

文章编号: 1007-2993(2023)05-0553-06

沉降控制条件下的基桩设计实例

张武¹ 姚晓旭² 张波¹ 郭哲¹

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 河南省建院勘测设计有限公司, 河南郑州 450014)

【摘要】 以西非某集装箱码头轨道桩基优化设计为工程实例, 分别采用现行中国规范方法和单桩竖向抗压刚度方法估算荷载作用下的桩顶位移, 对比分析和试桩检测结果表明, 采用单桩竖向抗压刚度方法可以简捷地评估在工作荷载下的桩顶沉降、规定试验荷载下的最大沉降、经历最大加载后卸载的桩顶残余沉降等, 满足国际专业标准中桩基沉降控制的技术要求。

【关键词】 单桩竖向抗压刚度; 设计最大荷载; 工作荷载; 基桩沉降; 残余沉降; 回弹率

【中图分类号】 TU 473.1+2

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.007

An Example of Foundation Pile Design under Settlement Control

Zhang Wu¹ Yao Xiaoxu² Zhang Bo¹ Guo Zhe¹

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Henan Geological Investigation & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450014, Henan, China)

【Abstract】 Through an engineering example of optimal design of track pile foundation of a container terminal in West Africa, the displacement of pile top under load was estimated by comparing the current Chinese code method with the vertical compressive stiffness method of single pile. The engineering example shows that the vertical compressive stiffness method of single pile can simply evaluate the settlement of pile top under working load, the maximum settlement under specified test load, and the residual settlement of pile top after unloading after the maximum load, which meets the technical requirements of pile foundation settlement control in international professional standards.

【Key words】 vertical compressive stiffness of single pile; design maximum load; working load; foundation pile settlement; residual settlement; rebound degree

0 引言

建筑物结构变形控制设计中, 常常需要对不同竖向压力荷载作用下的基桩沉降进行评估。对于承台底地基土不分担荷载的桩基, 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)将桩顶沉降视为桩端平面以下土层沉降与桩身压缩两者的叠加, 其中桩端平面以下土层沉降可以由桩端平面以下由基桩引起的附加应力通过明德林(Mindlin)解计算确定, 而桩身压缩则视基桩为单向受压杆件、按桩的承载特性以桩身压缩系数进行折减^[1]。

现行的基桩沉降分析需要预判桩的承载特性, 即桩端阻力与桩顶荷载之比(桩端承载比) α 和桩身压缩系数 ξ , 需要合理地选取与桩端下卧土层性质相应的计算厚度。

为简化并改进单桩沉降分析方法, 文献[2-5]归

纳并讨论了单桩竖向抗压刚度的理论及不同地层条件下的计算方法, 根据单桩竖向抗压刚度 k_p 的定义, 桩顶沉降 s 与桩顶荷载 Q 存在如下关系。

$$s = \frac{Q}{k_p} \quad (1)$$

如果考虑桩顶加卸载方式、桩基设计资料的完整性、沉降分析条件及施工经验等因素, 则需引入一个修正系数 λ , 此时桩顶沉降 s 按式(2)表达。

$$s = \lambda \frac{Q}{k_p} \quad (2)$$

西非某集装箱码头轨道桩基工程的设计、施工及检测均执行欧美相关专业标准, 尤其是桩顶沉降需满足不同荷载条件下对应的标准值, 即满足沉降控制要求。为此, 提出以单桩竖向抗压刚度方法分析基桩

沉降,对比了该方法与现行国内规范方法进行桩基沉降分析的过程与结果,桩基检测结果表明单桩竖向抗压刚度方法可以满足工程设计要求,更易于与海外技术标准对接。

1 工程概况、单桩承载力及沉降控制要求

西非某集装箱码头场址位于几内亚湾北侧,项目用地利用流域疏浚砂对浅海滩涂进行复垦,集装箱

码头桩基地质钻孔平面布置如图1所示。该项目基础桩设计桩径 1000 mm,原设计为单桩长约 48 m 的普通泥浆护壁灌注桩,经优化论证后采用桩长约 30 m 的后注浆钻孔灌注桩。

