



横向受载超长PHC管桩计算方法

周天乔, 鲁子爱, 王德虎

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 通过对 p - y 曲线的主要影响因素进行分析, 结合现场试桩资料, 以规范推荐的 p - y 曲线计算方法为基础, 选取合适的土的特性参数与强度指标, 建立新的 p - y 曲线法, 并与 m 法、 NL 法、规范 p - y 曲线法进行比较, 结果表明桩身最大弯矩的计算值都与实测值比较接近, 但桩顶位移各种算法相差很大, 按新的 p - y 曲线法的计算值与实测值吻合程度最好。

关键词: 超长PHC管桩; 水平承载力; p - y 曲线; 抗剪强度; 极限土抗力

中图分类号: TU 473.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0155-006

Calculation method of laterally loaded super-long PHC pile

ZHOU Tian-qiao, LU Zi-ai, WANG De-hu

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the analysis of main influential factors of p - y curve and a project field testing result and according to the calculation method suggested in the code, this paper selects suitable characteristic parameters and strength index of soft clay and establishes a new p - y curve method and compares with calculation results of m -method, NL -method and standard p - y curve method. The results show that the calculated value and measured value of the maximum bending movement of pile integrity are close to each other, but there are significant differences among different calculation methods and the calculated value of the suggested p - y curve is the best one to fit the measured value.

Key words: super-long PHC pile; horizontal bearing capacity; p - y curve; shear strength; ultimate soil resistance

预应力高强度混凝土管桩(简称PHC管桩)是预应力技术与离心制管技术结合的产物, 具有单桩承载力高、耐久性好、施工速度快等优点。但由于PHC管桩的应用处于起步阶段, 其理论研究水平低于工程应用的发展水平, 因此, 本文结合某高桩码头试桩资料, 在国内外计算方法的基础上, 结合我国规范, 并根据实际土层资料进行研究, 得到一些有意义的结果。

以前, 任意深度 x 处桩周围土体对桩的压力基本呈均匀分布, 合力基本为0, 当桩受到水平荷载产生横向位移后, 土压力分布产生变化, 沿桩周围积分可得到合力 p , 此即为作用在单位桩长上的土抗力, 如图1所示。

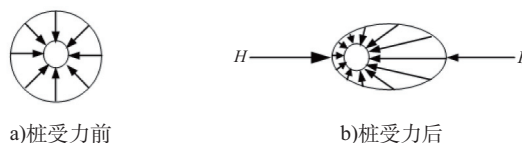


图1 桩土相互作用示意图

1 桩-土相互作用机理^[1]

超长PHC管桩入土深度大, 桩底端嵌固于地基中, 以弹性长桩状态工作。在未产生横向位移

2 p - y 曲线法简介

设桩在任意深度 x 处的横向位移为 $y(x)$, 桩的

收稿日期: 2012-12-05

作者简介: 周天乔(1987—), 男, 硕士, 从事港口航道工程结构。

横向抗弯刚度为 EI ，则可求得桩身位移的基本微分方程如下：

$$\frac{d}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + p = 0 \quad (1)$$

土抗力 p 与桩身位移 y (地基土的压缩量)和地基土的性质有关，一般为比较复杂的非线性函数关系，称为 p - y 曲线，确定了 p 与 y 的关系后即可求解方程(1)得到桩身位移 y ，进而求得土抗力、桩身转角、桩身弯矩等。

长桩桩顶受到水平荷载作用后，桩侧的土体依次形成弹性区和塑性区，在塑性区采用极限地基反力法，而在弹性区则采用弹性地基反力法，根据弹性区与塑性区边界上的连续条件求解桩的水平抗力，由于对塑性区和弹性区水平地基反力分布的不同假设，该法又有长尚法、竹下法、斯奈特法和 p - y 曲线法，而目前应用最为广泛的是 p - y 曲线法^[2]。 p - y 曲线法适用于任意尺寸、刚度和嵌固状态的桩在桩侧土体发生了弹性变形以至产生塑性变形和达到或超过剪切破坏时的内力和变形计算。

