

不同竖向荷载作用下桩基水平载荷试验研究

华卫君

(浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315012)

摘要:石油化工装置具有高、大、重及对地基承载力和沉降变形要求严格等特点,宁波镇海某石油化工项目位于沿海软土地基,工程地质条件差,风荷载大,对桩基的水平承载力要求较高。为了取得符合工程实际情况的桩基水平承载力参数,在工作区内开展了不同桩径、桩长、桩顶竖向荷载作用下的预制方桩桩基的水平静载荷试验。试验结果表明,在桩顶自由条件下,单桩水平承载力随着桩径和桩长的增加而增大,但并非是线性增长,而是呈幂函数增长关系;单桩水平承载力随着桩顶竖向荷载的增加同样呈幂函数增长关系;群桩水平承载力大于单桩水平承载力之和。

关键词:软土地基;竖向荷载;水平承载力;水平载荷试验;预制方桩;单桩;群桩

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)04-0063-05

Test Research on Horizontal Load of Pile Foundation under Different Vertical Loads/HUA Wei-jun (Zhejiang Engineering Prospecting Institute, Ningbo Zhejiang 315012, China)

Abstract: Petrochemical device is high, large and heavy, for which, the bearing capacity of foundation and the settlement deformation should be strictly controlled. The paper presents a petrochemical project in soft soil of Ningbo, because of the poor engineering geological conditions and large wind load, the horizontal bearing capacity is a very important factor. In order to achieve the horizontal bearing capacity parameters of pile foundation in accordance with the practical conditions, the horizontal static load test on the foundation of prefabricated square-pile is carried out under the conditions of different pile diameters, pile lengths and vertical loads on pile top in working area. The test results show that when the pile top is under the free condition, the horizontal bearing capacity of single pile increases along with the increase of diameter and the length of the pile, not being linear growth, but the power function relation. The horizontal bearing capacity of single pile increases along with the increase of vertical load on pile top, and also with power function relation. The horizontal bearing capacity of pile group is larger than the sum of that of single piles.

Key words: soft soil foundation; vertical load; horizontal bearing capacity; horizontal load test; prefabricated square-pile; single pile; pile group

0 引言

水平荷载作用下桩的受力是一个复杂的桩土相互作用过程,当前,对单桩水平承载力的确定方法主要有水平载荷试验和理论计算分析2类,其中以水平载荷试验最能反映真实情况。但目前水平静载荷试验都是在桩顶自由且不施加竖向荷载的条件下进行的,现行规范中的桩基水平静载荷试验方法亦是如此,这与工程桩的实际受力情况存在一定的差异。因为一般工程桩都要承受较大的竖向荷载,而且桩顶还有承台基础的嵌固铰结作用。本文将通过一系列不同工况条件下的水平静载荷试验,来分析桩基水平承载力的变化情况。

1 工程概况

宁波镇海一石油化工项目位于典型的沿海软土地区,系由海涂地回填而成。由静力触探成果图(见图1)不难看出,除表部素填土性质稍好外,在17.2 m深度范围内基本上由灰色流塑状淤泥质土组成,浅部地基土非常软弱(见表1),无良好的浅基础持力层。下部依次为灰绿色中密状粉砂、绿灰色稍密状含粘性土粉砂及灰黄绿色可塑状粉质粘土,物理力学性质较好。由于石油化工装置的特点是高、重、大,对地基的承载力要求高,对沉降变形要求严格,显然天然地基浅基础无法满足工程设计要求,一般需采用桩基础来加以解决。而工程场地位于建筑抗震设防烈度7度区,且地处东海之滨,对于高耸

收稿日期:2014-09-08

作者简介:华卫君,男,汉族,1963年生,宁波分院总工程师,高级工程师,从事岩土工程勘察及试验研究等工作,浙江省宁波市宝善路158号, hwj63@126.com。

