

急速圧密試験法について

野 田 健 二*

1. ま え が き

圧密試験において、一般に採用されている方法 (JIS, A-1217) では、非常に時日を要し、急を要するような場合、時機を失し、試験結果が有効に活用出来ない場合が多々ある。これは、各荷重段階の圧密試験の所要時間として 24 時間を必要としているからで、例えば、7 荷重段階の試験をおこなうためには、少くとも 7 日を要する。このように、試験に長時間を要することは、上述のように時機を失することは勿論、一つの供試体が長い期間試験器を占領するため、同じ試料について数多くの試験をおこなってみることができず、したがって試験の精度をチェックすることができない。

ここで紹介する方法²⁾は、Hsuan-Lohsu 氏により提案され従来の方法のように長時間を要することなく、急速に試験をおこなうことが出来る方法である。これに使用する試験装置は、従来の方法のものと全く同じでよい。試験所要時間は、例えば 7 荷重段階の試験をおこなっても、1 日を超えることはない。

まず、急速法に利用する最急勾配接線法の理論を紹介し、つぎに急速法の概要と、試験の実施方法を述べ、最後に、筆者の実施した試験結果、および従来の方法との比較を試みた。

2. 最急勾配接線法の理論

テルツアギー氏の一次圧密理論¹⁾によると、一次圧密過程を満足する微分方程式は、つぎのとおりである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C_v : 圧密係数

u : 時間 t における過剰水圧

一方、時間 t における沈下量 ρ は、

$$\rho = \int_0^H \Delta ndz = m_v(p_1 H - \int_0^H u dz) \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。ここで、 m_v : 体積圧縮係数

H : 粘土層の厚さ

p_1 : 荷重の増分

(1) 式の微分方程式は、フーリエ級数によって解くことができ、解かれた u の値を (2) 式に代入し、積分すると、次式のとおりになる。

$$\begin{aligned} \rho &= m_v p_1 H \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} e^{-\frac{(2N+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \right] \\ &= m_v p_1 H \left[1 - \sum_{N=0}^{\infty} \phi(M) e^{-M^2 T_v} \right] \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ただし、 e : 自然対数の底

N : 整数

$$T_v : \text{時間係数} = \frac{C_v}{H^2} t \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi(M) = \frac{\pi}{2} (N+1)$$

(3) 式のカッコ外のファクターは最終沈下量 ρ_1 をあらわしており、また、カッコ内の項は時間係数のみの関数である。故に、(3) 式はつぎのように示すことができる。

$$\rho = \rho_1 f(T_v) \rho_1 U$$

$$\therefore U = \frac{\rho}{\rho_1} f(T_v) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 U は圧密率であり、 $\rho_1=1$ とすると、圧密率は (3) 式より、

$$U = 1 - \sum_{N=0}^{\infty} (\phi(M) e^{-M^2 T_v}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。いま、圧密残余を $R=1-U$ とすると、

$$R = \sum_{N=0}^{\infty} \phi(M) e^{-M^2 T_v} \quad \dots\dots\dots (7)$$

(6)、(7) 式からわかるように、圧密率および圧密の残余は、境界条件と時間係数 T_v のみによって定まる。いま、両面に排水できる開放層 (Open layer) あるいは片面にのみ排水できる半開放層 (half-closed layer) が均等分布の圧密圧を受けている状態 (普通の圧密試験では、供試体は前者の状態にある) における T_v と R との関係を求め、半対数グラフに示すと、図-1 の曲線のようにになる。この曲線式は、

$$\log_{10} T_v = F(R)$$

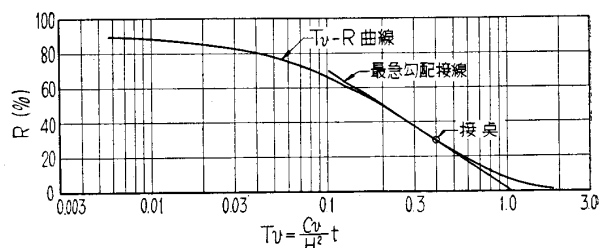


図-1

と示すことができる。この式の T_v に (4) 式を代入すると、

* 愛知用水公団 工務部材料試験室

$$\log_{10} T_v = \log_{10} t + \log_{10} \frac{C_v}{H^2} = \log_{10} t + K(\text{一定}) = F(R) \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。この式によって次のことが結論づけられる。いまもし、 C_v/H^2 の値の異なった二つの粘土層の圧密率を時間 t に対してプロットすると、時間—圧密曲線 ($\log_{10} t - R$) は同じ型になり、たがいに水平巨りは $\log_{10}(C_v/H^2)$ の値の差だけ隔る。 $C_v/H^2=1$, すなわち、 $T_v=t$ の場合には、 $\log_{10} T_v - R$ 曲線に一致する。(実際の実験曲線は、二次圧密現象により、理論のように 100% の水平線に漸近せず、もっと低下する。)

