

## 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

## Study on Reproduction Technique of Aging Effect of Marine Clay by Adding a Little Cement

平原 毅 Tsuyoshi HIRAHARA (株大林組)  
 土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究科)  
 平本 真也 Shinya HIRAMOTO (広島大学大学院工学研究科)

大阪湾沿岸地域に堆積する洪積粘土層は、圧密降伏圧力は有効土被り圧の 1.3~2.5 倍となっているが、これらは年代効果による擬似の過圧密であることが知られている。年代効果が発現する過程は十分解明されていないが、粘土中の炭酸カルシウムなどのセメンテーション物質による固化が堆積中にゆっくりと進行したことが考えられる。本研究は、粘土に少量のポルトランドセメントを添加することによって、自然粘土の堆積過程におけるセメンテーションと同様の効果を実験室で再現することを試みた。その結果、セメント添加量を適切に選択して添加することにより、年代効果を有する不攪乱海成粘土の  $e$ - $\log p$  関係、三軸 CU 試験における応力ひずみ関係と類似した特性を示す再圧密粘土を作成することができたことがわかった。

キーワード：年代効果，セメンテーション，海成粘土，圧密 (IGC : B06, E02, M05)

## 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（遅延圧縮）と、間隙比と無関係に強度が発現するセメンテーション（凝結）効果とに分けられ、両者は年代効果（aging, エージング）と総称される<sup>1),2)</sup>。

筆者ら<sup>3)</sup>は、広島港粘土を用いて、少量のセメントを添加することにより、自然地盤の堆積過程に発現する年代効果を室内において短時間で再現する実験手法を検討した。この結果、セメントを 5.0% 添加して一定の圧密圧力のもとで最大 14 日間圧密することにより、年代効果による擬似過圧密に相当する程度の圧密降伏圧力の増加がみられること、このとき圧密降伏圧力が圧密時間の対数に比例して増加することを確認した。また、この試料に段階的に増分一定となるよう圧密圧力を増加させて加え、セメンテーションによる固化と圧密が同時に起こるときの体積比と圧密圧力の関係を調べた結果、載荷速度がゆっくりであるほど同じ圧密圧力  $p$  に対する体積比  $f$  が大きくなり  $f$ - $\log p$  の勾配（圧縮指数に相当する）が緩やかになることがわかった。このことは、粘土が海底で堆積し自重圧密する過程で、堆積速度（圧密圧力の増加）とセメンテーションの発現の

関係によって、堆積後の間隙比が変化する可能性を実験的に示したといえる。

一方、堆積中の圧密と同時にセメンテーションが起こっているとみられる粘土地盤では、正規圧密領域において圧縮指数  $C_c = \Delta e / \Delta(\log p)$  が一定にならず、圧密圧力が圧密降伏圧力を越えた直後にセメンテーションによる構造の破壊が始まって大きな圧縮性を示すことが知られている。しかし、広島港にセメントを添加した実験結果では、このような特徴的な圧縮特性が十分再現されていなかった。

また、堆積中のセメンテーションの影響は圧縮圧密特性のみならず、せん断特性にあらわれるが、せん断特性の影響については検討されなかった。

本研究では、福山港粘土と東京湾羽田粘土を用いて、少量のセメント添加による圧縮圧密特性の変化を調べるとともに、セメント添加がせん断特性に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

## 2. 実験に用いた粘土とセメント添加量

実験に用いた広島港粘土、福山港粘土、東京湾羽田粘土の試料の物理特性を表-1 に示す。なお、広島港粘土の圧縮圧密特性に関するデータは前報と同じものである。表のように、いずれの粘土も液性限界が 97~114% の狭い範囲にあり、高塑性の粘土である。添加したセメントは市販の普通ポルトランドセメントである。また、粘土の初期含水比は、それぞれの液性限界の 1.5 倍とした。

表-1 各粘土のコンシステンシー特性

	$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	$I_P$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$
広島港粘土	97.1	40.7	56.4	2.653
福山港粘土	99.0	45.0	54.0	2.693
東京港羽田粘土	113.2	49.6	63.6	2.662

Tan<sup>4)</sup>らは、わが国の多くの海成粘土に関してセメント添加量  $C$  と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係をまとめ、両者が次式のように表されることを報告している。

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

ここに  $C_0$  は強度発現に必要な最小セメント量（粘土の乾燥質量に対する比で表す）であり、 $k$  は比例定数である。そこで本研究では3つの粘土について、セメント添加量が粘土の強度発現に及ぼす影響を一軸圧縮強度との関係で調べた。その結果、 $q_u$  とセメント添加量  $C$  の関係は一本の直線ではなく、 $q_u$  が  $50\text{kN/m}^2$  以下の領域と  $50\text{kN/m}^2$  以上の領域で二本の直線で表され、以下のようになった。

$$q_u = k_0(C - C_0) \quad (q_u \leq 50\text{kN/m}^2)$$

$$q_u = k_1(C - C_1) \quad (q_u > 50\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

上式で  $k_0, k_1$  は  $q_u$  が  $50\text{kN/m}^2$  以下および以上における直線の勾配であり  $C_0, C_1$  は切片であるが、特に  $C_0$  は強度発現に必要な最小のセメント添加量を表している。養生期間3日と7日において  $k_0$  と  $C_0$  を求めた結果、表-2 に示す値が得られた。

表-2 各係数と養生日数

試料名	広島港粘土		福山港粘土		羽田粘土	
	3日	7日	3日	7日	3日	7日
$k_0$	24.6	36.9	24.7	36.3	21.5	37.4
$C_0$	6.68	6.62	5.65	5.65	7.25	7.22

