

数値解析による大阪湾洪積粘土の時間依存性挙動の評価について

京都大学防災研究所 正会員 ○三村 衛
 京都大学大学院 学生会員 張 祐榮

1. はじめに

大阪湾に堆積している洪積粘土は過去に力学的過圧密履歴を受けていない、土質力学的には正規圧密粘土である。しかしながら、圧密試験を行うと、過圧密比 $OCR=1.1 \sim 1.4$ の軽い過圧密を示すことから、擬似過圧密粘土と呼ばれている¹⁾。大阪湾に建設されている埋立地では、最終埋立応力 p_f が標準圧密試験による圧密降伏応力 p_c に達しないか、または p_c 周辺にとどまる場合であっても顕著な時間遅れ圧密が発生し、長期にわたって洪積粘土層の沈下が継続して発生している²⁾。そこで本報告では、力学的過圧密履歴を受けていない大阪湾洪積粘土が示す過圧密を見かけのものと考え、これを正規圧密 aged 粘土と仮定し、原位置初期応力以上の荷重を受けた場合には、 p_c 以下の応力状態であっても直ちに粘塑性ひずみが発生するという新たな枠組みを導入し、室内長期圧密試験結果と大阪港舞洲埋立地を例として取り上げ、弾粘塑性有限要素法によって解析を行った。解析結果と実測値を比較することにより、本報告で導入した仮定の妥当性を検証する。

2. 弾粘塑性モデルと擬似過圧密粘土の圧縮性に対する仮定

解析には弾粘塑性構成モデル³⁾を組み込んだ有限要素法⁴⁾を用いる。大阪洪積粘土はメカニカルな過圧密履歴を受けていない正規圧密 aged 粘土であると仮定しているため、圧密試験によって得られる圧密降伏応力 p_c はみかけのものであって、初期応力 p_0 から p_c の間の応力状態においても粘土が弾粘塑性的に挙動すると仮定したモデルを提案する。図-1 に圧縮モデルを示す。図-1 (a) は従来の考え方を示しており、標準圧密試験による $e \sim \log p$ 関係において、 p_c 以下の応力レベルでは弾性変形が、 p_c 以上になると弾粘塑性変形が生じると仮定している。一方、本報告で用いる圧縮モデル(図-1 (b))では、 p_0 以上の応力域ではすべて弾粘塑性変形が生じると仮定する。この時、 p_c 以下では圧縮勾配 C_s の、以上では圧縮勾配 C_c の変形が生じる。したがって既往の $e \sim \log p$ は reference curve としてそのまま使えることになる。しかしながら、提案モデルでは、洪積粘土層に載荷された最初の荷重によって粘土が弾粘塑性挙動をするように仮定し、一旦追加荷重が加わられると、除荷～再載荷領域の粘土は一般的な従来の過圧密粘土の挙動をするようになっている。時間依存性を支配する二次圧縮指数 α は石井ら⁵⁾による圧縮指数との一義的な関係から規定する。したがって p_c 以上の領域では C_c に比例した値を採用している。また p_c 以下の領域における α の値とその変化については Mesri & Godlewski⁶⁾、田中⁷⁾の知見に基づいて、 $p=p_0$ において 0.1α とし、相対降伏応力指数 $(p-p_0)/(p_c-p_0)$ に比例して増大し、 $p=p_c$ において正規圧密領域の α の値に一致するように変化させている。図-2 に本研究で仮定した α と相対降伏応力指数の関係を示す。特性時間 t_c は正規圧密領域で求められた圧密係数 c_v から算定した水圧消散時間を設定した。これは $p < p_0$ の過圧密領域では大きな c_v 値をとるのに対し、沈下問題で載荷領域となる $p_0 < p < p_c$ の“擬似過圧密”領域では正規領域の c_v 値に近づく傾向を有していることを考慮したものである。こうしたパラメータ設定によって基準堆積ひずみ速度 $\dot{v}_0$ は、結果的に $p > p_c$ で一定最大値をとり、 $p_0 < p < p_c$ の応力領域では応力レベルが小さくなるにしたがって減少することになり、 $p=p_0$ において $0.1\dot{v}_0$ となる。

3. 解析結果

大阪湾から採取した洪積粘土試料に p_c を中心としてそれ以上、以下の種々の載荷応力レベルで一次元長期圧密試験を行って得られた結果⁸⁾を、本稿で提案する解析手法によって計算を行った。図-3、4 に Ma12 と Ma10 に対

