

考虑环境荷载作用的膨胀土边坡挡墙侧向土压力研究

顾玉鑫

中铁十四局集团建筑工程有限公司

摘要:在我国工程建设行业高速发展的背景下,建筑施工技术水平全面提升,能够有效处理各种复杂环境下的工程建设难题。在工程项目施工过程中,边坡施工是一项重要内容,但是部分工程的边坡地质条件较为复杂,对于施工技术水平具有更高的要求,在挡土墙施工过程中,需要考虑到环境荷载的作用,从而对施工方案进行优化。因此,本文将对考虑环境荷载作用的膨胀土边坡挡墙侧向土压力方面进行深入地研究与分析,并结合实践经验总结一些措施,希望对相关人员有所帮助。

关键词:环境荷载;膨胀土;边坡挡墙;侧向土压力;优化措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.17.031

膨胀土是一种含有蒙脱石、伊利石与高岭土、具有较强亲水性的黏土,其基本特征为胀缩性、高固结性以及低渗透性等。我国膨胀土的分布范围较广,许多大型工程都会穿越膨胀土区域,由于膨胀土对于气候环境较为敏感,在季节发生变化时,膨胀土就容易出现变形等问题,从而导致建筑物出现开裂、边坡失稳等问题,使得工程质量受到严重影响,所以在该特殊地质环境下,需要充分考虑到环境的影响,对膨胀土的边坡挡墙进行优化设计。

一、膨胀土对工程建设的影响分析

膨胀土是一种特殊的土壤类型,具有显著的胀缩性、高固结性以及低渗透性,在我国多个省市地区有所分布,总面积超过10万平方千米。膨胀土的特殊性质,对于环境气候变化非常敏感,在季节发生变化后,受到温度、湿度的影响,膨胀土很容易出现变形问题,从而使得建筑物基础出现裂缝、边坡失稳都能够问题,比如在我国南水北调大型工程中沿线某段中,受到膨胀土的影响出现滑坡与挡墙损坏问题,产生了严重的危害^[1]。结合膨胀土的基本特征来看,胀缩性是其对工程建设影响最大的一项特质,简单来说就是膨胀土的湿度提升后体积会膨胀,湿度下降后体积会收缩,该性质会对工程建设质量与安全性造成极大的影响。近些年来,关于膨胀土增湿膨胀研究取得一些成果,在降水下渗的影响下,膨胀土的含水率会不断增加,膨胀土结构就会出现软化、强度下降以及体积膨胀的变化,对邻近的支挡结构产生膨胀力,膨胀力会受到其增湿程度、初始含水率以及干密度等多项因素的影响,但是相比于增湿膨胀而

言,其脱水收缩的特性没有得到充分重视,该特性容易引起工程出现裂缝问题,导致土体综合强度下降,甚至会使得深层的土体裸露出来,为降雨渗入提供相应的通道,使得裂隙区域膨胀土快速增湿膨胀,从而导致整体结构受到严重的破坏^[2]。

受到膨胀土特殊性质的影响,在膨胀土区域中很容易发生滑坡问题,滑坡主要是由于坡体的抗滑能力低于下滑力,通过设置挡土墙的方式能够提升坡体抗滑能力,进而促进边坡稳定性提高,在挡墙的作用下,产生远离土体的唯一,在土地处于极限平衡状态时,挡土墙紧贴边坡的一侧会受到主动土压的影响,另一侧会埋入土体中的部分,受到被动土体压力的作用;在干湿循环下膨胀土体积发生的变化,对于挡墙的压力会产生直接影响,从而导致土压力的合力与作用点区域产生变化。在挡墙设计过程中,受力分析是一项基础,如果受力分析结果与实际需求存在较大的差异,则可能会引起挡墙开裂以及完全倾覆等问题,通过对膨胀土主动压力、被动压力的研究,能够对膨胀土区域的挡墙设计提供支持^[3]。

