

佐賀大農彙 (Bull. Fac. Agr., Saga Univ.) 66 : 71~76 (1989)

粘土地盤における水平荷重下の 杭の支持力特性

甲本 達也・加来 研・G. G. MEYERHOF*
(農業造構学研究室)
昭和63年10月31日受理

Characteristics of Bearing Capacity of Piles under Horizontal Loads in Clay

Tatsuya KOUMOTO, Ken KAKU and George G. MEYERHOF*
(Laboratory of Construction Engineering)
Received October 31, 1988

Summary

The characteristics of bearing capacity of piles under horizontal loads in clay were investigated experimentally. Two-dimensional piles which have various flexural rigidity were used for horizontal loading tests to obtain the horizontal load-horizontal displacement relationship at the free top of piles and to observe the deflection behaviour of pile axis under horizontal loads.

Experimental values of ultimate horizontal bearing capacity decreasing with a decrease in the flexural rigidity of pile were in good agreement with the Broms's theory. When Vesic's dimensionless length βL was less than 2 or 3, piles were considered rigid (short piles), while βL being greater than 2 or 3, piles were considered flexible (long piles).

The ratio of ultimate horizontal bearing capacity for long pile P_u and $P_{u, rigid}$ for short pile was expressed as a function of factor βL only by

$$P_u/P_{u, rigid} = 1.58(1.0 - 0.85 \log \beta L).$$

Key words : bearing capacity, clay, deflection, flexural rigidity, horizontal load, pile

緒 言

斜面, 海岸, 海上等に築造された構造物の基礎 (ほとんどが杭基礎) は土圧や波圧, 地震力といった傾斜荷重や偏心荷重をよく受ける. このような荷重下における杭基礎の支持力は鉛直荷重下の支持力より小さいことが知られている. 従ってこのような荷重を受ける杭基礎の設計に際してはいかに合理的にその支持力を算定するかが重要な課題となる.

杭の支持力解析の現状をみると, 鉛直荷重下の杭支持力については, 理論, 実験両解析ともかなり行われており, 原位置におけるデータも豊富である. これに対して, 傾斜荷重や偏心荷重下の杭支持力については, 水平荷重下の支持力問題がかなり理論的に解析されている

* Dept. of Civil Engineering, Technical University of Nova Scotia, Halifax, Nova Scotia, Canada
B3J 2X4

のみで、任意の傾斜面や偏心率を有する荷重下の支持力に到ってはほとんどなされていないといってよい。これは一つには杭周辺の土の変形・破壊形式が荷重の傾斜角や偏心の度合の変化につれて複雑に変わるため、その理論的解析が非常に困難となることによる。しかしいま水平荷重下の杭の支持力特性が明らかになれば、任意の傾斜角や偏心率の荷重に対する支持力は、鉛直、水平両荷重下の杭支持力を適当に補間することによって精度よく算定できるであろう。

本論文はとくに粘土地盤を対象とし水平荷重下の杭の支持力特性を実験的に明らかにしたものである。

実験及び結果

水平荷重下の杭はその曲げこわさの大きさにより剛杭（短杭）的挙動とたわみ性杭（長杭）的挙動を示す。本実験では杭材料と杭断面の大きさを変化させて Table 1 に示すような 6 種類の曲げこわさを有するモデル杭を作成し使用した。供試土としてはベントナイト（比重 $G_s = 2.743$ 、液性限界 $w_L = 402.5\%$ 、塑性限界 $w_p = 35.6\%$ 、塑性指数 $I_p = 366.9$ ）の含水比 w を $w = 130\%$ と 98% に調整したものをを用いた。このときの供試土の非排水せん断強度 c_u はそれぞれ $c_u = 7.2kPa$ 及び $8.6kPa$ であった。これらの供試土を Fig.1 に示す二次元土槽（高さ $0.26m \times$ 幅 $0.30m \times$ 奥行 $0.012m$ ；前面ガラス張り）に充填した後モデル杭をセットし、約 5 分間隔の定荷重方式により載荷試験を行った。載荷に伴う杭軸の変位を、ガラス面に接する杭表面につけたマーク（Fig.1）の水平及び垂直方向の移動量として測定した。