つぎに、 $\log_{10} T_v - R$ 曲線の接線勾配は、(7) 式を微分すると、

$$\frac{dR}{d(\log T_v)} = \frac{T_v}{\log e} \cdot \frac{dR}{dT_v} = - \sum_{N=0}^{\infty} \frac{\phi(M)}{\log e} M^2 T_v e^{-M^2 T_v} \quad (9)$$

となる。最急勾配の接線がとおる点は、

$$\frac{d^2 R}{d(\log T_v)^2} = 0$$

$$\therefore \sum_{N=0}^{\infty} \frac{\phi(M)}{\log e} M^2 e^{-M^2 T_v} (1 - M^2 T_v) = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10) 式を解くと、最急勾配接線のとおる点は、(0.404, 0.298) を得る。この値を (9) 式に代入すると、最急接線勾配 S は

$$S = -0.688$$

を得る。

いま、圧密試験において、 $x\%$ 圧密に相応するダイヤルのよみ dx は、次式によって算定できる。

$$dx = d_s + \frac{h}{S} \cdot \frac{x}{100} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 d_s : 初期補正ダイヤルのよみ

S : 時間係数—圧密曲線の最急接線勾配
 $= -0.688$

h : 最急接線の—対数サイクルの縦巨 (図—2 参照)

3. 急速圧密試験について

テルツアギー氏も指摘しているように、ある荷重段階における圧密過程は、つねに、その前に進行していた荷重段階の圧密過程には無関係に進むものである。故に、圧密試験において、各荷重段階における圧密が未完了のまま、次の荷重段階の圧密試験をおこなっても、各々の圧密過程は、従来の方法、すなわち、各々の段階の圧密が完了した (厳密には未だ完了していない。) 後につぎの段階の試験に入る方法の圧密過程と全く同じである、と考えてよい。このように、未完了圧密のつみ重ねによる試験は、何% 圧密に対応するダイヤルのよみがいくらかであるか、ということがわかれば、あとで完了時のダイヤルのよみを補正し、つみ重ねをなおせばよい。

ここで問題となるのは、何% を圧密完了時の% にするかである。テルツアギー氏は、上述の理論による圧密を一次圧密とし、図—1 の曲線を示した。そして、曲線と合致せずにさらに低下する曲線部分を二次圧密と称して、分離して考えている。しかし、この両者は不可分の現象であり、分けて考えるより、二次圧密も一次圧密の% に加えて考察するのが望ましい。過去の試験結果から推定して、一次圧密比 r は平均 0.67 位であり、圧密完了時% を、 $100/0.67=150\%$ にとって、ほとんど実用に支障ないと考えられる。

つぎに、各荷重段階の圧密を何% でやめるのが最も試験を進める際、便利であるかということである。まず、 h を求めるためには、第 2 の曲線部分まで圧密が進み、直線部分が明らかにされなければならない。圧密 100% の点は第 2 曲点附近にあるから、この部分まで圧密が進行すると、90% 圧密の点はすでに曲線上にあり、明らかにされるはずである。90% 圧密の点は比較的早い時期に到達できるから、圧密を相当急速化できると考えられる。また、 $\sqrt{t}$ 法などとの比較も容易である。故に、90% 圧密の点が明らかにされれば、次の荷重段階の試験へ進むことにする。

4. 試験の進め方

a. 試験をはじめる前に、図—2 の例に示すような半対数用紙を準備し、試験中にダイヤルのよみを直ちにプロットできるようにしておく。グラフ用紙の大きさは、最急勾配接線を正しく引くことができる程でなければならない。

b. ダイヤル・ゲージは次の時間間隔でよむ。

0～30秒は、5秒ごと。

30秒～1分は、15秒ごと。

1分～5分は、30秒ごと。

5分以後は、 t_{90} か、 d_{90} のいずれかがわかるまで毎分。

c. 初期補正ダイヤルのよみ d_s は、放物線法によって、試験の途上で求める。時間—ダイヤルのよみ曲線の最急勾配接線がわかると、1 対数サイクルに対するダイヤルのよみの差 h が求まる。そうすると、50%, 90% 圧密に対応するダイヤルのよみは、(1) 式によってつぎのとおり計算される。

$$d_{50} = d_s + 0.73h \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$d_{90} = d_s + 1.31h \quad \dots\dots\dots (13)$$

d. d_{90} に対応する t_{90} を曲線上で求め、その値を用い次式によって t_{90} を計算する。

$$t_{90} = t_{50} \cdot \frac{(T_v)_{90}}{(T_v)_{50}} \cdot \frac{H_{90}^2}{H_{50}^2} \doteq 4.3 t_{50} \quad \dots\dots\dots (14)$$

