

二次圧密を考慮した圧密沈下計算方法の提案

A Proposal on a Calculation Method to Predict Consolidation Settlement Considering Secondary Consolidation

寺 田 邦 雄 (てらだ くにお)

(株)竹中工務店大阪本店設計部

1. はじめに

建物の設計で、圧密沈下量を精度良く予測することが要求されるが、従来は Terzaghi (テルツァーギ) 理論に基づく一次圧密のみの解析を行っていた。圧密には一次圧密だけでなく、二次圧密も存在する。近年では、計算機の発達もあり、関口-太田モデル¹⁾などの二次圧密を考慮した構成式を用いて、有限要素法により圧密沈下解析が行われている。しかし、これらの解析に必要な定数は標準圧密試験結果より得られた圧縮指数、二次圧密係数と圧密降伏応力を用いている。これらの定数にはいくつかの問題を含んでいる。著者はこれらの定数を検討し、二次圧密を含む一次元圧密沈下計算方法について検討したので、以下に報告する。

2. 一次圧密と二次圧密の関係

2.1 分割型定荷重圧密試験³⁾

標準圧密試験で一定荷重を载荷した場合、粘土構造は (a)間隙水圧の変化に関係するが時間には影響されない Terzaghi の一次圧密に相当する有効拘束圧に関する部分と、(b)時間に影響されるが間隙水圧とは無関係の二次圧密に見られるセメンテーションに関する部分とで安定した状態に至ると考える。Taylor (テイラー) の考え³⁾に従い、(a)と(b)が载荷初期から同時に働くと考えた。したがって、分割载荷する場合、各分割载荷重をすべて24時間载荷するのではなく、この区間の荷重を2分割すると各荷重の载荷時間は12時間、4分割のときは6時間とする。ただし、各载荷荷重期間は、一次圧密完了時間を越えているものとする²⁾。

大阪市内の洪積粘土層から採取した不攪乱試料を用いて圧密試験を実施した。その粘土のコンシステンシーを表1のAに示す。24時間载荷の e - $\log p$ 曲線を図1に△でプロットし、12時間载荷のそれを同図に○でプロットした。Leonard (レオナルド) らの実験結果⁴⁾と異なり、24時間载荷 (標準圧密) と12時間载荷 (分割载荷) の e - $\log p$ 曲線は同一の e - $\log p$ 曲線を示した。

2.2 一次圧密と二次圧密の分離

図1の△で示すデータより、载荷重が過圧密領域にある $p=78.5 \rightarrow 157 \text{ kN/m}^2$ の場合の d - t 曲線を△で図2にプロットした。载荷重が正規圧密領域にある $p=1256 \rightarrow 2511 \text{ kN/m}^2$ の場合の d - t 曲線を同図に○でプ

表1 洪積粘土のコンシステンシー (%)

記号	場 所	w_L	w_p	w
A	大阪市内	112	35	65
B	大阪市内	86	29	59
C	ポートアイランド	84	22	46
D	六甲アイランド	125	35	66
E	六甲アイランド	98	33	65

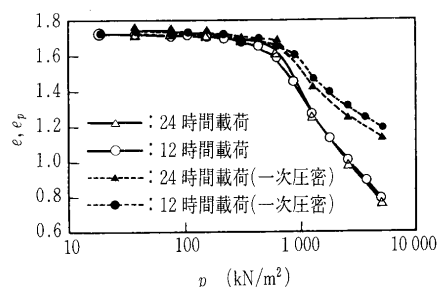


図1 e, e_p - $\log p$ 曲線

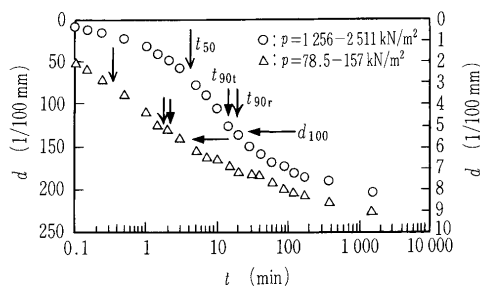


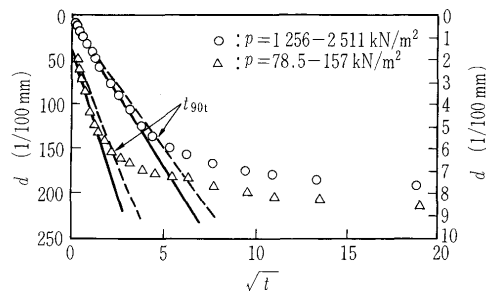
図2 d - $\log t$ 曲線

ロットした。△の変位量の日盛りは図の右側で、○のそれは左側である。そして、曲線定規法で求めた t_{50} (理論圧密度50%に当たる時間) と d_{100} (理論圧密度100%に当たる変位計の読み) を→で示す。 t_{50} の値を式(1)に代入して t_{90r} (曲線定規法による理論圧密度90%に当たる時間) を計算した。それを同図に→で示す。