桩基工程场地表层为吹填的中粗砂层(经强夯处理),其下为砂土和黏土互层,各土层名称、分布厚度及物理力学参数见表1。

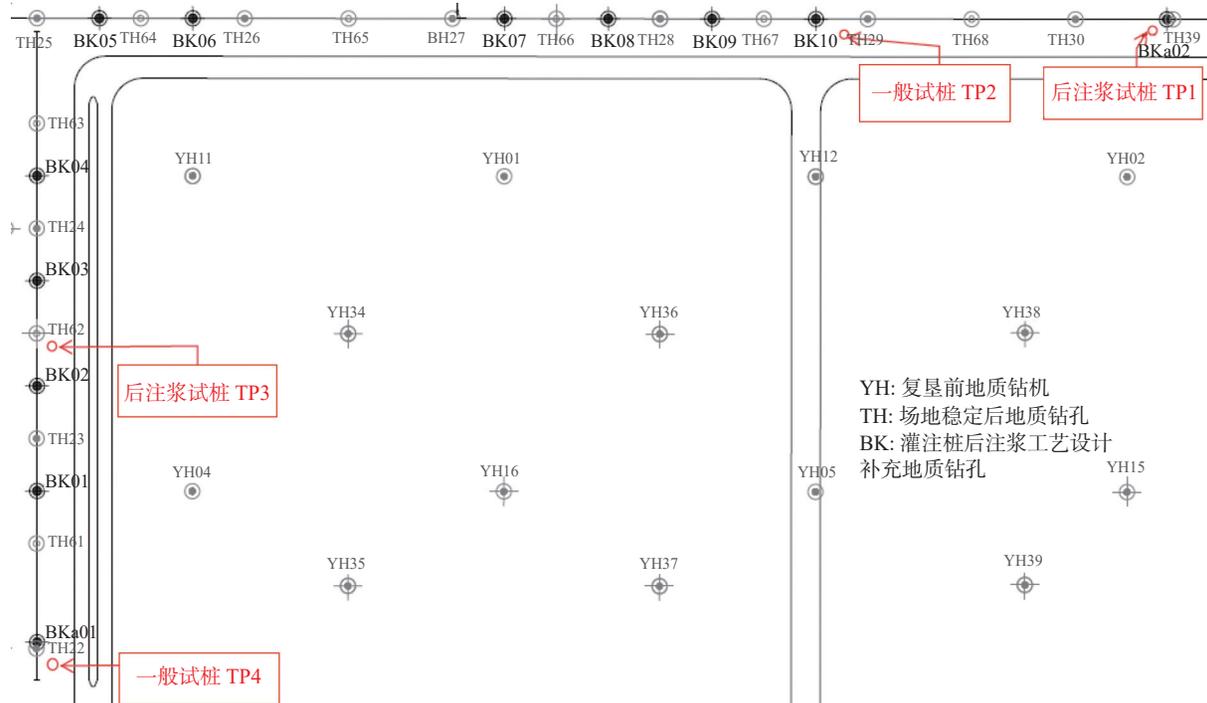


图1 项目集装箱码头轨道桩基地质钻孔平面图

表1 桩基土层物理力学参数

土层名称	厚度/m	SPT/N	压缩模量/MPa	灌注桩极限侧摩阻力标准值/kPa	灌注桩极限桩端阻力标准值/kPa
回填中粗砂层	19.6 ~ 25.7	≥15		60	
3 ₁ 松散细粗砂	0.70 ~ 6.7	2 ~ 10	5.7	23	900
3 ₂ 中密细粗砂	0.45 ~ 6.2	11 ~ 20	16.0	50	
3 ₃ 中密—密实细粗砂	0.50 ~ 12.7	15 ~ 35	49.4	60	1900
3 ₄ 密实细粗砂	0.50 ~ 15.2	43 ~ 54	188.9	90	2000
3 ₆ 硬黏土	0.50 ~ 3.4	9 ~ 20	13.3	60	
4 ₁₋₁ 坚硬黏土	0.8 ~ 1.8	20 ~ 26	25	90	1700
4 ₂ 含有机质硬黏土	0.30 ~ 4.7	6 ~ 14	13.4	70	
4 ₃ 含有机质坚硬黏土	0.60 ~ 1.5	16 ~ 20	18.5	90	1700
5 ₁ 中密—密实细粗砂	0.40 ~ 3.2	13 ~ 30	44.8	60	
6 ₁ 坚硬有机质黏土	1.6 ~ 8.4	10 ~ 29	28	90	
6 ₂₋₂ 软黏土	1.1 ~ 10.4	8 ~ 12	6.6	30	
6 ₄ 稍密中砂	0.70 ~ 6.9	6 ~ 12	5.2	35	
7 ₁ 坚硬黏土	1.2 ~ 24.2	47 ~ 100	39	100	1800
7 ₄ 中密细粗砂	0.60 ~ 2.5	12 ~ 20	21	45	1500