表をみると、養生日数により強度が発現する割合（傾き  $k_0$ ）は変化しているが3つの試料ともほぼ同じ値を示した。

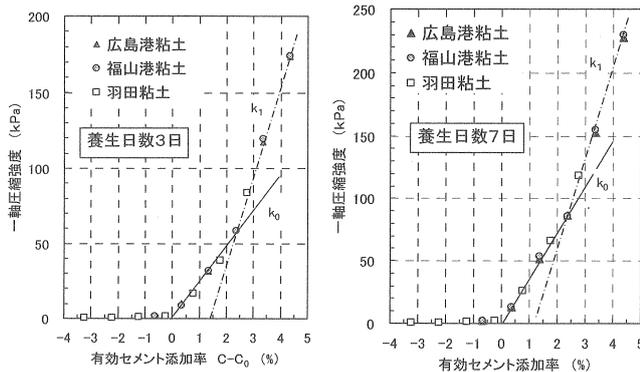


図-1 一軸圧縮強度（養生期間：左=3日、右=7日）

また、必要最低セメント添加率  $C_0$  はほとんど変化せず、広島港粘土 6.65%、福山港粘土 5.65%、羽田粘土 7.23%であった。また  $k_0$  についてみると

そこで実際のセメント添加率から最小セメント添加率を引いた値 ( $C - C_0$ ) を有効セメント量とし、養生日数3日と7日のときの有効セメント量と一軸圧縮強度の結果を図-1に示した。図のように ( $C - C_0$ ) で整理すると、3つの試料の強度とセメント量の関係がほぼ一致している。このことから、今回の実験の範囲では ( $C - C_0$ ) でセメント添加量を整理することで、種類の違う粘土の結果をまとめることができることが示唆された。

前報<sup>3)</sup>では、セメント添加率を5.0%とし、一段階の圧密圧力増分を27.7kPaとして9.8kPaから392kPaまで15段階で載荷したときの圧密中のセメンテーション効果を圧密降伏圧力から評価した。この結果より、各段階での載荷時間3時間（全体では45時間）、6時間（90時間）、12時間（180時間）で392kPaまで圧密する過程が、それぞれ若い沖積粘土地盤、古い沖積粘土地盤、洪積粘土地盤が堆積する過程を再現していると考察した。図-2に、前報の実験におけるセメント添加量5.0%のときの広島港粘土の過圧密比（セメンテーションによる擬似過圧密）と養生期間

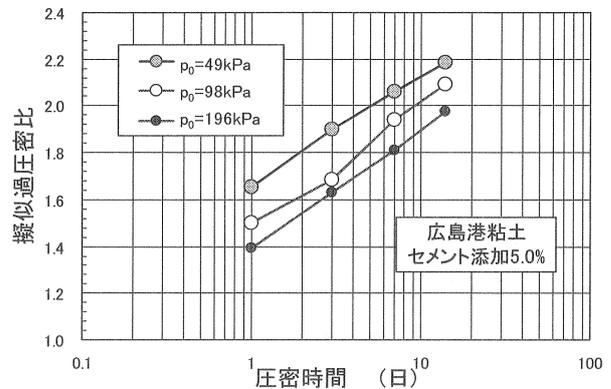


図-2 セメント添加量5.0%の広島港粘土における養生期間と擬似過圧密比の関係（ $p_0$ は有効圧密圧力）

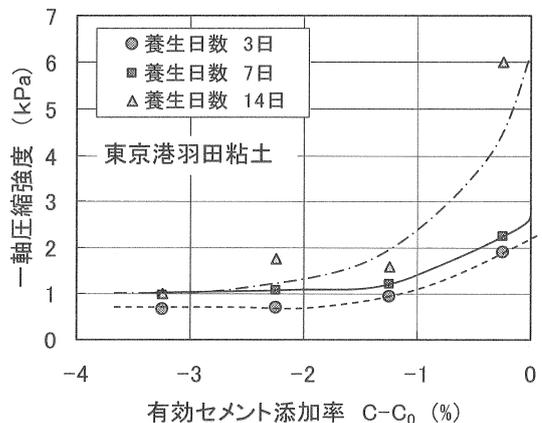


図-3 有効セメント添加量と一軸圧縮強度の関係（東京湾羽田粘土）

の関係を示すが、養生期間 14 日で擬似過圧密比が 2.0~2.2 まで増加しており、この値は実際の海底地盤で見られる擬似過圧密比としてはほぼ妥当な値である<sup>5)</sup>。広島港粘土の添加率 5.0%を有効セメント添加率でみると  $(C-C_0) = -1.65\%$ であり、一軸圧縮強度が発現するための最小セメント添加量  $C_0$ よりも 1.65%小さい値となっている。以上の結果から、本研究では  $(C-C_0) = -1.65\%$ を基準として他の 2つの種類の粘土に関する実験を行うこととした。

なお、東京湾羽田粘土について、図-1で求めた  $C_0$ をもとに  $(C-C_0) = 0 \sim -4.0$  (%) の領域で測定限界ぎりぎりの一軸圧縮強度を求め両者の関係を図-3に示した。図をみると  $C_0$ セメント添加量でも 2~6kpa 程度の強度発現はあり、ほぼ  $(C-C_0) = -1 \sim -2$  (%) 範囲から始まっていることが窺える。したがって、 $(C-C_0) = -1.65\%$ は、添加によって粘土にわずかな強度発現が開始する付近の添加率であるともいえる。

