

水泥搅拌桩复合地基承载力参数取值探讨

钟伟滔

(广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510030)

摘要:水泥搅拌桩复合地基在道路工程中的应用十分广泛,但对于水泥搅拌桩复合地基承载力计算过程中的参数如何合理确定,是值得深入研究的问题。例如桩端天然地基土的承载力折减系数 α 、90 d龄期的水泥土试块抗压强度平均值 f_{cu} 、桩间土承载力折减系数 β 、分层土地基天然地基承载力 f_{sk} 等参数的取值,相关规范中仍存在不完善的地方。通过案例对以上各种参数的取值进行分析研究,提出了取值的相关建议,以供参考。

关键词:水泥搅拌桩;复合地基承载力;计算参数

中图分类号: U46

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)09-0248-04

0 引言

在市政、公路道路工程中,软弱土路基十分常见,特别是在淤泥、淤泥质土分布广泛的广东沿海地区,水泥搅拌桩这种能有效提高地基承载力、减少沉降,且施工简便、造价经济的处理方式,得到了广泛应用。

在水泥搅拌桩复合承载力计算过程中,尽管《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[1]、广东省标准《建筑地基处理技术规范》(DBJ/T 15-38-2019)^[2]、《公路软土地基路堤设计与施工细则》(JTG/T D31-02—2013)^[3]等规范中给出了详细的计算方法,但计算过程中参数众多,且部分参数取值依赖于现场试验或者以往工程经验,在无现场试验资料或当地工程经验时,给计算带来了不确定因素,各种误差的累积可能导致最终计算结果与实际相差较大。本文针对复合地基承载力计算过程中不确定因素产生的原因及解决办法进行探讨。

1 复合地基承载力计算结果与实际检测结果的差异

1.1 工程概况

广州市某主干路建设项目位于广州中心城区西北部,本工程为城市主干路,工程重要性等级为一级,场地复杂程度等级为一级。根据勘察报告,软土主要为淤泥、淤泥质土,其承载力低,工程性质较差。选取本工程其中一个施工段落,水泥搅拌桩桩长

6.8 m,桩径0.5 m,桩间距1.3 m,采用正三角形布置,90 d无侧限抗压强度设计值不小于1.5 MPa。根据钻孔揭露,该工点从自然地面线起自上而下分别为2 m厚杂填土,3.8 m厚淤泥质土,2.6 m厚中、粗砂,中、粗砂以下为中风化基岩。

1.2 复合地基承载力计算方法

根据广东省标准《建筑地基处理技术规范》^[2]第8.2.2条,搅拌桩复合地基竖向承载力特征值应通过现场单桩和多桩复合地基静载试验综合确定,并应考虑压板尺寸和时间效应等因素影响,当无试验资料时,可借鉴地质情况类似的成功工程试验结果,按下式预估:

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

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值,kPa; f_{sk} 为桩间土天然地基承载力特征值,kPa; R_a 为单桩竖向承载力特征值,kN; A_p 为桩截面面积, m^2 ; m 为面积置换率, $m=A_p/A$,对于三角形布置, $A=0.866 s^2$; β 为桩间土承载力折减系数,当桩端土未经修正的承载力特征值大于桩周土的承载力特征值的平均值时,淤泥和淤泥质土可取0.1~0.4,差值大时取低值;当桩端土未经修正的承载力特征值小于或等于桩周土的承载力特征值的平均值时,可取0.5~0.8,差值大时取高值。

搅拌桩单桩竖向承载力特征值 R_a 应通过现场载荷试验确定;初步设计时可借鉴地质情况类似的成功工程经验并按下列公式预估,由水泥土强度确定的 R_a 宜大于由地基土抗力所提供的 R_a :

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

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

式中: u_p 为桩的周长,m; n 为桩长范围内所划分的土层数; q_{si} 为桩周第*i*层土的侧阻力特征值,kPa; q_{pk} 为

收稿日期: 2022-01-19

作者简介: 钟伟滔(1994—),男,本科,助理工程师,从事市政路桥设计工作。

桩端地基土未经修正的承载力特征值, kPa ; L_i 为第 i 层土层的厚度, m ; α 为桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取 $0.6 \sim 0.8$, 承载力高时取低值; η 为桩身水泥土强度折减系数, 无地方经验时淤泥、淤泥质土、黏土按 $0.2 \sim 0.3$ 取值, I_p 等于 17 时取大值, 等于 22 时取小值, 中间值用插值法确定; 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 90 d 龄期的立方体抗压强度平均值, kPa 。

