

基于附加应力法的刚性桩复合地基沉降 影响参数分析

付有为, 贺佐跃

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广州 510507)

摘要: 针对现有文献中刚性桩复合地基沉降的影响因素分析较为缺乏这一问题, 基于刚性桩复合地基的附加应力法, 对地基土、刚性桩、路堤等因素对加固区沉降、中性面深度、负摩擦力等的影响规律进行了分析。研究表明, 加固区沉降随淤泥质粉质黏土压缩模量、工作垫层厚度、工作垫层侧阻力逐渐增加; 中性面深度随工作垫层厚度逐渐增加, 但随工作垫层侧阻力逐渐减小; 负摩擦力均随工作垫层厚度、工作垫层侧阻力逐渐增加。加固区沉降均随桩端土极限端阻力、总极限端阻力和单桩极限承载力逐渐增加。相对于开口条件, 桩端为闭口时, 桩端阻力较大, 单桩承载力较高, 加固区沉降较小。加固区沉降均随路堤高度、路堤填料重度、路堤顶宽和路堤边坡坡率逐渐增加; 中性面深度和负摩擦力也随之呈现增加趋势。此研究结果可为刚性桩复合地基设计与计算提供一定参考。

关键词: 刚性桩; 复合地基; 影响因素; 加固区沉降; 附加应力法

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)14-0186-06

刚性桩复合地基对于路堤的沉降控制效果显著, 尤其适用于存在深厚软土层、路堤填土高、工期紧的工程项目^[1-2]。然而, 现有刚性桩复合地基的沉降常参考柔性桩复合地基采用复合模量法计算, 与实际沉降存在较大差别^[3-5]。刘吉福等^[6]基于桩土沉降关系提出了附加应力法, 该方法与实际沉降接近并得到了工程验证。

刚性桩复合地基沉降的影响因素分析较为缺乏。俞建霖等^[7]分析了下卧层压缩模量对复合地基沉降量的影响, 下卧层压缩模量增加, 复合地基沉降量逐步减小。郑刚等^[8]进行了褥垫层厚度的复合地基试验, 对褥垫层在荷载作用下的力学性质进行了研究。张乾青等^[9]基于数值分析桩侧摩阻力、桩端阻力对单桩承载力的影响规律, 同时也探讨了填土期和固结沉降期侧阻力的分担情况。史永强等^[10]基于神经网络分析, 分析了静压管桩极限承载力的数值精度和适用性。刘俊伟等^[11]对开口管桩的单桩承载力进行了时间效应研究, 但未对比开口、闭口之间的差异性。王凯等^[12]对软土区交叉式组合桩在不同路堤高度下的沉降特性进行了研究, 同时对填筑速率也进行了初步探讨, 其他文献也进行了类似研究^[13-16]。然而, 上述

文献均未对刚性桩复合地基沉降进行系统的影响因素分析, 且采用的计算方法与实际沉降差异较大, 分析的合理性和适用性受限。

本文基于刚性桩复合地基的附加应力法, 分析地基土(软土压缩模量、工作垫层厚度、工作垫层侧阻力)、刚性桩(桩端土极限侧阻力、总极限侧阻力、单桩极限承载力、桩端开/闭口条件)、路堤(路堤高度、路堤填料重度、路堤顶宽、路堤边坡坡率)等因素对加固区沉降、中性面深度、负摩擦力等的影响规律, 为刚性桩复合地基设计与计算提供参考。

1 理论简介

刚性桩复合地基加固区附加应力采用 Boussinesq 计算时, 沉降与实际相差显著^[6]。Boussinesq 解即在半无限空间弹性体表面作用力时, 在任意点产生的附加应力解析时, 均布荷载作用力可由集中力积分得到。刘吉福等^[6]建立的刚性桩复合地基理论中, 桩间土附加应力计算如式(1)所示, 与实际较为吻合。

$$\sigma_{ij} = \frac{p \left(1 - \frac{2\xi \sum \Delta z_i \tau_w}{P} \right) - \frac{P_z}{A_u}}{1 - m_p} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为某一深度处桩间土附加应力, kPa; p 为路堤荷载, kPa; P 为每延米路堤荷载, kN/m; ξ 为刚性桩加

收稿日期: 2024-03-03

作者简介: 付有为(1990—), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 工程师, 研究方向为道路工程与设计; 贺佐跃(1989—), 男, 湖南耒阳人, 博士, 高级工程师, 研究方向为岩土工程、地下工程与设计。

