

緩衝材の力学試験

1992年6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-ken 319-11, Japan

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

公　開　資　料

P N C T N 8410 92-170

1 9 9 2 年 6 月

緩衝材の力学試験

報告者：藤田 朝雄*，五月女 敦*，原 啓二*

要　　旨

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、地層処分研究の一環として、人工バリア技術開発および性能評価の基礎データとするために緩衝材の特性に関する研究を進めている。

本報告は、緩衝材としての圧縮ベントナイトの力学特性の把握を目的として、三軸圧縮試験を実施し圧縮ベントナイトの静的な応力条件下の変形特性、せん断特性やその密度、飽和度、温度依存性等に関するデータをまとめたものである。

実験方法は、非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験法であり、試験パラメータは、緩衝材の乾燥密度、飽和度、温度、ケイ砂含有率である。

試験結果より、応力-ひずみ関係、破壊応力及び弾性係数は、乾燥密度、飽和度、温度、ケイ砂含有の有無に影響を受けることが示された。温度の影響は他のパラメータに比べ顕著には現れなかった。破壊時の包絡線は、今回の拘束圧レベルでは、モールの破壊包絡線で示すことができ、せん断特性を概略的に把握することができた。

* 環境技術開発部 地層処分開発室

目 次

1. はじめに	1
2. 試験材料	3
2.1 ベントナイト	3
2.2 ケイ砂	5
3. 試験方法	6
3.1 試験体の作成	6
3.2 試験装置	6
3.3 試験方法	9
3.4 試験条件	11
4. 結果及び考察	12
4.1 応力-ひずみ関係	12
4.2 破壊応力	34
4.3 弹性係数	44
4.4 せん断強度	49
5. 結語	79
謝辞	79
参考文献	80

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、力学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、地層処分研究の一環として、人工バリア技術開発および性能評価の基礎データとするために圧縮ベントナイトの特性について研究を進めている。これまでに各種のベントナイトに関する基本特性試験が行われてきた[1][2]。

粘土等の土質系材料の変形特性は、間隙水挙動の影響を強く受ける。よって、飽和状態における有効応力の概念[3]を基本とした評価が広く活用されている。これらの特性を把握するための主な試験方法を表-1.1に示す[4]。表-1.1の中で圧縮ベントナイトの一軸圧縮試験結果についてはすでに報告されている[1]。この中で一軸圧縮強度は乾燥密度、含水比、ケイ砂混合率に依存することが報告されている。三軸圧縮試験には、非圧密非排水(UU)試験、圧密非排水(CU, \overline{CU})試験、圧密排水(CD)試験等がある。圧縮ベントナイトを使用した三軸圧縮試験としては、MX-80(米国産Na-ベントナイト、クニミネ工業社製)を使用したBörgesson[5]や砂に10~20%のクニゲルV1(山形県月布産のNa-ベントナイト、クニミネ工業社製)を混入したものを使用したKomine[6]等の例がある。MX-80を使用した場合の試験では、Ca-ベントナイトよりせん断強度が高いこと、強度の温度影響は無視しうることを報告している。砂に10~20%のクニゲルV1を混入した試験体についての試験では、ベントナイトの混入量をパラメータにしており、ベントナイトの量が多いほど可塑性が増すことが報告されている。

本報告書は、圧縮ベントナイトの力学特性の把握の一環として、非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験を実施し圧縮ベントナイトの静的な応力条件下の変形特性、せん断特性や密度、飽和度、温度依存性についてまとめたものである。

表-1.1 試験方法と試験条件の関係[4]

試験方法	使用試験機に固有の条件	排水条件
一軸圧縮試験	一主応力のみを載荷, 主応力方向は不变	非排水状態と仮定
三軸試験	軸対称主応力のみを載荷, 通常は最大主応力は不变	設定は容易
一面せん断試験	特定のせん断面に垂直力とせん 断力を載荷, 平面変形状態	設定は困難
ねじりせん断試験	上下端面に垂直力とせん断力を 側面に主応力を載荷	設定は容易

2. 試験材料

2.1 ベントナイト

ベントナイトは、モンモリロナイトを主成分とし、一般に石英、クリストバライト、沸石、長石等を含む粘土と定義され、ボーリング用泥水調整剤、土木用グラウト剤、染料助剤等として、広く使用されている[7]。ここでは、国産のベントナイトの一種である山形県月布産の製品（クニゲルV1、クニミネ工業）を使用することとする。

クニゲルV1の鉱物組成を表-2.1に示す。クニゲルV1は、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。また、化学組成分析結果を表-2.2に、物理特性を表-2.3に示す。表-2.3中、液性限界、塑性限界、塑性指数、収縮限界の試験方法は、土質工学会基準で定められている土の液性限界・塑性限界試験方法（JSF T 141-1990）と土の収縮定数試験方法（JSF T 145-1990）に従っている[4]。

表-2.1 クニゲルV1の鉱物組成[8]

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(アカサバ)	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

表-2.2 クニゲルV1の化学組成[8]

成 分	全 岩	水ひ試料 (モンモリロナイト)
S i O ²	69.9	61.3
T i O ²	0.18	0.16
A l ₂ O ₃	14.4	22.0
F e ₂ O ₃	1.91	1.78
F e O	0.47	0.22
M n O	0.06	0.02
M g O	1.86	3.58
C a O	1.87	0.68
N a 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
T O T A L	98.02	99.76
その他		
C l	0.03	
全S	0.55	
S O ₄ ²⁻	0.21	
全C	0.61	
C O ₂	1.7	
乾燥減量 ^{*2}	8.50	7.71

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

表-2.3 クニゲルV1の物理特性[1]

項 目	物 性 値	
真比重	G _s	2.662～2.784
液性限界	ω _L	416.0 %
塑性限界	ω _P	20.9 %
塑性指数	I _P	395.1 %
収縮限界	ω _S	10.6 %

2.2 ケイ砂

試験に使用したケイ砂は、愛知県産の花崗岩を粉碎して製品化されたものである。このケイ砂は、研磨材としてサンドblast工法その他に一般的に使用されているもので、愛知県産7号ケイ砂と呼称されている。

真比重は、AUTO TRUE DENSER MAT-5000 を用いた方法と土質工学会の定める比重試験(JIS A1202)を行って測定した結果より、2.629 ~ 2.656 であった。化学分析結果を表-2.4に示す。測定にはAUTO TRUE DENSER MAT-5000 を用いた。粒度分布測定結果を図-2.1に示す。測定は、レーザー回折式粒度分析計(SEISHIN ENTERPRISE CO. LTD SK LASER)を用いて行なったものである。

表-2.4 化学分析結果

構成鉱物等	含有量 (wt%)
SiO ₂	92.4
Al ₂ O	3.25
Fe ₂ O	0.31
CaO	0.06
MgO	0.15
Na ₂ O	0.27
K ₂ O	2.1
ig. loss	0.19

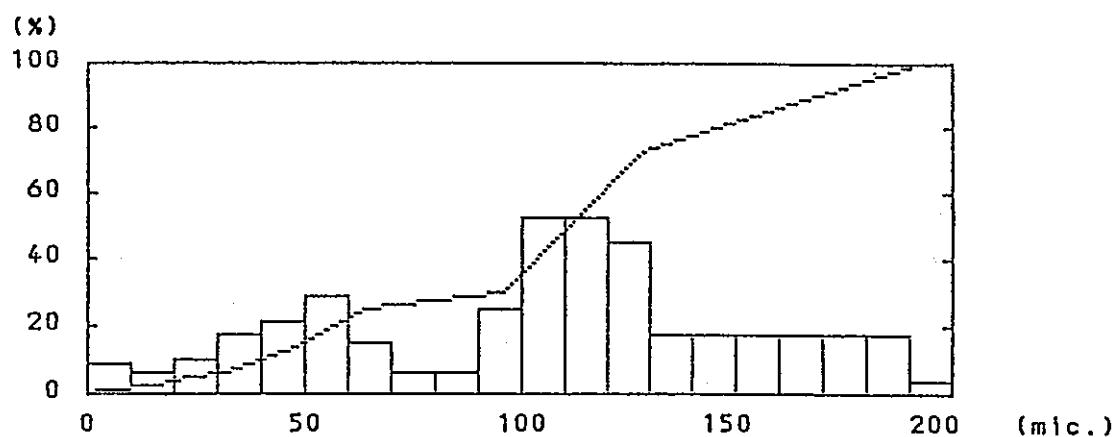


図-2.1 粒度分布結果

3. 試験方法

3.1 試験体の作成

試験体は、試料を試験体作成円筒セルに所定量入れ、上下ピストンを圧縮することにより作成した。

試験体の密度の調整は、試験体が所定の体積になるまで圧縮することにより、また、飽和度の調整は試料の含水比を変えることにより調整した。密度、飽和度、含水比の関係を次式に示す。

$$\rho_d = \frac{W_s}{V} = \frac{100 \rho_t}{(100 + \omega)} \quad \dots \quad (3.1)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 \quad \dots \quad (3.2)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{\omega G_s}{e} \quad \dots \quad (3.3)$$

ρ_d : 乾燥密度, W_s : 土粒子の重量, V : 全体積, ρ_t : 濡潤密度, ω : 含水比,
 e : 間隙比, V_v : 間隙の体積, V_s : 土粒子の体積, G_s : ベントナイト比重,
 ρ_w : 水の密度, S_r : 饱和度, V_w : 水の占める体積

ケイ砂混入の試験体は、最初に重量比分のベントナイト粉末とケイ砂を均一に混合した後に、上述の方法で試験体を作成した。

3.2 試験装置

試験装置の概略図を図-3.1に、系統図を図-3.2に示す。試験装置の主な機能を表-3.1に示す。温度については、バンドヒータを周囲に巻くことで調整設定した。

表-3.1 試験装置の機能

項目	許容値
軸荷重負荷能力	100t
側圧負荷能力	1000kg/cm ²
変位	0~20mm
載荷速度	変位: 0.01~10mm/min., 荷重: 0.1~100t/min.
バンドヒータ	200V, 1200W
試験体寸法	50φ×100mm, 35φ×70mm

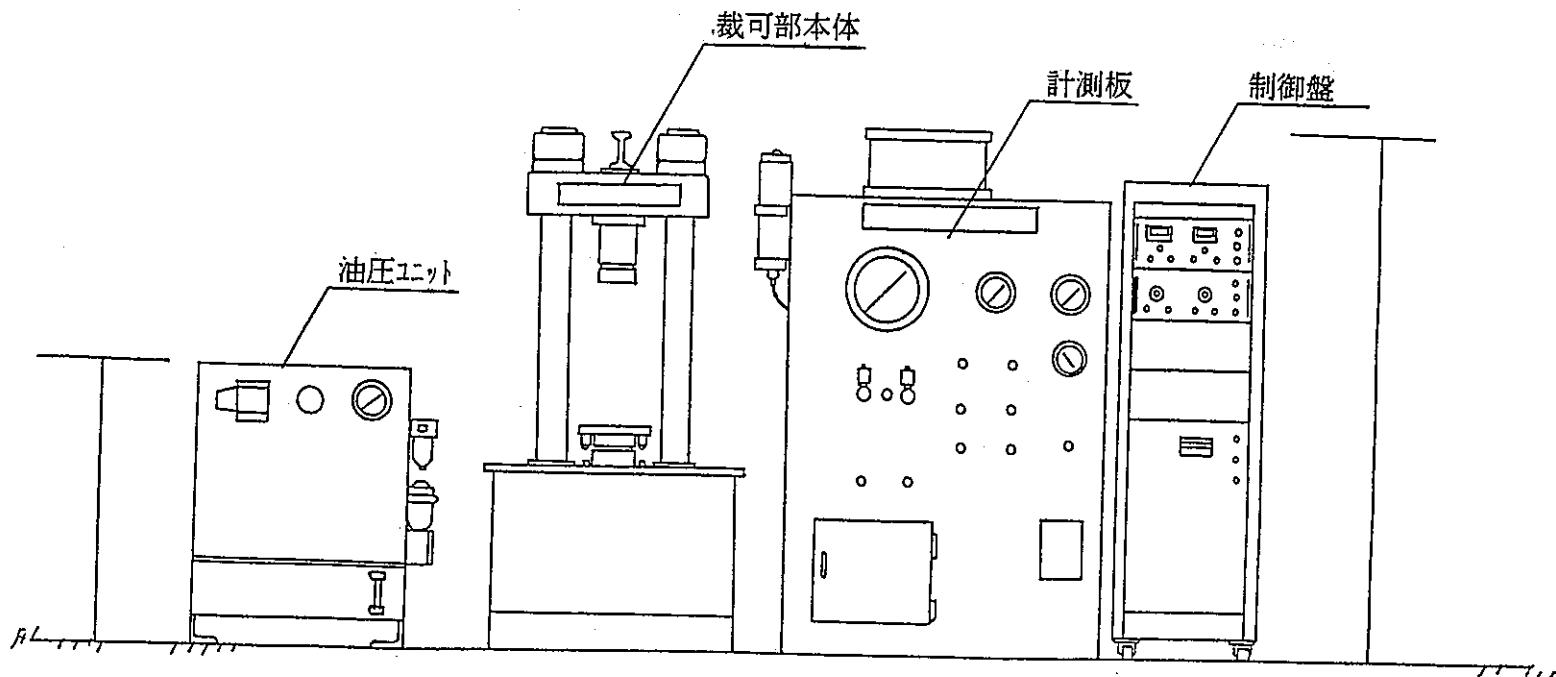


図-3.1 試験装置の概略図

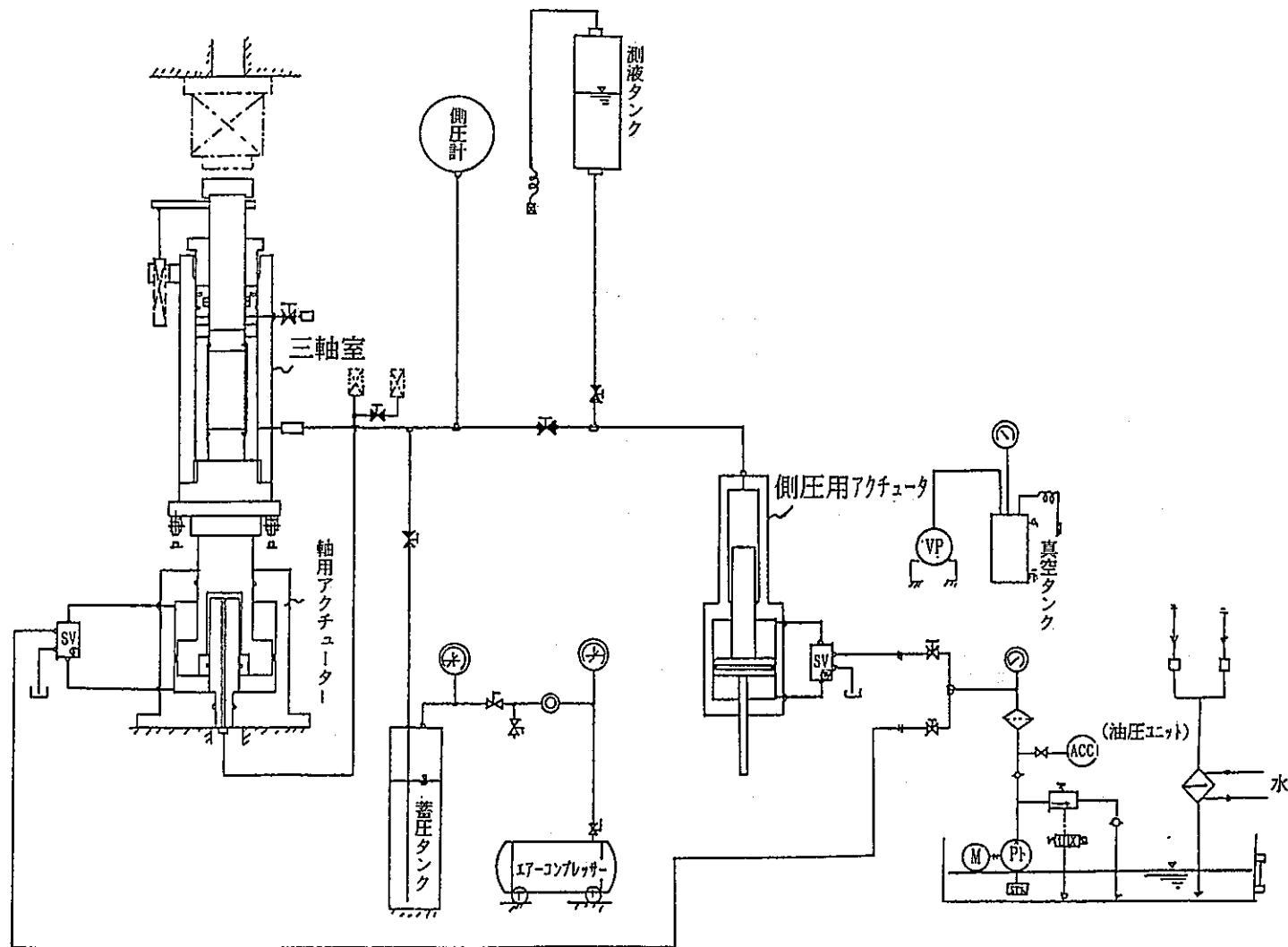


図-3.2 試験装置の系統図

3.3 試験方法

試験方法は、土質工学会基準（JSF T 521-1990）で定められている土の非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験方法に従い、せん断速度を毎分1%，最大軸ひずみ15%までせん断を行うこととした[4]。但し、温度条件の設定に際し、2次元非定常熱伝導解析を実施して試験体内部が一定温度になるまでに必要な時間を予備的に考察した。解析は次式に示す無次元化した熱伝導方程式を差分化したもの用いた。

$$\frac{\partial T}{\partial \bar{t}} = \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \bar{y}^2} \quad \dots \quad (3.4)$$

ここで、Tは温度、 \bar{t} は無次元時間、 \bar{x} 、 \bar{y} は無次元座標である。実時間t、長さx、yとの関係を次に示す。

$$t = \frac{\rho c_p L^2}{\lambda} \bar{t}, \quad x = L \bar{x}, \quad y = L \bar{y} \quad \dots \quad (3.5)$$

ρ ：密度、 c_p ：定圧比熱、L：代表寸法、 λ ：熱伝導率

代表寸法Lは任意に設定できるが、ここでは矩形領域の横幅が無次元距離 $\bar{x} = 1$ となるよう設定した。解析プログラムは、小竹等[9]によって制作された市販されているものを用いた。

解析は、三軸室内に試験体が置かれた状況を対象とした。試験体の初期温度を20°Cとし、境界の温度を90°Cにしたときの試験体内部の温度が平衡状態に達するまでの時間を数値解析によって求めた。

図-3.3に解析結果を示す。 $\bar{t} = 0.03$ の時、中心部分は60°Cまで上昇しているが試験体全域での温度分布は不均一な非定常状態である。時間が経過し $\bar{t} = 0.06$ の時の中心部分は80°Cまで上昇し、定常状態に近づいている。

最終的に、試験体全域での温度分布が均一な定常状態になるまでに要する時間は、 $\bar{t} = 0.116$ であった。ここで(3.5)式を使用し実時間を求めるために、緩衝材の物性値を決定する。藤田等[10]によれば、緩衝材の熱物性値は、含水比、温度等の影響を受けると報告されている。今回の試験では、試験体の周りにゴムスリーブを巻いており水分の蒸発を避けるようにしているが、ここでは熱伝導率の一番小さい乾燥状態の物性値を用い、温度依存性等は考慮せず、表-3.2に示すような熱伝導率 λ と定圧比熱 c_p を用いた。また、表-3.2に(3.5)式に代入して求められた実時間を合わせて示す。以上の検討から温度設定から試験開始までの時間を約1時間に設定した。

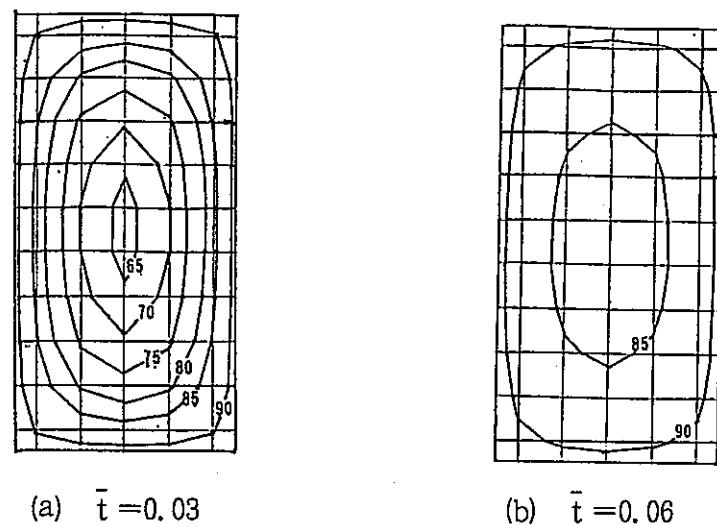


図-3.3 非定常熱解析結果

表-3.2 緩衝材の物性値

湿潤密度 g/cm ³	比熱 cal/g°C	熱伝導率 cal/cm sec °C	実時間 sec
1.9	0.215	2.152×10^{-3}	2201

3.4 試験条件

試験条件は、乾燥密度、飽和度、ケイ砂混入の有無、温度である。全試験ケースを表-3.3に示す。

表-3.3 試験ケース

No.	乾燥密度 (g/cm³)	飽和度 (%)	硅砂 (%)	温 度 (°C)	No.	乾燥密度 (g/cm³)	飽和度 (%)	硅砂 (%)	温 度 (°C)
1	1.8	47.0	0	23	27	1.6	73.0	0	50
2	1.8	50.0	0	48	28	1.6	74.0	0	87
3	1.8	50.0	0	87	29	1.6	73.0	30	50
4	1.8	50.0	30	23	30	1.6	73.0	30	87
5	1.8	50.0	30	49	31	1.6	97.0	0	23
6	1.8	50.0	30	87	32	1.6	98.0	0	50
7	1.8	73.0	0	23	33	1.6	98.0	0	87
8	1.8	75.0	0	50	34	1.6	95.0	30	23
9	1.8	75.0	0	90	35	1.6	98.0	30	50
10	1.8	75.0	30	23	36	1.6	97.0	30	87
11	1.8	74.0	30	48	37	2.0	49.0	0	50
12	1.8	74.0	30	87	38	2.0	47.0	30	50
13	1.8	98.0	0	23	39	2.0	48.0	30	87
14	1.8	98.0	0	48	40	2.0	66.0	0	23
15	1.8	98.0	0	87	41	2.0	68.0	30	23
16	1.8	96.0	30	23	42	2.0	74.0	0	50
17	1.8	95.0	30	48	43	2.0	75.0	0	87
18	1.8	96.0	30	87	44	2.0	83.0	0	23
19	1.6	31.0	0	23	45	2.0	80.0	30	23
20	1.6	30.0	30	23	46	2.0	95.0	0	23
21	1.6	50.0	0	50	47	2.0	94.0	0	50
22	1.6	50.0	0	87	48	2.0	95.0	0	87
23	1.6	49.0	30	50	49	2.0	93.0	30	23
24	1.6	49.0	30	87	50	2.0	94.0	30	50
25	1.6	69.0	0	23	51	2.0	94.0	30	87
26	1.6	66.0	30	23					

4. 結果及び考察

4.1 応力-ひずみ関係

表-4.1(1)～(8)に三軸圧縮試験結果をまとめて示す。ここで破壊点が顕著に現れないものについては15%ひずみ時の主応力差を破壊応力 q_f として採用した。また、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 との主応力差 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ と軸ひずみ ϵ の関係を図-4.1(1)～(13)に示す。せん断に従い主応力差は増加し、側圧 $\sigma_3 = 0$ 時を除きひずみ硬化がみられる。また、一般的な粘性土にもみられるように、側圧 σ_3 が増加するにつれ主応力差 q は増加する傾向にある。乾燥密度 ρ_d が小さいほど延性度が大きく、主応力差 q は小さくなる。これは、乾燥密度 ρ_d の低下にともない空隙率が増加するためであると考えられる。

低飽和度では硬質岩のようなはっきりとした破壊点がみられるのに対し、高飽和度では粘性土のような延性変形が長く続いている。

ケイ砂を混合した場合、主応力差 q は混入しないものに比べて低くなっていることが分かる。この理由の一つに、砂とベントナイトの付着力がベントナイトどうしのものより低いことが考えられる。

温度 T の影響は他のパラメータに比べて顕著には現れていない。Kuntiwattanakul 等[11]によれば、粘土の応力-ひずみ関係は温度の影響を大きくうけると報告している。一方、Borgesson 等[5]はせん断特性に及ぼす温度の影響は無視しえると報告している。いずれにせよ今後の研究によるところが大きいと思われる。

表-4.1 三軸圧縮試験結果(1)

No.	ρ_d (g/cm ³)	Sr (%)	T (°C)	σ_s (Mpa)	Ms (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm ³)	Q_t (Mpa)	ε_t (%)	E_{50} (Mpa)
1	1.78	48.0	23	0	0	9.5	0.556	5.06	9.96	396.8	200.1	4.89	1.4	359.6
	1.78	47.7	23	0.5	0	9.5	0.556	5.07	10.07	397.2	203.1	8.52	1.8	710.0
	1.76	46.2	23	1.0	0	9.5	0.574	5.06	10.20	396.4	205.0	10.53	4.0	629.9
	1.75	45.7	23	2.0	0	9.5	0.583	5.08	10.14	395.5	205.4	11.48	7.6	820.0
2	1.81	50.0	48	0	0	9.5	0.525	5.05	9.98	397.3	199.7	6.09	1.6	676.7
	1.81	49.8	48	0.5	0	9.5	0.527	5.05	9.99	397.1	199.9	6.68	2.6	654.9
	1.81	49.6	48	1.0	0	9.5	0.529	5.05	10.01	397.4	200.3	9.23	4.4	769.2
	1.81	49.8	48	2.0	0	9.5	0.528	5.05	9.99	396.9	199.9	10.30	7.0	715.3
3	1.80	49.3	87	0	0	9.5	0.532	5.05	10.00	396.1	200.1	5.61	1.2	985.0
	1.80	49.5	87	0.5	0	9.5	0.531	5.05	9.99	396.2	199.9	7.20	2.2	720.0
	1.81	49.8	87	1.0	0	9.5	0.527	5.05	9.99	397.1	199.9	9.02	3.8	751.7
	1.80	49.5	87	2.0	0	9.5	0.530	5.05	9.99	396.3	199.9	10.49	6.0	742.9
4	1.81	50.3	23	0	30	9.5	0.522	5.05	9.99	398.5	199.9	2.70	1.6	259.6
	1.82	50.7	23	0.2	30	9.5	0.518	5.05	9.99	399.6	199.9	3.60	2.0	360.0
	1.81	49.8	23	0.35	30	9.5	0.527	5.05	9.99	397.1	199.9	4.05	2.4	405.0
	1.82	50.6	23	0.5	30	9.5	0.519	5.05	9.99	399.2	199.9	4.05	2.2	405.0
5	1.81	50.2	49	0	30	9.5	0.524	5.05	9.99	398.0	199.9	2.55	1.6	386.4
	1.81	50.1	49	0.2	30	9.5	0.524	5.05	9.99	397.8	199.9	3.55	2.2	355.0
	1.81	49.6	49	0.4	30	9.5	0.529	5.05	10.00	396.9	200.1	3.84	3.0	384.0
	1.80	49.5	49	0.6	30	9.5	0.530	5.05	10.00	396.7	200.1	4.32	4.0	392.7
6	1.81	49.9	87	0	30	9.5	0.526	5.05	9.99	397.3	199.9	2.83	1.8	372.3
	1.81	50.0	87	0.2	30	9.5	0.525	5.05	9.99	397.7	199.9	3.71	2.6	371.0
	1.81	50.3	87	0.	30	9.5	0.523	5.05	9.99	398.3	199.9	3.91	3.2	402.1
	1.81	49.8	87	0.6	30	9.5	0.528	5.05	9.99	396.9	199.9	4.18	3.6	418.0
7	1.78	72.7	23	0	0	14.6	0.556	5.05	9.99	408.9	200.1	3.30	1.6	300.0
	1.78	72.7	23	0.25	0	14.6	0.556	5.05	10.00	409.3	200.3	4.01	4.5	332.3
	1.78	72.7	23	0.5	0	14.6	0.556	5.05	10.00	409.5	200.3	4.32	5.5	364.5
	1.78	72.7	23	1.0	0	14.6	0.556	5.05	9.99	409.1	200.1	4.62	7.2	334.7

表-4.1 三軸圧縮試験結果(2)

No.	ρ_a (g/cm ³)	Sr (%)	T (°C)	σ_s (Mpa)	Ms (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm ³)	α_t (Mpa)	ε_t (%)	E_{50} (Mpa)
8	1.78	72.7	50	0	0	14.6	0.556	5.05	9.99	409.3	200.1	2.87	2.0	287.0
	1.78	72.7	50	0.25	0	14.6	0.556	5.05	9.99	409.5	200.1	3.41	2.2	396.5
	1.78	72.7	50	0.5	0	14.6	0.556	5.05	9.99	409.1	200.1	3.85	4.0	447.6
	1.78	72.7	50	1.0	0	14.6	0.556	5.05	10.00	409.3	200.3	4.38	13.8	353.2
9	1.78	72.7	90	0	0	14.6	0.556	5.05	10.00	408.3	200.3	3.76	2.1	482.0
	1.78	72.7	90	0.25	0	14.6	0.556	5.05	9.99	408.3	200.1	3.70	3.0	313.5
	1.78	72.7	90	0.5	0	14.6	0.556	5.05	10.00	409.0	200.3	4.12	3.5	343.3
	1.78	72.7	90	1.0	0	14.6	0.556	5.05	9.99	408.5	200.1	4.45	18.0	353.1
10	1.82	76.3	23	0	30	14.2	0.515	5.05	9.90	413.7	198.1	1.46	2.4	202.8
	1.81	75.1	23	0.1	30	14.2	0.523	5.05	9.95	413.7	199.1	1.70	2.4	170.0
	1.82	76.0	23	0.15	30	14.2	0.517	5.05	9.92	414.0	198.5	1.80	2.4	225.0
	1.81	74.3	23	0.3	30	14.2	0.528	5.05	9.97	413.5	199.5	2.05	4.2	205.0
11	1.80	74.0	48	0	30	14.2	0.531	5.05	9.99	413.1	199.9	1.38	2.0	172.5
	1.81	74.6	48	0.1	30	14.2	0.527	5.05	9.99	414.3	199.9	1.61	2.8	166.0
	1.81	74.7	48	0.2	30	14.2	0.526	5.05	9.99	414.5	199.9	1.77	3.2	177.0
	1.81	74.6	48	0.3	30	14.2	0.526	5.05	9.98	413.9	199.7	2.02	5.0	168.0
12	1.80	74.1	87	0	30	14.2	0.530	5.05	10.01	414.2	200.3	1.56	2.2	195.0
	1.81	74.5	87	0.1	30	14.2	0.527	5.05	9.99	414.1	199.9	1.71	2.6	190.0
	1.81	74.4	87	0.2	30	14.2	0.528	5.05	9.99	413.9	199.9	1.96	4.0	196.0
	1.81	74.5	87	0.3	30	14.2	0.527	5.05	9.98	414.2	199.9	2.05	5.0	186.0
13	1.78	97.4	23	0	0	19.5	0.550	5.04	9.99	425.9	199.9	2.57	4.4	116.8
	1.78	96.5	23	0.25	0	19.5	0.550	5.06	10.16	433.5	204.3	3.02	8.0	100.7
	1.78	97.1	23	0.5	0	19.5	0.550	5.06	10.17	434.9	204.5	3.12	8.0	130.0
	1.78	99.1	23	1.0	0	19.5	0.550	5.06	10.03	432.1	201.7	3.50	15.0	134.6
14	1.78	97.1	48	0	0	19.5	0.544	5.05	9.99	426.3	200.3	1.83	3.6	114.4
	1.79	99.0	48	0.1	0	19.5	0.545	5.05	10.01	429.3	200.3	2.35	6.0	93.6
	1.78	97.5	48	0.2	0	19.5	0.553	5.05	10.02	427.4	200.5	2.58	6.0	129.0
	1.77	96.9	48	0.3	0	19.5	0.556	5.05	10.02	426.5	200.5	2.87	9.0	151.0

表-4.1 三軸圧縮試験結果(3)

No.	ρ_a (g/cm ³)	S _r (%)	T (°C)	σ_3 (Mpa)	M _s (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm)	q _t (Mpa)	ε_t (%)	E ₅₀ (Mpa)
15	1.78	97.9	87	0	0	19.5	0.541	5.05	10.00	427.1	200.1	1.94	3.6	119.8
	1.78	98.1	87	0.1	0	19.5	0.554	5.05	10.01	427.8	200.3	2.38	5.0	108.2
	1.79	98.9	87	0.2	0	19.5	0.551	5.05	10.01	429.1	200.3	2.62	6.0	137.9
	1.79	98.7	87	0.3	0	19.5	0.553	5.05	10.00	428.3	200.1	3.02	10.0	167.8
16	1.79	96.8	23	0	30	19.0	0.543	5.04	10.03	427.2	200.0	0.63	4.6	29.1
	1.77	94.4	23	0.1	30	19.0	0.557	5.04	10.01	422.5	199.6	0.84	15.0	28.0
	1.79	97.0	23	0.2	30	19.0	0.542	5.04	10.01	426.6	199.6	0.93	15.0	24.4
	1.77	93.9	23	0.3	30	19.0	0.560	5.04	9.99	420.8	199.2	0.93	15.0	35.7
17	1.78	95.5	48	0	30	19.0	0.550	5.04	10.00	423.8	199.4	0.58	5.0	25.2
	1.78	94.8	48	0.1	30	19.0	0.554	5.04	9.99	422.3	199.2	0.82	15.0	22.8
	1.78	95.3	48	0.2	30	19.0	0.551	5.04	9.99	423.1	199.2	0.84	15.0	23.3
	1.79	95.1	48	0.3	30	19.0	0.553	5.04	9.99	422.8	199.2	1.00	15.0	23.8
18	1.78	95.5	87	0	30	19.0	0.543	5.04	10.00	423.9	199.4	0.67	5.2	30.5
	1.79	96.2	87	0.1	30	19.0	0.547	5.04	10.01	425.3	199.6	0.83	15.0	28.6
	1.79	96.1	87	0.2	30	19.0	0.547	5.04	10.00	424.8	199.4	0.85	15.0	28.3
	1.79	96.8	87	0.3	30	19.0	0.543	5.04	10.01	426.3	199.6	0.95	15.0	29.7
19	1.60	30.6	23	0	0	8.0	0.722	5.05	9.99	347.4	199.9	2.68	1.6	335.0
	1.60	30.5	23	0.5	0	8.0	0.724	5.05	9.98	346.6	199.7	5.53	2.4	460.8
	1.60	30.6	23	0.75	0	8.0	0.723	5.05	9.96	346.1	199.3	5.62	3.6	468.0
	1.60	30.6	23	1.0	0	8.0	0.723	5.05	9.97	346.4	199.5	6.42	5.0	428.0
20	1.62	30.6	23	0	30	7.8	0.705	5.04	9.90	347.1	198.1	1.24	1.2	103.3
	1.61	30.4	23	0.1	30	7.8	0.710	5.05	9.97	348.4	199.5	2.10	2.4	87.5
	1.60	29.7	23	0.2	30	7.8	0.727	5.05	10.07	348.5	201.5	2.20	2.8	100.0
	1.60	29.5	23	0.3	30	7.8	0.730	5.05	10.08	348.2	201.7	2.38	2.4	119.0
21	1.59	49.9	50	0	0	13.2	0.731	5.05	10.00	362.5	200.1	1.92	1.7	148.6
	1.60	50.0	50	0.2	0	13.2	0.730	5.05	9.99	362.3	199.9	4.40	5.0	354.8
	1.60	50.0	50	0.4	0	13.2	0.731	5.05	9.98	361.9	199.7	4.45	1.8	517.4
	1.60	50.0	50	0.6	0	13.2	0.736	5.05	10.00	362.7	200.1	4.80	5.0	400.0