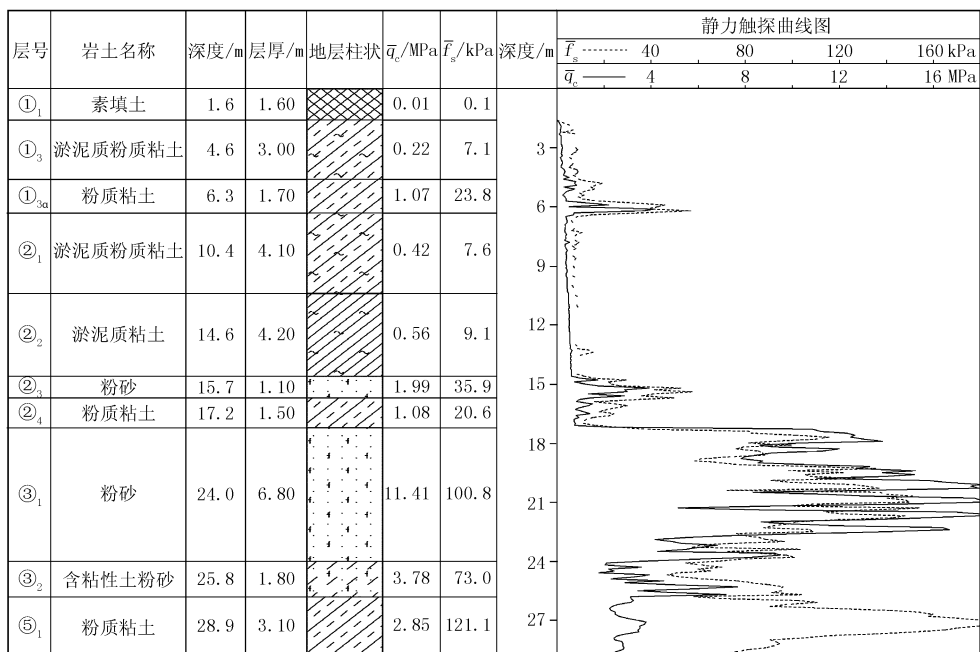


图1 地层竖向分布及静力触探成果图

表1 地基土物理力学性质指标表

层号	W/ %	ρ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	e_0	I_L	E_{s1-2} / MPa	φ / ($^\circ$)	c / kPa
① ₁		18.0				20.0	10.0
① ₃	41.2	18.1	1.139	1.19	3.07	9.8	19.1
① _{3a}	31.9	19.1	0.876	0.85	7.23	20.4	15.3
② ₁	42.9	17.8	1.191	1.42	2.82	9.6	16.4
② ₂	48.9	17.3	1.357	1.43	2.14	8.7	16.5
② ₃	27.4	19.4	0.768		7.86	27.2	11.3
② ₄	36.4	18.3	0.987	1.47	3.35	9.9	18.2
③ ₁	22.4	20.0	0.643		10.76	30.6	12.2
③ ₂	25.0	19.8	0.699		7.60	28.5	12.8
⑤ ₁	26.9	19.8	0.755	0.30	6.46	18.6	43.8

的构筑物来说,承受的风荷载也较大。因此,桩基不仅要承受很大的竖向荷载,还要承受较大的水平荷载。

根据场地工程地质条件及建筑物特点和要求,该工程一般采用钢筋混凝土预制方桩基础,选择③层中密状粉砂作为桩端持力层,桩长为19 m左右。

2 桩基水平静载荷试验

2.1 试桩类型

本文介绍的试桩均为钢筋混凝土预制方桩,分别对不同桩径、不同桩长、桩顶施加不同轴向荷载及多桩承台等条件下进行了水平静载荷试验。其中桩顶自由且不施加轴向荷载的试桩共有18根,桩顶施加轴向荷载的试桩共有9根,群桩(3桩承台)施加

