

金沢大学工学部 正員 西田 義親

〃 横山 一乙

〃 ○松本 樹典

弾塑性理論による杭支持力は、Gibson (1950) によつて球状空洞及び円柱状空洞の押し広げと利用して解析されて以来、多くの研究者によつて研究されて来た。これらの弾塑性解析は、杭周辺の地盤現象を近似モデルによつて解析するものである。今回の支持力式は、地盤現象の近似モデルとして空洞押し広げと杭貫入を同時に取り入れて解析された。

§. 1 砂地盤の弾塑性域における応力分布と杭支持力

杭先端部における土中の応力分布は球状空洞押し広げモデルを適用して決定される。ただし、杭貫入の際は、図1に示されるように杭先端より浅い部分は空洞広がりによる応力分布が取り残され、杭貫入による地盤の応力変化、体積変化は杭先端より深い部分で生じると仮定した。弾塑性域における応力分布は、Vesic (1972)、山口 (1973) と同様に次の式で表わされる。

$$\text{塑性域} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = -\frac{3P_0(1+\mu)}{3-\mu} \left(\frac{b}{r}\right)^{\frac{4\mu}{1+\mu}} \quad \text{--- (1)} \\ \sigma_\theta = -\frac{3P_0(1-\mu)}{3-\mu} \left(\frac{b}{r}\right)^{\frac{4\mu}{1+\mu}} \quad \text{--- (2)} \end{array} \right.$$

$$\text{弾性域} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = -P_0 - \frac{4\mu P_0}{3-\mu} \left(\frac{b}{r}\right)^3 \quad \text{--- (3)} \\ \sigma_\theta = -P_0 + \frac{2\mu P_0}{3-\mu} \left(\frac{b}{r}\right)^3 \quad \text{--- (4)} \end{array} \right.$$

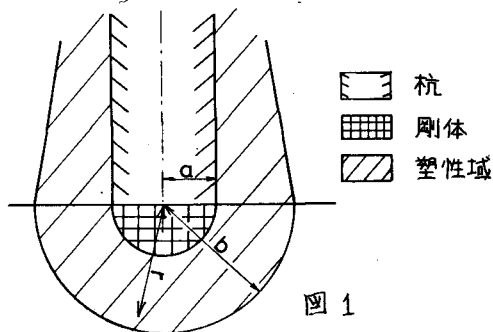


図 1

ここで、 $\mu = \sin \phi$ である。

杭の先端支持力 (σ_{rb}) は、塑性域の応力式 (1) において $r=b$ とし与えられる。b の大きさは、杭貫入時の体積変化の釣り合いによつて求められる。杭の貫入による土の体積変化において塑性域の土の体積変化は微小であると考えられるので、杭の貫入量 Δz は土の弾性体積変化量 ΔV_e に等しいとする。杭の貫入量を dz とすると体積変化の釣り合い式は、 $\pi a^2 dz = \Delta V_e$ である。

杭の微小量貫入を考え、 ΔV_e は弾塑性境界の土の全変位量によつて求められる。図2においてA点の変位量を求める際には dz が微小なので O_1-O_2 と $O_1'-O_2'$ は同じ直線上にあると仮定する。 O_1 を原点とする弾性域の応力分布は (3), (4) によつて表わされる。 O_1' を原点とする応力分布は (3), (4) において r を $r' = \sqrt{r^2 + (dz)^2 + 2r \cdot dz \cdot \cos \theta} \approx \sqrt{r^2 + 2r \cdot dz \cdot \cos \theta}$ として表わされる。A点の変位 u_r は弾性理論により $e_\theta = u_r/r$ で与えられ、 $e_\theta = \{\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_\phi)\}/E$ (ν : ポアソン比) より

$$\Delta u_r = \frac{2\mu P_0(1+\nu)b^3 r}{E(3-\mu)} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r'^3} \right) \quad \text{--- (5)}$$

A点には $\overline{O_1 A} = b$ であるから $r=b$ とし、また $2\mu P_0(1+\nu)/E(3-\mu) = A_0$ とし (5) は、

$$\Delta u_b = A_0 \left\{ b - \frac{b^4}{(b + 2b \cdot dz \cdot \cos \theta)^{3/2}} \right\} \quad \text{--- (6)}$$

よって弾塑性境界における全変量 ΔV_E は、

$$\Delta V_E = 4 \int_0^{\tan^{-1} \frac{a}{b}} \int_0^{\tan^{-1} \frac{a}{b}} \Delta u b d\theta b d\varphi \doteq 6A_0 b^2 dz \pi \quad (7)$$

$$\therefore \pi a^2 dz = 6A_0 b^2 dz \pi \quad \text{より} \quad b = a \sqrt{\frac{1}{6A_0}} = a \sqrt{\frac{E(3-\nu)}{12\mu P_0(1+\nu)}} \quad (8)$$