(14) 式の t_{90} に対応するダイヤルのよみを曲線上で求め

荷重は 0.1 kg/cm^2 から 12.8 kg/cm^2 までの 8 荷重段階である。

- a ①, ②はそれぞれ試験荷重, および 90% 圧密のときのダイヤルのよみ d_{90} である。
- b ③は②の差, $(d_{90})_{i+1} - (d_{90})_i$ である。
- c ④は初期供試体厚さから②の値を差引いた値
- d ⑤は④より土のみの厚さ $2H_0$ を差引いた値
- e ⑥は 90% 圧密のときの間げき比 $e_{90} = ⑤/2H_0$
- f ⑦は接線法で求めた 90% 圧密の時間
- g ⑧は t_{90} による圧密係数 C_v の計算
- h ⑨は⑥の e_{90} の差, $(e_{90})_{i+1} - (e_{90})_i$
- i ⑩は $\Delta e_{150} = 150/90 \times \Delta e_{90}$
- j ⑪以下は従来の方法と同じ。

7. 従来の方法との比較

接線法によって求めた 90% 圧密の点を, 理論上の 90% 圧密の点, および $\sqrt{t}$ 法, $\log t$ 法によって求めた点, と比較するため, 図-3 を画いた。この図は, まず図-1 の理論曲線 ($T_v - U$) を引く。この際, $U=0 \sim 100\%$

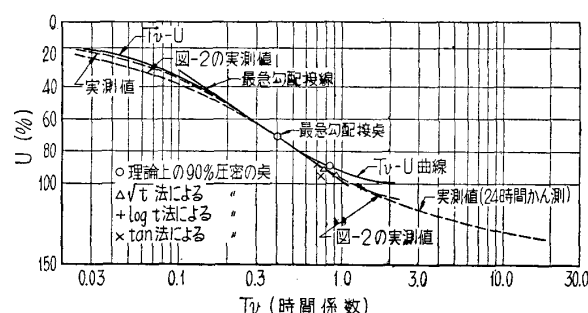


図-3

の長さと 1 対数サイクル ($\log 10 - \log 1$) の長さとが等しくなるように縦横の目盛を合わせる。次に, この曲線に重ねて, 図-2 の例と, 他のもう一つの例の実測曲線 ($t-d$) を引く。この際, 実測曲線はその最急接線の勾配が 0.688 になるよう, ダイヤルのよみの目盛をなおし, そして, 最急勾配接点が理論曲線のそれに一致するように重ねた。この図によると, 二つの実測曲線の 90% 圧密の点は, $\log t$ 法によるものを除き, 他は非常によく接近している。今まで筆者が経験したところでは, 接線法は $\sqrt{t}$ 法と同様に比較的正しい結果を与えている。 $\log t$ 法による結果は, いずれも他のものと最も離れた

位置にあった。これは筆者の対象としている材料がかたよったものだけであったことにも原因しているのかも知れない。今後, 機会あるごとに, 多種の材料について試験をおこない, 比較してみたいと思う。一般には, $\sqrt{t}$ 法が圧密過程の前半の試験結果によって定めているのに対し, $\log t$ 法は全圧密過程をとらえて定めている点, よりすぐれているといわれているが, 図-3 の結果からは, 必ずしもそうは云えないと思う。

接線法による 90% 圧密の点が理論曲線のそれによく一致するための条件は, 実測曲線の最急接線勾配が理論値 0.688 によく一致すること, および全圧密% が 150% になることの二つである。前者については, 多数のデータを調べた結果からも, これは非常によく一致していることがわかった。後者の 150% については, 今後大いに研究し, 果してこの値が妥当かどうか, あるいは材料の種類によって分類して考えるべきかどうか, など調べ, より合理性のある値を呈供したいと考える。

8. 結 論

以上述べたことを総括すると, つぎのとおりである。

- a. 急速試験法は, 従来の方法では不必要に長かった圧密試験の時間を, 著しく短くすることができる。
- b. 急速法の信頼度は従来の方法にまさるとも, 劣らないと考えられる。殊に, 相似係数によって試験精度を定量的に示すことができることは, 従来の方法よりすぐれている点である。
- c. 接線法は従来の $\sqrt{t}$ 法, $\log t$ 法より合理性があると考えられる。もし, この方法に誤差が生ずるとすれば, S 値と全圧密% のとり方においてである。
- d. 急速法には, 接線法ばかりでなく, $\sqrt{t}$ 法も採用でき, チェックすることができる。
- e. 接線法と, それを利用した急速試験が将来高く評価され, 一般化されるためには, 今後多くの人々がこの方法を試み, 多数のデータを得, 論議されることである。

参 考 文 献

- 1) Terzaghi: "Theoretical soil mechanics" p. 265~296
- 2) ASCE proc. paper 1729: "Procedure for rapid consolidation test,"