

セメンテーションによる構造を有する粘土の圧縮特性とそのモデル化

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○今井遥平・平本真也

広島大学大学院工学研究科 正会員 土田 孝・宇高 薫

1. はじめに

地盤が生物遺骸に起因する炭酸カルシウムなどの固化物質を含んで堆積した場合、堆積中にゆっくりとセメンテーションが進行し圧密圧力に対して通常よりも高い間隙比を維持する構造が形成されることが考えられる。筆者らは、練り返した海成粘土スラリーに適切なセメントを添加して再圧密し、大阪湾洪積粘土など高間隙比の状態に堆積し降伏圧力を超えた载荷で大きく圧縮する自然粘土と類似した圧縮特性を示す粘土を室内で作ることができた¹⁾。本研究では、セメンテーションによって形成された高間隙比構造を有する粘土の圧縮特性を数値モデル化することを試みた。

2. セメント添加再圧密試料の圧縮特性

実験に用いた試料は、福山港粘土(セメント添加率Cは粘土の乾燥重量比2%および3%)、大阪湾粘土(セメント添加率1%)である。粘土スラリーに少量のセメントを低温で添加混合し、室温で段階的に予備圧密を行い、最終圧密圧力で所定の時間養生を行った。添加したセメント量は、一軸圧縮強度が発現するのに必要な最小セメント量からさらに乾燥重量比で1.0~2.0%減じた量として決定した。

図-1は段階载荷による急速圧密試験を行ったときの $e-\log p$ 曲線である。凡例の括弧内は予備圧密圧力 p_0 である。一般に年代効果を持つ不攪乱試料と再構成粘土の違いは、不攪乱試料は初期間隙比が高く、高い圧縮性を示すことがわかっている¹⁾。

図-1をみると、すべてのセメント添加した試料で初期間隙比がセメント添加していないものより高い。これは、セメンテーションにより、同じ圧力に対してより高い間隙比の状態を維持できるような構造が形成されているためと考えられる。図-2は各圧密圧力における圧縮数 C_c の変化である。図のように圧密圧力を少し超えた圧密圧力の時に圧縮指数は大きくなり、福山港粘土ではセメント添加率Cが大きいほど最大の圧縮指数も大きくなる。大阪湾粘土の場合は、3.0%の添加で一軸圧縮強度が発現がみられたので、ここでは $C=1.0\%$ とした。図-2のように福山港粘土ほど顕著ではないが、無添加の場合と比べると圧縮性は大きく増加している。

大阪湾粘土スラリーに1.0, 2.0, 3.0%のセメントを添加し、圧密圧力を5kPaから400kPaとなるまで6時間おきに15段階かけて増加し(各段階26.3kPa増加する)たときの体積比 $f=1+e$ と圧密圧力 p の関係を図-3に示す。図のように、セメント添加量が1.0%の場合 $f-\log p$ 関係はほぼ直線となるが、2%, 3%と増加させることにより、同じ圧密圧力に対する体積比は大きくなっている。400kPaまで圧密した後に、一次元圧密終了で直ちに示談会の圧力を加える急

