

SEM 画像解析による海成粘土の構造の定量評価
Quantitative Evaluation of Marine Clay due to SEM Image Analysis

平本 真也 Sinya HIRAMOTO (岡山県)
土田 孝 Takashi TSUTIDA (広島大学大学院)
今井 遥平 Yohei IMAI (広島大学大学院)

我々が生活する地域の地盤の多くは、海底や湖底の環境で形成されたものであり、数千年から数十万年の年月を経ているとされている。この堆積過程においては水の流れや波浪の作用、生物遺骸の沈殿などさまざまな物理化学・生物学的要因、つまり年代効果の影響を受けていると考えられる。

本研究においては、年代効果のうち特にセメンテーションの部分に着目し、セメンテーションが固化作用であるという観点から、粘土にセメントを添加し载荷パターンを種々設定した圧密試験を行うことにより、比較的短期間で粘土にセメンテーションを発現させると共に、その発現メカニズムについて SEM 画像を解析することによって考察した。

キーワード：年代効果、セメンテーション、海成粘土、SEM (IG : B06, D03, E02)

1. はじめに

長い地質学的な年代を経て堆積した自然の海底地盤では、その強度や圧密・圧縮特性は、圧密時の有効応力のほか土の物理化学的性質や堆積過程の環境によっても大きく影響を受けることがわかっている。これらの影響は、主に有効応力一定のもとでの長期的な沈下である二次圧縮と、間隙比と無関係に強度が発現するセメンテーション効果とに分けられ、両者は年代効果と総称される。近年、沿岸域における埋め立て事業の大規模化によって従来は沈下問題の対象ではなかった深部の洪積粘土の強度・変形特性の評価が問題になっているが、このような大深度の粘土地盤は数万年から数十万年前に堆積しているため年代効果の影響が工学的にも無視できないものとなっている。

セメンテーション構造を持つ地盤の代表的な例として大阪湾自然粘土が挙げられる。図-1 は、大阪湾泉南沖の沖積粘土試料(以下、大阪湾粘土)を圧密試験したときの e - $\log p$ 曲線である¹⁾。図-1 のように圧密圧力が圧密降伏応力を越えるときに大きな圧縮性を示し、その後 e - $\log p$ 関係の勾配は小さくなって最終的に再構成試料と同じ圧縮曲線に戻っている。図-1 より得られた圧縮指数 C_c の変化を図-2 に示す。年代効果を受けた粘土は前にも述べたとおり圧密降伏応力以降に大きな圧縮性を示すことから、図-2 のように C_c にピークが表れ、一方、再構成した粘土では正規圧密領域における圧縮指数のピークがみられずほぼ一定となっている。このように自然粘土と再構成粘土の力学特性には明瞭な違いが見られるが、粘土地盤の研究の多くが年代効果の無い再構成粘土を用いて行われているのが実情であり、自然粘土の年代効果を再現する技術が必要であると考えられる。また、自然粘土と再構成粘土の力学特性の違いは粘土の微視的な構造の違いが反映されてい

ると考えられるが、粘土の場合、微視的構造を定量的に評価して力学特性と関連づける具体的な手法は提案されていない。

筆者らは、少量の普通ポルトランドセメントを添加した再構成粘土によって、自然粘土の力学特性を再現することができることを明らかにしてきた。本研究は、セメントを添加した再圧密試料を用いて圧密試験から力学特性を求

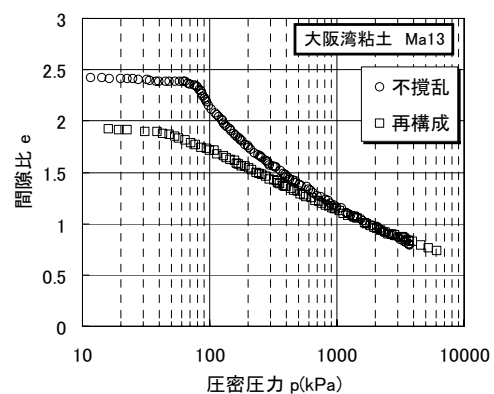


図-1 大阪湾沖積粘土の e - $\log p$ 曲線

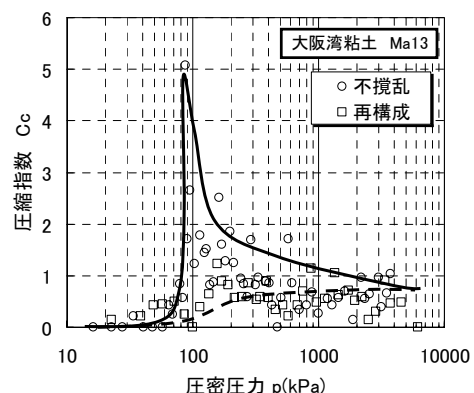


図-2 大阪湾沖積粘土の圧縮指数 C_c

め、水銀圧入ポロシメータ試験と走査型電子顕微鏡(SEM)での観察から微視的な構造を調べて両者の関連性について検討を行った。

2. 実験に用いた粘土とセメント添加量

粘土の乾燥重量に対するセメント添加量 $C(\%)$ と一軸圧縮強度 q_u の関係は多くの海成粘土で次式のように表すことができる。

$$q_u = k(C - C_0) \quad (1)$$

ここに C_0 は強度発現に必要な最小セメント量($\%$)であり、 k は比例定数である。セメンテーション構造を再現するために添加するセメント量は、通常のセメント処理土より少量である必要があり、平原らは直線近似線が示す一軸圧縮強度が発現するセメント添加率 C_0 よりも1.65%低い添加率としたときに、自然粘土の圧縮特性、せん断特性が再現できることを報告している³⁾。関西国際空港が建設されている大阪湾粘土、福山港粘土、広島港出島粘土について、物理特性を表-1に、養生日数7日における一軸圧縮強度について直線近似し、 k と C_0 を求めた結果を表-2に示す。なお、粘土の初期含水比は、海底地盤が堆積するときの初期含水比と考えられる $1.5w_L$ とした。

