

カルシウム型化ペントナイトの 圧密非排水三軸圧縮試験

1997年12月

PNC-TN-8410-97-314

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)1997

カルシウム型化ペントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験

報告者 前田宗宏*、伊藤 勝**

三原守弘***、田中益弘****

要旨

人工バリアシステムを構成する緩衝材には、廃棄体等の自重や周辺岩盤のクリープ変形等により、長期的な外力が作用すると予測される。緩衝材の力学的安定性を評価するためには、これらの外力に対する緩衝材の力学的変形挙動を明らかにする必要がある。

一方、放射性廃棄物の処分において緩衝材としてナトリウム型ペントナイトを使用した場合、ペントナイト中方解石や地下水成分の影響により、処分環境において長期的にナトリウム型からカルシウム型に変化することが考えられる。また、TRU 廃棄物処分施設においては、構造躯体や充填材、さらには支保にセメント系の材料を使用する可能性があり、その場合、カルシウム型への変化は顕著になるものと考えられる。したがって、TRU 廃棄物の処分研究においては、カルシウム型に変化したペントナイトの特性を知る必要がある。

本報告書は TRU 廃棄物の処分概念の検討の一環として行われた、飽和した圧縮ペントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験 (CU 試験) についてまとめたものである。本試験では、ナトリウム型及びカルシウム型化ペントナイト (ペントナイト含有率 100%) を乾燥密度が 1.6g/cm^3 になるように圧縮成型し、飽和させた供試体を用いた。試験は三軸圧縮試験装置を用いて行い、飽和供試体を 0.5MPa から 2.0MPa の圧密応力で圧密後、非排水条件で圧縮試験を行った。

その結果、カルシウム型化ペントナイトの力学特性は、ナトリウム型ペントナイトのそれよりわずかに大きくなる傾向を示した。しかし、その差は試験データのバラツキの範囲に収まる程度で、顕著な差とは認められなかった。したがって、緩衝材の力学的変形挙動の保守的な検討には、ナトリウム型ペントナイトの力学特性を用いて検討を行えばよいと判断された。

* 株式会社小堀鐸二研究所

** 東海事業所 環境技術開発部

*** 東海事業所 環境技術開発部 処分システム解析室

**** 鹿島建設株式会社 技術研究所

目 次

1 はじめに	1
2 試験条件	2
2.1 使用材料	2
2.2 試験条件	3
2.3 試験方法	3
2.3.1 試料調整	4
2.3.2 圧縮固化	4
2.3.3 鮫 和	4
2.3.4 供試体の設置	6
2.3.5 圧 密	6
2.3.6 せん断	9
2.3.7 乾燥重量の測定	9
2.4 試験結果	10
2.4.1 圧縮固化	10
2.4.2 鮫 和	10
2.4.3 圧 密	11
(1) 圧密量及び圧密時間	11
(2) 間隙水圧係数 B 値	13
(3) 供試体の圧密状態	14
2.4.4 せん断	16
(1) せん断試験における粘土の一般的挙動	16
(2) 本試験の結果	16
(3) 並河らの結果との比較	24
3 力学パラメータの設定	29
3.1 せん断強度定数	29
3.2 変形係数	35
3.3 ポアソン比	41
4 まとめと今後の課題	44
4.1 まとめ	44

4.2 今後の課題	46
謝 辞	46
参考文献	47
付録1 Gap-Senser 非接触式変位計	48

1 はじめに

現在までのところ、TRU 廃棄物の地層処分における緩衝材として、圧縮ペントナイトが有望な候補材料と考えられる。緩衝材には、拡散場を維持するための止水性、核種吸着遅延性、力学的安定性等の性能が要求される。力学的安定性の観点から、人工バリアシステムを構成する緩衝材には、廃棄体等の自重や周辺岩盤のクリープ変形等により、長期的な外力が作用すると予測される。緩衝材の力学的安定性を評価するためには、これらの外力に対する緩衝材の力学的変形挙動を明らかにする必要がある。緩衝材として用いるペントナイトのような粘土材料の力学的変形挙動を調べる試験には、圧密試験や三軸圧縮試験等があり、動燃事業団においても、これまでにナトリウム型ペントナイトに対し圧密試験¹⁾や非圧密非排水三軸圧縮試験(UU 試験)²⁾、圧密非排水三軸圧縮試験(CU 試験)³⁾等が行われている。

一方、放射性廃棄物の処分において緩衝材としてナトリウム型ペントナイトを使用した場合、ペントナイト中の方解石や地下水成分の影響により、処分環境において長期的にナトリウム型からカルシウム型に変化することが考えられる。また、TRU 廃棄物処分施設においては、構造躯体や充填材、さらには支保にセメント系の材料を使用する可能性があり、その場合、カルシウム型への変化は顕著になるものと考えられる。したがって、TRU 廃棄物の処分研究においては、カルシウム型に変化したペントナイトの特性を知る必要がある。

本報告書は TRU 廃棄物の処分概念の検討の一環として行われた、飽和した圧縮ペントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験(CU 試験)についてまとめたものである。圧密非排水三軸圧縮試験は、主として飽和した粘土材料を対象に、地盤上に載荷された荷重で地盤が圧密された時の強度の予測や有効応力による強度定数を決定することを目的としている⁴⁾。また、圧密非排水三軸圧縮試験により得られる強度定数は、圧密排水三軸圧縮試験(CD 試験)で求まるそれとほぼ等しくなる⁵⁾。試験結果としては、任意の拘束圧下での非排水せん断強度、応力経路、応力-ひずみ関係等が得られる。本試験では、ナトリウム型及びカルシウム型化ペントナイト(ペントナイト含有率 100%)を乾燥密度が 1.6g/cm^3 になるように圧縮成型した後、飽和させた供試体を用いた。試験は三軸圧縮試験装置を用いて行い、飽和供試体を 0.5MPa から 2.0MPa の圧密応力で圧密後、非排水条件で圧縮試験を行った。せん断方法としては、ひずみ制御方式を用いた。

なお、圧密非排水三軸圧縮試験は、委託研究「TRU 廃棄物の処分概念の検討(Ⅱ)」(委託先:鹿島建設株式会社)において実施された。

2 試験条件

2.1 使用材料

ナトリウム型ペントナイトには、表-2.1.1 に示すとおりクニミネ工業社の市販製品であるクニゲル V1 を使用した。また、カルシウム型化ペントナイトは、クニゲル V1 を強制的にカルシウム型に変質させることにより作製した。以下においては、ナトリウム型ペントナイトに対しクニゲル V1、カルシウム型化ペントナイトに対し Ca 型化クニゲル V1 と記述する。

Ca 型化クニゲル V1 の作製に当たっては、クニゲル V1 の随伴鉱物をできるだけ変化させないように、塩化カルシウム水溶液を用いてモンモリロナイトの層間をカルシウムに置換した⁶⁾。その後、ろ過・水洗いを行い可能な限りペントナイトに付着した塩化物イオンを除去し、その上澄み液に硝酸銀溶液を添加して溶液が白濁しないことを確認した。クニゲル V1 および Ca 型化クニゲル V1 の浸出陽イオン量を表-2.1.2 に示す。浸出陽イオン量の測定結果から、浸出陽イオンのほとんどがカルシウムイオンであることが分かる。また、X 線回折分析により、ペントナイトの随伴鉱物が変化していないことを確認した。

また、表-2.1.3 には、予備試験により取得した各使用材料の物理特性を示す。

表-2.1.1 使用材料

ペントナイト	製造元及び商品名
ナトリウム型ペントナイト	クニミネ工業社製、クニゲル V1 [®]
カルシウム型化ペントナイト	クニゲル V1 [®] を強制的にカルシウム型に変質させたもの

表-2.1.2 浸出陽イオン量⁶⁾

	クニゲル V1	Ca 型化クニゲル V1
Na ⁺	53.9	5.2
K ⁺	1.4	1.4
浸出陽イオン量 (meq/100g)	Ca ²⁺ 48.5	102.8
	Mg ²⁺ 7.4	7.0
合計	111.2	116.4
陽イオン交換容量 (meq/100g)	59.9	60.8

表-2.1.3 使用材料の物理特性

ペントナイト	自然含水比 w _n (%)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _P (%)	塑性指数 I _P (%)
クニゲル V1	5.8	2.7	419.2	18.4	400.8
Ca 型化クニゲル V1	6.5	2.7	121.0	23.9	97.1

2.2 試験条件

以下に試験条件を示す。乾燥密度、供試体形状及び初期含水比は、あくまでも目標値である。

- ・乾燥密度 : 1.6g/cm^3
- ・供試体形状 : 直径 5cm × 高さ 10cm
- ・初期含水比 : 10% (飽和度 39%)
- ・有効拘束圧 (圧密応力) : 0.49、0.98、1.96MPa
- ・試験温度 : 室温 (20°C 前後)
- ・試験水 : 蒸留水

2.3 試験方法

試験は、基本的に JSFT523 に準じて行う。図-2.3.1 に試験の具体的なフローを示すとともに、以下に詳述する。

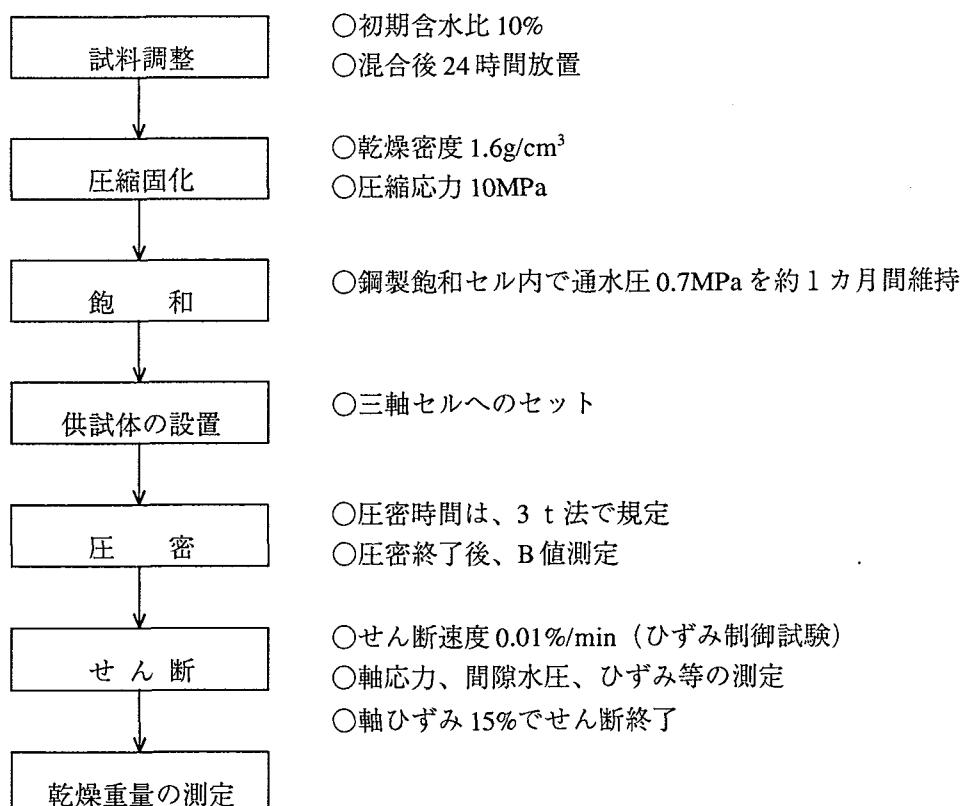


図-2.3.1 ベントナイト三軸圧縮試験の試験フロー

2.3.1 試料調整

粉末のベントナイトを必要重量分測定し、含水比10%になるように水を霧吹きで散布し、十分に混合する。混合後は、水分分布がなるべく平均化することを目的に24時間放置する。

2.3.2 圧縮固化

含水比調整した試料の一部より含水比をあらかじめ測定した上で目標乾燥密度(1.6g/cm^3)に必要な湿潤重量を測定し、圧縮固化体作製治具に投入する。その後、一軸圧縮試験装置で圧縮応力 10MPa 程度を加え、所要の供試体形状(直径 $5\text{cm} \times$ 高さ 10cm)になるよう静的に固化させる。図-2.3.2に圧縮固化した供試体例を示す。

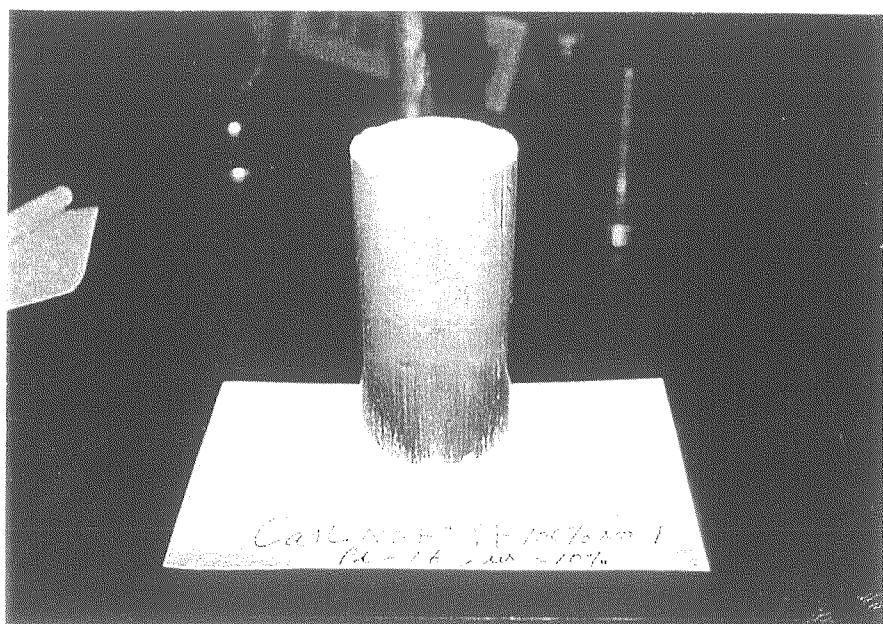


図-2.3.2 圧縮固化したベントナイト供試体例

2.3.3 飽和

圧縮固化したベントナイト供試体の飽和は、以下の手順で行う。また、図-2.3.3に飽和セル、図-2.3.4に飽和状況を示す。

- ① 供試体飽和セルにろ紙を介して設置する。
- ② 飽和セルの上下から真空度を徐々に高めていき、24時間真空脱気する。
- ③ 今度は圧力を徐々に大気圧に戻して、上下から吸水させた後、通水圧 0.7MPa で30日間吸水させる。

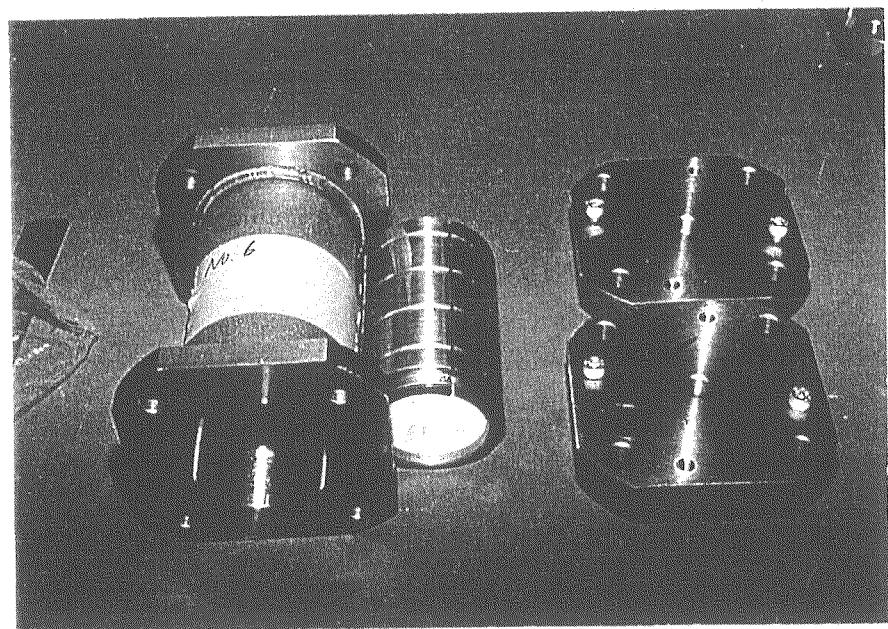


図-2.3.3 飽和セル

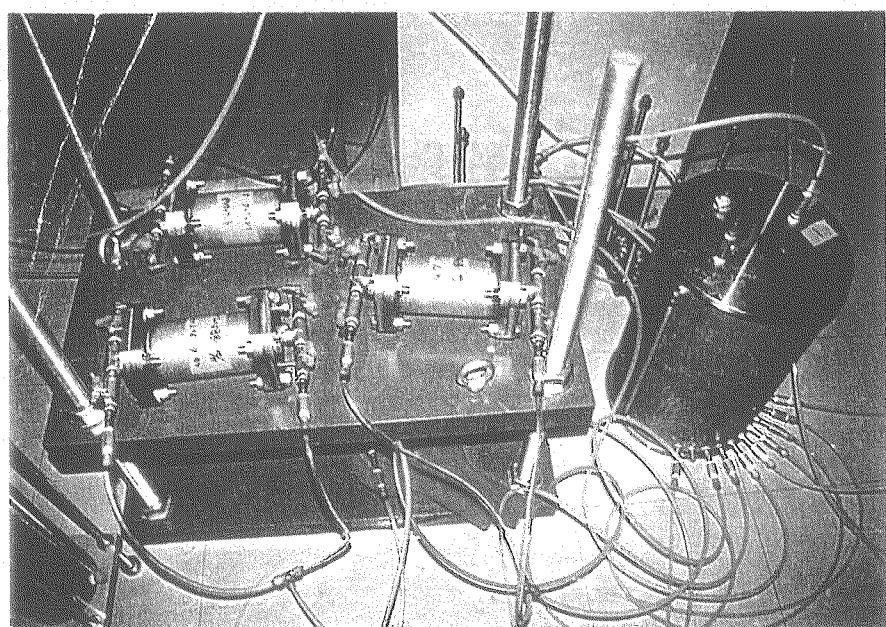


図-2.3.4 飽和状況

2.3.4 供試体の設置

飽和セルから供試体を取り出した後、ろ紙を外し、径、高さ及び重量を測定した。その後、すみやかに三軸圧縮試験装置に設置した。三軸セルへの設置は、以下の手順で行う。また、図-2.3.5 に三軸圧縮試験装置の概要、図-2.3.6 に供試体設置状況を示す。

- ① ポーラスストーンと一体になったペデスタル上にろ紙を敷き、供試体を置く。
- ② 供試体側面には、新たにペーパードレーン（ろ紙）を巻き、上端面にもろ紙を敷く。
- ③ ゴムスリーブをかぶせキャップを置き、上下のゴムスリーブをシールする。
- ④ 上下端面からの排水設備のセットを行う。
- ⑤ 三軸セルをセットし、セル内に水を充満させる。

2.3.5 圧密

供試体を三軸セルに設置した後、上下のコックを開き所定の有効拘束圧（0.49、0.98、1.96MPa）で等方的に圧密を開始する。この時、間隙水圧及び拘束圧には、0.69MPa の背圧を負荷する。したがって、拘束圧は、有効拘束圧+背圧（1.18、1.67、2.65MPa）となる。

