

九州大学工学部 正員 山内豊聡 正員 後藤恵之輔
 〃 学生員 井上修美 岩見 功

1. まえがき

軟弱地盤の圧密を促進するために、プレローディング工法やサンドドレーン工法などの方法がよく利用されている。著者らの研究室では、電気浸透を利用した圧密の促進方法も有効であると考え、これまで基礎的研究として三軸圧縮試験機と圧密試験機による実験を行ってきた。しかし、これらの実験に使用した電極は板状のものであり、今回、より現場に即したものとするため棒状電極を考え、これについて行なった計算結果および実験結果について報告するものである。なお、理論については三瀬のものを参照し、これに若干の修正を加えている。

2. 理論

排水は陰極でなされるものとし、陰極を図-1のように千鳥格子状に配置する。この場合一本の陰極に流入する区域は正六角形となるが、これを等面積の円(半径 r_e)に置きかえて考え、円周上に陽極を配置する。

ここで電圧を電気浸透に有効に作用する有効電圧 E_e と、その他の無効電圧とに分けて考え、電圧をかけることにより生じる間げき水圧は、有効電圧に比例するものと考えらる。

有効電圧 E_e に関する基礎式は、Barronらの式を参照して三次元直交座標系で次式となる。

$$C_{eh} \left(\frac{\partial^2 E_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_e}{\partial y^2} \right) + C_{ev} \frac{\partial^2 E_e}{\partial z^2} = \frac{\partial E_e}{\partial t} \quad (1)$$

ここに C_{eh} , C_{ev} はそれぞれ水平および垂直方向の電気浸透圧係数である。

垂直方向の流れを無視して式(1)を円筒座標に変換すると、次式が得られる。ただし水平方向には等方であるとする。

$$C_{eh} \left(\frac{\partial^2 E_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_e}{\partial r} \right) = \frac{\partial E_e}{\partial t} \quad (2)$$

これを変数分離の形で解くと、次の解が得られる。

$$E_e = \sum_k \{ A_k J_0(kr) + B_k Y_0(kr) \} \exp(-k^2 c_e t) \quad (3)$$

ただし k は定数、 $J_m(kr)$, $Y_m(kr)$ は m 次の第一種および第二種のベッセル関数、 A_k , B_k は定数である。

境界条件は (i) $r=r_e$ で $\frac{\partial E_e}{\partial r} = 0$, (ii) $t > 0$, $r=r_w$ で $E_e = 0$ で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{(i)より} \quad \left(\frac{\partial E_e}{\partial r} \right)_{r=r_e} &= - \sum_k \{ A_k J_1(kr_e) + B_k Y_1(kr_e) \} \exp(-k^2 c_e t) = 0 \\ \therefore B_k &= -A_k J_1(kr_e) / Y_1(kr_e) \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(ii)より} \quad (E_e)_{r=r_w} &= \sum_k \{ A_k J_0(kr_w) + B_k Y_0(kr_w) \} \exp(-k^2 c_e t) = 0 \\ \therefore B_k &= -A_k J_0(kr_w) / Y_0(kr_w) \quad (5) \end{aligned}$$

式(4)と(5)を等置して

$$J_1(kr_e) / Y_1(kr_e) = J_0(kr_w) / Y_0(kr_w) \quad (6)$$

式(6)から k が決定される。ここで $kr_w = \alpha$, $re/r_w = n$ とおいて

$$J_1(n\alpha) / Y_1(n\alpha) = J_0(\alpha) / Y_0(\alpha) \quad (7)$$

より α を求めてよい。

したがって、完全解は式(4)を(3)に代入して次式となる。

$$E_e = \sum_k A_k \left\{ J_0(kr) - \frac{J_1(kr_e)}{Y_1(kr_e)} \times \frac{Y_0(kr)}{Y_0(kr_w)} \right\} \exp(-k^2 c_e t) \quad (8)$$

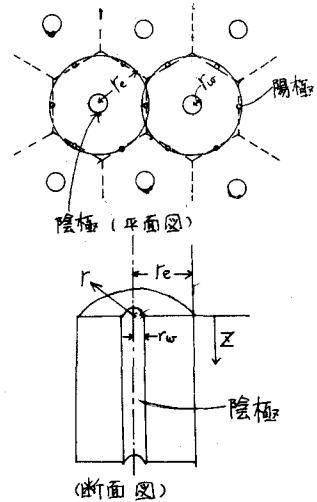


図-1

初期条件を $E_i = f(r)$ とし、 $V_m(r) = J_m(r) - J_i(r)/Y_i(r) \times Y_m(r)$ とおくと、周知の次式から A_k が決定される。

$$A_k = \int_{r_w}^{r_e} f(r) V_0(r) r dr / \int_{r_w}^{r_e} V_0^2(r) r dr \quad \text{----- (9)}$$

