

緩衝材の特性試験（Ⅰ）

1992年3月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1992

緩衝材の特性試験（I）

実施責任者：佐々木憲明*，石川博久*

報告者：鈴木英明**，柴田雅博*
山形順二***，広瀬郁郎*
寺門一馬**

要 旨

高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリアのひとつに緩衝材があり、ベントナイトがその候補材料と考えられている。

本報告においては、国産のベントナイト製品の中から山形県月布産のベントナイトについて、①製品の組成、化学的な特性値等に関する調査および試験 ②圧密成形した際の機械的強度、熱伝導率、膨潤圧力および透水係数を定量的に把握するため試験 を実施した。

その結果、機械的強度、熱伝導率、膨潤圧力および透水係数はいずれも乾燥密度の大きい方が、緩衝材として望ましい特性を示すことがわかった。また、ケイ砂の混合により熱伝導特性を向上させ得ることが明らかとなったが、混合率の決定にはケイ砂の混合による他の性能変化を併せて検討を行う必要があることがわかった。

本試験の結果から、上記の各特性の値を定量的に示した。

* 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室
** 検査開発係
*** 石川島播磨重工業㈱

目次

1	はじめに	1
2	標準的緩衝材材料	3
2. 1	鉱物組成	3
2. 2	化学組成および構造式	4
2. 3	交換性陽イオン量および陽イオン交換容量	5
2. 4	試料中のモンモリロナイトの固溶割合の検討	8
2. 5	真比重	9
3	緩衝材の特性試験	11
3. 1	圧縮ベントナイトの状態量	12
3. 2	一軸圧縮試験	14
3. 2. 1	試験方法・装置	14
3. 2. 2	一軸圧縮強さにおよぼす試料形状の影響	15
	(1)試料直径	15
	(2)試料高さとの直径比	16
3. 2. 3	乾燥密度と一軸圧縮強さ	18
3. 2. 4	含水比と一軸圧縮強さ	21
3. 3	熱伝導率測定試験	24
3. 3. 1	試験方法・装置	24
3. 3. 2	含水比と熱伝導率	25
3. 3. 3	ケイ砂混合率と熱伝導率	27
3. 3. 4	温度依存性	29
3. 4	膨潤圧力測定試験	31
3. 4. 1	試験方法・装置	31
3. 4. 2	圧縮ベントナイトの膨潤圧力測定	33
3. 4. 3	モンモリロナイト含有量と膨潤圧力	41
3. 4. 4	初期飽和度と膨潤圧力	43

3. 5	透水試験	44
3. 5. 1	試験方法・装置	44
3. 5. 2	動水勾配の影響	45
	(1)透水圧力	46
	(2)試料厚さ	47
3. 5. 3	乾燥密度と透水係数	49
3. 5. 4	ケイ砂混合による止水性への影響	51
3. 5. 5	止水性に対する透過液中のNaCl濃度の影響	53
3. 6	緩衝材の製作性と製作後の機械的健全性の検討	55
3. 6. 1	緩衝材の製作性の検討（締固め試験）	57
3. 6. 2	製作後の機械的健全性の検討	62
	(1)乾燥収縮試験	62
	(2)一軸圧縮試験	65
	(3)熱伝導率測定試験	68
4	まとめ	71
	謝 辞	74
	引用文献	75
別添資料	1 分析, 試験方法	76
	2 ケイ砂の試験成績	101

1 はじめに

高レベル廃棄物地層処分における緩衝材には止水性、核種吸着性、機械的安定性など多くの性能が要求される。現在までのところ、これらの要求性能の多くを満足するものとして圧縮ベントナイトが有望な候補材料と考えられている。

動燃事業団では、緩衝材開発の一環として、緩衝材仕様の決定および性能評価の基礎データとするために原料、密度等の要因が緩衝材の特性に及ぼす影響について研究を進めている。その研究フローを図-1に示す。このうち第一段階の標準的材料の選定として行った『ベントナイトの基本特性調査』(PNC SN8410 89-033)では、一般に製品として販売されているベントナイトについてカタログ調査、基本特性試験を実施した。さらに、第二段階として『緩衝材特性に影響をおよぼす要因の検定』(PNC SN8410 90-005)で報告したように、ケイ砂混合率、空隙率等が緩衝材の特性に影響を及ぼす要因を明らかにするための試験を実施してきた。

本報告書は、第三段として、緩衝材の物理的、機械的特性について試験結果のを取りまとめたものである。

はじめに、研究に用いるための標準的材料として選定した山形県月布産のNa-ベントナイト(クニゲルV1、クニミネ工業(株)製)について特性値に関する調査および試験を実施し、製品の化学組成、鉱物組成、主成分鉱物の鉱物学的特性等を明らかにした。次に、これを圧密成形した圧縮ベントナイトについて透水、膨潤等の物理的、機械的特性に関する試験を実施し、各特性値を定量的に明らかにした。

本報告書においては、これらの特性値が、緩衝材の設計の検討および性能評価に有効に利用され得るように、測定値に影響を及ぼすと考えられる測定条件の検討結果および各測定での実測定値等を詳細に記載してある。

一連の特性試験の中から一軸圧縮強さ、熱伝導率、膨潤圧力、透水係数、締固め性について報告する。

なお、一部の試験においては、参考として、海外で標準的材料として多くの研究例がある米国産Na-ベントナイトのMX-80および、クニゲルV1と同鉱床から産出する精製ベントナイトのクニピアFについても合わせて試験を行い比較を行った。

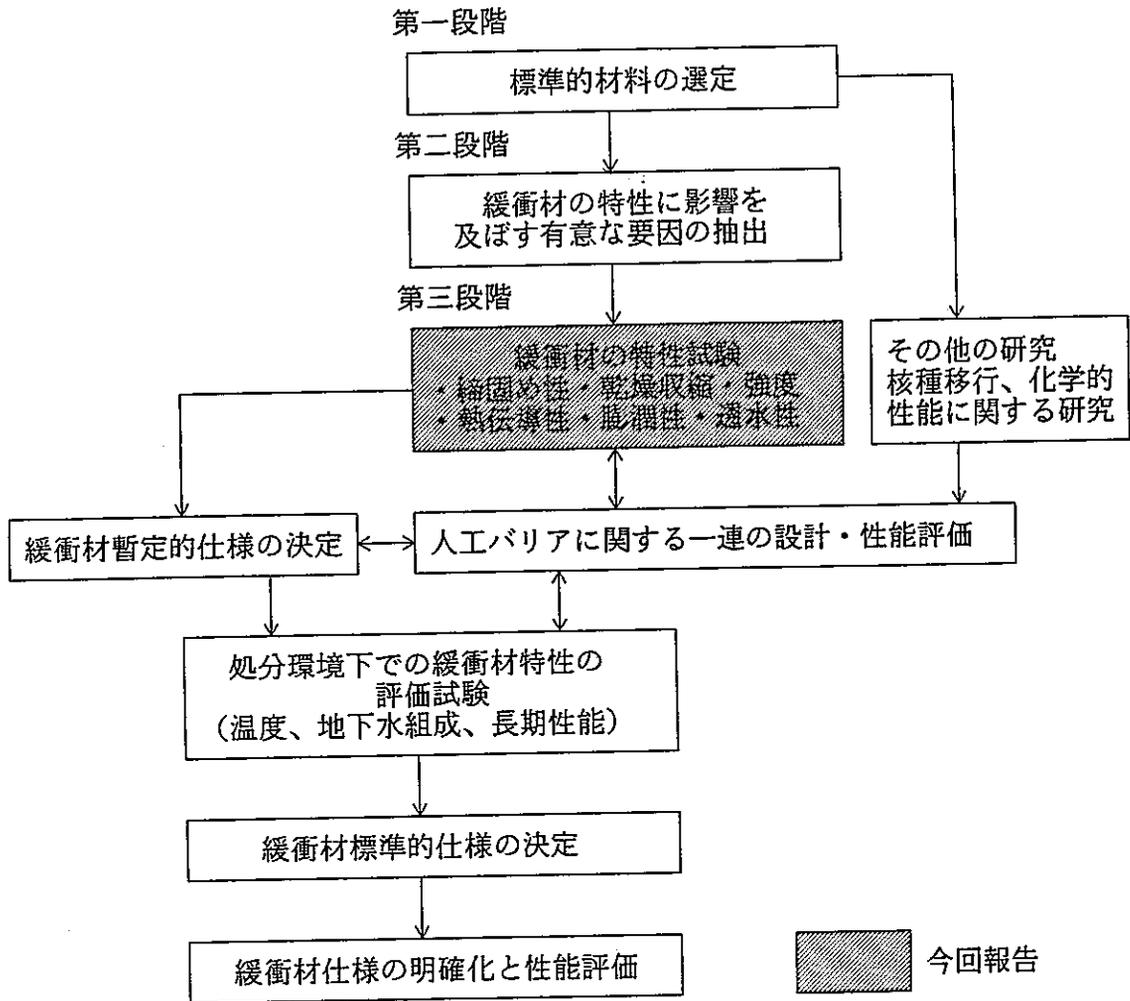


図-1 緩衝材の研究開発フロー

2 標準的緩衝材材料

既報¹⁾において、緩衝材材料としてベントナイトに着目し、いくつかの国産製品と各国で検討の対象とされている米国産の代表的製品（米国ワイオミング産、MX-80）とについて、基本特性試験を行った。その結果、国産のベントナイト製品は米国産に比べ性能が著しく劣るものではないこと、国産の製品間に著しい差異はないことが分かった。国産製品の中で主要な特性、性能について平均的な値を示したこと、締固め性が良いこと等により、山形県月布産の製品（クニゲルV1，クニミネ工業(株)製）を標準的緩衝材材料として当面の研究対象に用いることとした。

本章では、クニゲルV1の鉱物組成、化学組成、含有されるモンモリロナイトの性質等について調査・試験した結果を記述する。

2.1 鉱物組成

本製品の鉱物組成を表2.1に示す。モンモリロナイト含有量については、水ひにより精製したモンモリロナイトとのメチレンブルー吸着量の比により、他の鉱物については、標準添加法によるX線回折法等によって求めた。粘土鉱物であるモンモリロナイトを主成分とし、その含有量は約50%である。随伴鉱物としては、石英、長石のほか方解石、黄鉄鉱等が認められる。

表2.1 クニゲルV1の鉱物組成²⁾

構成鉱物等	含有量
モンモリロナイト	50 ~ 55 %
石英	30 ~ 35 %
長石	5 ~ 10 %
方解石	1 ~ 3 %
沸石(アムイ)	1 ~ 2 % 以下
ドロマイト	1 ~ 2 % 以下
黄鉄鉱	1 ~ 2 % 以下
雲母(黒雲母)	1 ~ 2 % 以下

2. 2 化学組成および構造式

製品の化学組成分析結果を表2. 2に示す。分析方法の概略を別添資料 1-1に示す。分析は全岩および水ひによりモンモリロナイト成分を抽出した試料の2試料について行った。水ひ試料の分析値からモンモリロナイトの構造式を導出した。導出方法は須藤(1974)³⁾等による方法に従った。

表2. 2 クニゲルV1化学分析結果

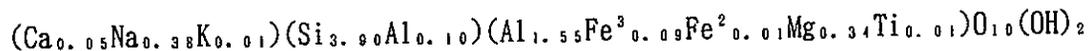
成分	全岩	水ひ試料 (モンモリロナイト)
SiO ₂	69.9	61.3
TiO ₂	0.81	0.16
Al ₂ O ₃	14.4	22.0
Fe ₂ O ₃	1.91	1.78
FeO	0.47	0.22
MnO	0.06	0.02
MgO	1.86	3.58
CaO	1.87	0.68
Na ₂ O	2.70	3.60
K ₂ O	0.30	0.10
P ₂ O ₅	0.05	0.02
強熱減量*1	5.04	6.30
TOTAL	98.02	99.76
その他		
Cl	0.03	
全S	0.55	
SO ₄ ²⁻	0.21	
全C	0.61	
CO ₂	1.7	
乾燥減量*2	8.50	8.71

含有率は 105°C恒量試料重量に対する割合

*1) 1,000°C

*2) 室温放置試料の 105°C恒量までの減量

構造式は、



と記述される。表2. 3に、各層の電荷を整理した。

表2.3 クニゲルV1中のモンモリロナイトの層電荷

全層電荷	-0.44
4面体	-0.10
8面体	-0.34
8面体中心金属 イオン数	2.00
層間陽イオン 電荷	+0.49

2.3 交換性陽イオン量および陽イオン交換容量

クニゲルV1について交換性陽イオン量および陽イオン交換容量の測定を行った。測定は日本ベントナイト工業会標準試験方法 (JBAS-106-77) に準拠して行った。試験方法、および測定手順のフロー図を別添資料1-2に示す。

陽イオン交換容量の測定結果を図2.2に示す。測定値は、測定の繰り返し精度および製品のロット間格差等により若干のばらつきを示すが、およそ60meq/100gの値を持つ。

交換性陽イオン量の測定結果を表2.4に示す。ここで求められた交換性陽イオン量の総和は、約100meq/100gの値を示し、陽イオン交換容量よりも大きいことから、本測定結果には交換サイト以外からのイオンの溶出が寄与しているものと考えられる。そのため、クニゲルV1の交換性陽イオンの値は、クニゲルV1と同鉱床のベントナイトを水ひにより精製したクニピアFの交換性陽イオン量からの推定を行った。すなわち、クニゲルV1中の交換性陽イオンはクニピアFと同じ割合で存在すると考えることとする。クニピアFの交換性陽イオン量の測定結果を表2.5に示す。これらの交換性陽イオン量は、ベントナイトの化学的緩衝性の評価に必要なデータとなる。

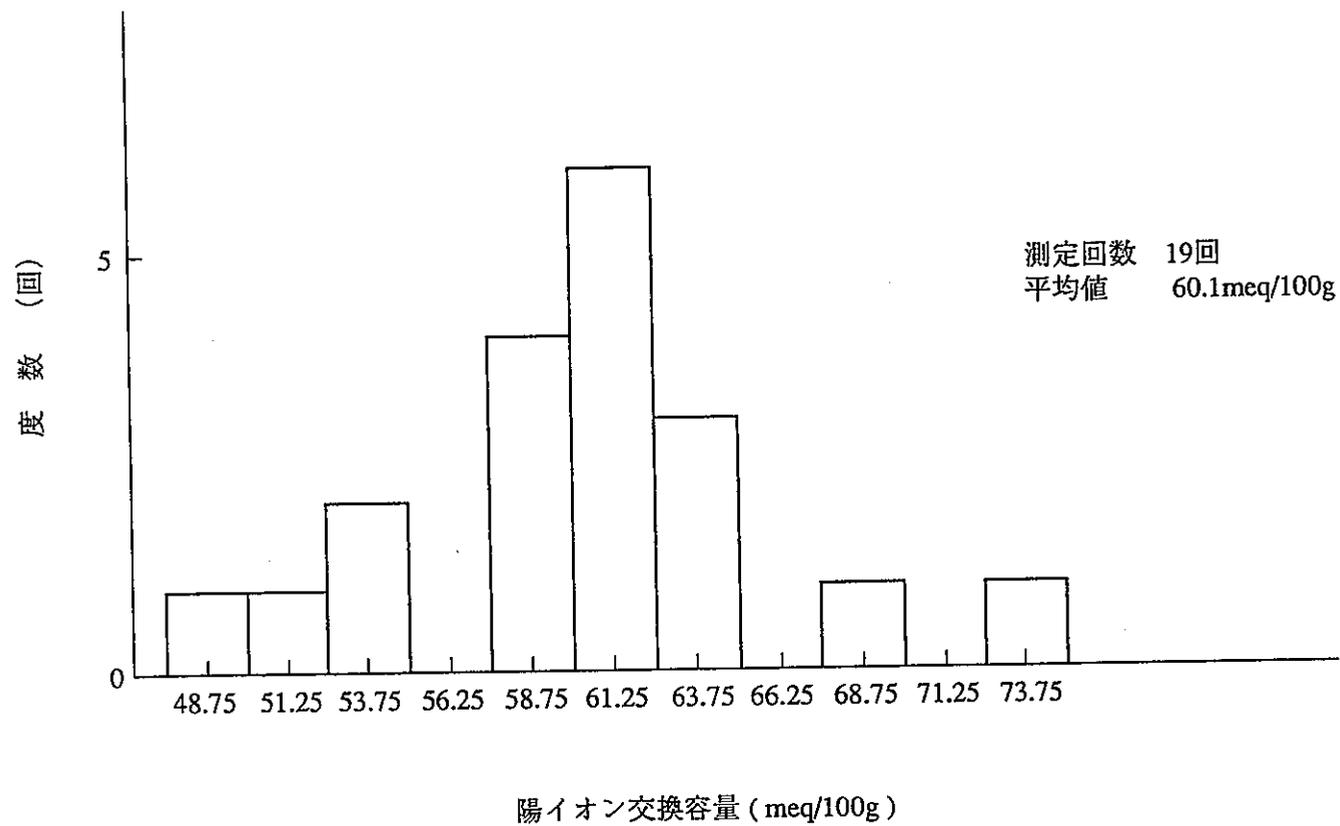


図2.2. クニゲルV1 陽イオン交換容量測定結果

表 2.4 クニゲルV I 交換性陽イオン量測定結果

層間 陽イオン種	Na	Ca	K	Mg	合計 (meq/100g)
測定値	50.9	44.9	0.92	10.1	106.8
	50.9	49.4	0.92	12.6	113.8
	50.0	37.4	0.89	6.37	94.7
	53.3	34.9	0.83	6.16	95.2
平均	51.3	41.7	0.89	8.8	102.6
	49.9%	40.6%	0.9%	8.6%	100%

表 2.5 クニピアF 交換性陽イオン量測定結果

層間 陽イオン種	Na	Ca	K	Mg	合計 (meq/100g)
測定値	107.2	19.5	1.3	4.2	132.2
	108.3	19.5	1.2	4.0	133.0
	108.7	17.5	1.2	2.1	129.4
	106.5	17.4	1.1	2.7	127.7
	108.7	17.5	1.2	2.5	129.9
平均	107.9	18.3	1.2	3.1	130.5
	82.7%	14.0%	0.9%	2.4%	100%

2.4 試料中モンモリロナイトの固溶割合の検討

クニゲルV1中の主成分であるモンモリロナイトは、2.3項に示した構造式を持つ。この構造式は理想的なモンモリロナイトの構造式とは異なる、厳密には「理想的モンモリロナイトに近い構造を持つスメクタイト」と呼ばれるべきものである。しかし、天然には理想的な構造式を持つモンモリロナイトは存在せず、産地や試料毎に異なる構造式を持つため、慣習的にある範囲の組成を持つものをモンモリロナイトと呼んでいる。

このような、構造が一定しない鉱物群を熱力学的に取り扱う際には、理想的な構造式を持ついくつかのスメクタイト鉱物を端成分とした固溶体として考えることが有効であると考えられている。

そこで、クニゲルV1中のモンモリロナイトを、以下の理想構造式を持つ端成分の固溶体としての記述を行った。

端成分	構造式 (ここで、M は交換性陽イオンを示す。)
モンモリロナイト	$M_{0.03} Si_{4.00} (Al_{1.67} Mg_{0.33}) O_{10} (OH)_2$
バイデライト	$M_{0.03} (Si_{3.67} Al_{0.33}) Al_2 O_{10} (OH)_2$
ノントロナイト	$M_{0.03} (Si_{3.67} Al_{0.33}) Fe_2 O_{10} (OH)_2$

2.2項で求めた構造式から、4面体と8面体の電荷分布によりモンモリロナイトの割合を決定し、次に8面体中のAlとFe³⁺の割合からバイデライトとノントロナイトの割合を決定した。その結果クニゲルV1中のスメクタイトは上記の3鉱物がそれぞれ、77%、22%、1%の割合で固溶していると考えられる。これに2.3項で示した交換性陽イオンの割合を割りつけ、各イオン型の鉱物を端成分とすると、以下の様な各端成分の固溶体として記述することができる。

Na	モンモリロナイト	63 %	} 77%
Ca	モンモリロナイト	11 %	
Mg	モンモリロナイト	2 %	
K	モンモリロナイト	1 %	
Na	バイデライト	18 %	} 22%
Ca	バイデライト	3 %	
Mg	バイデライト	1 %	
Na	ノントロナイト	1 % - 1 %	
			100%

2. 5 真比重

粘土粒子の比重（以下「真比重」という）は圧縮成形されたベントナイトの間隙率、飽和度等の状態量を知るために必要である。クニゲルV1は天然の粘土質岩を粗精製したものであり、鉱物組成のばらつき等から必ずしも一定の値を示すものではないが、試験の評価上統一した値を用いる必要がある。このため、いくつかの測定をくり返し、最も確かと考えられる真比重の決定を行った。

(1)比重試験

比重試験(JIS A 1202 別添資料 1-3参照)による測定結果を表 2.6に示す。クニゲルV1の真比重は2.662 ~2.784 の範囲にあり、平均値は2.717 であった。

表 2.6 クニゲルV1の真比重

No.	測定用比重液	真比重 (15°C)		
1	蒸留水	2.762	2.772	2.747
2	蒸留水	2.676	2.673	2.667
3	蒸留水	2.761	2.769	2.784
4	ケロシン	2.664	2.662	2.669
平均		2.717		

(2)飽和含水比からの算出

体積を拘束した圧縮ベントナイト中に浸潤できる水量からベントナイトの真比重の算出を行った。浸潤できる水量は間隙率により決定し、間隙率は乾燥密度と真比重により求めることができる(3.1章参照)。真比重 G_c と圧縮ベントナイトの状態量には次式の関係がある。

$$G_c = \frac{S_r \times \rho_d}{S_r \times \rho_w - w \times \rho_d}$$

ここで、 G_c : 真比重、 S_r : 飽和度 100 (%)、 ρ_d : 乾燥密度(g/cm^3)、
 ρ_w : 水の体積重量(g/cm^3)、 w : 含水比(%) である。

上式より、乾燥密度が既知である飽和した試料の含水比を求めることにより、真比重を算出できる。結果を表 2.7に示す。各乾燥密度における飽和含水比から求めたクニゲルV1の真比重は 2.675~ 2.744の範囲であり、平均値は2.697 であった。

表 2.7 飽和含水比より求めた真比重

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	真比重 G _c
1.6	25.97	2.744
	25.24	2.690
1.8	18.28	2.688
	18.10	2.675
2.0	12.71	2.687
	12.88	2.699
平	均	2.697

(3)結晶構造からの算出

天然に存在するモンモリロナイトは構造式が多様であるため、鉱物としてのモンモリロナイトの理論密度は報告されていないが、X線回折による単位格子の大きさと 2.2項で求めた単位格子中の原子数からモンモリロナイトの理論密度の試算を行った。

X線回折データから格子定数を、 $a_0 = 5.2 \text{ \AA}$ 、 $b_0 = 9.0 \text{ \AA}$ 、 $c_0 = 10.0 \text{ \AA}$ とする。

モンモリロナイトの単位格子あたりの構造式の式量は 2.2項で示した式の 2 倍であり 747.09 となる。これらの値から、理論密度は 2.651 g/cm^3 となる。

クニゲルV1の鉱物組成を 2.1項より中間的な値を取り、以下の様に仮定すると

モンモリロナイト	(D=2.651)	53%	
石英	(D=2.648)	33%	
長石類	(D=2.620 ^{*1})	8%	#1: アルバイトの値
方解石	(D=2.710)	2%	
アナルサイト	(D=2.27 ^{*2})	1%	#2: 平均的な値
ドロマイト	(D=2.860)	1%	
パイライト	(D=5.011)	1%	
黒雲母	(D=3.0 ^{*2})	1%	
		100%	

密度は 2.674 g/cm^3 と計算され、これより、真比重は 2.674 となる。

以上 3 通りの結果より、クニゲルV1の真比重は有効数字 2 桁で 2.7 とすることが妥当であると考えられる。

なお、比較材料のクニピアFは同様な比重試験結果から、MX-80については Börgesson らが飽和含水比より求めた結果⁵⁾より、ともに真比重を 2.7 とした。

3 緩衝材の特性試験

ベントナイトを緩衝材として利用する場合、これを適当な密度に圧縮成形して用いられる。本章以降では圧縮成形されたベントナイト試料が持つ緩衝材としての特性を評価するための試験を実施した。試験項目とその反映先を下表に示す。

特性試験の項目と反映先

試験項目	特性値	反映先
一軸圧縮試験	一軸圧縮強さ ヤング率	機械的強度の指標とする。
熱伝導率測定試験	熱伝導率	人工バリアおよび処分場周辺の熱解析入力データとする。
膨潤圧力測定試験	膨潤圧力	ニアフィールド応力解析入力データとする。 シール機能の指標とする。
透水試験	透水係数	飽和した緩衝材中の物質移動を明らかにするためのデータとする。
締固め試験	締固め性	圧縮成形体の製作性の検討。

3. 1 圧縮ベントナイトの状態量

緩衝材候補である圧縮ベントナイトは、成形体中に含まれるベントナイト量、水分量等の状態量により、圧縮成形性や機械的強度等の特性を大きく変える。圧縮ベントナイトの特性値を評価する場合には、これら状態量を工学的にとりあつかうことが必要である。圧縮ベントナイトの状態量は土質工学会の定義^{6) 7)}に従うこととし、ベントナイト粒子、水および気体の3要素に分けて考える。体積Vの圧縮ベントナイト中の各構成要素の重量や体積は図 3.1に示す通りである。

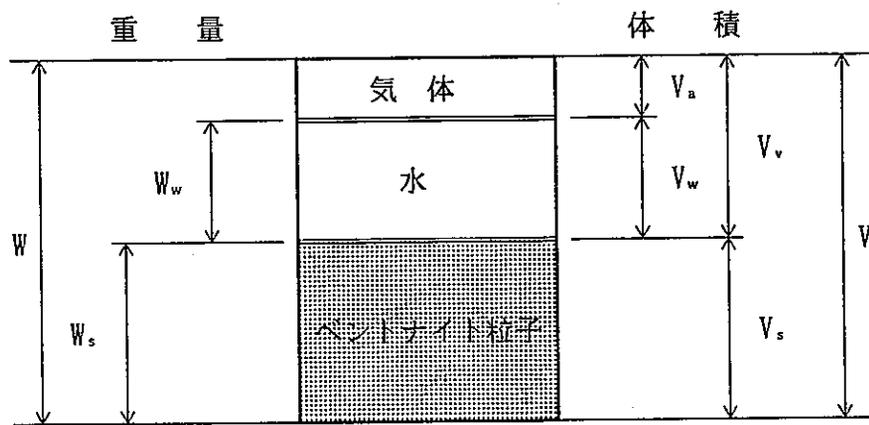


図 3.1 圧縮ベントナイトを構成する要素

これより、各特性試験を実施する上で必要な乾燥密度 ρ_d 、含水比 w 、間隙率 n 、飽和度 S_r は以下に示す式で表すことができる。

$$\text{乾燥密度 (g/cm}^3\text{)} \quad \rho_d = \frac{W_s}{V}$$

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

$$\begin{aligned} \text{間隙率(\%)} \quad n &= \frac{V_v}{V} \\ &= \left(1 - \frac{\rho_d}{G_c \rho_w} \right) \times 100 \end{aligned}$$

ここで、 G_c : ベントナイトの真比重 2.7
 ρ_w : 15℃の水の単位体積重量 0.99910(g/cm³)

$$\begin{aligned} \text{飽和度(\%)} \quad S_r &= \frac{V_w}{V_v} \\ &= \left(\frac{100}{n} - 1 \right) \times w \times G_c \end{aligned}$$

上記の式より、各乾燥密度における含水比と飽和度との関係を表 3.1に示す。

表 3.1 圧縮ベントナイトの状態量 (真比重=2.7)

乾燥密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	含水比10% 飽和度(%)	飽和度50% 含水比(%)	飽和時の 含水比(%)
1.6	40.74	39.27	12.73	25.46
1.8	33.33	54.01	9.26	18.52
2.0	25.93	77.13	6.48	12.97

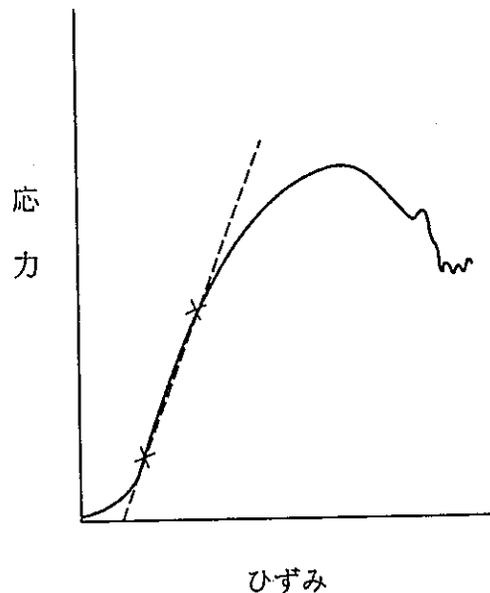
3. 2 一軸圧縮試験

3.2.1 試験方法・装置

機械的強度を表す指標として圧縮ベントナイトの一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強さ、弾性係数（ヤング率）を測定する。試験方法は、原則として土の一軸圧縮試験（JIS A 1216-1977、別添資料 1-4参照）に従った。試験装置は、万能試験機（島津オートグラフ10TB）を用いた。一軸圧縮試験に用いる試料は、任意の条件に調整したベントナイト粉末を圧縮金型で成形して作られる。

ここで、一軸圧縮強さは、試料が破壊するまでの最大圧縮応力、ヤング率は、下図に示す応力-ひずみ曲線において、直線部の傾きを最小二乗法により求めた。

試験は、まず試料形状が一軸圧縮強さにおよぼす影響を調査し、試験条件を明確にすることからはじめ、次に圧縮ベントナイトの乾燥密度、含水比等の要因をパラメータとした試験を実施している。



応力-ひずみ曲線

3.2.2 一軸圧縮強さにおよぼす試料形状の影響

(1) 試料直径

1. 目的 圧縮ベントナイトの一軸圧縮強さに及ぼす試料直径の影響を調べる。
2. 方法 試料直径をパラメータとし、一軸圧縮試験を実施する。試験供試体の形状は直径と高さを同一寸法に作製する。

試料 : クニゲルV 1
 乾燥密度 : 1.8、1.9g/cm³
 含水比 : 10%
 試験繰り返し数 : 3
 試料寸法 : 1) φ20×高さ20mm
 2) φ48×高さ48mm
 3) φ50×高さ50mm

3. 結果 試料直径をパラメータとした一軸圧縮強さを図 3.2.1に示す。この結果より各直径の一軸圧縮強さは同等の値となり、試験供試体の直径の影響は小さいといえる。

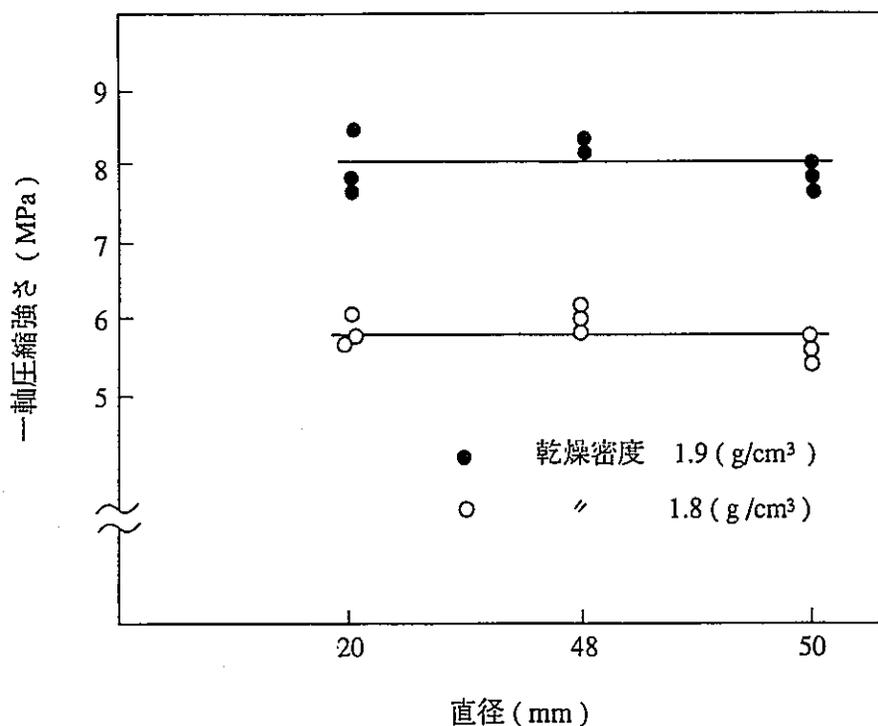


図3.2.1 試料直径と一軸圧縮強さ

(2) 試料高さ と 直径比

1. 目的 一軸圧縮強さは、円柱断面試料の高さと直径の比によって影響をうけ、一般に試料の高さは直径の2～3倍で測定することとされている。しかし、既存の圧縮装置でこれらの形状の試料が作成できないため、一軸圧縮強さにおよぼす試料直径と高さ比の影響についての詳細な試験を行い、その評価について検討する。
2. 方法 試験条件および試験方法を以下に示す。

