

专栏主编简介:

张锐,教授,博士生导师,长沙理工大学交通运输工程学院科研副院长,交通运输部青年科技英才,湖南省高校青年骨干教师,中国公路建设行业协会专家,中国岩石力学与工程学会红层工程分会理事。

长期从事膨胀土、高液限土、红层软岩等特殊岩土路基填料利用、边坡生态防护与加固等工程问题研究,先后主持国家自然科学基金项目3项,省部级和横向科研课题20余项;发表学术论文60余篇,获国家发明专利授权10项;参编行业规范2部,团体和地方标准3部;获国家科技进步一等奖1项,省部级科技进步奖特等奖2项、一等奖4项。研究成果先后在我国海南、广西、云南、河南等8个省区20多个新建和改扩建高速公路工程中成功应用,并在水利工程和高速铁路工程中推广。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220716001

文章编号:1672-9331(2023)06-0001-16

引用格式:凌时光,张锐,兰天.膨胀土强度特性的研究进展与探究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(6):1-16.

Citation: LING Shiguang, ZHANG Rui, LAN Tian. Research progress and exploration on strength characteristics of expansive soil [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 1-16.

膨胀土强度特性的研究进展与探究

凌时光¹,张锐^{1,2},兰天¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】进一步研究膨胀土抗剪强度的影响因素,深入探讨膨胀土最本质的膨胀特性对抗剪强度的影响机理。【方法】在总结国内外膨胀土抗剪强度特性主要研究成果的基础上,将膨胀土抗剪强度的影响因素归纳到膨胀土的胀缩性、裂隙性和超固结性三种特殊性质中。基于非饱和土抗剪强度理论,针对膨胀土膨胀前后有效抗剪强度指标的变化做出了科学假说,并采用改进的直剪试验装置和激光粒度仪进行了试验验证。【结果】膨胀土抗剪强度的变动性与自身的三种特殊性质密不可分;饱和直剪试验中有效黏聚力与有效内摩擦角均随干密度的减小而呈双曲线下下降趋势;膨胀土膨胀后粒径小于0.1 mm的颗粒含量明显增加,且干密度越大,其累积含量变化越大。【结论】膨胀土强度衰减的微观机制是膨胀土固相颗粒在晶格膨胀作用下产生破碎与分离,使颗粒级配发生改变,这是造成膨胀土强度指标出现差异的重要因素。

关键词:道路工程;膨胀土;抗剪强度;胀缩性;裂隙性;超固结性

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

0 引言

膨胀土是一种富含亲水性矿物(主要为蒙脱石和伊利石)且极易表现出吸水膨胀特性的高塑性黏土^[1]。其遍及六大洲的60多个国家和地区,在我国南方地区分布尤为广泛^[2-4]。在膨胀土地区建设工程时经常遇到与膨胀土抗剪强度有关的工程问题。膨胀土的强度具有明显的变动性,其边坡在早期通常表现出较高的抗剪强度,然而,经

过多次干湿循环后强度逐渐呈现下降趋势,进而导致膨胀土边坡产生渐进式、反复式的浅层破坏^[5]。部分膨胀土地地区边坡坡率即使放缓至1:6仍不能保持边坡稳定^[6],徐永福等^[7]通过对膨胀土的水力作用机理开展研究发现,放缓边坡导致开挖卸载幅度过大,并不利于膨胀土边坡的稳定。膨胀土边坡一旦失稳,将严重影响工程施工和安全运行,给工程建设带来巨大的安全隐患和经济损失^[8-9]。因此,深入研究膨胀土的强度特性,弄清膨胀土边坡浅层滑塌原因以及经干湿循环作用

收稿日期:2022-07-16;修回日期:2022-08-29;接受日期:2022-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978085)

