

広島大学 正員 網 千 寿 夫
 広島大学 正員 ○ 吉 国 洋

1. まえがき

Vertical Drain 工法の設計にあたって Drain 中の損失水頭が条件によって非常に大きく圧密過程に影響を及ぼし特に Vertical Drain 先端部の圧密にかなりの遅れが出るので三次元的な考え方で設計する必要がある事と昨年の学会に於いて述べ Vertical Drain 中の損失水頭に関する基礎方程式は(5)式で表わされ、その解の形は(6)式となる事を示した。然し乍ら(6)式中の $\int_0^T \frac{dT}{U(T)}$ の積分が容易ではない。そこで今年度は Vertical Drain 中の損失水頭の挙動及び圧密過程に及ぼす影響について電氣的シュミレートモデルを用いて模型実験を行い定量的に把握する事が出来た。

2. 電氣的モデルと圧密モデル

今 比抵抗 $\rho_c \Omega \cdot \text{cm}$ と蓄電容量 $C \text{ Farad/cm}^2$ をもって媒質と考へ媒質中の微小要素に流入する電氣量と流出する電氣量の差を微小要素が放電又は蓄電する量に等しいと置き問題を一次元に想定すれば

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{C \rho_c} \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \quad (E: \text{電圧}) \quad \dots \dots (1)$$

なる方程式が得られる。(1)式は熱伝導型の方程式であり圧密に於ける $C_D = \frac{\rho}{\rho_w M_v}$ は $\frac{1}{C \rho_c}$ に相当し相以解析が可能である。尚 $\frac{1}{\rho_w M_v}$ は $\frac{1}{C}$ に対応し ρ は $\frac{1}{\rho_c}$ に対応している。

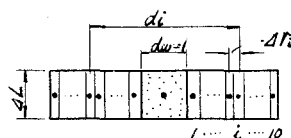
3. ランア化とスケーリング

この模型実験では Vertical Drain 全体を Fig. 1 に示す様に深度方向に10個の要素に分割し更に Radial 方向に各要素の体積を等しくする様な方法で10個に分割した。そして各要素に含まれている水は各要素の中心に集中しているものとしてシュミレートモデルを作成し尚媒質中の電氣抵抗 R_{ci} ($i=1, \dots, 10$) コンデンサー C 及び Vertical Drain 中の電氣抵抗 R_w は夫々次式で算定した。

$$R_{ci} = \frac{\Delta r_i}{\Delta z \cdot \pi \cdot d_i} \cdot \rho_c \quad \dots (2)$$

$$C = \Delta V_i \cdot C \quad \dots (3)$$

$$R_w = \frac{4 \Delta L}{\pi \cdot d_w^2} \cdot \rho_w \quad \dots (4)$$



Δr_i : ランア間距離

$$\Delta V_i = \frac{1}{10} \cdot \frac{\pi}{4} (n^2 - 1) d_w^2 \Delta L$$

ρ_w : Vertical Drain の土抵抗

ρ_c : 粘土の透水係数

ρ_w : Vertical Drain の透水係数

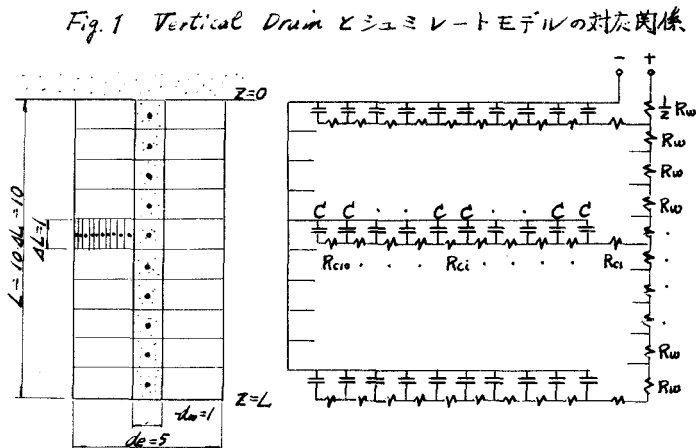


Fig. 1 Vertical Drain とシュミレートモデルの対応関係

この様にして作られたシュミレートモデルの $R_w=0$ の場合の $U-T$ 曲線と Barron の $U-T$ 曲線を比較したのが Fig. 2 であって圧密終期に少し遅れが出ているが初期の目的は達成したものと考えている。尚測定の方法は Vertical Drain に相当する部分の電流と電磁シロで記録する方法を用いた。

