

路基软土处理技术及沉降控制研究

易三美

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]软土遍布我国沿海、沿江、湖泊沉积区等地带, 软土有高含水量、高压缩性、低强度、低透水性等工程不利的特点, 在道路路基中容易产生过大的沉降、不均匀沉降甚至是路基失稳等问题, 文章详细解析了软土路基工程性质以及变形破坏原因, 并对换填及排水固结法、复合地基加固处理技术等多项软土路基加固处理方法进行了论述, 详细研究了软土固结沉降理论及常见的沉降计算方法, 最后从设计、施工、分期加载及动态监测控制, 以及信息化反馈控制五个方面提出路基沉降控制关键技术。软土天然含水量较高、天然孔隙比较大、压缩性强、抗剪强度低、固结时间长、扰动性强、透水性差等特性, 工程地质情况复杂、公路建设中软土路基的沉降及稳定问题是其基本问题与难点课题, 在此基础上进行进一步的研究, 意在探索软土路基工程设计、施工以及沉降控制理论及其技术建议。

[关键词]软土路基; 处理技术; 沉降控制

DOI: 10.33142/ec.v9i7.20058

中图分类号: U416. 043

文献标识码: A

Research on Soft Soil Treatment Technology and Settlement Control of Roadbed

YI Sanmei

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

Abstract: Soft soil is widely distributed in coastal, river, and lake sedimentary areas in China. Soft soil has the characteristics of high water content, high compressibility, low strength, and low permeability, which are unfavorable for engineering. It is easy to cause excessive settlement, uneven settlement, and even roadbed instability in road subgrades. This article analyzes in detail the engineering properties and causes of deformation and failure of soft soil subgrades, and discusses multiple soft soil roadbed reinforcement methods such as filling and drainage consolidation methods, composite foundation reinforcement treatment technologies, etc. It studies in detail the theory of soft soil consolidation settlement and common settlement calculation methods. Finally, key technologies for roadbed settlement control are proposed from five aspects: design, construction, staged loading and dynamic monitoring control, and information feedback control. Soft soil has high natural moisture content, large natural porosity, strong compressibility, low shear strength, long consolidation time, strong disturbance, and poor permeability. The complex geological conditions of engineering and the settlement and stability of soft soil subgrade in highway construction are its basic and difficult issues. Based on this, further research is conducted to explore the design, construction, and settlement control theory and technical suggestions for soft soil subgrade engineering.

Keywords: soft soil subgrade; processing technology; settlement control

引言

伴随着我国交通基础设施建设的发展, 越来越多的高速公路、高速铁路及市政道路工程穿过了大面积软土分布区。软土属于一种不良工程地质条件下的特殊性土体, 它的特殊性使得它在路基中的应用十分困难, 在保证路基长时间使用的前提下, 通过工程实例解析软土路基的沉降应力和变形规律, 对软土路基进行相应的处理已经成为当前的研究热点之一。利用分层总和法以及经验系数法计算

分析瞬时沉降、主固结沉降、次固结沉降, 也是目前的研究趋势。本文针对软土路基工程特点、处理措施、沉降原理及计算方法、沉降控制关键技术四个方面的内容进行了系统的剖析, 为相关领域提供一定的参考价值。

1 软土路基工程特性分析

软土是静止水或缓慢水流下堆积而成的一类饱和粘性土, 主要分布在我国沿海地带、长江三角洲、珠江三角洲以及内陆湖泊周围一带, 其工程性质如下所述。天然含

水量较高,一般都在液限附近或者超过液限;天然孔隙比较大,一般都在 1.0 以上;压缩系数比较高,一般都在 0.5MPa^{-1} 以上;抗剪强度较低,不排水抗剪强度通常都在 30kPa 以下;渗透性较差,渗透系数一般都处于 $10^{-7}\sim 10^{-8}\text{cm/s}$ 这个水平上;存在明显的触变性和流变性现象等特征。从变形机制来讲,软土路基在外界压力的作用下会出现瞬时变形、固结变形以及次固结变形三个过程。瞬时变形是在加载瞬间发生的体积不变的剪切变形,固结变形是孔隙水逐步排出,有效应力增大而产生的体积缩小;次固结变形是指土体骨架在恒定的有效应力下随时间增长的蠕性变形。软土地基沉降机理研究的结果是,在软土变形过程当中,固结和蠕变是同步存在的,在进行软土地基沉降分析的时候要考虑到蠕变-固结效应是十分重要的。影响软土地基沉降的主要因素有:软土层厚度及埋深、填土荷载大小与加载速率、排水边界条件、地下水位变化、软土本身的物理力学性能等。

