

公路膨胀土路基特性及设计施工关键研究

彭邦佳

武汉综合交通研究院有限公司, 湖北 武汉 430014

[摘要]膨胀土是具有明显的吸水膨胀和失水收缩特征的高塑性粘土,在我国广泛分布,对公路建设造成极大的困难,《公路膨胀土路基设计及施工技术规范》(JTG/T 3331-07—2024)指出,膨胀土路基主要存在以下几种病害:路基不均匀沉降、边坡失稳以及路面结构破坏等。文章从膨胀土填料的选择及改良、路基断面及结构设计、防排水系统的设计、边坡防护及加固四个方面论述了膨胀土路基设计的关键技术问题。并结合最新的行业标准和工程实例,着重介绍了施工前准备、填筑压实、防水保湿、监测与质量管理等方面的控制要求,以期膨胀土地区公路工程建设提供借鉴。

[关键词]膨胀土;公路路基;填料改良;边坡防护

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20229

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Research on the Characteristics and Key Design and Construction of Highway Expansive Soil Roadbeds

PENG Bangjia

Wuhan Comprehensive Transportation Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430014, China

Abstract: Expansive soil is a highly plastic clay with obvious characteristics of water absorption expansion and water loss shrinkage. It is widely distributed in China and poses great difficulties to highway construction. The "Technical Specification for Design and Construction of Highway Expansive Soil Roadbeds" (JTG/T 3331-07-2024) points out that expansive soil roadbeds mainly suffer from the following diseases: uneven settlement of roadbeds, instability of slopes, and damage to pavement structures. The article discusses the key technical issues in the design of expansive soil subgrade from four aspects: the selection and improvement of expansive soil filling materials, the design of roadbed sections and structures, the design of waterproofing and drainage systems, and slope protection and reinforcement. Combined with the latest industry standards and engineering examples, this article focuses on the control requirements for pre-construction preparation, filling and compaction, waterproofing and moisture retention, monitoring and quality management, in order to provide reference for highway engineering construction in expansive soil areas.

Keywords: expansive soil; highway subgrade; improvement of fillers; slope protection

引言

膨胀土即吸水膨胀、失水收缩明显且具有较高塑性的粘性土,其主要矿物质是蒙脱石、伊利石等亲水性粘土矿物。我国的膨胀土分布非常普遍,给公路、铁路等基础设施建设带来了大量的工程技术问题,膨胀土的胀缩特性,往往导致路基沉降、路表开裂,严重影响了公路的安全性和使用寿命。在膨胀土地区修建公路,如果设计不合理或者施工管理不到位,就很容易引起路基变形、边坡滑动、路面开裂等一系列病害,造成后期维护难度增大。近几十年来,国内外学者对膨胀土路基工程问题开展了大量研究,在工程性质、病害原因及防治措施等方面均有所突破。交通运输部在2024年出台了《公路膨胀土路基设计及施工

技术规范》(JTG/T 3331-07—2024),这标志着公路膨胀土路基工程技术进入规范化的新时期。

1 公路膨胀土路基基本特性

膨胀土作为一种特殊土,其工程特性主要体现在以下方面。

胀缩性能是膨胀土最大的工程性质。膨胀土中含有大量的高岭石、伊利石等强亲水型矿物质,在含水率发生变化时会带来明显的体积变化。它的这一吸水膨胀变软、失水收缩开裂的特点就是和其他类型的土体不同的地方所在。胀缩性质常用自由膨胀率、有荷膨胀率、膨胀力、线缩率等表征,据此可以对膨胀土进行弱、中、强三个胀缩等级。

多裂隙性是另一个显著特点,在反复干湿交替的过程中,土体中出现很多的原生、次生裂隙。膨胀土路基内层裂缝发育的方向与边坡坡度有关,胀缩循环次数越多,坡面就越容易拉裂破坏,裂缝使得土体的整体抗力下降,成为水流侵入的路径,加剧了边坡稳定性的降低。超固结性和强度衰减特性也影响显著。膨胀土处于天然状态时大多已经达到了超固结的状态,挖掘过程中卸载会导致地基应力释放造成松动。长时间的干湿交替造成坡体中非饱和土抗剪强度随着干湿变化而减弱,可以衰减到原来的 30%~50%,从而对边坡产生不利影响。