3 影响 p - y 曲线的主要因素

p - y 曲线描述桩身位移 y 与桩周围土抗力合力 p 之间的关系，与地基土的性质、桩的几何形状与尺寸、水平荷载的性质等因素有关。

3.1 桩身截面的影响

在一般情况下，桩身位移与桩径成反比，但描述极限状态的极限土抗力 p_u 和 y_{50} 与桩径成正比。

3.2 土体性质的影响

在对 p - y 曲线的研究中，一般根据土体的三轴不排水剪强度 c_u 确定极限土抗力 p_u ，根据土工三轴试验主应力差 σ 达到最大值一半时的应变 ε_{50} 确定极限土抗力一半时桩的位移 y_{50} 。不排水剪强度 c_u 与土体性质及其受到的压力有关，显然与 ε_{50} 也存在一定的相关性，因此用土的凝聚力 c ，内摩擦角 ϕ ，密度 ρ 和计算点深度 z 描述 c_u ，进而用 c_u 描述 ε_{50} 。

3.3 荷载性质的影响

众所周知，土体的弹性范围比较小，在不是很大的位移条件下就往往进入弹塑性变形阶段，甚至塑性变形阶段，因此荷载性质对 p - y 曲线有较大影响。本文仅对软黏土地基中横向承载PHC管桩的静载 p - y 曲线(图2)进行分析。

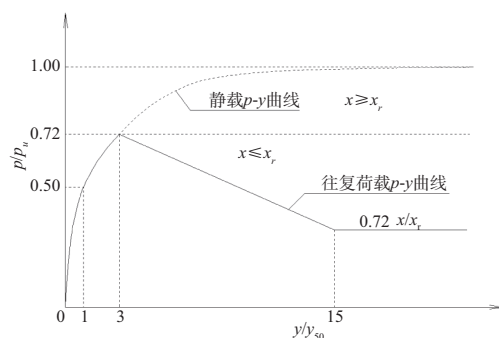


图2 软黏土 p - y 曲线

4 黏土中PHC管桩 p - y 曲线

4.1 水平静载荷试验和码头设计

水平力静载荷试验采用顶推法加荷，反力由试桩相邻的一平台提供。反力装置及加荷系统的主要设备有：一根反力梁、一只水平推力专用千斤顶、一个千斤顶导向架、一只压力传感器、一台油泵及相应油路系统。地质柱状图见图3，码头设计断面见图4。试桩设备安装见图5。其中，试桩桩长71 m，直径1 000 mm，桩尖高程-75.5 m，桩的相对刚度系数见表1。