つぎに圧密度を U とし、次式で求める。

$$U = 1 - \int_{r_w}^{r_e} 2\pi r E_e / \pi (r_e^2 - r_w^2) dr / \int_{r_w}^{r_e} 2\pi r E_i / \pi (r_e^2 - r_w^2) dr \quad \text{---- (10)}$$

初期条件として次の2種類を考え、圧密度の計算式を導けば、以下のとおりである。

(i) $E_i = E_0 = \text{const.}$, (ii) $E_i = \frac{r}{r_e} E_e$ (E_e : $r = r_e$ における有効電圧)

(i) のとき $A_k = A_\alpha = 2 E_0 V_0(\alpha) / \alpha \{V_1^2(\alpha) - n^2 V_0(\alpha)\}$

$T_e = C_{en} t / 4 r_e^2$ とおいて

$$U = 1 - \frac{4}{\pi^2 - 1} \sum_{\alpha} V_1^2(\alpha) / \alpha^2 \{n^2 V_0^2(\alpha) - V_1^2(\alpha)\} \times \exp(-4 n^2 \alpha^2 T_e) \quad \text{----- (11)}$$

(ii) のとき

$$A_k = A_\alpha = 2 E_e \{n \alpha V_0(\alpha) - \alpha^2 V_1(\alpha) - \int_{\alpha}^{n \alpha} V_0(t) dt\} / n \alpha^3 \{n^2 V_0^2(\alpha) - V_1^2(\alpha)\}$$

$$U = 1 - \frac{6}{\pi^2 - 1} \sum_{\alpha} \{n \alpha V_0(\alpha) - \alpha^2 V_1(\alpha) - \int_{\alpha}^{n \alpha} V_0(t) dt\} V_1(\alpha) / \alpha^4 \{V_1^2(\alpha) - n^2 V_0^2(\alpha)\} \times \exp(-4 n^2 \alpha^2 T_e) \quad \text{---- (12)}$$

となる。

3. 計算結果および考察

式(11), (12)により計算した圧密度 U を図-2に示す。この図から明らかに、 n の増大につれて圧密度 U の増加率は小さくなるが、この結果は同じ電位傾度で電圧をかけたときでも、電極間が増大するほど圧密が促進されなくなること示すものである。

図-2の実線と破線の比較から、初期有効電圧の違いによる圧密度の差は初期において認められるものの、最終的にはほとんど見られなくなる、したがって、これを活用すれば、電気浸透の計画管理は主として電極間隔比 n に着目することにより実施できることになる。

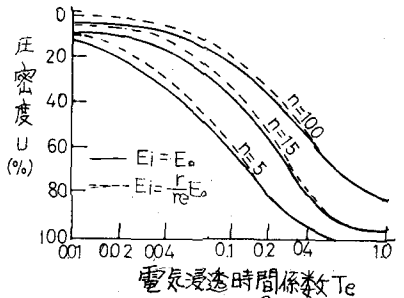


図-2

4. 理論と実験の比較

実験に使用した装置の概略を図-3に示す。容器には内径50cmの塩ビ管を使用し、中央部に陰極を据え陽極を正六角形状に配置した。陰極はφ30mmの有孔ビニルパイプに砂をつめ中に鉄棒を入れたもの、陽極はφ10mmの金針棒である ($n = 16$)。電位傾度は 1 V/cm とし、排水は下方に行なった。なお、使用試料は箱崎東浜の沖積粘土であるが、その物理的性質は表-1のとおりである。

表-1

比重	液性限界	塑性限界	塑性指数
2.60	78.6%	38.2%	40.4

実験結果の圧密度 U を理論値と比較して図-4に示す。両値はほぼ一致しており、理論に用いた仮定に誤りのないことが認められる。なお、この時の C_{en} は0.24である。

5. あとがき

今後の研究課題としては、垂直方向の流しをも考慮した場合に、圧密度が水平方向流しのみ考慮の場合と比べて差違があるかを調べる必要がある。さらに、多くの実験を行ない、 C_{en} および C_{ev} の係数を予測し、電気浸透の計画管理に供したい。

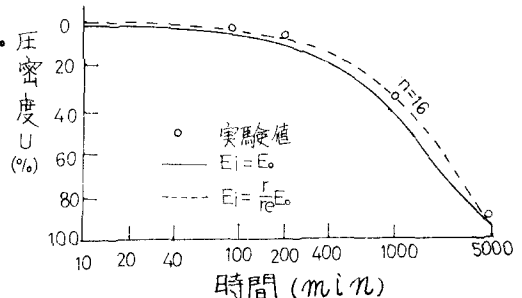


図-4

参考文献

- 1) 山内、松田、中島、電気浸透を用いた沖積粘土の圧密について、昭和50年度土木学会西部支部研究発表会講演集(1976.2), pp.11~22.
- 2) 三瀬、貞、粘土の電気浸透による脱水工法の一考察、土木学会論文集, 第61号(1960), pp.22~28.