

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.010



双层地基中倾斜偏心荷载下基桩 非线性模型试验研究

李微哲^{1,2}, 娄平¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410012; 2. 中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆 400016)

摘要:引入初始地基比例系数、初始地基系数、水平位移特征值, 导出一种新型双曲线型 $p-y$ 曲线, 并给出了参数经验选取参考值范围。在上层粘土下层砂土地基中进行了 2 组模型桩试验, 含 2 根水平加载的钢桩和 6 根倾斜偏心荷载下的木桩。试验表明, 水平荷载、竖向荷载和偏心弯矩荷载下柔性木质模型桩非线性特征显著。按双曲线型 $p-y$ 曲线计算的模型桩地面处和桩顶水平位移与实测值吻合良好, 验证了双曲线型 $p-y$ 曲线。水平位移特征值增大时, 桩身位移将减小, 桩身最大剪力将增大, 桩身最大弯矩将减小, 桩侧最大土压力将增大。双层地基中, 下层砂土位移特征值变化对试桩受力影响极小, 从简化计算参数和应用角度出发, 实际应用时可将下层砂土水平位移特征值与上层粘土的相同。

关键词: 双层地基; 木质模型桩; 初始地基比例系数; 初始地基系数; 水平位移特征值

中图分类号: TU470 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)01-0068-10

Nonlinear behavior of piles under inclined and eccentric loads in double layered soils by model test

Li Weizhe^{1,2}, Lou Ping²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410000, P. R. China; 2. China Coal Technology & Engineering Group, Chongqing Design & Research Institute Co. Ltd., Chongqing 400016, P. R. China)

Abstract: A new hyperbolic $p-y$ curve was derived to generally simulate the nonlinearity of piles in layered soils, and the new $p-y$ curve was presented containing parameters such as the initial ratio of elastic foundation coefficient, the initial elastic foundation coefficient, characteristic value of lateral displacement for soils, and etc.. Model test of six timber piles and two steel piles in two groups settled in layer soils with upper clay and lower sand were done. The calculated lateral displacements of model piles both at the top and at the ground are consistent with the test values by $p-y$ curve method, and the new hyperbolic $p-y$ curve is verified. While the characteristic value of lateral displacement for layered soils increases, the displacement and the maximum bending moment of the pile decrease, the maximum shear and the maximum soil pressure around the pile increase. The variety of characteristic value of lateral displacement for the lower sand has extremely small effect on mechanical property of the pile, then the characteristic value of lateral displacement for lower soils can be defined as the same as that of the top soil

收稿日期: 2017-05-16

作者简介: 李微哲(1981-), 男, 博士生, 高级工程师, 主要从事桩基础及路基稳定性研究, E-mail: 46414461@qq.com.

Received: 2017-05-16

Author brief: Li Weizhe (1981-), PhD candidate, senior engineer, main research interests: pile foundation and subgrade engineering, E-mail: 46414461@qq.com.

during engineering application.

Keywords: double layered soils; tiber model piles; the initial ratio of elastic foundation coefficient; the initial elastic foundation coefficient; characteristic value of lateral displacement

模拟桩侧土非线性一般采用 p - y 曲线法。学者们对此进行了大量研究,并基于单一土层中的模型桩水平承载力试验提出了很多不同形式的 p - y 曲线。但基于多层地基中的水平荷载、竖向荷载、偏心弯矩荷载下的基桩非线性室内模型试验研究则较少。工程基桩大多位于成层地基中,不仅承受水平荷载,还有竖向荷载和偏心弯矩荷载,因此,基于多层地基中复杂荷载下的模型试验研究基桩非线性特性具有实际意义。

Matlock^[1]、Reese 等^[2]、Stevens 等^[3] 提出粘性土 p - y 曲线,其桩侧土压力与桩身水平位移成幂函数关系;王惠初等^[4]、田平等^[5] 基于钢管桩模型试验提出的河海大学新统一法中桩侧粘土压力与桩身水平位移为双曲线函数关系。王腾等^[6] 基于钢管模型桩试验提出的粉土 p - y 曲线、戚春香等^[7] 提出的弱饱和土 p - y 曲线,其桩侧土压力与水平位移为双曲正切函数关系。王国粹等^[8] 认为砂土 p - y 曲线亦可用双曲线函数模拟。李雨润等^[9] 提出了液化土中 p - y 曲线的修正算法,凌贤长等^[10]、刘红军等^[11-12] 较为全面地介绍了液化土 p - y 曲线研究进展。楼晓明等^[13] 提出了一种根据 p - y 曲线计算地基比例系数的方法,首次将 p - y 曲线与 m 法结合了起来。刘红军等根据玻璃管模型桩试验提出了黄河水下三角洲快速沉积粉土层的 p - y 曲线,桩侧土压力与桩身水平位移为双曲线函数关系。上述模型桩试验提出 p - y 曲线侧重单一类型土非线性研究,且模型桩试验荷载仅限于水平荷载。

用上层粘土、下层砂土模拟成层地基,进行了两组木质模型桩试验,一组模型桩按水平荷载→竖向荷载→偏心弯矩顺序加载,另一组按竖向荷载→水平荷载→偏心弯矩顺序加载,以此模拟桩顶复杂荷载工况,进而研究复杂荷载下基桩非线性特性。根据王惠初等^[14] 提出的粘土 p - y 曲线和王国粹等^[8] 提出的砂土 p - y 曲线,推导了一种新的双曲线型 p - y 曲线,并用于模型桩试验结果分析。

1 双曲线型 p - y 曲线

1.1 粘土 p - y 曲线

根据王惠初等^[4] 提出的粘土 p - y 曲线为

$$\begin{cases} p = \frac{y}{ay_{50} + by} p_u = \frac{y}{\frac{ay_{50}}{b} + y} \cdot \frac{p_u}{b} \\ y_{50} = AD\epsilon_{50} \\ a = \frac{\beta}{(\beta-1)}, b = \frac{(\beta-2)}{(\beta-1)} \\ A = 0.2 + \frac{0.05}{D} \end{cases} \quad (1)$$

式中: y 为水平位移; p 为发生水平位移 y 时的桩侧土压力; p_u 为极限土压力; D 为桩径(在应用于计算系数 A 时,单位为 m); ϵ_{50} 为土三轴试验中最大主应力达到极限主应力一半时的应变值; $\beta=9\sim 11$,软土取小值,硬土取大值。 A 为经验系数,软土和大变位桩取大值,硬土和小变位桩取小值。Matlock 建议取 $0.5\sim 2.5$ 。

