

砂質地盤内の基礎杭の支持力の一計算法

一群杭の支持力の計算一

正 員 西 田 義 親*

AN ESTIMATION OF THE BEARING CAPACITY OF PILES IN COHESIONLESS SOILS

By *Yoshichika Nishida, C.E. Member*

Synopsis : This paper presents a general solution how to estimate the bearing capacity of foundation piles in the cohesionless soils and also to compute the stress distribution in the soil around piles. Theoretical calculation agrees with experimental results.

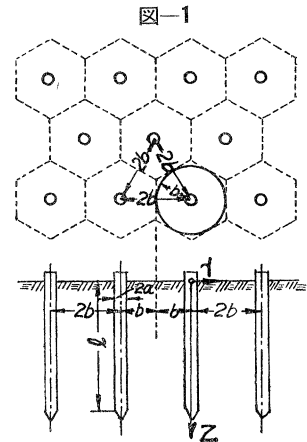
要旨 本論文は粘着性のない地盤の中の基礎杭の支持力を計算する一般的な方法を述べたもので、杭によつて生じる地中の応力も求めることができる。この方法で計算した杭の側面摩擦力の分布状況は実験結果ともよく合った。本文は単杭だけでなく群杭の場合についても計算を行つてある。

1. 緒 言

基礎杭の支持力の計算法はこれまで多く提案されているが、二、三のものを除いて¹⁾、杭によつて生じる地中の応力を考えていない。また多くのものは理論的な見地からも妥当を欠くようである²⁾。著者は杭の先端支持力と側面摩擦とは相互に関係し合うという観点から、杭によつて地中に生じた応力を考えて杭の支持力の計算を試みたが³⁾、これらはやや欠点があるので、次のような一般的な計算法を求め合理的な解を得ることができた。

2. 基 本 式

半無限体の地盤に無数の杭が鉛直に 図-1 に示されるように打ちこまれてあるものとする。杭は同じ寸法であつて無限に配列されているものとする。対称の性質から 1 本の杭のまわりの六角形の範囲だけとりあげて論ずればよいことになる。問題の取扱いを簡単にするためこの六角形に内接に円柱領域について考えることにする。地表面にある杭断面の中心に座標の原点をもち、杭軸を z 軸とする円柱座標 (r, t, z) を用いる (図-1)。均合の方程式は



$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \dots (1) \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} + \gamma = 0 \dots (2)$$

ここに、 $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$ はそれぞれ r, t, z 方向の垂直応力、 τ はせん断応力、 γ は土の容積密度である。土は完全な弾性体でないが、他に適当な方法のない以上、一応土が弾性的であると仮定すると⁴⁾

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{mE}{m+1} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots (3)$$

$$\sigma_z = \frac{m(m-1)E}{(m+1)(m-2)} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{mE}{(m+1)(m-2)} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) \dots (4)$$

$$\sigma_r = \frac{m(m-1)E}{(m+1)(m-2)} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{mE}{(m+1)(m-2)} \left(\frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \dots (5)$$

$$\sigma_t = \frac{m(m-1)E}{(m+1)(m-2)} \frac{u}{r} + \frac{mE}{(m+1)(m-2)} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \dots (6)$$

ここに E は土の弾性係数、 m は土のポアソン数で、 u, w はそれぞれ r, z 方向の土の変形である。

式 (3), (4), (5), (6) を式 (1), (2) に入れ、 u が z の偶関数で w が z の奇関数であることを考えて積分すると次の式をうる⁵⁾。

$$u = f(r) + \sum \left[(AI_1 + BK_1) \frac{1}{k} \cos kz + (CrI_0 + DrK_0) \frac{1}{k} \cos kz + (FI_1 + GK_1) \left(\frac{1}{k} z \sin kz + \frac{1}{k^2} \cos kz \right) \right] \dots (7)$$

* 金沢大学講師，工学部土木工学科

$$w=g(z)+\Sigma\left[(-A'I_0+B'K_0)\frac{1}{k}\sin kz+(-rI_1C'+rK_1D')\frac{1}{k}\sin kz+(F'I_0-G'K_0)\frac{1}{k}z\cos kz\right]\dots\dots(8)$$

$$f(r)\equiv C_1r+\frac{C_2}{r}\dots\dots\dots(9)$$

$$g(z)\equiv C_3z^2+C_4z+C_5\dots\dots\dots(10)$$

ここに I_0, K_0, I_1, K_1 はそれぞれ変形ベッセル関数 $I_0(kr), K_0(kr), I_1(kr), K_1(kr)$ を意味し, $A, B, C, D, F, G, A', B', C', D', F', G', k, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ は常数である。

