

水平荷重を受ける均一地盤中たわみ性杭の 変形挙動について

甲本達也・V. V. R. N. SASTRY・J. E. R. SUMAMPOUW・F. J. MANOPPO

(生産環境工学講座)

平成6年6月14日 受理

Deflection Behavior of Flexible Piles in Homogeneous Soils Subjected to Horizontal Loads

Tatsuya KOUMOTO・V. V. R. N. SASTRY・J. E. R. SUMAMPOUW・F. J. MANOPPO

(Laboratory of Construction Engineering)

Received June 14, 1994

Summary

In order to design the reinforcement of flexible piles subjected to horizontal loads, the place where the bending moment is maximum in the pile shaft must be known.

In this paper, the behavior of single free head flexible two dimensional piles buried in homogeneous soils and subjected to horizontal loads is investigated.

The elastic differential equation for the infinitely deep flexible pile subjected to a horizontal load at its free head is expressed by

$E_p I_p (d^4 y_1 / dx^4) = 0$ above the ground surface, and by

$E_p I_p (d^4 y_2 / dx^4) = p = -E_s \cdot y_2$ below the ground surface in which E_p and E_s are the moduli of elasticity of the pile and the soil, respectively, I_p is the moment of inertia of the pile section, y_1 and y_2 are horizontal deflections above the ground and below the ground, respectively, and p is the passive pressure (Chang).

Solving these equations, the distance L_m between the ground and the place where the bending moment is maximum is expressed by,

$L_m = (1/\beta) \tan^{-1} \{1/(1+2\beta e)\}$, in which e is the distance of the loading point above the ground surface and

$\beta = (E_s/4E_p I_p)^{1/4}$.

By introducing the relative stiffness factor K_r where $K_r = E_p I_p / E_s L^4$ in which L is the embedment depth of the pile, the above L_m is non dimensionally obtained by,

$L_m/L = 1.414 K_r^{1/4} \tan^{-1} [1/\{1+1.414(e/L)K_r^{-1/4}\}]$,

In the case of a rigid pile, the values of L_m/L are 0.414 for clay and 0.498 for sand.

Theoretical values of the ratio L_m/L are compared with observations made from model instrumented flexible pile tests in homogeneous clay and sand, and good agreement is found.

Key words: bending moment, clay, elastic theory, flexible pile, homogeneous soil, horizontal load, model test, reinforcement, sand.

1. はじめに

構造物基礎の杭には鉛直からだけでなく、地震、風、波浪、水位差、土圧等により水平方向からの外力を受ける。このような水平荷重は杭に曲げモーメントを生じさせ、たわみ性杭である長杭では、曲げ変形を受ける。したがって、このような杭基礎の設計に際しては、杭が水平荷重に基ずく曲げモーメントにより曲げ変形を受ける領域の補強を考慮しておかなければならない。

本論文は、水平荷重下における均一地盤中たわみ性杭の曲げ変形に対する設計を行う上で必要となる、曲げモーメント特性と曲げモーメントによる変形特性を理論的・実験的に検討したものである。

2. 理 論

Fig. 1 は、自由端に水平荷重 Q を受けるたわみ性杭のたわみ変形と曲げモーメント分布の模式図である。

Chang¹⁾によると、杭のたわみ曲線の弾性方程式は Fig. 1 を参照して次式で与えられる。

$$E_p I_p (d^4 y_1 / dx^4) = 0 \quad \text{地上部において} \dots (1)$$

$$E_p I_p (d^4 y_2 / dx^4) = p = -E_s \cdot y_2 \quad \text{地中部において} \dots (2)$$

ただし、 E_p および E_s はそれぞれ杭および土の弾性係数、 I_p は杭の断面 2 次モーメント、 y_1 および y_2 はそれぞれ地上部および地中部における杭の水平変位、 p は受動土圧である。

(2) 式に示すように、Chang は地盤の弾性係数 E_s が深さ方向に変化しないものとして弾性曲線式を与えている。一般に、この条件を満たすのは粘土地盤であり、砂地盤では、特にゆるい砂地盤の場合は、 E_s は深さとともにほぼ直線的に増大することが知られている。本論文では、砂地盤の場合も、 E_s が深さ方向に一定な等価な E_{es} に等しいと考えて (2) 式を用いることとした。

