

复合路基设计与施工技术优化研究

李博炆

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]复合路基是在软土地基上修建高速公路、高速铁路及市政道路的一种常见地基加固方式,它的重点就是桩体和加筋材料共同工作达到提高承载力和减少沉降的目的。文章以复合路基的设计理论和技术改进为主要切入点进行系统的介绍。在设计部分主要包括了地基承载力计算和沉降计算方法、桩土应力比以及置换率的设计指标还有各种情况下加筋材料的选择标准等。在施工部分介绍了 CFG 桩、碎石桩以及水泥搅拌桩等常用的地基处理方法的施工过程还有加筋材料的施工质量把控问题。对于不均匀沉降以及桩身质量问题等问题提出了一些有效的解决方法,分析了信息及智能施工技术的应用方向。研究结果显示:确定桩土应力比、置换率;选择合适的加筋材料参数并完善施工过程中实时监控是对复合地基工程进行质量把控的三个方面。

[关键词]复合路基; 设计优化; 施工技术

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19785

中图分类号: U416.02

文献标识码: A

Research on Optimization of Composite Roadbed Design and Construction Technology

LI Boyang

Central South Survey Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Composite subgrade is a common foundation reinforcement method for building highways, high-speed railways, and municipal roads on soft soil foundations. Its focus is on the joint work of piles and reinforcement materials to improve bearing capacity and reduce settlement. The article provides a systematic introduction to the design theory and technical improvements of composite roadbeds. In the design section, it mainly includes calculation methods for foundation bearing capacity and settlement, design indicators for pile-soil stress ratio and replacement rate, as well as selection criteria for reinforcement materials in various situations. In the construction section, the construction process of commonly used foundation treatment methods such as CFG piles, gravel piles, and cement mixing piles, as well as the quality control of reinforcement materials, were introduced. Effective solutions have been proposed for issues such as uneven settlement and pile quality, and the application direction of information and intelligent construction technology has been analyzed. The research results show that determining the pile-soil stress ratio and replacement rate; Selecting appropriate reinforcement material parameters and improving real-time monitoring during the construction process are three aspects of quality control for composite foundation engineering.

Keywords: composite roadbed; design optimization; construction technology

引言

复合路基即桩体、桩间土和加筋垫层共同分担负荷的一种路基结构形式,实际上就是利用桩土联合对软土地基进行加固以提高路基的承载能力和减小沉降量的一种方法,复合地基法就是一种桩体主要承受主要荷载、桩间土承担部分荷载的软土加固措施,在短时间内就可完成并且能取得良好的承载效果和较小的残余下沉量,近年来复合路堤在公路、轨道交通及城市道路中的应用非常广泛,但是现阶段在复合路堤的设计施工过程中还存在着很多的技术问题有待于解决:如承载力、沉降计算适用性以及桩

土应力比、置换率的选择等,这些问题都需要我们进一步地研究探讨。本文在研究设计理论和技术手段的基础上,对目前常用的处理办法进行利弊分析,并给出改进方案,从而为今后开展复合路基工程提供一些技术支持及理论依据。

1 复合路基设计理论与方法

1.1 地基承载力与沉降计算方法

复合地基承载力计算的关键是准确把握桩体以及桩间土所承担的荷载比例问题。现有的工程中常用的复合地基承载力计算的方法有复合压缩模量法、承载力比法、数

表 1 复合地基沉降计算方法对比

计算方法	基本原理	适用条件	优点	局限性
复合模量法	按面积加权计算复合模量	柔性桩复合地基	参数易获取, 计算简便	忽略桩土相互作用
承载力比法	基于桩土应力比分配荷载	刚性桩复合地基	反映荷载传递机制	应力比取值依赖经验
数值分析法	有限元/有限差分数值模拟	复杂边界条件	可模拟复杂工况	计算工作量大

值分析法等几种,以某高速铁路工程为例,在基底使用了水泥搅拌桩与 CFG 桩对地基进行处理,分别运用复合压缩模量法和承载力比法求出了加固区的沉降量,并对其计算方法进行了评价比较。

沉降计算是复合地基设计的主要工作之一,在进行加固区的沉降量计算时一般采取的是复合模量法,在下卧层中沉降量的计算方式是采用分层总和法来进行计算。所用的参数选择是否合理关系到计算结果的准确性,需要根据实际的现场测试或者参考当地的经验来进行调整。

