

水泥搅拌桩单桩及复合地基承载力特性分析

马蓉蓉

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 针对软土地基的特点,采用水泥搅拌桩复合地基对路段进行处理,以减少工后沉降、提高地基承载力。以莆田市涵江区火车站前道路建设项目为依托,分析水泥搅拌桩布置间距、桩径、桩长、水泥土强度等因素对单桩及复合地基承载力特征值与路基沉降的影响,以达到合理优化设计参数、在实际工程中节约成本的目的。

关键词: 水泥搅拌桩;单桩竖向承载力;复合地基承载力;工后沉降

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)05-0200-04

0 引言

我国幅员辽阔,跨纬度较广,地质形态多样,土层分布错综复杂。在江浙、沪闽等沿海城市,多分布着含水率较高、压缩性较大的淤泥、黏性土、粉质土等软弱土层,在该地基上修筑路堤,需要面临地基承载力是否足够、沉降量大、沉降速率过缓等问题,直接影响着工程的社会效益和经济效益。

近年来,水泥土搅拌法在软土地基处理中,被广泛应用。其具有如下优点:

(1)水泥土搅拌桩是黏结材料桩,具有刚柔相济的受力特征。

(2)承载力提高幅度较大,桩长以及桩的布置形式具有可调节性。

(3)施工相对简单,工期可控。

(4)采用水泥作为固化剂材料,可取得较好的时间和经济效益。

1 水泥搅拌桩复合地基基本理论

水泥搅拌桩适用于处理正常固结的淤泥、淤泥质土、饱和粘性土地基。

它是利用水泥作为固化剂,通过特制的搅拌机械,就地边钻进搅拌、边向软土中喷射浆液或雾状粉体,将软土固化成为具有整体性、水稳性和一定强度的水泥加固土,提高地基稳定性,增大加固土体变形模量,水泥搅拌桩与桩间土共同构成复合地基,承担上部结构传来的荷载^[1]。

水泥搅拌桩单桩竖向承载力由土的抗力与桩体

强度共同决定。其中,土的抗力由桩侧摩阻力 q_s 和桩端阻力 q_p 两部分组成,见图1。

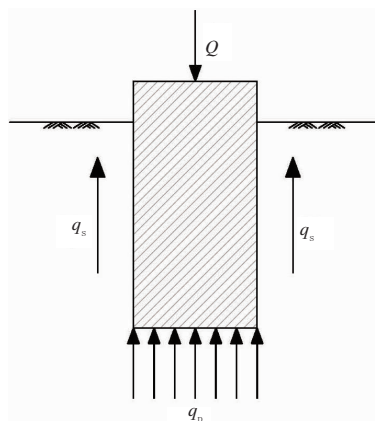


图1 水泥搅拌桩受力分析示意图

1.1 单桩竖向承载力特征值

水泥搅拌桩单桩竖向承载力特征值可按式(1)估算,并应同时满足式(2)的要求^[2]。

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

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

式中: R_a 为单桩竖向抗压承载力特征值(kN); u_p 为桩的截面周长(m); q_{si} 为第*i*层土的桩侧摩阻力特征值(kPa); l_i 为桩长范围内第*i*层土的厚度(m); α 为桩端土地基承载力折减系数; q_p 为桩端土地基承载力特征值(kPa); A_p 为单桩截面积(m^2); η 为桩体强度折减系数; f_{cu} 为桩体90d龄期的抗压强度平均值(kPa)。

1.2 复合地基承载力特征值

复合地基承载力特征值可按式(3)估算^[2]:

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (3)$$

收稿日期: 2022-09-02

作者简介: 马蓉蓉(1990—),女,硕士,工程师,从事道路设计工作。

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值(kPa); f_{sk} 为桩间土地基承载力特征值(kPa); β 为桩间土承载力修正系数,结合工程经验取值; m 为复合地基置换率。

2 工程实例

2.1 工程概况

本项目进站大道位于福建省莆田市涵江区火车站,是连接火车站与滨海大道的南北走向主干路,是涵江火车站与城市各级道路相连接的重要交通路线,为进出火车站的车辆及旅客提供出行通道。

