

金沢大学工学部 正会員 西田 義親

同 正会員・松本 樹典

1. まえがき 一般に杭打ち公式は、静的載荷試験から得られるものより高めの支持力を与えると言われている。この理由として、一つには、杭の動的貫入による地盤の変形速度に起因する地盤の強度および弾性係数の増加によるものが考えられる。さらには、杭の動的貫入においては、土粒子の変位速度も静的貫入時に比べてはるかに大きくなるため、その貫入力による影響も無視できなくなる。そこで、本報告では杭先端地盤の破壊状態として球状空洞押広げモデルを考え、土粒子の貫入力に杭先端支持力におよぼす影響について考察を試みた。

2. 球状空洞動的押広げの基本式

杭打ち時の動的貫入においても、杭先端地盤は図1に示されるような状態となっていると考え、今回の動的解析においては、空洞押広げモデルを採用した。

空洞中心を原点とした極座標を使うと、球状空洞動的押広げの基本式はHopkins¹⁾によって次の5つの式で表わされる。

$$\text{i) 弾性圧縮} : \epsilon_r + 2\epsilon_t = (\sigma_r + 2\sigma_t)(1 - 2\nu)/E \quad (1)$$

$$\text{ii) 降伏条件} : \sigma_t - \sigma_r = Y \quad (2)$$

$$\text{iii) 応力の釣合} : \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2}{r}(\sigma_r - \sigma_t) = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (3)$$

$$\text{iv) 質量保存} : \frac{\rho}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v) + \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\text{v) 粒子速度} : v = \frac{\partial u}{\partial t} / \left(1 - \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (5)$$

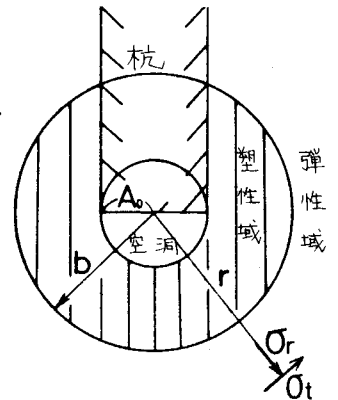


図-1

ここに、 $\sigma_r, \sigma_t, \epsilon_r, \epsilon_t$ は r, t 方向の応力とひずみ、 u は r 方向への土粒子の変位、 ρ は土の密度、 E と ν は土の弾性係数とポアソン比、 Y は土の降伏応力である。ただし、上述の基本式(1),(2)において、 E, Y, ν は応力や変形速度に無関係に一定値を持つと仮定している。また、塑性域での土の体積変化はないとしている。

上述の基本式に対する一般解は、現在のところ未だ求められていない。しかし、 ρ を一定とすれば、その解は容易に求まる。そのため、ここでは地盤を非圧縮性の弾塑性体として解くことにする。

3. 粘土地盤における杭の動的支持力式

粘土土は、ほぼ非圧縮性の弾塑性体とみなせることができ、その降伏条件も式(2)を満たすと考えてよい。したがって、 $\rho = \text{一定}$ 、 $\nu = 1/2$ となる。これらの条件下では、式(4)の質量保存は次式で表わされる。

$$\partial(r^2 v) / \partial r = 0 \quad (6)$$

基本式(4)の代わりに式(6)を用い、弾塑性境界で応力が連続していること、また $r = \infty$ で $\sigma_r = \sigma_t = -p_0$ (p_0 は土かぶり圧) となるという条件を用いると、空洞の内圧 p は、 a_0 を空洞の初期半径として、次式で表わされる。

$$p = \frac{2Y}{3} \left\{ 1 + \ln \frac{2E}{3Y} + \ln \left(1 - \frac{a_0^3}{a^3} \right) \right\} + p_0 + \rho \left(a \ddot{a} + \frac{3}{2} \dot{a}^2 \right) \quad (7)$$

ここで $p_0 = 0$ とすると、上式はHopkinsの解に一致する。

上式は $r = a$ における圧力、つまり空洞の内圧を示すもので、杭の動的支持力を表わしている。第1項と第2項は、 $\dot{a} = \ddot{a} = 0$ の場合の支持力すなわち静的支持力を表わし、第3項が動的効果を表わしている。

また、空洞の半径が0から a になるまでに地中に伝えられるエネルギーは次式で表わされる。

$$4\pi \int_0^a p a^2 da = 4\pi \left\{ \frac{2Y}{9} \left(1 + \ln \frac{2E}{3Y} \right) a^3 - \frac{\rho}{2} a^3 \dot{a}^2 \right\} - \frac{4\pi}{3} p_0 a^3 \quad (8)$$