試料 : クニゲルV 1
 乾燥密度 : 1.8g/cm³
 含水比 : 10%
 試験繰り返し数 : 3

高さ/直径の比(以下 L/Dという)をパラメータとする。試料直径は48mmとし、試料高さを以下に示す。

L/D	試料高さ(mm)
0.5	24
1.0	48
1.5	72
2.0	96
2.5	120
3.0	144

ただし、既存の圧縮装置では、乾燥密度1.8(g/cm³)でL/D=1.5(高さ72mm)を超えた試料の成形が不可能であるため、L/D=0.5(高さ24mm)の試料を積み重ねた試験を行った。一方、積み重ねることによる一軸圧縮強さへの影響を調べるため、L/D=1.0 および1.5 の試料については一体成形試料についても試験を行った。

3. 結果 試験結果を図 3.2.2に示す。

- ① 一体圧縮成形試料とL/D=0.5 の試料を積み重ねた各々の試験において、一軸圧縮強さは同等の値を示した。よって積み重ねによる一軸圧縮強さへの影響は小さいようである。
- ② L/D=0.5 ～1.5 の範囲で一軸圧縮強さは減少し、その後一定の値となる。よって、L/D=1.5 以上の試料では、一軸圧縮強さにあたる試料直径と高さ比の影響が小さくなると言える。

以上の結果より、試料形状により一軸圧縮強さは影響を受けることが確認され

た。既存の圧縮装置では $L/D=1.5$ 以上が作成不可能なことから、今後、一軸圧縮試験は $L/D=1.0$ の試料を用いて試験を行っていく。 $L/D=1.0$ は、試料形状の影響を受けない $L/D=1.5$ 以上の試料に比べ1.3倍程度大きい一軸圧縮強さを示すことから、他材料との比較や設計データに用いるときには、これら試料の形状を考慮する必要がある。

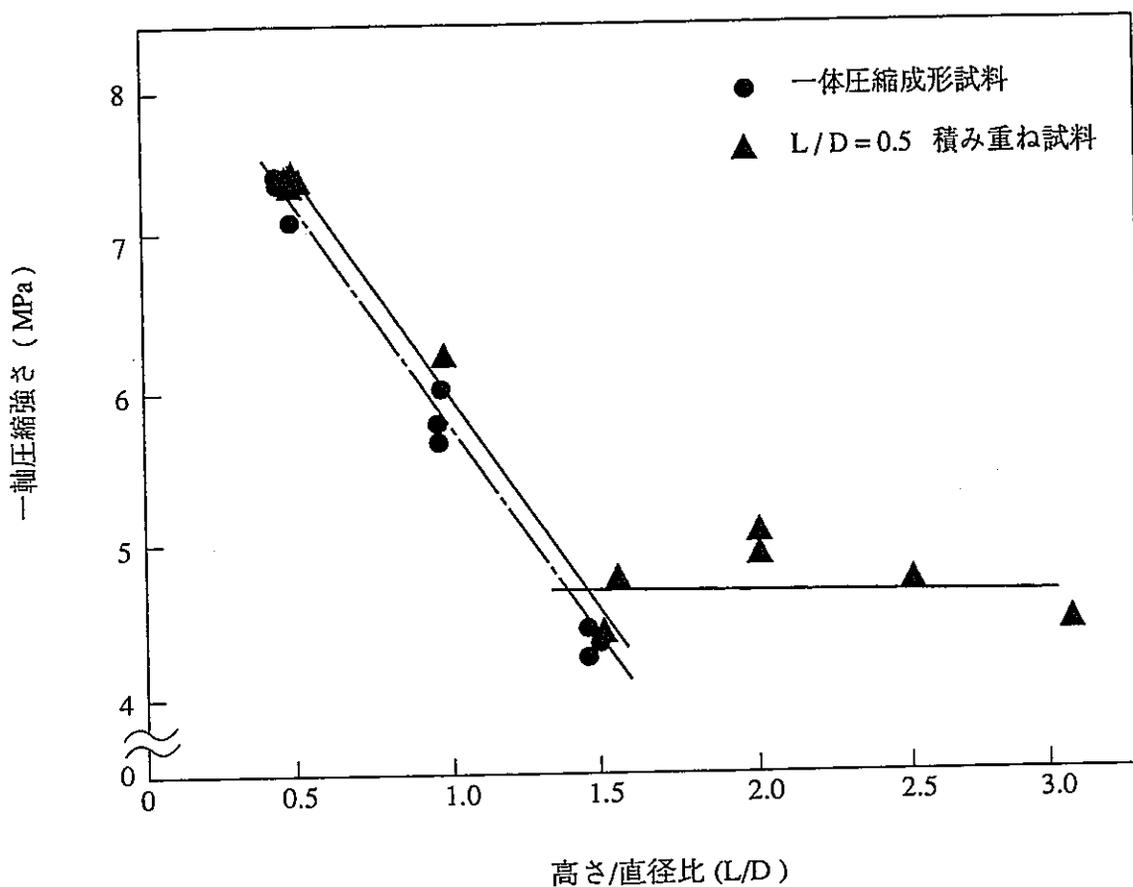


図3.2.2 試料の高さと直径の比と一軸圧縮強さ

3.2.3 乾燥密度と一軸圧縮強さ

1. 目的 圧縮ベントナイトの乾燥密度をパラメータとし、一軸圧縮強さ、ヤング率を測定する。

2. 条件 試験条件を以下に示す。

試料 : クニゲルV 1
 乾燥密度 : 1.4 ~ 2.0 g/cm³
 含水比 : 10%
 試料寸法 : φ48×高さ48mm

3. 結果 試験結果を表 3.2.1に示す。また、乾燥密度と一軸圧縮強さおよびヤング率の関係を図 3.2.3、図 3.2.4に示す。一軸圧縮強さ、ヤング率は乾燥密度とともに増加し、直線の関係が認められた。

表 3.2.1 乾燥密度と一軸圧縮強さ

乾燥密度(g/cm ³)	一軸圧縮強さ(MPa)	ヤング率×10 ² (MPa)
1.4	0.89	0.66
1.5	1.65	1.21
1.6	2.43	1.79
1.7	3.91	2.57
1.8	5.65	3.07
2.0	7.61	4.83

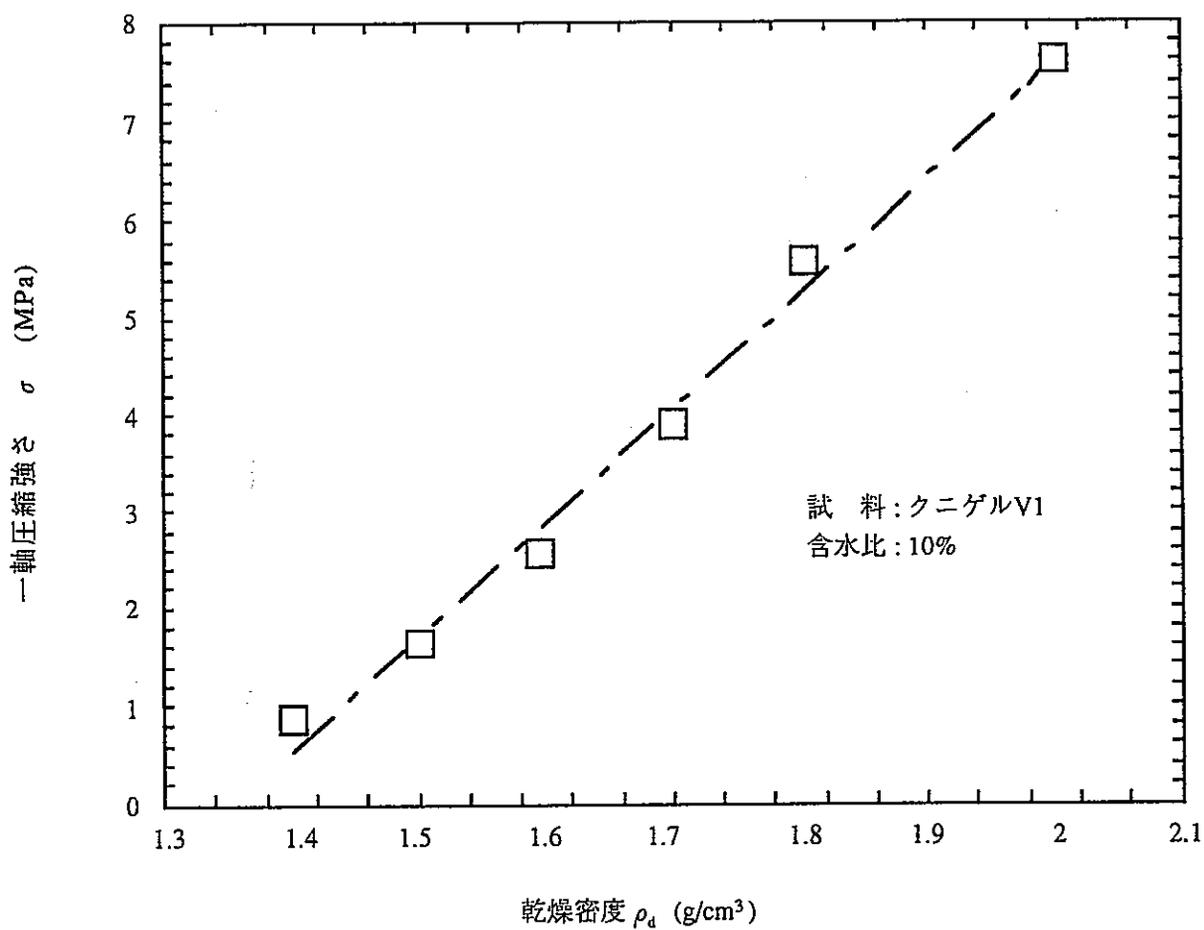


図3.2.3 乾燥密度と一軸圧縮強さ

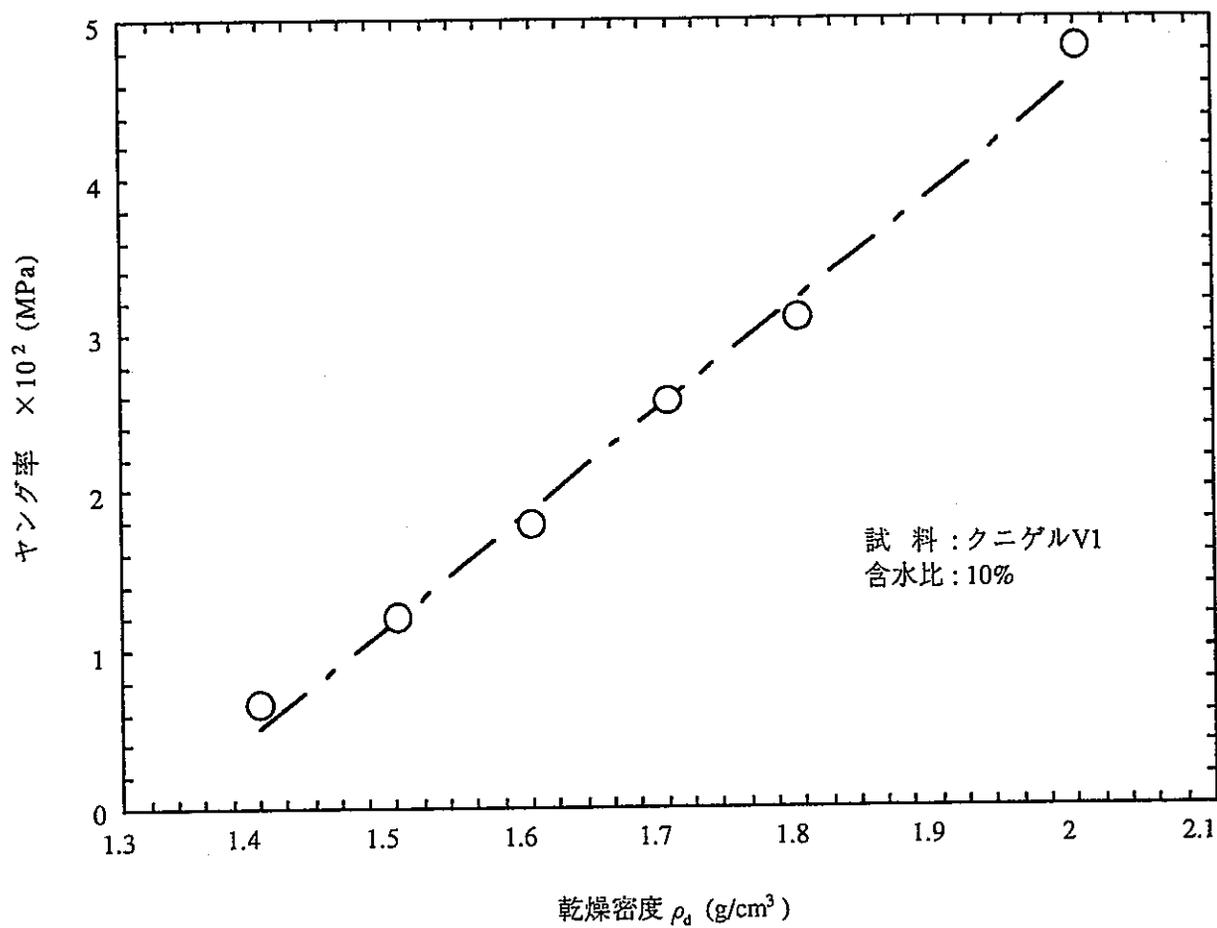


図3.2.4 乾燥密度とヤング率

3.2.4 含水比と一軸圧縮強さ

1. 目的 圧縮ベントナイトの一軸圧縮強さに及ぼす試料の含水比の影響を調べる。
2. 方法 ベントナイトの水分は、炉乾燥による蒸発、あるいは高湿度デシケータ内で吸水させ試料の含水比を調整する。試験条件を以下に示す。

試料 : クニゲルV1、MX-80
 乾燥密度 : 1.8 g/cm³
 含水比 : 4~20%
 試料寸法 : φ48×高さ48mm
 試験繰り返し数 : 2

3. 結果 一軸圧縮試験結果を表 3.2.2に示す。また、含水比と一軸圧縮強さ、ヤング率の関係を図 3.2.5、3.2.6 に示す。

以上の結果をまとめると、

- ①各試料の最大一軸圧縮強さを示す含水比はクニゲルV1で10(%)程度、またMX-80は飽和に近い含水比の18(%)程度であり、MX-80の方が大きな最大一軸圧縮強さを持つ。
- ②各試料の塑性限界はクニゲルV1(20.9%)、MX-80(37.4%)であり¹⁾、塑性限界の大きな試料の方がより高い含水比まで含水比とともに一軸圧縮強さが増加している。このことから、試料の塑性限界値と最大一軸圧縮強さを示す含水比には相関があることが示唆される。

表 3.2.2 含水比と一軸圧縮強さ

含水比 (%)	クニゲルV1		MX-80		クニゲルV1		MX-80	
	一軸圧縮強さ (MPa)	ヤング率 ×10 ² (MPa)						
4	4.14	3.75	4.14	3.75	4.14	3.75	1.61	1.52
8	4.29	5.16	5.16	4.92	5.16	4.92	3.32	2.80
10	5.22	5.29	5.29	5.65	5.29	5.22	3.21	2.69
12	5.55	5.93	5.93	2.70	5.93	5.55	2.75	2.47
15	6.88	7.10	7.10	3.02	7.10	6.88	3.08	2.99
18	8.62	6.58	6.58		8.51	8.62	10.82	6.71
20	8.18	7.64	7.64		7.64	8.18	6.87	5.73

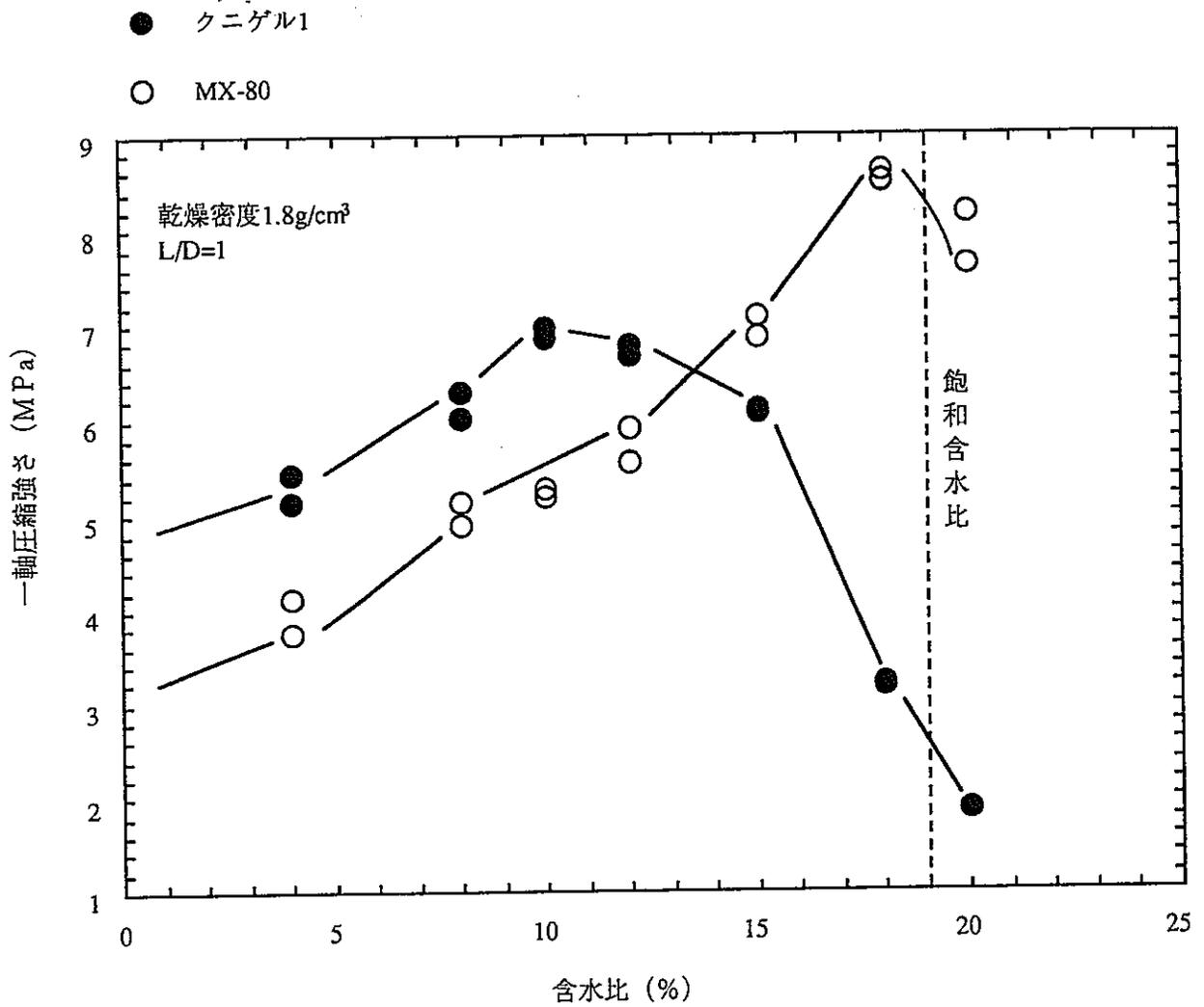


図3.2.5 含水比と一軸圧縮強さ

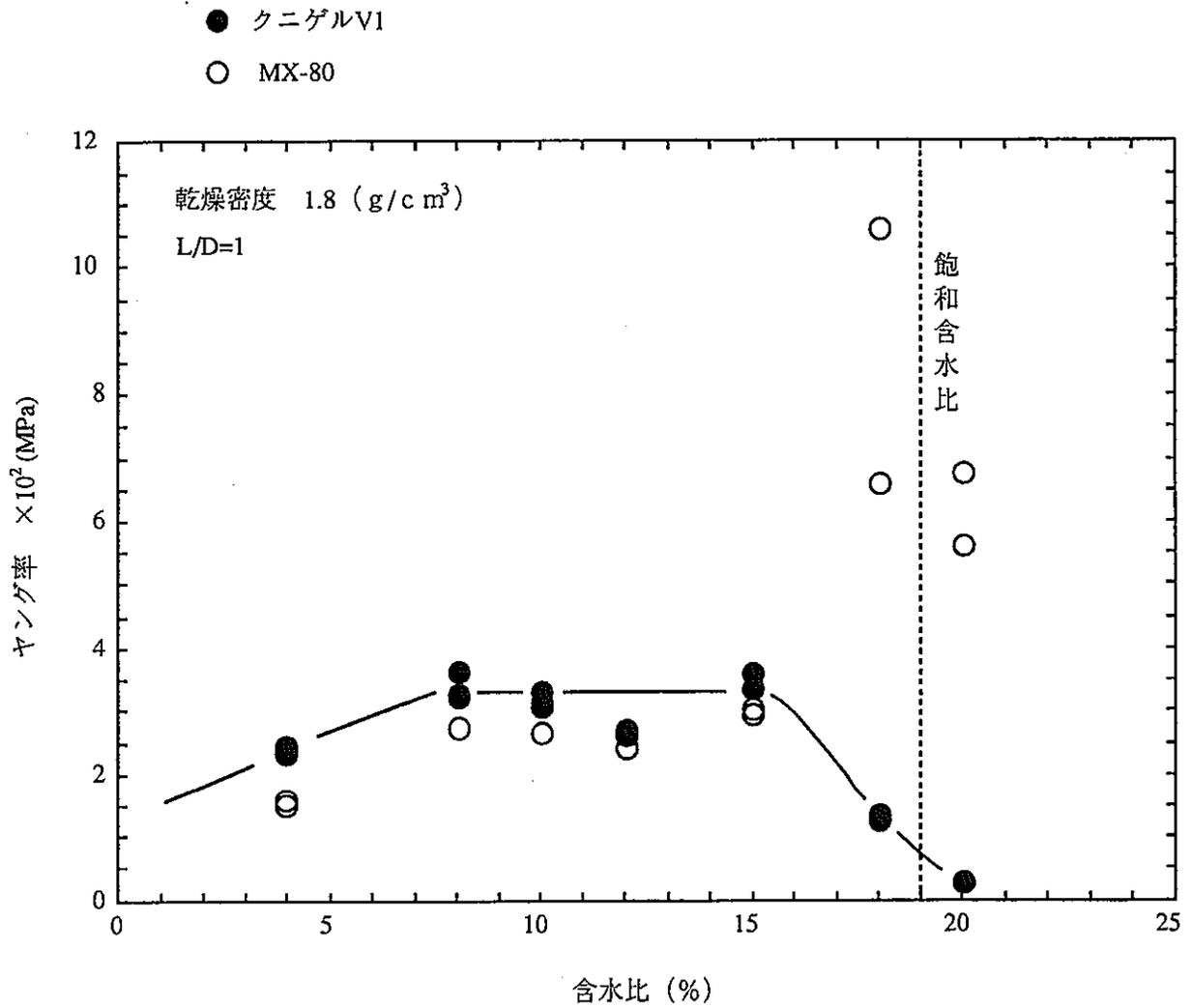


図3.2.6 含水比とヤング率

3.3 熱伝導率測定試験

3.3.1 試験方法・装置

圧縮ベントナイトについて熱伝導率を測定し、人工バリアおよび処分場周辺の熱解析のデータとする。測定装置にはQTM迅速熱伝導率計（昭和電工(株)製）を用いた。測定原理を図3.3-1に示す。QTM非定常法は、熱伝導率が既知のプロープを圧縮ベントナイト試料に押し当てる。一定熱量で加熱し、その温度上昇量を測定する。試験に用いる試料は50×50×100mmの角柱であり、任意の条件に調整したベントナイト粉末を圧縮金型で成形し作られる。

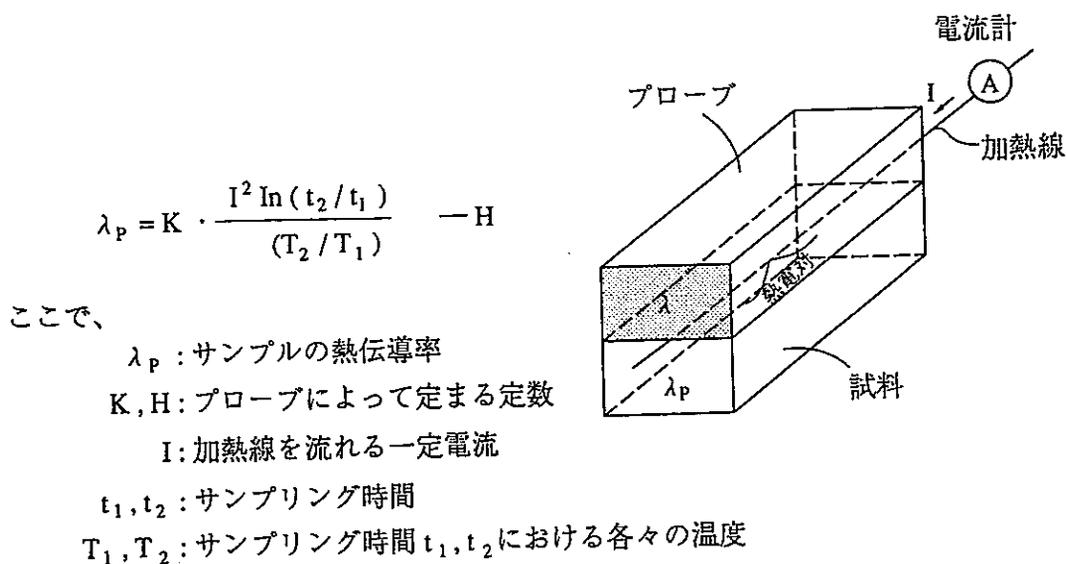


図3.3.1 熱伝導率の測定原理
(非定常熱線法による)

3.3.2 含水比と熱伝導率

1. 目的 圧縮ベントナイトの乾燥密度および含水比をパラメータとし、試料中の水分量と熱伝導率の関係を把握する。
2. 条件 ベントナイトの水分は、炉乾燥による蒸発、あるいは高湿度デシケータ内で吸水させ試料の含水比を調整する。試験条件を以下に示す。

試料 : クニゲルV 1
 乾燥密度 : 1.4 ~ 2.0 (g/cm³)
 含水比 : 0 ~ 25(%)
 測定温度 : 室温

3. 結果 試験結果を表 3.3.1に示す。熱伝導率は0.275 ~ 1.585(W/m²°C) の範囲にあり乾燥密度が大きいほど、また含水比が増加するほど、大きい熱伝導率を持つ(図 3.3.2 参照)。各乾燥密度において含水比と熱伝導率の関係を、試験範囲内で、近似式に表すと、

$$\begin{aligned}
 \text{乾燥密度} 1.4(\text{g/cm}^3) \quad \lambda &= 0.028 w + 0.272 \\
 1.6(\text{g/cm}^3) \quad \lambda &= 0.045 w + 0.401 \\
 1.8(\text{g/cm}^3) \quad \lambda &= 0.062 w + 0.527 \\
 2.0(\text{g/cm}^3) \quad \lambda &= 0.061 w + 0.780
 \end{aligned}$$

である。ここで、 λ は熱伝導率(W/m²°C)、 w は含水比(%)である。

表 3.3.1 各乾燥密度における含水比依存性

乾燥密度(g/cm ³)	含水比(%)	熱伝導率(W/m ² °C)
1.4	0.0	0.275
	5.0	0.404
	7.5	0.483
	10.0	0.574
	12.5	0.631
	15.0	0.691
1.6	0.0	0.417
	4.9	0.595
	6.4	0.687
	9.1	0.787
	12.0	0.955
	14.7	1.073
	19.8	1.307
	23.7	1.438
1.8	0.0	0.556
	4.7	0.835
	6.7	0.916
	9.3	1.092
	11.8	1.191
	13.8	1.363
	17.0	1.585
2.0	0.0	0.777
	4.3	1.023
	7.4	1.262
	8.7	1.348
	10.9	1.410

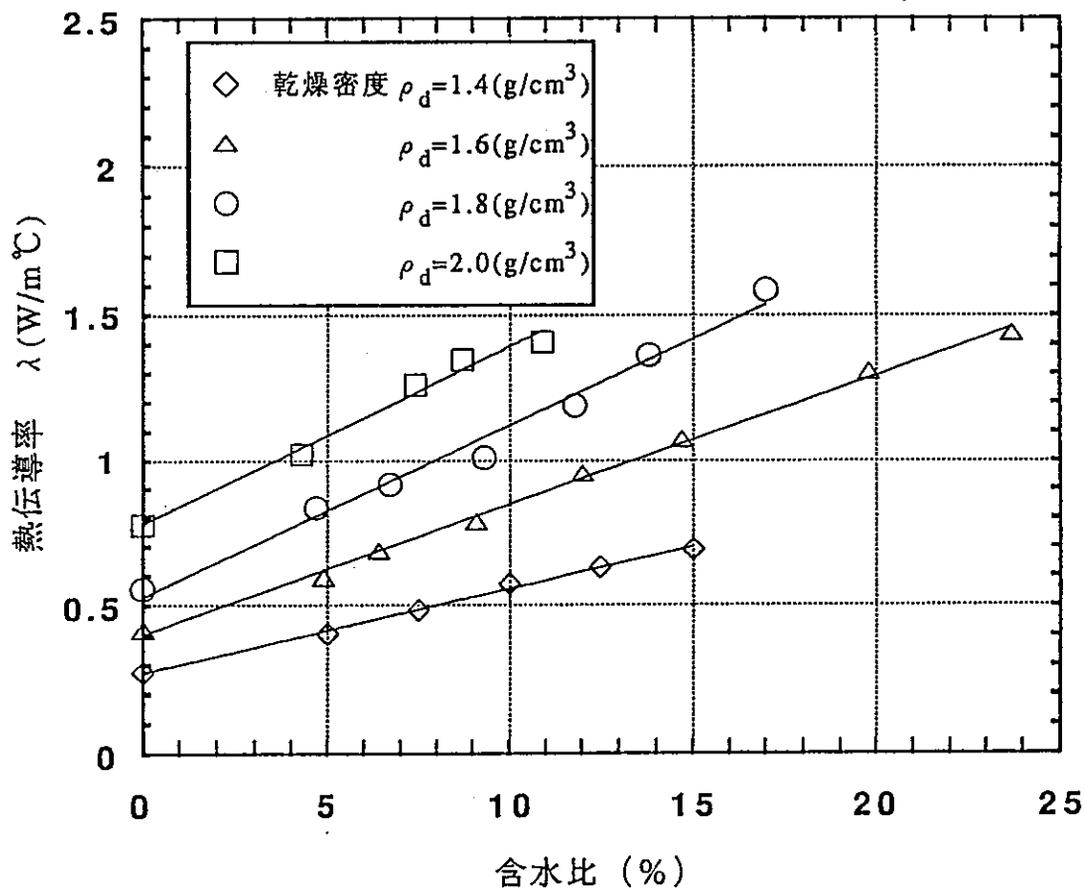


図3.3.2 含水比と熱伝導率

3.3.3 ケイ砂混合率と熱伝導性率

1. 目的 ベントナイトにケイ砂を混合する主な目的に緩衝材の熱伝導性の向上がある。
ここでは乾燥密度およびケイ砂混合率をパラメータとし、ケイ砂混合率と熱伝導率の関係を把握する。
2. 条件 ケイ砂の粒度分布を別添資料2-1に示す。水分を含まないケイ砂とクニゲルV1を所定の重量割合で混合するが、試料全体の含水比が10(%)になるようにクニゲルV1粉末の含水比を調整した。試験条件を以下に示す。
- 試料 : クニゲルV1、ケイ砂(5号)
 ケイ砂混合率 : 0 ~ 40(%)
 乾燥密度 : 1.6 ~ 2.0(g/cm³)
 含水比 : 10(%)
 測定温度 : 室温
3. 結果 試験結果を表3.3.2に示す。熱伝導率は0.787~2.198(W/m°C)の範囲にあり乾燥密度、ケイ砂混合率が高いほど熱伝導性が良い(図3.3.3参照)。

表 3.3.2 各乾燥密度におけるケイ砂混合率依存性

ケイ砂 混合率(%)	乾燥密度(g/cm ³)		
	1.6	1.8	2.0
0	0.787	1.092	1.348
20	0.920	1.330	1.792
30	1.042	1.421	1.965
40	1.202	1.650	2.198

