

水泥搅拌桩桩间距对桩身承载性能的影响

尹晓桐, 黄 勇

(中机中联工程有限公司, 重庆 400041)

摘要:为探究水泥搅拌桩桩间距对桩身承载性能的影响,以重庆市玉泉湖一路 K1 + 435 ~ K1 + 550 路段水泥搅拌桩处置工程为背景,结合理论研究及数值模拟,探讨分析了不同桩间距布置条件下的水泥搅拌桩桩身侧摩阻力、竖向应力及加固区沉降变化情况。研究表明:1)水泥搅拌桩侧摩阻力中性点出现在埋深 1/4 桩长处,且随桩间距的增加,中性点位置下移;2)在桩间距从 3 倍桩径增大至 5 倍桩径的过程中,桩侧负摩阻力峰值由 15.7 kPa 增至 18.3 kPa,增大了 16.6%,而桩间距对正摩阻力峰值的影响较小;3)水泥搅拌桩桩身竖向应力沿埋深方向递减,当桩间距增大时,持力层顶部应力水平持续增加,地表及加固区沉降均随桩间距的增大而不断增大;4)桩间距 3.3 倍桩径的水泥搅拌桩复合路基承载力为 456.68 kPa,处置效果良好。本文成果可为水泥搅拌桩在复合软弱路基处置工程中的应用提供一定的借鉴与参考。

关键词:水泥搅拌桩; 桩间距; 桩身承载性能; 软弱复合路基

中图分类号:TU473.1

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)03-0039-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.03.035

Research on effect of pile spacing on pile bearing performance of cement mixing pile

YIN Xiaotong, HUANG Yong

(CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400041, China)

Abstract: In order to explore the influence of cement mixing pile spacing on the pile bearing performance, the cement mixing pile disposal project of K1 + 435 ~ K1 + 550 section located at Yuquanhu 1st road in Chongqing is taken as the background, theoretical research and numerical simulation are combined, and the lateral friction resistance, vertical stress and settlement changes of reinforcement area under different pile spacing conditions are discussed and analyzed. The results show that: 1) The neutral point of the lateral friction resistance of the cement mixing pile appears at the length of the 1/4 pile of the buried depth, and the position of the neutral point moves down with the increase of the pile spacing; 2) The peak value of the negative friction resistance on the pile side increases from 15.7 kPa to 18.3 kPa when the pile spacing increases from 3 times the pile diameter to 5 times the pile diameter, which is increased by 16.6%; 3) The vertical stress of the cement mixing pile decreases along the buried depth direction, and when the pile spacing increases, the stress level at the top of the bearing layer continues to increase, and the settlement of the surface and reinforcement area increases with the increase of pile spacing; 4) The bearing capacity of the composite subgrade of the cement mixing pile with a pile spacing of 3.3 times the pile diameter is 456.68 kPa, and the disposal effect is good. The results can provide certain references for the application of cement mixing piles in weak composite subgrade treatment projects.

Key words: cement mixing pile; pile spacing; pile bearing performance; weak composite subgrade

水泥搅拌桩在道路软基处理工程中的应用较为广泛。它以水泥作为硬化剂,通过水泥与软基土产

收稿日期: 2023-05-08

作者简介: 尹晓桐(1990—),男,硕士研究生,从事交通、道路工程设计。

生的一系列物理化学反应,使桩周土体产生硬化反应,通过水泥搅拌桩置换桩周软土,形成具有足够强度的复合地基。水泥搅拌桩的软基置换作用受桩间距影响较大,当桩间距过大时,软基置换不充分,最终将导致后期行车荷载作用下的路面局部沉降破损。石彦明^[1]结合工程实践探究了水泥搅拌桩在深基坑支护工程中的应用,发现水泥搅拌桩相较于传统钢筋混凝土桩具有节能环保、施工便捷等优点;鲍燕妮^[2]对比分析了单向和双向水泥搅拌桩施工工艺,发现双向扩大桩头的水泥搅拌桩承载性能更优;袁哲^[3]对水泥搅拌桩加固路堤边坡稳定性进行了数值模拟研究,发现水泥搅拌桩桩间距与边坡稳定性呈负相关,但桩间距减小至某一水平时,路堤边坡稳定系数将达到动态平衡状态;赵利平等^[4]对不同桩间距条件下的水泥搅拌桩复合地基沉降量进行了数值模拟分析,发现地基沉降可通过缩小水泥搅拌桩桩身间距来减少,但不同设计荷载下,最佳桩身间距存在差距,工程中应进行合理设计和选择。基于上述研究成果得知,水泥搅拌桩桩身承载性能不光体现在复合地基沉降量上,其自身的力学性能仍不可忽视。在不同桩间距条件下,水泥搅拌桩桩身承载性能表现不同。本文以实际工程为研究背景,结合理论研究及数值模拟,探讨不同桩间距条件下的桩身侧摩阻力分布情况、桩身竖向应力变化及加固区沉降表现,以期为水泥搅拌桩力学性能研究提供参考。