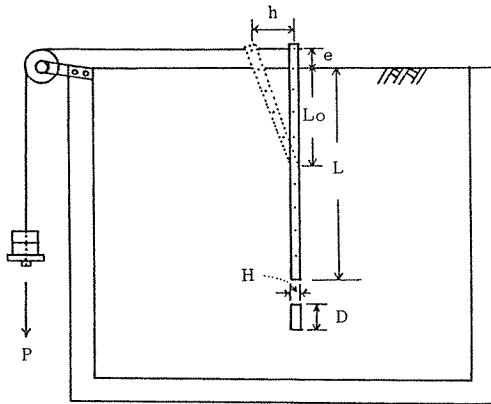


Fig. 1 Two-dimensional horizontal loading test apparatus

実験により得られた各荷重段階における杭軸の変形挙動を $c_u = 8.6kPa$ の場合について示したものが Fig.2 である。図によれば杭の曲げこわさが小さくなるにつれて杭が局部的に変形しており、Broms¹⁾のいう塑性ヒンジがあらわれてくるのがわかる。Fig.2 より載荷点の荷重～変位関係を求め、 $c_u = 7.2kPa$ の供試土についての結果とともに示したものが Fig.3 である。図によれば杭の曲げこわさ

Table 1 Data of tested piles

Pile No.	Material	Breadth D(m)	Height H(m)	Length L(m)	Flexural rigidity EI(tm ²)
1	steel	0.012	0.01	0.18	2.1×10^{-2}
2	Plastics	"	0.01	"	3.03×10^{-4}
3	"	"	0.081	"	1.55×10^{-4}
4	"	"	0.062	"	7.21×10^{-5}
5	"	"	0.040	"	1.94×10^{-5}
6	"	"	0.020	"	2.4×10^{-6}