固区两侧摩擦力发挥系数; P_z 为桩身轴力, kN; A_u 为单桩分担面积, m^2 ; m_p 为置换率; τ_{ui} 为桩身各土层侧阻力, kPa; Δz_i 为桩周各土层厚度, m。利用桩间土附加应力 σ'_{ij} , 可采用分层总和法计算桩间土对应压缩量。

加固区下部即下卧层的附加应力, 刘吉福等^[6]仍采用式(1)计算, 且下卧层侧阻力的范围与加固区相同。这不合理, 因为下卧层不存在桩体, 沉降应采用 Boussinesq 方法的附加应力计算。去掉桩体和侧阻力的影响, 可得到下卧层顶部(加固区底部)的平均附加应力计算公式如下:

$$\sigma'_{ij} = p \frac{P - 2\xi \sum \Delta z_i \tau_{ui}}{P} \quad (2)$$

将式(1)和式(2)导入到现有规范的刚性桩复合地基沉降计算理论^[3], 即可进行刚性桩复合地基沉降影响参数分析。

2 工程概况

横沥岛路网工程位于广州南沙, 桥头路基段高 5 m, 红线宽度 20 m, 路堤坡率为 1:1.5, 采用管桩复合地基进行处理。桩直径 0.5 m、间距 2.2 m, 平均桩长 32.5 m; 桩帽边长 1.1 m、厚 0.35 m, 正方形分布。桩顶以下为 0.5 m 厚的工作垫层。地基土主要物理、力学参数及土层分布如表 1 所示。

3 地基土

3.1 软土压缩模量

淤泥质粉质黏土是管桩负摩擦区的主要分布区域, 且压缩模量是影响加固区沉降的主要土体物理参数之一。淤泥质粉质黏土的压缩模量分别为 1.8、2.0、2.2、2.4、2.6、2.8 MPa。加固区的沉降变化如图 1 所示, 加固区沉降随淤泥质粉质黏土压缩模量增加, 由 227.1 mm 逐渐减小至 203.6 mm。压缩模量越大, 土体越难压缩, 变形越小, 图 1 与此规律一致。

表 1 土层主要物理、力学参数

变量	①2	②5	②2	②6
	素填土	淤泥质粉质黏土	淤泥	粉砂
厚度/m	1.0	15.0	11.5	4.5
地基承载力基本容许值 (f_{s0})/kPa	80	55	45	80
含水率(w)/%	28.9	48.6	53.3	26.7
天然重度(γ)/($kN \cdot m^{-3}$)	18.7	17.0	16.1	17.6
天然孔隙比(e_0)	0.889	1.326	1.660	0.925
压缩模量(E_{s1-2})/MPa	3.87	2.60	2.22	4.25
直接快剪	黏聚力(c)/kPa	12	8	6
	内摩擦角(φ)/°	10	8	6
固结快剪	黏聚力(c)/kPa	—	12	10
	内摩擦角(φ)/°	—	12	10

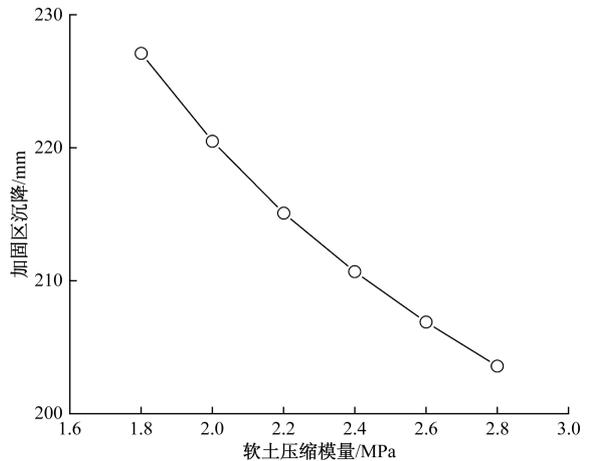


图 1 软土压缩模量对加固区沉降的影响

3.2 工作垫层厚度

在鱼塘区域, 实际工程中常先把鱼塘填平后再施工桩体, 鱼塘底至桩顶范围内的填料即为工作垫层。工作垫层位于桩顶以下, 对于原有地基土而言为附加荷载, 对加固区沉降产生不利影响。工作垫层厚度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m, 侧阻力为 15 kPa。加固区沉降如图 2 所示, 工作垫层越厚, 相对于原地基土的附加荷载就越大, 产生的沉降也越大。中性面深度由 4.86 m 逐渐增加至 14.51 m, 负摩擦力由 122.1 kN 逐渐增加至 315.9 kN, 如图 3 所示。