注:在进行桩基承载力与沉降分析时,其地下水位按+2.0 m考虑,土的重度取19 kN/m³。

按照业主对集装箱码头轨道结构运行要求,轨道的单桩竖向抗压工作荷载 SWL (Specified Work-

ing Load) 为 5150 kN。相应地,工程桩的最大试验荷载取 7800 kN;设计试桩的最大加载为 12900 kN。

根据业主提出的钻孔灌注桩技术规格书, 本项目工程桩的设计、施工和检测验收按美国 ASCE^[6] 和英国 ICE^[7] 标准执行, 在试桩成果获得业主认可之前不得建造永久工程桩, 同时不得使用试桩做为永久工程桩。

对永久工程桩, 验收试验必须满足如下要求:

(1) 加载至 7800 kN 全部卸载后桩顶的残余沉降小于 6 mm;

(2) 单桩加载必须达到或大于 7800 kN;

(3) 试桩加载至 5150 kN 时, 桩顶的最大沉降量小于 10 mm(桩最小横向尺寸的 1%);

(4) 试桩加载至 7800 kN 时, 桩顶的最大沉降量小于 20 mm(桩最小横向尺寸的 2%)。

为满足以上要求, 选择土层物理力学性质较差或桩端下卧软弱土层的地质钻孔 (TH61、TH25、TH30、TH66) 区域作为试桩区, 其地质柱状见图 2, 参照国内外有关桩基后注浆承载力估算的资料和规范^[8-12], 相应的单桩承载力计算值见表 2。

