

道路软土地基处理施工技术与沉降控制研究

袁知鹏

中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]软土作为一类天然含水量大、强度低、压缩性高的不良工程地质介质,在我国东部沿海地带以及内陆湖泊沼泽中分布较为普遍,它给道路工程质量带来的安全隐患和稳定性、耐久性的影响非常严重。文章从软土的工程地质性质及其存在问题出发,主要论述了排水固结法、复合地基法等相关基础处理施工技术;探究了软土工后沉降的产生原理及其计算方法,提出了施工期间工后沉降的控制、分段加载及预压控制、差异沉降控制等一系列关键技术;最后通过施工过程中的监测仪器和信息化控制技术,建立一个完整的软基处理技术体系。经试验得出结论,在软土地基基础加固处理技术及其施工工艺的选择上应做到科学合理,可以使路基的地基承载力得到加强,使得地基沉降量减少,地基稳定性增加,进而达到保证道路工程质量以及安全的目的。

[关键词]软土地基;复合地基;沉降控制

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19456

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Research on Construction Technology and Settlement Control of Road Soft Soil Foundation Treatment

YUAN Zhipeng

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Soft soil, as a type of poor engineering geological medium with high natural moisture content, low strength, and high compressibility, is widely distributed in the eastern coastal areas and inland lakes and swamps of China. It poses serious safety hazards and has a significant impact on the stability and durability of road engineering quality. Starting from the engineering geological properties and existing problems of soft soil, this article mainly discusses the construction techniques of foundation treatment such as drainage consolidation method and composite foundation method; Explored the principles and calculation methods of post settlement in soft soil engineering, and proposed a series of key technologies for controlling post settlement during construction, segmented loading and preloading control, and differential settlement control; Finally, a complete soft foundation treatment technology system is established through monitoring instruments and information control technology during the construction process. Through experiments, it has been concluded that scientific and reasonable selection should be made in the reinforcement treatment technology and construction process of soft soil foundation, which can strengthen the bearing capacity of the roadbed, reduce the settlement of the foundation, increase the stability of the foundation, and thus ensure the quality and safety of road engineering.

Keywords: soft soil foundation; composite foundation; settlement control

引言

我国交通基础设施建设向地质复杂地区发展的同时,软土地基加固处理方法越来越显得必要了。软土地基是由天然含水量高、承载能力较低、压缩性较大的松软土层组成的基础。它遍布在我国东部沿海以及内陆湖泊、水库等地势平坦低洼的地方,成为影响我国公路工程安全可靠、稳固耐用的重大障碍。在软土地基上修建道路工程时有地基承载力不够、工后沉降量大、差异沉降不易控制等一系

列技术上的难题需要解决,在软土地基上进行道路工程的修建,该如何合理的选择地基处理的方法,有效地降低工期以及工后的沉降量,保证道路结构的安全长久成为了工程界亟待解决的问题。

1 软土地基工程特性与问题分析

软土是由静水或者很缓慢流动的水体下长期堆积而成的一种饱和松软弱土层,包括有淤泥、淤泥土、泥炭以及泥炭质土等几种。它的工程性质特征是:天然含水量较

大,往往达到或者超过液限值;孔隙比大,大多数情况下大于1.0;压缩性高,压缩模量大多高于 0.5MPa^{-1} ;渗透系数低,垂直渗透系数多在 $10^{-6}\sim 10^{-8}\text{cm/s}$ 数量级上;抗剪强度低,不排水抗剪强度一般低于 30kPa ;灵敏度高,结构性强,扰动强度大。软地基给道路工程带来的影响作用主要有如下几点:地基承载力不够,不能够承受路面筑路和车辆行驶的压力,容易造成路基不稳定坍塌。沉降值大并且历时长,主固结沉降和次固结沉降互相叠加,工后沉降超出规范规定范围;差异沉降过大,尤其是桥头渐变段、新旧路基搭接等处容易出现跳车和路面开裂情况。对于软土地基以及过于潮湿的土质特殊土壤如果不加以处理,在车辆荷载的作用下会产生较大的累积变形及不规则沉降状况,使原有路基与新建路基之间的沉降差更大,软土地基常见的病害有:路基的不均匀沉降,路面横向裂缝,桥头跳车,路基滑坡等。

