

土の圧密試験

上羽 康友*

* UWABA Yasutomo、千代田ソイルテック株式会社 埼玉県八潮市古新田 325

1. はじめに

圧密とは、細粒分を主体とした透水性の低い飽和粘性土が静的荷重を受けることにより、間隙水が排出され、間隙の体積が減少し、時間の経過とともに密度を増加させる現象である。

粗粒土は、透水性が高く圧縮性が低いため、圧密は短時間で終了する。また、圧密量も小さいので、住宅地盤においては大きな問題となることは少ない。しかし、飽和粘性土は、透水性が低く圧縮性が高いため、長い時間をかけ大きな圧密量を生じる。このため、住宅建築から数年、数十年後に建物の沈下として表面化し、問題となることがある。

写真-1 は、圧密地盤を豆腐で表し、圧密沈下を視覚的に表現したものである。建物模型の荷重により、豆腐の中の水が排出され、豆腐が圧縮されて、建物の模型が沈下している様子がわかる。

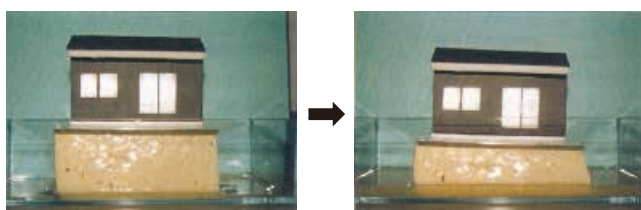
本稿では、地盤から採取した乱れの少ない試料を用いて、地盤の沈下量や沈下時間の推定に必要な圧縮性と圧密定数及び圧密降伏応力を求めるための圧密試験の方法を紹介する。

2. 土の圧密試験

2.1 試験概要

圧密試験は、「段階荷重による圧密試験（JIS A 1217：2009）」と「定ひずみ速度荷重による圧密試験（JIS A 1227：2009）」がある。本稿では、一般的に行われる段階荷重による圧密試験を述べる。

この試験は、直径 6 cm、高さ 2 cm の供試体を用いて、側方の変位を拘束し、上下面に排水を許した状態で、荷重を初期値から順に 2 倍ずつ段階的に 8 段階荷重し、その間の時間と圧縮量を測定する方法である。



建物模型載荷直後

時間経過後

写真-1 豆腐による圧密沈下の模型

この試験は、1 段階を 24 時間荷重するため、土質試験の中でも最も時間を要する試験で、試験終了までに 10 日程度の日数がかかる。

2.2 試験方法

地盤から採取した乱れの少ない試料を成形し、側方が拘束された圧密リングに入れる。

供試体が入った圧密リングを多孔板を持つ底板の上に置き、ガイドリングを圧密リングに取り付ける。供試体の上面に多孔板を持つ加圧板を置いて、上下面に排水が可能な圧密容器を組み立てる。圧密容器の例を図-1 に示す。

圧密容器を空の水浸容器に入れて載荷装置に設置し、加圧板頭部に載荷点を合わせ、変位計を取り付ける。

載荷直前の変位計の読みを測定し、荷重を載荷し、圧密を開始する。載荷後は、所定の経過時間ごとに変位計の読みを記録し、通常 24 時間荷重する。

以降、前段階の荷重の 2 倍（荷重増分比 $\Delta p/p=1$ ）で、繰り返し最終載荷段階まで行う。

最終載荷段階の測定終了後、載荷荷重を除荷し、圧密容器を解体する。

写真-2 は試験室に並べられた圧密試験機である。

2.3 試験結果の整理

圧密試験の結果を利用するために、供試体の初期状態や各載荷段階ごとの結果を整理し、沈下量や沈下時間の推定に必要な係数を求める。

具体的な整理の方法は、（公社）地盤工学会から出版されている「土質試験 基本と手引き 第二回改訂版」や「地盤材料試験の方法と解説—二分冊の 1—」などに記載されている。