根据 API 规范,粘土极限抗力计算为

$$\begin{cases} p_u = 3C_u + \gamma z + J \frac{z}{D} C_u & (z < X_r) \\ p_u = 9C_u & (z \geq X_r) \\ X_r = \frac{6DC_u}{\gamma D + JC_u} \end{cases} \quad (2)$$

式中: J 为与土类别有关的经验系数;其余符号意义同式(1)。

整理式(1)和式(2)可得浅层粘土 p - y 曲线

$$\begin{cases} p = \frac{y_L}{y_L + y} (C_0 + m_0 z) y \\ y_L = \frac{ay_{50}}{b} \\ C_0 = \frac{3C_u}{by_L} \\ m_0 = \frac{\gamma}{by_L} + J \frac{C_u}{Db_{y_L}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: y_L 为粘土水平位移特征值, m_0 为粘土初始地基比例系数, C_0 为初始地基系数。当经验选定了 ϵ_{50} 值后,即可按式(1)和式(3)计算 y_L 、 m_0 、 C_0 。

工程实际土层较多,建议 m_0 、 C_0 值经验选取或根据水平承载力试验确定。则式(3)可写成

$$\begin{cases} p = \frac{y_L}{y_L + y} (C_0 + m_0 z) y \\ C_0 = m_0 \cdot \frac{Jc}{\gamma \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: c 为粘土粘聚力; φ 为内摩擦角; J 为大于 1 的

系数,一般可取1.5~2.0(模型试验中取值为1.8);初始地基比例系数 m_0 可按规范经验取值的2~4倍选取,或根据基桩水平承载力试验,取其1~3级水平荷载位移值反算初始地基比例系数 m_0 值再乘以大于1的经验系数确定,一般取1.1~2.0,非线性特征小取小值,非线性特征大则取大值;确定了初始地基比例系数后则可按式(4)计算确定初始地基系数。

1.2 砂土 p - y 曲线

王国粹等^[8]提出的砂土 p - y 曲线为

$$p = \frac{p_u}{p_u + K_i y} K_i y \quad (5)$$

式中: K_i 为计算点初始地基系数, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; p_u 为计算点桩侧土极限土压力, kPa ; y 为计算点基桩水平位移, m 。

根据《海上固定平台的入级与建造规范》(1992),水面以上桩侧砂土极限土压力(kPa)计算式为

$$\begin{cases} p_u = (C_1 z + C_2 D) \gamma & (\text{浅层砂土, } z < z_r) \\ p_u = C_3 D \gamma & (\text{深层砂土, } z \geq z_r) \\ C_1 = 0.000 2 \varphi^3 - 0.01 \varphi^2 + 0.235 \varphi - 1.55 \\ C_2 = -3.333 3 \times 10^{-5} \varphi^3 - 0.005 571 4 \varphi^2 - 0.103 45 \varphi + 1.660 7 \\ C_3 = 0.000 4 \varphi^4 - 0.033 333 3 \varphi^3 + 1.11 \varphi^2 - 16.166 7 \varphi + 90 \end{cases} \quad (6)$$

式中: φ 为砂土内摩擦角; γ 为砂土容重。

砂土内摩擦角 $\varphi = 20 \sim 45^\circ$ 时, $z_r = 8.6 \sim 29.7D$,即使假定深层砂土的极限土压力随埋深线性增长,其对水平荷载下基桩受力影响也极其有限。地面处桩侧砂土极限土压力不为0,与砂土弱粘聚力实际情况吻合。

有学者认为砂土初始地基系数随埋深线性增加,也有认为与埋深呈非线性关系,本文亦认为砂土初始地基系数与埋深关系如下呈线性关系,且与桩侧极限土压力呈线性关系。

$$\begin{cases} K_i = m_0 z + C_0 = \frac{(C_1 z + C_2 D) \gamma}{y_L} \\ C_0 = \frac{m_0 C_2 D}{C_1} \\ y_L = \frac{\gamma C_1}{m_0} \end{cases} \quad (7)$$

式中: m_0 为砂土初始地基比例系数,可参照现行桩基设计规范选取; C_0 为初始地基系数; y_L 为砂土水平位移特征值。

由式(5)、式(7)和式(8)可得砂土 p - y 曲线的另一种形式

$$p = \frac{y_L}{y_L + y} (m_0 z + C_0) y \quad (8)$$

当经验选定了初始地基比例系数,则可按式(8)计算初始地基系数 C_0 和砂土位移特征值 y_L 。

如忽略砂土弱粘聚力,则式(8)简化为

$$p = \frac{y_L}{y_L + y} m_0 z y \quad (9)$$

式中初始地基比例系数、水平位移特征值可经验选取或根据水平承载力试验确定。

1.3 水平位移特征值的物理意义

式(4)和式(9)中的水平位移特征值 y_L 反映了桩侧土非线性特征,通过双曲线型非线性修正因子 $\frac{y_L}{y_L + y}$ 对初始地基系数和初始地基比例系数进行修正的方式计入桩侧土非线性。

当桩侧土水平位移增大时,非线性修正因子 $\frac{y_L}{y_L + y}$ 减小。当水平荷载很小时,水平位移也很小,地基系数非线性修正因子趋于1,即 $y_L / (y_L + y \rightarrow 0) = 1$,因此,可根据基桩水平承载力试验初始1~2级水平位移反算得的地基系数和地基比例系数,再乘以大于1的修正系数即得初始地基系数或初始地基比例系数。

2 模型桩试验

进行了两组上层粘土下层砂土中的模型桩试验(图1),每组模型试验包含2根水平加载的钢模型桩和3根倾斜荷载下的木制模型桩,模型桩直径、桩长、弹性模量、抗弯刚度等参数均由试验测定,见表1。钢模型桩主要用于确定初始地基系数。

表1 模型桩物理力学参数

Table 1 mechanical and physical parameters of model piles

组号	桩号	桩材	$d/$ mm	$l/$ cm	$h/$ cm	$l_0/$ cm	$I/$ (10^{-8}m^4)	倾角/ ($^\circ$)	$E/$ GPa
03#	杉木	30.73	102.2	66.2	36.0	4.377	0.001 2	8.765	
04#	杉木	32.43	118.4	66.4	52	5.429	0.004 65	7.831	
02#	05#	杉木	31.57	135.0	69.0	66	4.876	0.012 93	8.361
06#	钢材	25.00	97.5	53.8	43.7	1.917		190	
07#	钢材	25.00	97.5	30.0	67.5	1.917		190	
08#	杉木	31.12	120.0	73.0	47.0	4.604	0.05625	11.313	
09#	杉木	32.40	120.0	74.0	46.0	5.409	0.044 16	7.657	
03#	10#	杉木	31.54	120.0	71.3	48.7	4.858	0.050 00	8.296
11#	钢材	25.00	97.5	52.1	45.4	1.917		190	
12#	钢材	25.00	97.5	30.0	67.5	1.917		190	