表 1 地勘土体参数表

层号	土层名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	天然地基承载力基本容许值 f_{a0}/kPa	固结快剪强度		水泥搅拌桩	
				内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	桩侧土的侧阻力特征值 q_s/kPa	桩端端阻力特征值 q_p/kPa
1	素填土	18.4	70	21.4	13.8	8	
1-1	杂填土	18.0	70	*14	*13	9	
2	淤泥	16.1	45	9.13	6.33	8	
3	粉质黏土	18.7	180	29.66	18.11	22	180
3-1	中砂	19.2	200	*5	*28	25	200
4	碎卵石	20.5	320	*4	*38	45	320
5	残积砂质黏性土	18.2	220	12.20	22.70		
6	全风化花岗岩	18.6	350	*26	*26		
7	砂土状强风化岩	19.0	500	*30	*28		
8	碎块状强化风岩	20.5	1 000	*50	*32		
9	中等风化花岗岩	26.3	5 000	*180	*35		

2.3 水泥搅拌桩布置

平面采用等边三角形布置,桩顶与路堤之间设置 50 cm 级配碎石褥垫层,可有效减小桩土应力比,改善接近桩顶部分桩体的受力状态,垫层中间再敷设一层双向钢塑土工格栅。水泥搅拌桩用于路基段地基处理时布置见图 2。

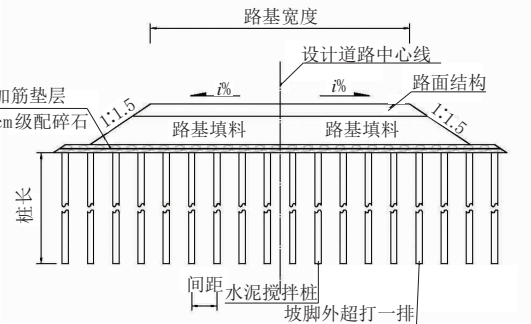


图 2 路基段水泥搅拌桩地基处理布置图

3 单桩竖向承载力与复合地基承载力特征值计算及特性分析

为进一步探讨各项参数对单桩及复合地基承载力特征值的影响规律,本文选择水泥土强度、桩长、桩径以及布置间距作为主要影响因素,根据式(1)~式(3),分别对单桩及复合地基承载力特征值计算分

路基标准横断面宽 51 m,双向六车道,平均填方高度 1.54 m。

2.2 地质条件

拟建场地地貌属于山前冲积平原或河流冲积平原地貌,工程场地主要为现有道路及道路两侧空地,整体走向较为平坦开阔,局部略有起伏。地勘揭示的 2# 孔土层分布情况为:素填土 1.8 m,淤泥 4.3 m,粉质黏土 9 m,碎卵石 1.9 m,全风化花岗岩 2.3 m,砂土状强风化花岗岩 6.1 m,孔口标高 4.52 m,桩顶设计标高 4.0 m。各土层物理力学参数见表 1。

析。其中,桩端土地基承载力折减系数 α 取 0.5,桩体强度折减系数 η 取 0.33,桩间土承载力修正系数 β 取 0.9。

3.1 水泥土强度的影响

为考虑水泥土强度对单桩和复合地基承载力特征值的影响,选用水泥搅拌桩桩径 50 cm,桩间距 1.5 m,桩长 6 m,得到不同水泥土强度条件下计算结果见图 3 和图 4。

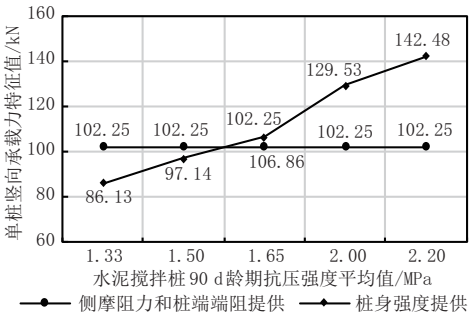


图 3 水泥土强度对单桩竖向承载力特征值 R_s 的影响

水泥土的抗压强度随其相应的水泥掺入比的增加而增大,且具有较好的相关性。由 1.1 节可知,单桩竖向承载力特征值大小由两方面控制,一方面由桩侧摩阻力和桩端阻力控制,另一方面由桩身强度控制。从图 3 和图 4 可以看出,初始阶段,随着水泥

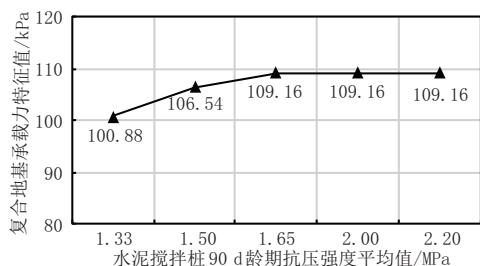


图4 水泥土强度对复合地基承载力特征值 f_{spk} 的影响

掺入比的增加,90 d 龄期的水泥土抗压强度增加,由桩身强度控制的单桩承载力特征值也不断提高,复合地基承载力特征值也随之增大。当由桩侧摩阻力和桩端阻力控制的单桩承载力发挥作用后,桩身强度继续增加,则单桩竖向承载力和复合地基承载力特征值保持不变。

