

粘土骨格の粘弾性圧縮を考慮した一次元圧密解析

東海大学大学院 学生会員 ○井野 大星
東海大学工学部 正会員 本間 重雄

1. まえがき

室内の標準圧密試験では, Terzaghi 理論による過剰間隙水圧が消散した後も粘土骨格の粘性変形に基づく圧縮(クリープ変形)が継続し, Terzaghi 理論に従う圧密沈下を一次圧密, 過剰間隙水圧が消散した後も一定有効応力のもとで圧密が進行する部分を二次圧密と称している. 二次圧密の要因として, 粘土構造骨格が時間依存の遅延圧縮を伴うことが多くの研究から明らかとなっている¹⁾. 本研究は, 粘土骨格の構成式として瞬時圧縮と粘性変形(遅延圧縮)が同時に進行する Maxwell モデルを用いた一次元圧密方程式を誘導し, 一次圧密中から発生する粘性変形が粘土骨格のひずみに依存した粘性係数の増加によって進行することを示す. さらに, 粘性係数の増加(硬化)率が標準圧密試験で得られる二次圧密係数で与えられることを明らかにし, 粘土層厚の増大に伴うアイソタックの問題についても考察する.

2. 粘弾性構成式に基づく一次元圧密方程式

Terzaghi の一次元圧密方程式では粘土骨格の圧縮特性を線形弾性体(m_v)と仮定しているが, ここでは圧密の全過程を通じて進行する粘弾性圧縮を表現するため, 図-1 に示す Maxwell モデルを骨格変形の構成式として考える.

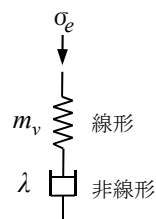


図-1 Maxwell 体

Maxwell 体の応力-ひずみ関係は次式で与えられる.^{2,3)}

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_e}{G} + \frac{\sigma_e}{\eta} \quad (1)$$

ここに, G はせん断弾性係数, η は粘性係数, σ_e は作用応力(有効応力)である. 横方向への変形が拘束された鉛直一次元圧縮の状態に対しては, 式(1)は次のようになる.

$$\dot{\varepsilon} = m_v \dot{\sigma}_e + \frac{\sigma_e}{\lambda} \quad (2)$$

ここに, m_v は体積圧縮係数, λ は骨格の体積粘性係数である. 二次圧密の状態, すなわち過剰間隙水圧が完全に消散し, 骨格に作用する有効応力 σ_e が一定の状態($\dot{\sigma}_e = 0$)に対して式(2)を時間に関し積分すると

$$\varepsilon = \frac{\sigma_e t}{\lambda} + C \quad (3)$$

となり, 時間 $t = 0$ で $\varepsilon = 0$ とすれば($C = 0$), ひずみ ε は時間 t に比例するが時間の対数には比例しない. そこで, 式(2)の粘性係数 λ がひずみ ε の指数関数により増加すると仮定すると

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_e}{\lambda_0 e^{a\varepsilon}} \quad (4)$$

と書ける. ここに, λ_0 は $\varepsilon = 0$ のときの粘性係数である. 上式を積分すると

$$\frac{1}{a} e^{a\varepsilon} = \frac{\sigma_e t}{\lambda_0} + C \quad (5)$$

となり, 時間 $t = 0$ で $\varepsilon = 0$ とすれば積分定数は $C = 1/a$ と求まる. よって

$$e^{a\varepsilon} = \frac{a\sigma_e}{\lambda_0} t + 1 \quad (6)$$

と表され, 両辺の対数をとると

$$\varepsilon = \frac{1}{a} \ln\left(\frac{a\sigma_e}{\lambda_0} t + 1\right) \quad (7)$$

となる. 上式より有効応力 σ_e 一定, 粘土の圧密開始時の初期粘性係数 λ_0 および定数 a が一定の状態では, 粘土骨格のひずみは時間の対数に比例して増加することがわかる. 式(4)で導入した定数 a は, 粘土の粘性係数がひずみの増大すなわち圧密の進行につれて増加する際の増加率を示す.

