

水泥土搅拌桩及CFG桩在泥炭质土中的应用研究

余以文¹, 郁庆荣², 钟伟滔¹

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510030; 2. 湛江市高铁新城建设投资有限公司, 广东 湛江 524002)

摘要: 水泥土搅拌桩和水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)是道路软土路基处理中常用的2种手段, 应用广泛且具有良好的效果。在湛江市某道路工程中, 以地质勘察资料为基础, 根据相关规范设计计算, 制定合理的试验方案, 进行水泥土搅拌桩、CFG桩的成桩试验, 并进行相应的检测, 对采用水泥土搅拌桩和CFG桩2种手段进行泥炭质土处理的适用性展开比选。比选结果表明: 采用长螺旋钻孔工艺的CFG桩对泥炭质土具有较好的适应性, 能够有效改善泥炭质土软基的强度和稳定性, 因此是更为合理和可靠的选择。

关键词: 泥炭质土; 淤泥质土; 软基处理; 水泥土搅拌桩; CFG桩

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0298-04

Research on Application of Cement-soil Mixing Piles and CFG Piles in Peaty Soil

YU Yiwen¹, YU Qingrong², ZHONG Weitao¹

(1. Guangzhou Urban Planning, Survey and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510030, China; 2. Zhanjiang High-speed Railway New Town Construction Investment Co., Ltd., Zhanjiang 524002, China)

Abstract: The cement-soil mixing pile and the cement fly-ash gravel (CFG) pile are two common means for soft soil subgrade treatment in road engineering with the wide application and good effects. In a road construction project in Zhanjiang City, based on the geological survey data and the design calculation of the relevant specifications, a reasonable testing scheme is prepared to conduct the pile finishing test of cement-soil mixing piles and CFG piles, and the corresponding detection is carried out. The applicability of two means using cement-soil mixing pile and CFG pile to treat the peaty soil is compared. The comparison results indicate that CFG pile by using the long auger drilling process has the better adaptability to peaty soil, and can effectively improve the strength and stability of soft peaty soil foundation. Therefore, CFG pile is a more rational and reliable choice.

Keywords: peaty soil; mucky soil; soft foundation treatment; cement-soil mixing pile; CFG pile

0 引言

在湛江市某道路工程中, 工程场地范围广泛分布泥炭质土、淤泥质黏土, 以流塑状态为主, 工程性质较差, 部分地段厚度较大, 承载力特征值 $f_{ak}=30\sim 70$ kPa, 是场地内的主要软弱层, 易造成地面沉降和边坡不稳, 未经处理不能作为拟建道路和管线的基础持力层。该场地特殊的工程性质使得道路软基处理成为了项目质量、成本控制的关键问题之一。本文旨在通过试验手段, 对比水泥土搅拌桩和CFG桩2

种处理方式的成桩效果, 为泥炭质土路基的处理提供经济、可行的方案。

1 背景技术介绍

1.1 泥炭质土的特性

场地范围内的泥炭质土见图1。根据本项目地质勘察报告, 场地内的泥炭质土呈黑色、浅灰色, 饱和, 流塑, 含较多腐木和植物根, 黏性一般, 具极高压缩性。根据室内土工试验成果资料, 该层土的有机质含量为6.14%~21.3%, 平均值14.8%, 层顶埋深为0.00~7.40 m, 厚度为0.70~7.40 m, 平均厚度3.44 m, 天然地基承载力仅有30 kPa。如果不加以适当处理, 泥炭质土在道路建成后易发生沉降破坏, 严重影响道路使用寿命和安全性。根据湛江市当地经验, 地质勘察报告建议采用水泥土搅拌桩、砂桩、碎石桩

收稿日期: 2024-01-31

作者简介: 余以文(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政规划设计工作。

通信作者: 钟伟滔(1994—), 男, 学士, 助力工程师, 从事工程施工工作。电子邮箱: 554973469@qq.com

或CFG桩等地基处理措施。

1.2 泥炭质土常用处理方法

常见的泥炭质土软基处理方法包括排水固结法和复合地基法^[1]。排水固结法主要包括堆载预压、超载预压、真空预压、袋装砂井、真空联合堆载预压等方法;复合地基法主要包括水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、CFG桩和砂(碎石)桩等方法。这些方法通过改善泥炭质土的物理性质或加固土体结构,来提高软基的承载能力和稳定性。