本稿では、圧密量と時間の関係、圧密係数、圧縮曲線の整理の方法について簡単に紹介する。

(1) 圧密量と時間の関係の整理

沈下時間の推定に必要な圧密係数 c_v を算定するために、

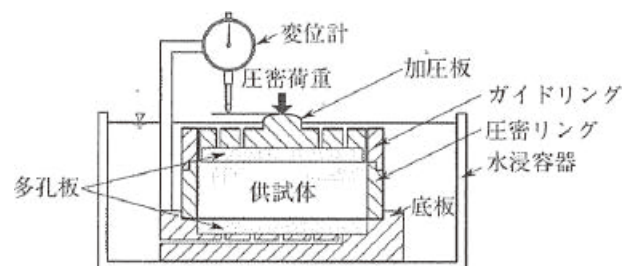
図-1 圧密容器の例¹⁾



写真-2 圧密試験機

必要な整理となる。

「 $\sqrt{t}$ 法」、または「曲線定規法」のいずれかを用いて整理し、以下の値を求める。

- ・理論圧密度 0% に当たる変位計の読み d_0 (mm)
- ・理論圧密度 100% に当たる変位計の読み d_{100} (mm)
- ・ $\sqrt{t}$ 法は、理論圧密度 90% に当たる時間 t_{90} (min)
- ・曲線定規法は、理論圧密度 50% に当たる時間 t_{50} (min)

ここでは、 $\sqrt{t}$ 法について説明する。 $\sqrt{t}$ 法は、縦軸に変位計の読み d (mm)、横軸に経過時間 t (min) の平方根をとって、 $d - \sqrt{t}$ 曲線を描く。描いた曲線の初期の直線部分を延長し、縦軸と交わる点を初期補正点 d_0 とする。初期補正点 d_0 を始点として、初期直線の 1.15 倍の横距の直線を描く。試験で得られた曲線との交点を理論圧密度 90% とし、変位計の読み d_{90} 、時間 t_{90} を求める (図-2 参照)。

次に、縦軸に変位計の読み d (mm)、横軸に経過時間 t (min) の対数目盛をとって、 $d - \log t$ 曲線を描く。描いた曲線に d_0 、 d_{100} 、 t_{90} または t_{50} の位置を示す (図-3 参照)。これにより、圧密の進行状況や一次圧密の終了が確認でき、二次圧密の状況がわかる。圧密理論に従って進む理論圧密度 100% (d_{100}) までを一次圧密と呼び、それ以降を二次圧密と呼ぶ。二次圧密は、一次圧密終了後の地盤のクリープ的な変形と考えられている。高有機質土のような含水比の高い地盤は、二次圧密の沈下量が大きくなり、沈下が長期間継続する。

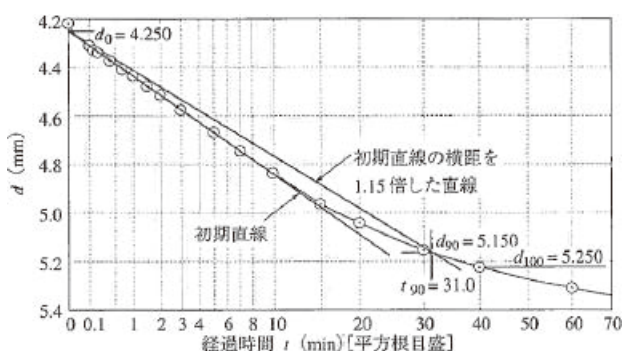


図-2 $\sqrt{t}$ 法による整理の例¹⁾

(2) 圧密係数の整理

前述した圧密度と時間の関係から求めた t_{90} 、 t_{50} を用いて、各载荷段階の圧密係数 c_v (cm²/d) を式 1、式 2 より求める。分子の「1440」は 1 日 (24 時間) を分で表した値であり、単位の換算のために乗じている。

$$\sqrt{t} \text{ 法の場合: } c_v = 0.848 \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{1440}{t_{90}} \quad (\text{式 1})$$

$$\text{曲線定規法の場合: } c_v = 0.197 \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{1440}{t_{50}} \quad (\text{式 2})$$

ここに、

t_{90} : 理論圧密度 90% に当たる時間 (min)

t_{50} : 理論圧密度 50% に当たる時間 (min)

H : 圧密終了時の供試体高さ (cm)

$\bar{H}$: 平均供試体高さ (cm)

H' : 直前の载荷段階の圧密終了時の供試体高さ (cm)

ΔH : 圧密度 (cm)

d_f : 各载荷段階の最終の変位計の読み (mm)

d_i : 各载荷段階の载荷直前の変位計の読み (mm)

$$H = H' - \Delta H \quad (\text{式 3})$$

$$\bar{H} = \frac{H + H'}{2} \quad (\text{式 4})$$

$$\Delta H = \frac{d_f - d_i}{10} \quad (\text{式 5})$$

圧密係数 c_v は、圧密時間に影響を与える係数で、 c_v が大きいほど圧密の進行が早くなる。

(3) 圧縮曲線の整理

各载荷段階の圧密終了時の間隙比 e を式 6 より求める。

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad (\text{式 6})$$

ここに、 H_s : 供試体の実質高さ (cm)