通信作者:张锐(1980—)(ORCID:0000-0003-2451-7103),男,教授,主要从事特殊岩土路基工程方面的研究。

E-mail: zr@csust.edu.cn

后其强度衰减的机理,对解决工程问题具有重大的指导意义。

目前,针对膨胀土抗剪强度的变动性演化规律的研究,一般需要考虑胀缩性、裂隙性、超固结性的影响。胀缩性的影响主要受含水率、干密度、应力状态的控制。张琦等^[10]通过对不同初始含水率的非饱和膨胀土开展不固结不排水三轴剪切试验发现,非饱和膨胀土的抗剪强度随初始含水率的增加呈线性下降趋势。裂隙性的影响包括次生裂隙的影响和原生裂隙的影响。汪时机等^[11]通过探究干湿循环效应下膨胀土胀缩裂隙的演化特征及土体抗剪强度的劣化规律,发现黏聚力的衰减与裂隙面积率、裂隙总长度、裂隙平均宽度的变化趋势具有明显的关联性,其中,与裂隙面积率的关联度最大。此外,超固结性的影响主要体现在抗剪强度指标的选取上,即采用残余强度作为土体破坏或稳定性分析的强度指标。

近年来,膨胀土工程问题引起了国内外专家学者的广泛关注,部分学者开展了关于膨胀土工程地质特性^[12]、膨胀土强度的影响因素^[13]以及膨胀土强度的改良^[14]等方面的研究。另外,越来越多的学者根据对膨胀土特殊性的认识,针对性地采用了各种改进的试验方法和测试技术,来论证膨胀土抗剪强度的变动性规律及衰减机理^[15-16]。肖杰等^[17]通过对吸湿膨胀的膨胀土边坡进行多场耦合数值模拟,发现在考虑膨胀土低应力状态强度和衰减规律的情况下,边坡会在中雨降落4 d后发生破坏。然而,如果不考虑这些因素,在相同条件下边坡仍能保持稳定。因此,在研究膨胀土边坡的稳定性时须考虑土体强度衰减规律。同时,部分学者在进行了大量的试验研究后,建立了与膨胀土吸力、裂隙、膨胀力等相关的强度理论公式^[18-20]。改进的试验方法及强度理论仅证明了强度的衰减规律,但对于膨胀土强度变动的内在机制,大多数研究仍参照一般黏性土强度衰减特性进行论述。膨胀土显著的膨胀性是其区别于其他一般黏土的最本质特征,然而,鲜有学者对此进行深入的研究和总结。由于侧重点不同,专门针对膨胀土强度特性的研究总结梳理还不够全面,关于膨胀土的强度特性方面还有较大的研究空间。因此,有必要对众多学者在该领域的研究进行系统的梳理与总结。

为此,本文总结了国内外关于膨胀土抗剪强

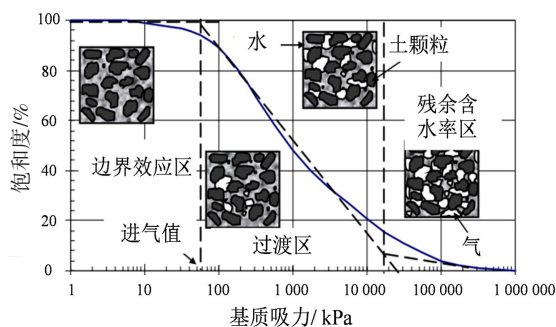
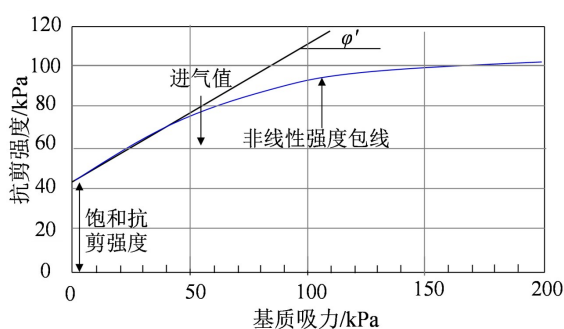
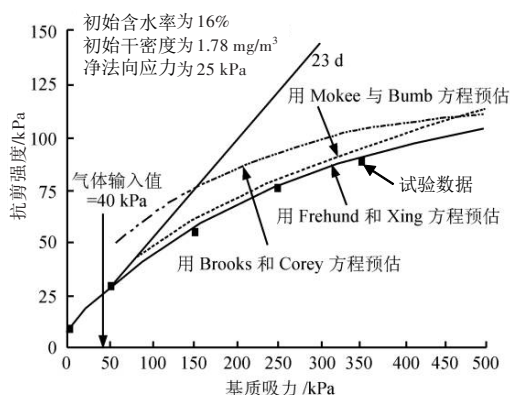
度特性的主要研究成果,根据膨胀土自身的特殊性,将影响抗剪强度的因素归纳到胀缩性、裂隙性和超固结性中。此外,基于膨胀土微观结构的研究进展,本文提出了膨胀影响下的膨胀土抗剪强度衰减机理,通过开展在恒定体积下的直剪试验测定百色膨胀土的抗剪强度参数,揭示了膨胀对膨胀土抗剪强度的响应机制。本文旨在科学、深入地认识膨胀土抗剪强度的变动性特征,期望通过本文的整理和总结能为膨胀土领域及相关领域的学者提供一定的参考和借鉴。