必要最低セメント添加率 C_0 は、大阪湾粘土 $\approx 3\%$ 、福山港粘土08(2008年) $\approx 5\%$ 、福山粘土07(2007年) $\approx 6\%$ 、出島粘土 $\approx 7\%$ であった。また、式(1)に示す k について試料ごとに比較すると、3つの試料ともほぼ同じ値を示した。表-2より、大阪湾粘土が他の海成粘土に比べて C_0 が非常に小さいことがわかる。このように粘土の種類による C_0 の相違については今後さらに検討する必要がある。

表-1 各粘土のコンシステンシー特性

	$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	I_P	$\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$
大阪湾粘土	83.3	34.5	48.8	2.62
福山粘土07	99.0	45.0	54.0	2.69
福山粘土08	97.6	33.8	63.77	2.69
出島粘土	97.1	40.7	56.4	2.65
羽田粘土	113.2	49.6	63.6	2.66

そこで実際のセメント添加率 C から最小セメント添加率 C_0 を引いた値 $(C - C_0)$ を有効セメント量とし養生7日後の $(C - C_0)$ と一軸圧縮強度の関係をまとめると図-3のようになった。図-3のように、4つの粘土の違いはあまりみられず、ほぼ同様の関係が得られている。図-4は10kPa以下のわずかなせん断強度が発現し始めるときの有効セメント添加率と一軸圧縮強度の関係を示した。図-4よりいずれの粘土でも一軸圧縮強度の発現し始める有効セメント添加率は $C - C_0 = -2 \sim -1\%$ であることが分かる。今回は大阪湾粘土と福山港粘土08(以下、福山粘土)についてセメント添加再圧密試料を作成したが、添加率としては

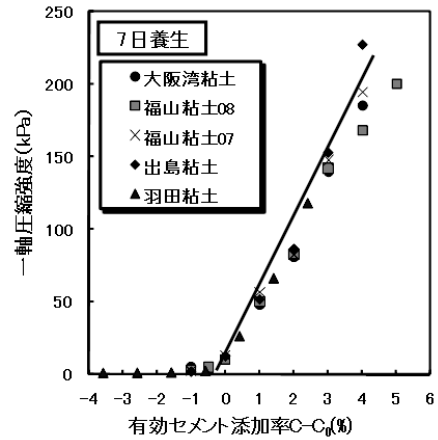


図-3 $C - C_0$ と一軸強度の関係

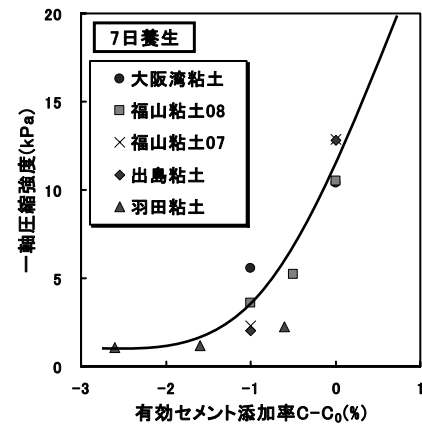


図-4 $C - C_0$ と一軸強度の関係(拡大)

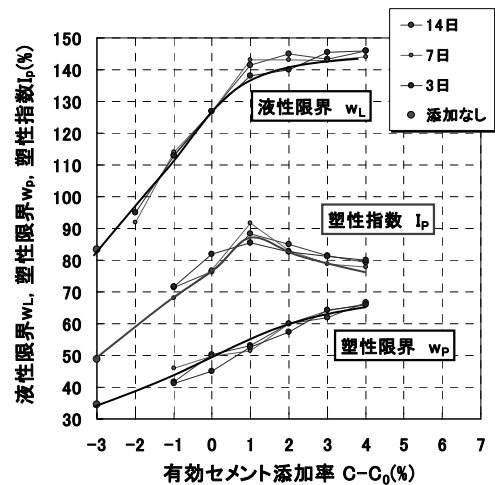


図-5 セメントを添加した試料のコンシステンシー

表-2 各粘土の係数

試料名	養生日数(日)	k	C_0
大阪湾粘土	7	47.1	2.90
福山粘土07	7	47.9	5.99
福山粘土08	7	33.9	4.99
出島粘土	7	59.3	7.00
羽田粘土	7	45.9	7.47

$C-C_0=-2\%$ で実験を行うこととした。したがって、福山粘土では乾燥重量比 3.0%、大阪湾粘土は乾燥重量比 1.0%である。

図-5 にセメントを添加した試料のコンシステンシー試験を示す。図-5 よりセメント添加率が高くなると液性限界はある一定の値まで上昇し、塑性限界は上昇している。これは、粘土にセメントを添加することで、粘土粒子の周りにセメント粒子が接着され粘土本来の性質が変わったことが原因であると考えられる。

