燥させた状態を別添資料1に示す。また、乾燥によるひび割れの発生状況のスケッチを供試体の初期含水比との関係で整理し表3.1に示す。乾燥によるひび割れは、供試体表面上のものをひび、供試体内部にまで達しているものを亀裂と表現してひび割れの状態を分類した。

ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）の乾燥によるひび割れは、初期含水比が13%以下ではほとんど認められず、一部、表面上に極小さなひびが見られる程度であった。初期含水比が15%以上になると表面上の極小さなひびとともに、供試体の内部に深さ数ミリメートル程度の亀裂が数本観察された。飽和状態の初期含水比約25%では、供試体内部まで達している亀裂が数多く観察された。

ベントナイトKunigelV1の場合、乾燥密度 1.6g/cm^3 、 1.8g/cm^3 ともに、初期含水比が約10%の場合、乾燥によるひび割れはほとんど認められず、初期含水比12%では供試体側面の表面に極小さなひびが数本観察された。初期含水比が15%では、表面上のひびの数が多くなり、供試体内部まで達している亀裂が1～2本観察された。乾燥密度 1.8g/cm^3 において飽和状態にある初期含水比18.5%では、さらに多くの亀裂が観察された。乾燥密度 1.6g/cm^3 において飽和状態にある初期含水比25.5%では、供試体の縦横に網目のように無数の亀裂が観察された。

ベントナイトKunigelOT-9607の場合、初期含水比が約10%以下では、乾燥によるひび割れはほとんど認められなかった。初期含水比約15%では、供試体表面上に極小さなひびが見られた。初期含水比約19.5%では、供試体内部まで達している亀裂が1～2本観察された。初期含水比約22%では、供試体内部まで達している亀裂が数多く観察された。

以上の結果から、乾燥によって生じるひび割れの程度は、供試体製作時の初期含水比に依存し、初期含水比が大きいほどひび割れが生じやすいことが分かった。また、初期含水比が13%以下の条件では、乾燥によるひび割れはほとんど発生しないことが分かった。

表3.1 乾燥によるひび割れの発生状況

初期含水比 [%]	1.85	3.61	5.21	7.74	8.59	約10	約12	13.06	約15	15.86	約18.5	約19.5	約22	25.00	25.43
ケイ砂混合体 (ベントナイ Kunigel V1 にケイ砂30wt%混合) 乾燥密度1.6g/cm ³															
	ひび割れはほとんど認められず	ひび割れはほとんど認められず		供試体表面上に極小なひびが認められた	供試体表面上に極小なひびが認められた			供試体表面上に極小なひびが認められた		供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が1,2本見られた。		供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が数本見られた。		供試体内部まで達している亀裂が数多く見られた。	
ベントナイト Kunigel V1 乾燥密度1.6g/cm ³															
						ひび割れはほとんど認められず。	供試体側面の表面上に極小なひびが数本見られた。		供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が1,2本見られた。		供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が数多く見られた。		供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が数多く見られた。		供試体全体に網目のような亀裂が無数に見られた。
ベントナイト Kunigel V1 乾燥密度1.8g/cm ³															
						ひび割れはほとんど認められず	供試体側面の表面上に極小なひびが数本見られた。		供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が1,2本見られた。		供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が数多く見られた。				
ベントナイト Kunigel OT-9607 乾燥密度1.65g/cm ³															
			ひび割れはほとんど認められず			ひび割れはほとんど認められず			供試体表面上に極小なひびが認められた			供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が数多く見られた。	供試体表面上のひびとともに、内部まで達している亀裂が数多く見られた。		

; 供試体表面上のひび

; 供試体内部まで達している亀裂

3.2 収縮定数

供試体の初期含水比をパラメータとして、含水比0%まで乾燥させた時の収縮定数を求めた。乾燥前後の供試体の体積、質量等の状態量を別添資料2に示す。

湿潤状態にある供試体の体積を V 、乾燥後の供試体の体積を V_0 とすれば、含水比と体積変化 V/V_0 の関係を表す収縮曲線は図3.1のようになる。図中には、完全飽和状態に対して水分脱水量と同じ体積の減少がおこる理論的な正規収縮、および水分脱水量よりも体積減少量が小さい残留収縮を実線で示す。正規収縮と残留収縮の交点は収縮限界、正規収縮と横軸との交点は全収縮と呼ばれる。これより、完全飽和状態に対する収縮限界の含水比は約18%であり、これは、一般的な粘土と同等の値である（Yong, R.N. and Warkentin, B.P., 著, 山内豊聡ほか監訳, 1978）。また、全収縮の含水比は約13%であり、これは、3.1章で示した乾燥によるひび割れが生じる含水比に対応していることが分かる。これより、圧縮ベントナイトが正規収縮を生じる含水比を持つ場合には、乾燥によるひび割れが生じることが分かった。

次に、収縮定数の収縮限界、収縮比、体積収縮率、線収縮を以下に示す(1)～(4)式に従って求めた。収縮限界 w_s [%]は、土が半固体から固体へとその性格を変える力学的な転移点と考えられており（土壌物理研究会, 1979）、土の含水量をある量以下に減じて、その体積が減少しない状態の含水比を表したものであり、次式で求められる。

$$w_s = w - \frac{(V - V_0)\rho_w}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

ここで、

w : 供試体製作時の含水比[%]

m_s : 乾燥後の供試体質量[g]

V : 湿潤時の供試体体積[cm³]

V_0 : 炉乾燥後の供試体体積[cm³]

ρ_w : 水の密度[g/cm³]

である。

収縮比 R [-]は、収縮限界以上の含水比における体積変化と、それに対応する含水比の変化量との比を表したものであり、次式で求められる。

$$R = \frac{m_s}{V_0 \cdot \rho_w} \quad (2)$$

体積収縮率 C [%]は、ある含水比から収縮限界まで含水量を減じたときの体積変化を乾燥時の体積の百分率で表したものであり、これは単位体積当たりの収縮した水の体積に等しく次式で求められる。

$$C = (w_1 - w_s)R \tag{3}$$

ここで、 w_1 は供試体製作時の含水比[%]である。

線収縮 L_s [%]はある含水比から収縮限界まで含水量を減じたときの線収縮量を乾燥前の供試体長さの百分率で表したものであり、次式で求められる。

$$L_s = \left(1 - \sqrt[3]{\frac{100}{C+100}}\right) \times 100 \tag{4}$$

以上、収縮定数の算出結果を表3.2～3.5に示す。各収縮定数を供試体の初期含水比との関係で整理し図3.2～3.5に示す。これらの図より、収縮限界、体積収縮率、線収縮は、ベントナイトの種類や供試体の密度による差異は小さく、供試体の初期含水比に大きく依存することが分かる。例えば、供試体の初期含水比が10%の場合の収縮限界は約8%であり、含水比を0%まで減じた場合の体積収縮率は約2%、線収縮は約1%となる。また、収縮比は供試体の密度によって異なり、供試体密度が大きいほど大きな値を持つことが分かる。