(1) 式および (2) 式を変形して、

$$d^4 y_1 / dx^4 = 0 \quad \text{地上部において} \dots (3)$$

$$d^4 y_2 / dx^4 + 4\beta^4 y_2 = 0 \quad \text{地中部において} \dots (4)$$

ただし、 $\beta = (E_s / 4E_p I_p)^{1/4}$ である。

いま、地表面から载荷点までの距離を e とし、(3) 式および (4) 式を解くと杭のたわみ曲線式が次式で与えられる。

$$y_1 = (Q / 6E_p I_p \beta^3) \{ \beta^3 x^3 + 3\beta^3 e x^2 - 3\beta(1 + 2\beta e)x + 3(1 + \beta e) \} \quad \text{地上部において} \dots (5)$$

$$y_2 = (Q / 2E_p I_p \beta^3) \exp(-\beta X) \{ (1 + \beta e) \cos \beta X - \beta e \cdot \sin \beta X \} \quad \text{地中部において} \dots (6)$$

(5)、(6) 式より、杭頭の変位 y_0 、地表面における杭の変位 y_g および曲げモーメント最大の点の地表面からの距離 L_m (Fig. 1 参照) はそれぞれ次式で与えられる。

$$y_0 = Q \{ (1 + 2\beta e)^2 + 0.5 \} / 3E_p I_p \beta^3 \dots (7)$$

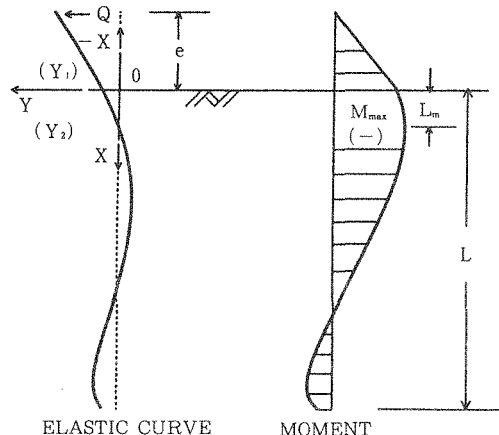


Fig. 1 Flexible Pile Under Lateral Load.

$$y_g = Q(1 + \beta e) / 2E_p I_p \beta^3 \dots\dots (8)$$

$$L_m = (1/\beta) \tan^{-1} \{1/(1+2\beta e)\} \dots\dots (9)$$

ここで、(9)式の両辺を杭の根入れ長 L で除して、杭の相対剛性を表す係数 K_r 、すなわち、 $K_r = E_p I_p / E_s L^4 \dots\dots (10)$

を導入すると次式が得られる。

$$L_m/L = 1.414 K_r^{1/4} \tan^{-1} \{1/(1+1.41(e/L)K_r^{-1/4})\} \dots\dots (11)$$

一方、杭が剛体の場合、水平荷重下の杭側面における地盤反力分布を均一と仮定すると、 L_m/L は次式で与えられる。

$$L_m/L = 0.414 \quad \text{粘土地盤の場合} \dots\dots (12)$$

$$L_m/L = 0.498 \quad \text{砂地盤の場合} \dots\dots (13)$$

3. 実験および結果

実験には、Table 1 に示すような6種類の厚みの異なるアクリル製の二次元杭の表面にひずみゲージを張り付けたものを用いた。供試土として有明粘土（液性限界 $w_L = 120.0\%$ 、塑性限界 $w_P = 48.5\%$ 、塑性指数 $I_P = 71.5$ ）の含水比を $w = 140\%$ （非排水せん断強さ $C_u = 0.0061 \text{ kgf/cm}^2$ ）に調整したもの、および標準砂（土粒子密度 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max} = 0.96$ 、最小間隙比 $e_{\min} = 0.61$ 、均等係数 $U_c = 1.31$ ）の密度を $\gamma_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ （相対密度 $D_r = 0.3$ 、 $\phi = 31^\circ$ ）に調整したものを使用した。これらの供試土を Fig. 2 に示す両面ガラス張りの二次元土槽（高さ50cm、幅90cm、奥行き10.5cm）に充填して実験を行った。载荷は、 $e = 3 \text{ cm}$ の点に Q がかか

Table 1 Pile Data

Pile No.	Material E_p (kg/cm ²)	Emdement Depth L (cm)	Width B (cm)	Thickness T (cm)	Loading Point e (cm)	Flexural Rigidity $E_p I_p$ (kgcm ²)	K_r	
							Clay	Sand
1	Acrylic 3.4×10^4	41.0	10.45	1.45	3.0	89,700	0.17335	0.0161
2				0.95		21,500	0.04150	0.0039
3				0.75		13,900	0.02685	0.0025
4				0.50		3,680	0.00710	0.00066
5				0.30		795	0.00153	0.00014
6				0.15		99	0.00019	0.000018