縦軸に間隙比 e 、横軸に圧密圧力 p を対数目盛にとり、圧縮曲線を描く。圧縮曲線の正規圧密領域の直線部に 2 点 a 、 b をとり、圧縮指数 C_c を式 7 で算出する (図-4 参照)。

$$C_c = \frac{e_a - e_b}{\log(p_b/p_a)} \quad (\text{式 7})$$

次に圧密降伏応力 p_c を求める。 p_c を求める方法は、「三笠法」と「キャサグランデ法」がある。ここでは、三笠法による p_c の求め方を図-5 に示す。

$C_c' = 0.1 + 0.25 C_c$ の勾配をもつ直線と圧縮曲線の接点 A を求める。

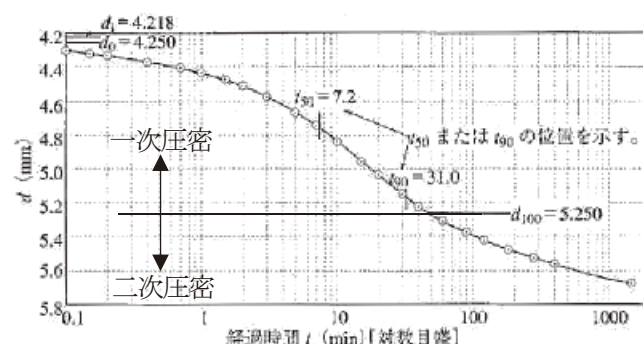


図-3 圧密度-時間曲線の例¹⁾

点 A を通って $C_c = C_c' / 2$ の勾配をもつ直線と圧縮曲線の正規圧密領域の最急勾配部を代表する直線の延長との交点 B の横座標を圧密降伏応力 p_c (kN/m²) とする。

3. 試験結果の利用

3.1 圧密降伏応力および過圧密と正規圧密の判定

圧縮曲線の例を図-6 に示す。圧縮曲線は、圧密圧力が小さい間は、体積変化は小さく弾性的挙動を示すが、圧密圧力が大きくなると体積が大きく減少し、塑性的挙動を示す。その境界の圧密圧力が圧密降伏応力 p_c である。

圧密沈下を考える上で、重要になるのが有効土被り圧と圧密降伏応力の関係である。圧密降伏応力と有効土被り圧の比は、過圧密比 OCR で表され、 $OCR > 1$ を過圧密粘土といい、 $OCR = 1$ を正規圧密粘土という。正規圧密粘土は、新たに荷重が加わることで大きな沈下を生じる。一方、過圧密粘土は、有効土被り圧に増加応力を加えても、圧密降伏応力を越えない限りほとんど沈下を生じない。したがって、住宅地盤の沈下で問題となるのは、正規圧密粘土が殆どである。また、有効土被り圧に建物荷重による増加応力を加えた有効応力と圧密降伏応力の大小関係を比較することで、圧密沈下の有無を判断する目安となる。

3.2 沈下量の推定方法

住宅地盤では、建物荷重による沈下量や地盤補強後の沈下量の推定に利用される。沈下量を推定する方法は、初期圧力と最終圧力を求め、その間の圧縮ひずみ ε と粘土層厚 H の積から最終沈下量 $S_f (= H \cdot \varepsilon)$ を求める。

沈下量を求めるための、計算方法には、下記の3つの方法がある (図-7 参照)。

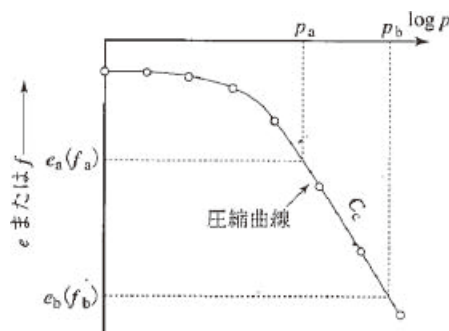


図-4 C_c の求め方¹⁾

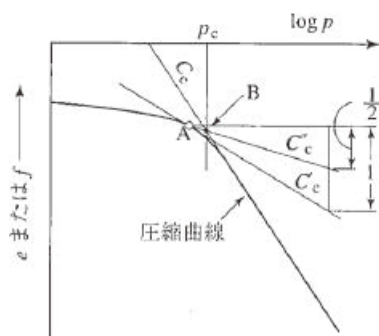


図-5 p_c の求め方¹⁾

$$\textcircled{1} \text{圧縮曲線法: } S_f = H \frac{e_i - e_f}{1 + e_i} \quad (\text{式 } 8)$$