3. 少量のセメントを添加した試料の圧縮特性

3.1 試料作成方法

セメント添加試料の作成は以下の手順で行った。

- (1)含水比 110 ~ 120(%)の粘土スラリーと練り混ぜに使用する蒸留水を 0°C程度に冷やす。
- (2)蒸留水に溶かしたセメントミルクを粘土に混ぜハンドミキサーで 2 分間練り混ぜる。この時、初期含水比を液性限界の 1.5 倍となるように調整する。これは、地盤堆積時の自然海底地盤の表層付近の含水比が液性限界の 1.5 ~ 2.0 倍の含水比であるからである。なお、セメントミルクはセメント : 水 = 1 : 1 としている。
- (3)真空ミキサーで 30 分間練り混ぜる。この時、温度が上昇しないように真空ミキサーの容器全体を氷と水が入った水槽の中に入れて練り混ぜを行う。
- (4)予備圧密容器に入れ、室温(20 度)で予備圧密を開始。
- (5)予備圧密の段階は荷重増加率を一定にして段階的に最終圧密圧力(福山粘土は 49kPa と 196kPa、大阪湾粘土は 49kPa と 490kPa)まで圧密をしており、最終段階での圧密終了が確認された時点からを養生日数と定め養生した。なお、各段階での圧密時間終了の判断は、最終圧密圧力までは \sqrt{t} 法で判断し、最終圧密圧力では 3t 法で一次圧密終了を判断している。養生日数は 3, 7, 14 日としている。

所定の養生期間が経過した後、試料を取り出し定率ひずみ圧密試験(ひずみ速度 0.2(%/min))を実施した。

3.2 セメントを添加した試料の圧密試験結果

図-6 に福山粘土(08)、 $C-C_0=-2\%$ ($C=3\%$ 、粘土スラリー 10あたり 16.3g)の $e-\log p$ 曲線、図-7 に圧縮指数 C_c の変化を、図-8 に大阪湾粘土 $C-C_0=-2\%$ ($C=1\%$ 、粘土スラリー 10あたり 6.2g)の $e-\log p$ 曲線、図-9 に圧縮指数 C_c の変化を示す。

図-6 より、セメントを $C-C_0=-2\%$ 添加した試料は P_c が大きく、 $e-\log p$ 曲線の形状が下に凸の曲線となっており、セメンテーション構造をもつ自然粘土の圧縮特性をよく再現できていると考えられる。しかし、セメントを添加した試料はセメンテーション構造破壊後に構造のない粘土の $e-\log p$ 曲線に回帰する自然粘土の特性とは異なり、固化構造が破壊された後も固化の影響が残り、セメントを添加

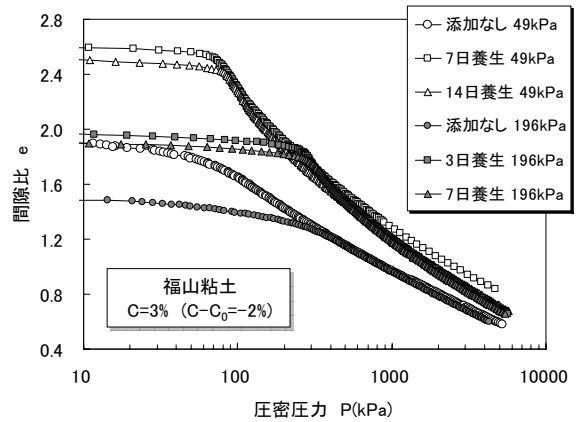


図-6 福山粘土 $e-\log p$ ($C=3\%$ $C-C_0=-2\%$)

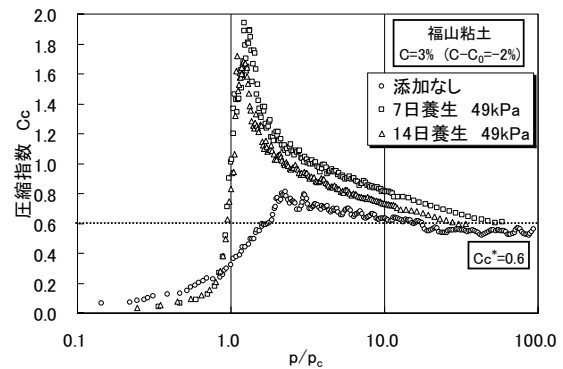


図-7 福山粘土 C_c ($C=3\%$ $C-C_0=-2\%$)

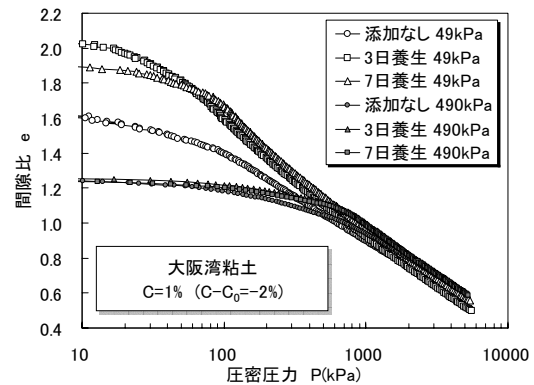


図-8 大阪湾粘土 $e-\log p$ ($C=1\%$ $C-C_0=-2\%$)

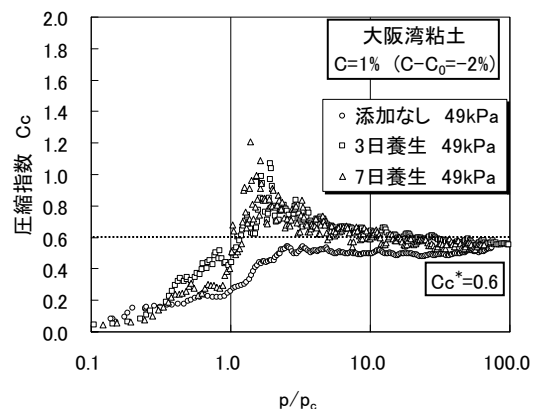


図-9 大阪湾粘土 C_c ($C=1\%$ $C-C_0=-2\%$)