2 软土路基处理技术

2.1 换填与排水固结法

换填法是最简单也是应用最多的地表浅层软土治理技术,适用范围为路基范围内的软土层厚度小于 3m 的地方。该方法是把软基范围内全部或者部分软土挖掉,再用砂、砾石、碎石、石灰土等良好级配的土进行回填夯实形成持力层。回填料最好有良好的级配和较高的强度以及回填深度和范围应该经过稳定性、沉降计算来确定。而对于软土层厚度大于 3m 时仅靠换填法所需工程量大,成本高,不适合使用该方法,排水固结法适合用于较深的软土地基,主要有堆载预压法及真空预压法两种方式。堆载预压法就是分层次堆放一些碎石等土料,在软土层上施加附加荷载,在附加荷载的作用下使软土得以排水固结以增加软土地基的承载能力。真空预压法就是铺设水平排水砂垫层、打设塑料排水板或者袋装砂井等,使在密封膜下面抽真空形成负压,使软土排水固结。其中塑料排水板之间的间隔一般为 $0.8\sim 1.5\text{m}$,打入时应该穿透软土地层到达下部较硬的地层。排水固结法的优点在于经济实惠并且处理深度大,缺点是对工期的要求比较高;真空预压搭配上塑料排水板的效果比较好,适用于大面积的填海造地路基。两者的结合称为真空-堆载联合预压,能各自扬长避短加快工期,提高处理效果,实际工程中联合预压的固结速度要比单独预压速度快 30% 左右。

2.2 复合地基处理技术

复合地基就是在软土地中增设垂直加强体的一种地基加固方法,靠桩体与桩间土分担荷载。常见的复合地基

方法有深层搅拌桩、CFG 桩、挤密碎石桩、高压旋喷桩等。深层搅拌桩法就是采用水泥、石灰等固化剂借助深层搅拌机强制搅拌软土与固化剂进行物理化学反应后生成一定强度的桩柱,水泥搅拌桩可以提高地基承载力及稳定性,有效的减少公路软土路基沉降量。桩径一般有 $0.5\sim 0.8\text{m}$ 之间,桩长依据软土地层厚度而定,一般穿透软土地层到下部坚硬岩层以上。搅拌桩的承载能力受桩身强度,桩周土摩阻力以及桩端承载力影响,需要依据现场试验来选择合适的参数。CFG 桩就是水泥粉煤灰碎石桩,它是用水泥、粉煤灰、碎石、石屑加水搅拌制成的一种具有良好粘结强度和较大变形模量的桩型,其与桩间土、褥垫层一同组成了复合地基,能够大幅度提升地基承载力,减小沉降量,它的施工工期较短、质量较好,但是造价较高,在工程应用上一般用于小型工点的设计。碎石桩属于散体材料桩,它主要是以桩体本身的挤密、振密效应和排水固结作用来改善软土地基。适用于砂土、粉土、软弱粘性土等各类地基条件。高压旋喷桩是通过高压射流切割搅拌土体并与水泥浆液混合产生桩体,桩径可达到 $0.6\sim 1.2\text{m}$,用于各种复杂软土地基中,在夹层软土方面也有明显的效果。不同类型的复合地基其要求各不相同。深层搅拌桩适用于软塑~流塑的粘性土;CFG 桩可以使用粉质粘土、黏性土、粉土;碎石桩适用于砂土以及粉土;高压旋喷桩适用于所有的软土类型,且桩径较大,质量可靠但是较为昂贵。综合比较来看,碎石桩的价格最低,深层搅拌桩其次,CFG 桩较贵一些,高压旋喷桩最贵。就加固效果而言,CFG 桩以及高压旋喷桩的承载力增加最多。在具体工程建设过程中应该结合地质情况、工期进度以及施工经济成本等进行权衡比较来选出最佳的施工方案。

