III−21

極限荷重時における杭先端周辺地盤の塑性域

名城大学理工学部土木工学教室　正会員　柴田道生

1. 緒言

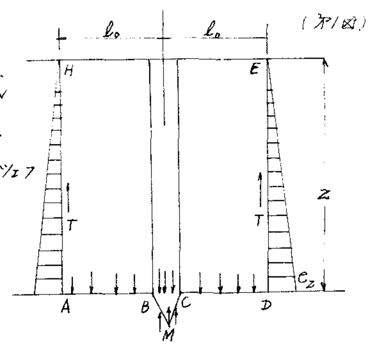
杭が地盤に貫入すれば、杭の体積に等しい土量が、側方に押圧され、従って土粒子は移動して体積変化を生ずる。杭の貫入によって、勿論土粒子の移動は、鉛直方向にも及ぶ。

さて、既成杭は一般に、その先端部は円錐形である。この円錐体が地盤に貫入することによって、円錐体周辺地盤も、当然、円錐体の体積に等しい土量が排除、押圧されるため、土粒子の移動、体積の変化が生じ塑性域が形成される。杭本体のみを考へた杭周地盤の塑性域は、地盤が砂質土の場合、土の内部摩擦角に関聯するし、杭の根入長さに無関係となっているが杭先端周辺地盤の塑性域は、土の内部摩擦角に関係があるのは当然であるが、杭の根入長さに大きく影響する。何故なら、杭の極限支持力は杭の根入長さによって決定づけられるからである。換言すれば、杭先端周辺地盤の塑性域は、その杭の載荷重によって、大きく変化する。筆者は、杭先端円錐体周辺地盤の塑性域を、二つに分けて考へた。

即ち、一つの領域は、円錐体の貫入が鉛直方向に行はれるという考へ方によるものと、他の一つの領域は、円錐体と杭本体との折点、即ち不連続点附近より上方領域で、この領域の解析では対数らせん法を用いた。

2. 杭の極限支持力

(第1図)



第1図において、杭の極限支持力の決め手となる土柱領域を、杭中心より l_0 の範囲にとる。HA, ED 面に沿う土相互の全摩擦力を T, 摩擦力の強さを e_Z で表はすと、ベレザンツェフにより

$$e_Z = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{\lambda-1}\left\{1-\left[\frac{1}{1+\frac{z}{l_0}\tan\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}\right]^{\lambda-1}\right\}\gamma l_0 \qquad \text{-----------} (1)$$

但し $\lambda = 2\tan\varphi\tan\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)$　　ここで φ：土の内部摩擦角

γ：土の単位重量　　r：杭の半径

いま、杭先端BC面の地盤反力を、単位面積当り q とすると、全断面では $\pi r^2 q$, この値と杭中心より l_0 の円筒土柱重量と釣合うと考へると次式が成立する。

$$\pi r^2 q = \pi(l_0^2 - r^2)\gamma Z \qquad \text{-------------} (2)$$

土の内部摩擦角 φ と、地盤のN値との関係式として　$\varphi = \sqrt{12N} + 15$ --------(3)　を用いる。

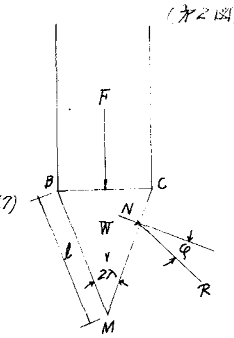
又、杭の先端断面積をAとすると、先端支持力を $q_a A$ で表はす。但し q_a：地盤の許容支持力度。砂地盤では、$q_a = N$ と考へられるから次の(4)式が成立する。

即ち　$\pi r^2 q = NA$ ---------- (4)　　但し N：先端地盤のN値。いま、φ の値が与へられれば (4) (3) (2) 式より l_0 の値が算定される。e_Z は、地表面では零で、深さによって直線的変化をするものとして、Zの深さの e_Z が(1)式から求まる。

従って全摩擦力Tは、 $T = 2\pi r_0 L \frac{c_L}{2}$ ………(5) 次に第1図において、AHGB, CFED の円筒土柱重量から、全摩擦力Tを減じた値が、杭先端BC面に、地盤反力として加わって、杭が安定するものと考へると $\pi r^2 g - T = F$ ………(6) このFが杭先端BC面に加わる荷重であり、換言すると、杭の極限支持力の値となる。

3. 杭先端円錐体の釣合式

(第2図)



第2図において、円錐体BCMのBC端面に加わる荷重をF、円錐体の重量をW、先端角∠BMC＝2λ、円錐体面に垂直な地盤反力成分をN、土の内部摩擦角をφ、とすると、楔の釣合條件から

$$\frac{1}{2}(F+W) = R\cos\left(\pi-\lambda-\frac{\pi}{2}-\varphi\right) = R\sin(\lambda+\varphi) \text{ ………(7)}$$

