

広島大学 正員 網子 寿夫
 広島大学 正員 O 吉 國 洋

1. まえがき

軟弱地盤の圧密を促進するためにサンドドレーン工法やペーパードレーン工法などの Vertical Drain 工法が広く採用されているがこれら Vertical Drain 工法に対する設計法としては現在二次元的な立場に於て Vertical Drain の透水係数が圧密過程に及ぼす影響或いは Vertical Drain の応力集中の問題その他三次元的に取扱うべき種々の問題を含んでいるにも拘らずこれらの事に全く考慮が拂われていない。Vertical Drain 中の損失水頭が圧密速度に及ぼす影響については Ch そのものの判定が比較的困難である事と実験室で求められた Ch が現場の Ch に一致するかどうかという点の意味があまりよくあつた Vertical Drain 中の損失水頭の影響が表面化せず現場に於いては流下観測によって得られた Data より損失水頭その他諸々の三次元的要素を含んだ Ch を求め三次元的問題を二次元的問題におき替へた取扱い方をしている。然しながら平均圧密度についてはこの様な取扱い方が問題と解決する事と出来るが任意点の圧密度即ち任意点の強度増加過程については全く無力である。Vertical Drain 工法の成果を判定するテックホーリングによると殆んど深度 10m 前後から急激に強度増加率が減少している。

その反面敷砂のすぐ下の部分では大きな強度増加率を示している事は対称的である。Fig.1 は Fig.2 に示す Vertical Drain のモデルで Vertical Drain の流水抵抗がない場合の各深さに於ける圧密排水とその透水係数が k_0 である様な実際の Drain の中に強制的に押しこんだ時の Vertical Drain 中の間隙水圧分布を示したものである。即ち抵抗のない理想的な Vertical Drain による圧密排水量を支障なく排水するためには Vertical Drain の中にこれだけの動水配が必要であることを示したものである。これを見るとある条件のもとでは圧密荷重 ap よりも大きな間隙水圧が Vertical Drain の中に生ずるといふ非現実的な結果になつてゐるがそれだけに損失水頭が圧密過程に大きく影響するケースもある事を示している。尚今回は Vertical Drain 工法の三次元的設計法の基礎的研究として先づ損失水頭の問題ととりあけ報告している。

2. Vertical Drain 中の損失水頭を考慮に入れた圧密過程

Fig.2 に示す Vertical Drain のモデルに於いて深さ Z と $Z+dZ$ の Vertical Drain 中の流量の差は厚さ dZ の薄円柱が漸増する圧密荷重 $P(t, Z)$ によつて単位時間に圧密排水される量に等しいとして微分方程式とたると

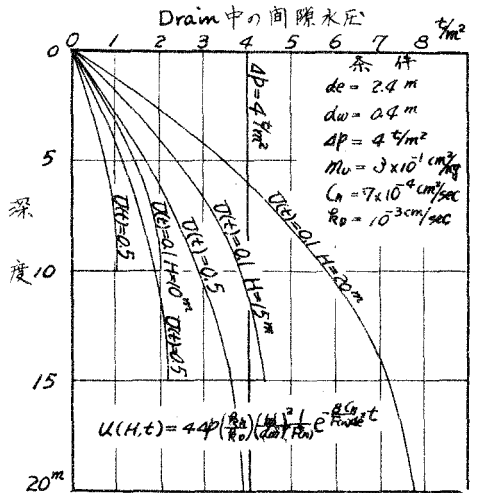


Fig. 1 圧密排水と空隙水圧の間に必要な動水配

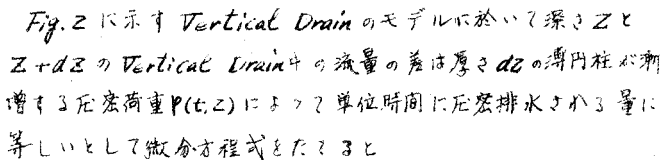


Fig. 2

$$\frac{R_0}{r_0 M_0 (n^2 - 1)} \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^t U(t-\tau) \frac{\partial R}{\partial \tau} d\tau \right] \quad (1)$$