图1 场地范围内的泥炭质土

相比复合地基法,排水固结法具有造价较低的优势,但在泥炭质土中应用时,也可能存在以下问题:容易导致地面沉降过大,给周边建构筑物带来安全隐患;在有透水层时,地下水源持续补充给软土层,将导致处理效果较差且固结周期加长;由于泥炭土的内部不均匀性,排水固结处理完成后的地基可能仍存在不均匀沉降;泥炭土植物根系丰富、孔隙极多,密封系统难以保障,采用真空预压等排水固结法处理时可能效果不佳;另外,排水固结法对于地基强度的提高一般要低于复合地基法。

因此复合地基法一般比排水固结法拥有更广泛的应用场景。

1.3 水泥土搅拌桩对泥炭质土的适应性

水泥搅拌法应用广泛,是加固饱和软黏土地基的一种成熟方法。它利用水泥作为固化剂的主剂,利用搅拌机械在地基中就地强制搅拌软土和固化剂(浆液状或粉体状),使水泥和软土之间产生一系列物理化学反应,使软土硬结,并与桩间土、褥垫层共同作用,形成复合地基,从而提高地基强度。其施工简便、应用广泛、造价较低,且相比排水固结法工期较灵活。

针对水泥土搅拌桩在有机质土中的适用性,建筑、公路的行业规范均提出,水泥土搅拌桩用于处理泥炭土、有机质土时,必须通过现场和室内试验来确定其适用性。从土工试验、工程经验和实践证明来看,高有机质含量会明显影响加固土的强度,从而降

低复合地基的强度。

国内也不乏在有机质含量较高的泥炭质土地基中应用水泥土搅拌桩的工程经验,特别是在云南地区,如昆明地铁3号线工程^[2]。在配合比、养护龄期、外加剂掺入比等合理的情况下,水泥土搅拌桩可以适用于泥炭质土处理。

1.4 CFG桩对泥炭质土的适应性

CFG桩即为水泥粉煤灰碎石桩,是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌和形成强度等级为C5~C25的高黏结强度桩。CFG桩可以全桩长发挥桩的侧摩阻力,而且当桩端落在较好的土层上时,还具有较大的端承力,可将荷载传递给较深的土层。一般情况下,CFG桩复合地基具有承载力提高幅度大、沉降较小的优点。

在一般情况下,CFG桩的单位造价较水泥土搅拌桩高,但由于其成桩过程受泥炭质土有机质含量的影响相对较小,根据以往工程经验,其处理效果也较水泥土搅拌桩好^[3]。

CFG桩在泥炭质土处理中应用广泛,同样在云南地区的软土地基处理中成功案例较多,如南昆线七甸泥炭质土工程、昆明地区环滇池三环路路基工程等^[4]。

2 试验方案的确定

本次研究参考《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTGT D31-02-2013),对水泥土搅拌桩和CFG桩的承载力、沉降、稳定性进行计算,以初步确定试桩的桩长、桩间距、桩径等参数。

2.1 水泥土搅拌桩计算方法

2.1.1 单桩承载力和复合承载力计算方法

水泥土搅拌桩复合地基竖向承载力特征值 f_{spk} 按下式预估:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk} \quad (1)$$

式中: m 为面积置换率, $m=A_p/A$,对于三角形布置, $A=0.866s^2$,其中 s 为桩间距; R_a 为搅拌桩单桩竖向承载力特征值; A_p 为桩截面面积, m^2 ; β 为桩间土承载力折减系数; f_{sk} 为桩间土天然地基承载力特征值,kPa。

式(1)中的 R_a 按下列公式预估:

$$R_a = u_p \sum q_{si} L_i + \alpha q_{pk} A_p \quad (2)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (3)$$

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 为第 i 层土层的厚度, m ; α 为桩端土天然地基承载力折减系数; q_{pk} 为桩端地基土未经修

正的承载力特征值, kPa; η 为搅拌桩桩身强度折减系数; f_{cu} 为与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块, 边长为 70.7 mm 的立方体在标准养护条件下的 90 d 龄期抗压强度平均值, kPa。

式(2)计算结果为由地基土抗力所提供的搅拌桩单桩竖向承载力特征值, 式(3)计算结果为由水泥土强度确定的搅拌桩单桩竖向承载力特征值, 应取两者较小值代入式(1)计算。