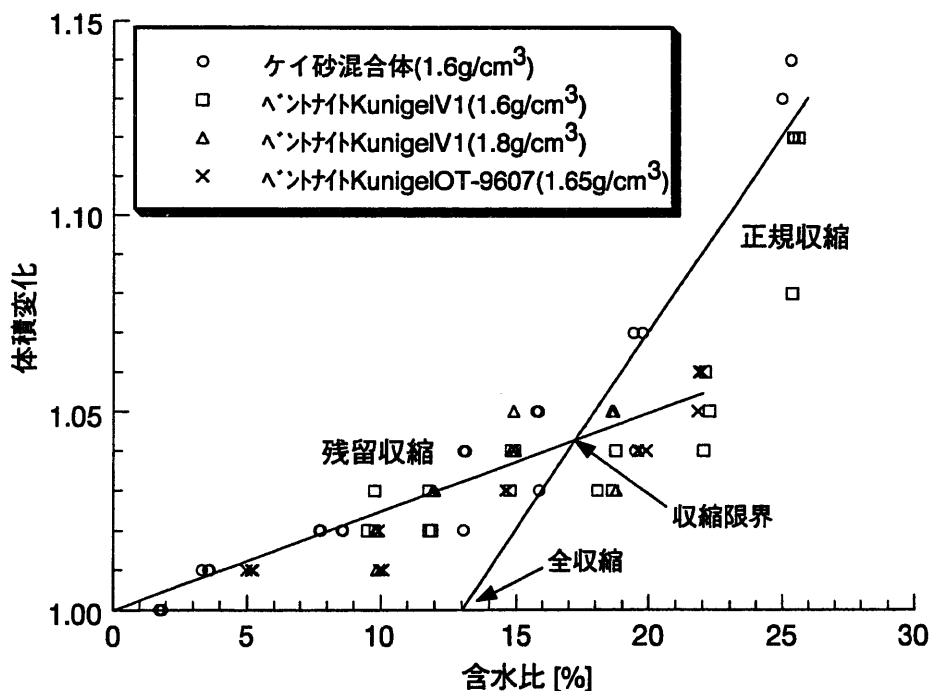


図3.1 圧縮ベントナイトの収縮特性

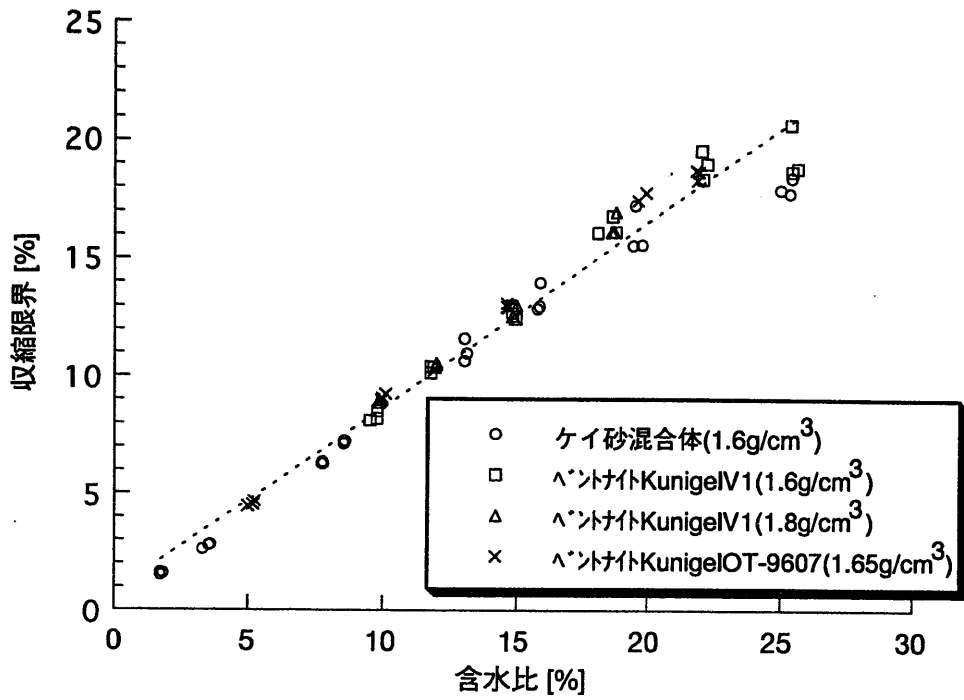


図3.2 供試体含水比と収縮限界との関係

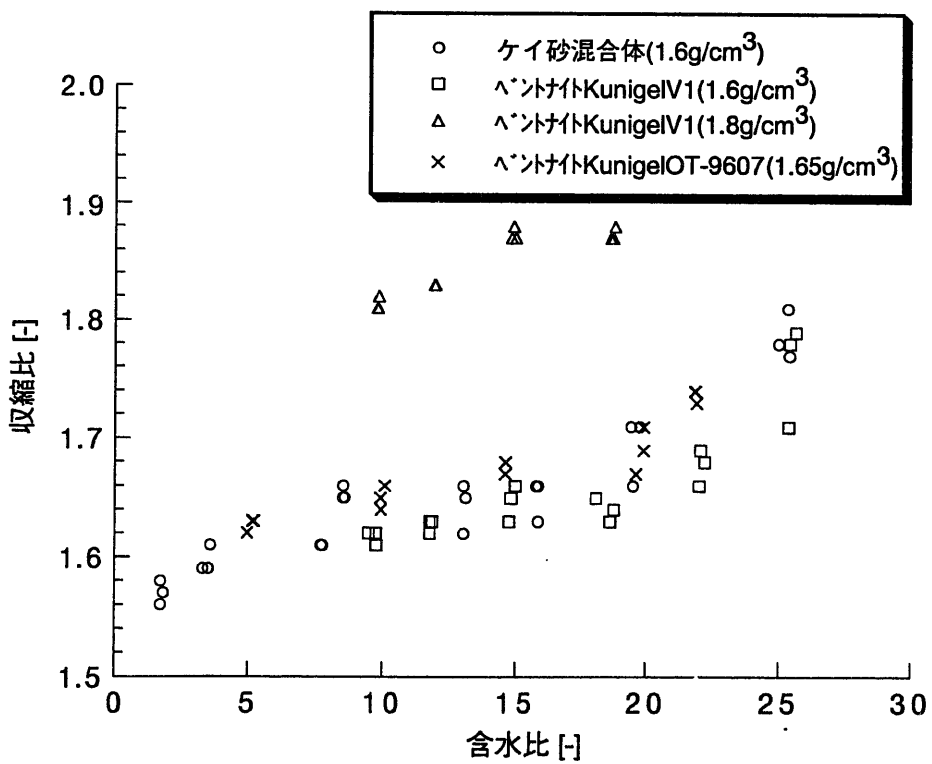


図3.3 供試体含水比と収縮比の関係

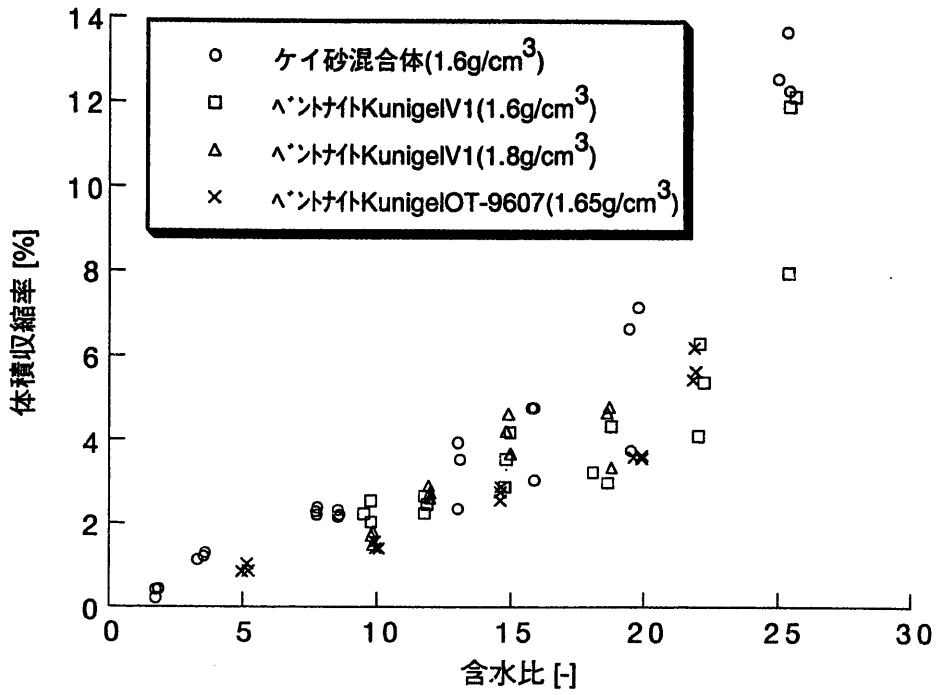


図3.4 供試体含水比と体積収縮率との関係

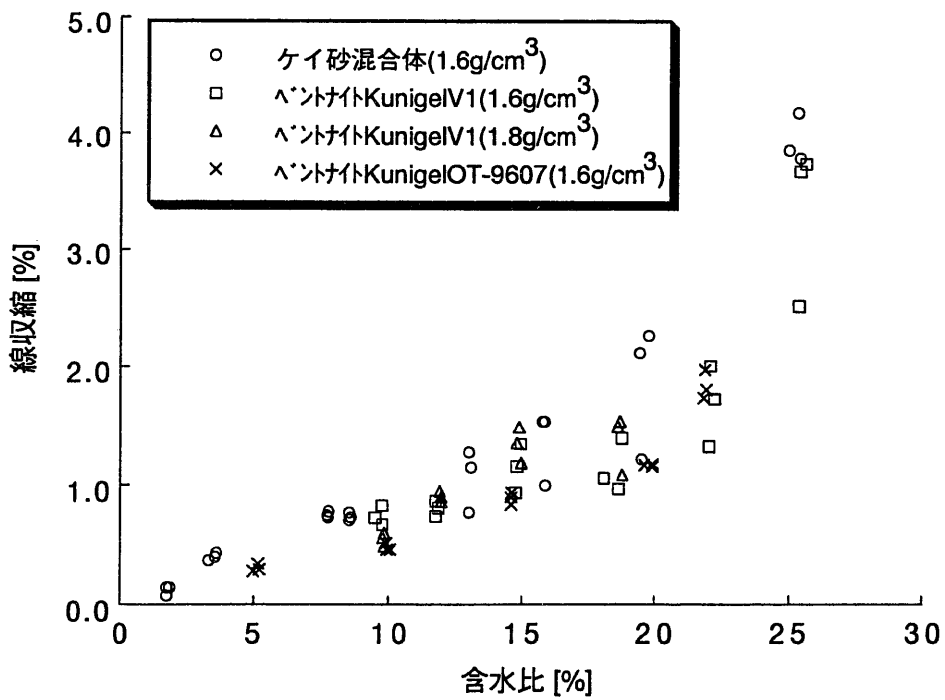


図3.5 供試体含水比と線収縮との関係

表3.2 収縮定数の算出結果 (ケイ砂混合体, 1.6g/cm³)

含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]	体積変化 [-]	収縮限界 [%]	収縮比 [-]	体積収縮率 [%]	線収縮 [%]
1.85	1.56	1.00	1.57	1.57	0.43	0.14
1.75	1.56	1.00	1.49	1.56	0.41	0.14
1.74	1.57	1.00	1.61	1.58	0.21	0.07
3.61	1.59	1.01	2.80	1.61	1.30	0.43
3.55	1.57	1.01	2.79	1.59	1.21	0.40
3.33	1.57	1.01	2.62	1.59	1.13	0.37
7.74	1.58	1.02	6.36	1.61	2.22	0.73
7.77	1.57	1.02	6.29	1.61	2.38	0.78
7.72	1.58	1.02	6.30	1.61	2.29	0.75
8.59	1.61	1.02	7.24	1.65	2.22	0.73
8.55	1.61	1.02	7.14	1.65	2.33	0.77
8.54	1.62	1.02	7.23	1.66	2.17	0.71
13.06	1.59	1.02	11.61	1.62	2.36	0.77
13.14	1.59	1.04	10.99	1.65	3.53	1.15
13.06	1.60	1.04	10.68	1.66	3.94	1.28
15.86	1.58	1.05	12.99	1.66	4.76	1.54
15.77	1.59	1.05	12.90	1.66	4.76	1.54
15.87	1.59	1.03	14.00	1.63	3.05	1.00
19.44	1.61	1.07	15.56	1.71	6.65	2.12
19.51	1.60	1.04	17.26	1.66	3.75	1.22
19.77	1.60	1.07	15.60	1.71	7.15	2.27
25.00	1.58	1.13	17.94	1.78	12.56	3.86
25.33	1.60	1.14	17.78	1.81	13.68	4.18
25.41	1.57	1.12	18.45	1.77	12.29	3.79

表3.3 収縮定数の算出結果 (ベントナイトKunigelV1, 1.6g/cm³)

含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]	体積変化 [-]	収縮限界 [%]	収縮比 [-]	体積収縮率 [%]	線収縮 [%]
9.77	1.58	1.03	8.19	1.62	2.55	0.83
9.50	1.58	1.02	8.12	1.62	2.24	0.73
9.79	1.58	1.02	8.52	1.61	2.04	0.67
11.80	1.58	1.02	10.41	1.62	2.25	0.74
11.80	1.59	1.03	10.16	1.63	2.66	0.87
11.90	1.59	1.02	10.38	1.63	2.47	0.81
14.77	1.59	1.03	13.01	1.63	2.88	0.94
14.84	1.59	1.04	12.68	1.65	3.55	1.16
14.98	1.59	1.04	12.45	1.66	4.18	1.35
18.09	1.60	1.03	16.12	1.65	3.24	1.06
18.78	1.57	1.04	16.14	1.64	4.33	1.40
18.64	1.59	1.03	16.82	1.63	2.98	0.97
22.05	1.60	1.04	19.59	1.66	4.10	1.33
22.25	1.59	1.05	19.04	1.68	5.38	1.73
22.10	1.59	1.06	18.38	1.69	6.30	2.01
25.43	1.59	1.12	18.72	1.78	11.92	3.68
25.38	1.58	1.08	20.71	1.71	7.97	2.52
25.64	1.59	1.12	18.84	1.79	12.14	3.74