していない試料のe-logp曲線に収束していない。図-7より、Ccでみると、年代効果を持つ不攪乱粘土と同様Ccにピークを示していることがわかる。

図-8より大阪湾粘土にC-C0=-2%添加した試料はセメントを添加した試料のe-logp曲線はセメントを添加していないものに収束している。また、図-9よりCcは僅かであるがピークを示していることがわかる。

ここで、圧密降伏応力直後の圧縮性を定量的に調べるために年代効果が正規圧密領域の圧縮指数に与える影響をあらわすため次式で定義する圧縮指数比rcを求めた。

$$r_c = C_{c_{max}} / C_c^* \quad (2)$$

ここにCcmaxは図-7,9における圧縮指数の最大値であり、Cc*は圧密圧力が十分に大きくCcがほぼ一定になったときのCcの値である。土田らは、海成粘土試料の圧密試験結果をまとめた結果、rcの範囲を以下のように報告している。

$$r_c = 1.0 \sim 1.2 \quad (\text{室内再調整粘土})$$

$$r_c = 1.2 \sim 3.0 \quad (\text{年代効果を有する粘土})$$

表-3にrcを示すが、今回用いた大阪湾粘土、福山粘土の場合、(C-C0)=-2%とすると、圧縮指数比は年代効果を持つ自然地盤と同程度の値を示している。

次に、セメントを添加し養生修了後の試料の液性限界を表-4に示す。セメントをC-C0=-2%添加した試料は大阪湾粘土、福山粘土ともに増加した。このように、セメントを添加することで液性限界は増加したため、e-logp曲線を液性限界で正規化する手法として、土田が提案している体積比指数Isvを用いた。体積比指数は液性限界時の間隙比eLを用い以下の式(3)で計算する。

$$I_{sv} = \frac{\ln f}{\ln f_L} = \frac{\ln(1+e)}{\ln(1+e_L)} \quad (3)$$

図-10に体積比指数Isvと圧密圧力の関係を示す。図-10より、セメントを添加した試料の圧密圧力と体積比指数lnf/lnfLの関係はセメントを添加しないときのIsvと圧密圧力の関係に収束するまでには至っていないが、補正する前よりは収束に近づいたといえる。

4. 少量のセメントを添加した試料の微視的構造

4.1 試料作成方法と試験方法

セメントを添加した試料の微視的構造について、水銀圧入ポロシメータ試験から間隙径を測定し、走査型電子顕微鏡(SEM)での観察・画像解析から構造の評価を行った。ポロシメータ試験、SEM観察に用いた供試体は3.1の手順で予備圧密・養生を行った試料を乾燥収縮が少ない凍結乾燥法(フリーズドライ)³⁾により、骨格構造を破壊することなく乾燥させた。

表-3 セメントを添加した試料の圧縮指数比rc

C-C0	養生日数(日)	圧縮指数比 rc	
		福山粘土	大阪湾粘土
無添加	-	1.30	1.02
-2	3	3.07	1.88
-2	7	3.20	1.88

表-4 セメントを添加した試料の液性限界wL

	C-C0	養生日数(日)	液性限界 wL
福山粘土	無添加	-	97.6
	-2	3	115.4
	-2	7	115.2
大阪湾粘土	無添加	-	83.3
	-2	3	90.9
	-2	7	90.0

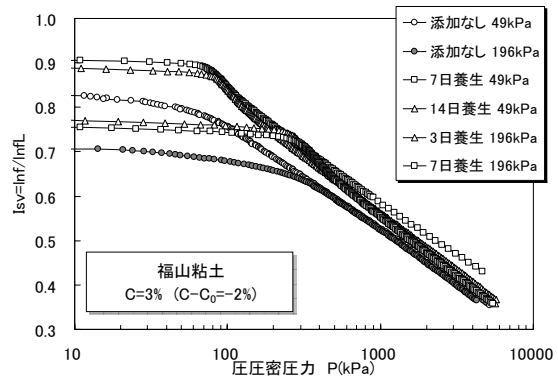


図-10 福山粘土(C-C0=-2%)液性限界での補正

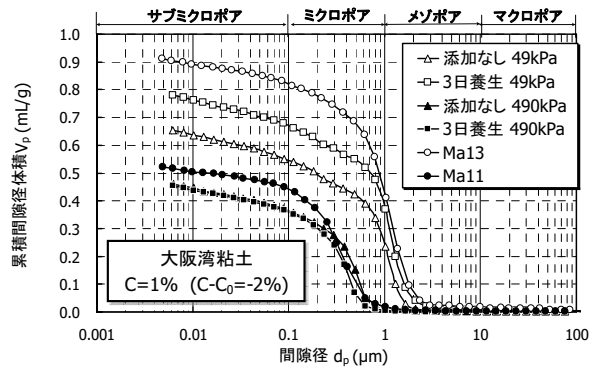


図-11 セメントを添加した試料の累計間隙体積曲線

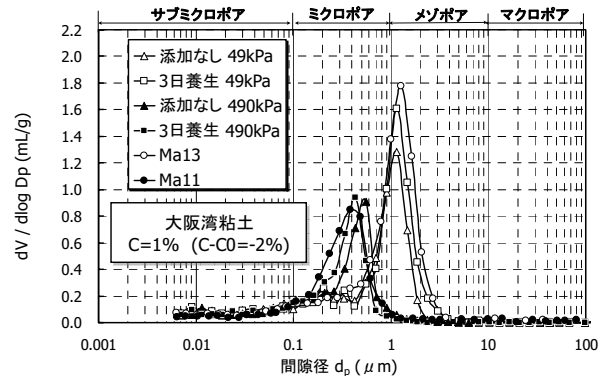


図-12 セメントを添加した試料の間隙径分布曲線

4.2 水銀圧入ポロシメータ試験結果

図-11 に大阪湾粘土にセメントを $C-C_0=2\%$ 添加した試料と大阪湾不攪乱粘土(以下, Ma13, Ma11)の累計間隙径曲線, 図-12 に間隙分布曲線を示す. また, 図-13 に Ma13, と大阪湾セメント添加粘土の各間隙径における間隙体積を示した.