圧密の終了は、いくつかある規定方法の内、最も妥当な方法である 3 t 法⁷⁾を適用して判断した。この方法は、圧密量～時間（対数）曲線の最急勾配部の接線を時間軸方向に 3 倍平行移動し、この直線と圧密量～時間（対数）曲線が交差した時点で圧密が終了したとするものである（図-2.3.7 参照）。また、図-2.3.8 に圧密状況を示す。

また、供試体の飽和の指標となる間隙水圧係数 B 値を測定する。B 値は、圧密終了後、拘束圧 σ_3 を 0.49MPa 減圧させた時に生じる間隙水圧の変化 Δu を測定し、次式により算定する。

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3 = \Delta u / 0.49$$

ここに、B : 間隙水圧係数 B 値

Δu : 間隙水圧の変化量 (MPa)

$\Delta \sigma_3$: 拘束圧の変化量 (MPa) ($\Delta \sigma_3 = 0.49\text{ MPa}$)

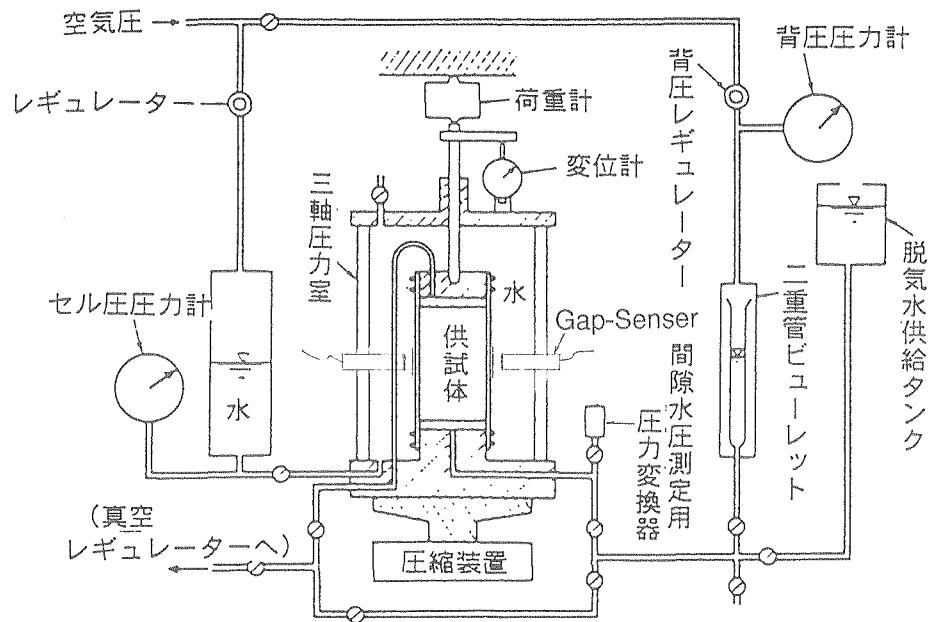


図-2.3.5 三軸圧縮試験装置の概要

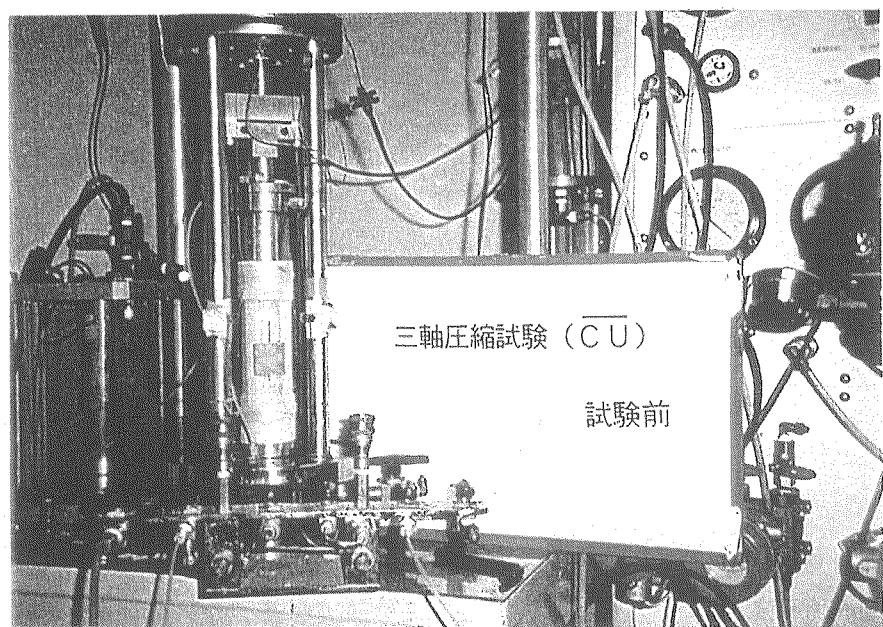


図-2.3.6 供試体設置状況

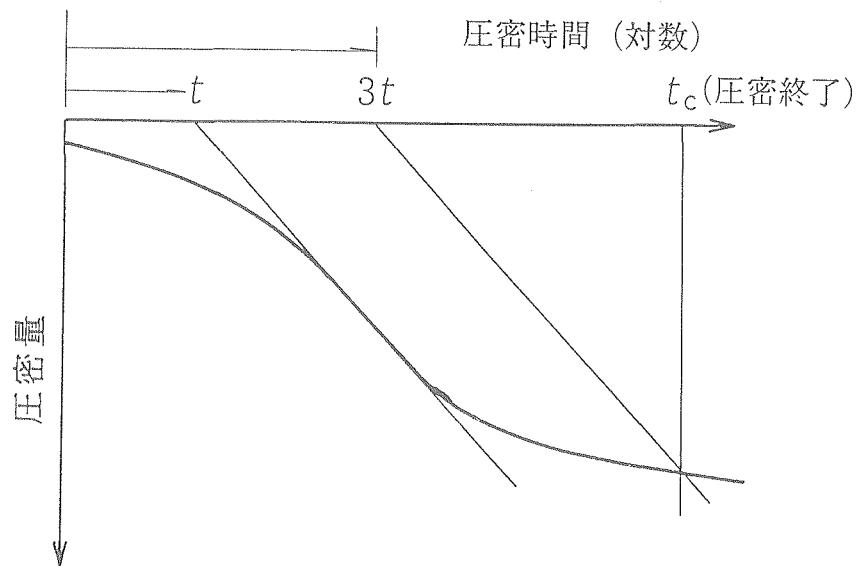


図-2.3.7 3 t 法概念図

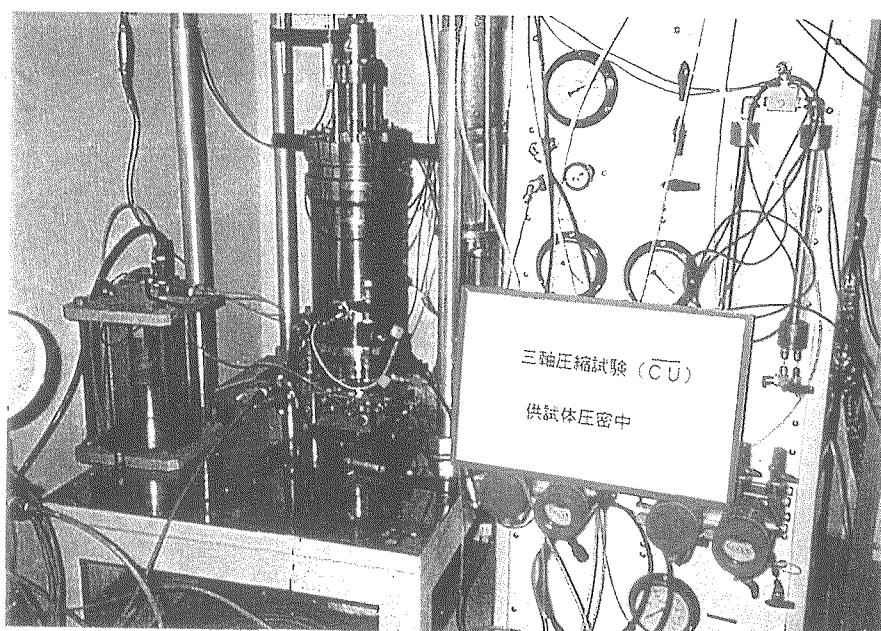


図-2.3.8 圧密状況

2.3.6 せん断

三軸セルの上下のコックを閉じて非排水状態にした上で、通常の粘土に適用されるひずみ速度（0.2～0.05%/min）⁹⁾よりも小さい速度（0.01%/min）で軸載荷を行う（ひずみ制御試験）。これは、一般にひずみ速度が速くなると、強度が大きく評価されるためである¹⁰⁾。ひずみが15%を越えた段階で供試体が破壊したとみなし、載荷を停止する。この間、軸応力、軸ひずみ、間隙水圧及び側方ひずみの測定を行う。通常の三軸圧縮試験では、側方ひずみの測定は行わないが、今回はポアソン比を算定することを目的にGap-Senser[®]（非接触式変位計、付録1参照）を取り付け、測定する。図-2.3.9にせん断後の供試体例を示す。

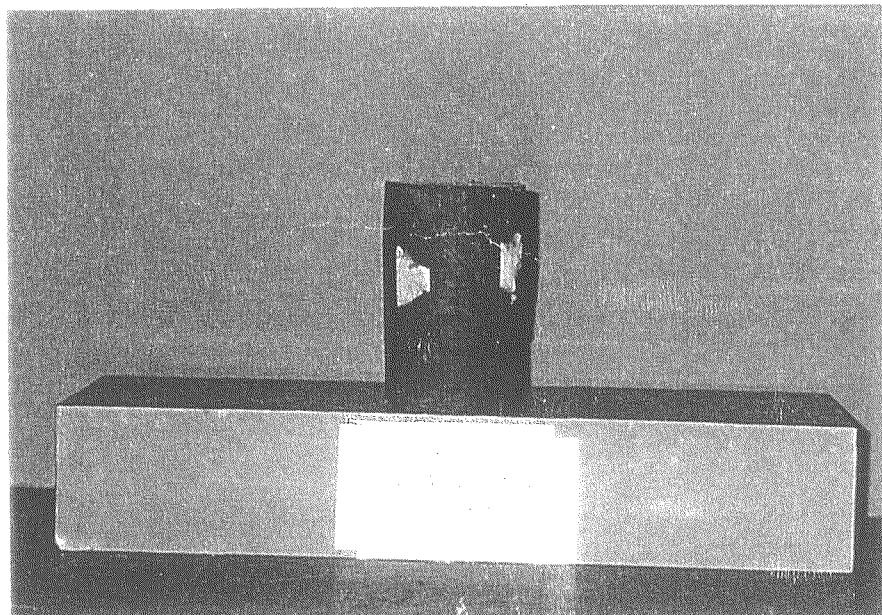


図-2.3.9 せん断後の供試体例

2.3.7 乾燥重量の測定

せん断試験終了後、試験に供した試料の乾燥重量を1日間110°Cで乾燥した後、測定する。この乾燥重量を基に吸水飽和後の飽和度を算出する。

2.4 試験結果

2.4.1 圧縮固化

表-2.4.1 に圧縮固化後の供試体諸元を示す。試料調整の段階では含水比 10%を目標としていたが、Ca 型化クニゲル V1 においては低めの値となった。

表-2.4.1 圧縮固化後の供試体諸元

有効拘束圧 σ_s (MPa)	径 ϕ (cm)	高さ h (cm)	体積 V (cm ³)	湿潤重量 W_t (g)	乾燥重量 W_d (g)	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)
クニゲル V1									
0.49	4.99	10.00	195.56	343.8	312.3	1.60	10.1	0.69	39.5
0.98	4.99	9.99	195.37	349.2	317.2	1.62	10.1	0.67	40.7
1.96	5.00	10.00	196.35	349.9	317.8	1.62	10.1	0.67	40.7
Ca 型化クニゲル V1									
0.49	4.98	10.08	196.34	333.5	314.0	1.60	6.2	0.69	24.3
0.98	4.98	10.11	196.92	339.0	319.2	1.62	6.2	0.67	25.0
1.96	4.98	10.10	196.73	338.2	310.3	1.58	9.0	0.71	34.2

備考：乾燥重量 $W_d = 100W_t / (100+w)$ 。

乾燥密度 $\gamma_d = W_d / V$ 。

間隙比 $e = (1 - \gamma_d / \rho_s) / (\gamma_d / \rho_s)$ 。

飽和度 $S_r = w / \rho_s / e$ 。

ペントナイトの真密度 ρ_s は共に 2.7g/cm³ として計算。

2.4.2 飽和

表-2.4.2 に飽和後の供試体諸元を示す。

表-2.4.2 飽和後の供試体諸元

有効拘束圧 σ_s (MPa)	径 ϕ (cm)	高さ h (cm)	体積 V (cm ³)	湿潤重量 W_t (g)	乾燥重量 W_d (g)	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)
クニゲル V1									
0.49	5.02	10.10	199.90	392.6	303.4	1.52	29.1	0.78	100.7
0.98	5.04	10.02	199.90	397.5	312.1	1.56	27.4	0.73	101.3
1.96	5.03	9.90	196.73	399.7	320.7	1.63	24.6	0.66	100.6
Ca 型化クニゲル V1									
0.49	4.98	9.73	189.52	377.4	299.9	1.58	25.8	0.71	98.1
0.98	4.97	10.22	198.27	381.2	293.9	1.48	29.7	0.82	97.8
1.96	5.03	9.90	196.73	390.4	314.0	1.60	24.3	0.69	95.1

備考：乾燥重量は、せん断終了後に測定した値。

乾燥密度 $\gamma_d = W_d / V$ 。

含水比 $w = (100W_t / W_d) - 100$ 。

間隙比 $e = (1 - \gamma_d / \rho_s) / (\gamma_d / \rho_s)$ 。

飽和度 $S_r = w / \rho_s / e$ 。

ペントナイトの真密度 ρ_s は、共に 2.7g/cm³ として計算。

乾燥密度 1.6g/cm^3 程度では、飽和期間 30 日、通水圧 0.7MPa という条件で供試体がほぼ飽和状態になることが確認された。

クニゲル V1 の飽和度において 100%を超える値が示されているが、実際には 100%を超えることはあり得ないので、供試体形状等の計測誤差に起因するものと考えられる。

また、前記の圧縮固化後の乾燥密度と飽和後のそれとでは、相違が生じている。これは、膨潤による体積増加、計測誤差、ベントナイト真密度及び含水比の仮定による計算値と実際の相違、ろ紙交換による供試体表面の剥離等種々の要因が重なり合った結果と考えられる。特に、クニゲル V1 の有効拘束圧 0.49MPa 及び Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 0.98MPa においては、乾燥密度が約 1.5g/cm^3 となった。

2.4.3 圧密

(1) 圧密量及び圧密時間

図-2.4.1 は、圧密開始後の経過時間と供試体の体積圧縮量を示したものである。この図で圧密時間を 3t 法で規定した場合、今回の試験条件(乾燥密度 1.6g/cm^3 、圧密応力 $\sigma_3 = 0.49$ 、 0.98 、 1.96MPa)では、7日間(10,000分)までに圧密の終了を確認することができた。

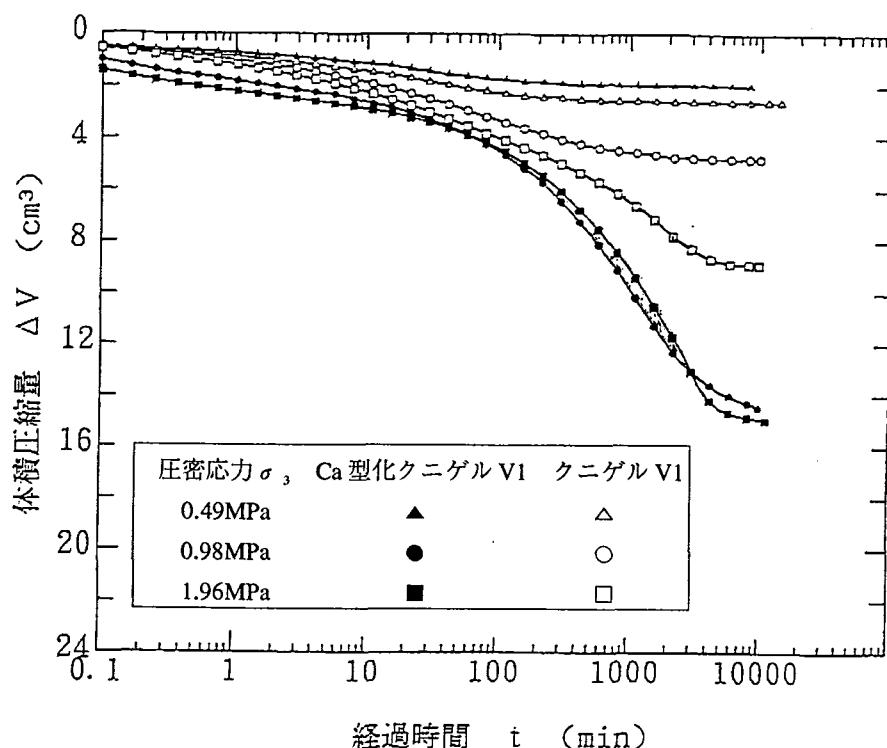


図-2.4.1 経過時間と体積圧縮量の関係

表-2.4.3 に圧密終了時の軸圧縮量、体積圧縮量及び圧密時間を示す。軸圧縮量ならびに体積圧縮量は、圧密応力の増加に伴い大きくなる傾向を示す。しかし、Ca型化クニゲルV1の圧密応力 $\sigma_3 = 0.98 \text{ MPa}$ においては、前述したように乾燥密度が目標値より小さくなり、間隙比が大きくなつたため圧縮量も大きくなつたと思われる。

また、表-2.4.4 には、体積圧縮量が排水量に等しいと考えた場合の供試体諸元を参考として示す。

表-2.4.3 圧密終了時の軸圧縮量、体積圧縮量及び圧密時間

有効拘束圧 $\sigma_3 (\text{MPa})$	軸圧縮量 $\Delta h (\text{cm})$	体積圧縮量 $\Delta V (\text{cm}^3)$	圧密時間 t (min)
クニゲルV1			
0.49	0.03	2.60	
0.98	0.04	4.60	10,080
1.96	0.07	8.89	
Ca型化クニゲルV1			
0.49	0.03	1.93	
0.98	0.32	14.44	10,080
1.96	0.22	14.92	

表-2.4.4 圧密終了時の供試体諸元（参考値[#]）

有効拘束圧 $\sigma_3 (\text{MPa})$	体積 $V (\text{cm}^3)$	湿潤重量 $W_t (\text{g})$	乾燥重量 $W_d (\text{g})$	乾燥密度 $\gamma_d (\text{g/cm}^3)$	含水比 w (%)	間隙比 e
クニゲルV1						
0.49	197.30	390.0	304.0	1.54	28.6	0.75
0.98	195.10	392.7	312.1	1.60	25.8	0.69
1.96	187.84	390.8	320.7	1.71	21.9	0.58
Ca型化クニゲルV1						
0.49	187.59	375.5	299.9	1.60	25.2	0.69
0.98	183.83	366.8	293.9	1.60	24.8	0.69
1.96	181.81	375.5	314.0	1.73	19.6	0.56