$$t_{90r} = 0.848 / 0.197 \times t_{50} \quad \cdots \cdots (1)$$

同様に時間軸を $\sqrt{t}$ 目盛りとした場合の d - t 曲線を図3に示す。同図に t_{90t} ($\sqrt{t}$ 法による理論圧密度90%に当たる時間) を示す。この t_{90t} の値を図2にプロットする。 t_{90r} と t_{90t} はほぼ同じ値を示した。

このことから、「 d - t 曲線の初期の部分は Terzaghi 理論による一次圧密で、その後二次圧密が発生する」とす

図—3 $d-\sqrt{t}$ 曲線

る。一次圧密の後、二次圧密が発生すると仮定した場合、間隙比の変化は式(2)で表せる。したがって、定荷重圧密試験による間隙比の変化は式(3)となる。

$$\Delta e = \Delta e_p + \Delta e_s = r \Delta e + (1-r) \Delta e \quad \cdots \cdots (2)$$

$$e_0 - \sum \Delta e = e_0 - (\sum \Delta e_p + \sum \Delta e_s)$$

$$= (e_0 - \sum \Delta e_p) + \sum \Delta e_s \quad \cdots \cdots (3)$$

ただし、 Δe : Δp 荷重載荷による24時間での間隙比の変化量、 Δe_p : 一次圧密量 (Δp 荷重載荷による有効応力の変化に関する間隙比の変化)、 Δe_s : 二次圧密量 (Δp 荷重載荷によるクリープに関する間隙比の変化)、 r : 一次圧密比、 e_0 : 初期間隙比

図—1に示す○と△のデータを用いて、一次圧密による間隙比の変化である $e_p (= e_0 - \sum \Delta e_p) - \log p$ 曲線を求め、同図に●と▲でプロットした。これらのデータの二次圧密係数を式(4)で求め、載荷重に対して図—4にプロットした。

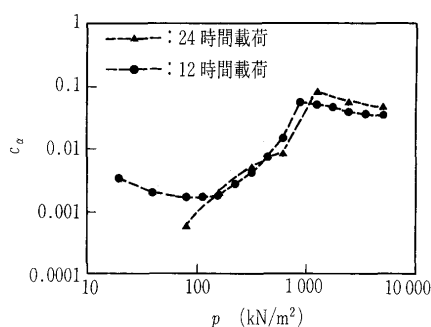
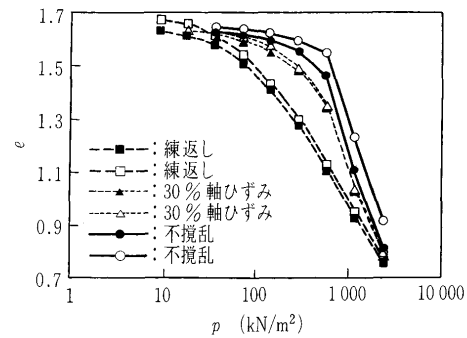
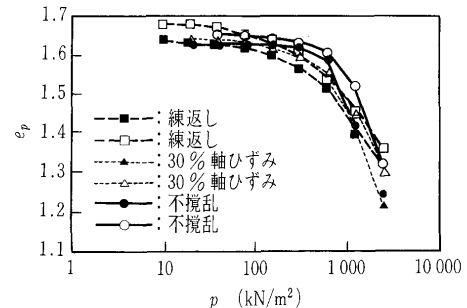
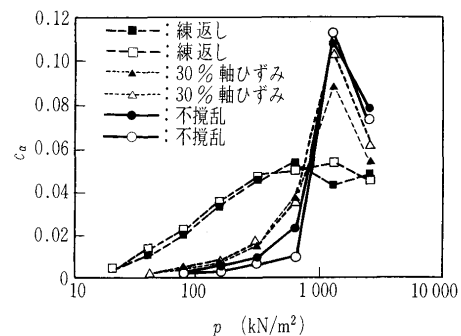
$$c_\alpha = \Delta e_s / \log(1440/t_c) \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし、 t_c : 二次圧密開始時刻 (d_{100} の時間 (min))