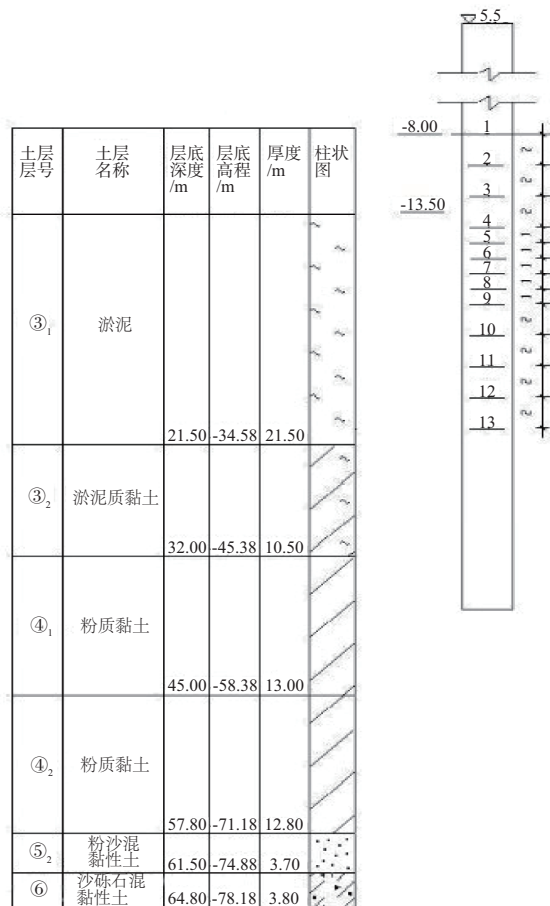


图3 地质柱状图

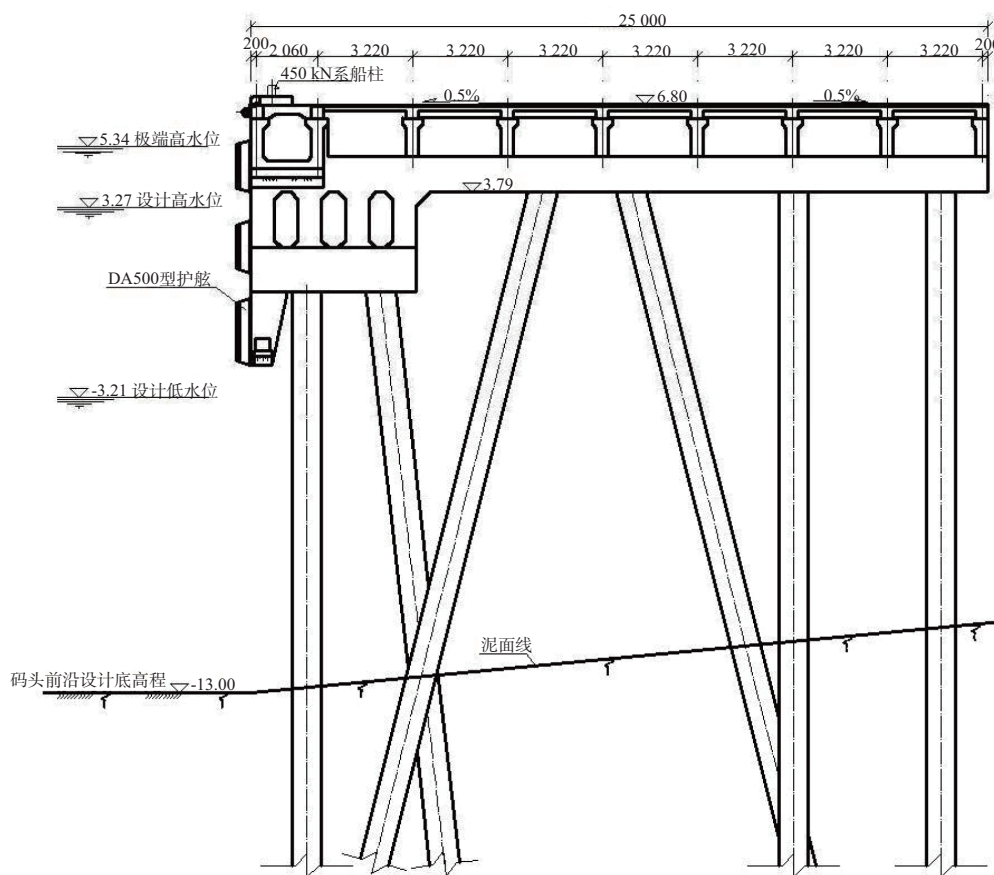
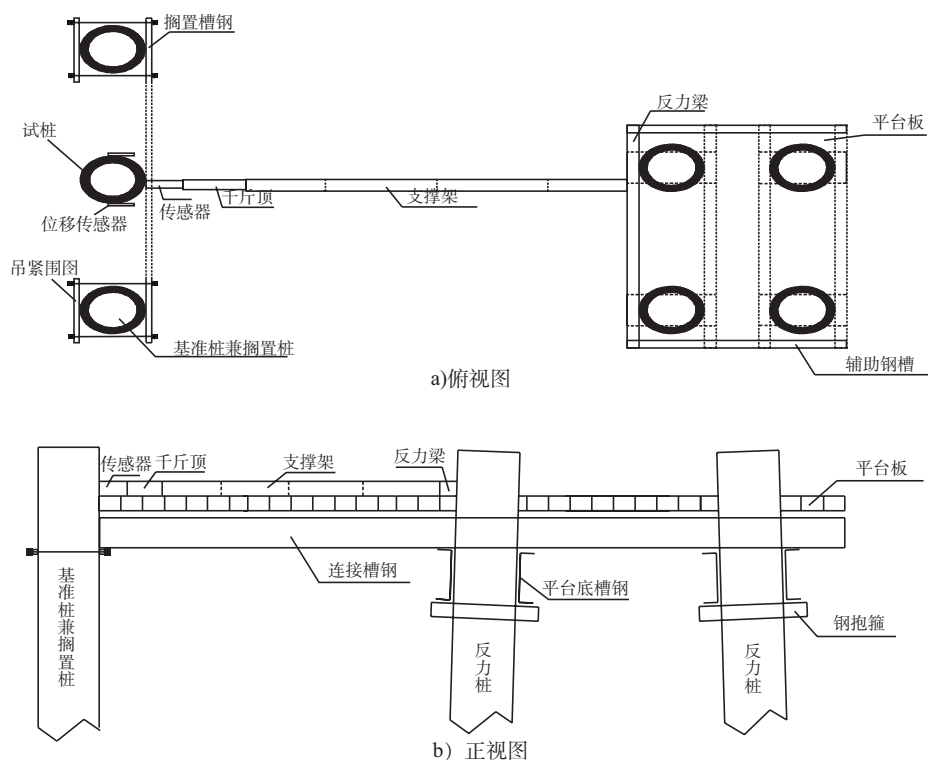