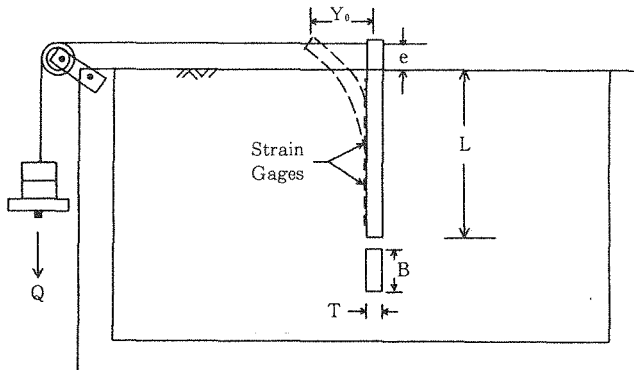


Fig. 2 Test Setup

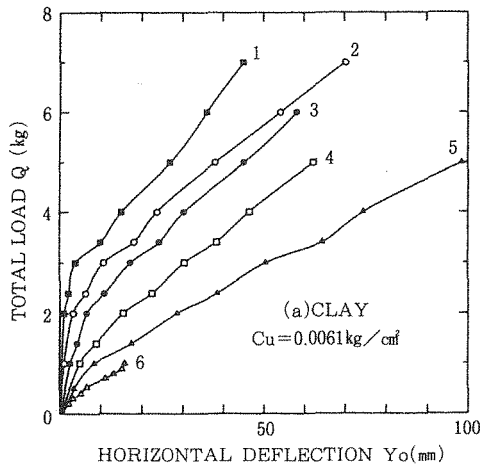


Fig. 3A Load Deflection Curves.

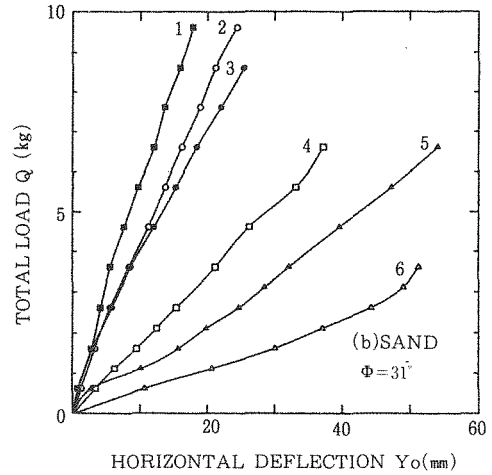


Fig. 3B Load Deflection Curves.

るようにセットし、定荷重載荷方式（各載荷時間3分間）で行った。

各荷重時における、 y_0 と杭軸のひずみ分布を測定し、データロガーにより記録し、ひずみ分布図を曲げモーメント分布図へと変換した。実験により得られた、載荷点における $Q \sim y_0$ 曲線をFig. 3AおよびBに、極限支持力時における曲げモーメント分布図をFig. 4AおよびBにそれぞれ示した。

4. 考察および結論

(1) 曲げモーメント特性：Fig. 4AおよびBによれば、一般に極限支持力時における曲げモーメントは杭の剛性が大きいほど大きく、また、曲げモーメントが最大になる点の位置は杭の剛性が小さくなるにつれて地盤表面に近づいていくことが分かる。

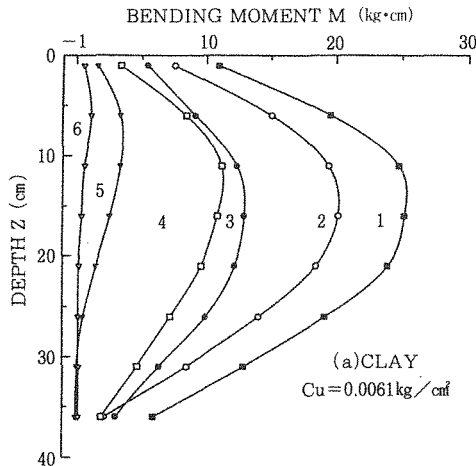


Fig. 4A Variation of Bending Moment With Depth.

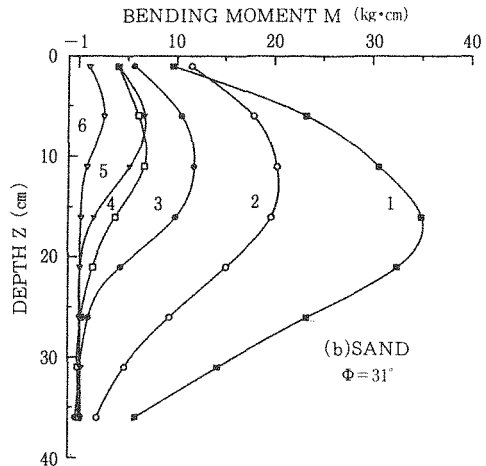


Fig. 4B Variation of Bending Moment With Depth.