図-12 より, Ma13 はメゾポアとマイクロポアが主な間隙径であり, Ma11 はマイクロポアが主な間隙径であることが分かる. Ma13 と再構成試料(セメント添加無し)の結果を間隙径分布曲線で比べてみると, 間隙径のピークである $d_{p,peak}$ は不攪乱試料の方が大きくなり, メゾポアの大きさの間隙径が再構成粘土より多いことが特徴であるといえる. Ma11 についても, マイクロポアに相当する間隙径が再構成粘土と比べて多くなっている. またサブマイクロポアの大きさの間隙径のものは, 土被り圧が変化しても変化せず一定である.

図-13 をみると, Ma13 の土被り圧に対応する 49kPa の試料は, $C-C_0=2\%$ ($C=1\%$) のセメントを添加することで累計間隙径が大きくなっている. また, 間隙径分布曲線では $1\sim 2\mu\text{m}$ のメゾポアが多くなっており, 累計間隙径では Ma13 のものと比較すると小さいものの, $C-C_0=2\%$ のセメントを添加することでセメンテーション構造を持つ粘土の間隙分布をよく再現できていると考えられる. しかし, 490kPa で予備圧密した試料のポロシメータ試験結果を見てみると, 最大累計間隙径体積が同程度で違いが見られず, Ma11 をほとんど再現できていない. この原因としては $C-C_0=2\%$ のセメント添加率で強度発現が生じるも, 高压

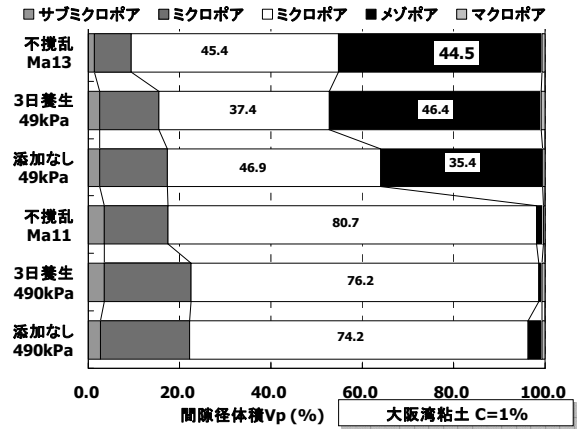


図-13 各間隙径における間隙径体積

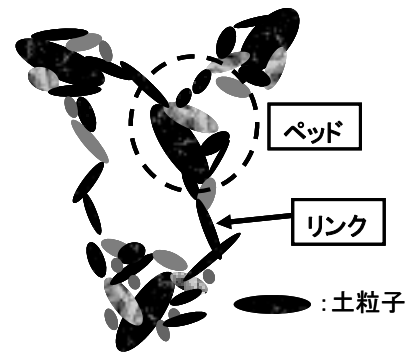


図-14 ベッド構造とリンク構造

で予備圧密するにはセメントの絶対量が少ないため, 490kPa ほどの予備圧密圧力では形成されていた不完全な

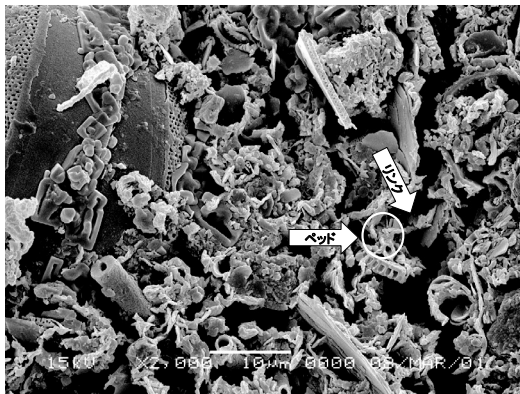
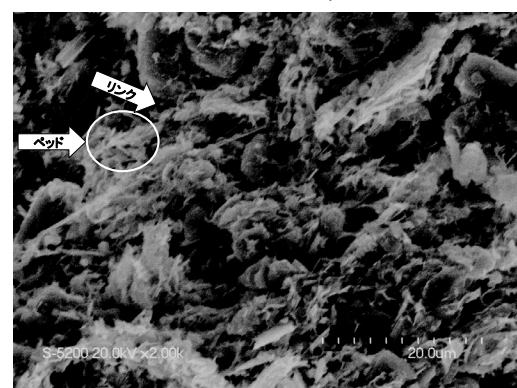
写真-1 Ma13 不攪乱⁴⁾ 2,000 倍写真-2 Ma13 再構成⁴⁾ 2,000 倍写真-3 大阪湾粘土 $C-C_0=2\%$ 2,000 倍