3 路基沉降机理与计算方法

3.1 软土固结沉降理论

软土地基的沉降包括瞬时沉降、主固结沉降及次固结沉降三个阶段。瞬时沉降是指加载时刻产生的,它与土体剪切变形相关,可以用弹性理论来估算;主固结沉降是软土地基中最重要的沉降部分,就是孔隙水逐步析出,有效应力增大造成的体积收缩。次固结沉降是在主固结结束后土层骨架在恒定有效应力作用下的蠕变变形。太沙基一维固结理论是研究软土固结沉降的基础。其假设为:土体均匀饱和,压缩系数、渗透系数均为常数,孔隙水、土颗粒均不可压缩,渗流满足达西定律。固结微分方程是: $C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$ 。式中, $C_v = k/(\gamma_w \cdot m_v)$ 为固结系数; u 为超静孔隙水压力; z 为深度; t 为时间。通过对这个固结微分方程的解答就可以获得任意时间任意深度处的固

结度，从而可以求出相应的固结沉降量。

3.2 常用沉降计算方法

分层总和法是最常用的一种工程中的沉降计算方法，它是把压缩层范围内的土层分为多个小层，对每一层分别进行附加应力下的压缩量的计算，在此基础上累计各层所得之和即为总的沉降量；用分层总和法与经验系数法来进行瞬时沉降、主固结沉降及次固结沉降的计算分析，比较能够正确反映软土路基地基的沉降变形趋势。分层总和法计算结果准确性由土体压缩模量值大小以及附加应力的计算是否合理决定。有限单元法属于一种数值计算方式。它可以考虑到土体的非线性和弹塑性的性质以及流变性等特征，模拟分级加载、排水边界、桩土相互作用等复杂工况，是目前软土路基沉降分析的高水平方法之一。利用有限元软件对软基进行数值仿真，在计算过程中针对不同的土层分别选择不同摩尔库伦模型以及可以模拟出土体时变效应的软土蠕变模型，这样可以使软基沉降更加符合实际情况。常用的本构模型主要有：摩尔库伦模型、修正剑桥模型、软土蠕变模型等。沉降量的预测也是软基设计及施工过程中非常重要的一个方面。常用的预测方法主要有曲线拟合法（双曲线法、指数曲线法、星野法）、三点法、Asaoka 法、灰色系统法等。使用双曲线法对新老路基沉降进行计算，分别比较了不同类型加固软基措施的沉降量，结果发现扩建软土路基处理效果最好的是 PC 管桩。不同的预测方法都有各自的长处，所以在具体的应用过程中应该根据实际测量的数据来选择多种方法进行相互验证，以期达到更准确的结果。

4 路基沉降控制关键技术

4.1 设计阶段沉降控制措施

设计是沉降控制的起点，在确定沉降量的基础上结合工程规模与地质情况以及施工进度等对沉降量进行合理的控制并选择合适的基础处理措施。工后沉降量控制值与工程类别有关：高速公路一般路段不大于 30cm，桥头跳车过渡段不大于 10cm；高速铁路对工后沉降有较高的要求，一般不大于 15mm。设计时要综合软弱土层深度、荷载大小以及排水状况等来选择适当的基础加固方法，并进

行相应的沉降量计算以及稳定性校核。保证设计符合所规定的指标。

4.2 施工阶段沉降控制技术

施工环节的沉降问题主要是对施工填土速率的控制。如果填土速度过快会造成软土层孔隙水压力迅速增大、有效应力增加不足以及地基发生滑动等现象^[1]。施工过程中应该根据设计方案分层施工并且控制好填土的厚度、间隔的时间。通常要求每一层的填土厚度不大于 30cm，两次填筑之间的间隔大于等于 7 天，在前一层加载完成所产生的沉降达到稳定后再加载下一层次的荷载。严格把控填筑的高度，不能出现过多或者过少的现象。在进行高填方段落时还应注意其边坡稳定情况，若有必要可设置反压护道或采用土工格栅加固，以此提高路基的整体稳定性。