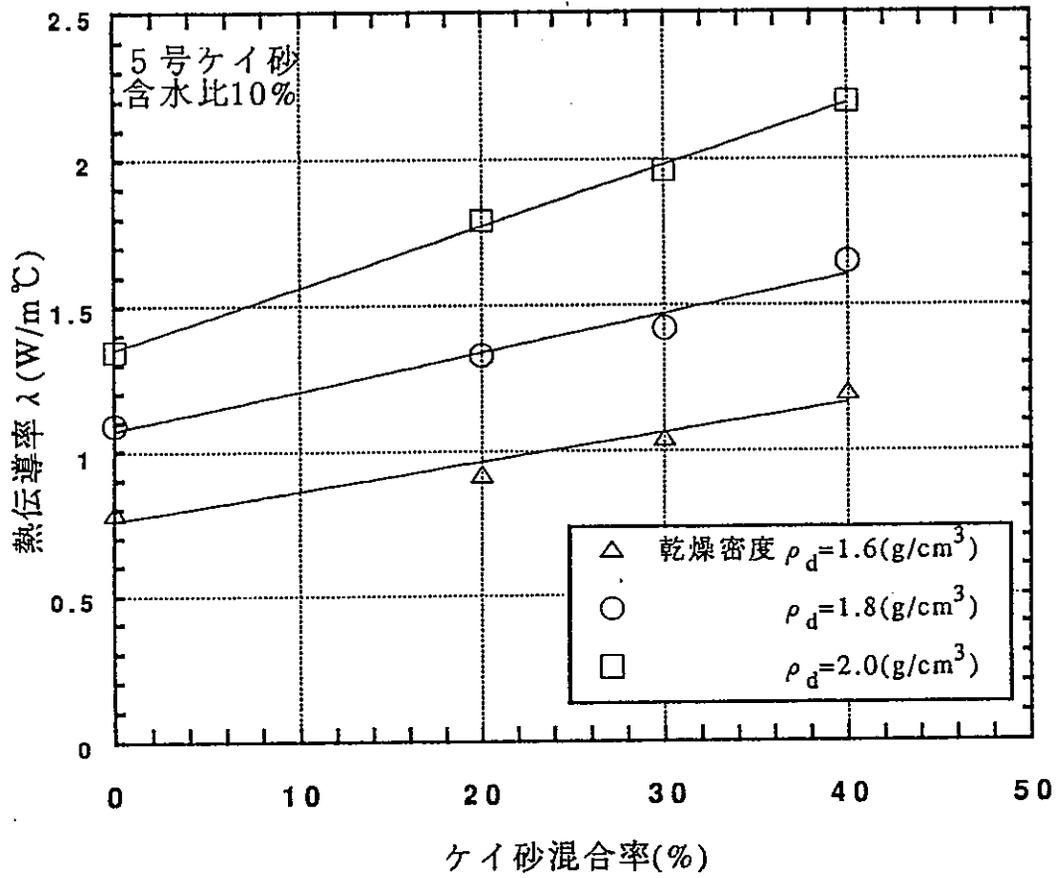


図3.3.3 ケイ砂混合率と熱伝導率

3.3.4 温度依存性

1. 目的 圧縮ベントナイトの乾燥密度、試料温度をパラメータとし、温度の熱伝導率への影響を把握する。

2. 条件 温度を上昇させた場合、試料からの水分蒸発を防止することが困難なため、今回は試料の水分が無い場合について、熱伝導率測定試験を実施した。試験条件を以下に示す。

試料 : クニゲルV1
 試料温度 : 室温～100 (°C)
 乾燥密度 : 1.6～2.0(g/cm³)
 含水比 : 0 (%)

3. 結果 試験結果を表3.3.3に示す。熱伝導率は0.417～0.791(W/m °C)の範囲にあり温度依存性は小さいようである(図3.3.4参照)。

表3.3.3 温度下における熱伝導率(W/m°C)

試料温度 (°C)	乾燥密度(g/cm ³)		
	1.6	1.8	2.0
室温	0.417	0.474	0.777
40	0.402	0.514	0.756
60	0.410	0.541	0.395
80	0.434	0.535	0.752
100	0.390	0.560	0.791

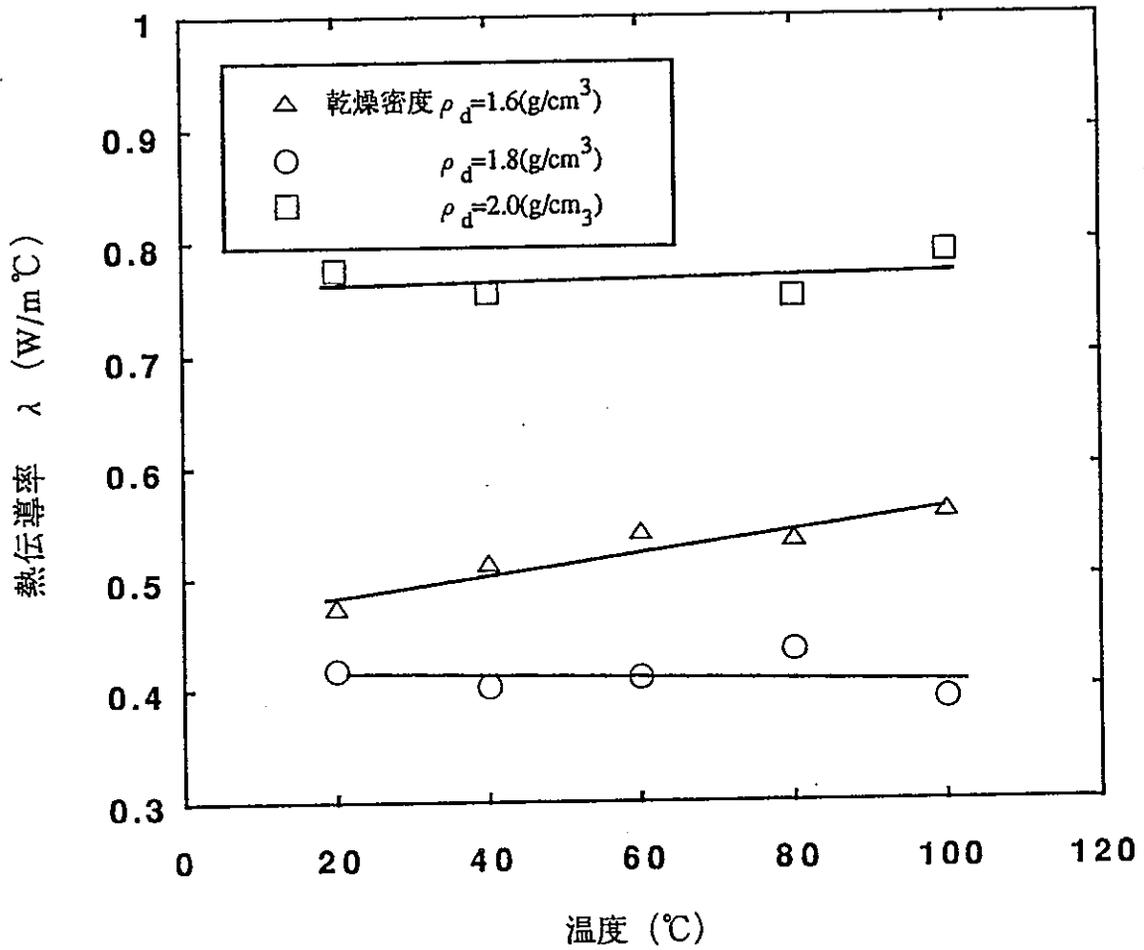


図3.3.4 試料温度と熱伝導率

3. 4 膨潤圧力測定試験

3. 4. 1 試験方法・装置

圧縮ベントナイトは水の浸潤により膨潤する。このとき、圧縮ベントナイトの体積を拘束することにより得られる膨潤圧力を測定する。膨潤圧力の測定には万能試験機および膨潤圧力測定セルを用いた。それぞれの試験装置の概念図を図 3. 4. 1、3. 4. 2 に、各装置の仕様を表 3. 4. 1に示す。試料は、いずれの装置においても拘束容器内でベントナイト粉末を圧縮することにより成形した。試料寸法は、万能試験機で直径50mm×高さ20mm、膨潤圧力測定専用セルで直径20mm×高さ20mmである。試料下部には金属焼結フィルター（孔径 $2\mu\text{m}$ ）が置かれ、試料との間にはテフロンフィルター（孔径 $2\mu\text{m}$ ）を有する。試験溶液はフィルターで分散されて試料中へ浸潤する。試験溶液の浸潤により発生する膨潤圧力は試料上部に設けたロードセル、または、圧力トランスデューサにより計測される。

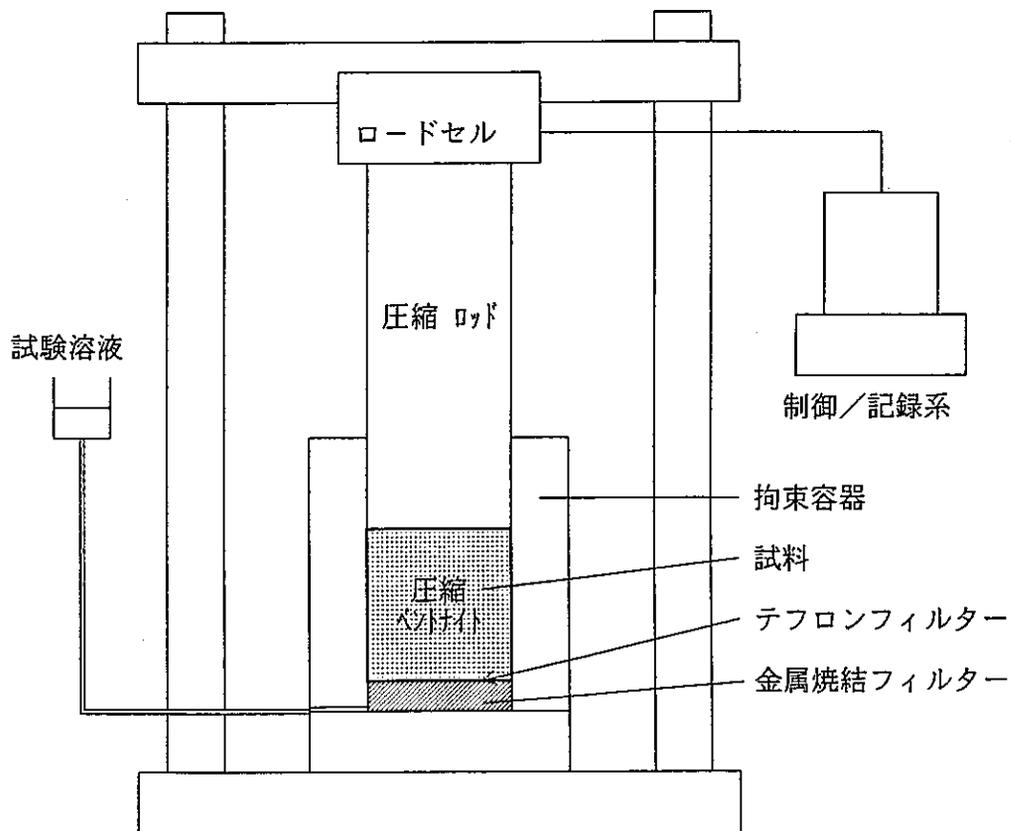


図 3. 4. 1 万能試験機による膨潤圧力測定

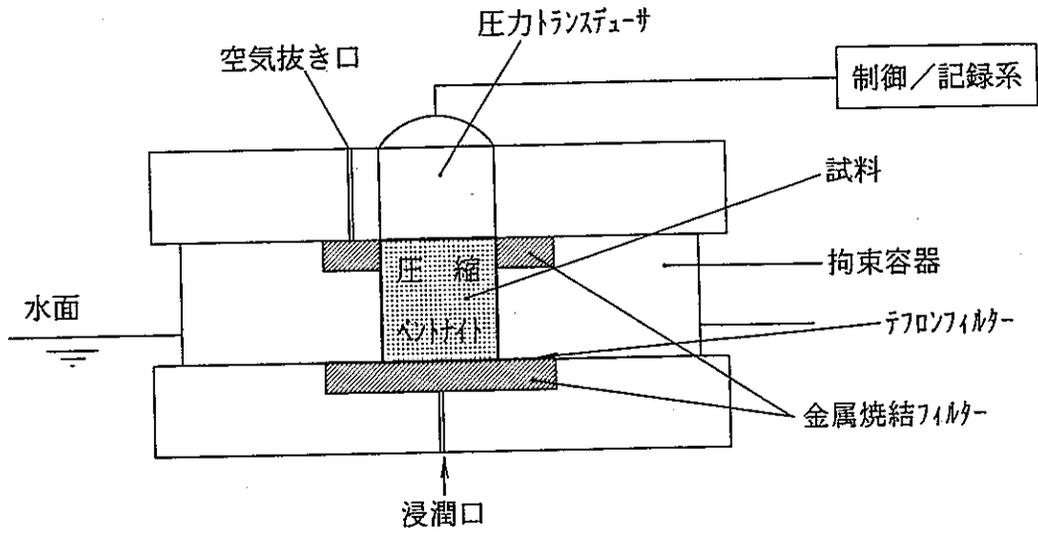


図 3.4.2 膨潤圧力測定セルによる膨潤圧力測定

表 3.4.1 機器のメーカー・型式

機 器	メーカー・型式
万能試験機 ロードセル 制御/記録系 試料寸法	島津製作所(株) オートグラフ10TB 最大計測圧力 50MPa PC9801 vm φ50mm×高さ20mm
膨潤圧力測定セル 圧力トランスデューサ 制御/記録系 試料寸法	日本テク インストルマンツ製 3000PSI(20MPa), 10000PSI(98MPa) 共和電業製 UCAM-10A, USB-51A, USB-51 φ20mm×高さ20mm

3.4.2 圧縮ベントナイトの膨潤圧力測定

1. 目的 クニゲルV1、クニピアF、MX-80の各種ベントナイトについて乾燥密度をパラメータとし膨潤圧力を測定する。
2. 条件 測定には万能試験機、および膨潤圧力測定セルを用いた。試料寸法はそれぞれ $\phi 50 \times$ 高さ20(mm)、 $\phi 20 \times$ 高さ20(mm)である。試験条件を以下に示す。

試料	: クニゲルV1、クニピアF、MX-80
乾燥密度	: 1.5 ~ 2.0 (g/cm ³)
試験溶液	: 蒸留水
試験温度	: 室温
粉末含水比	: 10(%)

3. 結果 膨潤圧力測定セルによる各種ベントナイト試料の膨潤圧力測定試験結果の一例を図 3.4.3~図 3.4.5に示す。膨潤圧力は4時間毎に測定した。膨潤圧力測定結果を表 3.4.2~表 3.4.4に示す。表中には、これ以上に膨潤圧力が変化しない平衡膨潤圧力、また膨潤圧力の発生初期に一時的なピークを持つもの(図 3.4.3、乾燥密度1.5 ~ 1.8 g/cm³の試料)についてはその最大値(最大膨潤圧力)と、それらの発生時間についてまとめた。

温度の影響

今回の試験では厳密な温度管理を行わなかったため、室温の変化にともなって膨潤圧力も変化した。これは熱膨張による装置の寸法変化の影響が考えられる。温度の上昇により、万能試験機では圧縮ロットが膨張し圧力が大きくなる傾向がみられる(図 3.4.6参照)。また圧縮ロットを持たない膨潤圧力測定セルは拘束容器の膨張により圧力が小さくなる傾向があると考えられる(図 3.4.7参照)。そこで平衡膨潤圧力については、室温と膨潤圧力の関係で回帰分析を行い、室温25℃時の値で整理した。一方、最大膨潤圧力は浸潤開始から試験終了までの間の最大値である。

装置の影響

この2種類の試験装置による膨潤圧力試験結果を、最も試験数の多いクニゲルV1の乾燥密度1.8g/cm³の場合について比較する。表 3.4.2からわかるように、平衡膨潤圧力は同等の値を示すが、発生時間には差があることがわかる。装置による膨潤圧力の経時変化の違いを図 3.4.8および図 3.4.9に示す。

膨潤圧力測定セルでは、100時間以前に最大膨潤圧力が発生した後に膨潤圧力は降下する。その後、ふたたび膨潤圧力は上昇し350時間を過ぎたあたりか

ら平衡膨潤圧力となる。この様な経時変動は他の研究例としてPusch による膨潤圧力測定試験⁸⁾でも同様の傾向が見られる。

一方、万能試験機による膨潤圧力経時変化は、水の浸潤開始後75時間程度で膨潤圧力が一定となり、装置による膨潤圧力の発生挙動に差がみられた。

これらの試験結果を乾燥密度と膨潤圧力の関係でまとめ、図3.4.10に示す。

- ①ベントナイトの種類によらず、乾燥密度が大きいほど膨潤圧力は増加する。
- ②膨潤圧力は、クニゲルV1 < MX-80 < クニピアFの関係があり、これは試料中のモンモリロナイト含有量によるものと考えられる。各種ベントナイトのモンモリロナイト含有量はそれぞれクニゲルV1で約50(%)、MX-80で約75(%)⁹⁾、クニピアFで約99(%)²⁾である。
- ③各種ベントナイトの乾燥密度と平衡膨潤圧力の対数には直線の関係が認められ、各ベントナイトとも同程度の傾きを持つといえる。各ベントナイトの乾燥密度と平衡膨潤圧力の関係を示す近似式は、乾燥密度1.5~2.0 g/cm³の範囲で

$$\text{クニゲルV1} \quad P_s = 2.28 \times 10^{-5} \times \exp(6.70 \rho_d) \quad (4-1\text{式})$$

$$\text{クニピアF} \quad P_s = 6.79 \times 10^{-4} \times \exp(7.36 \rho_d) \quad (4-2\text{式})$$

$$\text{MX-80} \quad P_s = 1.20 \times 10^{-4} \times \exp(6.80 \rho_d) \quad (4-3\text{式})$$

である。ここで、 P_s は平衡膨潤圧力(MPa)、 ρ_d は乾燥密度(g/cm³)である。Borgesson らによるMX-80の実験式⁵⁾は、

$$P_s = 2.860(Bc + 0.2)^{10/3} \cdot \exp((\rho_m - 2)/0.095)$$

であり、 P_s は膨潤圧力(MPa)、 ρ_m は湿潤密度(g/cm³)、 Bc はベントナイト含有率である。MX-80の乾燥密度1.8 g/cm³時の膨潤圧力をそれぞれ算出すると、4-3式では24.8(MPa)、Borgesson らによる実験式では21.3(MPa)とほぼ同等の値となった。

表 3.4.2 クニゲルV 1の膨潤圧力測定結果

乾燥密度 (g/cm ³)	膨潤圧力測定セル		万能試験機
	最大膨潤圧力 (MPa)	平衡膨潤圧力 (MPa)	平衡膨潤圧力 (MPa)
1.5	1.11(20) 0.95(20) 0.81(20) 平均 0.96(20)	0.99(250) 0.71(250) 0.45(280) 平均 0.72(260)	—
1.6	1.69(20) 1.56(20) 1.60(28) 平均 1.62(23)	1.08(380) 0.90(350) 0.83(350) 平均 0.94(360)	0.84(49) 1.11(22) 平均 0.98(36)
1.8	4.99(51) 5.30(79) 4.93(57) 4.70(49) 4.92(51) 4.41(47) 5.35(79) 4.84(39) 4.62(39) 4.93(36) 5.14(40) 4.50(72) 平均 4.89(54)	3.72(400) 3.85(400) 3.61(380) 3.51(470) 3.57(380) 3.68(400) 3.45(390) 3.82(310) 3.50(300) 3.50(280) 3.93(300) 4.32(330) 平均 3.71(360)	3.68(52) 3.71(68) 3.91(51) 3.18(52) 3.69(75) 4.13(46) 平均 3.72(57)
2.0	18.9(600) 14.7(1150) 平均 16.8(875)		—

() 内数字は浸潤開始からの時間 (hr)

表 3.4.3 クニピアFの膨潤圧力測定結果
(試験繰返し数：1)

乾燥密度 (g/cm ³)	平衡膨潤圧力 (MPa)
1.5	4.2(1000)
1.6	—
1.8	37.3(2000)
2.0	76.3(4000)

() 内数字は浸潤開始からの時間 (hr)

表3.4.4 MX-80の膨潤圧力測定結果
(試験繰返し数：1)

乾燥密度 (g/cm ³)	平衡膨潤圧力 (MPa)
1.5	3.1(470)
1.6	—
1.8	24.7(300)
2.0	60.2(3500)

() 内数字は浸潤開始からの時間 (hr)

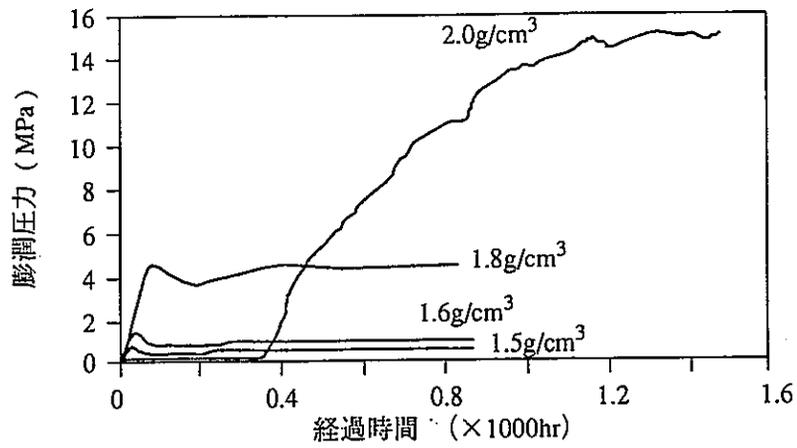


図3.4.3 クニゲルV1の膨潤圧力測定結果

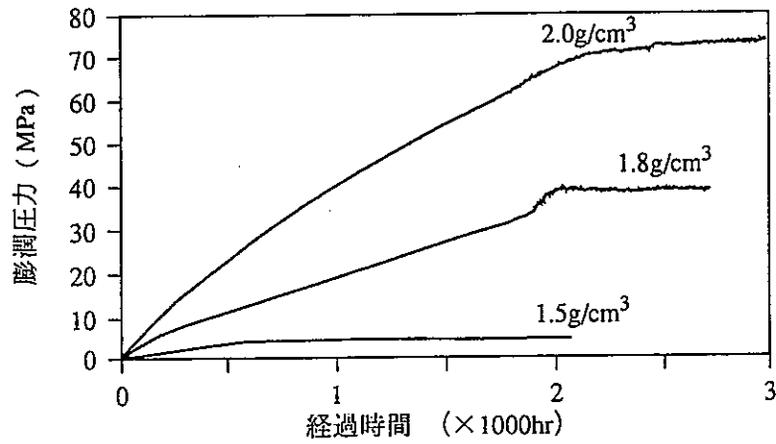


図3.4.4 クニピアFの膨潤圧力測定結果

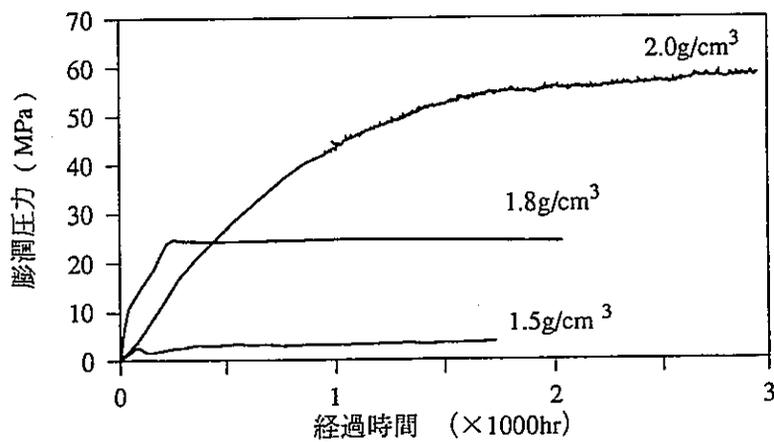


図3.4.5 MX-80の膨潤圧力測定結果

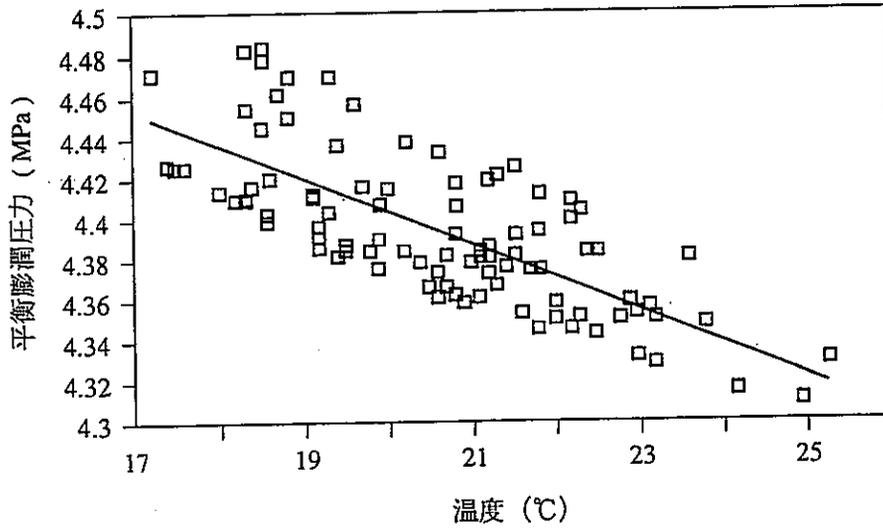


図3.4.6 膨潤圧力セルによる温度変化と平衡膨潤圧力

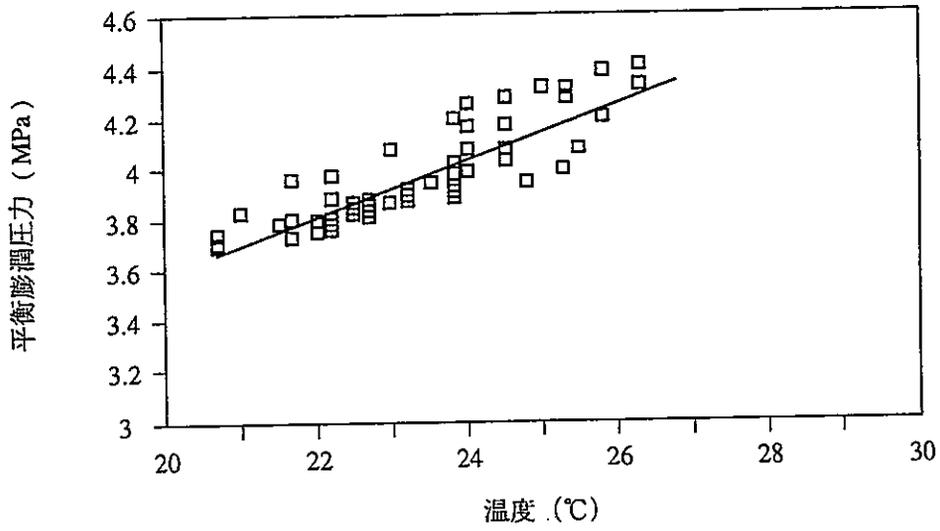


図3.4.7 万能試験機による温度変化と平衡膨潤圧力

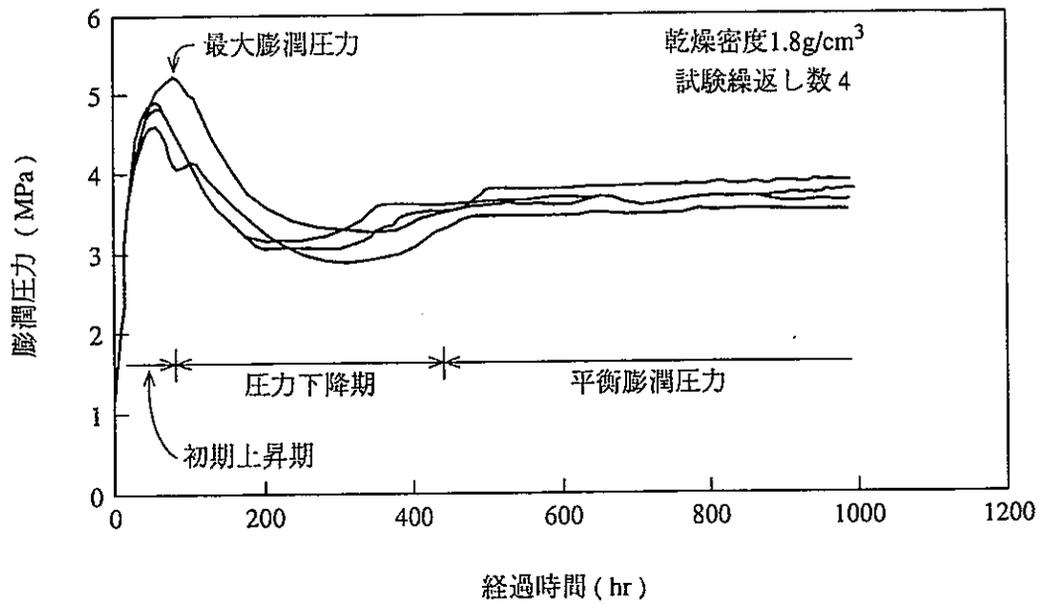


図3.4.8 膨潤圧力測定セルによる膨潤圧力経時変化

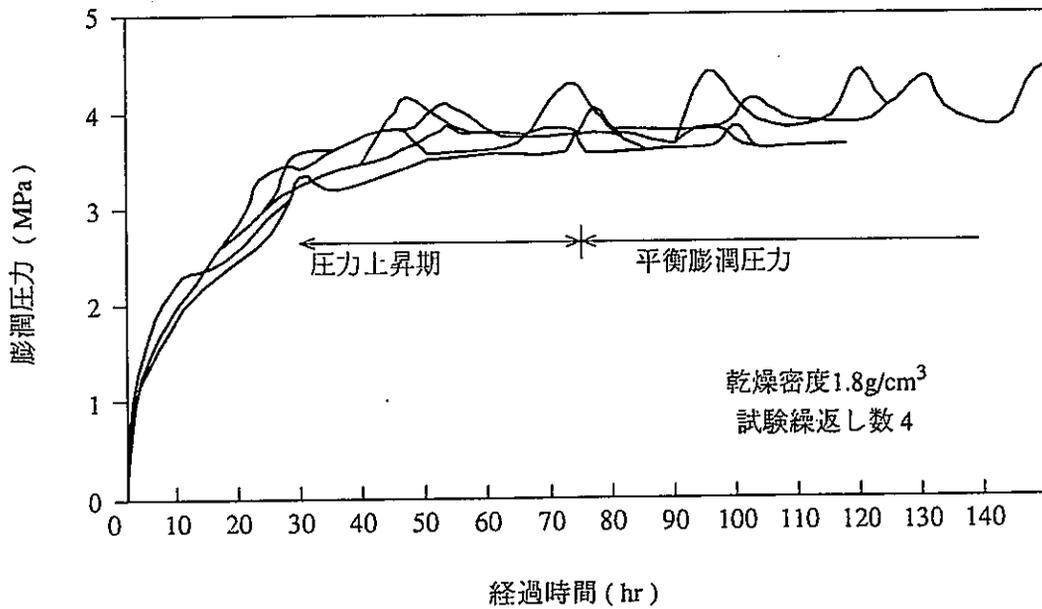


図3.4.9 膨潤圧力測定セルによる膨潤圧力経時変化
(波状の圧力の変動は温度変化による)