写真-4 大阪湾粘土 添加なし 2,000 倍

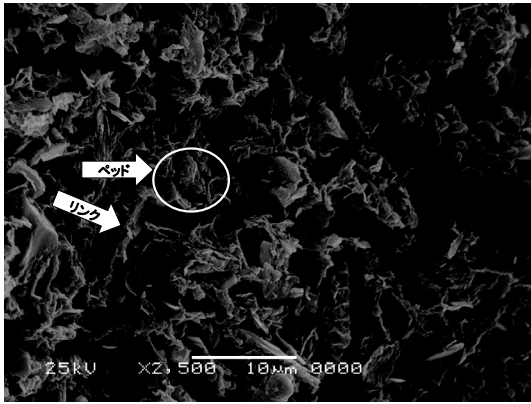


写真-5 福山粘土 C-C₀=2% 2,500倍

構造が壊されてしまうためであると推測される。

以上より、粘土にセメントを添加することにより、ポロシメータによる間隙径分布の観点からメゾポアが多いという自然粘土の間隙径分布を再現できたと考えられる。

4.3 走査型電子顕微鏡(SEM) 観察結果

土骨格は一般に、図-14のような土粒子の集合を表したベッド構造と、ベッド構造をつなぐ役割のリンク構造で成る。写真-1、写真-2に大向⁴⁾によって撮影されたMa13不攪乱、Ma13再構成のSEM観察画像を示す。全ての写真は上下方向が堆積方面で、下方から上方にかけて堆積している。また、写真-3、写真-4に49kPaで予備圧密を行った大阪湾粘土にセメントを添加した試料と添加していない試料、写真-5、写真-6に49kPaで予備圧密を行った福山粘土にセメントを添加した試料と添加していない試料のSEM撮影画像を示す。

写真-1、写真-2より、Ma13は土粒子のベッドが相互にリンクしていることが観察されている。また、不攪乱試料、再構成試料ともに数 μm 程度のベッドが確認されている。間隙に関しては不攪乱試料には $1\mu\text{m}$ 以上のメゾポアが多く確認されているが、再構成粘土には少ない。また、不攪乱試料、再構成試料ともにベッド間の間隙の大きさはマイクロポア($0.01\sim 1\mu\text{m}$)に相当するとされている。写真-3、写真-4、写真-5、写真-6より、49kPaで予備圧密した試料は概ね $0.5\sim 10\mu\text{m}$ のメゾポア、マイクロポアに相当する間隙径が主体であることが読み取れる。また、粒子構造に着目してみると、土粒子のベッドが相互にリンクしていることが分かる。また、セメントを添加していないものよりC-C₀=2%のセメントを添加した試料の方が間隙は大きくなり、ベッドとリンクがより明瞭に観察され、セメントを添加した試料とMa13は間隙径、構造ともによく似た画像となっていることが分かる。

4.4 SEM画像解析

森脇らは、撮影した試料の断面のSEM画像に数本ランダムな直線を選び、線分上の写真の濃度分布を計測した後、それをスペクトル解析し、卓越する波長から代表的粒徑を算出することによって粒子構造の違いを定量的に比較し

