

超厚砂层地质条件下旋挖钻孔灌注桩施工技术*

何艳龙^{1,2}, 赵付强^{1,2}, 许晓轩^{1,2}

(1. 中交路桥建设有限公司, 北京 100027; 2. 中交路桥华北工程有限公司, 北京 101100)

[摘要] 以济微高速 JWSG-4 标岩溶施工项目为研究对象, 分析了旋挖钻孔灌注桩施工技术及优化方案, 并使用静荷载试验测试桩体性能。研究结果显示, 直桩试验桩与工程桩的平均回弹率分别为 22.7% 与 26.9%, 并且随着桩顶施加荷载的增长, Y1 与 Y2 分担桩顶荷载也在不断增长, 占比分别为 6.3%~25.3%, 6.3%~22.0%。

[关键词] 桩基础; 超厚砂层; 岩溶; 钻孔灌注桩; 施工技术; 试验

[中图分类号] TU753.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0102-04

Construction Technology of Rotary Bored Pile Under Ultra-thick Sand Layer Geological Condition

HE Yanlong^{1,2}, ZHAO Fuqiang^{1,2}, XU Xiaoxuan^{1,2}

(1. Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. Road and Bridge North Engineering Co., Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: Taking the karst construction project of the JWSG-4 section of the Jinan-Weishan Expressway as the research object, the construction technology and optimization scheme of rotary drilled grouting piles are analyzed, and the performance of the pile body is tested by static load tests. The results indicate that the average rebound rate of the test pile and the engineering pile of the straight piles is 22.7% and 26.9%, respectively. With the increase in the pile top load, the load on the top of the pile shared by Y1 and Y2 is also increasing, accounting for 6.3%~25.3% and 6.3%~22.0%, respectively.

Keywords: piles; ultra-thick sand layer; karst; bored pile; construction; test

0 引言

钻孔灌注桩应用广泛^[1-3], 但在岩溶地区进行施工难度非常大^[4-5]。此外, 桥梁桩基施工不仅要依靠先进的技术, 还要根据丰富的施工经验对出现的问题及时进行处理^[6-7]。为解决上述问题, 以济微高速 JWSG-4 标岩溶施工项目为研究对象, 介绍了桥梁的具体情况与所处位置的地质情况, 然后分析了旋挖钻孔灌注桩施工技术通常存在的问题、应对方法与关键技术, 最后提出性能测试检验施工效果。

1 工程概况

济南至微山高速济南至济宁新机场段施工四标段位于山东省泰安市与济宁市境内, 标段起点自

泰安市宁阳县伏山镇, 终点位于济宁市兖州区新驿镇大庄村南。标段的起讫桩号为 K63+400—K88+563, 全长 25.163 km, 根据双向四车道高速公路标准进行建设, 设计速度 120 km/h, 桥涵设计汽车荷载等级采用公路-I 级, 整体式路基宽度 27 m。K67+322.5 堰城坝大桥、K67+605.3 通道桥桥梁桩基遇地下岩层溶洞。地勘显示两座桥梁砂层厚度在 16~23 m。其中 K67+605.3 通道桥处设计为 13 m 矮 T 梁通道桥, 直径 1.2 m 桩基共计 12 根, 桩长 24 m, 桩顶至原地面约 2 m, 即原地面向下 26 m 为设计桩底标高。

此桥的地质情况如下: 0~17.5 m 为砂层, 17.5~19.7 m 为粉质黏土层, 19.7 m 以下为页岩。场区所经区域河流不多, 地表径流主要来源于大气降水。受降水量不均影响, 汛期降水集中, 径流量大, 并且旱季降水量少, 径流量小, 河流干涸, 而钻孔期间地下水位稳定在 7.000 m。项目施工难点如下: 一是采用浆喷桩处理厚砂层地质时, 浆喷桩处理作业范围

* 中交路桥建设有限公司科研课题: 厚砂层、岩溶发育地质桥梁桩基施工技术研究 (ZJLJ-2024-86)