注: d 为桩径; l 为桩长; h 为埋深; l_0 为地面以上桩长; I 为截面惯性矩; E 为弹性模量。木桩荷载加载点高等于地面以上自由桩长,02组钢桩水平加载点距地面高35.8 cm,03组钢桩水平加载点距地面高38 cm。

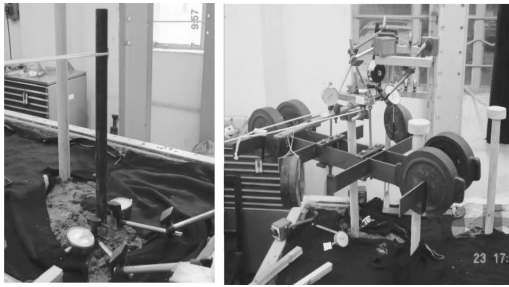


图 1 模型试验照片

Fig. 1 scene photos of model test

试验土分层压实。上覆粘土层厚 30 cm。02 组试验粘土含水量 $w=24.18\%$, 容重 $\gamma=19.05 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 液性指数 $I_L=0.115$, 不排水快剪试验测得 $c=44.91$, $\varphi=9.16^\circ$ 。03 组试验粘土含水量 $w=23.71\%$, 容重 $\gamma=18.81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, $I_L=0.081$, 不排水快剪试验测得 $c=38.35$, $\varphi=10.13^\circ$ 。

下卧中砂层厚 70 cm, 颗粒容重 26.49 kN/m^3 。02 组试验砂土含水量 $w=4.34\%$, $\gamma=14.81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, $\varphi=32.79^\circ$ 。03 组试验砂土含水量 $w=4.03\%$, $\gamma=14.43 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, $\varphi=33.42^\circ$ 。

加载装置由自平衡竖向加载系统、重物悬臂式偏心加载系统、重物滑轮式水平加载系统组成。荷载稳定标准为 0.01 mm/5 min 。02 组模型桩按水平荷载 \rightarrow 竖向荷载 \rightarrow 偏心弯矩顺序加载, 本组 03[#] ~ 05[#] 木质模型桩桩顶分级加载, 其加载顺序和桩顶各级水平荷载、竖向荷载、偏心弯矩数值见表 2。03 组则按竖向荷载 \rightarrow 水平荷载 \rightarrow 偏心弯矩顺序加载。本组 08[#] ~ 10[#] 木质模型桩桩顶分级加载, 其加载顺序和桩顶各级水平荷载、竖向荷载、偏心弯矩数值见表 2。采用不同加载顺序, 可获得基桩以下多种不同的受力工况: 1) 水平受荷桩, 如 03[#] ~ 05[#] 模型桩在未施加竖向力之前的状态; 2) 考虑施工误差下的竖向受荷桩, 如 08[#] ~ 10[#] 模型桩仅施加了竖向力而未施加水平力的状态; 3) 安装了固定支座或其他原因无偏心弯矩荷载的倾斜荷载桩, 如 03[#] ~ 05[#]、08[#] ~ 10[#] 模型桩施加了水平力和竖向力, 但尚未施加偏心弯矩荷载时的状态; 4) 安装了活动支座的倾斜偏心荷载桩, 如 03[#] ~ 05[#]、08[#] ~ 10[#] 模型桩施加了水平力和竖向力和偏心弯矩荷载时的状态。

表 2 模型桩顶和地面处位移实测值和计算值

Table 2 Calculated and tested lateral displacement of the top of model piles and at the ground

桩号	加载顺序	F_H/N	F_V/N	$M/(\text{N} \cdot \text{cm})$	v_{0T}/mm	v_{0C}/mm	$\Delta v_0/\text{mm}$	v_{PT}/mm	v_{PC}/mm	$\Delta v_P/\text{mm}$
03 [#]	1	7.35	0	0	0.122	0.096	-0.026	1.000	0.815	-0.185
	2	12.25	0	0	0.194	0.164	-0.03	1.355	1.373	0.018
	3	17.15	0	0	0.258	0.236	-0.022	1.764	1.942	0.178
	4	22.05	0	0	0.332	0.312	-0.02	2.269	2.524	0.255
	5	26.95	0	0	0.411	0.392	-0.019	2.880	3.119	0.239
	6	26.95	94.662	0	0.430	0.404	-0.026	3.151	3.218	0.067
	7	26.95	194.622	0	0.471	0.417	-0.054	3.526	3.329	-0.197
	8	26.95	390.622	0	0.491	0.445	-0.046	3.731	3.569	-0.162
	9	26.95	586.622	0	0.529	0.478	-0.051	4.035	3.844	-0.191
	10	26.95	782.622	0	0.607	0.517	-0.09	4.214	4.161	-0.053
	11	26.95	757.632	-749.7	0.845	0.901	0.056	6.261	7.694	1.433
	12	26.95	732.642	-1499.4	1.279	1.346	0.067	10.020	11.401	1.381
	13	26.95	757.632	-2249.1	1.981	1.911	-0.07	14.398	15.649	1.251
	14	29.4	757.632	-2249.1	2.363	2.005	-0.358	16.246	16.177	-0.069
	15	39.2	757.632	-2249.1	2.605	2.407	-0.198	17.270	18.373	1.103
	16	44.1	757.632	-2249.1	2.820	2.625	-0.195	18.545	19.523	0.978
	17	49	757.632	-2249.1	2.994	2.854	-0.14	19.813	20.708	0.895
	18	53.9	757.632	-2249.1	3.628	3.096	-0.532	22.633	21.931	-0.702
04 [#]	1	9.8	0	0	0.194	0.167	-0.027	2.582	2.301	-0.281
	2	14.7	0	0	0.285	0.265	-0.02	3.579	3.508	-0.071
	3	19.6	0	0	0.384	0.371	-0.013	4.645	4.755	0.11
	4	24.5	0	0	0.497	0.489	-0.008	5.607	6.042	0.435
	5	29.4	0	0	0.610	0.617	0.007	7.032	7.371	0.339

