

粘性土中侧向受载桩的模型试验研究

章连洋 陈竹昌

(同济大学地下工程系, 上海)

提 要

本文简单介绍了模型桩制作和粘性土固结的方法, 通过初始静载试验、循环荷载试验和循环荷载后再加载试验, 分别探讨了荷载大小、频率、循环次数和荷载历史等因素的影响, 并根据试验结果作出了沿桩身不同深度的 $p-y$ 曲线, 最后探讨了粘性土侧向基床系数模式和影响因素。

一、前 言

桩在侧向荷载作用下的变形特性长期以来一直受到工程界的广泛重视, 并进行了大量的试验研究工作。其中有不少通过模型试验进行研究, 如久保^[1]在砂槽中进行了模型试验, 观察垂直桩的变形特性, 提出了土反力和桩变位关系的表达式; 塞格拉梅尔(Saglamer)和帕利(Parry)^[2]采用铝合金管做的模型桩在砂土中进行了不同密度和荷载形式的荷载试验, 试验目的是用射线摄影观察砂中承受静的和循环的侧向荷载的小模型桩的变位, 并从这些值推断初期和循环加载期间砂土地基侧向基床系数的变化; 阿伦(Allen)和里斯(Reese)^[3]为探讨成层土中 $p-y$ 曲线的性状, 采用由内外铝合金管制成的模型桩在成层粘性土中进行了模型试验。但是, 由于侧向加荷设备条件的限制, 国内尚未开展双向循环荷载下侧向受荷桩的现场和室内试验研究。为此, 笔者在室内粘性土中进行了循环荷载试验和循环荷载后再加载试验, 以探讨荷载大小、频率、循环次数和加载历史等因素的影响, 并与初始静载试验作比较。本课题研究得到国家自然科学基金的资助。

二、模型桩和试验用土

选择一种理想合适的模型材料是整个试验的关键, 本次试验采用了铝合金管作为模型材料, 其外径为25.0mm, 壁厚1.5mm。

桩的两侧贴电阻应变片组成半桥, 测点布置见图1, 应变片的导线从桩管内穿出, 应变片的防潮保护采取以下措施: 用204胶水粘贴应变片和接线片, 烘干后焊接导线, 然后把703胶涂在应变片、接线片和接点表层, 最后把涂有环氧树脂的绸布条紧紧包裹在桩表面, 经过一段时间固化后, 它既能起到隔水防潮作用, 又能保护应变片不受土的摩擦而损坏。模型桩土面以上部分刚度较大, 可以认为桩顶转角和泥面转角相同, 这样桩顶位移和泥面位移有以

下关系

$$y_0 = y_t - \theta_0 h \quad (1)$$

式中 y_0 , y_t 分别为泥面位移和桩顶位移; θ_0 为泥面转角; h 为泥面至桩顶距离。

制成的模型桩长110.0cm, 外径26.5mm, 利用简支梁标定求得的抗弯刚度为 $0.386 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 应变片灵敏系数采用悬臂梁法进行标定。

本次试验采用上海地区的轻亚粘土, 土体首次采用气袋加压固结法, 见图2。这种方法具有操作简便、稳定性好等优点。固结完毕后测得的各项土性指标为: 容重 $\gamma = 17.89 \text{ kN/m}^3$, 含水量 $w = 34.85\%$, 液限 $w_L = 36.5\%$, 塑限 $w_P = 23.28\%$, 塑性指数 $I_P = 13.22$, UU 试验 $c = 19.6 \text{ kPa}$, $\phi = 8.8^\circ$, $e_{g0} = 0.02$ 。