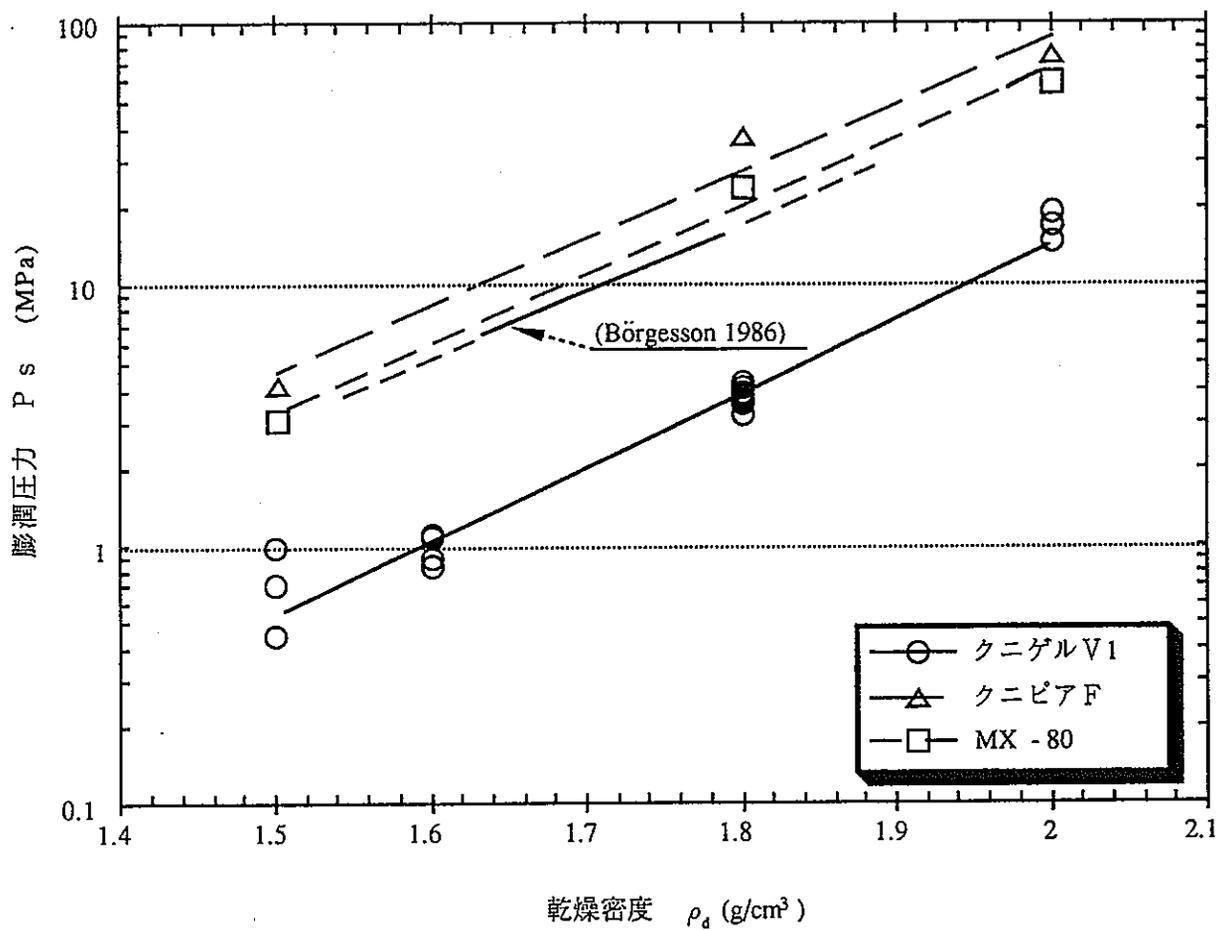


図3.4.10 乾燥密度と平衡膨潤圧力

3.4.3 モンモリロナイト含有量と膨潤圧力

1. 目的 圧縮ベントナイト中に含有するモンモリロナイト量と膨潤圧力の関係を把握する。

2. 方法 クニピアF(モンモリロナイト含有量約99%)にケイ砂量をパラメータとして混入し膨潤圧力を測定する。また、MX-80(モンモリロナイト含有量約75%)、クニゲルV1(モンモリロナイト含有量約50%)と比較し、試料中のモンモリロナイト量と発生する膨潤圧力の関係を整理する。試験条件を以下に示す。

(1)パラメータ

クニピアFにケイ砂(5号)を0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%の重量割合で混合し、試料中のモンモリロナイト含有量を調整する。

(2)条件	乾燥密度	:	1.8g/cm ³
	ベントナイト含水比	:	10%
	試料寸法	:	φ20×高さ20mm
	試験溶液	:	蒸留水
	試験温度	:	室温
	試験装置	:	膨潤圧力測定セル

3. 結果 各試料の平衡膨潤圧力を表3.4.5に示す。表中にはクニゲルV1、MX-80の値(3.4.2項参照)を合わせて示す。さらに、試料中のモンモリロナイト含有量と平衡膨潤圧力の関係を図3.4.11に示す。これらの試験結果から、

試料中のモンモリロナイト含有量が多くなると膨潤圧力は増大し、モンモリロナイト含有量と膨潤圧力の対数には、ほぼ直線の関係が認められる。乾燥密度1.8g/cm³、モンモリロナイト含有量40~99(%)の場合、モンモリロナイト含有量と膨潤圧力の関係を示す近似式は、

$$P_s = 0.1596 \times \exp(0.058 X)$$

と表せる。ここで、 P_s は平衡膨潤圧力(MPa)、 X はモンモリロナイト含有量(%)である。

表 3.4.5 モンモリロナイト含有量と膨潤圧力(乾燥密度 1.8 g/cm³の場合)

試料名	ケイ砂混合率(%)	モンモリロナイト含有量(%)	平衡膨潤圧力(MPa)
クニピアF + ケイ砂	0	99	37.3
	20	80	19.1
	30	70	10.4 12.0
	40	60	4.6
	50	50	3.5 2.2 2.7
	60	40	1.4 1.7
クニゲルV1	0	50	3.70(n=19の平均)
Mx-80	0	75	24.7

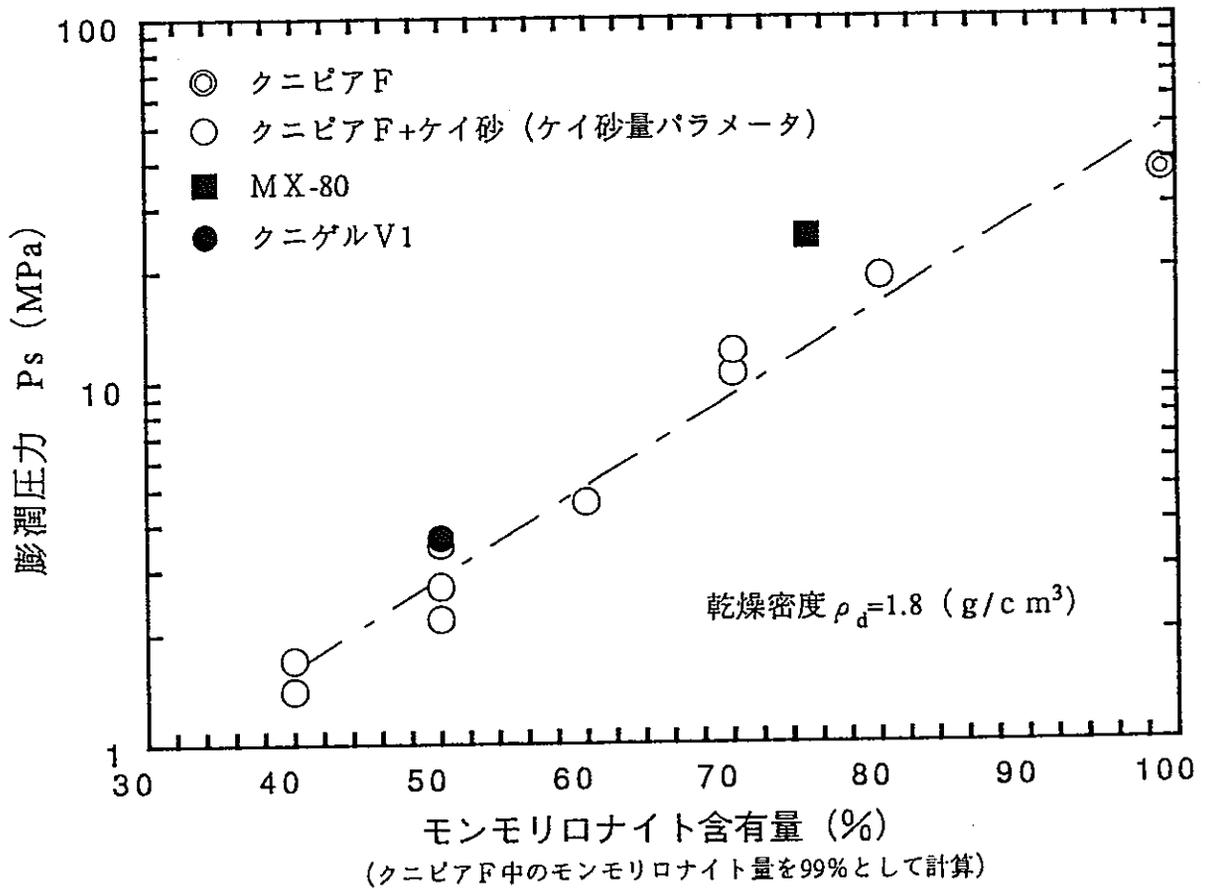


図3.4.11 モンモリロナイト含有量と膨潤圧力

3.4.4 初期飽和度と膨潤圧力

1. 目的 試料作製時のベントナイト粉末の含水比により、圧縮成形体の試料の飽和度が決定する。浸潤前の飽和度により圧縮成形体への水の浸潤量が異なるが、これによって、発生する膨潤圧力に違いがあるかを確認する。
2. 方法 試料作製時のベントナイト粉末の含水比を調整し、任意の飽和度の圧縮成形体を作製する。乾燥密度 1.8 g/cm^3 での含水比と飽和度の関係を下表に、試験条件を以下に示す。

ベントナイト粉末 含水比(%)	試料初期飽和度 (%)
0.00	0
9.26	50
13.89	75

試料 : クニゲルV 1
 乾燥密度 : 1.8 g/cm^3
 試験溶液 : 蒸留水
 試料寸法 : $\phi 50 \times$ 高さ 20 mm (万能試験機)
 試験温度 : 室温

3. 結果 各初期飽和度の試料の平衡膨潤圧力は表 3.4.6のようになった。この結果から試料作製時の圧縮成形体の飽和度が小さいほうが大きい膨潤圧力を発生する。

表 3.4.6 初期飽和度と平衡膨潤圧力

試料初期飽和度(%)	平衡膨潤圧力(MPa)
0	5.08
50	3.72
75	3.24

3.5 透水試験

3.5.1 試験方法・装置

緩衝材中の物質移動挙動を明らかにするために飽和した圧縮ベントナイト中の水の移動速度を測定する。一般に土壌中の水の動きはDarcyの法則に従うといわれており下記に示す式で表せる。水の移動のしやすさ、すなわち透水性の大小は式中の透水係数の値で評価される。本試験はこの透水係数を求め、緩衝材の止水性の指標とするものである。

$$v = K \cdot i$$

v : 流速

K : 透水係数

i : 動水勾配

ここで、動水勾配は水柱に換算した圧力差と試料の厚さの比であり、この動水勾配と見かけの流速を関係付ける比例定数を透水係数という。

透水試験装置の概念図を図3.5.1に示す。装置は、試験セル内の試料にコンプレッサーで圧搾された空気を用い加圧した水を供給する系と、透過した水を計測する系で構成される。試験セル内の圧縮ベントナイトの形状は直径50mm×厚さ5~50mmである。この試料の両端にはテフロンフィルター（孔径 $2\mu\text{m}$ ）および金属焼結フィルター（孔径 $2\mu\text{m}$ ）が置かれる。水は上部フィルターで分散されて試料中を透過し、下部フィルターへと抜け、天秤により透過液量が測定される。

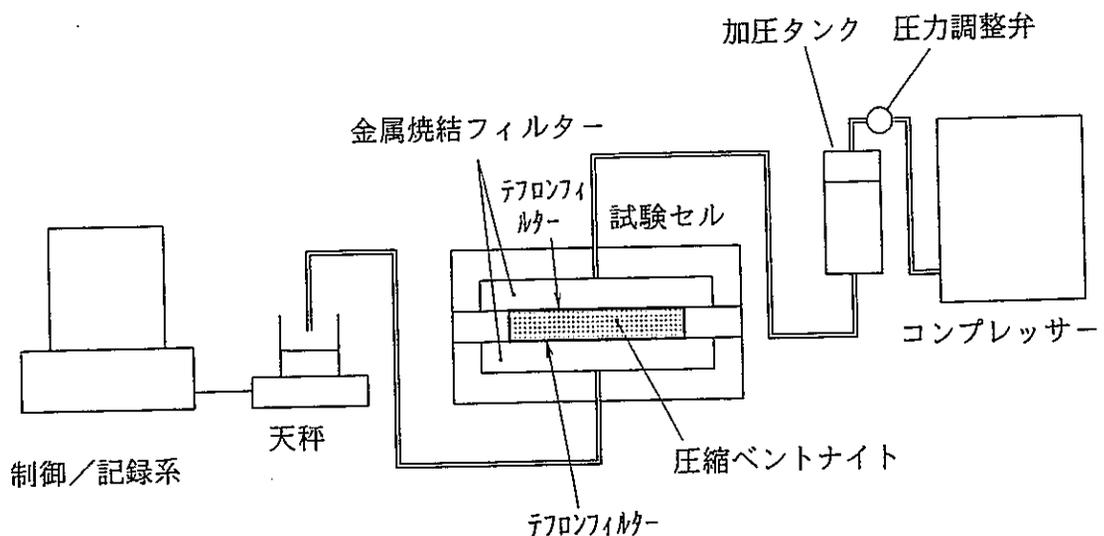


図 3.5.1 透水試験装置

3.5.2 動水勾配の影響

1. 目的 飽和した緩衝材中の水の流れをDarcyの法則に従えば、動水勾配と透水量は比例関係にある。動水勾配は、試料にかかる水圧（以下、「透水圧力」という）を水柱に換算した圧力差と試料厚さの比である。そこで、透水圧力および試料厚さをパラメータとした試験を実施し透水係数への影響を把握する。
2. 条件 透水圧力をパラメータとした試験条件を表 3.5.1に、試料厚さをパラメータとした試験条件を表 3.5.2に示す。試験に用いたベントナイトはクニゲルV1であり、透水圧力パラメータ試験では、これにケイ砂（5号：3号=1：1）を混合した場合の試験も行った。試験溶液には蒸留水を用い、室温にて実施した。

表 3.5.1 透水圧力パラメータ試験

乾燥密度(g/cm ³)	ケイ砂混合率(%)	透水圧力(Kgf/cm ²)	試料厚さ(mm)
1.2	0	3, 5, 8	10
	50	3, 5, 8	10
1.4	0	3, 5, 8	10
	50	3, 5, 8	10

表 3.5.2 試料厚さパラメータ試験（試験繰返し数 2）

乾燥密度(g/cm ³)	試料厚さ(mm)	透水圧力(Kgf/cm ²)
1.2	10	8
1.2	20	8

3. 結果 透水量は2時間毎に測定した。測定結果の例を1時間当たりの透水量で示すと図 3.5.2のようになる。測定開始から約 150時間まではそれ以後の透水量に比べ少ない。これは試料が完全に飽和した定常状態に致っていないためと考える。圧縮ベントナイトの透水係数を評価する場合、試料飽和後に安定した透水量が得られる範囲で求めるべきである。よって、透水係数の算出には図 3.5.2中に示す範囲Aのように、比較的透水量の安定している範囲を用いることとする。

(1) 透水圧力

透水圧力をパラメータとし、試料に 600時間水圧を加え、透水量が安定している範囲で透水係数を算出した。透水係数の算出には以下に示す式を用いた。試験結果を表 3.5.3、図 3.5.3に示す。

$$K = \frac{Q}{P/t \times A}$$

K : 透水係数(m/s)
 Q : 時間当たりの透水量(m³/s)
 P : 透水圧力(m H₂O)
 t : 試料厚さ(m)
 A : 試料断面積(m²)

表 3.5.3 透水圧力と透水係数(×10⁻¹² m/s)

乾燥密度 (g/cm ³)	ケイ砂 混合率 (%)	透水圧力 (kgf/cm ²)		
		3	5	8
1.2	0	1.17	0.92	0.75
1.2	50	2.33	2.79	2.30
1.4	0	*	0.55	0.51
1.4	50	1.35	1.75	1.42

(注) * 透過液が得られなかった

この結果から、透水圧力により若干の透水係数の差異が認められた。Puschによる同様の試験¹⁰⁾では、透水圧力が小さいときには粒子間の水が動き、透水圧力が大きくなるとそれに加えて層間に吸着されている水までも移動するため、透水圧力が大きくなると透水係数も増加すると説明されている。その時の動水勾配は1,000 ~ 10,000の範囲であり透水係数は $1.5 \times 10^{-13} \sim 2.3 \times 10^{-13}$ (m/s)であった。

本試験の乾燥密度 1.2g/cm³の結果では動水勾配 3,000 ~ 8,000に対し透水係数は $0.8 \times 10^{-13} \sim 1.2 \times 10^{-13}$ (m/s)の結果が得られているが、3.5.3項の結果からみとめられる試験繰り返し精度等を考慮すると透水圧力を変えることによって動水勾配を変化させても透水係数へ及ぼす影響は小さいと考える。

以降の試験では、試料の乾燥密度を大きくした場合、透過液を得ることができないことも予想され、また透過液の蒸発による誤差を考慮すると、短時間でより

多くの透過液を得たい。このため装置の許容範囲で最高の透水圧力 8 kgf/cm² を用いて透水試験を行っていくこととする。

(2) 試料厚さ

試料厚さをパラメータとし、試料に700 時間水圧を加え、透水量が安定している範囲で透水係数を算出した。試験結果を表 3.5.4に示す。これより、試料厚さによって動水勾配を変化させても透水係数への影響は見られなかった。

表 3.5.4 試料厚さと透水係数

乾燥密度(g/cm ³)	試料厚さ(mm)	透水係数(×10 ⁻¹² m/s)	
1.2	10	1.13	1.35
1.2	20	1.21	1.02

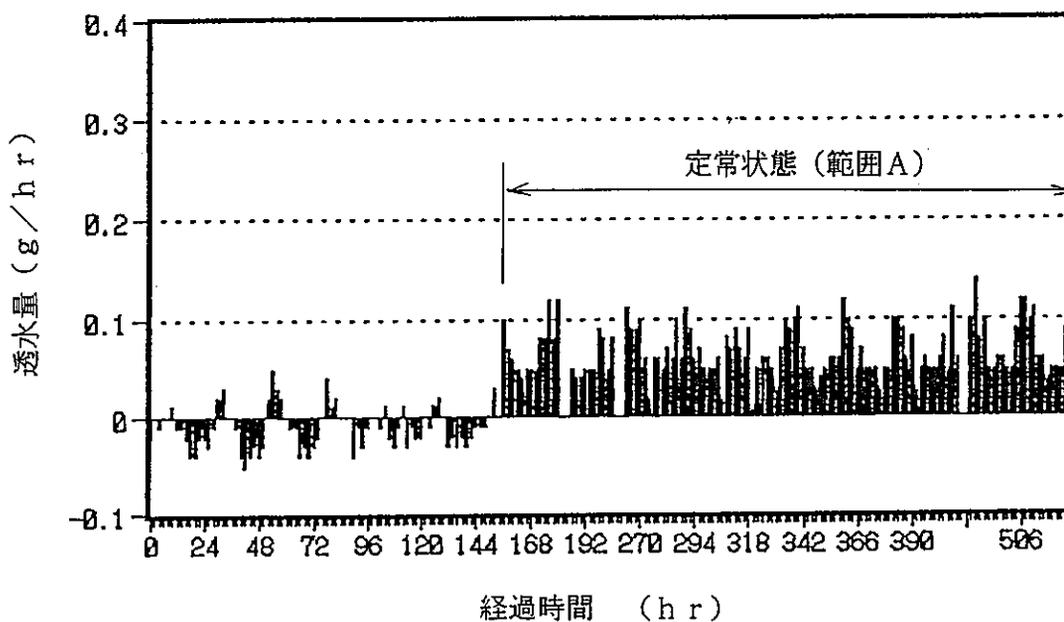


図 3.5.2 透水量の経時変化

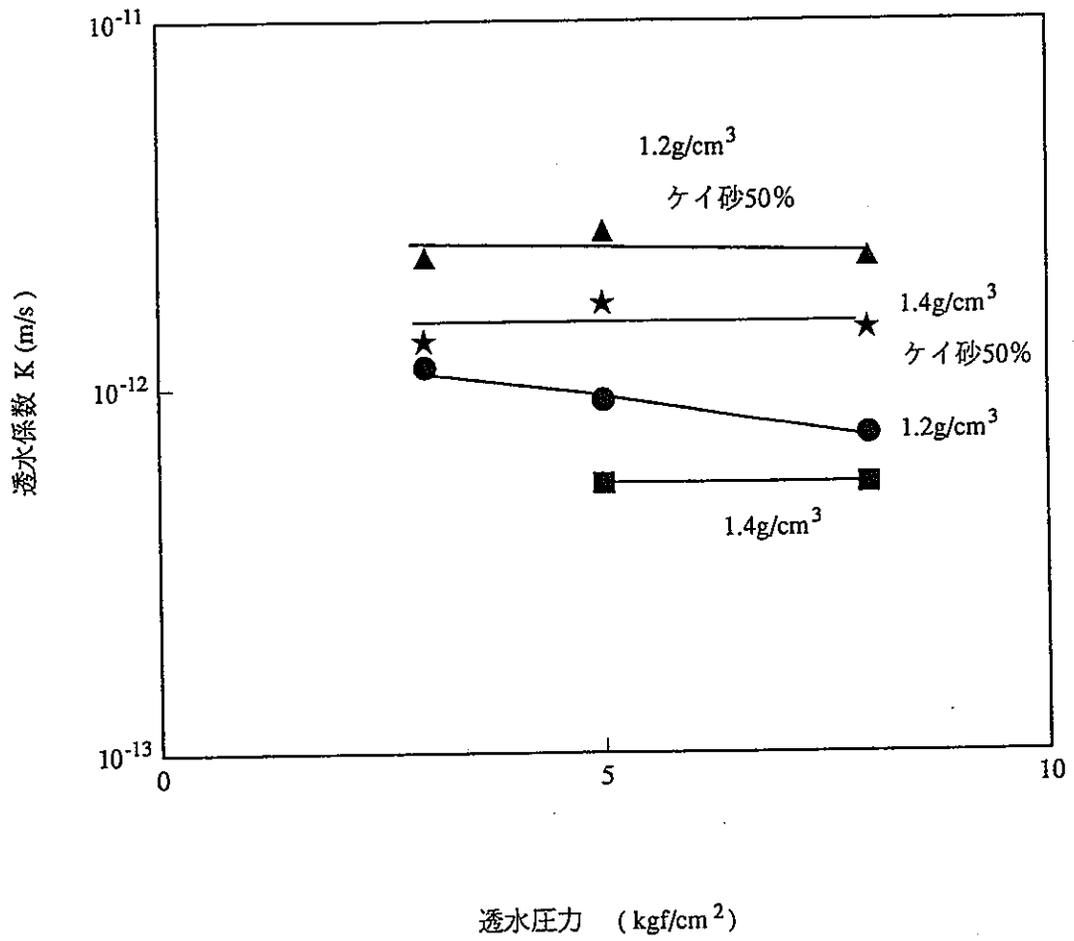


図3.5.3 透水圧力と透水係数

3.5.3 乾燥密度と透水係数

1. 目的 圧縮ベントナイトの乾燥密度をパラメータとし透水試験を行い、乾燥密度と透水係数の関係を把握する。

2. 方法 クニゲルV 1の圧縮成形体の乾燥密度をパラメータとし透水試験を行う。

動水勾配は、3.5.2項で述べたように、なるべく多くの透過液を得るため透水圧力 8kgf/cm²、試料厚さは低密度の1.2 ~1.4 g/cm³ では10mm、高密度の1.6 ~2.0 g/cm³ では5mmにより行った。試験条件を以下に示す。

試料 : クニゲルV 1
 乾燥密度 : 1.2 ~2.0g/cm³
 初期含水比 : 10%
 試験溶液 : 蒸留水
 試験温度 : 室温

3. 結果 乾燥密度と透水係数の関係を表 3.5.5、図 3.5.4に示す。本試験から以下のことが明らかになった。

クニゲルV 1 圧縮成形体の透水係数は乾燥密度の増加にともなって減少する。この関係を直線で近似すると、乾燥密度1.2 ~2.0 g/cm³ の範囲で、

$$K=7.99 \times 10^{-11} \times \exp(-3.55 \rho_d)$$

と表せる。ここで、Kは透水係数(m/s)、 ρ_d は乾燥密度(g/cm³)である。

図中には、Pusch によるNa-ベントナイトの報告値¹⁰⁾を合わせて示す。クニゲルV 1はこの報告の値とほぼ同等の透水係数を持つ。

表 3.5.5 乾燥密度と透水係数の関係

乾燥密度 (g/cm ³)	透水係数 (m/s)							
1.2	1.1E-12	1.3E-12	1.2E-12	1.2E-12	7.5E-12			(平均1.1E-12)
1.4	4.6E-13	4.1E-13	4.3E-13	3.8E-13	5.5E-13	5.1E-13	6.0E-13	(平均4.8E-13)
1.6	3.7E-13	3.7E-13	5.5E-13	5.3E-13				(平均4.6E-13)
1.8	1.3E-13	9.5E-14	1.7E-13					(平均1.3E-13)
2.0	5.2E-14	5.0E-14	5.7E-14					(平均5.3E-14)

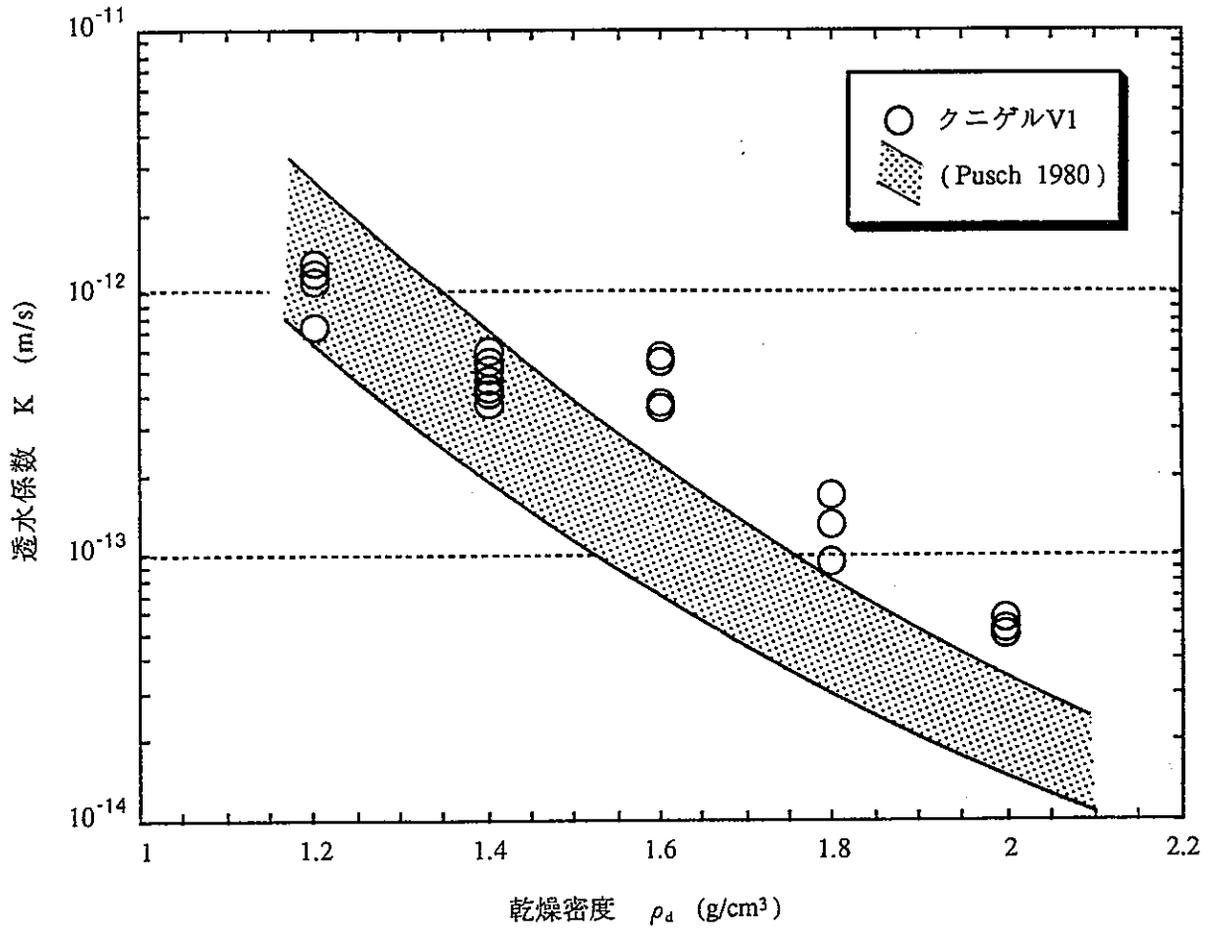


図3.5.4 乾燥密度と透水係数

3.5.4 ケイ砂混合による止水性への影響

1. 目的 熱伝導率の向上等を目的としてベントナイトにケイ砂を混合することも考えられており、ケイ砂を混合した場合の止水性への影響を把握する必要がある。

ここでは、試料の乾燥密度およびケイ砂混合率をパラメータとし、透水係数への影響を調べた。

2. 方法

試料 : クニゲルV 1、ケイ砂 (5号)
 乾燥密度 : 1.2、1.4(g/cm³)
 ケイ砂混合率 : 0 ~ 60(%)
 透水圧力 : 8(kgf/cm²)
 試験溶液 : 蒸留水
 試験温度 : 室温

3. 結果 試験結果を表 3.5.6に示す。各乾燥密度ともにケイ砂混合量の増加にともない透水係数も大きくなる(図 3.5.5参照)。クニゲルV 1にケイ砂を30(%)混合することにより、緩衝材の透水係数はクニゲルV 1単体の約2倍となり止水性能の低下が認められる。

表 3.5.6 ケイ砂混合による透水係数

乾燥密度 (g/cm ³)	ケイ砂 混合率(%)	透水係数 (m/s)		
1.2	0	1.1E-12 *		
	30	1.6E-12		
	50	1.8E-12	2.2E-12	
1.4	0	4.8E-13 *		
	30	1.1E-12	9.9E-13	9.0E-13
	50	1.4E-12	1.7E-12	
	60	2.1E-12	3.2E-12	

(注) * は表 3.5.5 「乾燥密度と透水係数の関係」より平均値を用いた。

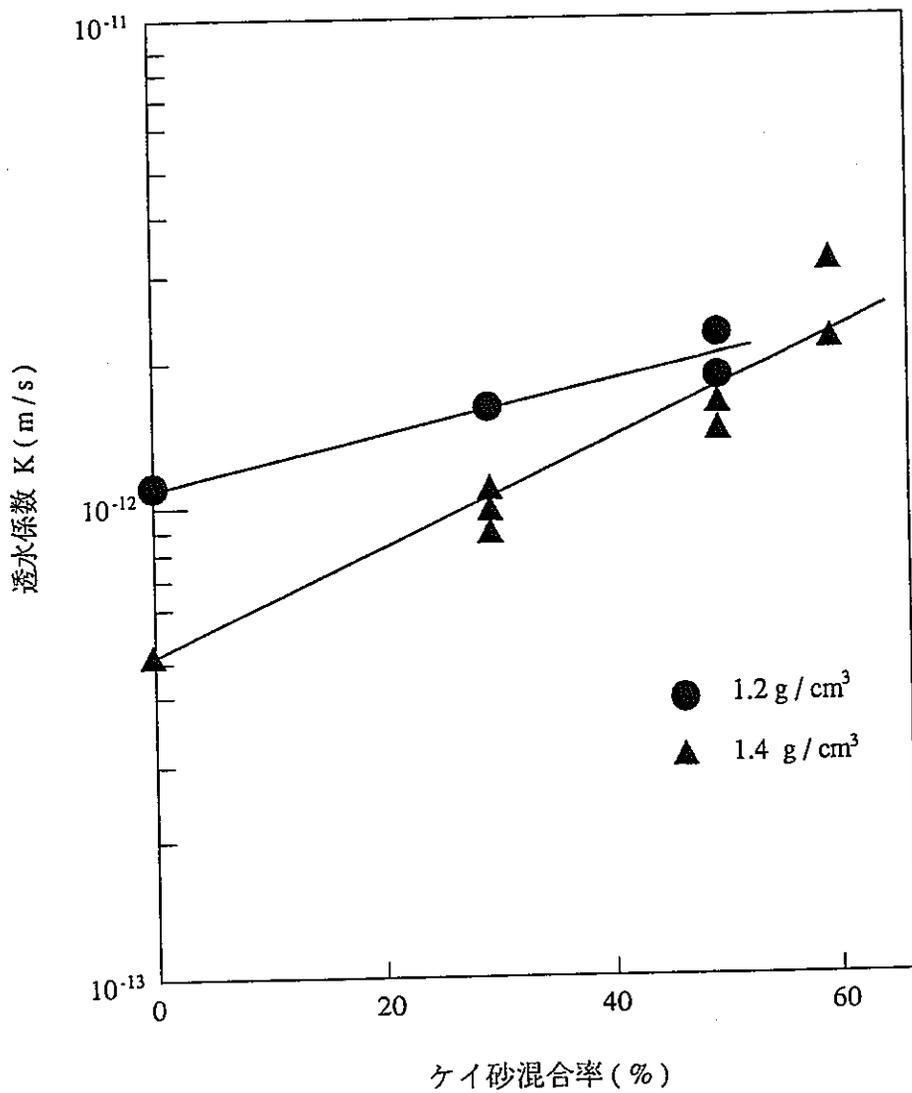


図3.5.5 ケイ砂混合率と透水性係数

3.5.5 止水性に対する透過液中の NaCl 濃度の影響

1. 目的 圧縮ベントナイトの止水性に対する透過液中のNaCl濃度の影響を把握する。
2. 方法 透過液中の NaCl 濃度をパラメータとし、透水係数を求める。試験条件を以下に示す。

試料 : クニゲルV 1
 乾燥密度 : 1.6 , 1.8 g/cm³
 NaCl 濃度 : 0 ~30,000 ppm
 透水圧力 : 8 kgf/cm²
 試験温度 : 室温
 試料寸法 : φ50mm×厚さ5mm

3. 結果 透過液中の NaCl 濃度をパラメータとした各乾燥密度における透水係数を表3.5.7 に示す。NaCl 濃度と透水係数の関係を図 3.5.6に示す。各乾燥密度ともに、透過液中の NaCl 濃度が10,000(ppm) 以上になると透水係数が大きくなる傾向がみられる。