2 膨胀土路基病害类型与机理

2.1 主要病害类型

路基不均匀沉降是常见的通病。由于路基土体含水率随季节而变,发生干缩湿胀变形,从而导致路基不均匀沉降、沉陷、路面裂缝、错台等。

路基边坡失稳及滑坡是膨胀土区域道路建设的主要难题之一,路堑开挖后产生的边坡垮塌现象非常普遍,并且其破坏程度与坡高、坡比关系不大。经研究,在潮湿高温环境下发生的膨胀土滑坡,主要是由于连续性降水造成的缓慢进行的逐步浅层滑动破坏,而滑动方式是以阶梯状为主,往往是越治越滑。路面结构受损也是路基病害反映到路面的表现形式,路基土体胀缩不均使得路面承受周期性的反复弯拉应力作用,造成沥青路面出现裂缝,水泥砼路面断裂等。另外,排水设施损坏也很普遍,胀缩变形造成排水结构破损错移失效,从而导致雨水下渗,造成不良影响。

2.2 病害形成机理

内在方面,胀缩性质是病害根源。含水率变动造成胀缩反复循环,引发土体结构损坏,强度下降。膨胀土中含有大量的蒙脱石等亲水矿物,使得其对湿度的变化特别敏感,这是病害产生内因的基础所在。外部条件方面,水分

变化是主要激发因素。降雨、地表水下渗、地下水径流致使含水率变化。研究发现,开挖边坡如果不能得到及时处理,在经过干湿交替之后往往会产生浅层滑塌。另外,一些不合理的开挖减载、人为扰动等因素也会加剧病害的程度。

3 膨胀土路基设计关键技术与方法

3.1 路基填料选择与改良

填料选择及预处理是设计的第一步,在规范要求方面,液限大于 50%,塑性指数大于 26 的膨胀土不得直接用于路堤填筑。弱、或中等膨胀土可经过改良再进行使用,强膨胀土原则上应弃之不用或者严格处治。改良主要以化学方法为主,石灰和水泥应用最多,水泥和石灰可以大幅度提升改良膨胀土的 CBR 值,现场试验表明两种改良材料都可以使土样的膨胀率大幅度降低。改良土的最佳含水率与其水泥或石灰掺量有关。其中石灰掺量一般在 5%~8% 之间,水泥掺量为 3%~6%。改扩建工程在填筑过程中使用的土工格栅加筋、膨胀土包边法处理路基的方法较为理想。当 CBR 大于 3% 时可以进行加筋、包边等物理处理再用作下路堤填料。各种改良方式对比见表 1:

3.2 路基断面与结构设计

膨胀土路基横断面设计要充分考虑到土体的胀缩特性,在设计上要不同于普通路基。路堤填筑高度不宜太低,填高小于 1m 的路堤必须换填非膨胀土并按规定压实处理。如用膨胀土进行填筑,则路堤边坡坡度应当适度放缓,一般比标准设计坡度放缓 0.25~0.5,并根据边坡高度情况按需设置分级平台。

路基结构防护措施主要为包边法,就是在外侧覆盖一层有一定厚度的非胀缩性粘土或者改良土,形成的隔膜层。根据湿法击实实验得出的压实标准,路堤的湿胀量预测值相比干法要小一个数量级,这就有了选择适宜标准的参考。而对于路堑部分来说就要控制好开挖深度及坡度,及时进行防护结构施工,避免边坡长时间裸露在空气中。