表-4.1 三軸圧縮試験結果(4)

No	ρ_s (g/cm ³)	Sr (%)	T (°C)	σ_3 (Mpa)	Ms (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm ³)	q _r (Mpa)	ε_t (%)	E ₅₀ (Mpa)
22	1.59	49.7	87	0	0	13.2	0.735	5.05	10.01	362.1	199.9	2.18	1.4	340.4
	1.59	49.8	87	0.2	0	13.2	0.732	5.05	9.99	361.9	199.9	4.05	2.5	333.3
	1.59	49.7	87	0.4	0	13.2	0.734	5.05	9.99	361.5	200.1	4.20	2.6	323.0
	1.59	49.9	87	0.6	0	13.2	0.732	5.05	10.00	362.3	200.3	4.70	2.2	470.0
23	1.60	49.4	50	0	30	12.9	0.722	5.05	10.01	363.8	200.3	1.02	1.5	82.9
	1.60	49.4	50	0.2	30	12.9	0.723	5.05	10.00	363.3	200.1	2.30	15.0	127.8
	1.60	49.3	50	0.4	30	12.9	0.723	5.05	9.99	362.9	199.9	2.40	15.0	141.1
	1.60	49.4	50	0.6	30	12.9	0.722	5.05	10.00	363.4	200.1	2.48	15.0	248.0
24	1.60	49.2	87	0	30	12.9	0.725	5.05	9.98	362.2	199.7	0.95	1.6	121.2
	1.60	49.3	87	0.2	30	12.9	0.724	5.05	10.01	363.4	200.3	2.08	15.0	189.0
	1.60	49.5	87	0.4	30	12.9	0.720	5.05	10.00	363.8	200.1	2.30	15.0	383.3
	1.60	49.3	87	0.6	30	12.9	0.723	5.05	9.99	362.9	199.9	2.70	15.0	168.8
25	1.63	68.8	23	0	0	17.2	0.691	5.04	9.90	378.8	197.4	1.68	2.4	175.0
	1.63	68.6	23	0.1	0	17.2	0.694	5.04	9.91	378.6	197.6	2.08	3.8	86.7
	1.63	68.1	23	0.2	0	17.2	0.699	5.04	9.93	378.3	198.0	2.26	4.0	94.1
	1.63	68.8	23	0.3	0	17.2	0.691	5.04	9.93	380.0	198.0	2.32	3.6	105.5
26	1.61	66.7	23	0	30	16.8	0.719	5.04	10.10	379.1	201.3	0.40	3.2	76.9
	1.62	66.0	23	0.1	30	16.8	0.704	5.04	10.02	379.2	199.8	0.53	15.0	24.0
	1.62	66.4	23	0.15	30	16.8	0.700	5.04	9.98	378.7	199.0	0.60	15.0	27.3
	1.63	66.6	23	0.2	30	16.8	0.697	5.04	9.94	379.6	199.2	0.65	15.0	29.5
27	1.58	73.6	50	0	0	19.8	0.745	5.05	9.99	380.3	199.9	1.25	2.7	96.6
	1.58	73.4	50	0.1	0	19.8	0.746	5.05	9.99	380.0	199.9	1.70	4.0	123.1
	1.58	73.2	50	0.2	0	19.8	0.748	5.05	9.99	379.6	199.9	1.85	2.8	177.9
	1.58	73.6	50	0.3	0	19.8	0.744	5.05	10.01	381.2	200.3	2.21	6.0	164.9
28	1.59	74.0	87	0	0	19.8	0.740	5.05	10.01	382.1	200.3	1.25	2.8	107.0
	1.59	73.6	87	0.1	0	19.8	0.736	5.05	10.00	382.5	200.1	1.68	3.0	120.0
	1.59	73.8	87	0.2	0	19.8	0.738	5.05	10.00	382.1	200.1	2.00	3.5	181.8
	1.59	73.6	87	0.3	0	19.8	0.736	5.05	9.98	381.7	199.7	2.10	3.5	175.0

表-4.1 三軸圧縮試験結果(5)

No.	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	T (°C)	σ_3 (Mpa)	M _s (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm ³)	q _t (Mpa)	ε_t (%)	E ₅₀ (Mpa)
29	1.60	73.6	50	0	30	19.4	0.729	5.05	9.99	382.4	199.9	0.53	2.7	45.0
	1.59	73.4	50	0.1	30	19.4	0.732	5.05	9.99	381.9	199.9	0.85	15.0	70.8
	1.60	73.5	50	0.2	30	19.4	0.731	5.05	10.00	382.5	200.1	0.95	15.0	79.1
	1.59	73.3	50	0.3	30	19.4	0.732	5.05	10.00	382.1	200.1	1.00	15.0	66.6
30	1.59	73.4	87	0	30	19.4	0.731	5.05	10.00	382.4	200.1	0.62	3.4	55.9
	1.59	73.4	87	0.1	30	19.4	0.732	5.05	9.99	381.9	199.9	0.73	15.0	91.2
	1.59	73.3	87	0.2	30	19.4	0.732	5.05	10.00	382.1	200.1	0.83	15.0	83.0
	1.59	73.3	87	0.3	30	19.4	0.732	5.05	10.01	382.5	200.3	0.87	15.0	70.9
31	1.59	98.5	23	0	0	26.4	0.741	5.01	10.02	404.8	201.3	0.38	4.0	17.3
	1.57	96.8	23	0.1	0	26.4	0.754	5.06	10.03	402.2	201.5	0.49	15.0	18.8
	1.57	96.6	23	0.15	0	26.4	0.756	5.06	10.04	402.2	201.7	0.52	15.0	21.6
	1.58	97.1	23	0.2	0	26.4	0.752	5.06	9.98	400.7	200.5	0.62	15.0	17.2
32	1.59	98.6	50	0	0	26.4	0.741	5.05	10.00	402.5	200.1	0.46	7.1	32.8
	1.59	98.3	50	0.1	0	26.4	0.743	5.05	10.00	402.1	200.1	0.68	15.0	24.2
	1.59	98.4	50	0.2	0	26.4	0.742	5.05	9.99	401.1	199.9	0.72	15.0	24.2
	1.59	98.3	50	0.3	0	26.4	0.743	5.05	10.00	402.1	200.1	0.81	15.0	33.7
33	1.58	98.2	87	0	0	26.4	0.744	5.05	9.99	401.5	199.9	0.46	6.5	11.5
	1.58	98.1	87	0.1	0	26.4	0.745	5.05	10.01	402.0	200.3	0.74	15.0	23.1
	1.58	98.2	87	0.2	0	26.4	0.744	5.05	10.00	401.8	200.1	0.79	15.0	30.3
	1.58	98.1	87	0.3	0	26.4	0.744	5.05	10.01	402.1	200.3	0.86	15.0	39.0
34	1.57	94.9	23	0	30	25.9	0.755	5.07	10.02	404.9	203.7	0.22	6.0	11.0
	1.57	94.1	23	0.05	30	25.9	0.761	5.15	10.01	403.0	203.5	0.31	15.0	6.2
	1.58	95.9	23	0.075	30	25.9	0.747	5.09	10.01	406.3	203.5	0.345	15.0	6.3
	1.57	94.2	23	0.1	30	25.9	0.760	5.09	9.99	402.4	203.1	0.35	15.0	6.7
35	1.59	97.7	50	0	30	25.9	0.733	5.05	9.99	402.3	199.9	0.23	7.3	7.6
	1.59	97.6	50	0.1	30	25.9	0.734	5.05	9.99	402.1	200.3	0.29	15.0	13.8
	1.59	97.7	50	0.2	30	25.9	0.734	5.05	10.01	403.0	200.1	0.31	15.0	15.5
	1.60	98.1	50	0.3	30	25.9	0.731	5.05	9.99	402.9	200.3	0.38	15.0	12.7

表-4.1 三軸圧縮試験結果(6)

No.	ρ_a (g/cm ³)	S _r (%)	T (°C)	σ_3 (Mpa)	M _s (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm ³)	a _r (Mpa)	ε_f (%)	E ₃₀ (Mpa)
36	1.59	97.2	87	0	30	25.9	0.737	5.05	10.00	401.8	200.0	0.21	7.2	7.0
	1.59	97.6	87	0.1	30	25.9	0.735	5.05	10.01	402.8	200.3	0.27	15.0	9.3
	1.59	97.3	87	0.2	30	25.9	0.737	5.05	9.99	401.5	199.9	0.34	15.0	17.0
	1.59	97.7	87	0.3	30	25.9	0.734	5.05	9.99	402.2	199.9	0.41	15.0	31.5
37	1.98	48.8	50	0	0	7.0	0.396	5.05	9.98	424.0	199.7	10.06	1.3	1127.1
	1.98	48.8	50	0.5	0	7.0	0.396	5.05	10.01	425.2	200.3	17.20	2.0	2150.0
	1.98	49.3	50	1.0	0	7.0	0.392	5.05	10.00	426.0	200.1	17.60	2.1	2200.0
	1.97	48.2	50	2.0	0	7.0	0.402	5.05	10.01	423.6	200.3	19.90	1.7	2487.5
38	1.99	47.7	50	0	30	6.7	0.389	5.05	9.97	424.7	199.5	5.23	1.4	352.9
	1.98	47.3	50	0.25	30	6.7	0.392	5.05	9.98	424.2	199.7	9.15	1.6	762.5
	1.98	47.2	50	0.5	30	6.7	0.392	5.05	10.01	425.2	200.3	9.35	2.2	850.0
	1.98	47.7	50	1.0	30	6.7	0.389	5.05	10.01	426.4	200.3	10.45	2.5	804.6
39	1.99	47.5	87	0	30	6.7	0.390	5.05	9.99	425.2	200.3	5.58	0.8	547.3
	1.99	47.8	87	0.5	30	6.7	0.388	5.05	10.01	426.7	200.1	10.40	2.2	742.8
	1.99	47.5	87	1.0	30	6.7	0.390	5.05	10.00	425.6	199.7	10.80	2.3	771.4
	1.99	48.0	87	2.0	30	6.7	0.386	5.05	9.98	425.9	200.1	122.0	3.0	871.4
40	1.96	65.7	23	0	0	9.8	0.412	5.07	9.98	433.5	201.3	7.63	1.2	1467.3
	1.96	66.4	23	1.0	0	9.8	0.408	5.07	9.99	435.2	201.5	12.40	2.2	1240.0
	1.95	65.6	23	2.0	0	9.8	0.413	5.07	9.98	433.3	201.3	18.95	3.4	1162.5
	1.95	65.6	23	3.0	0	9.8	0.413	5.07	9.97	432.9	201.1	15.20	3.8	1267.0
41	1.98	66.3	23	0	30	9.4	0.392	5.06	10.12	442.6	203.4	4.51	1.8	375.8
	1.99	67.2	23	0.5	30	9.4	0.387	5.06	10.07	442.1	202.3	6.05	2.4	504.1
	2.01	69.0	23	1.0	30	9.4	0.376	5.06	10.07	442.8	201.1	6.85	2.8	570.8
	2.00	67.7	23	1.5	30	9.4	0.384	5.06	10.06	442.7	202.1	7.25	3.0	604.2
42	1.97	72.1	50	0	0	10.4	0.399	5.05	10.00	437.5	200.1	8.14	1.5	956.3
	2.00	75.1	50	0.5	0	10.4	0.383	5.05	9.98	441.7	199.7	11.80	1.6	983.3
	1.99	73.9	50	1.0	0	10.4	0.389	5.05	9.99	440.2	199.9	15.00	2.1	1363.6
	1.99	74.1	50	2.0	0	10.4	0.388	5.05	10.01	441.3	200.3	17.70	3.5	1264.3

表-4.1 三軸圧縮試験結果(7)

No.	ρ_d (g/cm³)	Sr (%)	T (°C)	σ_3 (Mpa)	Ms (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm³)	q_t (Mpa)	ε_t (%)	E_{50} (Mpa)
43	2.00	75.1	87	0	0	10.4	0.383	5.05	9.98	441.7	199.7	8.98	1.9	538.1
	1.99	73.6	87	0.5	0	10.4	0.391	5.05	10.01	440.5	200.3	15.80	2.2	1436.4
	2.00	75.1	87	1.0	0	10.4	0.383	5.05	9.99	442.1	199.9	16.00	2.5	1383.3
	2.00	74.8	87	2.0	0	10.4	0.384	5.05	9.98	441.2	199.7	17.80	2.6	1369.2
44	1.98	83.8	23	0	0	11.9	0.393	5.08	9.99	450.3	202.3	6.70	1.4	858.9
	1.98	83.4	23	1.0	0	11.9	0.395	5.08	9.98	449.2	202.1	10.60	2.4	757.1
	1.97	82.0	23	2.0	0	11.9	0.401	5.08	9.96	446.1	201.7	10.90	2.8	990.9
	1.98	82.7	23	3.0	0	11.9	0.398	5.08	9.98	448.1	202.1	12.15	2.6	1104.5
45	1.99	80.7	23	0	30	11.4	0.391	5.05	10.06	446.7	201.3	3.89	3.4	208.3
	1.98	80.0	23	0.5	30	11.4	0.394	5.05	10.10	447.4	202.1	4.70	5.0	335.7
	1.99	80.6	23	1.0	30	11.4	0.391	5.05	10.09	448.0	201.9	5.15	5.0	367.9
	1.98	80.5	23	2.0	30	11.4	0.392	5.05	10.08	447.3	201.7	6.00	7.0	400.0
46	1.97	95.4	23	0	0	13.9	0.403	5.06	10.02	452.8	201.3	5.73	2.6	349.4
	1.97	95.1	23	0.5	0	13.9	0.404	5.06	10.00	451.5	200.9	6.95	3.0	386.1
	1.96	94.6	23	1.0	0	13.9	0.406	5.06	9.99	450.3	200.7	7.65	5.0	382.5
	1.96	93.8	23	2.0	0	13.9	0.410	5.06	9.98	448.7	200.5	8.10	6.0	368.2
47	1.96	94.1	50	0	0	13.9	0.408	5.05	9.97	447.0	199.5	5.54	2.8	234.2
	1.96	94.7	50	0.5	0	13.9	0.406	5.05	9.96	447.3	199.3	9.90	3.2	707.1
	1.96	94.0	50	1.0	0	13.9	0.409	5.05	9.98	447.2	199.7	11.00	2.6	733.3
	1.96	94.1	50	2.0	0	13.9	0.408	5.05	9.98	447.4	199.7	12.10	3.0	934.6
48	1.97	95.2	87	0	0	13.9	0.404	5.05	9.95	447.5	199.1	6.11	3.1	262.0
	1.97	94.9	87	0.5	0	13.9	0.405	5.05	9.96	447.6	199.3	9.50	2.5	558.8
	1.96	94.5	87	1.0	0	13.9	0.407	5.05	9.96	447.1	199.3	11.10	3.3	652.9
	1.96	94.0	87	2.0	0	13.9	0.409	5.05	9.98	447.3	199.7	11.50	3.0	718.8
49	1.98	93.4	23	0	30	13.4	0.397	5.08	10.02	456.3	202.9	2.46	4.0	150.0
	1.98	93.5	23	0.25	30	13.4	0.396	5.08	10.03	456.9	203.1	3.07	8.0	139.5
	1.97	93.0	23	0.50	30	13.4	0.399	5.08	10.01	455.3	202.7	3.30	9.0	143.4
	1.98	93.4	23	0.75	30	13.4	0.397	5.08	10.01	455.9	202.7	3.36	7.0	176.8

表-4.1 三軸圧縮試験結果(8)

No.	ρ_d (g/cm ³)	Sr (%)	T (°C)	σ_3 (Mpa)	Ms (%)	ω (%)	e (%)	d (cm)	h (cm)	m (g)	v (cm ³)	q_t (Mpa)	ε_t (%)	E_{50} (Mpa)
50	1.99	95.1	50	0	30	13.4	0.390	5.05	10.01	452.8	200.3	3.56	3.0	233.8
	1.98	93.6	50	0.25	30	13.4	0.396	5.05	10.00	450.3	200.1	4.80	6.0	228.5
	1.98	94.4	50	0.5	30	13.4	0.392	5.05	10.01	451.9	200.3	4.90	7.0	272.2
	1.98	94.0	50	0.75	30	13.4	0.394	5.05	10.01	451.4	200.3	5.15	6.0	286.1
51	1.98	94.5	87	0	30	13.4	0.392	5.05	10.01	452.0	200.3	2.84	4.8	93.4
	1.98	93.6	87	0.15	30	13.4	0.396	5.05	10.00	450.3	200.1	3.70	4.0	205.5
	1.98	94.6	87	0.5	30	13.4	0.392	5.05	9.99	451.3	199.9	4.40	5.3	220.0
	1.98	94.3	87	0.75	30	13.4	0.393	5.05	10.01	451.8	200.3	4.95	5.8	291.1

 ρ_d : 乾燥密度

Sr : 飽和度

T : 試験温度

 σ_3 : 側圧

Ms : ケイ砂混合率

 ω : 含水比

e : 間隙比

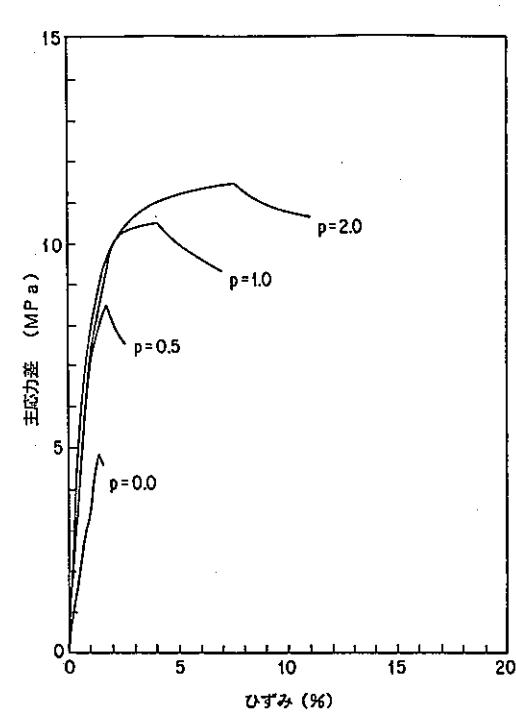
d : 直径

h : 高さ

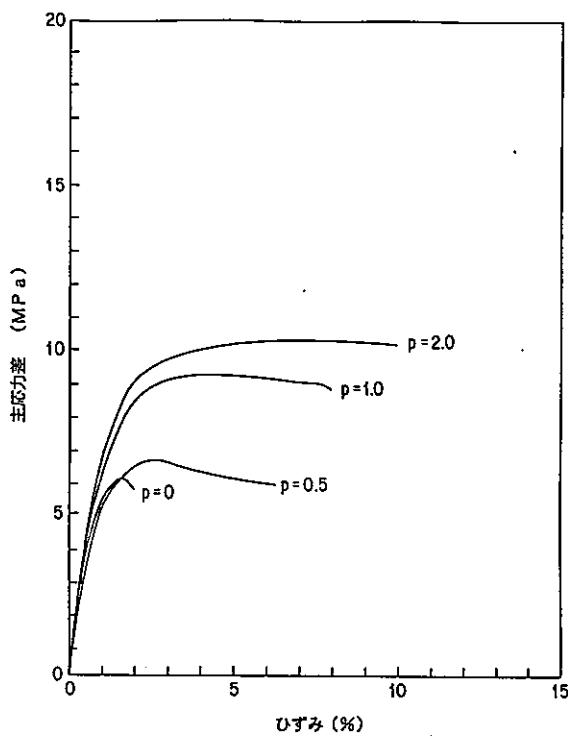
m : 重量

v : 体積

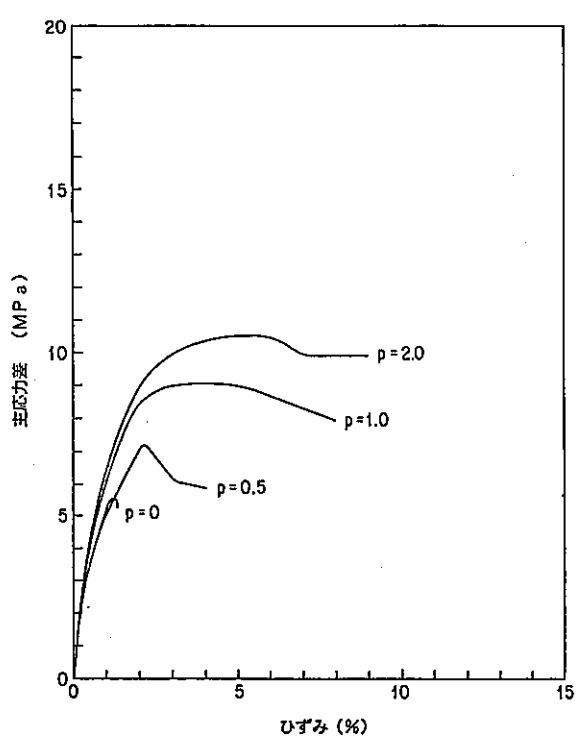
 q_t : 主応力差 ε_t : 破壊歪みE₅₀ : 弹性係数



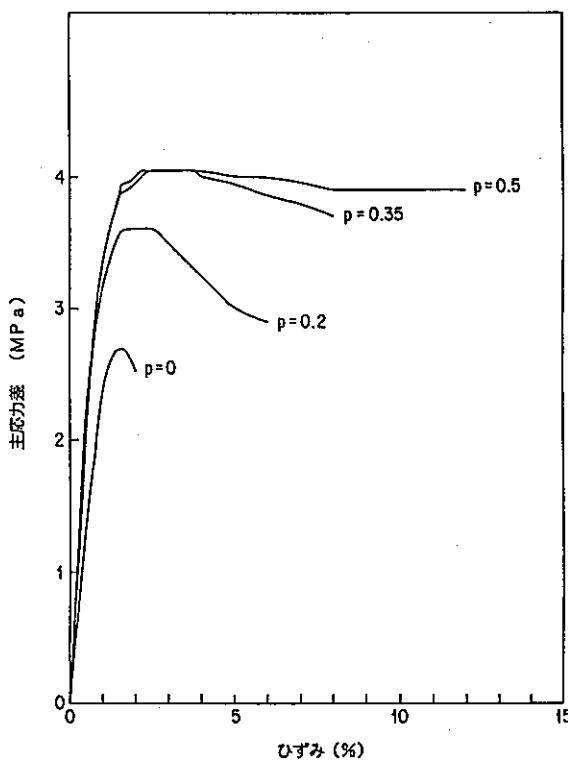
(No. 1)



(No. 2)



(No. 3)



(No. 4)

図-4.1 応力-ひずみ関係(1)

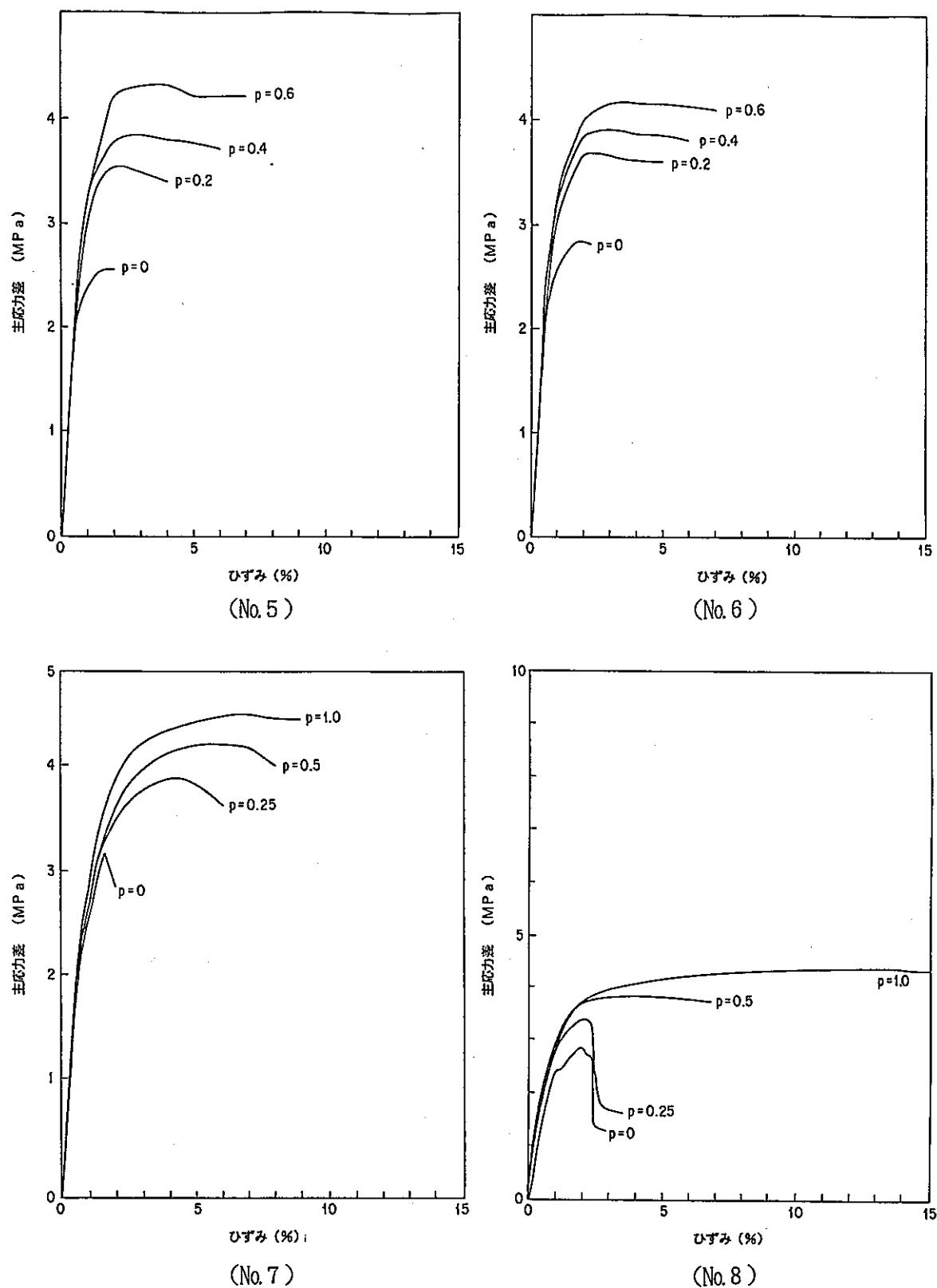


図-4.1 応力-ひずみ関係(2)

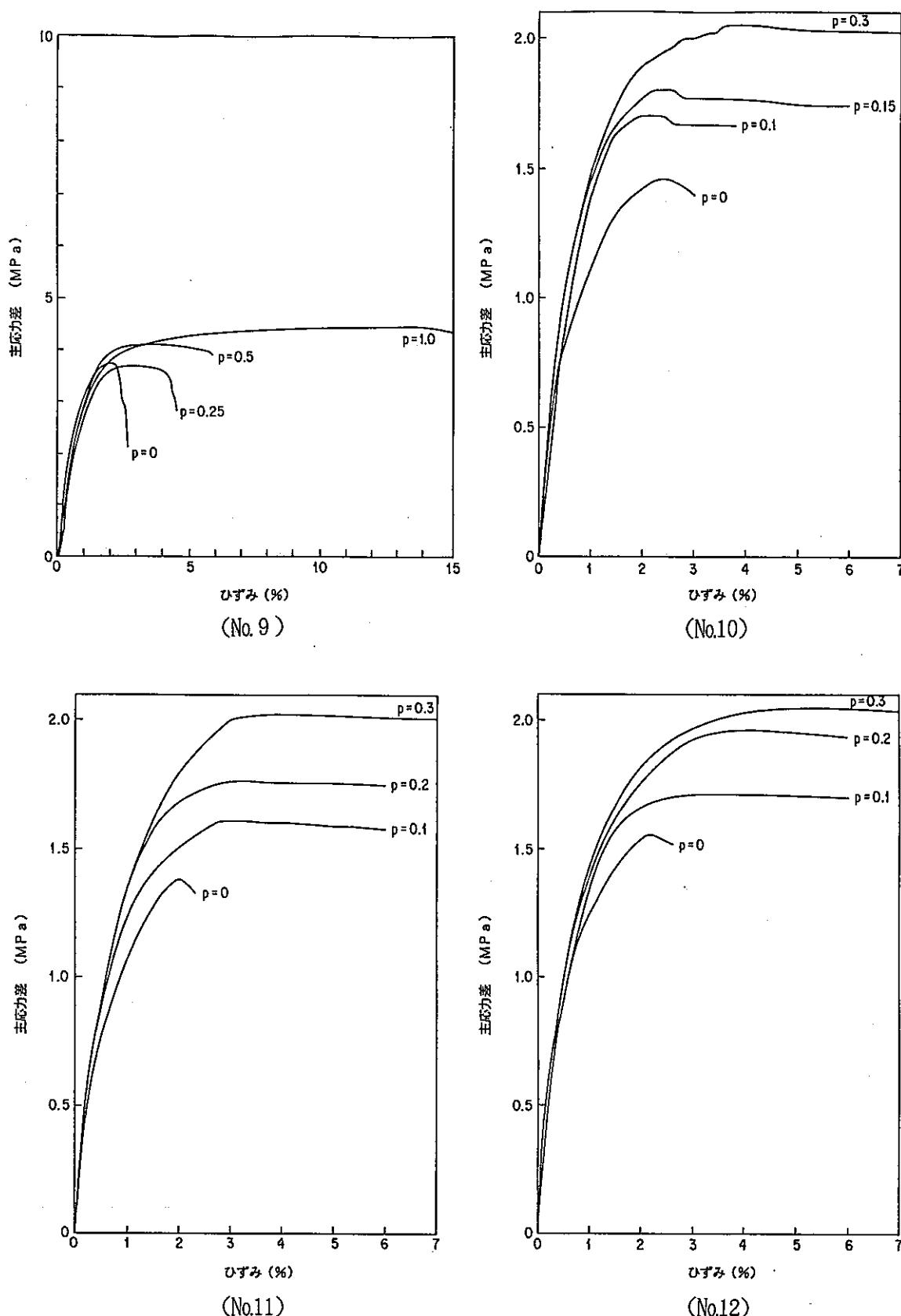


図-4.1 応力-ひずみ関係(3)

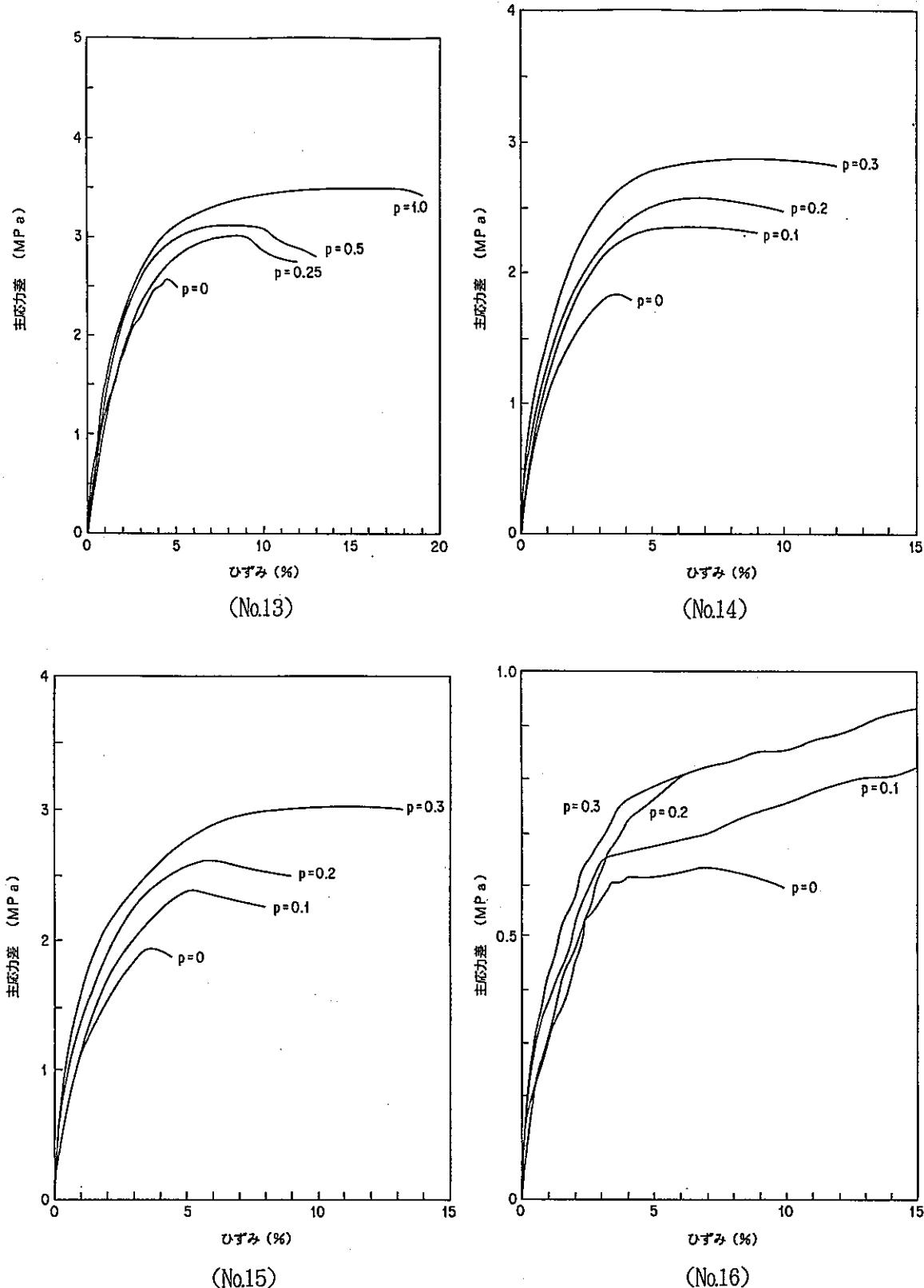


図-4.1 応力-ひずみ関係(4)

