

締固め杭に関する基本的研究*

正員 西 田 義 親**
正員 保 田 市 兵 衛**

SOME BASIC STUDIES OF COMPACTION PILES

By Yoshichika Nishida, C.E. Member, and Ichibee Hoda, C.E. Member

Synopsis: This paper presents some basic studies on compaction piles. In the calculations the authors give a suggestion, after a theoretical analysis, how to estimate the range of influence of soils around a compaction pile by driving it.

要 旨 本文は締固め杭が土におよぼす作用について力学的な計算を行なったもので、地盤の土が杭により締固められる範囲について明確な根拠をあたえることができる。従つて締固め杭の施工に指針をあたえることができる。

1. 緒 言

土木建築構造物を支える杭打基礎に関する研究は古來行われていて、著者はこの方面の計算について発表を行なつた¹⁾。杭打基礎を構成する基礎杭は、材料により、また杭の形により、あるいは施工の方法により、それぞれ分類されるわけであるが、一般に力学的機能によつて次のように分類されている。

- (1) 上側の軟弱な地層を通して下側の固たい地層に荷重をつたえる、いわゆる先端支持杭。
- (2) 杭の地中部分の長さ全部にわたつて、杭の側面と土との摩擦で荷重を支える、いわゆる摩擦杭。
- (3) 上記の二種の中間の種類に当るもので、上側の軟弱な地層をとおして下側の比較的固たい層に杭の下の方の部分が入り、下方の地層に入つた部分の摩擦で荷重を支えるもの。
- (4) 土を締固めて強度と支持力を増大する締固め杭。

先端支持杭、摩擦杭については従来多くの研究が行われ支持力算定の方法も種々提案されている。しかし締固め杭の作動についてはあまり研究がないようであるので²⁾、著者は次に述べるような理論的な計算を行ない、締固め杭の機構を明らかにした。

2. 基本式

地盤に杭が打ちこまれ、また押しこまれたものとする。杭の打ちこみには土の振動をとまらすが、この際は振動の影響は考えないことにする。杭はまた土を鉛直下方にも移動変形させるはずであるが、これによる土の締固めは比較的少なく、杭によつて土が締固まるのは、主として側方への移動圧縮によるようである。このことは著者の実験からほぼ推測された³⁾。そこで杭の押し込みによつて周囲の土は水平面内で横方向に圧せられるものと考えて計算をすすめることは許されると思う。もちろん、杭の圧入によつて、杭の周囲の土は破壊されている。地盤を締固め杭で締固めるために、多くの杭を用いるのであるが、いまこの杭の間隔がある程度大であるとして、1本の杭について考察をすすめる。

いま半径 a 、地中における杭の長さ l なる杭が、地盤に鉛直に押しこまれているものとする。杭軸の方向に鉛直下方に z 軸をとり、杭軸と地表面との交点を原点とし杭の半径方向を r 、 $r\theta$ に直角な円周方向を t 軸とし r, t, z 、よりなる円柱座標を用いる (図-1 参照)。

押しこまれた杭が土を圧するため地盤に生じた応力は、杭軸に関する対称の性質より力の均合に関する次の二つの方程式を満たさねばならない。

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

ここに $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$ はそれぞれ地盤に生じた r, t, z 方向の垂直応力であり、 τ は $r-z$ 面内のせん断応力である。 r は地盤の土の容積密度である。さきに説明したように杭は土を水平方向のみに圧すると仮定して計算をすすめているのであるから $\tau=0$ として式 (2) を積分して、地表 $z=0$ で鉛直方向の直応力 $\sigma_z=0$ という条件を入れる

* 昭和 34 年土木学会年次学術講演会で一部講演

** 金沢大学工学部土木工学科勤務

と $\sigma_z = \gamma Z \dots \dots \dots (3)$

図-2 に示されるように水平面内の応力のうち、土は外方へ押圧されるから $\sigma_r > \sigma_t$ と考えるべきである。杭から相当離れた所では地盤は弾性的に作動しているものと考えてよい⁴⁾。 $\tau=0$ として式 (1), (2) を解くと