注：体積圧縮量に関して過大評価の可能性があるため、本表の数値は参考値とする。

備考：乾燥重量は、せん断終了後に測定した値。

体積=飽和終了時の体積-体積圧縮量（全て水と仮定）。

湿潤重量=飽和終了時の湿潤重量-体積圧縮量。

乾燥密度 $\gamma_d = W_d / V$ 。

含水比 $w = (100W_t / W_d) - 100$ 。

間隙比 $e = (1 - \gamma_d / \rho_s) / (\gamma_d / \rho_s)$ 。

ペントナイトの真密度は、共に 2.7 g/cm^3 として計算。

また、並河らによる同種の試験³⁾によると乾燥密度 1.6g/cm^3 のクニゲル VI において、表-2.4.5 に示す有効拘束圧と供試体体積変化の関係が得られている。有効拘束圧が 1MPa 以下の場合は、供試体は吸水膨張している。これは、有効拘束圧が供試体の膨潤圧より小さいことに起因すると考えられる。また、有効拘束圧が約 3MPa でも体積圧縮量は 12cm^3 程度である。

表-2.4.5 並河らの試験による有効拘束圧と供試体体積変化

項目	試験方法							
	応力制御試験				ひずみ制御試験			
有効拘束圧 (MPa)	0.784	0.98	2.05	2.97	0.98	1.47	1.96	2.45
体積変化 (cm^3)	-3.9	-0.74	7.0	12.0	-1.7	2.7	5.1	6.2

注：体積変化は、正が圧縮、負が膨張を示す。

表-2.4.5 の結果を念頭に入れ、表-2.4.3 に示した本試験におけるクニゲル VI の体積圧縮量と比較すると、本試験結果はどのケースも大きい傾向にある。また、Ca 型化クニゲル VI の膨潤圧は、乾燥密度 1.6g/cm^3 程度では、クニゲル VI のそれと大差無い⁷⁾ ことから、Ca 型化クニゲル VI の体積圧縮量も大きい傾向にあると推察される。

この相違の原因是、供試体を三軸圧縮試験装置にセットする際、排水経路の飽和等の作業過程で供試体が吸水したことによると考えられる。このため並河らの試験では、排水経路を水で満たした後、平衡膨潤圧相当と考えられる 0.735MPa の拘束圧を負荷し、余分な水の排水を行っている。本試験では、この過程を踏んでいないため、体積圧縮量には余分に吸水した水量も含まれていると考えられる。したがって、表-2.4.4 に示した圧密終了後の供試体諸元は、実際よりも圧密量が過大に評価され、乾燥密度は大きく、間隙比は小さくなっている可能性がある。そのため表-2.4.4 に示した数値は、あくまでも参考値として扱うこととする。

(2) 間隙水圧係数 B 値

表-2.4.6 に、間隙水圧係数 B 値の測定結果を示す。

圧密終了後の B 値として $0.81\sim0.92$ が得られた。これらの値は、通常、飽和状態の目安とされる 0.95 以上⁸⁾ (ASTM(American Society of Testing Materials)における目安値) よりも小さな値である。また、NGI(Norwegian Geotechnical Institute)においては軟らかい粘性土なら $B=0.9$ 程度でもよいとしている⁸⁾。しかしながら、せん断試験終了後に測定した乾燥重量を

表-2.4.6 間隙水圧係数B値測定結果

有効拘束圧 σ_3 (MPa)	間隙水圧の変化量 Δu (MPa)	拘束圧の変化量 $\Delta \sigma_3$ (MPa)	B 値
クニゲル V1			
0.49	0.417		0.85
0.98	0.397	0.49	0.81
1.96	0.451		0.92
Ca型化クニゲル V1			
0.49	0.436		0.89
0.98	0.436	0.49	0.89
1.96	0.441		0.90

基に算出した圧密開始前の飽和度は前述のとおり 95%以上の値が得られており、実質的に飽和とみなしても差し支えないと判断される。また、これ以上 B 値を上げることは本試験方法では困難と考えられ、並河らもそのように結論付けている³⁾。したがって、この状態でせん断試験を行うこととした。

これまで筆者らは、飽和ペントナイトの三軸圧縮試験を実施してきたが、B 値 0.95 に固執していたために飽和の判断ができず、せん断試験に移行できなかった。したがって、圧縮成型ペントナイトのような通常の粘土より透水性が小さい材料に対しては、B 値で飽和を規定するより、予備試験を行い飽和度と通水圧及び飽和期間の関係を知ることが実際的と考える。今回用いた飽和方法により、供試体をほぼ飽和状態にすることができた。

(3) 供試体の圧密状態

図-2.4.2 は、並河らが乾燥密度 1.6g/cm³ のクニゲル V1 に対して行った一次元圧密試験から得られた e-logP 曲線¹⁾ と本試験における圧密後の状態を比較したものである。前述したように、本試験における圧密後の間隙比は、過小評価されている可能性があるため、e-logP 曲線に載る載らないという評価は困難である。ここでは、各供試体の圧密状態が、過圧密か正規圧密かということに着目する。

並河らは、求めた e-logP 曲線より圧密降伏応力が 1.5MPa 程度であるとしている。したがって、クニゲル V1 の有効拘束圧 0.49 及び 0.98MPa は過圧密領域の CU 試験、有効拘束圧 1.96MPa は正規圧密領域の CU 試験であると言える。また、Ca 型化クニゲル V1 においても以下の理由より有効拘束圧 0.49 及び 0.98MPa は過圧密領域の CU 試験、有効拘束圧 1.96MPa は正規圧密領域の CU 試験と推察される。

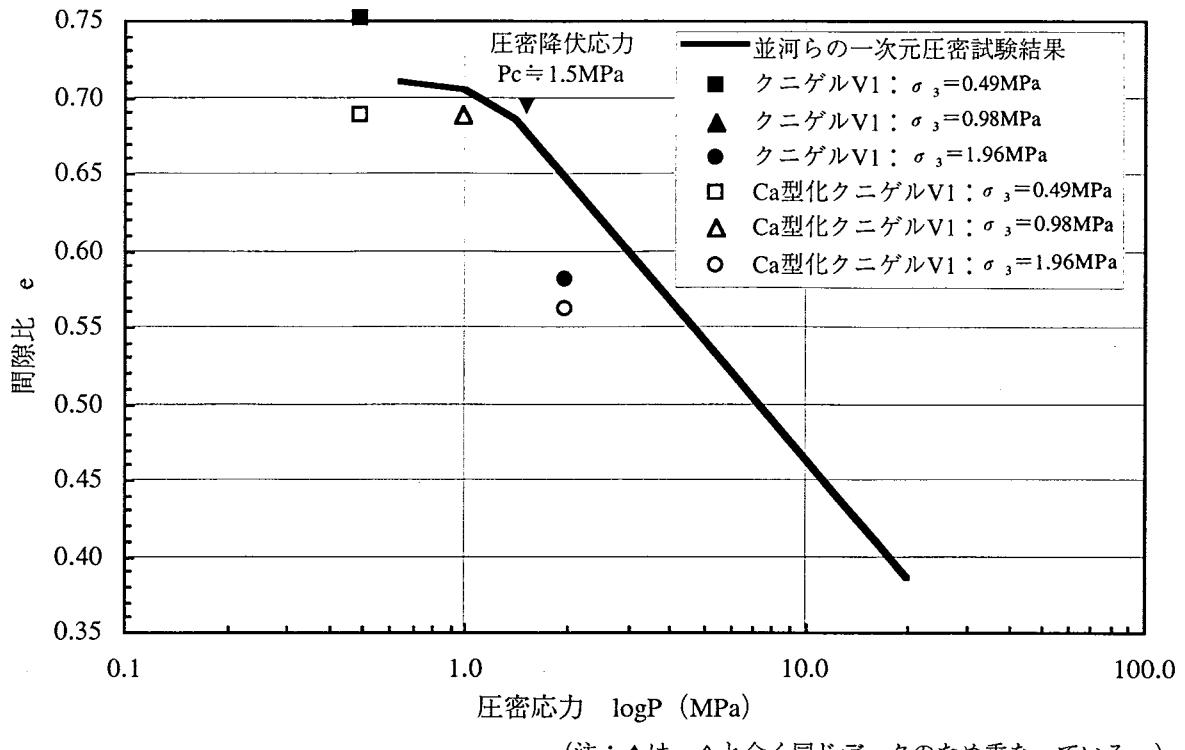


図-2.4.2 一次元圧密試験結果との比較

並河らが求めた圧密降伏応力 1.5MPa という値は、クニゲル V1 の最大膨潤圧にほぼ等しい。文献 11) では乾燥密度と最大膨潤圧の関係において以下の実験式を得ており、乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ の時、 $P_{\max} = 1.5\text{MPa}$ である。

$$P_{\max} = 10^{2.46 \gamma d - 3.76}$$

ここに、 P_{\max} : クニゲル V1 の最大膨潤圧 (MPa)

γd : クニゲル V1 の乾燥密度 (g/cm^3)

一方、Ca 型化クニゲル V1 の実験式は以下のとおりであり、乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ の時、 $P_{\max} = 1.2\text{MPa}$ である。したがって、Ca 型化クニゲル V1 の圧密降伏応力は、1.2MPa 近傍と判断した。

$$P_{\max} = 10^{3.34 \gamma d - 5.25}$$

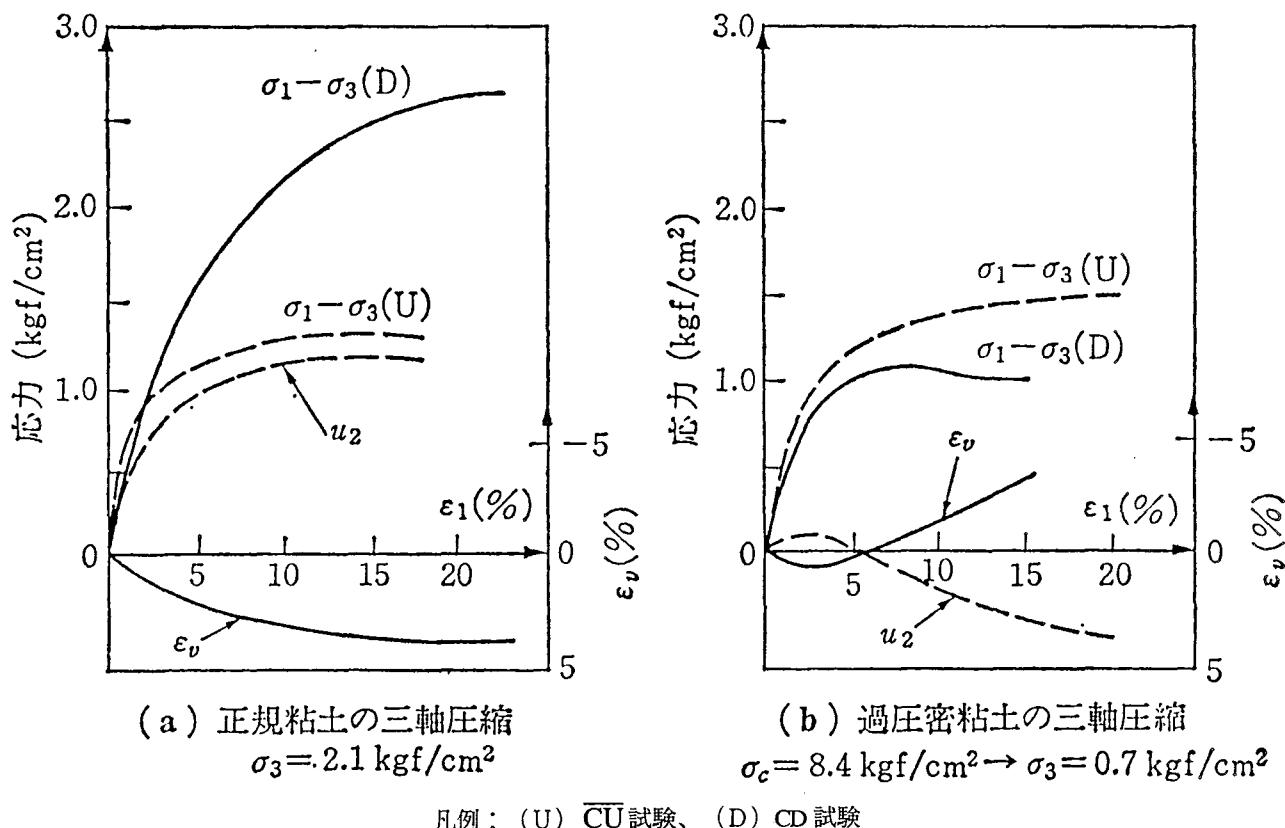
ここに、 P_{\max} : Ca 型化クニゲル V1 の最大膨潤圧 (MPa)

γd : Ca 型化クニゲル V1 の乾燥密度 (g/cm^3)

2.4.4 せん断

(1) せん断試験における粘土の一般的挙動

本試験の結果を記述する前に、 \overline{CU} 試験における粘土の一般的挙動について触れておく。図-2.4.3 は、Parry, R.H.G が練り返し Weald 粘土の正規、過圧密状態に対して行った \overline{CU} 、CD (圧密排水) 試験結果である¹²⁾。図には、軸ひずみ ϵ_1 と軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ の関係、また \overline{CU} 試験では間隙水圧 u_2 、CD 試験では圧縮を正とする体積ひずみ ϵ_v も示している。これより正規圧密粘土の \overline{CU} 試験では、軸差応力と比較して若干低めの正の間隙水圧が発生し、軸差応力と間隙水圧の曲線はほぼ相似形となることが分かる。一方、過圧密粘土の場合、間隙水圧は軸ひずみの初期段階でわずかな正のピークを迎えるが、その後負の間隙水圧が発生することが分かる。

図-2.4.3 Parry, R.H.G による三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係¹²⁾

(2) 本試験の結果

以下に、本試験の結果について記述する。図-2.4.4 に軸ひずみと軸差応力の関係、図-2.4.5 に軸ひずみと間隙水圧の関係、図-2.4.6 に側方ひずみと軸差応力の関係、図-2.4.7 に軸差応力と間隙水圧の関係を示す。ひずみは、圧縮が正、伸張が負である。