3.2 桩长的影响

为考虑桩长对水泥搅拌桩单桩及复合地基承载力特征值的影响,选用水泥搅拌桩桩径 50 cm,桩间距 1.5 m,90 d 龄期的水泥土抗压强度平均值为 1.65 MPa,得到不同桩长条件下计算结果分别见图 5 和图 6。

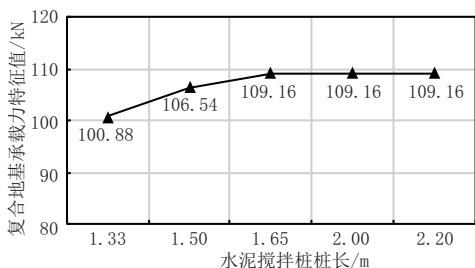


图5 桩长对单桩竖向承载力特征值 R_a 的影响

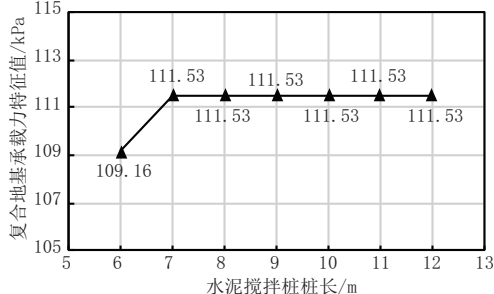


图6 桩长对复合地基承载力特征值 f_{spk} 的影响

从图 5 可以看出,当其他条件相同的情况下(土性、桩径、桩间距、水泥掺量等),随着桩长的增加,桩身强度提供的单桩承载力不受影响,而桩侧摩阻力和桩端端承力提供的单桩承载力随着桩长的增长,呈递增的趋势。当桩侧摩阻力和桩端端承力控制的单桩承载力与桩身强度控制的单桩承载力相等时,存在一有效桩长。

结合图 5 和图 6 可以看到,桩长较短时,桩侧摩阻力和桩端端承力控制的单桩承载力发挥作用,复

合地基承载力特征值随着桩长的增加不断增大;当达到有效桩长后,复合地基承载力特征值保持不变。

3.3 桩径的影响

为考虑桩径对单桩和复合地基承载力特征值的影响,选用水泥搅拌桩桩间距 1.5 m,桩长分别选用 6 m 和 8 m,90 d 龄期的水泥土抗压强度平均值为 1.65 MPa。得到不同桩径条件下计算结果见图 7 和图 8。

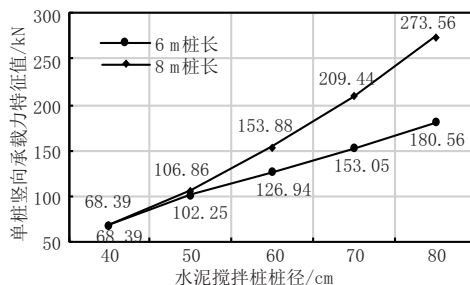


图7 桩径对单桩竖向承载力特征值 R_a 的影响

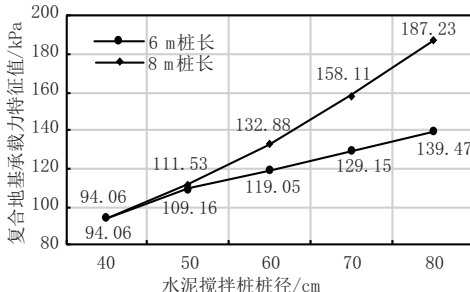


图8 桩径对复合地基承载力特征值 f_{spk} 的影响

桩径直接影响桩的截面周长 u_p 和桩的截面积 A_p ,对单桩和复合地基承载力特征值均有影响。从图 7 和图 8 可以看到,当其他条件相同的情况下(土性、桩间距、水泥掺量等),两种不同桩长曲线都显示:单桩竖向承载力和复合地基承载力特征值均随着桩径的增大而增加,其中,8 m 桩长条件下桩径的影响比 6 m 条件下更显著。因此,在满足地基上构筑物对地基承载力要求的前提下,选择适当的桩径在达到设计要求的同时还可以降低工程造价。

