

【ノ ー ト】

バーチカルドレーンの圧密機構について

BRIEF NOTE ON THE CONSOLIDATION MECHANISM OF
VERTICAL DRAIN

赤 井 浩 一*

By Koichi AKAI

1. はじめに

バーチカルドレーンは元来、水平に堆積した地層に鉛直な排水溝を打設して、圧密する粘性土層の過剰間隙水圧を水平方向に消散させようとする目的のものである。この際、ドレーンの間隔が粘性土層の厚さに比べて通常格段に小さいため、間隙水圧の消散はドレーンがない場合に比べて著しくすみやかとなることが期待され、これがバーチカルドレーン工法の本来の着眼点となっている。

ドレーンのない場合の自然土層の圧密と、ドレーンを打設した場合の同じ土層の圧密とが構造的に相異なるものであるか、またはこの両者の間になんらかの関連があるかについて最初に検討してみよう。この場合、粘性土層の上下にある砂層や砂礫層などの透水層の近傍では、ドレーンがある場合の間隙水圧の消散は水平方向と鉛直方向の両成分が重複して若干複雑となるが、現実にはバーチカルドレーンを設けるような粘性土層はその厚層が大きいから、水圧消散の方向を水平方向のみと限定することが許容される。

このように考えると、ドレーンのない場合とある場合の相違は、鉛直一次元流と鉛直軸対称水平一次元流の違いということになる。もちろん、前者では最大排水距離が後者のものに比べて著しく大きいことは当然である。さらに、水圧消散の速さを規定する土質特性としての圧密係数 $c_v = k/r_w m_v$ (k : 透水係数, r_w : 水の単位体積重量, m_v : 体積圧縮係数) に異方性があるかどうかについても論議が多いが、これらを含めて検討するために時間係数を変数として採用しよう。

2. 時間係数と圧密度

周知のように、時間係数は $T_v = c_v t / d^2$ (c_v : 圧密係

数, t : 時間, d : 排水長) なる無次元数であり、排水長 d は圧密により圧密層内の間隙水が通過する透水層までの最大距離として定義される。したがって、ドレーンのない鉛直一次元圧密では、片面排水条件のとき粘土層厚 H 、また、両面排水条件のとき粘土層厚 $2H$ の半分(すなわち同じく H) である。一方、ドレーンのある鉛直軸対称水平一次元流による圧密では、排水長はドレーンの有効集水直径 d_e の半分からドレーンの半径 $r_w = d_w/2$ を差し引いたものとして定義されねばならない。ドレーンの直径 d_w に比べて d_e がかなり大きいような通常の場合(すなわち、およそ $n = d_e/d_w > 5$) には、排水長として $r_e = d_e/2$ を採用することができよう。つまり以上をまとめると、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ドレーンのない場合 (鉛直方向排水):} \\ T_v^z = \frac{c_v^z t}{H^2} \dots\dots\dots (1) \\ \text{ドレーンのある場合 (水平放射状排水):} \\ T_v^r = \frac{c_v^r t}{r_e^2} \dots\dots\dots (2) \end{array} \right.$$

ここに肩符号 z, r は、それぞれ鉛直および水平放射状の排水に対応することを意味している。

従来、サンドドレーンの設計などに用いられている Barron の図表では、時間係数は、

$$T = \frac{c_v^r t}{d_e^2} \dots\dots\dots (3)$$

とされており、式 (2) のものとは、

$$T_v^r = 4 T \dots\dots\dots (4)$$

なる関係にある。式 (3) の T は慣用されて久しいが、時間係数の厳密な意味からははずれており、本文ではあくまで式 (2) の T_v^r に基づいて鉛直一次元流との比較を行う。

まず、Terzaghi¹⁾ の一次元圧密理論によると、等分布状の初期過剰水圧面をもつ粘性土層全体の平均圧密度 U^z と時間係数 T_v^z の間には次の関係がある。すなわち、ある時間 t における過剰間隙水圧の平均値を u_m 、 $t=0$ におけるものを u_0 として、

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科

$$\begin{aligned}
 U^z &= 1 - \frac{u_m}{u_0} \\
 &= 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \\
 &\quad \cdot \exp\left\{-\left(\frac{2m+1}{2}\pi\right)^2 T_v^z\right\} \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

式(5)より、この場合の圧密度の進行は時間に対し指数関数的であるが、しかし単一の指数関数ではなく、その無限級数(フーリエの級数)の和として推移することが知られる。そしてこの式は近似的に、

$$\begin{cases}
 U^z < 53\% ; U^z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{T_v^z} = 1.128 \sqrt{T_v^z} & \dots\dots\dots (6) \\
 U^z > 75\% ; U^z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} T_v^z\right) \\
 = 1 - 0.810 \exp(-2.467 T_v^z) & \dots\dots\dots (7)
 \end{cases}$$