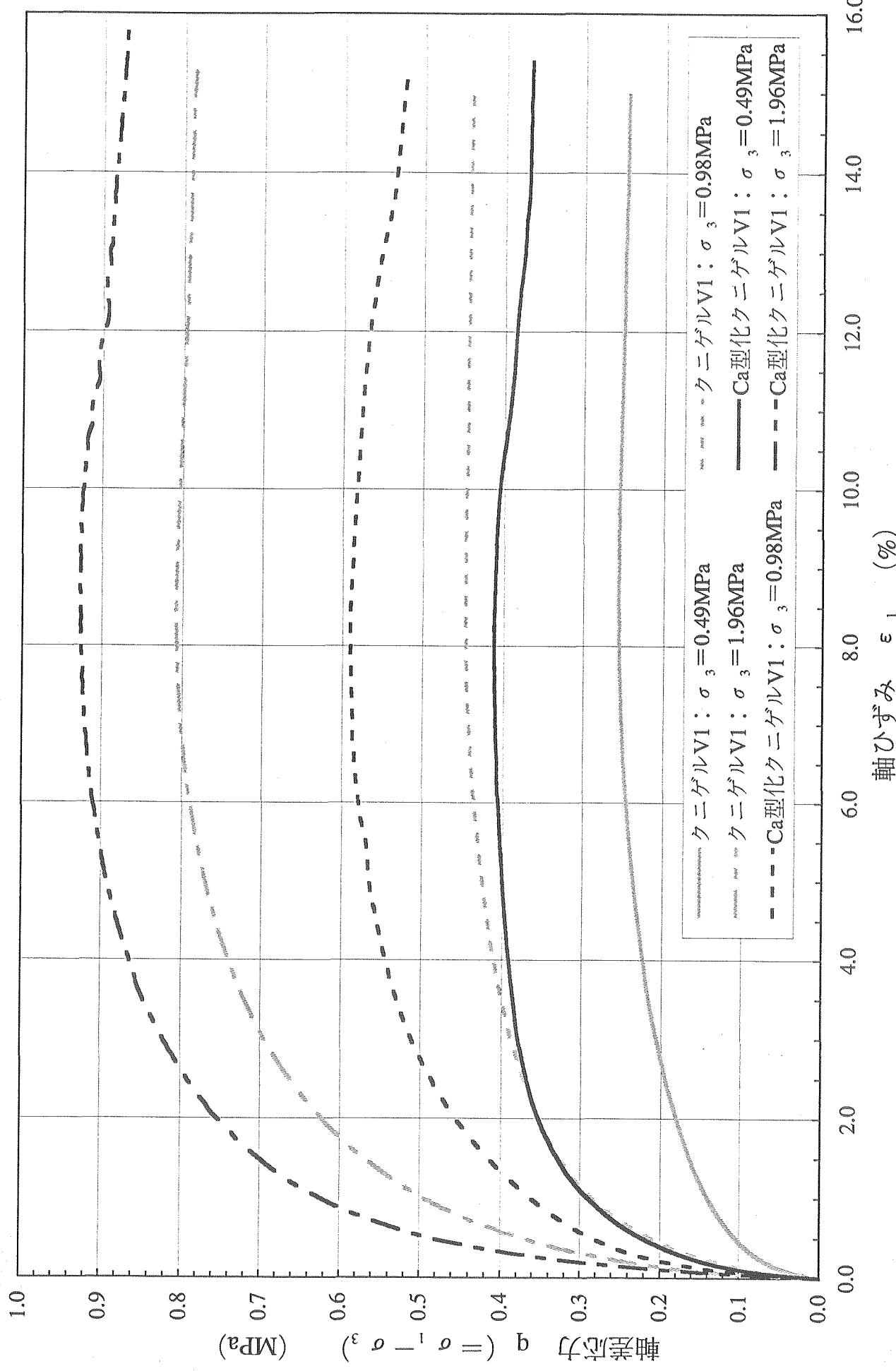


図-2.4.4せん断時における軸ひずみと軸差応力の関係

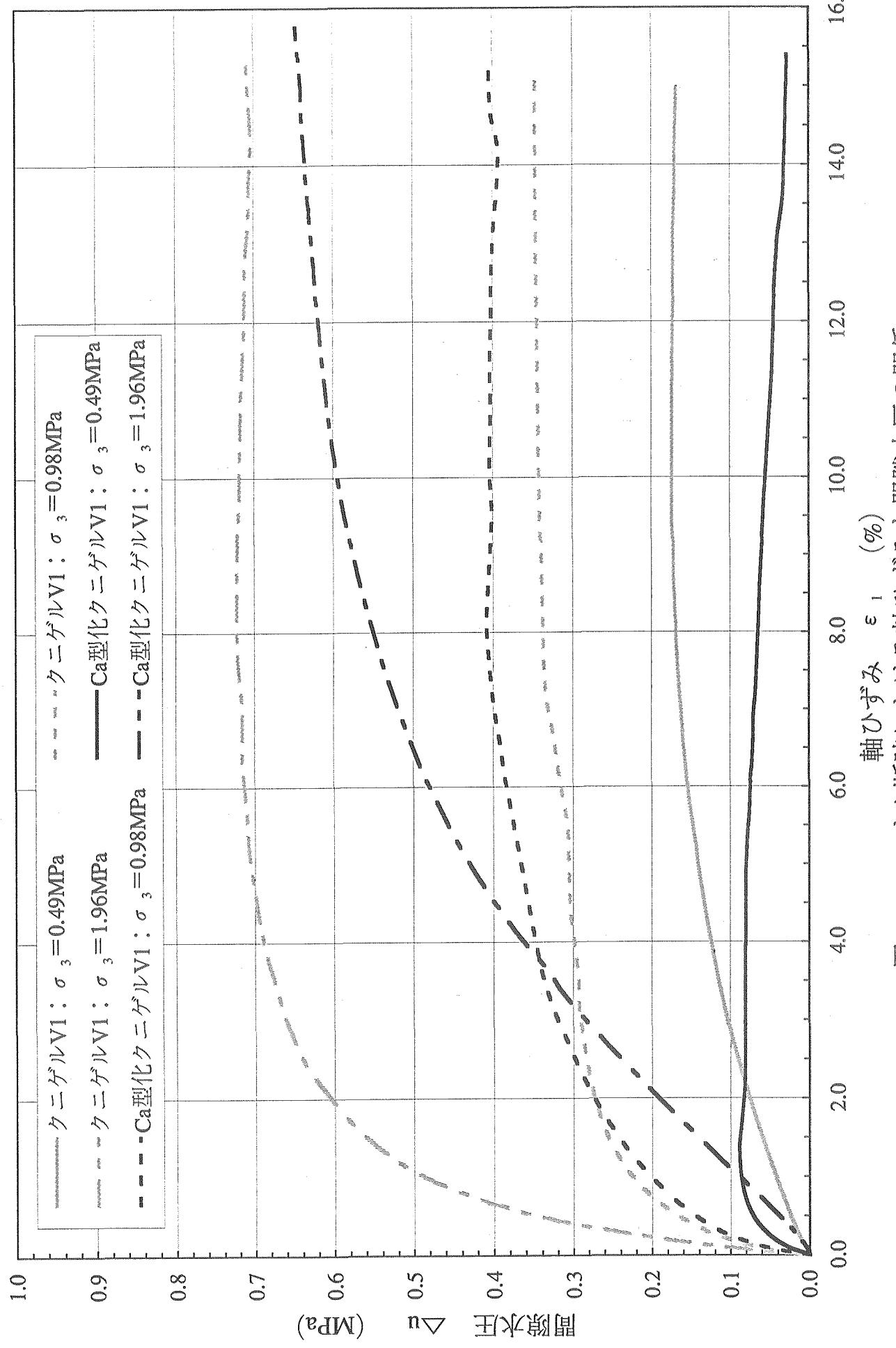
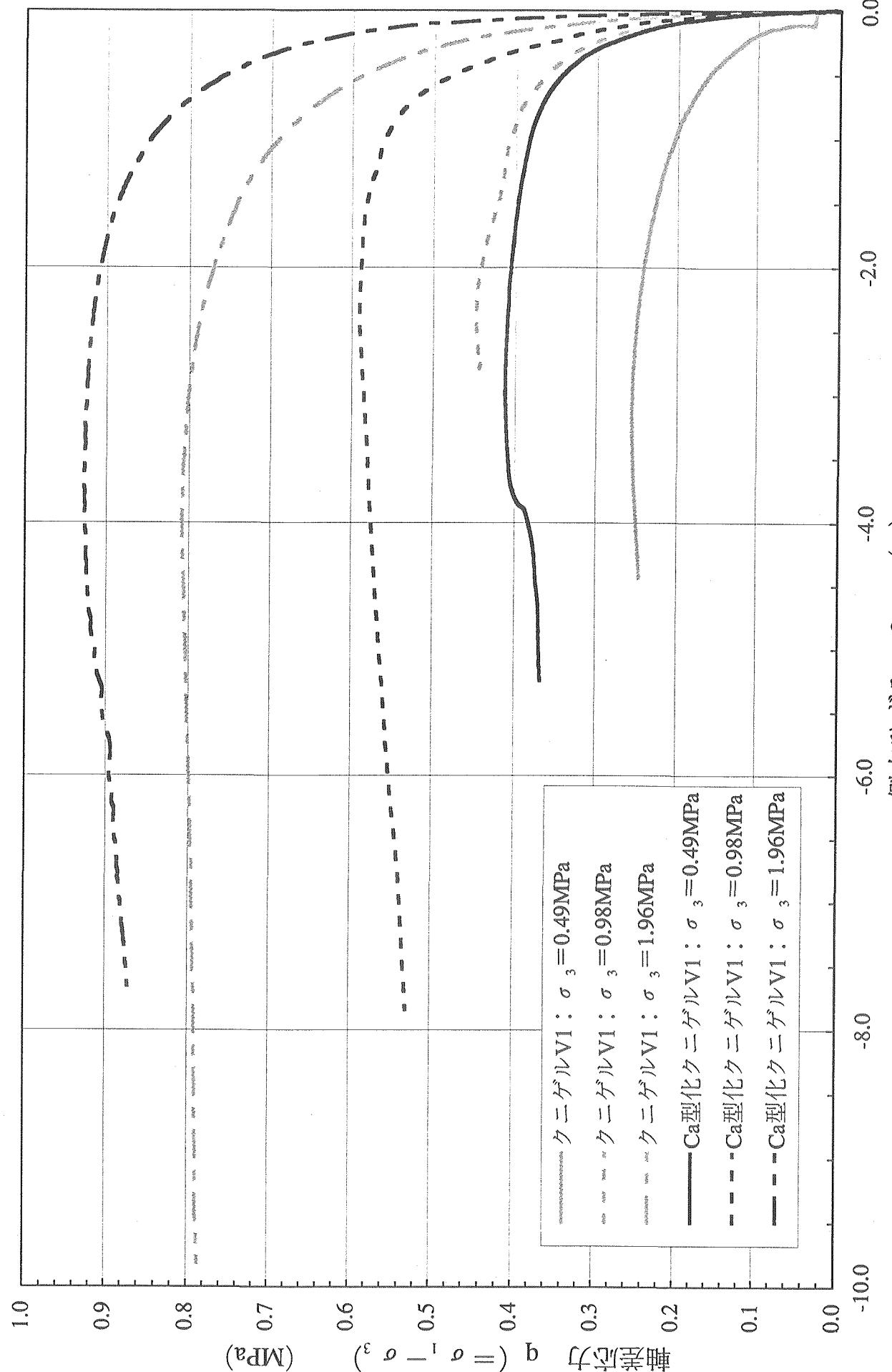


図-2.4.5 せん断時ににおける軸ひずみと間隙水圧の関係



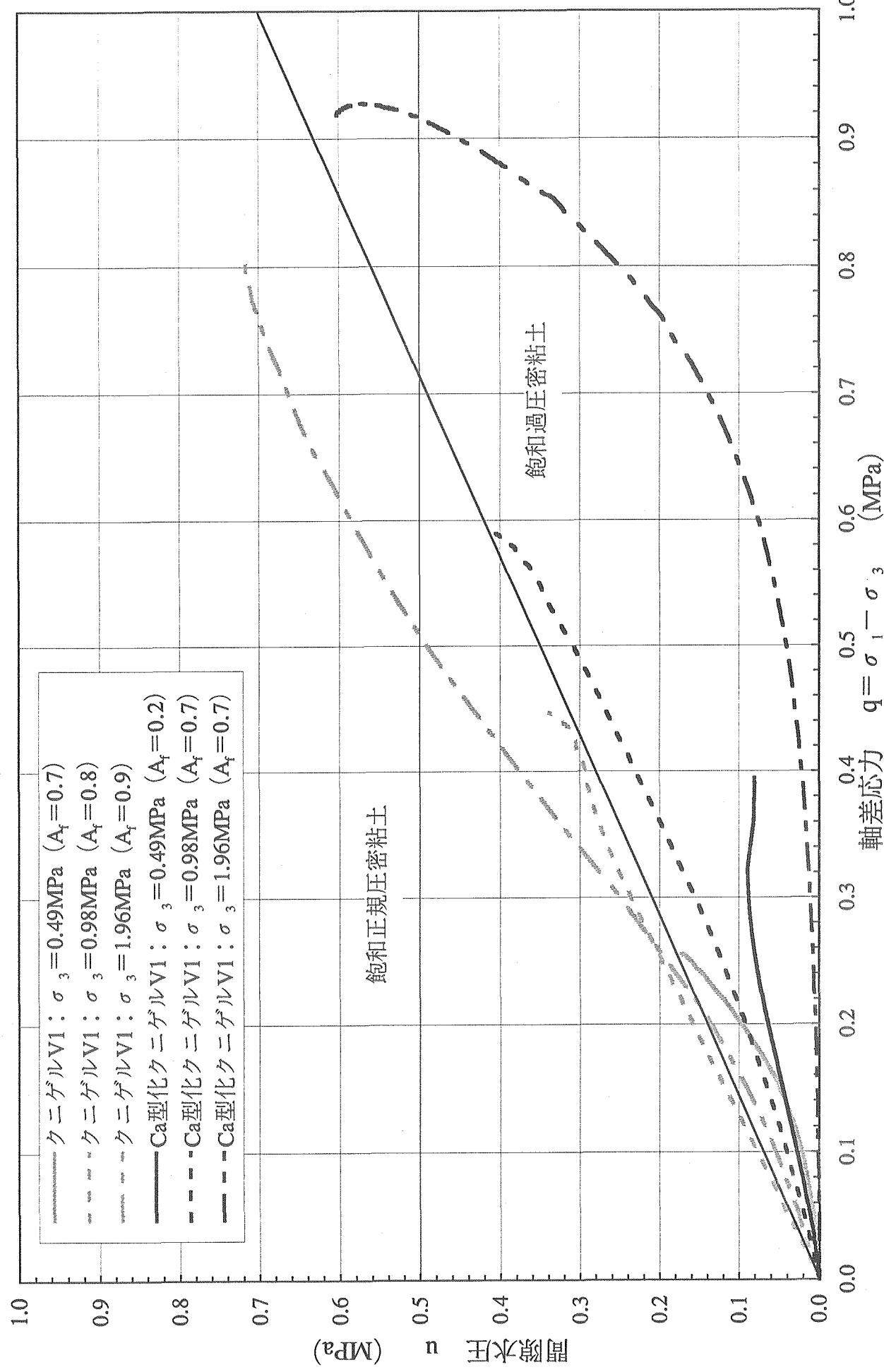


図-2.4.7 せん断時ににおける軸差応力と間隙水圧の関係

(i) 軸ひずみと軸差応力の関係

軸ひずみと軸差応力の関係（図-2.4.4 参照）では、有効拘束圧の大きい供試体ほど、また同一の有効拘束圧であればクニゲルV1よりCa型化クニゲルV1の方が、同一軸ひずみに対する軸差応力が大きくなっている。また、各供試体とも軸ひずみが0.5～1%を超えたあたりで非線形性が大きくなることが分かる。そして、有効拘束圧によらず表-2.4.7に示すように軸ひずみが約8～9%で軸差応力のピークを呈し、その後ほぼ一定あるいは若干のひずみ軟化を生じている。

表-2.4.7 最大軸差応力及び軸ひずみ

有効拘束圧 σ_3 (MPa)	最大軸差応力 q (MPa)	最大軸差応力時の軸ひずみ ϵ_1 (%)
クニゲルV1		
0.49	0.26	8.8
0.98	0.45	8.6
1.96	0.81	8.5
Ca型化クニゲルV1		
0.49	0.41	8.2
0.98	0.59	8.2
1.96	0.93	8.7

(ii) 軸ひずみと間隙水圧の関係

軸ひずみと間隙水圧の関係（図-2.4.5 参照）では、Ca型化クニゲルV1の有効拘束圧0.49及び1.96MPaを除き、軸差応力との関係と同様に軸ひずみが8%程度で間隙水圧のピークを呈し、その後ほぼ一定値を示している。また、軸差応力を若干下回る値で、ほぼ相似形の曲線を示しており、前述した正規圧密粘土の特徴を有している（図-2.4.4及び図-2.4.5 参照）。このような正規圧密状態にある供試体の非排水せん断時における間隙水圧の上昇は、せん断に伴う負のダイレタンシーが原因と考えられる。

一方、Ca型化クニゲルV1の有効拘束圧0.49MPaでは軸ひずみ1%強でピークを迎え、その後間隙水圧は減少している。負の間隙水圧の発生は見られないが、過圧密粘土的な挙動を示していると推察される。

さらに、Ca型化クニゲルV1の有効拘束圧1.96MPaでは、間隙水圧の初期の立ち上がりが他と比べて緩く、かつピークが現れていない。このような特徴を有する場合は、軸ひずみ～軸差応力関係におけるピーク後に有効応力比（ σ_1/σ_3 ）の最大が現れると言われ

ている¹³⁾。破壊点の規定には、軸差応力最大点とする立場と有効応力比最大点とする立場があり、有効応力比最大点とする方が合理的であるとされている。また、間隙水圧が正の増加傾向にあることから正規圧密状態と判断される。

(iii) 側方ひずみと軸差応力の関係

側方ひずみと軸差応力の関係（図-2.4.6 参照）では、材料及び有効拘束圧によらず全ての供試体において負の側方ひずみが発生している。すなわち、軸方向に圧縮されたことにより供試体は側方に伸張していたことを表している。また、側方ひずみは、有効拘束圧によらず3%前後で軸差応力のピークを呈し、その後ほぼ一定あるいは若干の低下を示している（表-2.4.8 参照）。

表-2.4.8 最大軸差応力及び側方ひずみ

有効拘束圧 σ_3 (MPa)	最大軸差応力 q (MPa)	最大軸差応力時の側方ひずみ ϵ_3 (%)
クニゲル V1		
0.49	0.26	-3.2
0.98	0.45	-2.4
1.96	0.81	-4.0
Ca型化クニゲル V1		
0.49	0.41	-3.0
0.98	0.59	-2.3
1.96	0.93	-3.6

(iv) 軸差応力と間隙水圧の関係

軸差応力と間隙水圧の関係（図-2.4.7 参照）では、各曲線の右端が破壊点を表している。Ca型化クニゲルV1の有効拘束圧1.96MPaについては、有効応力比（ σ'_1/σ'_3 ）が最大となる点を破壊としている。他の供試体については、軸差応力の最大点を破壊としている。この図からは、間隙水圧係数A_fを知ることができ、表-2.4.9にその結果を示す。間隙水圧係数A_fは、次式により算定した。また、土のタイプと間隙水圧係数A_f値の関係として表-2.4.10¹⁴⁾が示されており、それを基に評価した供試体の圧密状態も表-2.4.9に示した。

$$A_f = u_f / q_f$$

ここに、 A_f ：間隙水圧係数

u_f ：破壊時の間隙水圧

q_f ：破壊時の軸差応力

表-2.4.9 間隙水圧係数 A_f

有効拘束圧 σ_3 (MPa)	破壊時軸差応力 q_f (MPa)	破壊時間隙水圧 u_f (MPa)	間隙水圧係数 A_f	供試体の 圧密状態
クニゲル V1				
0.49	0.26	0.17	0.7	過圧密／正規圧密
0.98	0.45	0.34	0.8	正規圧密
1.96	0.81	0.72	0.9	正規圧密
Ca型化クニゲル V1				
0.49	0.41	0.063	0.2	過圧密
0.98	0.59	0.41	0.7	過圧密／正規圧密
1.96	0.92	0.60	0.7	過圧密／正規圧密

表-2.4.10 土のタイプと間隙水圧係数 A_f 値¹⁴⁾

土	A_f 値
砂 (ごくゆるい)	2 ~ 5
飽和粘性土	
鋭敏なもの	1.5 ~ 3.0
正規圧密粘土	0.7 ~ 1.3
過圧密粘土	0.3 ~ 0.7
著しい過圧密粘土	0 ~ -0.5
飽和シルト (中位)	0 ~ 0.5

(3) 並河らの結果との比較

ここでは、動燃事業団において並河らが実施したクニゲルV1（乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）の三軸圧縮試験（CU試験）³⁾と本試験結果の比較を有効応力経路及び軸ひずみと正規化軸差応力の関係により行う。

(i) 動燃事業団における試験条件

表-2.4.11に並河らが実施した試験条件を示す。

表-2.4.11 並河らが実施した試験条件

使用材料 供試体形状 初期含水比 せん断方法 試験番号	クニゲルV1								
	応力制御				ひずみ制御				
飽和後乾燥密度 (g/cm^3)	CU0-1	CU0-2	CU0-3	CU0-4	CU1-1	CU1-2	CU1-3	CU1-4	CU1-5
有効拘束圧 (圧密応力) (MPa)	1.57	1.58	1.57	1.58	1.58	1.57	1.58	1.58	1.57
せん断速度	0.784	0.98	2.05	2.97	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94
	0.05 MPa/step 1step= 1day	0.075 MPa/step 1step= 1day	0.10 MPa/step 1step= 1day	0.15 MPa/step 1step= 5-15days					
								0.01 mm/min (約 0.01 %/min)	

試験は、圧密応力と前述した圧密降伏応力 1.5MPa の関係より、CU0-1、CU0-2 及び CU1-1 は過圧密状態、CU1-2 は過圧密/正規圧密の中間状態、CU0-3、CU0-4、CU1-3、CU1-4 及び CU1-5 は正規圧密状態における CU 試験と考えられている。

(ii) 有効応力経路

図-2.4.8 に、並河らが得たせん断時の有効応力経路を示す。

図-2.4.8 は、 $p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ で定義される平均有効応力と軸差応力の関係を示したもので、供試体に軸差応力を加え非排水せん断した時の有効応力経路を示している。

正規圧密及び正規圧密と過圧密の中間状態にある供試体の各有効応力経路は、同じ傾向を示し、ほぼ相似形である。各試験ともせん断中、軸差応力の増加に伴い過剰間隙水圧が発生し、平均有効応力が減少している。この過剰間隙水圧の上昇は、供試体がせん断中負のダイレタンシーに体積収縮しようとするが、非排水条件であるため体積変化が抑制され

る。それが過剰間隙水圧の上昇を招いている。

次に破壊時の応力比 q/p' であるが、正規圧密状態にあると考えられる各供試体とも傾き $M=0.58$ の限界状態線上で軸差応力はほぼ最大となり破壊している。この限界状態線は、各有効応力経路の限界状態を結んだ線で、せん断変形が進み限界状態に至るとダイレタンシー効果は無くなり、軸差応力及び間隙水圧が一定のもとに塑性流動が起こる¹⁵⁾。限界状態線の傾き M は、粘土の構成方程式を表す cam-clay モデルや関口・太田モデルの入力パラメータとなり、有効内部摩擦角 ϕ' と以下の関係にある。 $M=0.58$ の場合、 $\phi'=15.3^\circ$ である。

$$M = \frac{6\sin\phi'}{3 - \sin\phi'}$$

一方、過圧密状態の供試体では、せん断の前半において平均有効応力の変化はほとんど無く、後半において平均有効応力が若干増加する傾向を示す。また、正規圧密状態の試験に基づく限界状態線より上方で破壊している。

図-2.4.9 は、本試験の結果を整理したものである。図中には、並河らが得た限界状態線も示した。本試験による有効応力経路の限界状態は、並河らが得たクニゲル V1 の限界状態線にほぼ一致する。

各有効応力経路の形状について見ると、間隙水圧が軸ひずみの進行とともに減少する Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 0.49MPa では、せん断の終局段階で平均有効応力が増加している。また、間隙水圧の上昇が緩やかなクニゲル V1 の有効拘束圧 0.49MPa 及び Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 1.96MPa では、有効応力経路の途中段階で平均有効応力の増加が見られるが、最終的には間隙水圧の上昇により平均有効応力が減少し、破壊に至っている。他の供試体では、せん断の進行とともに間隙水圧が上昇し、平均有効応力が減少している。したがって、有効応力経路の形状からは、Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 0.49MPa は過圧密状態、その他は正規圧密状態あるいは過圧密/正規圧密の中間状態と判断される。なお、並河らの試験では、正規圧密状態の各有効応力経路がほぼ相似形を成していたが、本試験ではそのような傾向は明確に現れなかった。