### 3 少量のセメントを添加して圧密養生した海成粘土の $e-\log p$ 曲線の変化と過圧密比の増加

#### 3.1 試料作成および圧密試験の方法

セメント添加試料の作成は以下の手順で行った。

- ①各粘土を十分に練返し、初期含水比が液性限界の 1.5 倍になるように調整する。
- ②粘土の乾燥質量に対するセメント質量を計量し、セメントと水が同じ質量になるセメントミルクを作る。
- ③粘土とセメントミルクを混合し、ハンドミキサーで攪拌する。次に、真空ミキサーに投入し 5 時間脱気しながら攪拌する。
- ④攪拌した試料を円形モールドに流し込み室温 (20°C) で圧密養生を行う。広島港粘土は圧密圧力 49kPa, 98kPa, 196 kPa で圧密し、養生日数は 1, 3, 7, 14 日の 4 ケースで試料を作成した。また、福山港粘土、羽田粘土は圧密圧力を 49 kPa とし、養生日数 3, 7, 12 日の 3 ケースで試料を作成した。圧密養生の方法は、所定の圧力まで段階的に圧密圧力を増加させ、段階ごとに  $\nu$  法によって一次圧密を確認した後に次段階の载荷を行った。
- ⑤最終圧密圧力段階は 3t 法で 100% 圧密終了時刻を求め、この時間からの日数を養生日数とした。所定の養生日数に達した後に、圧密容器から試料を取り出し、標準圧密試験と同様の手順で段階载荷による圧密試験を実施した。
- ⑥圧密試験に時間を要するとその間にセメンテーションが進行する可能性があるため、圧密試験では標準

圧密試験と同様の圧密圧力を用いたが、各段階で  $\nu$  法によって得られた一次圧密終了時間に達した時点で直ちに次の圧密圧力を载荷した。

上記の手順で実験を繰り返したところ、同じ方法で行ったにもかかわらず、セメンテーションによる強度発現に差がみられた。広島港粘土で圧密圧力 98kPa のときの供試体の圧密降伏応力の例を図-4に示す。図ではセメント混合時の外気温で整理しているが、図のように混合時の気温が低いほど圧密降伏圧力が大きくなり養生期間中の増加も顕著であった。本実験では養生中は室温を 20°C に保ったが、粘土の保管と攪拌の場所は屋外に隣接し温度管理ができない場所であるため、混合時の粘土の温度は外気温とほぼ同じであった。

セメントの水和反応は温度条件に大きく影響され、コンクリートの場合でも打ちこみ後 2 時間程度の初期温度が最終強度に大きく影響することが知られている。一般に初期温度が高いと水和反応が急速となり、水和生成物が不均一に生成されるため長期強度が小さくなるとされている<sup>6)</sup>。このことから今回の温度の影響を類推すると、外気温が高い場合は、セメント添加初期の段階で水和反応が速く進んでしまうため、生成した水和物が互いに十分なリンクを形成しにくく、全体として強度が発現しないことが考えられる。これに対して初期の温度が低い場合は混合の過程でゆっくりと水和反応が進行するため、セメント量が少ない今回の条件でも生成した水和物が互いにリンクを形成し、全体として強度が発現しやすいことが考えられる。以上は水和反応の早さからの類推であるので、今後さらに実証的に検討する必要がある。

以上の結果より、広島港粘土については外気温 3.2 °C のデータを用い、福山港粘土、羽田粘土については、温度管理に関する以下の 2 点を変更して実施した。

- ①' (追加) セメントミルクを作る前に粘土と含水比調整

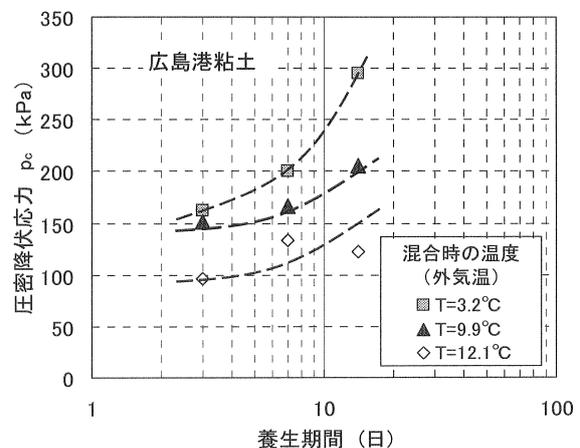


図-4 セメント混合時の温度と圧密降伏圧力の発現 (広島港粘土,  $P_0=98$  kPa)

用の蒸留水を冷蔵庫に保管し、温度を 0°C 付近に安定させる。

- ③ (変更) できるだけ早く温度管理ができる実験室内に試料を移動させるため、真空ミキサーでの攪拌時間を 30 分とする。

### 3.2 e-logp 曲線形状と強度増加

図-5 は圧密圧力が 49kPa のときの養生日数と過圧密比の関係である。ここで過圧密比は e-logp 曲線から求めた圧密降伏圧力  $p_c$  と圧密養生に用いた有効圧密圧力  $p_0$  の比である。本試験では段階载荷の圧密試験を一次圧密終了条件で実施しているため、標準圧密試験に比べると圧密降伏圧力が 20~25% 程度大きく求められている<sup>7)</sup>。

図のように少量のセメントを添加したことにより、1 日~14 日の養生日数で過圧密比は養生日数とともに明瞭に増加した。また、図中には有効セメント添加量 ( $C-C_0$ ) を示しているが、過圧密比の増加傾向は有効セメント添加量によって大きく変化するものの ( $C-C_0$ ) = -1.65% と等しい場合、3 つの粘土の過圧密比の増加傾向はほぼ一致した。このように今回の用いた 3 種類の粘土においては、有効セメント添加量は圧密養生によるセメンテーションの発現の有効な指標になっているといえる。また、図より有効セメント量の増加によって、擬似過圧密比は著しく増加しており、セメント添加量のわずかな違いが力学特性に大きな影響を及ぼすことがわかる。

次に、e-log p 曲線形状に着目する。図-6 (a) ~ (c) はセメントを ( $C-C_0$ ) = -1.65% となるように添加し、49kPa で圧密養生した広島港粘土、福山港粘土、羽田粘土の e-log p 関係である。図-6 (a) のように、広島港粘土は養生日数の増加とともに初期間隙比は大きくなり圧密降伏圧力も増加するが、正規圧密領域の  $e$  と  $\log p$  の関係はほぼ直線であり、圧密降伏圧力  $p_c$  を越えた圧力の範囲で圧縮指数