として表される。式(6)により、圧密の中期までは圧密度が時間 t の平方根に比例して増加することがわかり、周知のようにこれが \sqrt{t} -法による圧密-時間曲線の解析に利用されている。一方、式(7)は圧密の後期になれば圧密度の進行が時間 t の単一の指数関数で表わされることを示している。

次に、バーチカルドレーンと載荷量によって生ずる鉛直軸対称水平一次元流による圧密の基礎方程式は、間隙水圧 u に関して、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (8)$$

であるが、等ひずみの圧密に対する解は Barron²⁾ の誘導と吉国³⁾ の検討により次のように与えられている。

$$\begin{aligned}
 u(r, t) &= \frac{4u_0}{\lambda d_e^2} \exp\left(-\frac{T}{\lambda}\right) \\
 &\quad \cdot \left\{ r_e^2 \log\left(\frac{r}{r_w}\right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right\} \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{cases}
 T = \frac{c_v r t}{d_e^2}, \quad n = \frac{d_e}{d_w} = \frac{r_e}{r_w} \\
 \lambda = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}
 \end{cases} \dots\dots\dots (9)'$$

そして平均圧密度は、

$$U^r = 1 - \exp\left(-\frac{8T}{\lambda}\right) \dots\dots\dots (10)$$

であるが、前述の理由により、ここで式(4)を用いて厳密な意味での式(2)の時間係数 T_v^r を用いると、上式は、

$$\begin{cases}
 U^r = 1 - \exp\left(-\frac{2T_v^r}{\lambda}\right) \\
 \text{ここに、} \\
 T_v^r = \frac{c_v r t}{r_e^2}
 \end{cases} \dots\dots\dots (10)'$$

と書きなおされる。

式(10)'により、等ひずみ条件下でのバーチカルドレーンの圧密は時間 t の単一の指数関数として表わされ、さらにドレーンの有効集水直径 d_e とドレーンの径 d_w の比 n に依存することが知られる。種々の n の整数値に対する上式の関係半対数紙に描いたものが図-1である。図中に比較のため、鉛直一次元流による圧密に対する Terzaghi の解(式(5))と、鉛直軸対称一次元流ではあるがバーチカルドレーン工法の求心的放射状流ではなく、逆に遠心的放射状流としての Silveira⁴⁾ の解

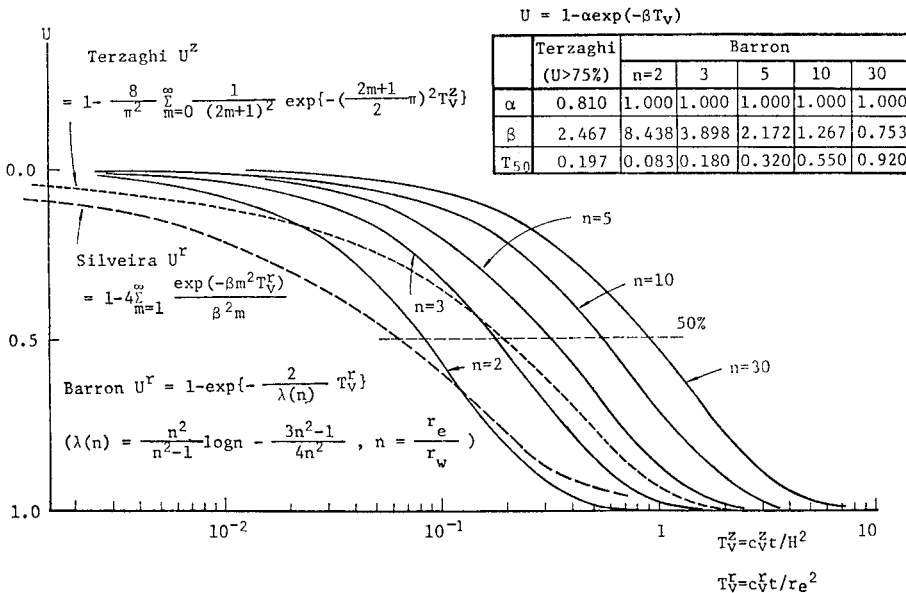


図-1 圧密度-時間係数曲線

$$U^r = 1 - 4 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\beta_m^2 T_v^r)}{\beta_m^2} \dots\dots\dots (11)$$