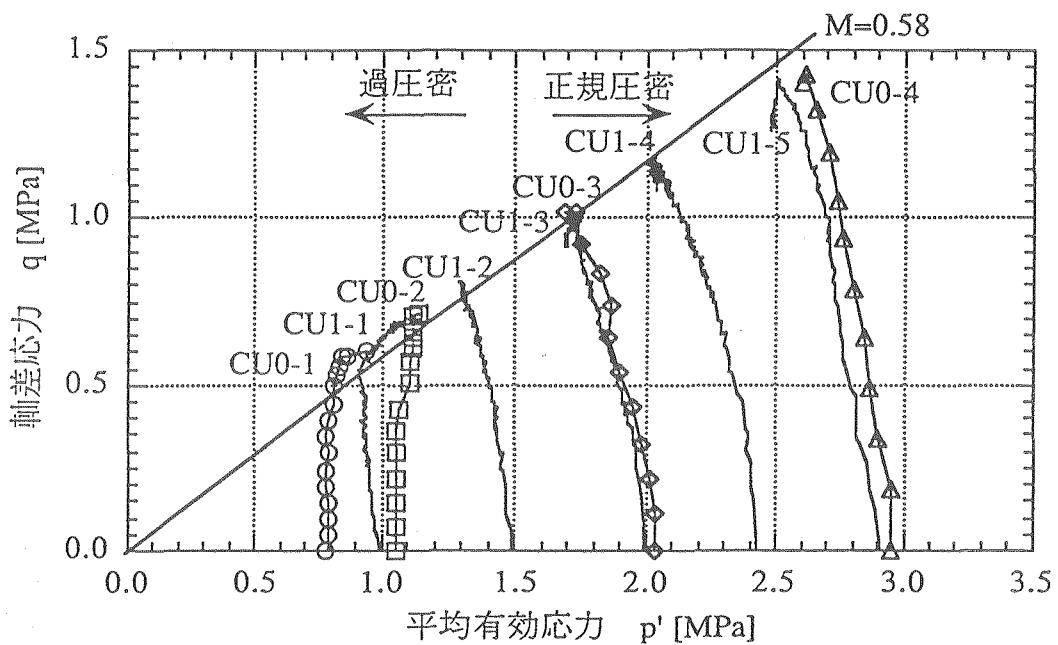
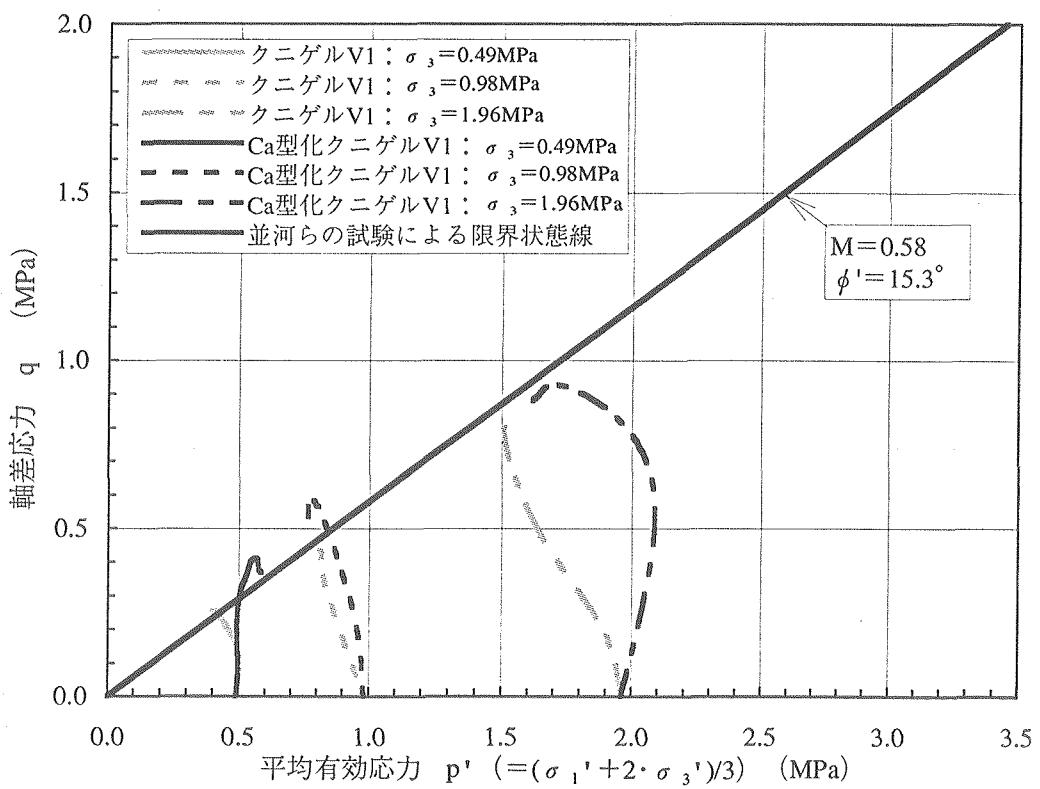
図-2.4.8 並河らによるせん断時の有効応力経路³⁾

図-2.4.9 本試験におけるせん断時の有効応力経路

(iii) 軸ひずみ～正規化軸差応力の関係

図-2.4.10 に、並河らが得たせん断時における軸ひずみと正規化軸差応力の関係を示す。図-2.4.10 は、せん断時における軸ひずみと q/p' で定義される正規化軸差応力の関係を示したものである。

並河らの結果では、正規圧密状態の試験 (CU0-3、CU1-3、CU1-4、CU1-5) において有効拘束圧が異なっても軸ひずみと正規化軸差応力の関係はほぼ等しく、軸ひずみ 8~10% 程度でピークを迎え、その後一定もしくは若干の低下を示す。そして、ピーク時の正規化軸差応力は 0.55~0.6 程度である。このことは、有効拘束圧が異なっても軸ひずみと正規化軸差応力の関係が一つの曲線で表現できることを示しており、飯塚¹⁶⁾によれば正規圧密粘土の典型的な挙動を示すものである。

一方、過圧密状態の試験 (CU0-1、CU0-2、CU1-1) では、正規圧密供試体より正規化軸差応力が大きくなっている。

図-2.4.11 は、本試験の結果を整理したものである。クニゲル V1 の有効拘束圧 0.98、1.96MPa 及び Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 1.96MPa は、並河らの試験結果と同様に、軸ひずみ 8% 程度でピークを迎え、その後一定もしくは若干の低下を示している。そして、ピーク時の正規化軸差応力は 0.54~0.56 程度である。このことから、これら 3 供試体は正規圧密状態、その他は過圧密状態での CU 試験であったことが示唆される。

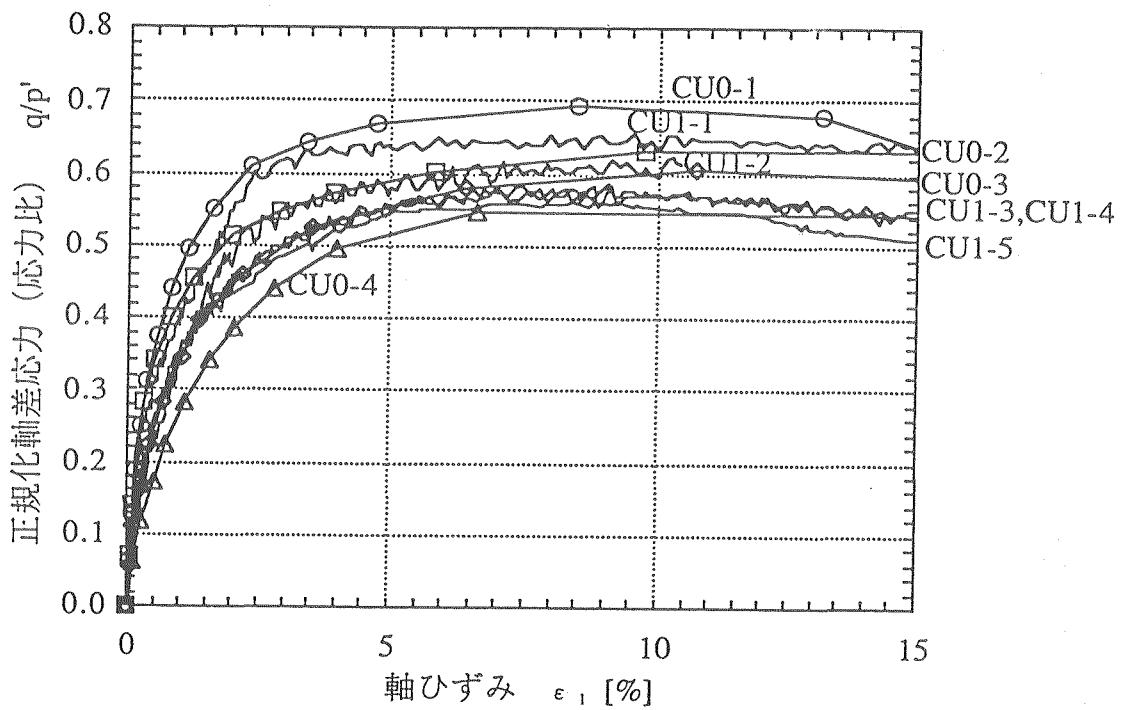
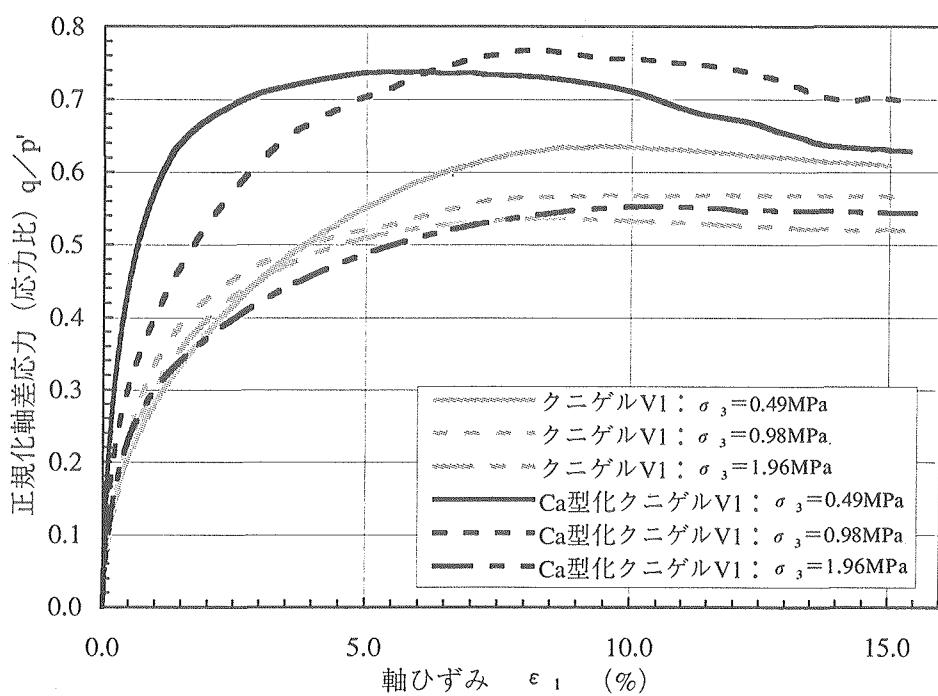
図-2.4.10 並河らによるせん断時の軸ひずみと正規化軸差応力の関係³⁾

図-2.4.11 本試験におけるせん断時における軸ひずみと正規化軸差応力の関係

3 力学パラメータの設定

3.1 せん断強度定数

図-3.1.1 及び図-3.1.2 に全応力及び有効応力規準における破壊線を示す。図は、後作業の容易さを考慮して、横軸に最大及び最小主応力の平均、縦軸に軸差応力の 1/2 (せん断応力) を示した。すなわち図-3.1.1 及び図-3.1.2 は、破壊時におけるモール円の頂点位置をプロットしたことになる。この図においてせん断強度定数 (粘着力 C、内部摩擦角 ϕ) は、次式により算定される。

$$\sin\phi = m$$

$$C = \frac{f_i}{\sqrt{1-m}}$$

ここに、m：破壊線の傾き

f_i ：破壊線の切片

ϕ ：内部摩擦角 (度)

C：粘着力 (MPa)

なお、破壊線は、各試験データを基に最小自乗法により回帰した。但し、Ca 型化クニゲル V1 の有効応力規準に対する破壊線の回帰には、有効拘束圧 0.98MPa のデータは用いなかった。なぜならば、他の試験データにおいて、同じ有効拘束圧であればクニゲル V1 より Ca 型化クニゲル V1 の方が主応力の平均 (横軸) が大きくなる傾向にあるのに対し、それはクニゲル V1 とほぼ同じであること、乾燥密度が目標値より低下したこと等、信頼性に欠けるためである。

図-3.1.1 及び図-3.1.2 から明らかなように本試験の結果は、1 本の直線上にプロットできる。また、せん断強度は、Ca 型化することによりわずかに増加する。この傾向は、不飽和供試体に対する一軸圧縮強さの関係¹¹⁾と一致する。しかし、せん断強度の増加は、工学的に有意な差とは考えにくい。表-3.1.1 は、本試験結果のみから上式を用いてせん断強度定数を算定した結果である。

表-3.1.1 本試験結果のみによるせん断強度定数

材 料	全 応 力 規 準				有 効 応 力 規 準			
	傾き m	切片 f_i	内部摩擦角 ϕ_{α} (度)	粘着力 C_{α} (MPa)	傾き m	切片 f_i	内部摩擦角 ϕ' (度)	粘着力 C (MPa)
クニゲル V1	0.158	0.032	9.1	0.03	0.231	0.024	13.4	0.02
Ca 型化クニゲル V1	0.147	0.106	8.5	0.11	0.214	0.071	12.4	0.07

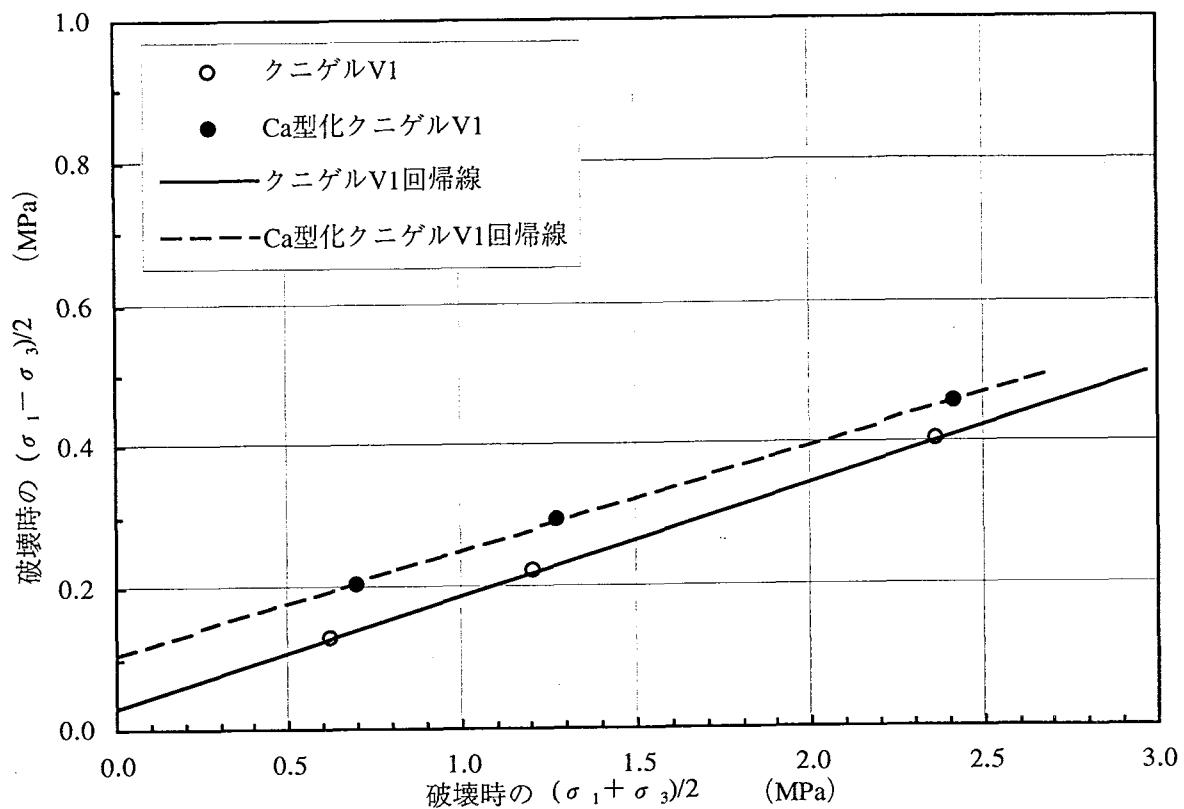


図-3.1.1 破壊線（全応力）

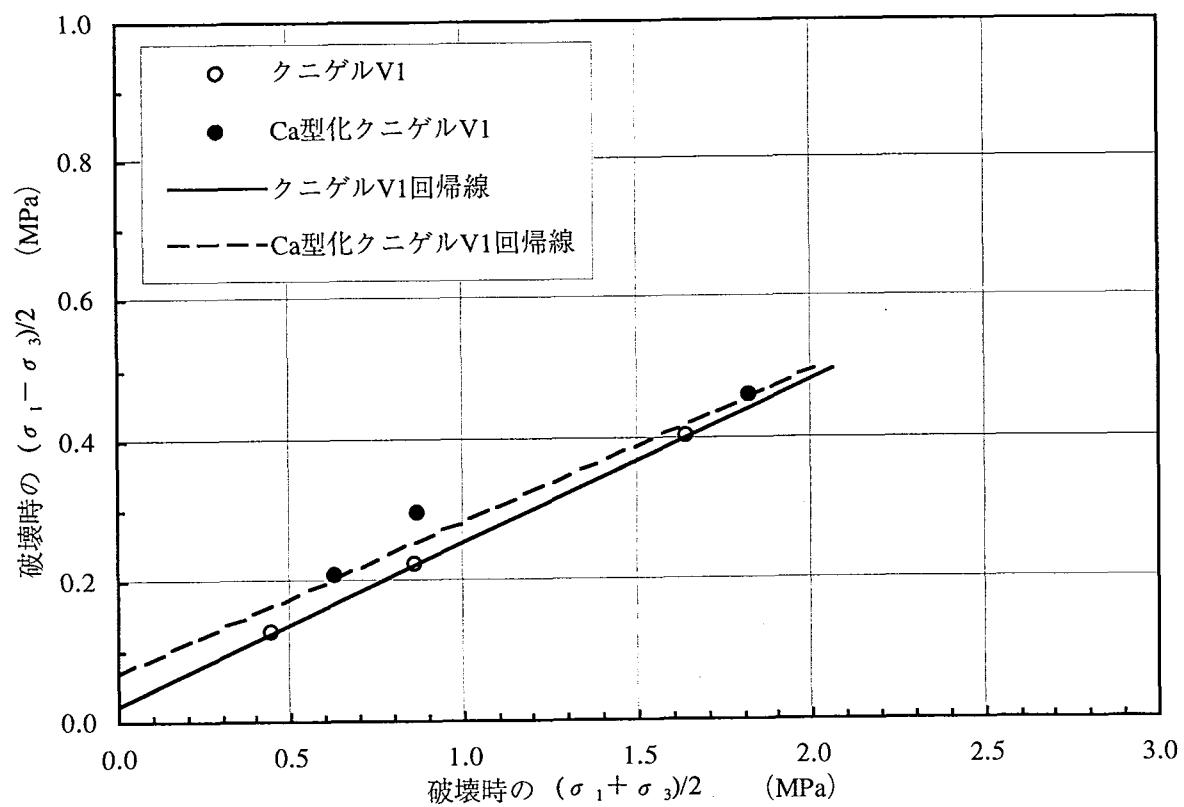


図-3.1.2 破壊線（有効応力）

一方、一般に破壊線は供試体の圧密状態によって異なり、図-3.1.3¹⁷⁾に示すように過圧密状態では $C \neq 0$ 、正規圧密状態では $C=0$ である。しかし、図-3.1.1 及び図-3.1.2 に図示した破壊線では、原点を通るべき正規圧密状態の破壊線を十分に表現していない。そこで、この観点より前述のせん断強度定数を再考する。