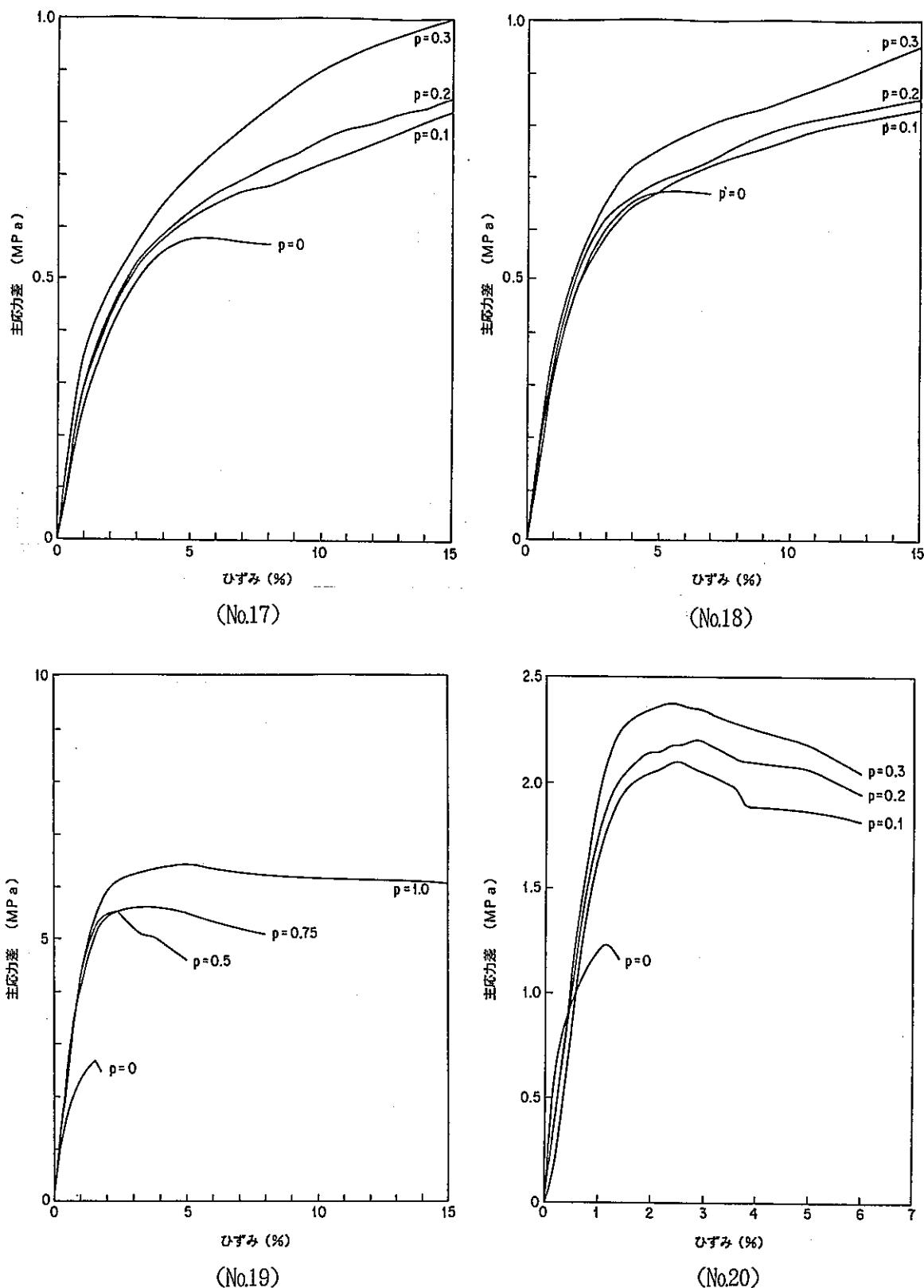


図-4.1 応力-ひずみ関係(5)

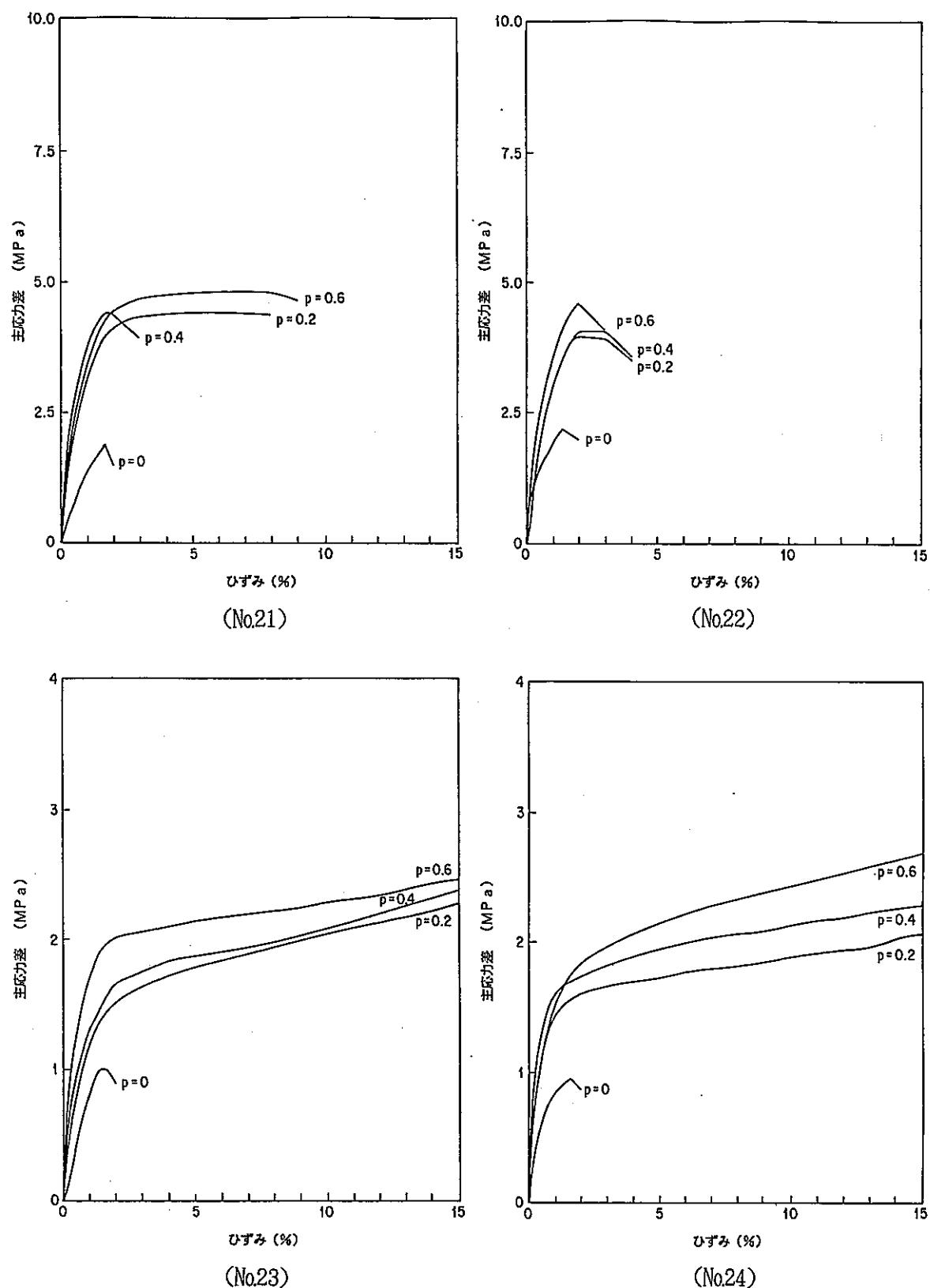


図-4.1 応力ーひずみ関係(6)

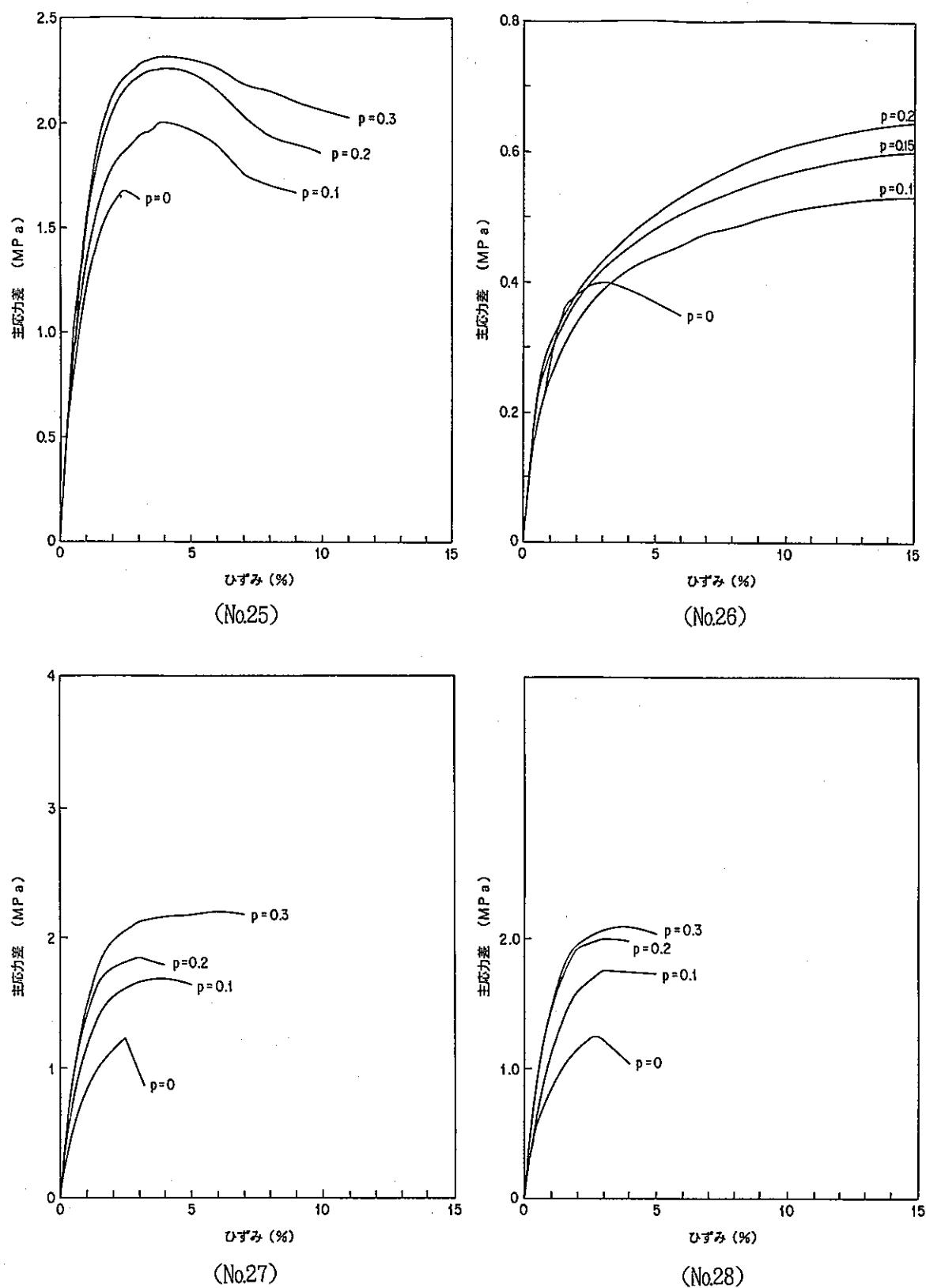


図-4.1 応力-ひずみ関係(7)

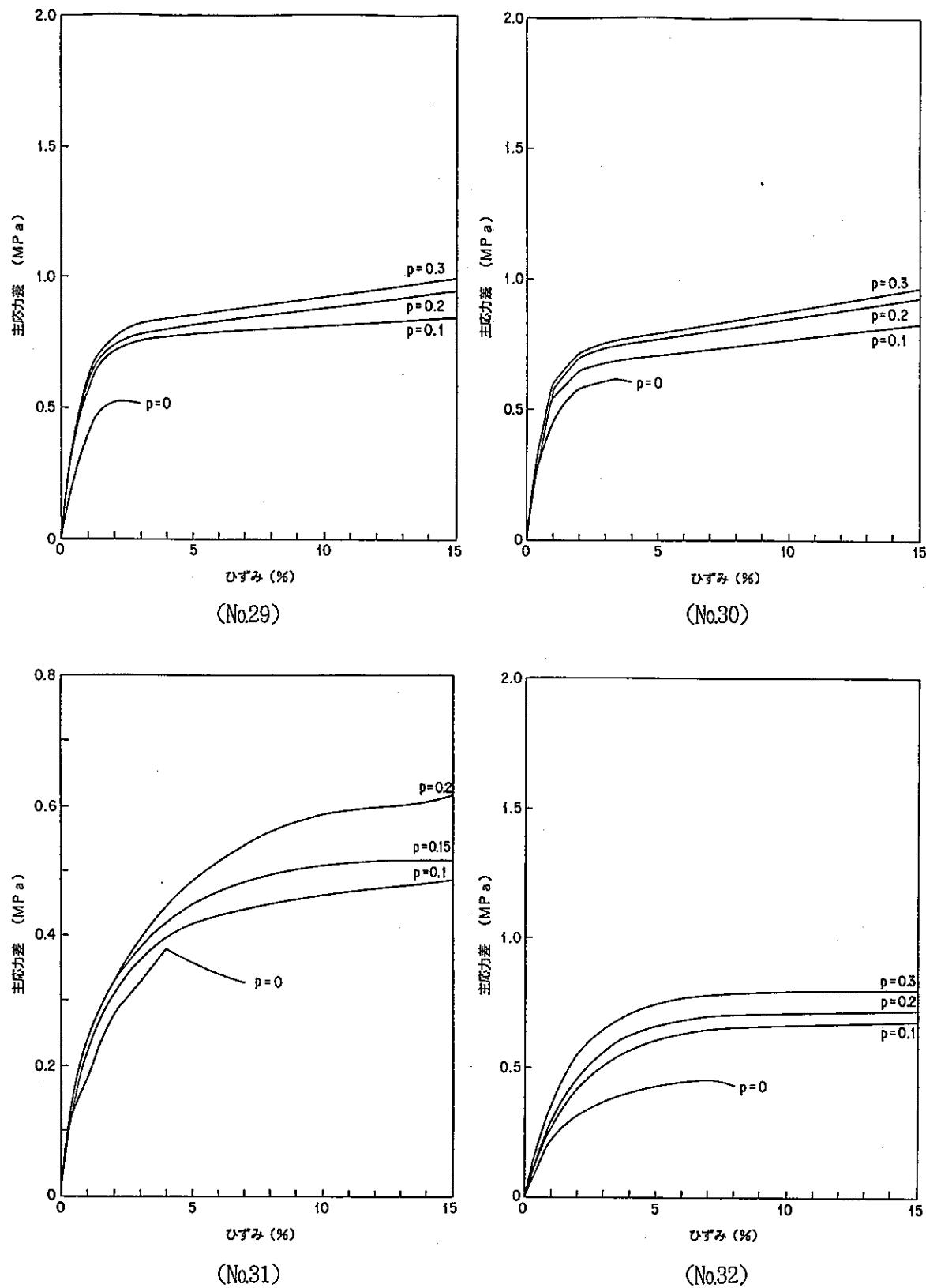


図-4.1 応力-ひずみ関係(8)

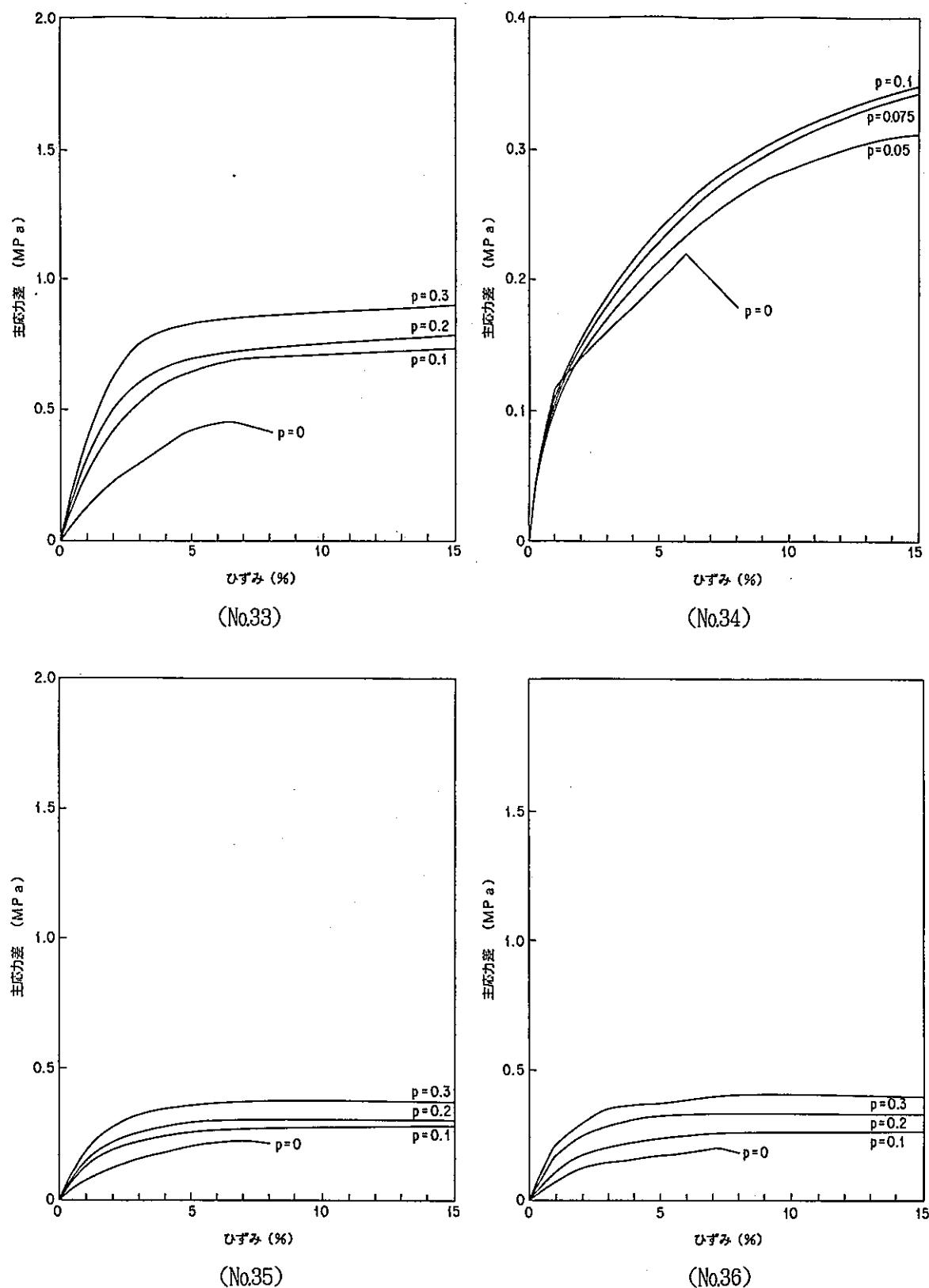


図-4.1 応力-ひずみ関係(9)

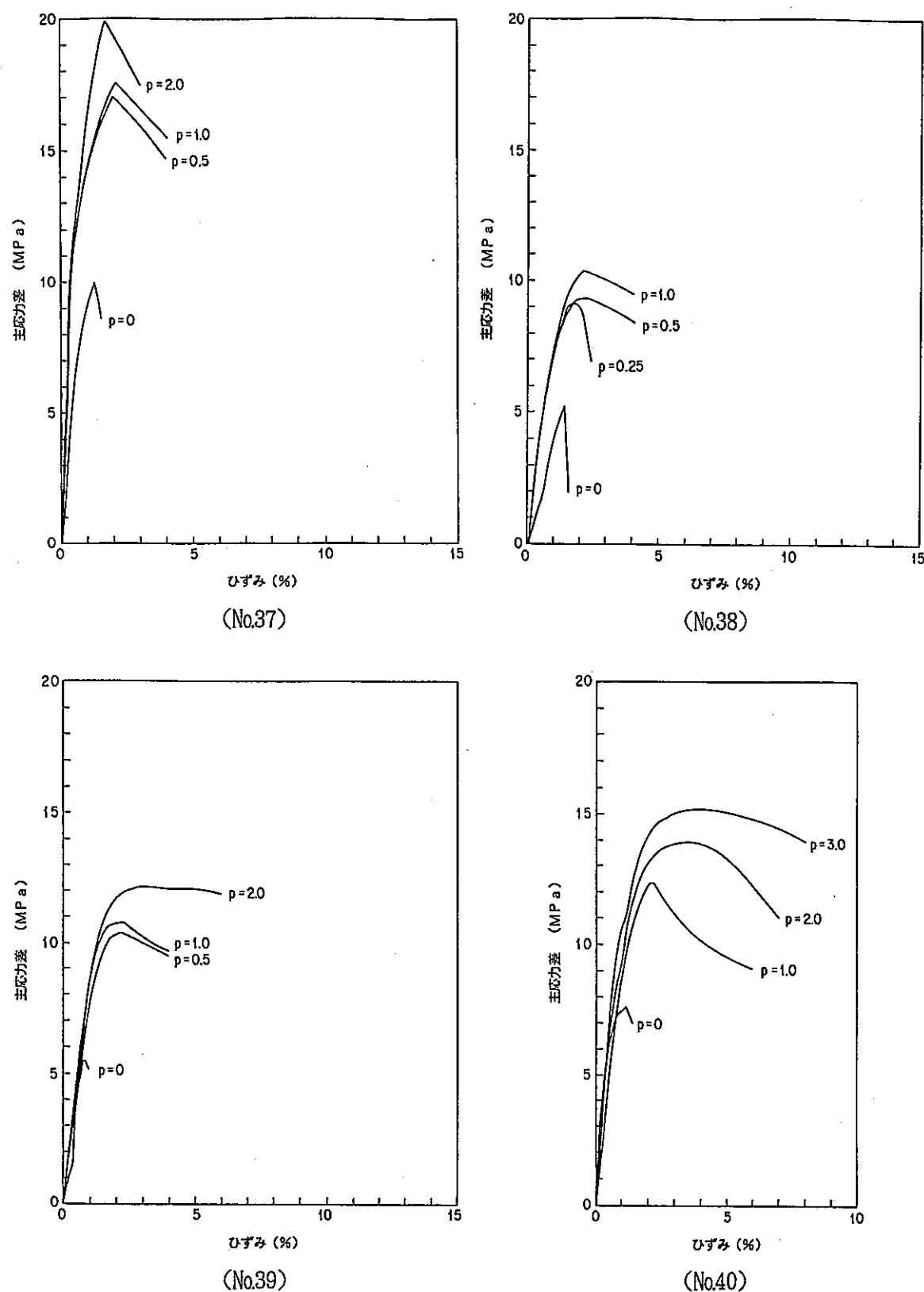


図-4.1 応力-ひずみ関係(10)

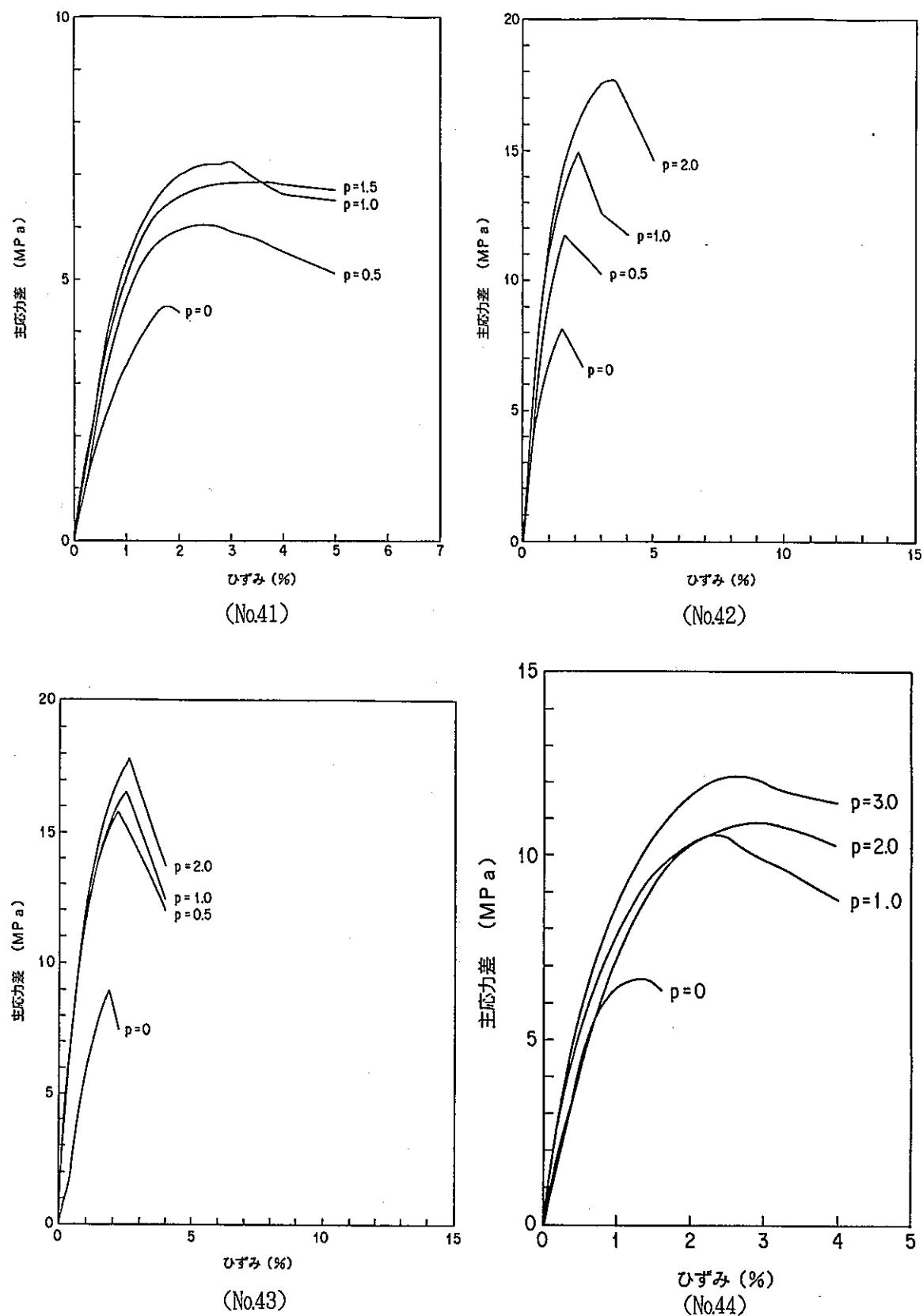
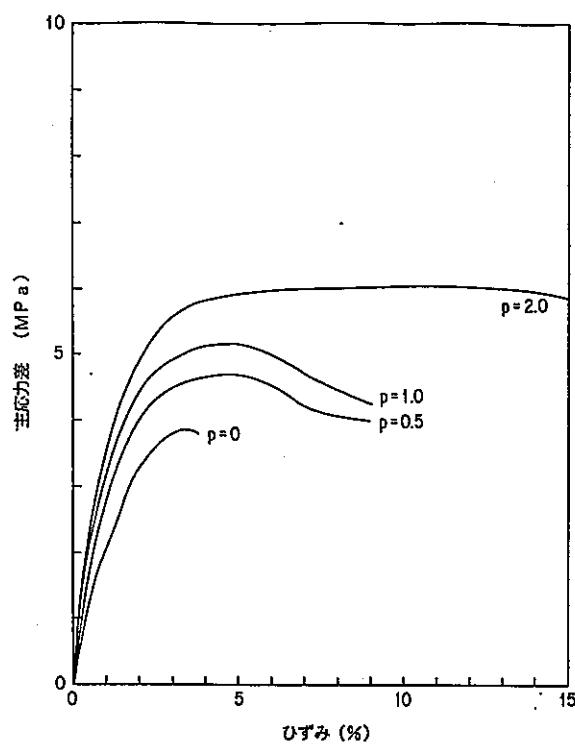
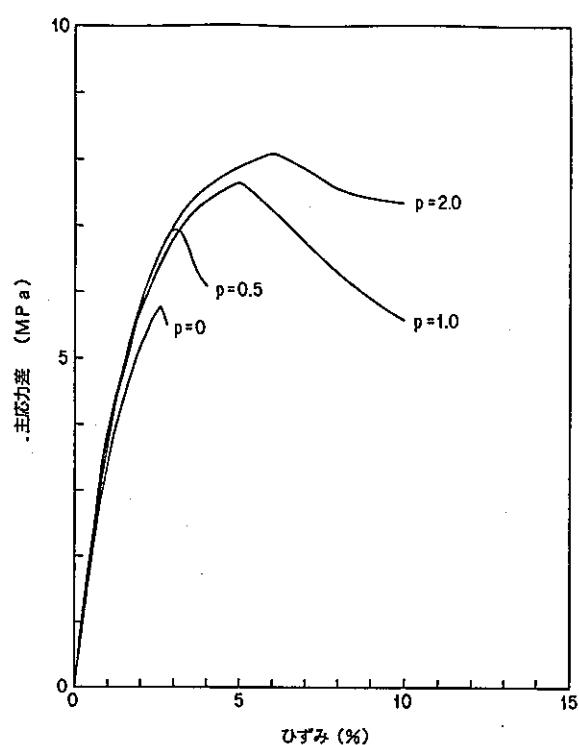


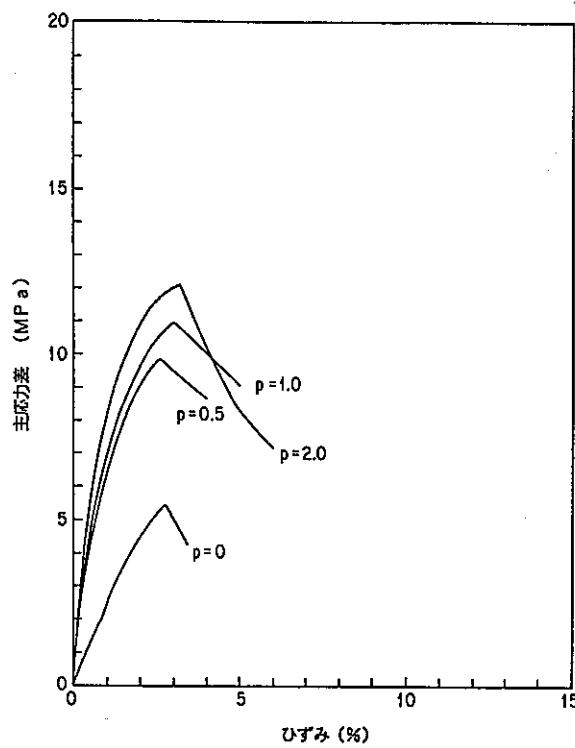
図-4.1 応力-ひずみ関係(1)



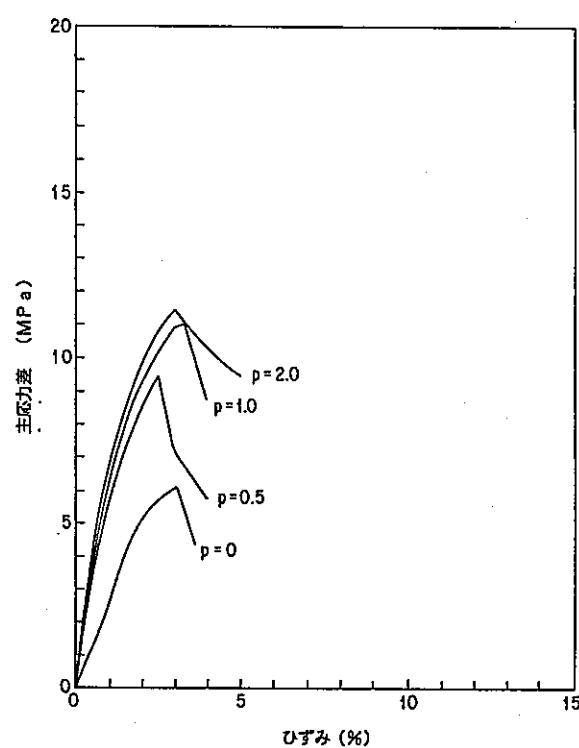
(No.45)



(No.46)



(No.47)



(No.48)

図-4.1 応力-ひずみ関係(2)

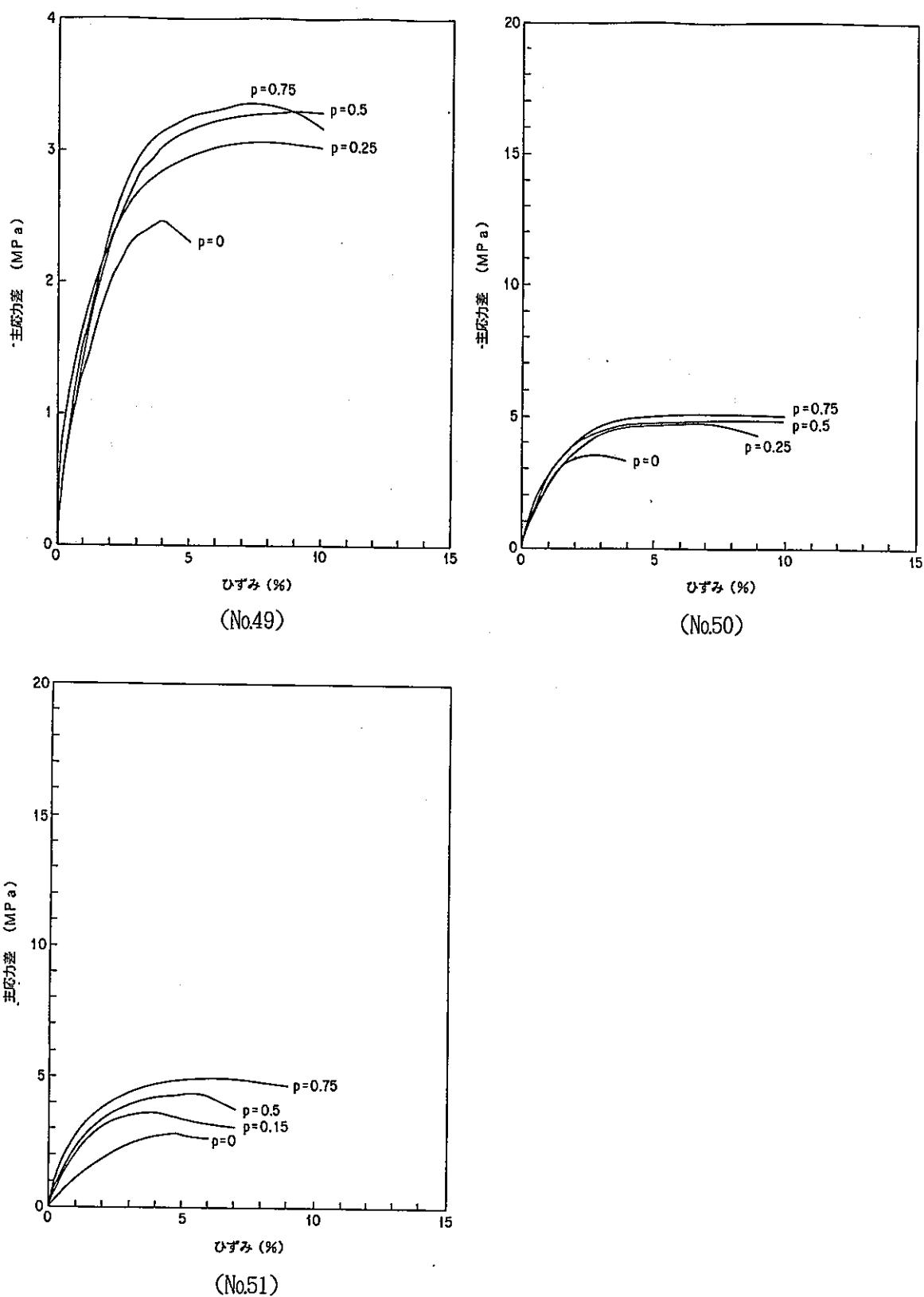


図-4.1 応力-ひずみ関係(3)