轴向荷载的共有2组。

2.2 试验装置及试验仪器

传统的单桩水平静载试验,是采用电动油压千斤顶施加水平力,水平力作用线通过试坑底面地面标高。在千斤顶与试桩接触处安置一球形铰座,以保证千斤顶作用力能水平通过桩身轴线。桩的水平位移采用大量程百分表测量,每一根试桩在力作用水平面上和在该平面以上50 cm左右各安装1只百分表(下表测量桩身在地面处的水平位移,上表测量桩顶水平位移,根据两表位移差与两表距离的比值求得地面以上桩身的转角);安装百分表的基准梁由基准桩固定,基准桩打在试桩两个侧面靠位移的反方向,与试桩的净距离不小于4倍试桩直径,即在试桩影响范围以外。试验仪器及设备主要有千斤顶台、压力表(精度为0.4级)、磁性表座、50 mm百分表(精度为0.01 mm)、基准梁、球形铰座等(见图2)。

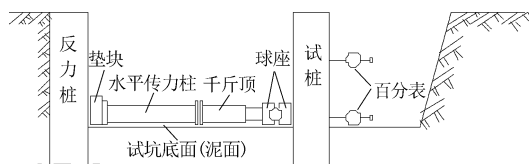


图2 传统的水平静载荷试验设备安装示意图

对于桩顶施加竖向荷载的试验装置,除了上述仪器及设备外,则在试桩桩顶增加1只油压千斤顶、

滚动轴排、桩顶竖向加载反力架等,其中单桩水平静荷载试验竖向反力由 2 根对称于试桩两侧布置的锚桩提供(图 3),群桩水平静荷载试验竖向反力则由 4 根对称于试桩且呈正方形布置的锚桩提供, YF11 为五桩承台,作为群桩水平静荷载试验时的反力台(图 4)。

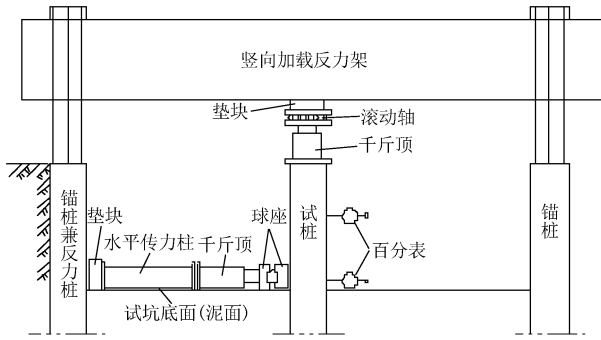


图 3 桩顶加载水平静荷载试验设备安装示意图

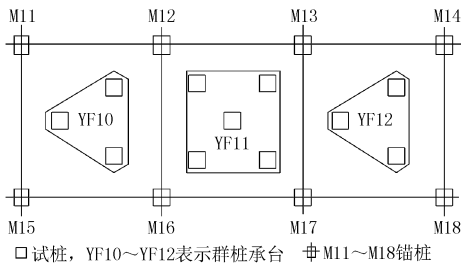


图 4 群桩竖向加载水平静荷载试验平面布置图

2.3 试验加载方法

采用单向多循环加卸载法。多循环加卸载试验法按下列规定进行加卸载和位移观测。

2.3.1 荷载分级

取预估水平极限承载力的 1/10 ~ 1/15 作为每级荷载的加载增量。

2.3.2 加载程序与位移观测

每级荷载施加后,恒载 4 min 后测读水平位移,然后卸载至零,停 2 min 测读残余水平位移,至此完成一个加卸载循环,如此循环 5 次便完成一级荷载的试验观测。加载时间应尽量缩短,测量位移的间隔时间应严格准确,试验不得中途停顿。

2.3.3 终止试验的条件

当桩身出现明显的裂缝或折断,或水平位移超过 30 ~ 40 mm,或可以较容易确定水平极限承载力时,可终止试验。

2.4 桩基水平承载力的确定

根据现场试验成果记录,进行分析整理,分别绘

制水平力 - 时间 - 作用点位移 ($H - t - Y_0$) 关系曲线和水平力 - 位移梯度 ($H - \Delta Y_0 / \Delta H$) 关系曲线。