式(2)を間隙水の連続式(8)に代入し

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (8)$$

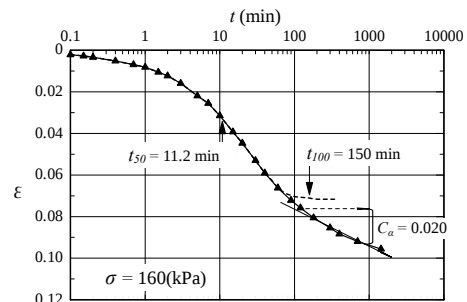
流速 v にダルシーの法則を適用すると次式が得られる.

$$m_v \frac{\partial \sigma_e}{\partial t} + \frac{\sigma_e}{\lambda_0 e^{a\varepsilon}} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \sigma_e}{\partial z^2} \quad (9)$$

式(9)は粘土骨格を伝搬する有効応力に関する一次元圧密方程式であり, 左辺 2 項目の粘性圧縮が加わる以外は Terzaghi の熱伝導型方程式と同型である. 粘土の初期粘性係数 λ_0 の大きさについては, 二次圧密区間での適当な時間 t_s におけるひずみ量を標準圧密試験結果から読み取り, 式(6)を用いて次のように求められる.

$$\lambda_0 = \frac{a\sigma_e t_s}{e^{a\varepsilon} - 1} \quad (10)$$

3. 圧密試験結果に対する再現性

図-2 圧密試験結果⁴⁾

キーワード : 二次圧密, 有効応力, 粘弾性, アイソタック

連絡先 : 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学工学部 Tel 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

次に、誘導した粘弾性圧密方程式(9)の圧密試験結果に対する再現性を検討する。図-2 は(社)地盤工学会が、土質試験法の基準書として発刊している「土の試験実習書⁴⁾」の圧密試験法に示されている段階載荷圧密試験結果の中の圧密圧力 $p=160$ kPa の時間-圧密率曲線である。図-2 には、測定された圧密率-時間曲線に曲線定規法(図中破線)を適用して得られた一次圧密終了時間や50%圧密時間ならびに二次圧密係数を示してある。

表-1 圧密定数の比較

σ (kPa)	弾性				粘弾性			
	t_{100} (min)	C_v (cm ² /min)	m_v (kPa ⁻¹)	k (cm/s)	m_v (kPa ⁻¹)	k (cm/s)	λ_0 (kPa·s)	a
80	75	2.65×10^{-2}	1.40×10^{-3}	6.2×10^{-8}	2.32×10^{-4}	2.5×10^{-8}	1.2×10^5	140
160	150	1.39×10^{-2}	1.14×10^{-3}	2.6×10^{-8}	2.14×10^{-4}	9.0×10^{-9}	9.9×10^3	115
320	80	1.75×10^{-2}	5.48×10^{-4}	1.6×10^{-8}	1.21×10^{-4}	6.0×10^{-9}	9.5×10^3	130

表-1 は圧密試験結果(圧密圧力 $p=80, 160, 320$ kPa)に対し曲線定規法によって得られた圧密定数と粘弾性圧密方程式から得られた圧密定数を比較したものである。粘弾性構成式から得られた体積圧縮係数は弾性構成式(Terzaghi 理論)の約 1/5、透水係数は約 1/3 の大きさとなっている。粘性増加係数は 130 前後の一定値を示しており、これは試験結果例ではほぼ同じ大きさの二次圧密係数が得られているためである。初期粘性係数は荷重段階 80kPa で大きな値を示しているが、160, 320 kPa ではほぼ同じ大きさとなっている。これらの結果から、一次圧密中の瞬時圧縮の大きさは Terzaghi 理論で見かけ上求まる圧縮率よりもかなり小さく、瞬時圧縮と粘性圧縮とが同時に進行する粘弾性構成式に基づく圧密方程式では、それらの成分を分離して求めることが可能である。