表 1 膨胀土路基填料常用改良方法对比

改良方法	适用条件	最佳掺量范围	主要改良效果	经济性	施工特点
石灰改良	弱~中膨胀土	5%~8%	降低塑性指数,提高强度	中等	工艺成熟,需控制拌和均匀性
水泥改良	中~强膨胀土	3%~6%	强度提升显著,膨胀率降低	较高	施工速度快,早期强度高
石灰+水泥复合	各类膨胀土	石灰 4%~6%+水泥 2%~4%	兼顾早期和后期强度	中等	效果稳定,施工较复杂
物理包边+加筋	弱膨胀土	包边厚度 $\geq 1.5\text{m}$	隔离水分,约束变形	较低	不改变土性,工期较短
固废材料改良	弱~中膨胀土	根据试验确定	环保利用,降低膨胀性	较低	材料来源需稳定可控

3.3 防排水系统设计

防排水设计是膨胀土路基设计的重点。主要原则可以概括为“保湿防渗，加强排出，抓紧施工”，膨胀土区要按照防止地表水以及地下水进入膨胀土体内、以免造成土体膨胀引起路基损坏的原则来进行排水布置。

路基排水措施：在路堑顶部设置截水沟防止坡面来水进入路基内部，路基两侧设置完整的排水边沟，沟底应进行防水处理并预留变形缝以适应土体伸缩；**地下排水措施：**对于地下水丰富的区域，设置盲沟或者渗沟、排水垫层，降低地下水位，避免或减少地下水渗入路基土体。尤其对于膨胀土地区，在施工过程中对路基土进行观察，对降雨量大的地区在设计时要充分考虑排水工程的防排水能力，保证道路的长期使用年限与稳定性。

3.4 边坡防护与加固设计

膨胀土的边坡防护加固既要考虑支挡，也要考虑防渗及排水等多重作用。针对不同边坡类型以及其病害情况可以采用下列措施。

柔性防护是一种近几年来使用得比较广泛的膨胀土边坡整治方法。采用土工格栅加劲柔性防护可以解决膨胀土挖方护坡滑塌这个工程建设难题。土工格栅加劲构造而成的柔性防护体系施工简单快捷，只需要普通的筑路设备即可施工，在材料、机械、人员到位的情况下，10天内即可完成一道高度10m、长度超过100m的挖方护坡柔性防护工程。柔性防护的“框箍”效应可以很好地对边坡土体产生水平向压缩的约束效果从而保持边坡整体稳定。新式防护材料的出现也给膨胀土边坡防护提供了更多的可能。新型土工织物是一种兼具排水功能及加筋功能的新型土工合成材料，除能排出显性水外，其毛细织物沟槽形成的毛细力还可排出毛细水，在非饱和状态下排水能力强；另外，EPS缓冲材料以及毛细阻滞材料在应用于膨胀土路基边坡防护的时候也有较好的效果。结合进行植被防护和工程防护能够加强边坡的长期稳定性。新型边坡采用工程防护基础上辅以植被防护的方法，既能提高土体抗力、稳固边坡，又能美化环境。坡面草皮种植、三维网草皮种植等方式可以有效地降低雨水对边坡坡面的侵蚀，而且植物的蒸腾作用也可以起到调控边坡土体含水率的作用。

4 膨胀土路基施工关键控制措施

4.1 施工前准备与土质处理

施工前期的准备工作是确保膨胀土路基工程质量的前提条件，在施工前要了解好沿线膨胀土分布状况、膨胀等级、土层厚度以及地下水情况等，根据这些编制出合理的施工计划；在开工之前还要设置好临时排水设施，避免

施工期间地表水对路堤土体的影响；取土场要避开雨期取土，同时做好场内排水工作。

对于拟用作填料的膨胀土，应根据试验结果确定是否进行改良处理。为减少膨胀土路基工后病害，需通过试验确定改良剂掺量。取土后应及时摊铺翻晒或进行改良拌合，防止土料堆存时间过长导致含水率不均。

