

I-18 杭の周囲の地盤に生じる間隙水圧の一計算について

正員 金沢大学工学部 ○ 西田義親

K.K.前田建設 梅桑要二郎、K.K.奥村組 草野邦雄

杭の支持力は地盤に打込んだ直後は小さくても長時間経過のうちにかなり大きくなる
ことが認められている。これは一つには乱された粘土の強度の回復現象による支持力の増
加であり、また一つには発生した間隙水圧の消失による有効応力の増加によるものであろ
うとは即ち述べられているが、その大きさを推定する計算法はまだ発表されていないよう
である。そこで次のような一計算法を説明したい。

いま水で飽和した砂質地盤を考えてみる。砂の場合は発生した間隙水圧が長時間存在す
るかどうかは議論があるが、打込み中には相当のものが発生するようであるし、また地盤
に薄い粘土層等が混在して水の流動があまり自由でないと考えて問題を解くことは基本的
な段階として充分許されると思う。

著者の一人は、地盤に打込んだ杭が土を締める範囲の計算法¹⁾を先に発表した今回の
発表はそれを更に発展させたものである。いま地盤に打込まれた杭の軸方向をZ軸にと
り地表面杭中心を原点とする円柱座標(r, θ, Z)を用いる。

押込まれた杭が土を圧するため地盤に生じた応力は杭軸に關する対称の性質から次の
条件を充たさねばならない。($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ は r, θ, Z 方向の垂直応力、 τ は剪断応力)。

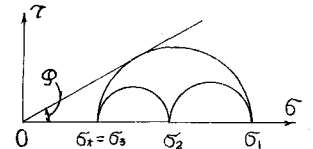
$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \gamma = 0 \quad (1)$$

ここで $\tau = 0$, $\sigma_z = \gamma Z$ (γ は土の容積密度), $\sigma_r > \sigma_\theta$ と仮定して計算を進める。杭から
離れた所では $\sigma_r = \sigma_\theta = K_0 \gamma Z$ (K_0 は静止土圧係数), 杭に近づくにつれて σ_θ は小さくな
り $r = R$ の所で土は破壊する。この時 σ_θ が最小主応力 σ_3 であると考え、杭に近い $r \leq$
 R の範囲の土は破壊されてしまっている。この時上述の均合の式をとく土の破壊の条件と
して三つの主応力を考えたモールの応力円²⁾より σ_θ を最小主応力と考える

$\sigma_1 = \sigma_3(1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$, ϕ は土の摩擦角。また $\sigma_2 = 1/m(\sigma_1 + \sigma_3)$ と
仮定した。($1/m$ はポアソン比である)。

以上にあげた種々の関係を利用して式をとく境界条件を入
れると $r \leq R$ なる範囲の土の応力は $\sigma_z' = \gamma Z$ として次の
ように得られる

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= \gamma Z \left\{ \frac{m(1+\sin \phi)}{2(1+m \sin \phi)} + \left(\frac{R}{r} \right) \frac{2(1+m \sin \phi)}{m(1+\sin \phi)+2} \left\{ \frac{m(1+\sin \phi)+2}{m+1} K_0 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{m(1-\sin \phi)\{2+m(1+\sin \phi)\}}{2(1+m)(1+m \sin \phi)} \right\} \right\} \\ \sigma_\theta' &= \gamma Z \left\{ \frac{m(1-\sin \phi)}{2(1+m \sin \phi)} + \left(\frac{R}{r} \right) \frac{2(1+m \sin \phi)}{m(1+\sin \phi)+2} \left\{ \frac{m(1-\sin \phi)}{m+1} K_0 - \frac{m^2(1-\sin \phi)^2}{2(1+m)(1+m \sin \phi)} \right\} \right\} \end{aligned} \right\} (2)$$



