

水平抵抗における群杭効果の研究

HORIZONTAL RESISTANCE OF A PILEGROUP
SUBJECTED TO LATERAL LOAD

玉置 脩*・三橋晃司**・今井常雄***

By Osamu Tamaki, Koji Mitsuhashi and Tsuneo Imai

1. まえがき

水平力を受ける単杭の挙動は、理論的に実験的にはほど明らかにされてきたが、群杭としての杭の挙動についての文献は少なく、特殊な場合の実験報告がいくらかあるのみである。それゆえ、水平力の作用する群杭の一般的挙動、つまり群杭全体の支持力、荷重に対する変位、各杭の荷重分担率、ひいては群杭効果などについては、ほとんど未解明であるといってよい。本研究は、系統的な模型実験を行ない、群杭としての各杭の挙動から群杭効果を把握しようとするものである。

一般に群杭効果は次のように表わされている。

$$\text{群杭効果} = \frac{\text{群杭の支持力}}{(\text{単杭の支持力}) \times (\text{群杭の杭本数})} \leq 1$$

この式からわかるように、群杭になることによって支持力が低減することを、群杭効果であると定義できるが、このほかに群杭効果は、同一荷重に対する変位の増加、あるいは、各杭の荷重分担率の違いなどによっても表現できる。ことに弾性曲線法を用いる最近の杭基礎の設計では、基礎の変位に制限を設け、これによって杭本数が決定される場合が多い。したがって、本実験研究では支持力に対する群杭効果ではなく、変位に対する群杭効果を検討した。すなわち、ここでは群杭効果を次のように表わすこととする。

$$\text{群杭効果} = \frac{\text{一定荷重に対する単杭の変位}}{(\text{一定荷重} \times \text{杭本数}) \text{に対する群杭の変位}} \leq 1$$

杭に働く水平力は、杭自身の曲げ剛性と地盤の反力によって抵抗されるが、群杭では各杭の反力が干渉し合い抵抗力が減少し、変位が増大するものと考えられる。荷重方向に杭が並んだとき、変位方向の最初の杭の変位によって他の杭の地盤反力が減少し、各杭の荷重分担率が異なるであろうし、また、杭頭が固定されれば杭反力は下方において水平方向での反力分布は小さなり、群杭と

しての反力の干渉は小さくなるとも考えられる。

以上の予測から群杭効果は、杭の中心間隔、荷重方向の杭本数、荷重直角方向の杭本数、および固定度の関数であるといえる。

本実験は、単杭の変位と群杭の変位の比較から群杭効果を求め、その実験式を提案し、ノモグラムを作成した。

2. 実験装置

実験は図-1のような装置を用いて行なった。まず、鋼製の型わくで内寸法 3.0 m × 2.0 m × 1.95 m (深さ) の土槽を組み立てその中に模型杭を建て込み、砂を施工基準に基づいて締め固めた。杭頭部は図-2(a), (b) に

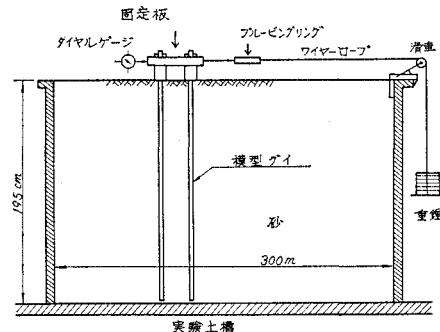
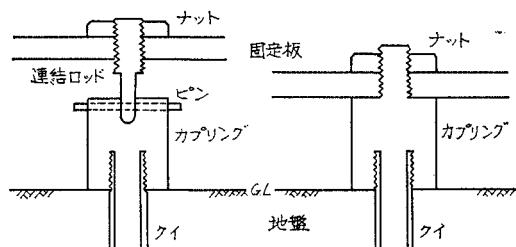


図-1 実験装置



a) 自由ゲイの場合

b) 固定ゲイの場合

図-2 杭頭の連結装置

* 正会員 首都高速道路公団工務部第二設計課長

** 正会員 首都高速道路公団第一建設部設計課

*** 地盤調査事務所涌和研究所計測課長

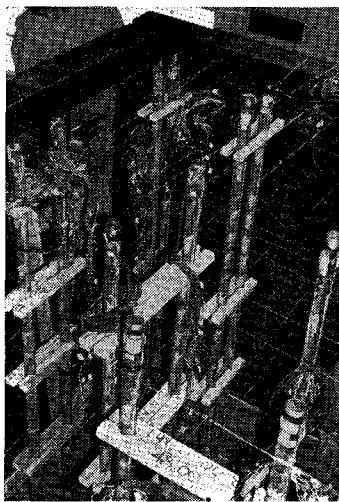


写真-1 土槽内への杭の建て込み

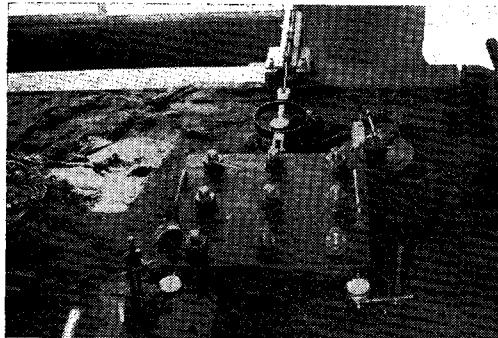


写真-2 載荷試験の状況（杭頭固定の場合）

示すように固定台にピン（杭頭自由）またはカップリング（杭頭固定）によって連結されている。固定台には重錘によって水平力を作用させ、水平力はブルーピングリングによってチェックされる。写真-1は杭の建て込み状況を、写真-2は杭頭固定の様子を示している。

(1) 模型杭

(5) に述べるシリーズ実験のために約30本の模型杭を製作した。各模型杭に20個のワイヤストレインゲージを2ゲージ測定法のために対称に貼布した。すべての杭は曲げ試験を行ないストレインゲージの感応精度をチェックし、杭の曲げ剛性をもあわせてチェックした。