二、蒸发脱湿期间挡墙后膨胀土侧向土压力发挥机制分析

(一) 膨胀土开裂机制与裂隙分析

膨胀土具有显著的胀缩性特征,在蒸发脱湿的过程中,其土体会产生收缩,主要为竖直与水平方向的收缩,从而产生两个方向的收缩应力,也就是竖直收缩应力与水平收缩应力;膨胀土具有低渗透的特点,在蒸发脱湿过程中,上层土体水分蒸发总量较大,下层总量较小,且上层的收缩应力较大,此时土地还会受到其自重导致的侧向土压力作用,侧向土压力和土层深度、上部土体的平均重度具有正比例关系,在土体上层水平收缩应力超过下层土体水平收缩应力的情况下,产生的作用力会超过土地的抗拉强度,从而导致土体出现裂缝,裂缝呈现竖向方向;在竖向裂缝产生之后,裂隙表面会产生新的蒸发面,使得裂缝区域的土体水分蒸发速度进一步加快,从而引起土体水平方向收缩,使得竖向裂缝发育程度加大;水平方向裂缝与竖向裂缝的发育基本相同,靠近裂隙的部分与远离裂隙的部分蒸发速度不同,产生的收缩应力也就不同,进而引起横向裂缝产生^[4]。在蒸发脱湿期间,计算膨胀土侧向压力需要考虑到裂缝问题,在土体水分不断流失的过程中,土体逐渐开始收缩,使得上层膨胀土和支挡结构逐渐分离,膨胀土和支

挡结构分离一定程度后就会产生开裂，其分离高度为开裂深度；饱和土的抗拉强度较低，在计算式可以忽略不计；设竖直收缩应力为 ρ_v ，水平收缩应力为 ρ_h ，上层水平收缩应力为 ρ_{h1} ，下层水平收缩应力为 ρ_{h2} ，土体自身重力为 ρ_c ，土体平均重度为 γ_i ，非饱和的膨胀土抗拉强度与主动土压力相同时，出现裂隙的公式为 $\rho_{ha} = \rho_t$ ，主动土压力的计算公式为： $\rho_{ha} = (M\rho_s - 2R\cos\phi') / N$ ； $M = 1 - \sin\phi'$ ， $N = 1 + \sin\phi'$ ， $R = c' + (u_a - u_w) \tan\phi^b$ 。

在上述公式中， ρ_{ha} 表示主动土的压力， ρ_t 表示土体抗拉强度； ρ_s 表示上层土体重力与荷载竖向应力， ϕ' 表示土体得到有效摩擦内角， c' 表示有效黏结力， $(u_a - u_w)$ 表示基质吸力， ϕ^b 表示相对基质吸力的内摩擦角。

在考虑非饱和土机制吸力的影响下，非饱和土的抗拉强度计算公式为 $\rho_t = \alpha TR\cot\phi'$ ，其中 α 表示非饱和土拉伸应力的修正系数，数值在0.5与0.7之间。将上述公式进行整合，可以通过泊松比、有效内摩擦角以及土体特征曲线等数据，对非饱和膨胀土的开裂深度进行计算预测，还可以对没有荷载作用下的膨胀土开裂深度进行计算^[5]。

(二) 挡墙后膨胀土侧向土压力的发挥机制分析

膨胀土具有胀缩特性，在湿润程度增加时，会产生水平膨胀力，所以在计算膨胀土侧向土压力的过程中，需要将水平膨胀力的作用融合在内，膨胀土湿润程度增加期间，基质吸力从 $(u_a - u_w)_a$ 降低到 $(u_a - u_w)_b$ 时，膨胀土侧向压力增加量为 $\rho_{L(a-b)}$ ，其计算公式为： $\rho_{L(a-b)} = \rho_{L(a-0)} - \rho_{L(b-0)} + v / (1-v) \rho_s$ 。结合相关研究来看，在特殊的环境下，膨胀土的脱湿过程可以看作是吸湿过程的逆过程，所以咋子膨胀土湿润程度降低期间，侧向土压力的降低数值可以采用湿润程度增加过程中侧向土压力的增加数值进行计算；膨胀土在湿润程度降低过程中，水分会不断流失，基质吸力从 $(u_a - u_w)_b$ 增加到 $(u_a - u_w)_a$ ，侧向土压力降低数值计算公式为： $\rho_{L(b-a)} = \rho_{L(b-0)} - \rho_{L(a-0)} + v / (1-v) \rho_s$ 。

(三) 挡墙后膨胀土的主动压力分析

在膨胀土湿润增加与降低循环期间，膨胀土的侧向压土压力具有上限与下限数值，采用莫尔圆对其进行藐视，在莫尔圆接触到剪切强度破坏上限时，土体压力达到了极限状态，也就是作用在挡墙中侧向土压力不能超过被动土压力，同时不能低于主动土压力，避免土体出现剪切破坏问题。传统的朗肯土压力理论，只适合在饱和土且光滑的结构中使用，但是在工程施工过程中，结构表面粗糙程度不能忽略不计，在水体渗入之后，膨胀土依然无法达到完全饱和状态^[6]。结合上述情况进行分析，膨胀土结构界面的摩擦力与土体中的吸力会对侧向