これまでいくつかの指標により各供試体の圧密状態に言及してきた。その結果を整理したものが表-3.1.2 である。これより、少なくとも有効拘束圧 1.96MPa の供試体はクニゲル V1 及び Ca 型化クニゲル V1 とも正規圧密状態、Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 0.49MPa は過圧密状態にあったと考えられる。また、本試験結果のみでは、明らかに正規圧密状態と言えるデータが不足するため、並河らが得た結果も加味して検討することにする。

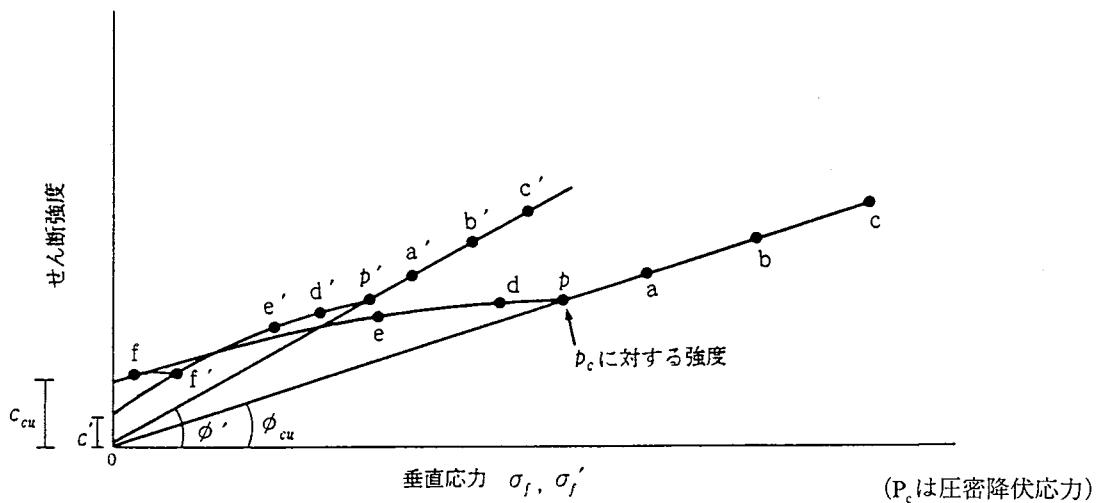


図-3.1.3 CU 試験結果の全応力（点 a～f）及び有効応力（点 a'～f'）による破壊線¹⁷⁾

表-3.1.2 各指標における各供試体の圧密状態

有効拘束圧 σ_3 (MPa)	指標				
	e-logP 曲線 ($P_c=1.5$ MPa)	間隙水圧の変化	間隙水圧係数 A_g	有効応力経路	軸ひずみ～ 正規化軸差応力
クニゲル V1					
0.49	過圧密状態	正規圧密状態	過／正規圧密状態	正規圧密状態	過圧密状態
0.98	過圧密状態	正規圧密状態	正規圧密状態	正規圧密状態	正規圧密状態
1.96	正規圧密状態	正規圧密状態	正規圧密状態	正規圧密状態	正規圧密状態
Ca 型化クニゲル V1					
0.49	過圧密状態	過圧密状態	過圧密状態	過圧密状態	過圧密状態
0.98	過圧密状態	正規圧密状態	過／正規圧密状態	正規圧密状態	過圧密状態
1.96	正規圧密状態	正規圧密状態	過／正規圧密状態	正規圧密状態	正規圧密状態
備 考	Ca 型化クニゲル V1 の P_c をクニゲル V1 と同 程度 ($P_c=1.3$ MPa)		間隙水圧の減少が あるものを過圧 密、それ以外を正規 圧密と判定	$A_g > 0.7$ を正規圧 密、 $A_g < 0.7$ を過圧 密、 $A_g = 0.7$ を過／ 正規圧密と判定	有効応力が減少し たものを正規圧 密、それ以外を過 圧密と判定
					並河らの結果と一 致するものを正規 圧密、それ以外を過 圧密と判定

図-3.1.4 及び図-3.1.5 は、本試験結果に並河らの結果を追加し、全応力規準及び有効応力規準で前出と同様の破壊線を描画したものである。太い実線は、クニゲルV1 の正規圧密状態における破壊線を示したもので、本試験による有効拘束圧 1.96MPa の結果と並河らによる正規圧密状態及び過圧密と正規圧密の中間 (CU0-3～CU0-4、CU1-2～CU1-5) の結果を用い、原点を通る直線に回帰させたものである。一方、太い点線は、過圧密状態における破壊線を示したもので、並河らによる過圧密 (CU0-1～CU0-2、CU1-1) の結果を用い、直線に回帰させたものである。

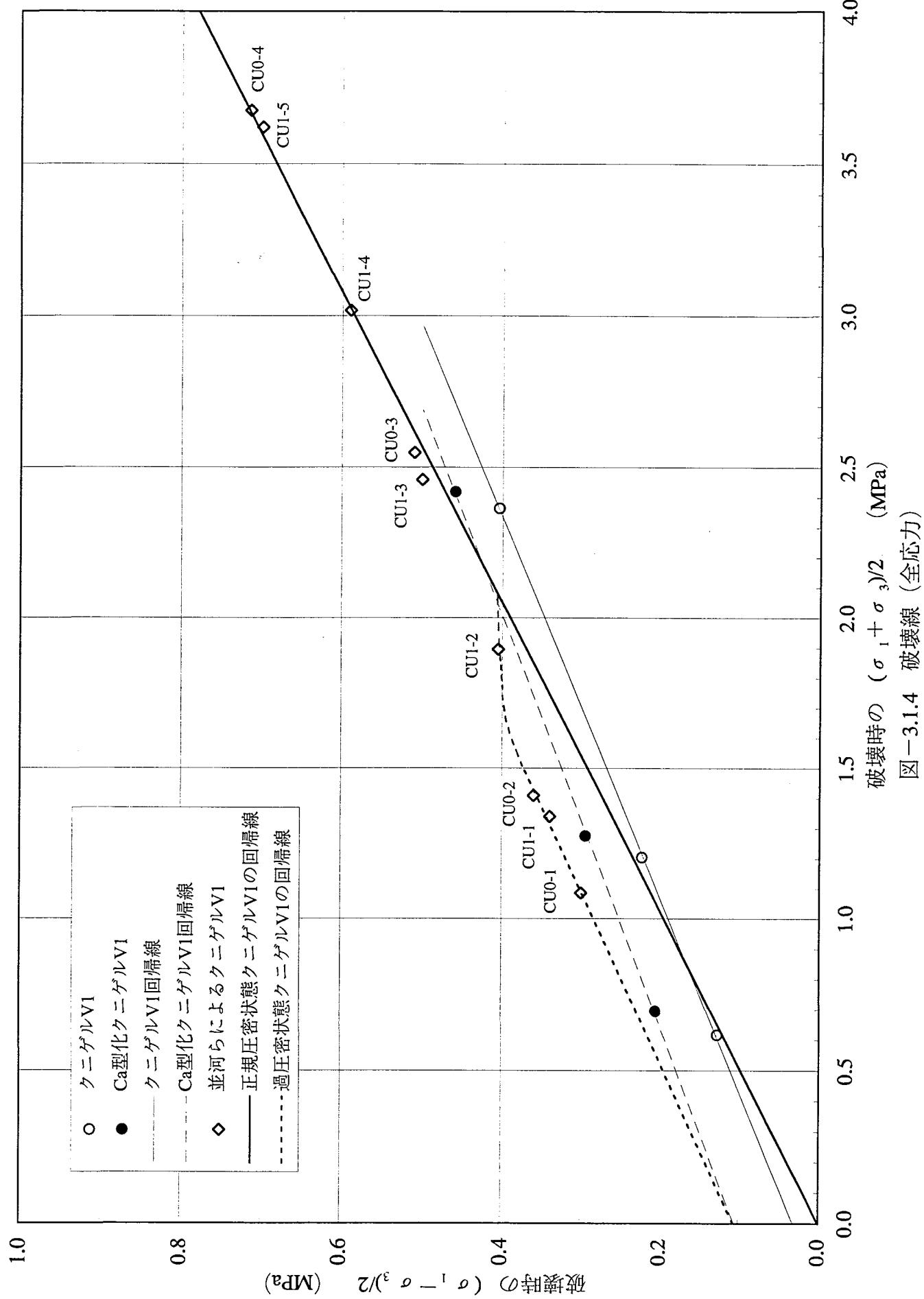
以上の整理結果を概観すると、本試験におけるクニゲルV1 の結果は、並河らのそれに比べせん断強度が小さく評価されている。特に、有効拘束圧が比較的小さい 0.49 及び 0.98MPa の結果も正規圧密状態の破壊線に載っており、前述の圧密状態の指標の幾つかでこれらが正規圧密状態と評価されたことの裏付けとなった。

Ca 型化クニゲルV1 に関してはデータが少ないため、それ独自の破壊線を描画することは困難である。しかし、この程度の相違を試験誤差の範囲内とするならば、Ca 型化クニゲルV1 の破壊時の状態はクニゲルV1 のそれと大差無いと考えられる。

表-3.1.3 は、前述の回帰線を基に算出したクニゲルV1 のせん断強度定数である。これによるとクニゲルV1 の内部摩擦角は、全応力規準で 10° 程度、有効応力規準で 15° 程度である。また、有効応力規準の粘着力 (応力 0 におけるせん断強度) は、全応力規準におけるその半分程度である。これらせん断強度定数の大小関係は、図-3.1.3 に示した一般的な粘土の傾向に合致するものである。

表-3.1.3 せん断強度定数

応力範囲	全 応 力 規 準				有 効 応 力 規 準			
	傾き m	切片 f_l	内部摩擦角 ϕ_{au} (度)	粘着力 C_{au} (MPa)	傾き m	切片 f_l	内部摩擦角 ϕ' (度)	粘着力 C' (MPa)
クニゲル V1								
過圧密領域	0.178	0.106	10.3	0.12	0.249	0.043	14.4	0.05
正規圧密領域	0.195	0.0	11.2	0.0	0.264	0.0	15.3	0.0



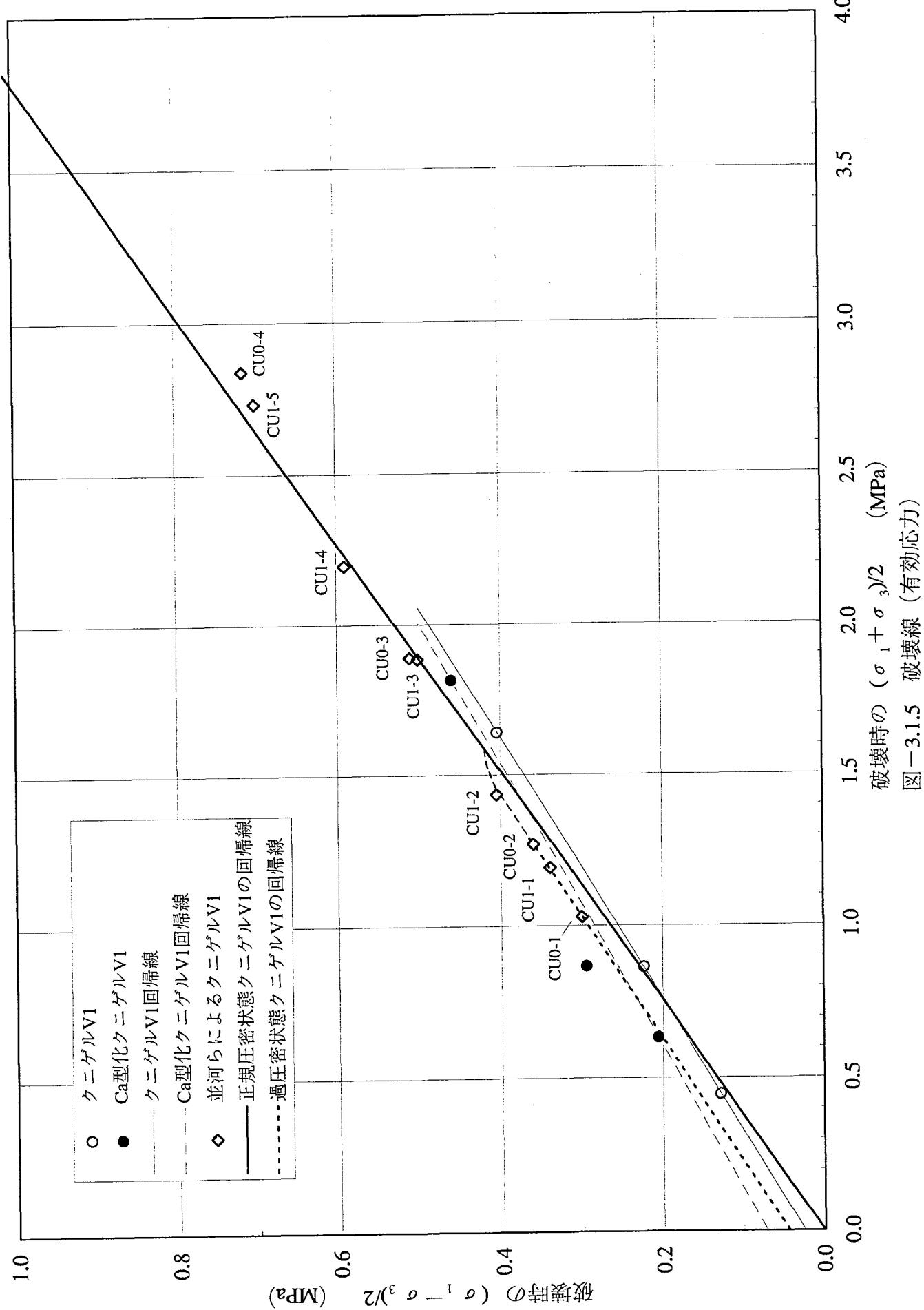


図-3.1.5 破壊線（有効応力）

3.2 変形係数

図-2.4.4に示した軸ひずみ～軸差応力関係を基に各供試体の変形係数 E_{50} を算定する。一般に変形係数 E_{50} は、破壊時の軸差応力の 1/2 となる曲線上の点と原点を結んで得られる直線の勾配で定義される。式で表現すると以下に示すとおりとなる。

$$E_{50} = \frac{q_{\max}/2}{\epsilon_1(q_{\max}/2)}$$

ここに、 E_{50} : 変形係数 (MPa)

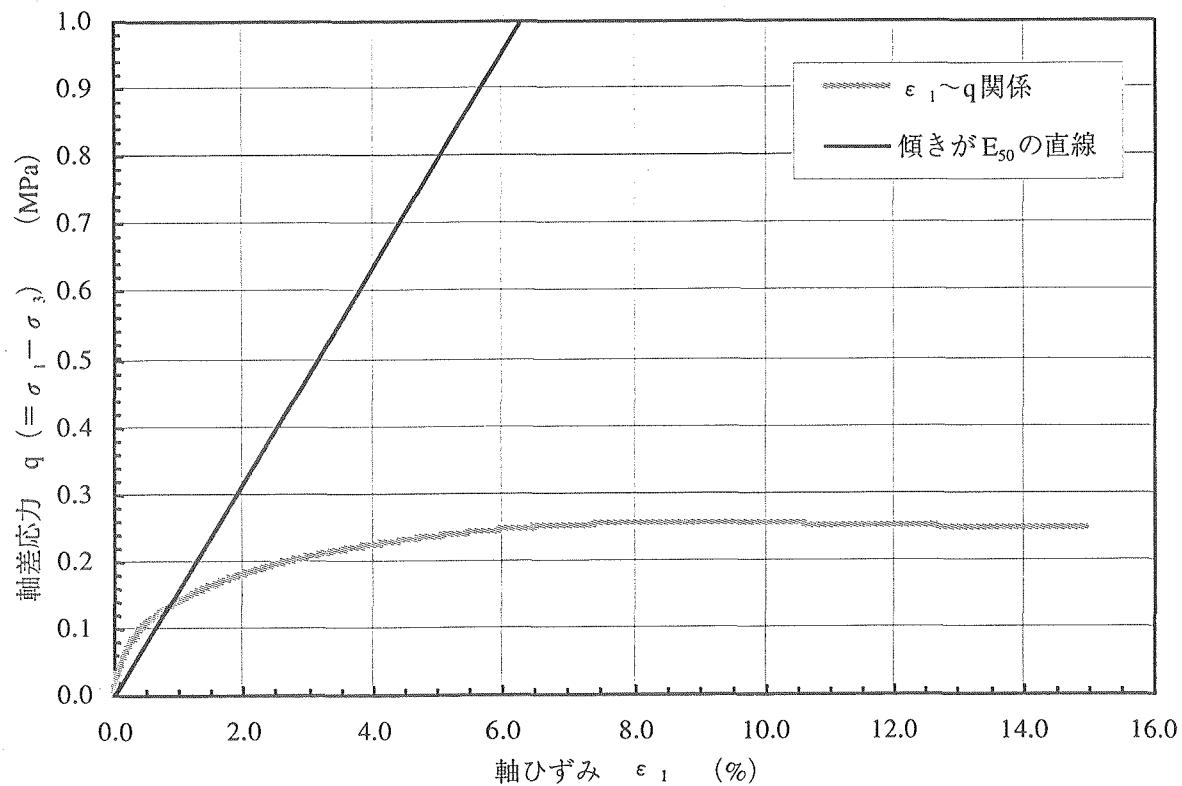
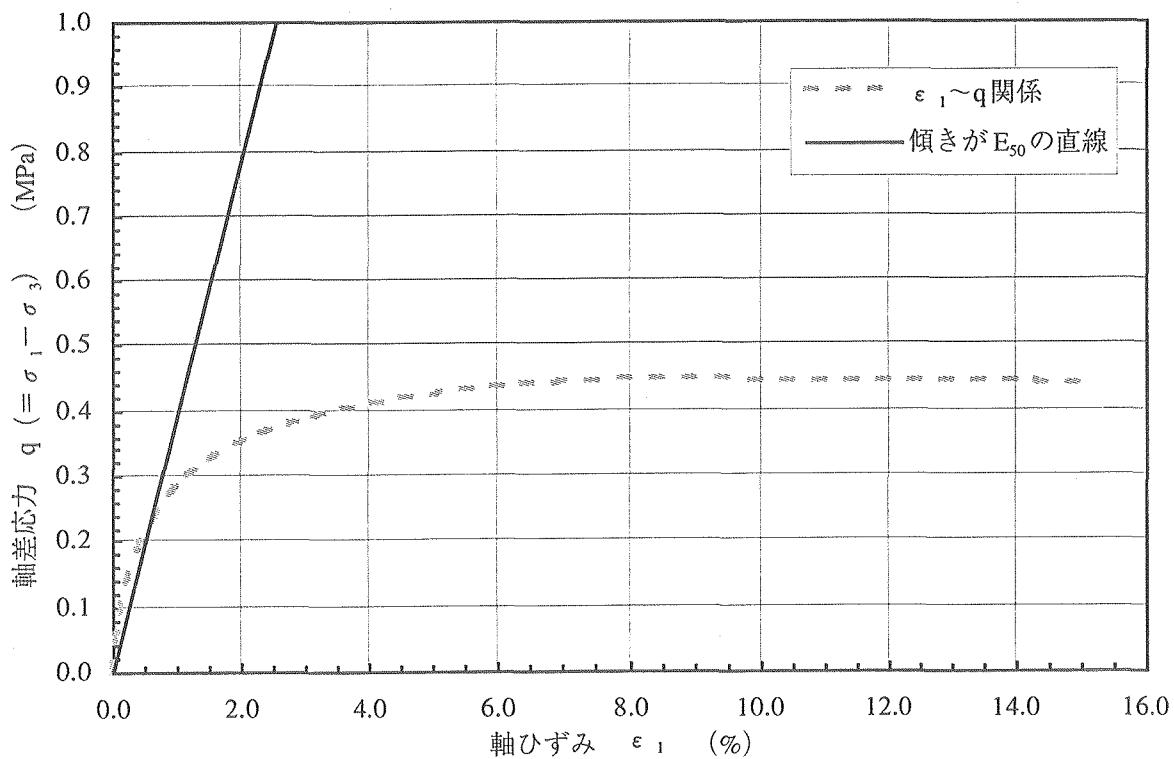
q_{\max} : 破壊時の軸差応力 (MPa)