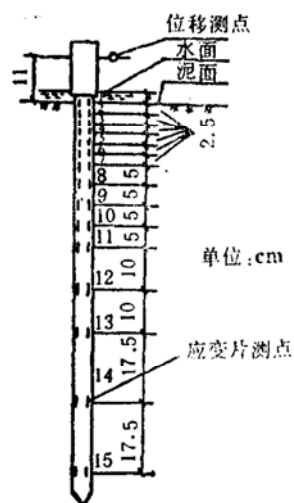


图1 模型桩测点布置图

三、试验仪器设备

试验在室内模型槽中进行, 模型槽为一内径1.6m, 高1.4m的圆桶, 由高强度钢制成。土固结好后, 采用压桩设备将模型桩压入土中, 见图3。

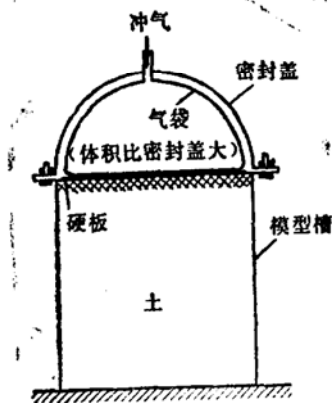


图2 气袋加压固结法示意图

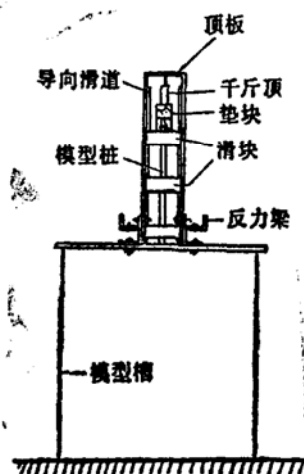


图3 压桩设备示意图

图4为加载与量测系统示意图, CKC动三轴试验加荷装置可以调节荷载的幅值、方向和频率; HEL型电感位移计量测桩顶位移; 差动式电阻位移计量测桩顶转角; X-Y 函数记录仪将桩顶位移和转角随力的变化关系按需要的比例绘出图形; 动态应变仪和光线示波仪一起测量桩身应变, 通过换算即得到桩身弯矩。

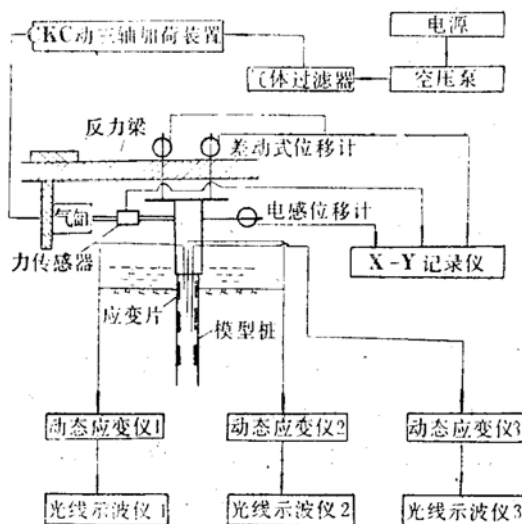


图4 加载与测量系统示意图

四、试验结果及分析

(一) 静载试验

在进行循环荷载试验之前,进行了静载试验,图5, 6为桩的侧向位移、弯矩与侧向荷载的关系图,可以看出,粘性土地基的非线性特性是明显的。

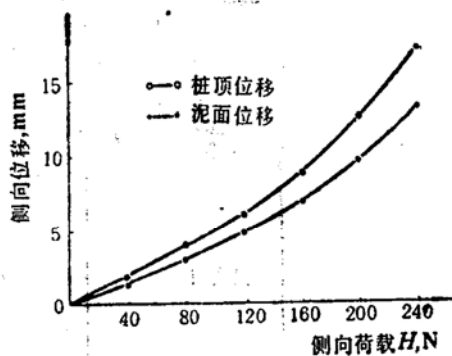


图5 侧向荷载-侧向位移图

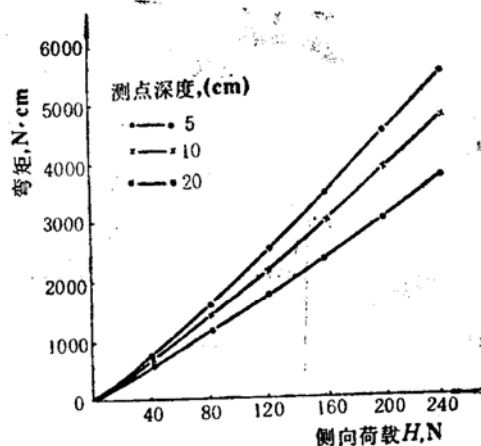


图6 侧向荷载-弯矩图

图7(a)为桩身弯矩分布曲线,最大弯矩点和弯矩零点的位置随荷载的增加向下移动。

(二) 循环荷载试验

循环荷载试验首先考虑荷载频率的影响,图8为荷载幅值为9.81N,不同频率下桩顶位移随循环次数的变化关系曲线。可以看出,在不同荷载频率时,桩顶位移随循环次数的变化趋势相同,即随循环次数增加而增大,到一定值后趋于缓慢平稳。荷载频率越小,达到平稳所需循环次数越多;在相同循环次数时,随着频率由小到大增加,桩顶位移减小,且开始阶