3.4 桩间距的影响

为考虑桩间距对复合地基承载力特征值的影响,选用水泥搅拌桩桩径 50 cm,桩长分别选用 6 m 和 8 m,90 d 龄期的水泥土抗压强度平均值为 1.65 MPa。得到不同桩间距条件下计算结果见图 9。

桩间距对单桩承载力特征值没有影响。桩间距主要通过影响桩土面积置换率 m 来影响复合地基承载力特征值 f_{spk} 。从图 9 可以看出,当其他条件相同的情况下(土性、桩径、水泥掺量等),两种不同桩长曲线都显示:桩间距越紧密,置换率越高,复合地基承载力也越高。从承载力角度看,提高置换率比单纯

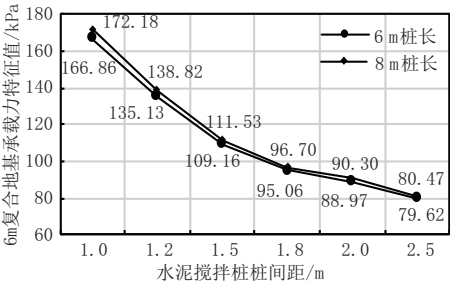


图 9 桩间距对复合地基承载力特征值 f_{spk} 的影响
增加桩长的效果更显著。

4 路基沉降影响分析

水泥搅拌桩除了提高软土地基承载力外，还可缩短预压期、有效的减小路基沉降。《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013)要求路基容许工后变形见表 2^[3]。

表 2 路基容许工后变形

层号	桥台与路堤相邻处	涵洞、通道处	一般路段
快速路、主干路	不大于 0.10 m	不大于 0.20 m	不大于 0.30 m
次干路、支路	不大于 0.20 m	不大于 0.30 m	不大于 0.50 m

为进一步探讨水泥搅拌桩对路基沉降的影响规律,本文选择桩长、桩径和布置间距作为主要影响因素,利用“理正岩土软土地基路堤、堤坝设计软件(7.0 版)”进行参数分析。

4.1 桩长的影响

为考虑桩长对地基沉降的影响,选用水泥搅拌桩桩径 50 cm,桩间距 1.5 m,90 d 龄期的水泥土抗压强度平均值为 1.65 MPa,得到不同桩长条件下计算结果见图 10。

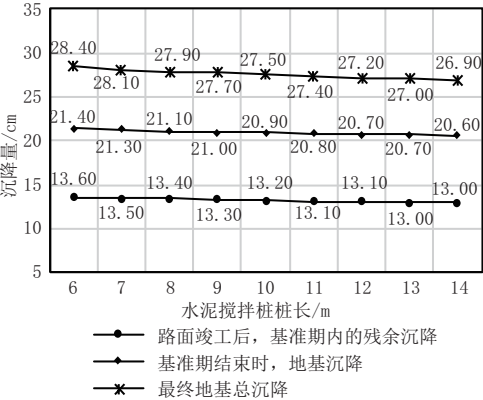


图 10 桩长对路基沉降量的影响

从图 10 可以看出,在其他条件相同的情况下(土性、桩径、桩间距、水泥掺量等),路基各阶段沉降量随着桩长的增加而不断减小,但随着桩长的继续增加这种影响趋势将变小。在设计过程中,需综合从承载力和沉降量两个角度考虑水泥搅拌桩桩

长的选择。

4.2 桩径的影响

为考虑桩径对地基沉降的影响,选用水泥搅拌桩桩间距 1.5 m,桩长 6 m,90 d 龄期的水泥土抗压强度平均值为 1.65 MPa。得到不同桩径条件下计算结果见图 11。

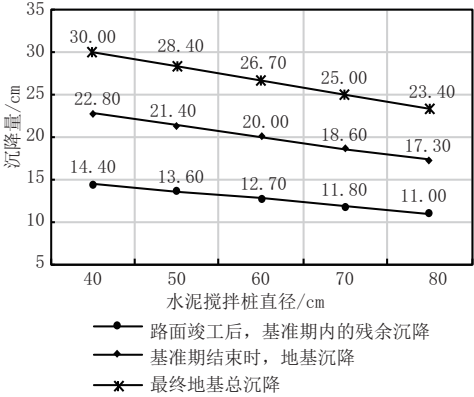


图 11 桩径对路基沉降量的影响

4.3 桩间距的影响

为考虑桩间距对地基沉降的影响,选用水泥搅拌桩桩径 50 cm,桩长 6 m,90 d 龄期的水泥土抗压强度平均值为 1.65 MPa。得到不同桩间距条件下计算结果见图 12。