[作者简介] 何艳龙, 项目常务副经理, 副高级工程师, E-mail: hey1@cerbnc.com

[收稿日期] 2024-12-10

是否能保证孔壁不坍塌;泥浆与砂层地质是否能充分搅拌均匀、砂层地质与水泥浆凝结硬化的成桩质量及无侧向抗压强度等数据需待其 28d 后进行取芯检测^[8],并且该方法施工周期较长,无法单纯地从技术角度去判断其砂层地质的处理情况。二是施工过程中需要基于现场试验,结合浆液流失情况以及孔内回填黏土、片石实际情况,判断桩基岩溶四周堵漏情况。现场操作过程需要根据规范处理,控制岩溶地段施工过程中桩身质量。

2 旋挖钻孔灌注桩施工关键技术

在超厚砂层地质条件下,通常使用的旋挖钻孔灌注桩施工工艺流程如图 1 所示。

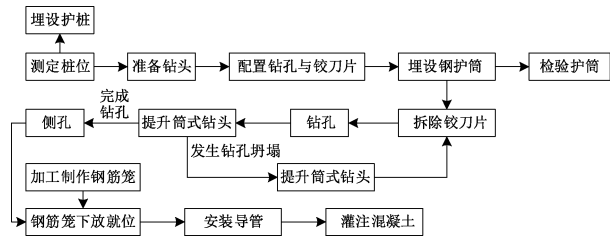


图 1 施工流程

Fig. 1 Construction process

施工关键技术主要包含桩位放样、护壁泥浆、钻孔与灌注混凝土 4 个部分。在桩位放样中,需要提前测定并标注钻孔桩位,便于后续使用钻机对准埋设钢护筒。在制备泥浆时需要严格遵守以下原则:①泥浆需要按照一定比例的水、黏土和添加剂配置而成,并且通过现场试验;②1 桶泥浆的拌制时间需要超过 10min;③制备完成的泥浆不能立即使用,需要放置 1d 后才能用于施工。在钻孔过程中,因为超厚砂层具有较差的稳定性,因此使用增压低速进行钻进,防止坍孔,而处于软硬土交界位置时需要通过二次复钻扫孔进行控制。在灌注混凝土部分,需要对第 1 批灌注的混凝土体积 V 进行计算:

$$\left\{ \begin{aligned} V &\geq \frac{\pi D_1}{4(H_a + H_b)} + \frac{\pi D_2}{4h_a} \\ h_a &= \frac{H_w r_w}{r_c} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: H_a 与 H_b 分别为桩底部、混凝土面距离导管底端的高度; D_1 和 D_2 分别对应桩孔与导管内部的直径; h_a 表示桩孔内部混凝土埋置深度为 H_b 时,泥浆压力所需的高度; H_w 与 r_w 分别为井孔内部水或泥浆的深度与重度; r_c 为井孔内混凝土的重度。

3 旋挖钻孔灌注桩施工优化方案

在岩溶地段超厚砂层地质条件下进行旋挖钻孔灌注桩施工中,经常存在斜孔与漏浆的问题。产

生斜孔可能是因为岩层软硬不均或是桩孔位于溶洞侧壁,一半为岩层,一半为溶洞。针对该问题可进行以下处理,首先要把溶洞用黏土和片石填充起来,片石和黏土按 3:7 的比例将孔桩回填,然后用冲锤将片石和黏土冲击挤入溶洞,待溶洞的填充片石将溶洞挤满后,则正常继续冲孔。产生漏浆问题主要是因为溶洞有半填充和无填充的情况,冲锤击穿溶洞后造成泥浆填充溶洞而形成泥浆面突然下降失浆,或者由于串珠状溶洞或较大裂隙形成漏浆,特别是后一种情况常常造成持续漏浆的情况。针对性处理方法如下:开动泥浆泵迅速往孔内补浆,支撑孔壁防止覆盖层孔壁坍塌,然后迅速使用装载机往孔内大量回填黏土和片石,减缓漏浆速度,直到制止漏浆。