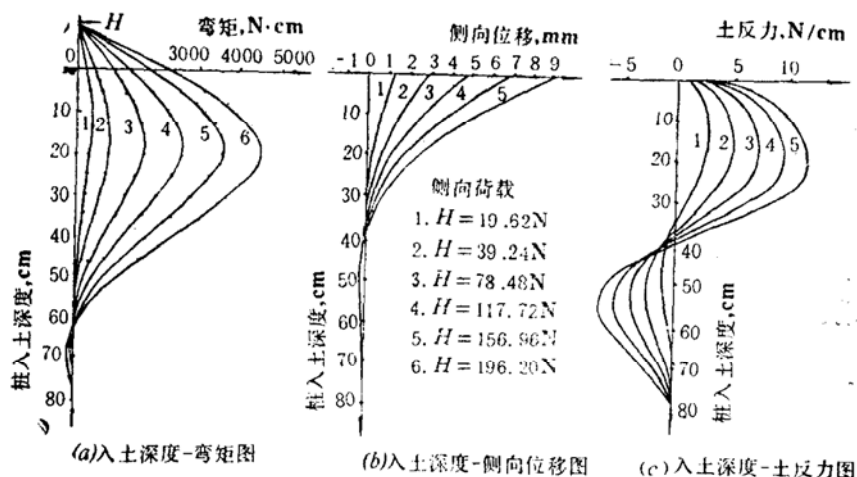
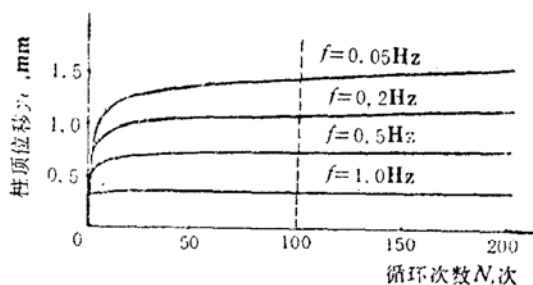
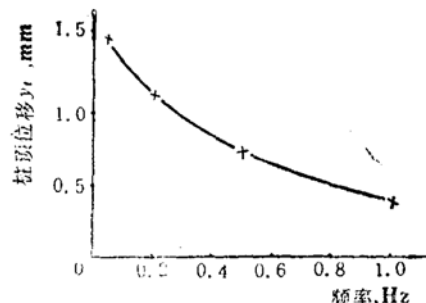
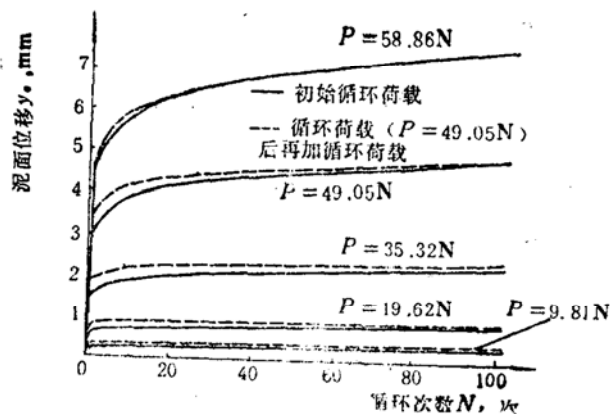


图7 入土深度与弯矩、侧向位移、土反力关系图

图8 不同荷载频率下 y_t - N 图图9 $N = 100$ 次时 y_t - f 图图10 循环荷载作用下 y_0 - N 图

段变化急剧, 随频率增加, 变化趋于平缓, 如图9。

为探讨循环次数的影响, 在荷载频率为 0.1Hz , 不同荷载水平进行了循环荷载试验, 图10中实线为不同荷载水平下泥面位移与循环次数的关系曲线, 可以看出, 在不同荷载水平下, 位移随循环次数增加而增大, 到一定值后趋于缓慢平稳, 荷载幅值越大, 达到平缓所需循环次数越多。从本次试验来看, 一般达到平缓所需循环次数不超过100次, 因此, 可以认为循环次数的影响主要体现在前100次。对试验结果进行数学拟合, 泥面位移随循环次数的