が得られこれと次の境界条件及び初期条件のもとでとくと

$$\left. \begin{array}{l} (1) \quad z=0, \quad R=0 \\ (2) \quad z=H, \quad \frac{\partial R}{\partial z}=0 \\ (3) \quad t=0, \quad R=R_0 \\ (4) \quad t=\infty \quad R=0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

Vertical Drain中の損失水頭 $h(t, z)$ は

$$h(t, z) = \frac{4 R_0}{\pi} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{1}{m} \sin \frac{m\pi z}{2H} e^{-m^2 \beta} \int_0^t \frac{d\tau}{U(\tau)} \quad (3)$$

任意点の圧密度 $U(t, z, r)$ は

$$U(t, z, r) = 1 - \frac{4\beta}{\pi} \sum_{m=1,3,5,\dots} m \sin \frac{m\pi z}{2H} \int_0^t U(t-\tau, r) \frac{1}{U(\tau)} e^{-m^2 \beta} \int_0^{\tau} \frac{d\tau'}{U(\tau')} d\tau \quad (4)$$

任意深さの平均圧密度 $U(t, z)$ は

$$U(t, z) = \frac{4\beta}{\pi} \sum_{m=1,3,5,\dots} m \sin \frac{m\pi z}{2H} \int_0^t U(t-\tau) \frac{1}{U(\tau)} e^{-m^2 \beta} \int_0^{\tau} \frac{d\tau'}{U(\tau')} d\tau \quad (5)$$

更に Vertical Drain 全体の平均圧密度 $U(t)$ は

$$U(t) = \frac{8\beta}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \int_0^t U(t-\tau) \frac{1}{U(\tau)} e^{-m^2 \beta} \int_0^{\tau} \frac{d\tau'}{U(\tau')} d\tau \quad (6)$$