表3.4 収縮定数の算出結果 (ベントナイトKunigelV1, 1.8g/cm³)

含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]	体積変化 [-]	収縮限界 [%]	収縮比 [-]	体積収縮率 [%]	線収縮 [%]
9.85	1.79	1.02	8.86	1.82	1.81	0.60
9.80	1.78	1.02	8.86	1.81	1.71	0.56
9.84	1.79	1.01	9.01	1.81	1.50	0.49
12.01	1.78	1.03	10.52	1.83	2.74	0.90
11.99	1.78	1.03	10.56	1.83	2.61	0.86
11.97	1.78	1.03	10.39	1.83	2.91	0.95
14.84	1.79	1.04	12.58	1.87	4.21	1.36
14.99	1.80	1.04	13.02	1.87	3.67	1.19
14.91	1.79	1.05	12.45	1.88	4.62	1.49
18.71	1.79	1.05	16.16	1.87	4.78	1.54
18.79	1.79	1.03	16.98	1.85	3.35	1.09
18.62	1.79	1.05	16.14	1.87	4.65	1.50

表3.5 収縮定数の算出結果 (ベントナイトKunigelOT-9607, 1.65g/cm³)

含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]	体積変化 [-]	収縮限界 [%]	収縮比 [-]	体積収縮率 [%]	線収縮 [%]
5.21	1.62	1.01	4.68	1.63	0.86	0.29
5.16	1.62	1.01	4.53	1.63	1.03	0.34
4.98	1.61	1.01	4.46	1.62	0.84	0.28
9.95	1.61	1.01	9.09	1.64	1.41	0.46
9.94	1.62	1.02	8.99	1.65	1.56	0.51
10.10	1.63	1.01	9.25	1.66	1.40	0.46
14.63	1.63	1.03	13.10	1.67	2.57	0.84
14.62	1.63	1.03	12.97	1.68	2.76	0.90
14.64	1.63	1.03	12.92	1.68	2.88	0.94
19.92	1.65	1.04	17.80	1.71	3.62	1.18
19.62	1.61	1.04	17.47	1.67	3.59	1.17
19.91	1.63	1.04	17.80	1.69	3.56	1.16
21.94	1.64	1.06	18.69	1.73	5.63	1.81
21.90	1.64	1.06	18.34	1.74	6.19	1.98
21.85	1.65	1.05	18.74	1.74	5.43	1.74

3.3 一軸圧縮試験

圧縮ベントナイトのひび割れによる機械的強度への影響を確認するために、湿潤状態の供試体と、乾燥後の供試体の一軸圧縮強さを測定した。試験は、ベントナイト KunigelV1の乾燥密度 1.6g/cm^3 と 1.8g/cm^3 について実施した。

一軸圧縮強さは次式により求めた。

$$q_u = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (6)$$

ここで、

q_u : 一軸圧縮強さ [kgf/cm²]

P_{\max} : 最大荷重 [kgf]

A_0 : 圧縮する前の供試体の断面積 [cm²]

である。

E_{50} は次式により求めた。

$$E_{50} = \frac{\left(\frac{q_u}{2}\right)}{\epsilon_{50}} \times 100 \quad (7)$$

ここで、

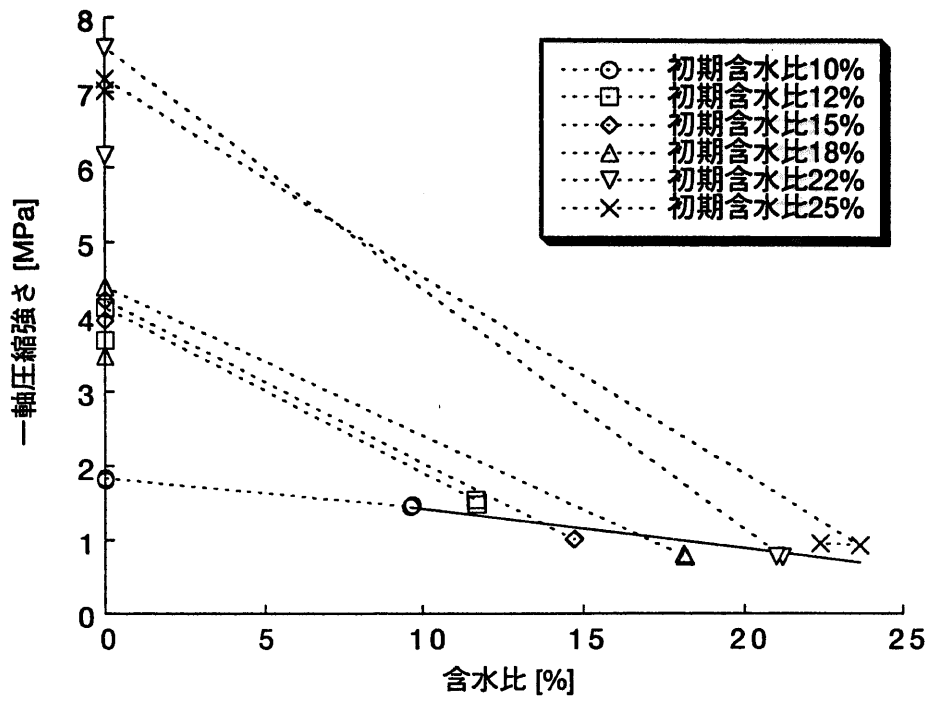
q_u : 一軸圧縮強さ [kgf/cm²]

ϵ_{50} : 圧縮応力 $\frac{q_u}{2}$ の時の圧縮ひずみ

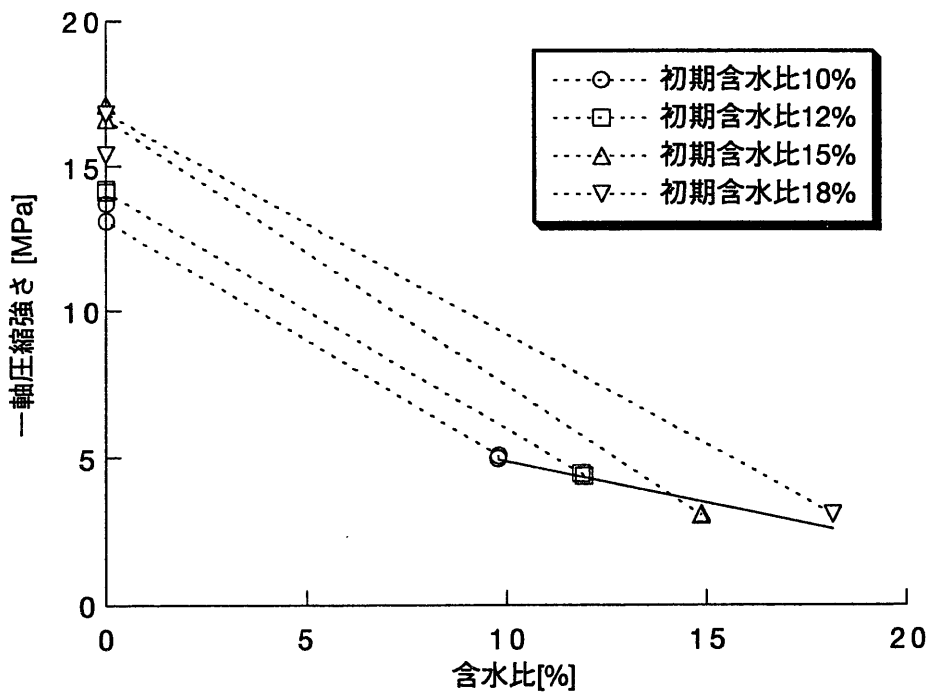
である。

乾燥前後の供試体の一軸圧縮強さおよび E_{50} を比較し図3.6～3.7に示す。これより、湿潤状態にある供試体よりも乾燥させた供試体の方が一軸圧縮強さおよび E_{50} は大きくなること、また、供試体の初期含水比が大きいほど、乾燥させた時の一軸圧縮強さおよび E_{50} が大きくなる傾向にあることが分かった。