1.2 桩土应力比与置换率设计

桩土应力比是反映桩结构和桩周地基土共同承担荷载多少的重要指标。它受到许多方面的制约,如桩土弹性模量比、置换比、荷载大小以及施工质量等诸多因素的影响。研究发现影响复合地基桩土应力比的因素有六个,分别为桩土弹性模量比、置换比、荷载大小、桩径、垫层刚度以及施工方法等。其中置换比属于复合地基设计的主要控制指标。桩土面积置换比与桩径 d 和桩距 L 之间具有如下关系: $m=d^2/L^2$ (桩为正方形布置)。若确定了桩土的面积置换比则也就确定了该工程在满足强度和压缩变形的要求下所对应的经济合理的置换率。针对软土地段的重要工程,在满足 3.6%的置换率下,使用透水混凝土桩复合地基能使路面工后沉降不超过 43mm,使达到 99%固结状态的时间从原来的一年减少到 155 天左右。桩土应力比 n 与置换率 m 之间有相关性,即:置换率越大,则桩体会受到更多的力,桩土应力比也随之上升,但是二者的关系并不是成正比的关系。设计过程中应当依据桩型种类的不同以及土层情况不同还有受力情况的不同,来合理设定桩土应力比的大小。

1.3 加筋材料设计与参数选取

加筋材料是对复合路基起着重要作用的一部分,它的功能主要是控制桩间土的横向位移、调整传力途径、提高整个路基的整体承载能力。常用的加筋材料包括土工格栅、土工布、土工格室等,不同的材料具有不同的力学指标。加筋材料的设计需要考虑的主要参数有:抗拉强度、延伸率、网孔大小、长期蠕变特性和与土接触面之间的摩擦系数等。对于典型的桩承式土工合成材料加筋路堤形式,应

当结合土工合成材料的拉伸模量、桩间距以及层数等因素来综合考虑复合地基加固的效果,从而合理确定采用土工合成材料的数量以及拉伸模量参数值。而加筋材料的位置摆放及其数量都会对复合路基产生很大的影响。通常情况下,加筋材料应当设置在桩头承台中部或者偏下一点的位置上,使其能更好地发挥拉膜的作用。而对于一些高填方路堤或者是地基沉降差异比较大的地方,则需要使用两层甚至多层的加筋形式。

1.4 不同工况下的设计要点

不同的工程项目对于复合基床的设计要求也不尽相同,在设计过程中需要依据工程实际情况有针对性地选择相应的工程技术措施,高速铁路复合基床对工后沉降值的要求非常苛刻,一般规定工后沉降不大于 15mm。宜采用 CFG 桩或者管桩等刚性桩基的形式,加大沉降监控和预测工作。高速公路复合基床除了考虑工后沉降外,还要注意其差异沉降带来的路基结构变化,桥头引道、填方边坡与沟槽相接的位置均需单独进行设计,可以通过调整桩间距以及桩长度等方式进行解决。城镇道路和市政道路由于施工场地有限及对临近环境影响比较大等原因导致了这些地方很难达到复合基床的要求。宜选用水泥搅拌桩类扰动小的桩型并合理安排施工顺序,降低对临近建筑的影响;堤路合一工程不仅要满足防洪功能的要求,同时也要保障道路营运的安全。深层水泥搅拌桩、透水混凝土桩施工情况下均可有效地对上部堤防和下部地层的沉降、上浮、侧向位移起到一定的约束作用,工后沉降量均小于 100mm。

2 复合路基施工关键技术

2.1 地基处理技术

复合路基施工的第一步便是地基处理,当前道路工程使用的桩类有 CFG 桩、碎石桩、水泥土搅拌桩以及管桩等等。CFG 桩全称为水泥粉煤灰碎石桩,其特点就是承载能力强,工期快,经济实惠,适用于粉土、粘土、砂土等各种类型的地基条件,施工方法采取的是长螺旋钻孔配管内泵送技术,桩径一般控制在 400~600mm 之间,而桩距则为 1.2~2.0m 左右。对于桩位的偏移以及垂直度的要求比较严格,此外还要注意桩身连续性和桩顶标高的情况。碎石桩主要用于软粘土地质或者砂性地质环境之中,能够