$\epsilon_1(q_{\max}/2)$: 破壊時の軸差応力の 1/2 に対応する軸ひずみ (—)

表-3.2.1 に本試験における各供試体の変形係数 E_{50} の算定結果を示す。また、図-3.2.1～図-3.2.6 に各供試体の変形係数 E_{50} を示す。ここで、Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 1.96MPa については、前述の理由より σ_1' / σ_3' の最大点を破壊点とし、その他は軸差応力の最大点を破壊点としている。ちなみに Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 1.96MPa に関して軸差応力の最大点を破壊点とした場合の変形係数 E_{50} は、104MPa であり、 σ_1' / σ_3' の最大点を破壊点とした場合と大差ない。

表-3.2.1 本試験による変形係数 E_{50}

有効拘束圧 (σ_3' / MPa)	破壊点の軸差応力 (q_{\max} / MPa)	破壊点の軸差応力 の 1/2 $(q_{\max}/2 / \text{Mpa})$	$q_{\max}/2$ に対応する 軸ひずみ $\epsilon_1 / (\%)$	変形係数 $E_{50} / (\text{MPa})$
クニゲル V1				
0.49	0.256	0.128	0.802	16
0.98	0.447	0.224	0.559	40
1.96	0.808	0.404	0.597	68
Ca 型化クニゲル V1				
0.49	0.412	0.206	0.419	49
0.98	0.591	0.296	0.550	54
1.96	0.919	0.460	0.438	105

図-3.2.1 クニゲルV1 (有効拘束圧 $\sigma_3=0.49$ MPa) の変形係数 E_{50} 図-3.2.2 クニゲルV1 (有効拘束圧 $\sigma_3=0.98$ MPa) の変形係数 E_{50}

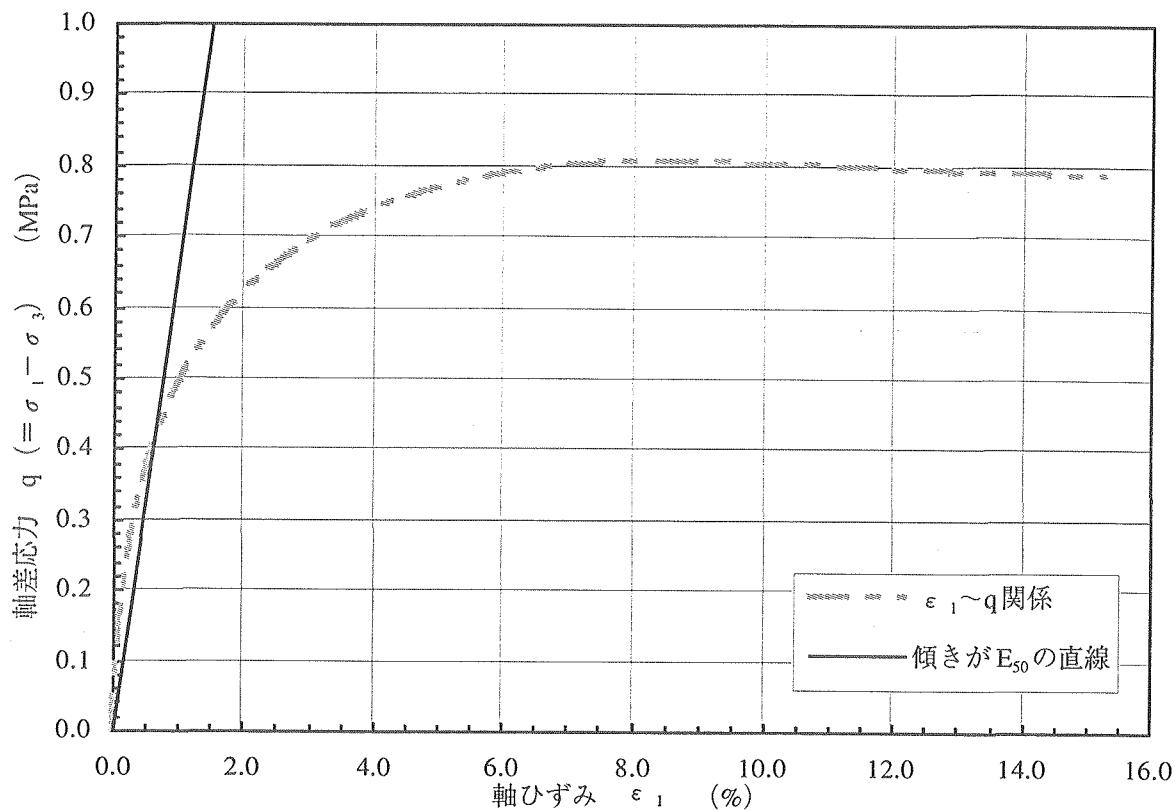


図-3.2.3 クニゲルVI（有効拘束圧 $\sigma_3=1.96\text{MPa}$ ）の変形係数 E_{50}

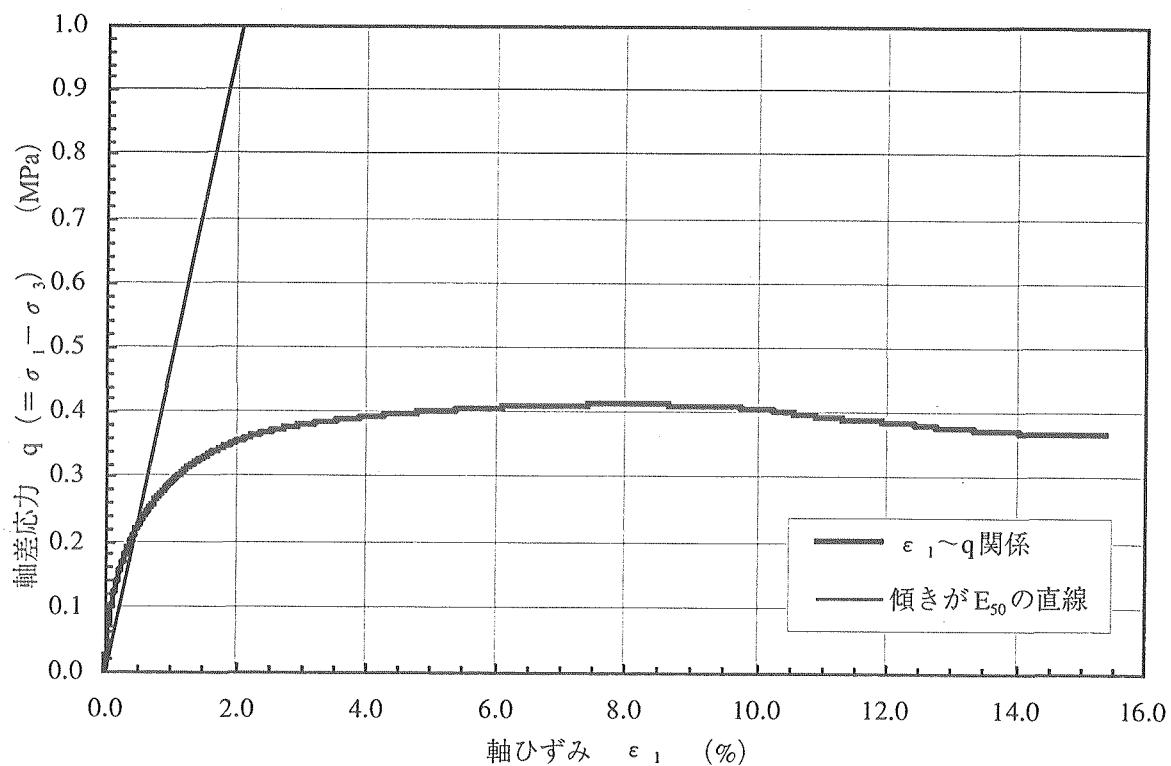


図-3.2.4 Ca型化クニゲルVI（有効拘束圧 $\sigma_3=0.49\text{MPa}$ ）の変形係数 E_{50}

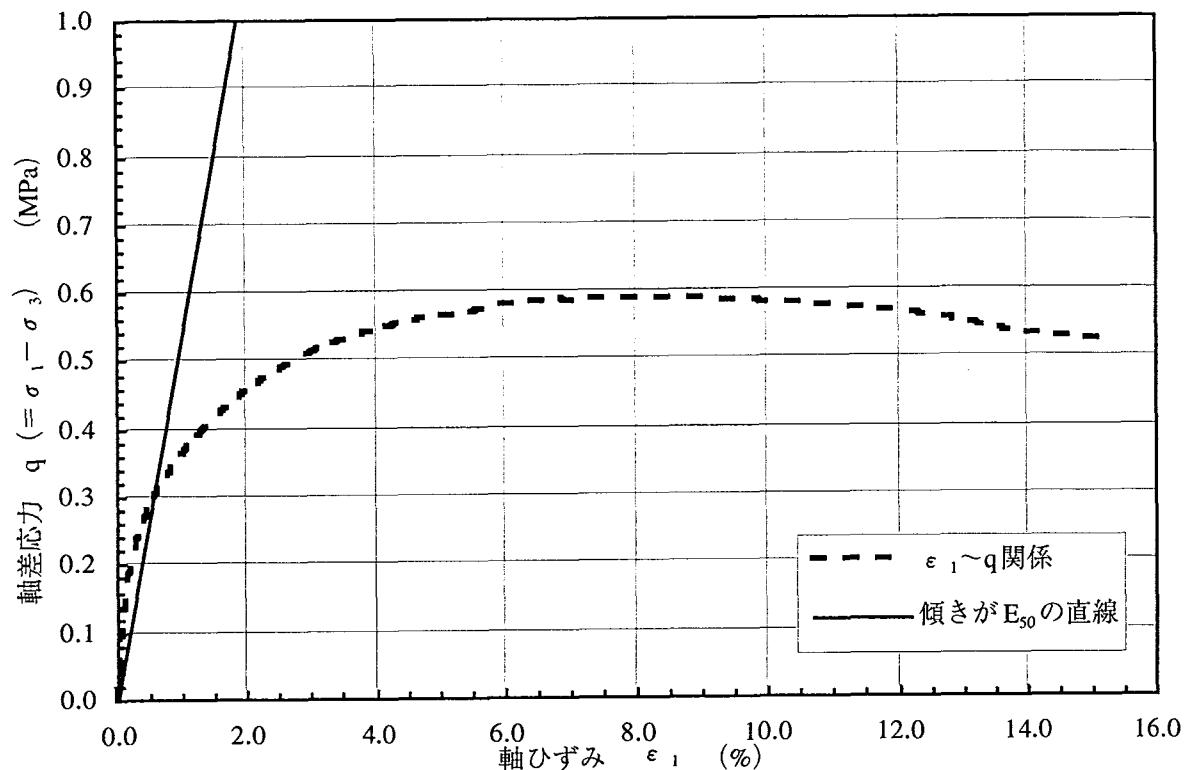


図-3.2.5 Ca型化クニゲルV1（有効拘束圧 $\sigma_3=0.98\text{MPa}$ ）の変形係数 E_{50}

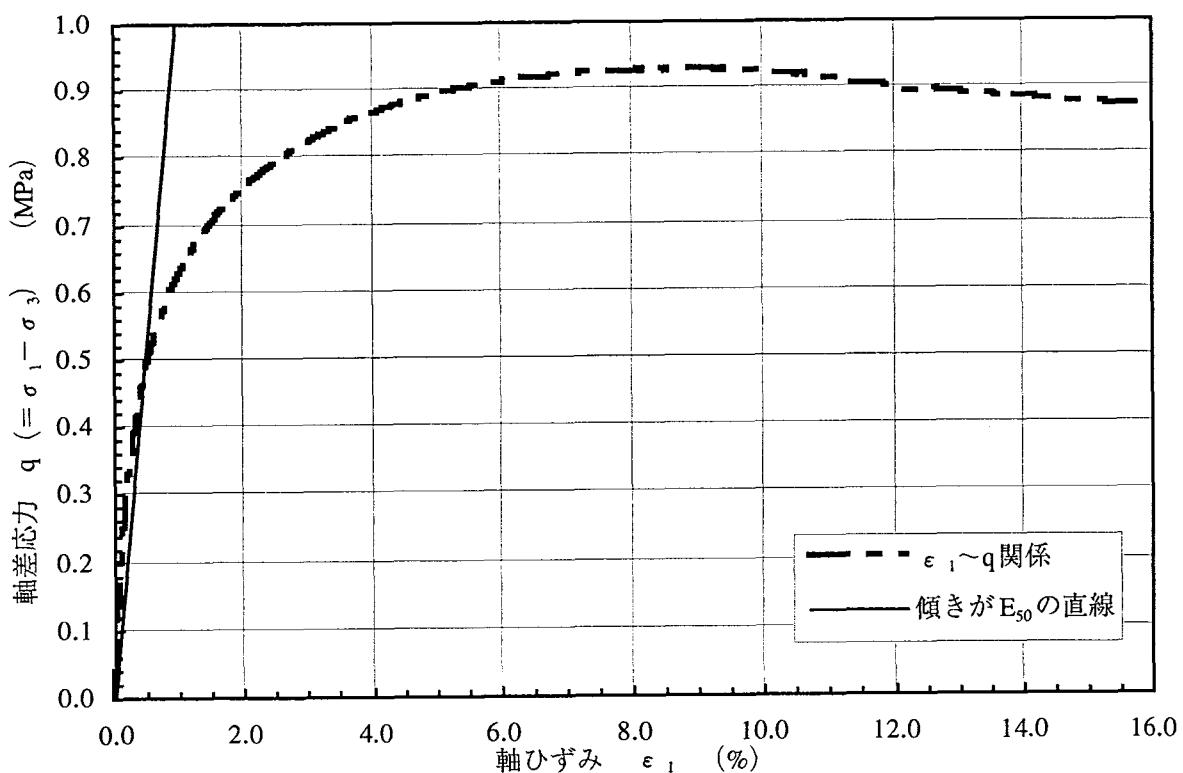
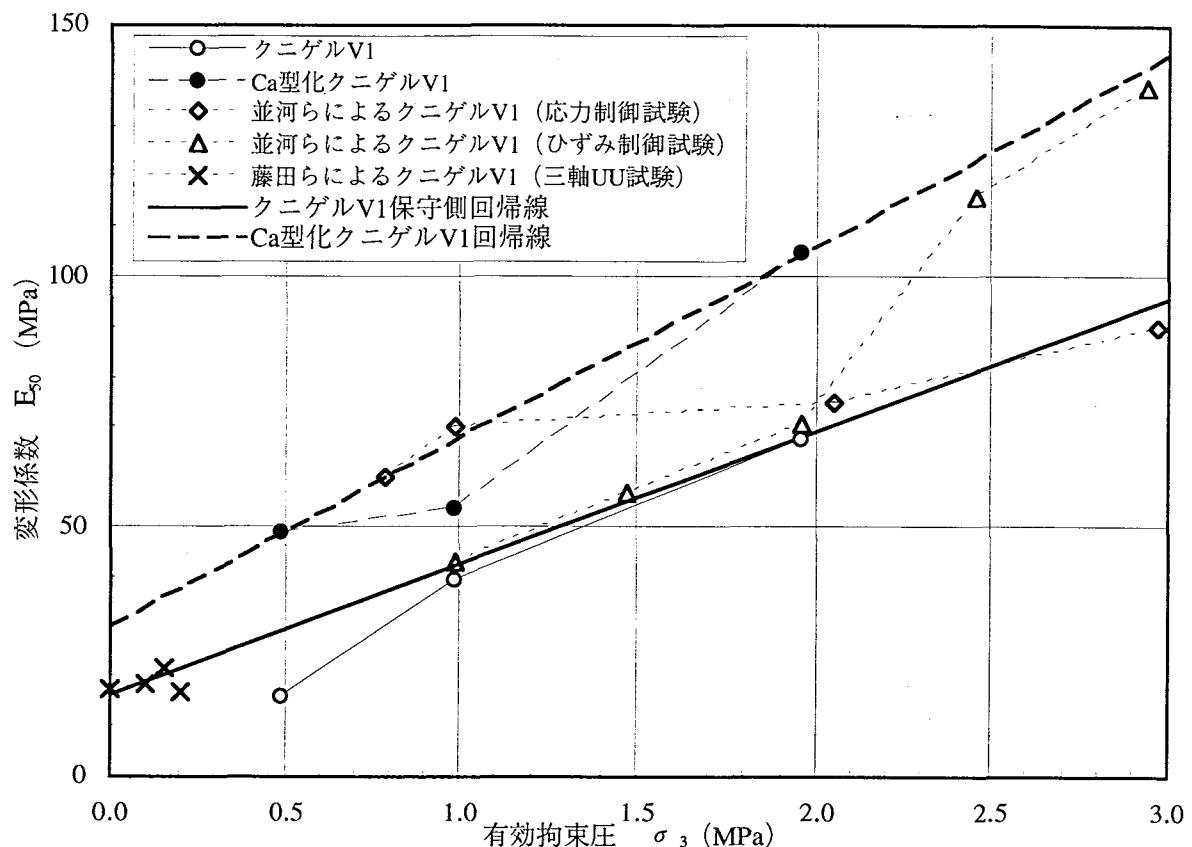


図-3.2.6 Ca型化クニゲルV1（有効拘束圧 $\sigma_3=1.96\text{MPa}$ ）の変形係数 E_{50}

また、図-3.2.7は、有効拘束圧と変形係数 E_{50} の関係を示したものである。図には、本試験結果の他、並河らによる試験結果³⁾（表-3.2.2 参照）及び藤田らによる試験結果²⁾（表-3.2.3）を追記した。

