

広島大学 正 網千寿夫
 広島大学 正 吉国 洋
 不動建設 K.K. 正 原田邦雄

1. まえがき

この研究は、締め固められた大口径の砂杭を含むいわゆる複合粘性土地盤（コンポーザー工法）の放射流れによる圧密過程を一部実験データを取り入れて理論的に解析し、ホローウエル（サンドドレーン工法）に対する圧密過程と比較する形で検討したものである。

2. 複合地盤の圧密過程の理論的検討

オ24回の土木学会学術講演会において発表したように、鉛直等ひずみ条件のもとでの放射流圧密の基礎方程式は一般的に

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2G(1-\nu)}{\gamma_w(1-2\nu)} \nabla^2 u + \frac{d\bar{p}}{dt} + 2G \frac{d}{dt} (\bar{\epsilon}_r + \bar{\epsilon}_t) \quad (1)$$

と表わされる。ここに G 、 ν は夫々せん断弾性係数及びポアソン比であり、 $\bar{p}$ は粘土に作用する平均鉛直全応力である。又 $U_r(r_w)$ 、 $U_r(r_e)$ を中空円筒の内外面の半径方向の変位とすると

$$\bar{\epsilon}_r + \bar{\epsilon}_t = \frac{2(r_e U_r(r_e) - r_w U_r(r_w))}{r_e^2 - r_w^2} \quad (2)$$

である。コンポーザー工法による圧密においては、 $U_r(r_e) = 0$ であり、 $\bar{\epsilon}_r + \bar{\epsilon}_t = -\frac{2r_w U_r(r_w)}{r_e^2 - r_w^2}$ である。締め固め砂杭工法（コンポーザー）の場合、圧密過程において、砂杭の体積変化は粘土の体積変化に比較して無視しうる量であると考えられる。従って砂杭は地盤の鉛直ひずみの半分だけ半径方向にひずみ、中空円筒の内面に変位（ $U_r(r_w)$ ）を与える。 $U_r(r_w) \neq 0$ の事は実験結果から、砂杭への応力集中の時間過程にかなりの影響を与えるけれども、応力集中の影響をキャンセルした圧密過程、換言すれば一定応力のもとでの圧密過程への影響、（即ち $4G \frac{d}{dt} \left(\frac{r_w U_r(r_w)}{r_e^2 - r_w^2} \right)$ の値）は無視しうる量である事が数値計算結果（未発表）から知られている。従ってコンポーザー工法の場合の圧密過程に対する基礎方程式として

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \nabla^2 u + \frac{d\bar{p}}{dt} \quad (3)$$

とする事が出来る。3式において粘土に作用する鉛直方向の平均全応力 $\bar{p}$ は、砂杭、及び粘土のせん断強度ないしはせん断弾性係数、圧縮係数、砂杭と粘土の相対断面積等によって決定される未知関数であるが、現在これらを数式化するに至っていないので、先に述べた実験によって求められた砂杭への応力集中の時間過程を3式に入れ、差分法により数値計算を行った。粘土に作用する鉛直方向の全応力 $\bar{p}$ 、有効応力 σ'_z の分布及び時間過程を知るため次の解析を行った。円筒座標における応力とひずみ関係は

$$\epsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{1}{E} (\sigma'_r - \nu (\sigma'_z + \sigma'_\theta)) \quad (4)$$

$$\epsilon_z = \frac{u_z}{r} = \frac{1}{E} (\sigma'_z - \nu (\sigma'_r + \sigma'_\theta)) \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_r' + \sigma_\theta')) \quad (6)$$

であり、5式に r を乗じ r について微分し、4式と等値すれば

$$(1 + \nu) (\sigma_r' - \sigma_\theta') - r \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} + \nu r \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} + \nu r \frac{\partial \sigma_\theta'}{\partial r} = 0 \quad (7)$$

となる。6式を r について微分すれば鉛直等ひすみ条件より、 $\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial r} = 0$

$$\therefore \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} = \nu \frac{\partial \sigma_\theta'}{\partial r} \quad (8)$$

7式と8式より

$$\sigma_r' - \sigma_\theta' + \nu r \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} - (1 - \nu) r \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

を得る。応力の釣合方程式は

$$\sigma_\theta' - \sigma_r' - r \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} - r \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

9式と10式より

$$\frac{d}{dr} (\sigma_r' + \sigma_\theta') = - \frac{1}{1 - \nu} \frac{du}{dr} \quad (11)$$

