

水泥搅拌桩和高压旋喷桩在道路软基处理中的应用与分析

詹圣哲

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司厦门分公司,福建 厦门 363700]

摘要:福建省地处中国东南部的沿海地区,其西北部以大量低山、丘陵为主,东南部分布较多的冲积平原,呈依山傍海态势。其中,厦门、泉州、福州等省内沿海城市大量分布着近代沉积的软土地层、深厚淤泥和淤泥质黏土层。为了提高地基承载力,减少地基沉降变形,保证道路路基的稳定性,水泥搅拌桩和高压旋喷桩是该地区工程设计中常见的道路软基处理方式。闽台大道项目位于福建省福清市江镜镇,沿线路基存在大量深厚淤泥,且路线走向下穿高压线走廊。根据项目的具体地质情况、软土层深度和现场建设条件,采用上述 2 种桩型进行了软基处理方式的比较。首先根据规范要求进行参数计算;然后进行现场钻芯试验、复合地基静载荷试验等多项试验,并比较了理论计算结果和试验结果的差异,分析了水泥搅拌桩、高压旋喷桩的优势和劣势;最后总结出了 2 种桩型的适用情况。

关键词:软基处理;水泥搅拌桩;高压旋喷桩

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0217-04

0 引言

在滨海城市的市政道路设计过程中,需详细调查道路沿线地质条件和土层分布情况。其中深厚软土、淤泥质土地基存在压缩性高、透水性低、土层均匀性差、强度低等特点,可能使道路出现路面开裂、路基不均匀沉降等质量事故^[1]。根据详细勘察资料和现场调查,闽台大道沿线路基存在大量深厚淤泥,且路线走向下穿高压线走廊,现场施工环境复杂。为有效提高地基承载力,保证路基稳定性,延长道路使用寿命,根据实际处理效果、经济效益对比,选择不同的桩型对闽台大道项目进行软基处理。

1 工程概况

闽台大道位于福建省福清市江镜镇,为 104 国道规划南连接线的重要组成部分。工程起于蓝色经济产业园园区北侧规划路(现状为农场道路),路线由北向南,终点与江华大道相交,道路全长 1 313.55 m。闽台大道采用城市主干路兼二级公路的道路等级标

准,其标准段的路基宽度为 46 m,分离式路基的宽度为 20.5 m。

本工程现状沿线途经较多养殖鱼塘、河道等水系,水系之间以田埂、便道等隔开,存在大量深厚淤泥质土,并在 WK0+950~WK1+154、EK1+010~EK1+160 路段下穿 220 kV 高压线,经现场测量,高压线最低点距离地面的净空高度为 16.3 m,现场建设条件较为复杂。

2 工程地质条件和土层参数

2.1 工程地质条件

该工程场区主要为冲海积、淤积平原地貌单元。对于沿线揭露的岩土层,按埋藏顺序叙述如下:(1)粉质黏土,以可塑状为主,湿,棕黄色,主要成分为黏粉粒,厚度约 0.9~2.8 m;(2)淤泥质土,呈流塑状态,深灰色,含腐殖质,有臭味,属高压缩性软弱土层,厚度约 8.1~14.6 m;(3)粉质黏土,局部相变为黏土,以可塑状为主,局部硬塑状,灰黄色、褐色,主要成分为黏粒、粉粒,厚度约 0.2~11.2 m;(4)残积砂质黏性土,以可塑状为主,局部软塑,褐红色、灰黄色,主要成分为中粗粒石英颗粒、高岭土,厚度约 0.2~11.7 m;(5)砂土状强风化花岗岩,硬塑,湿,灰黄色,母岩为

收稿日期:2024-05-11

作者简介:詹圣哲(1991—),男,学士,工程师,从事道路设计工作。

花岗岩类,主要成分为粗中粒石英颗粒、长石、高岭土等,厚度约 2.7 ~ 4.8 m。

2.2 土层参数

根据现场调查和工程详细勘察资料,列出该场地各岩土层设计参数建议值,见表 1。

表 1 各岩土层设计参数建议值

序号	土层名称	土层平均厚度 /m	压缩模量 /MPa	地基承载力 /kPa	黏聚力 / kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	孔隙比	桩侧摩阻力特征值 q_{si} /kPa
1	粉质黏土	1.0	3.5	120	29.0	12.8	0.89	12
2	淤泥质土	8.5 ~ 12.0	2.5	85	12.9	9.5	1.49	7
3	粉质黏土	5.0	4.5	150	35.2	15.6	0.71	15
4	残积砂质黏性土	5.0	9.5	220	25.7	20.5	1.05	15
5	全风化花岗岩	3.0	25.0	300	22.0	25.0		