变化关系可用下式表示:

$$y_N = y_1 N^T \quad (2)$$

式中 y_N , y_1 为第 N 次和第 1 次循环时的泥面位移; T 为变化参数, 随循环荷载幅值增加而增大, 图 11 为参数 T 随标准位移 y_1/D 的变化关系。

图 12 为不同循环次数下的桩身弯矩分布曲线, 可以看出, 随循环次数的增加, 桩身弯矩增加, 且桩身下部增加很多, 上部增加较少, 在土面附近几乎不增加。最大弯矩点和弯矩零点位置向下移动。荷载幅值越大, 循环次数的影响越大。

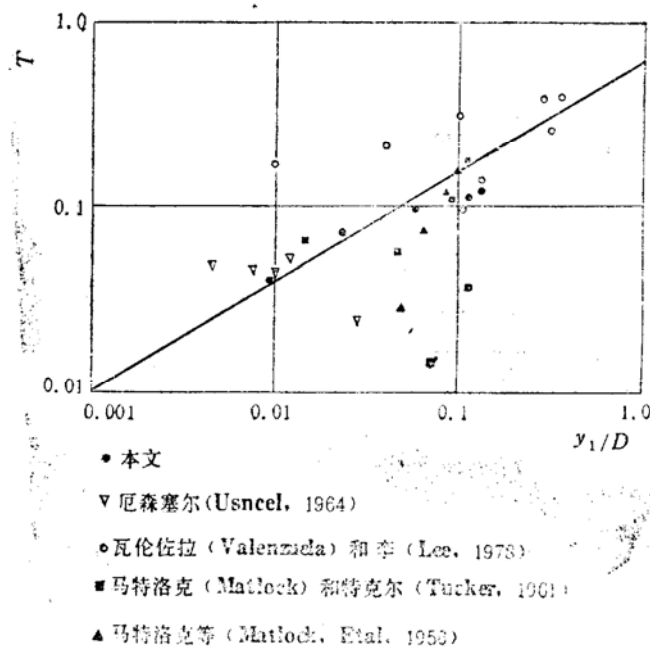


图 11 参数 T -标准位移关系图

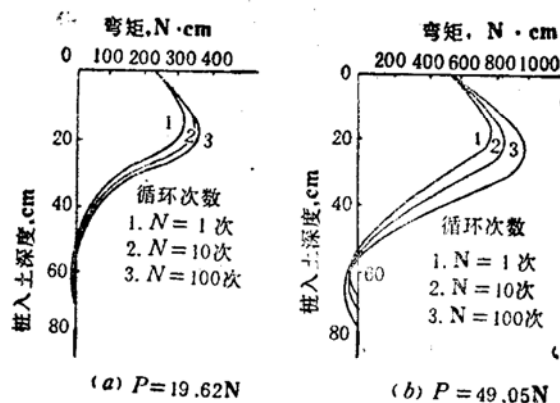


图 12 不同循环次数时的桩身弯矩分布曲线

图 13 为桩-土-水相互作用示意图, 上部区域在开始几次循环形成间隙, 间隙中充满水。随着循环次数的增加, 上部区域被挤出和推向前后的土形成泥浆, 填入所形成的间隙, 且泥浆面比加载前土面约低 0.5 倍桩径, 这可能是由于桩前后的土被挤密的缘故。海上桩基前后的土形成泥浆将更容易引起剥蚀, 因此, 在设计海上桩基时必须充分注意。