ここで、これまでの結果を使い、杭打ち時に地盤に伝わるエネルギーを考えてみる。杭の貫入機構においては空洞拡がりは、最初 $a_0 = 0$ から始まる。しかし、杭は連続して打込まれるため、ハンマーの打撃による杭の貫入は a が杭の半径すなわち A_0 に達した時より始まると仮定する。つまり、前回の打撃により空洞はすでに A_0 まで拡がっていると考ええる。杭が ΔS だけ貫入した時の空洞半径を A' とすると、体積釣合式 $4\pi(A')^3/3 = 4\pi A_0^3/3 + \pi A_0^2 \Delta S$ より、 A' は次式で表わされる。

$$A' = (A_0^3 + 3A_0^2 \cdot \Delta S / 4)^{1/3} \quad (9)$$

空洞拡がりの速度は、杭の貫入速度を v^p として、体積釣合式 $\pi A_0^2 v^p = 4\pi A_0^2 \dot{a}$ より、次式で表わされる。

$$\dot{a} = A_0^2 v^p / 4 A_0^2 \quad (10)$$

杭貫入終了時には $v^p = 0$ であるので $\dot{A}' = 0$ 、また杭の初期貫入速度を v_0^p とすると $a = A_0$ より $\dot{A}_0 = v_0^p / 4$ となる。したがって、杭貫入によって地盤に伝えられるエネルギーは、式(8)において積分範囲を A_0 から A' とし、 $\dot{A}' = 0$ 、 $\dot{A}_0 = v_0^p / 4$ という条件より次式で与えられる。

$$4\pi \int_{A_0}^{A'} p a^2 da = \frac{4\pi}{3} \left\{ \frac{2Y}{3} \left(1 + \ln \frac{2E}{3Y} \right) + p_0 \right\} (A'^3 - A_0^3) - \frac{p \pi A_0^3 (v_0^p)^2}{8} \quad (11)$$

ハンマーの打撃エネルギーが地中に伝わったエネルギーに等しいと仮定すると、杭打ち時のエネルギーの釣合は以下ようになる。まず、打撃エネルギー E_H および杭の初期貫入速度 v_0^p は次式で表わされる。

$$E_H = e_f m_1 g h \times \frac{m_1 + e^2 m_2}{m_1 + m_2} \quad (12) \quad v_0^p = \frac{\{e m_1 + \sqrt{m_1^2 + m_1 m_2 (1 - e^2)}\} \sqrt{2e_f g h}}{m_1 + m_2} \quad (13)$$

ここに、 e_f は打撃効率、 g は重力加速度、 h はハンマーの落下高さ、 m_1, m_2 はハンマーと杭の質量、 e はハンマーと杭の間の反発係数である。

したがって、完全弾性衝突($e = 1$)および完全塑性衝突($e = 0$)の場合の静的支持力 p_s は、式(9)より $(A')^3 = 3A_0 \cdot \Delta S / 4$ であることから、次式で表わされる。

$$\text{完全弾性衝突}(e=1) \text{の場合} \quad p_s = \frac{2Y}{3} \left(1 + \ln \frac{2E}{3Y} \right) + p_0 = \frac{e_f m_1 \left\{ 1 + p \pi A_0^3 \times \frac{m_1}{(m_1 + m_2)^2} \right\} g h}{\pi A_0^2 \Delta S} \quad (14)$$

$$\text{完全塑性衝突}(e=0) \text{の場合} \quad p_s = \frac{2Y}{3} \left(1 + \ln \frac{2E}{3Y} \right) + p_0 = \frac{\frac{e_f m_1^2}{m_1 + m_2} \left(1 + p \pi A_0^3 / 4 m_1 \right) g h}{\pi A_0^2 \Delta S} \quad (15)$$

4. 考察 上式の p_s は、前述した通り杭の静的支持力を表わす。したがって、式(14)、(15)は従来の杭打ち公式に比べて右辺かっこ内第2項の分だけ支持力を大きく見横っていることを示している。いま半径20cm、長さ10mのコンクリート杭を重量10kNのハンマーで打撃した場合、かっこ内第2項は完全弾性衝突のときに0.3%、完全塑性衝突のときに1.1%であり、式(13)、(14)は従来の杭打ち公式にほぼ等しくなる。このことから、従来の杭打ち公式は、粘土地盤における杭の打撃中の支持力をかなり正確に表わしていると考えられる。しかし、この解は、最初に述べたように、 E や Y が変形速度に独立して一定値を持つ場合の解である。実際には、石原によって指摘されているように、土の変形速度が大きくなると伴に Y も E も大きくなる。ゆえに、式(14)、(15)は、ある一定の杭の貫入速度における Y と E に対しての支持力を表わし、静的載荷試験から得られる支持力とは異なっていると考えらるべきである。

5. 結論 以上の考察より、杭打ち公式が一般に高めの支持力を与えるのは、杭の貫入速度に比例した土の変形速度により Y および E が大きくなったことに原因があり、慣性力による影響はほとんどないと考えてよい。

参考文献

- 1) H. G. HOPKINS: "DYNAMIC EXPANSION OF SPHERICAL CAVITIES IN METALS" Progress in Solid Mechanics, Vol. 1, Chap. III, 1964.
- 2) 石原 研而: 土質動力学の基礎(鹿島出版会), pp. 179~185, 1976.