

間隙径分布の測定に基づく海成粘土の圧縮特性に関する考察

三浦哲彦¹・山寺 彰²・日野剛徳³

¹正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町一番地)

²学生会員 工修 佐賀大学大学院工学系研究科システム生産科学専攻

³正会員 博(工) 佐賀大学助手 低平地防災研究センター

自然間隙比状態の異なる2つの海成粘土を対象にして、一次元圧縮過程および膨張過程における間隙径分布の変化を水銀圧入型ポロシメーターを用いて測定し、それらの圧縮・膨張特性に関わる間隙を定量的に評価し考察した。実験結果より、初期間隙状態では1μm径以上の間隙が60%以上を占めていること、正規圧密過程と膨張過程ではメゾポア(1~10μm)の増減が主として関与していることを示した。また、同一間隙比における乱さない試料と練返し再圧密試料は類似の間隙径分布特性を示すことを明らかにした。実験に用いた有明粘土と広島粘土の圧縮特性の違いは、1μm径以上の間隙量の差によるものであり、前者は土の集合体間に働くセメントーションの効果が広島粘土より大きいことに起因することを指摘した。

Key Words: marine clay, compression, rebound, pore size distribution, microstructure, cementation

1. はじめに

佐賀平野に堆積している有明粘土は、広大な干潟を有する有明海の環境下で生成された海成粘土である。堆積環境の観点から、有明粘土の塩分溶脱現象に関する研究が行われ、その影響が土質工学的性質に影響を及ぼしていることが明らかにされてきている¹⁾。一般に、飽和粘土が塩分溶脱作用を受けると構造の低位化をきたし、間隙比は低下するとの見方がある²⁾。塩分溶脱とともに有明粘土の中には依然高い間隙比を保ち、高圧縮性を示すものがある。またこの粘土が乱れると、せん断強さは著しく低下し、圧縮性は小さくなることが知られている。このような現象は、同粘土の力学特性が微視的構造の変化に依存していることを示唆するものである。

粘土の圧縮過程における微視的構造の変化を調べるために、水銀圧入型ポロシメーター（以下、単にポロシメーターという）を用いた間隙径分布の測定が有用であると考える。ポロシメーターを用いた従来の研究の中で、Ahmedら³⁾は、土の最適含水比状態と乾燥、湿潤状態での間隙径分布を測定し、土の締固め強度と間隙の変化について論じている。

Delageら⁴⁾は、圧縮過程におけるChamplain clay（海成粘土）の構造特性を電子顕微鏡とポロシメーターを用いて検討し、土のアグリゲート（集合体）は機械的な練返しによって壊れ難いこと、粘土には自由間隙が存在すること、圧縮指数は大きな間隙と関係があることなどを報告している。Lapierreら⁵⁾は、圧縮過程におけるLouiseville clay（海成粘土）の間隙径分布の測定結果に基づいて透水係数を算出し、実測値と比較することにより粘土の構造特性を議論している。我が国では山口⁶⁾が、泥炭の等方圧縮および排水せん断過程における間隙径分布の変化を測定し、その構造特性について報告しているのが注目される。立石⁷⁾は、珪藻土の間隙が主に0.1~5μm径の間に分布していることを示し、鬼塚と根上⁸⁾は、有明粘土の乱さない試料と室温および高温状態で再圧密した試料を用いて間隙径分布の測定を行い、その微視的構造について考察している。またYamaderaら⁹⁾は、セメントで改良した有明粘土の圧縮過程における間隙径分布の変化を測定している。

著者らは高位の構造¹⁰⁾を保っている有明粘土の力学特性に関する研究を行っているが、本論文はその一環として、有明粘土より低位の構造を有する広島

粘土と比較しつつ、海成粘土の圧縮・膨張特性を調べたものである。このために、ポロシメーターを用いて一次元圧縮過程および膨張過程における2つの粘土の乱さない試料と練り返した後、再圧密した試料の間隙径分布を測定し、間隙の定量化に基づいて粘性土の構造特性について論じる。

2. 間隙径分布の測定方法

(1) 試料

有明粘土は、佐賀郡芦刈町（A1）および有明海干潟（A2）においてサンプリングした。また、広島粘土については、広島湾で採取されたものを入手して実験に用いた。粘土の物理的諸性質をTable 1に示す。練返し再圧密試料については、2mmふるいを通過した粘土をソイルミキサーで5分程度練り返し、塩ビモールド（直径290mm、高さ150mm）に空気が入らないように詰めた。鉛直方向に段階的に荷重を与え、9.8kPaで一次圧密を終了させた後、モールドから取り出し、ラッピングした上からビニール袋で覆って水中保存した。

乱さない試料と練返し再圧密試料はひずみ制御型圧密試験によって圧縮した。装置の上面から片面排水させ、供試体下面で間隙水圧を測定し、過剰間隙水圧が発生しないよう0.025%/min.のひずみ速度で試験を行った。

Fig.1とFig.2に間隙径分布の測定に用いた有明粘土（A1）と広島粘土の乱さない試料および練返し後に9.8kPaで再圧密した試料の圧縮経路を示す。これらの実験結果から、複数の e_c -log σ'_v 曲線はおおむね一致しており、ひずみ制御型圧密試験の再現性は比較的高いことが確認できる。Fig.1にみられるように、実験に用いた乱さない有明粘土は、初期間隙比が大きく、明瞭な圧密降伏点と逆S字型の曲線を示す。また練返し後、再圧密した粘土の圧縮経路は、再圧密圧力より大きい領域で直線であり、土田が示した基準曲線¹¹⁾に相当する。一方、Fig.2の広島粘土は、乱さない試料の初期間隙比、正規圧密領域の圧縮性が有明粘土に比べて小さい。また、圧密圧力が大きくなると、乱さない試料の圧縮経路は練返し再圧密試料の曲線に近づく傾向にある。

Fig.1, Fig.2の記号（ $a \sim d$ と $a' \sim d'$ 、および $e \sim h$ と $e' \sim h'$ ）で示した状態に達したところで各々の試験を停止した。すべての試料は圧密試験装置から取り出すときに生じる応力解放の影響を受けるが、極力その影響を避けるよう速やかに試料を取り出して間隙径分布の測定を行った。また本論文では、圧密圧力

Table 1 Basic properties of test samples

Sample	Ariake clay(A1)	Ariake clay(A2)	Hiroshima clay(H)
Natural water content (%)	136-159	149-204	126-137
Natural void ratio	3.6-4.2	3.8-5.2	3.3-3.6
Liquid limit (%)	112	142	122
Plasticity index	70	96	76
Specific gravity	2.67	2.56	2.60
Sensitivity ratio	14	3	4
Salt concentration (g/l)	9	20	26
pH	8.3	7.8	7.1

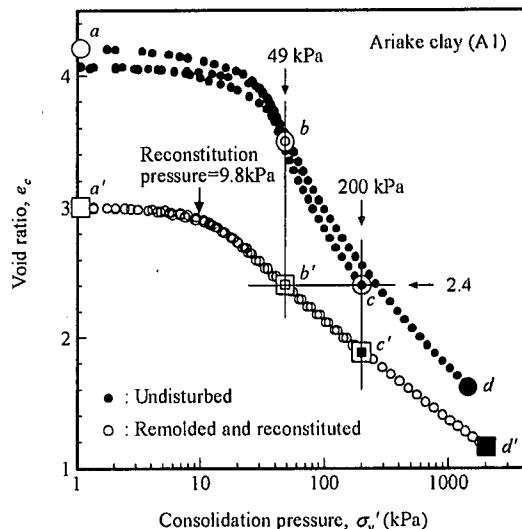


Fig.1 Compression path of Ariake clay by constant rate of strain consolidation test