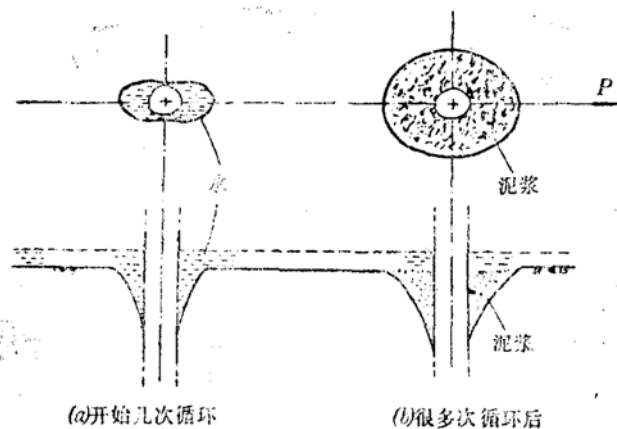
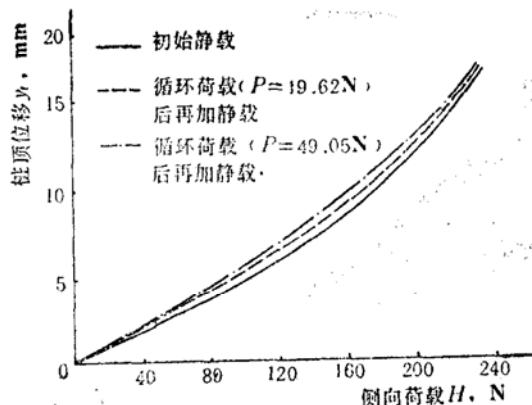


图13 桩-土-水相互作用示意图

(三)再加载试验

图14为进行循环荷载试验后休止一天再进行静载试验的桩顶位移与荷载关系曲线,图中也给出了初始静载试验结果。可以看出,再加静载时桩顶位移明显偏大。但由于循环荷载幅值较小,在大静载时差别不是很大。由此可以推测,如果循环荷载幅值增大,在大静载时影响也会很大。

图10中虚线为进行循环荷载试验后休止一天再进行循环荷载试验的结果。和初始循环荷载试验结果相比可以看出,当荷载幅值比曾经所受的最大循环荷载幅值小时,在同样循环荷载下,位移明显增大,且很快达到稳定。当荷载幅值比曾经所受的最大循环荷载幅值大时,影响很小,但还是很快达到稳定。

图14 循环荷载后再加静载 $y-H$ 图

五、由试验结果求 $p-y$ 曲线

由泥面反应和桩身弯矩测量结果求 $p-y$ 曲线大致有以下三种方法:

1. 直接积分和微分法

$$y = \int \int \frac{M}{EI} dx^2 \quad (3)$$

$$p = \frac{d^2 M}{dx^2} \quad (4)$$

这种方法求解微分方程不仅遇到数学上的困难,而且所得结果精度较差,本文没有采用。

2. 曲线拟合法

采用不同的曲线形式如指数曲线、多项式曲线和样条函数拟合逼近实测弯矩,然后结合

泥面反应实测结果对拟合函数进行微分和积分,即可求得土反力和桩身位移。笔者从大量计算结果^[4]发现,在多数情况下,这种方法结果比较离散,误差较大,不宜采用。

3. 侧向基床系数法

假定不同的侧向基床系数形式,将桩离散为若干单元,用有限元法或有限差分法进行计算,直到计算结果与试验结果相符,同时可求得土反力和桩身位移,本文采用有限元法进行计算,结果表明这种方法令人满意,简单介绍如下:

作用在桩单位长度上的土反力 p 可按式计算

$$p = k_s D y^\beta \quad (5)$$

式中 k_s 为侧向基床系数; β 为表示位移与土反力之间非线性的指数; D 为桩直径。

为计算方便起见,取 $\beta = 1$, 即 p 与 y 之间的非线性体现在 k_s 值上, k_s 值可用下式表示

$$k_s = k_{s0} + m x^\alpha \quad (6)$$

式中 k_{s0} 为土面处的 k_s 值; m 为 k_s 随深度 x 变化的系数,随桩土位移量的变化而变化; α 为表示 k_s 随深度 x 变化形状的指数,随桩土位移量的变化而变化。

采用以上方法,笔者编写了计算机程序,通过不断调整 k_{s0} , m 和 α 值进行有限元计算,即可求得桩身位移和土反力,如图 7(b), (c)。图 15, 16 为沿桩身不同深度的 p - y 曲线。