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= c_1 Z + c_2 / r^2 + c_3 \\ \sigma_t &= c_1 Z - c_2 / r^2 + c_3 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

の形になる³⁾。ここに c_1, c_2, c_3 は積分常数である。杭から相当はなれた所では、水平方向の土圧はいずれも自然の静止土圧に等しいはずであり、地表からの深さに比例するから、上の式 (4) において $r \rightarrow \infty$ のとき $\sigma_r = \sigma_t = n \gamma Z$ (ただし n は自然の静止土圧係数) なる条件を用いると、 $c_1 = n \gamma, c_3 = 0$ となる。

さきにも述べたように、土は水平方向のみに圧せられると考えて $\tau=0$ として問題を扱っているから、 σ_r と σ_t とは主応力の関係にある。そして杭に接近するにつれて、 σ_r は次第に大きくなり、 σ_t は小さくなるが、ある点に至つて、土の性質によつて定まるある一定の比を越えることができない。

締固め杭を用いるのは主として砂質地盤であるから、いま、土は粘着力をもたずに、摩擦角 (せん断抵抗角) φ のみ有するものとする。そこで杭軸から $r=R$ の所で土の破壊がはじまつているものと考え、図-3 に示されるように Mohr の条件から、 $r=R$ で $\sigma_r = \sigma_t (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ なる条件を式 (4) に適用すると $c_2 = c_1 R^2 \sin \varphi$ なる結果を得る。従つて式 (4) は次のような形になる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= n \gamma r Z \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \right) \\ \sigma_t &= n \gamma r Z \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

R は杭が地盤に押しこまれたため土が水平に押し戻されて破壊している範囲であると考えられる。また鉛直方向の直応力は次のように考えている。

$$\sigma_z = \gamma Z \dots \dots \dots (6)$$

以上もとめた式はすべて力の均合の条件を満たしている。

次に杭に接した近くの地盤は、押しこまれた杭のため土が横方向に移動して破壊しているはずである。いまこの範囲の地盤にはせん断応力が作用せず、直応力を $\sigma_r', \sigma_t', \sigma_z'$ とするときこれらの直応力は主応力となつているものとして、上に述べたようにこの範囲の土においても $\sigma_z' = \gamma Z$ と仮定する。この領域では土がすべて破壊しているから Mohr の破壊条件より、常に次の関係が成立している。

$$\sigma_r' = \sigma_t' (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \dots \dots \dots (6')$$

式 (6) を式 (1) に代入し $\tau=0$ として積分すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= c_4 (Z) r^{-\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \\ \sigma_t' &= c_4 (Z) \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} r^{-\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

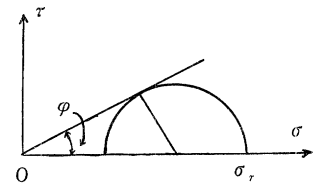
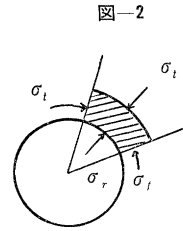
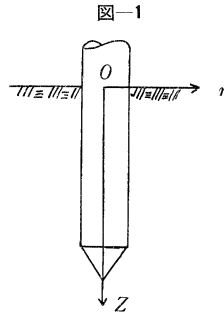
$r=R$ の所が、土の破壊している範囲の境界であるから、式 (7) で示される水平面内の応力 σ_r', σ_t' は、(5) 式で示される σ_r, σ_t とそれぞれ $r=R$ で一致しなければならない。従つて $r=R$ のとき $\sigma_r = \sigma_r', \sigma_t = \sigma_t'$ とおくことにより $c_4 (Z) = n \gamma Z (1 + \sin \varphi) R^{2 \sin \varphi / (1 + \sin \varphi)}$ なる結果を得るから、式 (7) は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= n \gamma r Z (1 + \sin \varphi) \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \\ \sigma_t' &= n \gamma r Z (1 - \sin \varphi) \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