1.3 复合地基承载力计算过程及结果

根据勘察报告, 该工点各岩土层的岩土参数建议值见表 1。

表 1 各土层岩土参数建议值			单位: kPa
岩土名称	承载力特征值	桩侧土的摩阻力特征值	
杂填土	90	10	
中、粗砂	250	22	
淤泥质土	60	7	
中风化基岩	2 800	—	

按式(2)计算由地基土抗力所确定的 R_a , α 取 0.6 。计算可得: $R_a = 1.57 \times (10 \times 2 + 7 \times 3.8 + 22 \times 1) + 0.6 \times 250 \times 0.196 = 137.1\text{ kN}$ 。

按式(3)计算由水泥土确定的 R_a 。根据地勘报告, 淤泥质土的塑性指数 I_p 平均值为 16 , η 取 0.3 。计算可得: $R_a = 0.3 \times 1500 \times 0.196 = 88.2\text{ kN}$ 。取两者计算的小值, 故预估计算的单桩竖向承载力特征值为 $R_a = 88.2\text{ kN}$ 。

根据式(1)计算复合地基承载力, β 暂取值 0.3 , f_{sk} 取桩顶土层杂填土承载力特征值 90 kPa ; $f_{spk} = 0.134 \times 88.2 / 0.196 + 0.3 \times (1 - 0.134) \times 90 = 60.3 + 23.4 = 83.7\text{ kPa}$, 故可得预估的复合地基承载力特征值为 83.7 kPa 。

1.4 现场试验结果及偏差原因分析

该工点水泥搅拌桩试桩的单桩竖向抗压静载试验及单桩复合地基平板载荷试验成果见表 2。

表 2 单桩竖向抗压静载试验及单桩复合地基平板载荷试验结果					
试桩数量	桩径 / mm	入土桩长 / m	桩端持力层	检测方法	极限承载力
4	500	6.8	中密中、粗砂	单桩竖向抗压静载试验	R_a 不小于 200 kN
4	500	6.8	中密中、粗砂	单桩复合地基平板载荷试验	f_{spk} 不小于 352.8 kPa

整体试验结果显示, 实测单桩竖向极限承载力不小于 200 kN , 复合地基极限承载力不小于 352.8 kPa , 即 R_a 不小于 100 kN , f_{spk} 不小于 176.4 kPa 。可见, 根

据规范计算出来的 $R_a = 88.2\text{ kN}$ 和复合地基承载力 $f_{spk} = 83.7\text{ kPa}$ 均比现场实际试验结果小不少。而且, 桩顶杂填土天然地基承载力特征值 f_{sk} 为 90 kPa , 但计算得到经加固的复合地基承载力 f_{spk} 仅有 83.7 kPa , 加固后承载力竟比加固前还低, 这显然也是不合常理的。引起偏差的原因是多方面的, 从工程施工的角度分析, 现场地质条件变化、施工搅拌质量等因素都可能带来影响。本文主要从理论计算角度分析, 以下几个参数是可能导致计算与实际试验出现偏差的主要原因:

1.4.1 单桩竖向承载力偏差原因分析

(1) 桩端天然地基土的承载力折减系数 α 取值的不确定。广东省标准《建筑地基处理技术规范》^[2]对 α 的具体取值规定为“可取 $0.6 \sim 0.8$, 承载力高时取低值”。此处对于承载力高低的衡量缺少定量的依据, 给 α 的具体取值带来困难。

(2) 90 d 龄期的水泥土试块抗压强度平均值 f_{cu} 。由于设计前期缺少现场试验数据, f_{cu} 取值仅能参考有关的经验数据, 对计算结果影响较大。根据广东省标准《建筑地基处理技术规范》^[2], 胶凝材料掺入比不应小于 12% , 且宜为 $15\% \sim 20\%$ 。针对各龄期的淤泥水泥土试块抗压强度与胶凝材料掺入比的关系, 广东省标准《建筑地基处理技术规范》^[2]条文说明 8.1.3 中已有详尽阐述和数据统计, 对于淤泥来说, 18% 的掺入比 90 d 龄期的水泥土试块抗压强度达到 1.47 MPa , 故设计计算时暂定 90 d 龄期的水泥土试块抗压强度平均值 f_{cu} 为 1.5 MPa 。