模型杭の断面は相似則によって決定した。

模型杭(suffix:m)と原型杭(suffix:p)との諸元の相似比は、はりの理論から次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \text{深さ} \quad R_x &= \frac{x_p}{x_m} & \text{たわみ} \quad R_y &= \frac{y_p}{y_m} \\ \text{幅} \quad R_B &= \frac{B_p}{B_m} & \text{曲げ剛性} \quad R_{EI} &= \frac{EI_p}{EI_m} \end{aligned}$$

$$\text{曲げモーメント} \quad R_M = \frac{R_y}{R_x^2} \cdot R_{EI}$$

$$\text{せん断力} \quad R_S = \frac{R_y}{R_x^3} \cdot R_{EI} \quad \text{地盤反力} \quad R_q = \frac{R_y}{R_x^4} \cdot R_{EI}$$

$$\text{ひずみ} \quad R_i = \frac{R_M \cdot R_B}{R_{EI}} \quad \text{曲げ応力} \quad R_\sigma = \frac{R_M \cdot R_B}{R_I}$$

また、地盤反力qは久保らの実験によれば

$$\text{S型地盤に対して} \quad q = kxy^{0.5}B$$

$$\text{C型地盤に対して} \quad q = ky^{0.5}B$$

となり、これに相似則を用いれば

$$R_q = R_k \cdot R_x \cdot R_y^{0.5} \cdot R_B \quad (\text{S型地盤})$$

$$R_q = R_k \cdot R_y^{0.5} \cdot R_B \quad (\text{C型地盤})$$

となる。

原型杭として、首都高速道路公団の高架橋下部構造の基礎としてよく用いられる場所打コンクリート杭を考えると、その諸元は、外径 $B_p = 100\text{ cm}$ 、弾性係数 $E_p = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、断面二次モーメント $I_p = 4.91 \times 10^6 \text{ cm}^4$ 、曲げ剛性 $EI_p = 1.03 \times 10^{12} \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ である。これらの諸元をもとに、鋼材で円形断面を有する模型杭を選定することは不可能に近いことがわかったので、模型杭としては縦と横との相似比を変えた“ひずみ模型”を採用することにした。すなわち、水平方向の縮尺を R_c とし、深さ方向と水平方向との縮尺比つまりひずみ模型のひずみ度を r とすると、この模型杭の原型杭に対する各寸法比は次のようになる。ただし、地盤条件は模型、原型とも共通であるとした。

$q = kxy^{0.5}B$ の場合(カッコ内は $q = ky^{0.5}B$ の場合)

$$R_y = R_B = R_C, \quad R_x = rR_C, \quad R_k = 1$$

$$R_{EI} = r^5 R_C^{5.5} (=r^4 R_C^{4.5}), \quad R_M = r^3 R_C^{4.5} (=r^2 R_C^{3.5}),$$

$$R_S = r^2 R_C^{3.5} (=r R_C^{2.5}), \quad R_q = r R_C^{1.5} (=R_C^{1.5}),$$

$$R_i = 1/r^2, \quad R_\sigma = 1/10 r^2$$

$$\text{ただし, } R_E = E_p/E_m = 1/10$$

上記の寸法比をもとに実験条件を考慮し、検討の結果模型杭として、外径 4.3 cm、肉厚 0.3 cm の JIS G 3465 試錐用継目無鋼管を用いることにした。

模型杭の杭長は、杭頭が自由の場合では Chang の式によって計算される曲げモーメントの第1ゼロ点までの深さの1.5倍をとったが、杭頭が固定された場合では曲げの影響が下方におよぶのではないかと考えられたので、これを実験上の測定精度の面から検討を行なった。つまり図-3のように2つの場合を考える。a)の場合は、杭頭と $x=l$ で固定され、b)は杭頭のみで固定され杭長が無限大の場合である。そこでa)の場合とb)の場合とで各深さでのひずみの差が測定精度以内の差であるような根入長 l を求めればよいことになる。

ひずみ測定の最小単位を a とし、両者のひずみの差を $x=l$ の時について求めてみると、2ゲージ法であるから

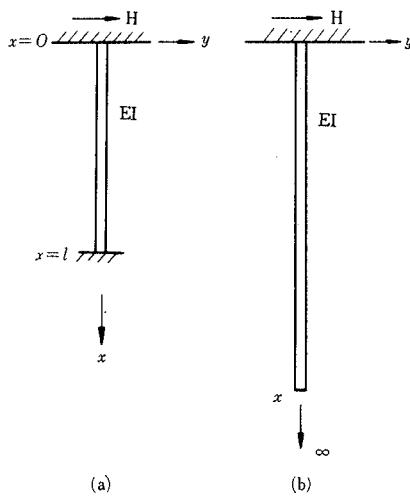


図-3 杭根入長の対比模式図

$$\begin{aligned} & |2\epsilon_a - 2\epsilon_b|_{x=l} \\ &= \frac{HB}{2EI} \left\{ \frac{-2 \sin \beta l \sinh \beta l}{\cos \beta l \sin \beta l + \cosh \beta l \sinh \beta l} \right. \\ &\quad \left. - e^{-\beta l} (\cos \beta l - \sin \beta l) \right\} < a \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

となる。 a は測定機械の精度から 3×10^{-6} である。

いま、杭の根入長を $l=2.0\text{m}$ とし、杭1本あたりの最大水平荷重を $H=30\text{kg}$ とすれば、 $B=4.3\text{cm}$, $EI=1.59 \times 10^7\text{kg}\cdot\text{cm}^2$, $\beta=3 \times 10^{-2}\text{cm}^{-1}$ であるから、

$$|2\epsilon_a - 2\epsilon_b|_{x=l} = 0.8 \times 10^{-6} < a = 3 \times 10^{-6}$$

となる。同様に $x=0$ と $x=l/2$ においても式(1)を完全に満足している。したがって、本実験では杭の根入長を 2m とした。

(2) 杭頭の装置

杭頭部は、杭頭自由の条件に対しては図-2(a)のようにピンにより、杭頭固定の条件には図-2(b)のようなカップリングによって固定台に連結させた。杭頭固定ではカップリングの曲げ剛性が無限大であることが必要であるので、これを固定杭の根入長と同様に測定精度の面から検討してみた。つまり図-4の高さ h の部分は地中に埋め込まれている部分より α 倍の曲げ剛性が