式 (7), (8), (9), (10) を式 (1), (2) に代入して積分のときに入ってくる常数を決めると次の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} C=C', D=D', G=G' \\ mk(A-A')+4(m-1)C+4(m-1)F=0 \\ mk(B-B')-4(m-1)D+4(m-1)G=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

杭がないとき自然の地盤の鉛直方向の垂直応力 σ_z は地表からの深さに比例し, また水平方向の変位がないものと仮定すると次の関係が得られる。

$$C_3=\frac{(m+1)(m-2)}{Em(m-1)}\frac{1}{2}\gamma\dots\dots\dots(12)$$

$$C_5=0\dots\dots\dots(12)'$$

3. 境界条件

地表面ではせん断応力も鉛直方向の垂直応力も作用しないから, 式 (7), (8) を式 (3), (4) に代入し, $z=0$ で $\tau=0$ (これは常に成立することが分かる) および $\sigma_z=0$ であるためには次の関係が成立しなければならない。

$$\left. \begin{aligned} (m-1)C_4+2C_1=0 \\ C=0, D=0 \\ A-(m-1)A'+mF/k=0 \\ B-(m-1)B'+mG/k=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

2本の杭の中間点では, いずれの深さでも水平方向の土の変位がなく, またせん断応力が生じない。従つて $r=b$ (2本の杭の杭軸間の距離を $2b$ とする) で $u=0, \frac{\partial u}{\partial z}=0$, かつ $\tau=0$ とすると, 式 (7), (8) を式 (3) に入れて計算した結果次の関係をうる。

$$\left. \begin{aligned} AI_{1b}+BK_{1b}=0 \\ FI_{1b}+GK_{1b}=0 \\ C_1b+C_2/b=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

ここに I_{1b}, K_{1b} は $I_1(kb), K_1(kb)$ を意味する。

以上の関係式を整理すると次のようになる

$$\left. \begin{aligned} A=G\frac{3m-2}{mk}\frac{K_{1b}}{I_{1b}}, A=-G\frac{m-2}{mk}\frac{K_{1b}}{I_{1b}} \\ B=-G\frac{3m-2}{mk}, B'=G\frac{m-2}{mk} \\ F=-G\frac{K_{1b}}{I_{1b}} \\ (m-1)C_4+2C_1=0 \\ bC_1+C_2/b=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

従つて未知の常数は G, k, C_2 の3個になる。これらは以下にのべる条件から決定する。

4. 地中の土の応力

上述の結果を式 (3), (4) に代入すると地中の土の応力を次のごとくあたえることができる。

$$\tau=\Sigma\frac{mE}{m+1}G\left\{K_1(kr)-\frac{K_{1b}}{I_{1b}}I_1(kr)\right\}\frac{1}{k}(\sin kz+kz\cos kz)\dots\dots\dots(16)$$

$$\sigma_z=rz+\Sigma\frac{mE}{m+1}G\left\{K_0(kr)+\frac{K_{1b}}{I_{1b}}I_0(kr)\right\}z\sin kz\dots\dots\dots(17)$$

同様に式 (5), (6) から

$$\sigma_r=\frac{rz}{m-1}+\frac{mE}{(m+1)(m-2)}(mC_1+C_2)-\frac{mE}{m+1}\frac{C_2}{r_2}+\Sigma\frac{mE}{m+1}G\left[\left\{I_0(kr)-\frac{K_{1b}}{I_{1b}}K_0(kr)+\frac{m-1}{m}\frac{K_1(kr)}{kr}\right\}\times\right]$$

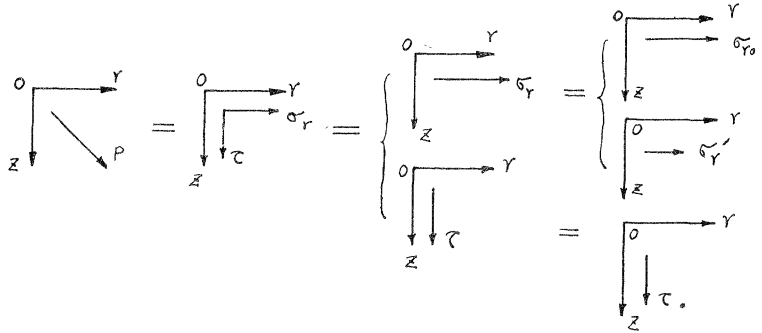
$$\frac{2}{k} \cos kz + \left\{ -I_0(kr) \frac{K_{1b}}{I_{1b}} + \frac{I_1(kr)}{kr} \frac{K_{1b}}{I_{1b}} - K_0(kr) - \frac{K_1(kr)}{kr} \right\} \times z \sin kz \dots\dots\dots (18)$$

