

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

近年、水深の深い沖合域において大規模な埋め立て事業が行われており、それに伴う予想を超えた洪積粘土層の沈下が問題となっている。代表的な例として、大阪湾の関西国際空港がある。これらの原因として、洪積粘土の年代効果が挙げられる。年代効果とは、長い地質学的な年代を経て堆積した海底地盤はその強度や圧密・圧縮特性は、圧密時の有効応力のほか、堆積過程における潮汐変動、塩分濃度、生物遺骸といったさまざまな物理化学・生物学的要因を受けていることがわかっており¹⁾それらを称したものを言う。また、年代効果には応力一定のもとで長期的な沈下による二次圧密(クリープ)、間隙比は無関係に強度が発現するセメンテーション効果に分けられる。近年問題視されていなかった、これらの特性の解明が求められている。

2. 研究内容

本研究は、年代効果が発揮される要因とされているセメンテーション効果に着目し、沖積層粘土に少量のセメントを加えることによって、洪積層粘土のセメンテーション効果を再現することを目的とする。実験試料は、地元の福山粘土(セメント添加率Cは粘土の乾燥重量比2%および3%)、関西国際空港で過去に行ったチェックボーリング試料を再構成した大阪湾粘土(セメント添加率1%)を使用する。試験方法は、粘土スラリーに自然地盤の年代効果に相当する小さな固化が発現する最少量のセメントを配合し、予備圧密を行い、その後所定の時間養生する。この過程により年代効果による力学特性を室内で短期間のうちに再現する事を目指す。固化が発現するセメントの添加量は、過去の研究より、一軸圧縮強度から決定する²⁾。その試料で圧密試験を行い、圧密試験結果と養生日数の関係より作成した粘土試料が自然地盤においてどの程度の堆積年代に相当するのか推定する。また、再現性の確認として、セメンテーション構造を持つ粘土と、セメントを添加した粘土の $\ln f - \log p$ 曲線を正規化する。さらに、そのカーブフィッティングを行えるような、モデル式を提案し考察する。固化剤としてセメントを選択した理由は、セメンテーションの強度発現の原因がセメントと同じ固化作用である事と、大きな強度発現を必要とするためである。

3. セメント添加再圧密試料の圧縮特性

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²⁾。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

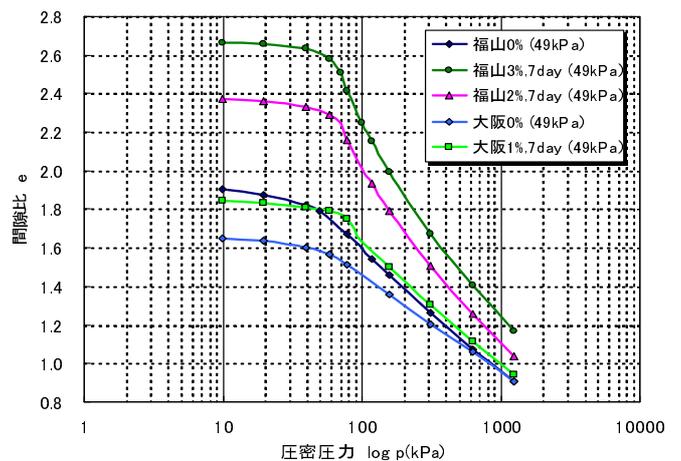


図-1 $e - \log p$ 曲線 (段階载荷圧密試験)

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の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 とするまで 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。400 kPa まで圧密した後、一次元圧密終了で直ちに示談会の圧力を加える急速圧密試験を行った。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、荷重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。