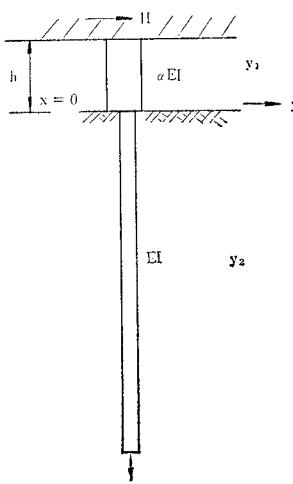


図-4 杭の剛度の模式図

あるものとし、 α がどの程度の値をとれば h の部分は無限大的曲げ剛性があるものと見なし得るかを検討してみた。

α 倍の曲げ剛性であるときのひずみは

$$\begin{aligned} \epsilon_\alpha &= \frac{BH}{4EI\beta} \cdot \frac{e^{-\beta x}}{\alpha + \beta h} [\{\alpha + 2(\beta h) + (\beta h)^2\} \\ &\quad \cdot \cos \beta x - \{\alpha - (\beta h)^2\} \sin \beta x] \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

また、 α が無限大であれば

$$\epsilon_\infty = \frac{BH}{4EI\beta} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \dots \dots \dots (3)$$

この2つの式から

$$\begin{aligned} |2\epsilon_\alpha - 2\epsilon_\infty| &= \left| \frac{BH}{2EI\beta} \cdot \frac{\beta h(1 + \beta h)}{\alpha + \beta h} \right| < a \\ &\cdot e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

を得る。ひずみは $x=0$ で最大となるので式(4)にて $x=0$ とおけば、

$$\begin{aligned} |2\epsilon_\alpha - 2\epsilon_\infty| &= \left| \frac{BhH}{2EI} \cdot \frac{1 + \beta h}{\alpha + \beta h} \right| < a \\ &\therefore a \geq \frac{BhH(1 + \beta h)}{2EIa} - \beta h \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

となる。式(5)に $B=4.3\text{cm}$, $EI=1.59 \times 10^7\text{kg}\cdot\text{cm}^2$, $a=3.0 \times 10^{-6}$, $\beta=3 \times 10^{-2}\text{cm}^{-1}$ および $h=5\text{cm}$ を代入すると $H=30\text{kg}$ のとき $\alpha=7.75$ となる。したがって、7.75倍の曲げ剛性を持つ外径 6.3cm , 内径 4.3cm のカップリングを用いることにした。これは杭の最小間隔 6.45cm よりも外径が小さいので杭の配置にも支障はない。なお、杭をカップリングに連結させ、片持かりとして載荷試験を行ない、測定値と理論値とがほぼ一致することを確かめた。

杭を固定する固定台は、水平力が作用したとき、たわみを起こさない厚さのものでなくてはならないが、この厚さを理論的に求めることは困難である。そこで、なるべく板厚の大きいものとし、 19mm とした。これについては固定台にストレインゲージを貼り、載荷時にひずみの測定を行なったところ、固定台は剛として扱ってもよいことがわかった。

(3) 実験地盤

a) 予備実験

実験を行なう地盤はどの個所も同一の性質であり、各シリーズ実験を通じて、いつも同種同質の地盤でなければならない。このために、地盤材料として均質な地盤の得やすい砂を用いることとし、本実験に先立って、締め固め方法についての予備試験を行なって地盤造成のための施工基準を定めた。そして作業能率などを考慮して、‘‘相対密度 65% 以上を目安とし、1回当りの締め固め層厚を 20cm とし、 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の底面積を持つ総重量 8.2kg の木製ランマーで、 45cm の高さから 8回自

由落下させて突き固める方法”を施工基準とした。

本実験で造成された地盤が、どのように締め固められているかをチェックするために、現場密度を測定する必要がある。この測定方法として、砂置換法、水置換法、カッター法を検討してみたが、砂置換法が比較的まとまった値を示したので、この方法を採用することにした。

b) 本実験の地盤

予備実験によって決められた施工基準で本実験の地盤は造成されるが、果たしてその通りの地盤であるかをチェックしてみる必要がある。そのために原位置試験を水平載荷試験終了後各シリーズごとに行なった。その結果によれば、 N 値については各シリーズとも 4 度程度であり、深さによって変化はしていない。したがって標準貫入試験で論ずる限りでは均質で同一の地盤であるといえる。しかし、単位体積重量 (r_t)、 K 値などでは必ずしも同一値を示さず、特に単位体積重量は 0.4 m 以深ではバラツキが多い。また K 値についても同様である。

しかしながら、このような結果から地盤の不均一性やシリーズによる違いを定量的に論ずることはデータのバラツキともともと試験に含まれている誤差を考慮すればむずかしい。したがって、本実験では一応地盤条件は同一であるとして、解析と考察を進めることとする。

各種の試験結果の平均値を示せば、次のようになる。

N 値	4
乾燥密度	1.53 g/cm ³
相対密度	89.6%
含水比	約 5%
K 値	4.7 kg/cm ³
E 値	27.2 kg/cm ³

また、使用した砂の諸性質は次のようにある。

粒度による分類	砂（砂分 95% 以上）
均等係数	$U_c=2.0$
真比重	$G_s=2.8$

(4) 載荷方法

載荷荷重は杭 1 本当り杭頭自由で 20 kg、杭頭固定では 30 kg まで加えた。これを先に述べた S 型地盤の相似比によって原型杭に換算すると、それぞれ 100 t（自由の場合）と 36 t（固定の場合）までの載荷となる。群杭にはこれらの荷重に杭本数を乗じたものを載荷させた。

杭の変位は、ダイヤルゲージで読み取ったが、ダイヤルゲージの針の進みが 2 分間で 1/100 mm 以下となったときに変位は停止したものとした。曲げひずみは読み取り精度 3 μ ~2000 μ のインディケーターを用いて行なった。