3.3 工作垫层侧阻力

工作垫层除了厚度, 侧阻力也会产生影响。工作垫层厚度为 0.5 m, 侧阻力分别为 10、15、20、25、30、35 kPa。如图 4 和图 5 所示, 工作垫层整体均位于负摩擦区内, 工作垫层侧阻力越大、中性面深度减小但负摩擦力越大, 导致加固区沉降也随之增加。

4 刚性桩

4.1 桩端土极限端阻力

单桩承载力主要有端阻力和侧阻力两部分组

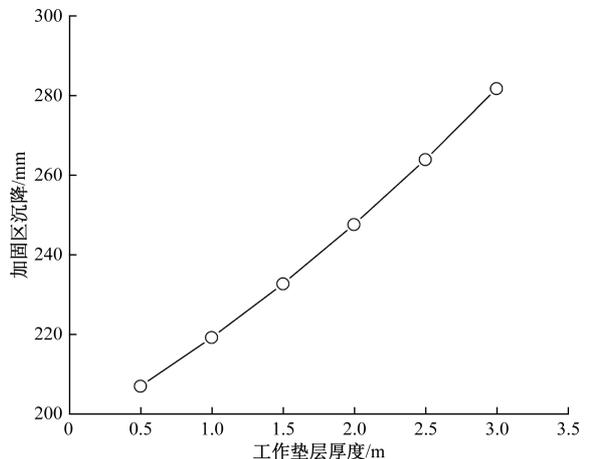


图 2 工作垫层厚度对加固区沉降的影响

成,对于桩身范围存在深厚软土的地基而言,刚性桩而言端阻力对于提高单桩承载力尤为重要。桩端土极限端阻力分别为1 400、1 600、1 800、2 000、2 200、2 400 kPa。极限端阻力对加固区的影响见图6。极限端阻力越大、单桩承载力越高,导致加固区沉降逐渐减小。