根据上述岩溶地段施工中存在的问题以及相应的处理方法,对常规旋挖钻孔灌注桩施工过程进行优化,即使用浆喷桩对桥梁桩基厚砂层地质进行加固,避免施工完成后钢护筒难以拔出与施工代价高的缺点,并引进片石黏土筑壁法处理溶洞。具体优化流程如下:利用水泥作为固结材料,通过搅拌桩机将固化材料送到砂层深处将水泥和砂层强制搅拌,经过一段时间后硬结成整体,加固厚砂层钻孔灌注桩四周的砂层地质;片石黏土筑壁法施工处理溶洞需要在钻孔至溶洞顶板被击穿后,钻孔桩内泥浆面会快速下降,提前做好补浆的准备工作,一旦流失立即向孔内补浆。用挖掘机向孔内回填片石和黏土进行堵漏,待孔内泥浆面稳定后,重新开钻,如此反复多次,片石和黏土组成的混合物在溶洞内形成固壁,完成护壁和堵漏工作。

4 旋挖钻孔灌注桩施工技术性能测试

性能测试选择静荷载试验,根据桩体的使用功能,分别在桩顶逐级施加轴向压力、轴向上拔力或在桩基承台地面标高一致处施加水平力,观测桩体相应检测点随时间产生的沉降、上拔位移。并通过荷载与位移的关系,判定相应的单桩竖向抗压承载力、单桩竖向抗拔承载力或单桩水平承载力。此处仅探究优化部分对单桩竖向承载力的影响。项目选取 4 根试验桩进行测试,其中 2 根为工程桩,按照优化后的方案进行施工,记为 Y1 与 Y2,而另外 3 根为普通的直桩试验桩,采用常规施工方法,记为 Z1 与 Z2。单桩竖向抗压静载测试装置如图 2 所示。

具体试验流程如下:首先使用油压千斤顶施加荷载,加载方式采用慢速维持荷载法进行逐级加载,每级荷载达到相对稳定后进行下一级加载,直到桩体破坏。加载过程中,若出现以下情况,就可

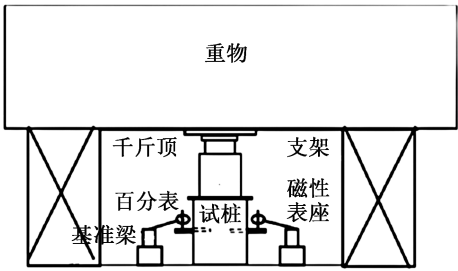


图 2 单桩竖向抗压静载测试装置

Fig. 2 Single pile vertical compressive static load testing device

终止试验,即分级加载过程中,与前一荷载的沉降量对比,桩顶沉降量出现超过 5 倍的情况且 1d 后还未稳定,或已经达到要求的最大承载力。此外,如果出现以下情况时,就可确定对应的抗压承载力,即荷载沉降曲线产生突变,取显著变化点未知的荷载量;未达到预估最大承载力,取对应承受的最大试验承载力;与前一荷载的沉降量相比,桩顶沉降量是其 3 倍,且 1d 内还未稳定,就取前一级的荷载值。最后对数据进行整理,需要先将桩体 j 截面的应力应变关系转化成 j 截面的桩身轴力。再通过 Hooke 定律进行计算:

$$F=A\varepsilon \tag{2}$$

式中: F 、 A 与 ε 分别为弹力、弹性系数与应变值。然后计算第 i 级荷载下载面 j 的受力 $F_{Sj,i}$:

$$\begin{cases} F_{Sj,i}=S_sA_s\varepsilon_{Sj,i} \\ \varepsilon_{Sj,i}=\frac{F_{Sj,i}}{\Delta F} \end{cases} \tag{3}$$

式中: S_s 与 $\varepsilon_{Sj,i}$ 分别为桩体 j 截面钢筋的面积及应变值; A_s 表示桩体截面钢筋的弹性系数。通过桩身相协调以及截面变形的原理,计算见式(4):

$$\begin{cases} F_{Qji}=\varepsilon_{ji}(nA_sS_s+A_dS_{di}) \\ F_{Qji}=nF_{Sj,i}+\frac{F_{Sj,i}}{\Delta F}A_dS_{di} \end{cases} \tag{4}$$