したがって、一軸圧縮試験結果からは、乾燥によってひび割れが生じた場合でも圧縮ベントナイトの機械的強度は低下しないことが分かった。

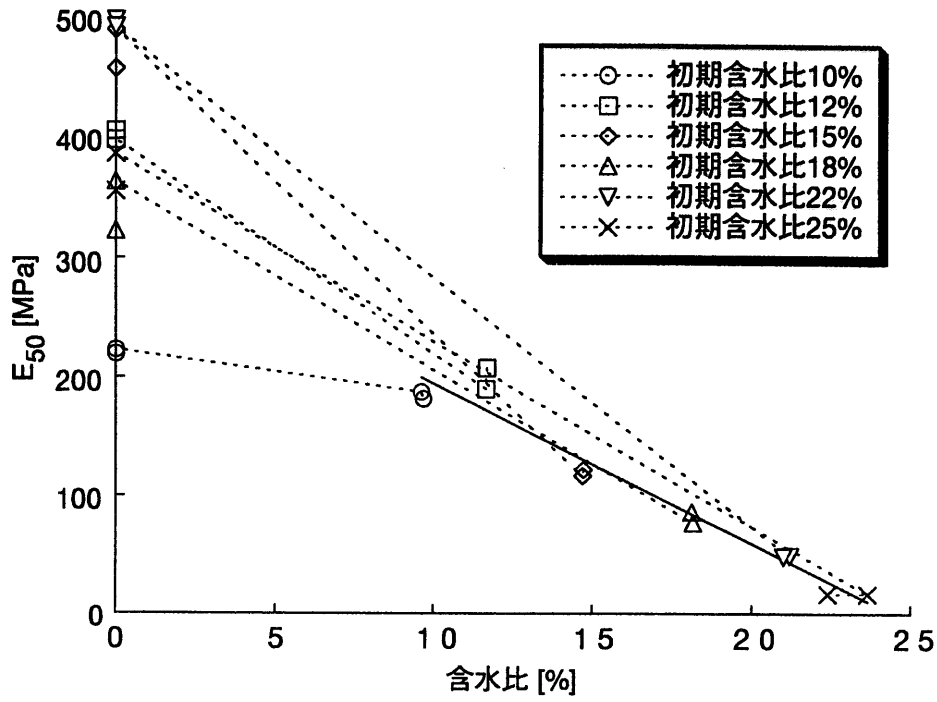


(a)乾燥密度1.6g/cm³

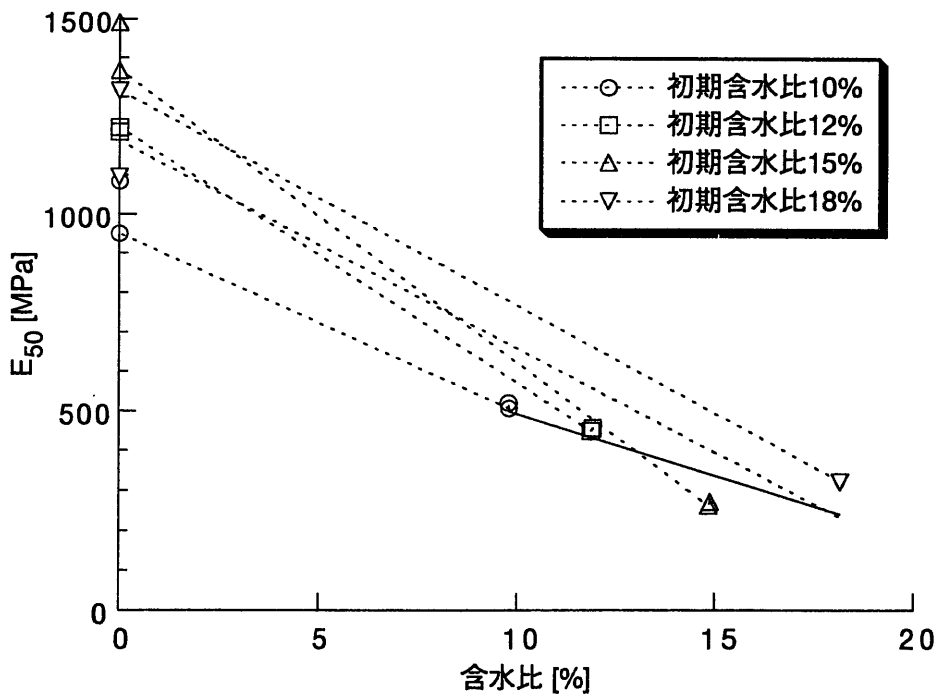


(b)乾燥密度1.8g/cm³

図3.6 乾燥前後の一軸圧縮強さの比較



(a)乾燥密度 1.6 g/cm^3



(b)乾燥密度 1.8 g/cm^3

図3.7 乾燥前後の E_{50} の比較

第4章 おわりに

緩衝材の乾燥収縮特性を把握するため、圧縮ベントナイトの供試体を製作する際の初期含水比をパラメータとし、供試体の含水比を0%まで乾燥させたときの乾燥によるひび割れの発生状態の確認、および収縮限界や収縮比などの収縮定数を求めた。さらに、ひび割れによる機械的強度の変化を確認するため、一軸圧縮強さの測定を実施した。その結果、

- (1) ケイ砂混合体、ベントナイトKunigelV1、ベントナイトKunigelOT-9607ともに供試体の初期含水比が大きいほど、乾燥によるひび割れが生じやすい。
- (2) 供試体の初期含水比が約13%以下の条件では、乾燥によるひび割れの発生はほとんどない。
- (3) 供試体の初期含水比が大きいほど乾燥による体積変化が大きくなる。
- (4) 完全飽和状態に対して水分脱水量と同じ体積の減少がおこる理論的な正規収縮から求めた収縮限界の含水比はおおよそ約18%であり、これは、一般的な粘土と同等の値である。また、全収縮の含水比は約13%であり、これは、乾燥によってひび割れが生じる含水比に対応する。これより、圧縮ベントナイトが正規収縮を生じる含水比を有する場合には乾燥によるひび割れが生じる。
- (5) 収縮限界、線収縮などの収縮定数は、供試体製作時の含水比に依存する。例えば、供試体の初期含水比が10%の場合の収縮限界は約8%であり、含水比を0%まで減じた場合の体積収縮率は約2%、線収縮は約1%である。
- (6) 乾燥によってひび割れや亀裂を生じた供試体の一軸圧縮強さは、乾燥前の湿潤状態の供試体よりも大きく、乾燥によってひび割れや亀裂が生じた場合でも機械的強度は低下しない。

以上のことが明らかとなった。

緩衝材の製作・施工時における緩衝材材料の水分量は、実際の処分場に緩衝材を施工する際の施工機械能力や作業性に大きく影響を与える要因のひとつである。一般に、土の締め固め特性は、締め固めの条件を一定とした場合、乾燥密度は水分量の状態で異なり、最大の乾燥密度が得られる最適含水比が存在する。緩衝材材料の場合、20Mpaの締め固めエネルギーにおける最適含水比は、ベントナイトKunigelV1の場合で約15%、ケイ砂30%wt混合体の場合で約10%であり、ベントナイトに混合するケイ砂の量が増えるほど、また、締め固めエネルギーが大きくなるほど最適含水比は小さくなる（動燃事業団，1992）（鈴木ほか，1992）。したがって、緩衝材材料の締め固め特性からくる最適含水比より、緩衝材の初期含水比を決定した場合には、廃棄体の発熱による緩衝材のひび割れの発生や機械的強度への影響は小さいものと考えられる。

【参考文献】

土壤物理研究会（1979）：土の物理学—土質工学の基礎—，森北出版.

土質工学会（1990）：土質試験の方法と解説，社団法人土質工学会.

動力炉・核燃料開発事業団（1992）；「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の
技術報告書—平成3年度—、PNC TN 1410 92-081.

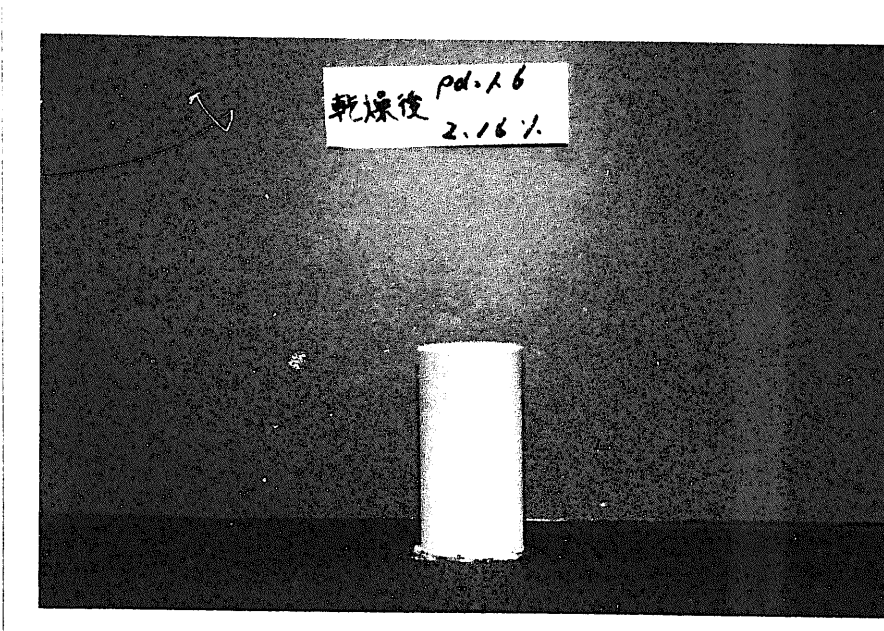
鈴木英明，柴田雅博，山形順二，広瀬郁郎，寺門一馬（1992）：緩衝材の特性試験
(I)，動燃技術資料，PNC TN8410 92-057.

Yong, R.N., and Warkentin, B.P., 著，山内豊聡，竹中肇，東山勇，前田隆，監訳
(1978)：新編土質工学の基礎〈土の性質と挙動〉，鹿島出版会.