2.4.1 水平临界荷载 H_{cr} 的确定

取单向多循环加载法时的 $H - t - Y_0$ 关系曲线出现拐点的前一级水平荷载值;

取 $H - \Delta Y_0 / \Delta H$ 关系曲线上第一拐点对应的水平荷载值。

2.4.2 水平极限荷载 H_u 的确定

取单向多循环加载法时的 $H - t - Y_0$ 关系曲线产生明显陡降的前一级水平荷载值;

取 $H - \Delta Y_0 / \Delta H$ 关系曲线上第二拐点对应的水平荷载值。

3 试验结果的综合对比分析

3.1 不同桩径单桩水平承载力的对比分析

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)提供的单桩水平承载力特征值计算公式可见,桩的水平承载力与桩的水平变形系数 α 、桩身混凝土抗拉强度 f_t 和弹性模量 E_c 、桩身换算截面受拉边缘的截面模量 W_0 和换算截面惯性矩 I_0 、桩侧土水平抗力系数的比例系数 m 等参数有关,而归根到底,这些参数都与桩的截面(桩径)大小有关。因此,在地质条件相同、桩长和桩身钢筋混凝土强度相等的条件下,桩的水平承载力主要取决于桩的截面形状和截面积。从表 2 试桩结果可以看出,对于相同桩长的钢筋混凝土预制方桩,其单桩水平承载力随桩径的增大而增加,当桩径增大 28.6% 时,其水平临界荷载平均提高 25.0%,水平极限荷载平均提高 21.7%,显然不是同比例增加。

表 2 不同桩径单桩水平承载力对比表

试桩编号	桩径 d/mm	有效桩长 L/m	临界荷载		极限荷载	
			单桩 H_{cr}/kN	平均 H_{crm}/kN	单桩 H_u/kN	平均 H_{um}/kN
D01	350 × 350	19.5	30		42	
D02	350 × 350	19.5	36	32.0	48	46.0
D03	350 × 350	19.5	30		48	
D04	450 × 450	19.5	40		56	
D05	450 × 450	19.5	40	40.0	56	56.0
D06	450 × 450	19.5	40		56	
DM05	450 × 450	19.5	40		56	

3.2 不同桩长单桩水平承载力的对比分析

由《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)提供的单桩水平承载力特征值计算公式可见,在公式中所用到的桩顶(身)最大弯矩系数 ν_m 和桩顶水平位

移系数 ν_x 都与桩的入土长度有关。从表3试验结果不难看出,对于相同桩径(横截面积)的钢筋混凝土预制方桩,其单桩水平承载力随桩长的增加而逐渐增加,当桩长分别从19.5 m增长到24.0 m(增长率23.1%)和从24.0 m增长到30.0 m(增长率25.0%)时,其水平临界荷载平均值分别提高10.0%和9.1%,水平极限荷载平均值分别提高10.7%和6.5%。由于场地内浅部土体软弱,对桩基水平承载力的发挥起关键性作用,可见桩长增加对水平承载力的提高程度十分有限,同时也反映了单桩水平承载力与桩长不是呈线性增加,而是呈幂函数增加关系。其中水平临界荷载 H_{cr} 和桩长 L 的关系式为 $H_{cr} = 11.42L^{0.42}$, 相关性系数 $r = 0.999$; 水平极限荷载 H_u 和桩长 L 的关系式为 $H_u = 18.25L^{0.38}$, 相关性系数 $r = 0.988$; 2个公式的相关性均较好。