4. Vertical Drain 中の損失水頭に影響する Factor

模型実験を行うにあたって何を Factor にするかは重要な問題である。これについて著者は昨年 Vertical Drain 中の損失水頭に関する基礎方程式が

$$\frac{R_w}{r_w M_0 (n^2-1)} \frac{\partial^2 R}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^z U(t-\tau) \frac{\partial R}{\partial \tau} d\tau \quad \dots (5)$$

で表わされその解の形は

$$R(t, z) = \frac{4R_0}{\pi} \sum_m \frac{1}{m} \sin \frac{m\pi z}{2L} e^{-m^2 \beta^2 \frac{T}{4n^2}} \quad \dots (6)$$

$$\beta = \frac{\pi(n^2-1)}{4} \left(\frac{d_w^2}{L^2} \right) \left(\frac{k_c}{k_w} \right)$$

である事を示し損失水頭に影響する Factor は $\left(\frac{n^2-1}{\pi^2} \right) \left(\frac{d_w^2}{L^2} \right) \left(\frac{k_c}{k_w} \right)$ に関係ある事を述べた。

尚(6)式の積分中には $F(\eta) = \frac{n^2-1}{4n^2} \log n \cdot \frac{3n^2-1}{4n^2}$ が含まれている。今度の模型実験では n を一定として $R = \left(\frac{L}{d_w} \right)^2 \left(\frac{k_c}{k_w} \right)$ を parameter として整理した。尚 $R = \left(\frac{L}{d_w} \right)^2 \left(\frac{k_c}{k_w} \right)$ は(2)式と(4)式を用いて計算すれば

$$R = \left(\frac{L}{d_w} \right)^2 \left(\frac{k_c}{k_w} \right) = \left(\frac{L}{d_w} \right)^2 \left(\frac{f_w}{f_c} \right) = \frac{4R_0}{4d_i R_{ci}} \left(\frac{L}{d_w} \right)^2 R_w$$

となり $\frac{4R_0}{4d_i R_{ci}} = \text{const.}$ である。従ってシュミレートモデルに於いて dL を任意に考えても 式は自動的に満たされるので $\left(\frac{L}{d_w} \right)^2$ の影響を見るためにランブ数を変化させる事をせず専ら R_w だけ変化させて模型実験を行った。

5. シュミレートモデルによる実験結果

Fig. 3 は $Z=L$ に於ける損失水頭の時間的变化を $R = \left(\frac{L}{d_w} \right)^2 \left(\frac{k_c}{k_w} \right)$ を parameter に示したのである。 R が小さい時には $T=t_0$ に於ける損失水頭の大きさも小さく半対数で上に凹の変化をする。 R が大きくなるにつれて $T=t_0$ の損失水頭も大きくなり $R = 6.55 \times 10^{-1}$ では殆んど一定速度で減少している。 Fig. 3 中に Barron の $U-T$ Curve が入っており損失水頭の時間的变化との相対関係が示してある。 Fig. 4 は $T=t_0$ に於ける $Z=L$ の損失水