起到振密、替挤、排水三种效果。桩径为 600~800mm, 桩距范围 1.5~2.5m 之间。施工方法为振动沉管法或者振冲法, 施工中需注意的是填料数量、压实电流以及留振时间, 在软粘土、淤泥质土的地基中使用水泥搅拌桩, 用深层搅拌机强制将水泥浆液与软土搅拌成桩体, 桩的直径为 500~800mm 左右, 加固深度一般不超过 15m, 施工中要控制搅拌次数及提升速度, 水泥掺加量等保证桩体均匀性。

2.2 填筑与压实施工工艺

填筑与压实施工是影响复合式路堤沉降控制的主要因素之一。填料必须符合级配良好、含水量适中的标准。对于饱和度较高的淤泥质软土地基, 可以采用石灰-水泥联合改良法, 经过正交试验得出最佳的配合比为 6%生石灰和 4%P O42.5 水泥, 混合料的最大干密度为 1.82g/cm³ 在 28 天时的无侧限抗压强度大于 1.5Mpa, CBR 值大于 15%; 压实方法采用“先小后大, 先静压后振动, 先慢后快”“先中间后两边、先轻后重”的方式进行; 填料采用分层的方式, 每层压实厚度不超过 200~300mm。检测方法采用挖坑灌砂法或者环刀法, 检测次数以及指标均要满足设计的要求。核心区压实度应达到 96%以上。

2.3 施工过程中的质量控制要点

施工过程质量控制是保证复合地基工程质量的基础性工作。质量控制要覆盖从原材料进厂起一直到工程完工验收整个过程。桩体施工质量控制要点如下: 桩位偏差 ≤50mm, 桩垂直容许偏斜 1%, 桩径不小于设计尺寸, 桩体连续无断开。对 CFG 桩、水泥搅拌桩采用低应变法检测桩身完整性, 检测数量不得低于总桩数的 10%, 加筋层施工质量控制要点如下: 选用加筋材料品种及其规格需满足设计要求, 铺设平顺无波浪, 搭接宽度及锚固长度满足要求, 上覆填料厚薄一致, 碾压时不得破坏加筋材料等。填筑压实质量控制要点有: 填料级配合成与含水量检查, 压实厚度管理, 压实密度测量等, 各层填筑完毕后都要进行压实密度测试, 对不合格的地方要重新回填压实。

3 复合路基施工问题分析与技术优化

3.1 不均匀沉降控制技术优化

不均匀沉降是复合路基工程中最主要的质量问题, 主要体现在路堤中间与边坡间的不均匀沉降、桥梁与路基间的不均匀沉降以及新旧路基间的不均匀沉降等几类, 造成其产生原因主要有以下几个方面: 地基土层分布不均, 桩体施工质量不同, 填筑厚度各异, 排水固结不够充分等。

防治措施应该从设计、施工和监控三个方面进行综合治理, 改进措施有: 采用长短桩法或者疏密桩法, 在路堤下沉比较严重的部位增加桩数或者延长桩长; 增加加筋层来提高基底的整体强度; 控制好填筑速度使地基能够得到充分的固结; 采取设置过渡带的方法来进行基底硬度的逐渐过渡。针对城市堤路结合工程, 台阶加筋工况的整体变形规律和天然堆载工况差不多, 如果不做软基处理是不能够有效地缩短新老堤防以及地基的下沉、水平位移的。

3.2 桩体施工质量提升措施

桩基施工质量通病为断桩、缩径、夹泥、桩体强度不够等问题。在 CFG 桩施工过程中, 提管过快及混凝土坍落度掌握不好引起的是造成断桩的主要因素, 在水泥搅拌桩施工过程中, 搅拌不到位以及加料量少引起的是导致桩身强度低的原因。质量改进措施如下: 改良施工工艺, 如 CFG 桩需使提管速率保持在 1.2~1.5m/min 之间, 混凝土坍落度维持在 180~220mm 范围内; 水泥搅拌桩需使搅拌次数不低于两次, 提升速度不超过 0.8m/min。加强施工过程中的检测力度, 使用自动记录仪来监测整个施工过程。认真开展桩身完整性的检查工作, 在发现有质量问题的时候应及时进行补桩或者注浆等加固补强的方法。