$$\sigma_t = \frac{\tau z}{m-1} + \frac{mE}{(m+1)(m-2)} (mC_1 + C_4) + \frac{mE}{m+1} \frac{C_2}{r^2} + \Sigma \frac{mE}{m+1} G \left[\frac{1}{m} I_0(kr) + \frac{m-1}{m} \frac{I_1(kr)}{kr} \frac{K_{1b}}{I_{1b}} \right. \\ \left. + \frac{1}{m} K_0(kr) - \frac{m-1}{m} \frac{K_1(kr)}{kr} \right] \frac{2}{k} \cos kz + \left\{ -\frac{I_1(kr)}{kr} \frac{K_{1b}}{I_{1b}} + \frac{K_1(kr)}{kr} \right\} z \sin kz \dots\dots\dots (19)$$

この式 (18), (19) は非常に複雑すぎるので著者はそれらの代りに次のような考え方で σ_r と σ_t の式を求めることにした。

地中に杭を打ちこむと土は側方下方へ押しやられることになり、杭からの圧力は側方下方へ作用することになる。そこで図-2に示すように杭が土を圧する圧力を分解して考える。まず第一に杭が土を水平方向に押しやつて、杭の側面には摩擦力がなく、従つて土に生じる応力も垂直応力 $\sigma_{r_0}, \sigma_{t_0}, \sigma_{z_0}$ だけが存在する状態とする。

図-2

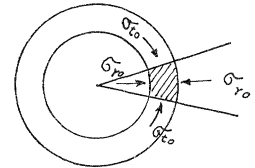
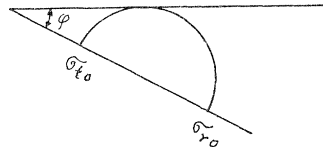


次に第二の段階として杭が鉛直下方に移動する。すなわち杭の側面に摩擦を生じこれが土にせん断応力 τ をあたえ、かつ垂直応力にある変化をあたえるものとするのである。第一段階では $\tau=0$ であるから垂直応力は全て主応力状態にある。そこで鉛直方向の応力を $\sigma_{z_0} = \tau z$ と仮定し、 $r=a$ (a は杭半径) で土が破壊しているという条件から、粘着性のない地盤では $\sigma_{r_0} = \sigma_{t_0} (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ となる条件を用いて式 (1) を解くと次のようになる (図-3)。

図-3

$$\sigma_{r_0} = n \tau z \left(1 + \sin \phi \frac{a^2}{r^2} \right) \dots\dots\dots (20)$$

$$\sigma_{t_0} = n \tau z \left(1 - \sin \phi \frac{a^2}{r^2} \right) \dots\dots\dots (21)$$



ここに n は静止の土圧係数で、 ϕ は粘着性のない土の内部摩擦角である。

次に第二の段階として、杭の側面の摩擦によつて生じたせん断応力 τ が作用するため、 r, t 方向に生じる垂直応力 (これを σ_r', σ_t' とする) をお互いに等しい ($\sigma_r' = \sigma_t'$) と仮定する。しかるときは式 (16) を式 (1) に入れて積分すると次の関係を得る。

$$\sigma_r' = \sigma_t' = \Sigma \frac{mE}{m+1} G \frac{1}{k} \left\{ K_0(kr) \frac{K_{1b}}{I_{1b}} + I_0(kr) \right\} (2 \cos kz - kz \sin kz) \dots\dots\dots (22)$$