续表 2

桩号	加载顺序	F_H/N	F_V/N	$M/(N \cdot cm)$	v_{0T}/mm	v_{0C}/mm	$\Delta v_0/mm$	v_{PT}/mm	v_{PC}/mm	$\Delta v_P/mm$
04#	6	29.4	94.662	0	0.640	0.658	0.018	7.681	7.843	0.162
	7	29.4	194.622	0	0.723	0.708	-0.015	8.535	8.398	-0.137
	8	29.4	390.622	0	0.882	0.827	-0.055	9.798	9.697	-0.101
	9	29.4	586.622	0	1.333	0.988	-0.345	13.126	11.393	-1.733
	10	29.4	782.622	0	1.910	1.222	-0.688	17.387	13.728	-3.659
	11	29.4	757.632	-749.7	2.420	1.996	-0.424	23.346	21.693	-1.653
	12	29.4	732.642	-1499.4	3.125	2.949	-0.176	29.959	30.263	0.304
13	29.4	757.632	-2249.1	4.296	4.492	0.196	39.799	42.157	2.358	
05#	1	7.35	0	0	0.177	0.155	-0.022	3.320	3.158	-0.162
	2	12.25	0	0	0.286	0.273	-0.013	5.379	5.341	-0.038
	3	17.15	0	0	0.424	0.405	-0.019	7.614	7.590	-0.024
	4	22.05	0	0	0.559	0.550	-0.009	9.678	9.906	0.228
	5	26.95	0	0	0.684	0.711	0.027	11.747	12.292	0.545
	6	31.85	0	0	0.896	0.887	-0.009	14.643	14.749	0.106
	7	31.85	94.662	0	1.075	1.005	-0.07	17.228	16.509	-0.719
	8	31.85	194.622	0	1.255	1.159	-0.096	19.556	18.717	-0.839
	9	31.85	390.622	0	1.589	1.596	0.007	24.202	24.622	0.42
	10	31.85	365.632	-574.8	1.972	2.056	0.084	30.490	31.533	1.043
	11	31.85	340.642	-1149.6	2.590	2.542	-0.048	36.918	38.342	1.424
	12	31.85	365.632	-1724.4	3.468	3.372	-0.096	49.664	48.466	-1.198
08#	1	0	94.662	0	0.101	0.086	-0.015	0.971	0.901	-0.07
	2	0	194.622	0	0.227	0.193	-0.034	1.956	1.951	-0.005
	3	0	390.622	0	0.442	0.462	0.02	4.016	4.386	0.37
	4	0	586.622	0	0.814	0.847	0.033	7.977	7.513	-0.464
	5	0	684.622	0	1.082	1.106	0.024	10.684	9.448	-1.236
	6	9.511	684.622	0	1.449	1.548	0.099	13.182	12.404	-0.778
	7	14.411	684.622	0	1.700	1.808	0.108	14.735	14.039	-0.696
	8	19.311	684.622	0	1.974	2.091	0.117	16.347	15.754	-0.593
	9	24.211	684.622	0	2.270	2.399	0.129	17.954	17.553	-0.401
	10	29.111	684.622	0	2.589	2.734	0.145	19.661	19.441	-0.22
	11	29.111	659.672	-574.8	3.132	3.267	0.135	23.531	23.179	-0.352
	12	29.111	634.682	-1149.6	4.147	3.830	-0.317	31.460	26.960	-4.5
	13	29.111	659.672	-1724.4	5.195	4.918	-0.277	36.285	33.312	-2.973
09#	1	0	94.662	0	0.087	0.073	-0.014	0.466	0.807	0.341
	2	0	192.662	0	0.175	0.162	-0.013	1.493	1.742	0.249
	3	0	290.662	0	0.292	0.269	-0.023	2.763	2.798	0.035
	4	0	388.662	0	0.430	0.399	-0.031	4.067	4.003	-0.064
	5	0	486.662	0	0.621	0.559	-0.062	5.784	5.397	-0.387
	6	0	586.622	0	0.810	0.763	-0.047	7.927	7.070	-0.857
	7	9.511	586.622	0	1.212	1.222	0.01	10.628	10.346	-0.282
	8	14.411	586.622	0	1.492	1.505	0.013	12.450	12.201	-0.249
	9	19.311	586.622	0	1.818	1.823	0.005	14.344	14.179	-0.165
	10	24.211	586.622	0	2.210	2.179	-0.031	16.580	16.288	-0.292
	11	24.211	561.23	-574.8	2.860	2.821	-0.039	21.777	20.886	-0.891
	12	24.211	537.24	-1149.6	3.518	3.530	0.012	25.744	25.653	-0.091
	13	24.211	561.23	-1724.4	4.850	4.794	-0.056	35.820	33.086	-2.734

续表 2

桩号	加载顺序	F_H/N	F_V/N	$M/(N \cdot cm)$	v_{0T}/mm	v_{0C}/mm	$\Delta v_0/mm$	v_{PT}/mm	v_{PC}/mm	$\Delta v_P/mm$
	1	0	94.662	0	0.097	0.088	-0.009	0.493	1.072	0.579
	2	0	192.662	0	0.207	0.196	-0.011	1.821	2.317	0.496
	3	0	290.662	0	0.330	0.326	-0.004	3.479	3.731	0.252
	4	0	388.662	0	0.512	0.484	-0.028	5.369	5.355	-0.014
	5	0	486.662	0	0.749	0.678	-0.071	7.256	7.246	-0.01
	6	0	586.622	0	0.986	0.929	-0.057	10.388	9.537	-0.851
10#	7	9.511	586.622	0	1.367	1.403	0.036	13.434	13.334	-0.1
	8	14.411	586.622	0	1.626	1.686	0.06	15.448	15.447	-0.001
	9	19.311	586.622	0	1.876	2.000	0.124	17.323	17.672	0.349
	10	24.211	586.622	0	2.224	2.345	0.121	19.729	20.018	0.289
	11	24.211	561.23	-574.8	2.792	2.919	0.127	24.707	24.819	0.112
	12	24.211	537.24	-1 149.6	3.399	3.539	0.14	30.442	29.727	-0.715
	13	24.211	561.23	-1 724.4	4.374	4.701	0.327	37.186	37.710	0.524

注: F_H 为桩顶水平荷载; F_V 为桩顶竖向荷载; M 为桩顶偏心弯矩; v_{0T} 、 v_{0C} 分别为地面处桩身水平位移实测值和计算值, $\Delta v_0 = v_{0C} - v_{0T}$; v_{PT} 、 v_{PC} 分别为桩顶水平位移实测值和计算值; $\Delta v_P = v_{PC} - v_{PT}$ 。