1 胀缩性对膨胀土抗剪强度的影响

胀缩性是膨胀土三大特性中最典型、最显著的特性。膨胀土富含亲水性矿物蒙脱石和伊利石,其对水分非常敏感。膨胀土吸收过多的水分时,会发生膨胀和软化;当其失水过多时,会引起收缩和开裂。在不断蒸发和降雨的自然环境下,膨胀土会发生反复的胀缩变形,从而导致其抗剪强度下降。膨胀土的胀缩现象是由土体内含水率(吸力)的变化直接引起的。这种胀缩现象会导致干密度发生改变,而胀缩的程度也受到土体周围应力状态的控制。因此,本文将与膨胀土胀缩性联系最为密切的含水率(吸力)、干密度、应力状态归为一类,并分别讨论这三种因素对膨胀土抗剪强度的影响。

1.1 不同含水率(吸力)条件下膨胀土抗剪强度

当水分进入土体孔隙并吸附于颗粒表面时,相邻土粒之间会形成一层水膜,产生表面张力,此时孔隙水压与孔隙气压会同时作用于土颗粒,两者之差即为基质吸力。基质吸力大小与土粒孔隙含水率密切相关,是影响膨胀土抗剪强度的最重要因素之一^[21]。文献[22-23]中总结的众多针对非饱和土强度的理论模型,例如Bishop、Fredlund、缪林昌和卢肇钧等提出的适用于非饱和土的经典强度理论,巧妙地将土体的吸力变化与强度结合起来,能够清晰地反映吸力变化对强度的影响趋势(见图1、图2)。同时,WHEELER等^[24]考虑非饱和和抗剪强度受饱和土强度参数与基质吸力的综合影响,据此选用Fredlund公式表述非饱和土抗剪强度。另一方面,LOCAT等^[25]根据不同学者提出的膨胀土抗剪强度计算方程,得到了不同模型抗剪强度预估值与试验值之间的差异,如图3所示。

图1 典型土水特征曲线与土体结构^[22]Fig. 1 Typical soil water characteristic curve and soil structure^[22]图2 抗剪强度与土水特征曲线的关系^[23]Fig. 2 The relationship between shear strength and soil water characteristic curve^[23]图3 不同模型抗剪强度预估与试验值的比较^[25]Fig. 3 Comparison between predicted and experimental values of shear strength of different models^[25]

在膨胀土抗剪强度随吸力变化的试验研究方面, YE 等^[26]对湖北膨胀土进行了非饱和三轴试验,发现当净围压为 100~400 kPa 时,剪切特性由应变软化变为应变硬化;在低吸力范围内,吸力主要影响有效黏聚力,而有效内摩擦角基本保持不变,非饱和抗剪强度随吸力增加呈线性增加趋势。ZHANG 等^[27]选取南阳膨胀土作为研究对象,通过

饱和盐溶液蒸气平衡技术和轴线平移技术对其施加吸力,探究了不同吸力条件下的非饱和膨胀土的水-力特性。此外,三轴剪切试验结果表明,对于干密度相同的压实膨胀土,吸力越大,应力-应变曲线峰值、强度和体积收缩越大;极高吸力作用下的膨胀土具有明显的峰值强度、应变软化和膨胀特性。詹良通等^[28-29]通过控制非饱和直剪仪压力室中的气压以及陶土板底部水压力的方法,得出了吸力会使粒间有效应力增加,并对膨胀土峰值强度的贡献较大的结论。