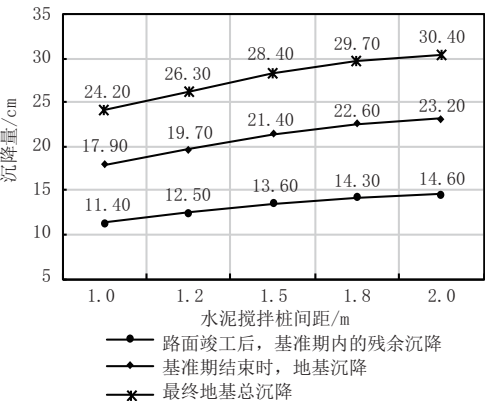


图 12 桩间距对路基沉降量的影响

从图 11 和图 12 可以看出,在其他条件相同的情况下(土性、水泥掺量等),增加水泥搅拌桩桩径、缩小水泥搅拌桩布置间距,能提高复合地基整体性,均有利于减小路基工后沉降。在实际工程中,在满足规范对容许工后沉降要求的前提下,选择合适的桩径和桩间距,可同时兼顾工程安全与效益。

5 结 语

(1)本文基于已有研究成果,结合工程实例,总结归纳了水泥搅拌桩复合地基在处理软土地基问题上的特点、设计计算方法与工作性状等。

(2)通过对影响因素的分析可知,水泥搅拌桩布

(下转第 211 页)

[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(6):1-10.

[5] 周胤德,忻元发,张世忠.由近年国际重大公路长隧道事故检讨隧道安全设施[C]// 第四届海峡两岸隧道与地下工程学术研讨会.

[6] 张厚记.沥青路面的矿物组分阻燃机理与技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.

[7] 王朝辉,董彪,高志伟,等.无机阻燃改性沥青结构表征及阻燃机理研究[J].功能材料,2014,45(13):13045-13049.

[8] 杨宇,王洪国,廖克俭,等.环保型 SBS 改性阻燃沥青性能研究[J].石油炼制与化工,2016,47(3):31-35.

[9] 贺海,王朝辉,刘志胜,等.新型无机阻燃改性沥青的制备与路用性能研究[J].公路交通科技,2014.

[10] 陈辉强.新型阻燃沥青的制备及其阻燃机理研究[D].长安:长安大学,2009.

[11] Chen J , Xin Z , Li S , et al. Surface Modification of Inorganic Composite Flame Retardant with Sodium Stearate and Its Application on PE-LD Composites [J]. Engineering Plastics Application, 2016.

[12] Zhang A L , Chang T , Li S X , et al. Surface Modification of Brucite and its Application in Flame Retardant Polypropylene Composites[J].Advanced Materials Research, 2012, 538-541:214-217.

[13] 李小玲.阻燃沥青的制备及其混合料性能研究[D].兰州:兰州交通大学,2015.

[14] 李小玲.阻燃沥青的制备及其混合料性能研究[D].兰州:兰州交通大学,2014.

[15] 李湘洲,钱伟,吴志平,等.硅烷偶联剂改性茶皂素膨胀阻燃剂及涂料应用[J].湖南大学学报(自科版),2014,41(2):119-124.

[16] Zhang G L , Zhao Y H , Song P , et al. In-situ Surface Modification of Mg-Al Composite Flame Retardant with Silane Coupling Agent KH-570[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2016.

[17] 王艳飞,郭尧,张艳维,等.钛酸酯偶联剂表面改性纳米氢氧化铝阻燃剂的工艺[J].表面技术,2017,46(4):217-221.

[18] 陈辉强,郝培文.钛酸酯偶联剂对沥青阻燃剂表面改性的研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(17):66-69.

（上接第 203 页）

置间距、桩径、桩长、水泥土强度等因素均影响着单桩竖向承载力和复合地基承载力特征值的大小。在实际工程中,可通过合理选取桩径、桩长、桩间距以及水泥掺入比等参数来完善对水泥搅拌桩复合地基的优化设计,以达到保证工程质量、节约工程成本的

目的。

参考文献:

[1] GB/T 50783—2012,复合地基技术规范[S].

[2] JTG/T D31-02—2013,公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S].

[3] CJJ 194—2013,城市道路路基设计规范[S].