

论公路工程软基加固碎石桩施工技术应用分析

梁瑞利

新疆北新路桥集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]软土地基具有高含水量、大孔隙比、低承载力、高压缩性等特点,直接在其上修建公路易导致路基失稳、工后沉降过大等工程问题。基于此,本篇文章以碎石桩施工技术为研究对象,结合具体工程案例对其在软基加固中的应用进行深入剖析,希望可以解决公路软基的稳定与变形问题。

[关键词]公路工程;软基加固;碎石桩施工

DOI: 10.33142/ect.v3i9.17870

中图分类号: U45

文献标识码: A

Analysis of the Application of Construction Technology of Gravel Pile for Soft Foundation Reinforcement in Highway Engineering

LIANG Ruili

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Soft soil foundation has the characteristics of high moisture content, large porosity, low bearing capacity, and high compressibility. Directly constructing highways on it can easily lead to engineering problems such as roadbed instability and excessive post construction settlement. Based on this, this article takes the construction technology of gravel piles as the research object, and combines specific engineering cases to deeply analyze its application in soft foundation reinforcement, hoping to solve the stability and deformation problems of highway soft foundation.

Keywords: highway engineering; soft foundation reinforcement; construction of gravel pile

引言

在公路工程软基加固过程中,碎石桩复合地基技术通过振动或水冲等方式在软土中形成桩孔,然后填入级配良好的碎石并振密,形成一系列竖向增强体。这些碎石桩与周围的桩间土共同构成复合地基,通过置换部分软土、振密桩间土、提供竖向排水通道以及桩体的应力集中作用,综合提高了地基的整体抗剪强度和承载能力,并有效加速了软土的排水固结,控制了沉降变形。

1 工程概况

某地区公路加宽工程面临着复杂的地质挑战,施工区域主要是由低液限黏土质组成,这种土质有较高的压缩性以及较低的承载力,地下水位比较高,水量较为丰富,这使得地基的软弱性加剧,在桥头过渡段,因为结构存在差异并且车辆荷载集中,路基填方的需求格外突出,填筑高度达到了4~5m。然而这种高度的填方荷载远远超过了原地基的承载能力,如果不进行特殊处理,很容易引发路基不均匀沉降、路面开裂等病害,为了解决这个问题,项目团队运用碎石挤密桩技术来进行地基加固,该技术借助振动沉管形成桩孔并填入碎石,可置换软弱土体,还可以借助挤密作用提升周围土体密度,形成复合地基,提高地基承载力和抗变形能力,保证路基长期稳定^[1]。地基加固的具体参数如表1所示。

表1 地基加固指标

加固前承载力 f_{sk} (kPa)	土层压缩模量 E_s (MPa)	加固后复合地基承载力 f_{spk} (kPa)
95	4.10	130

2 碎石桩设计要点

2.1 桩长以及桩径计算

技术人员根据详细的工程勘察报告以及承载力验算结果,得出该工程场地天然地基的平均承载力只有95kPa,这一数值远远低于设计所要求的120kPa承载力标准,水文地质调查说明地下水位埋深相对较浅,稳定水位处于地表下1.5m的位置,这样的高水位状况会使地基土的力学性能变弱。经过多个方案的比较与选择,技术人员决定采用碎石桩复合地基加固方案,借助振动沉管法施工来形成桩土共同承载体,依据软弱土层厚度以及桩端持力层深度的要求,经过严谨地计算确定桩体长度为5m,如此可有效地穿透软弱层并且保证桩端进入下部密实砂层,

在桩径参数设计阶段,技术人员综合考虑地基土的渗透系数和颗粒组成,并且顾及现场配备的DZ-90型振动沉管机的成桩能力,在规范所允许的30~80cm范围之内进行多个方案的比较与选择。凭借构建三维有限元模型来分析不同桩径的应力扩散效应,发现40cm桩径可保证单桩承载力达到180kN的设计要求,还可让桩间距控制在1.8m的合理范围,相比50cm桩径方案节省材料用量22%^[2]。