また $\sigma_z = \sigma_z' = \gamma Z \dots \dots \dots (9)$

すなわち、杭が土を横方向へ押しこめた場合の地盤内の応力は、 $r \geq R$ の範囲では式 (5) で示され、 $r \leq R$ の範囲では式 (8) で示されることになる。いま杭の周囲の地盤の応力を想定すると図-4 のような状態になると思われる。ここで R だけが未知であるが、これは土の変形特性を考えて決定するのである。

いま土が杭によつて圧縮される範囲を考えてみる。土が容積変化するのは互いに直交する 3 個の主応力の和に



支配されると考えることは十分差支えないと思う。従つて杭が地盤に押しこまれる前後の直応力の和の変化について考察を進めればよいことになる。

さて自然地盤における直応力の和は

$$\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z = n r Z + n r Z + r Z = r Z(1+2n) \dots (10)$$

ここに n はさきにも述べたように自然の静止土圧係数である。次に杭が押しこまれて、土が水平に移動圧縮されたとき、 $r \geq R$ の範囲の地盤内の直応力の和は次のようになる。すなわち式 (5) より

$$\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z = n r Z \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi\right) + n r Z \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi\right) + r Z = r Z(1+2n) \dots (11)$$

一方 $r \leq R$ の範囲の地盤内の直応力の和は (8) 式より次のようになる。

$$\sigma_r + \sigma_t' + \sigma_z' = n r Z(1 + \sin \varphi) \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} + n r Z(1 - \sin \varphi) \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} + r Z = r Z \left\{1 + 2n \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}\right\} \dots (12)$$

式 (10) と式 (11) とを比較すると 3 直応力の和は全く同じになっているから、 $r \geq R$ の範囲では、土の圧縮(体積変化)はないことになる。また式 (12) にて $r=R$ とおくと、 $\sigma_r + \sigma_t' + \sigma_z' = r Z(1+2n)$ となり、自然の状態における $(\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z)$ の値に等しい。さきにも述べたように R は杭を押しこんだために土が破壊されている範囲を示すものであるが、同時に式 (12) より明らかなように、土に体積変化を生じている範囲をも示すことになる。そこでいま半径 a の杭を地盤に押しこんだとき土が水平のみ移動するものとしたとき、杭の単位長について考えると、杭の断面積に相当する土の量は $r=a$ から $r=R$ の間に生じた土の圧縮量に等しいとおくことができる。

一般に土の間げき比 e と有効圧力 p との間には次の関係がある。

$$e - e_0 = c_c (\log_{10} p - \log_{10} p_0) \dots (13)$$

ただし、 e_0 ははじめの圧力 p_0 に対応する初期間げき比である。 c_c は圧縮指数である。

したがって圧力が p_0 から p になつたときの容積ひずみ ϵ_v は次のようになる。

$$\epsilon_v = \frac{e - e_0}{1 + e_0} = \frac{c_c}{1 + e_0} \log_{10} \frac{p}{p_0} \dots (14)$$

杭が地盤の土を圧縮する場合、初めの圧力 p_0 は式(10)で表わされ、杭が押しこまれた後の圧力 p は式(12)で示されることより、次の関係式で、 R が求まる。

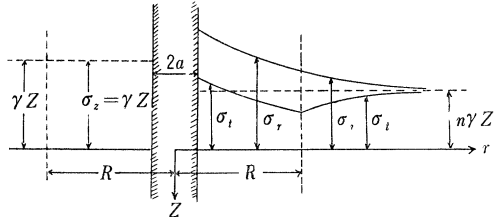
$$\begin{aligned} \pi a^2 &= \int_a^R \epsilon_v 2 \pi r \cdot dr = \int_a^R 2 \pi r \frac{c_c}{1 + e_0} \log_{10} \frac{r Z \left\{1 + 2n \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}\right\}}{r Z(1+2n)} dr \\ \therefore \frac{a^2(1 + e_0)}{c_c} &= \int_a^R 2 r \log_{10} \frac{1 + 2n \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}}{1 + 2n} dr \dots (15) \end{aligned}$$