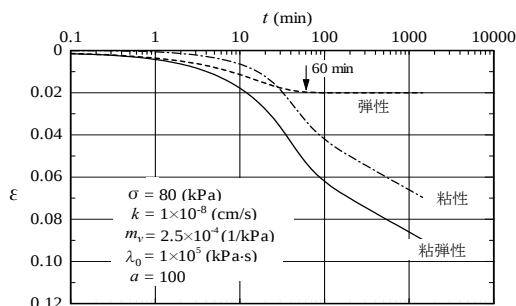


図-3 弾性圧縮と粘性圧縮の沈下成分

そこで、表-1 より代表的な粘弾性定数を採用して圧密数値計算を行い、弾性圧縮による沈下成分と粘性圧縮による沈下成分を分離して示したのが図-3 である($\sigma=80$ kPa)。弾性圧縮によるひずみは圧密初期に顕著に現れるが、その全ひずみ量は2%とかなり小さいので、 m_v の非線形性(C_c の利用等)を考慮する必要は小さいと思われる。図-3 の圧密率-時間曲線より、室内の標準圧密試験で得られるひずみは試験開始初期を除きその大半が粘性圧縮によって生じていることが窺われる。このことが他の広範な自然堆積粘土についても同様に見られるのか、実験を通じて検証していく必要がある。

4. 粘土層圧に対する粘性圧縮の影響

最後に、室内において層厚 2cm の粘土供試体に対して行われる標準圧密試験から得られる圧密定数をもとに、原位置における厚い飽和粘土地盤の圧密沈下計算を行う際の問題について考察する。これはいわゆる圧密現象における相似則に係わる問題である。図-4 は図-3 で用いた粘弾性圧密定数を用い、粘土層厚を2倍, 10倍, 50倍, 500倍に変えて粘弾性圧密数値計算を行って得られた圧密率-時間曲線を示したものである。図中の矢印は弾性圧縮による圧密が完了したときのひずみと時間を示している。図-4 より粘土層圧が増大するにつれ、弾性圧縮の終了時間は排出距離の2乗に比例して増加し、排出距離の2乗則が成立している。弾性圧縮が終了した後の圧密率変化は同じ二次圧密曲線に収斂し、いわゆるアイソタックが成立している。このことは、粘土の骨格点(物体点)に関する応力-ひずみ関係に関する構成則が同一である限りひずみの発生率は同一であることを意味する。

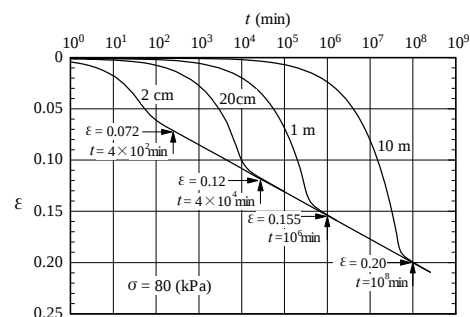


図-4 粘弾性圧密数値計算による圧密曲線

粘土層圧の増大に対する圧密の時間的遅れは排水距離の増大に伴う排水時間の遅れによって生じ、アイソタックの不成立には透水則の非線形性(非ダルシー流れ)が関与するのではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究は、粘土構造骨格の粘性圧縮を取り入れた粘弾性圧密方程式を示し、方程式に含まれる圧密定数の力学的特性について考察するとともに、室内で行われる標準圧密試験結果に対し理論の再現性を検討したものである。ここで展開した粘弾性圧密方程式は、瞬時圧縮と粘性圧縮を単純な粘弾性体として方程式に取り込み、含まれる圧密定数が現行の標準圧密試験結果から容易に決定可能であることが大きな利点と考えられる。

参考文献

- 1) 今井五郎「飽和土の一次元圧密、わかりやすい土質力学原論(第1回改訂版)」地盤工学会, pp.187-239 (1992)
- 2) Y.C. Fung / 大橋義夫・村上澄男・神谷紀生共訳「連続体の力学入門」培風館, pp.189-231 (1973)
- 3) Y. Klausner: Fundamentals of Continuum Mechanics of Soils, Chap.11 Volumetric Stress-Strain Phenomena, Springer-Verlag London, pp.263-342 (1991)
- 4) 地盤工学会「土の試験実習書—第二回改訂版—」, 第18章 圧密試験, pp.121-132 (1992)