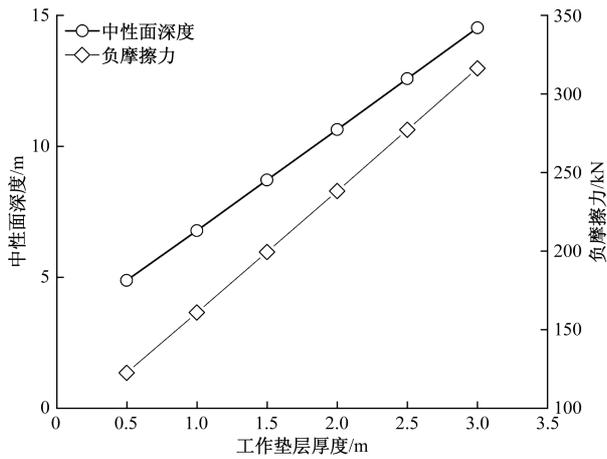


图3 工作垫层厚度对中性面深度和负摩擦力的影响

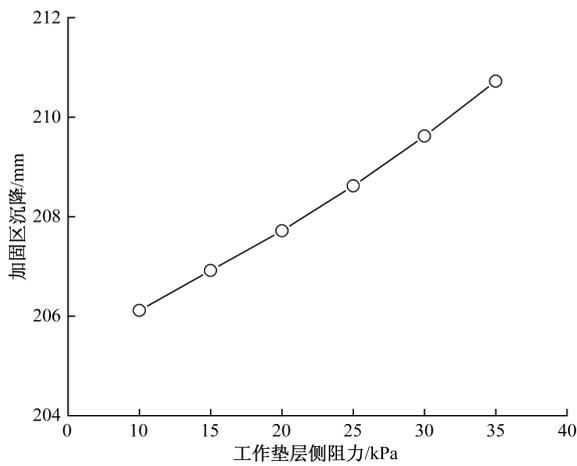


图4 工作垫层侧阻力对加固区沉降的影响

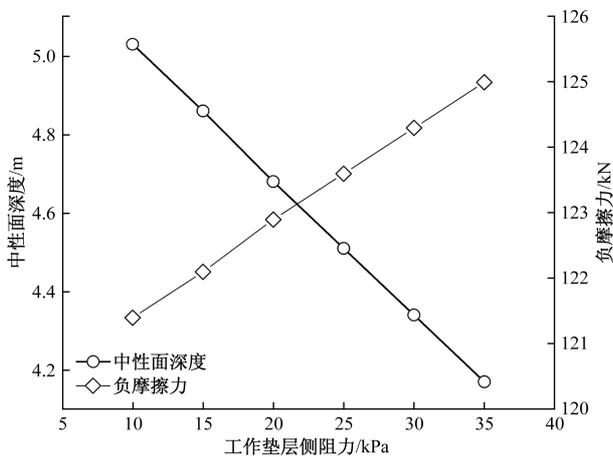


图5 工作垫层侧阻力对中性面深度和负摩擦力的影响

4.2 总极限端阻力

总极限端阻力除与桩端土的极限端阻力有关外,还与桩端有效面积有关,总极限端阻力为二者乘积。总极限端阻力分别为250、300、350、400、450、500 kN,对加固区沉降的影响如图7所示。与桩端土极限端阻力的影响规律类似,总极限端阻力越大、单桩承载力越高,导致加固区沉降逐渐减小。

4.3 单桩极限承载力

由前文可知,单桩承载力主要有端阻力和侧阻力两部分组成。单桩极限承载力分别为800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800、2 000 kN,单桩承载力特征值为400~1 000 kN,位于刚性桩复合地基常采用的单桩承载力范围内。单桩极限承载力对加固区沉降的影响如图8所示。与桩端土极限端阻力的影响规律类似,单桩极限承载力越大、加固区沉降逐渐减小。

4.4 桩端开/闭口条件

预制管桩桩端由开口、闭口两种情况,开/闭口

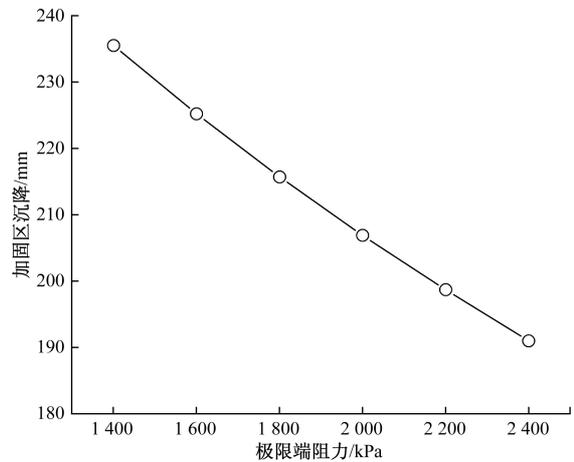


图6 极限端阻力对加固区沉降的影响

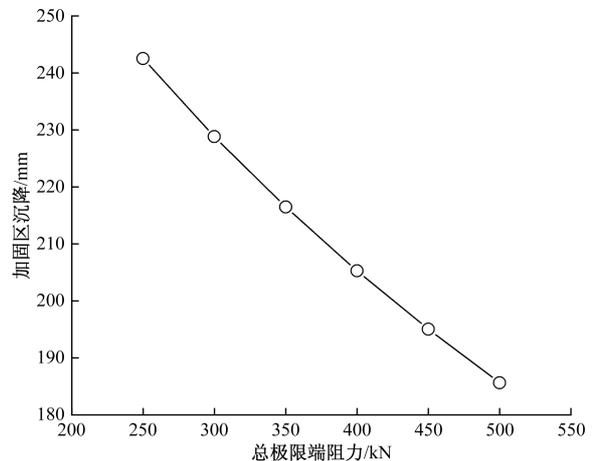


图7 总极限端阻力对加固区沉降的影响

条件影响桩端阻力,对加固区的沉降如图 9 所示。桩端为闭口时,桩端阻力较大,单桩承载力较高,加固区沉降约为 206.9 mm;而桩端为开口时,桩端阻力较小,单桩承载力较低,加固区沉降约为 244.9 mm。

5 路堤

5.1 路堤高度

路堤高度与附加荷载、桩顶荷载密切相关。路堤高度分别为 3、4、5、6、7、8、9 m。路堤高度的影响如图 10~图 12 所示。加固区沉降随路堤高度逐渐增加;桩顶荷载、桩帽间荷载均随路堤高度逐渐增加,但桩顶荷载增加更加显著;桩土应力比随路堤高度先逐渐增加再稳定在 15.04;中性面深度和负摩擦力均随路堤高度逐渐增加,但增加幅度随之增大。