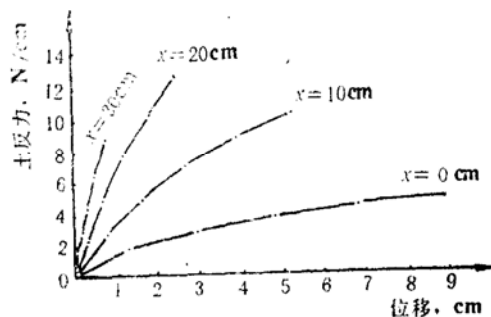


图15 静载作用下 p - y 曲线

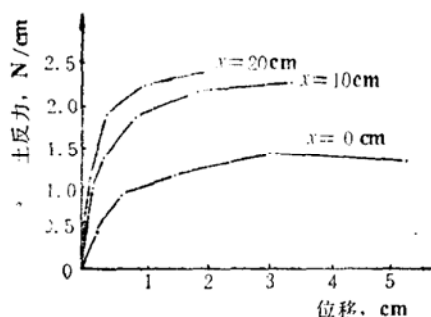


图16 循环荷载作用下 p - y 曲线

六、粘性土侧向基床系数模式和影响因素

(一) 粘性土侧向基床系数模式

关于粘性土侧向基床系数,现有很多计算模式,其中以式(6)最具代表性,我国常用的 m 法、 c 法、 k 法和张氏法都是它的特殊情况。

在上节采用侧向基床系数法求 p - y 曲线的过程中,笔者曾分别采用 m 法、 c 法、 k 法和张氏法进行计算,很难使泥面反应和桩身弯矩与实测结果同时满足。而采用式(6)进行计算,通过调节 k_{s0} , m 和 α 值,可以使泥面反应和桩身弯矩计算结果与实测结果都能较好符合,见表 1, 2。

由此可以看出,在本次试验情况下,通常采用的 m 法、 c 法、 k 法和张氏法是不合适的,而必须选用 $k_s = k_{s0} + m x^\alpha$ 的模式。

(二) 侧向基床系数的影响因素

侧向基床系数的影响因素很多,如桩宽、荷载大小、荷载循环和长期荷载等^[5],本次试

表1 静 载 计 算 结 果

荷 载 (N)	地基模式 $k_s = k_{s0} + mx^a$			最大弯矩(N·cm)		泥面位移(mm)	
	k_{s0}	m	a	实 测 值	计 算 值	实 测 值	计 算 值
9.81	1.160	0.00395	2.050	176.19	180.01	0.30	0.29
19.62	1.080	0.00365	2.100	358.65	352.47	0.58	0.59
29.43	1.011	0.00335	2.130	558.78	551.42	0.94	0.95
39.24	0.952	0.00310	2.160	768.32	779.21	1.30	1.29
49.05	0.880	0.00290	2.185	1019.65	1030.15	1.69	1.70
58.86	0.821	0.00270	2.210	1279.03	1270.59	2.20	2.19
78.48	0.720	0.00235	2.250	1768.94	1746.29	3.02	3.06
117.72	0.574	0.00189	2.310	2553.54	2513.52	4.78	4.72
156.96	0.491	0.00151	2.350	3535.13	3484.61	6.83	6.79
196.20	0.434	0.00132	2.360	4430.20	4346.91	9.30	9.01

表2 循 环 荷 载 计 算 结 果

荷 载 (N)	地基模式 $k_s = k_{s0} + mx^a$			最大弯矩(N·cm)		泥面位移(mm)	
	k_{s0}	m	a	实测值*	计 算 值	实测值*	计 算 值
9.81	1.055	0.00360	2.15	192.96	191.69	0.31	0.30
19.62	0.705	0.00226	2.30	431.74	414.28	0.63	0.63
35.32	0.610	0.00095	2.50	804.81	751.25	1.53	1.49
49.05	0.377	0.0005	2.62	1216.54	1150.91	3.23	3.01
58.86	0.226	0.0004	2.68	1525.16	1434.12	5.22	4.93