表3 不同桩长单桩水平承载力对比表

试桩 编号	桩径 d/mm	有效 桩长 L/m	临界荷载		极限荷载	
			单桩 H_{cr}/kN	平均 H_{cm}/kN	单桩 H_u/kN	平均 H_{um}/kN
D04	450 × 450	19.5	40		56	
D05	450 × 450	19.5	40		56	
D06	450 × 450	19.5	40	40.0	56	56.0
DM05	450 × 450	19.5	40		56	
C04	450 × 450	24.0	40		56	
C05	450 × 450	24.0	40		64	
C06	450 × 450	24.0	48	44.0	64	62.0
CM05	450 × 450	24.0	48		64	
D07	450 × 450	30.0	48		64	
D08	450 × 450	30.0	48		64	
D09	450 × 450	30.0	48	48.0	72	66.0
DM09	450 × 450	30.0	48		64	

3.3 单桩水平承载力与桩顶竖向荷载的关系

上述表2、表3试桩都是在桩顶无约束(自由)的情况下进行的,而实际上几乎所有的工程桩都是有基础承台的约束且桩顶是同时承受竖向荷载的。为了更加真实的反映工程桩的受力情况,我们在桩顶施加不同的竖向荷载的条件下进行了水平静载荷试验。表4试验结果表明,在桩径相同、桩长相近的条件下,桩的水平承载力随着桩顶竖向压力的增加而增大,而且当施加的竖向荷载为单桩设计承载力的50%左右时,水平承载力增长尤其明显,然后随着桩顶竖向压力的继续增加而增大,但效果逐渐减弱,也呈现出了幂函数增长关系。通过数理回归统计,桩的水平承载力与桩顶竖向荷载具有下列关系。

表4 桩顶施加不同竖向荷载下单桩水平承载力对比表

试桩 编号	桩径 d/mm	有效 桩长 L/m	临界荷载		极限荷载		竖向 荷载 P/kN
			单桩 H_{cr}/kN	平均 H_{cm}/kN	单桩 H_u/kN	平均 H_{um}/kN	
L01	450 × 450	19.5	30		40		
L02	450 × 450	19.5	30	30.0	50	43.3	0
L03	450 × 450	19.5	30		40		
D2-II	450 × 450	19.5	60		83		
D3-II	450 × 450	19.5	53	56.5	83	83.0	218
YF1	450 × 450	19.5	60		110		
YF2	450 × 450	19.5	60	63.3	110	113.3	500
YF3	450 × 450	19.5	70		120		
YF4	450 × 450	19.5	72		132		
YF5	450 × 450	19.5	60	72.0	120	128.0	1000
YF6	450 × 450	19.5	84		132		
B25-1	450 × 450	19.5			137	137.0	1245

水平临界荷载 H_{cr} 与桩顶竖向荷载 P 的关系式:

$$H_{cr} = H_{cr0} + 5.19P^{0.30}, \text{相关性系数 } r = 0.998$$

水平极限荷载 H_u 和桩顶竖向荷载 P 的关系式:

$$H_u = H_{u0} + 2.76P^{0.5}, \text{相关性系数 } r = 0.974$$

式中: H_{cr0} 、 H_{u0} ——分别为桩顶竖向荷载为0时的水平临界荷载和水平极限荷载。

由相关系数可以看出,2个公式的相关性均较好。

3.4 单桩与群桩水平承载力的对比分析

工程实践表明,软土地区高层建筑、石油化工装置、市政桥梁、港口码头等建(构)筑物一般采用群桩基础形式,而且桩基础在承受竖向荷载的同时,还承受水平荷载。群桩承台基础在竖向和水平荷载的联合作用下,群桩的桩与桩和承台之间会相互影响,其水平承载力有别于单桩,故设计时需对群桩的水平承载力进行分析和验算。