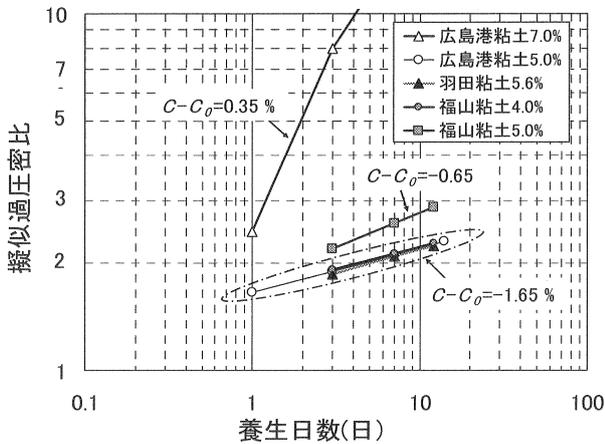
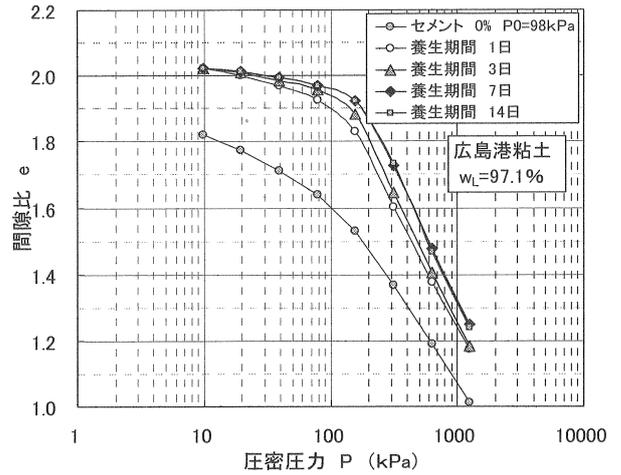
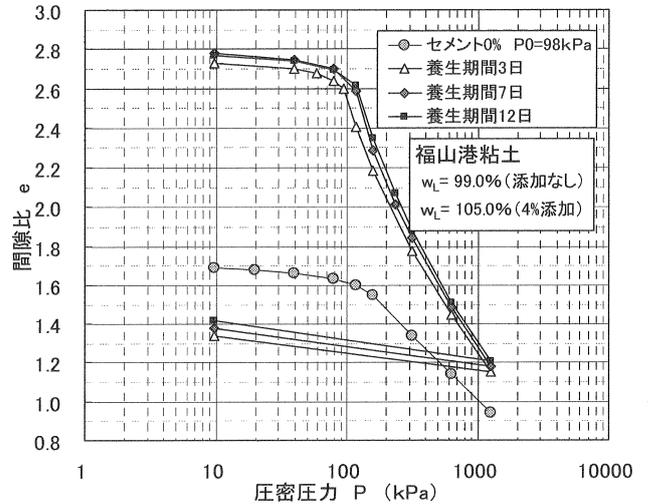


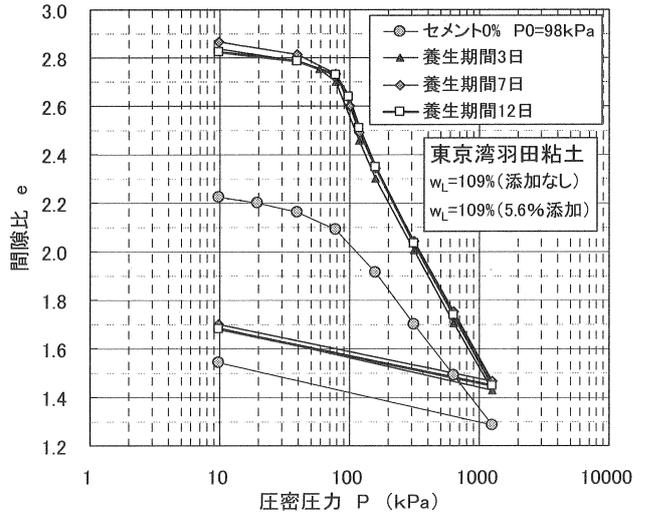
図-5 有効セメント量と擬似過圧密比の関係



(a) 広島港粘土 ( $p_0=49kPa$ )



(b) 福山港粘土 ( $p_0=49kPa$ )



(c) 東京港羽田粘土 ( $p_0=49kPa$ )

図-6 セメントを添加した再圧密試料の e-log p 曲線

が増加する傾向がみられない。これに対して、福山港粘土の  $e$ - $\log p$  曲線、東京湾羽田粘土の  $e$ - $\log p$  曲線では、圧密降伏圧力を越えた圧密圧力付近で圧縮指数が大きくなり、圧密圧力の増加とともに低下している。

正規圧密領域での圧縮性の変化を詳しくみるため、各圧密圧力における圧縮指数  $C_c = \Delta e / \Delta (\log p)$  を求め、圧密圧力との関係を図-7(a)~(d)に示した。図-7(a)は、セメンテーションとみられる構造が発達している大阪湾洪積粘土試料の定ひずみ速度圧密試験結果から求めた圧縮指数の変化である。図のように、不攪乱粘土の場合、圧縮指数は圧密降伏応力の付近で明瞭なピークを示し圧密降伏応力を超えて圧密圧力が大きくなるにつれ顕著に減少する。一方、繰り返した試料の圧密試験結果では、圧縮指数は正規圧密領域においてはほぼ一定であり不攪乱試料の圧縮特性とはっきり異なっている。

図-7(b), (c), (d)は福山港粘土セメント添加率 4.0% ( $(C-C_0) = -1.65\%$ )、福山港粘土セメント添加率 5.0% ( $(C-C_0) = -0.65\%$ )、東京湾羽田粘土セメント添加率 5.6% ( $(C-C_0) = -1.65\%$ ) について、圧密圧力を  $p_c$  で正規化して同様の整理を行ったものである。