図—1と図—4の $e - \log p$ 曲線の比較より、標準圧密試験と分割載荷試験の $e - \log p$ 曲線が同じであると、両者の $e_p - \log p$ 曲線や $c_\alpha - \log p$ 曲線もほぼ同じとなるといえる。

2.3 $e - \log p$ 曲線と試料の乱れ

建築現場の掘削底 (G.L.-11 m の深度) より洪積粘土のブロックサンプルを採取した。この試料のコンシステンシーを表—1のBに示す。この試料を用いて、Schmertmann (シュマートマン) の方法による三つの乱れの程度⁵⁾で供試体を作成し、標準圧密試験を行った。

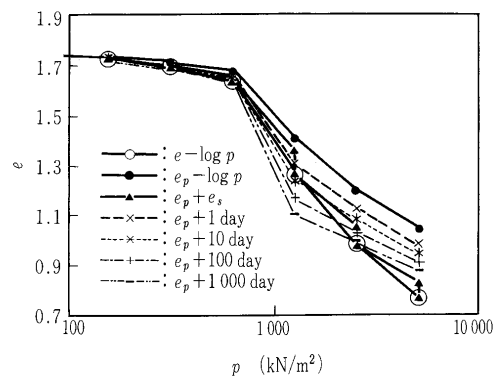
図—4 $c_\alpha - \log p$ 曲線図—5 $e - \log p$ 曲線と乱れの関係図—6 $e_p - \log p$ 曲線と乱れの関係図—7 $c_\alpha - \log p$ 曲線と乱れの関係

その $e - \log p$ 曲線と乱れの影響を図—5に示す⁶⁾。上記と同様にして、これらの $e - \log p$ 曲線より $e_p - \log p$ と $c_\alpha - \log p$ の関係を求め、図—6と7にプロットする。 $e_p - \log p$ 曲線は $e - \log p$ 曲線に比較して、試料の乱れに対する変化は小さい。しかし、二次圧密係数は試料の乱れに対して敏感で、試料の乱れとともに、 c_α の値は過圧密領域では大きく、正規圧密領域では小さくなっている。特に、 p_c 値直後では大きく低下している。

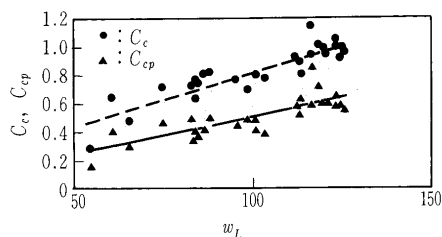
3. 土質定数の検討

3.1 圧縮指数

先述した図—1の標準圧密試験の $e - \log p$ 曲線を図—8に○でプロットする。 $\Delta e = \Delta e_p + \Delta e_s$ の関係より、この曲線を各載荷段階で一次圧密と二次圧密に分離して▲でプロットした。一次圧密による間隙比の変化である $e_p (= e_0 - \sum \Delta e_p) - \log p$ 曲線を同図に●でプロットした。Crawford (クロウフォード)⁷⁾が一次圧密終了時の $e_p - \log p$ 曲線と標準圧密試験の $e - \log p$ 曲線が平行になるとしているが、同図では、荷重が大きくなるに連れて、両曲線の e_p と e の差が大きくなっている。 $e - \log p$ 曲線よ



図—8 一次圧密と二次圧密の分離



図—9 圧縮指数と液性限界の関係

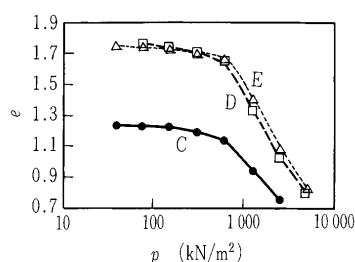
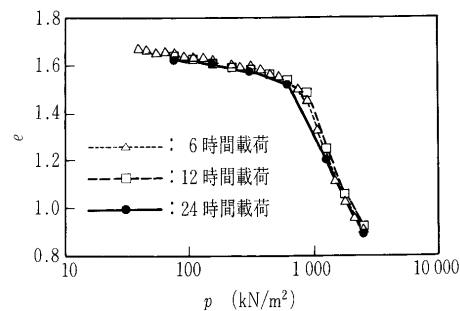
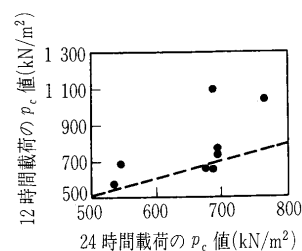
り求めた正規圧密領域の C_c と e_p - $\log p$ 曲線より求めた正規圧密領域の C_{cp} を液性限界に対して図—9 に●と▲でプロットした。 C_c と C_{cp} が異なったものであることが分かる。