2.2 桩距布设要点

技术人员依据复合地基的受力特性,最后选用等边三角形布桩方式,以此来优化桩土应力分布,提高整体稳定性,桩间距被设定成 1.8m,这样能保证桩间土充分参与承载,同时还可避免应力重叠效应,鉴于路堤荷载的扩散影响,处理范围要延伸到坡脚外 2.0m,防止侧向变形,保证边坡稳定。由于施工区域为低液限黏土地基,桩间距可以利用式(1)计算:

$$S=1.08\sqrt{A_e} \quad (1)$$

其中, S 为桩间距, A_e 为单桩所承担的地基处理面积,其具体计算如式(2)所示:

$$A_e = \frac{A_p}{m} \quad (2)$$

其中, A_p 为碎石桩截面积; m 为面积置换率;面积置换计算公式如式(3)所示:

$$f_{spk} = [1 + m(n-1)]f_{sk} \quad (3)$$

f_{spk} 为复合地基承载力标准值; f_{sk} 为桩间土承载力标准值, n 为桩、土应力比,该项目中取固定值 3。将表 1 中的数据代入对应公式中,如表 2 所示。

表 2 计算结果

面积置换率 m	桩间距 m/m	复合地基土层压缩模量 E_{sp} (MPa)
0.1842	4.10	130

复合地基压缩模量计算公式如式(4)所示:

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)]E_s \quad (4)$$

E_s 为桩间土压缩模量,根据表 2 的计算结果可以得出碎石桩间距为 0.85m。当碎石桩施工结束后要在其上方铺设一层 0.5m 厚的碎石垫层来加大负荷承载力。

2.3 碎石桩填量计算要点

在填料选择环节,技术人员依据工程地质状况以及施工工艺的具体要求,历经多个方案的比较与筛选,最终选定强度较高且级配优良的未风化碎石或者砾石作为桩体填料,为保证成桩质量,对填料的粒径进行严格把控,使其不超过 63mm,来防止在振动沉管过程中出现卡管情况,同时避免过大颗粒对设备外壳造成异常磨损。填料的含泥量被严格控制在 3%以内,以此减少泥质成分对桩体透水性以及强度的影响,施工用水选用符合国家标准的饮用水,防止水中杂质对填料密实效果产生影响,经过室内击实试验的验证,该填料方案可保证桩体压实度达到 95%以上,充分契合设计要求的承载力标准^[3]。

碎石桩填石量由式(5)计算:

$$q = \beta \times L \times \pi d^2 / 4 \quad (5)$$

其中, q 为单桩填料量; L 为桩长和桩径, β 为充盈系数,取值范围为 1.15~1.50;最终所得到的单桩填料量

为 0.79m³。

3 碎石桩施工技术在公路工程软基加固中的应用

3.1 施工准备

在项目正式启动施工之前,施工单位务必要对路基作业面展开全面且系统的预处理工作,专业队伍凭借机械化设备与人工协作的方法,将施工红线范围内的所有地表植被、建筑垃圾以及腐殖土等杂物给予彻底清除,清除深度需达到设计规定的 30cm,之后还要对清理完成后的场地开展压实度检测工作。考虑到南方多雨地区的施工特性,需预先规划三级临时排水体系:在作业区的外围设置截水沟,以此拦截坡面径流,沿着施工便道布置排水盲沟,同时在桩机作业区的周边开挖环形导流明沟,构建起完整的水流引导网络,保证在雨季单日降水量为 50mm 的工况下,作业面不会出现积水现象^[4]。

针对碎石桩核心材料的供应工作,施工单位需组建专项考察组,针对半径 50km 范围内的 5 家及以上石料场展开比选评估工作,重点对开采许可证、月产能以及碎石压碎值等关键指标进行核查,经由一系列严谨的考察流程,最终选定 2 至 3 家优质供应商,并与其签订分级供应协议,在材料质量控制环节,除了严格依照 20~50mm 粒径要求执行外,还需运用“二级筛分+水洗”工艺,以此保证含泥量≤3%,并且颗粒级配曲线应当处于规范推荐的连续级配区间范围之内。