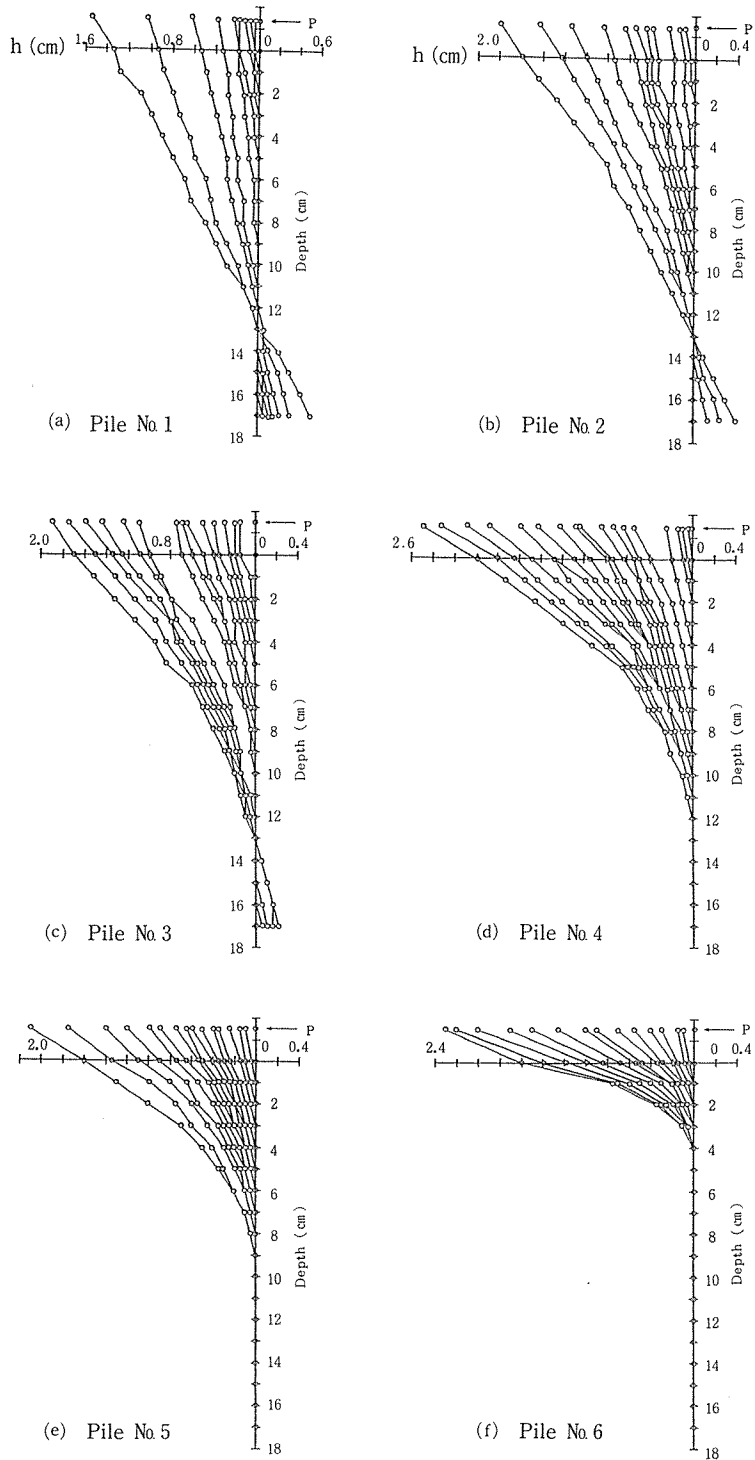


Fig. 2 Deflection behaviour of pile axes under horizontal loads in clay ($C_u=8.6\text{kPa}$)

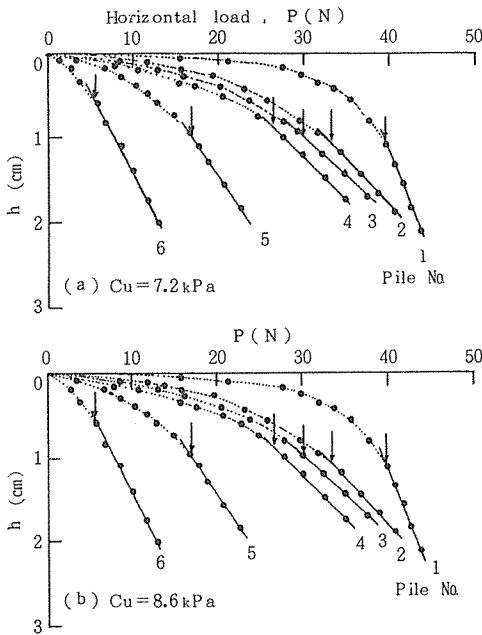


Fig. 3 Horizontal load~horizontal displacement curves (↓: ultimate horizontal load P_u)

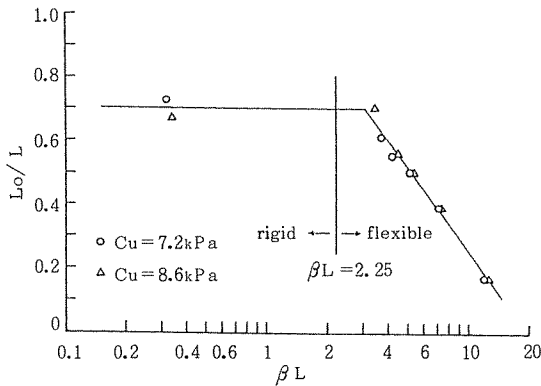


Fig. 4 Relationship between L_o/L and βL .

2. 短杭の極限水平支持力について

Broms¹⁾は水平荷重下の短杭の極限支持力を杭周面に沿う地盤が完全に破壊状態にあると仮定した極限地盤反力法により求めた。これによると短杭の極限水平支持力 $P_{u, rigid}$ は次式で与えられる。

$$\frac{P_{u, rigid}}{C_u D^2} = 9 \left(\frac{L+2e}{D} + 1.5 \right) \left[\sqrt{1 + \left\{ \frac{(L/D - 1.5)}{(L/D + 1.5)} \right\}^2} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし e は地表面より載荷点までの距離である。

Fig.5は本実験により得られた短杭の極限水平支持力 $P_{u, rigid}$ と Broms 式 (2 式) による計算値とを対比したものである。図には有明粘土に対する円形剛杭の水平載荷試験により得られた結

が大きい程、極限荷重がかなり明瞭に読み取れることがわかる。曲げこわさが小さくなると極限荷重は求め難くなるが、荷重~変位曲線の曲率最大の点を過ぎた領域の直線部と曲線部との交点を極限荷重 P_u とみなした (↓印で示した)。