以上の結果から地中の応力は次のように表わすことができる。ただし、計算を簡単にするため級数の第一項だけで表わせるものとして取扱う。

$$\tau = \frac{mE}{m+1} G \left\{ K_1(kr) - \frac{K_{1b}}{I_{1b}} I_1(kr) \right\} \frac{1}{k} (\sin kz + kz \cos kz) \dots\dots\dots (23)$$

$$\sigma_z = \tau z + \frac{mE}{m+1} G \left\{ K_0(kr) + \frac{K_{1b}}{I_{1b}} I_0(kr) \right\} z \sin kz \dots\dots\dots (24)$$

$$\sigma_r = \sigma_{r_0} + \sigma_r' = n \tau z \left(1 + \sin \phi \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{mE}{m+1} G \left\{ K_0(kr) \frac{K_{1b}}{I_{1b}} + I_0(kr) \right\} \times \frac{1}{k} (2 \cos kz - kz \sin kz) \dots\dots (25)$$

$$\sigma_t = \sigma_{t_0} + \sigma_t' = n \tau z \left(1 - \sin \phi \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{mE}{m+1} G \left\{ K_0(kr) \frac{K_{1b}}{I_{1b}} + I_0(kr) \right\} \times \frac{1}{k} (2 \cos kz - kz \sin kz) \dots\dots (26)$$

これらの式は均合いの条件式を厳密に満たしている。未知の常数 G と k は次のような条件で決定する。

5. 土の破壊条件

実際上の観察によると、杭が地中に沈入するとき、杭と土との間の辺りは地表に近い所で生じている⁶⁾。従

つて地表に近い所では杭の側面に作用する摩擦力の深さによる変化は、杭の側面に作用する水平土圧の深さによる変化に比例するものと考えられる。すなわち $r=a$ で $z \rightarrow 0$ のとき次の関係を仮定する。

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \mu \frac{\partial \sigma_r}{\partial z} \dots \dots \dots (27)$$

ここに μ は杭と土との間の摩擦係数である。式 (27) に式 (23), (25) を代入すると次の関係をうる。

$$\frac{mE}{m+1} G = \frac{1}{2} \mu r n (1 + \sin \varphi) \frac{I_{1b}}{K_{1a} I_{1b} - K_{1b} I_{1a}} \dots \dots \dots (28)$$

ここに K_{1a}, K_{1b}, I_{1a} は $K_1(ka), K_1(kb), I_1(ka)$ を意味する。式 (28) を式 (23), (24), (25), (26) に代入すれば地中の応力は未知の常数 k だけの関数となる。もちろん地表近くの所で ($z \rightarrow 0$) σ_r も σ_t も受動土圧 $r z \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ より小さい値をとるべきである。

杭先においては ($r=a, z=l$, ここに l は地中にある杭の長さ) 土は破壊せんとする状態にあるから、3 主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) の間に次の関係がある (図-4)。

$$\sigma_1 = \sigma_3 (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \dots \dots \dots (29)$$

また杭先の所では、弾性エネルギー U は次式で与えられる。

$$U = \frac{1}{2} \frac{1}{E} \left\{ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \frac{2}{m} (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) \right\} \dots \dots \dots (30)$$

土がまさに破壊せんとするときは U は最大値になっていると仮定して $\partial U / \partial \sigma_2 = 0$ なる条件より次の関係を得る。

$$\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) / m = 2 \sigma_3 / (1 - \sin \varphi) m \dots \dots \dots (31)$$

また 3 主応力と 3 垂直応力との間には常に次の関係がある。

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_r + \sigma_t + \sigma_z \dots \dots \dots (32)$$

式 (28) を式 (24), (25), (26) に用いて、それらを式 (32) に代入した結果と式 (29), (31) より主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の間に次の関係を求めることができる。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{m(1 + \sin \varphi) - 2}{(1 - \sin \varphi) m} \sigma_3 = \frac{m(1 + \sin \varphi) - 2}{2(m+1)} \left[(1+2n) r l + \mu r n (1 + \sin \varphi) \right. \\ \left. \times \frac{I_{1b} K_{0a} + K_{1b} I_{0a}}{I_{1b} K_{1a} - K_{1b} I_{1a}} \frac{1}{k} (2 \cos kl - 0.5 kl \sin kl) \right] \dots \dots \dots (33)$$

杭を地盤に打ちこむと、土を横方向へ押しやるので、式 (21) より容易に分かるように、最小主応力 σ_3 は $r-z$ 面に垂直に作用するものと考えられる。従つて杭先付近の応力状態は 図-4 に示されるようになる。従つて式 (23) で示されるせん断応力 τ は $r-z$ 面 (杭軸を含む平面) 内で達しうる最大値に等しいと仮定することができる。すなわち、 $r=a, z=l$ で次の関係を仮定することができる。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos \psi \\ \psi &\equiv \arcsin (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (34)$$