8式と11式より

$$\frac{d}{dr} = - \frac{\nu}{1 - \nu} \frac{du}{dr} \quad (12)$$

かくして各方向の有効応力と間隙水圧の関係を求める事ができた。12式を積分し、 $r = r_w$ において、 $u = 0$ の条件を与えれば

$$\sigma_\theta' = \sigma_r' (r = r_w) - \frac{\nu}{1 - \nu} u \quad (13)$$

を得る。一方鉛直方向の応力の釣合から

$$p_c = \sigma_z' + u \quad (14)$$

であり14式に13式を代入すると

$$p_c = \sigma_z' (r = r_w) + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} u \quad (15)$$

となり、15式の両辺に $2\pi r$ を乗じ r_w より r まで積分すると

$$\bar{p}_c = \sigma_z' (r = r_w) + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \bar{u} \quad (16)$$

となる。ここに $\bar{p}_c$ 、 $\bar{u}$ は夫々鉛直方向の平均全応力及び、平均間隙水圧である。16式において $\bar{p}_c$ の時間過程は実験によって得られた値を利用し、 $\bar{u}$ は3式より求めた値を利用すれば $\sigma_z' (r = r_w)$ を求める事ができる。そして13式より σ_θ' の分布が計算される。全応力分布は14式より求める事ができる。数値計算において ν の値は、 K_0 圧密において $K_0 = 1/2$ というのが沖積粘土に対する一般的評価なので $\nu = 1/3$ を採用した。尚以上の議論はコンホーサー工法の場合だけでなく、 $\bar{p}_c = \text{const.}$ 、 $u_r(r_w) = 0$ とするだけでサンドドレーン工法の場合にも適用できるので、サンドドレーン工法についても数値計算を行い、両者を比較する形で検討を行った。

3. 数値計算結果

数値計算は模型実験に合わせ、次の条件のもとに行なわれた。 $d_c = 14.4 \text{ cm}$ 、 $d_w = 5.0 \text{ cm}$ 、 $\frac{d_w}{d_c} = 2.8$ 、 $C_h = 1.7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$ 複合地盤全体の平均荷重 $p_0 = \text{const.}$ 、粘土に作用する平均鉛直全応力 $\bar{p}_c(t) = \text{実測値}$ 、図-2はサンドドレーンとコンホーサー工法の理論況下曲線で、両者の最終況下量の比は $\bar{p}_c / \bar{p}_c(t_{final})$ の値に一致している。尚圧密時間曲線の形はサンドドレーンの場合と殆んど一致している。コンホーサーをサンドドレーンの圧密曲線で解析した場合、見掛けの圧密係数 C_h はこのケースで $C_h' = 1.6 C_h$ であ