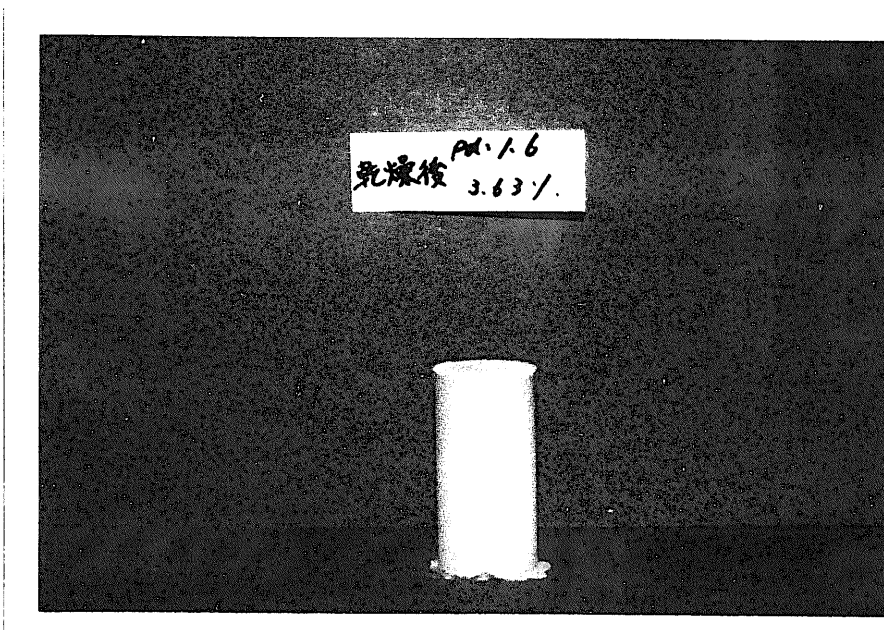
【別添資料1】

乾燥後の供試体の状態

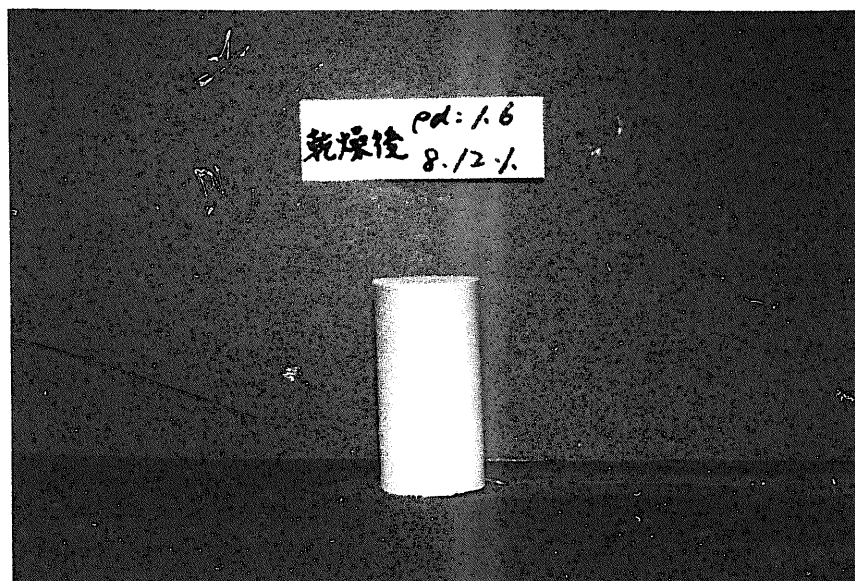
- | | |
|--|----------|
| (1) ケイ砂混合体 (乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$) | 付図 1～8 |
| (2) ベントナイト KunigelV1 (乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$) | 付図 9～14 |
| (3) ベントナイト KunigelV1 (乾燥密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$) | 付図 15～18 |
| (4) ベントナイト KunigelOT-9607 (乾燥密度 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$) | 付図 19～23 |



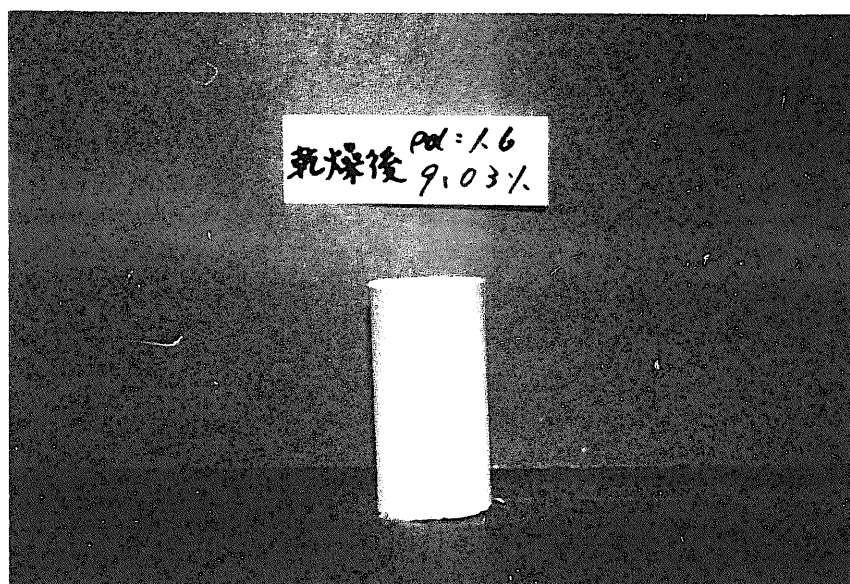
付図1 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比1.85%



付図2 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比3.61%



付図3 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比7.74%



付図4 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比8.59%



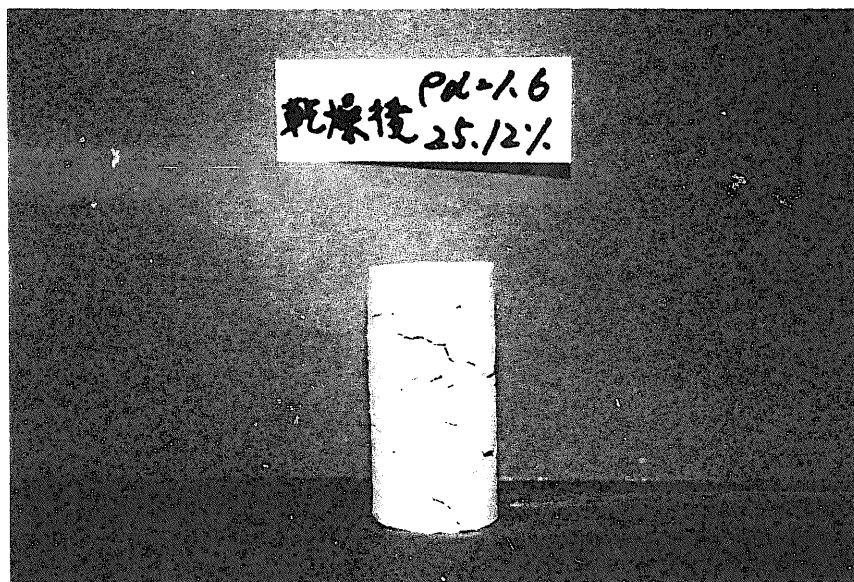
付図5 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比13.06%



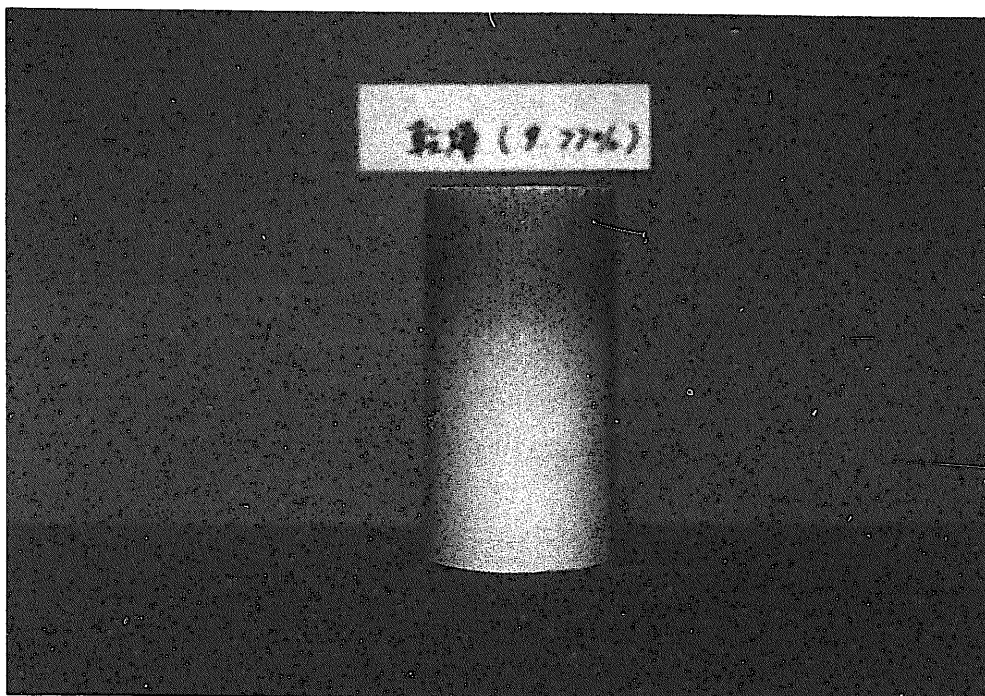
付図6 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比15.86%



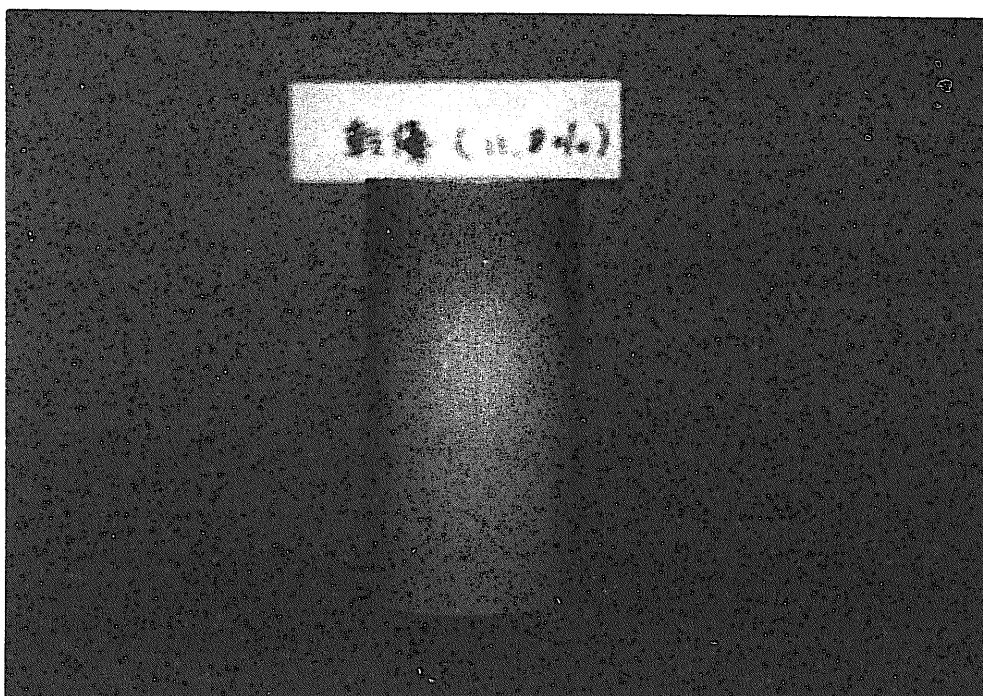
付図7 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比19.44%