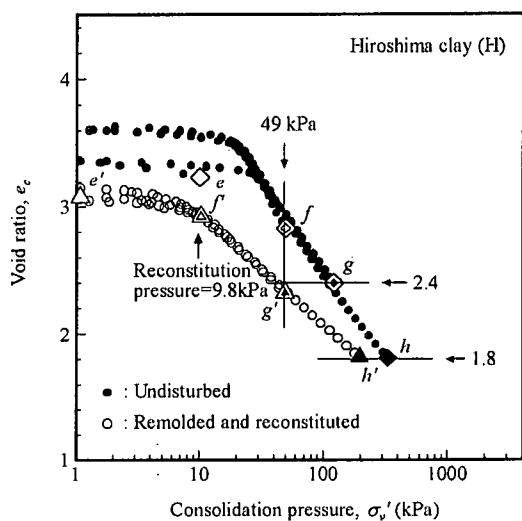


Fig.2 Compression path of Hiroshima clay by constant rate of strain consolidation test

1kPaに対応する点 (a , a' , e') を初期間隙状態と呼ぶ。図に示すように、乱さない試料と練返し再圧密試料と同じ圧密圧力 ($\sigma'_v=49$, 200kPa), または同じ間隙比 ($e_e=2.4$, 1.8)まで圧縮した上で両試料の間隙径分布を比較検討した。

(2) ポロシメーターへのセット

間隙径分布の測定を行う準備として、試料の体積を変化させることなく間隙中の流体(水、空気)をすべて除去する必要がある。本実験では真空凍結乾燥(フリーズドライ)法を用いた。フリーズドライは種々の材料を氷点下の温度で凍結させ、その状態のまま昇華によって乾燥させる方法であり、乾燥過程で生じる体積変化は小さく、試料の物理的、化学的变化も少ないことが知られている^[12,13]。

凍結方法には予備凍結と蒸発凍結(乾燥室内凍結)があるが、本実験では試料を凍結乾燥機に入れ、真空を徐々にかけることで蒸発凍結させた。水は凍結乾燥機内が減圧されて気圧が4.6mmHg(613Pa)になると0°Cで沸騰蒸発し、水1kgについて約540kcalの蒸発潜熱がとられて氷結がはじまると言われる^[12,13]。そのさい試料の体積は増加することが予想されるが、後述するように、間隙径分布の測定結果より求めた間隙比と圧密試験後の間隙比の差が小さいことから、凍結過程における試料の体積膨張が間隙径分布の測定結果に及ぼす影響は小さいと判断した。また予備凍結処理した試料と比較したところ、両者の間隙径分布の測定結果には大きな違いが認められないことを確認した。

Fig.3は予備実験で調べた乾燥法の違いによる有明粘土の含水比の変化を乾燥時間の関係で示している。同図においてフリーズドライした試料の含水比は110°C炉乾燥より約6%低く、乾燥時間がおよそ1~2日で含水比の変化が小さくなることがわかった。この実験結果に基づいて、試料は5日間フリーズドライして間隙径分布の測定用に用いることとした。ひずみ制御型圧密試験において所定の圧縮状態に達した試料は、圧密リングから試料を乱さないように取り出し、供試体の中央部を一辺が約10mmの直方体に切り出した。その後、凍結乾燥機(冷却温度:-45°C、真空到達度: 6.7×10^{-2} Pa、排気量: 60l/min.)によって乾燥した。フリーズドライした試料の0.2~0.9gを乱さないようにガラスセルに入れ、ポロシメーターにセットした。

(3) 間隙径分布の測定

間隙径の算出には、粘土の間隙がすべて連続した円筒状であると仮定し、接触角が90°以上の水銀は

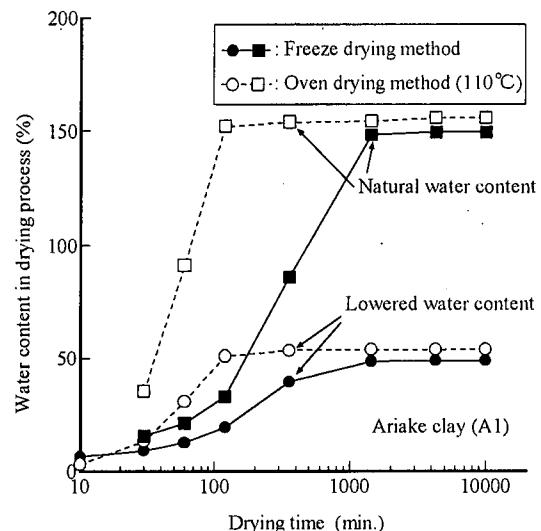
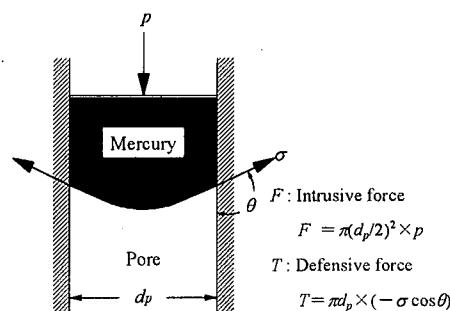


Fig.3 Water content and time relations for different drying methods



$$\pi: \text{Pi } p: \text{Intrusion pressure (N/m}^2\text{)} \quad d_p: \text{Pore diameter (m)}$$

$$\sigma: \text{Surface tension of mercury (N/m)}$$

$$\theta: \text{Contact angle of mercury to sample (°)}$$

Fig.4 Principal of pore size measurement

表面張力のために外圧作用がないと間隙に侵入できないという性質を利用する。Fig.4は、粘土の間隙に水銀が侵入する力(F)と、水銀の侵入を妨げる力(T)の関係を模式的に示しているが、力の釣り合い条件が $F > T$ のときに水銀は間隙に侵入できることから、間隙径と侵入圧力の関係は次式で表わされている^[14]。

$$pd_p = -4\sigma \cos \theta \quad (1)$$

ここに、 p : 侵入圧力 (N/m²), d_p : 間隙直径 (m), σ : 水銀の表面張力 (N/m), θ : 水銀の試料に対する接触角 (°) である。水銀の表面張力と接触角の値は温

Table 2 Test results obtained by porosimeter

Sample	Test point	w_i	σ_v'	e_c	e_p	c_c	c_r	Σv_{pt}	m_s	Remarks
Ariake clay (A1) Undisturbed	a	150	0	4.21	3.61	-	-	1.35	0.41	Natural state
	b	150	49	3.49	3.22	2.02	0.03	1.21	0.40	Compression state (Constant rate of strain consolidation test)
	c	151	200	2.40	2.07	2.13	0.09	0.78	0.48	
	d	151	1448	1.62	1.20	1.89	0.03	0.45	0.69	
Ariake clay (A1) Remolded and reconstituted	a'	109	0	3.00	2.45	-	-	0.92	0.33	Initial state
	b'	109	49	2.40	1.85	0.84	0.05	0.69	0.75	Compression state (Constant rate of strain consolidation test)
	c'	110	200	1.88	1.51	0.86	0.06	0.57	0.68	
	d'	109	2027	1.16	1.09	0.75	0.06	0.41	0.88	
Hiroshima clay (H) Undisturbed	e	131	10	3.24	3.24	-	0.14	1.25	0.42	Compression state (Constant rate of strain consolidation test)
	f	132	50	2.83	2.67	1.81	0.05	1.03	0.44	
	g	126	122	2.40	1.95	1.36	0.03	0.75	0.43	
	h	137	334	1.81	1.74	1.36	0.05	0.67	0.41	
Hiroshima clay (H) Remolded and reconstituted	e'	115	0	3.08	2.68	-	-	1.03	0.24	Initial state
	f'	116	10	2.92	2.37	-	0.12	0.91	0.24	Compression state (Constant rate of strain consolidation test)
	g'	112	49	2.32	1.84	0.94	0.10	0.71	0.24	
	h'	113	197	1.82	1.44	0.89	0.08	0.55	0.42	
Ariake clay (A2) Remolded and reconstituted	①	130	20	2.79	2.28	1.10	-	0.89	0.25	Compression state (Standard consolidation test)
	②	132	78	2.28	2.00	1.18	-	0.78	0.41	
	③	132	157	1.82	1.23	1.19	-	0.48	0.25	
	④	132	78	1.86	1.50	1.27	0.07	0.59	0.24	Rebound state (Standard consolidation test)
	⑤	133	20	1.91	1.51	1.26	0.10	0.59	0.23	

w_i : Initial water content before consolidation test

e_p : Void ratio measured by total mercury intruded volume

c_c : Compression index

Σv_{pt} : Total mercury intruded volume (cm^3/g)