3 试验结果分析

对水平荷载、竖向荷载、偏心弯矩荷载下模型桩非线性分析采用文献[14-15]中的有限杆单元法,并自编了 Matlab 有限元分析程序。

02 组、03 组模型试验的初始地基系数、初始地基比例系数如表 3 所示。模型桩计算分析采用的水平位移特征值 y_L 如表 4 所示。

水平荷载、竖向荷载、弯矩荷载作用下模型桩地面处水平位移和桩顶水平位移如表 2 和图 2~图 13 所示。

表 3 初始地基系数和初始地基比例系数

Table 3 the initial ratio of elastic foundation coefficient and the initial elastic foundation coefficient

组号	土类别	土层顶面初始地基系数/ ($N \cdot cm^{-3}$)	初始地基比例系数/ ($N \cdot cm^{-4}$)	现行规范地基比例系数参考值/ ($N \cdot cm^{-4}$)	式(4)中的系数 J
02#	上层粘土	137.2	0.62	0.17	1.8
	下层砂土	23.9	0.62	0.17	1.8
03#	上层粘土	103.4	0.58	0.16	1.8
	下层砂土	22.68	0.58	0.16	1.8

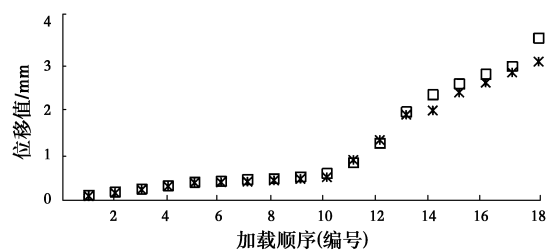
注:①土层中任意计算点初始地基系数等于土层顶面初始地基系数加上计算点至土层顶面距离与其初始地基比例系数的乘积;②按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》,硬塑粘土与中砂地基比例系数相当,故按经验选取的粘土和砂土地基比例系数值相同,约为规范取值的 3.62~3.65 倍;③计算砂土地基系数时,按容重比对上覆土层计算深度予以修正。

表 4 水平位移特征值 y_L

Table 4 Characteristic value of lateral displacement of soils

桩号	粘土 y_L/mm	桩号	粘土 y_L/mm
03#	0.85	04#	0.52
05#	0.58	08#	0.62
09#	0.48	10#	0.65

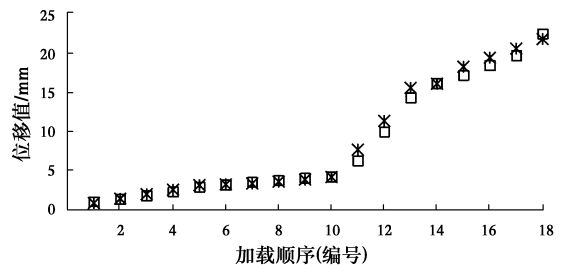
注:下层砂土中桩侧位移极小,远小于其位移特征值,双曲线型非线性修正因子 $y_L/(y_L+y)$ 接近 1,其非线性不显著,因此,可参考黏土位移特征值取值或忽略其非线性。



注: $y_L=0.85$ mm □ 实测位移值/mm × 计算位移值/mm

图 2 3# 木桩地面处水平位移实测值和计算值

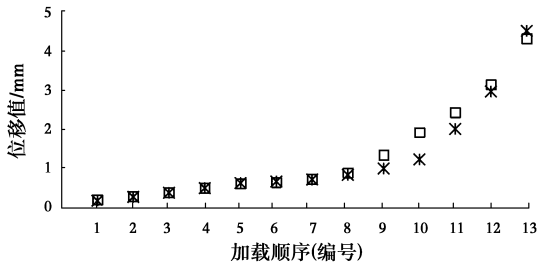
Fig. 2 the tested and calculated lateral displacement of the 3rd model pile at the ground



注: $y_L=0.85$ mm □ 实测位移值/mm × 计算位移值/mm

图 3 3# 木桩顶水平位移实测值和计算值

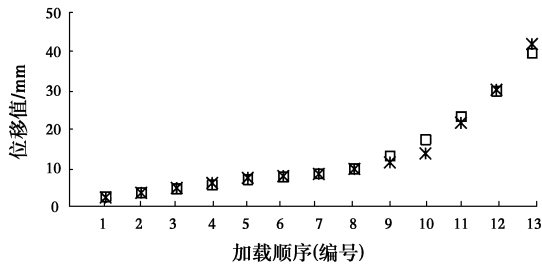
Fig. 3 the tested and calculated lateral displacement of the 3rd model pile at the top



注: $y_L=0.52$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值/mm

图 4 4# 木桩地面处水平位移实测值和计算值

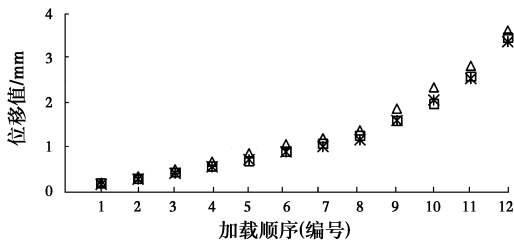
Fig. 4 the tested and calculated lateral displacement of the 4th model pile at the ground



注: $y_L=0.52$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值/mm

图 5 4# 木桩顶水平位移实测值和计算值

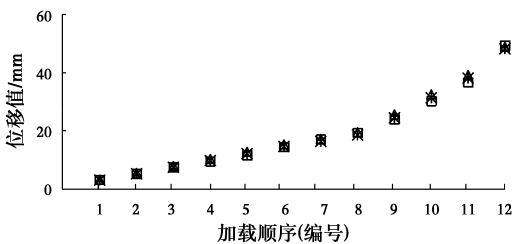
Fig. 5 the tested and calculated lateral displacement of the 4th model pile at the top



注: $y_L=0.58$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值1/mm
△计算位移值2/mm

图 6 5# 木桩地面处水平位移实测值和计算值

Fig. 6 the tested and calculated lateral displacement of the 5th model pile at the ground

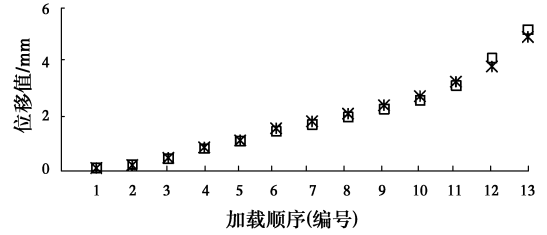


注: $y_L=0.58$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值1/mm
△计算位移值2/mm

图 7 5# 木桩顶水平位移实测值和计算值

Fig. 7 the tested and calculated lateral displacement of the 5th model pile at the top