$$\textcircled{2} C_c \text{法: } S_f = H \frac{C_c}{1 + e_i} \log \frac{p_f}{p_i} \quad (\text{式 } 9)$$

$$\textcircled{3} m_v \text{法: } S_f = H m_v \Delta p \quad (\text{式 } 10)$$

①は、地盤に荷重が加わると、間隙比の減少が生じるという考えに基づき、圧縮曲線から p_i 、 $p_f (= p_i + \Delta p)$ に対応する e_i 、 e_f を読み取り沈下量を求める。

②は、圧縮曲線の正規圧密領域の直線とみなせる部分の勾配 C_c を用いて沈下量を求める。

③は、 $\log m_v - \log \bar{p}$ 関係から $\sqrt{p_i p_f}$ に対応する m_v を読み取って、沈下量を求める。

3つの方法は正規圧密領域では、ほぼ等しい結果になるが、過圧密領域では結果に差がある。建築基礎構造設計指針では、①圧縮曲線法 ($e - \log \sigma$ 法) を原則とし、正規圧密粘土の場合は、② C_c 法を用いてもよいとされている。地盤条件などを考慮し、目的に応じて使い分けが必要である。

3.3 圧密時間の推定方法

圧密試験より得られた c_v と圧密層厚 H (cm) から沈下時間 t (d) を推定する。

ある圧密度 U (%) に至るまでに要する時間 t は、広域な盛土のように粘性土層の過剰間隙水圧が一樣とみなせる場合には、式 11 と図-8、表-1 から推定できる³⁾。

$$t = \frac{H^2}{c_v} T_v \quad (\text{式 } 11)$$

ここに、 c_v : 圧密係数 (cm²/d)

T_v : 時間係数

H : 圧密層の排水距離 (片面排水は圧密層の厚さ、両面排水はその 1/2) (cm)

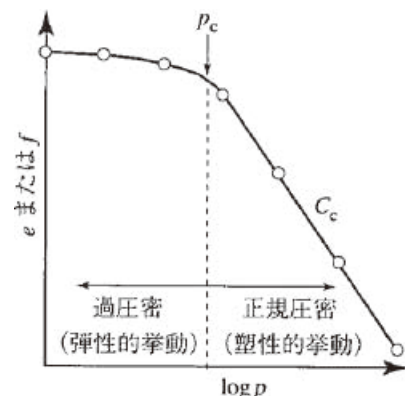
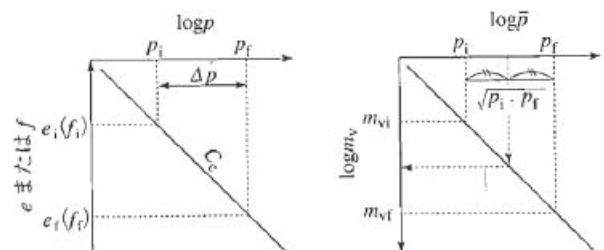


図-6 圧縮曲線の例¹⁾



(a) 圧縮曲線

(b) $\log m_v - \log \bar{p}$ 関係

図-7 圧密特性¹⁾

圧密時間は、圧密係数や時間係数が同じ場合、排水距離の2乗に比例する。よって、排水距離が2倍になれば、圧密時間は4倍かかることになる。排水距離と圧密時間の関係を利用して、圧密を促進させる工法にサンドドレーン工法やペーパードレーン工法などがある。排水距離を短くすることで、圧密時間の短縮を図る工法である。

圧密時間の推定は、住宅地盤での利用は少ないが、軟弱地盤に盛土して造られた間もない宅地の盛土の放置期間の推定などに利用が考えられる。

3.4 計算例

参考までに、圧密試験より得られた圧密定数を用いて、沈下量及び圧密時間を計算した例を示す。

図-9のように、砂層に挟まれた厚さ8mの粘土層を想定する。圧密試験の結果、間隙比 $e_0=1.10$ 、圧縮指数 $C_c=0.60$ 、圧密係数 $C_v=120\text{cm}^2/\text{d}$ が得られた。この地