σ_v' : Consolidation pressure (kPa)

e_c : Void ratio in consolidation test

c_r : Rebound index

m_s : Dried sample weight for porosimeter (g)

度と粘土の種類により異なってくる。本実験では、過去の研究で用いられた値¹³⁾を参考にして、 σ を480dyn/cm ($1\text{dyn}/\text{cm} = 1 \times 10^{-3}\text{N}/\text{m}$)、 θ を140°とした。各間隙径に対する間隙容積は、段階的に圧入される水銀量から求めた。

測定は、試料の入ったガラスセル内を真空脱気して段階的に水銀を圧入した。本実験に用いた装置は最大225MPaまで水銀圧入できるので、間隙直径は400~0.0064μmの範囲で測定可能であった。

Fig.5は、圧密試験の各段階で算出した間隙比(e_c)と、水銀圧入によって測定された全間隙容積より求めた間隙比(e_p)を比較したものである。同図において、炉乾燥試料の e_p (os点)はフリーズドライ試料の e_p (fs点)の37%に相当し、炉乾燥が試料の体積収縮に与える影響の大きさを示している。一方、フリーズドライ試料における e_p は e_c より小さな値を示すが、その要因として、 e_p の算出に際し測定不可の微小間隙容積が含まれていないこと、間隙を連続した円筒状であると仮定していること、試料の乱れや膨潤の影響があること、などが挙げられる。しかし、

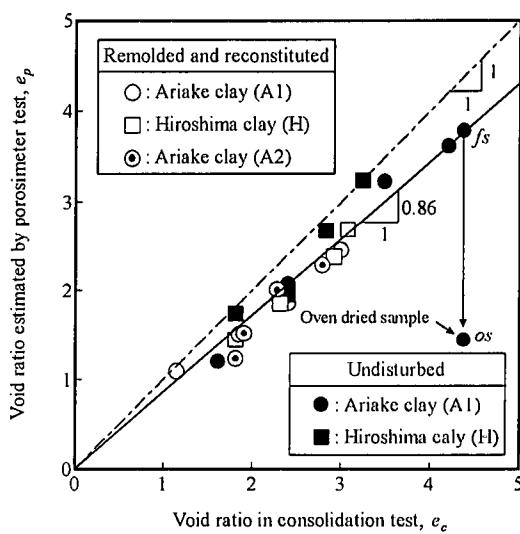


Fig.5 Comparison of void ratios obtained by two methods

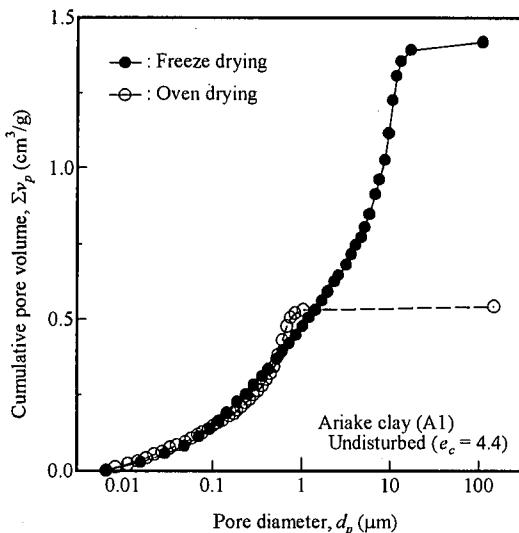


Fig. 6 Changing of pore size distribution in oven dried and freeze dried samples

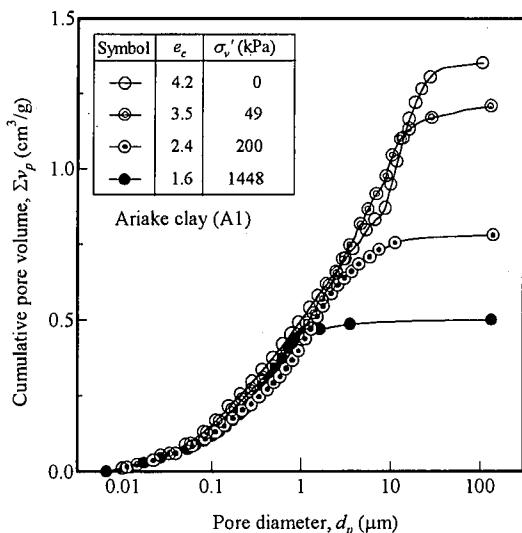
両者の相関係数が0.86と比較的高いことから、ポロシメーターによる本測定値の信頼性は容認できるレベルのものと考えた。

Table 2に、間隙径分布の測定に用いた全試料の実験結果をまとめている。

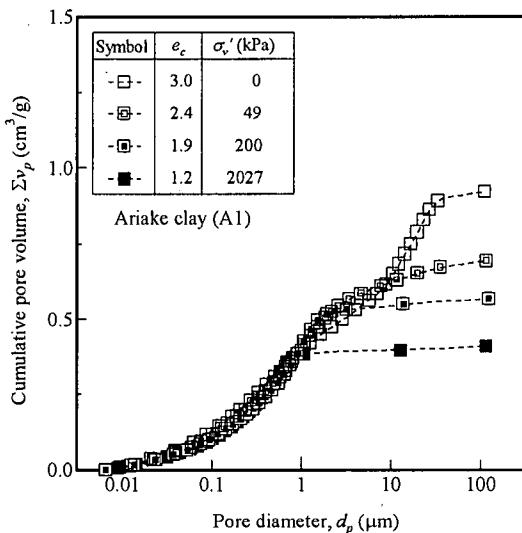
3. 実験結果

(1) 乾燥法が間隙径分布に及ぼす影響

Fig.6はフリーズドライと110°C炉乾燥によって乾燥した有明粘土の乱さない試料(A1, 自然含水比が159%)の累積間隙曲線を示す。この曲線の勾配が大きいことは、その間隙径に対応する間隙の量が多いことを示す。同図において、フリーズドライ試料の間隙が広範な間隙径領域で分布しているのに対して、炉乾燥試料は体積収縮が大きく生じ、1μm以上上の間隙は存在していない。また後者の累積間隙曲線の最大勾配部分は0.1~1μm径へ移行しているが、0.1μm径以下の同曲線はフリーズドライ試料とほぼ一致している。このことから、炉乾燥による粘土の乾燥が1μm以上の間隙を消失させ、0.1~1μm径の間隙径分布に変化を与えていているといえる。0.1μm径以下の間隙が影響されない要因の一つには、有明粘土に含まれる珪藻があげられる。立石²⁾は、110°C炉乾燥が珪藻土の間隙径分布特性に与える影響が小さいことを報告している。またAhmedら³⁾は、土の締固め実験において、土の含水比がその最適含水比より小さくなるほど、炉乾燥が土の間隙径分布特性に



(a) Undisturbed sample



(b) Remolded and reconstituted sample

Fig. 7 Changing of pore size distribution in Ariake clay

与える影響は小さくなることを示している。このことから、圧縮が進行し含水比が低下してくると、試料の間隙径分布特性に及ぼす炉乾燥法の影響は小さくなることが予想される。