式中: F_{Qji} 与 F_{Qji} 分别为第 i 级与第 j 级荷载作用下截面 j 的轴力; S_{di} 与 A_d 分别对应截面 j 的混凝土面积与弹性系数; n 为钢筋数目。在获取轴力后,就可计算在第 i 级荷载下承受的荷载 f :

$$f(j,j+1)=F_{Qi,j}-F_{Qi+1,j} \tag{5}$$

综合上述内容可完成性能测试试验。

5 工程案例

在 K67+605.3 通道桥施工 0-4 号桩时发现,设计桩长 24m,桩顶至原地面向下 2m,即原地面向下 26m 为设计桩底标高的位置。施工至原地面向下 23m 处时遇岩,钻破岩层后钻头有下掉现象,随后孔

内浆体直接下灌,疑似存在溶洞,孔内浆体短时间内全部流失。随后上方开始塌孔,现场迅速提钻回填渣土,转移旋挖钻机至 1-2 号、1-3 号桩基,施工情况同 0-4 号桩基。具体施工情况如图 3 所示。

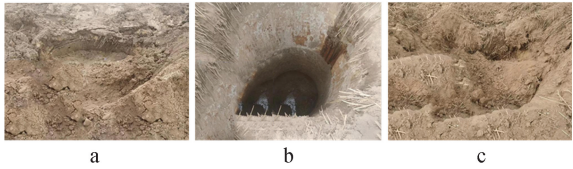


图 3 现场施工情况

Fig. 3 Construction site

在图 3 中,桩基在钻孔施工过程中,钻机首先钻通厚砂层地质,未出现孔壁坍塌现象。钻进至溶洞顶板时,溶洞顶板被击穿后孔壁急速失浆、压力骤降、孔壁坍塌。因此岩溶地区钻孔灌注桩施工宜采取先钻进长桩后短桩、先钻进外围桩后中间桩的方法防止土体位移,按照先易后难的总体施工原则,并需要摸清相邻地层的工程地质情况和岩溶地层下溶洞填充物的性质后,采取合理的方案。试验桩的荷载-沉降变化曲线如图 4 所示。

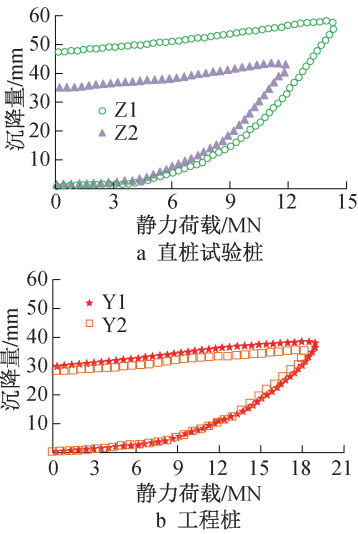


图 4 试验桩的荷载-沉降变化曲线

Fig. 4 Load-settlement curve of test pile

从图 4 可以观察到,4 个试验桩的变化曲线在加载过程中均呈现出缓慢下降的趋势,同时具有较小的斜率。Z1 与 Z2 试验桩在最大静荷载的位置累计沉降量分别为 55.83mm 与 42.47mm,对应的桩顶回弹量与回弹率分别为 9.74、8.32mm 与 21.1%、24.3%。这说明直桩试验桩桩身的弹性压缩较小,并且最大加载量显著低于单桩极限承载力。而 Y1 与 Y2 试验桩在最大静荷载的位置累计沉降量分别为 42.42mm 与 37.41mm,桩顶回弹量与回弹率分别为 9.43、7.65mm 与 29.1%、24.6%。工程桩在加载

过程中的变化趋势与直桩试验桩类似,其最大加载量同样显著低于单桩极限承载力。上述结果表明,工程桩在利用改进的旋挖钻孔灌注桩施工方案后,加载过程中其沉降量的增加明显小于直桩试验桩,并且单桩抗压承载力得到显著增强。为进一步分析改进方案的灌注桩底部对抗压承载力的影响,对工程桩的分担荷载进行汇总,结果如表 1 所示。

表 1 工程桩底部分担荷载结果

Table 1 Load bearing results of the bottom part of engineering pile				
桩顶 荷载/kN	Y1 分担 荷载/kN	Y1 分担 占比/%	Y2 分担 荷载/kN	Y2 分担 占比/%
0	0	0	0	0
2 000	126	6.3	126	6.3
4 000	254	6.4	254	6.4
6 000	450	7.5	433	7.2
8 000	651	8.1	607	7.6
10 000	1 007	10.1	743	7.4
12 000	1 631	13.6	1 121	9.3
14 000	2 566	18.3	2 219	15.9
16 000	3 343	20.9	3 117	19.5
18 000	4 552	25.3	3 964	22.0