表 2 水泥搅拌桩、高压旋喷桩处理方案对比表

处理方法	原理	设备高度 h/m	桩径 d/m	每延米造价 / 元	桩间距 S/m	单位处理面积每延米造价 / 元	应用情况
水泥搅拌桩法	水泥固化剂和地基土通过机械强制搅拌形成桩体	≥ 15	0.5	60	1.3	41	工艺成熟,适用于各类软土、承载力 ≤ 110 kPa 的黏性土、粉土等土层,加固深度超过 12 m 后,成桩效果较差
高压旋喷桩法	高压喷射水泥浆切割土体并与土体拌和形成桩体	≤ 3	0.5	150	1.5	77	工艺成熟,适用于各类软土、承载力 ≤ 110 kPa 的黏性土、粉土、黄土、人工填土、砂土等土层,加固深度可达 25 m

本工程路基平均设计填土高度为 3.0 m,路段沿线存在大量工程性能较差的淤泥质土,其天然地基承载力和沉降变形量无法满足道路使用要求,因此需要对其进行软基处理。

由表 2 可知,水泥搅拌桩、高压旋喷桩的应用范围基本相同,但水泥搅拌桩的单位面积每延米造价低于高压旋喷桩,其经济合理性较优。因此在满足道路使用要求的前提下,优先采用水泥搅拌桩作为主要的软基处理方式。

《城镇道路工程施工与质量验收规范》(CJJ 1—2008)第 6.3.7 条第 5 款规定^[3],机械设备与 220 kV 导线之间的最小垂直距离为 6.0 m,最小水平距离为 6.0 m。本工程在 WK0+950 ~ WK1+154、EK1+010 ~ EK1+160 路段下穿 220 kV 高压线,其最低点距离地面的净空仅为 16.3 m,现场机械设备所需的施工净空受限。而高压旋喷桩机械设备高度一般不超过 3 m,因此,为保证现场施工安全,在该路段前后 8 m 范围内采用高压旋喷桩对软基进行处理。

道路下穿高压线处软基处理平面示意图见图 1。

本工程范围内的部分路段(如 ZK1+640 ~ ZK1+740 路段)存在加固深度超过 12 m 的淤泥质土,采

3 软基处理设计

3.1 软基处理方案的对比与选择

根据工程的具体地质情况、软土层深度和现场建设条件,对不同桩型的软基处理方案进行选择。水泥搅拌桩、高压旋喷桩的处理方案对比表见表 2^[2]。

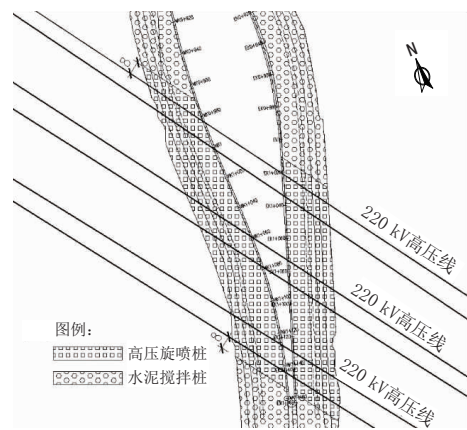


图 1 道路下穿高压线处软基处理平面示意图

用水泥搅拌桩对其进行处理时,埋深较深处无法成桩,处理效果较差。此种情况下,考虑采用高压旋喷桩的处理方式,在其高压喷射流的作用下,可充分切割、搅拌深处土体,充分拌和并形成完整的竖向增强体^[4]。

ZK+1640 ~ ZK1+740 路段软基处理里面示意图见图 2。

3.2 桩体的理论计算和分析

3.2.1 桩体布置^[5]

(1)水泥搅拌桩。拟设计的水泥搅拌桩在平面上

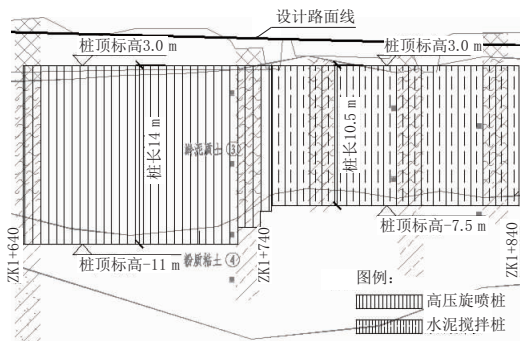


图2 ZK1+640~ZK1+740路段软基处理里面示意图

采用正三角形布置,间距 $S=1.3\text{ m}$, 桩径 $d=0.5\text{ m}$, 拟定桩长 L 分别为 $10.5、14.0\text{ m}$, 混凝土立方体抗压强度平均值 $f_{cu}=2.0\text{ MPa}$; 预压期 6 个月, 采用湿法施工。