(2) 累積間隙曲線

Fig.7(a),(b)に有明粘土の累積間隙曲線を示す。Fig.7(a)の乱さない試料の初期間隙状態では、間隙径が10μmより小さいところで勾配が緩く、その後急勾配となっている。これは、地盤中から採取した試料が応力解放によって膨張したことに関係してい

る。圧密降伏応力を越えると、累積間隙曲線のギャップは消失し、その最大勾配部分は左側に移行して、 $1\mu\text{m}$ 径付近の間隙が多く認められるようになる。一方、 $0.1\mu\text{m}$ 径以下の累積間隙曲線は4つの間隙状態でほぼ重なって描かれ、粘土には圧密圧力の変化に依存しない間隙が存在することを示している。

Fig.7(b)に示す練り返した後、再圧密した試料の初期間隙状態における累積間隙曲線は、乱さない試料よりもギャップが大きくなる傾向を示している。この場合も、試料作製時の載荷と除荷にともなう圧縮膨張が影響していると考えられる。正規圧密領域まで圧縮が進むと、累積間隙曲線のギャップは小さくなり、乱さない試料と同様に、 $1\mu\text{m}$ 径付近の間隙が多く存在するようになる。また、全ての圧縮状態において $0.1\mu\text{m}$ 径以下の間隙の量はあまり変化していない。

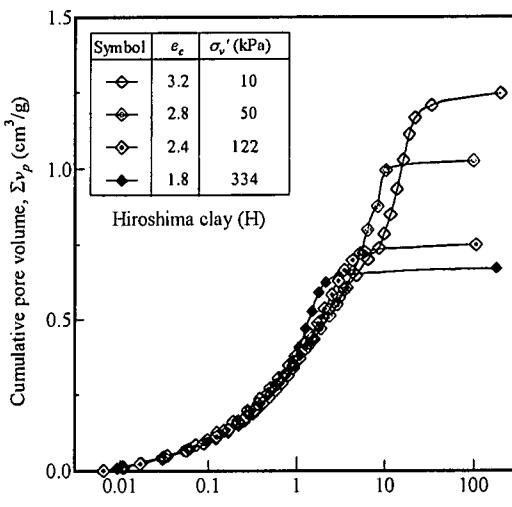
Fig.8(a),(b)は、広島粘土の乱さない試料と練返し再圧密試料の累積間隙曲線を示している。乱さない試料の初期間隙状態では、 $10\mu\text{m}$ 径より小さい間隙付近で緩やかな勾配が認められ、その右側で急勾配となって有明粘土の場合と同様に $10\mu\text{m}$ 径より大きい間隙が多いことを示している。その後、圧密圧力の増加にともなって大きな間隙は消え、間隙は $1\mu\text{m}$ 径付近に多く存在するようになる。また、練返し再圧密試料においては、 9.8kPa で再圧密した後の膨張によって累積間隙曲線にギャップが生じるが、再圧密圧力を越えて正規圧密領域に達すると、ギャップは消失していく。乱さない試料と練返し再圧密試料の $0.1\mu\text{m}$ 径以下の間隙は、有明粘土の場合と同様に、全ての間隙比状態において類似の分布を示している。

4. 実験結果の考察

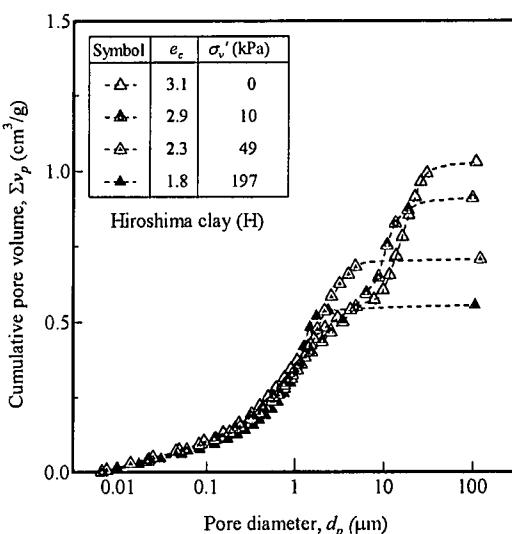
(1) 圧縮過程の間隙径分布の変化

鬼塚と根上⁸は、有明粘土の微視的構造をアグリゲーション（土粒子の集合体）、リンク（アグリゲーション間の連結）および間隙を用いて表し、その乱さない試料と練返し再圧密試料の圧縮過程における間隙径分布の変化をリンクの切断や破壊に起因したアグリゲーションの分布の変化によって説明している。

本研究では、粘土の圧縮過程における間隙の変化を定量的に検討するために、間隙径の範囲を規定して、その間隙容積の変化を調べた。松尾と嘉門¹⁶は、粘性土のミクロ構造を構成する基本単位として、土粒子の集合体をペッド、間隙をポアと名称し、Table



(a) Undisturbed sample



(b) Remolded and reconstituted sample

Fig.8 Changing of pore size distribution in Hiroshima clay

Table 3 Classification of ped and pore (Matsuo and Kamon¹⁶)

ped	pore
Macro-ped ($>50\mu\text{m}$)	Macro-pore ($>10\mu\text{m}$)
Mezzo-ped (2-50μm)	Mezzo-pore (1-10μm)
Micro-ped (0.1-2μm)	Micro-pore (0.01-1μm)*
Submicro-ped ($<0.1\mu\text{m}$)	Submicro-pore ($<0.01\mu\text{m}$)

*Micro-pore A (0.1-1μm)

Micro-pore B (0.01-0.1μm)

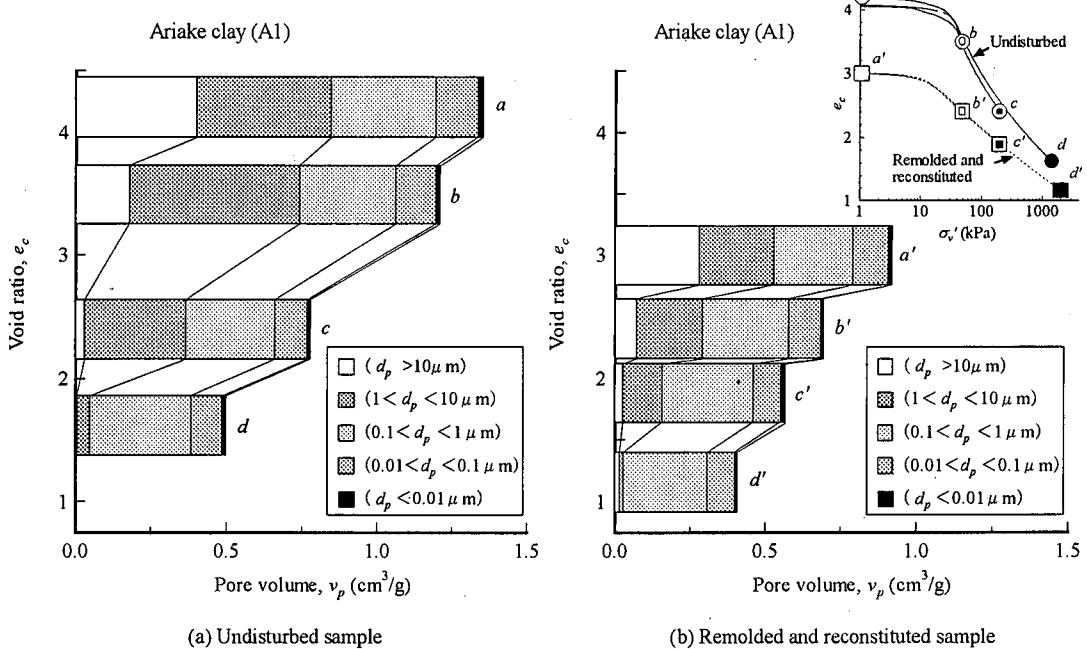


Fig.9 Changing of pore volume in loading process in Ariake clay

3に示すような分類をしている。本文では、 $0.01\sim1\mu\text{m}$ 径のミクロポアは、ミクロポアA ($0.1\sim1\mu\text{m}$)とミクロポアB ($0.01\sim0.1\mu\text{m}$)に区別して5段階で表示することとした。