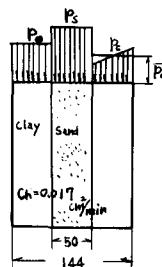


図-1 実測圧密曲線

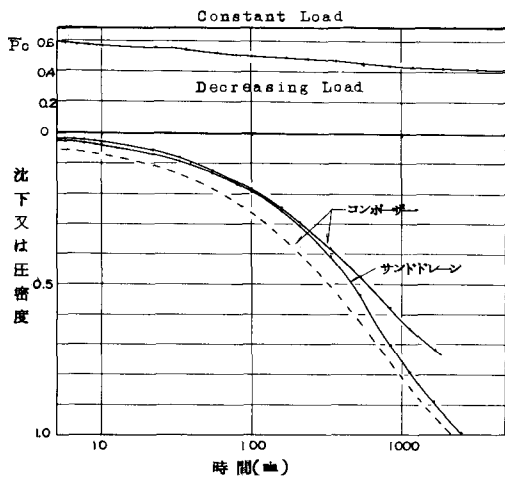


図-2 理論圧密曲線

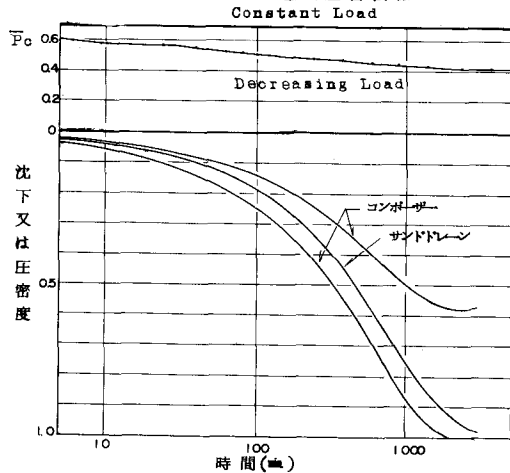


図-3 任意点の圧密度-時間曲線

図中の数字は
 $(V-r_w)/(r_e-r_w)$ の値

(A) サンドドレーン

(B) コンボージャー

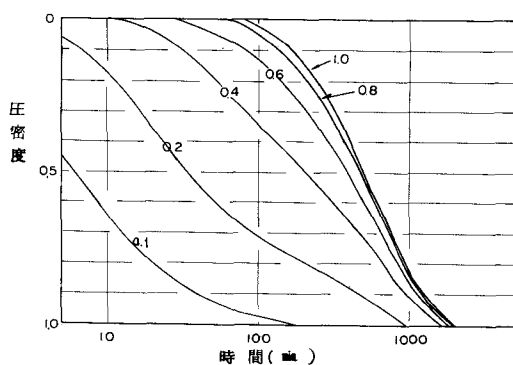
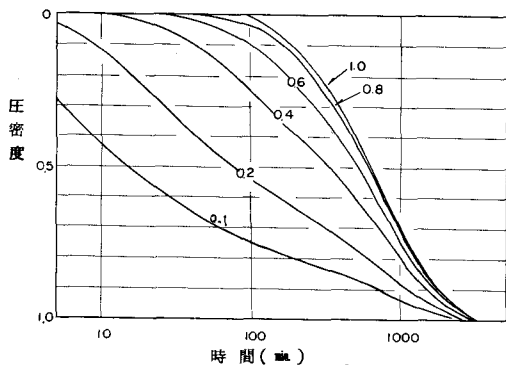


図-4 間デキ水圧 (u) の分布 (理論計算値)

(A) サンドドレーン

(B) コンボージャー

—— 理論曲線
- - - 実測曲線

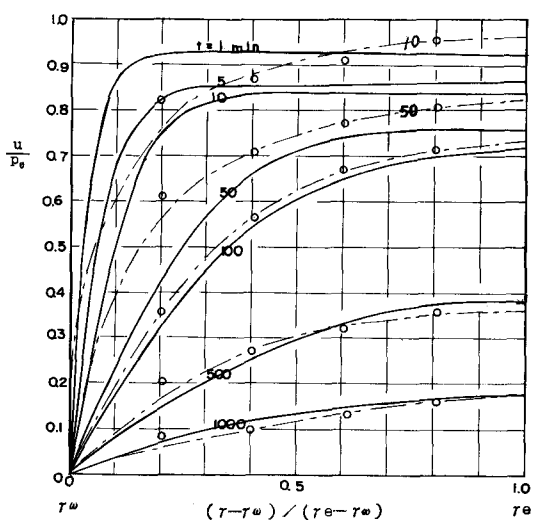
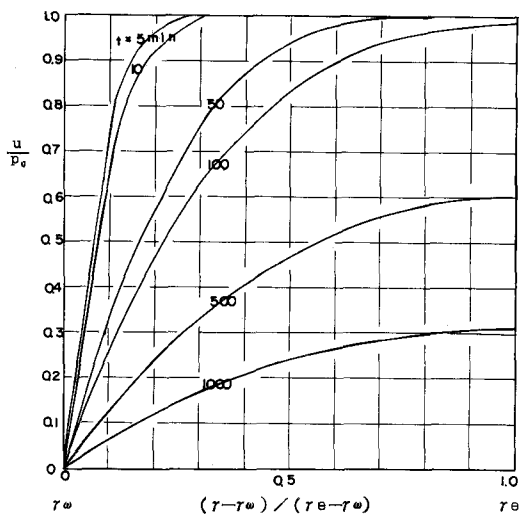