2 软土地基处理关键施工技术

2.1 排水固结法施工技术

排水固结法是向软土地基内铺设一定量的排水结构物,在一定的时间内逐步施加荷载预压,使软基中的孔隙水慢慢排出,有效应力增大,达到加速沉降固结并提高地基强度的一种方法。堆载预压法适用于淤泥质黏土及淤泥、人工填土等地基,堆载预压的方式包括了堆载预压和真空预压两种形式。堆载预压是通过在地基上堆积重力来实施预压,当堆载超过了预期要建设的建筑物负荷称之为超载预压,在堆载过程中为了避免破坏地基造成坍塌需要分阶段进行加载,采用打设塑料排水板+真空联合的堆载预压排水固结方法被广泛应用到软土地基治理当中去。预压时间和预压荷载的大小直接影响着对软土路基的加固效果。这种方法采用竖向排水管及水平排水垫层构成整体的排水系统,在抽真空与堆填相结合的作用下迅速对整个地基进行固结。利用真空分阶段对两层软土层进行加固,通过对施工过程中的沉降情况进行检测,经过60天观察期,地基中软土沉降量都没有超过 0.1mm ,达到施工要求。

2.2 复合地基法施工技术

复合地基是天然地基部分土体被替换或加固成为有

增强体和原状地基共同分担荷载的人工地基,相比于桩基础,复合地基充分发挥了桩间土的承载力作用,通过桩土相互作用,获得一个弹性模量相对适中,能够较好适应结构沉降变形的复合结构。常用的复合地基形式有柔性桩复合地基、刚性桩复合地基及散体材料桩复合地基等。柔性桩复合地基包括深层搅拌桩、高压旋喷桩;刚性桩复合地基有CFG桩、预制管桩;散体材料桩复合地基有碎石桩、砂桩等。深层搅拌桩是采用水泥做固化剂,由深层搅拌机强制把软土及水泥浆进行均匀搅拌,从而形成具有一定强度及低压缩性的复合桩体。这项技术可以用于开挖淤泥、淤泥质土、粉土等软土层,在施工时一定要控制好水泥掺量、搅拌速度以及提升速度,保证桩体的完整性和均匀性;水泥土搅拌桩法是最常用于软土地区路基加固的方法之一,在循环荷载作用下的水泥土桩复合地基变形规律的研究对交通荷载下软土地区路基沉降控制有着重要的参考价值。高压旋喷桩利用高压喷流冲蚀剪断土体结构,使水泥浆液与土体很好地融合,在土体中形成较大的直径、较高的强度的桩柱,在淤泥、黏土、砂土等多种类型的土质中都可以适用,桩径可达 $0.8\sim 1.2\text{m}$,桩体强度较高。CFG桩也叫水泥粉煤灰碎石桩,是由水泥、粉煤灰、碎石等多种材料组成的,是通过长螺旋钻孔灌注而成的桩体,强度大,沉降量小。可用于粉土、粉砂、黏土等土质中,在CFG桩复合地基的作用下,地基承载力可提高到 280kPa ,沉降量不超过 12.6mm 。碎石桩是利用振动或冲击方法造孔,然后放入碎石振实形成的桩体,具有排水作用,加快地基土层的固结速度。采用碎石桩处理过以后的基坑沉降降低 $11.32\%\sim 12.82\%$,经碎石桩处理过的地基长期沉降满足要求。碎石桩适用于松散砂土、粉土及可液化土层,施工方便,造价低。

在工程实际应用过程中,复合地基选型需要结合现场的地质状况以及上部结构的荷载大小、工期长短还有经济成本等多种因素来决定。针对高填方路堤或者对沉降有严格控制需要的桥头过渡段可以使用CFG桩或者高压旋喷桩等刚性或者半刚性桩复合地基。而对于普通的路段或者是对地基承载能力要求不高的一些区域,使用碎石桩或者