この式 (15) を R について解けば、杭の半径 a 、地盤の自然の間げき比 e_0 、圧縮指数 c_c 、土のせん断抵抗角(内部摩擦角) φ の関数として示され、これらの土の力学的性質が測定されれば R は a の何倍という形で求められる。式 (15) の積分はあまり簡単でないが数値積分をするか、図解法で行なえばよい。式 (15) の右辺をあらかじめ n, φ を適当な値に変化させて図表を作成しておけば、式 (15) の右辺の e_0 と c_c をあたえられればだちに R が a の何倍として求められる。

以上は水平面内での直応力 σ_r と σ_t との関係をもとにして計算をすすめたが、杭が土を圧するときの抵抗は土かむりの重さ σ_z に規定されるから、特に地表近くの所では、 σ_r は σ_t によつて抵抗されるよりも、土を上方に押し上げる時の抵抗によつて規定されるはずである。すなわち水平面内に作用する半径方向の直応力 σ_r は(もちろん $r=0$ であるから) 主応力であり、受動土圧より大となり得ない。三次元的に考えた受動土圧の計算はあまり見あたらないようで、これについて著者は別に報告するつもりであるが、杭径にくらべてあまり深くない地表近くでは、一応二次元受動土圧を援用してみると次のようになる。すなわち杭に接した所では $r=a$ とおいて式 (8) より

$$n r Z(1 + \sin \varphi) \left(\frac{R}{a}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \leq \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} r Z \quad \therefore \left(\frac{R}{a}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \leq \frac{1}{n(1 - \sin \varphi)} \dots (16)$$

図-4



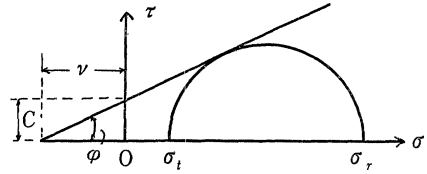
いま仮りに普通の砂地盤の例として、静止土圧係数 $n=0.5$ 、内部摩擦角 $\varphi=30^\circ$ として上式 (16) に代入すると、 $R/a=8$ となる。すなわち、このような地盤に杭を打ちこむと締固めの効果のおよぶ範囲は、地表近くにおいては直径の 8 倍を超えないことが結論された。

3. 粘着力のある土の場合の計算

一般に土はせん断抵抗角 φ の他に粘着力 c をも有するが、この場合の土の破壊条件は 図-5 に示される。

前に述べたと同じように杭が土を水平方向にのみ押し出すものとする。杭から相当はなれた所 ($r \rightarrow \infty$) では水平面内の直応力は自然の静止土圧に等しく、杭に接近するにつれて半径方向の直応力 σ_r はだんだんと大きくなり、一方円周方向の直応力 σ_t は次第に小さくなる。そしてある距離 $r=R$ の所で土が破壊を始めると思えると式 (4) において、

図-5



$$\left. \begin{aligned} r \rightarrow \infty \text{ のとき } & \sigma_r = \sigma_t = n r Z \\ r = R \text{ のとき } & \sigma_r + \nu = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\sigma_t + \nu) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (17)$$

ここに $\nu = c \cot \varphi$, c : 土の粘着力

なる条件を用いて常数を計算決定すると次の結果を得る。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= n r Z \left\{ 1 + \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \right\} + \nu \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \\ \sigma_t &= n r Z \left\{ 1 - \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \right\} - \nu \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (18)$$

次に杭に接して $r \leq R$ なる範囲では、押しこんだ杭のため土が水平に圧せられて破壊していると考えられる。従つてこの範囲の土に生じている直応力を $\sigma_r', \sigma_t', \sigma_z'$ とすると (せん断応力 $\tau=0$ として)、