をも記入した。後者は三軸試験の際に、供試体の圧密を促進するためその側面に筒状の濾紙を巻いて周圧を作用させる場合の問題に相当する。

3. 圧密度-時間係数曲線

図-1の圧密度-時間係数曲線の特性から、次の事項が認められる。

(1) n が小さいほど圧密の進行が速いことは当然であるが、 n が異なる種々の曲線は互いに水平距離が等間隔でずれているに過ぎない。つまり曲線の形はまったく同一であるが、これは Barron の解が式 (10)' のようにパラメーター $\lambda(n)$ の指数関数であることによる。したがって、特定の n の値、たとえば $n=5$ に対する曲線を代表として1つだけ描いておけば、他の曲線は任意の圧密度(たとえば $U^r=50\%$) に対応する時間係数の値を定めることができるから、代表曲線を平行移動することによって容易に描くことができる。図中に $n=2$ ないし $n=30$ に対する各曲線の特性値を表記してある。

(2) 鉛直一次元流による圧密に対する Terzaghi の解を示す曲線と、 $n=3$ に対する Barron の曲線とはほぼ同様の推移を示す。図中の表からもわかるように、 $U=50\%$ に対する時間係数の値は前者で $T_v^s=0.197$ 、後者で $T_v^r=0.180$ とほぼ相等しい。これより時間係数を同一としたとき、Barron の解は $n=3$ の場合 Terzaghi の解と等価であると結論される。

(3) 先述のように、Terzaghi の解(式(5))は時間係数に関して単一の指数関数でなく、その級数和であるから、曲線の形が Barron のものとは異なる。しかし、圧密度の大きいところ ($U^s > 75\%$) では、級数の第1項のみをとった式(7)により T_v^s の単一の指数関数となり、Barron の解の形と一致する(図中の表参照)。

(4) 同じ軸対称水平一次元流といっても、Barron の求心的流れと Silveira の遠心的流れとでは、圧密の進行特性が異なる。後者では排水面積が大きいため圧密の進行が速く、圧密の後半ではようやく $n=2$ に対する Barron の解とほぼ等価となる。

(5) 各種パーチカルドレーン工法の中で、サンドドレーンは $n=5$ 、パックドレーンは $n=10$ 、カードボードドレーンは $n=30$ 、ロープドレーンは $n=50$ 程度の n の値であるから、この図によってそれぞれの圧密特性を評価できよう。

なお繰り返して述べるが、図-1の横軸は鉛直軸対称水平一次元流(Barron および Silveira) に対し、厳密な意味での時間係数 T_v^r (式(2)参照)をとっており、

慣用の式(3)の T ではない。つまり、慣用の図表の種々の n の値に対する各曲線を式(4)によりその時間係数の4倍分だけ右へ移したものである。このようにして、はじめてドレーンの効果が Terzaghi の元の解に対して評価されるものであることを強調しておきたい。ただし、この図によっても、各種パーチカルドレーンの設計には慣用とならば変らない手法で計算がなされることはいうまでもない。

4. サンドドレーン工法の問題点

ここで、パーチカルドレーン工法の中で代表的なサンドドレーンを取り上げ、粘性土層を囲む砂柱と敷砂とからなる排水系をモデル化し、有効応力に基づいて圧密機構を論じよう。従来、サンドドレーンによる圧密が理論どおりに進行しない理由として、砂柱周辺の粘性土の攪乱の影響、砂柱内の水頭損失、砂柱の剛性(杭作用)による複合地盤の効果などがあげられているが、以下ではこれらとは若干違った観点から検討を行うことにする。

まずサンドドレーンの施工において、砂柱の打設による周辺粘土層内の過剰間隙水圧の発生がある。いうまでもなく、砂柱はいわゆる排除杭としてまわりの粘性土を押し除けながら作った孔の中へ砂を投入してでき上がるから、各砂柱のまわりに相当の範囲にわたって粘性土の圧縮があり、しかもそれが衝撃的な非排水状態でなされるため、数 t/m^2 ないし十数 t/m^2 に及ぶ間隙水圧の一時的上昇が見られる例が少なくない。このような発生間隙水圧は、あたかも粘性土層表面に一時的な载荷があったと同様の効果を持ち、その時間的な消散とともに粘性土層内の有効応力が増大して圧密沈下が生ずる可能性がある。事実、各地の盛土試験における沈下計測記録の中で、载荷以前または载荷初期にみられるかなりの沈下がこのような砂柱打設時の過剰水圧の消散によるものである場合が少なくないと考えられる。この意味から、サンドドレーンなどを施した地盤は、砂柱打設という工程によってある程度過圧密されているとみなさねばならない場合もあり、その後の地盤の圧密に及ぼすこの先行効果を無視することができない。