図-7(b), (d)をみると圧縮指数は  $p/p_c = 1.0$  (圧密降伏応力) 付近で急激に上昇し、その後急激に減少している。しかし、図-7(c)では  $p/p_c = 1.0$  付近で圧縮指数が上昇しているものの、その後の減少はそれほど見られない。これはセメント量が多いため、セメント水和物により形成された構造がより強くなり、 $p_c$  を越えて圧密するだけでは容易に破壊しなくなったためと考えられる。

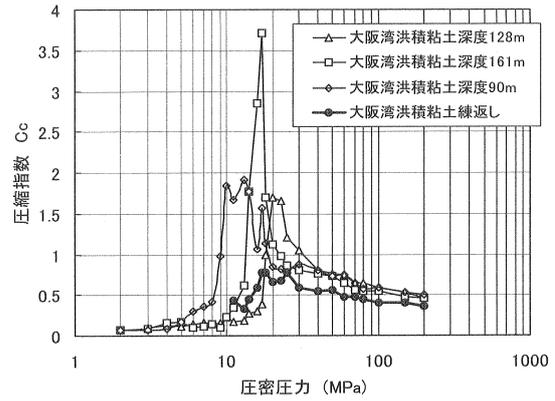
ここで圧密降伏圧力直後の圧縮性を定量的に調べるために年代効果が正規圧密領域の圧縮指数に与える影響をあらわすため次式で定義する圧縮指数比  $r_c$  を求めた。

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

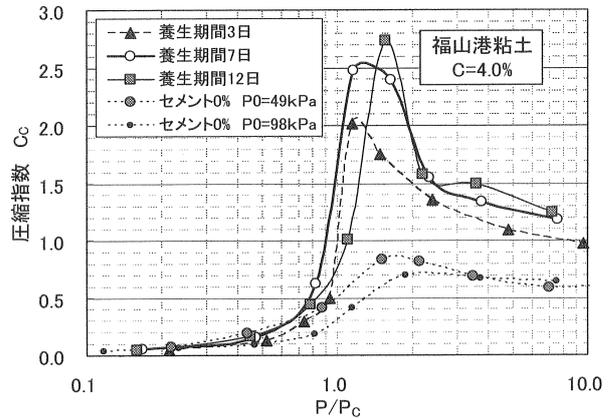
ここに  $C_{cmax}$  は図-7で求めた圧縮指数の最大値であり、 $C_c^*$  は圧密圧力が十分に大きく  $C_c$  がほぼ一定になったときの  $C_c$  の値であり、通常は圧密圧力が  $p_c$  の5倍となったときの  $C_c$  を用いる。土田らは海成粘土試料の圧密試験結果をまとめた結果、 $r_c$  の範囲を以下のように報告している<sup>8)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} r_c &= 1.0 \sim 1.2 && \text{(室内再調整粘土)} \\ r_c &= 1.2 \sim 3.0 && \text{(年代効果を有する粘土)} \\ r_c &= 3.0 \sim 6.0 && \text{(構造が発達した粘土)} \end{aligned} \right\} (3)$$

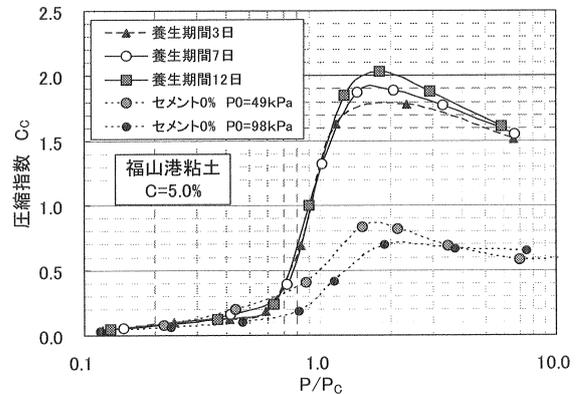
表-3に  $r_c$  と  $C_{cmax}$  をまとめて示すが、今回用いた福山港粘土、東京湾羽田粘土の場合、 $(C-C_0) = -1.65\%$  とすると、圧縮指数の最大値と圧縮指数比は年代効果を持つ自然地盤とよく一致している。しかし、広島港粘土の場合は正規圧密領域で圧縮指数の変化がみられず、年代効果を有する



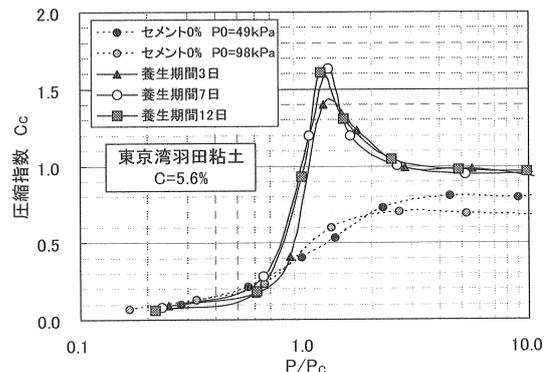
(a) 大阪湾洪積粘土における圧縮指数の変化



(b) 福山港粘土 (セメント添加率 4.0%)



(c) 福山港粘土 (セメント添加率 5.0%)



(d) 羽田粘土 (セメント添加率 5.6%)

粘土の圧縮性の再現としては不十分であった。また、養生時間と  $r_c$  の関係をみると、養生期間 3 日よりも 7 日の方が  $r_c$  は大きくなるが、7 日と 12 日、14 日では福山港粘土では  $r_c$  が増加したが羽田粘土では増加がみられなかった。