1 水泥搅拌桩承载性能

1.1 复合地基荷载传递机理

水泥搅拌桩是将水泥等化学添加剂作为原材料,通过机械搅拌的方式,将地基软土与化学添加剂进行拌和,在物理化学反应的作用下,凝结成具有足够强度的水泥搅拌桩,并与周围地基土形成复合地基,共同承担荷载。水泥搅拌桩被广泛应用于大面积深层淤泥质粉质黏土不良地基处理。它主要由褥垫层和桩体组成,其中褥垫层一般采用粗砂、中砂或级配碎石,设置于基础与桩体之间。由于褥垫层的存在,地基在承受荷载的过程中始终能够共同承载荷载。

桩土间的相互作用是指桩体与桩间土的荷载分

担及传递机制。水泥搅拌桩及桩间土的弹性模量等力学性能存在较大差异,因此其承载性能也存在较大差异。复合地基在承受上部传递的荷载时,通过褥垫层传递至桩顶,搅拌桩和周边土体受压变形产生位移差,桩周摩阻力和桩端压力将荷载传递至周边桩间土,水泥桩自身轴向荷载和压缩量随埋深的增加自上而下递减,桩间摩阻力得到发挥,桩土间的应力分配处于动态的平衡感过程中。

1.2 群桩效应及桩土相互作用

在实际工程中,水泥搅拌桩处置淤泥质粉质黏土不良路基时往往以群桩的形式出现,处置面积大,作用范围广。褥垫层将上部荷载传递至桩顶及桩间土体,在桩土相互作用过程中,一部分桩顶荷载传递至桩端持力层,并在持力层中扩散形成扇形持力区域。假如水泥搅拌桩为单桩,则桩端持力层所受应力仅为桩体传递至桩端的应力,若为群桩,当桩间距较密时,桩间应力扩散的扇形区域可能出现相互叠加的情况,进而产生对应桩端持力层应力的叠加,其应力水平远超单桩应力状态。

BRUCE^[5]根据理论解析推导认为,当桩间距大于3倍桩径时,可认为群桩之间不会产生对工程不利的群桩效应,但当桩间距过于稀疏时,桩间土体离散型增大,桩土之间的相互作用也会因此减弱。水泥搅拌桩的桩土相互作用主要依靠桩侧摩阻力,当桩间距较小时,水泥搅拌桩置换面积较大,桩土间的相互作用更为明显;当间距较大时,桩间土体的置换面积较小,远离桩体的桩间土几乎不参与桩土间的相互作用。因此,水泥搅拌桩桩间距对桩身承载性能具有重要的影响。

2 不同桩间距的数值模拟分析

为探究水泥搅拌桩在不同桩间距条件下桩身承载性能的变化情况,特以桩间距为变量,以数值模拟软件FLAC^{3D}为计算工具,建立水泥搅拌桩计算模型。水泥搅拌桩桩长为10 m,桩径为50 cm,桩周土体采用摩尔库伦本构模型,桩身采用线弹性本构模型,接触面有摩擦且可变形,桩间距分别取3~5倍桩径,模型物理力学参数如表1所示,数值模拟模型如图1所示。

表 1 材料物理力学参数

材料	深度/m	容重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	摩擦角/($^{\circ}$)	压缩模量/MPa	泊松比
路堤填土	0.8	20.3	20.3	23.5	10.0	0.28
褥垫层	0.3	25.2	6.5	38.2	65.0	0.21
人工素填土	1.2	16.6	13.1	19.6	2.1	0.32
淤泥质土	3.8	15.6	8.8	10.2	2.2	0.35
粉质黏土	5.0	17.9	7.2	22.8	3.2	0.33
黏土	2.3	18.2	15.6	16.8	3.8	0.31
水泥搅拌桩	10.0	189.7	182.0	22.2	120.0	0.25