图4 码头设计断面



注:位移计在试桩力点高程处及以上1 m位置处各水平布置2个。

图5 水平力试验安装示意图

表1 桩的相对刚度系数

荷载/kN	$m/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-4})$	$EI/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	b/m	$\frac{EI}{mb}/\text{m}^5$	T/m
12.00	2 828.62	1 340 343	1.00	236.93	2.98
18.00	2 184.91	1 340 343	1.00	306.73	3.14
24.00	1 729.98	1 340 343	1.00	387.39	3.29
30.00	1 438.14	1340 343	1.00	466.00	3.42
36.00	1 050.89	1 340 343	1.00	637.72	3.64
42.00	897.78	1 340 343	1.00	746.48	3.75
48.00	765.75	1 340 343	1.00	875.18	3.88
54.00	771.67	1 340 343	1.00	868.47	3.87
60.00	719.91	1 340 343	1.00	930.91	3.92
66.00	646.63	1 340 343	1.00	1 036.41	4.01
72.00	597.64	1 340 343	1.00	1 121.36	4.07
78.00	613.51	1 340 343	1.00	1 092.36	4.05

水平力试验分级及加、卸载程序均按照 JTJ 254—1998《港口工程桩基规范》^[3]的有关规定执行,本次试验采用单向单循环水平维持荷载法,具体分级见表2。

表2 水平力试验荷载分级测读时间

序号	荷载/kN	维持时间/min
1	12	20
2	18	20
3	24	20
4	30	20
5	36	20
6	42	20
7	48	20
8	54	20
9	60	20
9	66	20
10	72	20
11	78	20
12	66	10
13	54	10
14	42	10
15	30	10
16	18	10
17	0	30

注:在加至原计划荷载60 kN后,根据设计要求,继续施加荷载至78 kN。

单桩水平力静载荷试验的位移测读时间如下:

1) 每次加载后按第5 min,10 min,15 min,20 min测读桩顶水平位移,测读20 min后进行下一级加载;2) 卸载时,每级荷载按第5 min,10 min测读,卸载至零时,维持30 min,按10 min,20 min,30 min测读。

本次水平力静载荷试验采用单向单循环水平维持荷载法进行试验。试验符合下列条件之一则终止加载:1) 达到试验要求的最大荷载或最大位移;2) 在某级荷载作用下,桩顶水平位移急剧增加、位移速率明显增大;3) 地基土出现明显的斜裂缝或桩身断裂。

4.2 现场试验资料分析

土工参数见表3。

表3 土工参数

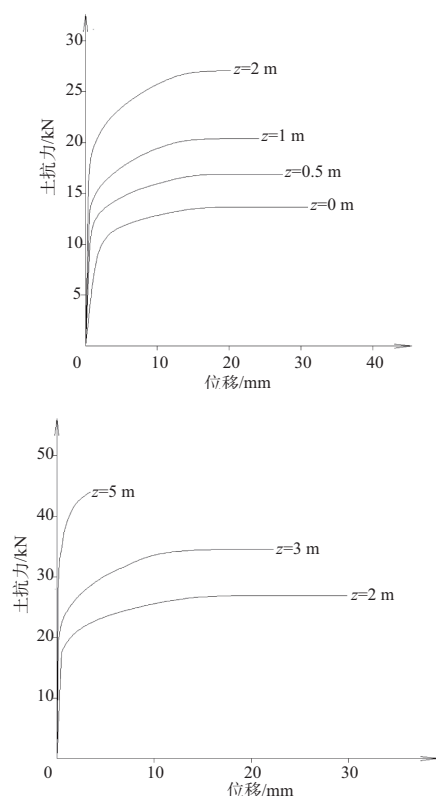
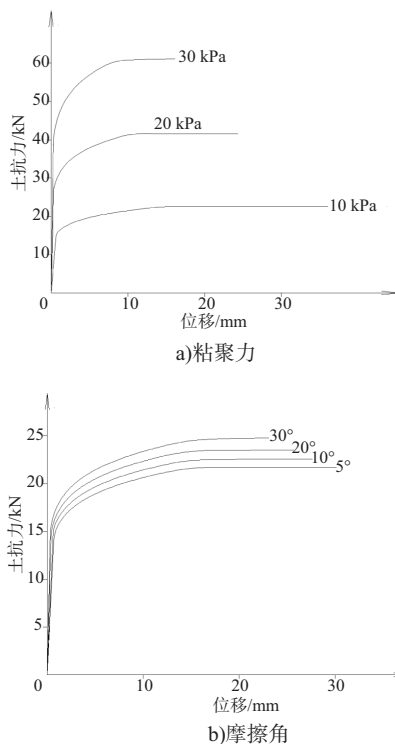
土层号	土层描述	层底高程/m	密度/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量/MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/(°)
③ ₁	淤泥	-34	1.58	1.66	0.35	9	9.0
③ ₂	淤泥质黏土	-44	1.71	2.61	0.35	11	12.5
④ ₁	黏土	-60	1.77	4.28	0.35	14	16.5
④ ₂	黏土	-71	1.76	4.04	0.35	14	16.5
⑤ ₁	粉砂混黏性土	-75.2	1.90	4.88	0.35	18	21.5