$\sigma_r' + \nu = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\sigma_t' + \nu)$ なる関係がある。それゆえに式 (1) に上の条件を入れて積分し、 $r=R$ なる破壊の範囲の境界で σ_r', σ_t' がそれぞれ式 (18) であたえられる σ_r, σ_t に等しいとおくと、式 (8) に相当するものとして次の式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= (n r Z + \nu) (1 + \sin \varphi) \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} \\ \sigma_t' &= (n r Z + \nu) (1 - \sin \varphi) \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

また $\sigma_z = \sigma_z' = r Z \dots \dots \dots (20)$

すなわち $r \geq R$ の範囲では、式 (18) が、 $r \leq R$ の範囲では式 (19) が地盤内に生じた応力を示すことになる。 $r=R$ ではこの両式は一致して次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_r' = n r Z (1 + \sin \varphi) + \nu \sin \varphi \\ \sigma_t &= \sigma_t' = n r Z (1 - \sin \varphi) - \nu \sin \varphi \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (21)$$

次に R を決定しなければならないが、これは粘着性のない地盤の場合に行つたと同じように杭の押込の前後における土の圧縮を考えればよいことになる。すなわち自然の地盤における 3 直応力の和は式 (10) で示されるように $r Z (1 + 2n)$ となる。杭が押しこまれた後で、 $r \geq R$ の範囲で 3 直応力の和は式 (18) より次のようになる。

$$\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z = n r Z \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \right) + \nu \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi + n r Z \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi \right) - \nu \frac{R^2}{r^2} \sin \varphi + r Z = r Z (1 + 2n) \dots (22)$$

従つて体積の変化はないことになる。ところが $r \leq R$ の範囲では 3 直応力の和は式 (19) より次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_r' + \sigma_t' + \sigma_z' &= (n r Z + \nu) (1 + \sin \varphi) (R/r)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} + (n r Z + \nu) (1 - \sin \varphi) (R/r)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} \\ &\quad + r Z = r Z \left[1 + 2n \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} + \frac{2 \nu}{r Z} \left\{ \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} - 1 \right\} \right] \dots \dots \dots (23) \end{aligned}$$

すでに説明したように、杭の体積に相当する土の圧縮が $r=R$ の範囲でなされたとして式 (13), (14) を用いると式 (15) に相当するものとして次式を得る。

$$\frac{a^2 (1 + e_0)}{c_c} = \int_a^R 2 r \log_{10} \frac{1 + 2n \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} + \frac{2 \nu}{r Z} \left\{ \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \nu} - 1 \right\}}{1 + 2n} dr \dots \dots \dots (24)$$

ただし a は杭の半径, e_0 は杭の押しこまれる前の地盤の土の間げき比, c_e はその土の圧縮指数, n は自然の静止土圧係数, φ はせん断抵抗角, ν は c を粘着力としたとき $c \cot \varphi$ を意味するものである。この積分は簡単でないが図解的に行つて R を a の何倍という形で求めることができる。式 (24) は式 (15) にくらべて右辺に $1/rZ$ なる項が入っているから R は深さによつても変化するから注意しなければならない。粘着力 $c=0$ のときは式 (24) は式 (15) に一致する。半径方向の直応力 σ_r は杭に接近するにつれて大となることは式 (18), (19) より明らかであるが, 前に述べたように $Z=0$ の地表近くでは σ_r は受動土圧より大となり得ない。杭径にくらべて深さの小さな地表近くでは一応二次元的な受動土圧を用いて考えると, 杭に接した $r=a$ の所では次の制限がある。

$$\sigma_r' = (nrZ + \nu)(1 + \sin \varphi) \left(\frac{R}{a} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \nu \leq \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (rZ + \nu)$$

$$\therefore (R/a)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \leq \frac{(1 + \sin \varphi) rZ + 2\nu}{(1 - \sin^2 \varphi)(nrZ + \nu)} \dots \dots \dots (25)$$