4.2 破壊応力

表-4.1より、破壊応力 q_f と側圧 σ_3 の関係を図-4.2に示す。側圧 σ_3 の増加にともない破壊応力 q_f が増加し、ケイ砂を混合した場合破壊応力 q_f は混入しないものに比べて低く、主応力差と類似した傾向を示している。

図-4.3(1)～(2)に破壊応力 q_f と乾燥密度 ρ_d の関係を示す。各条件下の試験とも乾燥密度 ρ_d が増加するにつれ破壊応力 q_f も増加することが分かる。主応力差 q と同様に空隙率の変化が影響していると考えられる。

図-4.4(1)～(3)に破壊応力 q_f と飽和度 S_r の関係を示す。飽和度 S_r が増加するにつれ、破壊応力 q_f が低下することが分かる。これは、水分の増加により圧縮ベントナイトが粘性土の性質に近づくことを示している。友田等[12]は、膨張性泥岩を粉碎し、所定の含水比を加え成形した試験体に対して一軸及び三軸圧縮試験を行い、その結果、含水比の増加にともない強度低下が生じることを報告している。同じように、圧縮ベントナイトの強度は飽和度の影響を強く受けることがいえる。

図-4.5(1)～(3)に破壊応力 q_f と温度 T の関係を示す。今回の条件下での試験では、温度 T の影響は他のパラメータに比べて顕著には現れていない。

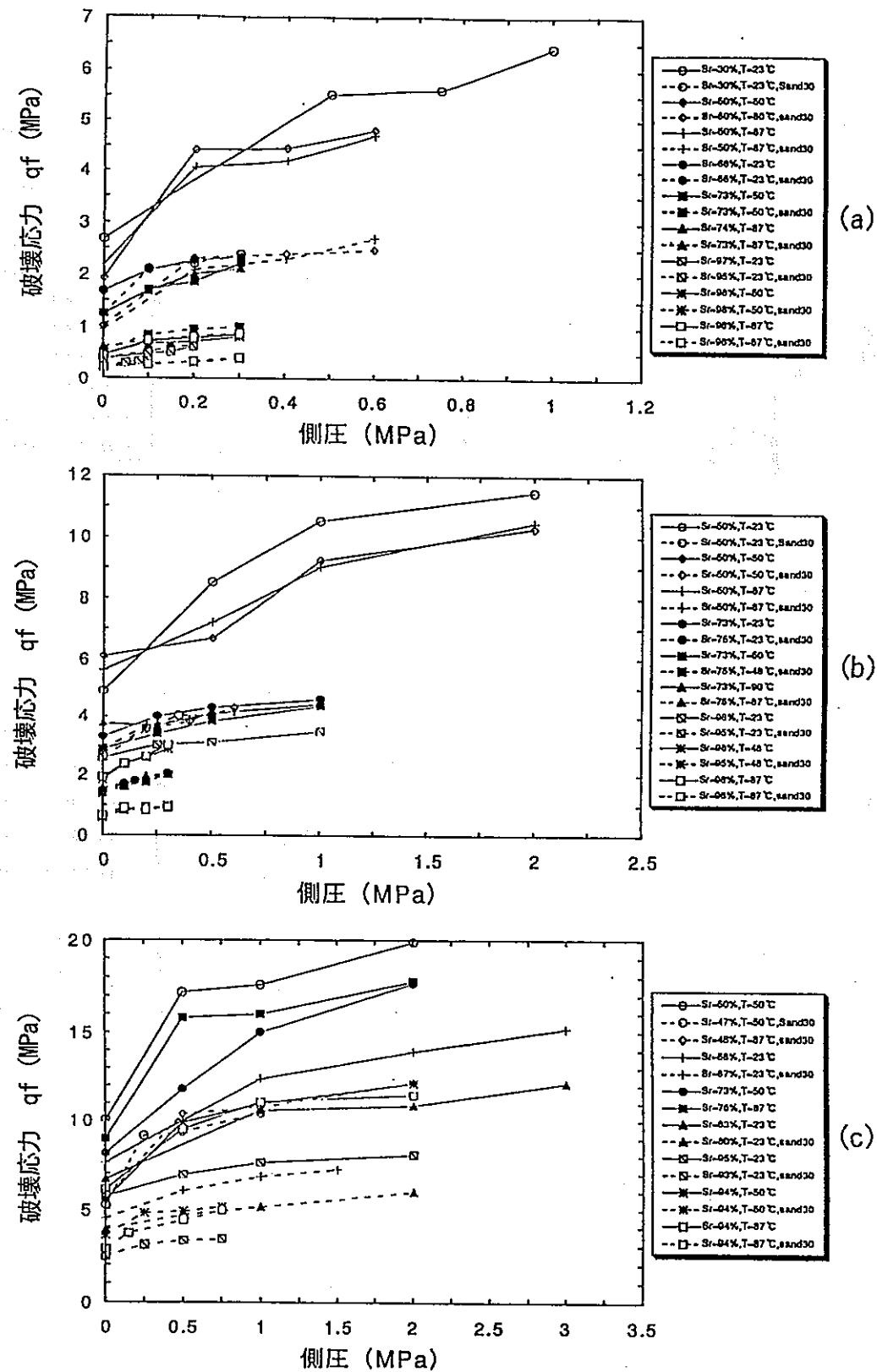


図-4.2 破壊応力-側圧関係

(乾燥密度(a)1.6(b)1.8(c)2.0)

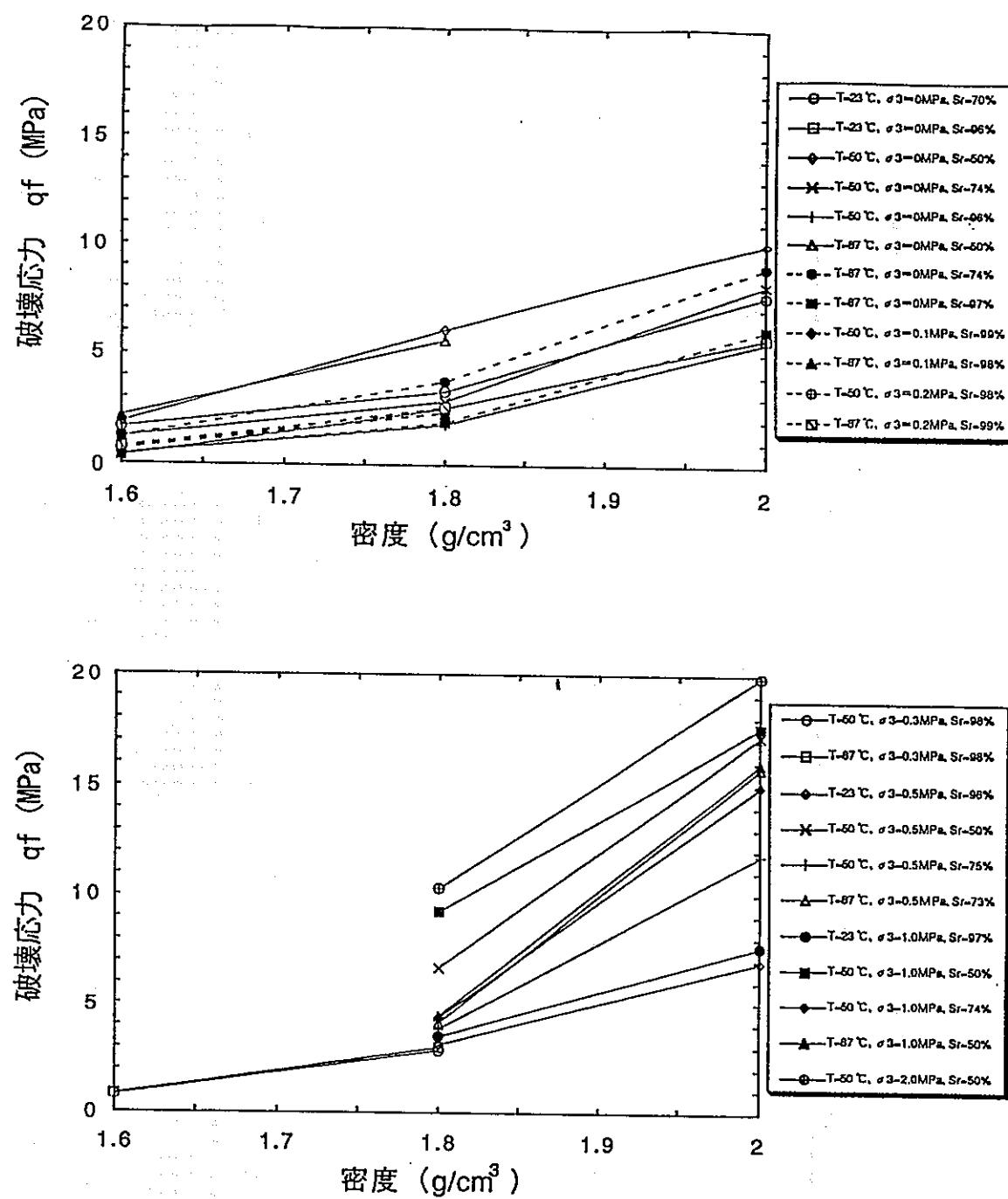


図-4.3 破壊応力-乾燥密度関係(1)
(ケイ砂混合なし)

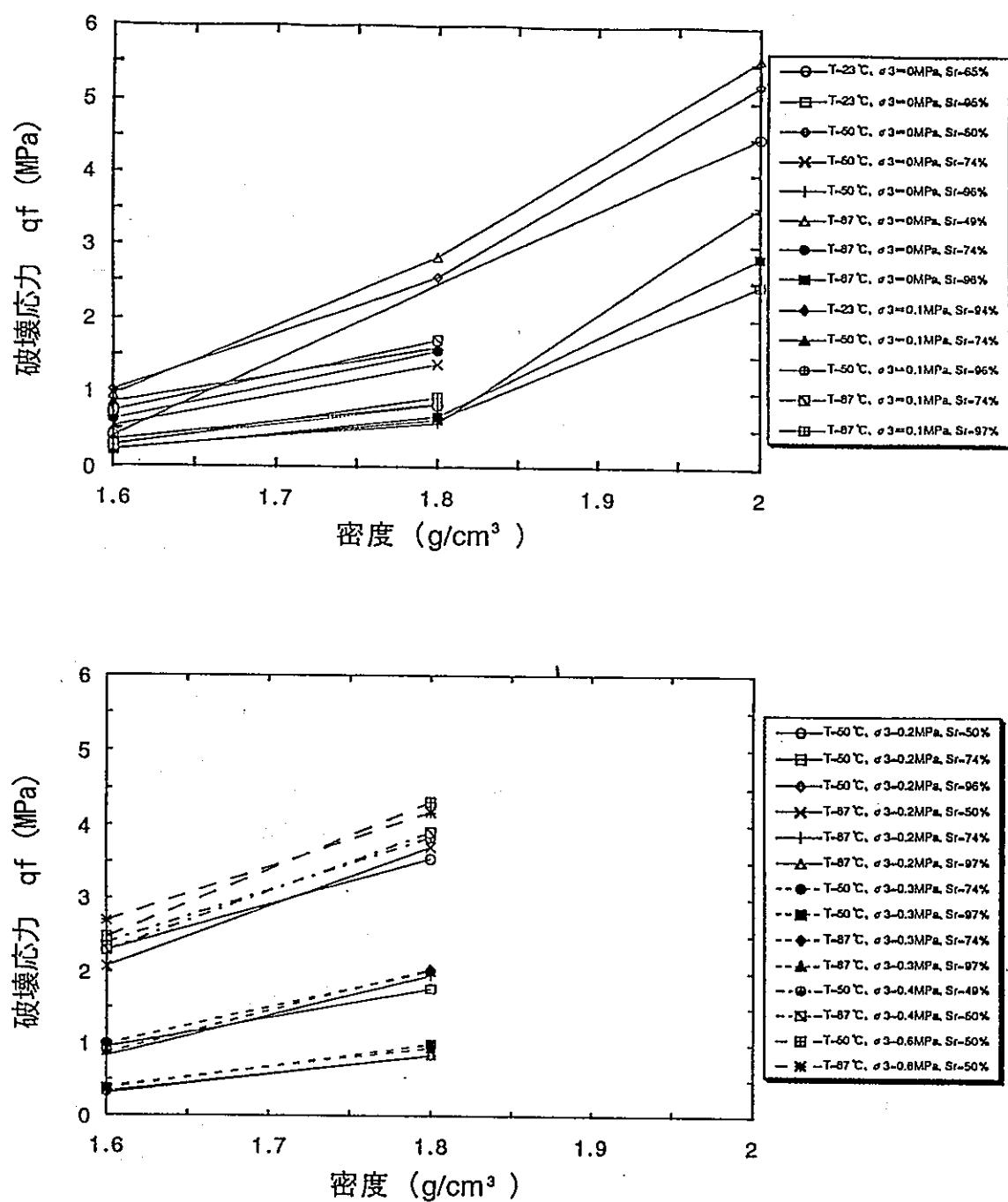


図-4.3 破壊応力-乾燥密度関係(2)
(ケイ砂混合あり)

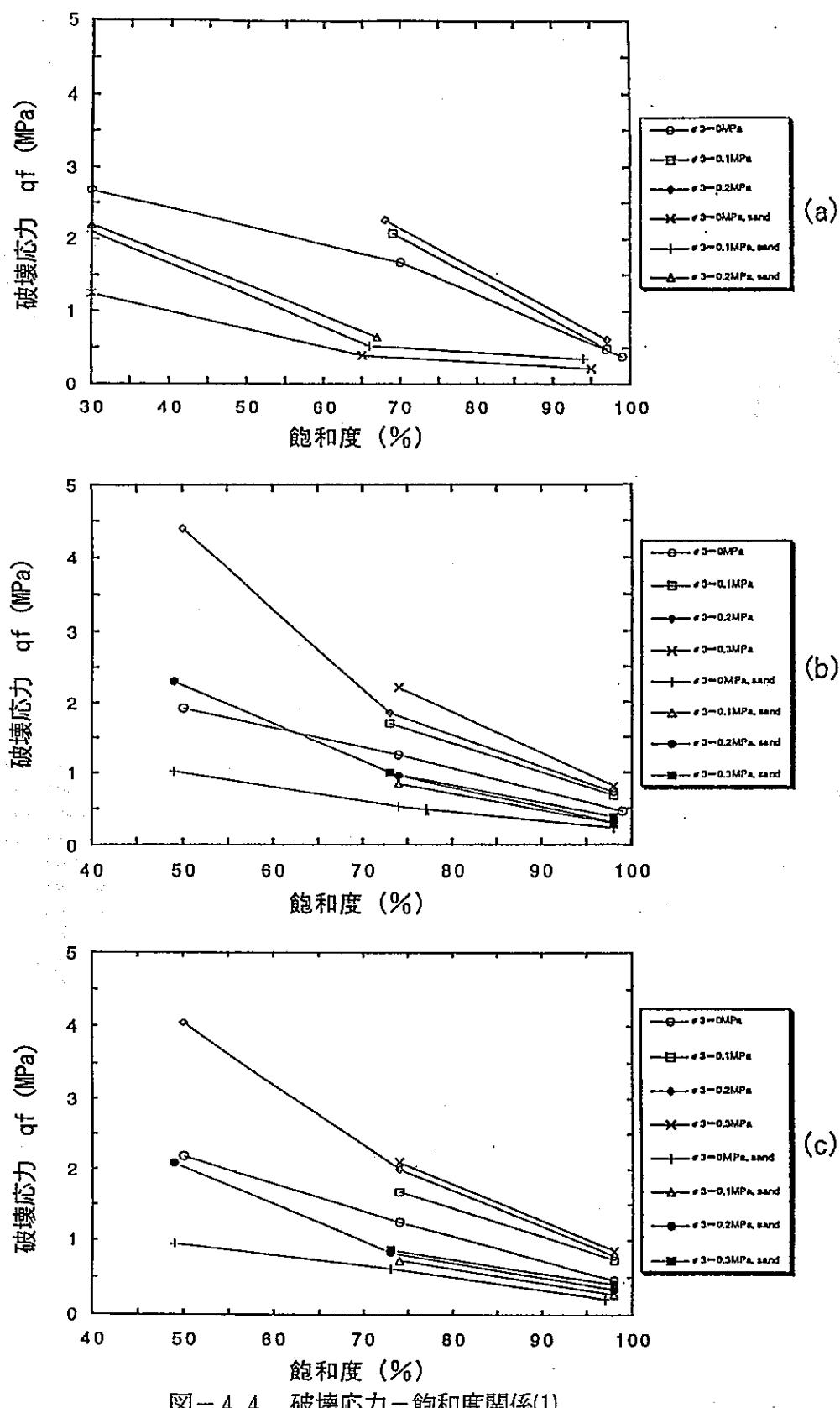


図-4.4 破壊応力-飽和度関係(1)

(乾燥密度1.6, 試験温度 (a)23°C (b)50°C (c)87°C)

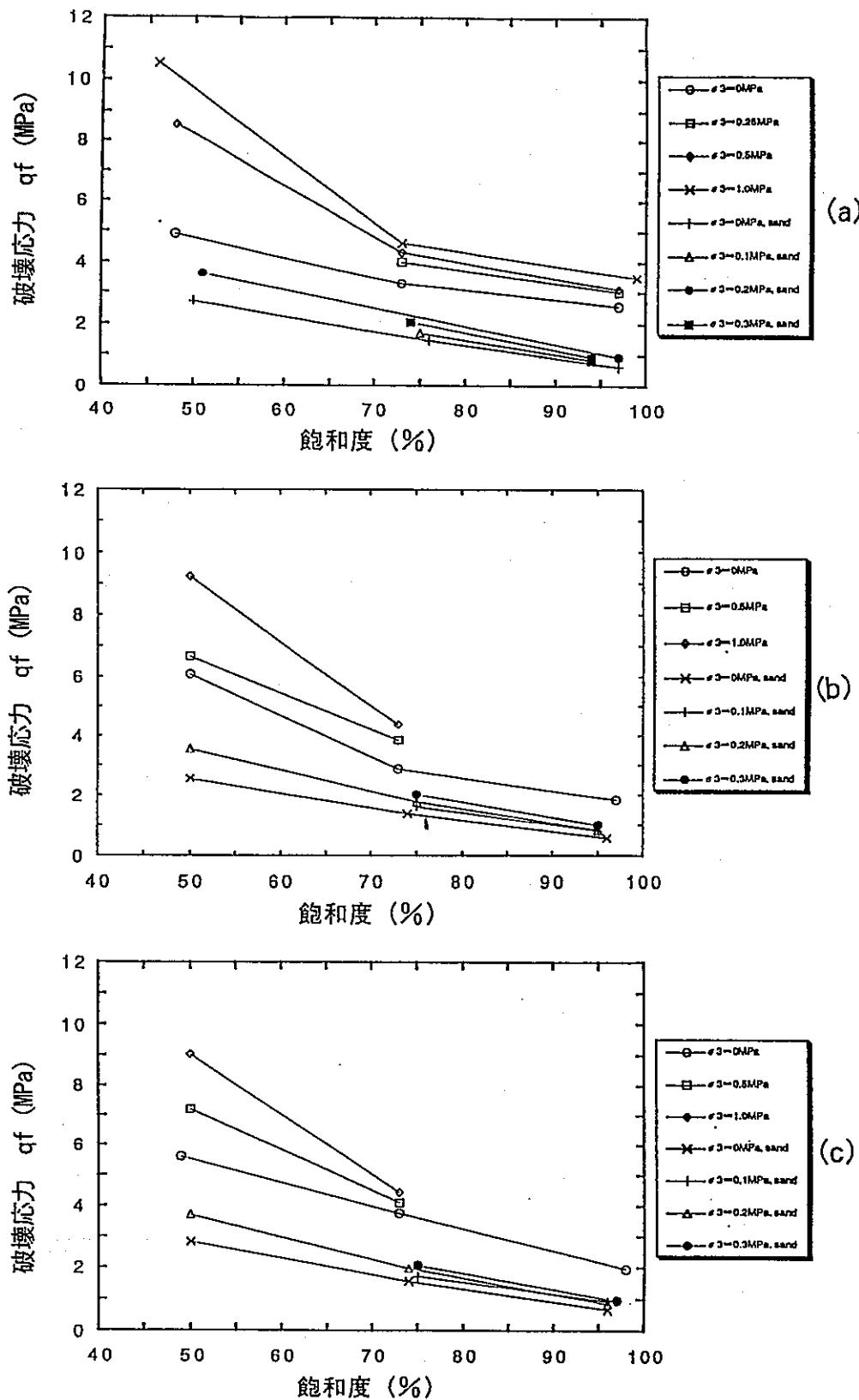


図-4.4 破壊応力-飽和度関係(2)

(乾燥密度1.8, 試験温度 (a)23°C (b)50°C (c)87°C)

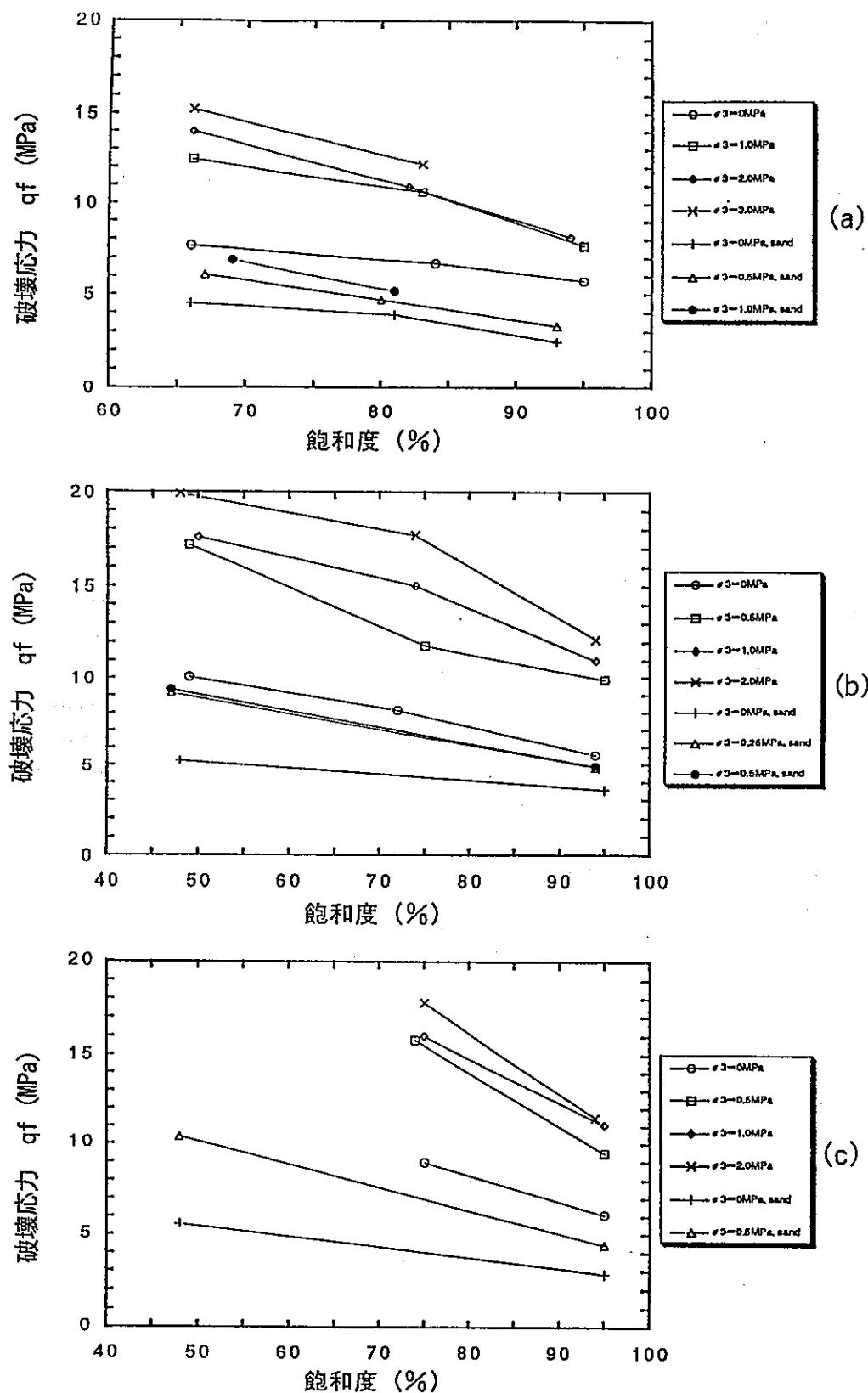


図-4.4 破壊応力-飽和度関係(3)

(乾燥密度2.0, 試験温度 (a)23°C (b)50°C (c)87°C)

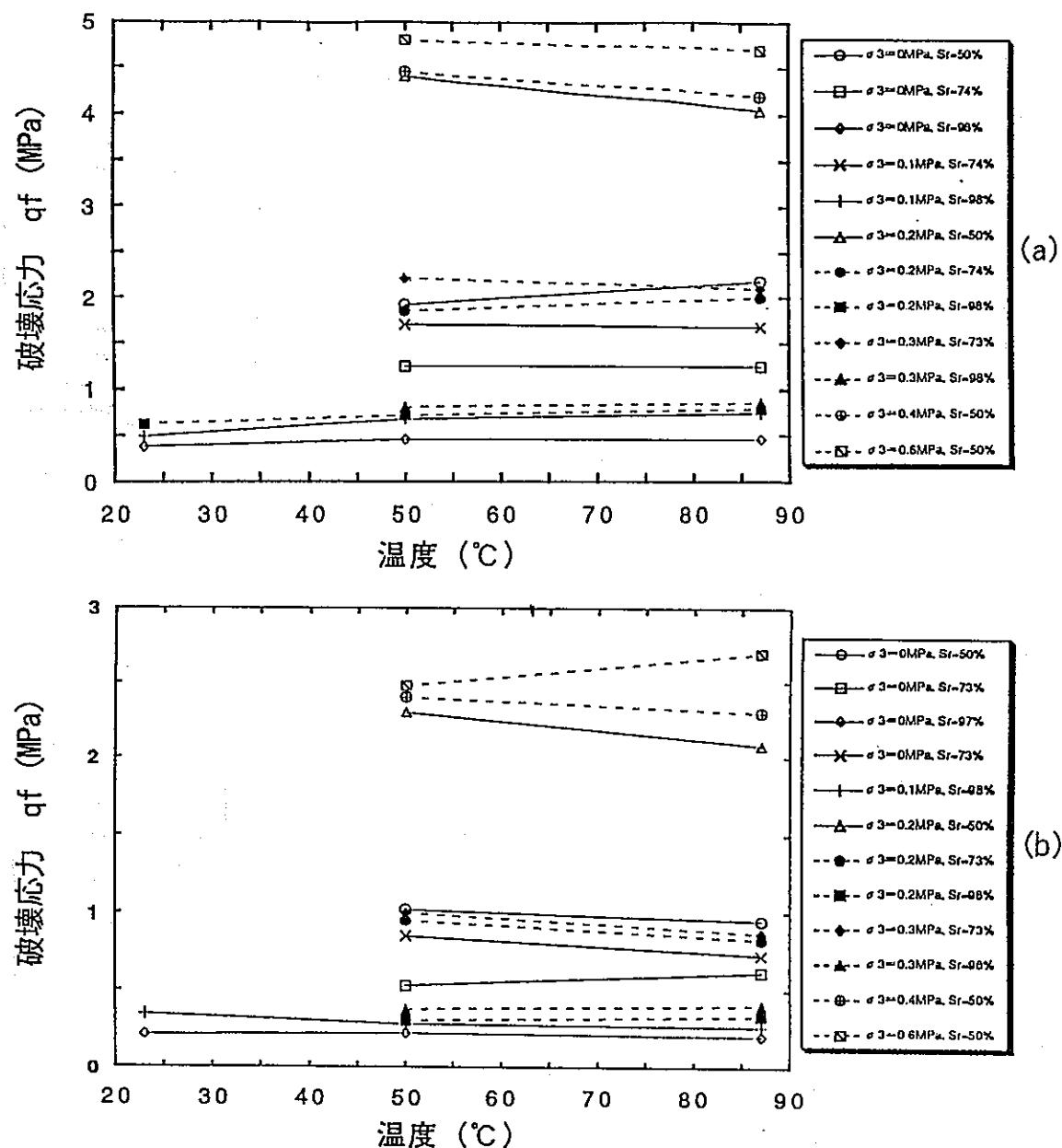


図-4.5 破壊応力-温度関係(1)

(乾燥密度1.6, ケイ砂混合 (a)なし (b)あり)

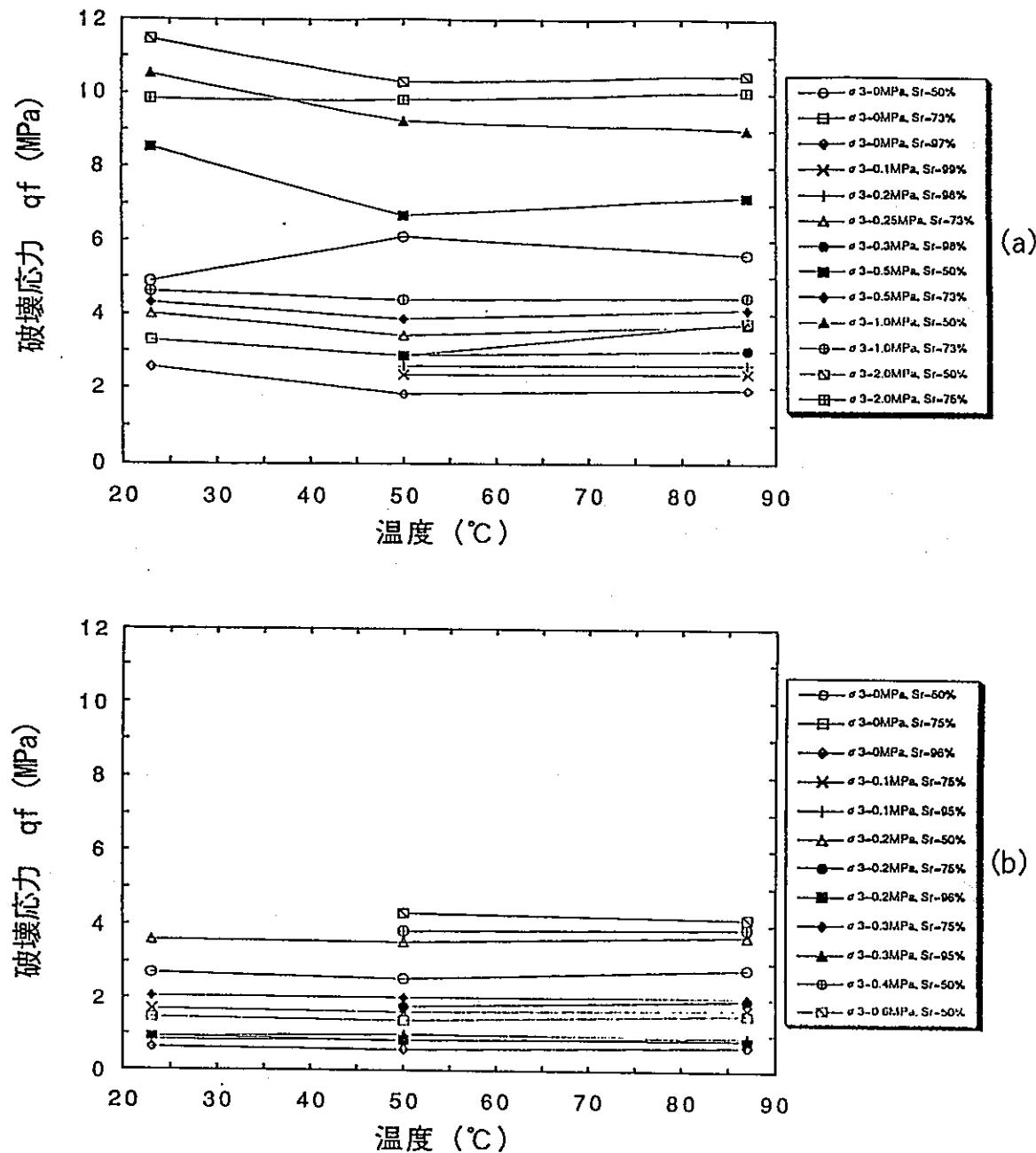


図-4.5 破壊応力-温度関係(2)

(乾燥密度1.8, ケイ砂混合 (a)なし (b)あり)