土压力产生直接影响；在常规的挡墙结构设计中，考虑到挡墙粗糙度与倾斜角度的情况下，通常应用库仑土压力理论对其进行计算，但是库仑土压力理论尽管能够用于合力计算，却无法得到类似朗肯土压力理论的应力分布曲线，从而无法解决侧向土压力与深度变化关系的相关问题。现阶段，通常采用两个独立的变量解释非饱和土体力学，即净正应力与基质吸力，但是一些方法没有考虑到土体湿润程度降低时基质吸力提升而增加的抗剪强度非线性增加问题。结合现有的研究成果来看，在基质吸力提升的情况下，粗糙挡墙面与光滑挡墙面主动土压力会降低，粗糙挡墙main主动土压力相比于光滑挡墙面更大。

三、案例验证

(一) 工程简介

大连市新监管场所建设项目位于大连市金州新区大魏家街道小莲泡村。大魏家街道地处辽东半岛南端，西邻渤海岸，距海边最近约 5 公里；沈大高速在场地东侧通过，距场地约3km。本项目场地基本呈矩形布置，场地总用地面积 55.4 万平方米，东西向长约 1245 米，南北向长约 479 米，场地红线周长为 3453 米。

项目场地属于丘陵地带，整体东高西低、南高北低，场地内有三座丘陵，最高点高程为 73.92m，另有土坑一处、水塘一处，最低点高程为 20.78m。本项目场地为开挖或填筑形成，除西侧边界外，北、东、南三侧边界场地形成后与周边地形存在高差，需通过设置边坡进行衔接。边坡总长为 2890.34 米，北侧全部为填筑形成，边坡最高处高度约为 18 米，东侧以岩体开挖后的护坡为主，边坡最高处高度约为 17 米，南侧以岩体开挖后的护坡为主，边坡最高处高度约为 20 米。主要内容是一阶、二阶、三阶加筋土挡墙、悬臂混凝土挡墙、扶臂混凝土挡墙、三维植被网护坡、植草护坡、混凝土板锚索挡墙、格构式锚杆植物护坡、方格骨架护坡等。本项目边坡及挡土墙支护为永久性支护，K0+000.00~K2+157.90 段边坡工程安全等级为一级，K2+157.90~K2+890.34 段边坡工程安全等级为二级，边坡支护施工完成后有效使用年限为 50 年。

(二) 地形与地质基本情况

本项目场地地貌类型属于剥蚀丘陵地貌。场地原为林业用地及果园，现征用为建筑用地。场地整体地势东高西低，低丘、冲沟相间分布，最高点位于场地东侧，高程 73.00 米左右，最低点位于场地西南侧，高程 22.00 米左右，高差可达51.00 米。植被发育，树木多为槐树、山枣树。边坡汇水面积约 60 万平方米。场地内主要发育有 4 条冲沟，冲沟延伸方向多为北向、北西向，冲沟切割深度一般在 1.0 米~6.0 米，冲沟宽 2.0 米~20.0 米，沟壁倾角约 50 度左右，小型冲沟

横断面呈‘V’型，大型冲沟横断面‘U’型，沟底植被不发育。

该工程现场的场地地层从上到下依次为：黏土→风化黏土岩→粉质黏土→次生红黏土→全风化页岩→强风化页岩→中风化页岩→强风化石灰岩→中风化石灰岩；根据地下水的勘察情况，在钻孔控制深度范围内未揭露地下水，但在丰水期时候是可能有地下水的，尤其灰岩区会有基岩裂缝水。

（三）挡墙设置情况

本工程边坡挡墙施工根据现场实际情况，分为三个阶段施工：北侧加筋土挡墙为第一阶段；东侧包含加筋土挡墙混凝土锚索、锚杆挡墙、三维植被网护坡、方格骨架护坡、植草护坡、悬臂混凝土挡墙为第二阶段；南侧三维植被网护坡、植草护坡、方格骨架护坡、扶臂混凝土挡墙为第三阶段；根据现场施工制约条件合理安排三个阶段施工，相互衔接，组织流水施工作业。