图6是本次现场试桩的试验 p - y 曲线,图7是在深度1 m处的 p - y 曲线随凝聚力和摩擦角的变化规律。

4.3 新建 p - y 曲线表达式

本报告参考规范 p - y 曲线^[4]形式,综合各种因素对 p - y 曲线的影响分析成果,利用容易获取的土壤参数描述,较好地解决了上述不足。

众所周知,土体的抗剪强度 $C_u=c+\sigma \tan \varphi$,其中,考虑到桩基侧向摩擦阻力, $\sigma \tan \varphi$ 再乘以 K_0 即土的静止水平侧压力系数。 K_0 值对正常固结土来

图6 现场试桩 p - y 曲线图7 深度1 m处 p - y 曲线随土体参数的变化

说,经常小于1或接近1。对超固结土或人工夯实土, K_0 则大于1。考虑到本工程地区的土质, K_0 取

0.4^[5]。原状土不排水剪切试验的摩擦角 $\varphi=0$, 因此原状土三轴不排水抗剪强度 C_u 等于不排水剪切试验的凝聚力 c , 鉴于原状土三轴试验的困难, 取用固结快剪指标按式(2)近似计算深度 z 处土体的不排水抗剪强度 C_u , 且 p - y 曲线法假定 p_u 与桩径、土层深度、土的密度以及土的三轴不排水强度 C_u 有关^[1], 进而按式(3)计算极限土抗力 p_u 。

$$C_u = c + 0.4 \sum \rho gh \tan \varphi \quad C_u \leq 96 \text{ kPa} \quad (2)$$

$$p_u = 1.2 C_u + 0.5 \sum \rho gh + \frac{0.4 C_u z}{B} \quad p_u \leq 9 C_u \quad (3)$$

式中: c, φ 为土体粘聚力(kPa)和摩擦角($^\circ$), 采用固结快剪指标; $\sum \rho gh$ 为计算点处单位面积上的土柱重力(kN/m^2); z 为计算点深度(m); B 为桩宽或桩径(m)。

根据现场试桩资料的分析成果, 桩周围土抗力达到极限值一半时桩身位移 y_{50} 在2~4 mm, 根据一般软黏土的 ε_{50} 值 y_{50} 可按式(4)计算。其中, y_{50} 中常数值根据不同的方法取值, 如Matlock取2.5, Reese等人取1.0, Lee和Gilbert取0.1, 而Sullivan等人又根据土性的不同而选用不同的值。式(4)中, 取值0.3是为了使预估 p - y 曲线和试桩 p - y 曲线能良好吻合得到的一个经验系数。

$$y_{50} = 0.3 \varepsilon_{50} B \quad (4)$$

式中: ε_{50} 参考Matlock和统一法提出的参数值按式(2)计算的 C_u 按下式确定:

$$\varepsilon_{50} = \begin{cases} 0.02 & C_u \leq 18 \text{ kPa} \\ 0.02 [1 - 0.25 (C_u - 18)^{0.25}] & 18 \text{ kPa} < C_u \leq 96 \text{ kPa} \end{cases} \quad (5)$$

根据桩周围土抗力达到极限值一半时桩身位移 y_{50} 和极限土抗力 p_u , 通过编制fortran程序拟合, 得出式(6), 计算软黏土中横向承载桩的 p - y 曲线。

$$p = 0.8 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{8}} p_u \quad p \leq p_u \quad (6)$$