3.2 施工放样与测量

在碎石桩施工实际操作时,施工单位要组建专业化施工团队,优先挑选有 3 年以上地基处理经验的技术人员和操作工人,还要组织专项技术交底工作,测量放线环节要用高精度全站仪进行坐标放样,凭借测量员初测、技术负责人复测、监理工程师终测这种“三级复核制”,把桩位中心线偏差控制在 ±20mm 范围内。对于桩位布置,要依照设计计算的 0.85m 等间距梅花形布点方案,用经计量检定的 50m 钢尺配合 20kg 拉力器进行钢丝绳张拉定位,每个桩位都要进行纵横双向校核,并且用掺有荧光剂的石灰粉在硬化地面上做出直径 30cm 的圆形标记,标记线宽度维持 5cm 以保证辨识度。针对软弱夹层或者填挖交界处等特殊地质段,要把控制点的布设加密到 0.7m 的间距,并且在施工日志中单独记录定位数据。所有测量的原始记录都要凭借防篡改电子手簿实时上传至工程管理平台,以此达成施工全过程的可追溯性^[5]。

3.3 桩机定位与调整

在桩机安装调整作业这个过程当中,施工人员要严格按照规范流程来进行操作,首先要保障桩机准确就位,之后还应该借助全站仪这类测量仪器去复核桩位坐标,在确认没有任何差错之后,再缓慢地降低导管,在操作的整个过程中,需要运用液压系统来精确控制下降的速度,还要安排专门的人员去观察导管与地面之间的距离。当这个距

离达到大约 10cm 的时候,就要马上停止下降。

进入钻机位置调整阶段,此时要借助水平仪以及激光定位装置来对钻机实施细微调整,以此保证桩顶中心与预先设定的桩位标记之间的偏差不会超过 2mm,当完成位置校准工作之后,才可再次把桩导管埋入地下,在埋设的过程中需要保持以均匀的速度向下压,防止出现偏移的情况。在整个施工过程当中都要运用电子倾角仪对桩机的垂直度进行实时监测,每隔 30s 就要记录一次数据,一旦发现偏差超过 0.5%,就应当立刻暂停作业并进行调整。

3.4 振动沉管与成桩作业

当桩机套管准确无误地移动到预先设定的位置后,施工人员便可启动高频振动器展开振动作业,在作业进程中,要充分借助振动棒自身的重力以及高频振动所产生的激振力,凭借共振效应让套管平稳地贯入松软地层,为保证施工质量,操作人员需使套管垂直度偏差不超过 1%,并且采用分级下沉的方式,每贯入 2m 就暂停振动,复核垂直度之后再继续进行作业。

在整个施工过程中,监测系统要对振动时长、电机工作电流以及泥浆循环流速等关键参数开展实时采集并分析,数据采样频率不得低于每秒 1 次,要是监测数据显示振动电流突然下降超过 30%或者流速降低 40%,那就意味着遇到了坚硬夹层或者孤石等障碍物,这时候就得马上停止下沉作业,借助卷扬系统把桩管准确提升 $60 \pm 5\text{cm}$,然后切换到 2800r/min 的高速振动模式再次进行激振。

实践情况显示,当运用“振动-提升-复振”这种循环施工工艺之时,每一个循环里面振动的时长适合控制在 3 至 5 分钟的范围,相邻的两次提升之间间隔的时间不应该超过 15 分钟,借助这样的方式可有效地破碎坚硬地层,并且还可以避免套管因为长时间振动而产生疲劳损伤。

3.5 停止投料与孔深校验

当桩管抵达预定的试桩高度之时,施工人员应当即刻停止振动作业,借助测量仪器对桩管的垂直度以及深度给予复核,以此查验是否契合设计要求,待沉管精确地达到预设标高后,要迅速组织施工班组展开碎石灌注工序,在作业期间,应配备 1 台 3t 级的小型装载机,并协同 3 名工人共同作业,运用分层连续灌注的方式,朝着套管内注入粒径为 5~20mm、含泥量小于 3%的级配碎石。其中基础段要使用经过试验室配比的水泥碎石混合物,借助强制式搅拌机预先进行拌和,使其均匀一致,务必保证混合料的坍落度控制在 30~50mm 的范围之内,在灌注过程中,要安排专职质检员全程进行旁站监督,利用标定过的计量器具实时监控灌注量,保证碎石面一直高于套管底口 2m 以上。