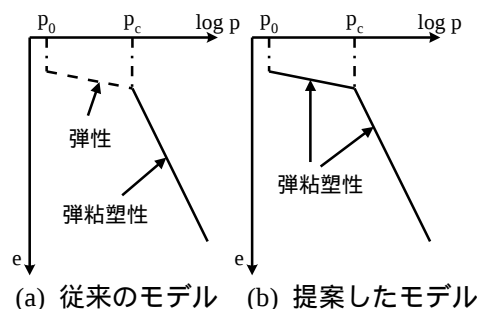


図-1 圧縮モデル

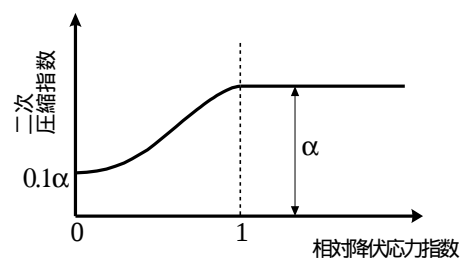


図-2 二次圧縮指数と相対降伏応力指数の関係

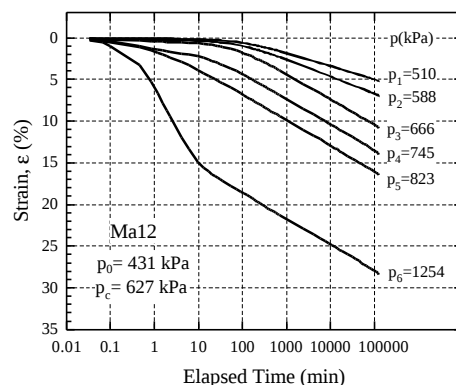


図-3 ひずみ - 時間関係(Ma12)

キーワード：擬似過圧密粘土，弾粘塑性 FEM，二次圧縮指数，時間依存性挙動

連絡先：(住所) 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 (電話) 0774-38-4091 (FAX) 0774-38-4094

するひずみ～対数時間関係の解析結果を示す。Ma12 については p_3 以上が、Ma10 に対しては p_4 以上が p_c を超える応力レベルでの载荷となっている。これらの結果から、载荷によって p_c を超える場合には初期段階で大きな圧縮ひずみが生じ、徐々に一定のいわゆる二次圧密状態に移行するのにに対し、 p_c 近傍ないしは以下に载荷応力がとどまる場合には、逆に時間の経過とともに遅れ変形が発生するモードとなっている。次に解析から得られた応力～ひずみ関係での比較を Ma12、Ma10 に対してそれぞれ図-5 および 6 に示す。時間の経過とともに圧縮が進行し、ひずみ速度が小さくなるにしたがって、ひずみ～ $\log p$ 曲線が下に移動する傾向を示している。一般的に標準圧密試験や CRS 圧密試験におけるひずみ速度では明確な降伏点が現れているのに対し、ひずみ速度が小さくなるとこうした特徴的な形状は消え、初期有効応力から応力の対数に対してほぼ直線的な圧縮曲線となる。さらに注目すべきことは、この遅れ圧縮が正規圧密領域にとどまらず、 p_c 以下の領域でも非常に顕著に現れることである。これらの解析結果は室内一次元長期圧密試験結果とほぼ定量的に表現している⁹⁾。図-7 には舞洲埋地基礎地盤の変形を解析し、各層の実測値と比較した結果を示す。上载荷重によって塑性降伏して正規圧密領域にはいる上部洪積粘土層 (Ma12, Ma11U) については従来の圧縮モデルと提案モデル両方ともに応力-変形特性をうまく評価している。一方、最終応力が p_c 近傍になる下部洪積粘土層 (Ma11L, Ma10) では、従来の圧縮モデルによる解析結果は沈下量を過小評価しているが、提案モデルによる解析結果は実測値とほぼ一致している。これは埋立による最終応力が p_c 以下であっても時間依存性が発揮されると仮定したことにより、現実の変形挙動を再現し得たためであると考えられる。Ma9 についてはまだ計測値の方がかなり大きくなっている。計測結果は Ma9 以深の沈下の合計であることを含め、深部の洪積粘土層の沈下の実態が未解明であることなどの課題を残している。

4. まとめ

大阪湾洪積粘土を正規圧密 aged 粘土と考え、過圧密領域においても洪積粘土の時間依存性挙動が発生すると仮定した新たな圧縮モデルを提案し、室内長期圧密試験結果と大阪湾舞洲洪積粘土地盤の沈下現象を弾粘塑性有限要素法によって解析した。提案したモデルを用いることにより、見かけの圧密降伏応力 p_c 以下の領域でも正規圧密粘土と同様、時間の経過とともに圧縮が生じることになり、室内長期圧密試験結果、および従来モデルでは過小評価した大阪湾舞洲埋地地下部洪積粘土層の沈下量を、精度良く表現できることがわかった。