図-5 P_0 及び σ_z 分布図

(A) サンドドレーン

(B) コンポーザー

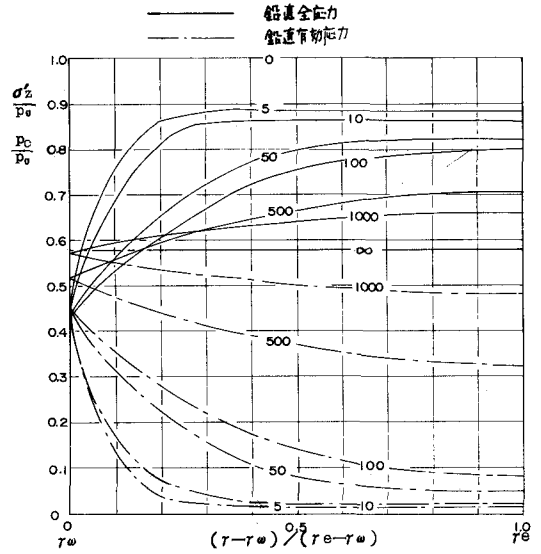
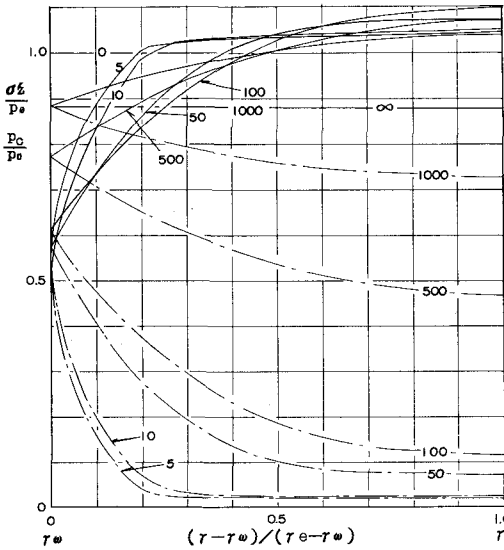


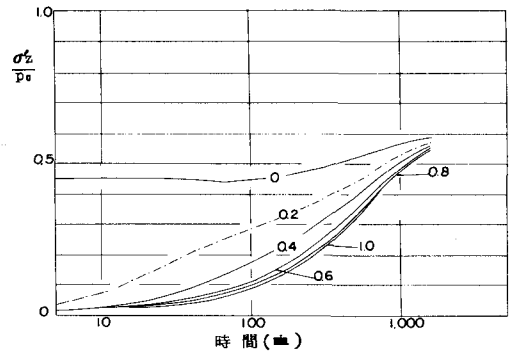
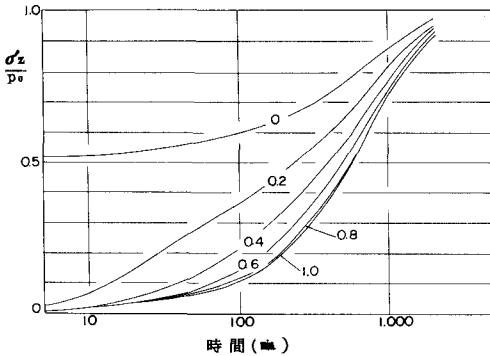
図-6 任意点の鉛直有効応力(σ_z)の時間的变化

図中の数字は

$(r-r_w)/(r_e-r_w)$ の値

(A) サンドドレーン

(B) コンポーザー



る。図-1は沈下の実測曲線であるがよく理論計算値の傾向を示している。図-3は任意点の圧密度時間理論曲線を示したものである。コンポーザーの場合、ドレーン周辺の圧密が早く進行する傾向を見せているが、これは $\bar{p}_0$ が大きい時期に圧密が大半完了するためであると考えられる。又図-3には表現されていないがごく一部にはわずかではあるが数値計算において膨潤の傾向が見られた。図-4は間隙水圧の分布形を比較したもので、コンポーザーの場合扁平な分布となっている。図-4(B)には実測分布が示されているが、扁平な分布の傾向をよく示している。図-5は両者の鉛直全応力 $\bar{p}_0$ 及び有効応力 σ_z の分布を比較したものである。図-6は両者の任意点の鉛直有効応力の時間的变化を比較したものである。尚より詳しい検討は頁数の制限があるため、当日会場で発表する事にします。

4. あとがき コンポーザー工法の沈下過程の推定において、粘土に作用する最終鉛直応力が分れば、サンドドレーン工法の場合に準じて近似的に取扱い得ると考えられる。しかし複合地盤の圧密過程をより厳密に取扱うためには応力集中の過程を解明する必要がある。

参考文献：(1)熱伝導型圧密方程式と境界条件についての一考察(第24回土木学会全国大会)、(2)大口径砂粒を含む粘土の k_v 圧密(第5回土質工学研究発表会)