表 3.5.7 NaCl 濃度と透水係数

透過液 NaCl 濃度(ppm)	乾燥密度(g/cm ³)	
	1.6	1.8
0	4.6E-13*	1.3E-13*
300		1.4E-13
1000	2.4E-13	1.5E-13
3000		1.8E-13
10000	6.1E-13	2.6E-13
30000	3.1E-12	5.0E-13

(注) *表 3.5.5 「乾燥密度と透水係数の関係」より平均値を用いた。

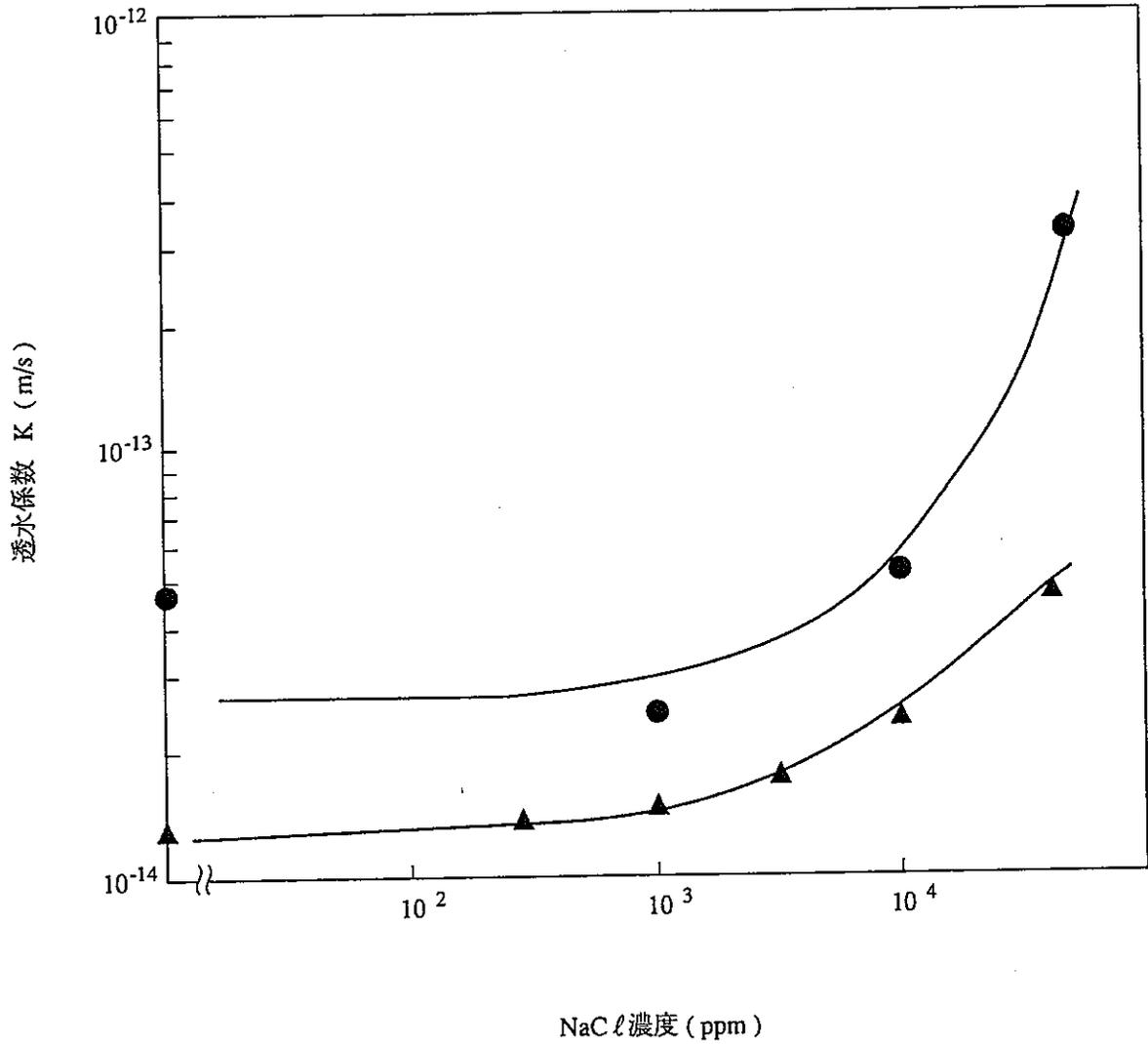


図3.5.6 透過液中NaCl濃度と透水係数

3. 6 緩衝材の製作性と

製作後の機械的健全性の検討

概要

緩衝材を圧縮成形する際の製作性と、製作後の機械的健全性について検討を行う。緩衝材の有力な主原料はベントナイトであるが、例えばカナダのA E C Lのようにこれにケイ砂を混合する仕様も考えられている。ベントナイトにケイ砂を混合する主な理由は次のようである¹⁾。

①製作性の向上

微粉のベントナイト(クニゲルV 1は -250mesh>95%)にケイ砂(粒径0.1mm ~ 2mm)を混合することで、同一の締固め圧力において、より高い密度の緩衝材の製作が可能となる。

②熱伝導率の向上

ケイ砂の主成分である石英(α -石英)の熱伝導率は5.4(軸に垂直)~9.3 W/m²C(軸に平行)¹⁾とベントナイトに比べ大きな値であり、これをベントナイトに混合することで熱伝導率の向上をはかる。

③経済性の向上

1トンの価格はクニゲルV 1で41800円¹⁾、ケイ砂で22000¹⁾円であり、ケイ砂の混合により緩衝材の材料費は低減する。

本試験では、製作性等に多くの影響をおよぼすケイ砂の混合に着目し、図 3.6.1に示す順序で試験を実施した。初めに、各ケイ砂混合率で最も締固まる条件を明らかにするための締固め試験*を行う。さらに、各ケイ砂混合率で最大乾燥密度が得られた試料に対し、各特性試験を実施し緩衝材としての適正およびケイ砂混合の妥当性を検討する。

(注)*締固め試験

土をある一定の方法で締固め、含水比と乾燥密度の関係を知り、これより締固め曲線、最適含水比および最大乾燥密度を求めるものである。締固め曲線は一般に凸な曲線となるが、この極大値を最大乾燥密度、それに対応する含水比を最適含水比という。

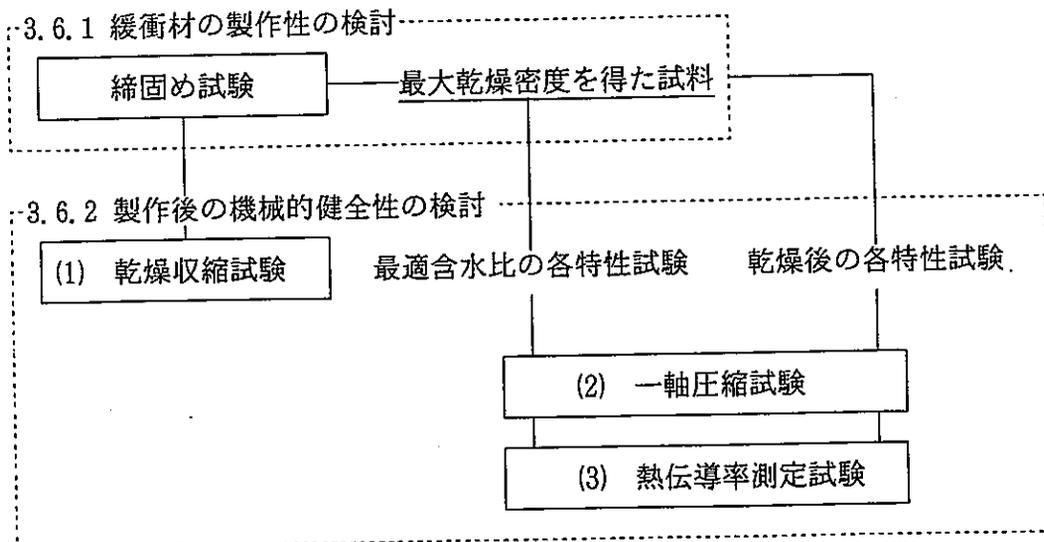


図3.6.1 締固め試験と製作後の特性試験フロー図

3.6.1 緩衝材の製作性の検討（締固め試験）

1. 目的 ベントナイトにケイ砂を混合することにより向上する緩衝材の製作性について調査し、ケイ砂混合の妥当性を検討する。
2. 方法 任意のケイ砂混合率、および含水比に調整した総重量200gの試料を直径50mmの圧縮金型内で所定の圧縮圧力で成形する（試験装置概要図3.6.2参照、島津オートグラフ10TBを使用）。成形後の試料体積から乾燥密度を求め締固め曲線を得る。締固め試験の試験条件は次の通りである。

締固め圧力 P(MPa)	20, 50, (100)	締固め圧力20MPaは200tonプレス機で1000cm ² の断面積を持つ緩衝材を製作する場合を想定。
ケイ砂混合率 Rs(%)	0, 15, 30, 50, 70	重量割合。
含水比 w(%)	0~20	最適含水比の近傍を中心。

締固め圧力 100(MPa) はベントナイト単体 (R_s = 0%) でのみ締固め試験を実施した。

- 材料 ①ベントナイト クニゲルV 1
 ②ケイ砂 5号（細粒）と3号（粗粒）を
 1 : 1で混合する。
 （粒径 0.1~2mm）

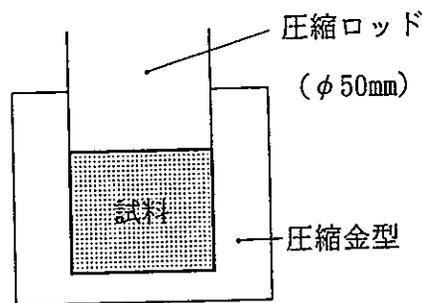


図 3.6.2 試験装置概要

3. 結果 各締固め圧力においてケイ砂配合率をパラメータとした締固め試験結果を図 3.6.3、図 3.6.4に示す。この図より求められる最大乾燥密度、最適含水比を表 3.6.1に示す。ここには、試料中のベントナイトだけの乾燥密度（有効粘土密度*）も合わせて示す。さらにケイ砂混合率と最大乾燥密度、ケイ砂混合率と有効粘土密度の関係をまとめると図 3.6.5、図 3.6.6のようになる。

また、ベントナイト単体において締固め圧力をパラメータとした試験結果を図 3.6.7、表 3.6.2に示す。締固め試験の結果をまとめると、

$$\text{(注) * 有効粘土密度} = \frac{\text{(乾燥ベントナイトの重量)}}{\text{(試料体積)} - \text{(試料中のケイ砂体積)}}$$

- ①締固め圧力を大きくすると最大乾燥密度は増大し、最適含水比は減少する。
しかし、締固め圧力を20(MPa) から50(MPa)と大きくしても、締固め後の試料の密度に著しい増加はみられず、密度差は0.1(g/cm³)程度であった(表 3.6.1, 図 3.6.5参照)。
- ②ケイ砂混合率を増やすと最大乾燥密度は増大し、最適含水比は減少する(表3.6.1, 図 3.6.5参照)。
- ③ケイ砂混合率の増大により緩衝材中の有効粘土密度は著しく減少する(図 3.6.6参照)。
- ④20(MPa)の締固めで高密度の圧縮ベントナイトの製作が可能であり、ケイ砂を混合しなくても乾燥密度1.8(g/cm³)以上の圧縮ベントナイトが製作できる(図 3.6.7参照)。

表 3.6.1 各ケイ砂混合率における最大乾燥密度と最適含水比

ケイ砂混合率 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)	乾燥粘土密度 (g/cm ³)
0	1.86 / 1.95	15.3 / 13.0	1.86 / 1.95
15	1.93 / 1.99	13.1 / 11.5	1.64 / 1.69
30	2.00 / 2.06	10.4 / 9.0	1.40 / 1.44
50	2.10 / 2.13	9.0 / 7.5	1.05 / 1.07
70	2.14 / 2.18	7.2 / 7.1	0.64 / 0.65

20(MPa)/50(MPa)

表 3.6.2 各締固め圧力における最大乾燥密度と最適含水比

締固め圧力 (MPa)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
20	1.86	15.3
50	1.95	13.0
100	2.03	10.5

次項においては、製作後の機械的健全性を評価するために、これら、締固め試験で得られた試料を用いて、乾燥収縮、一軸圧縮強さ、熱伝導率を測定することとする。

なお、ケイ砂混合率をパラメータとする一連の試験では、各ケイ砂混合率で最大乾燥密度を得た試料を用いて行った。

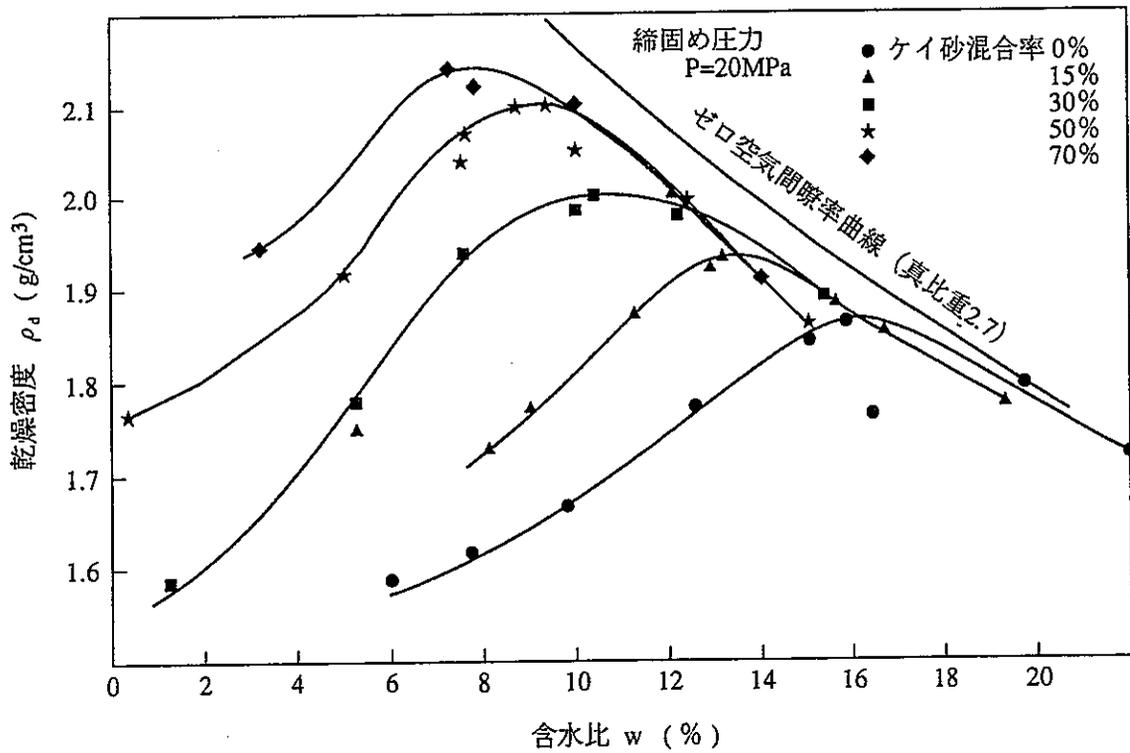


図3.6.3 締固め試験結果 (P=20MPa)

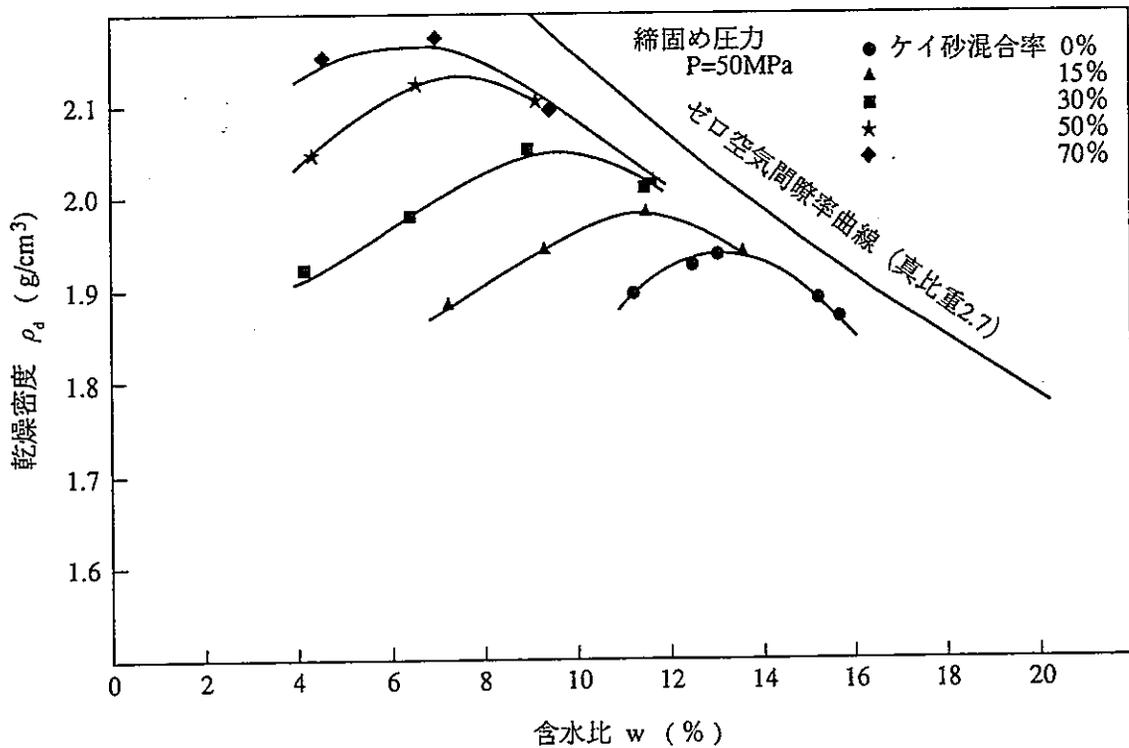


図3.6.4 締固め試験結果 (P=50MPa)

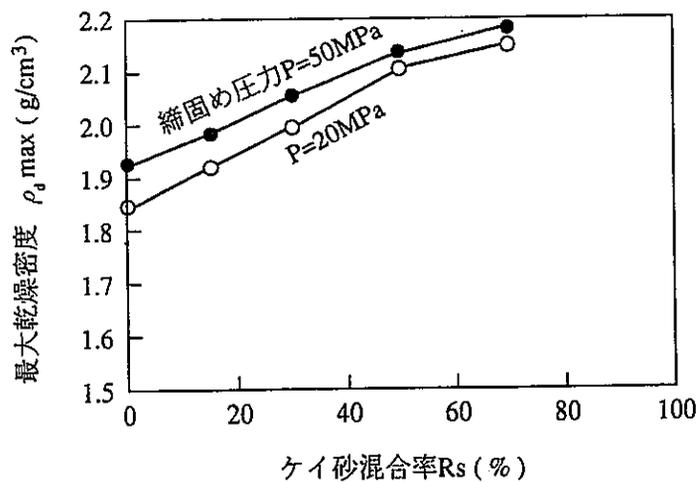


図3.6.5 ケイ砂混合率と最大乾燥密度との関係

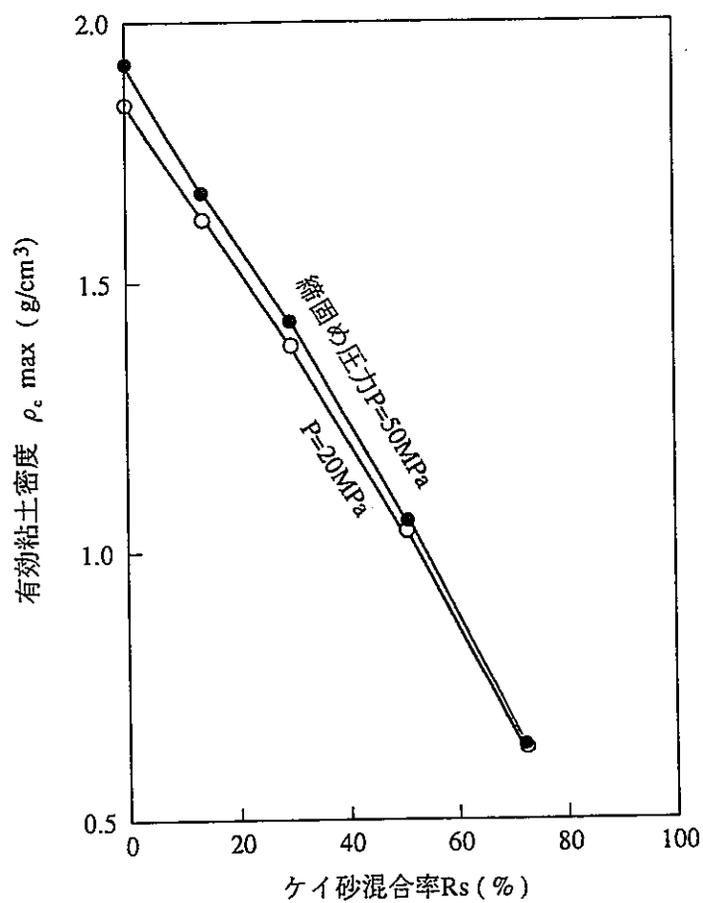


図3.6.6 ケイ砂混合率と有効粘土密度との関係

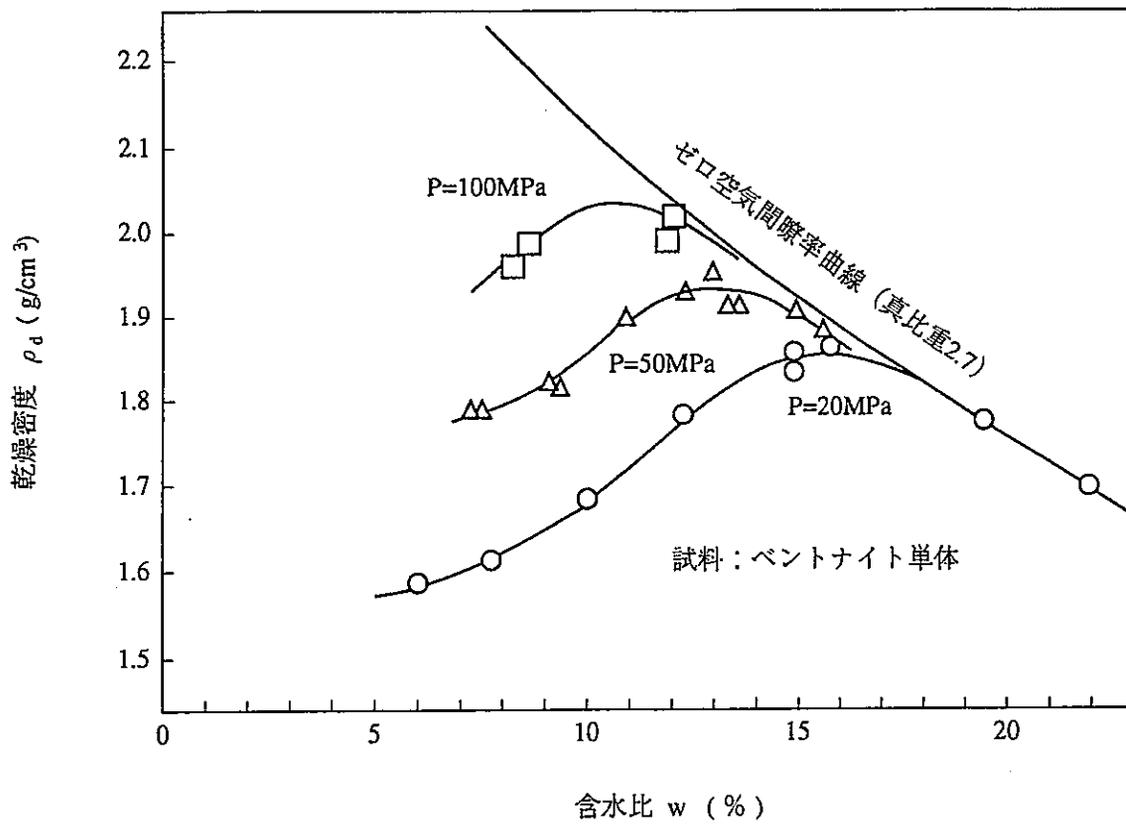


図3.6.7 ベントナイト単体による締固め曲線

3.6.2 製作後の機械的健全性の検討

(1)乾燥収縮試験

1. 目的 緩衝材はガラス固化体の発熱により乾燥すると考えられる。締固め試験で得られた試料を炉乾燥させ、ひび割れの発生状況や乾燥収縮率の測定* を行い、緩衝材としての適正を検討する。
2. 条件 試料 : 締固め試験で得られた試料
乾燥 : 炉乾燥(110℃)で恒量になるまで
3. 結果 各試料の乾燥後の体積収縮率を図 3.6.8、図 3.6.9に示す。また、各ケイ砂混合率で最大乾燥密度を得た試料の体積収縮率を図3.6.10に示す。乾燥収縮試験の結果をまとめると、
 - ①ケイ砂混合率が多いほど、また含水比が小さいほど体積収縮率は小さい(図3.6.8、図 3.6.9参照)。
 - ②体積収縮率は、含水比15 (%)以上の試料を除けば5 (%)以下の値となる(図3.6.8、図 3.6.9参照)。
 - ③最大乾燥密度を得た試料について乾燥収縮によるひび割れを観察した結果、ケイ砂混合率70(%)以外の試料でひび割れが観察された。しかし、これらは微小なひびであり、水の浸潤にともなう膨潤による自己シール性を考えると水理的特性を大きく損なうものではないと考えられる。

(注) * 乾燥収縮率VC(%) =
$$\frac{(\text{乾燥前の試料体積}) - (\text{乾燥後の試料体積})}{(\text{乾燥前の試料体積})} \times 100$$

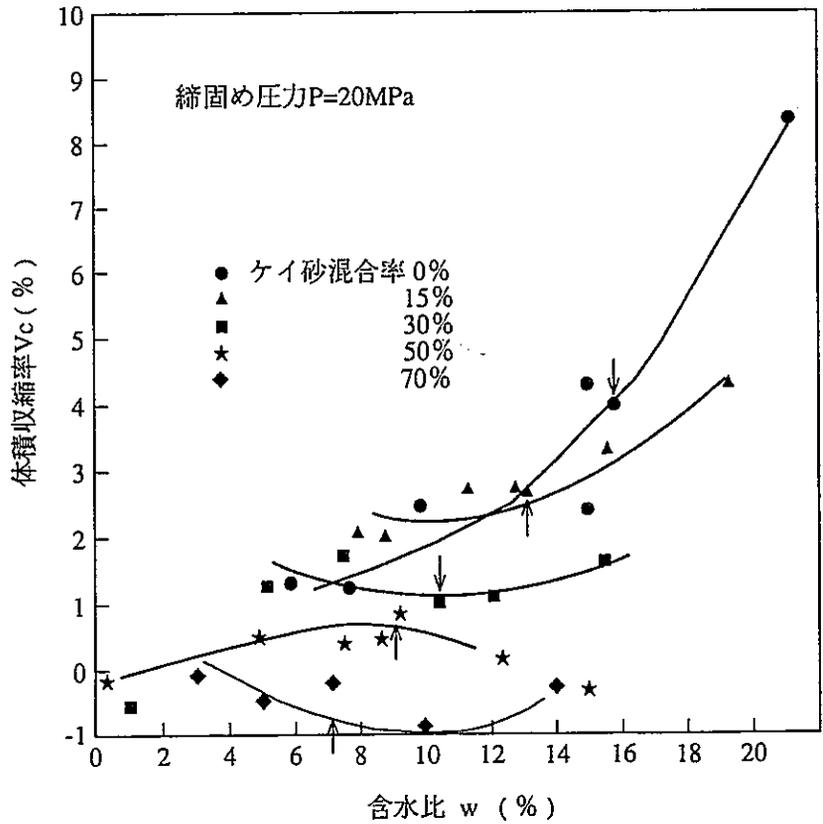


図3.6.8 縮固め試料の体積収縮率 (縮固め圧力P=20MPa)
 (図中の矢印は各ケイ砂混合率で最大乾燥密度を得た試料)

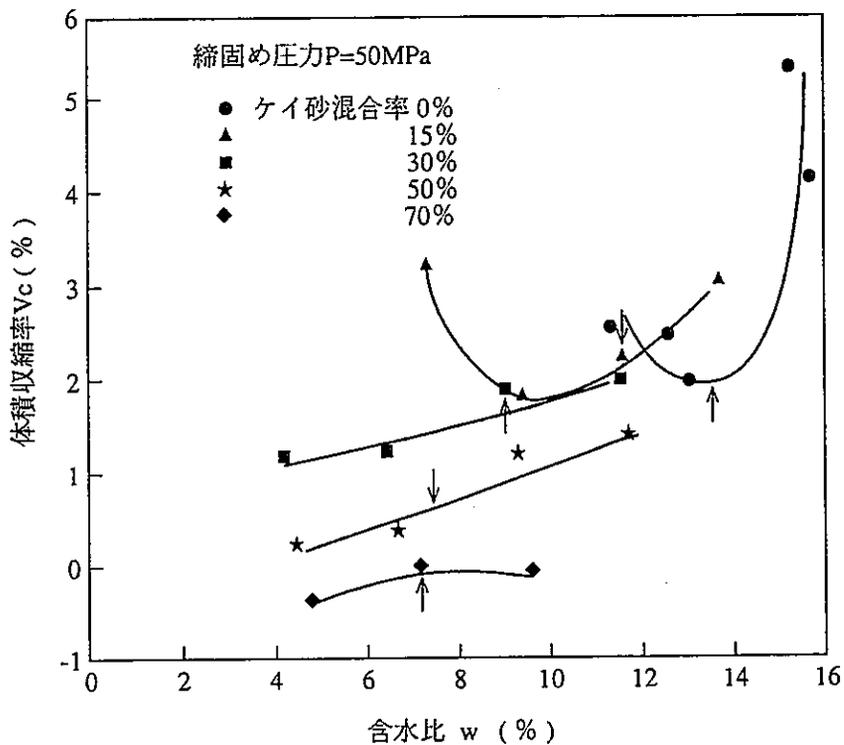


図3.6.9 縮固め試料の体積収縮率 (縮固め圧力P=50MPa)
 (図中の矢印は各ケイ砂混合率で最大乾燥密度を得た試料)

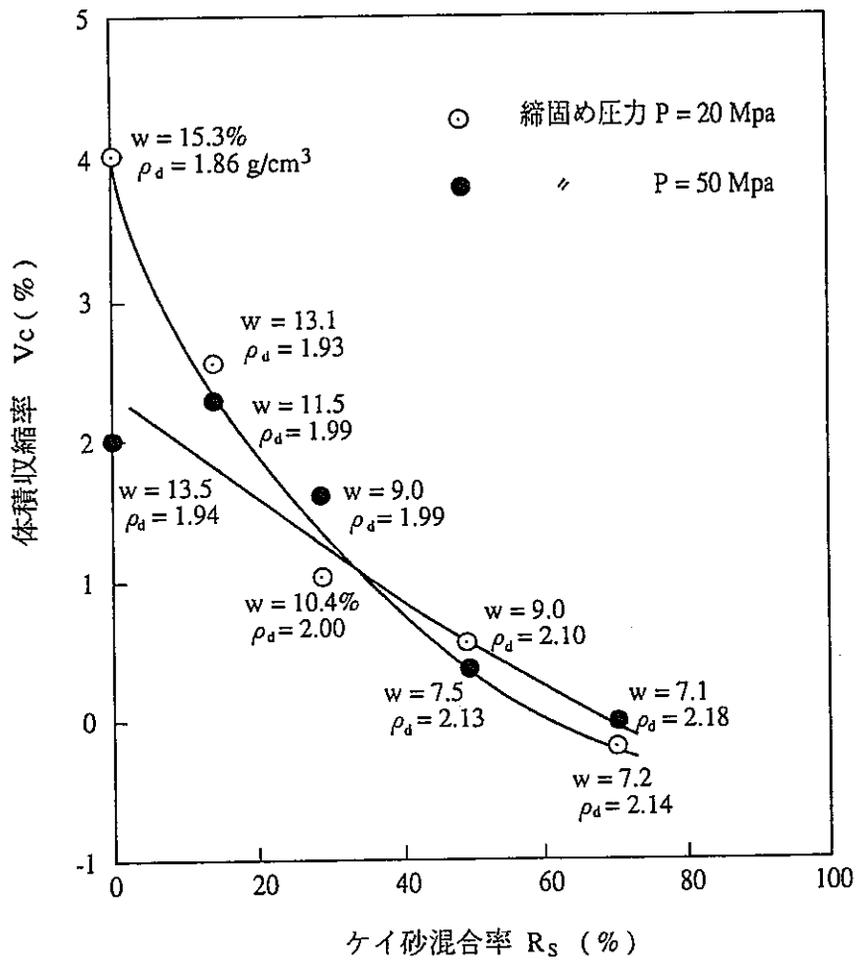


図3.6.10 各ケイ砂混合率で最も締固まった試料の体積収縮率

(2)一軸圧縮試験

1. 目的 締固め試験で最大乾燥密度を得た試料 (表 3. 6. 1参照) について、その一軸圧縮強さ、ヤング率を求める。また、これら試料を乾燥させた場合についても試験を実施する。