1.4.2 复合地基承载力偏差原因分析

(1) 桩间土承载力折减系数 β 取值的不确定。3 个规范对于淤泥和淤泥质土, β 的取值范围均为 $0.1 \sim 0.4$ 。《建筑地基处理技术规范》^[1]中对 β 的具体取值规定为“固结程度好或设置褥垫层时 β 可取高值。确定 β 值时还应考虑建筑物对沉降的要求以及桩端持力层土层性质, 当桩端持力层强度高或建筑物对沉降要求严时, 应取低值”, 而《公路软土地基路堤设计与施工细则》^[3]、广东省标准《建筑地基处理技术规范》^[2]中对 β 的具体取值规定为“当桩端土未经修正的承载力特征值与桩周土的承载力特征值差值大时取低值”。3 个规范中仅仅定性地对 β 取值进行规定, 具体桩端持力层土层强度多高、桩端土未经修正的承载力特征值与桩周土的承载力特征值差值多大时才取低值却并未明确, β 取值的不确定给计算结果带来了一定误差。而且, β 取值范围 $0.1 \sim 0.4$ 偏小, 导致

计算结果偏于保守,可能给工程造成浪费。

(2)分层土地基 f_{sk} 的取值问题。对于分层土地基,如具有软弱下卧层的双层土地基,规范对公式中的桩间土天然地基承载力特征值 f_{sk} 是取上部硬土层还是取软弱下卧层土体的天然地基承载力仍不明确。如果取硬土层的承载力则不安全,取软土层的承载力则偏保守。

2 各参数取值问题的研究

2.1 单桩竖向承载力相关参数

(1)桩端天然地基土的承载力折减系数 α 取值研究。根据式(2)可知,由地基土抗力所确定的单桩竖向承载力特征值 R_a 分为两部分:由桩侧极限摩阻力 $u_p \sum q_{si} L_i$ 和极限桩端阻力 $\alpha q_{pk} A_p$ 。在本工程中,当 $\alpha=0.6$ 时, $u_p \sum q_{si} L_i=107.7$ kN, $\alpha q_{pk} A_p=29.4$ kN, $R_a=137.1$ kN,极限桩端阻力占 R_a 的21.44%;当 $\alpha=0.8$ 时, $u_p \sum q_{si} L_i=107.7$ kN, $\alpha q_{pk} A_p=39.2$ kN, $R_a=146.9$ kN,极限桩端阻力占 R_a 的26.62%,两者极限桩端阻力计算结果仅相差9.8 kN。因水泥搅拌桩在穿透硬质地层时存在困难,在水泥搅拌桩适用的一般情况下,桩端土地基承载力 q_{pk} 不会太大,而在 q_{pk} 不大时, α 取值对 R_a 实际影响较小。虽然规范中对于承载力高低的衡量缺少定量的依据,但考虑到该参数在多数情况下对整体计算结果影响较小,而且在《公路软土地基路堤设计与施工细则》^[3]和《建筑地基处理技术规范》^[1]中该值的建议取值范围是0.4~0.6,在实际计算中可采用按 $\alpha=0.6$ 取值。

(2)90 d龄期的水泥土试块抗压强度平均值 f_{cu} 研究。广东省标准《建筑地基处理技术规范》^[2]要求,由水泥土强度确定的 R_a 宜大于由地基土抗力所提供的 R_a 。在本工程中,水泥土强度确定的 $R_a=88.2$ kN,远小于由地基土抗力所提供的 $R_a=137.1$ kN。可见,由于桩身早早地先于地基土破坏,地基土所能提供的抗力并不能完全发挥,从而限制了复合地基承载力。而在水泥土强度确定的 R_a 的计算中, f_{cu} 取值是参考广东省标准《建筑地基处理技术规范》条文说明8.1.3:对于淤泥来说,18%的掺入比90 d龄期的水泥土试块抗压强度达到1.47 MPa。继续增大水泥掺入比,可以进一步提高水泥土试块抗压强度,但势必会增加施工成本,在设计中应综合考虑经济性和使用要求,合理确定水泥掺入比。在实际应用中,水泥土的强度与土的性状关系十分密切,通过现场试验确定 R_a 和 f_{cu} 才是确保工程经济性和合理性最有效