式 (23) と (33) を (34) に代入して整理すると次の関係をうる。

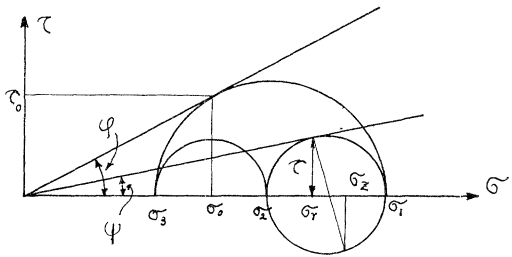
$$\frac{I_1(kb) I_0(ka) + K_1(kb) I_0(ka)}{I_1(kb) K_1(ka) - K_1(kb) I_1(ka)} = \frac{(\sin \alpha + \alpha \cos \alpha) - \alpha \frac{m(1 + \sin \varphi) - 2}{2 \mu (m+1)} \times \frac{1+2n}{n(1 + \sin \varphi)} \sqrt{1 - \frac{m(1 + \sin \varphi) - 2}{m(1 + \sin \varphi) + 2}}}{(2 \cos \alpha - 0.5 \alpha \sin \alpha) \times \frac{m(1 + \sin \varphi) - 2}{2(m+1)} \sqrt{1 - \frac{m(1 + \sin \varphi) - 2}{m(1 + \sin \varphi) + 2}}} \dots \dots \dots (35)$$

ただし、 $\alpha \equiv kl$

従つて杭の半径 a , 杭長 l , 杭間隔 b , 土のポアソン比 $1/m$, 土の内部摩擦角 φ , 土と杭との摩擦係数 μ , 土の静止土圧係数 n があたえられれば未知常数 k が決定でき、さらに杭の周囲の土の応力状態を式 (23), (24), (25), (26) によつて求めることができる。

杭の側面摩擦による支持力は式 (23) を積分して式 (28) を用いて次のように示される。

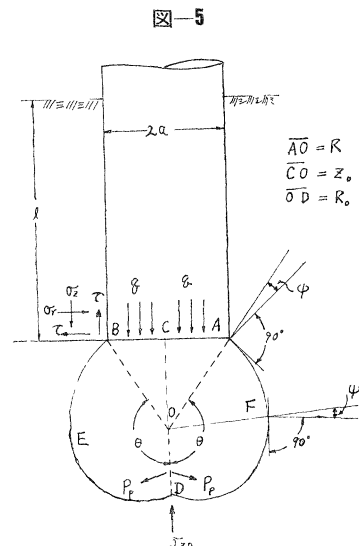
図-4



$$T = 2\pi a \int_0^l |\tau|_{r=a} dz = 2\pi a \mu r n (1 + \sin \varphi) \frac{1}{2} \frac{l \sin kl}{k} \dots \dots \dots (36)$$

6. 杭先支持力の算定

G.G. Meyerhof は等価自由面なる考え方をを用いて、砂地盤の中の深い帯状基礎の支持力を求める方法を示している⁹⁾。著者が求めた式 (23), (24) で表わされる τ と σ_z は、その等価自由面応力に相当するものといえよう。従つて、 $z=l$ のときの τ と σ_z を求め、これらが表面に分布荷重として作用している地盤の支持力を求めればよいことになる。しかしながら著者は次のような考え方で杭先支持力を求めることにした。荷重を受けた杭はその杭先底面で土を押し破壊せしむるに至るが、従来多く考えられた方法と実際上の観察より、杭先底面の下の土の迂り面でかこまれた部分を2個の部分に分つことにする。その一つは図-5に示される AOB なる中央の円錐部で依然として弾性均合の状態にありあつかも杭の一部のごとくなつてゐる。他の部分はこの AOB をめぐるせん断領域で図-5の AFD および BED である。杭底面の端の点 A, B, でまず土が破壊することにより、せん断領域の線は、A, B, ($r=a, z=l$) を通ることと考えられる。OD について考えると、鉛直方向の圧力 σ_{zD} に圧せられ、土は左右の方向へ移動し k_p なる圧力でせん断領域内の土を押しつけようとしているはずである。さてすでにのべたように σ_r は最小主応力であつて、土が破壊状態になつてゐるから、このせん断領域では $\tau_0 = \sigma_0 \tan \varphi$ になつてゐる。しかしながら $r-z$ 面で考えるとせん断応力 τ はその面に作用する垂直応力 σ とはまだ φ なる内部摩擦角で迂りを生じていないのである (図-4)。従つて杭先底面の下に形成されるせん断領域の形は、迂り面上でせん断応力と垂直応力との比が常に一定であるということにより対数線であると仮定することができるが、このときの摩擦角は二次元帯状基礎の場合の φ の代りに図-4で示される ψ (式(34))を用いればよいことになる。もちろんこの三次元的なせん断領域は、Meyerhof が推定しているように二次元的に考えた場合より小さい。図-5を参照して、 e を自然対数の底とすると次の諸関係が得られる。