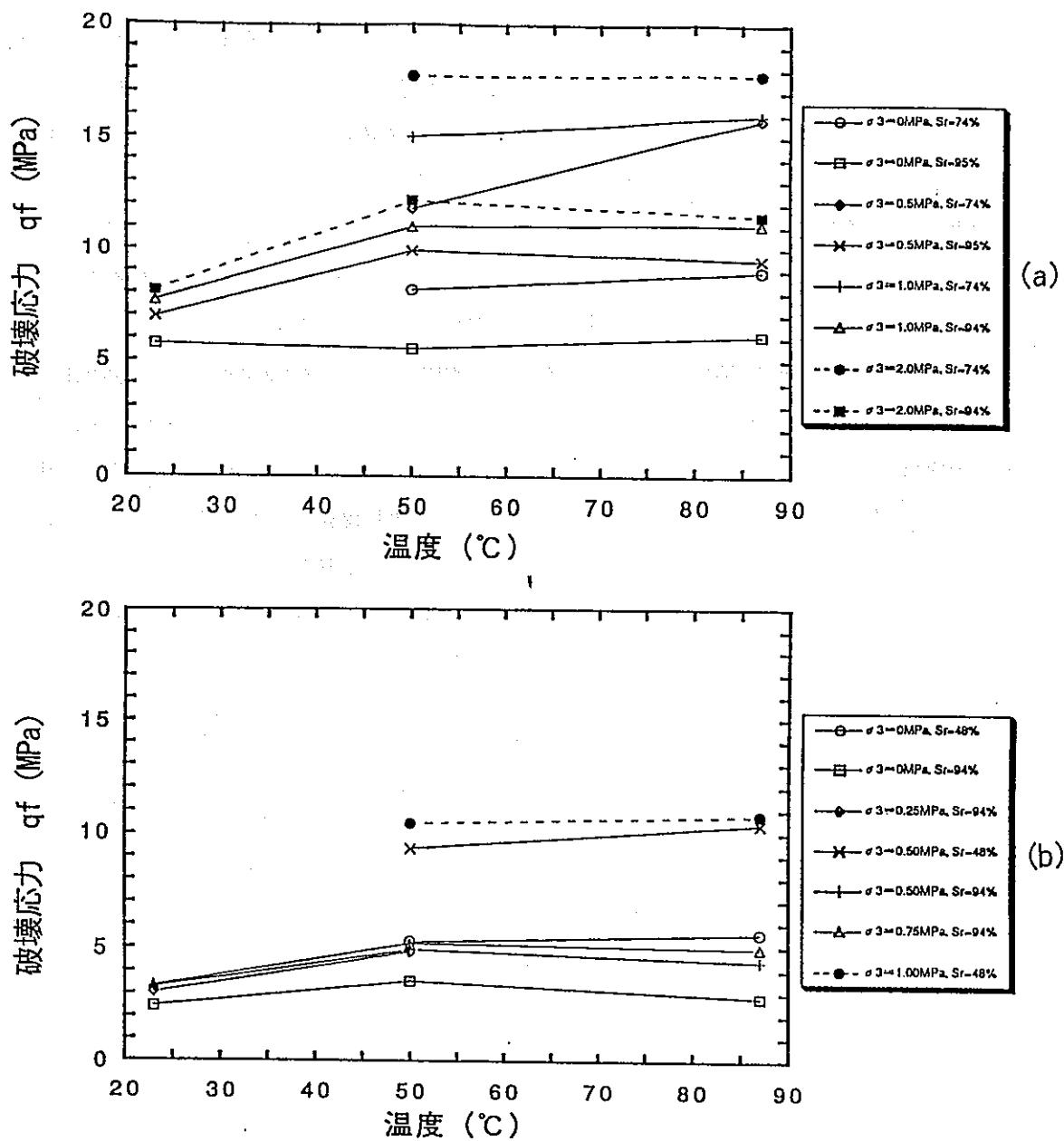


図-4.5 破壊応力-温度関係(3)

(乾燥密度2.0, ケイ砂混合 (a)なし (b)あり)

4.3 弾性係数

図-4.6(1)～(2)に弾性係数 E_{50} と乾燥密度 ρ_d の関係を示す。飽和度50%の場合、乾燥密度 1.6 g/cm^3 で約 $200\sim600 \text{ MPa}$ 、乾燥密度 1.8 g/cm^3 で約 $700\sim800 \text{ MPa}$ に、乾燥密度 2.0 g/cm^3 で約 2000 MPa になっている。また、飽和度98%の場合、乾燥密度 1.6 g/cm^3 で約 30 MPa 、乾燥密度 1.8 g/cm^3 で約 $70\sim100 \text{ MPa}$ に、乾燥密度 2.0 g/cm^3 で約 $300\sim800 \text{ MPa}$ になっている。各条件での結果は、乾燥密度 ρ_d の増加とともに、ほぼ指数的に弾性係数 E_{50} が増加することが分かる。またケイ砂を混入した場合も同様に乾燥密度 ρ_d の増加とともに弾性係数 E_{50} は増加し、ケイ砂を混入しない場合と比べて弾性係数 E_{50} は低い値を示していることが分かる。

図-4.7(1)～(2)に弾性係数 E_{50} と飽和度 S_r の関係を示す。乾燥密度 1.6 g/cm^3 の場合、飽和度50%で約 $200\sim600 \text{ MPa}$ 、飽和度98%で 100 MPa 以下になっている。乾燥密度 1.8 g/cm^3 の場合、飽和度50%で約 $700\sim800 \text{ MPa}$ に、飽和度98%で約 $100\sim200 \text{ MPa}$ になっている。乾燥密度 2.0 g/cm^3 の場合、飽和度75%で約 $1000\sim1500 \text{ MPa}$ に、飽和度98%で約 $400\sim700 \text{ MPa}$ になっている。各条件での結果は、飽和度 S_r が増加するにつれほぼ線形的に弾性係数 E_{50} が低下することが分かる。前項の破壊応力 q_f と同様、弾性係数 E_{50} も飽和度の影響を強く受けていることが分かる。またケイ砂を混入した場合も同様に飽和度 S_r の増加とともに弾性係数 E_{50} は低下し、ケイ砂を混入しない場合と比べて弾性係数 E_{50} は低い値を示していることが分かる。

主応力差 q や破壊応力 q_f と同様、温度 T の影響は他のパラメータに比べて顕著には現れていない。

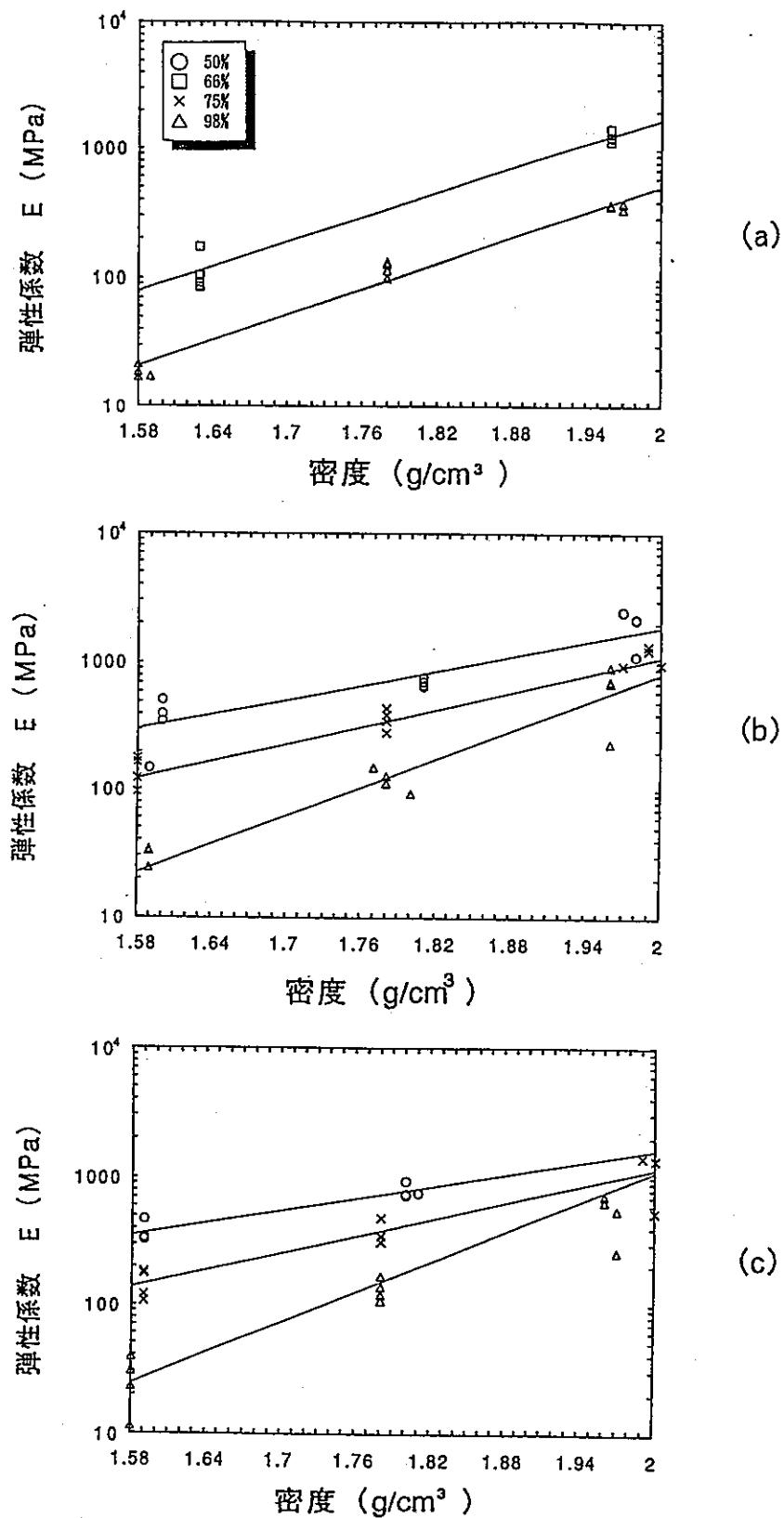


図-4.6 弾性係数-乾燥密度関係(1)

(ケイ砂混合なし, 試験温度 (a)23°C (b)50°C (c)87°C)

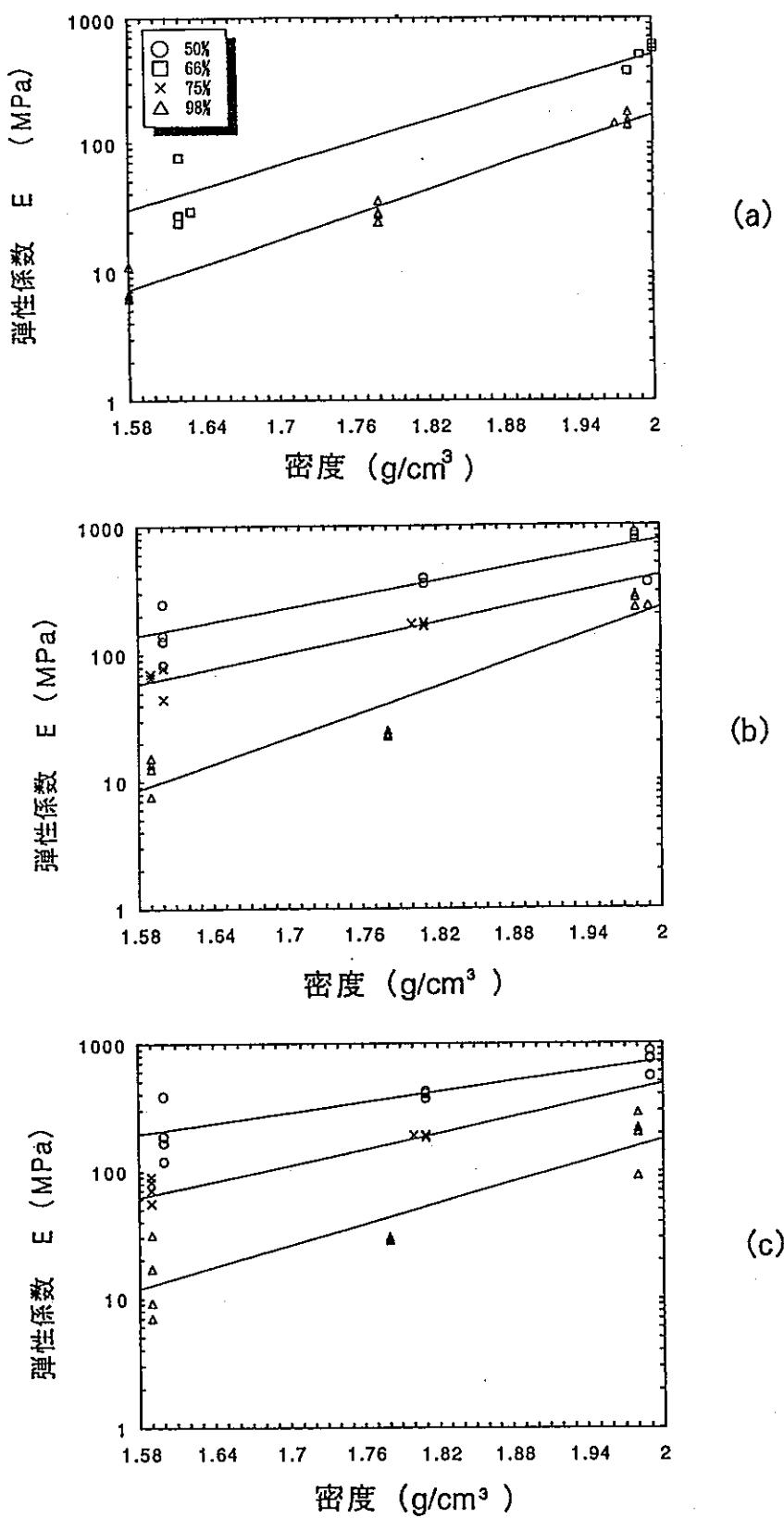


図-4.6 弾性係数-乾燥密度関係(2)

(ケイ砂混合あり, 試験温度 (a)23°C (b)50°C (c)87°C)

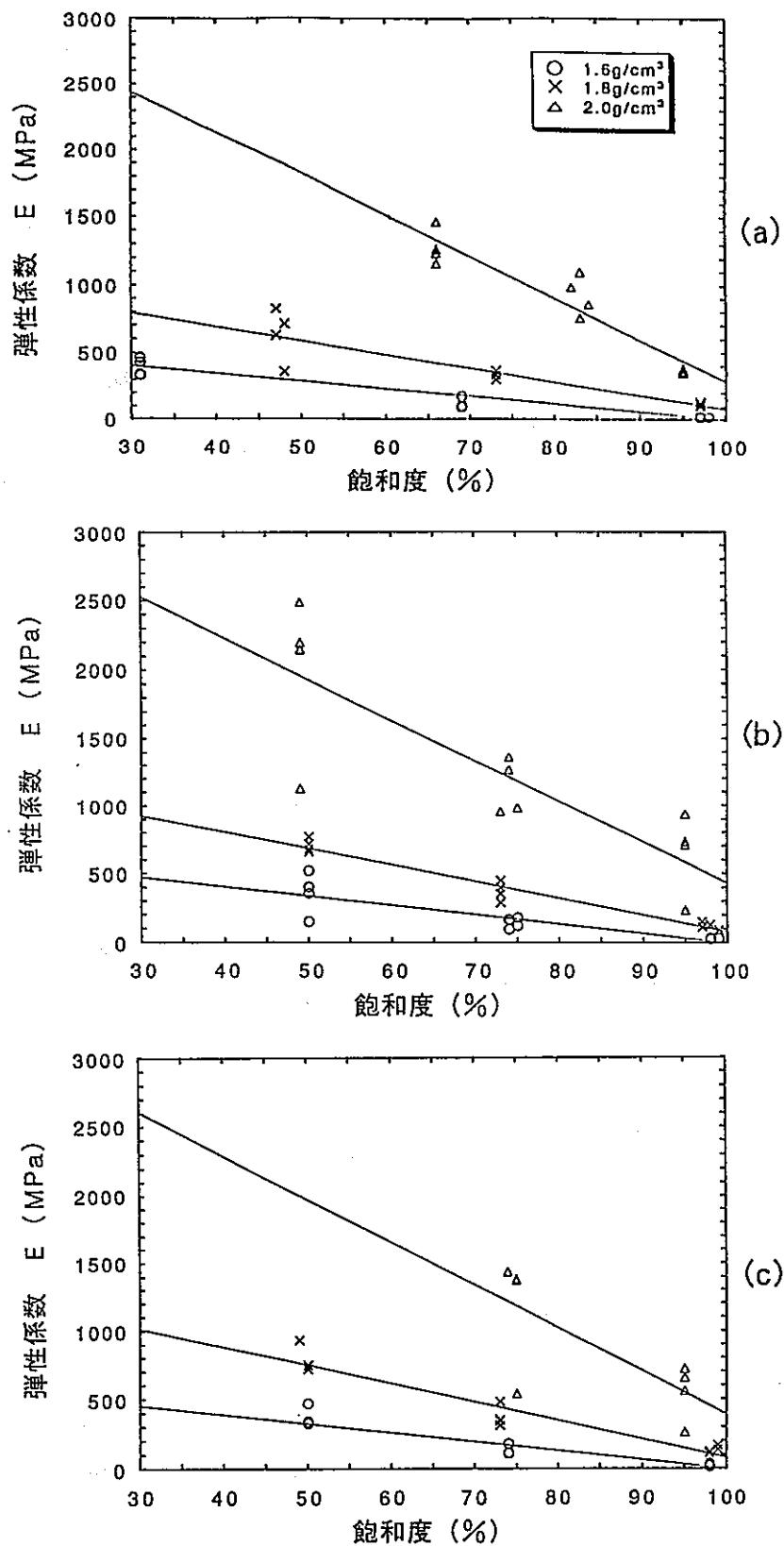


図-4.7 弾性係数-飽和度関係(1)

(ケイ砂混合なし, 試験温度 (a)23°C (b)50°C (c)87°C)

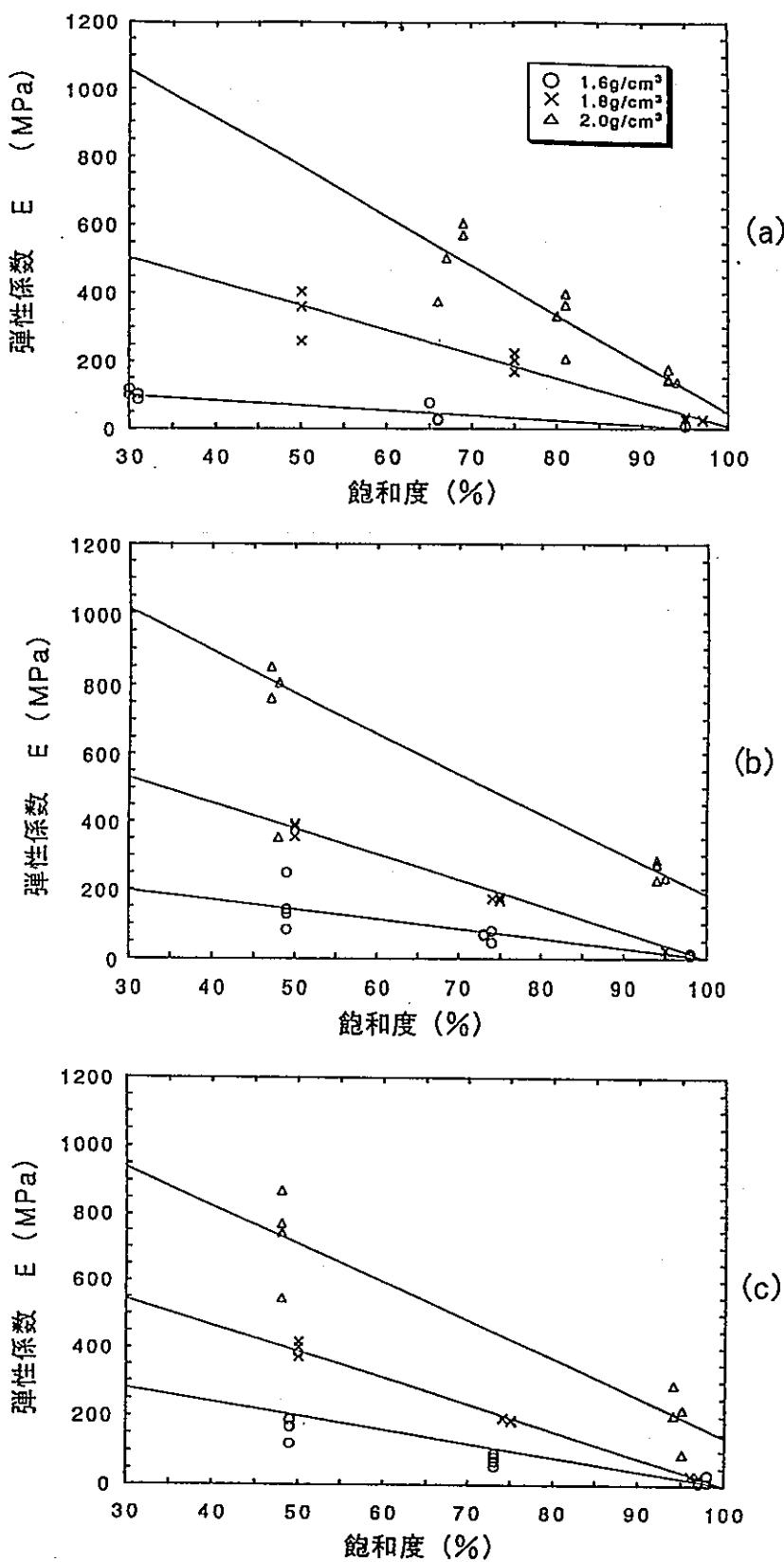


図-4.7 弾性係数-飽和度関係(2)

(ケイ砂混合あり, 試験温度 (a)23°C (b)50°C (c)87°C)

4.4 せん断強度

図-4.8(1)～(26)に、次式で与えられる破壊時のモールの応力円とその包絡線を示す。

$$[\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 + \tau^2 = \frac{1}{4}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad \dots \quad (4.1)$$

ここで σ は主応力、 τ はせん断力を示し、 σ_1 、 σ_3 は実験で求められた最大、最小主応力を示す。ここで用いた主応力間の関係は次式で与えられる[13]。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c} \quad \dots \quad (4.2)$$

ここで σ_c はインタクトな供試体の一軸圧縮強さ、 m 、 s は定数である。(4.1)、(4.2)式からBalmer, G. [14] の方法を用いて求めた破壊包絡線 σ 、 τ の関係を次式に示す。

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{\tau_m}{\tau_m + m\sigma_c / 8} \quad \dots \quad (4.3)$$

$$\tau = (\sigma - \sigma_3) \sqrt{1 + m\sigma_c / 4\tau_m} \quad \dots \quad (4.4)$$

ここで $\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ である。

今回の拘束圧レベルではほぼ上式でせん断特性を表すことができる。図-4.9に破壊包絡線と乾燥密度の関係を示す。乾燥密度 ρ_d が増加するにつれて強度は大きくなり、強度の差は主応力 σ の増加につれて大きくなる傾向がある。図-4.10に破壊包絡線と飽和度の関係を示す。飽和度 S_r が増加するにつれて強度は小さくなり、強度の差は主応力 σ の増加につれて小さくなる傾向がある。図-4.11に破壊包絡線と温度の関係を示す。今回の試験では、温度Tの影響は他のパラメータに比べて顕著には現れていない。また、ケイ砂を混入した結果でも乾燥密度、飽和度、温度の影響は、ケイ砂を混入しない場合と同様の傾向を示している。

以上のようにして圧縮ベントナイトのせん断特性を概略的に把握することができたが、今回の拘束圧は比較的低いものであるため、今後さらに高拘束圧下での試験を実施し、その特性の把握を行う必要がある。

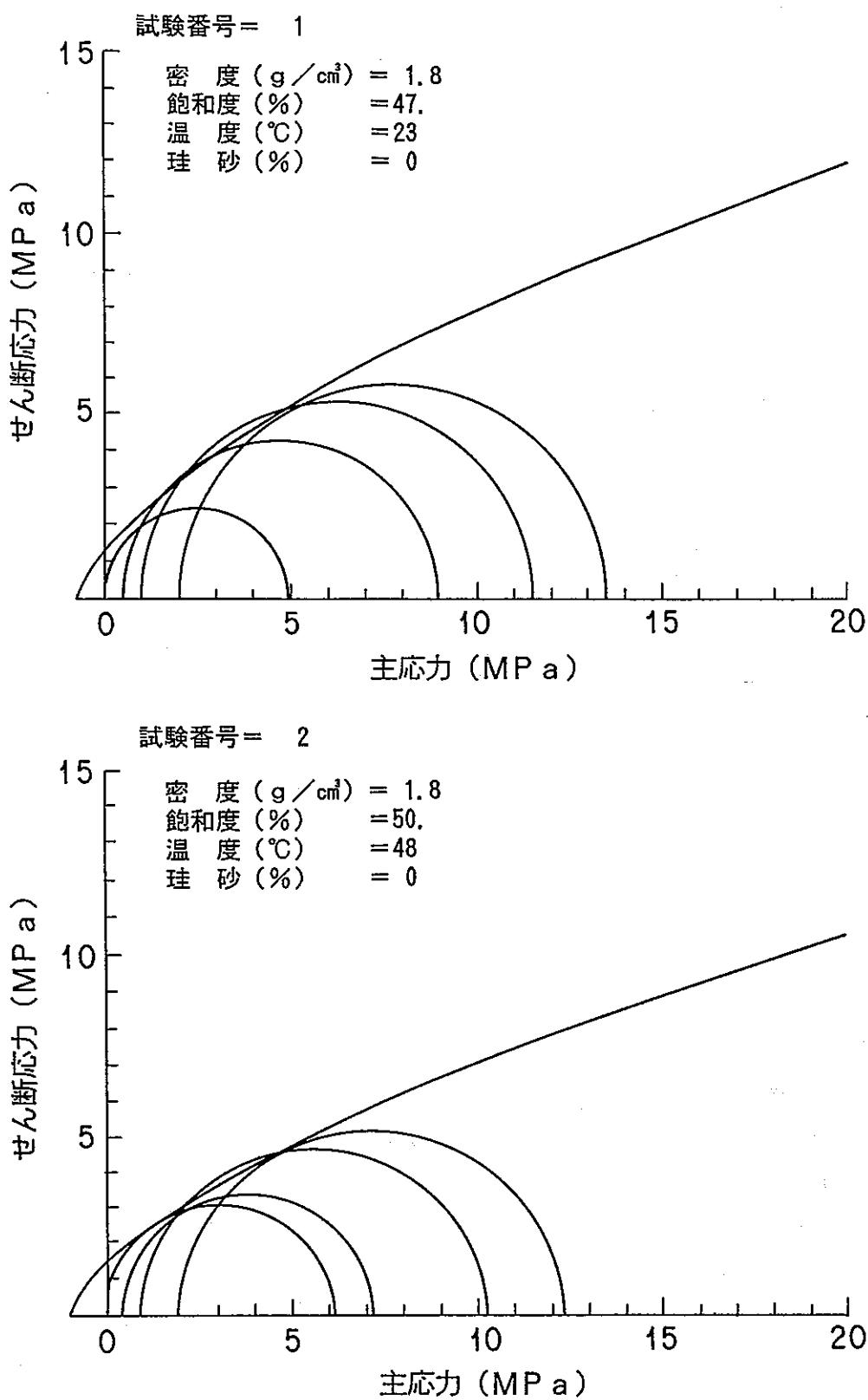


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(1)

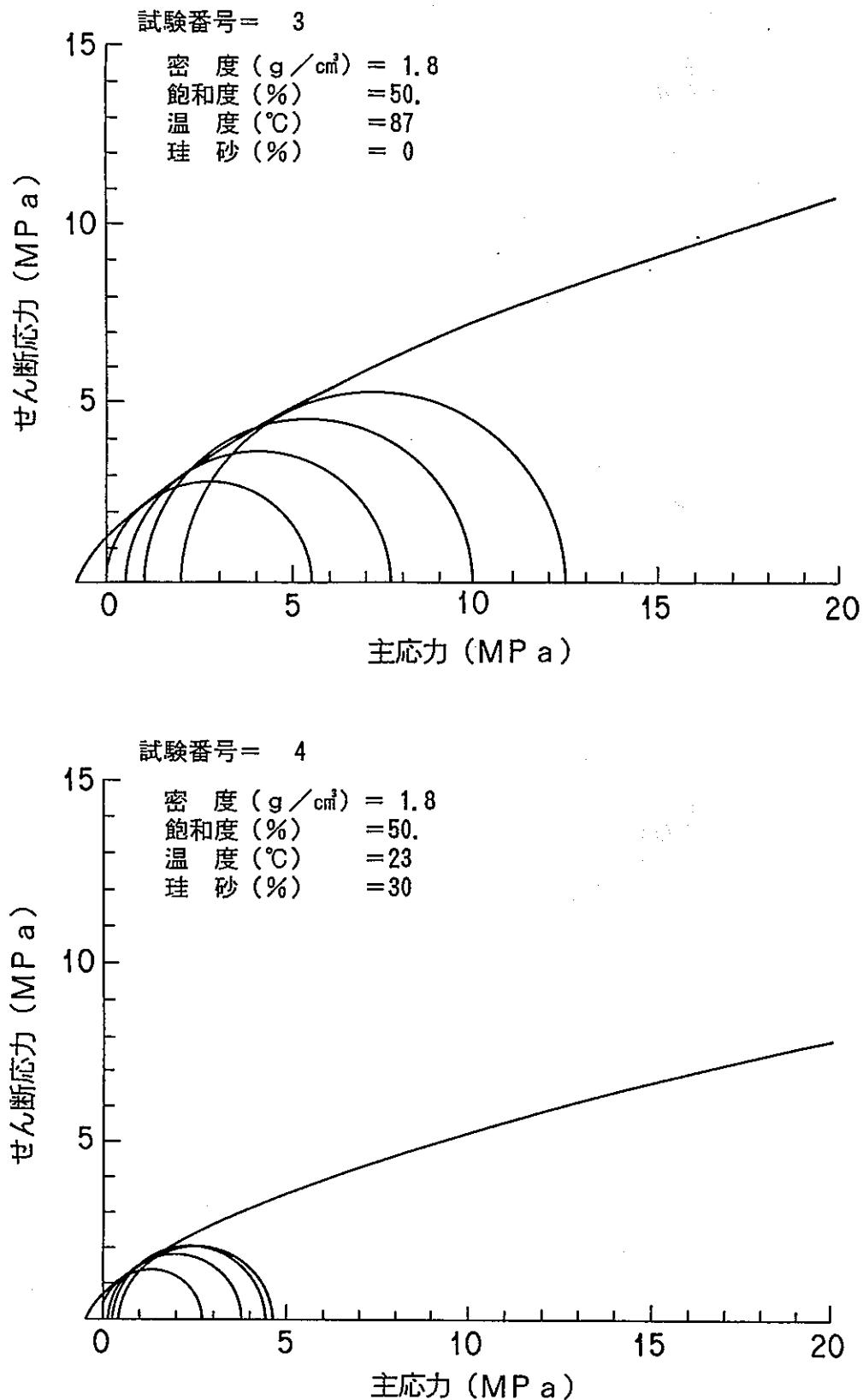


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(2)

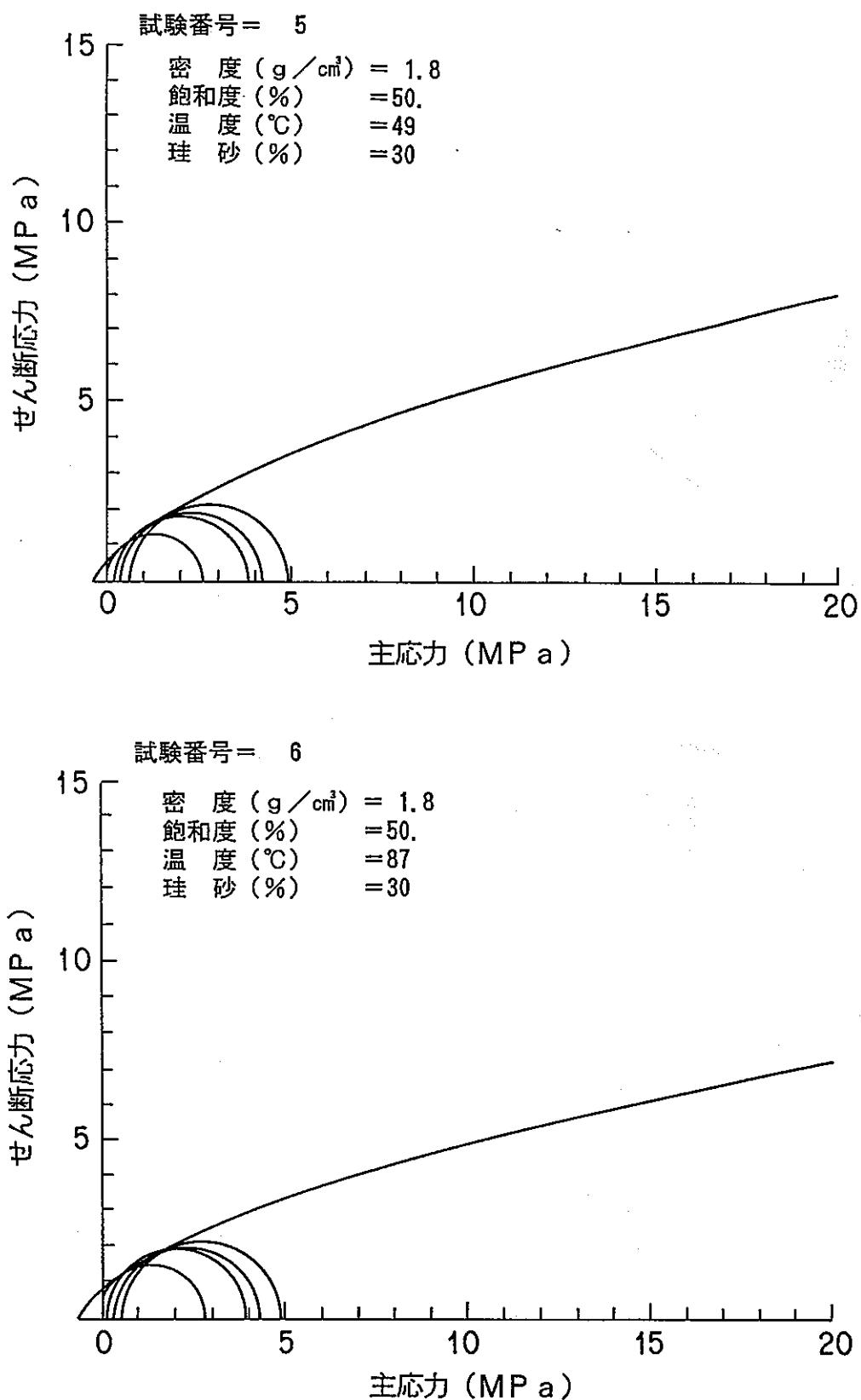


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(3)