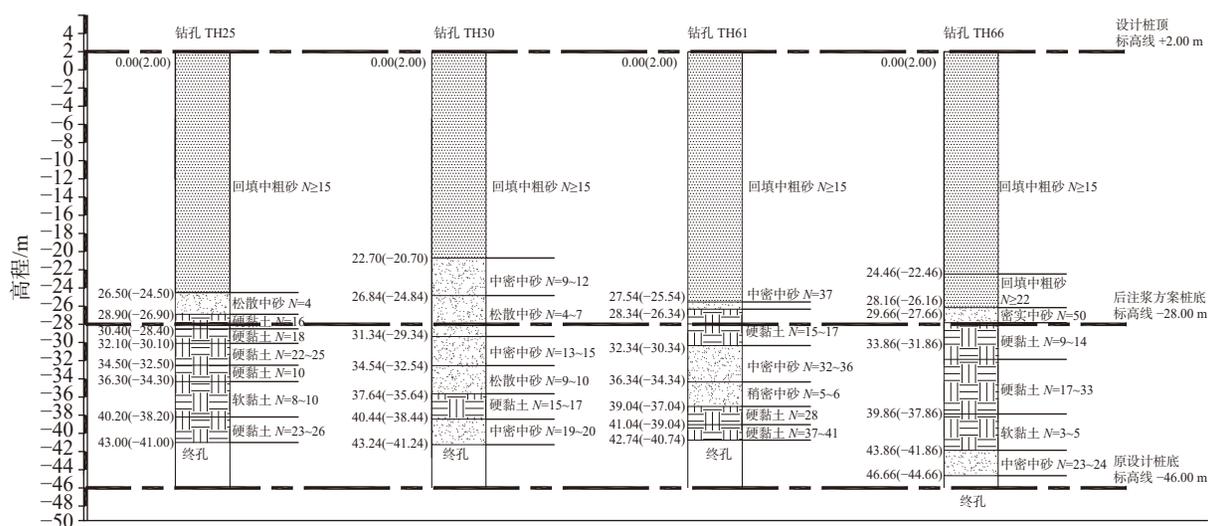


图 2 试桩区地质钻孔柱状图

表 2 单桩竖向极限承载力计算表

钻孔编号	桩长 48 m 单桩 极限承载力/kN	桩长 30 m 未注浆单桩 极限承载力/kN	桩长 30 m 后注浆单桩 极限承载力/kN	后注浆灌注桩 承载力提高幅度/%
TH61	10589.83	8455.02	14038.04	66
TH25	10881.47	7946.02	13238.86	67
TH30	8678.14	6878.08	12102.72	76
TH66	10979.81	8227.98	14670.86	78
平均值	10282.31	7876.775	13512.62	72

2 规范法分析基桩沉降

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008), 对不计承台作用的基桩, 如单桩、单排桩、桩中心距大于 6 倍桩径的疏桩基础, 其桩顶沉降可按式(3)一式(5)计算, 桩端底下计算土层深度 Z_n 按式(6)确定, 式中符号含义见规范^[1]。

$$s = \varphi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{Zi}}{E_{si}} \Delta Z_i + s_e \quad (3)$$

$$\sigma_{Zi} = \sum_{j=1}^m \frac{Q_j}{l_j} [\alpha_j I_{p,ij} + (1 - \alpha_j) I_{s,ij}] \quad (4)$$

$$s_e = \xi_c \frac{Q_j l_j}{E_c A_{ps}} \quad (5)$$

$$\sigma_z + \sigma_{zc} = 0.2\sigma_c \quad (6)$$

沉降计算的基桩设计参数为桩径 $D = 1.0$ m、桩长 $L = 30$ m、桩身选用 C50 混凝土、桩顶工作荷载 $Q = 5150.0$ kN。当计算深度 $Z_n = 4$ m 时, 不计承台土压力引起的附加应力 σ_{zc} , 计算分层厚度不超过 $0.3Z_n$, 取 1.0 m。则 $0.2\sigma_c = 62.2$ kPa, 按公式(4)计算桩底以下 3.5 m 处 $\sigma_z = 34.99$ kPa $\leq 0.2\sigma_c$ 。

以钻孔 TH61 为例, 桩的端承比 α , 可在 0 ~ 1.0 范围内取值; 桩身压缩系数 ξ_c 取值与 α 相关; 当

$\alpha=0.75 \sim 1$ 时, 桩身压缩系数 $\xi_c=1$; 当 $\alpha=0 \sim 0.5$ 时, 桩身压缩系数 $\xi_c=2/3$; 沉降计算经验系数 φ 取 1, 计算的桩顶沉降如表 3 所示。

以上计算过程表明: 当端承比 $\alpha=0$ (即桩为摩擦桩)时, 计算的桩顶沉降值最小; 随着 α 值增大, 即桩

的摩擦作用降低、端承特性增强时, 计算的桩顶沉降值也随之增加; 当桩的承载特性表现为完全端承作用, 即端承比 $\alpha=1.0$ 时, 计算的桩顶沉降值达到最大值。仅仅由于桩的端承比 α 取值差异, 计算的桩顶沉降值就可以相差 3.44 ~ 5.30 倍(见图 3)。

表 3 钻孔 TH61 试桩沉降计算汇总表

Z_n/m	α							
	0	0.05	0.1	0.15	0.25	0.5	0.75	1
5	10.748	12.968	15.186	17.404	21.839	32.930	45.922	57.013
10	20.128	22.764	25.398	28.033	33.299	46.470	61.543	74.714
15	22.194	24.894	27.593	30.292	35.688	49.182	64.578	78.073
18	23.089	25.812	28.534	31.255	36.695	50.301	65.808	79.414