考察及び結論

1. 塑性ヒンジについて

Vesic²⁾は無次元長さ βL が $\beta L < 2.25$ のとき杭は短杭とみなされ、 $\beta L > 2.25$ のときは長杭とみなされることを示した。ここで $\beta = \sqrt{kD/4EI}$ である。この式において EI は杭断面の曲げこわさ、 k は地盤反力係数、 D は杭幅である。現在のところ k の値のとり方には諸説あるが、粘土地盤の場合一般に次式のように表わされよう。

$$k = a' c_u / D = \alpha c_u \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし a' は無次元数で $\alpha = a'/D$ である。いま $\alpha = 1$ としたときの βL に対する塑性ヒンジの地表面からの位置 L_o (Fig. 1) の変化を示したものが Fig.4 である。図によれば L_o/L は $\beta L \leq 3$ では $L_o/L = 0.7$ とほぼ一定値をとり、 $\beta L > 3$ では βL の増加とともに急激に減少することがわかる。また図より Vesic の無次元杭長 $\beta L = 2.25$ は杭を短杭と長杭とに区別する指標となり得ることがわかる。

果もあわせて示している。図によれば両者は非常に良く一致しているのがわかる。従って粘土地盤における短杭の極限水平支持力は(2)式により推定できることが明らかである。

3. 長杭の極限水平支持力について

Broms¹⁾はさらに長杭の水平荷重下の極限支持力を、地盤上部を塑性域、下部を弾性域とし地盤反力法を用いるいわゆる複合地盤反力法により求めている。これによると長杭の極限水平支持力 P_u は次式で与えられる。

$$\frac{P_u}{C_u D^2} = 9 \left(\frac{e}{D} + 1.5 \right) \left[\sqrt{1 + \frac{1}{4.5 \left(\frac{e}{D} + 1.5 \right)^2} \cdot \frac{M_{max}}{C_u D^3}} - 1 \right] \dots\dots\dots(3)$$

ただし M_{max} は最大曲げモーメントである。

(3)式を用いて長杭の極限水平支持力 P_u を算

定するには M_{max} の値を知る必要がある。本実験のように水平載荷時の杭の変形状況が観察されて極限支持力状態における塑性ヒンジが測定できる場合には M_{max} は次式で求められる¹⁾。

$$M_{max} = \frac{P_u}{2} (2e + 1.5D + L) \dots\dots\dots(4)$$

しかし実際の場合には塑性ヒンジの位置は不明であり、通常は杭断面の降伏モーメント M_{yield} が用いられている。 M_{yield} は杭の断面1次モーメントと降伏応力との積で与えられ、 M_{max} よりも大きい。

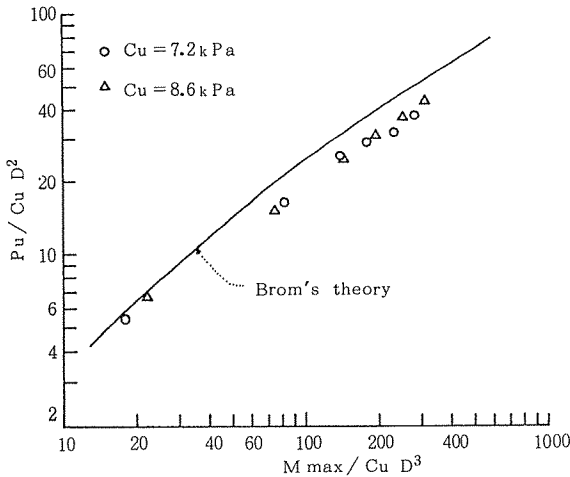


Fig. 6 Comparison of experimental and theoretical values of ultimate horizontal loads P_u for flexible piles.