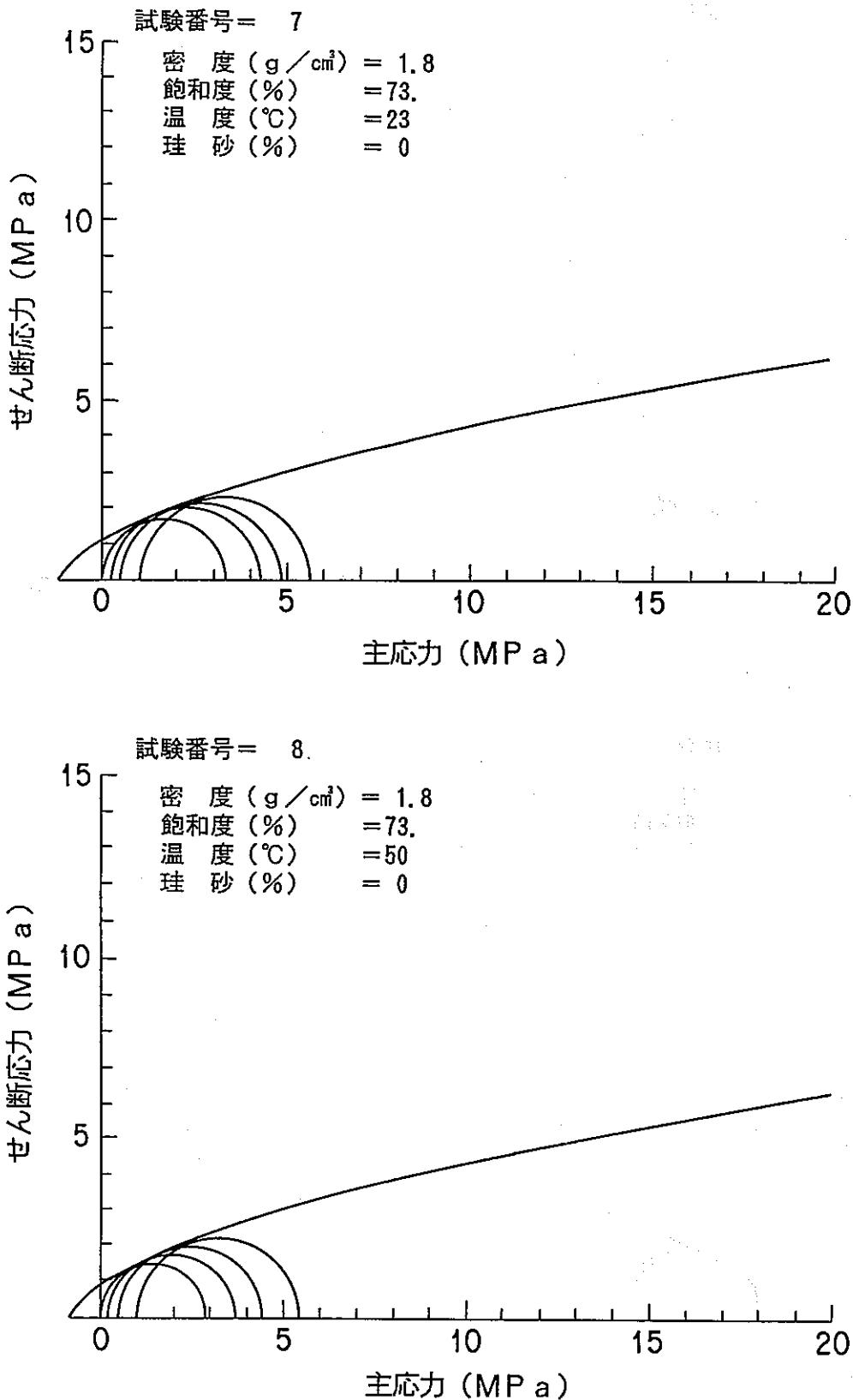


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(4)

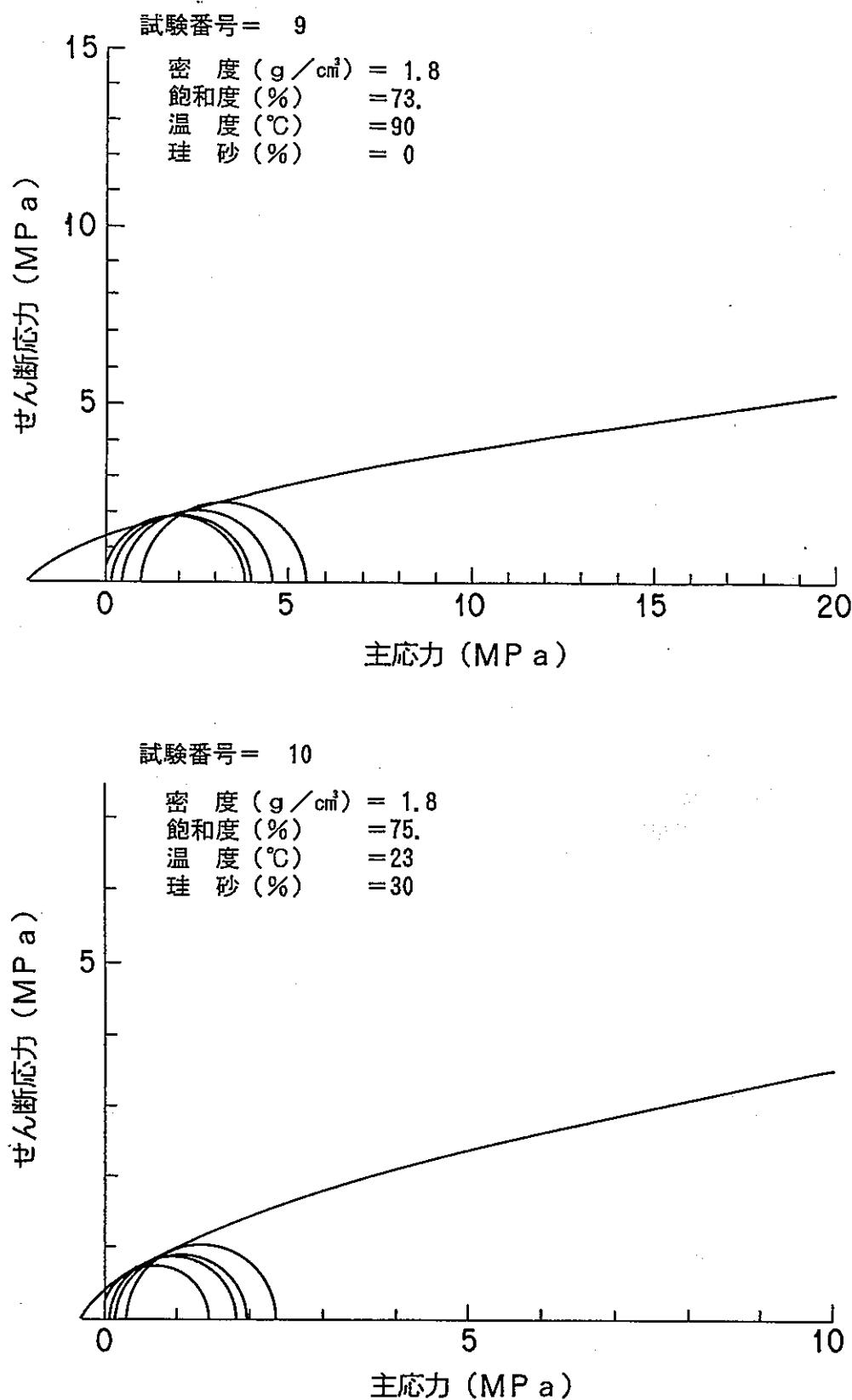


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(5)

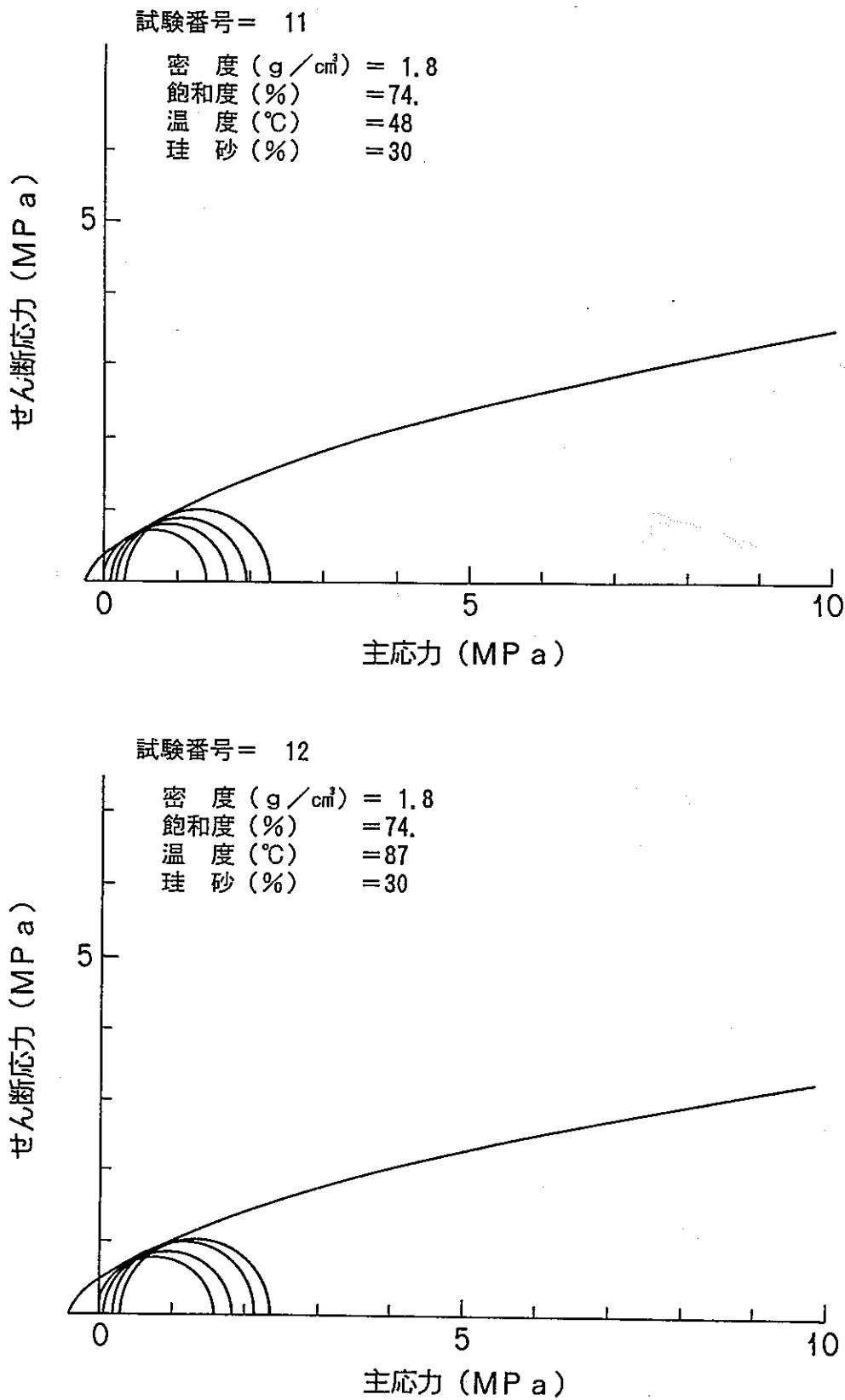


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(6)

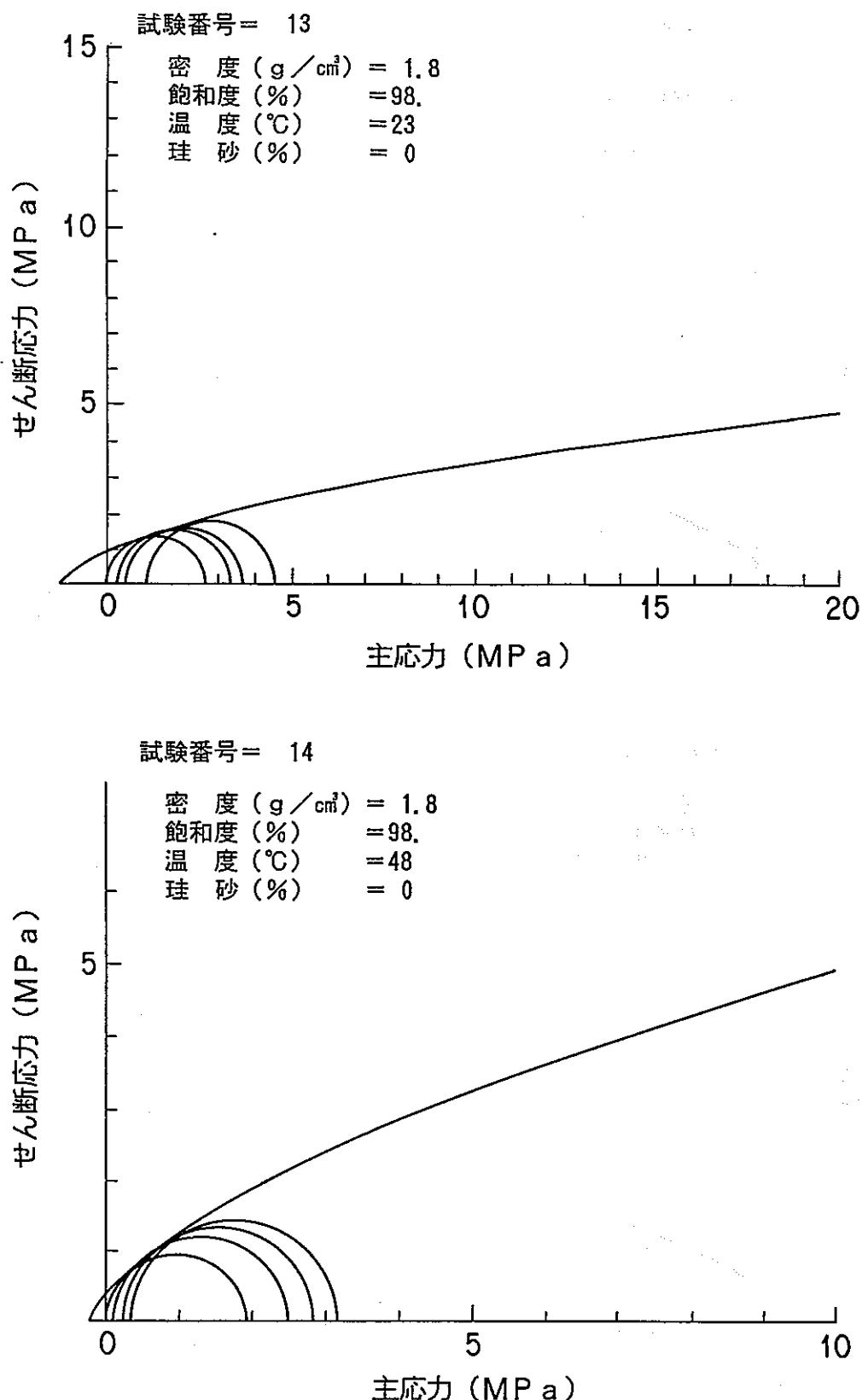


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(7)

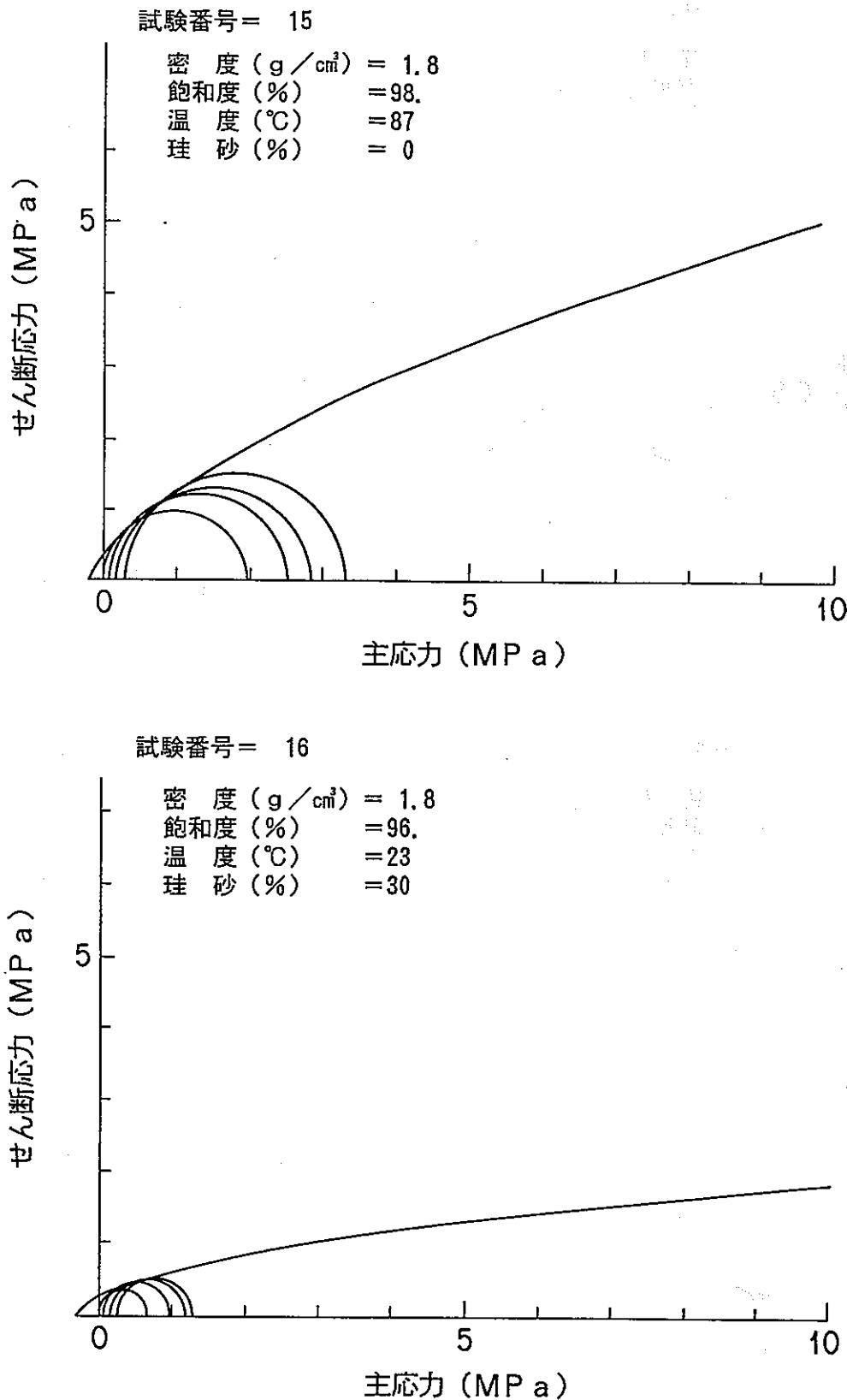


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(8)

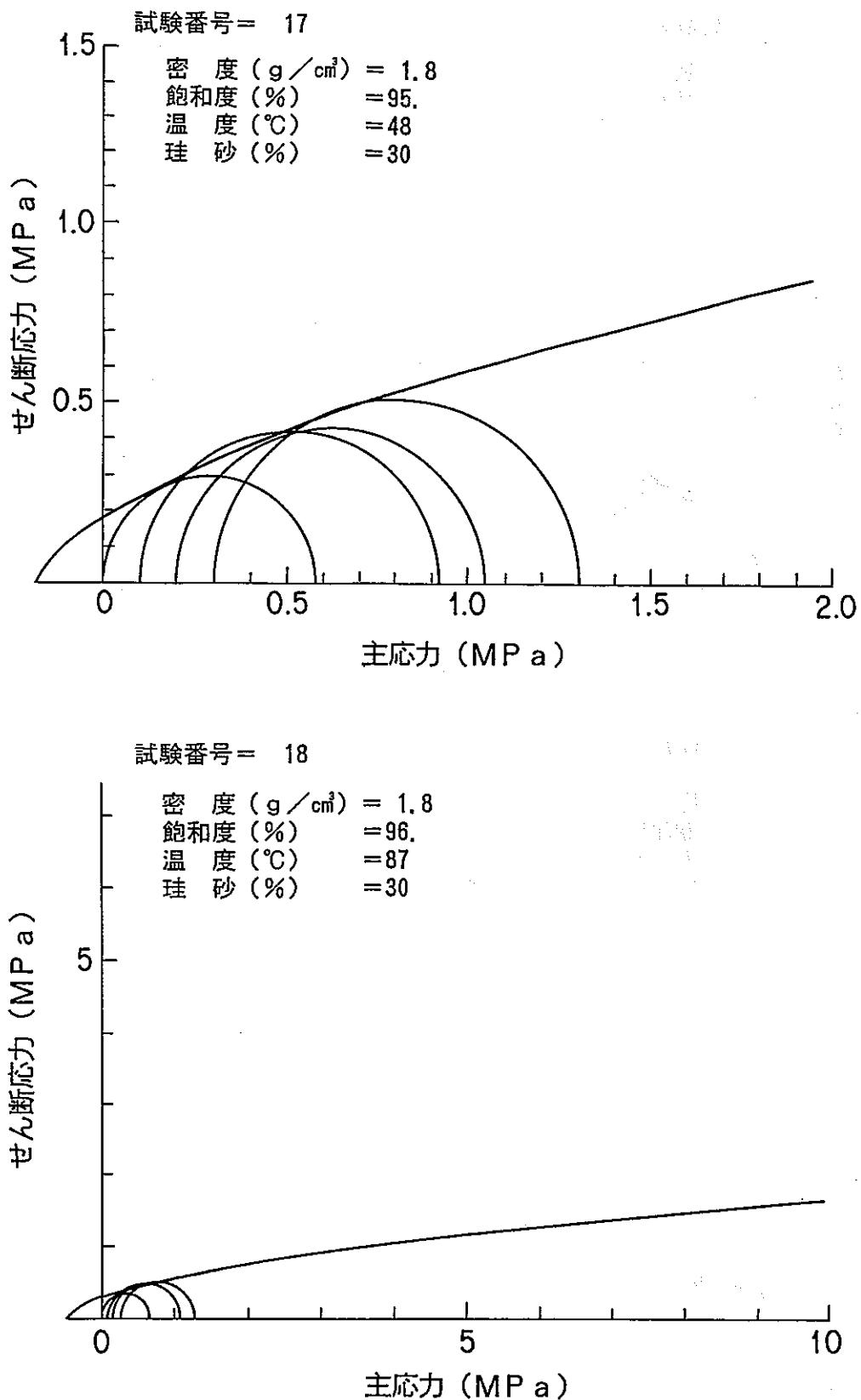


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(9)

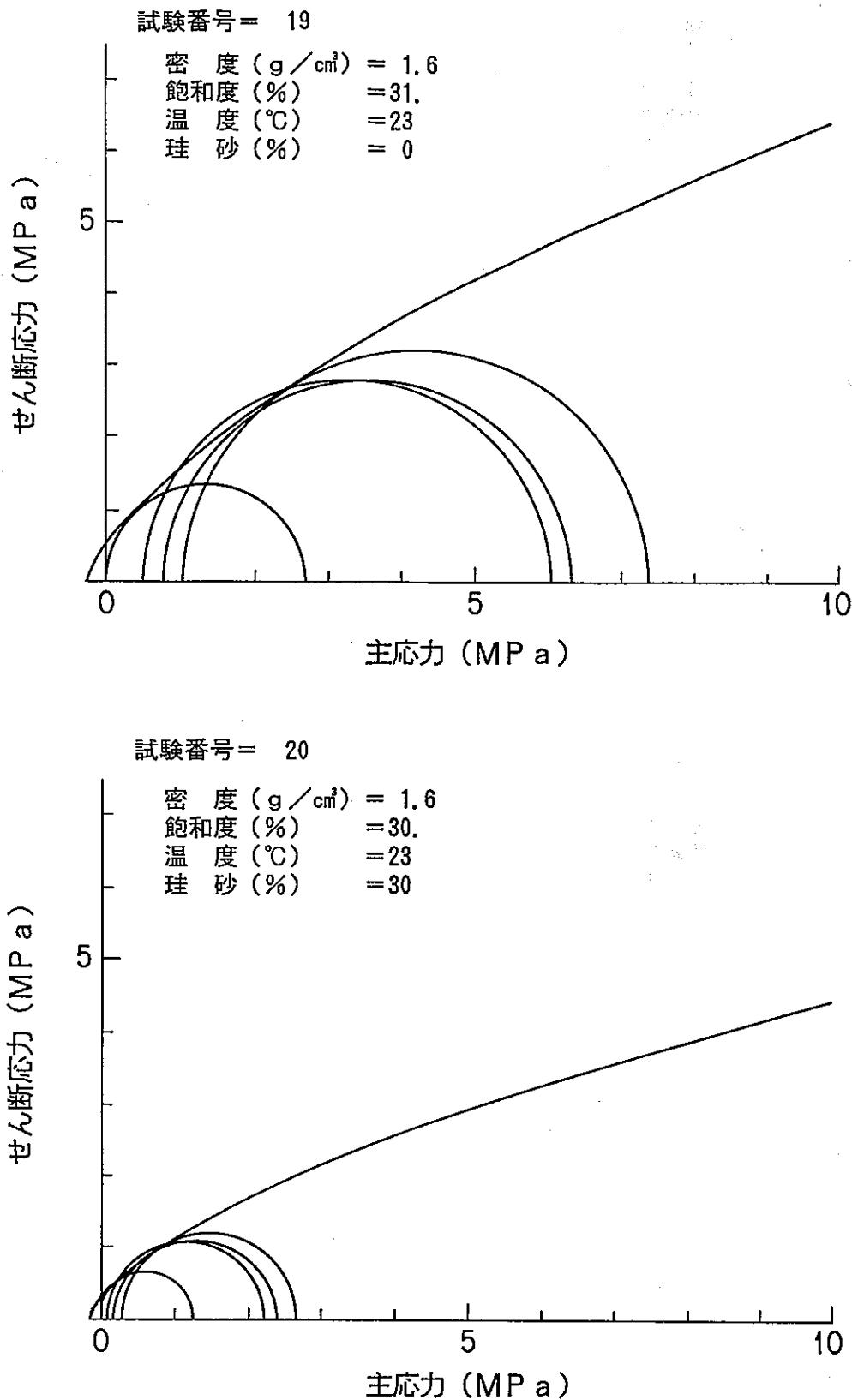
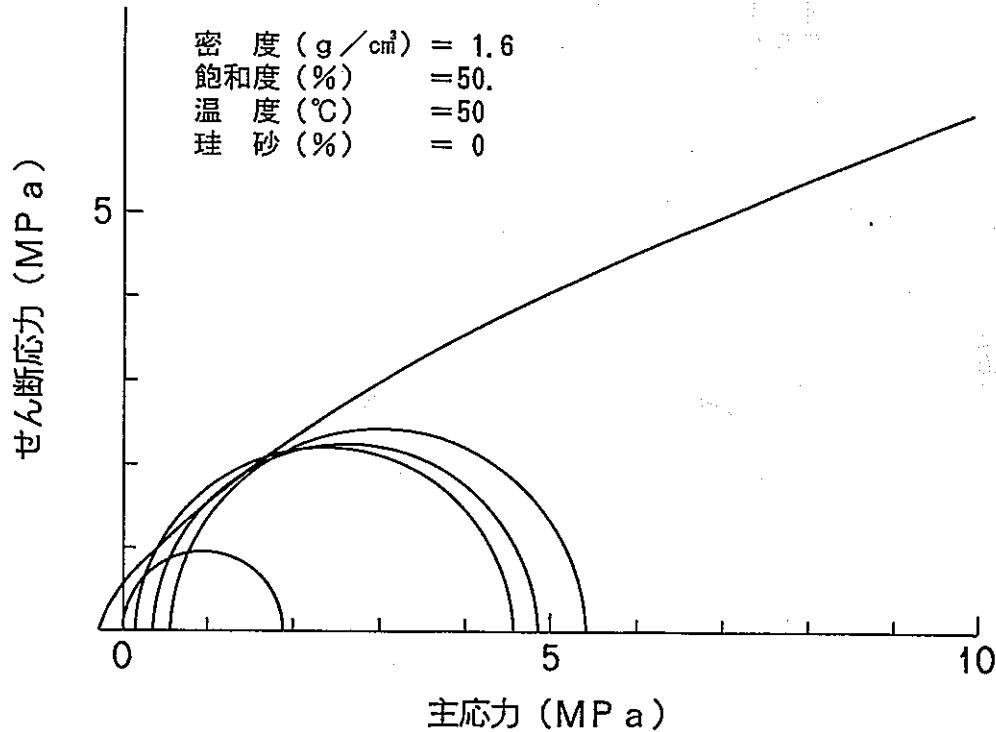


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(10)

試験番号 = 21



試験番号 = 22

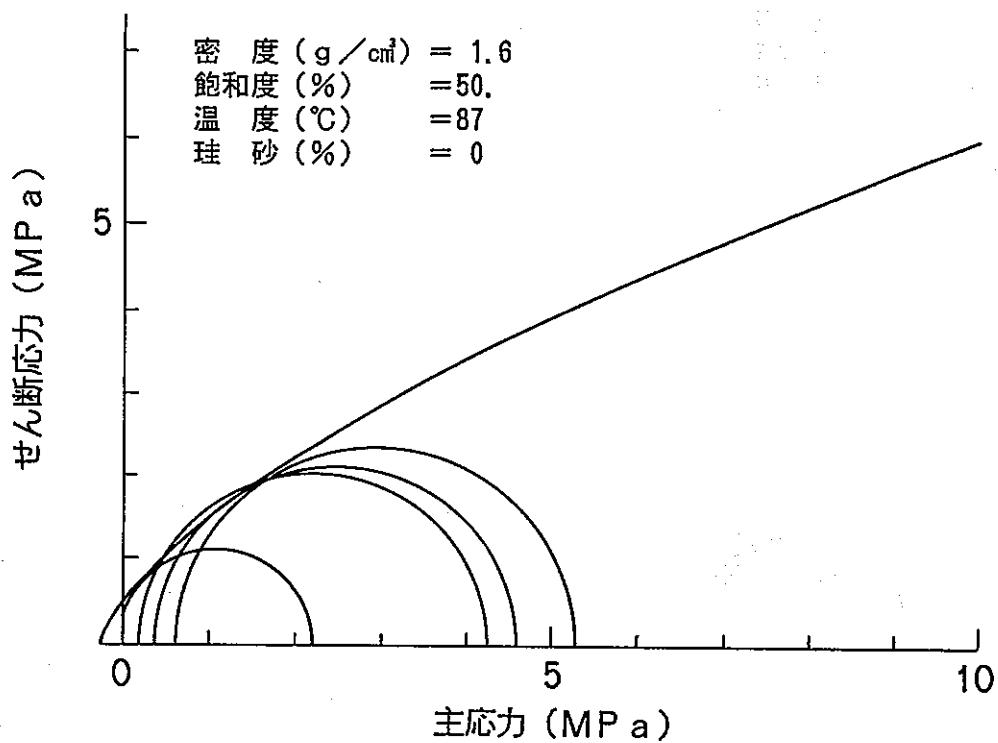
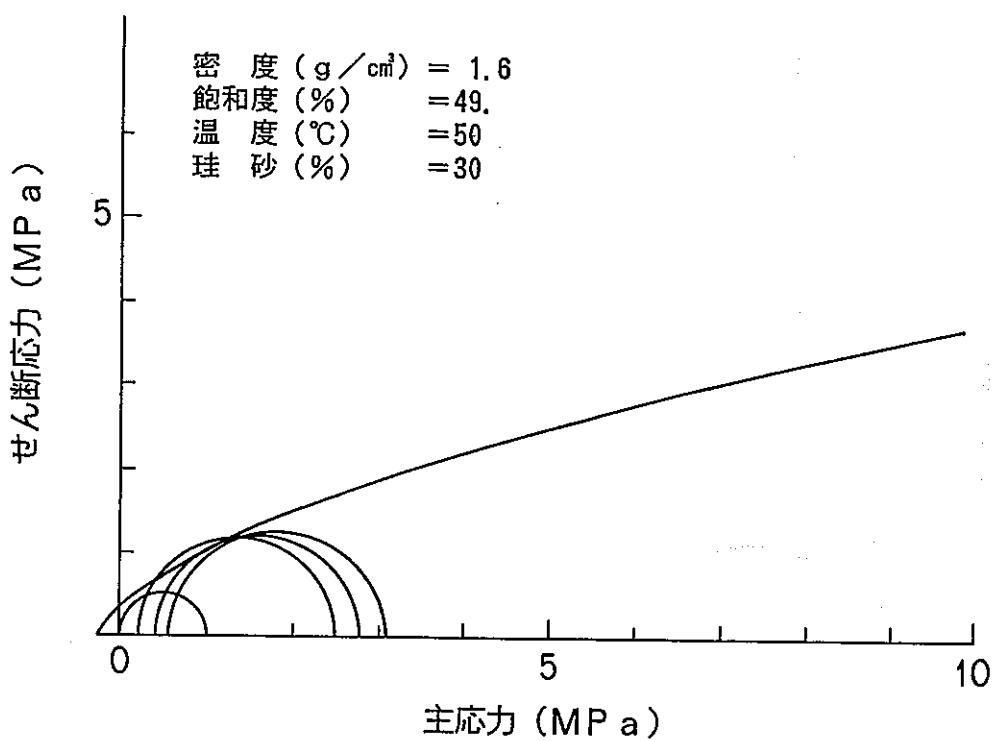


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(1)

試験番号 = 23



試験番号 = 24

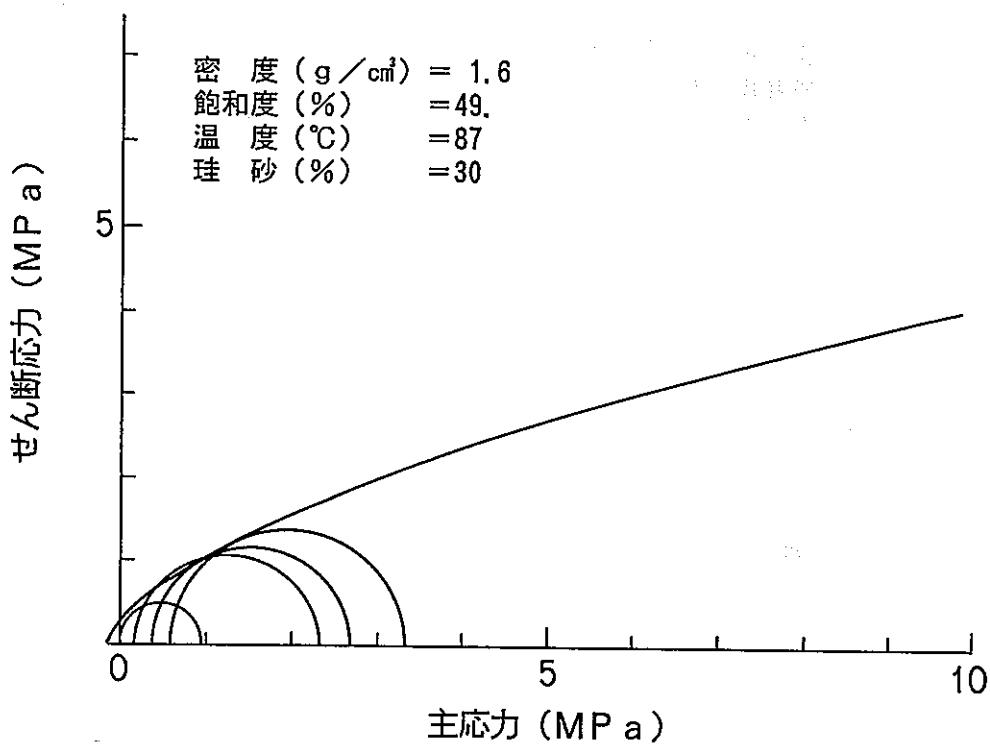


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(12)