Fig.9(a),(b)は、先に示した有明粘土(A1)の累積間隙曲線に基づいて、圧縮過程における乱さない試料と練返し再圧密試料の各領域における間隙容積を求める、間隙比との関係で表したものである。Fig.9(a)の乱さない試料の初期間隙状態(a 点)において、そのマクロポアは全間隙の30%を、メゾポアは全間隙の33%を占め、有明粘土は大きな間隙が支配的な構造を有していることがわかる。圧密降伏応力を越えた b 点の間隙径分布と比較すると、マクロポアの間隙容積に差が生じているが、その他の間隙容積はほとんど変化していない。このことは、サンプリングや供試体作製時に生じる応力解放や乱れがマクロポアの量に影響を与える、メゾポア以下の間隙径分布には反映されないことを示唆している。正規圧密領域における間隙径分布の変化は(b 点~ d 点)，主にメゾポアにおいて生じていることが認められる。はじめにマクロポアが減少し、減少量の一部がメゾポアの間隙に移行する。その後の圧密圧力の増加では主にメゾポアが減少し、圧密圧力が $1,448\text{kPa}$ に至ると(d 点)，メゾポア以上の間隙が全間隙容積の5%に満たなくなる。また、 $1\mu\text{m}$ 径以下のミクロポアA，

ミクロポアBおよびサブミクロポアの間隙容積は、圧縮過程においてほぼ同じ大きさを保ち、圧密圧力に影響を受けないことがわかった。

Fig.9(b)の練返し再圧密試料の間隙径分布において、初期間隙状態(a' 点)では、マクロポアが全間隙の30%を、メゾポアが全間隙の27%を占め、乱さない試料の場合と同様に大きな間隙が支配する構造を有しているといえる。しかし、マクロポアとメゾポアの間隙容積は乱さない試料に比べて小さい。また、ミクロポア以下の間隙容積は乱さない試料とほぼ同じ大きさを有している。これらのことから、ミクロポア以下の間隙は試料作製時における練返しや再圧密載荷、除荷の影響を受けないと推測され、Delageら⁴⁾がChamplain clayについて述べたことが、本試料においても間隙径分布の観点から確認された。さらに b' 点の間隙径分布と比較した場合、マクロポアの間隙容積のみが変化を生じていることから、試料作製時や応力解放の影響を受けるのは主としてマクロポアであると考えられる。一方、正規圧密領域における間隙径分布の変化は(b' 点~ d' 点)，乱さない試料と同様に、マクロポアが先に減少し、圧密圧力が大きくなるとメゾポアも影響されるようになる。しかしミクロポア以下の間隙容積はほとんど変化していない。

Fig.10(a),(b)は、広島粘土の乱さない試料と練返

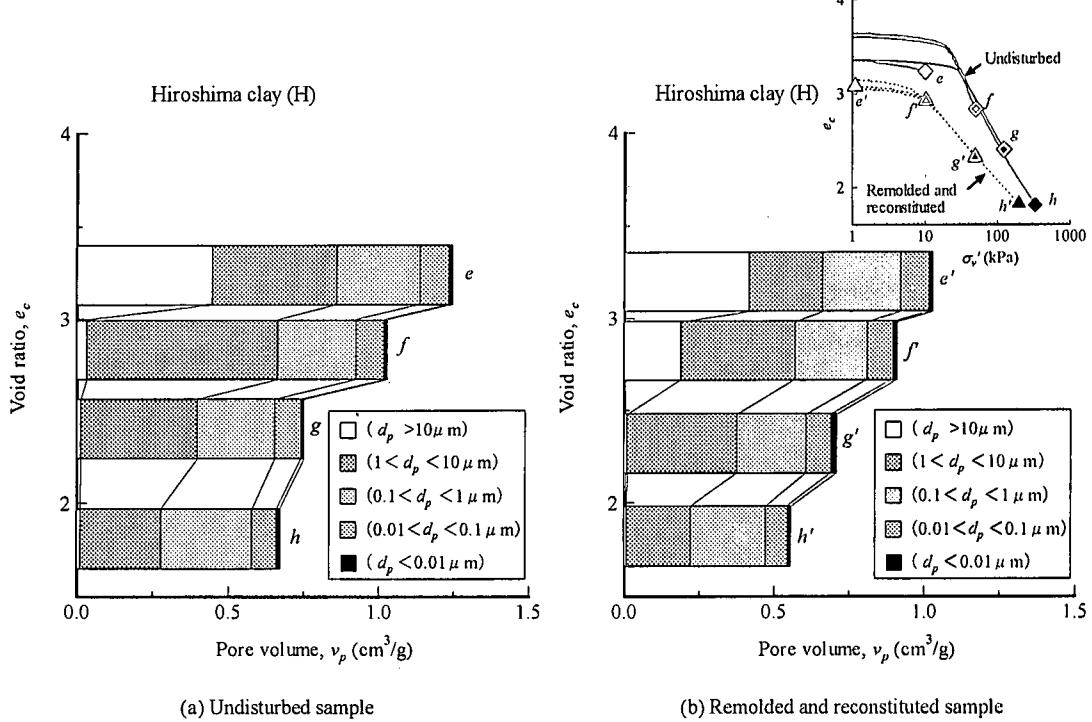


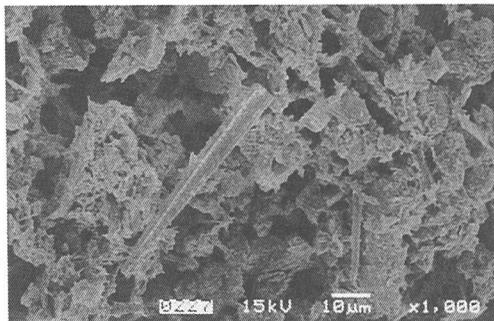
Fig.10 Changing of pore volume in loading process in Hiroshima clay

し再圧密試料の間隙容積の変化を間隙比の関係で示している。Fig.10(a)の乱さない試料の e_c 点における間隙径分布は、メゾポア以上の間隙が全間隙量の69%を占めることから、広島粘土についても大きな間隙で支配された構造を有しているといえる。正規圧密領域における間隙比の減少は(f 点～ h 点)，有明粘土の場合と同様に、主としてメゾポアの変化によるものであり、ミクロポア以下の間隙は変化を生じない。また、間隙比が2.4に対応する広島粘土の乱さない試料の間隙径分布を乱さない有明粘土の $e_c = 2.4$ の場合と比較すると、メゾポア以上の間隙が占める割合は広島粘土の方が大きいが、マクロポアの割合は有明粘土の方が大きい。またミクロポア以下の間隙容積は、広島粘土の方が幾分少ない。

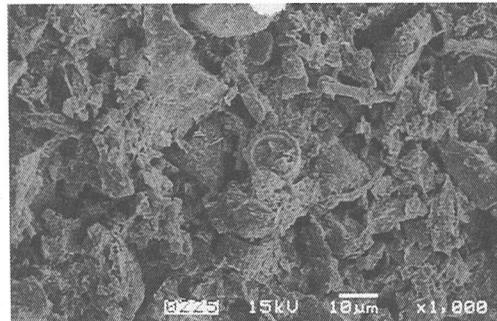
Fig.10(b)の広島粘土の練返し再圧密試料における初期間隙状態(e' 点)では、メゾポア以上の間隙が占める割合は全間隙量の64%を占め、有明粘土の練返し再圧密試料より大きな間隙を含んだ構造であるといえる。また e' 点から f' 点へ至る圧縮過程における間隙の変化は、マクロポアとメゾポアによって生じている。正規圧密領域の f' 点から h' 点における間隙径分布の変化は、主としてメゾポアの間隙の増減に左右され、メゾポアが全間隙量に占める割合は有明粘土より大きいことがわかる。