Fig. 2 理論曲線との比較

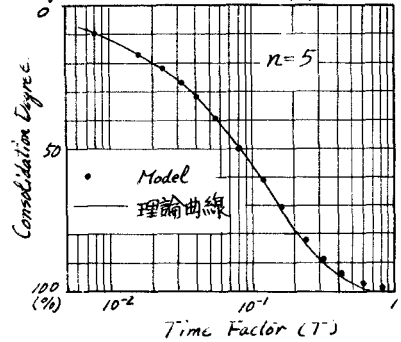


Fig. 3 $Z=L$ に於ける損失水頭の時間的变化

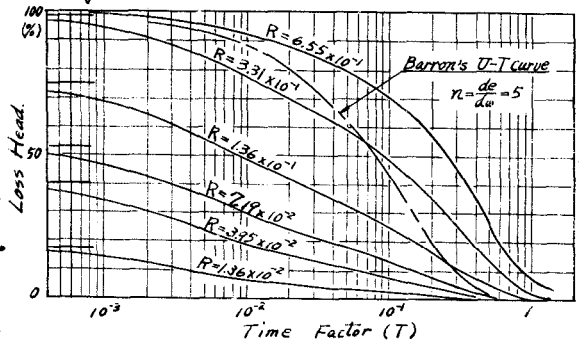


Fig. 4 $T=t_0$ に於ける $Z=L$ の損失水頭

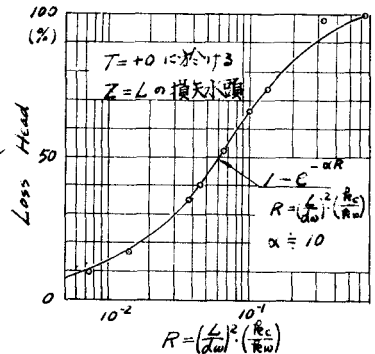
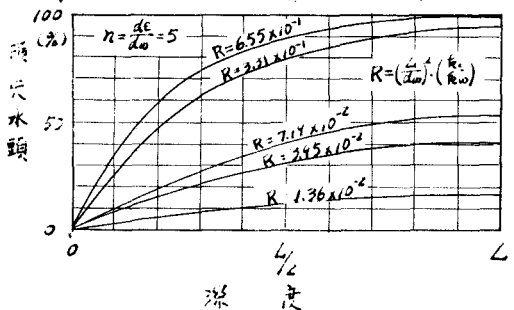


Fig. 5 $T=t_0$ に於ける損失水頭の分布

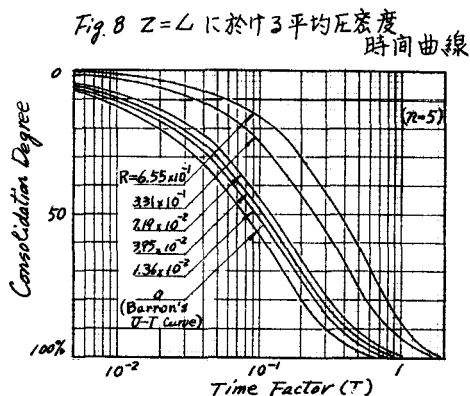


頭が R の大きさによって変化し $1 - \exp\{-10(\frac{L}{2a_w})^2(\frac{R_c}{R_w})\}$ の曲線にのる事を示したものである。Fig.5は $T=0$ の深度方向の損失水頭分布を R とparameterに示したものである。この様にVertical Drainの損失水頭が $T=0$ に於いて不連続的な減少をする事について実際には非常に急激な連続的变化であるのかも知れないが工学的には不連続な変化をとると考えても差支えないと思われる。

Fig.6はVertical Drain全体としての平均圧密度と時間の関係と R をparameterに示したものである。

Fig.7はFig.6を書き直して或る圧密度に達する時間と R との関係にしたものである。圧密の遅れは圧密過程の前半で大きく後半に入って或る程度回復しており単純に C_u を何倍かした $\sigma-T$ 曲線ではない事が分る。

Fig.8及びFig.9は夫々 $Z=L$ の圧密過程をFig.6, Fig.7と同様に整理したものである。これを見ると上に述べた傾向は更に顕著である。特に R の値が 10^1 を越すとVertical Drain中の損失水頭が圧密過程に及ぼす影響は急激に増加するようである。



6. 室内模型実験

前述のシュミレートモデルを用いて得られた結果を検証する意味でFig.10に示す試験装置を用いて模型実験を行った。模型の寸法は夫々 $L=80\text{cm}$, $d_e=20\text{cm}$, $d_o=3\text{cm}$, $n=68$ であってDrain材料としては豊浦産の標準砂を用いた。透水試験及び一軸圧密試験の結果より夫々 $R_w=3.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, $R_c=2.1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ と推定してシュミレートモデルより得た結果に適用した。尚シュミレートモデルは $n=5$ であるが n の相違による影響は無視している。室内模型の R の値は前述の値を入れて計算すれば $R \div 5 \times 10^{-1}$ である。