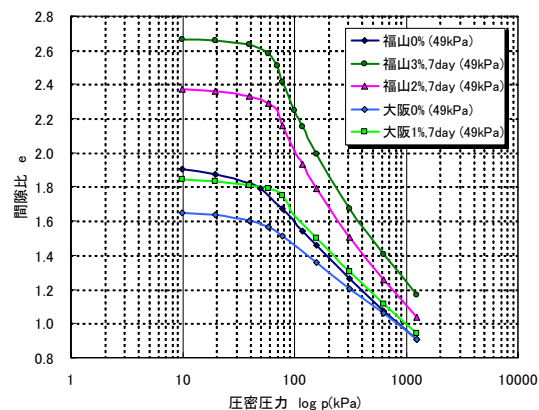
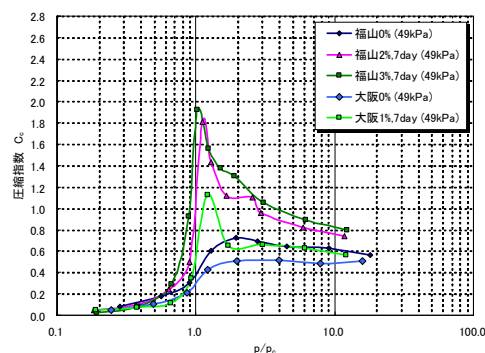
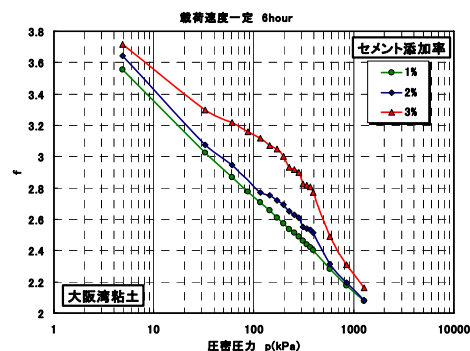
図-1 $e-\log p$ 曲線 (段階载荷圧密試験)

図-2 圧縮指数の変化 (段階载荷圧密試験)

図-3 载荷速度一定圧密試験における体積比 $f(=1+e)$ と圧密圧力の関係 (大阪湾粘土)

キーワード 海成粘土, 圧縮, 圧密, セメンテーション

連絡先 〒739-8527 広島市鏡山1-4-1 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 TEL 082-424-7784

速載荷圧密試験を行った。このときの f - $\log p$ 曲線も図-3 に示しているが、これを見ると、 $C=3\%$ では、載荷速度一定条件のもとで形成された高間隙比の構造が急速圧密によって崩壊し、セメント添加が無い場合の体積比の状態に戻っていく傾向が示されている。このような圧縮特性は大阪湾洪積粘土の圧縮特性とよく類似している。

3. 粘土の圧縮特性のモデル化

圧密降伏応力が違う状態の $\ln f$ - $\log p$ 曲線の圧縮特性を比較するためには、 $\ln f$ - $\log p$ 曲線を正規化することがよいと考え正規化を行った。 $\ln f$ - $\log p$ 曲線を正規化する手順は以下の通りである。

- (1)十分高い圧密圧力領域で $\ln f$ - $\log p$ 曲線の直線関係を決定する。
- (2)過圧密領域での $\ln f$ - $\ln p$ 関係を直線近似し、(1)で求めた直線との交点を求め、その圧密圧力を P_0^* とする。
- (3) $p^*=P_0^*/10$ とし、 p^* における体積比を f^* とする。 f^* と p^* を用いて体積比 f と圧密圧力 p を正規化すると、圧密圧力によらず、 $\ln f$ - $\log p$ 曲線を図-4 のように正規化することができる。

以上の正規化を行った後、 $\ln f$ - $\ln p$ 関係を表す次式を考案した。

$$\begin{cases} \ln\left(\frac{f}{f^*}\right) = -0.12(\ln f_L) \ln\left(\frac{p}{p^*}\right) + 0.27(\ln f_L) + A \left\{ \exp\left((1+B)\left(\frac{p}{p^*}\right)\right) - 1 \right\} & [p \geq p_c] \\ \ln\left(\frac{f}{f^*}\right) = \left(\frac{C}{100}\right) \ln\left(\frac{p}{p^*}\right) & [p \leq p_c] \end{cases}$$

f_L は液性限界の体積比、 p_c は圧密降伏圧力である。また、上式の下線部はセメンテーションや乱れの影響がなく圧密圧力が十分大きいときの標準的な $\ln f$ - $\log p$ 関係（基準曲線）である²⁾。式中のパラメータ A はセメンテーションによる間隙構造の高位化の程度を表し、 $A>0$ は $\ln(f/f^*)$ - $\log(p/p^*)$ 関係が基準曲線より右側（高間隙比）の状態にあり、 $A<0$ のときは基準曲線よりも間隙比は低い状態にある。 B はセメンテーションによる構造が崩壊して ($A>0$ のとき) $\ln f$ - $\log p$ 関係が標準的な基準的な関係に戻る過程を表現するパラメータである。 C は、過圧密領域における $\ln(f/f^*)$ - $\log(p/p^*)$ 関係を示している。大阪湾洪積粘土の $\ln(f/f^*)$ - $\log(p/p^*)$ 関係にフィッティングした結果を図-5 に示すが、高い精度でフィッティングできている。