図-3.2.7 有効拘束圧と変形係数 E_{50} の関係表-3.2.2 並河らの試験による変形係数 E_{50}

試験番号	有効拘束圧 σ_3 (MPa)	破壊点の 軸差応力 ^往 q_{max} (MPa)	破壊点の 軸差応力の1/2 $q_{max}/2$ (MPa)	$q_{max}/2$ に対応 する軸差応力 ^往 q	変形係数 E_{50} (MPa)
クニゲル V1					
応力制御試験					
CU0-1	0.784	0.60	0.30	0.5	60
CU0-2	0.98	0.70	0.35	0.5	70
CU0-3	2.05	1.20	0.60	0.8	75
CU0-4	2.97	1.43	0.72	0.8	90
ひずみ制御試験					
CU1-1	0.98	0.68	0.34	0.8	43
CU1-2	1.47	0.80	0.40	0.7	57
CU1-3	1.96	1.00	0.50	0.7	71
CU1-4	2.45	1.15	0.58	0.5	116
CU1-5	2.94	1.38	0.69	0.5	138

注：文献3)に示される図から著者が読みとった値。

表-3.2.3 藤田らの試験による変形係数 E_{50}

乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	飽和度 Sr (%)	有効拘束圧 σ_3 (MPa)	変形係数 E_{50} (MPa)
クニゲルV1			
1.59	98.5	0	17.3
1.57	96.8	0.1	18.8
1.57	96.6	0.15	21.6
1.58	97.1	0.2	17.2

注：文献2) における三軸UU試験結果に基づき整理。

供試体形状は、直径5cm×高さ10cm。試験温度は、23℃。

図から明らかなように変形係数 E_{50} は、有効拘束圧の増加に依存して大きくなる。そして、同じ有効拘束圧であればCa型化クニゲルV1の方が、変形係数 E_{50} はやや大きめの値をとる。また、本試験結果におけるクニゲルV1の有効拘束圧0.98MPa及びCa型化クニゲルV1の有効拘束圧0.49MPaの変形係数 E_{50} は、本試験の他の結果と比較して小さめの値を示している。これは、前述したように、これらの供試体の乾燥密度が低下しすぎたことの影響と考えられる。

図に示した太い実線は、設計的に保守側と考えられるクニゲルV1の有効拘束圧と変形係数 E_{50} の関係を示す回帰線である。ここで設計的に保守側とは、変形しやすい、すなわち変形係数 E_{50} が小さいことと考えた。また、回帰に用いたデータは、本試験による有効拘束圧0.98及び1.96MPaの結果、並河らによるCU0-3～CU0-4及びCU1-1～CU1-3の結果、藤田らによる結果の計11データである。その結果、乾燥密度1.6g/cm³のクニゲルV1における飽和時の有効拘束圧と変形係数 E_{50} の関係式として以下を得た。

$$E_{50} = 26.4 \sigma_3 + 16.3$$

ここに、 E_{50} : 乾燥密度1.6g/cm³におけるクニゲルV1の変形係数 (MPa)

σ_3 : 有効拘束圧 (MPa)

また、図中の太い破線は、Ca型化クニゲルV1の有効拘束圧と変形係数 E_{50} の関係を示す回帰線である。回帰に用いたデータは、本試験による有効拘束圧0.49及び1.96MPaの結果の計2データである。その結果、乾燥密度1.6g/cm³のCa型化クニゲルV1における飽和時の有効拘束圧と変形係数 E_{50} の関係式として以下を得た。

$$E_{50} = 38.0 \sigma_3 + 30.1$$

ここに、 E_{50} ：乾燥密度 1.6g/cm^3 における Ca 型化クニゲル V1 の変形係数 (MPa)
 σ_3 ：有効拘束圧 (MPa)

この Ca 型化クニゲル V1 の回帰線に並河らによるクニゲル V1 の結果が、何点か載っている。これから判断するに、Ca 型化クニゲル V1 の変形係数 E_{50} が、クニゲル V1 のそれより大きいと言っても、たかだかバラツキの上限程度である。

3.3 ポアソン比

図-3.3.1 に軸ひずみとポアソン比の関係を示す。ポアソン比は、各軸ひずみに対応する側方ひずみから下式により算定した。

$$\nu = \frac{|\epsilon_3|}{\epsilon_1}$$

ここに、 ν ：ポアソン比

ϵ_1 ：軸ひずみ

ϵ_3 ：側方ひずみ

低軸ひずみ領域では、計測開始直後に生じた側方ひずみの乱れを受けている。その後、 $\nu = 0.2 \sim 0.5$ の間で変化しているが、材料や有効拘束圧、軸ひずみとの相関は全く読み取れず、ポアソン比の同定は困難である。また、一部の供試体では、高軸ひずみ域で 0.5 を上回っており、ポアソン比測定、言い換えれば側方ひずみ測定の難しさを物語っている。これは、供試体の側方への変形が、高さ方向に関し均等でないためと考えられる。

そこで、ポアソン比と静止土圧係数との関係¹⁸⁾ からポアソン比の算定を試みる。静止土圧係数の算定には、有効応力時の内部摩擦角に応じて変化する Jaky の実験提案式¹⁹⁾ を用いる。以上を式で表現すると、以下に示すとおりである。また、表-3.3.1 は、表-3.1.3 に示したクニゲル V1 の有効内部摩擦角からポアソン比を算定した結果である。

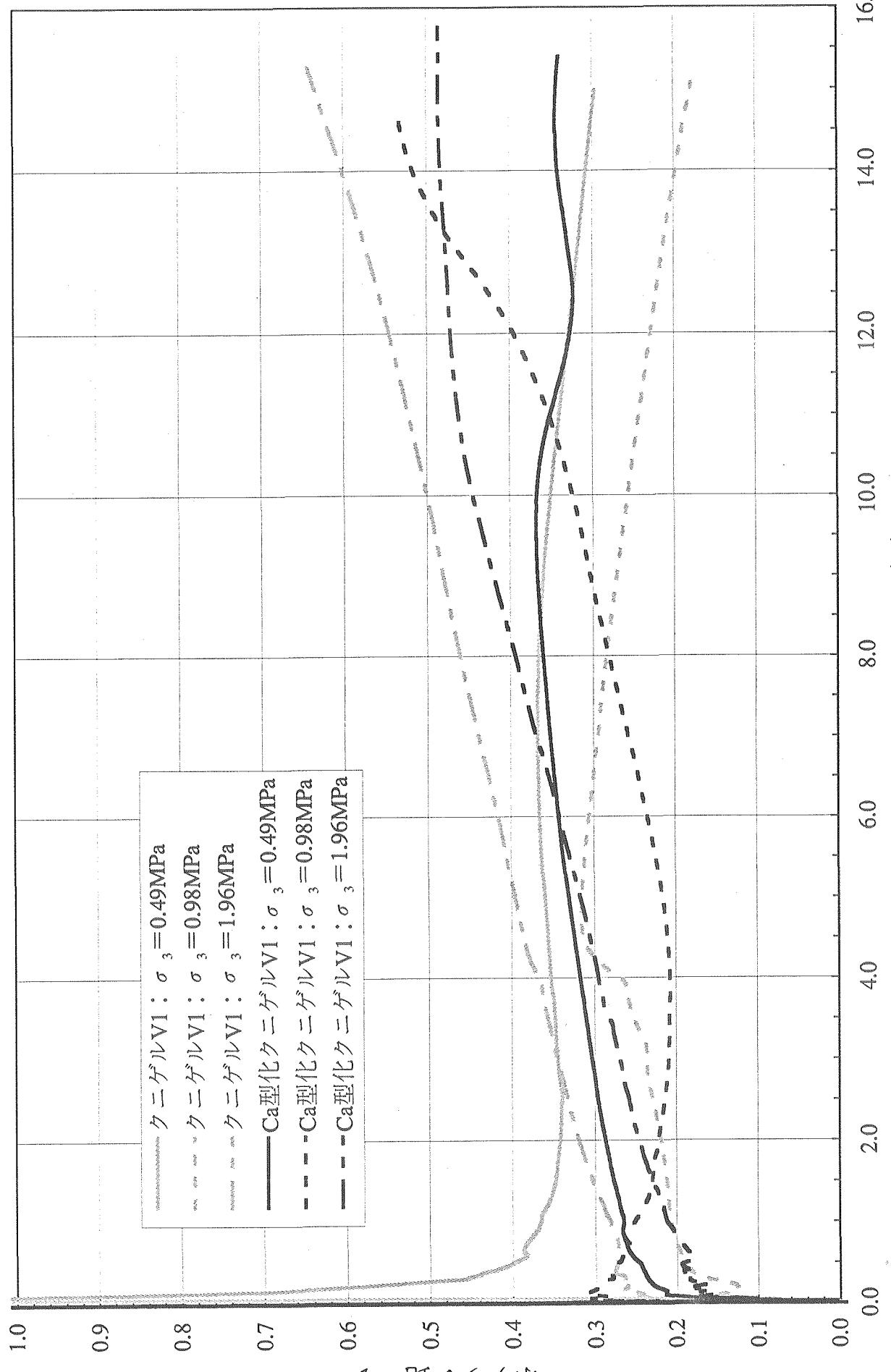


図-3.3.1 せん断時ににおける軸ひずみとボアンソン比の関係

$$K_0 = 1 - \sin\phi' \quad (\text{Jaky の実験提案式})$$

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0}$$

ここに、 ν ：ポアソン比

K_0 ：静止土圧係数

ϕ' ：有効内部摩擦角

表-3.3.1 クニゲルV1のポアソン比算定結果

圧密状態	有効内部摩擦角 ϕ' (°)	静止土圧係数 K_0	ポアソン比 ν
クニゲルV1			
過圧密状態	14.4	0.75	0.43
正規圧密状態	15.3	0.74	0.43

算定の結果、クニゲルV1のポアソン比は、圧密状態に係わらず $\nu=0.43$ となった。本試験に供したベントナイトは、飽和粘土と見なせるが、完全な等方弾性体 ($\nu=0.5$) より若干小さな値となった。また、静止土圧係数は、粘土に対する Terzaghi の実験結果 $K_0=0.70\sim0.75^{19)}$ と一致する結果となった。

Ca型化クニゲルV1に対するポアソン比は、明確な有効内部摩擦角が得られていないため算定できないが、前述したようにCa型化クニゲルV1とクニゲルV1の有効内部摩擦角が大差ないと考えるならば、ポアソン比も表-3.3.1に示した値と大きく異なることはないであろう。

以上より、ひずみ測定試験から直接的にポアソン比を決定するよりも、せん断試験結果に基づく有効内部摩擦角を用い、計算式によってポアソン比を算定する方法が実用的と考える。

4. まとめと今後の課題

4.1 まとめ

- (1) 乾燥密度 1.6g/cm^3 程度では、飽和期間 30 日、通水圧 0.7MPa という条件で供試体がほぼ飽和状態になることが確認された。
- (2) 圧密時間を 3 t 法で規定した場合、今回の試験条件（乾燥密度 1.6g/cm^3 、圧密応力 $\sigma_3 = 0.49, 0.98, 1.96\text{MPa}$ ）では、7 日間（10,000 分）までに圧密の終了を確認することができた。
- (3) ベントナイト供試体は、三軸圧縮試験装置にセットする際、排水経路の飽和等の作業過程で余分な水を吸水する可能性がある。この余分な水の影響を圧密量に与えないために排水経路を水で満たした後、平衡膨潤圧相当と考えられる拘束圧を負荷し、余分な水の排水を行うことが肝要である。
- (4) 圧密終了後の間隙水圧係数 B 値として $0.81 \sim 0.92$ が得られた。これらの値は、通常、飽和状態の目安とされる 0.95 よりも小さな値である。しかしながら、圧密開始前の飽和度は 95% 以上得られており、実質的に飽和とみなしても差し支えないと判断される。また、これ以上 B 値を上げることは本試験方法では困難と考えられる。これまで、なかなか飽和ベントナイトの三軸圧縮試験の成果が得られなかったのは、B 値 0.95 に固執していたためである。したがって、ベントナイトのような通常の粘土より透水性が小さい材料に対しては、B 値 0.95 で飽和を規定するより、予備試験を行い飽和度と通水圧及び飽和期間の関係を知ることが実際的と考える。
- (5) 軸ひずみと軸差応力の関係では、有効拘束圧の大きい供試体ほど、また同一の有効拘束圧であればクニゲル V1 より Ca 型化クニゲル V1 の方が、同一軸ひずみに対する軸差応力が大きい。また、各供試体とも軸ひずみが 1% を超えたあたりで非線形性が大きくなつた。そして、有効拘束圧によらず軸ひずみが約 $8 \sim 9\%$ で軸差応力のピークを呈し、その後ほぼ一定あるいは若干のひずみ軟化を生じた。
- (6) 軸ひずみと間隙水圧の関係では、Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 0.49 及び 1.96MPa を除き、軸差応力との関係と同様に軸ひずみが 8% 程度で間隙水圧のピークを呈し、その後ほぼ一定値を示した。一方、Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 0.49MPa では軸ひずみ 1% 強でピークを迎え、その後間隙水圧は減少した。さらに、Ca 型化クニゲル V1 の有効拘束圧 1.96MPa では、間隙水圧の初期の立ち上がりが他と比べて緩く、かつピークが現れなかつた。

- (7) 側方ひずみと軸差応力の関係では、材料及び有効拘束圧によらず全ての供試体において負の側方ひずみが発生した。すなわち、軸方向に圧縮されたことにより供試体は側方に伸張していたことを表している。また側方ひずみは、有効拘束圧によらず3%前後で軸差応力のピークを呈し、その後ほぼ一定あるいは若干の低下を生じた。
- (8) 各供試体における有効応力経路の限界状態は、並河らが得たクニゲルV1の限界状態線 ($M=0.58$ 、 $\phi'=15.3^\circ$)³⁾ にほぼ一致した。
- (9) 軸ひずみと正規化軸差応力の関係においてクニゲルV1の有効拘束圧0.98、1.96MPa及びCa型化クニゲルV1の有効拘束圧1.96MPaは、並河らの試験結果³⁾と同様に、軸ひずみ8%程度でピークを迎え、その後一定もしくは若干の低下を示した。そして、ピーク時の正規化軸差応力も並河らの試験結果³⁾と同様であった。
- (10) せん断強度は、Na型ペントナイトがCa型化することによりわずかに増加するが、工学的に有意な差とは考えにくい。
- (11) 本試験におけるクニゲルV1のせん断強度は、並河ら³⁾のそれに比べ小さい傾向にあった。
- (12) 本試験及び並河らの試験結果³⁾から求めたクニゲルV1のせん断強度定数は、表5.1.1に示すとおりとなった。Ca型化クニゲルV1に対するせん断強度定数は、データが少ないと同定困難であるが、(10)の立場を採れば表-5.1.1と大差無いと考えられた。

表-5.1.1 せん断強度定数

応力範囲	全応力規準		有効応力規準	
	内部摩擦角 ϕ_{au} (度)	粘着力 C_{au} (MPa)	傾き m	粘着力 C' (MPa)
クニゲルV1				
過圧密領域	10.3	0.12	0.249	0.05
正規圧密領域	11.2	0.0	0.264	0.0

- (13) 本試験、並河らの試験³⁾及び藤田らの試験²⁾結果を整理すことにより、乾燥密度1.6g/cm³のクニゲルV1における飽和時の有効拘束圧と変形係数 E_{50} の保守的な関係として下式を得た。また、Ca型化クニゲルV1の変形係数 E_{50} は、クニゲルV1のそれより若干大きいが、クニゲルV1のバラツキの上限程度であった。

$$E_{50} = 26.4 \sigma_3 + 16.3$$

ここに、 E_{50} ：乾燥密度 1.6g/cm^3 におけるクニゲル VI の変形係数 (MPa)

σ_3 ：有効拘束圧 (MPa)

(14) ベントナイトのポアソン比を試験から同定することは、困難であった。そこで、有効内部摩擦角から静止土圧係数を算定し、さらに静止土圧係数からポアソン比を算定した。その結果、クニゲル VI のポアソン比は、供試体の圧密状態によらず $\nu = 0.43$ を得た。また、Ca 型化クニゲル VI のポアソン比は、他と同様に(10)の立場を採れば、クニゲル VI と大差無いと考えられた。

4.2 今後の課題

- (1) 乾燥密度 1.6g/cm^3 の Ca 型化クニゲル VI の力学定数は、クニゲル VI のそれより若干大きくなる傾向を示した。クニゲル VI に対する力学定数を用いれば、保守的な検討が可能と考えられる。しかしながら、Ca 型化クニゲル VI 独自の力学定数がどうしても必要な場合は、データが少なく、決定困難である。正規圧密状態の力学定数を決定するには、現在より高い拘束圧下での試験データ取得が望まれる。また、有効拘束圧 0.98MPa における試験は乾燥密度が目標より低下する等信頼性が乏しいため、全般的に試験データの拡充が望まれる。
- (2) 現在、TRU 廃棄物の処分概念設計では、乾燥密度 1.8g/cm^3 のベントナイトを想定している。したがって、乾燥密度 1.6g/cm^3 のベントナイトで要求性能が担保できなければ、乾燥密度 1.8g/cm^3 の試験結果が必要となる。その場合、飽和度と通水圧及び飽和期間の関係を明らかにする予備試験を行う必要がある。

謝 辞

本研究における試験の実施や結果の解釈を行うに当たっては、田中俊行氏をはじめ鹿島建設株式会社の多数の方々に多大な御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 並河努、菅野毅：緩衝材の圧密特性 PNC TN8410 97-051, (1997)
- 2) 藤田朝雄、早乙女敦、原啓二：緩衝材の力学試験, PNC TN8410 92-170, (1992)
- 3) 並河努、菅野毅：緩衝材のせん断特性 1 PNC TN8410 97-074, (1997)
- 4) (社)土質工学会：N 値および $C \cdot \phi$ -考え方と利用法-, p104 (1992)
- 5) 鹿島建設土木設計本部編：土木設計の要点① 設計の基本知識, 鹿島出版会, p18 (1993)
- 6) 三原守弘、伊藤勝、加藤博康、上田真三：ナトリウム型ペントナイトのカルシウム型化に伴う形状因子の変化 - 圧縮ペントナイト中のトリチウムの実効拡散係数による比較 -, (社)日本原子力学会「1995年秋の大会」, p642 (1995)
- 7) 田中益弘、山本博之：Na 型ペントナイトの Ca 化による透水係数と最大膨潤圧の変化, (社)日本原子力学会「1997年秋の大会」, (1997)
- 8) (社)土質工学会：土質試験の方法と解説, pp304～305 (1990)
- 9) (社)土質工学会：土の試験実習書 -第一回改訂版-, p145 (1984)
- 10) 前出 4), p102
- 11) 前田宗宏、伊藤勝、三原守弘：カルシウム型ペントナイトの基本特性 - 透水係数、膨潤圧、一軸圧縮強度 - PNC TN (作成中)
- 12) 山口柏樹：土質力学（全改訂）講義と演習, 技報堂出版, p160 (1984)
- 13) 前出 12), p167
- 14) 前出 12), p100
- 15) 前出 12), p185
- 16) 飯塚敦：地盤の変形解析への適用 -- 弾塑性もしくは弾粘塑性構成モデルを用いた試み -- (社)土質工学会関西支部 地盤工学における有限要素法入門講習会, p31 (1992)
- 17) 前出 4), p107
- 18) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, p149 (1993)
- 19) 前出 18), p101

付録1 Gap-Senser® 非接触式変位計