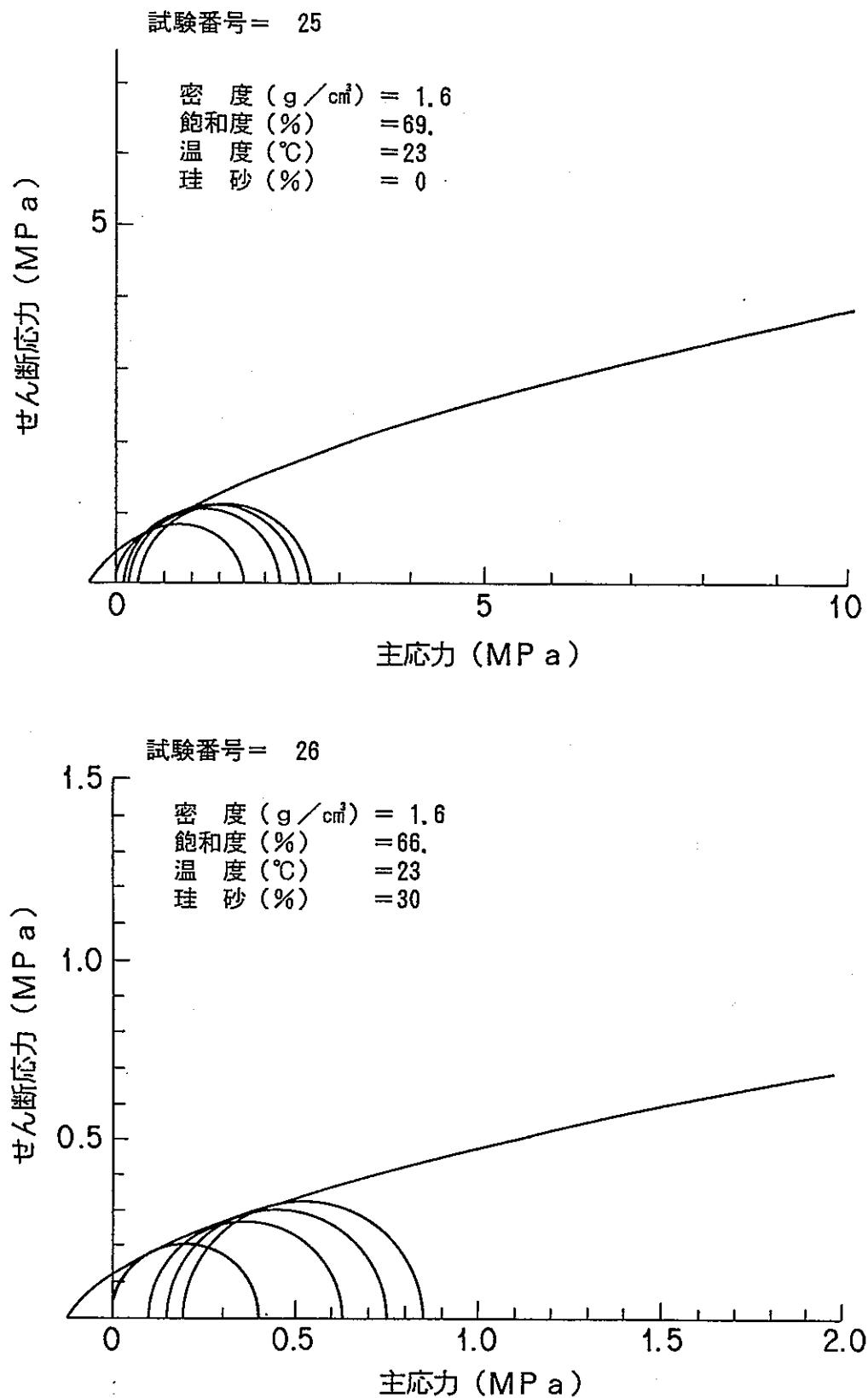


図-4.8 モールの応力円とその包絡線⑬

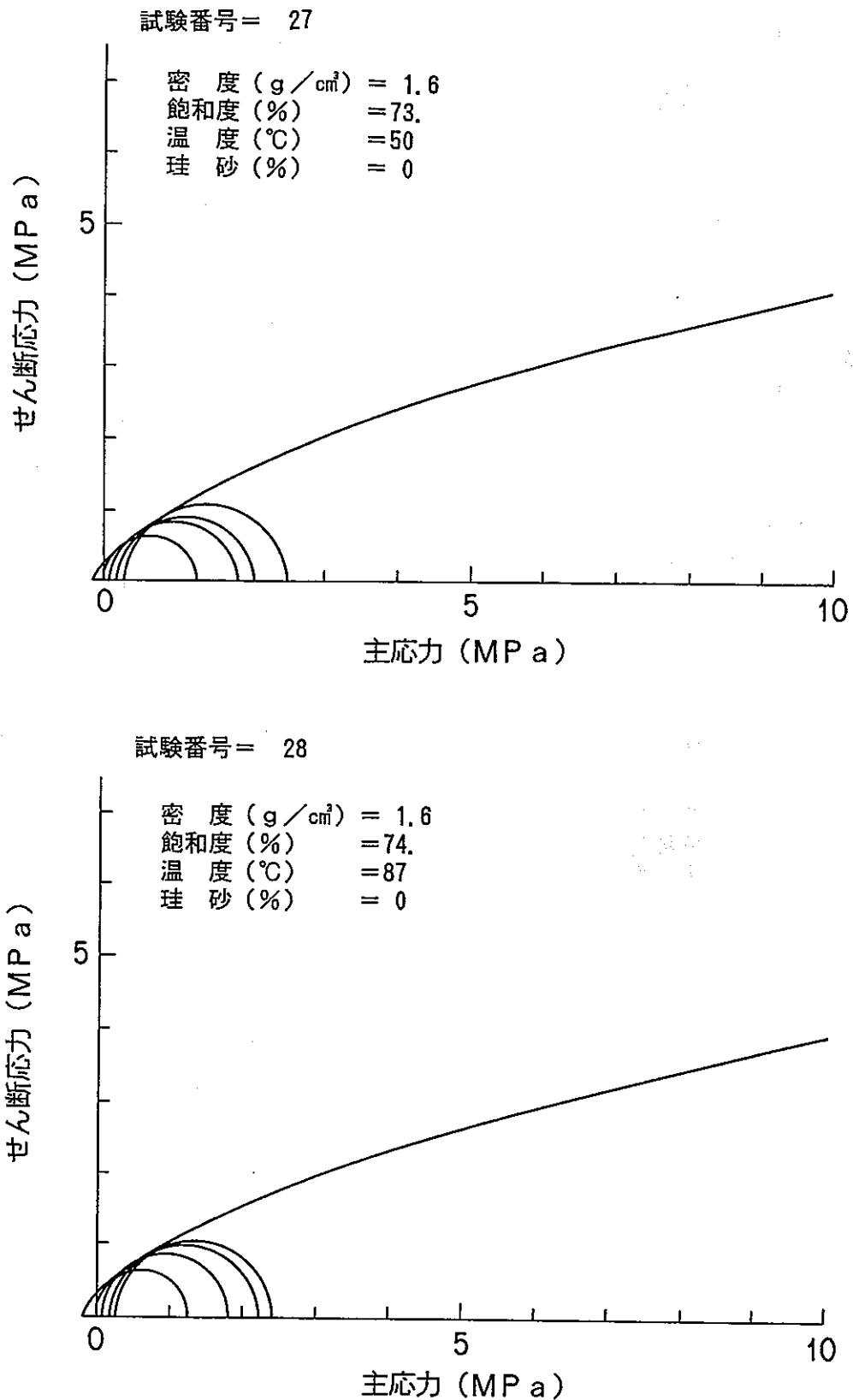


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(14)

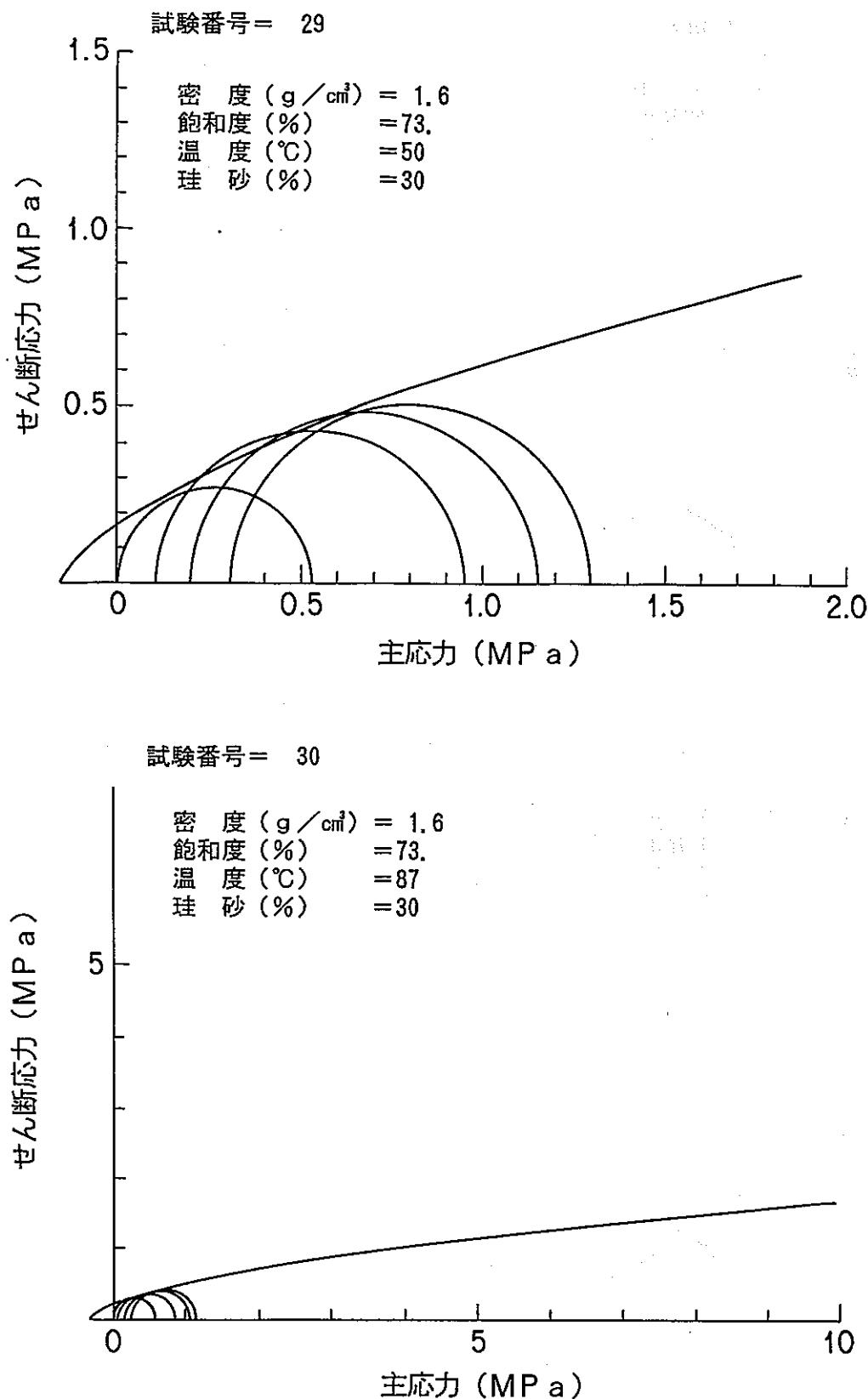


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(15)

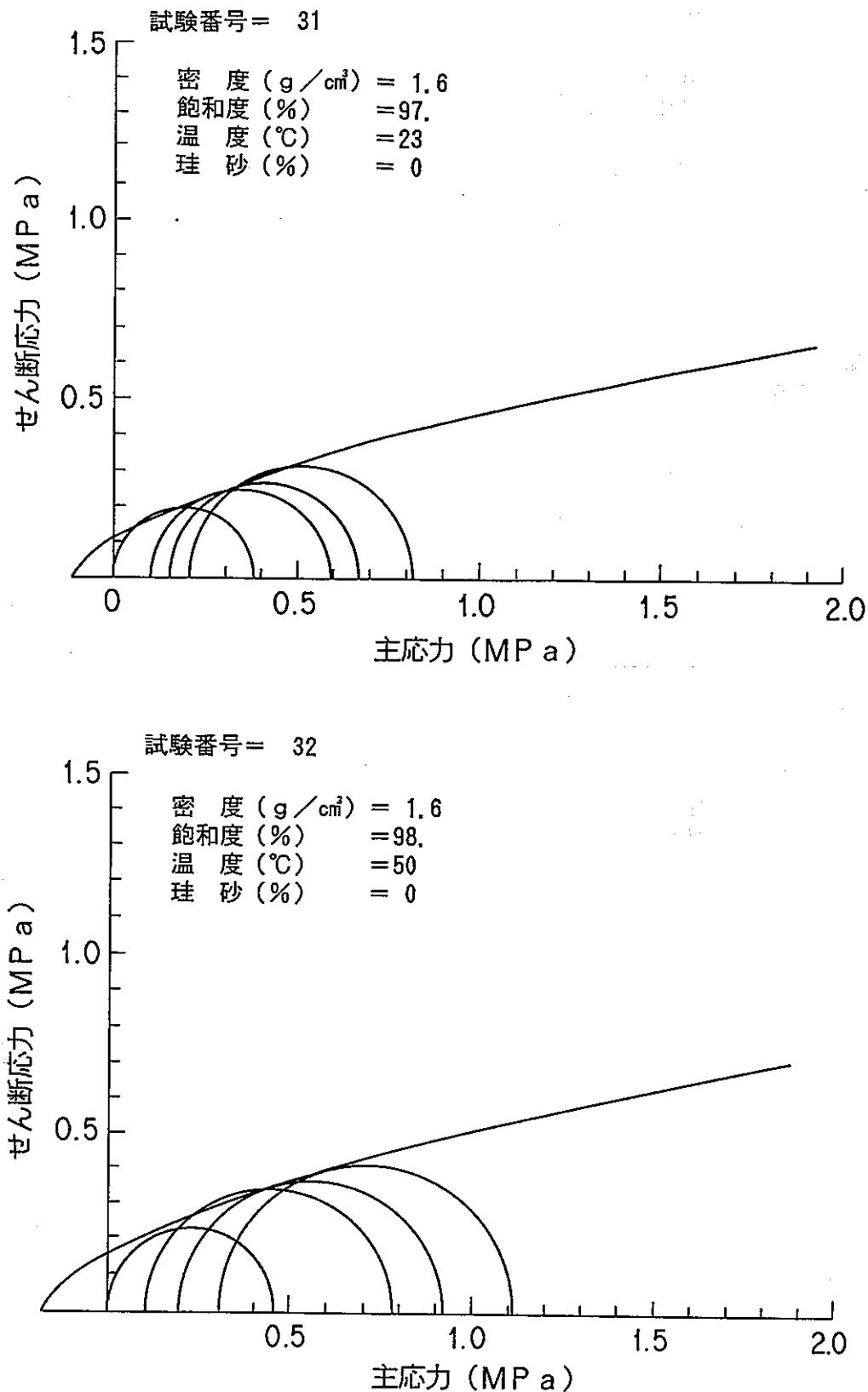


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(16)

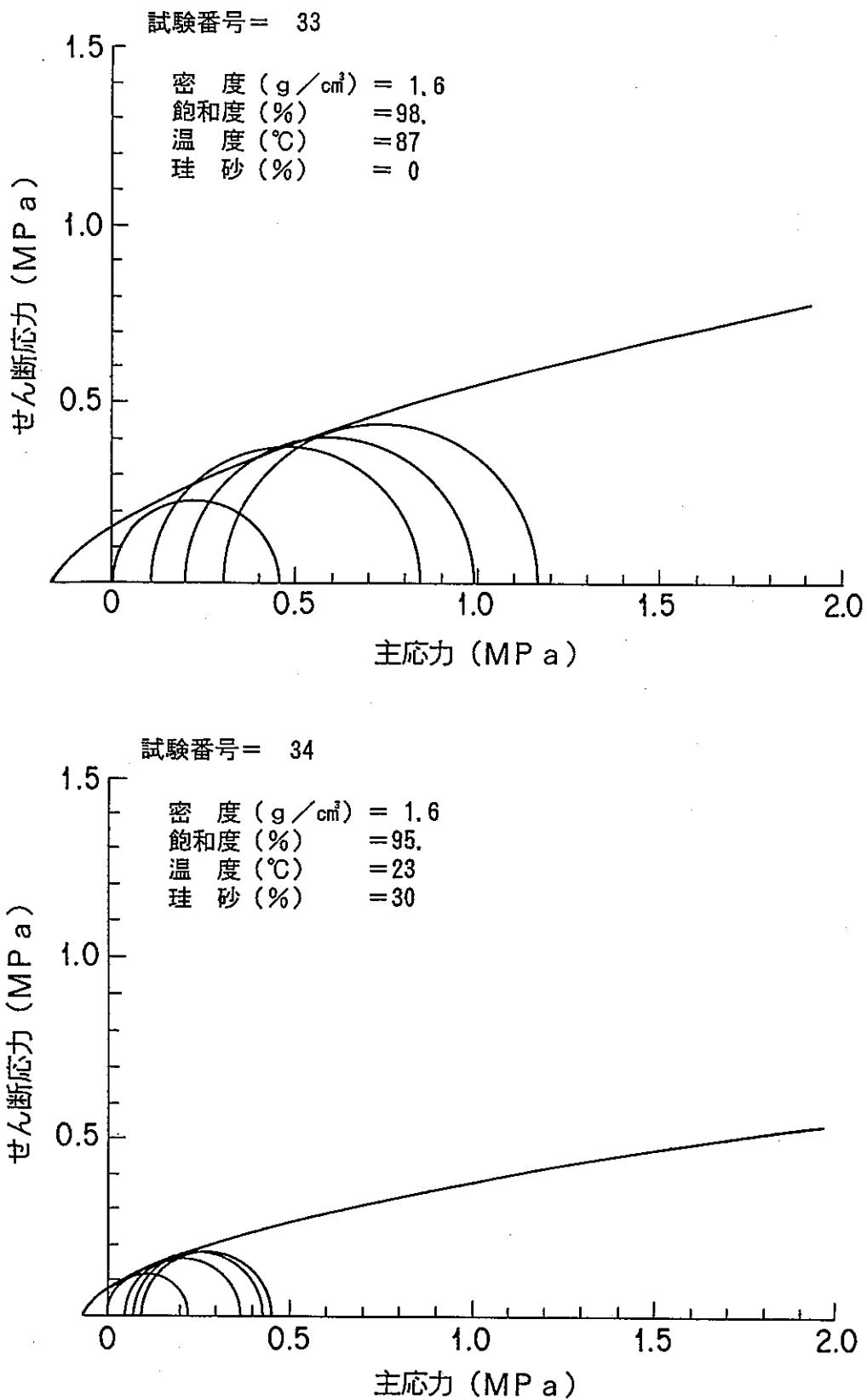


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(1)

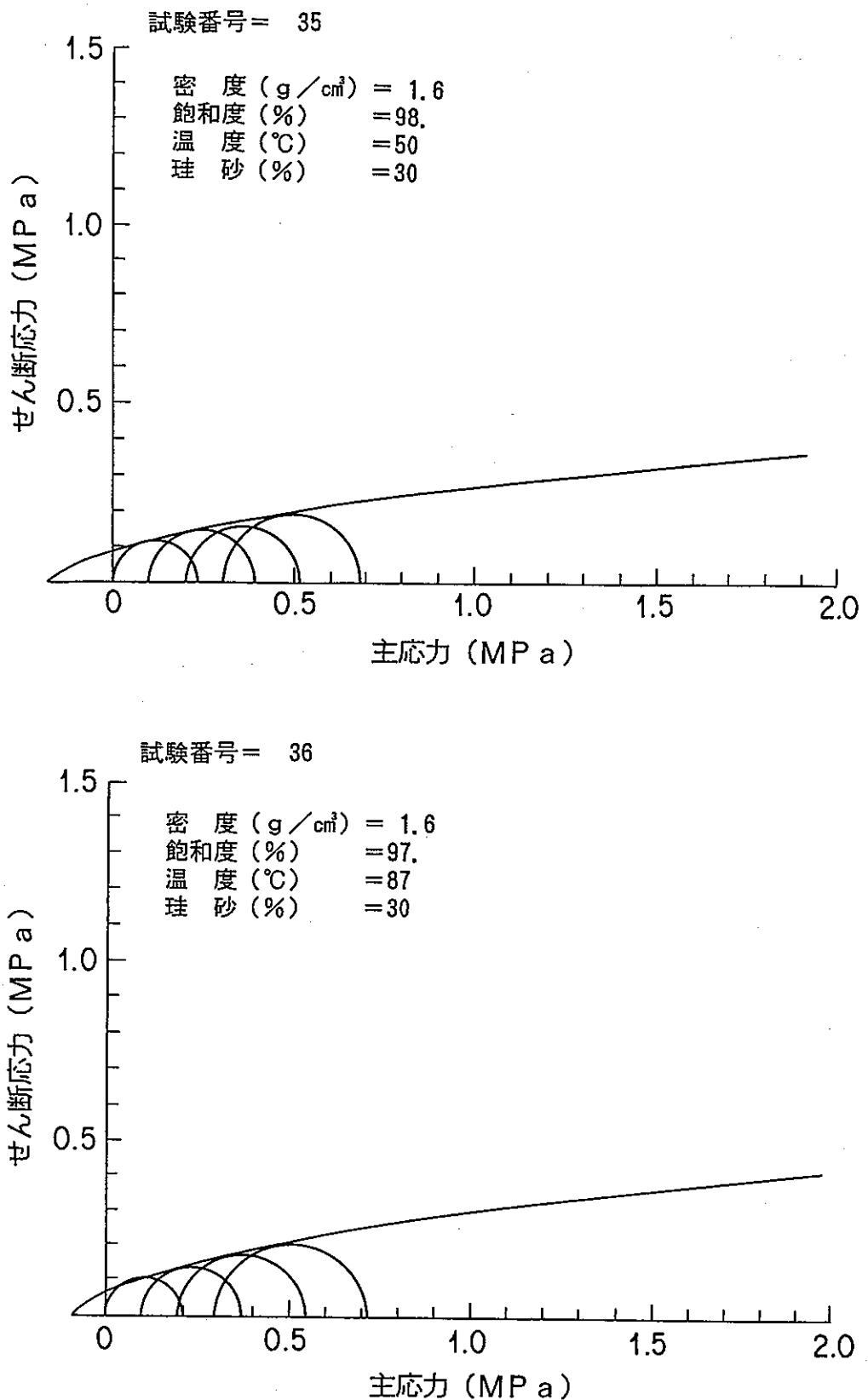


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(18)

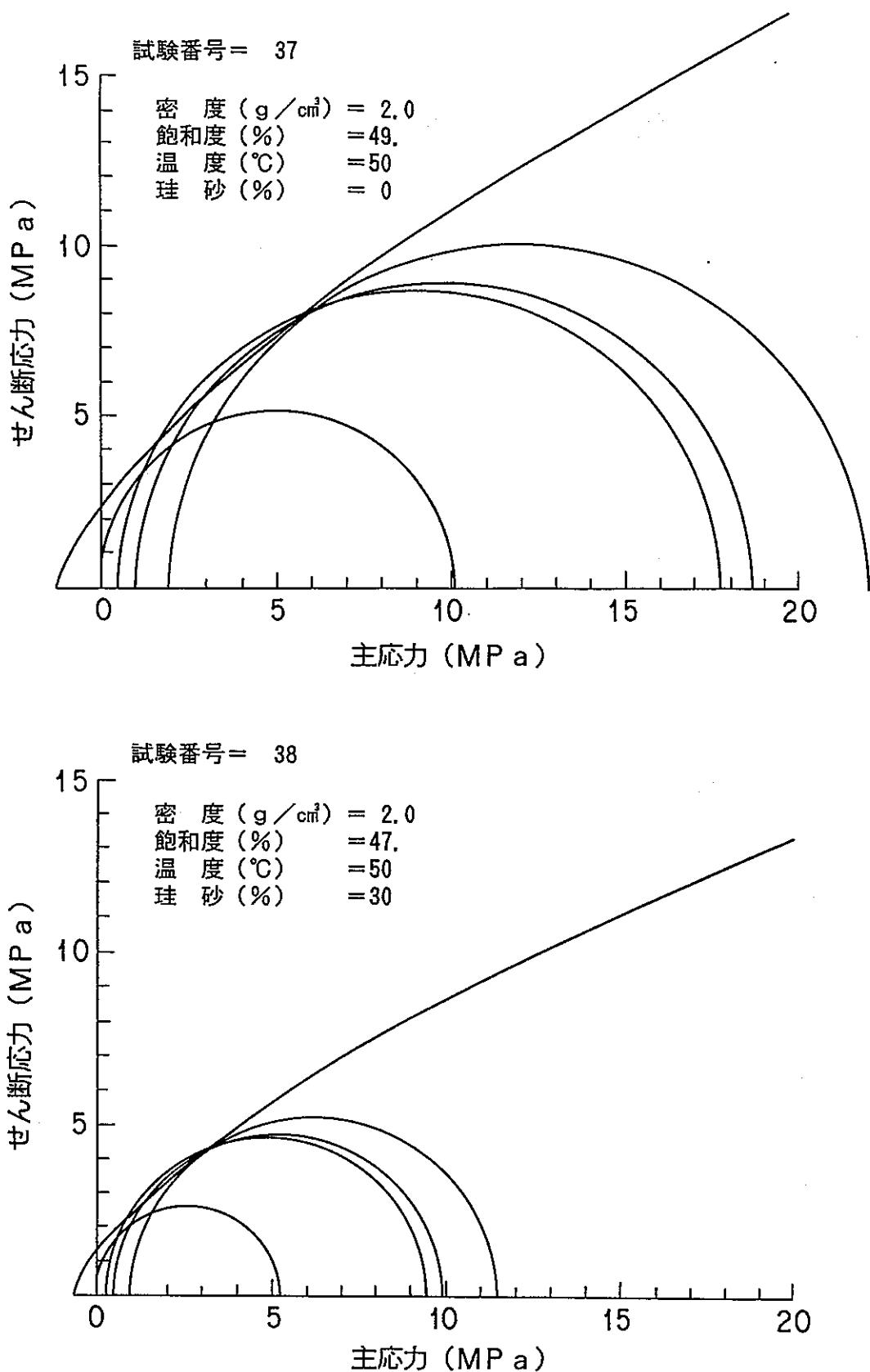


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(19)

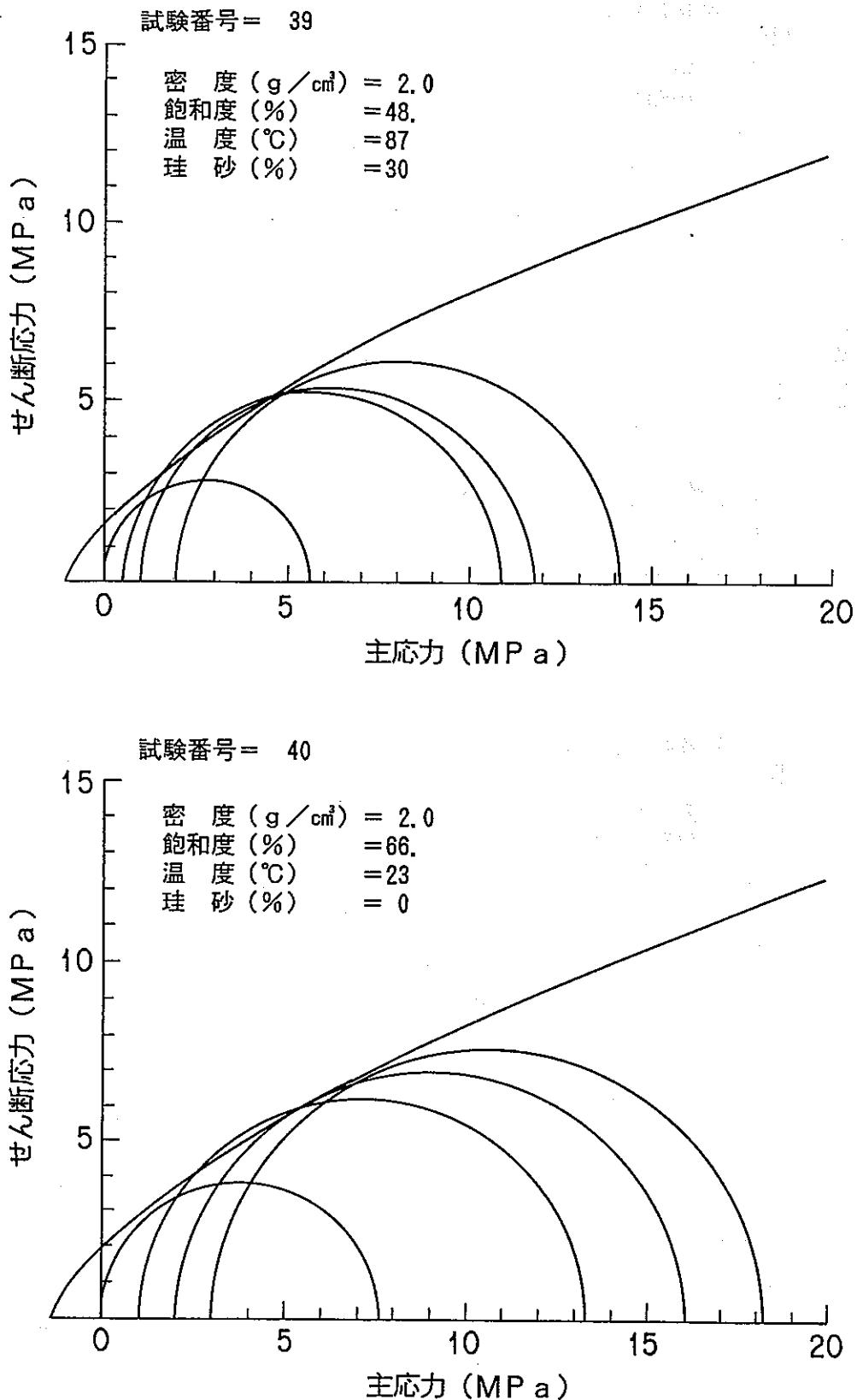


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(20)