表-3  $(C-C_0)=-1.65\%$  のときの圧縮指数比  $r_c$  と  $C_{max}$

養生期間 (日)	広島港粘土		福山港粘土		羽田粘土	
	$r_c$	$C_{max}$	$r_c$	$C_{max}$	$r_c$	$C_{max}$
3	1.14	0.91	2.07	2.02	1.42	1.49
7	1.24	0.92	2.44	2.48	1.72	1.52
12 or 14	1.24	0.93	2.74	2.74	1.69	1.61

以上をまとめると、今回用いた 3 種類の海成粘土に関しては、有効セメント添加量  $(C-C_0)$  を  $-1.65\%$  で一致させることにより、養生時間と擬似過圧密 (圧密降伏圧力の増加) の関係はほぼ一致したが、 $e-\log p$  曲線の形状に関しては、 $p_c$  を越えた圧密圧力での顕著な圧縮性がみられる場合 (福山港粘土、東京港羽田粘土) とみられない場合 (広島港粘土) があつた。図-7(c) に示すように、福山港粘土でも添加率が  $(C-C_0)=-0.65\%$  と  $1\%$  多くなると、 $p_c$  より大きい圧密圧力の範囲での  $C_c$  の低下がみられずほぼ一定となっている。これは、固化により形成された構造が圧密降伏を越えても壊れにくいと考えるならば、広島港粘土の場合、セメント添加量  $5.0\%$  が年代効果を再現する観点からは大きすぎた可能性がある。

#### 4 少量のセメントを添加して圧密養生した海成粘土のせん断強度・変形特性

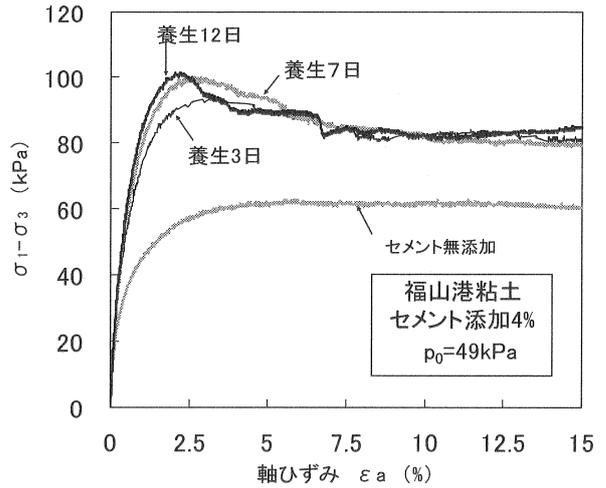
##### 4.1 実験方法

一般に年代効果の影響はせん断特性にも表れることが知られている。ここでは福山港粘土の  $(C-C_0)=-0.65\%$  および  $-1.65\%$ 、羽田粘土の  $(C-C_0)=-1.65\%$  の条件で作成した試料を用いて、三軸圧縮試験を行い、少量のセメント添加がせん断特性に及ぼす影響について検討を行った。

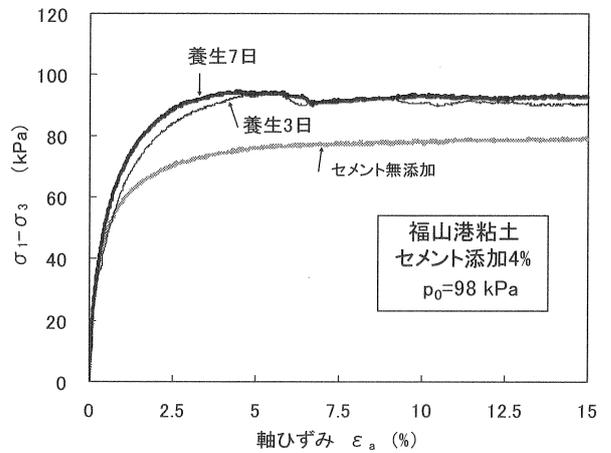
実験に使用した供試体は前節の初期温度管理を行っている供試体と同じ試料より取り出した。実験方法は圧密非排水せん断試験で、供試体を高さ  $8\text{cm}$ 、直径  $3.5\text{cm}$  の円柱形に切り出し三軸セル内にセットし、供試体の飽和度を十分高めるため背圧を  $196\text{kPa}$  作用させた。三軸セル内の等方圧力  $\sigma_3$  は供試体作成時の有効圧密圧力  $p_0=49\text{kPa}$  と同じ  $49\text{kPa}$  とその 2 倍の  $98\text{kPa}$  の二条件とした。圧縮はせん断速度  $0.03\%/min$  で行い、ひずみが  $15\%$  に達するまで行った。

##### 4.2 実験結果

図-8(a), (b) に、それぞれ圧密圧力  $49\text{kPa}$ 、 $98\text{kPa}$  のとき



(a) 応力ひずみ曲線 ( $p_0=49\text{kPa}$ )



(b) 応力ひずみ曲線 ( $p_0=98\text{kPa}$ )

図-8 福山港粘土 ( $C=4\%$ ) の応力ひずみ曲線

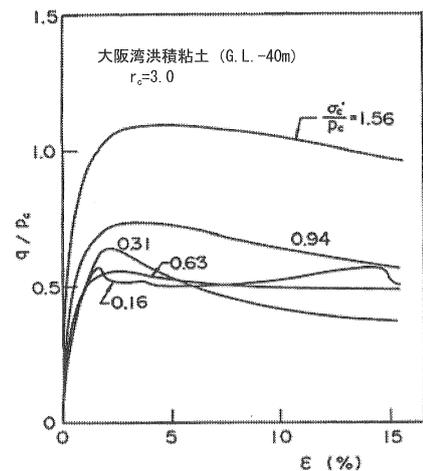


図-9 大阪湾洪積粘土試料の応力ひずみ曲線<sup>8),9)</sup>  
( $\sigma'_c$ : 圧密圧力,  $p_c$ : 圧密降伏圧力)

