

一次元圧密における排水距離と時間効果について

東海大学工学部 正会員 ○杉山 太宏, 赤石 勝
(株)建設企画コンサルタント 正会員 白子 博明

1. まえがき

現場の長期沈下観測記録や最近の研究では、粘土地盤の二次圧密は一次圧密中から発生し、また時間の対数にはほぼ比例して長期間生じることが明らかにされている^{1),2)}。一次元圧密量つまり飽和粘土の間隙比の減少が対数時間に比例して無限に続く、という二次圧密の仮定に問題はあるが、二次圧密沈下量はある程度の期間で無視できる大きさになることが多いため、実用的には合理的な仮定と考えられる^{3),4)}。

この報告は、現場の二次圧密を含む一次元圧密解析を実施する場合、時間の対数に比例する二次圧密がいつからどの程度の大きさで発生すると仮定すべきかについて検討したものである。最大排水距離の異なる圧密供試体の圧密量時間関係、いわゆる寸法効果に対して、既往の二次圧密評価式^{5),6)}に圧密度を導入することで計算結果に与える影響を検討するとともに、排水距離を変化させた実験によって考察している。

2. 二次圧密を含む一次元圧密の計算法

正規圧密飽和粘土の有効応力 σ' による間隙比 e の変化は、式(1)で表される^{5),6)}。

$$e = e_0 - C_c \log(\sigma' / \sigma'_0) - C_\alpha \log(t / t_x) \quad (1)$$
ここに、 C_c は圧縮指数、 C_α は二次圧密係数、 t は圧密層内各点の圧密開始後の時間、 t_x は二次圧密の開始時間、 σ' と e のサフィックス0は圧密前の初期状態を表す。間隙比の全微分は式(2)で、また式(2)右辺の各項は式(2.a)、式(2.b)で表される。

$$de = de_p + de_s \quad (2)$$

$$de_p = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' = - \frac{0.4343 C_c}{\sigma'} d\sigma' = m_p \cdot d\sigma' \quad (2.a), \quad de_s = \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right) dt = - \frac{0.4343 C_\alpha}{t} dt = m_s \cdot dt \quad (2.b)$$

この報告では、式(2.a)の有効応力の変化に伴う間隙比の変化量 de_p を一次圧密量、式(2.b)の時間の変化に伴う間隙比の変化量 de_s を二次圧密量と呼ぶ。式(2)を一次元圧密方程式(3)に代入すると式(4)が得られる。ただし、式(4)では圧密中載荷重一定と仮定している。

$$\frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right)_t \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{k(1+e_0)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_\sigma \quad (4)$$

ここに、 k は透水係数、 γ_w は水の単位体積重量、 u は過剰間隙水圧、 y は距離である。

ところで、式(2.b)では式(1)の二次圧密開始時間 t_x をEOP以前としても、圧密による有効応力増加の有無にかかわらず二次圧密が発生する。一次元圧密中に生じる二次圧密のメカニズムが明確でない現状では、式(2.b)も一案と考えられるが、著者らは圧密開始前の二次圧密の影響が無視できて、さらに粘土の初期状態が同じであれば、有効応力の増加と同時に二次圧密が発生すると考えている。そこで、式(2.b)に圧密度 U_y を掛けて有効応力の増分を表す式(5)を提案し、有効応力に依らない式(2.b)の計算結果と比較する。

$$de_s = \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_\sigma U_y dt = - \frac{0.4343 C_\alpha}{t} U_y \cdot dt = m_s \cdot U_y \cdot dt \quad (5)$$

表-1 計算条件

圧縮指数 C_c	1.0
二次圧密係数 C_α	0.04
初期間隙比 e_0	2.0
圧密係数 C_v (cm ² /min)	0.1
初期圧密圧力 σ_0 (kPa)	98
圧密荷重増分 $\Delta\sigma$ (kPa)	98