表1 常用复合地基类型对比

复合地基类型	桩体材料	成桩工艺	适用土层	承载力提升范围	沉降控制特点
深层搅拌桩	水泥土	深层搅拌	淤泥、淤泥质土、粉土	$80\sim 150\text{kPa}$	桩体连续,整体性好
高压旋喷桩	水泥浆	高压旋喷	淤泥、粘土、砂土	$100\sim 200\text{kPa}$	桩径可控,适应性强
CFG桩	水泥粉煤灰碎石	长螺旋钻孔灌注	粉土、粉砂、粘土	$150\sim 300\text{kPa}$	承载力高,变形小
碎石桩	碎石、卵石	振动沉管或冲击成孔	松散砂土、粉土	$50\sim 120\text{kPa}$	兼具排水固结功能

是深层搅拌桩这些柔性桩进行复合地基也完全可以达到工程的需求而且更为经济合理一些。复合地基施工时一定要注重施工质量，保证桩身的整体性能良好，桩的定位准确以及桩与土层间的协同工作效果。

3 软土地基沉降控制关键技术

3.1 施工期沉降控制技术措施

施工期间沉降控制的重点为科学规划施工程序以及控制填筑速度，利用信息化手段进行现场监控填料的施工能够有效的缓解填料堆放过程中产生的稳定性问题及控制余留沉降量；施工中要完善沉降监测体系，在地基沉降及侧向位移、孔隙水压力等方面进行动态观测，一旦有偏离正常值或者达到警戒线的现象发生，要及时暂停加载，查明情况后在做相应处理才可施工，在此期间沉降速率和侧向位移速率是最主要的控制因素，一般而言路堤中部的沉降速率不超过 10~15mm/d，而坡脚外侧向位移速率不超过 5mm/d。

3.2 分级加载与预压控制技术

分阶段加载是对软土地基稳定性及减小工后沉降的一种有效办法。荷载对于地基的作用有一定的时间差，加快加载速度能够促进荷载作用的速度提升，分级加载有利于获得较好的预压作用。现场施工时，分阶段加载要根据地基土体的固结速度以及强度变化趋势来确定每一阶段的荷载量以及加载间隔时间，保证地基在加载的过程中处于稳定的状态。每一个阶段加载之后都应该等该阶段的地基沉降平稳，孔隙水压力衰减至规定范围的时候才能实施下一阶段的加载。预压荷载分为等载预压及超载预压两种方式。等载预压即预压荷载为设计使用的荷载值，适用于对于工后沉降要求较不严格的项目；超载预压即预压荷载大于设计使用荷载，在预压过程中对地基进行适当加荷使得地基的部分次固结沉降得到提前完成，能够有效的减少工后沉降量。超载预压荷载大小及预压时间的选择要基于沉降控制目标和地基的固结性能来决定，一般取超载系数为 1.1 到 1.3 之间。排水固结法和复合地基相比，前者的处理后工后沉降较大，但工后差异沉降较小，后者可以很好的控制总沉降量，但是桩土刚度相差太大可能会出现局部差异沉降现象。在具体工程中应根据地质条件和沉降控

制要求，恰当选用合适的处理方式并确定合理的预压荷载大小及预压时间。对于对下沉比较敏感的一些重要建筑物，宜采取复合地基加超载预压的双重治理措施来达到总下沉量以及不均匀下沉量两方面的要求。

3.3 差异沉降与过渡段控制技术

软土地基修建道路上，桥梁与道路衔接段、旧路基新连接处差异沉降控制成为技术难题，改扩建道路软土地区路基横向刚度差异成为主要问题，新老路基差异沉降会更加显著，对于桥梁与道路衔接段差异沉降，需要通过综合性措施来进行有效控制。

在排水固结处理、复合地基处理以及各种处理结合使用的时候，可以通过调整处理方案的形式来减少差异沉降的程度，用整体沉降量大而差异沉降量小的处理方案能够有效降低结构物开裂的程度。

3.4 长期沉降控制策略

针对软土地基路段，若地基处理不合理，则会在长时间的行车荷重影响下造成服役期间路面起裂缝、不均匀沉降等一系列问题，长期沉降控制要在设计时就做好规划，选择合适的处理措施和预压时间^[1]。水泥土桩法可以有效地降低软土地基地段的长期沉降，在反复循环荷载下水泥土桩复合体累积塑性应变随着压力、动应力比以及静偏应力的增加而升高，当置换率增大的时候会有所下降。在施工完成后要及时建设长期沉降监测网，对后期沉降情况进行跟踪观察，掌握情况便于今后的保养维护。