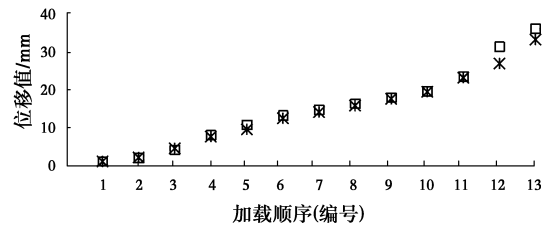
由图 2~图 7 可知,按水平荷载→竖向荷载→偏心弯矩的顺序对木质模型桩顶加载试验,模型桩



注: $y_L=0.62$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值/mm

图 8 8# 木桩地面处水平位移实测值和计算值

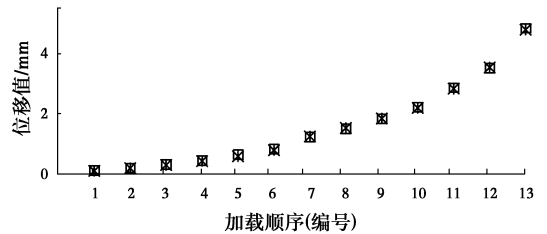
Fig. 8 the tested and calculated lateral displacement of the 8th model pile at the ground



注: $y_L=0.62$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值/mm

图 9 8# 木桩顶水平位移实测值和计算值

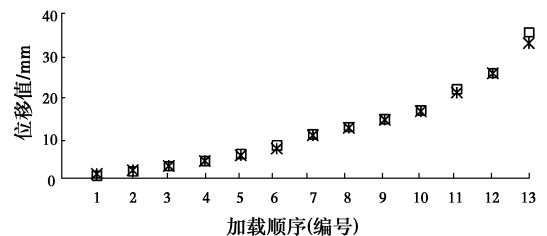
Fig. 9 the tested and calculated lateral displacement of the 8th model pile at the top



注: $y_L=0.48$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值/mm

图 10 9# 木桩地面处水平位移实测值和计算值

Fig. 10 the tested and calculated lateral displacement of the 9th model pile at the ground



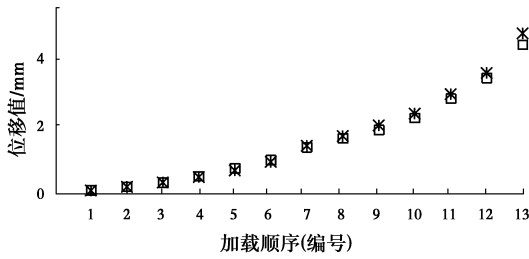
注: $y_L=0.48$ mm □ 实测位移值/mm * 计算位移值/mm

图 11 9# 木桩顶水平位移实测值和计算值

Fig. 11 the tested and calculated lateral displacement of the 9th model pile at the top

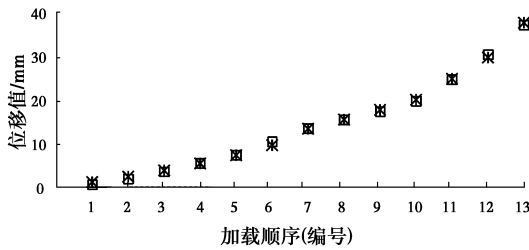
非线性特征显著。比较图 2、图 4、图 6 可知,地基土非线性越显著,其水平位移特征值越小,反之亦然;比较图 3、图 5、图 7 结论亦同。

由图 8~图 13 可知,按竖向荷载→水平荷载→偏心弯矩的顺序对木质模型桩顶加载试验,模型桩非线性特征显著。比较图 8、图 10、图 12 可知,地基



注: $y_{L_c}=0.65$ mm □ 实测位移值/mm × 计算位移值/mm

图 12 10# 木桩地面处水平位移实测值和计算值
Fig. 12 the tested and calculated lateral displacement of the 10th model pile at the ground



注: $y_{L_c}=0.65$ mm □ 实测位移值/mm × 计算位移值/mm

图 13 10# 木桩顶水平位移实测值和计算值
Fig. 13 the tested and calculated lateral displacement of the 10th model pile at the top

土非线性越显著,其水平位移特征值越小,反之亦然;比较图 9、图 11、图 13 结论亦同。

6 根模型桩共有 16 个水平荷载下试桩实测位移、17 个竖向荷载下计入试桩倾斜实测位移、26 个倾斜荷载下试桩实测位移、23 个倾斜偏心荷载下试桩实测位移结果与按本文理论分析结果基本一致,从多工况不同受力状态验证了本文 $p-y$ 曲线。

02 组 6 根模型桩对应的粘土水平位移特征值均不同,最大值为 0.85 mm,最小值为 0.48 mm,平均值 0.617 mm,样本标准差 0.13 mm,变异系数为 $0.21 < 0.25$,因此,试验中粘土水平位移特征值取平均值是合理的估计,即为 0.617 mm。

5# 模型桩计算结果图 6 和图 7 所示,计算位移值 1 为按本文 $p-y$ 曲线法计算,其计算参数如表 3 和表 4。计算位移值 2 为按文献[17]中宏观下基于 m 法下的 $p-y$ 曲线法计算结果,其计算关键参数初始地基比例系数为 $27 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-4}$,水平位移特征值为 0.4 mm。其位移计算结果基本一致,但因宏观下基于 m 法的 $p-y$ 曲线法忽略了粘土地面处初始地基系数,从而使得初始地基比例系数值大大增加,其水平位移特征值则减小。

4 水平位移特征值对基桩受力影响

粘土非线性特征一般比下砂土更为显著,其下层中砂水平位移特征值 y_{L_s} 比上层粘土的水平位移特征值 y_{L_c} 更大。以 5# 模型桩为例,仅改变下层砂土位移特征值的情况下,分别假定 $y_{L_s} = y_{L_c}$ 和 $y_{L_s} = 100y_{L_c}$ 的试桩内力位移计算结果如表 5。可见,下层砂土水平位移特征值放大 100 倍后,桩身最大弯矩、剪力以及桩侧最大土压力变化不超过 0.5%,桩顶最大位变化不超过 1.67%。可见,下层砂土位移特征值变化对试桩受力影响极小,因此,从简化计算参和应用角度出发,假定下层砂土的水平位移特征值与上层粘土的相同是合理可行的。

