

大阪湾粘土の長期圧密挙動に対する関口・太田モデルおよびSYSカムクレイモデルの適用性

港湾空港技術研究所	正会員	渡部 要一	金田 一広
応用地質	正会員	○宇高 薫	野坂 知正
関西国際空港用地造成	正会員		田端竹千穂
港湾空港技術研究所	正会員		森川 嘉之

1. はじめに

室内試験結果を用いて実地盤の圧密現象を評価するには、層厚に関する寸法効果を把握することが重要である。これまで筆者らは、大阪湾粘土に対し、長期圧密試験、分割型圧密試験（摩擦の影響を抑えた上で比較的層厚を厚くした圧密試験）などを実施してきた<sup>1)</sup>。一方、粘土の圧密現象を予測・評価するための手段としては数値解析が有効である。そこで、粘土の変形予測に広く使われている粘性を考慮した関口・太田モデル、ならびに過圧密や構造の劣化、異方性の変化を考慮できるSYSカムクレイモデル<sup>2)</sup>を用いて、大阪湾粘土の圧密挙動を評価した。

2. 試験方法

本研究では、大阪湾の沖積粘土Ma13を検討対象とする。Ma13を用いて再構成試料（圧密圧力98 kPa）を作製し、段階荷重圧密試験、三軸CU（等方圧密）試験、定ひずみ速度圧密試験（以下、CRS試験：圧縮ひずみ速度 $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ）を実施した。また、不攪乱のMa13を用いてCRS試験および長期圧密試験を実施した。長期圧密試験では、重錘式圧密試験機を用いて原位置の土被り圧 $\sigma'_{v0}$ まで段階荷重し、その後圧密降伏応力 $p_c$ および正規圧密領域となる $2p_c$ を圧密圧力として約2週間荷重した。供試体高さは2cm（最大排水距離：CRS試験2cm，長期圧密試験1cm）である。

3. 入力パラメータと試験・計算結果および考察

再構成試料に対する一連の試験より、SYSカムクレイモデルの圧縮指数 $\lambda$ 、膨張指数 $\kappa$ 、限界状態指数 $M$ を求めた。

$M$ は関口・太田モデルでも同じ値を入力することにした。その他の定数は、解析対象となる各試験の結果から読み取ったり、解析結果を試験結果にフィッティングさせたりして設定した。関口・太田モデル(解析コード:GeoFEM)のパラメータを表-1に、SYSカムクレイモデルのパラメータを表-2（詳細は参考文献2を参照）に示す。

CRS試験のシミュレーション結果を、 $e - \log p$ 関係として図-1に示す。関口・太田モデルの計算結果がバイリニア型を呈するのに対し、SYSカムクレイモデルでは、降伏後に最も勾配が急になり、その後徐々に緩やかになっていく挙動が、試験結果よりやや過大ではあるが再現できている。

図-2は、 $p_c$ 付近、 $2p_c$ (正規圧密領域)に荷重した長期圧密試験結果をシミュレートした際の間隙比の経時変化である。図中の試験結果は、大阪湾粘土の特徴である時間経過とともに沈下が継続する傾向を示す。

関口・太田モデルの計算結果は、試験期間内の実測値が良好に再現されている。

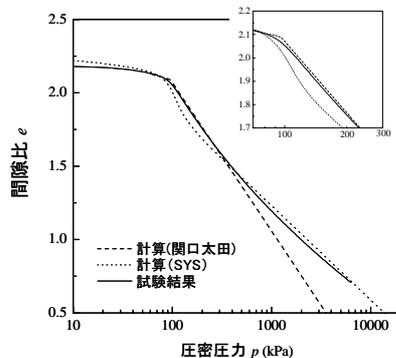


図-1 CRS試験結果の比較

表-1 関口・太田モデルの入力パラメータ

	不攪乱 (CRS)	不攪乱 (長期)
土被り圧力 $\sigma'_{v0}$ (kPa)	65	
土被り圧での間隙比 $e_0$	2.13	2.12
圧密降伏応力 $p_c$ (kPa)	106	
限界状態指数 $M$	1.4	
ポアソン比 $\nu$	0.3	
圧縮係数 $\lambda$	0.434	0.478
膨張指数 $\kappa$	0.087	0.096
二次圧密係数 $\alpha$	0.0042	0.0046
初期ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$1.0 \times 10^{-6}$	
初期透水係数 $k$ (cm/s)	$1.0 \times 10^{-7}$	
$e - \log k$ 関係: $\Delta \ln k / \Delta e$	3.0	