杭の支持力は(8)を(1)に代入して、

$$(\sigma_r)_a = -\frac{3P_0(1+\mu)}{3-\mu} \left\{ \frac{E(3-\nu)}{12\mu P_0(1+\nu)} \right\}^{\frac{2\mu}{1+\mu}} \quad (9)$$

§. 2 Rebound Energy E_R と杭打ち時のエネルギー釣り合い式

Rebound Energy E_R は弾塑性境界における運動量として求める。弾塑性境界において圧力が P_0 から $(\sigma_r)_b$ まで変化する時の E_R は、

$$E_R = 2\pi(b+u_{r1})^2(P_0+\Delta P)u_{r1} + 2\pi(b+u_{r1}+u_{r2})(P_0+\Delta P)u_{r2} + \dots + 2\pi(b+u_{r1}+u_{r2}+\dots+u_{rm})(\sigma_r)_b u_{rm} \quad (10)$$

u_{rm} は圧力が $P_0 + m\Delta P$ から $P_0 + (m+1)\Delta P$ まで変化する時の r 方向の変位である。(10)式において $b \gg u_{rm}$ なので $(b + \sum_{i=1}^m u_{ri})^2 \doteq b^2$ とする。ここで、 $u_{rm} = (e_{\theta m+1} - e_{\theta})b$ であり、弾性域における平均応力は、

$-P_0$ で $e_{\theta m} = \{m(1+\nu)\Delta P/2 - P_0(1-2\nu)\}$ により、

$$u_{rm} = b(1+\nu)\Delta P/2E \quad (11)$$

また、 $-P_0 - n\Delta P_0 = (\sigma_r)_a = -P_0 - 4\mu P_0/(3-\mu)$ により、

$$\Delta P = 4\mu P_0/n(3-\mu) \quad (12)$$

(11), (12) を (10) に代入して、 $n \rightarrow \infty$ とすると E_R は、

$$E_R = \frac{P_0(3+\mu)a^3\pi}{3(3-\mu)} \sqrt{\frac{E(3-\mu)}{12\mu P_0(1+\nu)}} \quad (13)$$

杭打ち時のエネルギーの釣り合い式は (ハンマーの落下エネルギー) = (杭の貫入エネルギー) + E_R とし、

$$eWh = \pi a^2 (\sigma_r)_a S + E_R \quad (14)$$

e : 打撃効率, W : ハンマーの重量, h : ハンマーの落下高さ, S : 杭の貫入量

(9), (13) より上式は、

$$\begin{aligned} eWh &= \frac{3\pi a^2 P_0(1+\mu)S}{3-\mu} \left\{ \frac{E(3-\mu)}{12\mu P_0(1+\nu)} \right\}^{\frac{2\mu}{1+\mu}} + \frac{P_0(3+\mu)a^3\pi}{3(3-\mu)} \sqrt{\frac{E(3-\mu)}{12\mu P_0(1+\nu)}} \\ &= \pi a^2 (\sigma_r)_a \left[S + \frac{(3+\mu)a}{9(1+\mu)} \left\{ \frac{E(3-\mu)}{12\mu P_0(1+\nu)} \right\}^{\frac{1-3\mu}{2(1+\mu)}} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、上式のオ2項を A とおくと、 $eWh = \pi a^2 (\sigma_r)_a (S+A)$ 。 $\pi a^2 (\sigma_r)_a = eWh/(S+A)$

A の値は、 E を西田(1965)と同様に圧縮指数 C_c と間隙比を使い計算し、 $\mu = 0.5 \sim 0.7$ とする。ゆるい砂では安全側として $0.2a$ となり、よく締まった砂では $0.1a$ である。これは、Hiley 等の杭打ち公式の地盤の弾性圧縮量 C_3 が $0.1a \sim 0.2a$ であることを示しており、杭打ち公式が一般に高目の支持力を与えることはこの C_3 が無視又は過小評価されて来たことに原因があると思われる。

おすび: 本研究では、空洞押し拡げと杭貫入を同時に取り入れ、砂地盤における杭支持力と Rebound Energy を導いて杭打ち公式における地盤弾性圧縮量 C_3 を見積った。杭と標準貫入試験の類似性に基づき、現在、このモデルを標準貫入試験に適用して杭支持力を N 値で表わすことを検討中である。

参考文献 Vesic (1972) Proc. ASCE, SM3. 山口 (1973): 東工大土木工学科研究報告

西田 (1965) 土と基礎 13-8