の応力-ひずみ曲線を示す。

図のように供試体が  $\sigma_3=49\text{kPa}$  で圧密した場合は、セメンテーションによって試料は擬似過圧密状態にあり、軸差

応力は明瞭にピークを示した後低下して一定値に落ち着いている。比較のため図-9 に大阪湾洪積粘土における応力ひずみ曲線<sup>5),6)</sup>を示すが、 $\sigma'_c < p_c$ では軸差応力のピークが明瞭に現れ、図-8(a)は類似した挙動を示している。圧密圧力が98kPaのときは、圧密圧力が擬似過圧密による降伏圧力付近よりもやや大きい値となっているため軸差応力は明瞭なピークが見られず最大値に達すると同時に一定値に落ち着いている。この傾向は図-9における $\sigma'_c > p_c$ のとき応力ひずみ曲線に類似している。このように、少量のセメントを添加した再構成粘土では、セメンテーションによる強度増加が存在している間はピークを示し、それを上回る等方圧密圧力が作用するとその影響は解消されるという、年代効果の影響を受けた自然不攪乱粘土の応力ひずみ関係がほぼ再現されているといえる。

図-10に福山港粘土の応力経路図を、図-11に大阪湾洪積粘土不攪乱試料の応力経路図<sup>5),6)</sup>を示す。図のように擬似過圧密状態で圧縮された福山港粘土( $\sigma_3=49\text{kPa}$ )は、軸差応力がピークに達するときの有効応力状態は実線の限界状態線を突き抜けて、その後限界状態線に近くに低下している。このせん断特性は図-11における過圧密領域での大阪湾不攪乱粘土の応力経路とよく類似している。

土田らは、年代効果を有する粘土の力学特性を表す指標としても(2)式で求めた圧縮指数比 $r_c$ に着目し、大阪湾洪積粘土試料の三軸CIU試験から求めた破壊時の圧縮ひずみと圧密試験から求めた $r_c$ の関係について整理している。図-12は破壊ひずみと圧縮指数比の関係である。ここで福山港粘土4.0%と羽田粘土5.6%は $(C-C_0)=-1.65\%$ 、福山港粘土5.0%は福山港粘土 $(C-C_0)=-0.65\%$ の値である。図中の実線は大阪湾粘土のデータより得られた近似曲線である。図のように、今回の実験から得られた $r_c$ と破壊ひずみの関係は大阪湾不攪乱粘土による関係とほぼ対応している。

次にせん断時の強度低下率を次式で定義し、圧縮指数比 $r_c$ と強度低下率の関係を図-13に示した。

$$\text{強度低下率} = (\text{残留強度}) / (\text{ピーク強度}) \quad (4)$$

図のように今回セメントを添加した試料による値は圧縮指数比 $r_c$ の範囲が最大2.5という限界はあるが、大阪湾洪積粘土試料のデータとほぼ対応する傾向を示した。

図-14には、変形係数と有効土被り圧の関係について、今回の実験結果と大阪湾洪積粘土、沖積粘土の結果を比較して示した。洪積粘土で圧密圧力500kPa以下、沖積粘土で圧密圧力100kPa以下は過圧密領域で変形係数である。図をみると圧密圧力が49kPaで擬似過圧密となっている供試体は、不攪乱粘土試料の範囲にほぼ含まれており、セ

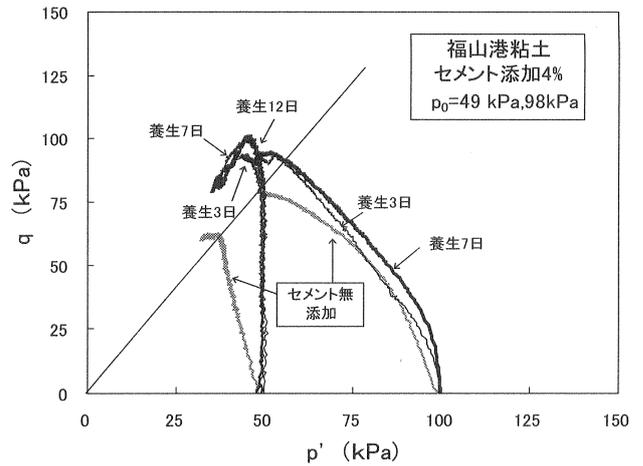


図-10 福山港粘土の有効応力経路

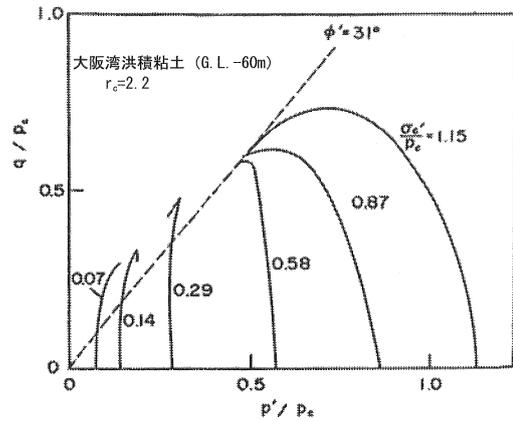


図-11 大阪湾洪積粘土の三軸CIU試験における有効応力経路<sup>5),6)</sup> ( $\sigma'_c$ : 圧密圧力,  $p_c$ : 圧密降伏圧力)