(2)高压旋喷桩。拟设计的高压旋喷桩在平面上采用正三角形布置,间距 $S=1.5\text{ m}$, 桩径 $d=0.5\text{ m}$, 拟定桩长 L 分别为 $10.5、14.0\text{ m}$, 混凝土立方体抗压强度平均值 $f_{cu}=3.5\text{ MPa}$; 预压期 6 个月, 采用单管法施工。

3.2.2 桩体单桩竖向承载力特征值计算

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012) 的规定, 水泥搅拌桩和高压旋喷桩的单桩竖向承载力特征值 R_a 按下式计算:

$$R_a = u_p \sum_{i=0}^{n-1} q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (1)$$

式中: u_p 为桩的周长, m ; q_{si} 为桩周第 i 层土的侧阻力特征值, kPa ; l_i 为桩长范围内第 i 层土的厚度, m ; q_p 为桩端土未经修正的承载力特征值, kPa ; α 为桩端土承载力折减系数, 对于水泥搅拌桩取 $\alpha=0.5$, 对于高压旋喷桩取 $\alpha=1.0$; n 为桩长范围的土层数; A_p 为桩的截面积, m^2 。

验证时, 对于水泥搅拌桩:

$$R_a \leq \eta f_{cu} A_p \quad (2)$$

对于高压旋喷桩:

$$f_{cu} \geq 4 \frac{\lambda R_a}{A_p} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度平均值, 对于高压旋喷桩, 采用 28 d 龄期的 f_{cu} , 对于水泥搅拌桩, 采用 90 d 龄期的 f_{cu} ; η 为桩身强度折减系数, 取 $\eta=0.25$; λ 为单桩承载力发挥系数, 取 $\lambda=1.0$ 。

单桩竖向承载力 R_a 计算结果如表 3 所示。

3.2.3 复合地基承载力计算

根据《建筑地基处理技术规范》的规定, 经刚性桩处理后的复合地基承载力 f_{spk} 特征值计算式为:

表3 单桩竖向承载力特征值计算表

桩型	L/m	R_{a1}/kN	R_{a2}/kN	$R_a = \min(R_{a1}, R_{a2})$
水泥搅拌桩	10.5	150.5	98.1	98.1
	14.0	189.0	98.1	98.1
高压旋喷桩	10.5	165.2	171.7	165.2
	14.0	203.7	171.7	171.7

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (4)$$

式中: λ 为单桩承载力发挥系数, 取 $\lambda=1.0$; β 为桩间土发挥系数, 对于水泥搅拌桩取 $\beta=0.5$, 对于高压旋喷桩取 $\beta=1.0$; m 为面积置换率; f_{sk} 为处理后桩间土地基承载力特征值, 取 $f_{sk}=100\text{ kPa}$ 。

复合地基承载力计算结果见表 4。

表4 复合地基承载力计算结果

桩型	桩长 L/m	f_{spk}/kPa
水泥搅拌桩	10.5	110.4
	14.0	110.4
高压旋喷桩	10.5	174.8
	14.0	178.1

3.2.4 沉降值计算

根据《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013) 中的规定, 软土路基沉降值计算式见表 5。

表5 路基沉降值计算公式表

计算步骤	计算内容
地基主固结沉降 S_c	采用常规分层总合法计算
地基总沉降 S_{Σ}	$S_{\Sigma} = m_s \times S_c$
任意时刻沉降 S_t	$S_t = (m_s - 1 + U_t) \times S_c$

表 5 中: m_s 为沉降系数, 根据工程现场实际情况, 取 $m_s=1.2$; U_t 为固结度, 取 $U_t=0.9$ 。路基沉降计算结果见表 6。

表6 路基沉降计算表

桩型	桩长 L/m	主固结沉降 S_c/mm	总沉降 S_{Σ}/mm	预压期沉降 S_t/mm	工后沉降 S_s/mm
水泥搅拌桩	10.5	171.4	231.2	190.3	17.3
	14.0	223.1	270.0	247.6	22.4
高压旋喷桩	10.5	102.9	124.5	114.2	10.3
	14.0	103.4	125.1	114.8	10.3