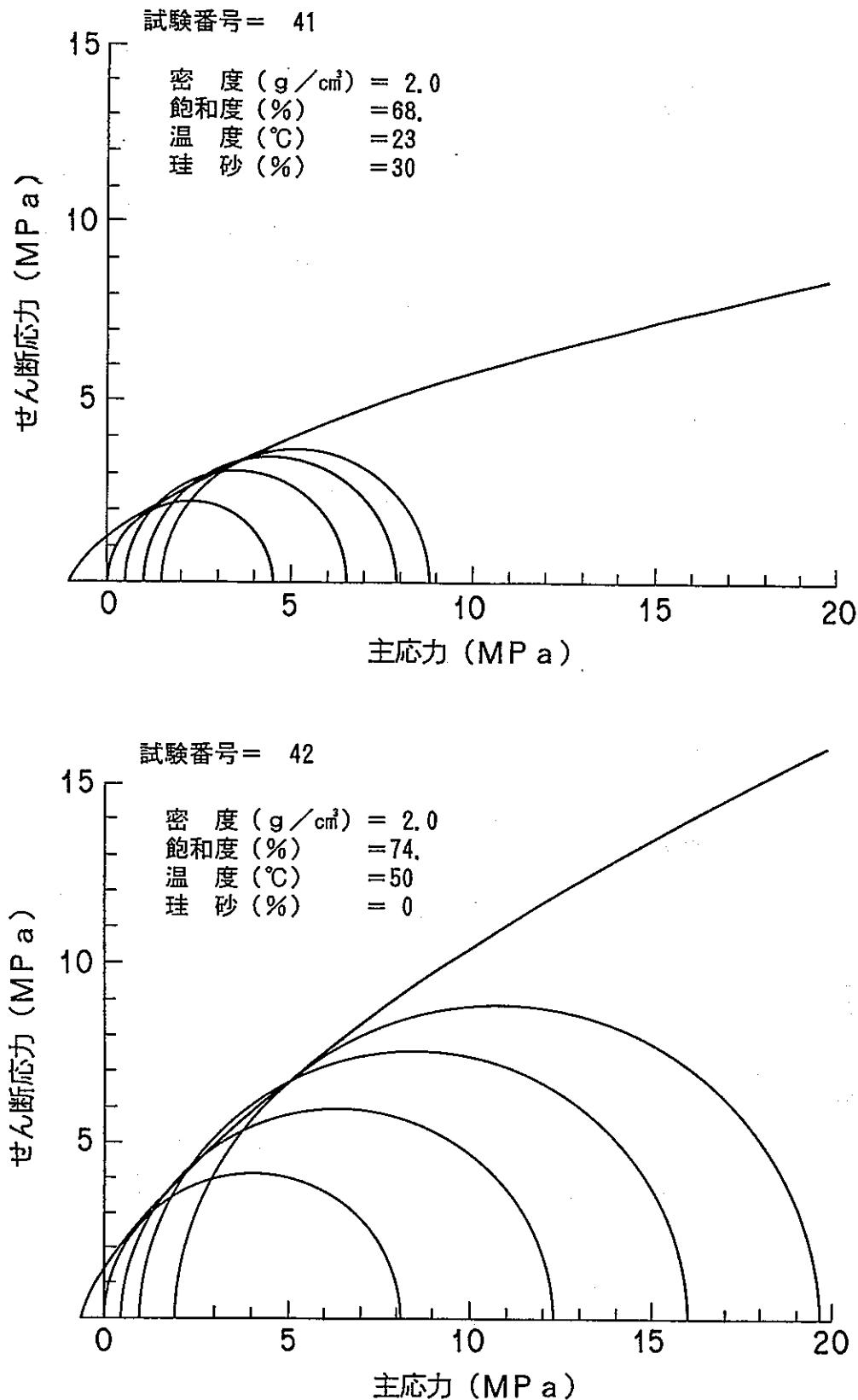


図-4.8 モールの応力円とその包絡線②

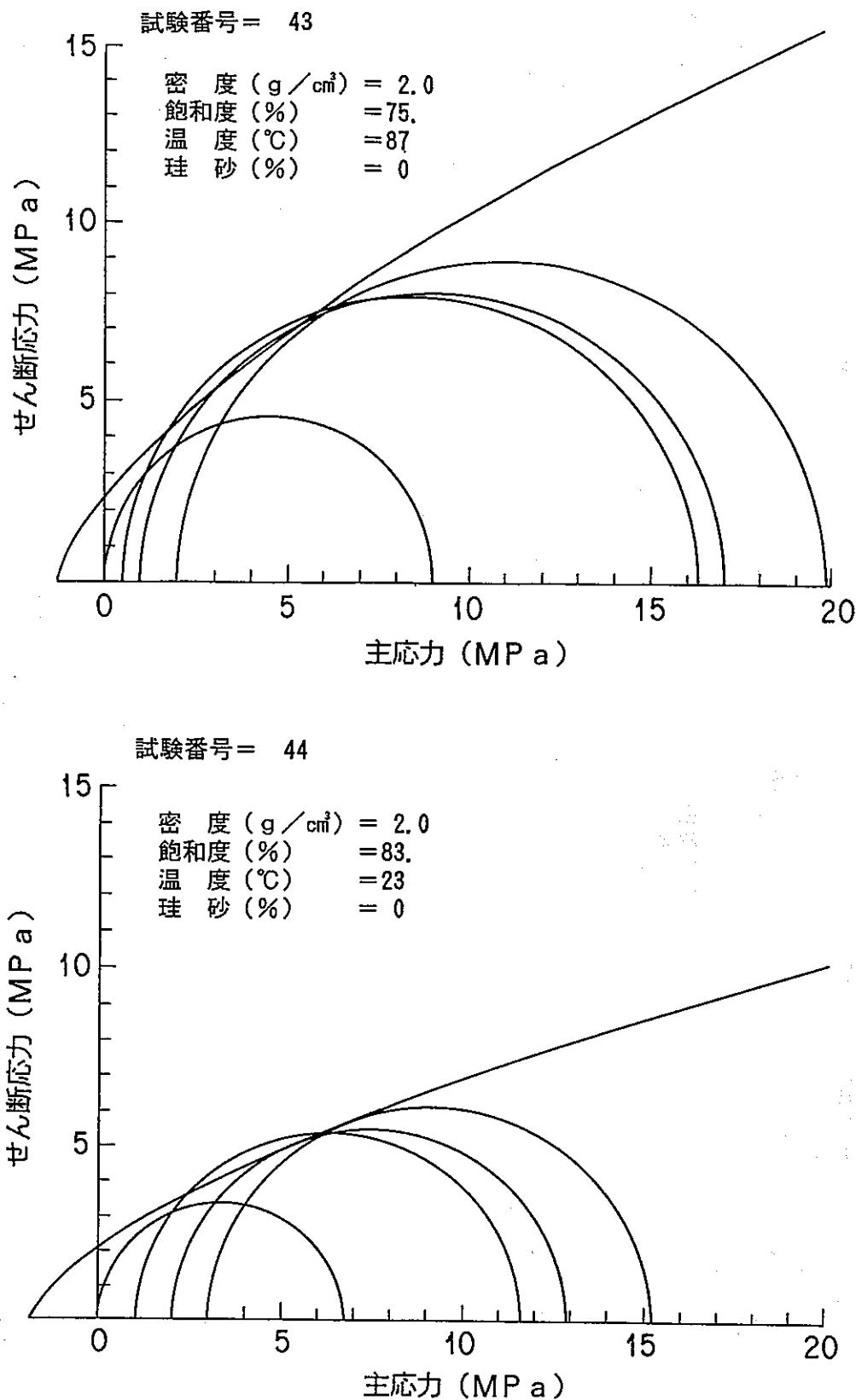


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(2)

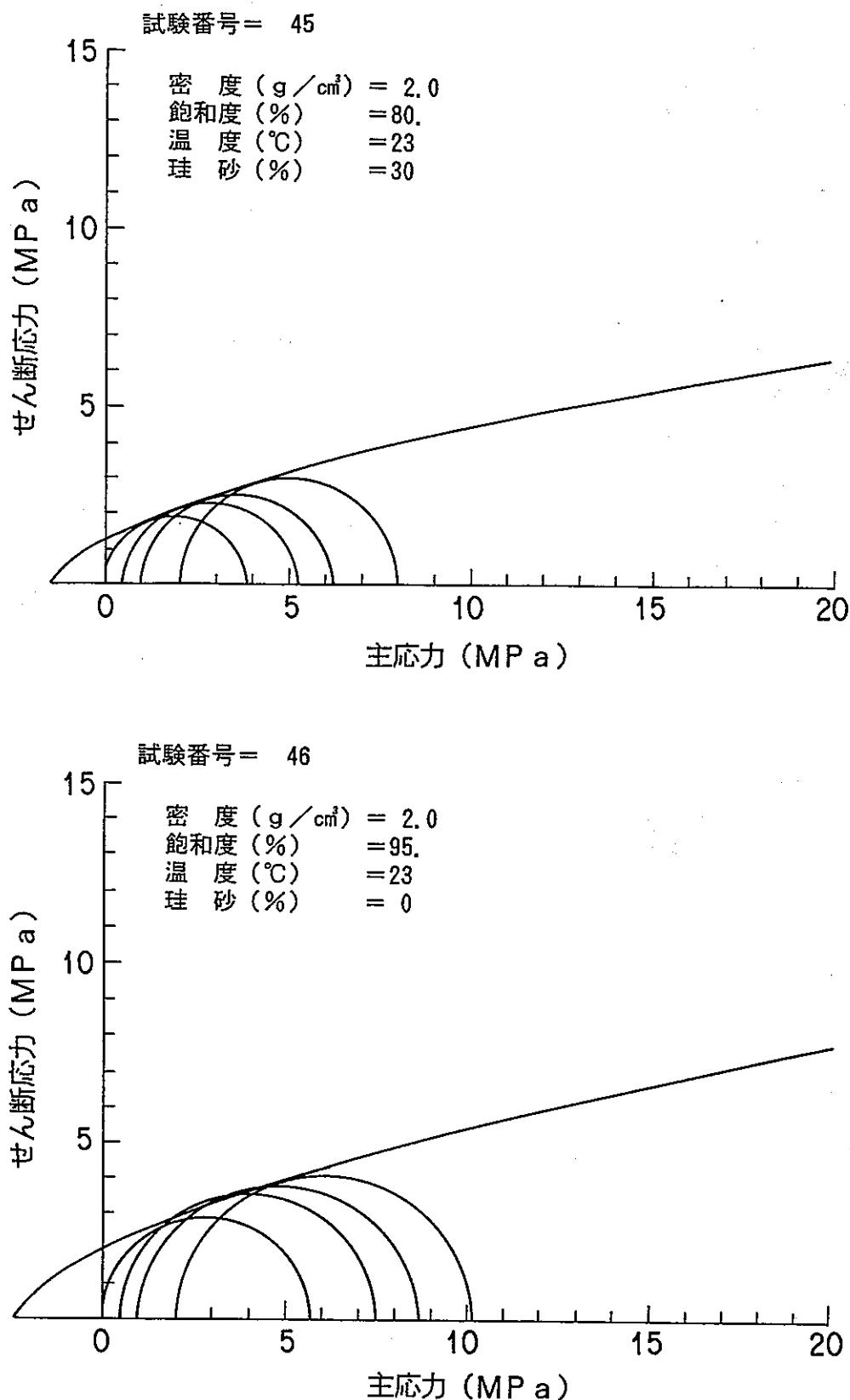


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(23)

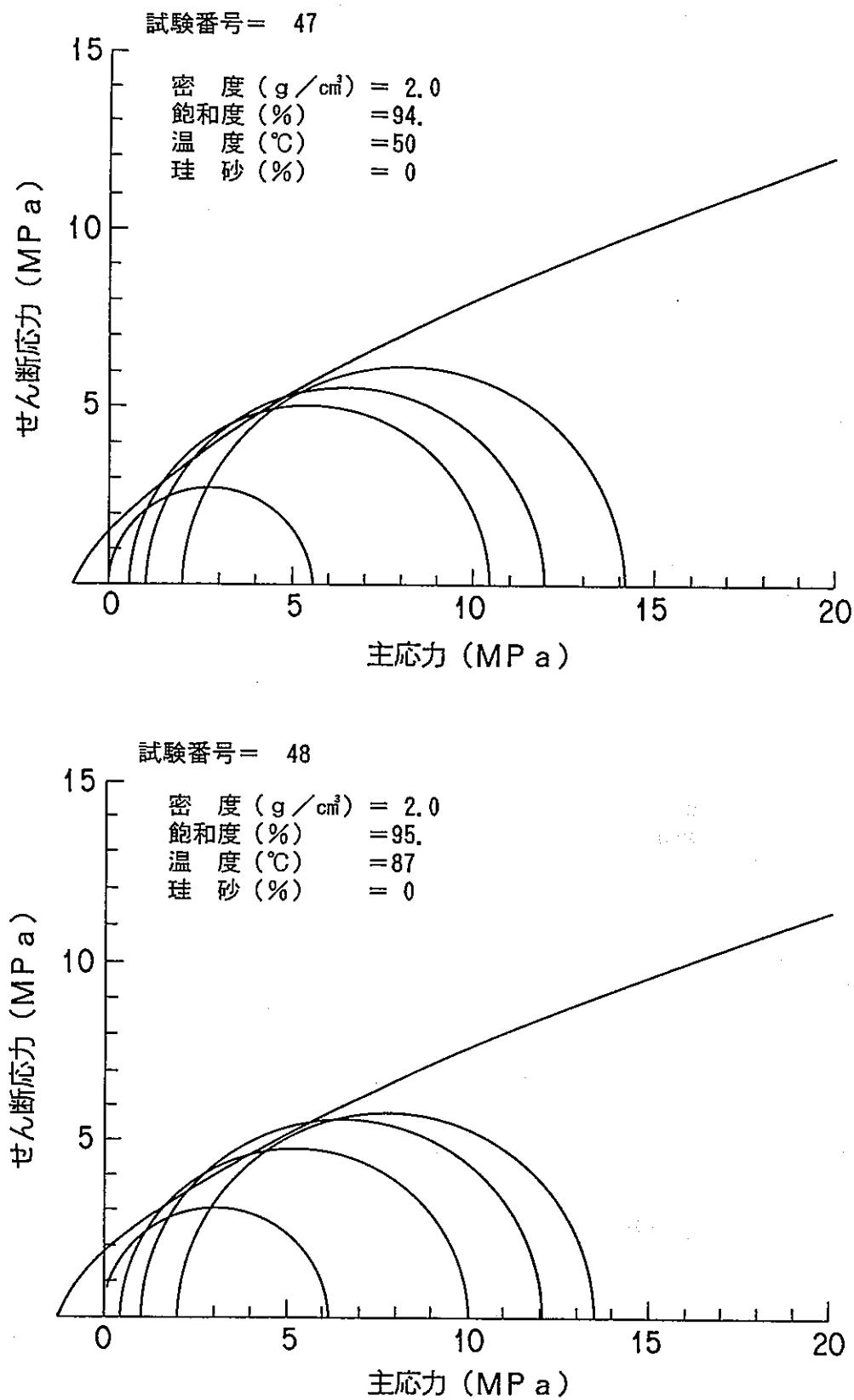
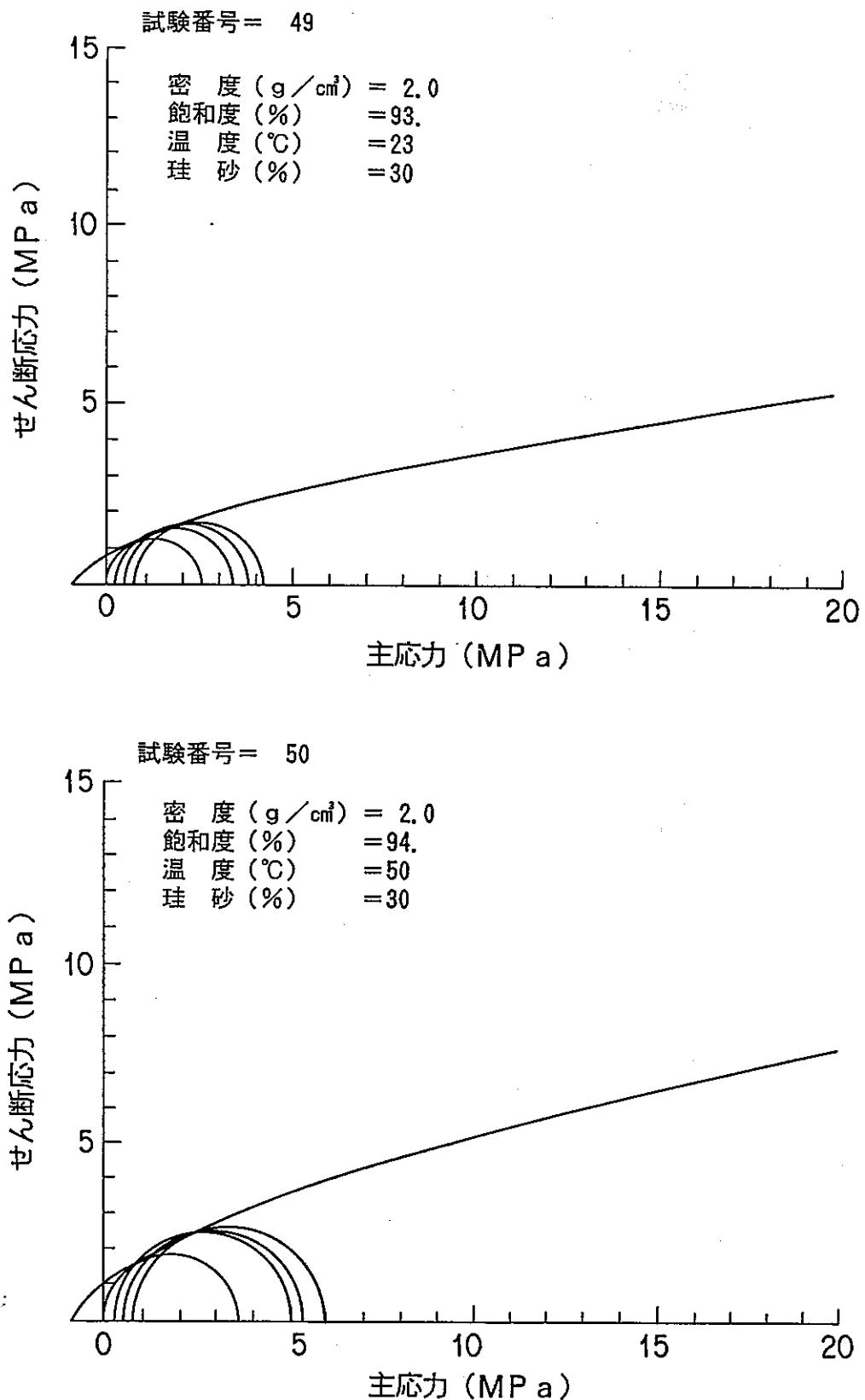


図-4.8 モールの応力円とその包絡線(24)

図-4.8 モールの応力円とその包絡線²⁵⁾

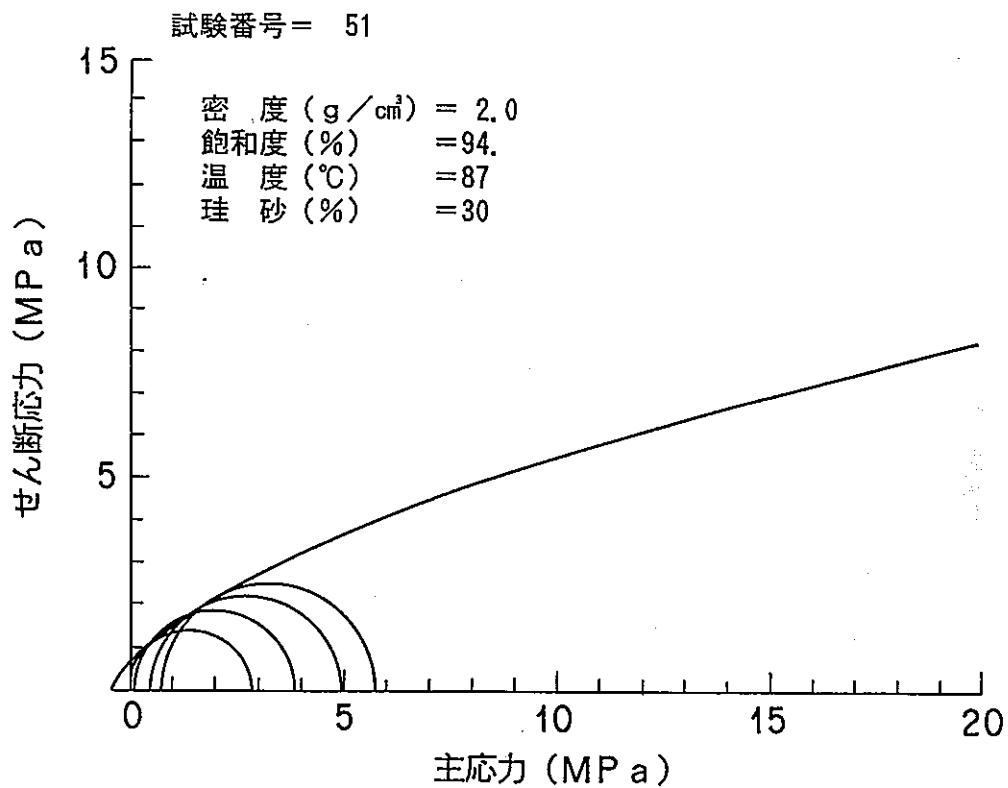


図-4.8 モールの応力円とその包絡線²⁶⁾

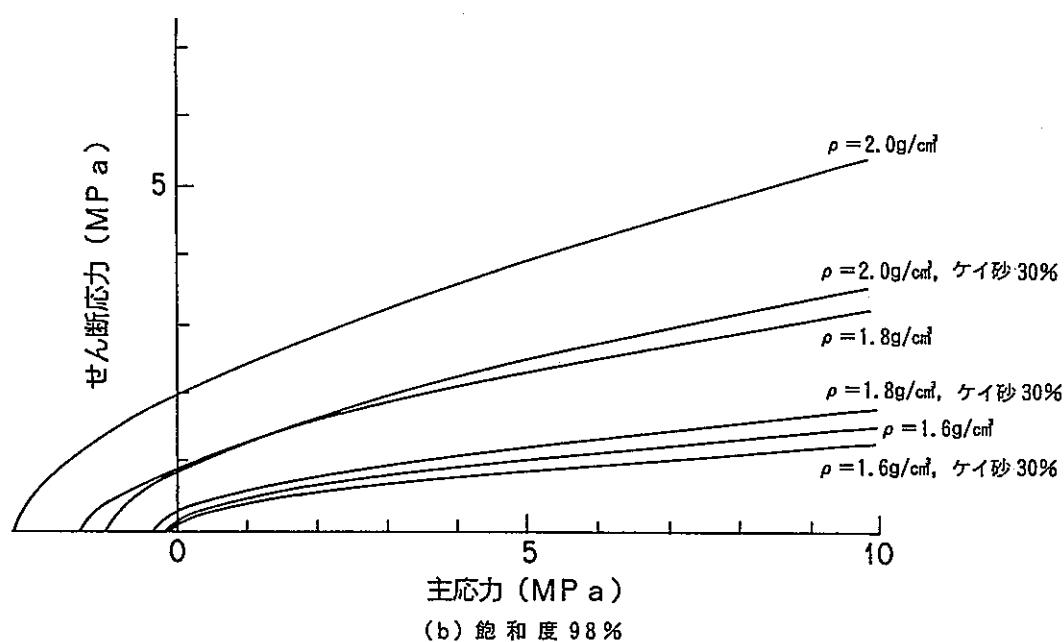
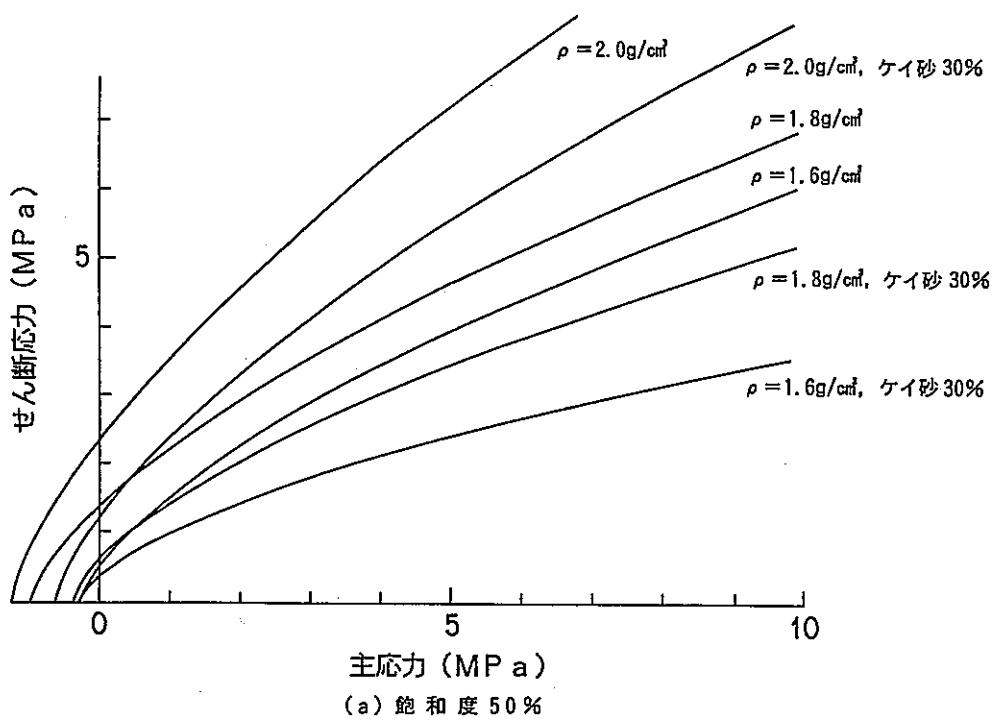


図-4.9 破壊包絡線一密度関係
(試験温度50°C, (a)飽和度50%, (b)飽和度98%)

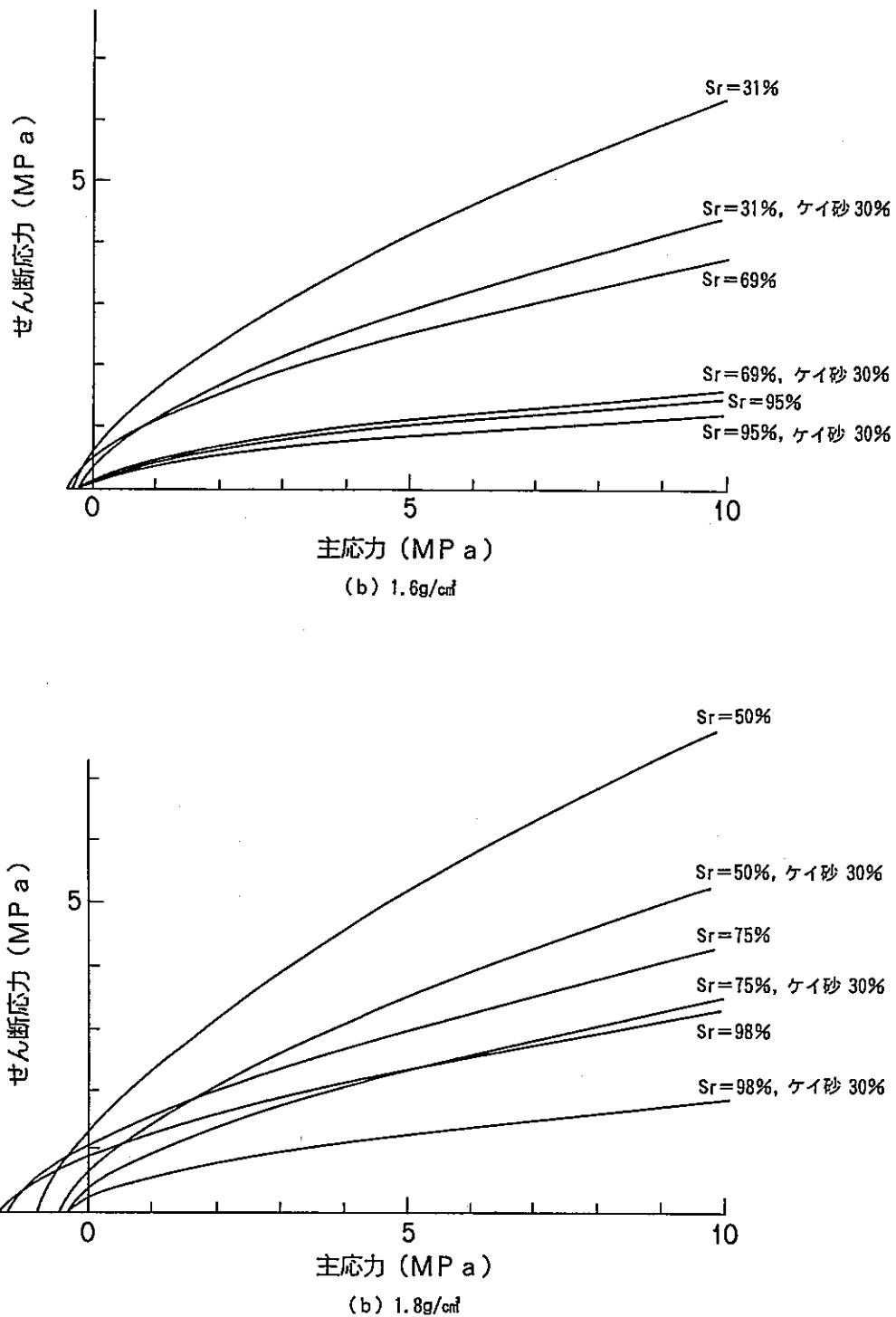


図-4.10 破壊包絡線-飽和度関係

(試験温度23°C, 乾燥密度(a)1.6 g/cm³, (b)1.8 g/cm³)

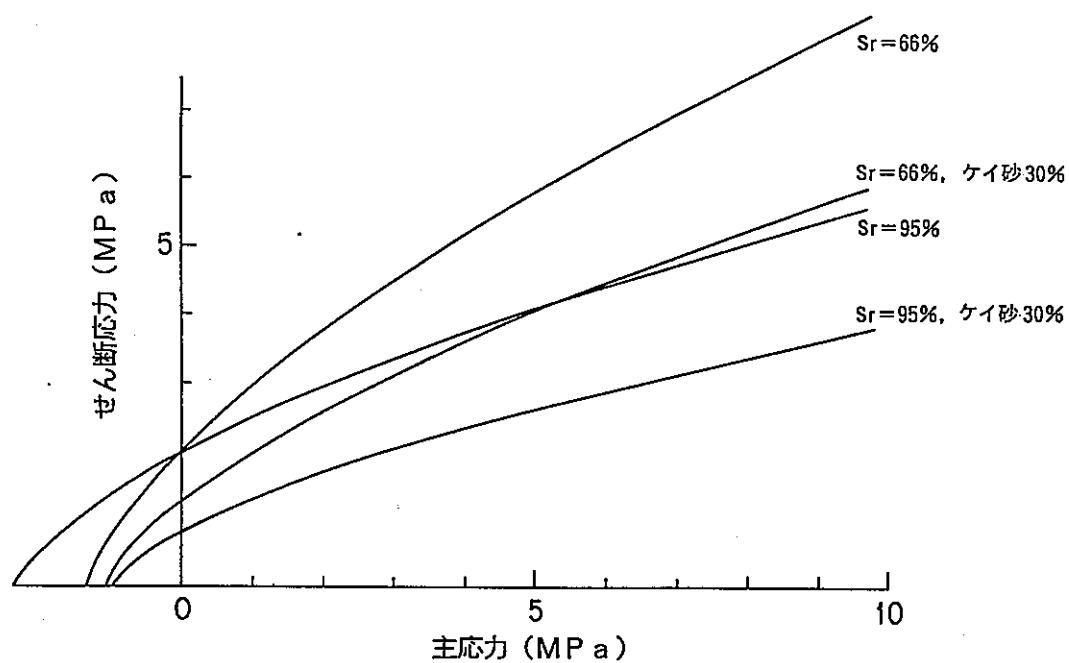


図-4.10 破壊包絡線-飽和度関係
(試験温度23°C, 乾燥密度(c)2.0 g/cm³)

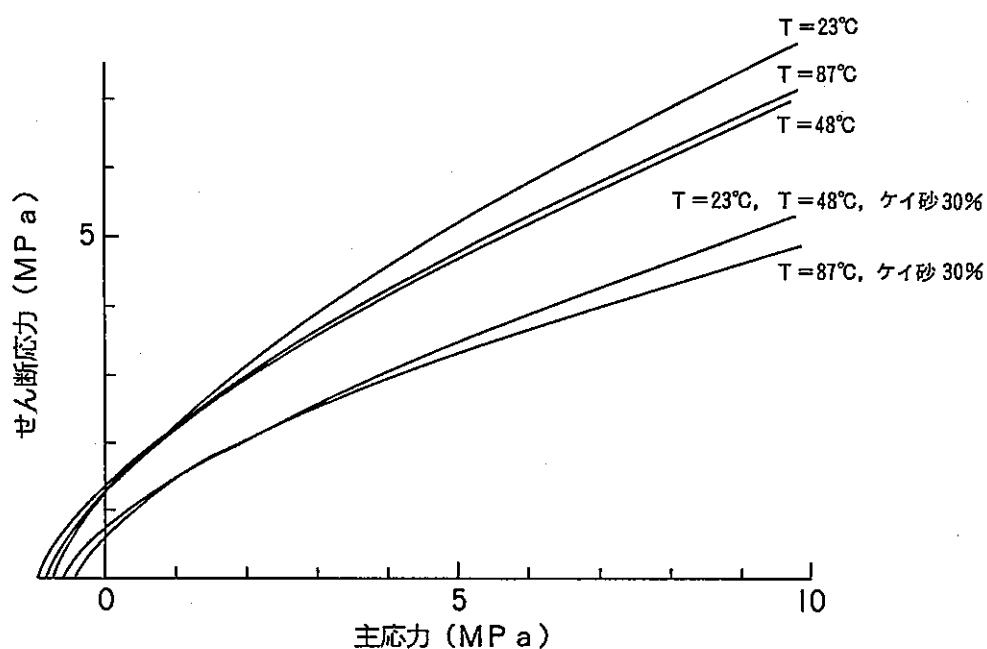


図-4.11 破壊包絡線-温度関係
(乾燥密度 1.8 g/cm³, 饱和度50%)

5. 結 語

本報告では、高レベル廃棄物地層処分における緩衝材の候補材料である圧縮ベントナイトの力学特性の把握を目的として、三軸圧縮試験を実施し圧縮ベントナイトの静的な応力条件下の変形特性、せん断特性やその密度、飽和度、温度依存性について検討した。得られた知見を要約して以下に挙げる。

(1) 応力-ひずみ関係

せん断、ひずみの増加に従い主応力差は増加し、側圧 $\sigma_3 = 0$ 時を除きひずみ硬化がみられる。乾燥密度 ρ_d が小さいほど延性度が大きく、主応力差 q は小さくなる。低飽和度では硬質岩のようなはっきりとした破壊点がみられるのに対し、高飽和度では粘性土のような延性変形が長く続く。

(2) 破壊応力、弾性係数

側圧 σ_3 の増加にともない破壊応力 q_f は増加している。破壊応力、弾性係数とも、ケイ砂を混合した場合、混入しないものに比べてその値は低く、乾燥密度 ρ_d が増加するにつれ高くなる。また、破壊応力、弾性係数とも、飽和度 S_r が増加するにつれ低下する。

(3) せん断特性

破壊時の包絡線は、今回の拘束圧レベルでは、モールの破壊包絡線で示すことができ、せん断特性を概略的に把握することができる。せん断特性は、乾燥密度 ρ_d の増加、飽和度 S_r の減少につれて強度は大きくなり、強度の差は主応力 σ の増加につれて大きくなる。

(4) 温度の影響

今回の試験では、温度 T の影響は他のパラメータに比べて顕著には現れていない。

謝 辞

本研究の実験にあたっては、吉田 宏氏をはじめ鹿島建設株式会社の御協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木英明、柴田雅博、山形順二、広瀬郁郎、寺門一馬；”緩衝材の特性試験（I）”，動燃技術資料[PNC TN8410 92-057]，1992.
- 2) 山形順二、鈴木英明、柴田雅博；”緩衝材の特性試験（II）”，動燃技術資料[PNC TN8410 92-169]，1992.
- 3) Terzaghi, K. ;Theoretical Soil Mechanics, Wiley, New York, 1943.
- 4) 土質工学会編 “土質試験の方法と解説”，1990.
- 5) Börgesson, L., Hökmark H. and Karnland O.; "Rheological properties of sodium smectite clay", SKB Technical Report 88-30, 1988.
- 6) Komine, H., Ogata, N., Horie, Y., Ishii, T., Nishio, S.; "Permeability and Mechanical Properties of Bentonite-Sand Mixture for Sealing LLW Repositories", SMiRT 11, Vol. SD1, pp. 271-276, 1991.
- 7) 日本粘土工学会 “粘土ハンドブック” 1987
- 8) クニミネ工業(株)資料 私信
- 9) 小竹 進、土方邦夫；パソコンで解く熱と流れ、丸善, 1988.
- 10) 藤田朝雄、五月女敦、原 啓二、納多 勝；”緩衝材の熱物性試験”，動燃技術資料[PNC TN1410 92-052]，1992.
- 11) Kuntiwattanakul, P., Towhata, I. ;"Temperature Effects on Mechanical Behavior of Clay.", SMiRT 11, Vol. SD1, pp. 283-288, 1991.
- 12) 友田 孝、西平福宏、稻葉 力、平田篤夫；”膨張性泥岩の物理的・化学的性質について”，第22回土質工学研究発表会講演集、pp. 983-984, 1987.
- 13) E. フック, E. T. ブラウン共著, 小野寺透、吉中龍之進、齊藤正忠、北川隆共訳；”岩盤地下空洞の設計と施工”，土木工学社, 1985.
- 14) Balmer, G. ;"A general analytical solution for Mohr's envelope.", Amer. Soc. Testing Materials, Vol. 52, pp. 1260-1271, 1952.