2. 条件 試験装置 : 島津オートグラフ10TB

試験繰り返し数 : 2

3. 結果 一軸圧縮試験の結果を表 3. 6. 3に示す。また、一軸圧縮強さ、ヤング率をケイ砂混合率との関係でまとめ、図3. 6. 11、図3. 6. 12に示す。さらに、最大乾燥密度を得た試料を乾燥させた場合の一軸圧縮強さの変化を図3. 6. 13に示す。

一軸圧縮試験の結果をまとめると、

①ケイ砂混合率が大きくなると、一軸圧縮強さ、ヤング率ともに減少する (図3. 6. 11、図3. 6. 12参照)。

②ケイ砂混合率が同じであれば、大きい締固め圧力で製作された試料の方が一軸圧縮強さ、ヤング率ともに大きい値を持つ。

③試料を乾燥させることにより、一軸圧縮強さ、ヤング率は増大する。また、その増大率はケイ砂量が多いほど大きい (図3. 6. 13参照)。

このことから、前項の試験で認められた乾燥によるひび割れは、機械強度上問題はないと考えられる。

表 3. 6. 3 最大乾燥密度を得た試料の一軸圧縮試験結果

締固め 圧力 (MPa)	ケイ砂 混合率 (%)	乾燥前		乾燥後	
		一軸圧縮強さ (MPa)	ヤング率 $\times 10^2$ (MPa)	一軸圧縮強さ (MPa)	ヤング率 $\times 10^2$ (MPa)
20	0	3.53 3.58	2.62 2.56	19.87	9.01
	15	3.33 3.26	1.72 1.81	17.28	8.88
	30	3.05 3.17	2.50 2.83	14.97	8.10
	50	2.22 2.23	1.44 1.34	13.18	5.60
	70	1.07 1.00	0.60 0.55	13.08	4.42
50	0	6.50 6.29	4.31 4.34	28.38	10.70
	15	5.27 5.48	— 2.99	22.00	9.95
	30	5.57 5.72	3.93 3.79	20.38	8.59
	50	5.04 4.63	3.49 3.19	15.93	5.59
	70	1.61 1.61	0.68 0.77	8.75	3.89

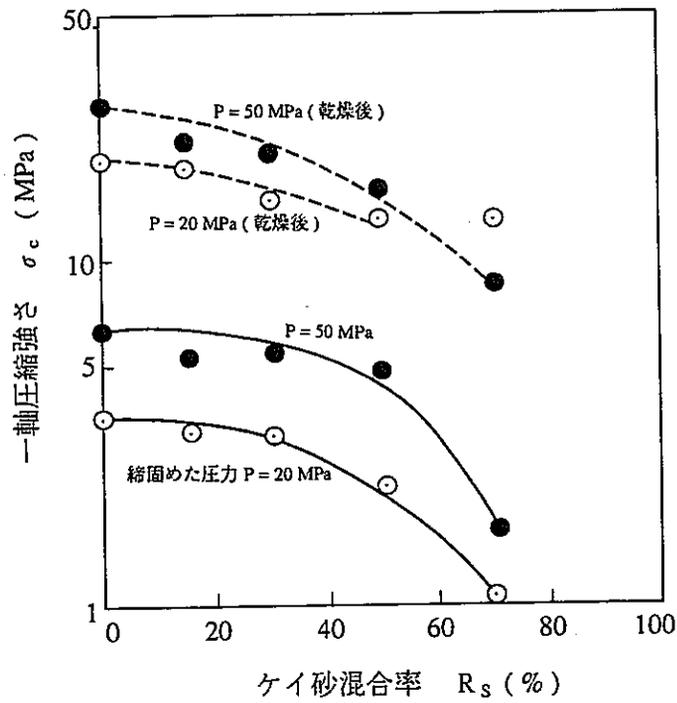


図3.6.11 各ケイ砂混合率で最も締固まった試料の一軸圧縮強さ

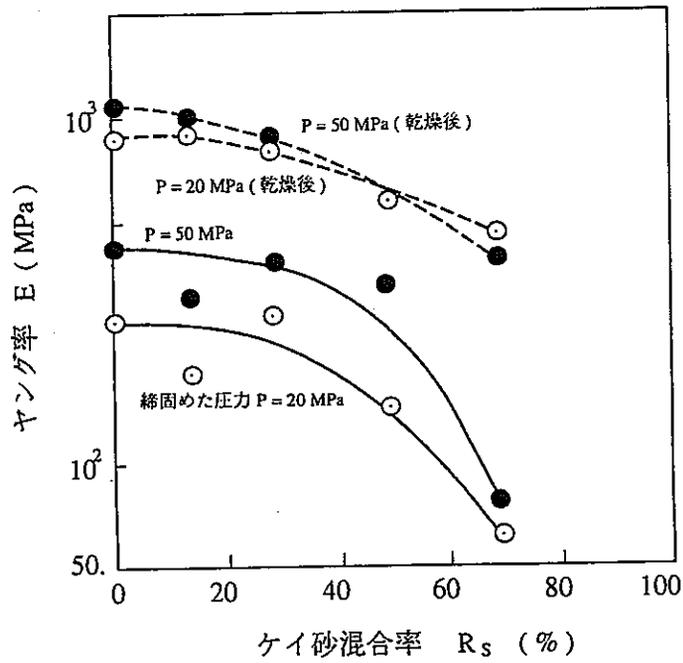


図3.6.12 各ケイ砂混合率で最も締固まった試料のヤング率

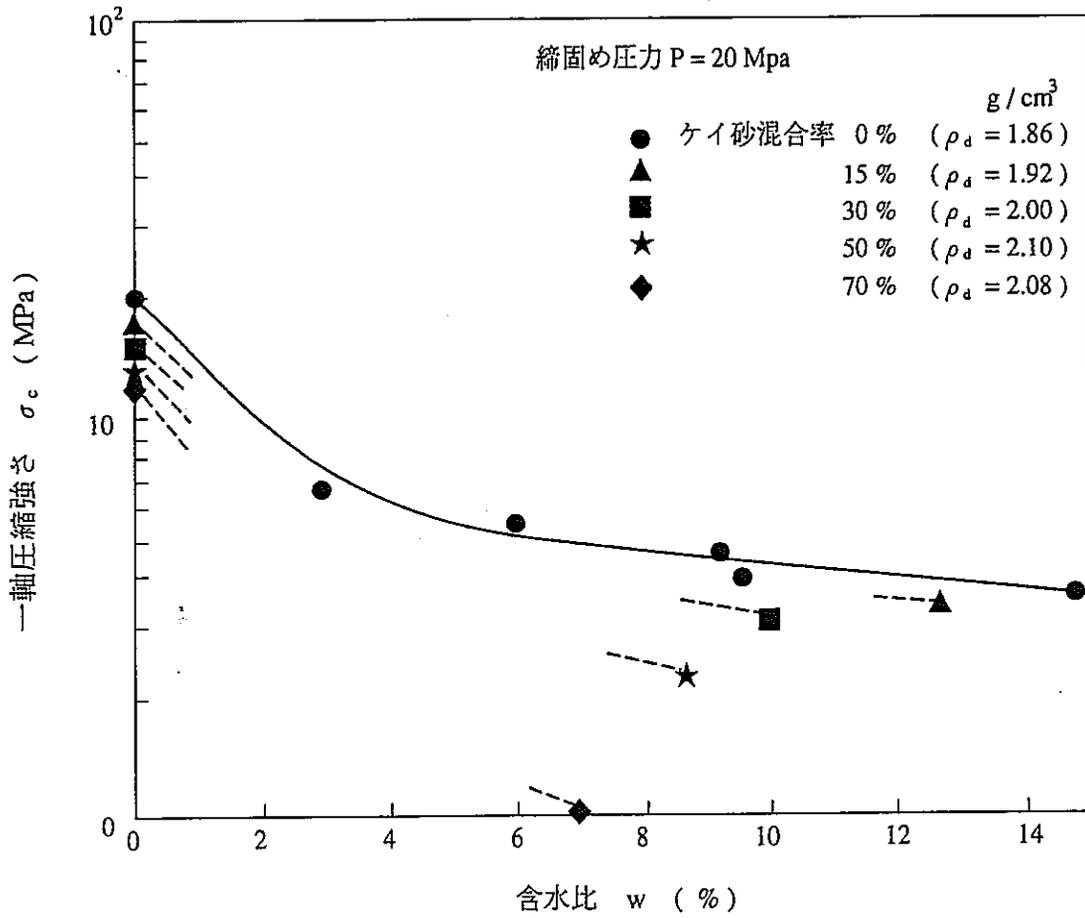


図3.6.13 乾燥による含水比の変化と一軸圧縮強さの関係

(3)熱伝導率測定試験

1. 目的 ベントナイトへのケイ砂混合の主目的の一つに熱伝導性の改良がある。

ここでは、各ケイ砂混合率で最大乾燥密度を得た試料の熱伝導率を測定し、緩衝材としての熱伝導性を検討する。

2. 結果 締固め圧力20(MPa) で最大乾燥密度を得た試料および、これを乾燥させたときの熱伝導率測定結果を表 3.6.4、図3.6.14に示す。

ケイ砂の混合により熱伝導率は増加する。これは、熱伝導率の高い物質の割合が増えると同時に、ケイ砂混合率の増大により締固め後の乾燥密度が大きくなるためである(表 3.6.1参照)。しかし、ケイ砂混合率50(%) 以上では、熱伝導率の増加は認められなかった。

表 3.6.4 最大乾燥密度を得た試料の熱伝導率

締固め圧力 (MPa)	ケイ砂 混合率(%)	熱伝導率(W/m°C)	
		乾燥前	乾燥後
20	0	1.633	1.042
	15	1.793	1.144
	30	2.063	1.265
	50	2.513	1.472
	70	2.479	1.427

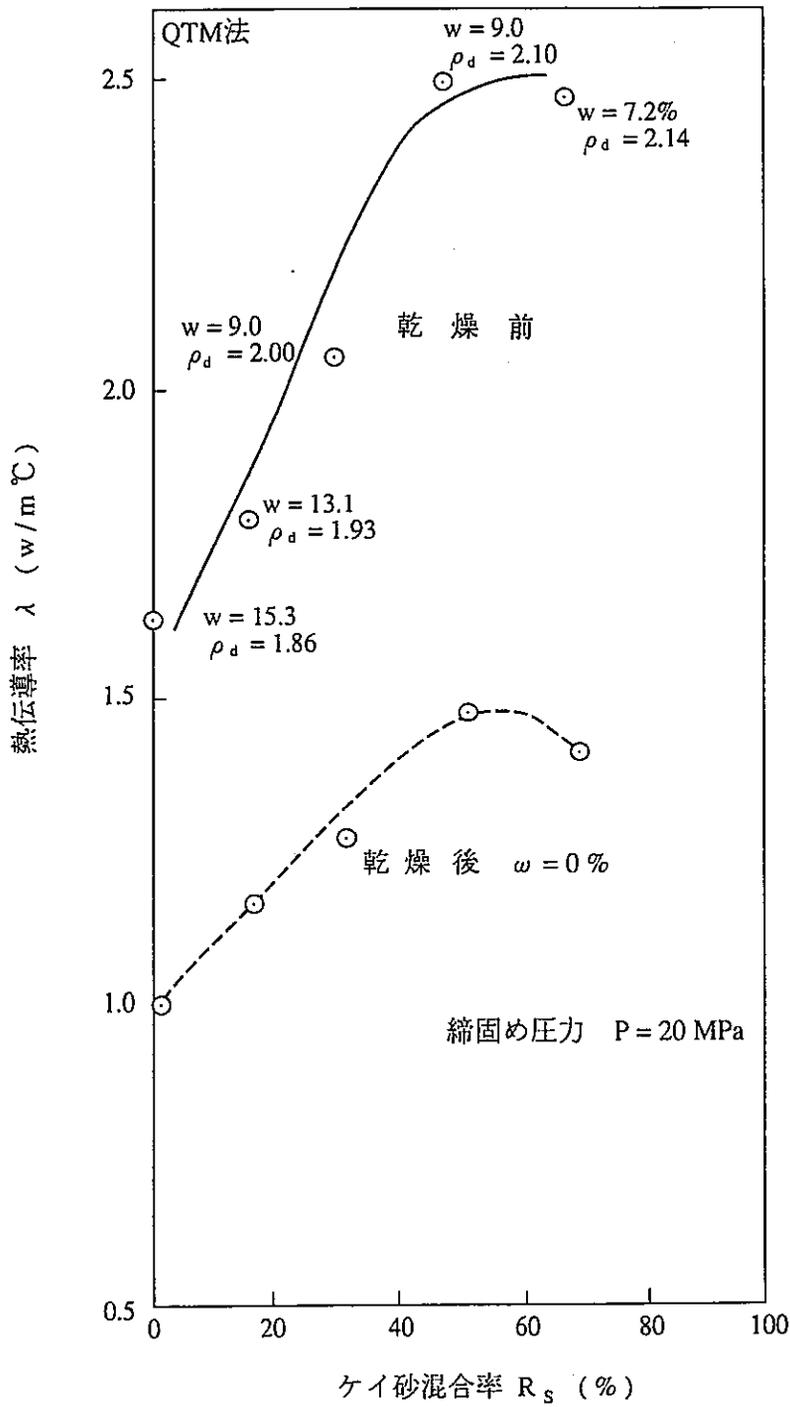


図3.6.14 各ケイ砂混合率で最も締固まった試料の熱伝導率

本章での一連の試験結果から、ベントナイトにケイ砂を混合することにより、

- ①同一の締固め圧力のとき、圧縮成形体の密度を上昇させることができる。
- ②熱伝導率を上昇させる。
- ③乾燥による収縮を低減できる。

といった性能の向上が認められた。

しかし、

- ①緩衝材中の有効粘土密度が低下する。
- ②一軸圧縮強さ、ヤング率が低下する。

ことが分かった。この中で有効粘土密度の低下は、緩衝材に要求される性能（自己シール性、止水性、核種吸着性）を低下させることから望ましくない傾向である。

また、熱伝導率については、3.3.2 項の結果からケイ砂を混合しなくても乾燥密度を大きくすることで増加させることが可能であることがわかる。

以上のことより、実際の緩衝材の製作においては、要求される熱伝導率、圧縮方法、施工方法等を考慮し、総合的に判断する必要がある。

4 ま と め

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおける緩衝材の研究開発の一環として、選定された標準的材料についての調査、およびこれを圧縮成形した圧縮ベントナイトが持つ特性値の測定を行い、実施した試験範囲内での各特性を定量的に明らかにした。

圧縮ベントナイトの各特性値は乾燥密度、含水比、ケイ砂混合率等の要因に大きく依存することがわかった。各要因が特性値に及ぼす影響をまとめると表 4. 1 のようになる。

(1)一軸圧縮強さ、ヤング率

緩衝材の機械的安定性の指標となる一軸圧縮強さ、ヤング率は乾燥密度、含水比、ケイ砂混合率に依存する。一軸圧縮強さ、およびヤング率は、乾燥密度、含水比とともに増加し、ケイ砂混合率の増加にともない減少する。

(2)熱伝導率

圧縮ベントナイトの熱伝導率は、乾燥密度、含水比、ケイ砂混合率に依存し、3 要因とも大きいほうが熱伝導率は増加する。

(3)膨潤性

圧縮ベントナイトの膨潤圧力は乾燥密度とともに増加する。また、含有するモンモリロナイト量に依存し、同じ乾燥密度でもモンモリロナイト含有量の多い試料の方が大きい膨潤圧力を持つ。

(4)透水係数

圧縮ベントナイトの透水係数は、乾燥密度の増加にともない減少し高い止水性を示す。また、MX-80 の透水係数と比較するとモンモリロナイト含有量の多い試料の方が高い止水性を示すと考えられる。また、ケイ砂の混合により止水性は低下することがわかった。

(5)締固め性

ケイ砂混合率を大きくすることにより、圧縮ベントナイトの製作性は向上する。しかし、試料中の有効粘土密度は著しく低下する。ベントナイト単体でも 20 (MPa) 程度の締固め圧力で高密度の圧縮ベントナイトの製作が可能であることがわかった。

以上の結果より、緩衝材に求められる性能と緩衝材の仕様に関して、以下のことが考察される。

緩衝材に要求される機械的安定性、自己シール性、止水性等はいずれも乾燥密度が大きいほど優れた性能を示すことが分かった。また、乾燥密度を大きくすることは緩衝材中のモンモリロナイト含有量を増加させ、核種の吸着性や、ベントナイトの流出抑制の観点からも望ましい。しかし、炭素鋼オーバーパックの腐食にともなって発生する水素ガスの透気性、腐食生成物の蓄積膨張にともなう体積変化の緩衝性等の観点からは必ずしも大きい乾燥密度が望ましいとはいえない。

一方、ベントナイトにケイ砂を混合することにより、緩衝材の熱伝導性を向上させることができる。しかし、緩衝材中の有効粘土密度の低下にともないモンモリロナイト含有量に依存する各特性（膨潤性、透水係数等）は劣ることが考えられる。

緩衝材の原料にはベントナイト単体が妥当と思われるが、処分孔中に生じる隙間等の影響により緩衝材により大きな熱伝導率が要求される場合には、ケイ砂混合の仕様もあると考えられる。

緩衝材の仕様は、上記に述べたようなことを考慮し総合的な判断のもとに決定されるべきである。

最後に、クニゲルV1の各乾燥密度について、一連の試験結果より得られた各特性値を表4.2にまとめる。なお、参考値としてMX-80の値を表中に比較して示す。両者を比較すると、クニゲルV1は膨潤圧力は小さく、透水係数が大きいことがわかる。膨潤圧力については、自己シール性等の指標であるが、求められる性能と膨潤圧力の定量的な関係が明らかとなっていないため、この値をもって緩衝材としての適性や優劣を議論することはできない。また緩衝材中の物質移動挙動の指標である透水係数については、その値から緩衝材中の物質の移行が拡散支配であると考えられ、評価上の得失はないものと考えられる。

本試験結果は、緩衝材の設計検討および性能評価を行うための入力データとするものである。

今後は、実際の処分環境で想定される条件下での緩衝材特性を評価する試験を実施して行く予定である。

表 4. 1 特性値に影響をおよぼす因子

要求性能	試験	特性値	因子			
			乾燥密度	含水比	ケイ砂混合率	温度
機械的 安定性	一軸圧縮試験	一軸圧縮強さ	○	●	×	
		ヤング率	○	●	×	
熱伝導性	熱伝導率測定試験	熱伝導率	○	○	○	△
シール性	膨潤圧力測定試験	膨潤圧力	○	×	×	
止水性	透水試験	透水係数	○		×	
製作性	締固め試験	締固め性	×	●	○	

- 因子の値が大きいほど特性値が大きくなる
- × 因子の値が小さいほど特性値が大きくなる
- △ 因子の影響が少ない
- 最適値を持つ

表 4. 2 クニゲルV1とMX-80の特性値の比較
(含水比 10%の場合)

試料	クニゲルV1			MX-80	
	乾燥密度(g/cm ³)	1.6	1.8	2.0	1.8
特性値	一軸圧縮強さ(MPa)	2.4	5.4	7.6	5.3
	ヤング率(MPa)	1.8×10 ²	3.0×10 ²	4.8×10 ²	3.0×10 ²
	熱伝導率(W/m°C)	0.9	1.1	1.4	—
	膨潤圧力(MPa)	1.0	3.7	16.8	24.7
	透水係数(m/s)	5×10 ⁻¹³	1×10 ⁻¹³	5×10 ⁻¹⁴	1.5×10 ⁻¹⁴ (5)

※表中の各特性値は、原則として実測値を記載してあるが、含水比10%の測定値がないものについては、近似式による内挿による値を示した。
また、記載の数値は、試験繰返し数や、測定精度等から、各特性試験によって得られた測定値の最小位を四捨五入し、桁数を1つ減じて表示したものである。

謝 辞

本試験を実施するにあたり、試験に供したクニゲルV 1の鉱物組成をはじめ、製品に関する貴重なデータを提供していただいたクニミネ工業(株)研究所、鈴木啓三、伊藤雅和、各氏に厚く御礼申し上げます。

また、試験の実施にあたり、(株)間組 雨宮清氏には有益な御助言をいただいた。データの取得に関しては環境技術開発部 地層処分開発室 川崎学、松本一浩、各氏の御助力をいただいた。ここに深謝いたします。

引用文献

- 1) 雨宮他 “ベントナイトの基本特性調査” 動燃技術資料 PNC SN8410 89-033 (1989)
- 2) クニミネ工業(株)資料 私信
- 3) 須藤俊男 “粘土鉱物学” 岩波書店 (1974)
- 4) Arthur R.C , Apted M.J “Analysis of Buffering in Bentonite-Groundwater systems” Proceedings of the Second Annual International Conference, Las Vegas, Nevada (1991)
- 5) Lennart Borgesson “Model Shear Tests of Canisters with Smectite Clay Envelopes in Deposition Holes” SKB TR 86-26 (1986)
- 6) 土質工学会編 “土の試験実習書” (1983)
- 7) 日本粘土学会編 “粘土ハンドブック 第二版” 技報堂出版 (1987)
- 8) Roland Pusch “Swelling pressure of highly compacted bentonite” KBS 80-13 (1980)
- 9) M. MULLER-VONMOOS G. KAHR “MINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGEN VON WYOMING BENTONIT MX-80 UND MONTIGEL” NAGRA NTB 83-12 (1983)
- 10) Roland Pusch “permeability of highly compacted bentonite” KBS 80-16 (1980)
- 11) Dixon D. A , Gray M. N “The Engineering Properties of Buffer Material Research at Whiteshell Nuclear Research Establishment” AECL TR-350 pp.513-530
- 12) 東京天文台編 “理科年表” 丸善 (1988)
- 13) 積算資料 92年 1月号 財団法人 経済調査会
- 14) 日陶連原料(株)資料 私信
- 15) Roland Pusch “USE OF CLAYS AS BUFFERS IN RADIOACTIVE REPOSITORIES” KBS TR 83-46 (1983)

別添資料 1

分析, 試験方法

1-1 粘土鉱物の分析方法

1-2 ベントナイト (粉状) の陽イオン交換容量 (CEC) 測定方法

J B A S 1 0 6 7 7

1-3 土粒子の比重試験

J I S A 1 2 0 2

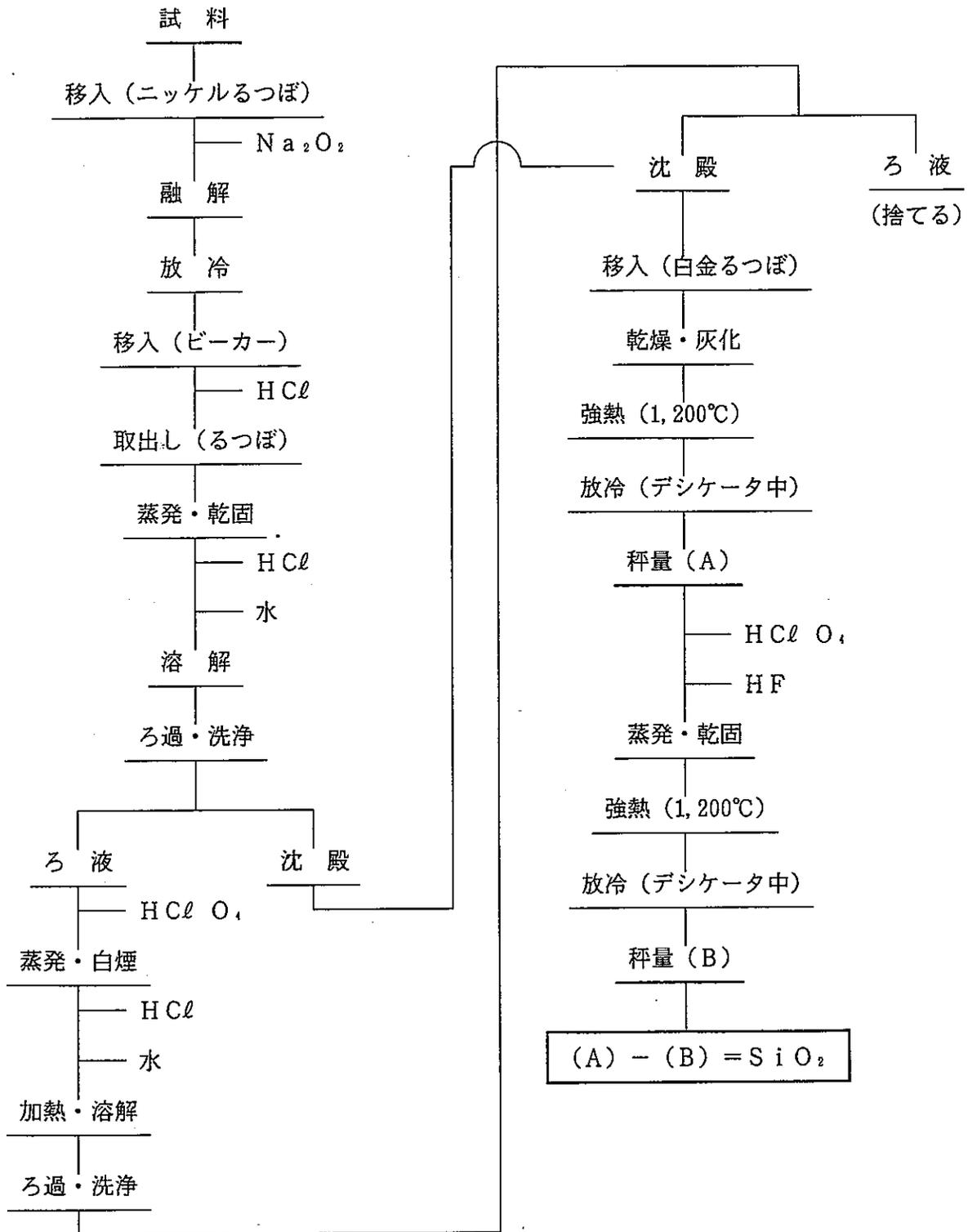
1-4 土の一軸圧縮試験

J I S A 1 2 1 6

別添資料 1-1

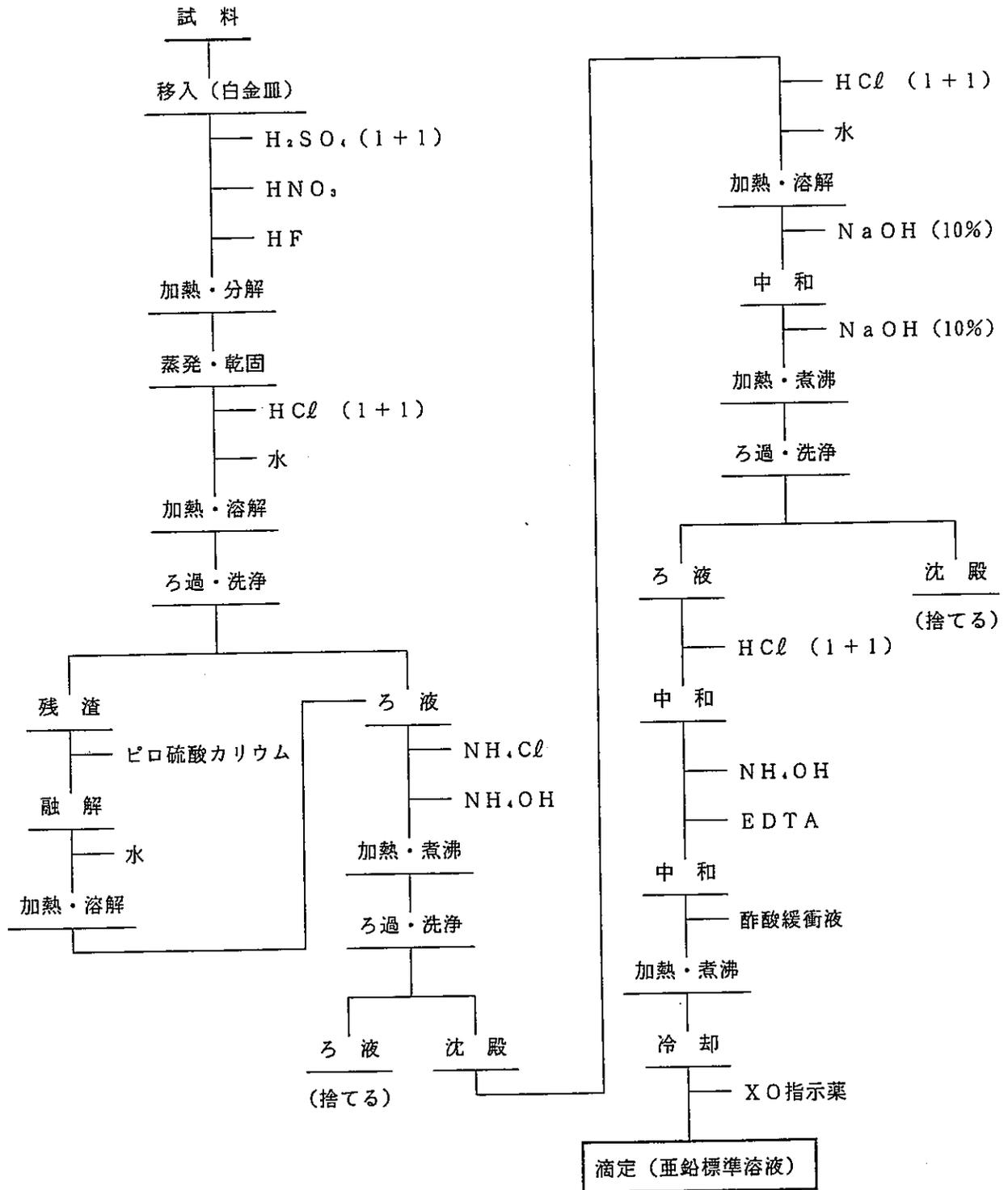
粘土鉱物の分析方法 (1)

1. SiO₂ の分析方法



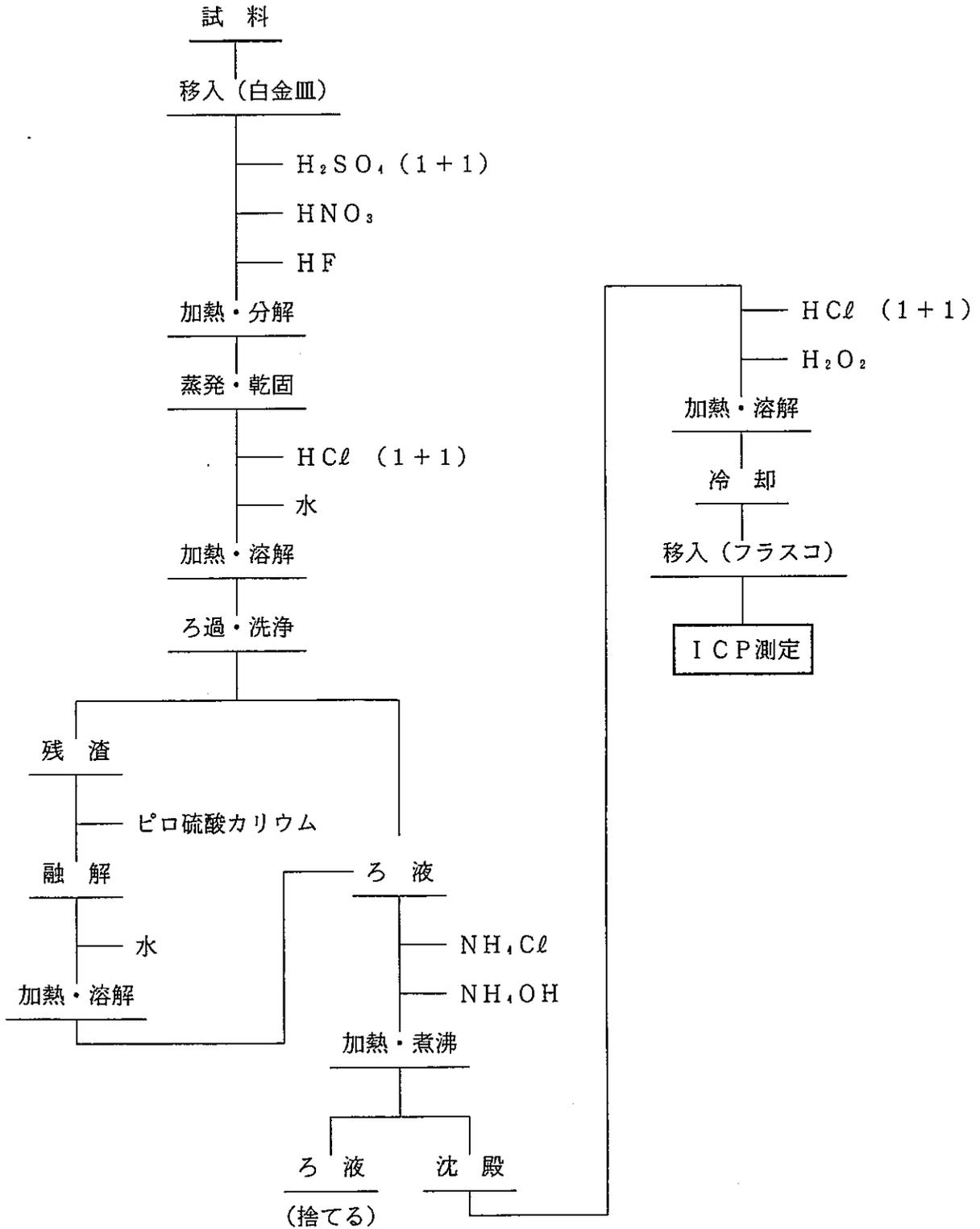
粘土鉱物の分析方法 (2)