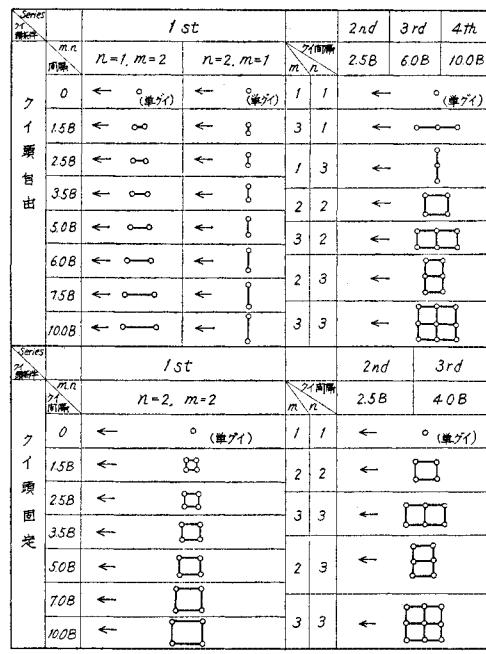


図-5 杭配置図

(5) 杭配置

各シリーズの杭の配置を図-5 に示す。杭頭自由の場合では第 1, 2, 3, 4 シリーズを、杭頭固定では第 1, 2, 3 シリーズについて行なった。

a) 第 1 シリーズ

群杭効果の生ずる臨界間隔（以下 D_c という）を求めた。

b) 第 2, 3 シリーズ

群杭効果の期待される間隔、すなわち D_c より小さい間隔（以下 D_e という）について、杭本数の違いによる群杭効果を調べた。

c) 第 4 シリーズ

群杭効果の期待されない間隔、すなわち D_c より大きい間隔（以下 D_o という）について、第 2, 3 シリーズと同様な実験を行なった。

3. 実験結果

実験の結果、測定値として得られるものは次の 3 つである。

水平載荷荷重 (H)

荷重作用点までの水平変位 (δ)

杭に生ずる曲げひずみ (ϵ)

これらを次のように整理した。

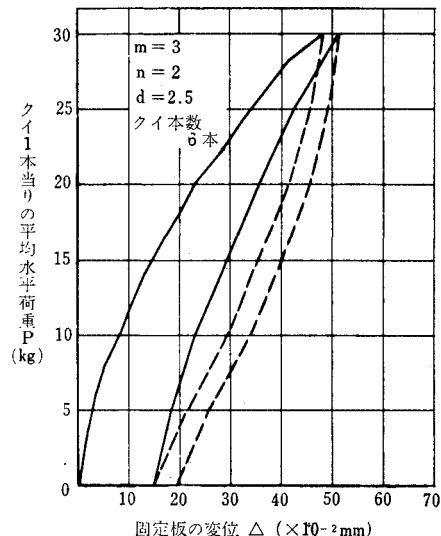


図-6 荷重変位曲線の一例

(1) 荷重変位曲線

群杭全体としての挙動を知るために、水平載荷荷重(H)と荷重作用点の水平変位(Δ)との関係を $H \sim \Delta$ 曲線として描いた。その一例を図-6 に示す。固定台の左右両端の動きをみると、その差はせいぜい 10% 程度で、偏心移動はないとみなしてよい。鉛直変位は水平変位の 20~30% 程度であった。杭頭固定の場合では、荷重方向に対して、前方の杭は沈下し、後方の杭は浮き上り一種の回転を生じた。完全固定の条件では、本来鉛直変位は許されるべきではないが、このような実験方法を採用する限りではある程度はやむを得ないといえよう。

水平偏心移動の傾向は、杭間隔が大きくなるとともに、また、杭本数が多くなるとともに増加するようである。鉛直変位は逆に杭本数が増すにしたがって減少し、いわゆる固定効果が増す傾向にある。

(2) 曲げひずみ(ϵ)、たわみ(y)、たわみ角(i)、曲げモーメント(M)、せん断力(S)、地盤反力(P)の分布

群杭を構成する各杭の挙動を知るため、ストレインゲージによる曲げひずみ(ϵ)の測定データより、まず曲げモーメント(M)の分布を求め、次に、この曲げモーメント分布曲線から式積分あるいは式微分によって、杭のたわみ角(i)、たわみ(y)、せん断力(S)、杭面の地盤反力(P)の分布を求めた。その一例を図-7 に示す。積分によって得たたわみ角およびたわみは精度的にかなり期待できるが、微分によるせん断力と地盤反力は誤差の多いもので、ことに地盤反力についてはあまり期待できない。

以上の結果から、杭頭固定の場合、杭頭固定の埋め込み杭の条件で実験したにもかかわらず、結果は当初の予想とかなり異なっており、むしろ杭頭突出杭としてみなすべきものようである。このことは杭頭の完全固定条件は満足されていないことを示しているといえよう。

4. 固定度と群杭効果

すでに述べたように、杭頭固定の実験では、荷重前列の杭が沈下し、後列の杭が浮き上るといった半固定の状態になって、通常の意味での杭頭完全固定の群杭効果を求めることができなかつたので“固定度”という概念を用いて後述の解析を行なった。したがって実験結果の解析を述べるに先立って、この固定度の概念とその理論を簡単に紹介する。