従つて $Z \rightarrow 0$ とすると

$$\left(\frac{R}{a} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \leq \frac{2}{1 - \sin^2 \varphi} \dots \dots \dots (26)$$

いま仮りに $\varphi=30^\circ$ とすると $R/a \approx 4.35$ となる。すなわち粘着力のある地盤では, 地表の近くか, あるいは土の自重 rZ にくらべて $\nu (=c \cot \varphi)$ の大きい場合には, 土の締固まる範囲は直径の約 4.4 倍になることが決論される。式 (26) には静止土圧係数が入っていないが, 普通の地盤で内部摩擦角が $\varphi=30^\circ$ 程度のものであれば式 (16) のあたえる結果とあわせて考えると, 杭の間隔は直径の 8 倍以上離なせば, 相互の影響が消失するという実験⁹⁾ 報告の解明に一つの根拠をあたえることになる。

上述の計算は地盤の土が或る程度の粘着力とせん断抵抗角をもあわせもつ場合の一般解法を説明したが, 特に軟弱な粘土では $\varphi=0$ となり, この場合 $\nu = c \cot \varphi \rightarrow \infty$ となる。そこでこの場合の計算を行うと次のようになる。

地盤の土は粘着力 c のみをもつものとする Mohr の破壊の条件は図-6 のようになる。杭が土を水平に押し出すものと考え, 杭から相当はなれた所では水平面内の直応力は自然の静止土圧に等しく, 杭に近いある $r=R$ の所以内の土が破壊していると考え。式 (17) の代りに

$$\begin{aligned} r \rightarrow \infty & \quad \sigma_r = \sigma_t = nrZ \\ r = R & \quad \sigma_r - \sigma_t = 2c \end{aligned} \dots \dots \dots (27)$$

なる条件を用いて式 (4) から次式を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= nrZ + cR^2/r^2 \\ \sigma_t &= nrZ - cR^2/r^2 \end{aligned} \dots \dots \dots (28)$$

$r \leq R$ では $\sigma_r' - \sigma_t' = 2c$ なる条件を用いて, 式 (1) を $\tau=0$ として積分し, $r=R$ で σ_r', σ_t' がそれぞれ式 (28) であたえる σ_r, σ_t に等しくなるという条件を用いると次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= nrZ + c \left(2 \log \frac{R}{r} + 1 \right) \\ \sigma_t' &= nrZ + c \left(2 \log \frac{R}{r} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (29)$$

また

$$\sigma_z = \sigma_z' = rZ \dots \dots \dots (30)$$

すでに説明したように杭の入る前の自然の 3 直応力の和は $\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z = rZ(1+2n)$ であり, 杭が押しこまれた後の地盤で $r \geq R$ の範囲では 3 直応力の和は式 (28) より $\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z = rZ(1+2n)$ となるから土の圧縮はない。次に $r \leq R$ の範囲では式 (29) より

$$\sigma_r' + \sigma_t' + \sigma_z' = 2nrZ + 4c \log \frac{R}{r} + rZ \dots \dots \dots (31)$$

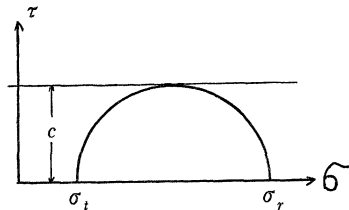
従つて式 (13), (14) を用いて式 (15) または (28) に相当するものとして次式を得る。

$$\frac{a^2(1+e_0)}{c} = \int_a^R 2r \log_{10} \frac{1+2n + \frac{4c}{rZ} \log \frac{R}{r}}{1+2n} dr \dots \dots \dots (32)$$

地表では $\tau=0$ であり, すでに述べたように σ_r' は受動土圧より大となり得ないから, 式 (29) より, $r=a$ のときでも,

$$\sigma_r' = nrZ + c \left(2 \log \frac{R}{a} + 1 \right) \leq 2c$$

図-6



∴ $Z \rightarrow 0$ のとき $R/a \leq 1.649$ (33)