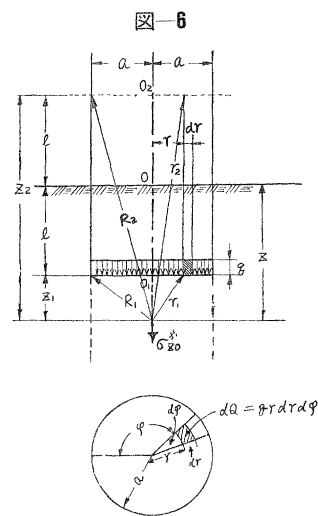


$$\left. \begin{aligned} \angle CAO &= \frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}, \quad \angle AOD = \theta = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \\ OD &= R_0, \quad OA = OB = R = R_0 e^{\theta \tan \psi} \\ OA = OB &= a / \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}\right) \\ OC = z_0 &= a / \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}\right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (37)$$

対数線 AFD (および BED) について考えると、A点($r=a, z=l$)の鉛直応力 σ_{zA} と D 点の鉛直応力 σ_{zD} との間には次の関係がある⁹⁾。

$$\sigma_{zD} = \sigma_{zA} \times e^{2\theta \tan \psi} \dots \dots \dots (38)$$

いま、杭先底面に作用する鉛直圧力 q は等分布するものと仮定⁹⁾する。半無限体内で、表面に直角な方向に等分布荷重 q が円形面に分布荷重するとき、半無限体内に生じる鉛直方向の応力は、次のごとくあたえられる¹⁰⁾ (図-6)。



$$\sigma_{z_0}^* = \frac{1}{1 - \frac{1}{m}} \frac{3q'}{2} F(r, z) \dots \dots \dots (39)$$

$$F(r, z) = \left[\frac{1 - \frac{2}{m}}{6} z_1 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} - \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} \right) + \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \frac{z_1^3}{R_1^3} + \left\{ \frac{3 - \frac{4}{m}}{2} z_2 - l \left(1 - \frac{2}{m} \right) \right\} \left(\frac{1}{3z_2} - \frac{z_2^2}{3R_2^3} \right) - lz(z-l) \left(\frac{z_2^2}{R_2^3} - \frac{1}{R_2^3} \right) \right] \dots \dots \dots (39)'$$

式 (38) の σ_{zD} は杭先底面から加えられる圧力で生じたものであるから、 σ_{zD} と式 (39) の $\sigma_{z_0}^*$ を等しいとお

くことができる。なぜなら、鉛直方向の垂直応力 σ_{zD} は $r-z$ 面内にあり、さきにものべたように $\psi < \varphi$ であることより、この $r-z$ 面内では弾性平衡をなしており、さらに σ_{zD} を与える式 (38) のなかの σ_{zA} も式 (24) から明らかなように弾性平衡の条件を満たしているからである。従つて q は次のように求められる。

$$q = \sigma_{z0}^*/F(r, z) = \frac{\sigma_{zD}}{F(r, z)} = \frac{\sigma_{zA} e^{2\theta + \tan \psi}}{F(r, z)} \dots \dots \dots (40)$$

そして杭先底面の支持力は次のようになる。

$$P = \pi a^2 q \dots \dots \dots (41)$$

式 (36) と式 (41) より杭の支持力は次の形になる。

$$Q = P + T \dots \dots \dots (42)$$

7. 計算結果の例

単杭の場合の計算は式 (23), (24), (25), (26), (35) 等において杭間隔を無限大、すなわち $b \rightarrow \infty$ として行えばよいことになる。一例として次の値を仮定する。

杭長 $l = 10$ m, 杭径 $2a = 20$ cm, 静止土圧係数 $n = 0.5$, 土の内部摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 土と杭との摩擦係数 $\mu = 0.577$, 土の容積密度 $\gamma = 1.6$ t/m³, 実験の結果により¹¹⁾土のポアソン比 $1/m = 0.5$