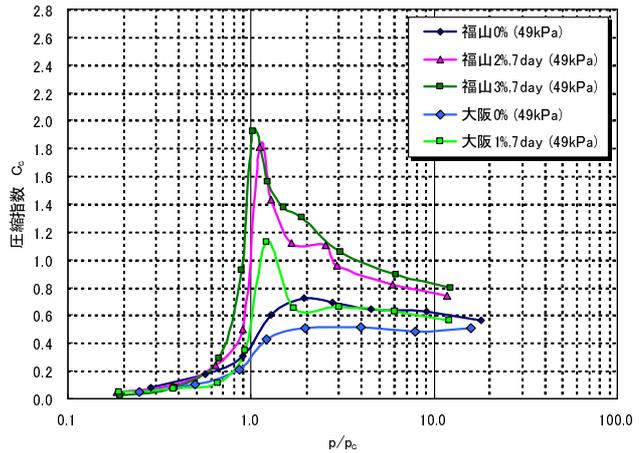


図-2 圧縮指数の変化（段階荷重圧密試験）

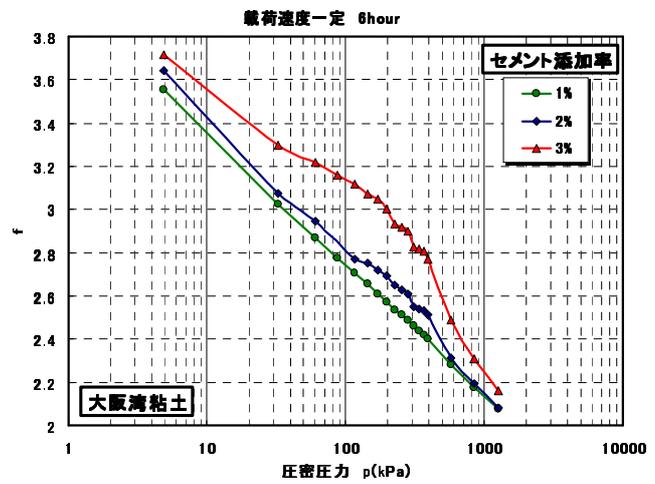


図-3 荷重速度一定圧密試験における体積比 $f(=1+e)$ と圧密圧力の関係（大阪湾粘土）

4. 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。

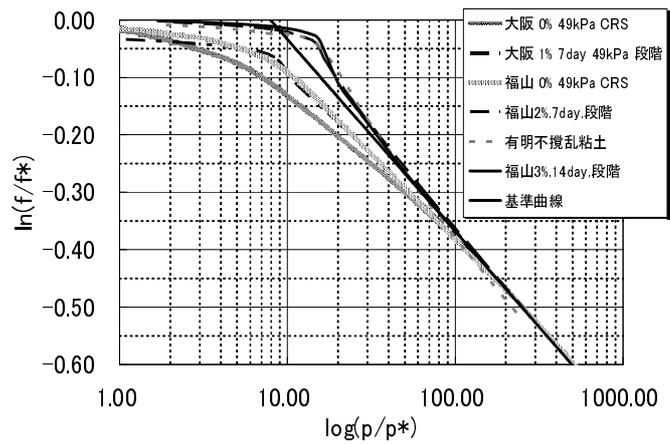


図-4 正規化した $\ln f-\log p$ 曲線

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

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³⁾. 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.

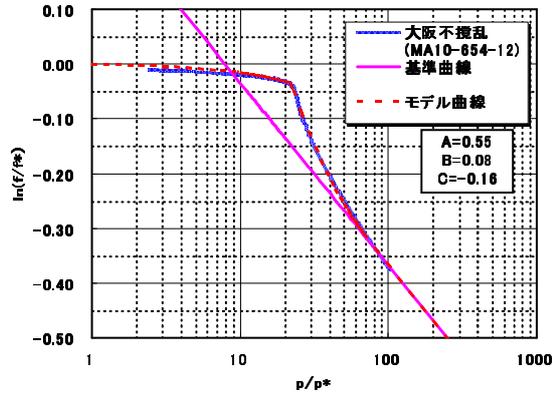


図-5 フィッティング結果

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¹⁾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.