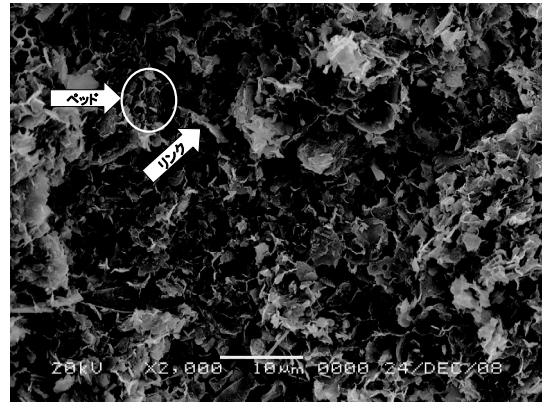


写真-6 福山粘土 添加なし 2,500倍

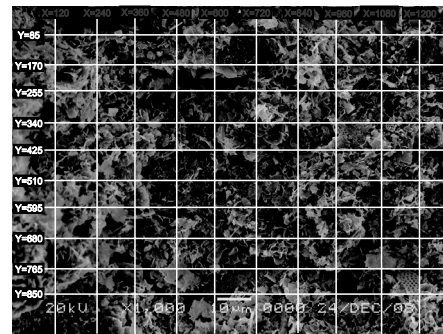


図-15 読み取り線の例

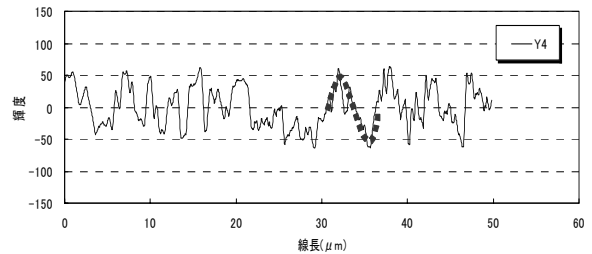


図-16 線長と輝度の関係

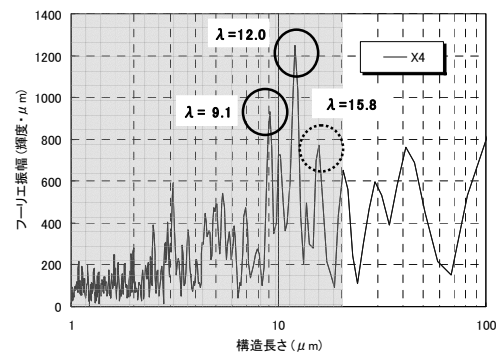


図-17 構造長さとフーリエ振幅の関係

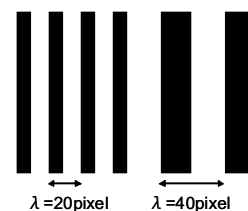


図-18 20pixel と 40pixel 間隔の縞模様

た⁴⁾。本研究では森脇らの方法に類似した方法で、粒子構造を明らかにすることを試みている。以下に画像解析方法を示す。

- (1) SEM 画像を取り込み、X 方向、Y 方向等間隔に 10 本ずつ直線を引き、その直線上の色の輝度を読み取る。図-15 に読み取る線の引き方の例、図-16 に読み取った輝度の例を示す。
- (2) 図-16 に示したような濃度分布を一種の波とみなしてスペクトル解析を行った。図-16 に示した点線をひとつの波形とみなし、これを構造長さとする。
- (3) 図-16 をフーリエ変換した結果得られるスペクトルを図-17 に示す。このスペクトル図から構造長さを次のように読み取る。
 - ① 代表構造長さはフーリエ振幅が大きいものから3つ採用する。
 - ② 構造長さは $\lambda=1\sim 20\mu\text{m}$ のものから選ぶ。
 - ③ フーリエ振幅が最大のものより3分の2以下のものは採用しない。
 - ④ 卓越するフーリエ振幅が隣り合い、かつその間に大きいフーリエ振幅の半分以下の谷がない場合、大きい方の構造長さを1つ採用する。

式(4)より「ランダム度」を計算して画像解析結果から構造を比較することとした。

$$\text{ランダム度} \quad R = \frac{\sum \lambda_x / N_x}{\sum \lambda_y / N_y} \quad (4)$$

ここで、 λ_x : 縦線(X線)から読み取った構造長さ、 λ_y : 横線(Y線)等読み取った構造長さ、 N_x : 縦線(X線)から読み取った構造長さの数、 N_y : 横線(Y線)から読み取った構造長さの数である。ランダム度が大きいほどゼメンテーション構造が形成されていると考えられる。

4.5 解析精度

森脇らは濃度分布を計測するにあたって、画像ソフトウェアを用いている⁴⁾が、本研究ではVisual Basic 6.0を用いて自らプログラムを組んで計測を行った。また、フーリエ変換はFortranを用いて解析した。ゆえに解析精度を確認する必要がある。簡単なモデルとして、図-18に示す波長20pixelと40pixelの縞模様には、縞模様と垂直に直線を引き濃度を読み取り、フーリエ変換を行った。縞模様は粒径と間隙が同じ大きさであると仮定し、山と谷を同じ大きさのものとしている。濃度分布を図-19、波長とフーリエ振幅の関係を図-20に示す。図-19では黒い部分の輝度が255で出力され、白い部分の輝度は0で出力されたものをフーリエ変換しやすいうように平均で引いたものを表している。これは明らかにモデル画像の濃度分布を計測できていることが分かる。また、図-20はフーリエ変換した結果である。これからは、波長20pixelと40pixelでピークが確認され、縞模様を読み取れていることが確認された。

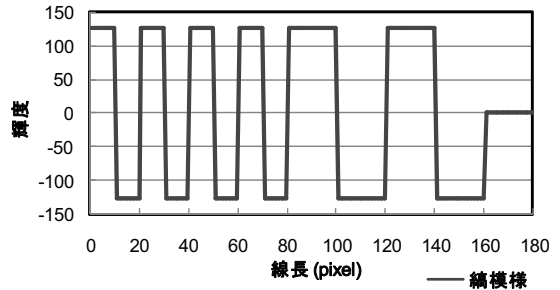


図-19 縞模様の濃度分布

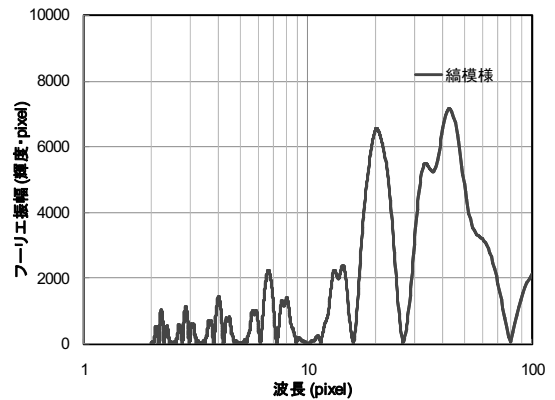


図-20 縞模様の濃度スペクトル図

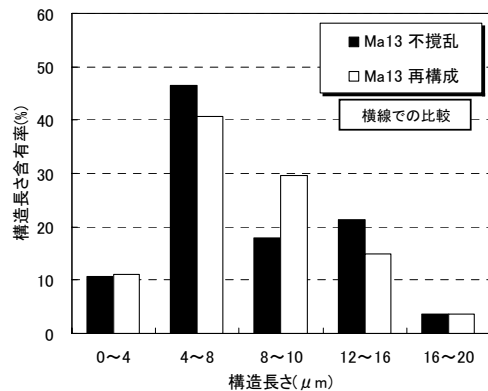


図-21 構造長さのヒストグラム(縦線)

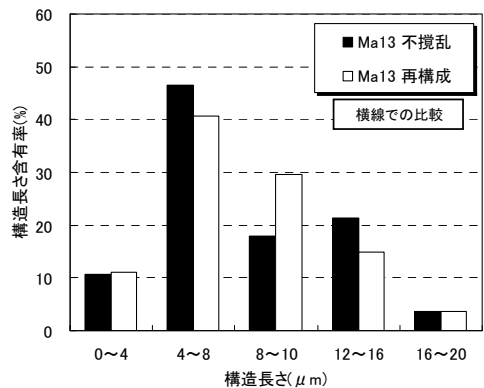


図-22 構造長さのヒストグラム(横線)