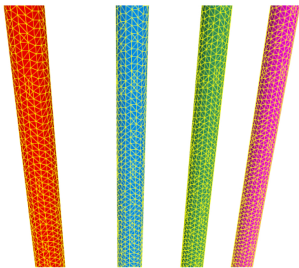
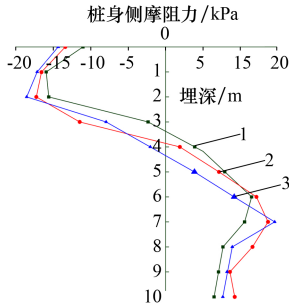


图 1 水泥搅拌桩模型示意

2.1 桩间距对桩侧摩阻力的影响

图 2 为不同桩间距条件下，桩身侧摩阻力沿桩长方向的变化情况。由图 2 可知：侧摩阻力整体呈上端为负下端为正的 trends，且存在摩阻力为 0 的中性点。当桩间距为 3 倍桩径(1.5 m)时，最大负摩阻力和最大正摩阻力分别为 15.7、18.6 kPa，中性点位于埋深 3.3 m 处；当桩间距为 4 倍桩径(2.0 m)时，负摩阻力峰值为 17.8 kPa，较 3 倍桩径时增大了 13.4%，中性点下降至 3.8 m 处，正摩阻力峰值为 19.3 kPa，增大了 3.7%；继续增大桩间距至 5 倍桩径(2.5 m)时，桩身负摩阻力峰值增大至 18.3 kPa，较 3 倍桩径时增大了 16.6%，中性点下降至 4.1 m 处，桩身正摩阻力峰值增大至 19.7 kPa，增大了 5.9%。综上，当桩间距较小



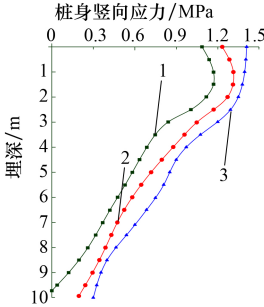
1—桩间距 3 倍桩径 (1.5 m)；2—桩间距 4 倍桩径 (2.0 m)；3—桩间距 5 倍桩径 (2.5 m)。

图 2 不同桩间距的桩身侧摩阻力

时，桩土间相互作用较强，相对变形差较小，因而导致桩身侧摩阻力较小；反之，则侧摩阻力较大，且在中性点以下，土体固结压缩量减小，水泥搅拌桩桩身位移较土体压缩量更大，因此表现出正摩阻力^[6-7]。

2.2 桩间距对竖向应力的影响

桩间距的变化会改变水泥搅拌桩对桩周土体的置换率。当桩间距较小时，复合地基的置换率较大，此时，受桩土之间的相互作用影响，桩间土体承受荷载的比例增大，桩身竖向应力减小。当桩间距增大时，复合地基置换率减小，桩间土体承受荷载的比例减小，桩身竖向应力增大，此时，桩间土的承载性能尚未完全发挥，桩土间的相互作用较小。图 3 为不同桩间距条件下的桩身竖向应力分布情况。



1—桩间距 3 倍桩径 (1.5 m)；2—桩间距 4 倍桩径 (2.0 m)；3—桩间距 5 倍桩径 (2.5 m)。

图 3 不同桩间距的桩身竖向应力

由图 3 可知：桩身竖向应力总体呈沿桩长逐渐递减规律。当桩间距为 3 倍桩径(1.5 m)时，桩身最大轴向应力为 1.16 MPa，最大应力出现在 1.8 m 处；从桩身各土层分布情况来看，此段桩间土主要为第四纪人工素填土，随后随埋深增加，桩身轴向应力逐渐减小，淤泥质土及粉质黏土段桩身竖向应力一直呈减小趋势。出现上述现象的原因：在素填