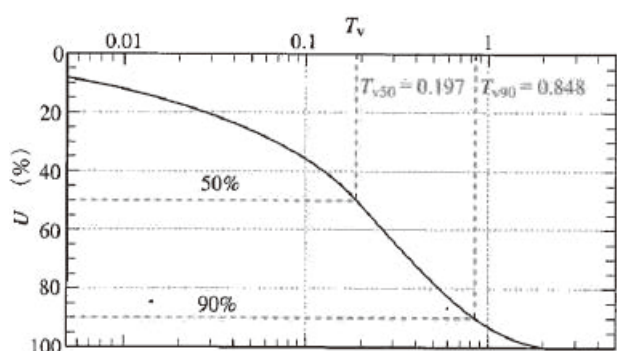


図-8 理論圧密曲線¹⁾

表-1 時間係数と圧密度の理論解³⁾

T_v	$U(\%)$	T_v	$U(\%)$
0.006	8.7	0.15	43.7
0.008	10.1	0.2	50.4
0.01	11.3	0.3	61.3
0.015	13.8	0.4	69.8
0.02	16.0	0.5	76.4
0.03	19.5	0.6	81.6
0.04	22.6	0.8	88.7
0.06	27.6	1.0	93.1
0.08	31.9	1.5	98.0
0.1	35.7	2.0	99.4

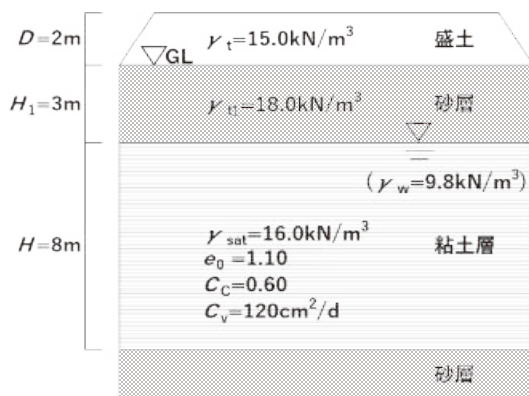


図-9 地盤モデル

盤の上に厚さ2mの盛土を広く载荷した場合の粘土層の圧密度を推定する。また、最終圧密沈下量の90%の沈下量となる日数を推定する。

盛土载荷前の粘土層中央に作用する有効土被り圧 p_0 を算出する。

$$\begin{aligned} p_0 &= \gamma_{t1} \cdot H_1 + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \cdot H/2 \\ &= 18.0 \times 3.0 + (16.0 - 9.8) \times 8/2 \\ &= 78.8 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

盛土による増加応力 Δp を算出する。

$$\Delta p = \gamma_t \cdot D = 15.0 \times 2 = 30 \text{ kN/m}^2$$

盛土载荷後の粘土層中央に作用する応力 p_1 を算出する。

$$p_1 = p_0 + \Delta p = 78.8 + 30.0 = 108.8 \text{ kN/m}^2$$

最終圧密沈下量 S_f は

$$\begin{aligned} S_f &= H \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{p_1}{p_0} \\ &= 8 \times \frac{0.6}{1 + 1.1} \log \frac{108.8}{78.8} \\ &= 0.32 \text{ m} \end{aligned}$$

圧密度90%に対する時間係数は、 $T_v=0.848$ である。

排水距離は、両面排水となるため、 $H=400\text{cm}$ となる。

最終圧密沈下量の90%の沈下量になる日数は、

$$t = \frac{H^2}{C_v} T_v = \frac{400^2}{120} \times 0.848 = 1131 \text{ d}$$

以上、最終沈下量は0.32m、日数は1131日と推定することができる。

4. おわりに

今回紹介した圧密試験は、地盤の圧密特性を知ることができる重要な試験である。戸建住宅では、SWS試験が主流であり、土質試験を実施するケースは稀である。しかし、SWS試験で自沈層が連続するような軟弱地盤で、基礎設計が難しい地盤でも、圧密試験を実施することで、土の実況が把握でき基礎設計が可能となることもある。圧密試験に限らず各種の土質試験を実施し、地盤を詳細に知ることができれば、より正確な地盤判断が可能である。これにより、基礎設計の安全性向上は元より、過剰設計を防ぎ経済設計が可能となる場合もある。費用や時間が優先される傾向にある住宅地盤だが、地盤調査や土質試験の理解を深めることで、幅広い基礎提案に繋がれるのではなかろうか。

参考文献

- 1) (公社) 地盤工学会：土質試験 基本と手引き 第二回改訂版
- 2) (公社) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二冊の1—
- 3) (一社) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針 2019
- 4) (一社) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針 2008