(2) L_m/L と K_r との関係：(10)式に示すように、 K_r の計算には E_s の値が必要である。粘性土の場合、Poulos²⁾は、既存の多くの実大杭についての荷重-変位関係から、 E_s と C_u との間には、次式

$$E_s = (15 \sim 95) C_u \dots (14)$$

の関係があり、平均的に、 $E_s = 40C_u$ となることを見出している。(14)式において、軟らかい粘性土の場合は低い方の値を、硬い粘土の場合は高い方の値を使用すればよい。本実験の場合、粘土は比較的軟らかいので、次式

$$E_s = 30C_u \dots (15)$$

による、 $E_s = 30 \times 0.0061 = 0.183 \text{ kg/cm}^2$ を用いた。

また、砂では、剛性杭の水平荷重-水平変位関係から杭底部において逆算して得られた E_s の値から、次式

$$E_{Es} = E_s / 2 \dots (16)$$

による $E_{Es} = 1.98 \text{ kgf/cm}^2$ を用いた。

Fig. 5 は Fig. 4A および B より読み取った L_m/L の値を K_r に対して示したものである。Fig. 5 には、また、たわみ性領域においては、(11)式よりの計算値 (ただし、 $e/L = 0.073$) を、剛性域においては、(12)式および(13)式よりの計算値を実線で示している。これによると、計算値と実験値との相関は大変良い。

したがって、水平荷重を受けるたわみ性杭の曲げモーメント最大の位置 L_m/L は、粘土や砂を問わず(11)式によりかなり精度よく推定出来るといえる。

5. 摘 要

水平荷重を受けるたわみ性杭の補強を考えた設計のためには、杭シャフト上のどの位置で曲げモーメントが最大となるかが知らなければならない。

本論文は、均一地盤中に埋設した杭頭部が自由端であるたわみ性二次元単杭の水平荷重下における挙動について研究したものである。

たわみ性の長杭がその自由端において水平荷重を受けた時の弾性微分方程式は次式で表される。(Chang)

$$E_p I_p (d^4 y_1 / dx^4) = 0 \quad \text{地上部において}$$

$$E_p I_p (d^4 y_2 / dx^4) = p = -E_s \cdot y_2 \quad \text{地中部において}$$

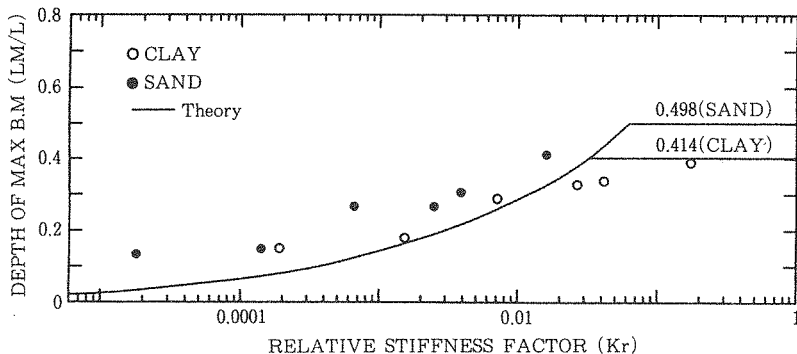


Fig. 5 Relation Between L_m/L and K_r .

ただし, E_p および E_s はそれぞれ杭および地盤の弾性係数, I_p は杭の断面二次モーメント, y_1 および y_2 はそれぞれ地上部および地中部における杭の水平変位, p は受動土圧である。

これらの方程式を解くと, 曲げモーメントが最大となる位置の地表面からの距離 L_m は次式で表される。

$$L_m = (1/\beta) \tan^{-1} \{1/(1+2\beta e)\}$$

ただし, e は地表面から載荷点までの距離, β は次式で与えられる。

$$\beta = (E_s/4E_p I_p)^{1/4}$$

杭の相対剛性係数 K_r を導入すると, 無次元化した L_m は次式で与えられる。

$$L_m/L = 1.414 K_r^{1/4} \tan^{-1} [1/\{1 + 1.414(e/L) K_r^{-1/4}\}]$$

ただし, L は杭の根入れ長, K_r は次式で与えられる。

$$K_r = E_p I_p / E_s L^4$$

剛性杭の場合は, L_m/L の値は, 粘土に対しては0.414, 砂に対しては0.498となる。

L_m/L の計算値と均一な粘土地盤および砂地盤において杭表面にセンサーを取り付けたたわみ性モデル杭についての実測値と対比したところ良い一致が見られた。

引用文献

1. Chang, Y. L. (1937). Discussion on the paper "Lateral Pile-Loading Tests" by L. B. Feagin, Trans. ASCE, Vol. 102, pp. 272-278.
2. Poulos, H. G. (1971). Behaviour of Later-ally Loaded Piles: I - Single Piles, J. S. S. M. F. D., ASCE, Vol. 97, no. SM 5, pp. 711-731.