随着桩顶施加荷载的增长,工程桩底部分担的桩顶荷载也在不断增大,Y1 与 Y2 分担桩顶荷载的占比范围分别为 6.3%~25.3%,6.3%~22.0%,Y2 试验桩分担的占比相对较少。上述结果说明,在桩身混凝土强度符合要求的基础上,随着桩顶施加荷载增大,从桩体传输到桩端的作用力不断增长。除此之外,通过对改进方案的应用,不仅保证工程质量、缩短工期、降低成本、提高效益,还为建设单位减少了投资。

6 结语

首先分析了桥梁项目的地质情况以及技术难点,然后针对岩溶地段对常规的旋挖钻孔灌注桩施工技术进行优化,最后对施工效果进行测试。结果显示,Z1 与 Z2 试验桩在最大静荷载位置累计沉降量分别为 55.83,42.47mm;Y1 与 Y2 试验桩在最大静荷载位置累计沉降量分别为 42.42,37.41mm。这表明工程桩在加载过程中沉降量的增加显著低于直桩试验桩,对应单桩抗压承载力得到增强。最后随着桩顶施加荷载的增长,工程桩底部分担的桩顶荷载也在不断增大。综上所述,研究方法能为项目的施工质量提供技术保障、降低施工成本、保障施工安全,也为类似工程施工提供可行的指导意见和建议。

参考文献:

[1] 张新宇. 港澳地区大直径钻孔灌注桩施工技术 & 方案优化

[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(7): 57-62.
ZHANG X Y. Construction technology and optimization for large-diameter bored pile in Hong Kong and Macao[J]. Construction technology, 2023, 52(7): 57-62.
[2] 曹进海,叶胜林,肖代胜,等. 岩溶强发育及超厚回填土地层钻孔灌注桩施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 17-22,54.
CAO J H, YE S L, XIAO D S, et al. Construction technology of bored pile in karst strong development and super thick backfill soil layer[J]. Construction technology, 2024, 53(1): 17-22,54.
[3] ALZABEEBEE S, CHAVDA J T, KEAWSAWASVONG S. Analysis of bored pile subjected to machine vibration:an insight into the influence of the soil-pile interface coefficient[J]. Transportation infrastructure geotechnology, 2023, 10(5): 871-887.
[4] 陕耀,肖蔚雄,马伟叁,等. 软土地区钢套管钻孔灌注桩施工对临近高速铁路基变形影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7):2372-2384.
SHAN Y, XIAO W X, MA W S, et al. Influence of developed Benoto piling on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(7):2372-2384.
[5] 薛振年,田叶青,董亚琴,等. 考虑长径比影响的黄土地区钻孔灌注桩桩侧摩阻力取值研究[J]. 公路交通科技,2022,39(12):67-74,85.
XUE Z N, TIAN Y Q, DONG Y Q, et al. Study on value of lateral friction resistance of bored cast-in-situ pile in loess area considering influence of length-diameter ratio[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2022, 39(12):67-74,85.
[6] 张燕军. 考虑桩-土摩阻效应的桥梁桩基水平承载特性研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(5): 134-138.
ZHANG Y J. Research on horizontal bearing characteristics of bridge pile foundations considering pile-soil friction effect[J]. Construction technology,2024, 53(5): 134-138.
[7] 杨磊,朱富丽,张浩. 地铁隧道侧穿桥梁桩基工程注浆加固控制及监测管理研究[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(10): 165-170.
YANG L, ZHU F L, ZHANG H. Grouting reinforcement control and monito-ring management of metro tunnel side-pass-ing bridge pile foundation engineering[J]. Urban mass transit, 2022, 25(10):165-170.
[8] 吴凯,陈荣刚,顾海荣,等. 富水砂层高压旋喷桩注浆材料防渗性实验研究[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(2):533-540,585.
WU K, CHEN R G, GU H R, et al. Experimental study on seepage control performance of high pressure jet grouting pile using grouting material in water-rich sand layer[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(2): 533-540,585.