为了取得较为准确的水平承载力参数,本文在现场进行了对比试验。

本次试验群桩为三桩承台,呈正三角形布置,桩的中心距为1.80 m,桩顶嵌入承台长度为10 cm,为等边三桩承台,承台高度1.10 m,承台顶面标高与单桩试验桩顶标高相同,桩底标高亦相同。为了便于对比,在承台中心点所施加的竖向荷载为3000 kN,相当于每根试桩所分担的平均竖向荷载为1000 kN。表5试验结果表明,在相同的竖向荷载作用下,3根单桩水平静载荷试验所取得的水平承载力之和,明显小于带承台的群桩水平承载力,可见承台的作用不可忽视。桩顶在承台的约束作用下,其临界水平荷载平均可提高22.7%,极限水平荷载平均

可提高32.8%。经过分析,认为主要原因有2个:一是由于群桩承台的嵌固,使桩顶受到固接约束作用,这种约束连接既能减少桩顶水平位移,又能降低桩顶约束弯矩,从而提高桩顶约束效应系数;二是由于桩基发生水平位移时,面向位移方向的承台侧面将受到土的弹性抗力,即水平承载力;至于桩的相互影响和承台底的摩阻效应,根据场地工程地质条件及以往试验成果分析,估计很少,可忽略不计。

表5 桩顶施加竖向荷载下单桩与群桩水平试验成果对比表

试桩 编号	桩径 d/mm	有效 桩长 L/m	临界荷载		极限荷载		竖向 荷载 P/kN
			单桩 H_{cr}/kN	平均 H_{cm}/kN	单桩 H_u/kN	平均 H_{um}/kN	
YF4	450×450	19.5	72		132		1000
YF5	450×450	19.5	60	72.0	120	128.0	1000
YF6	450×450	19.5	84		132		1000
合计			216		384	137.0	3000
YF10	450×450	18.0	280	265.0	520	510.0	3000
YF12	450×450	18.0	250		500		3000

注:YF10、YF12为群桩,平均每根桩分担的荷载为1000 kN。

4 结论

本文通过一系列的桩基水平静荷载试验,研究并分析了桩径、桩长、桩顶自由和桩顶在不同竖向荷载作用下的水平承载力,从而得到了影响桩基水平承载力的因素,除了桩体弹性模量、土体弹性模量、土体泊松比、土体粘聚力和内摩擦角等客观因素外,还与桩径、桩长、桩顶竖向荷载的大小密切相关,主要结论如下:

(1)在桩顶自由条件下,单桩水平承载力随着桩径和桩长的增加而增大,但并非是线性增长,而是呈幂函数增长关系;

(2)单桩水平承载力随着桩顶竖向荷载的增加而增大,而且同样也呈现了幂函数增长关系;

(3)在桩顶承受大致相同的竖向荷载作用下,桩顶嵌入基础承台的群桩水平承载力大于单桩水平承载力之和。

参考文献:

- [1] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
- [2] JGJ 106—2003, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [3] 张进林,沈军辉.单桩水平静载试验及成果参数取值问题初探[J].水文地质工程地质,2005,32(4):100-103.
- [4] 牛绍卿,张金利,赵彦国.桩的水平静荷载试验成果资料分析与判释[J].城市勘测,2006,(4):76-79.
- [5] 王钰,林军,陈锦剑,等.软土地基中PHC管桩水平受荷性状的试验研究[J].岩土力学,2005,16(S1):39-42.
- [6] 牛国生,王斐庆,刘兴.沉管灌注桩竖向承载力研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(3):65-68.
- [7] 郑刚,王丽.竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J].岩土工程学报,2008,30(12):1796-1804.
- [8] 李海涛,吴权,吕春峰.不同竖向荷载下PHC管桩水平承载性能研究[J].工程勘察,2011,(11):19-23.
- [9] 陈挺,姚小槐.基础桩单桩水平静荷载试验条件和环境浅析[J].浙江水利科技,2013,(6):47-50.
- [10] 李彰明,全国权,刘,丹,等.土质边坡建筑桩基水平荷载试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):930-935.
- [11] 杨建民.基桩竖向承载力试验研究[J].湖南城建高等专科学校学报,2009,(2):5-9.