3.2 圧密降伏応力

ポートアイランドや六甲アイランドの洪積粘土層 (Ma12) の中央部分から採取された試料の e - $\log p$ 曲線を図—10 に● (C), □ (D) と△ (E) でプロットする。これらの試料のコンシステンシーを表—1 に示す。D と E の e - $\log p$ 曲線はほぼ同じであるのに、C と D の p_c 値は 600 kN/m^2 で、E のそれは 750 kN/m^2 と報告された。これらの粘土層は過圧密から正規圧密に変化する境界にあるので、この値の差 (150 kN/m^2) は粘土の状態についての判断を過圧密から正規圧密に変える可能性を示している²⁾。

表—1 の B に示すブロックサンプルを用いて先述した分割型定荷重圧密試験で圧密試験を実施した。その結果を図—11 に示す。荷重増分比が小さくなくても、 e - $\log p$ 曲線の関係は変わらず、標準圧密試験結果の間に補間するような結果が得られた。

いくつかの場所で洪積粘土の不攪乱試料を採取し、24時間載荷 (標準圧密試験) と12時間載荷の圧密試験

図—10 洪積粘土の e - $\log p$ 曲線図—11 分割載荷による e - $\log p$ 曲線図—12 p_c 値の比較

を行った。これらの圧密降伏応力の値を図—12 に示す。前者は後者より小さな値を示す。

3.3 二次圧密

ポートアイランドの洪積粘土層より不攪乱試料を用いて、長期圧密試験を実施した。長期荷重までは標準圧密試験と同じ方法で荷重を増加した。その結果を図—13 に示す。図の●で示すデータの長期荷重は 628 kN/m^2 で、 p_c 値は 952 kN/m^2 である。ほかのデータの長期荷重は 628 kN/m^2 で、 p_c 値は $560 \sim 620 \text{ kN/m}^2$ である。これらの試料の液性限界は $83 \sim 96\%$ 、塑性限界は $21 \sim 27\%$ 、そして、含水比は $45 \sim 51\%$ であった。

図より、間隙比は時間の対数目盛りに対して、ほぼ直線的に減少しているので式(4)で求めた c_α を用いて長期の二次圧密沈下量を予測する。

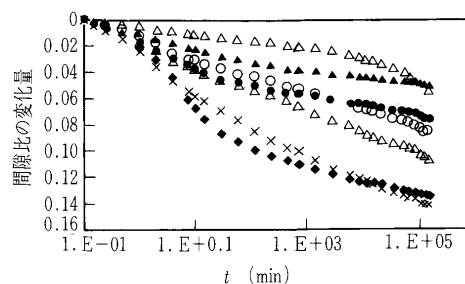
図—1 の標準圧密試験のデータを用いて、載荷直後より、1日後、10日後、100日後と1,000日後の二次圧密量を式(5)で計算する。この二次圧密量を図—8 の e_p - $\log p$ 曲線に足し合わせたのが破線群 ($e_p+1 \text{ day}$, $e_p+10 \text{ day}$, $e_p+100 \text{ day}$ と $e_p+1,000 \text{ day}$) である。

$$\Delta e_{st} = c_\alpha \log(t/t_c) \quad \dots\dots\dots (5)$$

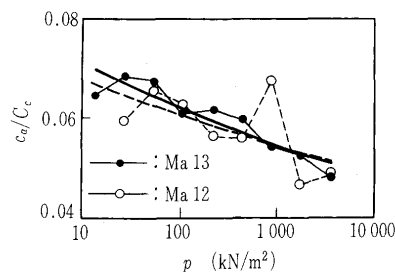
ただし、 t : Δp 載荷後からの時間、

t_c : 二次圧密開始時間

この図を Bjerrum (ベラム) による長時間圧縮を



図—13 間隙比の変化量-時間曲線

図-14 c_α/C_c と載荷重の関係

考慮した解析法の図⁸⁾と比較する。Bjerrum が示した瞬時圧縮曲線に相当するのは図-8の●で、Bjerrum が示した長時間圧縮に相当する曲線が同図の破線群である。