$U(t)$: Radial flow に於ける二次元の平均圧密度

$U(t, r)$: Radial flow に於ける二次元の間隙水圧減少率

R_0 : Vertical Drain の透水係数

H : Vertical Drain の長さ

d_w : Vertical Drain の直径

$$\beta = \frac{\pi^2 R_D}{4 H^2 \int_0^{\infty} M_0 (n^2 - 1)}$$

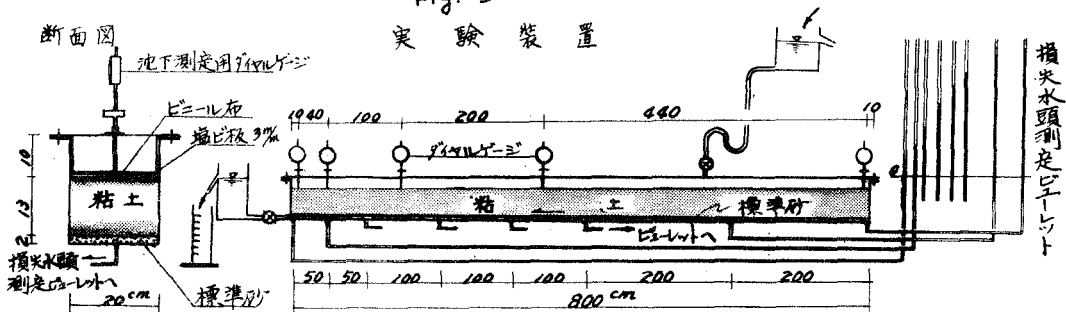
$$n = d_e / d_w$$

d_e : 圧密有効円の直径

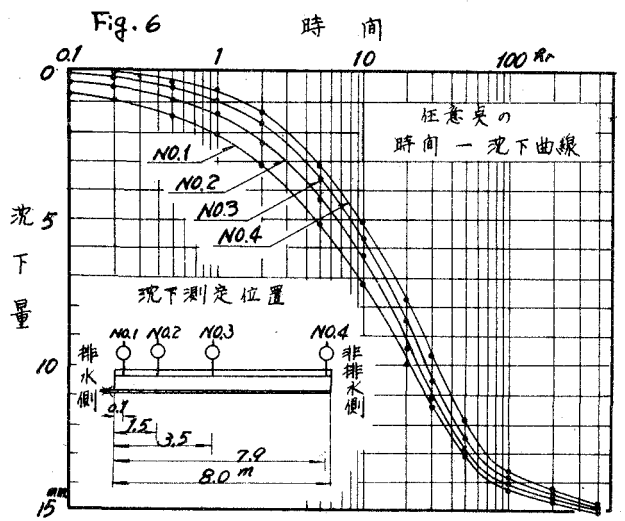
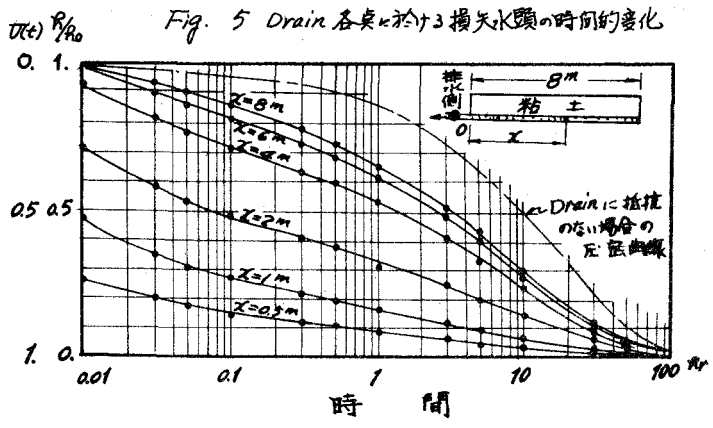
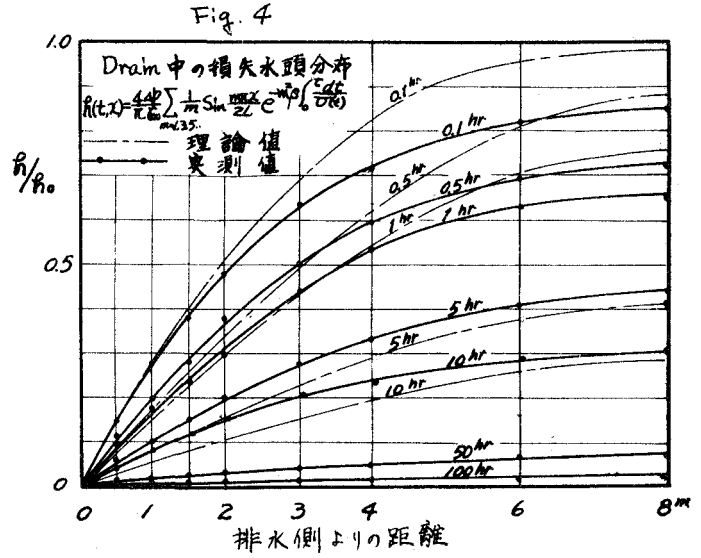
3. 模型実験

前述の Vertical Drain 中の損失水頭を考へた圧密過程に対する考へ方を検証する意味で Fig. 3 に示す試験装置を用いて模型実験を行った。この場合実際の Vertical Drain 工法は Radial flow で等歪による d_e の変化しない圧密であるが有意差を出すために長尺な Vertical Drain を本来の筈のまゝ、室内で実験する事が困難な事及び Drain の各位置に於ける圧密の進行状態を把握するために圧密の形態を自由歪の一次元圧密におき替え、Drain を横置して実験を行った。