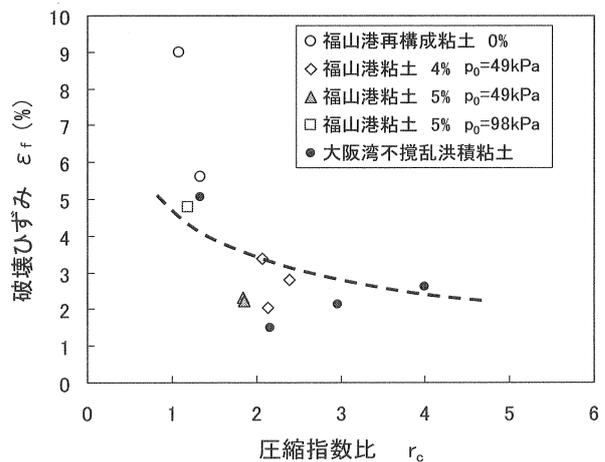


図-12 圧縮指数比と破壊ひずみの関係 (8), (9)に加筆

メントを添加していない供試体および等方応力によりセメントによる固化構造が破壊されたと考えられる供試体のデータは、それらよりも変形係数が小さくなっている。

以上の破壊ひずみ、強度低下率、変形係数 $E_{50}$ の結果より、有効セメント添加量 $(C-C_0)$ により決定したセメ

ントを練返し再構成粘土に添加し、実験室内で温度を管理して圧密養生することで、原地盤において形成・発達したセメンテーション構造に類似した擬似過圧密状態を再現できたと考えられる。

5. まとめ

年代効果が発現する過程は十分解明されていないが、粘土中の炭酸カルシウムなどのセメンテーション物質による固化が堆積中にゆっくりと進行したことが考えられる。本研究は、粘土に少量のポルトランドセメントを添加することによって、自然粘土の堆積過程におけるセメンテーションと同様の効果を実験室で再現することを試みた。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) セメント添加率  $C$  と添加後の一軸圧縮強度の関係より強度発現のための最小セメント率  $C_0$  を求め、有効セメント添加率を  $(C-C_0)$  とする。  $(C-C_0)$  は異なる粘土におけるセメント添加の効果を表す有効な指標となる可能性がある。
- 2) 今回の実験の範囲では粘土の種類によらず有効セメント添加量  $(C-C_0)$  を  $-1.65\%$  としてセメントを添加することにより、自然海成粘土地盤がもつ擬似過圧密比と同等の圧密降伏圧力の増加を実験室内で再現することができる。また、セメントを添加して圧密養生した試料の  $e\text{-log } p$  曲線は、自然海成粘土が示す正規圧密領域における圧縮指数の変化(圧密降伏圧力直後の大きな圧縮性とその後圧縮性の低下)と類似した傾向を示した。ただし、セメント添加量が大きすぎると、正規圧密領域の圧縮指数は一定となる。
- 3)  $(C-C_0) = -1.65\%$  のセメントを添加し、圧密養生した試料の三軸 CU 試験による応力ひずみ関係、有効応力径路は、大阪湾洪積粘土の特性と類似していた。
- 4) セメント添加率を適切に設定することにより、年代効果を有する自然海成粘土と類似した力学特性を有する粘土を室内で作成できると考えられる。

参考文献

- 1) Bjerrum, L.: Problems of Soil mechanics and construction of soft clays, states-of-the-art report, Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, pp.111-159,1973.
- 2) Bjerrum: Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Géotechnique*, Vol.17, pp.83-118,1967.
- 3) 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.
- 4) Tan, Y. X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T.: Practices of

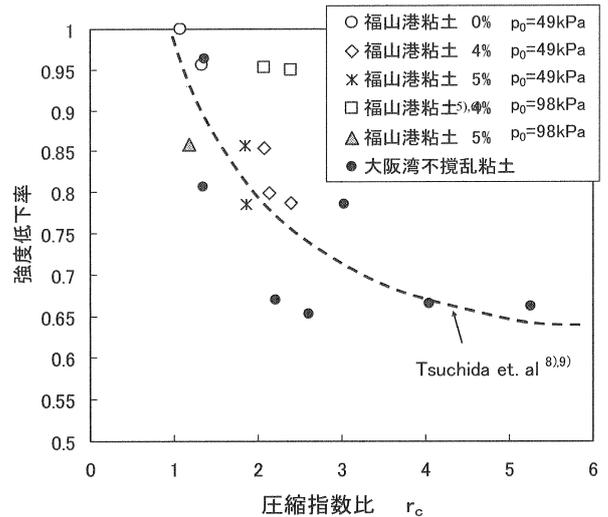


図-13 圧縮指数比と強度低下率の関係

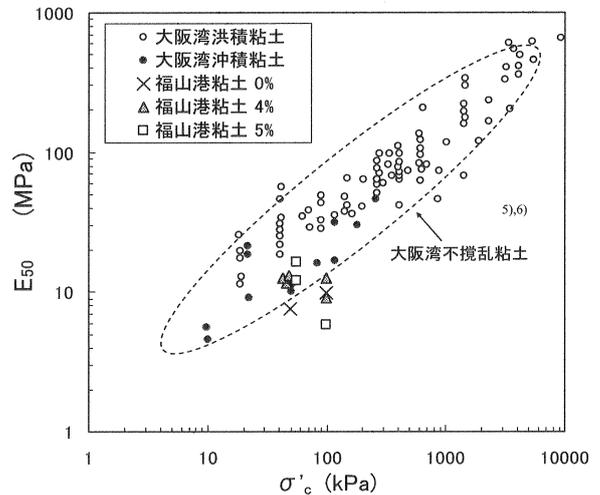


図-14 変形係数 E50 の比較

reused dredgings by cement treatment, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, pp.129-143, 2001.

- 5) Tsuchida, Takashi: "Mechanical properties of Pleistocene clay and evaluation of structure due to aging", Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Proceedings of International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice, IS-Yokohama2000, Vol.2, pp.43-83, 2000.
- 6) 三浦尚: 土木系大学講義シリーズ 8 (土木材料学), コロナ社, pp.66.
- 7) Tsuchida, T.: Evaluation of undrained shear strength of soft clay with consideration of sample quality, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.3, pp.29-42, 2000.6.
- 8) Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J.: Effect of aging of marine clays and its duplication by high temperature consolidation: *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp.133-147, 1991.12.
- 9) 土田孝: 三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究, 港湾技研資料, No.688, pp.1-197, 1990年12月.

(2009年7月31日 受付)