4.6 解析結果

図-21, 図-22に Ma13 不攪乱(写真-1), Ma13 再構成(写真-2)から求めた構造長さについてまとめたヒストグラムを示す. 図-21, 図-22より, 横線にはそれほど違いが見られないが, 縦線は不攪乱試料の構造長さが明らかに大きくなっている. これは, 堆積方向に間隙が大きくなる(=構造が発達している)ことを表している. つまり, セメンテーション構造の特徴をよく表していることが分かる. 図-23, 図-24では今回行った大阪湾セメント添加粘土の構造長さをヒストグラムに表した. これをみると若干ではあるが, セメント添加した試料の縦線の構造長さが大きく現れた. また, 横線はセメント添加することによって短くなっていることから, セメント添加することによって構造が発達していることが分かる.

表-5にそれぞれの画像から得られたランダム度をまとめたものを示す.表-5よりランダム度はセメント添加することにより高い値となっていることが分かる. 以上よりスペクトル解析による画像解析によりセメンテーション構造が評価できる可能性がある. 今回の画像解析結果からは, 粘土にセメントを添加することでセメンテーション構造を再現できている結果となった. しかし, ランダム構造の違いは10%程度であり, それほど明瞭ではない. また, ポロシメータの結果では不攪乱試料において大きな間隙径が卓越したが, 図-23での間隙より求めた構造長さをみると, そのような傾向は表れていない. これらについては, 今後検討する.

5. 結論

- 1) 圧縮特性に関しては $C-C_0=2\%$ のセメントを添加することで, セメンテーション構造を持つ自然粘土の圧縮特性を再現することができたと考えられる.
- 2) 大阪湾粘土に乾燥重量比 1%というわずかな量のセメントを添加することで沖積粘土地盤程度の自然粘土を再現することができた.
- 3) 水銀圧入ポロシメータ試験により, 粘土にセメントを添加することでセメンテーション構造をもつ自然粘土の間隙径の状態を再現できていることが確認できた.
- 4) SEMにより撮影した画像にフーリエ変換を用いたスペクトル解析を行うことにより, セメントを添加した試料は添加していない試料に比べて構造が発達している

表-5 ランダム度のまとめ

試料	圧密圧力(kPa)	$C-C_0$	ランダム度R
福山粘土	49	-2	1.09
		添加なし	0.84
大阪湾粘土	49	-2	1.04
		添加なし	0.96
Ma13		不攪乱試料	1.12
		再構成試料	0.93
Ma11		不攪乱試料	0.90
		再構成試料	0.64

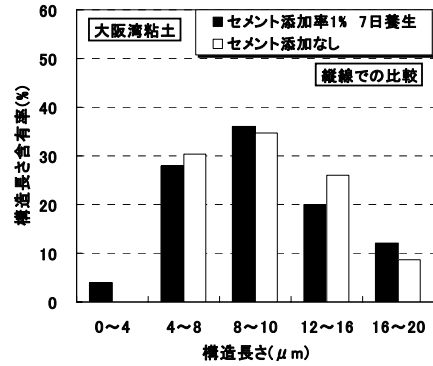


図-23 大阪湾粘土 C=1%構造長さのヒストグラム(縦線)

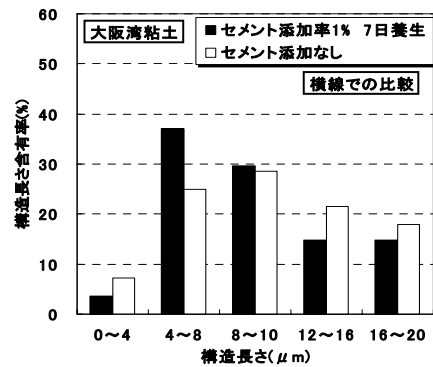


図-24 大阪湾粘土 C=1%構造長さのヒストグラム(横線)

という結果が得られた. この結果より, 今回用いた解析方法で粘土の構造の違いを読み取れる可能性がある.

参考文献

- 1) Tsuchida, T.: Mechanical properties of Pleistocene clay and evaluation of structure due to aging, IS-Yokohama2000, Vol.2, pp.43-83, 2000.
- 2) 土田孝, 平原毅, 竹信正寛: 圧密とセメンテーションが同時に進行するときの粘土の圧縮特性, 地盤と建設, Vol.25, No.1, pp.85-92, 2007.
- 3) 平原毅, 土田孝, 平本真也: 少量のセメントを添加した粘土の圧縮およびせん断特性に関する研究, 地盤と建設, Vol.26, No.1, pp.49-56, 2008.
- 4) 大向直樹: 擬似圧密粘土の圧密特性に関する研究, 横浜国立大学学位請求論文, pp.117-120, 2008.
- 5) 姜敏秀, 渡辺要一, 土田孝: SEM およびポロシメータを利用した土の微視的構造の視察とその評価, 港湾技術研究所資料, No.1032, pp.22 - 23, 2002.
- 6) 森脇武夫, 木下洋樹: 高温条件下での粘土の微視的構造と力学特性, 第47回地盤工学シンポジウム, pp.51 - 59, 2002.
- 7) 土田孝: 海成粘土地盤の自然間隙比と土被り圧の関係に関する統一的な解釈, 地盤工学会論文報告集, Vol.41, No.1, pp.127-143, 2001.

(2009年6月29日 受付)