表-2 SYSカムクレイモデルの入力パラメータ

	再構成 (CRS)	不攪乱 (CRS)	不攪乱 (長期)
圧縮指数(再構成) $\lambda$	0.28		
膨張指数(再構成) $\kappa$	0.052		
限界状態指数(再構成) $M$	1.4		
NCLの切片(再構成) $N$	2.8		
ポアソン比 $\nu$	0.3		
正規圧密土化指数 $m$	7		
構造劣化指数 $a$	4.0	1.0	4.0
構造劣化指数 $b$	1.0		
構造劣化指数 $c$	1.4	1.0	1.4
回転硬化指数 $b_r$	0.001		
回転硬化限界指数 $m_b$	1.0		
拘束圧 $p'_0$ (kPa)	10		
比体積 $v_0$	2.97	3.23	3.11
構造の程度 $1/R_0^*$	1.2	2.8	3.1
過圧密の程度 $1/R_0$	9.0	7.0	13.0
異方性の程度	0.8		
初期透水係数 $k$ (cm/s)	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-8}$
$e - \log k$ 関係: $\Delta e / \Delta \ln k$	0.3	1.0	0.3

キーワード：長期圧密，圧縮曲線，弾粘塑性，粘土，構造

連絡先：〒112-0012東京都文京区大塚3-2-1，応用地質(株)東京本社，TEL.03-3946-3111.

一方、SYSカムクレイモデルでの計算結果は、いずれのケースとも沈下が完了している（間隙水圧が完全に消散した時点でそれ以上沈下しない）。 $p_c$ のケースでは、 $t=1 \times 10^2$ min付近で沈下が鈍る過程が見られる。そこで、 $p_c$ のケースについて、間隙比 $e$ 、過剰間隙水圧 $u$ 、 $R$ （過圧密の程度）および $R^*$ （構造の程度）の等時曲線を整理し、図-3に示す。いずれの図も、上面からの排水に伴い、過圧密の解消（ $R \rightarrow 1$ ）や構造の劣化（ $R^* \rightarrow 1$ ）が下方に伝播している様子がわかる。

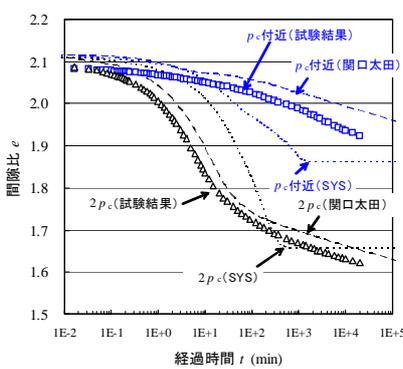


図-2 長期圧密の比較

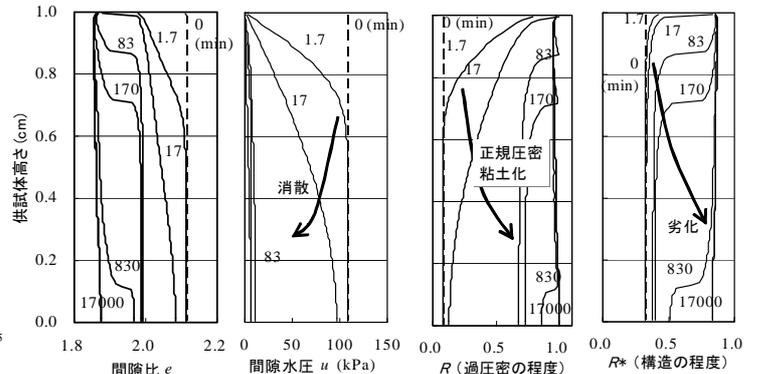


図-3 間隙比、間隙水圧、 $R$ および $R^*$ の等時曲線

は、 $t=1 \times 10^2$ min付近で沈下が鈍る過程が見られる。そこで、 $p_c$ のケースについて、間隙比 $e$ 、過剰間隙水圧 $u$ 、 $R$ （過圧密の程度）および $R^*$ （構造の程度）の等時曲線を整理し、図-3に示す。いずれの図も、上面からの排水に伴い、過圧密の解消（ $R \rightarrow 1$ ）や構造の劣化（ $R^* \rightarrow 1$ ）が下方に伝播している様子がわかる。

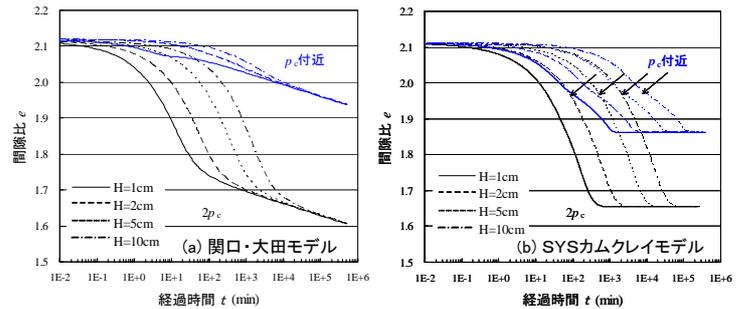


図-4 間隙比の経時変化

排水距離 $H=1, 2, 5, 10$ cmに対して各モデルを用いて計算した結果として、間隙比の経時変化を図-4に、間隙水圧比の経時変化を図-5にそれぞれ示す。図-4(a)は関口・太田モデルの結果であるが、いずれのケースでも二次圧密過程では最終的に一つの直線に収束する「タイプB」挙動となっている。図-4(b)はSYSカムクレイモデルの結果であり、いずれのケースでも図-5(b)に示した間隙水圧比が消散し終わった時点で沈下が完全に止まる。なお、前述したように $p_c$ のケースでは、どのケースも変曲箇所が認められる（図中矢印）。