Photo 1(a),(b)および**Photo 2(a),(b)**は、有明粘土と広島粘土の乱さない試料の初期間隙状態および間隙比が2.4まで圧縮したときの堆積方向に対して鉛直面の様子を電子顕微鏡によって撮影したものである。それぞれの写真において有明粘土と広島粘土の土構造の明瞭な違いは読みとりにくい。しかし、土粒子は単独ではなく集合体として存在すると指摘されるように¹⁰⁾、圧密開始前の両試料の構造状態は様々な大きさや形状を有した集合体と間隙によって複雑に構成されていることは読みとることができる。また間隙比2.4まで圧縮が進行すると、両試料とも大きな間隙は消失し、集合体が接近して密な粘性土構造を有するようになることが観察される。

ここで、有明粘土と広島粘土の初期間隙状態における集合体の大きさについて検討した。集合体は写真によって判定し、トレースした集合体の長軸と短軸の長さを測定して大きさを決定した。その結果、両粘土の集合体の多くが、Table 3によるとこころのメゾペッドに分類され、有明粘土は5～15μmの集合体が、広島粘土の場合には5～10μmの集合体が最も多く存在していることがわかった。また同写真において、有明粘土の集合体の面積は全体の47%を占め、広島粘土の集合体の場合には42%であった。さらに**Photo 1**と**Photo 2**および**Fig.9**と**Fig.10**をあわせて考

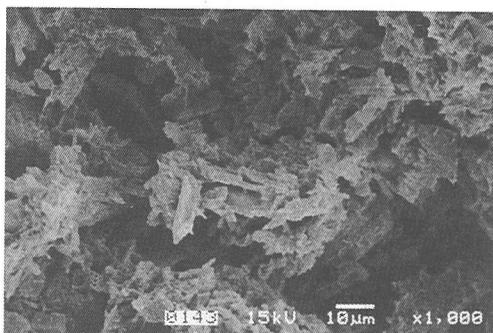


(a) $\sigma_v' = 0$ kPa, $e_c = 4.2$

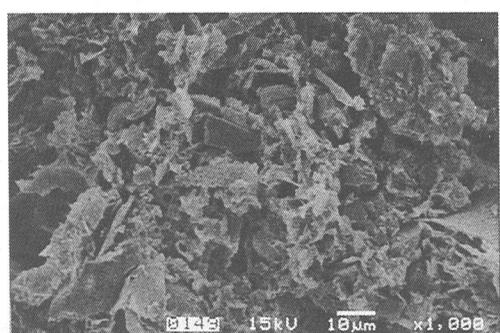


(b) $\sigma_v' = 200$ kPa, $e_c = 2.4$

Photo 1 Undisturbed Ariake clay



(a) $\sigma_v' = 0$ kPa, $e_c = 3.3$



(b) $\sigma_v' = 122$ kPa, $e_c = 2.4$

Photo 2 Undisturbed Hiroshima clay

ると、有明粘土と広島粘土の集合体の内部は主として1μm径以下の間隙で構成されており、それらの中には珪藻遺殻特有の細孔間隙も含まれていることが推定される。

以上のことから、本実験の圧密圧力レベルにおいては、一次元圧縮による間隙の変化は主に集合体間で生じるのであり、集合体内部の間隙はあまり影響を受けないことが明らかになった。

(2) 膨張過程に関する考察

先に述べたように、海成粘土の応力解放にともなう過圧密領域における間隙径分布は、正規圧密領域のそれとは異なることがわかった。そこで膨張過程における間隙径分布の変化をさらに詳しく調べるために、練返し再圧密した有明粘土(A2)を用いて検討した。Fig.11は標準圧密試験で得られた有明粘土(A2)の練返し再圧密試料の e_c -log σ_v' 曲線(①～⑤)

を示している、圧縮曲線、膨張曲線は共に直線で表されることがわかる。膨張過程の④と⑤は、膨張時間による間隙径分布の変化が明瞭に生じるように、それぞれ③の状態より24時間および72時間放置した。その後、応力解放の影響による間隙径分布の変化が小さくなるように圧密試験装置から試料を速やかに取り出した。①から⑤の各状態に対応する間隙径分布に関するデータはTable 2に示している。

Fig.12にFig.11の①から⑤で測定した間隙径分布の測定結果を間隙容積の変化で表している。正規圧密領域(①～③)の圧縮過程における間隙径分布の変化は、先に示したように、マクロポアとメゾポアの増減によって生じ、圧密圧力157kPaの③においてはマクロポアとメゾポアは消失して、ミクロポアAが支配的となる。一方、③から⑤の除荷過程における間隙径分布の変化に注目すると、正規圧密領域の圧縮過程において形成されたミクロポア以下の間隙径

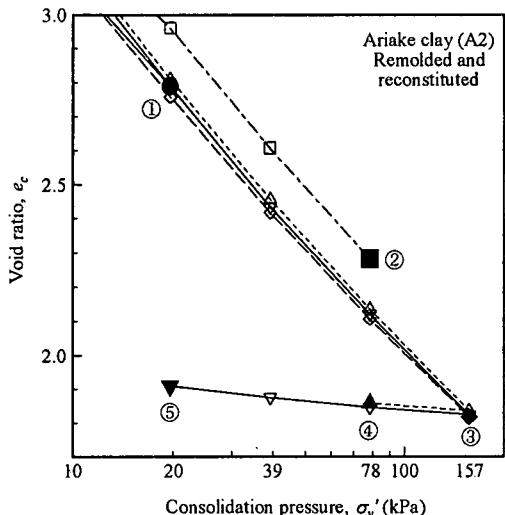


Fig.11 Compression and rebound path in standard consolidation test

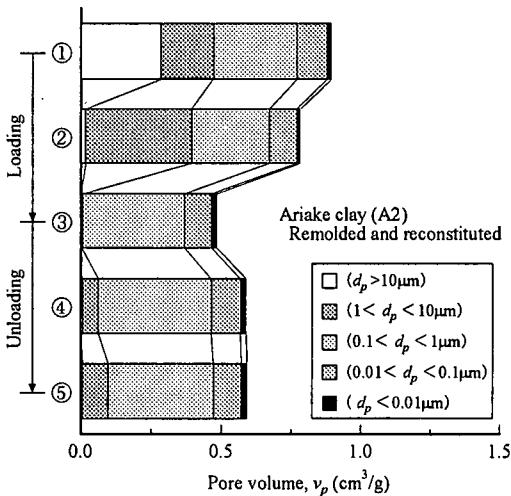


Fig.12 Changing of pore volume in loading and unloading processes in standard consolidation test

分布は、その後の除荷過程においても維持されている。また、経過時間の増加とともに試料の膨張が進行すると、メゾポアの間隙容積が増加し、その結果として間隙比が大きくなっている。これらのことから、有明粘土が応力解放の影響を受けると、経過時間に依存して集合体の配列が変化し、メゾポア以上の間隙が現れてくることがわかる。これは、先に論じた乱さない試料と練返し再圧密試料の初期間隙状態がメゾポア以上の間隙で多く占められていることを説明することになる。