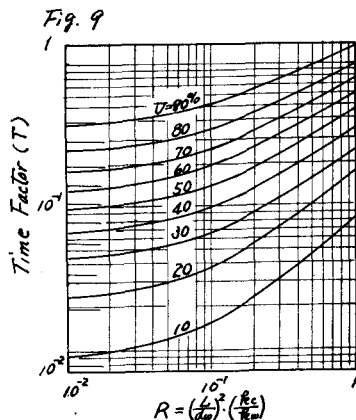
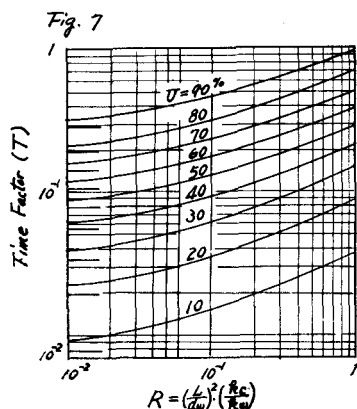
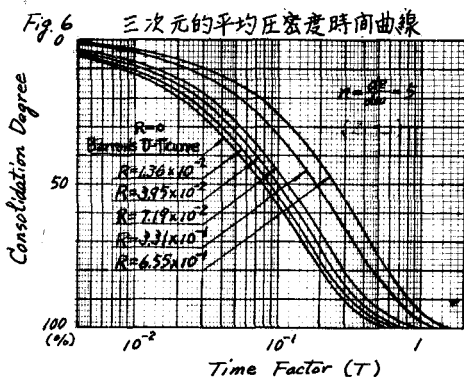


Fig. 11 は $z=L$ に於ける損失水頭の時間的变化, $z=L$, $z=\frac{1}{2}L$ 及び全体の圧密度時間曲線の実測値とシュミレートモデルによる曲線を比較したものである。結果は比較的良好一致しているが室内模型実験の方が幾分遅れる傾向が見られる。

7. 考察

以上 $R = \left(\frac{L}{d_w}\right)^2 \left(\frac{k_c}{k_w}\right)$ を parameter にすれば Vertical Drain 中の損失水頭が圧密過程に及ぼす影響をよくとらえる事を述べて来たが実際の地盤改良に於いてはどの程度の影響をうけているかを検討してみる。サンドドレーン工法とペーパードレーン工法について次の条件を仮定すると

サンドドレーン ペーパードレーン

$$n = 5$$

$$n = 30$$

$$L = 20.0 \text{ m}$$

$$L = 20.0 \text{ m}$$

$$d_w = 40 \text{ cm}$$

$$d_w = 2 \text{ cm} \text{ (3 cm}^2 \text{ を円に換算)}$$

$$k_c = 10^{-7} \text{ cm/sec}$$

$$k_c = 10^{-7} \text{ cm/sec}$$

$$k_w = 3 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

$$k_w = 10^{-1} \text{ cm/sec}$$

$$R = 8 \times 10^{-2}$$

$$R' = 3.3 \times 10^{-1}$$

(但しペーパードレーン工法の場合 $n=30$ であり $R(n=30)/R(n=5) \div 30$ であるので $R' = \frac{R}{30}$ を用いる)

サンドドレーン ペーパードレーン

全体の平均圧密度が 80 % に達する時間 ($T_{80} R=0.08 / T_{80} R=0$)

1.4 倍

2.25 倍

表層部 ($R=0$) が圧密度 80 % に達した時 $z=L$ の圧密度 ($U_{z=L}$)

68 %

43 %

この様に相当大きな影響があると考えられる。特に Vertical Drain 先端部の圧密のおくれが相当あり一般によく言われる様に 10m 以下の強度が増加しにくい事はこの事からも説明される。圧密速度については C_h そのものが室内実験で求めにくい事もある現場の圧密流下曲線の 50 % 附近でフィティングして C_h を逆算しているのだからその影響は否定しないが本来の C_h はもっと大きい筈である。強度の増加という観点からは損失水頭の影響は無視出来ないと考えられる。

尚今回の模型実験は $n = \frac{L^2}{d_w^2} = 5$ について行ったものであるが他の n の値に対しても同様に行う事が出来る。本研究は文部省科学研究費(試験研究)の援助を受けてなされたものであり衷心より謝意を表。参考文献

網干 吾国 Vertical Drain 工法の三次元的設計法に関する基礎的研究 昭 41. 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

Fig. 10

室内実験装置

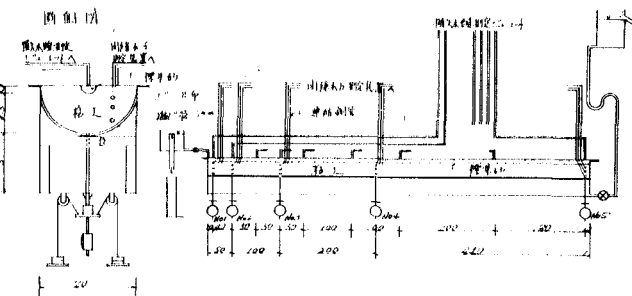


Fig. 11 室内実験に於ける損失水頭圧密度-時間曲線