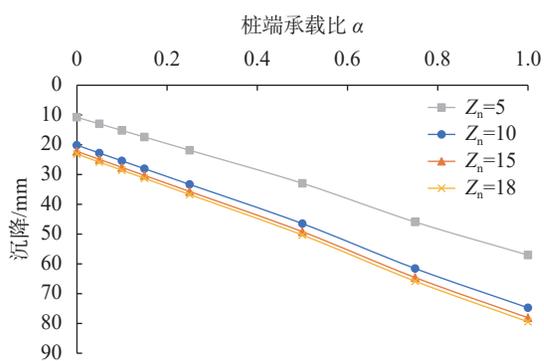


图 3 钻孔 TH61 试桩沉降与桩端承载比 α 关系

在实际工程中, 影响桩的端承比 α 因素较多, 如桩周土层分布及其物理力学性质。当桩周上层土坚硬而下层土柔软时, α 宜取较小值; 当桩顶荷载较高时, α 值可能较大。如果采用灌注桩后注浆, 注浆组合模式也可以改变桩的端承比^[11]。文献 [12] 提供的单桩静载试验表明, 在北京、石家庄、郑州等地以粉黏土或砂卵石土为桩端持力层的后注浆灌注桩, 其桩端承载比 $\alpha=0.017 \sim 0.22$, 且仅当桩顶加载超过计算的单桩承载力特征值 2 倍以上时, α 取较高值; 当桩的长径比大于 30 或桩周上部土层强度较高或桩顶荷载水平较低时, α 宜取较低值。

依据《建筑桩基技术规范》(GJG 94—2008), 计算桩顶沉降值也与桩端下卧层计算厚度 Z_n 取值相关, 本文算例表明, 随着桩端下卧层计算深度 Z_n 取值增加, 计算的桩顶沉降值也随之单调增加。对摩擦或端承摩擦型桩, 计算的桩顶沉降值由于 Z_n 取值不同可以相差 120% 以上; 而对于端承或摩擦端承型桩, 计算的桩顶沉降值由于 Z_n 取值不同可以相差超过 40%。从图 4 还可以看出, 对本项目基桩, 当桩端下卧层计算厚度 Z_n 取值超过 15 m 后, 计算的桩顶沉降值趋于稳

定。其他 3 个地质钻孔区域的试桩的桩顶沉降计算亦存在相似趋势(见表 4)。

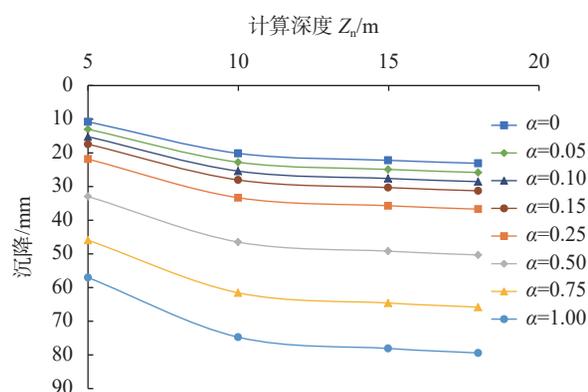


图 4 钻孔 TH61 试桩沉降与桩端下卧层计算深度 Z_n 关系

以上沉降计算结果表明, 在桩顶作用工作荷载 $Q=5150.0$ kN 时, 按国内现行规范方法计算的桩顶沉降值均大于 10 mm, 此计算结果不能满足工作荷载作用下桩顶沉降控制要求(桩径的 1%)。为此, 提出利用单桩竖向抗压刚度估算基桩沉降的分析方法。

3 单桩竖向刚度分析及相应的沉降估算

按照单桩竖向抗压刚度的定义, 桩顶沉降可以由式(1)估算, 其合理性则取决于单桩竖向抗压刚度计算。目前计算单桩竖向抗压刚度的方法有《动力机器基础设计规范》查表法^[8]、集成刚度法^[5]、利用单桩静载试验数据的直接法^[2]、基于单桩承载机理的荷载传递法^[3]和剪切位移法^[4]等。由于影响单桩竖向抗压刚度的因素比较复杂, 这些方法得到的单桩竖向抗压刚度值亦存在一定的离散性。这些因素的综合影响可以通过式(2)中的经验修正系数 λ 加以反映, 初步分析或无经验时, 可取 $\lambda=1$ 。采用本文提出的单桩刚度法计算的单桩竖向抗压刚度及不同荷载水平下