上の値を用いて式 (29), (31), (34) より $\psi = 0.265$ をうる。式 (35) より

$$\frac{K_0(ka)}{K_1(ka)} = \frac{\sin \alpha + \alpha \cos \alpha - 0.747 \alpha}{0.162(2 \cos \alpha - 0.5 \alpha \sin \alpha)}$$

このうち最も簡単な場合を探ることにして上式より

$$\alpha \approx kl \approx 1.49 \quad \therefore k = 0.149, \text{ また } ka = 0.0149$$

この結果を用いて、式 (23), (24), (25), (26) により杭の側面に作用する摩擦力や土圧力を計算すると 図-7 に示すようになる。また $z=l, r=a$ なる杭先の所の鉛直方向の応力は $\sigma_{zA} = 16.2$ t/m² となる。式 (36) によりこの杭の側面摩擦による支持力は $T = 14.5$ t となつた。次に式 (37) より次のような結果をうる。

$$\theta = 2.49, R = 0.164 \text{ m}, R_0 = 0.0855 \text{ m},$$

$$z_0 = 0.130 \text{ m}, R_0 + z_0 = 0.216 \text{ m}$$

式 (38) により $\sigma_{zD} = \sigma_{zA} \times 3.86 = 16.2 \times 3.86 = 62.5$ t/m²

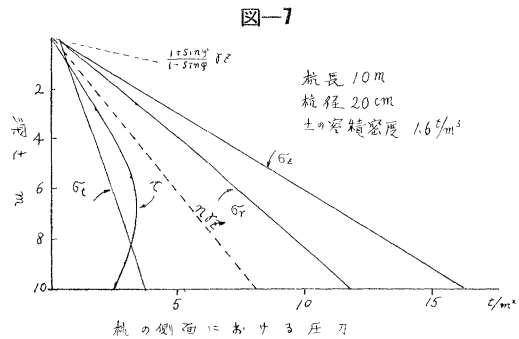


図-7

図-8

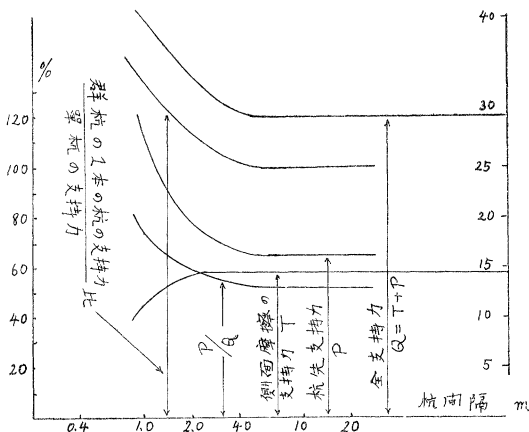
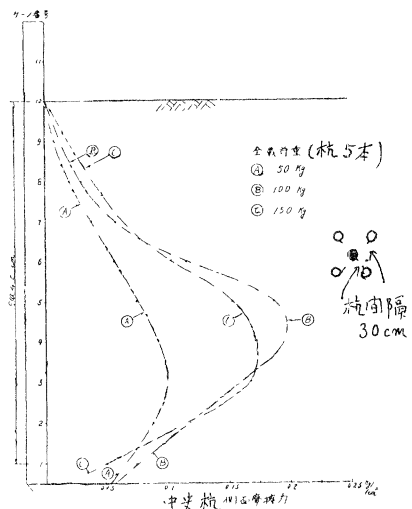


図-9



杭のような非常に深い基礎に対しては $l/a \doteq \infty$ と考えてよく、またポアソン比は 0.5 であるから式 (39) において

$$\sigma_{z_0}^* \doteq \frac{1}{1-0.5} \frac{3q}{2} \left\{ \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \left(\frac{z_1}{R_1} \right)^3 \right\} = 0.127 q$$

従つて式 (40) より

$$q = \sigma_{z_0}^* / 0.127 = \sigma_{zD} / 0.127 = 62.5 / 0.127 = 492 \text{ t/m}^2$$

ゆえに杭先底面の支持力は

$$P = \pi a^2 q = \pi (0.1)^2 \times 492 = 15.5 \text{ t}$$

この杭の全支持力は $Q = P + T = 15.5 + 14.5 = 30 \text{ t}$ となる。この値はこの種の土と杭とに対し適当なものと思われる。次に群杭の場合には $b \neq \infty$ として杭間隔をそれぞれに決めて計算すればよいことになる。