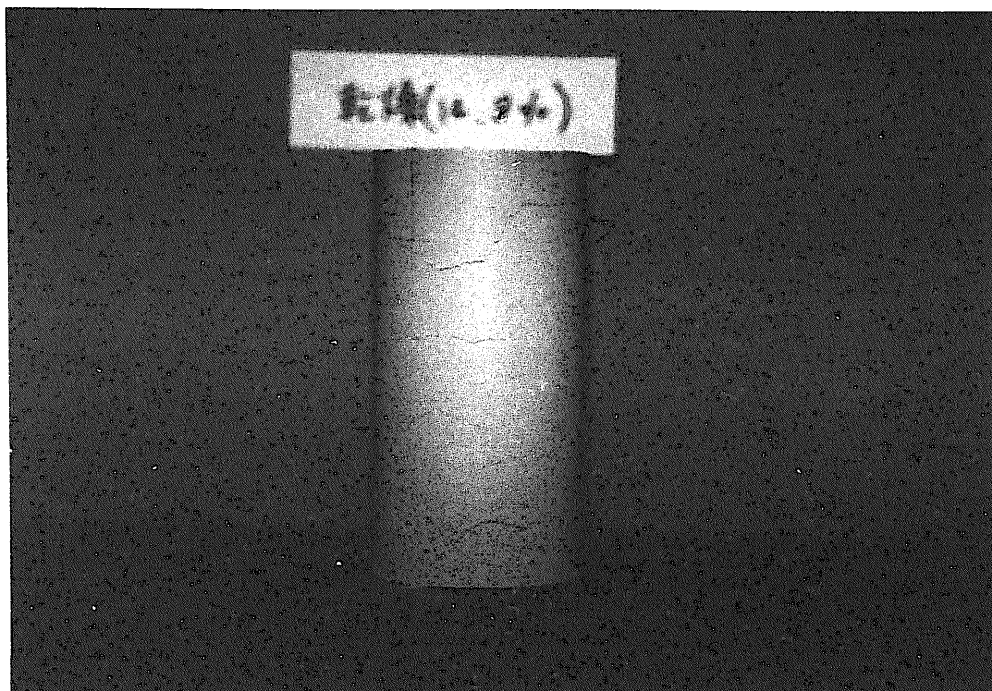
付図8 ケイ砂混合体（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）初期含水比25.00%



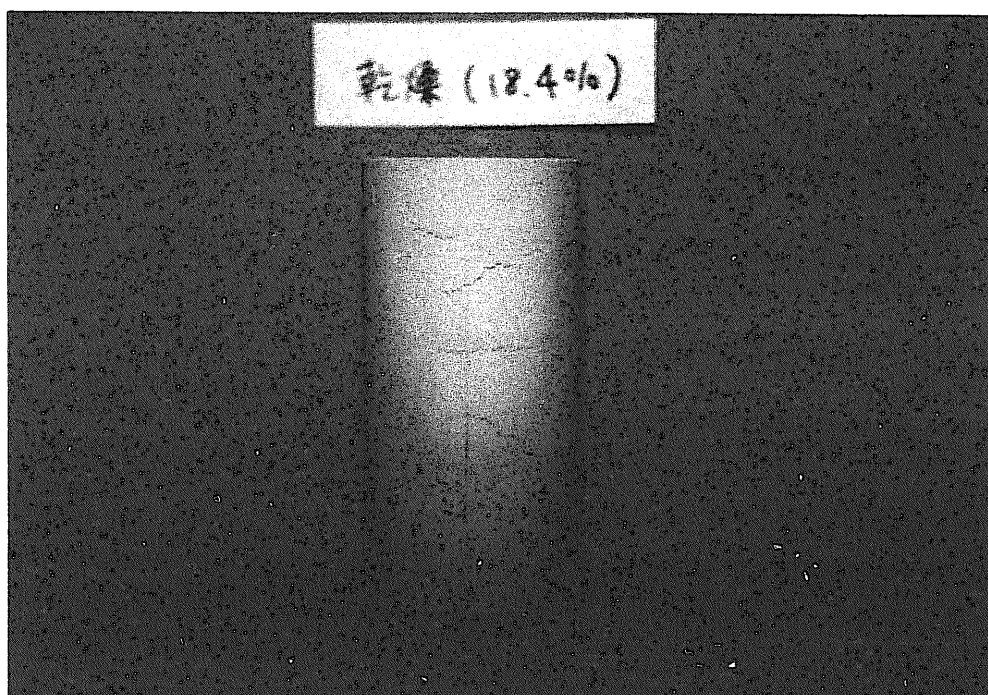
付図9 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$) 初期含水比9.77%



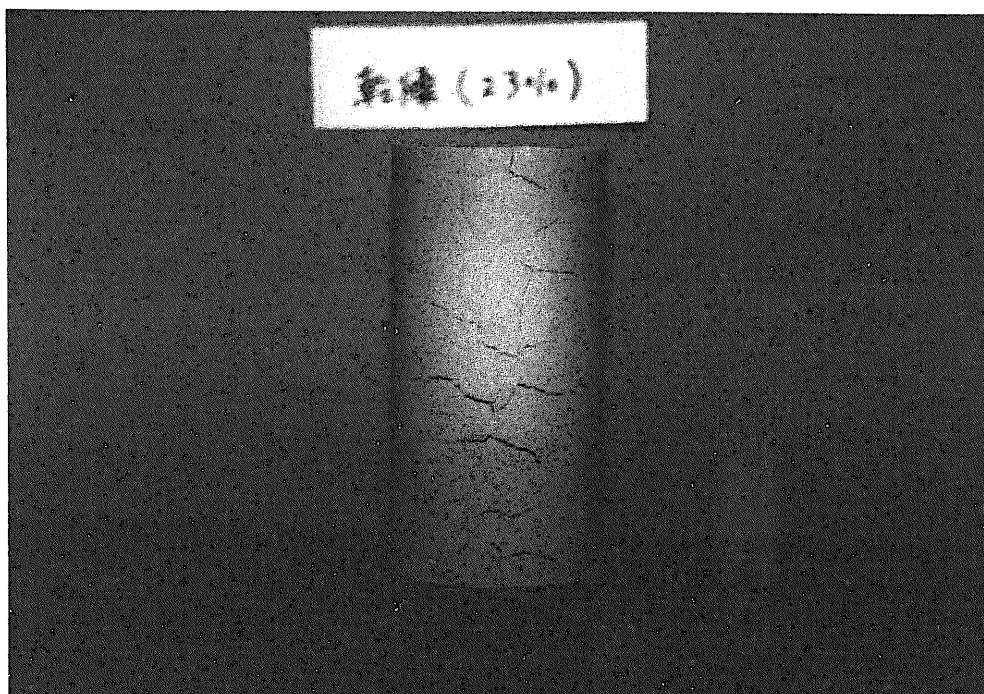
付図10 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$) 初期含水比11.80%



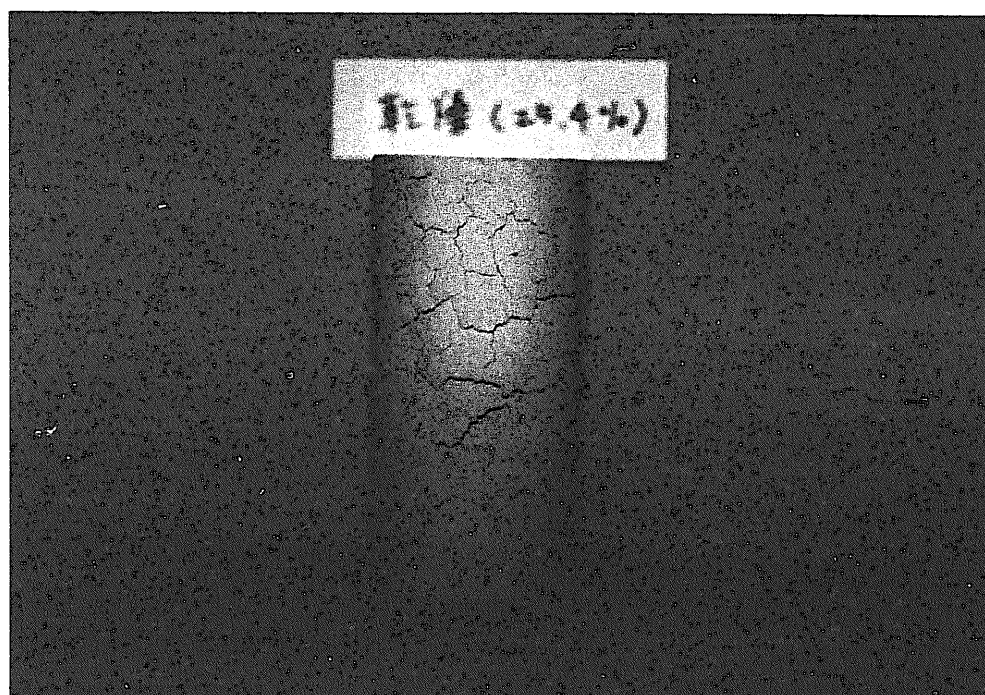
付図11 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$) 初期含水比14.77%



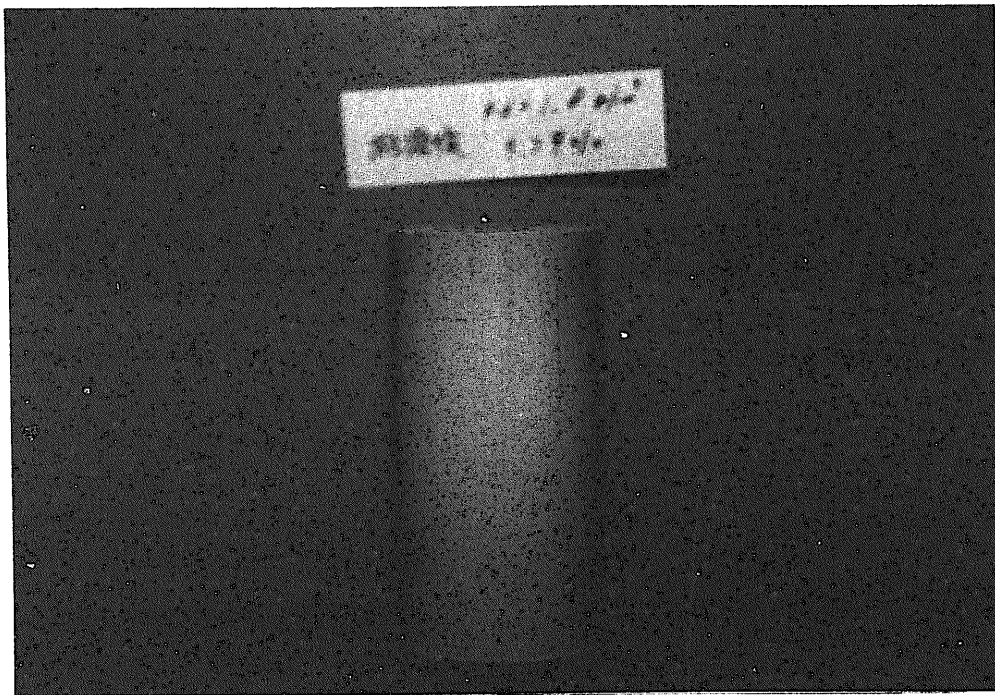
付図12 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$) 初期含水比18.09%