土段,土体中能够与水泥等化学拌和剂发生化学反应,并随之产生强度的化学离子较少,桩土之间相互作用较弱,上部荷载主要由桩自身承担;在淤泥质土及粉质黏土段,土体含水率较高,形成水泥搅拌桩较为迅速,桩土之间相互作用较强,侧向摩阻力将桩身应力传递至桩间土,共同承担上部荷载,因而桩身竖向应力递减^[8-9]。当桩间距增大至 4 倍桩径(2.0 m)时,桩身最大竖向应力为 1.38 MPa,较 3 倍桩径时增加了 19.0%;当桩间距为 5 倍桩径(2.5 m)时,桩身最大竖向应力为 1.5 MPa,最大应力出现在桩顶。综上,在不同桩间距下,桩底(持力层顶面)承受的荷载大小存在差别。当桩间距较小时,竖向应力沿桩身递减,在水泥搅拌桩和桩间土体承受荷载后,荷载未传递至持力层顶部,土层不会发生破坏;当桩间距增大后,桩身应力峰值增加,同时持力层顶部所受荷载也将增大;当桩底应力超过持力层土体最大承载力时,则会发生刺入破坏,进而导致桩底沉降,在道路运营后期,路面将产生局部开裂破坏。

2.3 桩间距对下卧层沉降的影响

水泥搅拌桩治理软弱路基土的目的在于增强路基承载能力,防止软弱路基土在道路运营期间产生较大的路面沉降,进而导致路面产生裂缝,雨水下渗破坏路基。图 4 为不同桩间距条件下,加固区沉降量变化趋势。由图 4 可知:地表及加固区沉降均随桩间距的增大而不断增大。这是由于过大的桩间距会降低复合地基的换算弹性模量,降低加固区地基承载力^[10]。

表 2 K1+150 处断面地质情况

土层	最大深度/m	含水率/%	饱和度/%	压缩模量/MPa	泊松比
人工素填土	1.5	35.2	80.3	2.15	0.31
淤泥质土	5.5	78.6	100	1.15	0.34
粉质黏土	3.8	37.4	92.2	3.20	0.32
黏土	3.2	41.2	85.4	3.96	0.33

根据复合模量法,梅花形布置的水泥搅拌桩单桩置换率 m 可按以下公式计算。

$$m = \frac{\pi d^2}{2 \times \sqrt{3} l_s^2} = 0.907 \left(\frac{d}{l_s} \right)^2 \quad (1)$$

式中: d 为桩径, mm; l_s 为桩间距, mm。

带入工程数据可得,水泥搅拌桩复合地基置换率为 0.08。

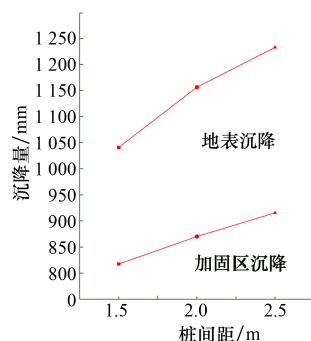


图 4 不同桩间距的地表及下卧层沉降

3 工程应用

3.1 工程概况

玉泉湖一路位于重庆市璧山区西部数字经济产业园区内,起、终均与玉泉湖路相接,整体呈环状走势。道路全长 1 565.71 m(含桥梁 100 m),红线宽度为 38 m 设计时速为 30 km/h。玉泉湖一路 K1+435 ~ K1+550 路段原为现状鱼塘,现已被周边地块人工素填土掩埋,该处淤泥深度范围为 3 ~ 5 m,淤泥质粉质黏土表现为灰褐色、灰黑色,软塑状或流塑状,切面稍有光泽,无摇震反应,干强度中等及韧性中等。采用直径为 0.3 m 的水泥搅拌桩进行处治,处治深度最深处为 11.3 m,采用梅花形布置方式,桩间距为 3.33 倍桩径(1.0 m),桩体采用 42.5 级普通硅酸盐水泥。

3.2 地基承载力计算

表 2 为地勘对桩号 K1+500 处断面地层情况统计结果。该路段上覆人工素填土厚度范围为 1.8 ~ 2.5 m,淤泥质土层最大厚度为 5.5 m。

根据《地基处理技术规范》(DG/TJ 08-40—2010)^[11]相关规定,地基承载力 f_{spk} 计算公式如下。

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (2)$$

式中: λ 为单桩承载力发挥系数,本文取 0.8; R_a 为单桩承载力特征值, kN,取单桩极限承载承载

力的二分之一作为其特征值; A_p 为水泥搅拌桩截面积, m^2 ; f_{sk} 为天然地基承载力特征值, kPa ; β 为桩周土承载力发挥系数, 本文取 0.5。