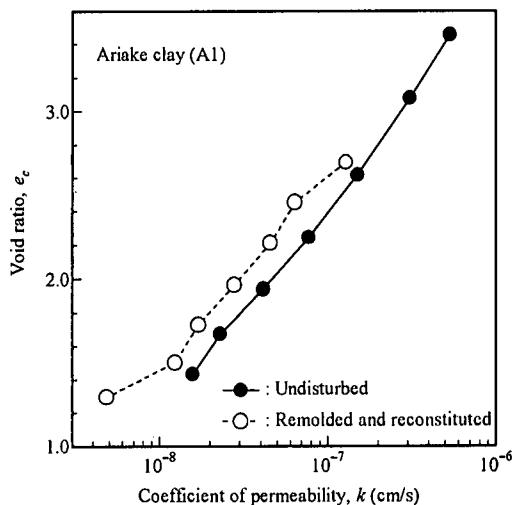


Fig.13 Relationship between e_c and $\log k$ in Ariake clay

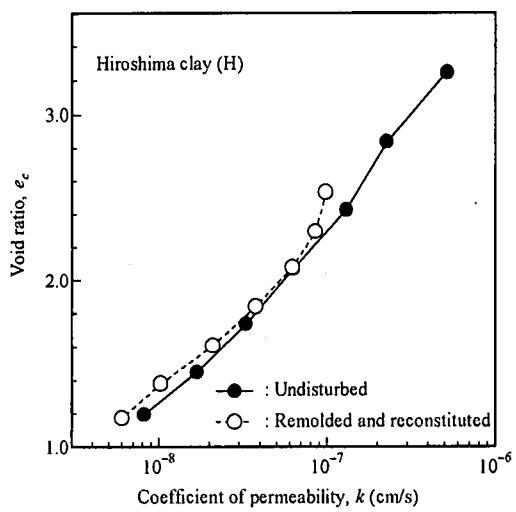


Fig.14 Relationship between e_c and $\log k$ in Hiroshima clay

(3) 透水係数に関する考察

先に述べたように、Lapierreら⁹は、一次元圧縮過程におけるLouiseville clay（海成粘土）の乱さない試料と練返し試料の間隙径分布の測定を行い、間隙量から透水係数を算出して、その実測値と比較した。その結果、両者にはユニークな関係は認められず、粘性土の透水性は間隙径分布特性のみで説明できないことを示した。すなわち、粘性土の透水性には、透水経路の形状や曲がり具合、粘土鉱物、間隙水中のイオン、流れの方向などが要因として含まれるからである。その一方で、Nagarajら¹⁰は、練り返した粘性土と粘性土にセメントを混合した材料の透水係数が、同一間隙比において同じオーダーを示すこ

とに基づいて、セメント改良材の強度発現に関する予測式を導いている。このことから、粘性土の透水係数は、そのマクロな構造特性を表す重要なパラメーターの1つとして考えることができよう。

Fig.13は有明粘土(A1)の乱さない試料と練返し再圧密試料の圧縮過程における間隙比(e_c)と透水係数(k)の関係を、**Fig.14**には広島粘土の e_c と k の関係をそれぞれ示している。透水係数は、標準圧密試験の各載荷終了時において変水位透水試験を実施して求めた。透水試験は、圧密容器とビューレット(50cm³容量)を接続し、脱気水を供試体の下部から通水させて、経過時間とともにビューレット内の水位の変化を測定する方法で行った。

Fig.13および**Fig.14**において、全ての試料の e_c -log k はほぼ直線関係で表され、間隙比の低下にともない透水係数は小さくなることがわかる。また、乱さない試料と練返し再圧密試料の透水係数を同一間隙比で比較すると、両者は同じオーダーを示している。これらのことから、乱さない試料と練返し再圧密試料のマクロ構造は、一次元圧縮過程において類似したパターンで変化していることがうかがえる。

Fig.15は、同一圧密圧力と同一間隙比における有明粘土の乱さない試料と練返し再圧密試料の累積間隙曲線を全間隙量で正規化して表している。圧密圧力が49kPaおよび200kPaにおいて、乱さない試料の累積間隙曲線は練返し再圧密試料より右側に位置し、圧密圧力の増加にともなって練返し再圧密試料の間隙径分布に近づいてくる。これは、先に示した**Fig.9(a),(b)**の間隙容積の変化でも明らかのように、乱さない試料が練返し再圧密試料よりも大きな間隙で支配された構造を有しているにも関わらず、圧縮力に対して練返し再圧密試料と同じ抵抗力を發揮していることを意味する。また、間隙比2.4における両試料の累積間隙曲線はほぼ一致し、乱さない試料と練返し再圧密試料の間隙径分布は同じであることがわかる。

Fig.16には、広島粘土の間隙比がほぼ等しい($e_c=2.4$ と2.3および1.8)乱さない試料と練返し再圧密試料の全間隙量で正規化した累積間隙曲線を示しているが、有明粘土と同様に、同一間隙比における乱さない試料と練返し再圧密試料は同じ累積間隙曲線で示される。

(4) 集合体間のセメンテーションについて

以上に述べたように、乱さない試料と練返し再圧密試料の間隙径分布の間には、大きな間隙径の量的な違いはあるものの、小さな間隙径分布においては顕著な違いは認められなかった。一方、有明粘土と

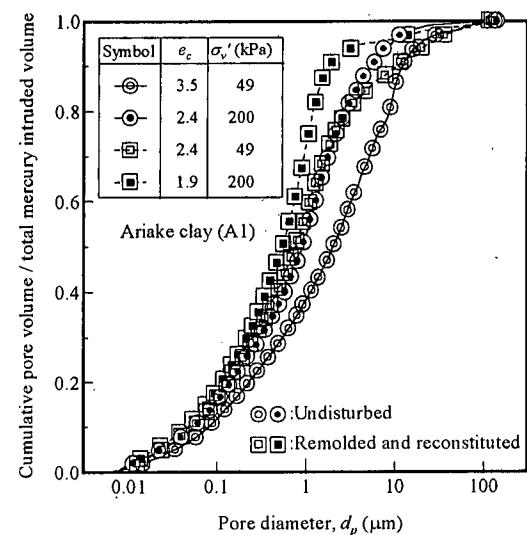


Fig.15 Pore size distribution of undisturbed, remolded and reconstituted samples in Ariake clay.

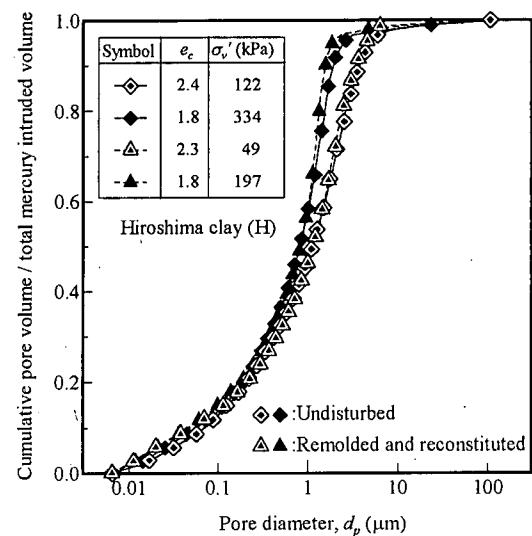


Fig.16 Pore size distribution of undisturbed, remolded and reconstituted samples in Hiroshima clay

広島粘土はともに、乱さない試料の e_c -log σ'_v 曲線と練返し再圧密試料の同曲線との間には明らかな違いが認められる。練返しによって生じる2つの e_c -log σ'_v 曲線の開きは、いわゆるセメンテーションによる効果として説明されている¹⁸⁾。粘土には、堆積過程の物理的、化学的、物理化学的变化によって、土粒子間にシリカ、鉄、アルミニウムの水酸化物、有機物、各種炭酸塩などのセメンテーション物質が発達するといわれている¹⁹⁾。このことから、本実験に用いた有明粘土および広島粘土においては、マクロポアや