* 为循环次数N=100次时的测量值

验主要讨论荷载大小和荷载循环的影响。

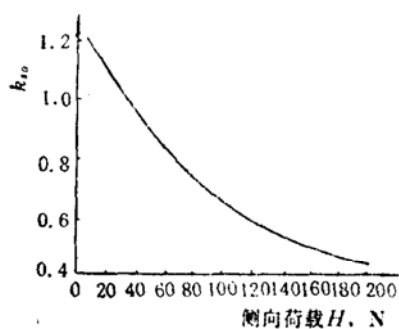
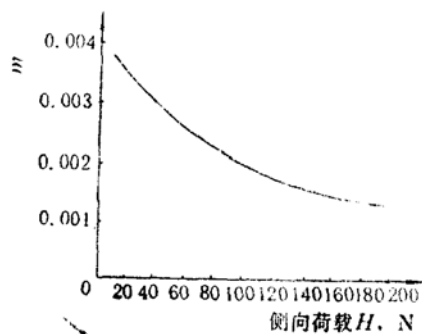
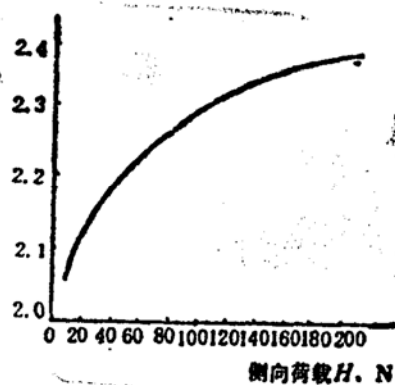
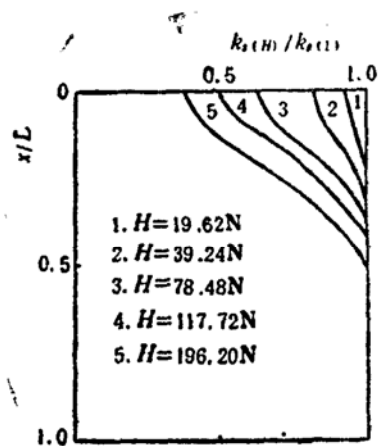
1. 荷载大小的影响

从表1可以看出, k_{s0} 和 m 值随荷载增加而减小, 而 a 值随荷载增加而增大, 如图17, 18, 19。这说明随荷载的增大, 侧向基床系数的降低主要发生在桩身上部, 而在下部几乎不出现降低, 如图20, 图中 L 为桩入土深度。江阴利港电厂钢管桩现场试验也得到相同的结论^[6]。

2. 荷载循环的影响

比较表1, 2中同样大小荷载的 k_{s0} , m 和 a 值, 见表3, 可以看出, 由于荷载循环的影响, k_{s0} 和 m 值减小, 而 a 值增大, 且荷载幅值越大, 影响越大。这说明由于荷载循环的影响, 侧向基床系数的降低主要发生在桩身上部, 而在下部几乎不出现降低, 如图21。

图22为荷载幅值为35.32N, 不同循环次数时侧向基床系数的降低情况, 可以看出, 循环次数的影响主要体现在前100次左右, 这与前面所得的结论是一致的。

图17 k_{s0} 与侧向荷载的关系图18 m 与侧向荷载的关系图19 α 与侧向荷载的关系图20 荷载大小对 k_s 的影响沿深度分布情况表3 荷载循环对 k_{s0} , m 和 α 的影响*

荷载 (N)	k_{s0}	$k_{s0(100)}$	$\frac{k_{s0(100)}}{k_{s0}}$	m	$m(100)$	$\frac{m(100)}{m}$	α	$\alpha(100)$	$\frac{\alpha(100)}{\alpha}$
9.81	1.16	1.055	0.909	0.00395	0.00360	0.911	2.05	2.15	1.049
19.62	1.08	0.905	0.838	0.00365	0.00226	0.619	2.10	2.30	1.095
35.32	0.97	0.610	0.629	0.00320	0.00095	0.297	2.15	2.50	1.163
49.05	0.88	0.377	0.428	0.00290	0.0005	0.172	2.185	2.62	1.199
56.86	0.82	0.226	0.276	0.00270	0.0004	0.148	2.21	2.68	1.213

* 表中 k_{s0} , m 和 α 为初始静载的数值; $k_{s0(100)}$, $m(100)$ 和 $\alpha(100)$ 为循环荷载次数 $N=100$ 次时的数值。