表 5 不同砂土位移特征值的 5# 模型桩内力位移计算结果

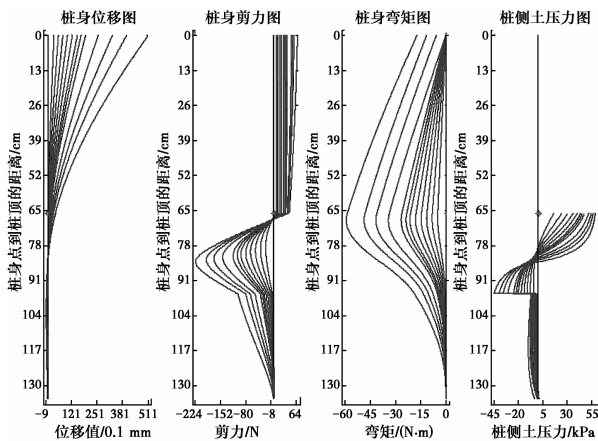
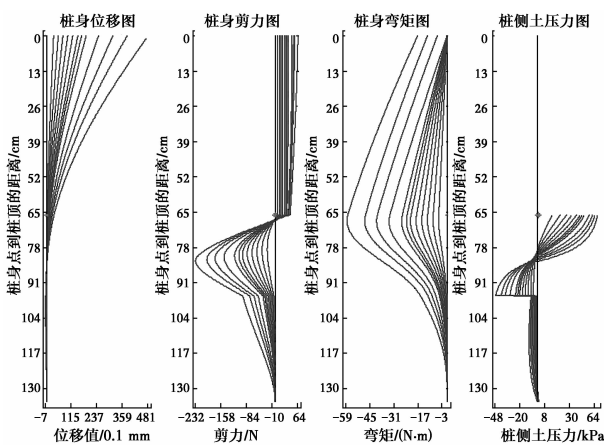
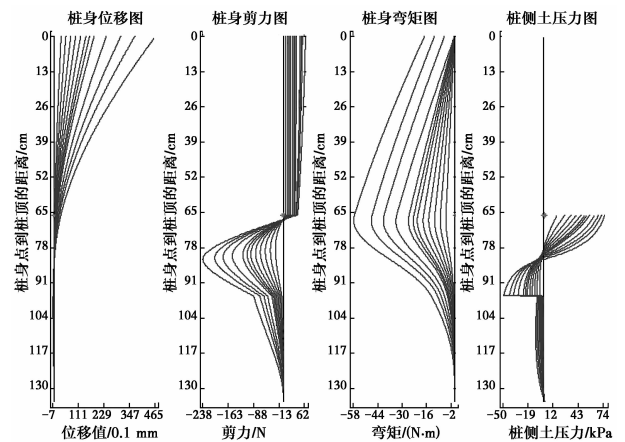
Table 5 mechanical analysis of the 5th model pile with different characteristic value of lateral displacement in sand

y_{L_c}/mm	加载顺序	桩顶荷载值(分级加载的荷载累计值)			地面桩身位移 v_{oc}/mm	桩顶位移 v_{pc}/mm	桩身最大剪力 $F_{Q_{\max}}/\text{N}$	桩身最大弯矩 $M_{\max}/\text{N} \cdot \text{m}$	最大桩侧土压力 σ_{\max}/kPa
		F_H/N	F_V/N	$M/(\text{N} \cdot \text{cm})$					
0.58	1	7.35	0	0	0.155	3.157	-23.128	-4.904	16.745
	2	12.25	0	0	0.273	5.339	-38.157	-8.182	25.463
	3	17.15	0	0	0.404	7.586	-52.871	-11.467	32.687
	4	22.05	0	0	0.549	9.897	-67.264	-14.759	38.714
	5	26.95	0	0	0.708	12.275	-81.332	-18.058	43.773
	6	31.85	0	0	0.883	14.721	-95.070	-21.366	48.045
	7	31.85	94.662	0	1.000	16.469	-105.455	-23.668	50.380
	8	31.85	194.622	0	1.150	18.656	-117.859	-26.500	52.926
	9	31.85	390.622	0	1.574	24.466	-148.167	-33.806	58.182
	10	31.85	365.632	-574.8	2.018	31.262	-174.596	-41.074	61.842
	11	31.85	340.642	-1149.6	2.482	37.920	-198.450	-47.977	64.534
	12	31.85	365.632	-1724.4	3.259	47.675	-232.363	-58.149	67.587

续表5

y_L/mm	加载顺序	桩顶荷载值(分级加载的荷载累计值)			地面桩身位移 v_{0C}/mm	桩顶位移 v_{PC}/mm	桩身最大剪力 $F_{Q_{max}}/N$	桩身最大弯矩 $M_{max}/N \cdot m$	最大桩侧土压力 σ_{max}/kPa
		F_H/N	F_V/N	$M/(N \cdot cm)$					
	1	7.35	0	0	0.155	3.158	-23.140	-4.904	16.751
	2	12.25	0	0	0.273	5.341	-38.191	-8.182	25.480
	3	17.15	0	0	0.405	7.590	-52.938	-11.467	32.719
	4	22.05	0	0	0.550	9.906	-67.373	-14.758	38.763
	5	26.95	0	0	0.711	12.292	-81.489	-18.058	43.842
58	6	31.85	0	0	0.887	14.749	-95.276	-21.365	48.134
	7	31.85	94.662	0	1.005	16.509	-105.717	-23.670	50.489
	8	31.85	194.622	0	1.159	18.717	-118.187	-26.510	53.059
	9	31.85	390.622	0	1.596	24.622	-148.700	-33.858	58.390
	10	31.85	365.632	-574.8	2.056	31.534	-175.101	-41.160	62.095
	11	31.85	340.642	-1149.6	2.542	38.342	-198.741	-48.102	64.823
	12	31.85	365.632	-1724.4	3.372	48.466	-231.979	-58.401	67.932

以5#模型桩为例,保持初始地基系数、初始地基比例系数不变,仅改变其双层土水平位移特征值时桩计算结果如表5和图14~图16。可见,水平位移特征值增大后,桩身位移将减小,桩身最大剪力将增大,桩身最大弯矩将减小,桩侧最大土压力将增大。

图14 5#木桩内力位移计算结果($y_{1s} = y_{1c} = 0.48 mm$)Fig. 14 mechanical analysis of the 5th model pile($y_{1s} = y_{1c} = 0.48 mm$)图15 5#木桩内力位移计算结果($y_{1s} = y_{1c} = 0.58 mm$)Fig. 15 mechanical analysis of the 5th model pile($y_{1s} = y_{1c} = 0.58 mm$)图16 5#木桩内力位移计算结果($y_{1s} = y_{1c} = 0.68 mm$)Fig. 16 mechanical analysis of the 5th model pile($y_{1s} = y_{1c} = 0.68 mm$)