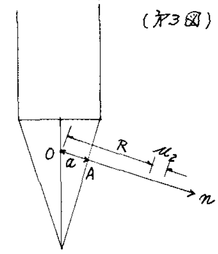
一方、 $R\sin\varphi = N\tan\varphi$ $\therefore R = \frac{N\tan\varphi}{\sin\varphi}$ ………(8) (8)を(7)に代入して

$$F = 2N(\sin\lambda + \cos\lambda\cdot\tan\varphi) - W$$ いまWを無視すると、

$$N = \frac{F}{2(\sin\lambda+\cos\lambda\cdot\tan\varphi)} \text{ ………(9)}$$ となる。さてNが円錐面長 l に等分布すると仮定して、平均地盤反力 g_t は、巾1cm当り $g_t = \frac{N}{l\times 1}$ ………(10)

4. 杭先端円錐体周辺地盤の塑性域

(第3図)



さて、杭先端円錐体が、地盤に貫入することは、円錐体面に直角方向に、地盤を押圧するからであると考へる。いま円錐体中心線上の任意の点Oをとり（第3図）円錐面と直角方向にn軸をとり、円錐面との交点をA、 $OA = a$ として、微小厚を考へ、微小幅をbとすると abの体積に等しい土が押圧することになる。

地盤が破壊されている境界までの距離を点OよりRとし $a \sim R$ の土の歪みを $\frac{\partial u}{\partial n}$ 、Rの境界点における土の変位を u_2 とすると

$$(R+u_2)b - Rb = ab - b\int_a^R \frac{\partial u}{\partial n}dn$$

従って $u_2 = a - \int_a^R \frac{\partial u}{\partial n}dn$ ………(11) 但し u ：土の変位

又、 $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{1}{E}(\Delta\sigma_n - \nu\Delta\sigma_t)$ ………(12) 但し $\Delta\sigma_n = \sigma_n - K_m\gamma Z$

$\Delta\sigma_t = \sigma_t - K_m\gamma Z$

但し σ_t ：円周方向水平垂直応力、 K_m ：静止土圧係数、 ν ：土のポアソン比。

故に、 $$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{1}{E}\left\{\sigma_n - K_m\gamma Z - \nu(\sigma_t - K_m\gamma Z)\right\}$$

従って $$\int_a^R \frac{\partial u}{\partial n}dn = \int_a^R \frac{1}{E}\left\{\sigma_n - K_m\gamma Z - \nu\sigma_t + \nu K_m\gamma Z\right\}dn \text{ ………(13)}$$

ここで $\sigma_n = g_t$ とおく。さて $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を3主応力として $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ の関係があると考へる。

砂の破壊條件から $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$ ………(14) 又、 $\sigma_2 = \nu(\sigma_1+\sigma_3)$ ………(15)

$\sigma_Z = \gamma Z$. 次に．σ_tは最小主応力と考へられるから　$\sigma_t = \sigma_3$ ……………(16)

又．$\sigma_m + \sigma_t + \sigma_Z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ……………(17)　(13)〜(16)式より　σ_3は

$$\sigma_3 = \frac{\frac{1}{\nu}(1-\sin\varphi)}{2\left(\frac{1}{\nu}+1\right)}(2K_m+1)\gamma Z \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

次に．円錐体面に直角方向の歪 ε_m は　$\varepsilon_m = \frac{\mu}{m}$　$\therefore \mu = m\varepsilon_m = m\frac{1}{E}(\sigma_m - \nu\sigma_t)$ ……(20)

(20)式において　$m = R$ で $\mu = \mu_Z$ とおくと．$\mu_Z = \frac{R}{E}(\sigma_m - \nu\sigma_t)$ ……………(21)

即ち．(21)式と(11)式，(13)式より R の値が求められる。

5，塑性域の算定例（円錐体下方周辺地盤）

いま．杭本体長さ $Z = 100^{cm}$．杭半径 $r = 7{,}5^{cm}$．$\varphi = 30°$ 土の単位重量 $\gamma = 1{,}8^{t/m^3}$

土のポアソン比 $\nu = 0{,}3$ と　して．先ず (3)式より $\varphi = 30°$のとき $N = 19$．(4)式より $\pi r^2 q = 336^{kg}$

(2)式より　$l_0 = 26^{cm}$　(1)式より　$e_Z = 0{,}0186\ ^{kg/cm^2}$　平均摩擦力 $e_Z' = \frac{0{,}0186}{2} = 0{,}0093^{kg/cm^2}$

(5)式より　$T = 152^{kg}$．(6)式より　$F = 184^{kg}$．(9)式より　$2\lambda = 60°$のとき

$$q_t = 6{,}13\ ^{kg/cm^2}$$

$2\lambda = 30°$のとき

$$q_t = 3{,}88\ ^{kg/cm^2}$$

従って．$\sigma_m = q_t$ として．$2\lambda = 60°$のとき　$\sigma_m = 6{,}13^{kg/cm^2}$．$2\lambda = 30°$のとき $\sigma_m = 3{,}88^{kg/cm^2}$