5.2 路堤填料重度

路堤填料重度也与附加荷载、桩顶荷载密切相关。路堤填料重度分别为 16、18、20、22、24 kN/m³。路

堤高度的影响如图 13~图 15 所示。加固区沉降随路堤填料重度逐渐增加;桩顶荷载、桩帽间荷载均随路堤填料重度逐渐增加,但桩顶荷载增加更加显著;桩土应力比随路堤填料重度变化很小;中性面深度和负摩擦力均随路堤填料重度逐渐增加。

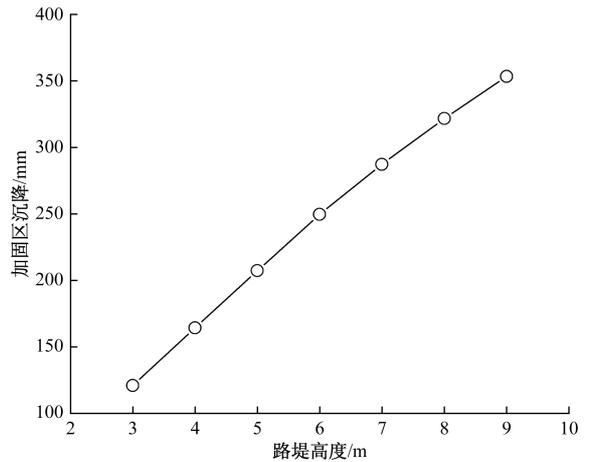


图 10 路堤高度对加固区沉降的影响

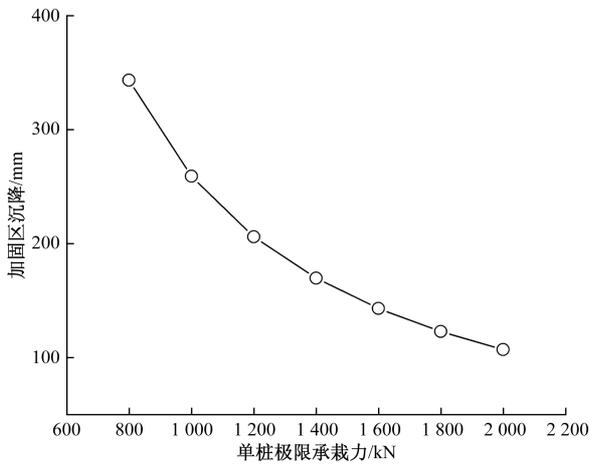


图 8 单桩极限承载力对加固区沉降的影响

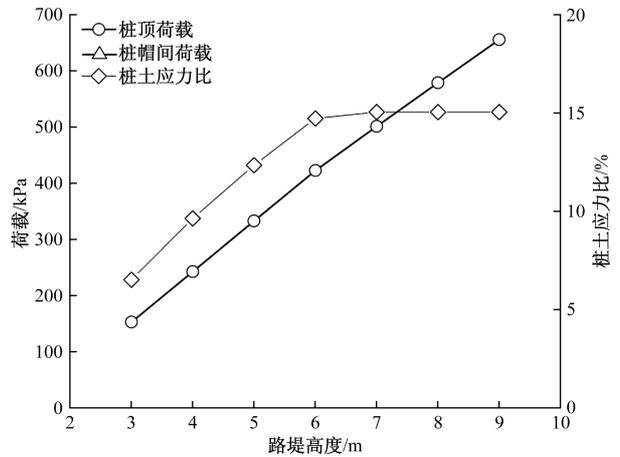


图 11 路堤高度对桩顶荷载、桩间土荷载和桩土应力比的影响

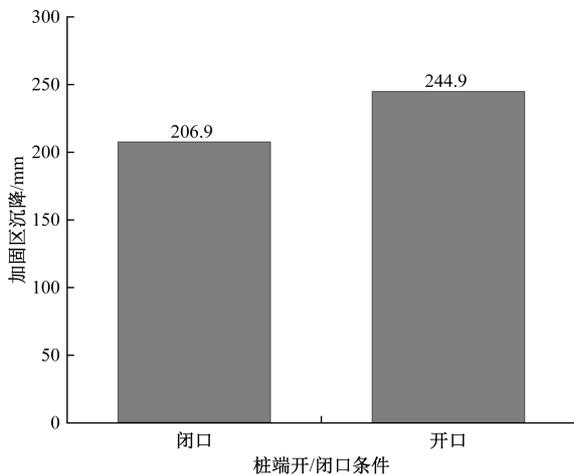


图 9 桩端开/闭口条件对加固区沉降的影响

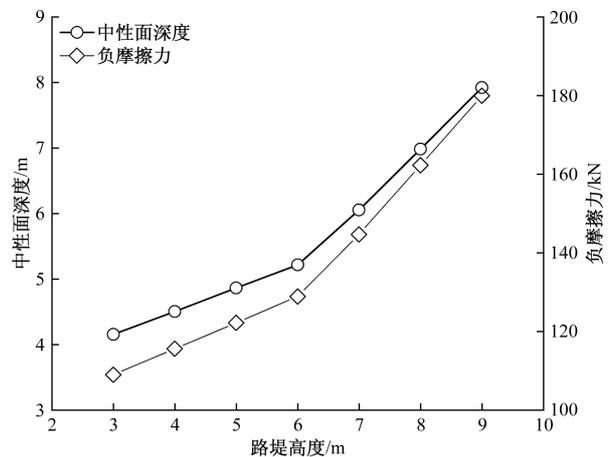


图 12 路堤高度对中性面深度和负摩擦力的影响

5.3 路堤顶宽

路堤顶宽代表了路堤附加荷载作用的宽度。路堤顶宽分别为20、25、30、35、40、45 m。加固区沉降随路堤顶宽逐渐增加如图16所示；中性面深度、负摩擦力均随路堤顶宽逐渐增加如图19所示。