次に上载荷重がのせられる段階に移ろう。载荷直後、圧密開始前は粘性土および砂柱内ともにピエゾメーター水頭はある高さにある。このとき盛土下のサンドマットは容易に圧縮でき、過剰水圧を消散させようが、砂柱に関しては必ずしもそうではない。まわりに粘性土層があって、その圧密沈下が進行しないかぎり砂柱の鉛直方向の圧縮は妨げられている。わずかに砂柱は半径方向にのみ圧縮する可能性が残されているが、それが不十分であれば砂柱内には若干の過剰水圧が残ることになる。実

際の試験盛土などの測定で、砂柱に過剰間隙水圧を残したまま沈下が進行している例が見られるが、この場合粘性土層の圧密はそのような境界値問題として解かねばならない。一般に、砂の圧縮は粘土に比べて量的に小さいし、透水性がよいから圧縮の速さも大きい。サンドドレーンでは砂柱の周囲に粘性土層の拘束があって、先述のように少なくとも鉛直方向には砂柱だけが独自に速く圧縮することはできない。よって急速な圧縮が起こりうるとすれば、それは砂柱の中心へ向かう半径方向ということになるが、荷重分担という観点からは砂柱は相当の大きさの軸力をうけて外方へ広がろうとし、中心方向への圧縮を妨げられるであろう。

このように、サンドドレーンの圧密は粘性土層の圧縮性との相対における砂柱の圧縮性の大小に支配されると考えねばならない。すなわち、砂柱がゆるくて圧縮性が大きければ、地盤の圧密初期に砂が砂柱の中心方向へ圧縮できるので、砂柱内の過剰水圧が残存しない理想的な境界条件が満足されることになる。逆に砂柱が密で圧縮性が小さければ、圧密初期に砂が中心方向へ圧縮するのがむずかしく、したがって、砂柱に過剰水圧が残りやすい。パーチカルドレーン工法の中でも、砂柱をよく締め固める方式のサンドコンパクションパイル工法は、この後者に属すると考えられる。端的にいって、砂柱への応力集中は圧密を促進させるべき粘性土層に有効な上載荷重が作用しないことにほかならない。元来、砂柱での支持と圧密促進とは相反する機能なのであって、現にサンドドレーン工法において砂柱の存在が地盤の圧密を遅らせている事例が少なくない。このような観点からすれば、サンドドレーンの砂柱は切れない程度にゆるく造成されるのが圧密促進には有効であろう。このことは砂柱への応力集中を減じ、粘性土層への最終有効応力を増大させ

るという意味からも望ましい。また、砂柱の透水性を大にして、その内部での水頭損失を減ずるうえでも有効であり。さらには相当高価な砂質材料の節約という面からも有利である。

特に泥炭のような有機質土で二次圧密が支配的な土層に対しては、サンドドレーンはまったく有効でないだけでなく、むしろ有害であるという意見も多い。たとえば Bjerrum⁹⁾ によると、サンドドレーンが泥炭に効かない理由として、泥炭の透水係数が有効応力の増加とともに急激に減少し、砂柱のまわりに不透水膜を作ってしまうことをあげている。このようないわゆるドレーンの汚染効果は、カードボードドレーンにおいてもいわれており、圧密初期におけるカードボードの排水機能が、目づまりとともに急速に減退するという報告がある。このような圧密促進工法の適否は、多かれ少なかれパーチカルドレーン工法全般についていえることであり、対象とする粘性土層を主体とした地史的・地形的・地質的ならびに土質工学的特性の把握とともに、ドレーン系で構成される複合地盤としての圧密機構の解明が肝要であると結論される。

参 考 文 献

- 1) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, 5th print., John Wiley, New York, p. 282, 1948.
- 2) Barron, R.A. : Consolidation of fine-graded soils by drain wells, Trans. ASCE, Vol. 113, pp. 718~742, 1948.
- 3) 吉国 洋：三次元圧密の基礎理論，土木学会論文報告集，No. 201, pp. 87~98, 1972.
- 4) Silveira, I. : Consolidation of a cylindrical clay sample with external radial flow of water, Proc. 3rd Intern. Conf. SMFE, Vol. 1, pp. 55~56, 1953.
- 5) Bjerrum, L. : Embankments on soft ground, Proc. ASCE Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Vol. 2, pp. 1~54, 1972. (1978.3.15・受付)