4.4 实例应用

利用上节建立的 p - y 曲线编制fortran程序对现场试桩进行了计算, 并与 m 法、 NL 法、规范 p - y 曲线法进行了比较, 结果表明桩身最大弯矩的计算值都与实测值比较接近, 但桩顶位移各种算法相差很大, 按本文 p - y 曲线的计算值与实测值吻合程度最好, 如图8, 表4和5所示。

表4 桩顶位移比较

荷载/kN	实测值/mm	m法		NL法		规范 p - y 曲线		新建 p - y 曲线	
		计算值/mm	误差/%	计算值/mm	误差/%	计算值/mm	误差/%	计算值/mm	误差/%
12	24.03	34.20	42.32	31.17	29.71	35.62	48.23	28.62	19.10
18	44.71	51.30	14.74	49.68	11.12	57.65	28.94	46.84	4.76
24	65.44	68.41	4.54	69.28	5.87	81.70	24.85	66.85	2.15
30	86.40	85.51	-1.03	89.84	3.98	106.78	23.59	88.36	2.27
36	110.15	102.61	-6.85	111.10	0.86	133.71	21.39	111.28	1.03
42	132.93	119.71	-9.95	132.98	0.04	161.62	21.58	135.40	1.86
48	158.04	136.81	-13.43	155.62	-1.53	190.77	20.71	160.63	1.64
54	187.75	153.91	-18.02	179.03	-4.64	219.39	16.85	186.85	-0.48
60	222.07	171.01	-22.99	202.53	-8.80	252.13	13.54	214.54	-3.39
66	256.57	188.11	-26.68	226.93	-11.55	284.28	10.80	242.73	-5.39

表5 桩身最大弯矩比较

荷载/kN	实测值/ (kN·m)	m法		NL法		规范 p - y 曲线		新建 p - y 曲线	
		计算值/(kN·m)	误差/%	计算值/(kN·m)	误差/%	计算值/(kN·m)	误差/%	计算值/(kN·m)	误差/%
12	219	216.0	-1.37	215.0	-1.83	213.8	-2.37	211.7	-3.33
18	325	324.1	-0.28	324.7	-0.09	323.2	-0.55	321.1	-1.20
24	443	432.1	-2.46	435.1	-1.78	434.3	-1.96	432.0	-2.48
30	559	540.1	-3.38	546.5	-2.24	545.8	-2.36	544.5	-2.59
36	652	648.1	-0.60	657.8	0.89	659.1	1.09	658.0	0.92
42	774	756.2	-2.30	769.8	-0.54	771.5	-0.32	772.3	-0.22
48	870	864.2	-0.67	883.1	1.51	886.1	1.85	888.1	2.08
54	992	972.2	-2.00	995.8	0.38	998.9	0.70	1004.8	1.29
60	1 105	1 080.2	-2.24	1 108.1	0.28	1 115.8	0.98	1 122.5	1.58
66	1 205	1 188.3	-1.39	1 222.2	1.43	1 232.5	2.28	1 240.4	2.94

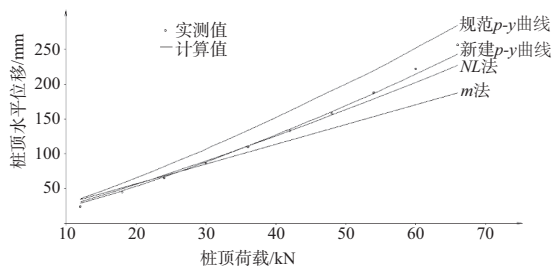


图8 桩顶位移计算值与实测值比较

5 结论

针对软黏土中的超长PHC管桩,根据试桩 p - y 曲线,分析了极限土抗力 p_u 和 y_{50} 与一些容易获得的土工参数之间的关系,考虑到土的静止水平侧压力系数,并紧密结合实际工程所在地的土工参数,提出的 p - y 曲线经验公式比已有的横向受载超长PHC管桩的计算公式更为简单方便,计算结果

更符合实际。

土工参数的准确与否直接影响计算结果的正确性,在计算水平荷载桩的内力和变形时必须使用试验得到的土工参数。

参考文献:

- [1] 周礼军. 浅覆盖层中水平荷载桩 P - Y 曲线研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].
- [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.
- [5] 波勒斯J E. 基础工程分析与设计[M]. 唐念慈, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987: 36-39.

(本文编辑 武亚庆)