为了提升挡墙科学性，需要考虑到现场存在膨胀土对其影响，为了确保计算结果准确性，采用本文提出的预测模型对其进行计算。

（四）边坡挡土墙侧向土压力计算

本文采用BENVENGA提出的理论预测模型进行验证，将测针布置在场地隆起区域，安装侧向土压力测定装置，采用PVC管测量土体含水率。通过实验得到膨胀土的平均弹性模量为5MPa，泊松比为0.4，试验中膨胀土土层参数统计结果如下表所示。

表1：膨胀土土层参数

深度	土体类型	含水率	干重度/ (kN/m ³)	S%/%	σ'_{cs} / KP
0-1.5m	黏土	13.9%	17.2	1.0	39.8
1.5-1.8m	黏土	13.8%	17.6	2.8	205.8
1.8-2.4m	风化黏土岩	15.5%	17.3	2.4	215.4
2.4-3.2m	风化黏土岩	20.5%	18.0	0.8	124.4
3.2-4.3m	风化黏土岩	10.3%	17.5	3.7	430.8
4.3-3.7m	风化黏土岩	11.4%	17.8	1.8	210.6
4.7-8.0m	风化黏土岩	11.4%	17.8	3.7	287.2

在实验中得到相应的膨胀土体积含水量与机制吸力，采用F-X土水特征曲线模型，对获取的数据进行稽核，从而得到土水特征曲线，结合不同时期深度膨胀土的含水量分布情况，能够得到沿着深度方向膨胀土的基质吸力分布情况，最后结合恒定体积竖向膨胀力与土壤体积含水量的关系与公式，得到不同深度土体恒定条件下的竖向膨胀力，结合相关公式计算，可以得到土体含水量降低、基质吸力提升使得膨胀土侧向土压力的降低数值，进而对工程侧向土压力进行预测，将预测数值与实际数值进行比对分析后，证明预测效果较好，在工程

实践过程中，到深度为0.715m区域测量得到土压力，从而证明存在裂隙问题，且开裂的深度为0.715m。

四、应用效果

膨胀土在干燥蒸发、湿润程度下降过程中，会产生收缩变形，导致挡墙的后侧向土压力降低，挡墙后最低压力为主动土压力，达到主动土压力后，继续收缩就会出现裂缝，以此为基础提出了膨胀土深度开裂的计算模型；以非饱和土双应力变量理论为基础，提出了考虑膨胀土收缩变形与裂缝发育影响下的挡土墙后侧向土压力计算模型，并总结了不同工况条件下主动土压力的预测模型，膨胀土湿润程度降低与挡墙界面的粗糙程度，都会对主动土压力产生影响；本文提出的预测模型，只需要土体的基本物理参数与土水特征曲线，就能够按照吸力分布计算干燥蒸发时挡土墙后膨胀土沿着深度方向的侧向土压力分布情况；将其应用在具体的工程实践中，能够准确计算出边坡挡墙侧向土压力，以此为基础对挡墙的设计方案进行优化，降低膨胀土对于挡墙的影响，从而能够提升工程建设质量。

结语

综上所述，本文简要阐述了膨胀土对工程建设的影响，并对蒸发脱湿期间挡墙后膨胀土侧向土压力发挥机制进行分析，最后结合工程实践证明本文所提出的预测模型具有良好的应用效果，能够为挡墙设计提供科学的数据支持，使得挡墙建设质量提升，希望能够对工程建设领域起到一定的借鉴与帮助作用，不断提升施工技术水平与建设质量。

参考文献

- [1]徐永福，程岩，唐宏华. 膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J]. 中南大学学报（自然科学版）. 2022, 53（1）.
- [2]姜绍飞，乔泽惠，吴铭昊，等. 考虑环境与荷载长期共同作用的木材本构模型研究[J]. 建筑结构学报，2021, 42（8）：9-9.
- [3]徐永福，张景伟，刘云龙，等. 考虑环境荷载作用的膨胀土边坡挡墙侧向土压力研究[J]. 中南大学学报（自然科学版），2022（001）：53-53.
- [4]彭晓钢，王寰宇，李有志，等. 考虑土体非均质各向异性特征及地震效应的挡墙主动土压力分析[J]. 铁道科学与工程学报，2022（001）：019-019.
- [5]林宇亮，张震，罗桂军，等. 膨胀土边坡的水平膨胀力及桩板结构内力分析[J]. 中南大学学报：自然科学版，2022（001）：053-053.
- [6]徐永福，程岩，肖杰，等. 膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究[J]. 岩土工程学报，2022（007）：044-044.