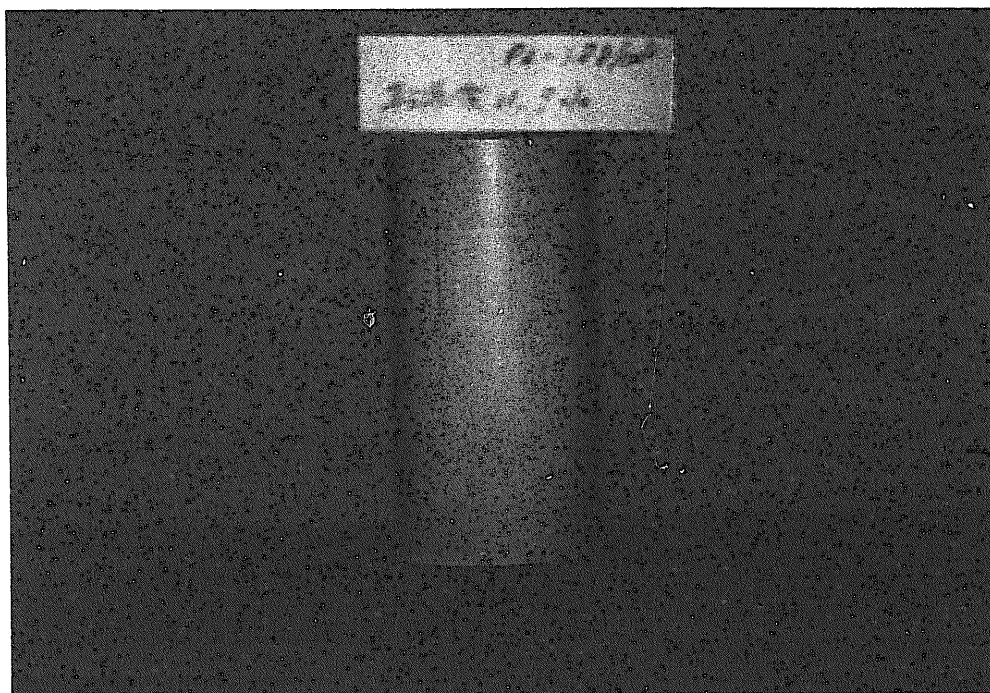
付図13 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 1.6g/cm^3) 初期含水比22.05%



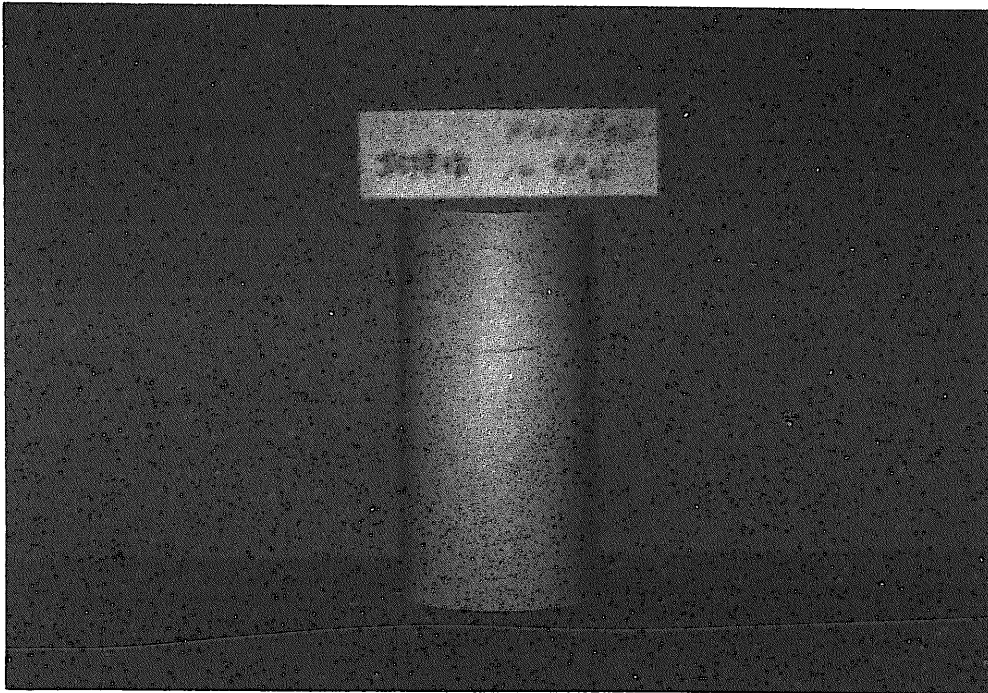
付図14 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 1.6g/cm^3) 初期含水比25.43%



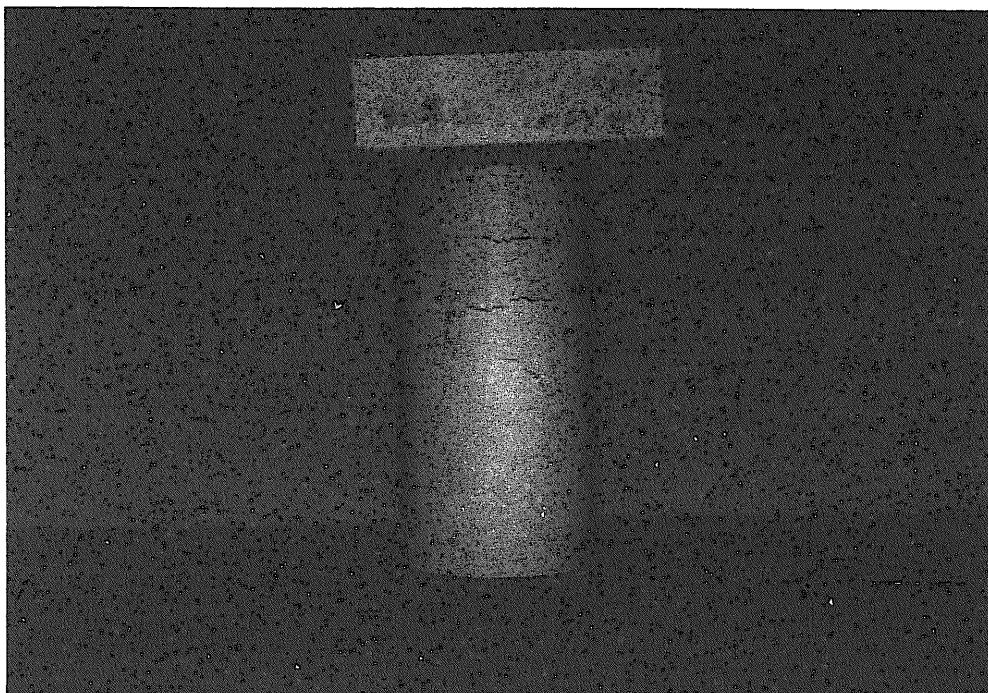
付図15 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 1.8g/cm^3) 初期含水比9.85%



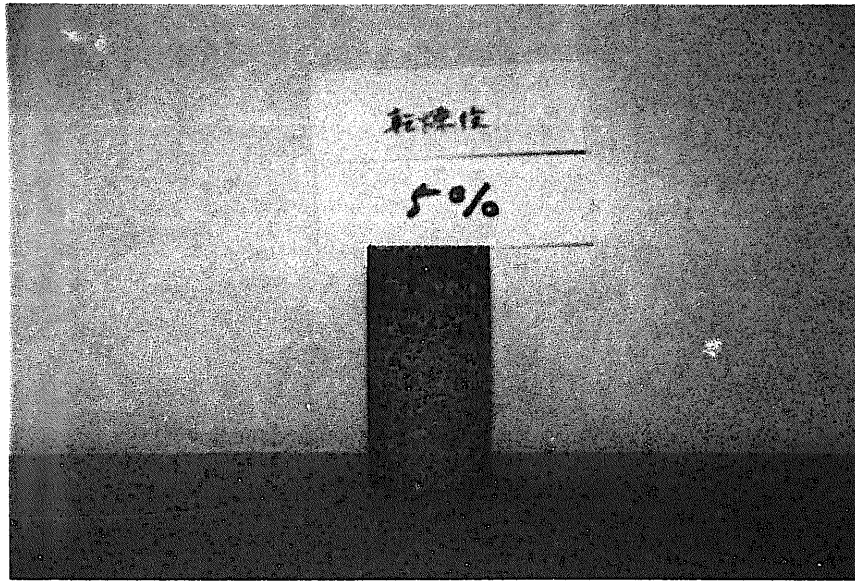
付図16 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 1.8g/cm^3) 初期含水比12.01%



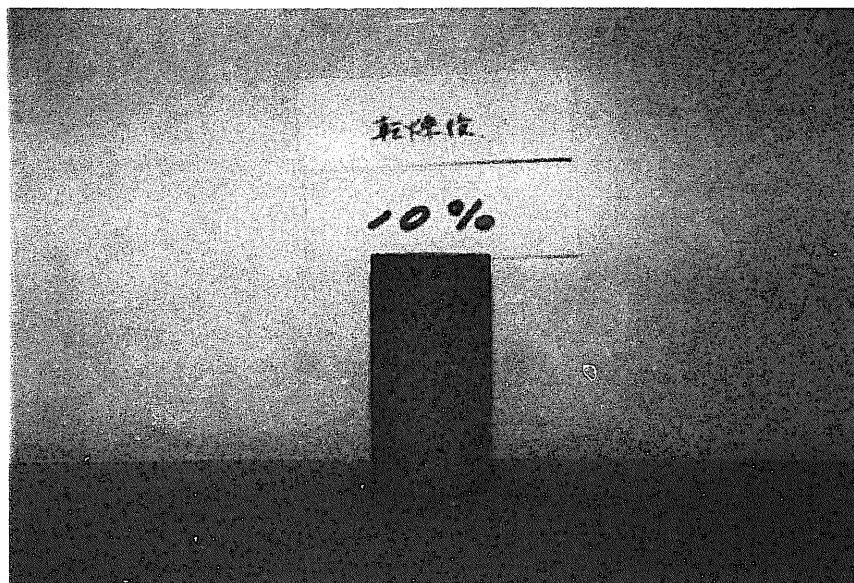
付図17 ベントナイトKunigelV1（乾燥密度 1.8g/cm^3 ）初期含水比14.84%