メゾポアが土粒子の集合体によって構成され、乱さない試料の場合には、集合体間にセメントーション物質が発達しているような構造を有していると推定される。

鬼塚と根上⁸⁾は、有明粘土の微視的構造の変化をリンクの切断・破壊によって説明している。著者は、高い圧密圧力下においても乱さない試料と練返し再圧密試料の $e_c - \log \sigma_v$ 曲線に開きが認められることから、セメントーションによる効果は圧密圧力が増加しても保たれ、土構造に大きく寄与しているものと考える。また有明粘土と広島粘土の違いは、自然堆積状態における間隙比の大きさにあり、後者より高位の構造を有する有明粘土では、集合体間に働くセメントーション作用が強く、有明海特有の堆積環境に起因して形成された高間隙比状態が土被り圧の作用に抵抗して保たれたものと推測される。

セメントーション物質の生成のメカニズムについては未だ明らかにされていないが、一つの可能性として、堆積環境の変化の中で生じる海成粘土中の貝殻が溶解し、遊離したカルシウムイオンがセメントーションをもたらす^{20),21)}、ということが考えられ、現在検討中である。

5. 結論

本論文は、海成粘土の圧縮特性、膨張特性を考察するために、有明粘土と広島粘土を対象として、一次元圧縮・膨張過程における間隙径分布の変化を定量的に表し、構造特性について議論した。得られた知見を要約すると以下のとおりである。

(1) 2つの海成粘土について、間隙比と水銀圧入型ポロシメーターで算出した間隙比との間の相関性が高いことを確認し、間隙径分布の測定は海成粘土の圧縮・膨張特性を明らかにする実験手法として有用であることを示した。

(2) 実験試料の初期間隙状態において、メゾポア以上の間隙が全間隙量のおよそ60%以上を占めていることから、海成粘土は1μm径以上の大きな間隙で支配された構造を有していることを示した。また試料の乱れや応力解放は10μm径より大きなマクロポアの間隙量に影響を与えていていることを明らかにした。

(3) 正規圧密領域における間隙径分布の変化は、主として0.1~1μm径のメゾポアの間隙が関わっていること、膨張領域においてはメゾポア以上の間隙が関与していることを明らかにした。

(4) マクロポアとメゾポアは集合体の間に存在する間隙で、0.01~0.1μm径のミクロポア以下が集合

体内部の間隙であることを示した。また、ミクロポア以下の間隙径分布は練返しの影響を受けず、本実験の圧力レベル下での圧縮・膨張過程においてあまり変化しないことを示した。

(5) 同一間隙比において、乱さない試料と練返し再圧密試料の透水係数および間隙径分布はほぼ一致することを示した。このことから、海成粘土は大きな間隙が集合体によって構成され、集合体間にセメントーション物質が発達しているような構造を有していると考えた。またセメントーションの効果は1,500kPa程度の圧密圧力下においても保たれ、土構造に寄与していることを示唆した。

(6) 有明粘土と広島粘土の違いはメゾポア以上の間隙量の差によるものであり、高位構造を有する有明粘土は集合体間に働くセメントーションが後者よりも大きいことに起因することを指摘した。

謝辞：本論文を作成するにあたり、Indian Institute of ScienceのT. S. Nagaraj教授には適切な御意見、御助言を賜った。また九州工業技術研究所の井上耕三氏には水銀圧入型ポロシメーターに関する実験上の便宜と御指導を受け、実験に用いた広島粘土は(株)復建調査設計の田尻宣夫氏の御好意で入手できたものである。実験結果の一部は、本学卒業生の山岡博氏(現(株)ダイヤコンサルタント)の協力によって得られた。お世話になった上記の方々に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 三浦哲彦、赤峰剛徳、下山正一：有明粘土層の堆積環境とその鋭敏性について、土木学会論文集、No.541/III-35, pp.119-131, 1996.
- 2) 土壌物理研究会編：土の物理学－土質工学の基礎－、森北出版、pp.121-146, 1979.
- 3) Ahmed, S., Lovell, C. W. and Diamond, S. : Pore size and strength of compacted clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, pp.407-425, 1974.
- 4) Delage, P. and Lefebvre, G. : Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.21, pp.21-35, 1984
- 5) Lapierre, C., Leroueil, S. and Locat, J. : Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.761-773, 1990.
- 6) 山口晴幸：不搅乱泥炭の等方圧密及び排水せん断過程での間隙径分布の変化、土木学会論文集、No.488/III-19, pp.1-8, 1992.
- 7) 立石義孝：珪藻土の工学的特性と切土斜面表層の安

- 定に関する研究, 佐賀大学工学系研究科博士論文, 1997.
- 8) 鬼塚克忠, 根上武仁: 有明粘土の乱さない試料および再圧密試料の微視的構造変化, 土と基礎, Vol.46, No.4, pp.17-20, 1998.
 - 9) Yamadera, A., Nagaraj, T. S. and Miura, N. : Prediction of strength development in cement stabilized marine clay, *Improvement of Soft Ground, Design, Analysis and Current Research, Institute of Lowland Technology and Asian Center for Soil Improvement and Geosynthetics*, pp.108-124, 1997.
 - 10) 三笠正人: 土の力学における構造の概念の意義について, 土木学会第17回年次学術講演会, pp.35-38, 1962.
 - 11) 土田孝: 初期間隙比の異なる粘性土の圧縮特性の統一的表現, 土木学会第48回年次学術講演会, pp.992-993, 1993.
 - 12) 加藤舜朗: 食品冷凍の理論と応用, 光琳書院, pp.945-960, 1972.
 - 13) 高野玉吉, 唯野哲男: 食品工業の乾燥, 光琳書院, pp.223-279, 1975.
 - 14) Washburn, E. W. : Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous material, *Proceedings, National Academy of Science*, Vol. 7, pp.115-116, 1921.
 - 15) 山口晴幸, 池永均: 土構造評価への水銀圧入型ポロシメーター装置の利用, 土と基礎, Vol.41, No.4, pp.15-20, 1993.
 - 16) 松尾新一郎, 嘉門雅史: 粘土の構造に関する用語について, 土と基礎, Vol.24, No.1, pp.59-64, 1976.
 - 17) Nagaraj, T. S., Yaligar, P. P., Miura, N. and Yamadera, A. : Prediction strength development by cement admixture based on water content, *Proceedings of the International Conference on Grouting and Deep Mixing*, Vol.1, pp.431-436, 1996.
 - 18) Nagaraj, T. S., Srinivasa Murthy, B. R. and Vatsala, A. : Analysis and prediction of soil behaviour, *Wiley Eastern Limited*, pp.181-207, 1994.
 - 19) 陶野郁雄: コウ結作用, 土と基礎, Vol.22, No.5, p.24, 1974.
 - 20) 日野剛徳: 有明粘土の堆積環境と高鋭敏性・高圧縮性に関する研究, 佐賀大学工学系研究科博士論文, 1997.
 - 21) 中村六史, 三浦哲彦, 松田応作: 有明粘土に対する地盤改良材の適用上の問題と改良地盤についての現地調査, 土と基礎, Vol.35, No.3, pp.9-14, 1987.

(1998. 7. 2 受付)

CONSIDERATION ON COMPRESSION PROPERTIES OF MARINE CLAY BASED ON THE PORE SIZE DISTRIBUTION MEASUREMENT

Norihiko MIURA, Akira YAMADERA and Takenori HINO

This paper discusses compression and rebound characteristics of two kinds of marine clays, based on the measurement of pore size distribution under one-dimensional compression and rebound processes by using a mercury intrusion porosimeter.

It is found that the characteristics of rebounding due to stress release and reloading processes are mainly associated with the macro pores and the mezzo pores of larger than 1 μm of diameter. The normally consolidation processes are associated with the decrease of mezzo pores of which size are between 1 μm and 10 μm . High void ratio and high compressibility of Ariake clay are also discussed from a viewpoint of inter-aggregate cementation.