在完成灌注操作之后,操作人员需要以均匀的速度向上提升桩管,将提升速度严格控制在每分钟 1~2m 范围内,借助桩管自身的重量促使自动脱扣式桩尖可顺利开启,

在这个时候,操作人员要留意观察碎石下落的具体状况,借助测绳按照一定的时间间隔定期检测填料的高度,以此来保证桩孔内碎石的密实程度可达到规范所要求的压实系数,即压实系数要大于或等于 0.96。对于整个施工过程而言,应当做好影像记录以及施工日志,重点记录灌注的具体时间、填料的使用数量以及针对异常情况所采取的处理措施等关键参数。

3.6 振动拔管

当往桩管内持续投放材料时要同步启动振动锤施加激振力,振动的频率最好控制在 20~30Hz 这个范围,激振力不能低于 80kN,这样能保证填料在振动作用下充分达到密实状态,在进行拔管作业以前,要先开启振动锤进行 5~10s 的预先振动,让桩周的土体初步压实,降低后续拔管时土体回弹带来的影响。在拔管的过程中,要严格控制提升速率在 1.0~1.2m/min 的范围内,并且让振动持续发挥作用,使得桩周土体在动态压实的条件下形成稳定的桩身结构。

当套管被提升到预定的标高之后,就要马上开展倒钻作业,也就是再次向下压桩管直至原来的桩底标高,并且把这个过程重复 7~8 次,以此来挤密桩端的土体,提高桩端的承载力,在沉桩的过程当中,要结合振动锤的激振力以及桩管反复地上下运动,保证桩周以及桩底的土体压实度达到 95%以上。施工时要配备沉降观测仪实时监测桩体的沉降状况,如果发现有异常沉降或者土体松动的情况,就要及时调整振动参数或者补填碎石,保证成桩质量符合设计的要求。

3.7 套管撤除

在这一施工环节当中,要严格依照振动拔管以及倒钻复压这样的工艺流程来循环开展作业,每一个循环所持续的时间控制在 3~5min,借助桩管上下反复移动的方式,让桩周土体可获得充分的挤密效果,每次进行套管提升操作时,应当同步开启振动锤,并且在桩管提升至距离桩顶 2m 的范围之时暂停作业,接着利用装载机向管内补填级配碎石,以此保证填料一直高出桩管底部 1.5m 以上。

在桩体达到设计标高之后,要开展最终密实度检测工作:运用动力触探试验或者静载试验来验证桩端承载力,以此保证桩身压实系数大于或等于 0.97,只有验收合格了,才可拆卸井底套管,在拆除的时候,应当使用液压拔管机匀速起拔,防止扰动已经成型的桩体,当套管完全移除后,马上用平板夯对桩顶松散填料进行二次夯实,并且覆盖土工布进行养护,避免雨水渗入对桩体稳定性产生影响。整个过程要留存振动参数记录表以及碎石灌注量台账,将其作为质量验收的依据。

4 结语

本文深入探讨了碎石桩技术的加固机理,详细梳理施工技术流程与质量控制核心,并结合工程实践评估其应用

成效, 以为同类工程的优化设计与标准化施工提供更多参考。

[参考文献]

- [1]黄秋玲,黄波.公路工程软基加固施工中碎石桩技术的应用[J].汽车周刊,2025(1):162-164.
[2]路子腾.碎石桩施工技术在公路工程软基加固中的应用研究[J].交通世界,2024(11):68-70.
[3]钟久红.公路工程软基加固碎石桩施工技术应用分析[J].

运输经理世界,2023(36):35-37.

[4]王晓东.公路工程软基加固碎石桩施工技术应用[J].交通世界,2023(16):37-39.

[5]李贵宾.碎石桩技术在公路工程软基加固施工中的应用[J].交通世界,2023(11):62-64.

作者简介:梁瑞利(1978.11—),男,西安交通大学,土木工程,就职单位:新疆北新路桥集团股份有限公司,项目总工程师,工程师。