杭が土を押圧する前の自然の地盤内の三直応力の和は $P_0 = \gamma Z + 2K_0 \gamma Z$ でそれと $P = \sigma_r' + \sigma_\theta' + \sigma_z'$ との差が増
加した応力 ΔP で、飽和した地盤内では発生する間隙水圧に等しい筈であり次の様になる。

$$\Delta P = P - P_0 = \delta Z \left\{ 1 - \left(\frac{R}{r} \right) \frac{2(1+m \sin \varphi)}{2+m(1+\sin \varphi)} \right\} \left\{ \frac{m(1-\sin \varphi)}{1+m \sin \varphi} - 2K_0 \right\} \quad (3)$$

$r \geq R$ なる外側の範囲の土に生じる三直応力の和は、自然状態のそれに等しいから ΔP は 0 であることが分った。さて土の空隙に水がない場合は上式の ΔP なる圧力増加によって杭の周囲の地盤が締まるので、上の各式に必要な R は杭の排除圧縮する土の容積より次の式で求められる。

$$\frac{1+e_0}{C_c} = \frac{1}{a} \int_a^R 2r \log_{10} \left\{ 1 + \left\{ 1 - \left(\frac{R}{r} \right)^{\alpha} \right\} \beta \right\} dr \quad \text{但し } a \text{ は杭半径, } C_c \text{ は圧縮指数} \quad (4)$$

$$\text{ただし } \alpha = \frac{2(1+m \sin \varphi)}{2+m(1+\sin \varphi)}, \quad \beta = \left\{ \frac{m(1-\sin \varphi)}{1+m \sin \varphi} - 2K_0 \right\} / (1+2K_0) \text{ とおいた。}$$

この式の積分は予め図表を用意しておけば求まる。飽和した地盤でも長時間後水の流出によって締まる場合は上の式から R/a が求まるのである。しかし飽和している場合、杭を押しこんだ直後は土の圧縮は生じ得なから、(4)式は用いることができない。そこで自然の状態に較べて、杭が土を圧縮するために生じる応力成分の変化 $\Delta \sigma_r'$, $\Delta \sigma_\theta'$ に基づくエネルギーの変化 ΔW の総和が ΔP に基づく体積変化の総和に対し最小なるように土が杭で破壊されるとするとその破壊される範囲 R が次式より求まるのである。

$$\frac{\partial}{\partial R/a} \left[\int_a^R 2\pi r \Delta W dr / \int_a^R 2\pi r \Delta P dr \frac{1}{K_v} \right] = 0 \quad (5)$$

(5)式より得られる R を (3)式に入れば間隙水圧が具体的に計算できる。杭に作用する有効側圧は(2)式で $\sigma_r' - \frac{1}{2}\Delta P$ (但し $r=a$) として計算すればよい。また長時間経った場合は(4)式より得られる R を用いて σ_r' を計算すればよい。

次に杭先支持力は単位面積当り $q = K_s \delta Z N_q$ として与えられる。 K_s は水平の土圧係数で、 N_q は支持力係数である。この支持力は杭先の下の土の剪断破壊領域内の摩擦抵抗によって与えられるものであるから粒子間の有効応力が入りく関係するわけである。間隙水圧が生じると有効応力は $P' = P - \Delta P$ に減少するから、摩擦抵抗もでからうでまで小さくなる。そこで $\tan \varphi' = \frac{P - \Delta P}{P} \tan \varphi$ として φ の代りに φ' を用いて杭が土を押し込んだ直後の杭先支持力を計算する。 N_q としては Meyerhof のグラフを用いた。砂の場合は剪断に伴う容積変化があるから、山口博士³⁾の示す $m = 2/(1+\sin^2 \varphi)$ なる関係を用いた。種々の例題を計算したがその一例を示すと次図の通りである。

この例より杭の支持力は長時間たてば打込み直後より2倍〜3倍に増大することもあるといえる。粘土質地盤についても同様な計算が出来るので具体的には講演会で説明したい。

参考

- 1) 西田, 保田: 土木学会論文集 N0.69
- 2) Y. Nishida: Proc. A.S.C.E., June, 1960 P. 105
- 3) 山口柏樹: 土木学会論文集 N0.63