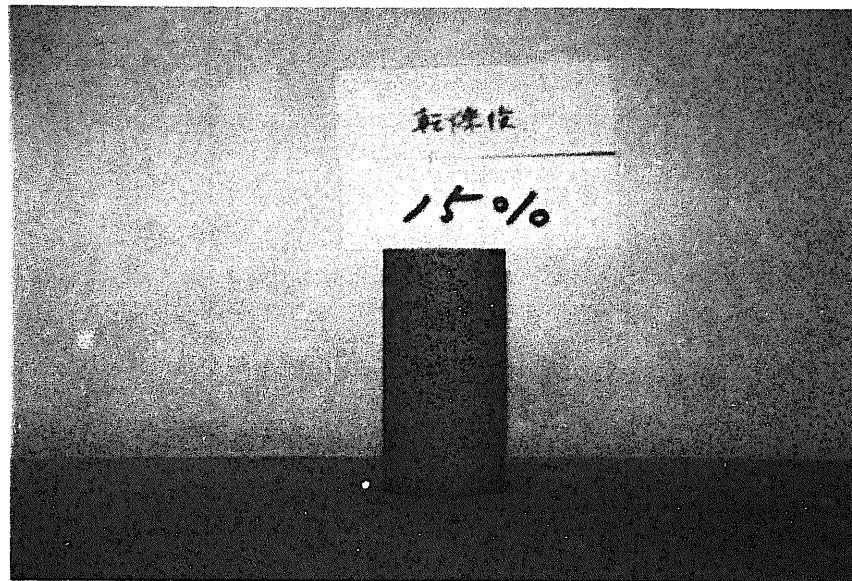
付図18 ベントナイトKunigelV1（乾燥密度 1.8g/cm^3 ）初期含水比18.71%



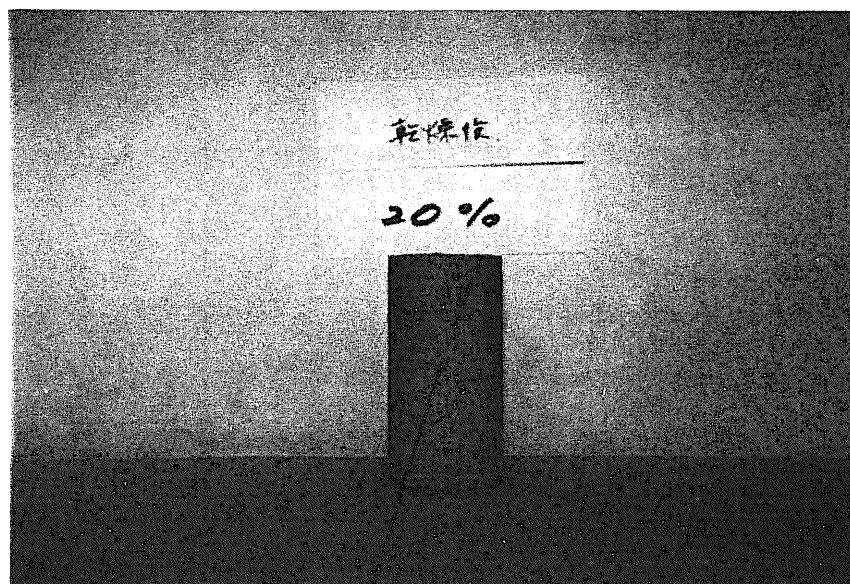
付図19 ベントナイトKunigelOT-9607 (乾燥密度 1.8g/cm^3) 初期含水比5.21%



付図20 ベントナイトKunigelOT-9607 (乾燥密度 1.8g/cm^3) 初期含水比9.95%



付図21 ベントナイトKunigelOT-9607 (乾燥密度 1.8g/cm^3) 初期含水比14.63%



付図22 ベントナイトKunigelV1 (乾燥密度 1.8g/cm^3) 初期含水比19.92%



付図23 ベントナイトKunigelOT-9607 (乾燥密度 1.8g/cm^3) 初期含水比21.94%

【別添資料2】

- 付表1 供試体の状態量 (ケイ砂混合体, 乾燥密度 1.6g/cm^3)
- 付表2 供試体の状態量 (ベントナイトKunigelV1, 乾燥密度 1.6g/cm^3)
- 付表3 供試体の状態量 (ベントナイトKunigelV1, 乾燥密度 1.8g/cm^3)
- 付表4 供試体の状態量 (ベントナイトKunigelOT-9607, 乾燥密度 1.65g/cm^3)

付表1 供試体の状態量 (ケイ砂混合体, 乾燥密度1.6g/cm³)

供試体制時の含水比 [%]	乾燥前の供試体体積 V[cm ³]	乾燥後の供試体体積 Vo[cm ³]	湿潤質量 [g]	乾燥質量 [g]	含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]
2.16	43.64	43.45	69.43	68.17	1.85	1.56
	43.75	43.57	69.33	68.14	1.75	1.56
	43.52	43.43	69.60	68.41	1.74	1.57
3.63	43.57	43.01	71.75	69.25	3.61	1.59
	43.60	43.08	71.09	68.65	3.55	1.57
	43.60	43.11	70.85	68.57	3.33	1.57
8.12	43.22	42.28	73.49	68.21	7.74	1.58
	43.37	42.36	73.54	68.24	7.77	1.57
	43.25	42.28	73.43	68.17	7.72	1.58
9.03	43.12	42.18	75.38	69.42	8.59	1.61
	43.01	42.03	75.28	69.35	8.55	1.61
	42.84	41.93	75.35	69.42	8.54	1.62
13.61	42.92	41.93	76.96	68.07	13.06	1.59
	42.77	41.31	77.00	68.06	13.14	1.59
	42.65	41.03	76.98	68.09	13.06	1.60
16.10	42.91	40.96	78.75	67.97	15.86	1.58
	42.84	40.89	78.79	68.06	15.77	1.59
	42.82	41.55	78.64	67.87	15.87	1.59
19.86	42.80	40.13	82.15	68.78	19.44	1.61
	42.62	41.08	81.66	68.33	19.51	1.60
	42.57	39.73	81.54	68.08	19.77	1.60
25.12	42.92	38.13	84.76	67.81	25.00	1.58
	42.45	37.34	84.86	67.71	25.33	1.60
	42.96	38.26	84.73	67.56	25.41	1.57

付表2 供試体の状態量 (ヘントナイトKunigelV1, 1.6g/cm³)

供試体製作時の含水比 [%]	乾燥前の供試体体積 V[cm ³]	乾燥後の供試体体積 Vo[cm ³]	湿潤質量 [g]	乾燥質量 [g]	含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]
9.77	43.07	42.00	74.61	67.97	9.77	1.58
	42.92	41.98	74.43	67.97	9.50	1.58
	42.95	42.09	74.46	67.82	9.79	1.58
11.80	43.12	42.17	76.15	68.11	11.80	1.58
	42.79	41.68	75.90	67.89	11.80	1.59
	42.73	41.70	75.87	67.80	11.90	1.59
14.80	42.85	41.65	78.00	67.96	14.77	1.59
	42.56	41.10	77.68	67.64	14.84	1.59
	42.60	40.89	77.83	67.69	14.98	1.59
18.40	42.68	41.34	80.63	68.28	18.09	1.60
	42.92	41.14	80.14	67.47	18.78	1.57
	42.54	41.31	80.13	67.54	18.64	1.59
23.00	42.69	41.01	83.25	68.21	22.05	1.60
	42.48	40.31	82.75	67.69	22.25	1.59
	42.53	40.01	82.66	67.70	22.10	1.59
25.40	42.62	38.08	84.83	67.63	25.43	1.59
	42.82	39.66	84.92	67.73	25.38	1.58
	42.30	37.72	84.68	67.40	25.64	1.59

付表3 供試体の状態量 (ヘントナイトKunigelV1, 1.8g/cm³)

供試体製作時の含水比 [%]	乾燥前の供試体体積 V[cm ³]	乾燥後の供試体体積 Vo[cm ³]	湿潤質量 [g]	乾燥質量 [g]	含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]
9.79	42.65	41.89	83.85	76.33	9.85	1.79
	42.77	42.05	83.79	76.31	9.80	1.78
	42.77	42.14	83.86	76.35	9.84	1.79
11.90	42.77	41.63	85.42	76.26	12.01	1.78
	42.79	41.70	85.44	76.29	11.99	1.78
	42.86	41.65	85.39	76.26	11.97	1.78
14.90	42.58	40.86	87.62	76.30	14.84	1.79
	42.36	40.86	87.68	76.25	14.99	1.80
	42.55	40.67	87.68	76.30	14.91	1.79
18.64	42.55	40.61	90.35	76.11	18.71	1.79
	42.53	41.15	90.39	76.09	18.79	1.79
	42.50	40.61	90.32	76.14	18.62	1.79

付表4 供試体の状態量 (ハントナイトOT-9607, 1.65g/cm³)

供試体製作時の含水比 [%]	乾燥前の供試体体積 V[cm ³]	乾燥後の供試体体積 Vo[cm ³]	湿潤質量 [g]	乾燥質量 [g]	含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm ³]
5.00	43.21	42.84	73.47	69.83	5.21	1.62
	43.17	42.73	73.35	69.75	5.16	1.62
	43.38	43.02	73.14	69.67	4.98	1.61
10.00	43.19	42.59	76.66	69.72	9.95	1.61
	43.06	42.40	76.77	69.83	9.94	1.62
	42.78	42.19	76.88	69.83	10.10	1.63
15.00	42.78	41.71	79.82	69.63	14.63	1.63
	42.87	41.72	80.14	69.92	14.62	1.63
	42.84	41.64	80.12	69.89	14.64	1.63
20.00	42.33	40.85	83.55	69.67	19.92	1.65
	42.69	41.21	82.18	68.70	19.62	1.61
	42.74	41.27	83.59	69.71	19.91	1.63
24.00	42.96	40.67	85.86	70.41	21.94	1.64
	43.05	40.54	85.83	70.41	21.90	1.64
	42.74	40.54	86.17	70.72	21.85	1.65