3. 差分計算式と計算結果

二次圧密を含む一次元圧密方程式(4)を差分表示すると式(6)が得られる。

$$u_{y,t+dt} = u_{y,t} + \alpha (u_{y+dy,t} - 2u_{y,t} + u_{y-dy,t}) + m_s \cdot dt / m_p \quad (6)$$

ここに、 $\alpha = dt \cdot c_v / dy^2 \leq 0.5$ 、 $c_v = k(1+e_0) / \gamma_w / m_p$ である。表-1のように土質

定数と圧密条件を仮定し、二次圧密開始時間 t_x は圧密層内各点における圧密開始時間として、式(6)による差分計算を行った。式(2.b)と提案式(5)により、二次圧密を含む圧密量時間関係を求めた結果が図-1と図-2ある。

Key words : 一次元圧密, 二次圧密, 時間効果, 差分法, 排水距離

〒259-1207 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学土木工学科 TEL 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

図一1では、当然のことながら一次圧密終了後、層内各点の圧密量がすべて同じ大きさに収束してゆく。また図一2では、層内各点の圧密量は有効応力の増加に応じた二次圧密発生の遅れに対応して平行線となる。両式によって、最大排水距離 H の異なる圧密量時間関係を計算したのが図一3である。一次圧密終了後、最大排水距離の異なる圧密量時間関係が重なり合う場合と、平行線になる2通りの計算結果が得られた。しかし、これらの計算結果は、一次圧密中から二次圧密が発生すると仮定し、時間 t_x を明確にしている点で Ladd が示した仮説 A, B⁷⁾ のいずれとも異なる結果である。

4. 圧密試験の方法ならびに実験結果

液性限界以上の含水比で練返した粘土をリング直径 $D=20\text{cm}$ と $D=6\text{cm}$ の一次元圧密試験機に詰め、予圧密荷重 $p_0=9.8\text{kPa}$ で圧密した。圧密時間は最大排水距離 H の自乗に比例させるため、 $D=20\text{cm}$ で12日間、 $D=6\text{cm}$ で1日間とした。供試体高さ h は $D=20\text{cm}$ で $h=7\text{cm}$ 、 $D=6\text{cm}$ で $h=2\text{cm}$ 、排水は両面排水である。予圧密終了後、試料の上端をわずかにカットして、試料の直径 D と高さ H の比 D/H がほぼ3になるよう調節した。供試体成形後 p_0 で再び1日間圧密した後、圧密荷重増分 $\Delta p=29.4\text{kPa}$ で圧密を行った。また、 $D=6\text{cm}$ 、 $h=2\text{cm}$ の一次元圧密試験機3台を直列に連結し($H=6\text{cm}$)、片面排水条件で36日間予圧密した。その後、圧密荷重増分 $\Delta p=29.4\text{kPa}$ で圧密して経時変化を測定した。

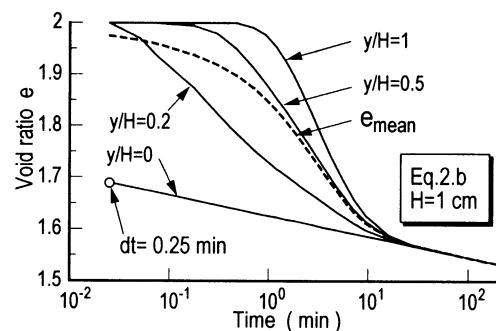
図一4は、3種類の最大排水距離で行った圧密試験結果である。図から明らかなように、最大排水距離の異なる供試体の圧密量時間曲線は、一次圧密終了後重なり合わず互いにほぼ平行である。図一4の実験と同じ条件で、式(5)により二次圧密を含む一次元圧密解析を実施した結果が図一5である。解析に必要な圧密係数 c_v と二次圧密係数 C_α は $H=1\text{cm}$ の圧密量時間曲線から求め、他の定数とともに図中に示した。計算結果は実験結果と良く一致し、提案式(5)の妥当性を示している。