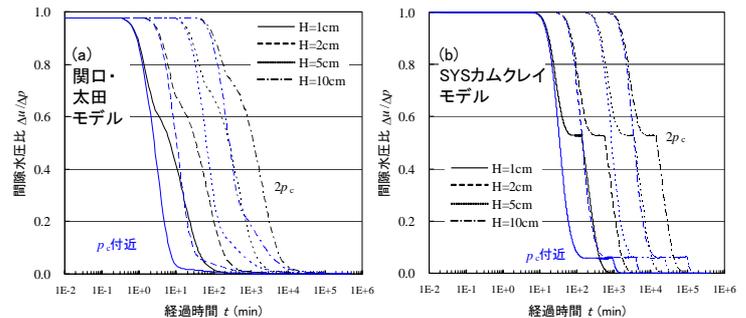


図-5 間隙水圧比の経時変化

図-5(b)のSYSカムクレイモデルの $p_c$ のケースでは、前述の沈下挙動に変曲点が見れる時刻で間隙水圧の消散が一時的に停滞している。これは、一次圧密による間隙水圧の消散がほぼ終了した後、構造の劣化に伴う間隙水圧の湧き出しがあるためと考えられる。これにより、SYSカムクレイモデルでは遅れ沈下を表現している。なお、 $2p_c$ のケースでも間隙水圧比50%程度で同様の停滞現象が認められるが、構造の劣化に比較して大きな荷重による圧密沈下が卓越しているため、間隙比の変化に変曲点は現れていない。図-6は、 $p_c$ のケースについて、時間軸を排水距離の2乗で除して間隙比の経時変化を示したものである。この図より、関口・太田モデルでは、一次圧密は一つの曲線となるが、二次圧密は平行な直線となって表されており、一次圧密は $H^2$ 則に従うが、二次圧密は $H^2$ 則に従わないことがわかる。なお、二次圧密は勾配 $\alpha$ で沈下し続けるため、超長期予測を考える際には沈下が止まらず、当該モデルの適用は難しいといえる。一方、SYSカムクレイモデルによる結果は全てのケースが重なり、一次圧密から構造の劣化に伴う二次圧密まで、排水距離によらず $H^2$ 則が成立していることになり実験事実<sup>1)</sup>と異なる。現時点では圧密に要する時間が過小評価され、試験結果を再現できていないものの、いつかは沈下が止まることを表現しており、この意味においては現実的でもある。今後、クリープ特性の卓越した大阪湾粘土を評価するために、SYSカムクレイモデルの改良などを含め、さらなる検討をしていく予定である。

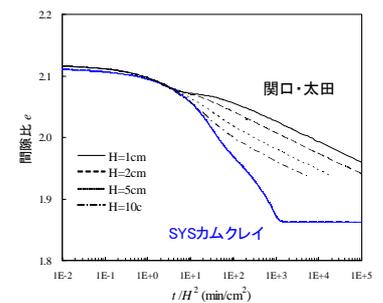


図-6  $e - t/H^2$  関係

関口・太田モデルでは、一次圧密は一つの曲線となるが、二次圧密は平行な直線となって表されており、一次圧密は $H^2$ 則に従うが、二次圧密は $H^2$ 則に従わないことがわかる。なお、二次圧密は勾配 $\alpha$ で沈下し続けるため、超長期予測を考える際には沈下が止まらず、当該モデルの適用は難しいといえる。一方、SYSカムクレイモデルによる結果は全てのケースが重なり、一次圧密から構造の劣化に伴う二次圧密まで、排水距離によらず $H^2$ 則が成立していることになり実験事実<sup>1)</sup>と異なる。現時点では圧密に要する時間が過小評価され、試験結果を再現できていないものの、いつかは沈下が止まることを表現しており、この意味においては現実的でもある。今後、クリープ特性の卓越した大阪湾粘土を評価するために、SYSカムクレイモデルの改良などを含め、さらなる検討をしていく予定である。

参考文献 1) 田中ら(2004): 大阪湾洪積粘土の圧密特性に及ぼす層厚の影響, 第39回地盤工学研究発表会, 908-909; 2) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.