4 软土地基施工监测与信息化控制

4.1 沉降与位移监测技术

施工监测是软基处理信息化施工的前提条件，在施工过程中利用监测数据及时反馈的作用可以大大提高施工的风险预警水平，有效的控制住地基的变形情况保证周边环境的安全性。沉降监测主要有地表沉降测量、分层沉降观测、孔隙水压力监测等^[2]。采用压差型静力水准仪，对新老路堤进行分钟级别的实时连续监测，精度高达亚毫米级；系统可以自行判定当天填筑之后的地基沉降状况，从而得到预压期和路面施工时期的最佳方案。位移监测包括坡脚侧向位移观测和深层水平位移观测，通过对测斜仪来检测深层土体的位移情况。

表 2 差异沉降与过渡段控制措施对比

控制措施	作用机理	适用位置	施工要点	控制效果
桥头搭板	刚性过渡，分散荷载	桥台与路堤连接处	搭板长度与角度合理设置	有效缓解桥头跳车
柔性过渡层	刚度渐变，缓冲变形	刚性结构与柔性路堤之间	级配碎石、砂砾分层压实	减小刚度突变影响
土工格栅加筋	增强路堤整体性	过渡段路堤底部及分层铺设	格栅强度、层间距、锚固长度	控制不均匀沉降
渐变桩长复合地基	桩长渐变，刚度过渡	桥头过渡段	桩长由桥台向路基逐步缩短	实现沉降平稳过渡

4.2 信息化施工与动态反馈控制

信息化建设是把测量信息同施工工序相联系,做到实时监控的一种有效途径。通过对数据分析以及现场情况联系在一起的方式,形成了监测报警—工况追溯—调整措施这样一个完整的循环式的施工管理模式,使施工管理由凭经验走向依靠数据。基于物联网的多数据融合软基治理全生命周期智慧管控平台,针对软基加固、路基填筑、沉降观测三大主要环节,做到了把隐蔽工程变成透明监管的过程^[3]。该平台利用物联网传感器对桩长、延米灰量、钻进速率、浆液浓度等指标进行实时检测并利用多参数分层智能控浆技术实现实时快进多给、慢下少灌的目的。平台建立分级控水参数数据库,根据不同土层自适应调节喷水方案,在保证桩体质量的同时节约水泥量 8%-12%,北斗高精度导航系统可进行桩点精确定位,定位误差 $\leq \pm 3\text{cm}$,大大降低漏桩以及偏离等现象的发生几率,在路基施工时平台上实现从拌和至碾压全工艺过程智能化监管,在压路机上加装一体化定位单元可及时获取碾压路线、速率及遍数等信息,形成碾压热力图,如果出现漏压或者碾压速度快以及碾压遍数不够等情况则会即时通过屏幕提示音等方式提醒驾驶员注意。该方法是对以往依靠人工巡视+记录的传统方式的一种革命性的转变,由被动式变为自动监测—预警—纠正正式管理方式极大地提高了路基填筑平整度和平整度。

5 结语

软土地基处理是道路工程施工的技术难点之一,本文对软土路基工程技术特征进行了全面剖析,介绍了排水固结技术和复合地基技术等重点工法的技术要求,研究了沉降机理以及控制方法,并提出了施工监控及信息化管理的方法途径。得出结论是:正确选用地基加固方法和施工方法是保证软基地质改善质量的基础;逐级加载、预压控制、差异沉降控制是沉降控制的主要手段;应用物联网信息管理系统可以实现实时监控整个软基工程过程,有利于提高工程质量。下一步要加强软土路基智能化技术的研究力度,促使高速公路工程建设走向更加智能、更加高效、更加可靠的新型发展阶段。

[参考文献]

- [1]陈军夫,王晟旭,李泉泉,等.碎石桩在大型集装箱软弱土地基中的应用[J].科技通报,2026,42(2):64-70.
- [2]俞峥嵘,丁付革.大型龙口软土地基快速处理关键技术[J].水运工程,2024(1):209-213.
- [3]蔡伟.城市道路软土地基处理技术及施工质量控制要点研究[J].运输经理世界,2025(25):40-42.

作者简介:袁知鹏(1994.02—)男,汉族,湖北阳新人,毕业于武汉科技大学城市学院土木工程专业,道路工程师,现主要从事道路工程设计。