3.3 加筋层施工优化方法

加筋层施工经常遇到的问题有: 加筋布铺设不平顺、搭接长度不够、锚固不到位、上层填料摊铺时损坏筋材等。施工改进措施为: 铺设前把基层准确整平; 用专门张拉工具保证筋材处于绷紧的状态; 搭接部分用 U 型钉或绑扎固定; 上层填料用后退法摊铺, 不允许用机械直接碾压筋材; 填筑厚度满足设计要求后再实施碾压工序。

3.4 施工参数优化与工艺改进

施工工艺控制是提高复合地基工程质量的重要手段, 在进行现场试验段施工的时候应该找到适合本项目情况的最优施工工艺组合, CFG 桩施工工艺调整, 在试桩的基础上选取最合适的拔管速率, 以及最合适的水灰比。一般推荐的拔管速率为 1.2~1.5m/min; 水灰比范围 180~220mm; 泵送水压 2~3MPa; 碎石桩施工工艺调整: 根据试桩选择最优的锤击电流, 振入时间, 以及充盈系数。一般推荐的锤击电流为 40~60A, 留振时间为 10~15s; 充盈系数 1.2~1.4。填筑压实参数调整: 在施工现场进行碾压试验, 得到最优含水量、松铺层厚度、碾压次数以及施工机械的选择。三阶段压实工艺是: 初压使用 12~15t 的钢轮压路机静压两遍, 复压使用 18~21t 的振动式压路机振动四到六遍, 终压用 10~12t 胶轮压路机碾

压 2~3 次。

3.5 信息化与智能化施工技术应用

信息化与智能化施工技术是复合路基工程技术发展的必然趋势。借助 BIM 技术和物联网监测、北斗导航以及自动化控制等多种技术的应用,能够做到对复合路基的全过程实时观测和智能化管理。对于复合地基的固结理论的研究,传统的理论是以饱和土、大面积均布荷载为基础进行推导出来的,在现实工程中,干旱地区以及半干旱地区的土壤都是处于非饱和的状态,因此高填方路堤造成的荷载也是局部非均布荷载。试验结果表明饱和复合地基的固结沉降量要较非饱和复合地基高出 30%~50%,同时稳定的时间也较长。智能化施工技术的应用有如下表现:桩机施工参数自动记录及远程控制系统、压实机械智能行驶及压实率即时展示系统、无人机航拍及三维激光扫描质量检查方法、以物联网为基础进行沉降及应力自动监测的技术等,这几种技术的应用可以大大提高工程质量管控的精确性和及时性。

4 结语

复合路基的设计及施工技术研究也是软土地基区交通运输建设工程的一项重要课题。本文针对复合路基的技术要点及其改进措施进行了系统的解析,其中在设计上如何合理地选取桩土应力比、置换率以及增强材料性能参数

等,都是提高复合路基设计质量的重点内容;对于饱和土复合路基来说,采用变截面桩加固技术能够很好地发挥出桩土交互的优势而使复合地基承载力获得明显的改善,具有良好的经济效益和环境效益;而在施工过程中则要注重地基预压处理、加筋铺填、分层碾压这三个主要环节的质量把控,才能保证复合路基工程的性能指标。对于不均匀沉降、桩基质量问题等典型缺陷采用参数优化、工艺革新和信息化管理等多种方式可以达到提高工程质量的效果。复合型路堤施工技术目前还在不断进步当中,下一步要加强对非饱和性土固结相关研究、智能施工技术以及长期观测等方面的探索,从而让复合型路堤施工技术变得更为高效、节省成本并更具可靠性。

[参考文献]

- [1]郎翌成,潘傲宇.市政道路工程不良路基填料改良施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2026(1):117-119.
 - [2]韩振玉,姚明新,张敏.市政道路不良路基填料改良施工控制技术[J].汽车画刊,2024(12):126-128.
 - [3]汪璋淳,姜彦彬,何宁,等.城市堤路结合工程变形控制措施研究[J].水利水运工程学报,2023(6):133-141.
- 作者简介:李博炆(1994—),男,汉族,河南巩义人,工程师,毕业于河海大学交通运输工程专业,最高学历为硕士研究生,现主要从事路基路面设计工作。