2. Al₂O₃ の分析方法



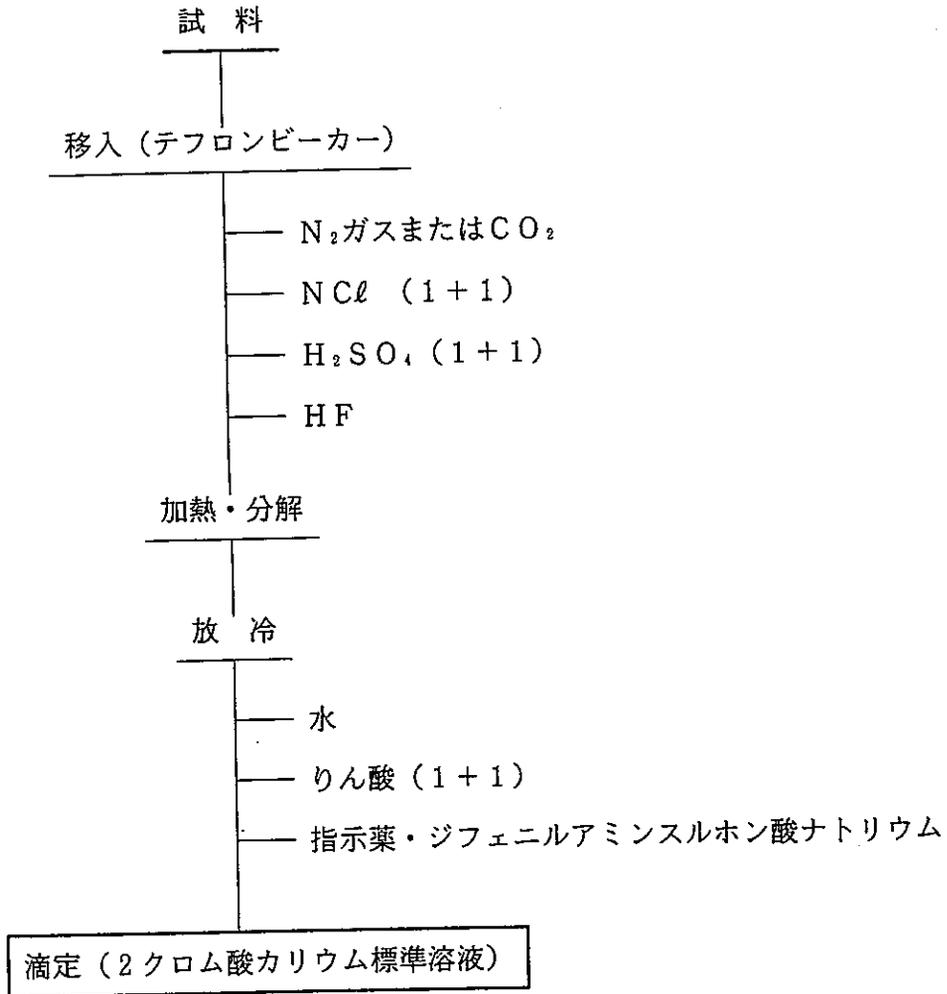
粘土鉱物の分析方法 (3)

3. 全Feの分析方法 (TiO₂, P₂O₅ はこの方法に準ずる)



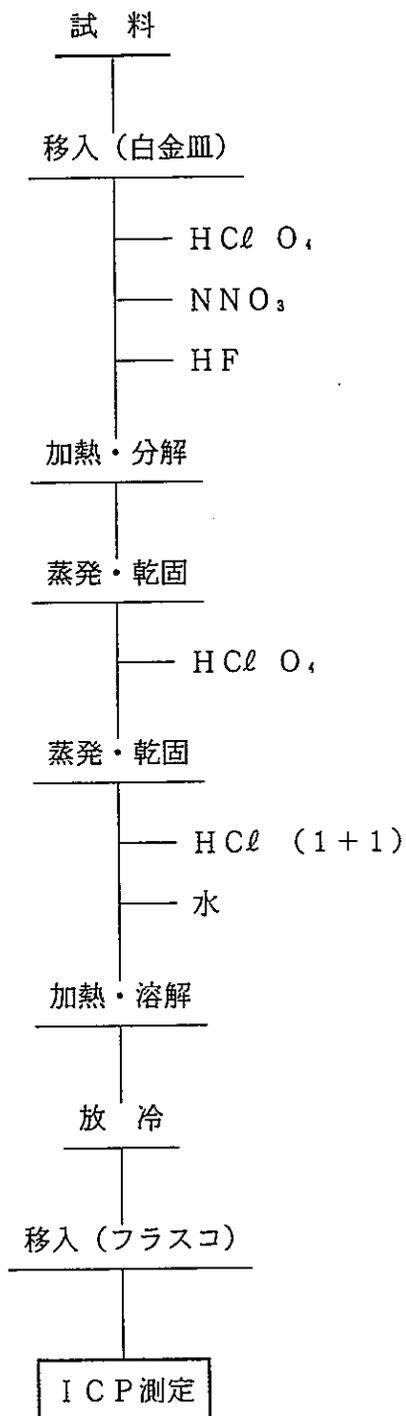
粘土鉱物の分析方法 (4)

4. FeOの分析方法



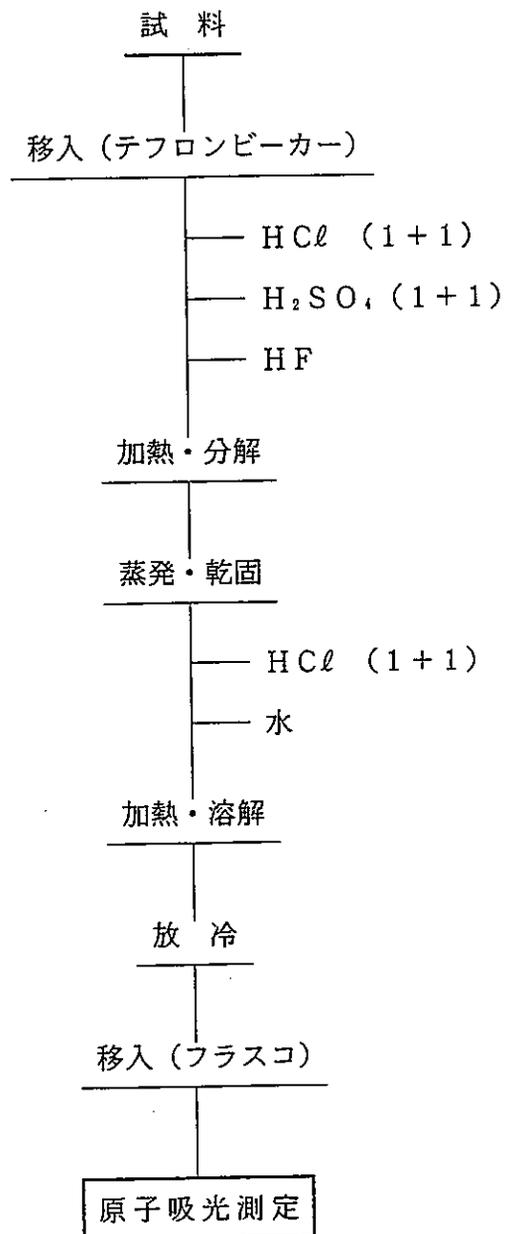
粘土鉱物の分析方法 (5)

5. MnOの分析方法 (MgO, CaOはこの方法に準ずる)



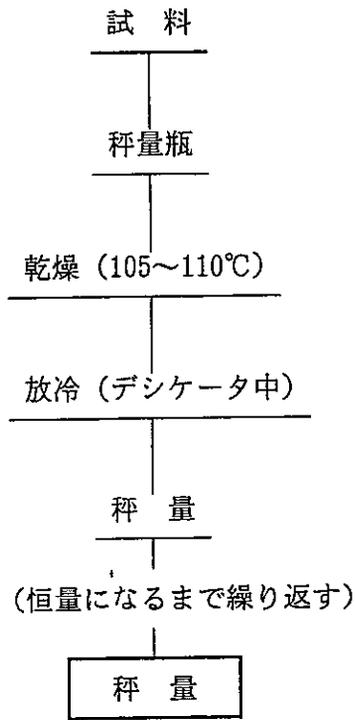
粘土鉱物の分析方法 (6)

6. Na_2O の分析方法 (K_2O はこの方法に準ずる)

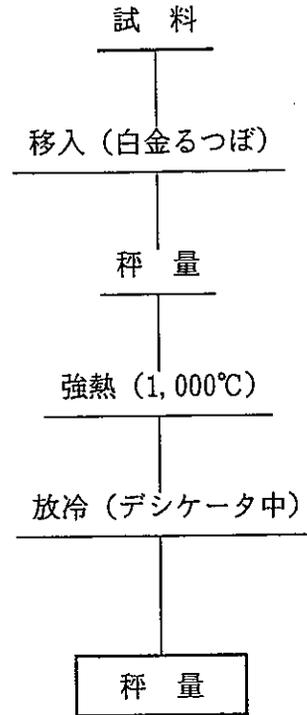


粘土鉱物の分析方法 (7)

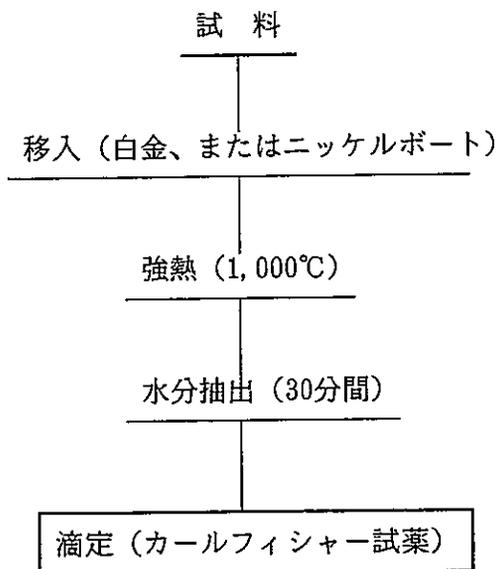
7. H_2O^- (湿分) の分析方法



9. 強熱減量の分析方法

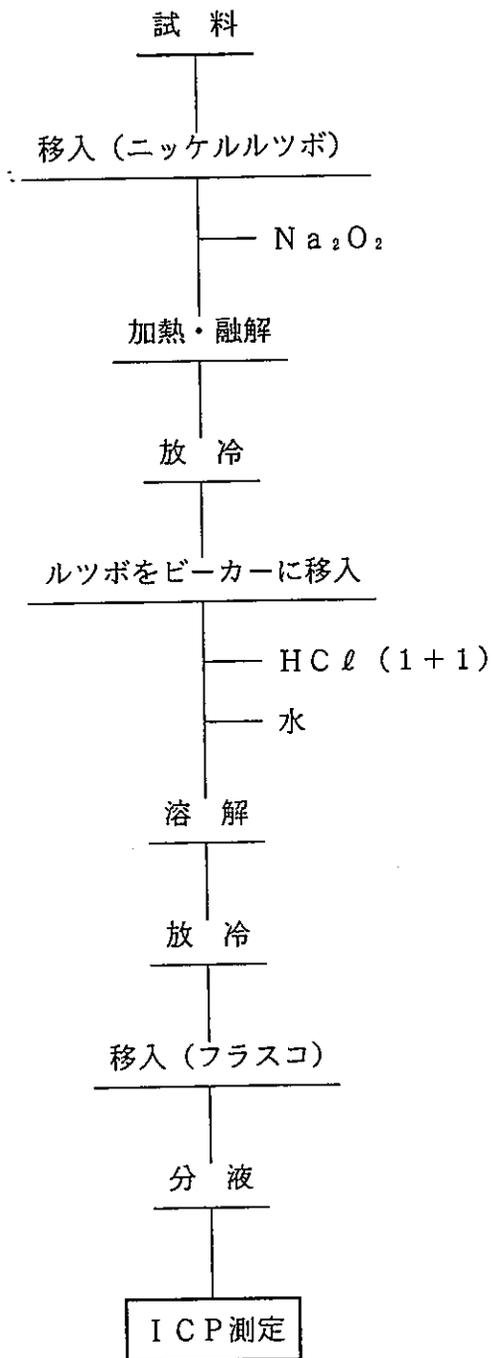


8. H_2O^+ (化合水) の分析方法



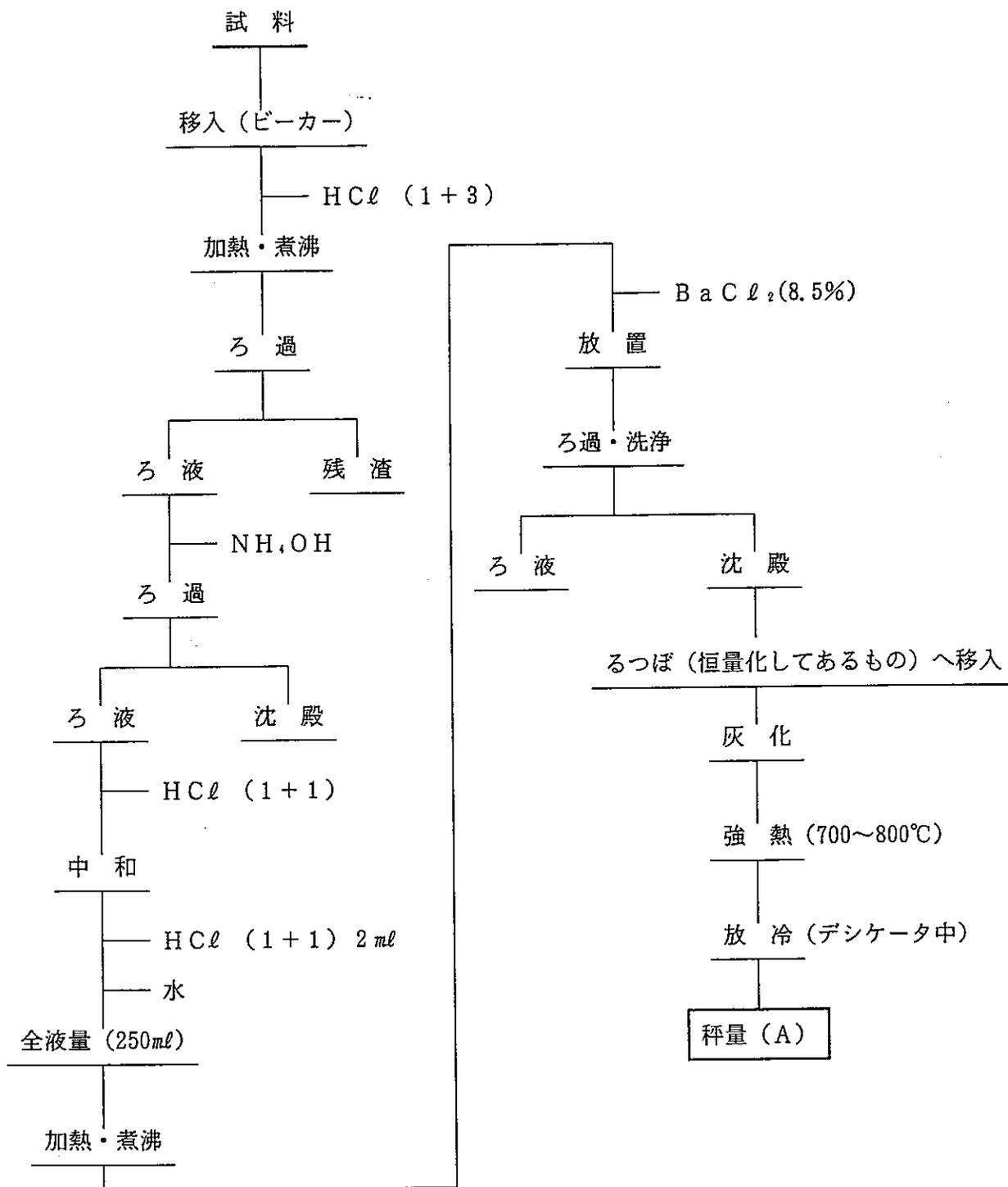
粘土鉱物の分析方法 (8)

10. 全Sの分析方法



粘土鉱物の分析方法 (9)

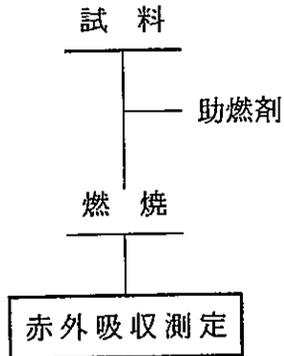
11. SO_4^{2-} の分析方法



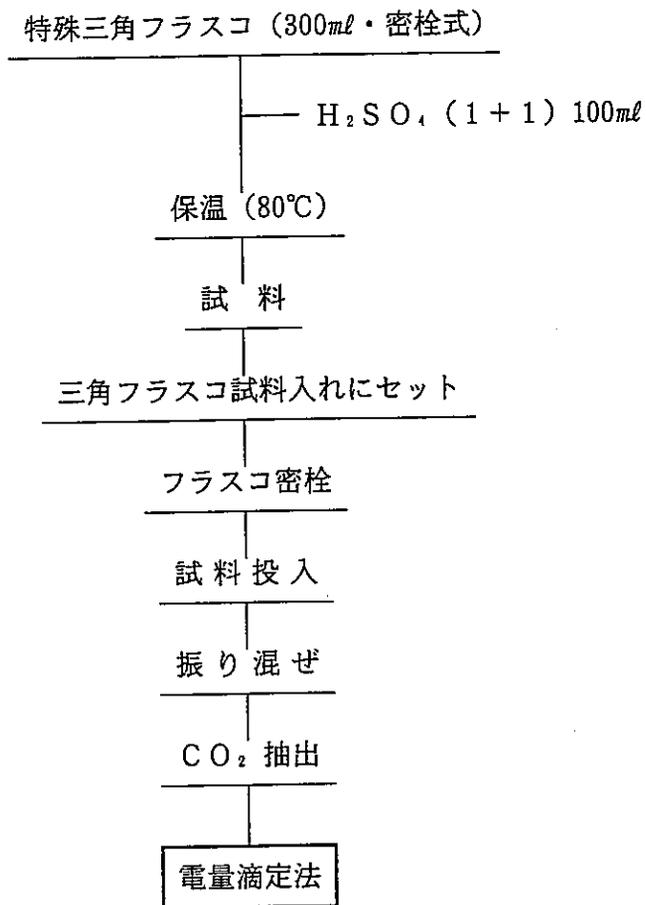
$$\text{SO}_4^{2-} (\%) = \frac{A (\text{g}) - \text{ブランク値 (g)}}{\text{試料秤り取り量 (g)}} \times 41.16$$

粘土鉱物の分析方法 (10)

12. 全Cの分析方法 (*高周波燃焼赤外吸収法による)



13. CO₂の分析方法 (**電量滴定法による)

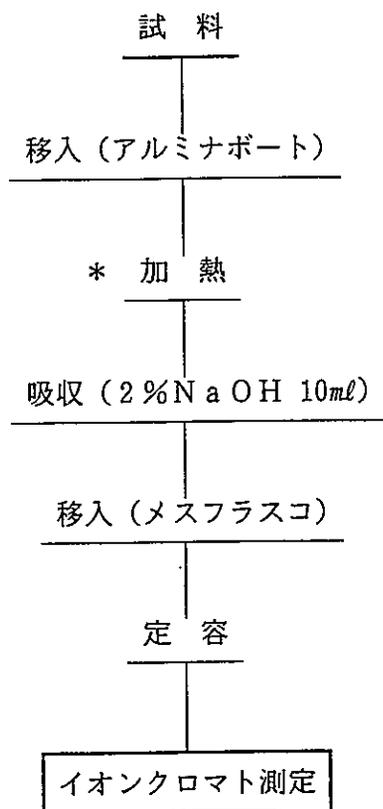


注 *JIS-Z 2615 金属材料の炭素定量方法通則 6.9 赤外線吸収法 (積分法)

**JIS-Z 2615 金属材料の炭素定量方法通則 6.7 電量法

粘土鉱物の分析方法 (11)

14. Clの分析方法



注 * 1,000°C 電気炉、水蒸気を含むO₂ 気流中

日本ベントナイト工業会標準試験方法

ベントナイト（粉状）の陽イオン交換容量（CEC）測定方法

1. 適用範囲

本試験方法はベントナイト（粉状）の陽イオン交換容量（CEC, Cation Exchange Capacity）の測定方法について規定する。ただし、数値の丸め方は J I S - Z - 8 4 0 1 による。

2. 方法

2.1 装置および準備

装置は図 1 に示すような浸出液容器、浸出管、受器よりなる。浸出管の下部に脱脂綿少量を上面が平らになるようにつめ、その上に乳化濾紙を 2～3 mm の厚さに敷き、試料の支持層とする。この支持層の上に試料 0.4～0.5 g 1) と 10 倍量の石英粒とを均一に混合したものを載せる。石英粒としては粒度 40～60 メッシュ程度のものを稀塩酸で煮沸処理したのち、十分に水洗し乾燥したものをを用いる。

注 - 1) 試料は 0.1 ml まで精秤する。

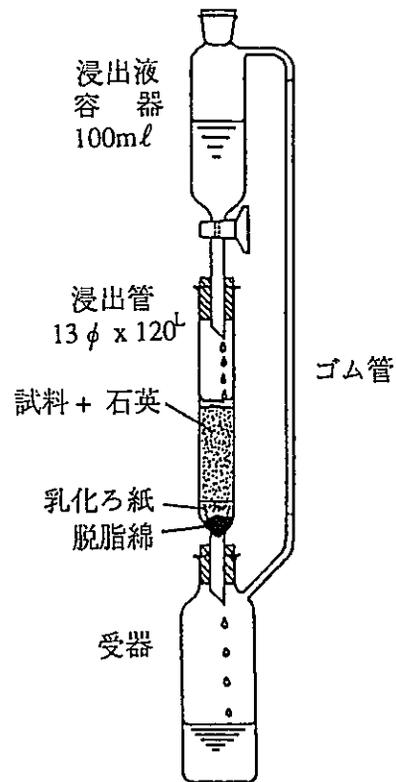


図 1. CEC 測定用装置

2.2 試薬¹⁾

1) pH 7 - 1 N 酢酸アンモニウム溶液

2 N アンモニア水と、2 N 酢酸とを等量ずつ混合し、pH 7 となるように濃アンモニア

水あるいは水酢酸で調整する。pHの測定はガラス電極pHメーターを用いて行う。

2) pH 7 - 80%エチルアルコール

精製水20容とエチルアルコール80容を混合し、B T B試験紙で検しながらpH 7となるように水酸化ナトリウム溶液で調整する。

3) 10%塩化カリウム溶液

塩化カリウム 100 gを精製水 900mlに溶かす。

注- 1) J I S 試薬特級を用いる。

2.3 浸出操作

- 1) 試料の入った浸出管に1 N酢酸アンモニウム溶液を少しずつ入れ、試料中に完全に浸透したら浸出管を装置にセットし、100mlの1 N酢酸アンモニウム溶液を4~24時間で浸出が終るように浸出容器のコックを調節して流下させる。
- 2) 浸出液容器を水洗したのち、50mlの80%エチルアルコールを加え流下させて試料を洗浄する。
- 3) 浸出液容器、受器を十分に水洗したのち、浸出液容器に100mlの10%塩化カリウム溶液を加え、流下させ、試料中のアンモニウムイオンをカリウムイオンと交換させる。
- 4) 受器の塩化カリウム溶液を蒸留装置に移し、ケルダール法に従ってアンモニアを蒸留する。突沸を防ぐために亜鉛粒を少量添加しておくといよい。留出液は0.1N硫酸に受け過剰の硫酸を0.1N水酸化ナトリウム溶液で滴定する。同時に空試験を行い、次式より計算し、小数第1位までを乾燥試料100g当りのミリ当量数 (meq/100g) で表示する。

$$\text{CEC (meq/100g)} = \frac{(A - B) \times f \times 10}{S \times \frac{100 - M}{100}}$$

ここに A : 空試験に要した 0.1N・NaOHのml数

B : 実際に要した 0.1N・NaOHのml数

f : 0.1N・NaOHのファクター

S : 試料採取量 (g)

M : 試料の水分 (%)

〔参 考〕

- ・渡辺裕、粘土の塩基置換容量の測定方法、粘土科学、1, [1], 23 (1961)
- ・C. J. Schollenberger and R. N. Simon, Soil Sci., 59, 13-24 (1945)

ベントナイト (粉状) の陽イオン交換容量 (CEC) 測定方法

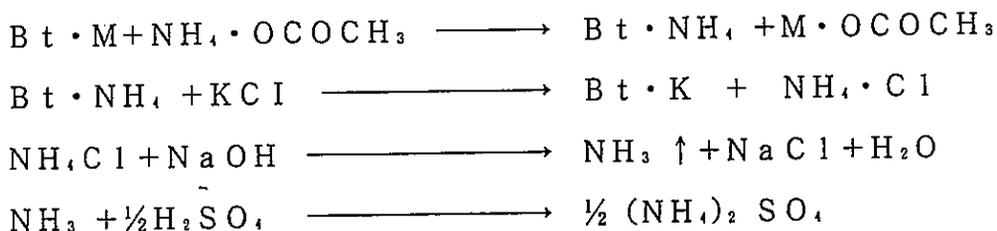
〔解 説〕

ベントナイトの陽イオン交換能は、この粘土の化学的性質の重要な特徴となっている。それは主に主成分鉱物であるモンモリロナイトに基づくものである。理想的なナトリウム・モンモリロナイト $[(OH)_4 Si_4 (Al 3.34 Mg .66) O_{20} \cdot Na .66]$ の化学式量は 734 であって 660 meq の Na^+ イオンをもっている。この Na^+ は交換性であって、化学式量から次式の計算によって理論 CEC が得られ、その値は 90 meq/100 g である。

$$\begin{aligned} \text{理論 CEC (meq/100 g)} &= \frac{0.66 \times 1000 \times 100}{734} \\ &= 90 \end{aligned}$$

しかしながら、ベントナイトの CEC は単にモンモリロナイト含有量だけに支配されるのではなく、ベントナイトを構成している他の陽イオン交換性鉱物、たとえばゼオライトの寄与がある場合もある。

CEC の測定方法としては、諸種の方法が研究者により提案されているが、ここに収録した方法は、酢酸アンモニウム法または Schollenberger 氏法の準法として最も広く、かつ一応の標準的方法として周知されている方法である。CEC 測定のプロセスを化学反応式で示すと次のとおり。



(以上)

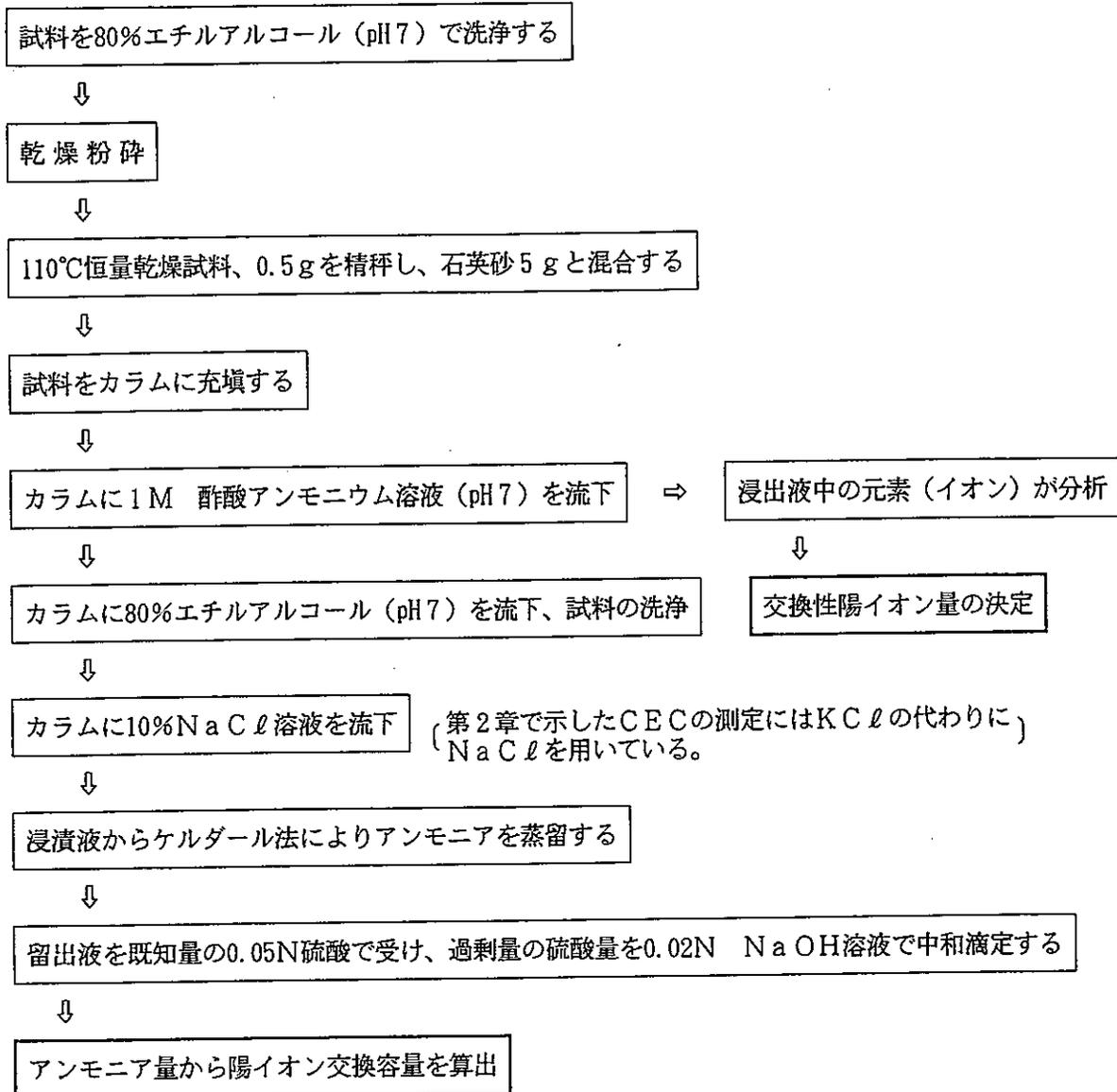


図 交換性陽イオン量および陽イオン交換容量の測定手順

土粒子の比重試験方法

Method of Test for Specific Gravity of Soils

1. 適用範囲

この規格は、土粒子の比重を求めるための試験方法について規定する。

2. 用語の意味

土粒子の比重 ある示された温度において土粒子が空气中で示す質量と、ある示された温度において土粒子と同体積の蒸留水が空气中で示す質量との比。

3. 試験用具

3-1 比重びん

比重びんは、JIS R 3505 (ガラス製化学用体積計) に規定する呼び容量100ml以上のメスフラスコ、又はJIS R 3503 (化学分析用ガラス器具) に規定する呼び容量50ml以上のゲーリュサック形比重びんとする。

3-2 はかり

はかりは、メスフラスコを用いる場合は、感量0.01gのもの、ゲーリュサック形比重びんを用いる場合は、感量0.001gのものとする。

3-3 温度計

温度計は、精度1°Cのものとする。

4. 試験方法

4-1 比重びんの検定

比重びんの検定は、次のとおりとする。

- (1) 比重びんを洗ってかわかした後、その質量 m_f (g)をはかる。比重びんに蒸留水を満たし、その全質量 $m_a'(g)$ と水温 T' °Cをはかる。
- (2) 測定の結果から、任意の温度 T °Cにおける蒸留水を満たした比重びんの質量 $m_a(g)$ を、次の式から求める。

$$m_a(T^\circ\text{C}) = \frac{T^\circ\text{C} \text{における水の比重}}{T'^\circ\text{C} \text{における水の比重}} \times [m_a'(T'^\circ\text{C}) - m_f] + m_f$$