4.2 填筑压实控制

膨胀土回填压实必须严控土料含水率以及压实工艺参数。研究发现，在保证较低含水率的同时可加快施工进度，但也需要控制养生期。重复碾压4次即可显著提高平均压实度，但碾压次数过多反而会使压实度下降。施工中应使填料含水率尽量保持在最优含水率±2%范围内，过湿则需翻晒，偏干可适量洒水增湿。填土层厚也是影响压实效果的一个重要因素。膨胀土路堤回填每层松铺厚度不应大于30cm，改良膨胀土的松铺厚度可根据实际情况适当调整。压实机械采用重型振动压路机，碾压遍数一般为6~8遍，遵循先静后振、压实速度2~4km/h的原则。碾压后应及时检测压实度，不足处应补压或返工。在挖填结合部及构造物填筑部位，应设置过渡段，增加碾压遍数并适当提高压实标准，以减少不均匀沉降。

4.3 防水保湿施工技术

防水保湿是贯穿膨胀土路基施工全过程的重要工序，必须遵循“快挖、快填、快压、快封闭”的原则，尽量减少土体暴露时间。在每层填筑结束后要及时覆盖上一层土料，当天完成的工作场地须在下班之前加以碾压覆盖，雨天施工时要密切关注天气预报，准备好覆盖物，遇大雨立即停工，并用彩条布或防水土工布进行临时覆盖，雨后重新开始施工之前要检测路基表面的湿度情况，对过湿区域进行晾晒后再进行分层填筑；路堑开挖区如未及时设置防护措施，在经历干湿交替后会出现浅表层滑塌现象，故在开挖之后应及时做好防护工作。坡顶需要设置截水沟，在坡面上可以采用土工膜覆盖等方式作为临时的保护措施，待边坡稳定之后再进行永久防护施工。

4.4 施工监测与质量控制

膨胀土路基施工中应建立健全监测及质量保障机制。监测内容主要包括：填料含水率变化、碾压压实度、路基沉降及边坡变形等。质量控制主要通过控制含水率、改良剂掺量和碾压压实度三方面，确保施工阶段安全可靠。施工过程中应加密沉降观测频次，路堤填筑较高时还应在坡脚和顶部增设边部变形观测桩。一旦监测数据出现异常，应及时分析并采取对策。每道工序完成后均应进行压实度检测，检测频率不少于每2000m²一组，压实度须达到设

计标准。质量管理还应包括材料检测、工序检测和隐蔽工程验收等内容;改良剂质量、掺量和拌合均匀性均需检测;边坡防护应检查排水系统畅通性和防护结构完整性。完工后应形成全面的质量检测报告和监测总结报告,作为竣工验收文件

5 结束语

公路膨胀土路基的设计与施工是一项综合性的工程技术问题,本文以膨胀土基本性质为出发点,探究了病害类型及机理、提出了设计关键技术和施工控制要点。目前,随着膨胀土问题日益突出,其对施工环境的影响已成为岩土工程领域的世界性技术难题。《公路膨胀土路基设计及施工技术规范》(JTG/T 3331-07—2024)的颁布实施对于工程建设具有极其重要的参考价值。今后的研究工作应着重于以下几点:解析复杂条件下膨胀土长期变化规律;开发绿色环保型改良新材料,例如废弃物资源化利用等;推广智慧监控预警技术的应用,做到早发现早处理,防患于未然;建立健全的设计理论与施工工艺标准化体系。只有

理论研究,技术创新以及工程建设三者相互促进,才能有效地解决膨胀土路基工程中存在的技术问题,保证公路的安全可靠和长远发展。

[参考文献]

- [1]付国庆.高速公路膨胀土路基湿胀变形研究[J].建筑机械,2025(7):168-170.
- [2]刘金锋.柔性生态护坡在膨胀土路基中的应用及标准化实践[J].大众标准化,2026(5):131-133.
- [3]赵琪.高速公路膨胀土路基处治及施工质量控制[J].交通世界,2025(11):107-109.
- [4]任翔宇.膨胀土地区公路路基常见病害及改扩建设计研究[J].交通科技与管理,2025,6(4):85-87.
- [5]陈阳.公路工程膨胀土路基施工技术要点[J].交通建设与管理,2025(5):115-117.

作者简介:彭邦佳(1992—),男,汉族,湖北武汉人,工程师,毕业于郑州大学,毕业时间2015年6月,本科,从事路基路面设计专业。