関西国際空港建設現場において採取された大阪湾洪積粘土（不攪乱）の試験結果³⁾にフィッティングを行ってパラメータ A, B を求め、試料の堆積年代の関係をみたのが図-6 である。図中にはセメント添加再圧密試料の結果もプロットしている。図のように A, B は堆積年代と正の相関があり、図を見ると福山港粘土（セメント添加率 3%, 14 日養生）では A, B とも 20～25 万年の堆積年代に相当している。

4. まとめ

セメント添加再圧密により、間隙比が高位化する構造を有する粘土の圧縮特性と同様の粘土を室内で作成することができた。次に、高位化した構造を有する粘土の圧縮特性を表現するモデルを提案した。大阪湾粘土について求めた本モデルのパラメータは堆積年代との正の相関がみられた。

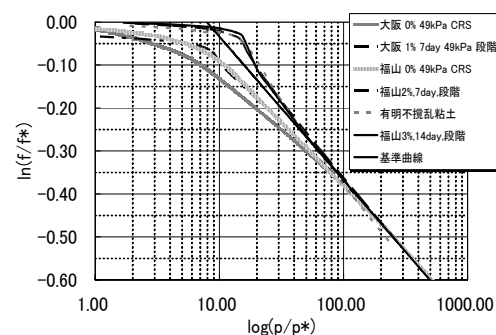


図-4 正規化した $\ln f$ - $\log p$ 曲線

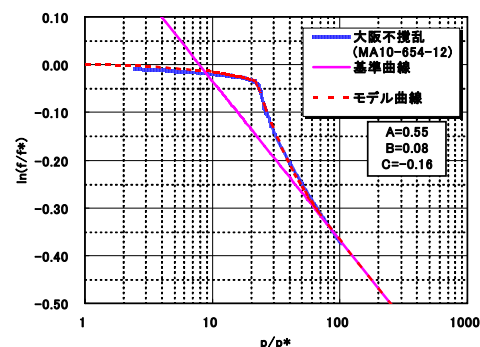


図-5 フィッティング結果

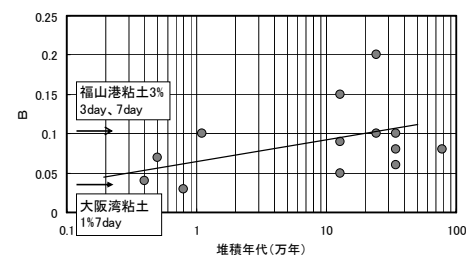
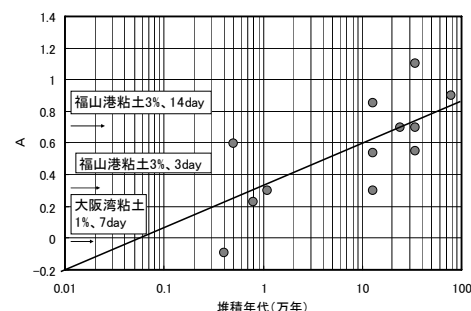


図-6 堆積年代と各パラメータの関係

参考文献 1) 土田孝ほか、圧密とセメンテーションが同時に進行～、地盤と建設、Vol.25, No.1, pp.85-92, 2007. 2) 土田孝、海成粘土地盤の自然間隙比と土被り圧～、地盤工学会論文報告集、Vol.41, No.1, pp.127-143, 2001. 3) 大向直樹：擬似過圧密粘土の圧縮特性に関する研究、横浜国立大学大学院工学府 博士学位論文 2008.3.