2.1.2 沉降计算方法

水泥土搅拌桩复合地基的沉降计算应包括复合地基加固区的沉降值 S_1 和加固区下卧层的沉降值 S_2 。

复合地基加固区的沉降值 S_1 按下式计算:

$$S_1 = \sum (\Delta p_i / E_{psi}) \Delta h_i \tag{4}$$

$$E_{psi} = mE_p + (1-m)E_{si} \tag{5}$$

上述式中: Δp_i 为地基中各分层中点的附加应力, kPa; E_{psi} 为各分层的桩土复合压缩模量, kPa; Δh_i 为地基中各分层的初始厚度, m; E_p 为桩体压缩模量, kPa; E_{si} 为各分层的土体压缩模量, kPa。

加固区下卧层的沉降值 S_2 可按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)的有关规定计算。

2.1.3 稳定性计算方法

路堤整体抗剪稳定性按下式计算:

$$\tau_{ps} = m\tau_p + (1-m)\tau_s \tag{6}$$

式中: τ_{ps} 为复合地基抗剪强度; τ_p 为桩体部分的抗剪强度; τ_s 为土体部分的抗剪强度。

2.2 CFG 桩计算方法

CFG 桩承载力、沉降、稳定性计算方法与水泥土搅拌桩相同, 此时式(3)中的桩身强度折减系数 η 可取 0.35~0.50。

2.3 相关计算参数选取

选取本项目较不利的工点进行验算。根据地质勘察报告, 该工点的土层物理力学指标建议值见表 1。

该工点泥炭质土厚度为 3.8 m, 淤泥质粉质黏土厚度为 5.2 m, 淤泥质粉质黏土以下为粉质黏土层, 可作为水泥土搅拌桩和 CFG 桩的持力层。

水泥土搅拌桩桩身强度折减系数 η 取 0.25, CFG 桩桩身强度折减系数 η 取 0.4; 桩间土承载力折减系数 β 取 0.9; 桩端土天然地基承载力折减系数 α 取 0.6。

2.4 设计计算结果

(1) 水泥土搅拌桩。当水泥土搅拌桩桩间距采

表 1 土层物理力学指标建议值

参数名称	地层层号		
	②	② ₁	④ ₁
	泥炭质土	淤泥质粉质黏土	粉质黏土
含水量/%	77.8	42.9	23.5
比重	2.62	2.65	2.69
质量密度/(g·cm ⁻³)	1.51	1.79	1.97
孔隙比	2.257	1.187	0.695
塑性指数/%	23.5	15.3	15.3
黏聚力/kPa	4.0	4.4	9.3
内摩擦角/(°)	5.6	7.4	9.2
压缩系数/MPa ⁻¹	1.560	0.808	0.382
压缩模量/MPa	2.59	3.55	5.45
地基承载力特征值/kPa	30	70	150
桩侧摩阻力特征值/kPa	4	4	25

用 1.5 m、桩径采用 0.5 m、桩长采用 12 m、90 d 立方体抗压强度平均值 f_{cu} 不小于 3.0 MPa 时, 按以上公式和计算参数可得: 单桩承载力满足 150 kN, 复合地基承载力达到 100 kPa, 沉降、稳定性均满足《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTGT D31-02—2013) 的要求。

(2) CFG 桩。当 CFG 桩桩间距采用 1.6 m、桩径采用 0.5 m、桩长采用 12 m、90 d 立方体抗压强度平均值 f_{cu} 不小于 5.0 MPa 时, 按以上公式和计算参数可得: 单桩承载力满足 160 kN, 复合地基承载力达到 100 kPa, 沉降、稳定性均满足《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》的要求。

2.5 确定试桩方案

2.5.1 水泥土搅拌桩

水泥土搅拌桩试桩桩间距采用 1.5 m, 梅花形布置; 桩径采用 0.5 m、桩长采用 12 m, 采用双向搅拌机械施工, 二喷四搅。

由《广东省建筑地基处理技术规范》(DBJ/T 15-38—2019) 可知, 土质对水泥土试块抗压强度的影响极其显著。当粉质黏土+9% 水泥时, 其 90 d 立方体抗压强度为 2.84 MPa; 当淤泥质土+21% 水泥时, 其 90 d 立方体抗压强度只有 1.71 MPa。若要使淤泥质土+水泥搅拌桩的 90 d 立方体抗压强度平均值 f_{cu} 达到 3.0 MPa, 就需要较高的水泥掺量。因此, 试验拟采用 33% 的水泥掺量。