Fig. 3
実験装置

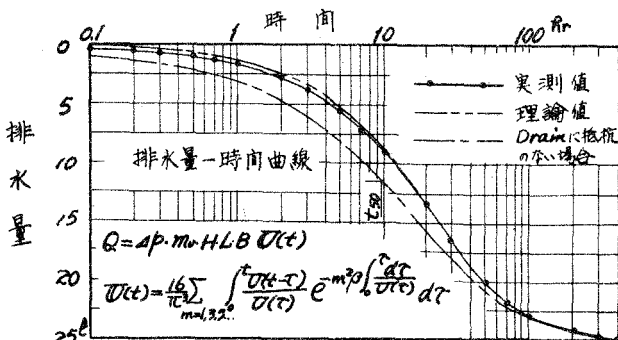


実験方法は先づ $20\text{cm} \times 25\text{cm} \times 8\text{m}$ の圧密槽の下部に Drain 材料として豊浦産の標準砂を厚さ 2cm に敷き均し濾紙を敷いた上に粘土を 15cm セットした。そして同一横断面の沈下を一定にするために長さ 50cm 厚さ 3mm の塩ビ板を敷き並べその上をビニール布で覆い液圧をもって圧密荷重を与えた。実験に先立ち $p_0 = 0.1\text{kg/cm}^2$ で事前圧密を行い事前圧密が完了したところで荷重増加率 $4p/p_0 = 4.2$ の $4p = 0.42\text{kg/cm}^2$ を与えて圧密を行った。圧密は Fig. 4 に示す圧密槽の左端のコックを開いて行い種々の位置で粘土の表面の沈下をダイヤルゲージで測定し、Drain 中の損失水頭をピエロメータで測定した。尚排水量を測定し Drain 全体の平均圧密率とした。Fig. 4 は圧密過程での損失水頭の分布の時間的变化を示したものである。又 Fig. 5 は Drain 各点に於ける損失水頭の時間的变化を示したもので Drain の位置により異なった速度で圧密有効応力が漸増する過程がよく示されている。尚損失水頭のない場合の理想的な圧密曲線と対比させ時間的おくれの程度を示した。Fig. 6 は Drain 各点に於ける粘土層の沈下の時間的变化を示したもので排水口よりの巨離と共に圧密のおくれが見られる。Fig. 7 は排水量の時間的变化を示したもので損失水頭の影響のない場合の排水量-時間曲線と比較してあるが $U(t) = 0.2$ 附近



で 2.5 倍 $U(t) = 0.5$ 附近で 1.6 倍の時間的
おくれが出ている。尚 Vertical Drain
中の損失水頭に影響された圧密過程の
実測値と理論計算値は比較的良好一致して
いる。

Fig. 7



4. あとがき

(1) Vertical Drain の設計に当って Drain 中の損失水頭が条件によっては非常に大きく圧密過程
に影響を及ぼし三次元的な考え方で設計する必要がある。

(2) 圧密過程の後半について Radial flow の平均圧密度として Barron の近似的式 $U(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
を用いて定性的な検討を行うと Vertical Drain 工法の圧密過程に及ぼす損失水頭の影響は (R_h/R_0)
 $(H/d_w)^2$, $(n^2-1)/n^2 F(n)$ によって規定される。但し R_h は軟弱層の横方向の透水係数であり

$F(n) = \frac{(n^2-1)}{n^2} \log_e n - \frac{2n^2-1}{2n^2}$ である。尚一般に使用される範囲の $n = d_w/d_s$ の値に対して $\frac{n^2-1}{n^2 F(n)}$
の値はあまり変化しないので Vertical Drain 工法の圧密過程に影響する主要なファクターは透水係数の
比と Drain の細長比の二乗である。

(3) Vertical Drain 工法の圧密過程を計算するに当って ②~④ 式は全て $\int_0^t \frac{dt}{U(t)}$ という積分を含
んでいる。Radial flow に於ける平均圧密度 $U(t)$ として Barron の近似的式 $U(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ を用いた
のでは $\int_0^t \frac{dt}{1 - e^{-\lambda t}}$ が $t=0$ で異常積分となり解は不定となるので圧密初期あるいは全過程に積分
可能な近似的式を用いる必要がある。近似的式の形については今後の問題として検討していくつもりである。
尚模型実験は圧密の形態が一次元圧密であるので $U(t) = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{C_v}{L^2} t}$ の近似的式を用いて容易に積分する
事が出来た。

参考文献

網干, 吉國 軟弱地盤の真空排水工法に関する二つの実験的研究 昭 99, 土木学会年次講演会
R.A. Barron Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, Trans. A.S.C.E. 1948
大西, 堤 土地造成における原地盤改良工法 土と基礎 Vol. 11, No. 8 1963