$\nu = 0{,}3$　$K_m = 0{,}5$ として　$K_m\gamma Z = 0{,}0009Z$　(18)式より　$\sigma_3 = 0{,}00069Z - \sigma_t$

$E = 170\gamma Z$ として　$E = 0{,}306Z$　　従って (11)式と(21)式より

$2\lambda = 60°$の場合

$$R(0{,}001Z - 12{,}26) + 6{,}13a + 0{,}3052Za = 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (22)$$

$2\lambda = 30°$の場合

$$R(0{,}001Z - 7{,}76) + 3{,}88a + 0{,}3052Za = 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (23)$$

即ち．(22)(23)両式に．第3図のO点の位置を移動し．$OA = a$として．地表面より A点までの深さを Z として．塑性領域 R を求めて．之をプロットすれば第4図が得られる．

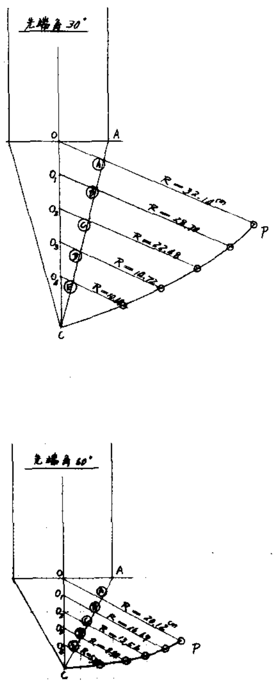
6．円錐体と本体との不連続点附近より上方への塑性域の算定

第4図で求めた塑性曲線上端P点より上方は．対数らせん法で塑性域を求める。

即ち．円錐体と本体との交点 A を極として．$AP = r_0$ を始線として．$r = r_0 e^{\theta\tan\varphi}$ で表わされる対数らせんは．動径 r と常に．$\frac{\pi}{2} - \varphi$ の角度で交はる。之をプロットしたのが第5図，第6図である．

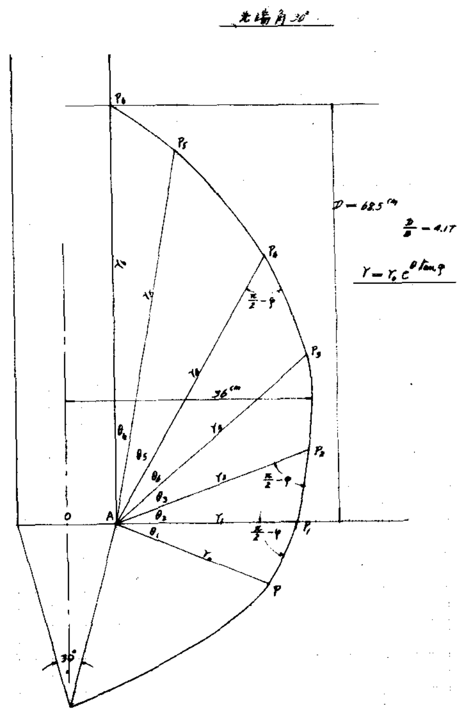
之の図より見ると，塑性域界は．$2\lambda = 60°$の場合 $R = 34^{cm}$　従って．$R = 4{,}5r$，塑性域の上方へ及ぶ範囲 $D = 55{,}5^{cm}$　従って　$D = 3{,}7B$　（B：杭径）となり　$2\lambda = 30°$ の場合 $R = 4{,}8r$，$D = 4{,}17B$ の結果を示している。この結果から判断すると．杭の貫入による塑性域は．$R = (4\sim5)r$．上方への塑性界 $D \doteqdot 4B$ 程度と推定される。従って．現在考へられている $D = 10B$ の値は大きすぎるようである。

図-4.



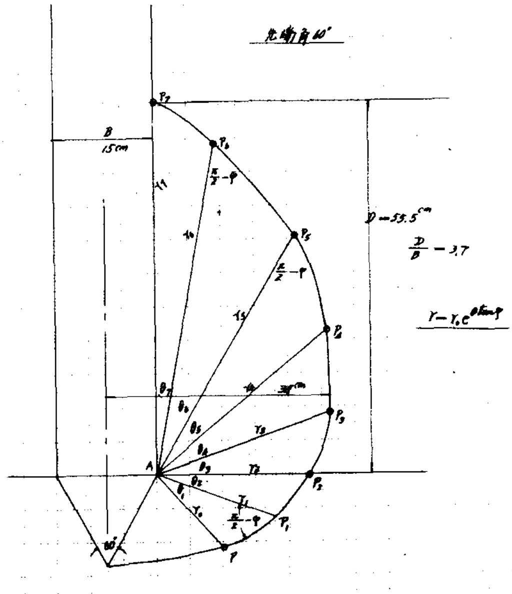
先端角30°
P
先端角60°
P

図-5.



先端角30°
D=68.5cm
D/B=4.17
r=r₀e^{θtanφ}
36cm
30°

図-6.



先端角60°
B
15cm
D=55.5cm
D/B=3.7
r=r₀e^{θtanφ}
38cm
60°