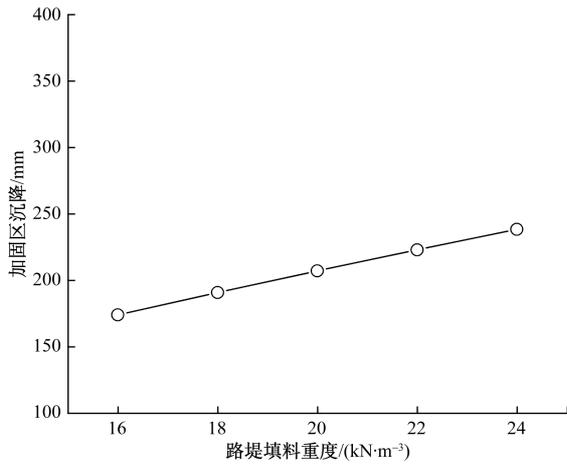


图13 路堤填料重度对加固区沉降的影响

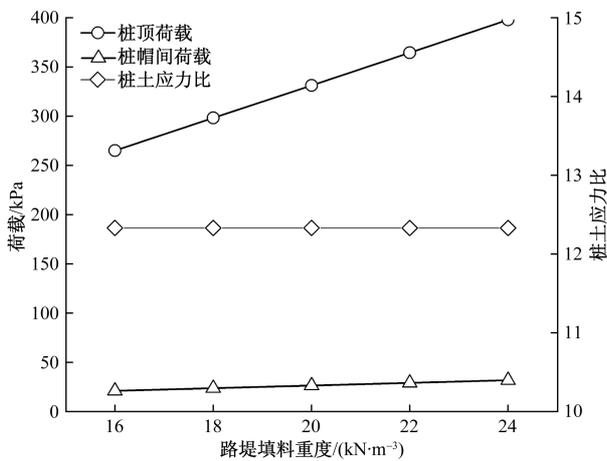


图14 路堤填料重度对桩顶荷载、桩间土荷载和桩土应力比的影响

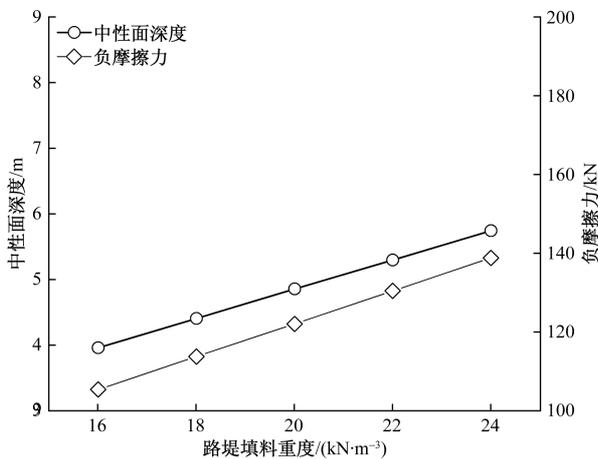


图15 路堤填料重度对中性面深度和负摩擦力的影响

5.4 路堤边坡坡率

路堤边坡坡率为0.5~2。加固区沉降随路堤边坡坡率逐渐增加如图18所示；中性面深度、负摩擦力均随路堤边坡坡率逐渐增加如图19所示。

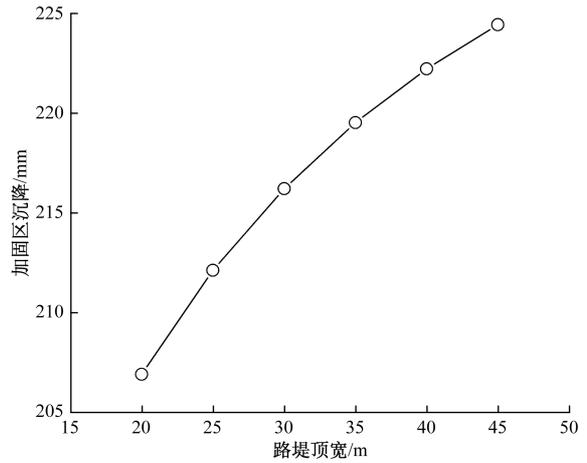