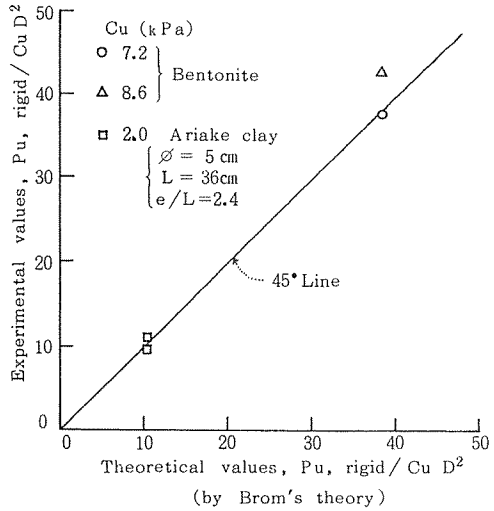


Fig. 5 Comparison of experimental and theoretical values of ultimate horizontal loads P_u , rigid for rigid piles.

Fig.6 は本実験により得られた長杭の極限水平支持力 P_u と Broms 式による計算値 (3, 4 式による) とを対比したものである。図によれば両者はかなり良く一致しているのがわかる。実際の場合には M_{max} の代りに M_{yield} を用いることになるので、(3)式による長杭の P_u の推定は過大となることがうかがわれる ($M_{yield} > M_{max}$ であるから)。

いま短杭の極限水平支持力 $P_{u, rigid}$ に対する長杭の極限水平支持力 P_u の比を βL に対して示したものが Fig.7 である。図によれば両者の比は $\beta L < 2.8$ では 1.0 であり、 $\beta L > 2.8$ では片対数紙上で βL の増加に対してほぼ直線的に減少することがわかる。いま $\beta L > 2.8$ において、 $P_u / P_{u, rigid} \sim \log \beta L$ の間に直線式を仮定す

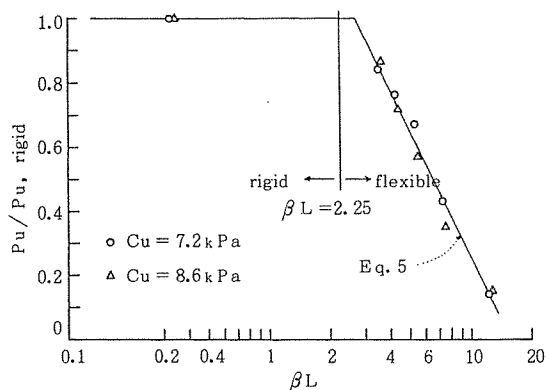


Fig. 7 Relationship between $P_u/P_{u, rigid}$ and βL .

ると次式が得られる.

$$\frac{P_u}{P_{u, rigid}} = 1.58(1.0 - 0.85 \log \beta L) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$(N_s = 10, r_c = -0.99)$$

ただし N_s はデータ数, r_c は相関係数である. $P_{u, rigid}$ が(2)式によりかなり精度良く算定されたことを考えると, βL の値が既知の長杭の極限水平支持力 P_u は(5)式により簡単に求められることがわかる. β を算定する際の k は(1)式において $\alpha = 1$ とおいたものを使用すれば良いであろう.

摘 要

本論文は粘土地盤における水平荷重下の杭の支持力特性を実験的に明らかにしたものである. 種々のたわみ剛性を有する二次元モデル杭を用いて水平載荷試験を行い, 杭上部自由端における水平荷重～水平変位関係を求めるとともに, 水平荷重下における杭軸のたわみ挙動を観察した.

実験によれば, 極限水支持力はたわみ剛性が小さくなるにつれて減少する結果が得られた. また極限水平支持力の実験値は Broms の理論値と良く一致していた. さらに Vesic の無次元長さ βL が 2 又は 3 より小さいときは杭は剛杭 (短杭) とみなされ, βL が 2 又は 3 より大きいときはたわみ性杭 (長杭) とみなされることがわかった.

長杭の極限水平支持力 P_u と短杭の極限水平支持力 $P_{u, rigid}$ との比は βL のみの関数として次式で表わされた.

$$\frac{P_u}{P_{u, rigid}} = 1.58(1.0 - 0.85 \log \beta L)$$

謝 辞

本実験は本学専攻生 (現株式会社テツビル) の坪根忠弘君の手伝いを受けて行われたことを付記して謝意を表する.

文 献

- 1) Broms, B.B. (1964). Lateral resistance of Piles in cohesive soils. Proc. ASCE. vol. 90, No. SM3, 27-63.
- 2) Vesic, A.B. (1961). Bending of beams resting on isotropic elastic solid. Proc. ASCE. vol. 87, No. EM2, 35-53.