(1) 固定度

杭頭の拘束条件を、自由と固定の中間に想定すると、その固定の度合は、杭頭に働く拘束モーメントの比で決まる。すなわち固定度 k を、実際の杭頭の拘束モーメ

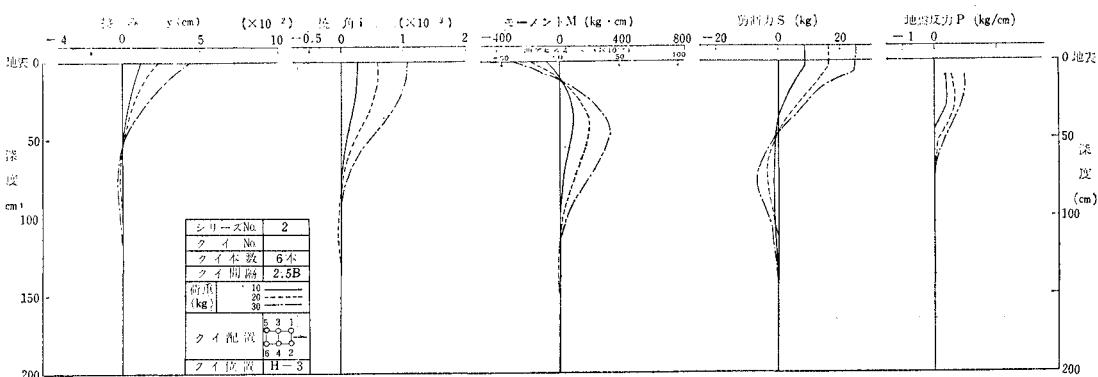


図-7 曲げひずみならびにたわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力、地盤反力の分布

すなわち、固定度 k は R_s と βh の関数であり、 βh をパラメーターにとると、 k と R_s の関係は図-8 のようになる。埋設杭の場合は図で $\beta h=0$ のグラフに相当する。

(2) 固定度を用いた群杭効果の表示

固定度を考慮した群杭効果を求めるために図-9 に示すように杭頭が自由な单杭の実測データより、式(7), (8)によって固定度 k の单杭の挙動を求め、これと固定度 k の群杭の挙動を比較する。



図-9 群杭効果算定の方法

突出杭の場合には、式(8)で $x=-h$, $k=0$ とおけば杭頭自由の单杭の杭頭変位 Δ_{S0} は

$$\Delta_{S0} = \frac{4(1+\beta h)^2 + 2}{12 EI \beta^3} H_{S0}$$

となり、また固定度 k の单杭の杭頭変位 Δ_{Sk} は

$$\Delta_{Sk} = \frac{\{(1+\beta h)^3(4-3k)+2\}}{12 EI \beta^3} H_{Sk}$$

となる。群杭効果 e は、杭1本当りの荷重を等しくしたときの、单杭の変位と群杭の変位との比であるから、上の2式を用いて、次のようになる。

$$e = \frac{\Delta_{Sk}}{\Delta_{S0}} = \frac{H_{Sk}}{H_{S0}} = \{1 - k \cdot G(\beta h)\} \frac{H_{Sk}}{H_{S0}} \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{ただし, } G(\beta h) = \frac{3(1+\beta h)^3}{4(1+\beta h)^3 + 2}$$

ここに、 H は水平荷重、 Δ は杭頭変位で第1サフィックスは S は单杭、 G は群杭、第2サフィックスは固定度であり、 H/Δ は荷重変位曲線の勾配である。 H_{Gk} は全荷重を杭本数で除した値である。

埋設杭の場合は式(10)において、 $h=0$ とおけば、

$$e = \left(1 - \frac{k}{2}\right) \frac{H_{Gk}}{H_{S0}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

となる。

5. 実験結果の解析

(1) 解析の基本的立場

すでに述べたように、群杭効果は、固定度、杭相互の間隔および群配置の関数と考えた。すなわち、

$$e = F(k, d, m, n) \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 e は群杭効果、 k は固定度、 d は杭中心間隔係数（杭中心間隔 D を杭幅 B で除した値）、 m は荷重方

向の杭本数（列数）、 n は荷重直角方向の杭の本数（行数）である。杭の群配置については、行と列の数は違っても、その配置の基本は等間隔配置で、行および列によって間隔の違いはなく、 d が共通である場合をモデルにしている。

式(12)において、4つの要因 k, d, m, n の働きがそれぞれ独立であるとすると、式(12)は次のようになる。

$$e = F[K(k), D(d), M(m), N(n)] \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $K(k)$ は固定度の違いによる群杭効果、 $D(d)$ は杭間隔の違いによる群杭効果、 $M(m)$ は荷重方向の杭本数による群杭効果、 $N(n)$ は荷重直角方向の杭本数による群杭効果である。

実際にこれら4つの要因が独立の働きをするかどうかはさておいて、ひとまず式(13)に前提をおき、それの効果関数を実験データから求め、それからこれらの関数を結合して群杭効果の一般関数を求めることとする。ただし、杭頭自由の場合には

$$e = F[D(d), M(m), N(n)] \quad \dots \dots \dots (14)$$

となる。

(2) 群杭効果の算出

a) 杭頭自由の場合

各シリーズとも、单杭を必ず1本設置しており、この单杭と他の群杭の実験結果を比較して、群杭効果を算出した。この群杭効果の算出は、同一荷重に対する変位の比として求めることを基本とするが、実際には、次の4つの方法で算出し、その平均値で処理するようにした。

(イ) プルーピングリングで測定した荷重とダイヤルゲージで測定した変位の比から求めた群杭効果 e_y

(ロ) プルーピングリングで測定した荷重とストレインゲージで測定したひずみから計算した変位の比から求めた群杭効果 e_t

(ハ) ひずみの測定から計算した杭頭での最大せん断力と変位の比から求めた群杭効果 e_f

(ニ) ひずみの測定値から計算した地表面での最大せん断力と変位の比から求めた群杭効果 e_o

以上4種類の群杭効果の一例として、第1シリーズにおける杭間隔との関係を表-1に示す。

表-1 杭頭自由の場合の杭間隔による群杭効果一覧表

項目	e_y	e_e	e_t	e_f	平均
1.5	0.7 6	0.5 5	0.8 1	0.5 8	0.6 8
2.5	0.8 6	0.7 4	0.8 4	0.7 7	0.8 0
3.5	0.9 1	0.7 8	0.8 5	0.9 7	0.8 8
5.0	0.9 8	0.9 5	1.0 0	1.0 0	0.9 8
6.0	1.0 0	0.8 6	0.9 3	0.9 8	0.9 4
7.5	1.0 0	1.0 4	1.0 5	1.0 4	1.0 3
10.0	0.9 8	1.0 2	0.9 4	0.8 4	0.9 5

b) 杭頭固定の場合

4.(2) で述べた方法で、実測群杭効果を求めたが、この算出に当っての問題は βh の評価と荷重変位曲線の勾配の決定にある。これらの決定は、さまざまな方法を試行錯誤的に試みた結果、次の方法を採用した。