5. まとめ

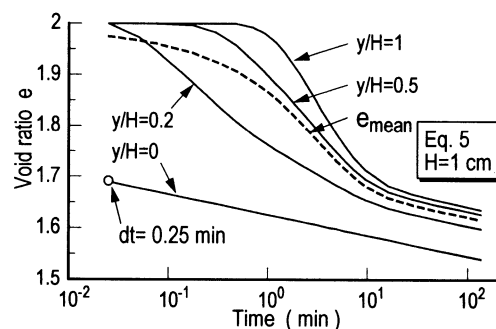
一次圧密中の二次圧密は、有効応力の増加に伴い発生し、その大きさは圧密層内各点において圧密度($0\sim 1$)に支配されると仮定した二次圧密式を提案した。最大排水距離の異なる一次元圧密の圧密量時間曲線は、有効応力に依存しない既往の二次圧密式が一次圧密終了後互いに重なり合うのに対し、提案式では平行となる結果が得られた。また、提案式は実験結果の妥当性を示すものであった。

—参考文献—

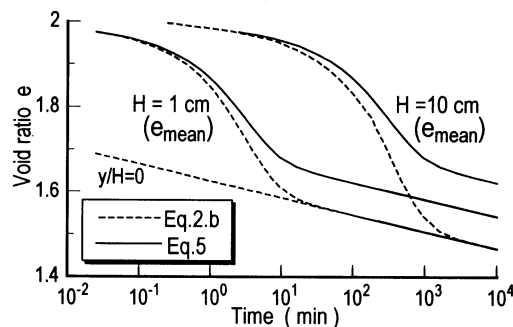
- 1) Imai, G.: A constitutive equation of one-dimensional consolidation derived from interconnected tests, Soil and Foundations Vol.32, No.2, pp.88-96, 1992.
- 2) 日本道路公団試験所: 軟弱地盤における盛土の沈下事例集, 試験所技術資料 No.302, 1977.
- 3) Mesri, G. et al.: Secondary compression of peat with or without surcharging J. Geotech. Engrg. ASCE, 105(1), pp.106-113, 1997.
- 4) Sekiguchi, H. and Torihara, M.: Theory of one dimensional consolidation of clays with consideration of their reological properties, Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp.27-44, 1976.
- 5) Mesri, G. and Rokhsar, A.: Theory of consolidation for clays, J. Geotech. Eng. ASCE, 100(8), pp.889-904, 1974.
- 6) Imai, G.: Analytical examinations of the foundations to formulate consolidation phenomena with inherent time-dependence, Key Note Lecture at IS-Hirosima 1995 may 10.
- 7) Ladd, C.C. et al.: Stress Deformation and Strength Characteristics SOA Report, Proc. IX of ICSMFE, Vol.1, pp.421-494, Tokyo, 1977.



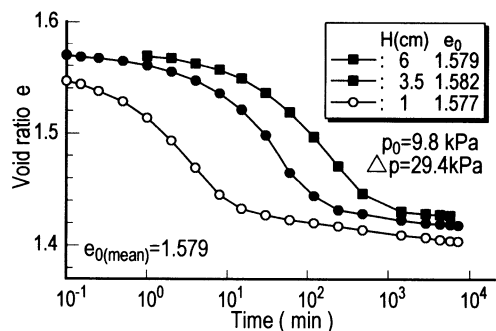
図一1 式(2.b)による計算結果



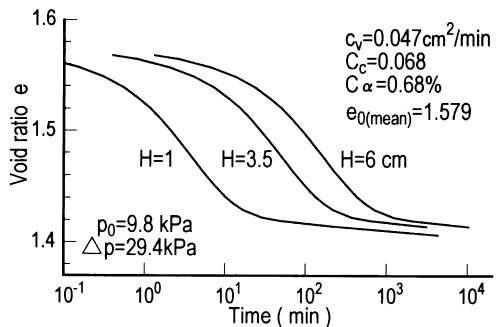
図一2 提案式(5)による計算結果



図一3 排水距離による計算結果の比較



図一4 圧密試験の間隔比時間関係



図一5 圧密試験の計算結果