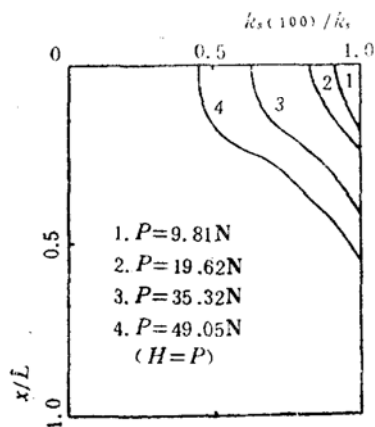


图21 循环荷载水平对 k_s 的影响
沿深度分布情况

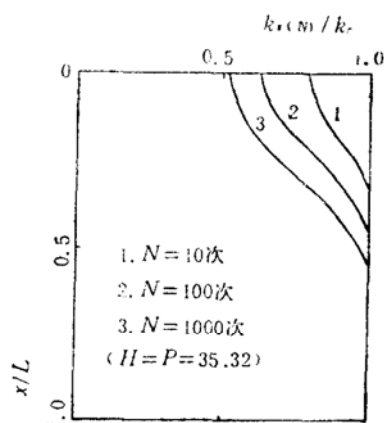


图22 循环次数对 k_s 的影响沿深度
分布情况

七、结 论

1. 本次试验所采用的气袋加压固结法具有操作简便、稳定性好等优点, 是一种较好的方法;

2. 随着循环次数的增加, 位移增大, 且增大的趋势逐渐趋于平缓。荷载幅值越大, 达到平缓所需循环次数越多。循环次数的影响主要体现在前100次;

3. 不同荷载频率时, 位移随循环次数 N 的变化趋势基本相同, 即随 N 增加而增大, 到一定值后趋于平缓, 频率越小, 达到平缓所需循环次数越多; 在相同荷载幅值、相同循环次数时, 频率越小, 位移越大;

4. 当循环荷载后再加循环荷载幅值比曾经所受最大循环荷载幅值小时, 和初始循环荷载试验相比, 位移明显增大, 且更易达到稳定; 而当比曾经所受最大循环荷载幅值大时, 位移增加很小, 但还是更易达到稳定;

5. 由泥面反应和桩身弯矩实测资料求 p - y 曲线采用侧向基床系数法可得到满意的结果, 粘性土侧向基床系数宜采用 $k_s = k_{s0} + mx^\alpha$ 的模式;

6. 无论静载还是循环荷载条件下, k_{s0} 和 m 值随荷载增加而减小, 而 α 值随荷载增加而增大; 与同样大小静荷载相比, 循环荷载下的 k_{s0} 和 m 值减小, 而 α 值增大;

7. 由于荷载增大或荷载循环的影响, 侧向基床系数的降低主要出现在位移较大的桩身上部, 而在桩身下部几乎不出现降低。

参 考 文 献

- [1] K·久保, 侧向受荷桩性质的实验研究, 桩基(水平力)译文, 天津大学水利系桩基规范专题小组, 1978.7。
- [2] Saglamer, A., Parry, R.H.G., 侧向受荷单桩的模拟试验研究, 工业建筑情报, 第3, 4期, 1981。
- [3] Allen, J.D., Reese, L.C., Small Scale Tests for the Determination of p - y Curves in Layered Soils, OTC 3737, 1980。

- [4] 章连洋, 桩基侧向抗力性能的模型试验研究, 同济大学硕士研究生论文, 1987.12。
- [5] 章连洋, 土的水平地基基床系数, 全国海洋开发工程技术论文集(上), 海洋出版社出版, 1987.12。
- [6] 陈竹昌, 江阴利港电厂试桩报告, 同济大学和华东电力设计院, 1987。

Study on the Model Test of Laterally Loaded Piles in Cohesive Soils

Zhang Lianyang, Chen Zhuchang

(Tongji University, Shanghai)

Abstract

In this paper, the methods for making model piles and for consolidation of cohesive soils are introduced. By the model test of short-term static loading, cyclic loading and reloading after cycling, the influences of the magnitude, frequency, number of cycles and history of load on the behavior of pile are analyzed. Based on the data of the model test, $p-y$ curves in different depths of pile are determined. Finally, the mode and influencing factors of lateral subgrade coefficient of cohesive soils are analyzed.