βh については、次のようにした。式(7)のひずみ分布の式で $x=0, k=0$ として杭頭自由の場合の地表面でのひずみ ϵ_0 を求めてみると

$$\varepsilon_0 = -\frac{B H h}{4 E I}$$

となり、これより

を得る。つまり ε_0 を知れば h が求まる。 h は実測によっても求めることができるので、地表面の影響によって、実際の h と異なることも考えられるので、式(15)で求められた h を用いた。一方、式(8)で、 $x = -h$, $k=0$ とおくと、杭頭での荷重変位曲線の勾配は

$$\frac{A}{H} = \frac{h^3}{3EI} \frac{(1 + \beta h)^3 + \frac{1}{2}}{(\beta h)^3} \dots \dots \dots (16)$$

となる。したがって、式(15)による h と実測した A/H から、式(16)によって βh を求めることができる。

次に荷重変位曲線の勾配としては、自由杭の場合と同じように、いく種類かの検討をしたが、結局載荷試験の各荷重段階ごとのダイヤルゲージとブルーピングリングによる $4/H$ の平均値を用いた。

以上の方針により、各シリーズでの各試験ごとに、
 βh , $4S/H_S$, $4G/H_G$ を求め、一方地中の曲げひずみ分

表-2 杭頭自由の場合の群杭効果一覧表

series	タイ間隔 $d = \frac{D}{B}$	タイ配列		測定値		※ e
		m	n	固定度 k	群タイ効果 e	
1st	1.5	2	2	0.53	0.54	0.59
	2.5	"	"	0.62	0.61	0.69
	3.5	"	"	0.71	0.76	0.79
	5.0	"	"	0.72	0.85	0.90
	7.0	"	"	0.65	0.83	1.00
	10.0	"	"	0.69	1.06	1.00
2nd	2.5	"	"	0.59	0.66	0.70
	"	3	"	0.74	0.74	0.57
	"	2	3	0.56	0.66	0.67
	"	3	"	0.68	0.65	0.54
3rd	4.0	2	2	0.73	0.75	0.84
	"	3	"	0.85	0.70	0.75
	"	2	3	0.70	0.75	0.81
	"	3	"	0.78	0.75	0.74

答 下記の後述の実験公式からもとめた推測群グイ効果

$$e=1-5\left(\left\{1-\left(0.60-\frac{k}{5}\right)d\right\}^{\frac{(0.50+\frac{k}{5})}{5}}\right)\left\{1-m^{-0.22}n^{-0.99}\right\}$$

布から R_s を求め、 R_s と βh を用いて固定度 k を求め、これらと式(10)とによりそれぞれの群杭効果 e を得た。その結果は表-2のようになる。平均固定度は $k=0.6$ 程度であった。

(3) 杭配置と群杭効果

a) 杭頭自由の場合

後で述べるように、臨界間隔は $d=5.5$ であるので、この臨界間隔以内の $d=2.5$ の第2シリーズについて、杭配列による群杭効果を検討した。行および列の影響が独立のものであるかを交互作用のあるものであるかを知るため、 n 行 m 列の 2 元配列を行ない、分散分析によって要素の有意性の検定を行なった。先の e_y, e_i, e_t, e_o を用いて、くり返しのある 2 元配列を行なうと、行および交互作用について有意性が認められた。この 2 元配列を表-3 に示す。

次に m と n がどのように群杭効果に影響を与えるかを知るため、 m と n の母平均を求めると、次のような結果となる。

$$\bar{\mu}(m_1) = 90.4 \quad \bar{\mu}(m_2) = 76.8 \quad \bar{\mu}(m_3) = 67.8$$

$$\bar{\mu}(n_1) = 83.1 \quad \bar{\mu}(n_2) = 78.6 \quad \bar{\mu}(n_3) = 73.3$$

表-3 杭頭固定の場合の杭配置による群杭効果一覧表
(2元配列表)

n \ m	1	2	3
1	1.00	0.76	0.96
	1.00	0.65	0.90
	1.00	0.70	0.74
	1.00	0.65	0.61
平均	1.00	0.69	0.80
2	0.87	1.00	0.74
	1.00	0.93	0.56
	1.00	0.74	0.56
	1.00	0.61	0.42
平均	0.97	0.82	0.57
3	0.84	1.00	0.83
	0.66	0.66	0.68
	0.74	0.71	0.62
	0.74	0.80	0.52
平均	0.75	0.79	0.66

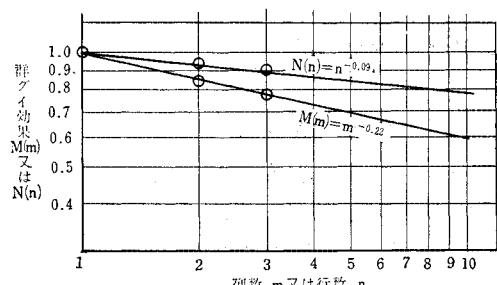


図-10 桟頭自由の場合の桟配置と群桟効果

この母平均はかなり大きい偏差をともなっているが、 m を一定としたときの $N(n) \sim n$, n を一定としたときの $M(m) \sim m$ の関係を描くと図-10 のようになる。 $m=1$ のとき $M(m)=1$, $n=1$ のとき $N(n)=1$ とするため $\bar{\mu}(m_i)=1.00$, $\bar{\mu}(n_i)=1.00$ になるように平均値を全体として平行移動している。この図から $M(m)$, $N(n)$ は次のようになる。