ただし、水の比重は、表1による。

表1 温度4～30°Cにおける水の比重と補正係数

温度°C	水の比重	補正係数K	温度°C	水の比重	補正係数K
4	1.000000	1.0009	18	0.998625	0.9995
5	0.999992	1.0009	19	0.998435	0.9993
6	0.999968	1.0008	20	0.998234	0.9991
7	0.999930	1.0008	21	0.998022	0.9989
8	0.999877	1.0007	22	0.997800	0.9987
9	0.999809	1.0007	23	0.997568	0.9984
10	0.999728	1.0006	24	0.997327	0.9982
11	0.999634	1.0005	25	0.997075	0.9979
12	0.999526	1.0004	26	0.996814	0.9977
13	0.999406	1.0003	27	0.996544	0.9974
14	0.999273	1.0001	28	0.996264	0.9971
15	0.999129	1.0000	29	0.995976	0.9968
16	0.998972	0.9998	30	0.995678	0.9965
17	0.998804	0.9997			

引用規格：JIS A 1204 土の粒度試験方法

JIS R 3503 化学分析用ガラス器具

JIS R 3505 ガラス製化学用体積計

日本工業規格

JIS A-1202-1978

4-2 試料

4-2-1 試料は、湿ったままのもの、空気乾燥したもの、又は炉乾燥したものでもよいが、その量は、メスフラスコを用いるときは、炉乾燥質量で25g以上、ゲーリュサック形比重びんを用いるときは、同じく10g以上とする。

4-2-2 湿ったままのもの、又は空気乾燥したものを試料として用いるときには、測定試験が終わってから、炉乾燥して質量 m_s (g)を求める。この場合、粘土質土では、比重びんに入れる前にJIS A 1204(土の粒度試験方法)に規定する分散装置を用いて、蒸留水の中で粒子をよく分離させておかねばならない。

4-2-3 炉乾燥した試料を用いるときには、110°Cで一定質量になるまで少なくとも12時間炉乾燥し、デシケーターの中で室温までさました後に質量 m_s (g)をはかる。その後、この試料を12時間以上蒸留水に浸しておく。

4-3 試験順序

試験の順序は、次のとおりとする。

- (1) 試料を比重びんに入れ、更に蒸留水を加えてその全量がメスフラスコなら約 $\frac{3}{4}$ 、ゲーリュサック形比重びんなら約 $\frac{1}{2}$ になるようにする。その場合に、質量をあらかじめはかった試料では、その微量をも失わないように注意しなければならない。
- (2) 比重びん中の気ほうを除くには、気圧を水銀柱で100mm以下に下げたか、10分以上静かに煮る。ときどき比重びんを振り、気ほうの抜け出すのを助ける。

気圧を急に下げたときに、内容物が激しく沸き立たないように注意しなければならない。

加熱した試料は、室温になるまで放置する。

- (3) 比重びんに蒸留水を満たし、外面を洗い、乾いた布でふいてから、全質量 m_b (g)と内容物の温度 T °Cをはかる。

5. 計算

5-1 温度 T °Cの水に対する温度 T °Cの土粒子の比重 $G_s(T$ °C/ T °C)は、次の式から求める。

$$G_s(T$$
°C/ T °C) = $\frac{m_s}{m_s + (m_o - m_b)}$

ここに、 m_s ：炉乾燥した試料の質量 (g)

m_o ：温度 T °Cの水を満たした比重びんの質量(1)の測定値から(2)によって換算した値 (g)

m_b ：温度 T °Cの水と土を満たした比重びんの質量 (g)

T °C： m_b をはかったときの比重びんの内容物の温度

5-2 特に指定されないときは、温度15°Cの水に対する土粒子の比重 $G_s(T$ °C/15°C)を、次の式から求める。

$$G_s(T$$
°C/15°C) = $K \times G_s(T$ °C/ T °C)

ここに、 K ：補正係数、すなわち温度 T °Cにおける水の比重を15°Cの水の比重で割った数(表1参照)

5-3 温度4°Cの水に対する土粒子の比重を求めるには、温度 T °Cにおける土粒子の比重に温度 T °Cにおける水の比重をかければよい。

UDC 624.131.37:621.131.439

A 1216

JIS

UDC 624.131.37:621.131.439

JIS
A 1216

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD

Method of Unconfined Compression Test of Soils

土の一軸圧縮試験方法

JIS A 1216-1977

JIS A 1216-1977

Revised 1977-07-15

- (8) 試験が終わった供試体の破砕状況を記録し、供試体のクラックが軸方向と直角を分度器ではかる。
- 5.1.2 繰り返した試験の場合
 - (1) マイターボックスに入れたままの供試体を試験機の圧縮部の中央に置く。
 - (2) マイターボックスを二つ取り外して外したのち、セロイド板を斜めにはかす。
 - (3) 5.1.1(2)の方法で供試体の高さ及び直径を求め、この場合マイターボックスを外す前夜の供試体の高さ以上の差が認められたときは試験をとりやめる。
 - (4) 5.1.1(3), (4), (5), (6)及び(7)の操作により試験を行う。
 - (5) 供試体の破砕状況を記録したのち、供試体の3箇所(両端面及び中央部)から試片を取り、JIS A 1203に規定する方法でその含水率を決定する。

- 5.2 応力測定
 - 5.2.1 乱さない材料の場合
 - (1) 5.1.1(1), (2)及び(3)の操作を行う。
 - (2) 予想される一軸圧縮強さの約 $\frac{1}{3}$ に相当する荷重を30秒ごとに供試体に加える。
 - (3) 荷重を加えてから15秒経過したときに、圧縮床頭適用ダイヤルゲージを読みとる。
 - (4) 試験は、供試体が破砕するまで行う。ただし圧縮ひずみが15%を超えたときは、その後更に1回だけ荷重を加える。
 - (5) 5.1.1(8)と同様の操作を行う。
 - 5.2.2 繰り返した試験の場合
 - (1) 5.1.2(1), (2)及び(3)の操作を行う。
 - (2) 5.2.1(2), (3)及び(4)の操作により試験を行う。
 - (3) 5.1.2(5)の操作を行う。

- 6. 試験結果の整理
 - 6.1 試験の求め方
 - 6.1.1 圧縮する際の供試体の平均断面積 A_1 を次の式によって計算する。

$$A_1 = \frac{D_1 + 2D_2 + D_3}{4} \text{ (cm)}^2 \text{ [mm]}^2$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2 \text{ (cm)}^2 \text{ [mm]}^2$$
 ここに D_1 : 供試体の平均直径 (cm) [mm]
 D_2 : 供試体上部の直径 (cm) [mm]
 D_3 : 供試体中央部の直径 (cm) [mm]
 D_4 : 供試体下部の直径 (cm) [mm]
 - 6.1.2 供試体の密度 ρ を次の式によって計算する。

$$\rho = \frac{m}{L_1 A_1} \text{ (g/cm}^3\text{)} \left\{ \rho = \frac{m}{L_1 A_1} \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)} \right\}$$
 ここに m : 供試体の質量 (g)
 L_1 : 圧縮する際の供試体の高さ (cm) [mm]

- 6.2 一軸圧縮強さの求め方
 - 6.2.1 供試体の圧縮ひずみ ϵ を次の式によって計算する。

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_1} \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{ここに、} \Delta L \text{ : 圧縮量 (cm) [mm]}$$

- 4. 供試体
 - 4.1 供試体の形状・寸法 供試体の形状は円柱形とし、その直径は3~7cm、高さは直径の2~2.5倍とする。
 - 4.2 供試体の作製 供試体の作製は、できるだけ土の含水率を定量化せしめたいために湿度の高い室内で行い、材料はコンクリートをめけて取り扱った方がよい。
 - 4.2.1 乱さない材料
 - (1) サンプラー又はモールドから材料を取り出し、乱された部分を除去し、供試体の直径及び高さより約20%大きく切り取る。切り取りは、ワイヤー又は刃ナイフを使用して円かに行う。
 - (2) 材料をトリマーの上で乾かす。ワイヤー(材料が堅くてワイヤーが使用できない場合は刃ナイフ)で両面を削り取り、所定の直径を有する円柱にする(図3参照)。
 - (3) 試片成形の際、削り取った土の中から供試体を代表する3箇所(供試体の両端面と中央部)から試片を採り、JIS A 1203に規定する方法で、その含水率を決定する。
 - (4) 削り取った円柱形試片をマイターボックスに入れた後、ワイヤー又は刃ナイフで両端をマイターボックスの端面に沿って切り取る。この際両端面は斜面に直角で、かつ平行であることが必要である(図4参照)。
 - (5) 繰り返した材料の試験に際しては、切り取った材料は含水率が変化するようには試験室内に保存する。
 - (6) 成形し終わった供試体の質量をはかる。
 - 4.2.2 繰り返した材料
 - (1) 乱さない材料の一軸圧縮試験が終わった供試体及び4.2.1(5)の材料をコンクリートの中に埋込み、上に厚く、この材料を1回ごとに少しずつ回しながら、図5に示すように手で机上に押し付けて繰り返す。この操作は、材料が十分に繰り返されるまで続ける。
 - (2) マイターボックスを組み立て、その内面にセロイド板を巻いたのち、その中に繰り返した材料を数層に分けて入れる。この際各層が十分に密着するようにし、また材料全体が均一な密度となるように密着する。
 - (3) マイターボックスの両端に当該材料を削り取って供試体の端面を成形する。
 - (4) マイターボックスに入れたままの質量 m_1 をはかると、成形し終わった供試体の質量を次の式によって求める。

$$\text{供試体の質量} = m_1 - [(\text{マイターボックスの質量}) + (\text{セロイド板の質量})]$$

- 5. 試験方法 一軸圧縮試験は、普通ひずみ測定法によって行うが、応力測定法によることもできる。
 - 5.1 ひずみ測定法
 - 5.1.1 乱さない材料の場合
 - (1) 供試体を試験機の圧縮部の中央に置く。
 - (2) 規定で供試体の高さをはかると、供試体の3箇所(両端面及び中央部)についてノギスで直径をはかるか、又は巻尺で両端をはかって直径を求める(7)。
 - 注(7) ノギスで直径をはかる場合は、直径を2方向については、圧縮の平均値を求め、巻尺を用いて図長 L_1 をはかる場合は、次の式を用いて直径 D を求める。

$$D = \frac{L_1}{\pi}$$
 - (3) 供試体の圧縮床頭適用ダイヤルゲージを取り付け、最初の読みをとる。
 - (4) 検力計の成初の読みをとる。
 - (5) 百分1%の圧縮ひずみが生ずる四合を標印として、供試体を圧縮する。
 - (6) 圧縮を始めると同時に時間をはかり始め、その後約20秒ごとに時間・検力計及び圧縮床頭適用ダイヤルゲージを同時に読みとる。
 - (7) 検力計の読みが最大となるか、供試体のひずみが15%を超えてからも引続き1分間圧縮する。

6.2.2 圧縮ひずみ ϵ に対する供試体の断面積 A を次の式によって計算する。

$$A = \frac{A_0}{1 - \frac{\epsilon}{100}} \quad (\text{cm}^2) \quad [\text{mm}^2]$$

6.2.3 圧縮ひずみ ϵ に対する圧縮応力 σ は、次の式によって計算する。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \left[\sigma = \frac{P}{A} \times 10^4 \quad \text{N/m}^2 \right]$$

ここに P : 圧縮ひずみ ϵ になったときに供試体に加えられた荷重 (kgD) [N]
 ϵ を縦軸にとり、 σ に対する圧縮応力 σ を横軸として応力-ひずみ曲線を描く。

6.2.5 圧縮ひずみが15%に達するまでの応力-ひずみ曲線から求めた最大圧縮応力を一軸圧縮強さとする。
 6.3 縦横比の求め方 土の縦横比 S_1 は、次の式によって計算する。

$$S_1 = \frac{q_1}{q_2}$$

ここに q_1 : 乱さない試料の一軸圧縮強さ (kg/cm²) [kN/m²]

q_2 : 振り返した試料 (4.2.2の操作で準備したものの) の一軸圧縮強さ (kg/cm²) [kN/m²]

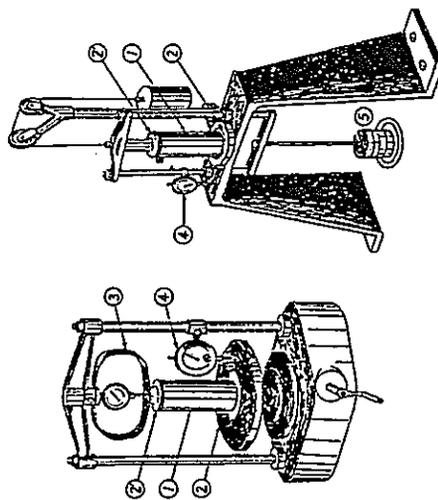
7. 報告 一軸圧縮試験の結果は、次の事項について報告する。

- (1) 供試体の寸法、含水率及び湿度
- (2) ひずみ測節法、応力測節法の別
- (3) 圧縮強さ
- (4) 供試体の形状状態
- (5) 応力-ひずみ曲線
- (6) 乱さない試料及び振り返した試料の一軸圧縮強さ
- (7) 縦横比

図1 一軸圧縮試験機

(この図は参考のために示すものであって、規格の一部ではない。)

(a) ひずみ測節形



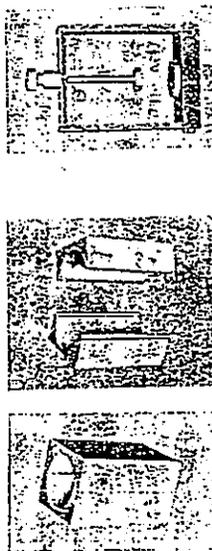
- ① 供試体
- ② 圧縮板
- ③ 鉄力計
- ④ ダイヤ
- ⑤ 荷重 (図示のような分測の代わりに應力、液体などを加えてもよい。)
- ⑥ 荷重

図2 供試体作製用具

(この図は参考のために示すものであって、規格の一部ではない。)

(a) マイターボックス

分解図



(c) ワイヤソー



(d) 直ナイフ



図3 試料断面の成形

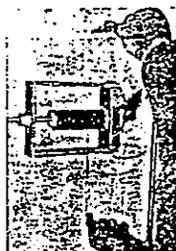


図4 試料端面の成形



図5 試料の振り返し



用い、又は、圧縮強さを $0.02 \text{ kgf/cm}^2 [1.96 \text{ kN/m}^2]$ までしかかることができる。
 一般に試験体の対象となる土の一般圧縮強さは $0.1 \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2 [9.81 \sim 245 \text{ kN/m}^2]$ の範囲の場合が多
 いので、これに対する効力計としては、供試体の大きさ及び予想される一般圧縮強さに応じて $30 \sim 100 \text{ kgf}$
 $[294 \sim 981 \text{ N}]$ をはかり得るもので、感量はその $\frac{1}{200}$ 以下のものを選定し、最大圧縮効力を測定する
 までに少なくとも数個のひずみに対する応力を測定して、信頼し得る応力-ひずみ曲線を開示するようにな
 る必要がある。したがって、例えば土の予想される一般圧縮強さが $0.1 \text{ kgf/cm}^2 [9.81 \text{ kN/m}^2]$ の場合に、
 供試体の直径 3 cm に対して容積 $100 \text{ kgf} [981 \text{ N}]$ 、感量 $\frac{1}{200}$ の効力計を用いるのはもちろん不適当で、こ
 の場合には供試体の直径を五えられたいときには、効力計の容積を $30 \text{ kgf} [294 \text{ N}]$ までの範囲で小さくし、
 小さな容積の効力計がないときには、供試体の直径を 7 cm までの範囲で大きくするというような工夫が
 必要となる。

また、土の一般圧縮強さが $0.1 \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2 [9.81 \sim 245 \text{ kN/m}^2]$ の範囲より若干小さいか大きい場合
 でも、同様に供試体の直径を $3 \sim 7 \text{ cm}$ の範囲で大きくするか小さくしてやることにより、規定した範囲内
 の適当な容積の効力計を用いて、一般に満足な試験を実施することが可能である。

(3) ダイアログ-ジョイス、(1) の規定に合わせて供試体容積の 20% までばかり得るものとした。前記として
 は、 $\frac{1}{100} \text{ mm}$ のダイヤルゲージを用いるのが普通であるが、大きい供試体を用いて試験する場合には、そ
 のストロークが相当長くなる(例えば、直径 7 cm 、高さ 17.5 cm の供試体を用いる場合は 3.5 cm) ので、
 規格で要求する範囲は 0.1 mm とした。

3.1.2 効力計用形一軸圧縮試験機 この形の試験機は一般に使用される量が少ないので、ひずみ測頭等のもの
 に比べて種類は少ないが、これも現在盛んに改良が加えられている状態にあるので、3.1.1 と同じく必要最小限の条
 件を規定するにとどめた。

(2) に規定した範囲には、図 1(b) に示すような分解を用いることもあるが、液体・液体などを一定成分で構成し
 て用いてもよい。

なお、(1) 及び (2) は、3.1.1 (1) 及び (2) と同様の趣旨に基づいて規定した。

3.2 供試体準備用具

3.2.1 マイターボックス 乱さない土の供試体の断面の成形及び取り返した土の供試体の作製に用いる。本文
 図 2 (a) のようなもので、高さは成形しようとする供試体の高さと同じのが普通であり、内径は内面をセルロイド板
 (厚さ 0.2 mm) で覆うために、供試体の直径より 0.4 mm だけ大きくしてある。供試体の直径に 0.4 mm の余裕
 があれば、内面の成形を終わった円柱形試料をマイターボックスではさんで強固に、供試体に余分な圧力をかけるよ
 うなことがない。

3.2.2 セルロイド板 取り返した土の供試体の作製を容易にするために用いる。その厚さを 0.2 mm としたの
 は、それより薄いセルロイド板では試料を詰める際に断面厚縮のため強固にすることがあり、反対に厚いセルロイド板
 では、効力によりセルロイド板が完全な円形を成さないことがあるからである。

3.2.3 トリマー 本文図 2 (b) に示すように乱さない土の供試体の断面を成形するために用いるもので、供試
 体の直径に比べてトリマーの径が過大であると、成形の際にトリマーのピアノ板が曲し出して所要の手法を有す
 る供試体を得ることが困難である。規格で参考を示したトリマーは、このような欠点が比較的に少ない。

3.2.4 ワイヤロー及び重すいフ 本文図 2 (c) 及び (d) に示すようなもので、試料を切り取りたりする
 場合に用いる。

3.2.5 ビニルシート 厚さ約 0.1 mm 、縦・横約 50 cm のもので、試料を切り取りたりする際に用いる。これの代わりに、
 三軸圧縮試験用のゴムシートなどを用いてもよい。

3.3 その他の用具

3.3.2 ノギス又は巻尺 供試体の直径をはかり得るノギス又は供試体の周長をはかり得る巻尺の、いずれかが

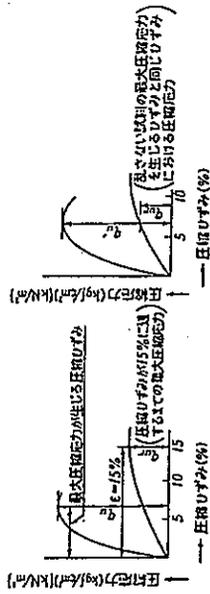
土の一軸圧縮試験方法 解説

1. 適用範囲 土の一軸圧縮試験は、土の特性係数を求めるためにも行われるが、普通には土の一般圧縮強さを求める
 ことを主な目的として行われるので、規格では別添録について触れなかった。
 また乱さない土については、その試験係数を求めることも行われるので、この場合に用いる取り返した試料の供試体の
 作製方法から試験係数の求め方までを規定した。

2. 変 異 乱さない試料から作製した供試体圧縮した場合には、圧縮ひずみが約 10% に達するまでに圧縮効力が
 最大となることが多いが、取り返した試料で作製した供試体圧縮した場合には、圧縮ひずみが増加するに従って圧縮
 効力も大きくなり、最大圧縮効力を見出せないことがある。
 このような場合を考慮して、規格では土の一軸圧縮強さとして圧縮ひずみが 15% に達するまでの効力-ひずみ曲線か
 ら求めた最大圧縮効力とるように規定した(0.2.5 参照)。

試験係数を決定するには、Terzaghi と Tschobanoff の提案した 2 とおりの方法がある。Terzaghi の提案した方法は、
 乱さない土の一軸圧縮強さと取り返した同じ土の一軸圧縮強さとの比(両者の最大圧縮効力の比)をとって試験比とす
 る。Tschobanoff の提案した方法は、乱さない土の一軸圧縮強さと、この圧縮強さに対するひずみと同じ圧縮ひずみ
 に達したときの取り返した同じ土の一軸圧縮強さとの比をとって試験比とする(附図 1 参照)。

附図 1 試験比を決定する Terzaghi と Tschobanoff の方法
 Terzaghi の方法



規格では、Terzaghi の提案した方法によって試験比を決定した。

3. 試験用具

3.1.1 ひずみ測頭形一軸圧縮試験機 現在各方面で使用されている試験機の断面は極めて多く、しかも常に改良
 されて進歩の上にあるので、試験機の規格化を急ぐことは現在の段階では適当でないと考えられる。したがって、図
 1 にひずみ測頭形の試験機の一部としてではなく、単に参考のために示した。
 また試験機の断面及び装置については、必要最小限の条件を規定するにとどめた。

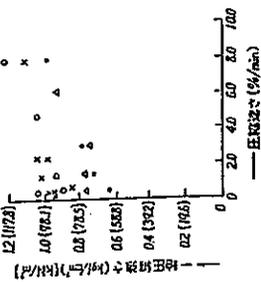
(1) 圧縮ひずみが 15% に達するまでに圧縮効力の最大値を示さない場合は、ひずみが 15% に達したのち約 1
 分間(約 1%) 圧縮を続けたのち試験を終了するように規定したので(5.1.1 (7) 参照)。試験後の圧縮
 装置は多少の余裕をみて、供試体に対し圧縮ひずみを 20% まで与え得る必要のあると規定した。

(2) 一般圧縮強さ $2.5 \text{ kgf/cm}^2 [245 \text{ kN/m}^2]$ の土について直径 7 cm の供試体を圧縮試験するために必要な容積約
 $100 \text{ kg} [981 \text{ N}]$ の効力計を必要とする。この場合、容積 $100 \text{ kg} [981 \text{ N}]$ 、感量 $\frac{1}{200}$ の効力計を用い、又は、
 圧縮強さを $0.013 \text{ kgf/cm}^2 [1.28 \text{ kN/m}^2]$ までしかかることができる。

また土の一軸圧縮強さが $0.1 \text{ kgf/cm}^2 [9.81 \text{ kN/m}^2]$ 、供試体の直径 3 cm の場合に、感量 $\frac{1}{200}$ の効力計を

10.
A 1216-1977 解説

解説図 2 圧縮速度による一軸圧縮強さの変化 (概要)



圧力	P.C (%) (kg/cm ²) (kg/m ²)	採取地	試体の状態
●	1.0 (94.1)	青島 (社)	残りなし
×	—	広島 (社)	混ざり
○	1.0 (94.1)	青島 (社)	残りなし
△	1.0 (94.1)	青島 (社)	残りなし

注 (○) P.C 有状態

6. 試験結果の概要

6.1 強度の求め方

6.1.2 一軸圧縮強さとは、試体両端面の断面積より端面の面積がより多く面積するので、中央部と両端面の面積の間に圧力の差をつけて、圧縮する側の試体の平均断面積を計算することにした。そして試験体の採取を求めると、この値をそのまま用いることとした。

6.2 一軸圧縮強さの決め方

6.2.5 既述は、圧縮ひずみが 20% に達するまでの応力-ひずみ曲線から求めた最大応力値を一軸圧縮強さとする場合が多かったが、ひずみが 15% から 20% に達するまでの応力の変化率は比較的小さいことが多いにもかかわらず、試験に要する時間ははるかに長くなる。そこで現物では試験時間を短縮する型で、20% の代わりに 15% と規定した。

7. 報告 土木工学公報のデータベースを用いて試験結果を整理し、これに基づいて報告するのが原形である。

日本工業規格 土の一軸圧縮試験方法 定価350円

昭和52年8月31日 第1刷発行

編集兼 田原正邦
発行人

発行所

財団法人日本規格協会
〒107 東京都港区赤坂4丁目1-24
電話 東京 (03) 583-8001 (代表)
振替 口座 東京 6-195146

札幌支部 〒060 札幌市中央区北4条西2丁目1 北四条ビル内

電話 札幌 (011) 261-0045 振替: 小樽4351

東北支部 〒980 仙台市一番町1丁目1-31 山口ビル内

電話 仙台 (022) 27-8336 8313 振替: 仙台8106

名古屋支部 〒460 名古屋市中区栄2丁目6-12 白川ビル内

電話 名古屋 (052) 221-8316 (代表) 振替: 名古屋23283

関西支部 〒541 大阪市東区本町4丁目4-1 本町野村ビル内

電話 大阪 (06) 261-8086 振替: 大阪2636

広島支部 〒730 広島市基町5-44 広島商工会議所ビル内

電話 広島 (082) 21-7023, 7035-7036 振替: 広島9479

四国支部 〒760 高松市西の丸町1-27 松屋ビル内

電話 高松 (0878) 21-7851 振替: 徳島3359

福岡支部 〒810 福岡市中央区渡辺通2丁目1-82 電気ビル第3別館内

電話 福岡 (092) 761-4226 振替: 福岡21632

株式会社第一印刷所, 印刷, 製本 Printed in Japan

別添資料 2

ケイ砂の試験成績

- 2-1 粒度分布 (5号ケイ砂, 3号ケイ砂)
- 2-2 5号ケイ砂試験成績表 (粒度分布, 化学分析値)

別添資料 2 - 1

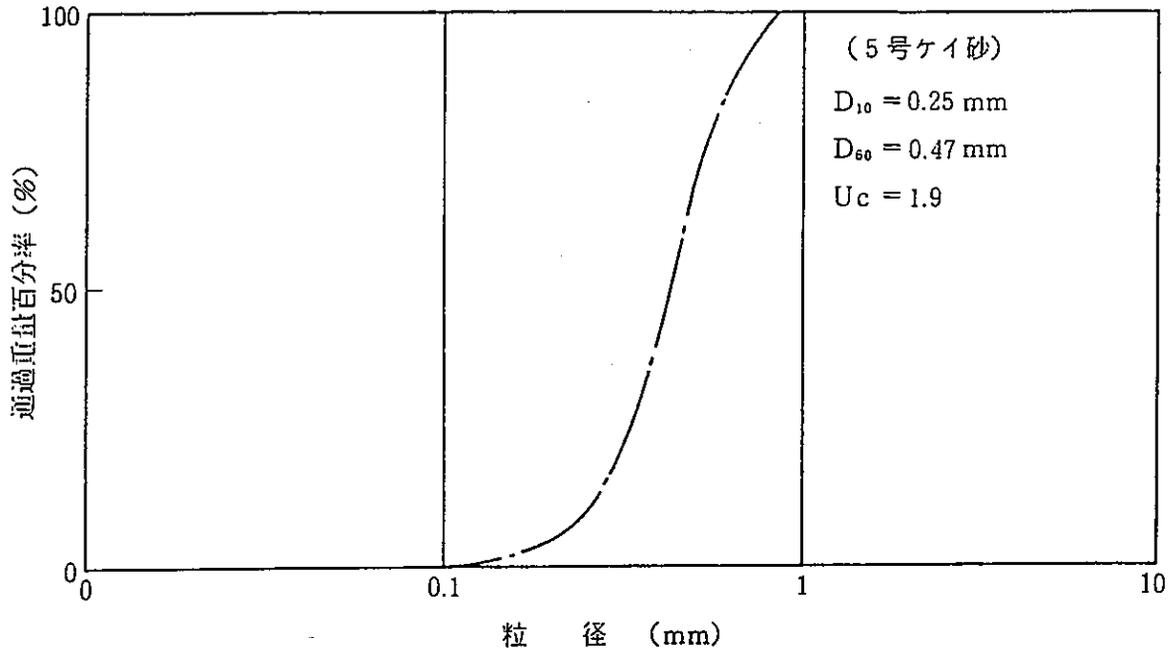


図2 ケイ砂の粒度分布 (5号ケイ砂)

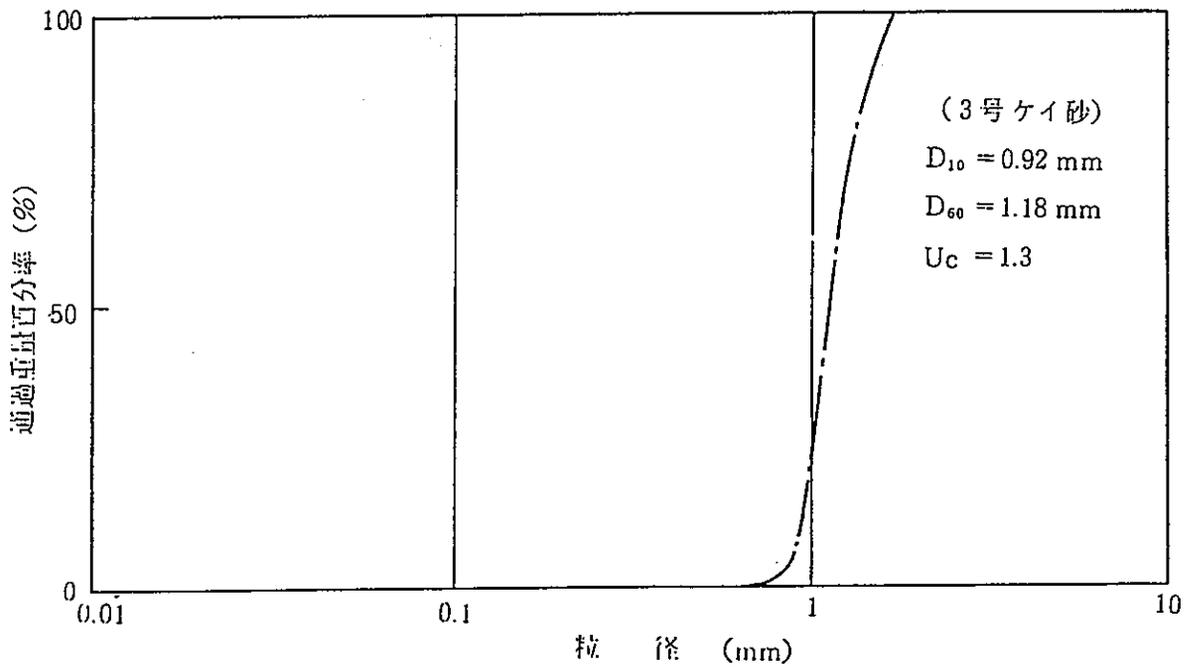


図3 ケイ砂の粒度分布 (3号ケイ砂)

別添資料 2 - 2

表 5号ケイ砂試験成績表



〒470-82
愛知県知多郡美浜町大字野間字由新田
株式会社 トウチュウ
TEL <05698> 7-0011(代)

トウチュウ. 珪砂性能表

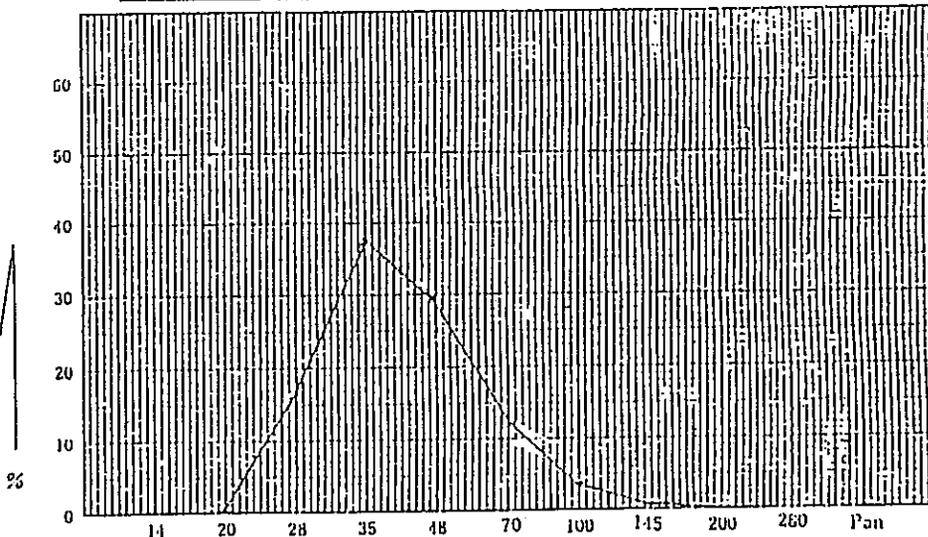
御中

平成 / 年 8 月 2 日 東 株式会社 トウチュウ

砂名	ハ [○] -1L5号	数量	サンゴ [○] 1L kg
製造年月日			

検査項目	単位	検査結果	検査項目	単位	検査結果
通気度			安息角		
充填密度	g/cc				

粒度分布



Mesh	0.5	1.6	3.7	7.7	16.2	38	75	150	300	(AFS)
ハ [○] -1L5号	0.5	16.0	37.7	29.6	11.2	3.8	0.9	0.2		35.84

化学成分

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Loss
ハ [○] -1L5号	99.78	0.05	0.01		<0.01	0.01	0.01	0.03	0.12

63.3. 100X50 T