5 结论

1) 提出一种新的双曲线型 $p-y$ 曲线, 即式(4)和式(9), 并给出了其关键参数初始地基系数、初始地基比例系数、水平位移特征值的选取确定方法。

2) 水平位移特征值在本次模型试验中表现出一定的离散型, 最大值为 0.85 mm, 最小值为 0.48 mm, 平均值 0.617 mm, 样本标准差 0.13 mm, 变异系数为 $0.21 < 0.25$, 因此, 试验中水平位移特征值取平均值是合理的估计。

3) 分别按水平荷载→竖向荷载→偏心弯矩的顺序和按竖向荷载→水平荷载→偏心弯矩的顺序对木质模型桩顶加载试验, 6根模型桩共有16个水平荷载下试桩实测位移、17个竖向荷载下计入试桩倾斜实测位移、26个倾斜荷载下试桩实测位移、23个倾斜偏心荷载下试桩实测位移结果与理论分析结果基本一致, 从多工况不同受力状态验证了本文 $p-y$ 曲线。

4) 下层砂土位移特征值变化对试桩受力影响极小, 因此, 从简化计算参和应用角度出发, 假定下层

砂土的水平位移特征值与上层粘土的相同是合理可行的。从而,为多层地基选取统一水平位移特征值提供理论支持。

5)水平位移特征值增大后,桩身位移将减小,桩身最大剪力将增大,桩身最大弯矩将减小,桩侧最大土压力将增大。

6)文献[16]中宏观下基于m法的 $p-y$ 曲线应用在上层粘土的多层地基中基桩非线性分析时存在不足,因其忽略了地面处粘土初始地基系数,使得初始地基比例系数大大增加,可以引入初始地基系数加以修正。

参考文献:

- [1] MATLOCK H S. Correlation for design of laterally loaded pile in soft clay [C]//Proceedings of 2nd Offshore Technology Conference, Houston:[s. n.],1970.
- [2] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay [C]//Proceedings of 7th Offshore Technology Conference, Houston:[s. n.], 1975.
- [3] STEVENS J, AUDIBERT J. Re-examination of $p-y$ curve formulations [C]//Proceedings of 11th Offshore Technology Conference, Houston:[s. n.], 1979.
- [4] 王惠初,武冬青,田平.黏土中横向静载桩 $p-y$ 曲线的一种新的统一法[J].河海大学学报,1991,19(1):9-17.
WANG H C, WU D Q, TIAN P. A new unified method of $p-y$ curve for laterally loaded pile groups in plasticity soil [J]. Journal of Hohai University, 1991, 19(1): 9-17. (in Chinese)
- [5] 田平,王惠初.黏土中横向周期性荷载桩的 $p-y$ 曲线统一法[J].河海大学学报,1993,21(1):9-14.
TIAN P, WANG H C. A unified method of $p-y$ curve for laterally and circularly loaded pile in plasticity soil [J]. Journal of Hohai University, 1993, 21(1): 9-14. (in Chinese)
- [6] 王腾,王天霖.粉土 $p-y$ 曲线的试验研究[J].岩土力学,2009,30(5):1343-1346.
WANG T, WANG T L. Experimental research on silt $p-y$ curves [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1343-1346. (in Chinese)
- [7] 戚春香,王建华.弱化饱和土层中桩的双曲线型 $p-y$ 曲线[J].天津大学学报,2010,20(3):215-220.
QI C X, WANG J H. Hyperbolic $p-y$ curve of pile in saturated degradation strata [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 20(3): 215-220. (in Chinese)
- [8] 王国粹,杨敏.砂土中水平受荷桩非线性分析[J].岩土力学,2011,32(2):261-267.
WANG G C, YANG M. Nonlinear analysis of laterally loaded piles in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 261-267. (in Chinese)
- [9] 李雨润,袁晓铭,梁艳.桩-液化土相互作用 $p-y$ 曲线修正计算方法研究[J].岩土工程学报,2009,31(4): 595-599.
- LI Y R, YUAN X M, LIANG Y. Modified calculation method of $p-y$ curves for liquefied soil-pile interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 595-599. (in Chinese)
- [10] 凌贤长,唐亮.液化场地桩基侧向响应分析中 $p-y$ 曲线模型研究进展[J].力学进展,2010,40(3):250-261.
LING X C, TANG L. Recent advance of $p-y$ curve to model lateral response of pile foundation on liquefied ground [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(3): 250-261. (in Chinese)
- [11] 刘红军,马明泊,吕小辉,等.黄河水下三角洲快速沉积粉土层桩基 $p-y$ 曲线试验研究[J].中国海洋大学学报,2015,45(10):81-87
LIU H J, MA M P, LYU X H, et al. Experimental study on $p-y$ curve of rapidly deposited silt in the subaqueous Yellow River Delta [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(10): 81-87. (in Chinese)
- [12] 刘红军,西国庚,马明泊.可液化土 $p-y$ 曲线模型折减方法的研究进展[J].中国海洋大学学报,2015,45(7): 107-112.
LIU H J, XI G G, MA M P. Recent advance of reduction methods on $p-y$ curves in liquefiable soil [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(7): 107-112. (in Chinese)
- [13] 楼晓明,吴昊,黄江枫.基于 $p-y$ 曲线确定饱和黏性土地基比例系数[J].岩土工程学报,2012,34(12): 2206-2212.
LOU X M, WU H, HUANG J F. Determination of slope coefficient of subgrade reaction of saturated clay based on $p-y$ curve [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2206-2212. (in Chinese)
- [14] 赵明华,李微哲,单远铭,等.成层地基中倾斜荷载桩改进有限杆单元法研究[J].工程力学,2008,25(5):79-85.
ZHAO M H, LI W Z, SHAN Y M, et al. Behavior analysis of piles in layered clays under eccentric and inclined loads by improved finite pole element method [J]. Engineering Mechanics, 2008, 28(5): 79-85. (in Chinese)
- [15] 赵明华,李微哲,曹文贵.复杂荷载及边界条件下基桩有限杆单元方法研究[J].岩土工程学报,2006,28(9): 1059-1064.
ZHAO M H, LI W Z, CAO W G. Study on applying finite pole element method to analysis of piles under complex loads with different boundary restraints [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1059-1064. (in Chinese)
- [16] 李微哲,姜平.m法下的双曲线型 $p-y$ 曲线[J].土木建筑与环境工程,2017,39(2):115-122.
LI W Z, LOU P. Analysis of pile by $p-y$ curve method based on m-method [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(2): 115-122. (in Chinese)