この式(17)のさまざまの結合と、表-3の実験結果とを対比させた結果、 m と n の交互作用のある群抗効果としては、次の積表示が最もよい一致をみせることがわかった。

$$G(m, n) = M(m) \cdot N(n) = m^{-0.22} n^{-0.09} \dots \dots (18)$$

b) 杭頭固定の場合

杭頭固定の場合に式(17)を適用すると図-11のようになり、この関数形は杭頭固定の場合にも使えることがわかる。

したがって、式 (18) もそのまま有効である。

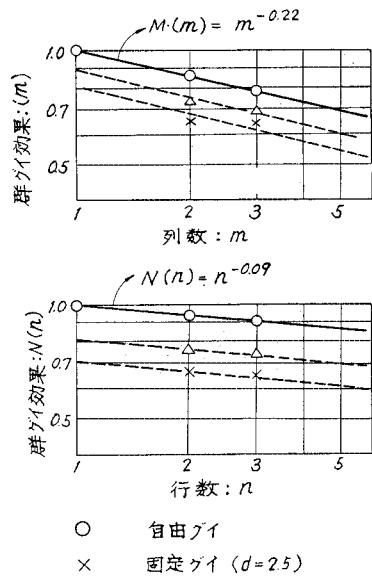


図-11 梁配列と群杭効果

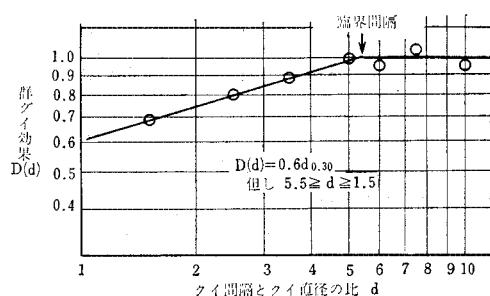


図-12 杭頭自由の場合の杭間隔と群杭効果

(4) 杭間隔および固定度と群杭効果

a) 杭頭自由の場合

表-1 から、杭間隔と群杭効果の関係は図-12 のようになる。この図から次式をうる。

ただし、 $5.5 > d > 1.5$

すなわち、杭頭自由の場合の、群杭効果を生ずる臨界間隔 D_c は $5.5 B$ といえよう。

b) 杭頭固定の場合

第1シリーズの実験結果から、杭間隔と群杭効果の関係は図-13 のようになる。これは固定度が約 0.6 で、4 本組杭の場合である。この場合の臨界間隔 D_c は約 6.5 B である。

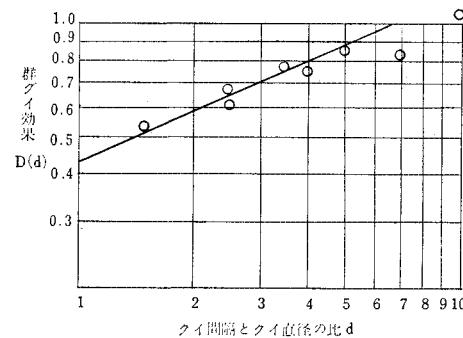


図-13 杭頭固定の場合の杭間隔と群杭効果

杭頭固定の場合の、杭間隔および固定度による群杭効果は、杭間隔と固定度が相互に関係するので、解析の順序上、群杭効果の一般表示のところで述べる。

(5) 群杭効果の一般表示と臨界間隔

a) 杭頭自由の場合

杭頭自由の場合は群杭効果の一般表示のうち、固定度 $k=0$ の、特別な場合の群杭効果を求めることがある。

さきの検討から、杭頭自由の場合の群杭効果は次のように書ける。

式(18),(19)を用いて式(20)を決定すればよい。ただし、この場合、式(20)は次の3条件を満たしていることが必要である。

(1) $d=5.5$ で $e=1$

(口) $d=2,5$ で $e=G(m, n)$

(ii) $5.5 > d > 1.5$ で e と d の関係は $D(d)$ と相似

以上の条件は、どのような配置であっても、群杭効果は $d > 5.5$ で常に 1 となり、 $D(d)$ の変化は杭配置の違いがあっても相似性があり、いいかえれば、配置をパラメーターとする同一関数群として表わされることを意味している。以上の条件を満たす式 (20) には、さまざ

まな関数形が考えられるが、最も実用的で簡便なものとして、補数間の積表示が望ましいことがわかった。すなわち、

$$(1-e) = \alpha \{1-D(d)\} \{1-G(m, n)\}$$

となり、係数を決めて整理すると、次のようになる。

$$e = 1 - 5(1 - 0.6 d^{0.3})(1 - m^{-0.22} n^{-0.09}) \dots \dots \dots (21)$$

b) 杭頭固定の場合

杭頭固定の場合の群杭効果は次のように書ける。

$$e = J[F(k, d), G(m, n)] \dots \dots \dots (22)$$

さきの検討で $G(m, n)$ は杭頭自由の場合と同じでよいので、式 (21) において $D(d)$ の代りに $F(k, d)$ を入れると

$$e = 1 - 5\{1 - F(k, d)\} \{1 - m^{-0.22} n^{-0.09}\} \dots \dots \dots (23)$$

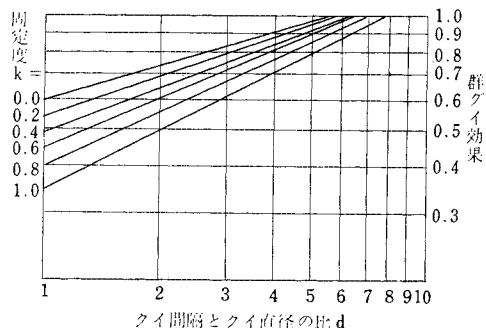


図-14 固定度をパラメーターとした杭間隔と群杭効果

ここで、 $m=n=2$ とすると、

$$e \approx F(k, d)$$

となる。すなわち、 $m=n=2$ の4本組杭のときは、 $F(k, d)$ は群杭効果そのものになる。固定度 $k=0.6$ の4本組杭の群杭効果 $e=F(0.6, d)$ は図-13 に示されており、杭頭自由の群杭効果を表わす式 (21) において、 $m=n=2$ とおくと同じ4本組杭の群杭効果のうち $e=F(0, d)$ がえられる。これらは図-14 における $k=0$