参考文献

- 1) 赤い浩一, 佐野郁雄 (1981) : 大坂湾上部洪積粘土の長期圧密特性, 土と基礎, vol.29, No.3, pp.43-47.
- 2) 三村 衛他 (2002) : 大坂湾擬似過圧密洪積粘土の圧縮特性と長期沈下について, 第 46 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.99-102.
- 3) Sekiguchi, H. (1977) : Rheological Characteristics of Clays, *Proc. 9th ICSMFE*, Vol. 1, pp.289-292.
- 4) 関口秀雄他 (1988) : 京都大学防災研究所年報 No.31 B-2, pp.123-145.
- 5) 石井一郎他 (1984) : 港湾技術研資料, No.498, pp.47-86.
- 6) Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977) : Time and Stress Compressibility Interrelationship, *Proc. ASCE*, Vol.103, GT5, pp.417-430.
- 7) 田中洋行 (2003) : 私信
- 8) 大坂湾地盤情報の研究協議会 (2002) : ベイエリアの地盤と建設, pp.395-404.
- 9) 張祐榮, 三村衛 (2003) : 弾粘塑性 FEM による擬似過圧密洪積粘土の時間依存性挙動の評価について, 第 38 回地盤工学研究発表会投稿中

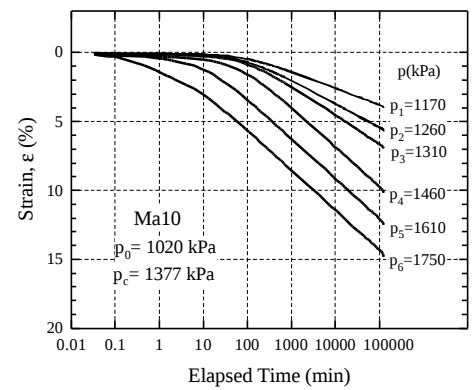


図-4 ひずみ - 時間関係(Ma10)

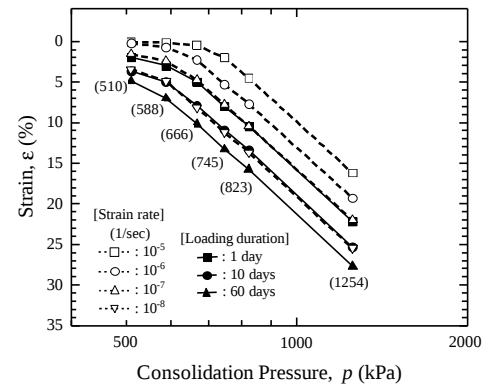


図-5 応力 - ひずみ関係(Ma12)

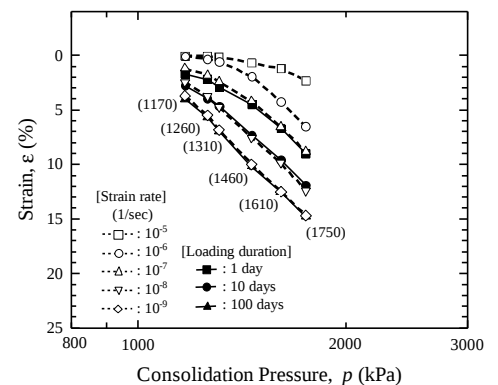


図-6 応力 - ひずみ関係(Ma10)

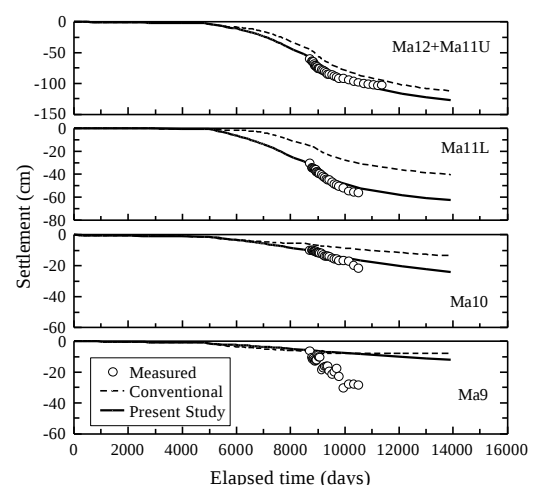


図-7 洪積各層の解析結果と実測値