图16 路堤顶宽对加固区沉降的影响

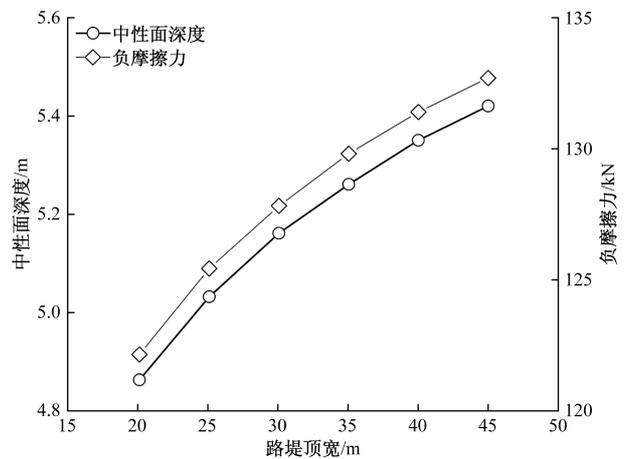


图17 路堤顶宽对中性面深度和负摩擦力的影响

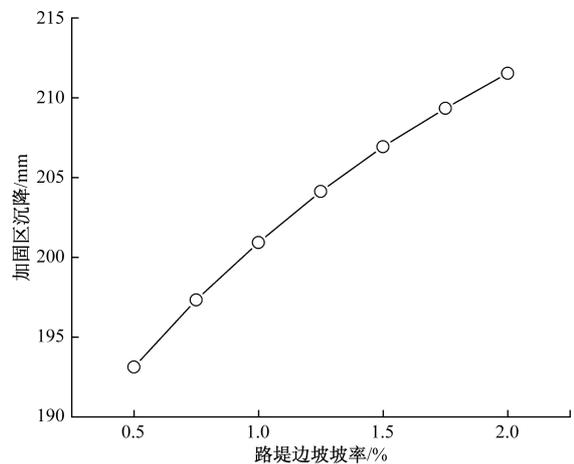


图18 路堤边坡坡率对加固区沉降的影响

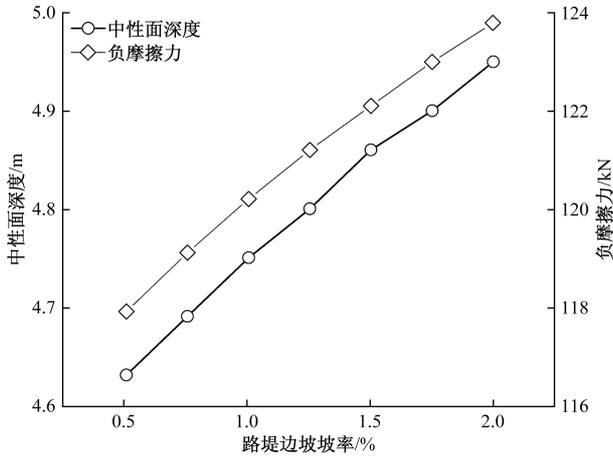


图 19 路堤边坡坡率对中性面深度和负摩擦力的影响

6 结论

(1)加固区沉降随淤泥质粉质黏土压缩模量、工作垫层厚度、工作垫层侧阻力逐渐增加;中性面深度随工作垫层厚度逐渐增加,但随工作垫层侧阻力逐渐减小;负摩擦力均随工作垫层厚度、工作垫层侧阻力逐渐增加。