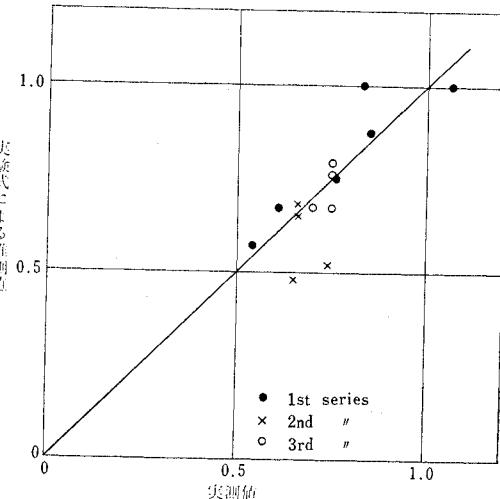


図-15 実測群杭効果と推測群杭効果

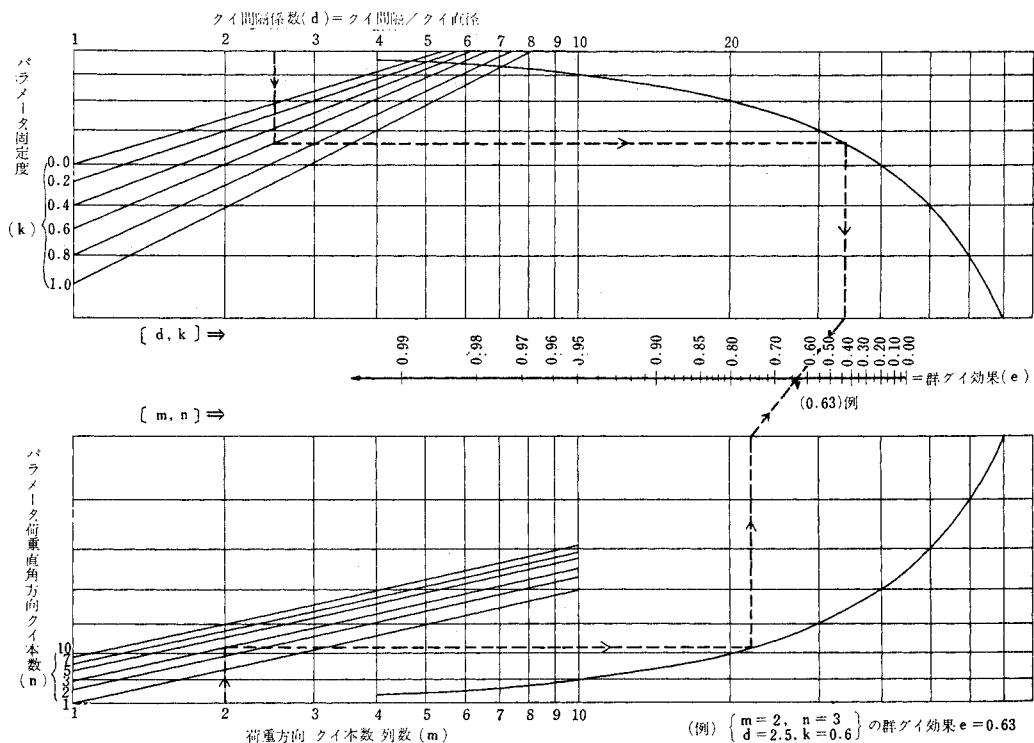


図-16 群杭効果をもとめるノモグラム

および $k=0.6$ の 2 本の直線である。したがってこの 2 本の直線を満足するように $F(k, d)$ を定めればよい。これは、

$$F(k, d) = (0.6 - 0.25 k) d^{(0.3 + 0.2k)} \dots \dots \dots (24)$$

となる。ただし $F(k, d) < 1$ である。式(24)から固定度 k をパラメーターとして $e \sim d$ の関係を求める図-14 がえられる。

以上の結果をまとめると、群杭効果の一般表示として、次式が提案される。

$$e = 1 - 5 \{1 - (0.6 - 0.25 k) d^{(0.3 + 0.2k)}\} \\ \cdot \{1 - m^{-0.22} n^{-0.09}\} \dots \dots \dots \quad (25)$$

ここで $k=0$ とすると杭頭自由の場合の式 (21) となる。

上式の検証のため、実験結果を用いた実測群杭効果と、 k, d, m, n を与えて式(25)から求めた推定群杭効果を対比すると、表-2 および図-15 となる。これらはかなりよい推測といえよう。

この式(25)を簡単に計算できるように、図-16のノモグラムを作成した。 k, d, m, n を知れば本図からただちに群杭効果 e を知ることができる。

c) 臨界間隔

群杭効果が現われなくなる臨界間隔, すなわち $e=1$ のときの D_c は図-14 から, $k=0$ の自由杭で $D_c=5.5B$, $k=1$ の完全固定杭で $D_c=7.8B$ で, 固定度によってこれらの間にあり, 固定度が増すと, 臨界間隔が増加する。

6. あとがき

水平力を受ける群杭について、群杭効果の実験式を提案し、ノモグラムを作成した。この群杭効果 e は次の

ように使うことができる。

$$(\text{群杭の水平支持力}) = (\text{単杭の水平支持力}) \times (\text{杭本数}) \times e$$

または

(群杭の水平変位) = (群杭の各杭と同じ水平荷重を受ける单杭の水平変位) × 1/e

群杭効果の生ずる原因是、地中応力の干渉にあると思われるが、水平力を受ける杭の地中応力はどのような分布になっているのであろうか。筆者らはこれを測定しようとして、いろいろと検討を重ねている。この地中応力の分布やその干渉の有様がわかれれば、群杭効果の解析も、より理論的に行なえるので、今後、ぜひその研究に取組んでいきたいと考えている。

この実験式を実際の設計に適用するに当って、問題となる点が 2 つある。1 つは実際の杭基礎の固定度はいくらかということである。これも簡単に測定できないので、今後の問題として研究していく予定である。もうひとつつの問題点は、水平力で杭本数が決まる杭基礎では群杭効果を考慮すると杭本数が増すということである。

これも実際の杭基礎について、試算を重ねてみると、その程度がはっきりしないし、また、この救済方法もいくつか考えられるが、これも今後の研究にまちたいと考えている。

以上述べたように、今後の問題がいくつかあるが、実験式を提案したところで、今回の研究報告の一応の終りとした。

最後に終始変わらぬご指導をいただいた、日本大学の最上教授に深甚の謝意を表します。

(1970.10.1・受付)