二次圧密係数 c_α は図-4 に示すように応力の関数となるが、Mesri (メスリ) による式(6)⁹⁾で二次圧密係数を推定している場合が多い。

$$c_\alpha = (0.05 \pm 0.02) C_c \quad \dots\dots\dots (6)$$

大阪湾内埋立地の沖積粘土層 (Ma13) と洪積粘土層 (Ma12) の標準圧密試験結果の $e-\log p$ 曲線より、図-14に示す。二次圧密係数と圧縮指数の比が拘束圧と相関があるという結果を得た。それぞれの回帰式は式(7)、そして式(8)となる¹²⁾。

$$\text{Ma13 : } c_\alpha = 0.08 p^{-0.06} C_c \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Ma12 : } c_\alpha = 0.08 p^{-0.05} C_c \quad \dots\dots\dots (8)$$

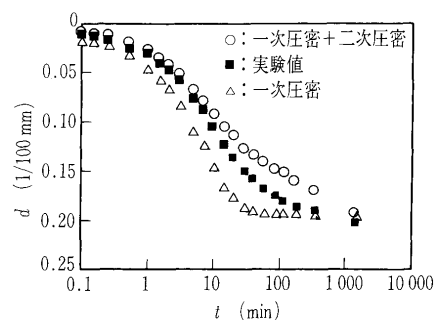
4. 二次圧密を考慮した圧密沈下量計算式の提案

二次圧密を考慮した圧密沈下量の計算式を式(9)で表す。

$$\Delta e_t = C_\phi \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_c} \right) \cdot U(t) + c_\alpha \log \left(\frac{t}{t_c} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 Δe_t : Δp 荷重載荷による t 時間後のひずみ、 C_ϕ : $e_p-\log p$ 曲線より求める、 p_c : 分割型定荷重圧密試験で求める、 c_α : 式(7)や(8)で示すように拘束圧の関数とする、 $U(t)$: 圧密度、 p_0 : 上載圧、 Δp : 増加荷重である。

図-2の○の値を図-15に■で再掲する。同図に式(9)を用いて計算した変位量を○でプロットする。標準圧密試験の $e-\log p$ 曲線から得られた C_c を用い、補正圧密係数を $c_v' = r \cdot c_v$ ¹¹⁾として求め、一次圧密のみの計算値を△でプロットする。式(9)による計算値はよい近似値を示している。

図-15 $d-t$ 曲線の比較

5. あとがき

圧密諸定数の求め方の提案を行い、二次圧密を含む一次圧密沈下量計算式を提案することができた。

しかし、実地盤では粘土層厚が厚いので、提案式の二次圧密開始時間 (t_c) をどの段階から発生するとしたらよいかという問題が残された。

参 考 文 献

- 1) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. 9th ICSMFE Specialty Session 9, Tokyo, pp. 229~237, 1977.
- 2) 寺田邦雄：洪積粘土の圧密降伏応力の測定方法に関する一提案，第32回地盤工学研究発表会，pp. 359~360, 1997.
- 3) Taylor, D. W. and W. Merchant: A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression, Journ. Math. and Phys., 19-3-167, 1940.
- 4) Leonards, G. A.: Foundation Engineering, McGraw-Hill, p. 149, 1962.
- 5) Schmertmann, J. H.: Estimating the Consolidation Behavior of Clay From Laboratory Test Results, Proc. ASCE, Oct., pp. 311~318, 1953.
- 6) 寺田邦雄・大下俊之：圧密試験結果と試料の乱れに関する一考察（その2），第23回土質工学研究発表会，pp. 287~288, 1988.
- 7) Crawford, C. B.: Interpretation of the Consolidation Test, Proc. ASCE, 90-SM, pp. 5~87, 1964.
- 8) Bjerrum, L.: Engineering Geology of Norwegian Normally-consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings, Geotechnique, pp. 17~83, 1967.
- 9) Mesri, G.: Coefficient of secondary compression, Proc. ASCE, No. SM1, pp. 123~135, 1973.
- 10) 寺田邦雄：二次圧密係数と圧密圧力の関係について，第33回地盤工学研究発表会，pp. 435~436, 1998.
- 11) 三笠正人：軟弱地盤の圧密，鹿島出版会，1963.

(原稿受理 1998.11.24)