本工程道路等级为城市主干路, 各项设计指标要求见表 7。

计算结果表明: 在理想情况下采用水泥搅拌桩、高压旋喷桩均能满足设计需求, 提高地基承载力, 减少地基沉降变形, 保证道路路基的稳定性; 且高压旋

表7 设计指标要求表

桩型	单桩承载力 R_a /kN	复合地基承载力 f_{spk} /kPa	工后沉降值 S_s /mm
水泥搅拌桩	≥ 90	≥ 105	≤ 200
高压旋喷桩	≥ 150	≥ 160	≤ 200

喷桩的处理效果优于水泥搅拌桩。

4 现场试桩与检测

根据理论计算结果,进行现场试桩施工,并于90 d和28 d后,按《建筑地基处理技术规范》中的试验要求,分别对水泥搅拌桩、高压旋喷桩开展钻芯试验、复合地基静载荷试验、复合地基竖向增强体静载荷试验和沉降观测试验。各项试验结果见表8~10,沉降-龄期曲线如图3所示。

表8 钻芯试验结果表

桩型	桩长 L /m	芯样特征
水泥搅拌桩	10.5	芯样较连续、完整
	14.0	芯样深度12 m处存在夹泥
高压旋喷桩	10.5	芯样连续、完整
	14.0	芯样连续、完整

表9 复合地基静载荷试验结果表

桩型	桩长 L /m	复合地基承载力特征值 /kPa
水泥搅拌桩	10.5	116
	14.0	104
高压旋喷桩	10.5	177
	14.0	185

表10 单桩竖向静载试验结果表

桩型	桩长 L /m	单桩竖向承载力特征值 /kN
水泥搅拌桩	10.5	105
	14.0	91
高压旋喷桩	10.5	169
	14.0	180

综合现场试桩的各项试验结果可知:

(1)当水泥搅拌桩桩长超过12 m时,易出现桩体不连续,导致单桩竖向承载力特征值、沉降值与理论计算值存在差异,影响道路软基处理效果;

(2)当采用高压旋喷桩处理深厚软土层时,其桩体完整,成桩效果较好,且各项试验结果与理论计算

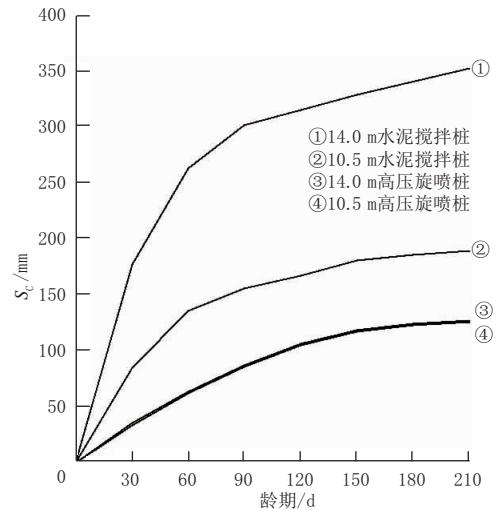


图3 沉降-龄期曲线图

值相近;

(3)高压旋喷桩的各项试验结果均优于水泥搅拌桩,进一步验证了高压旋喷桩整体处理效果较好的结论。

5 结语

(1)水泥搅拌桩的经济合理性较好,在满足道路使用要求时,应优先采用水泥搅拌桩的处理方式,可有效节约工程成本。

(2)高压旋喷桩的成桩机械设备小、高度低,适用于路段下穿高压线走廊等场地净空受限情况的地基处理。

(3)当路段下方的软土层超过一定深度时,采用水泥搅拌桩进行处理易出现断桩现象,此时应优先采用高压旋喷桩的处理方式,保证软基处理效果。

(4)高压旋喷桩处理效果优于水泥搅拌桩,当需要道路路基对周边既有建筑产生较小影响,路基沉降要求较严格时,可考虑采用高压旋喷桩。

参考文献:

[1] 刘素彦,武志鹏.滨海城市建设软基处理施工工艺[J].云南水利发电,2023,39(1):168-171.
 [2] 何长明,黎军.道路软基处理方案选型研究[J].岩土工程技术,2023,37(5):574-578.
 [3] CJJ 1—2008,城镇道路工程施工与质量验收规范[S].
 [4] 胡鹏,潘桥泓.浅谈高压旋喷桩在城市道路软基处理中的应用[J].价值工程,2020,39(7):164-166.
 [5] 汪焕玲.沿海地区道路软基处理设计[J].科学技术创新,202(36):115-118.