因持力层为硬土, 假定水泥搅拌桩的破坏模式为桩体破坏, 水泥搅拌桩单桩极限承载力 Q_a 计算公式如下。

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

式中: f_{cu} 为水泥土竖向抗压强度, kPa 。

计算得: $R_a = \frac{1}{2} Q_a = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times 42.5 \times \pi \times 150^2 = 500.69 \text{ kN}$

根据地勘采样及室内土力学试验结果, 天然地基承载力特征值为 72.8 kPa 。带入以上计算数据求得地基承载力为 456.68 kPa , 实测复合地基承载力特征值为 422.27 kPa , 计算误差为 7.5%。表明工程设计中采用直径为 0.3 m, 处治深度为 11.3 m 的水泥搅拌桩处治玉泉湖一路 K1+435 ~ K1+550 路段的软基满足设计要求, 且处治效果良好。

4 结 论

本文以数值模拟软件 FLAC^{3D} 为计算工具, 从桩侧摩阻力、桩身竖向应力及沉降方面探究了不同桩间距对水泥搅拌桩桩身承载性能的影响, 得到结论如下。

(1) 水泥搅拌桩负摩阻力峰值随桩间距的增大而不断增大, 中性点下移, 桩距 2.5 m 较桩距 1.5 m 时的桩身负摩阻力峰值增大了 16.6%, 桩间距对正摩阻力峰值的影响较小。

(2) 水泥搅拌桩桩身竖向应力沿埋深方向递减, 持力层顶部应力水平、地表及加固区沉降均随桩间距的增大而不断增大。利用水泥搅拌桩治理软弱路基土能够有效降低加固区地表及下卧层沉降, 且地表及加固区沉降均随桩间距的增大而不断增大。

(3) 水泥搅拌桩桩间距不宜过大, 否则处治

后的复合地基在后期荷载作用下仍然存在较大的沉降, 容易引起路面开裂, 也不宜过小, 否则将产生群桩效应, 影响桩底持力层承载性能, 同时也会造成不必要的浪费, 工程建设中建议采用 3 倍桩径作为桩间距较为合理。

(4) 在淤泥质粉质黏土软弱层的处置工程中, 桩间距为 3.3 倍桩径的水泥搅拌桩能够有效提高复合路基承载力, 计算结果与实测结果仅相差 7.5%, 处置效果良好。

参考文献:

- [1] 石彦明. 预应力管桩与水泥搅拌桩组合技术在深基坑支护中的应用[J]. 工程建设, 2020, 52(7): 54-58.
- [2] 鲍燕妮. 双向水泥搅拌桩法在软基处理中的工程实践[J]. 公路工程, 2012, 37(4): 148-151.
- [3] 袁哲. 水泥搅拌桩加固路堤边坡稳定性研究[J]. 水利技术监督, 2022(1): 228-232.
- [4] 赵利平, 龙晓鹏, 黄筱云. 水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 30-36; 70.
- [5] BRUCE D A, CADDEN A W, SABATINI P J. Practical advice for foundation design-micropiles for structural support[C]//GSP 131 Contemporary Issues in Foundation Engineering. Austin: ASCE, 2005(33): 1-25.
- [6] 曾帅. 基于 ABAQUS 的土工格栅和水泥搅拌桩复合地基加固研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(3): 15; 48-53.
- [7] 符传邦, 吴育麒, 吴月磊. 水泥搅拌桩各项参数对软土路基沉降的影响[J]. 市政技术, 2023, 41(2): 73-77.
- [8] 曹晓宇. 水泥搅拌桩加固软土路基与试验检测技术研究[J]. 中国高新科技, 2022(24): 52-53; 61.
- [9] 王骏飞, 王辰, 陈旭强. 软土地基经水泥搅拌桩加固后的沉降特性研究[J]. 工程与建设, 2022, 36(6): 1679-1682.
- [10] 于龙海. 水泥搅拌桩在公路路基中的应用研究[J]. 工程机械与维修, 2022(6): 157-159.
- [11] 地基处理技术规范: DG/TJ 08-40-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.