4. 実験結果

実験は $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ の箱に川砂を入れ直径 $2a = 3.4 \text{ cm}$ 長さ $l = 55 \text{ cm}$ の杭を押しこみ、その周囲に直径 0.7 cm 長さ 130 cm 重さ 432 gr の細いなめらかな鉄棒を鉛直にたてて、これに 150 gr のおもりも 20 cm の高さから自由落下させて衝撃を加え、一衝撃あたりの貫入量を比較したのである。結果は図-7 に示されるようである。図より半径の約 8~10 倍の所で杭の押しこみの影響が消失しているようである。

この実験に用いた砂は次のようである。

粒子の比重 2.72 , 初期間隙比 $e_0 = 0.80$ } 実測
 圧縮指数 $c_c = 0.15$, 内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$ }
 静止土圧係数 $n = 0.5$ } 推定

以上の結果を式(16)に代入すると $R \leq 8.3a$ となる。一方、式(15)に代入して計算すると $R = 12.7a$ なる。実際は杭が鉛直下方にも土を押圧移動させるから、 R は $12.7a$ よりやや小さいはずである。この計算結果は実験結果とほぼ一致するようである。

上の実験は 1 本の杭を打ちこんでその周囲の砂の締まりの変化を一種の貫入試験で調べたのであるが、杭の打込みの前後の砂の密度差を著明ならしめるため、図-8 のように 4 本の杭を正方形に配列して打ちこみこの中央の位置で上述のような貫入試験を行った。相互対称に配置した杭が接近して、それぞれの杭の周囲の締固まつた範囲が接触しだすと、貫入抵抗が急に増大し、1 本の杭のまわりを漏らべるよりも、砂の密度