上述の単杭の場合と同じ寸法の杭で同じ土の条件で群杭のうちの 1 本の杭あたりの支持力を、同様な手順で計算した結果を示すと 図-8 のようである。杭間隔が小さくなると群杭 1 本あたりの支持力が増加しているが、このことは実際にも砂地盤で認められている所である。

8. 結 論

著者は粘着性のない土に打ちこまれた基礎杭の支持力を、土の力学的な性質と、杭の寸法から計算する方法を最も妥当な見地から求めることができた。また同時に杭の周囲の土に生じる応力をも計算することができる。上述の理論的計算の結果得られたところの杭の側面の摩擦力の分布状況は、電気抵抗線ヒズミ計を用いて実測した結果¹²⁾とよく一致し、側面摩擦は地表からある深さまで増加し、それ以下は杭先に向つて減少している。図-9 は砂に押しこんだ直径 3.4 cm、長さ約 50 cm の杭について行つた実験の例である¹³⁾。杭間隔が小さくなると支持力が増大ししかも杭先支持力の占める割合が大となるが、これは上の計算で明らかにされる。この傾向は実験でも認められた。以上の計算は杭の打ちこみによつて土の力学的性質に変化がないものとして計算をすすめたが、実際には、杭によつて周囲の土（この場合砂）が締固められるから間げき比が小さくなり、従つて杭間隔の大小によつて内部摩擦角（一般に相対密度の線型関数である¹⁴⁾）や水平の土圧係数等に影響があるはずである。実測¹³⁾によると 1 本の杭の打ちこみによつて締固められる範囲は直径の約 6~8 倍と推定される。杭間隔が小さいほど締固めの効果があるわけであるが、場合によつては、杭間隔を小さくすると、杭先より下の土の締固めには効果があつても杭周囲の土はあまり締固まらないことがある¹⁵⁾。これらのことや、杭により砂の締固められる範囲、粘土地盤の場合の計算法等については次の機会にのべる。本研究は文部省科学研究費（昭.32、保田）、（昭.33、西田）より一部補助をうけた。Prof. M. Vargas, 村山教授らに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) D.M. Burmister : Proc. Purdue Conf. Soil Mech., p. 339-341, 1940
F.M. Master Trans ASCE, Vol. 108, p. 115-173, 1943
- H Marcus Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech., Vol. 7, p. 1-11, 1948
棚橋, 他 日本建築学会論文集, No. 30, 昭30
谷口, 他 同上 No. 33, p. 229 昭30; No. 54, p. 393, 昭31, No. 57, p. 229 昭32
- A. Kezdi Proc. 4th Int Conf Soil Mech., Vol. 2, p. 246-251, 1957
- 2) J.L. Kerisel Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech., Vol. 6, p. 119-121, 1948
- 3) 西田義親 土木学会論文集, 第13号 p. 31-35, 昭27
Y. Nishida Anais Assoc. Brasil. Mec. Sol., Vol. 3, p. 17-36, 1953
Y. Nishida. Bautechnik, 33 J., 10 H., S. 337-340, 1956
西田義親・金沢大学工学部紀要, 1巻5号, p. 43-49, 昭31
Y. Nishida Proc. ASCE, Vol. 83, No. SM 2, p. 1206-1-11, 1957
- 4) R.D. Mindlin Trans ASCE, Vol. 108, p. 147, 1943
- 5) Y. Nishida ditto.—3)—
- 6) H.B. Seed, L.C. Reese : Trans. ASCE, Vol. 122, p. 763, 1957
- 7) G.G. Meyerhof : Geotechnique, Vol. 2, p. 303, 1951
- 8) 最上武雄, 他・土質力学 (応用力学講座) p. 71.
- 9) G.G. Meyerhof : ditto-7)
- 10) A. Kezdi Bauingenieur, 33 J. 2 H., S. 54-58, 1958
- 11) B. Jakobson : Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech., Vol. 1, p. 167-171, 1957
- 12) 保田市兵衛, 西田義親, 島田淳一 金沢大学工学部紀要, 2巻7号 昭33, p. 75-85, (土木学会中部支部研究発表会で講演, 昭33)
- 13) 保田, 西田, 島田: 同上—12)—
- 14) T.H. Wu : Proc. ASCE, Vol. 83, No. SM 1, p. 1027-1-14, 1957
- 15) 村山朔郎 昭和 32 年度建設技術研究報告, 昭33
籾内, 原: 山梨大学工学部研究報告, 9号, p. 168, 昭33
- 16) 保田, 西田, 島田: ditto—12)—