同时考虑到泥炭质土的高有机质含量会明显影响加固土的强度, 试验还设置 2 组对照组: 第 1 组不

添加外加剂;第 2 组添加外加剂,以改善水泥和有机质土的结合。外加剂参考广东地区有关经验,采用硫酸钠、氯化钠、三乙醇胺,掺量分别为水泥质量的 2%、1%、0.05%。

2.5.2 CFG 桩

CFG 桩试桩桩间距采用 1.6 m,梅花形布置;桩径采用 0.5 m、桩长采用 12 m。

CFG 桩施工常用长螺旋钻孔成桩、振动沉管成桩 2 种方法。考虑到场地范围内的软土性质极差,且场地周边存在现状桥梁、建筑等,采用挤土工艺容易导致地基失稳从而影响周边构筑物安全,因此本次试验选用长螺旋钻孔成桩工艺。

3 试验过程分析和结果讨论

3.1 水泥土搅拌桩试验结果

水泥土搅拌桩试桩完成 28 d 后,对水泥土搅拌桩进行钻芯取样,以及单桩承载力、复合地基承载力检测。

不添加外加剂的第 1 组水泥土搅拌桩桩身完整性判定均为 IV 类桩,多处芯样特别是泥炭质土层的芯样松散、水泥含量少,呈软塑状(见图 2)。单桩承载力检测不满足要求,但复合地基承载力检测满足 100 kPa 要求。



(a)水泥土搅拌桩试桩芯样 1# (b)水泥土搅拌桩试桩芯样 2#

图 2 第 1 组水泥土搅拌桩芯样照片

添加外加剂的第 2 组水泥土搅拌桩桩身也未达到预期效果,完整性判定同样为 IV 类桩,相比第 1 组水泥土搅拌桩无明显改善(见图 3)。单桩承载力检测不满足要求,但复合地基承载力检测满足 100 kPa 要求。



(a)水泥土搅拌桩试桩芯样 3# (b)水泥土搅拌桩试桩芯样 4#

图 3 第 2 组水泥土搅拌桩芯样照片

3.2 CFG 桩试验结果

试桩完成 28 d 后,对 CFG 桩进行钻芯取样,以及单桩承载力、复合地基承载力检测。检测结果表明:CFG 桩的桩身完整性良好(见图 4),为 I 类桩;单桩承载力、复合地基承载力均满足设计要求。



图 4 CFG 桩芯样照片

3.3 结果分析

经核查,试验过程中,施工工艺、配合比等均严格按照试桩方案和地基处理的相关施工规范执行。

根据水泥土搅拌桩的试桩结果,即使试验中使用了较高的水泥掺量并添加了有利于改善水泥土结合的外加剂,成桩效果仍不理想。原因可能是泥炭质土中夹杂了过多植物根系,无法与水泥有效黏结形成整体;且其 pH 值低,属于酸性,即土中 H⁺ 含量高,会减少水泥水化物的生成量,使水泥土强度显著降低。

虽然水泥土搅拌桩复合地基承载力满足设计要求,但是在《广东省建筑地基处理技术规范》中提到,单桩载荷试验与复合地基载荷试验结果不一致时应该如何处理是工程界常见问题,由于复合地基载荷试验的时间效应问题比单桩载荷试验突出,原则上应以单桩载荷试验结果为准。据此判定水泥土搅拌桩不适用于本项目泥炭质土的软土路基处理。

CFG 桩试验结果表明,在泥炭质土软基处理中,CFG 桩比水泥土搅拌桩更适用,可以满足设计要求。由于 CFG 桩的成桩过程不需要与泥炭质土结合,因此其受有机质含量的影响较小,成桩效果也更好。

4 结 语

(1)受有机质含量过高的影响,水泥土搅拌桩在本项目泥炭质土中不易成桩,桩身完整性、单桩承载力均无法达到要求,不宜用于泥炭质土路段的处理。

(2)采用长螺旋钻孔工艺的 CFG 桩对泥炭质土具有较好的适应性,能够有效改善泥炭质土软基的强度和稳定性。

(下转第 306 页)