図-7

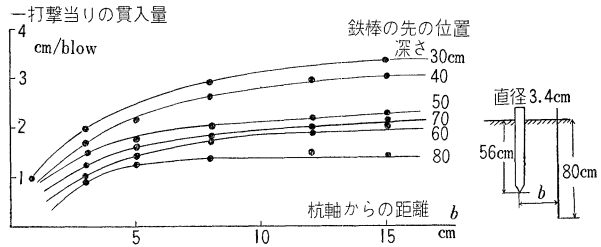


図-8

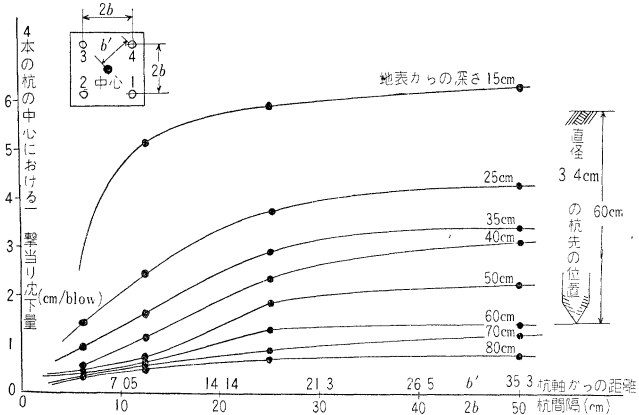


図-9

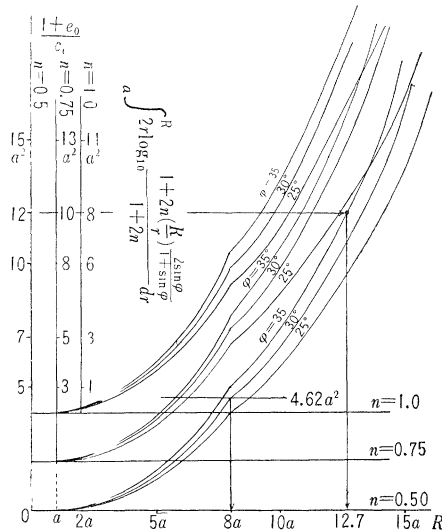
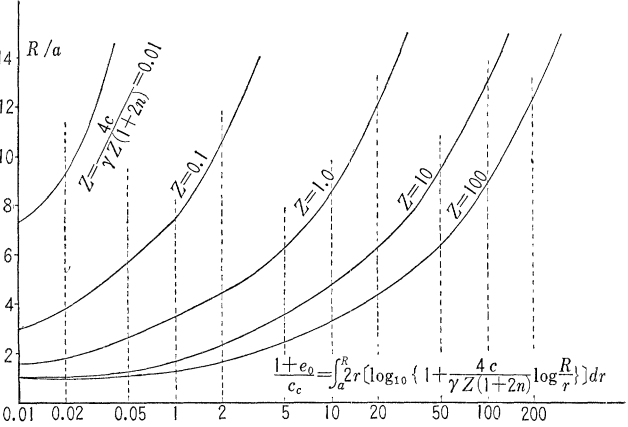


図-10



変化を発見しやすいのである。図-8 より明らかなように、比較的地表に近い深さ 15 cm の所では、一衝撃あたりの沈下量は、杭間隔 $15 \sim 20 \text{ cm}$ 、すなわち杭軸からの距離 $10 \sim 14 \text{ cm}$ の所で急に変化している。この距離

は杭半径の 6～8 倍に相当する。一方相当深い所の深さ 50 cm の所では、この曲線の変化は杭間隔 25～30cm すなわち杭軸から 17～22 cm の所に生じている。これは杭半径の 10～13 倍の距離に相当する。この実験結果は上述の計算結果とほぼ一致している。

図-9 は式 (15) の計算に用いるためのものである。いま砂の $\varphi=30^\circ$, $c_e=0.38$, $e_0=0.76$ とすると式 (15) の左辺は $4.62 a^2$ になるから図-8 よりと $R=8a$ となる。図-10 は式 (32) の計算に用いるための図表である。

5. 結 言

著者は締固め杭の機能について理論的に検討した結果砂質地盤において、杭の打込みのために土が圧縮せられる範囲は、直径の約 8 倍になることを示した。また地中深くなればこれよりさらに大になるはずで、このことは実験でも示されている⁷⁾。そしてこの範囲の決定法を説明することができた。これらの基本的研究は、ゆるい地盤の強化法として採用される締固め杭の施工配置に指針をあたえることができる。杭間隔が小さいほど締固めの効果があるわけであるが、あまり小さくすると、杭先より下の土の締固めには効果があつても周囲の土はあまり締固まらない場合がある。また多くの杭を地盤に打ちこむ場合杭間隔が小さいほど杭一本あたりの支持力は増大するが、直径の 3～4 倍程度以上近づけても効果がないのであつて、この点に関する理論的計算は次の機会に述べる。本研究は文部省科学研究費(昭 33. 西田)(昭 34. 試験研究, 代表, 京都大学 村山朔郎教授)による研究の一部であつて関係方面および実験に協力された島田淳一, 坂井尚弘, 砂子幸男, 高橋幸雄の諸君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 西田義親 土木学会論文集, No 64, p.48～54 (昭 34) 等
- 2) 後藤 清: 土木技術, 4 巻 3 号 p.4, (昭 24 年 3 月) に簡単な記事がある。
- 3) 保田・西田・島田: 土木学会第 14 回年次学術講演会講演概要, 第 II 部 p.117～118, (昭 34)
- 4) 村山・谷本 土木学会誌, 39 巻 7 号, p.375～379, (昭 29)
- 5) 西田義親: 上出 1). p.49
- 6) Press H.: Die Bautechnik, 11 Jah., S.625～627 (1933) 等
- 7) 村山朔郎・昭和 32 年度建設技術研究報告 (昭 33) 等

(原稿受付: 昭 34. 10. 24)