4.3 分期加载与动态监测控制

分次加载是一种有效的对软土路基沉降的控制措施，分次进行路堤加载，让软土在逐级加载的情况下达到最大沉降量时强度逐渐上升，从而防止出现一次性加载产生地基破坏的现象。各级次加载的重量要依据地基承载力来选取，一般情况下按预计总荷载量的 30%~50%为宜。两次加载之间的停顿期应该由沉降速率和固结情况来判定，通常规定连续 5~7 天沉降速度低于 5~8mm/天才能进行下一等级加载的工作^[2]。而对于高速公路还要严格把控填筑期间的沉降速度小于 10mm/天，路堤中部与边侧的沉降差值不能太悬殊。做好监控工作是保证能够有效控制沉降量的关键手段。观察项目有地表下沉、深部分级沉降、水平位移、孔隙水压力等，在道路修建与施工过程中，工程地质情况、路基的填筑材料、路堤填土速度以及施工方法等都会影响到软土地基的沉降变形特性，通过对沉降变形的仪器进行观测，能够随时掌握工地的观测数据来进行相应的修正，工地现场观测频率要随着工程进度的变化而变化，施工期间加密到一天一次，停工期间可以适当降低到间隔两三天一次。如果实际测量得到的沉降速率或者水平位移接近预警值就需要暂停负载并寻找原因，在所有数值恢复正常才能恢复施工。

表 1 分期加载与动态监测控制参数表

监测项目	监测频率	控制指标	预警值	应对措施
地表沉降	填筑期 1 次/天，间歇期 1 次/3 天	沉降速率 < 8mm/d	10mm/d	暂停加载，延长间歇期
深层沉降	1 次/周	各层沉降均匀	差异过大	检查排水系统有效性
水平位移	1 次/3 天	侧向位移 < 5mm/d	8mm/d	放缓加载速率
孔隙水压力	1 次/天	孔压系数 < 0.6	0.7	暂停加载，待孔压消散
分层固结度	1 次/周	固结度 > 80%	70%	延长预压时间
路堤稳定性	每级加载后	安全系数 > 1.2	1.15	反压护道或放缓边坡

4.4 信息化反馈控制方法

信息化反馈控制是指把施工观测资料与理论相印证,在施工过程中不断修正施工指标和方案的一种控制技术^[3]。主要是形成“观测-分析-反馈-调节”闭合回路系统。实时收集观测点的沉降、位移及孔隙水压力等测量数据,采用预报模型计算工后沉降量以及沉降总量,以此来确定目前的实际施工状况是否符合规定的标准。在检测数据达到预警界限的时候就要及时发出警戒并采取相应的对策处理。对软土路基做沉降监控,对沉降情况进行评估,运用预报模型对旧路基地段与新路基地段之间的沉降差进行估算,从而实现对接基沉降的有效管理。信息化反馈控制可以降低施工的风险,保证了路基长久的安全性。

5 结语

软土地基加固技术和沉降控制是岩土工程技术中的难题之一。本文以软土地基工程特点为基础,对换填与排水固结法、复合地基处理技术等软土地基加固技术的工作原理及其适用场合进行了详细的研究;并对软土地基的固结沉降理论以及常用的几种沉降计算方法进行研究,并提

出设计时控制、施工时控制、分期加载与动态监控控制及信息化反馈控制四种控制关键技术。研究发现软土地基的加固及沉降防治是一个综合性工程,在此基础上应综合分析地质情况、工程需求、工期、造价等因素来选取合适的加固措施、制定合理的控制指标以及借助监控信息对施工方案进行适时修改等,才能保证路基长期稳定地发挥其应有的性能的作用。

[参考文献]

- [1]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.
- [2]李兴明,祝希,石得权,等.高速公路改扩建新老路基沉降变形规律研究[J].岩土工程学报,2025,47(1):261-265.
- [3]刘刚刚.公路软土路基沉降分析与处理对策研究[J].交通世界,2024(15):129-131.

作者简介:易三美(1994—),女,汉族,湖北荆州人,工程师,2020年8月毕业于湖北工业大学建筑与土木工程专业,最高学历硕士,现在主要从事公路路基路面设计工作。