在干燥季节,膨胀土坡面上会形成大量裂隙,为降雨入渗提供了优先通道。在雨季,降水很容易通过这些裂缝渗透到土体中,导致土体含水率提高,基质吸力降低,进而对膨胀土的抗剪强度产生影响。LIANG 等^[30]根据膨胀土在旱季和雨季的含水率变化,采用两个地区的膨胀土分别在不同含水率和不同竖向压力下进行直剪试验。研究表明,当土壤含水率由 16% 增加到 34% 时,两个地区膨胀土的黏聚力分别减小了 71.8% 和 74.0%,内摩擦角分别减小了 93.9% 和 68.2%。可见,膨胀土抗剪强度的水敏性较大,含水率的增加导致膨胀土抗剪强度参数显著降低。

徐彬等^[31]认为同一种膨胀土的强度受含水率、密度和裂隙的影响最为显著。常规剪切试验结果显示,将这三个影响因素按影响程度大小排序,依次为含水率、裂隙、密度。此外,为深入探究含水率对抗剪强度和膨胀力的影响,杨庆等^[32]对两种重塑膨胀土样进行了三轴试验,发现黏聚力的对数与内摩擦角随含水率的增加呈线性下降趋势,含水率与膨胀力之间存在一定的指数关系。

综上所述,可见含水率(基质吸力)对膨胀土抗剪强度影响的显著程度。究其原因,一方面,膨胀土黏土颗粒间的关联作用是依靠相邻土粒间的水化膜实现的,属于间接接触而并非直接接触。当颗粒的外界条件(含水率)发生改变时,粒间距、水化膜厚度也会随之进行调整,从而造成土体发生不同程度的胀缩变形。另一方面,膨胀土抗剪强度降低的另一重要原因是土水界面之间的离子交换作用因水分子的浸入遭到破坏。

1.2 不同干密度条件下膨胀土抗剪强度

上一节提到膨胀土产生胀缩变形的诱因是土体含水率的变化,这种变化会导致土体的干密度发生改变,从而影响其抗剪强度。一直以来干密

度对膨胀土抗剪强度变动性的影响也是研究者们关注的焦点。肖杰等^[33]认为初始干密度增大,膨胀土单位体积内存在的固体物质占比上升,孔隙率减小,土颗粒之间接触更加紧密,从而削薄了土粒间的水膜厚度,土体抗剪强度得到提高。除此之外,其还采用南宁外环膨胀土开展了不同干密度条件下饱和原状样和重塑样的剪切试验来验证上述观点。结果显示,在低应力条件下且只有干密度一个变量时,试件的密实程度对其抗剪强度有显著影响,并且强度与干密度之间成一定的比例关系^[34],试验结果与上述结论完全一致。缪林昌等^[35]采用非饱和三轴仪对广西膨胀土开展了强度试验,探讨了不同干密度条件下土样的应力-应变关系,以及土体内部不同孔径之间是否存在关联的问题。最终得出以下结论:干密度越大,试样内部孔径越小,孔隙之间的连通性越差。此外,试验得到的应力-应变曲线呈剪胀软化型,随着试样密度增加到某一临界点之后,应力-应变曲线表现出相反的变化趋势。

为获悉不同干密度条件下膨胀土峰值和残余强度的变化规律,赵文建等^[36]通过控制干密度、含水率以及上覆荷载,开展了多次直剪试验,研究了百色重塑膨胀土抗剪强度的作用机制,并指出其峰值强度受干密度影响较大,而残余强度随干密度的增加无明显变化。文中还强调了土体的残余强度是决定边坡长期稳定的关键要素,土体的长期稳定仅靠增加压实度的方法来提高是行不通的。

1.3 不同应力状态条件下膨胀土抗剪强度

自然边坡经过长期侵蚀和剥落,其坡表面的超固结现象在浅层更加显著。出现滑动的膨胀土边坡基本上都表现出浅层失稳特性,特别是发生表层溜坍(深度 $h < 1.5$ m)时,滑动面上的竖向应力不大于30 kPa,远比直剪试验的法向应力(50或100 kPa)或常规三轴剪切试验的最小围压要小^[33]。针对此现象,一些学者借助各类试验开展了相关研究。其中,舒志乐等^[37]通过对膨胀土开展三轴固结不排水试验,发现在干湿循环次数相同的情况下,影响抗剪强度指标的因素按影响程度由大到小排序,依次为高围压段、全围压段、低围压段;邹维列等^[38]基于干湿循环后的抗剪强度试验,指出膨胀土抗剪强度随竖向应力的增加表现出明显的两阶段特性,低应力条件下测得的强