的方法。

2.2 复合地基承载力偏差原因

(1)桩间土承载力折减系数 β 取值研究。在设置合理厚度的褥垫层后,桩间土的承载能力将进一步发挥出来。若继续按规范要求的 β 取值0.1~0.4,则计算结果可能偏于保守,导致需要缩小桩间距或加大桩径以使计算结果满足要求,造成工程的浪费。针对桩间土承载力折减系数 β 取值问题,单鹏飞、郭永^[4]进行了研究,并得出结论,在复合地基承载力计算时,可适当减小单桩承载力发挥系数 α 取值,并增大桩间土承载力折减系数 β 取值至0.6~0.8,以保障承载力取值更加合理。

而在本工程中,按工程试验结果单桩竖向承载力特征值100 kN,复合地基承载力特征值176.4 kPa反算桩间土承载力折减系数 β ,可以得到 $\beta=0.75$ 。综合考虑地质情况、工程设计、载荷试验结果等因素,建议将规范要求的 β 取值从0.1~0.4提高至0.6~0.8,以使计算结果更接近实际,避免浪费。

(2)分层土地基天然地基承载力 f_{sk} 的取值研究。对于分层土地基,规范方法在其复合地基承载力和沉降计算方面的说明与解释尚不够完善,没有明确说明按规范公式计算复合地基承载力时桩间土承载力特征值具体选取哪一层土的特征值。针对分层土地基 f_{sk} 取值问题,若直接取用地基第一层土的天然地基承载力作为 f_{sk} ,显然是不合理的,特别是当第一层土厚度较小时,计算结果明显是不准确的。 f_{sk} 取值需要综合考虑整个分层土体,可按以下两种方法确定。

第一种方法:参考广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》(DBJ/T 15-136-2018)^[5],将这种分层土复合地基的桩间土承载力特征值 f_{sk} 取为各土层的承载力特征值的深度加权平均。若 f_{sk} 取较高的较硬的土层地基承载力,则计算的复合地基承载力偏高,不安全。若 f_{sk} 取较软的土层地基承载力,则计算的复合地基承载力往往达不到设计要求。故建议取桩体长度范围内桩间土各土层承载力特征值的加权平均值。不宜计入软弱土对复合地基承载力的贡献。

第二种方法:参考杨光华、刘清华等^[6]对基于桩土变形协调的复核地基承载力计算方法的研究,对于水泥搅拌桩复合地基的情况,其承载力组成包括桩和桩间土的抗力两部分,根据沉降变形协调可以确定桩土抗力的发挥程度。复合地基承载力既要保证强度安全系数足够,也要控制沉降变形。为此,建

立复合地基的荷载与沉降关系,由复合地基的 $p-s$ 曲线,依照强度安全和变形控制的原则进行复合地基承载力的取值考虑会更加全面。通过切线模量法计算这种分层土地基的沉降曲线,根据其沉降曲线按沉降控制及强度安全系数综合确定其整体的承载力,这样得到的承载力考虑了地基上部荷载影响范围内的所有土层的情况,可以解决 f_{sk} 取值问题。

3 结 语

- (1)水泥搅拌桩复合地基承载力的计算过程中参数众多,部分参数取值规范解释不明确,在无现场试验资料或当地工程经验时,给计算带来了不确定因素,并可能导致最终计算结果与实际相差较大。
- (2)规范对于 α 取值尚有不明确的地方,在桩端土地基承载力 q_{pk} 不大时, α 取值对 R_a 实际影响较小,本文建议在实际计算中可采用按 $\alpha=0.6$ 取值。
- (3)在实际应用中,水泥土的强度与土的性状关

- 系十分密切,通过现场试验确定 R_a 和 f_{cu} 才是确保工程经济性和合理性最有效的方法。
- (4)规范对于 β 取值尚有不明确的地方,建议将规范要求的 β 取值从 0.1~0.4 提高至 0.6~0.8,以使计算结果更接近实际,避免浪费。
- (5)对于分层土地基 f_{sk} 的取值问题,可用分层土深度加权平均的方法确定,也可按桩土变形协调的方法解决。

参考文献:

[1] JGJ 79—2012,建筑地基处理技术规范[S].
[2] DBJ/T 15-38—2019,建筑地基处理技术规范[S].
[3] JTG/T D31-02—2013,公路软土地基路堤设计与施工细则[S].
[4] 单鹏飞,郭永.水泥搅拌桩复合地基承载力研究[J].中国水运,2021(1):161-162
[5] DBJ/T 15-136—2018,岩溶地区建筑地基基础技术规范[S].
[6] 杨光华,刘清华,孙树楷,等.刚性桩复合地基承载力计算问题的探讨[J].广东水利水电,2019(12):1-7.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!
欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com

电话:021-55008850

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com>