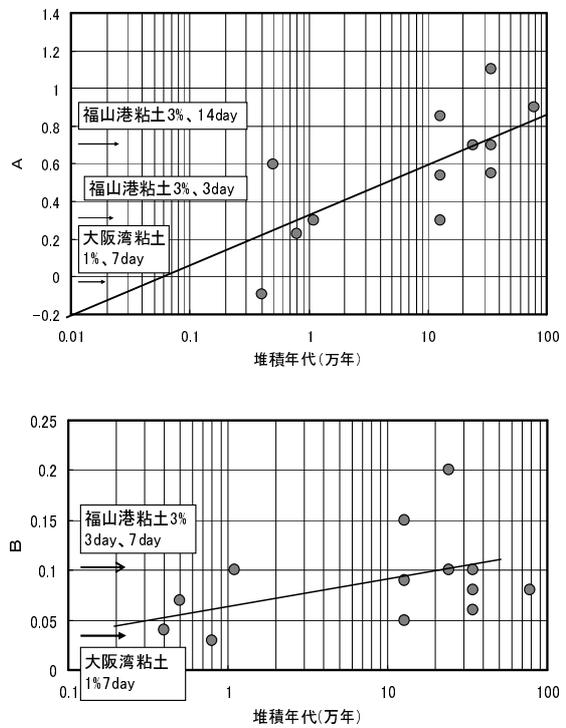


図-6 堆積年代と各パラメータの関係

そのモデル式の妥当性の検討として, 図-7 のような関西国際空港に似た地盤を再現した仮想地盤に 30m の山砂を埋め立てた時のそれぞれの粘土層の沈下量を計算した. それぞれの層の初期条件には単位堆積重量, 初期間隙比, 過圧密比を設定した. 沈下量の算出方法は, まず, それぞれの粘土層のパラメータを算出し, それと初期条件をもとに粘土層ごとに e - $\log p$ 曲線を求め, その e - $\log p$ 曲線から山砂を埋め立てたときの沈下量を算出する. 圧密圧力は 380kN/m^2 である. それぞれのパラメータの求め方は, パラメータ A, B は, 図-7 を使い堆積年代より算出し, パラメータ C は不攪乱試料では変化がほとんどなかったため, 平均値の -0.15 を利用した. 計算結果は, $A \sim D$ 層 (沖積層粘土) で 6.52m , $E \sim H$ 層で 1.58m となり, 合計沈下量は 8.10m となった. これは, 実際の関西国際空港の深度

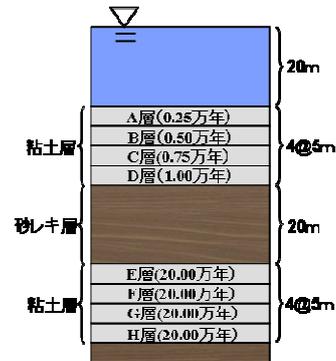


図-7 仮想地盤概略図

60m 程度までの地盤の沈下量に近い。

5. 荷速度一定実験のモデル化

今回、前項のモデル式を利用して、荷速度一定実験の各段階でのモデル化を行った。正規化の方法は、図-3における $C=1\%$ での十分高い圧密圧力領域で曲線の直線関係を決定する、過圧密領域は直線と仮定し、プロット点ごとに前項と同様の正規化を行った。また、フィッティングの際、パラメータ B を一定と仮定し、平均値の $B=0.075$ 、 C は簡略化のため $C=0$ とし、図-3のプロット点を変曲点として、それぞれのパラメータ A の値を求めた。図-8 にその結果を示す。これを見ると、 $C=2\%$ ではほとんどパラメータ A の増加は確認できなかった、逆に $C=3\%$ では $A_{MAX}=10$ と、不攪乱試料では得られなかった大きな値が求められた。この結果から、実際の不攪乱試料と比較するには、2.5%程度のセメント添加率がよいのではないかと考えられる。さらに、圧密圧力 200(kPa)付近で $C=2\%$ 、3%両方でパラメータ A の低下が見られた。

この事から、 $C=2\sim3\%$ と極少量のセメント添加量では、荷速度一定でなるべく構造を壊さないように圧密をしても、200kPa 程度の圧密圧力で構造が破壊し始めるのではないかと考える。

6. 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。また、本モデルで沈下量予測を行った結果は、現地盤のものと近い値が得られた。

参考文献

- 1) 大向直樹：擬似過圧密粘土の圧密特性に関する研究，横浜国立大学大学院工学府 博士学位論文 2008.3.
- 2) 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.
- 3) 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.

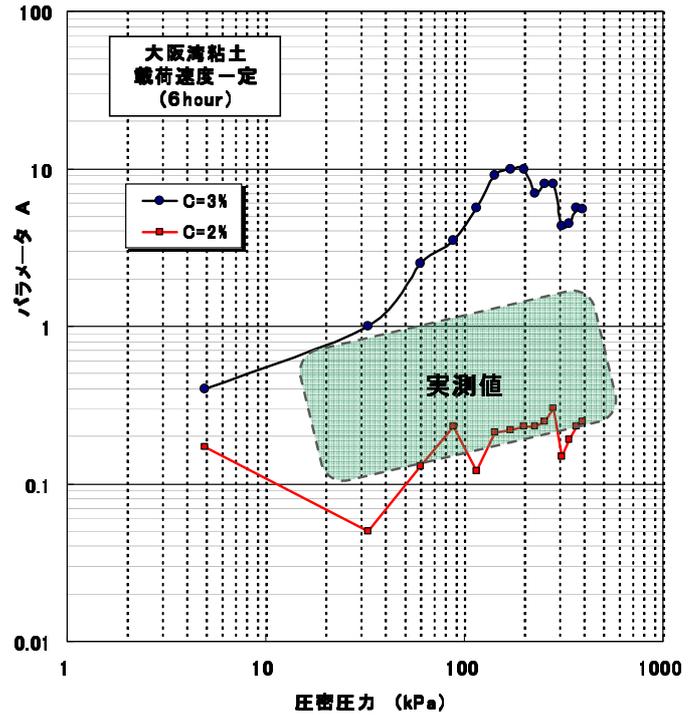


図-8 荷速度一定実験のモデル化