表 4 钻孔 TH30、TH25、TH66 试桩沉降计算汇总表

mm

试桩位置	Z_u/m	α							
		0	0.05	0.1	0.15	0.25	0.5	0.75	1
TH30	5	29.151	37.801	46.450	55.098	72.394	115.64	160.78	204.02
	10	40.393	49.591	58.788	67.985	86.376	132.36	180.25	226.23
	15	43.963	53.272	62.580	71.887	90.500	137.04	185.48	232.01
	18	45.626	54.977	64.326	73.675	92.371	139.12	187.76	234.51
TH25	5	15.124	18.432	21.738	25.043	31.653	48.181	66.611	83.140
	10	26.570	30.406	34.240	38.074	45.740	64.910	85.981	105.15
	15	29.751	33.686	37.619	41.552	49.416	69.081	90.647	110.31
	18	31.207	35.178	39.147	43.116	51.053	70.898	92.645	112.49
TH66	5	21.359	26.606	31.851	37.095	47.583	73.807	101.93	128.16
	10	25.675	31.121	36.566	42.010	52.897	80.119	109.24	136.47
	15	40.247	46.158	52.067	57.975	69.791	99.335	130.78	160.32
	18	41.645	47.590	53.534	59.477	71.362	101.08	132.70	162.46

的桩顶沉降如表 5 所示。

计算结果表明: 采用灌注桩后压浆工艺后, 规定工作荷载(5150 kN)下的最大沉降量小于桩的最小横

向尺寸的 1%(10 mm), 规定试验荷载(7800 kN)下的最大沉降量小于桩的最小横向尺寸的 2%(20 mm), 满足业主及国外相关规范要求。

表 5 试桩单桩竖向抗压刚度及沉降估算表

钻孔编号	单桩竖向抗压刚度/(MPa·m)	不同桩顶荷载时相应的桩顶沉降/mm		
		5150 kN(工作荷载)	7800 kN(验证荷载)	12900 kN(试验最大加载)
TH61	969.23	5.31	8.05	13.31
TH25	952.52	5.41	8.19	13.54
TH30	1005.26	5.12	7.76	12.83
TH66	1031.97	4.99	7.56	12.50
平均值	989.75	5.21	7.89	13.05

单桩竖向抗压刚度是特定地层条件下桩自身固有的性质, 仅决定于桩的几何尺寸和桩身弹性模量, 桩侧土的变形模量、泊松比及桩端土的基床系数, 可以利用基础设计条件和岩土勘察报告提供的资料估算, 其精度与各种参数的精度相匹配。由式(1)可知, 利用单桩竖向抗压刚度计算桩顶沉降, 两者精度是同阶的。利用单桩竖向抗压刚度计算桩顶沉降, 其准确性与可靠性高于目前的规范方法。如果现场进行了工程试桩且试桩资料具有可参考性, 或者设计者有足够的经验, 可以通过引入经验系数 λ 对式(1)进行修正。

桩顶加载至指定荷载后卸载的残余沉降 s_r 是相应加载的最大沉降量 s 与回弹量 s_e 的差值, 桩顶的最大沉降量 s 可通过单桩竖向抗压刚度按式(1)进行估算, 而回弹量为最大沉降量与回弹率 ε 的乘积, 因此借助于已有静载试验或工程实例所提供回弹率参考

值, 桩顶残余沉降可按式(7)估算。

$$s_r = (1 - \varepsilon) \frac{Q}{k_p} \quad (7)$$

回弹率 ε 是基桩静载试验提供的成果之一, 与单桩承受的最大荷载量, 桩周土的性质、桩底沉渣厚度等相关。按一般的施工经验, 如果采用灌注桩桩端后注浆, 可以提高回弹率 ε 。统计若干工程试桩静载试验数据, 可得 $\varepsilon=0.4 \sim 0.8$ ^[13-15]。

采用灌注桩后压浆工艺后, 其荷载试验完成后卸载, 估算回弹后的残余沉降约为 1.51 ~ 4.91 mm (见表 6), 小于 6 mm, 满足项目业主及 ICE 有关验收标准。