(2)加固区沉降均随桩端土极限端阻力、总极限端阻力和单桩极限承载力逐渐增加。相对于开口条件,桩端为闭口时,桩端阻力较大,单桩承载力较高,加固区沉降较小。

(3)加固区沉降均随路堤高度、路堤填料重度、路堤顶宽和路堤边坡坡率逐渐增加;中性面深度和负摩擦力也随之呈现增加趋势。

参考文献

- [1] 杜世伟,贾宁,刘海潮,等. 桩端为岩层时刚性桩复合地基的设计方法和工程实践[J]. 建筑结构, 2022(S1): 2423-2427.
- [2] 罗军,李建国. CFG 桩与管桩处理深厚淤泥层的适用性

- 研究[J]. 路基工程, 2023(2): 136-141.
- [3] JTG/T D31—02—2013 公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [4] 杨龙才,王炳龙,赵国堂,等. CFG 桩网复合地基沉降计算方法研究[J]. 铁道建筑, 2009(7): 19-23.
- [5] 齐昌广,刘汉龙,陈永辉,等. 塑料套管混凝土桩承载试验及沉降计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2302-2308.
- [6] 刘吉福,郑刚,龚晓南. 附加应力法计算刚性桩复合地基路基沉降[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 1995-2002.
- [7] 俞建霖,徐山岱,杨晓萌,等. 刚性基础下砾芯水泥土桩复合地基沉降计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2111-2120.
- [8] 郑刚,刘双菊,伍止超. 不同厚度褥垫层刚性桩复合地基工作特性研究[J]. 岩土力学, 2006(8): 1357-1360.
- [9] 张乾青,李振宝,马彬,等. 刚性与柔性桩承式路堤竖向承载特性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 991-999.
- [10] 史永强,赵俭斌,杨军. 基于主成分分析的优化神经网络模型及静压管桩单桩极限承载力预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 634-640.
- [11] 刘俊伟,张明义,寇海磊. 开口管桩竖向承载力时间效应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 117-122.
- [12] 王凯,冯传煌,杜文山,等. 重载铁路软土区交叉式组合桩复合地基沉降特性研究[J]. 铁道勘察, 2022, 48(4): 66-71.
- [13] 卢兰萍,张泽浩,张宇超. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基对于软基的加固效果研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8877-8883.
- [14] 周文辉,肖宁,贺佐跃. 广州南沙某路基桩帽下脱空机理分析[J]. 河南科学, 2021, 39(11): 1783-1789.
- [15] 于洪川,代楠,陈逸飞,等. 开口与闭口管桩连续贯入机理的可视化模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6573-6580.
- [16] 焦涛,李梁慧,刘德辉. 刚性桩复合地基模型在拟动力试验下的桩身反应研究[J]. 公路工程, 2020, 45(2): 207-212.

Analysis of Settlement Influence Parameters of Rigid Composite Foundation Based on Additional Stress Method

FU Youwei, HE Zuoyue

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China)

Abstract: In view of the lack of analysis of influencing factors of settlement of rigid pile composite foundation in existing literatures, the influence rules of foundation soil, rigid pile, embankment and other factors on settlement, neutral surface depth, negative friction, etc. was analyzed, based on the additional stress method of rigid pile composite foundation. The results show that the settlement of the reinforced area increases gradually with the compression modulus of silty clay, the thickness of working cushion and the side resistance of working cushion. The depth of neutral surface increases gradually with the thickness of working cushion, but decreases gradually with the side resistance of working cushion. The negative friction increases gradually with the thickness of the working cushion and the side resistance of the working cushion. The settlement in the reinforced area increases gradually with the ultimate resistance of the pile end soil, the total ultimate resistance and the ultimate bearing capacity of single pile. Compared with the opening condition, when the pile end is closed, the pile end resistance is larger, the single pile bearing capacity is higher, and the settlement of the reinforced area is smaller. The settlement of the reinforced area increases gradually with embankment height, embankment filling weight, embankment top width and embankment side slope ratio. The depth of the neutral surface and the negative friction force also show an increasing trend. The research results can provide some reference for the design and calculation of rigid pile composite foundation.

Keywords: rigid-pile; composite foundation; influencing factor; settlement in reinforced area; superimposed stress method