4 试桩测试结果分析

该项目原设计采用桩长 48 m、桩径 1000 mm 普通泥浆护壁灌注桩, 估算的单桩承载力特征值可以达到规定值, 按现行中国规范公式估算的桩顶沉降值不

表6 试桩残余沉降估算(验证荷载 7800 kN)

钻孔编号	沉降估算值/mm	残余沉降估算值/mm
TH61	8.05	1.61 ~ 4.83
TH25	8.19	1.64 ~ 4.91
TH30	7.76	1.55 ~ 4.66
TH66	7.56	1.51 ~ 4.54
平均沉降	7.89	1.58 ~ 4.73

能满足沉降控制要求。按照承载力与沉降双控要求,改为桩长 30 m、桩径 1000 mm 桩端与桩侧组合后注浆钻孔灌注桩,其中桩侧后注浆以注浆量约 0.8 ~ 1.5 t 控制,桩底注浆以注浆压力约 1.0 ~ 2.0 MPa 控制,浆液水灰质量比为 0.45 ~ 0.65。

根据修改后的设计方案,在地质钻孔 TH61、TH25、TH30、TH66 附近进行设计试桩的对比静载试验(试验桩位见图 1),以验证施工工艺的可行性和设计参数的合理性。

试桩单桩承载力静载试验及桩身完整性超声检测均参照 ICE 标准执行。为保证试验技术的可靠性与严谨性,试桩静载装置(如加载钢梁、配重、千斤顶、油压表、油管等)按最大加载量 15000 kN 配备,留足了安全储备。

试桩现场静载试验表明,单桩竖向抗压极限承载力超过 13500 kN,大于业主及 ICE 提出的最大加载 12900 kN 要求,同时对应于各级特定荷载值,桩顶沉降均小于相应的限制值。

5 结论

(1)对于不考虑群桩效应和承台下地基土分载作用的基桩,可以利用岩土工程勘察资料,按照《建筑桩基技术规范》(GJG 94—2008)或其他的行业技术规范对其承载力进行较为可靠的评估,而对于特定荷载作用下桩顶沉降值的评估则比较复杂,假设条件较多,其评估结果往往并不理想。

(2)提出按照单桩竖向抗压刚度的定义和计算方法,结合桩周地层、成桩工艺和工程经验,评估不同

桩顶荷载条件下的桩顶沉降,并在实际桩基设计案例中取得了理想的应用效果。

(3)由于地层参数、土性特点及桩基工程自身的复杂性,单桩竖向抗压刚度取值的合理性需要更多的工程资料积累,基桩的桩顶沉降评估计算方法还需要进一步完善。

参 考 文 献

- [1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [2] 张武,高炳琪,姚晓旭,等.均匀地基中的单桩竖向抗压刚度[J].建筑科学,2019,35(3):29-37.
- [3] 张武,姚晓旭,高炳琪,等.层状地基中的单桩竖向抗压刚度[J].建筑科学,2019,35(9):39-45.
- [4] 张武,姚晓旭,高炳琪,等.单桩竖向抗压刚度的集成刚度法[J].建筑科学,2021,37(5):37-43.
- [5] 李靖森.集成刚度法在基桩计算中的应用[J].公路,2008,(8):107-112.
- [6] ASCE 20—96 Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundation[S].
- [7] Institution of Civil Engineers. Specification for Piling and Embedded Retaining Walls[S].
- [8] GB 50040—2020 动力机器基础设计规范[S].
- [9] JTS 167—2018 码头结构设计规范[S].
- [10] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
- [11] Federation of Piling Specialists. Handbook on Pile Load Testing[M]. Bromley, UK: Devonshire House Business Centre, 2006.
- [12] BOWLES J E. Foundation Analysis and Design[M]. New York, US: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [13] 张武,张波,姚晓旭,等.刚果共和国布拉柴维尔商务中心桩基设计[J].建筑科学,2017,33(11):1-6.
- [14] 张武.竖向抗压单桩承载力实例分析[J].建筑科学,2008,24(1):75-79.
- [15] 张武,高炳琪,姚晓旭,等.后注浆方式对灌注桩承载力影响的试验研究[J].建筑科学,2018,34(11):83-87.

收稿日期:2022-05-31