度指标更有代表性;肖杰等^[33]从膨胀土边坡破坏的实际角度出发,对南宁膨胀土开展了不同低应力条件下常规直剪试验,试验结果显示,低应力下的实测值较规范法直线回归得到的残余强度值仍小很多,这说明在低应力状态下测得的膨胀土抗剪强度才能表征其真实强度。

总的来说,含水率变化是引起膨胀土胀缩的导火索,干密度的改变是胀缩变形的最终结果,而应力状态影响膨胀土抗剪强度是通过制约膨胀土的变形,进而控制干密度的改变来实现的。三者既是膨胀土胀缩特性的影响因素,也是膨胀土抗剪强度的影响因素,其中,含水率的变化对抗剪强度影响最大。

2 裂隙性对膨胀土抗剪强度的影响

裂隙性是膨胀土的三大基本特征之一,也是膨胀土最直观、最明显的特征。裂隙的存在使膨胀土的强度特性变得错综复杂,是引起诸多工程地质事故的直接或间接原因^[39-41]。膨胀土的强度是由裂隙的分布、密度、倾向、倾角、延伸、填充等综合控制的,裂隙的定向排列导致了膨胀土强度的各向异性^[42-43]。膨胀土中的裂隙可分为两种,一种是在土体表面0~3.0 m内,因干湿循环而产生的次生裂隙;另一种是非干湿循环裂隙,该裂隙是因土体中收缩应力不均匀而形成的,在膨胀土边坡大气显著影响区之外,也称作原生裂隙^[44]。在考虑裂隙性对膨胀土抗剪强度的影响时,需要考虑以上两种裂隙的作用。

2.1 次生裂隙对膨胀土抗剪强度的影响

膨胀土的胀缩循环实际上是由外界干湿循环导致的含水率上下波动所引起的。然而,与单向增湿导致的胀缩性影响不同,往复的干湿交替作用主要通过裂隙导致的结构损伤来表征强度的衰减。众所周知,膨胀土在大气中反复遭受风化和干湿循环效应的影响后,其浅层裂隙逐渐发育,导致其抗剪强度急剧衰减。针对干湿循环裂隙产生的强度问题,不少学者基于宏观和微观等不同角度开展了室内试验研究和理论分析。王勇^[45]运用图像处理软件对不同次数干湿循环作用后的膨胀土表面裂隙参数进行提取,然后对试件进行低应力条件下的快剪试验。研究结果表明,在第1次干湿循环后黏聚力变化最明显,有效内摩擦角受干

湿循环次数影响不大,黏聚力与裂隙率及分形维数具有良好的线性关系。

方瑾瑾等^[46]选取非饱和土真三轴仪开展了常吸力真三轴剪切试验,以便获取膨胀土在多次干湿循环下的力学指标。试验结果表明,围压、吸力的大小显著影响膨胀土的压缩特性;干湿循环会导致膨胀土的黏聚力和内摩擦角不断降低,当基质吸力小于200 kPa时,干湿循环后的吸力摩擦角不是一个常量,但膨胀土强度会在3次干湿循环作用后逐步趋于稳定。吴珺华等^[47]通过不排水剪切试验探究了非饱和膨胀土在干湿循环作用下强度的衰减情况。研究发现,采用直剪仪和滤纸法进行干湿循环下的强度试验得到的结果更加真实可靠,且经历多次干湿循环后,试样的黏聚力衰减幅度较大,而内摩擦角基本保持不变。刘宽等^[48]在膨胀土力学性能劣化的试验研究中发现,在前3次干湿循环作用下膨胀土黏聚力衰减高达71.0%。

为揭示在酸雨干湿循环作用下膨胀土的膨胀开裂特性,CHANG等^[49]利用高清数码相机拍摄了试样在干湿循环淋雨除湿过程中的裂纹显影图像,并利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和X射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)分析了在酸雨干湿循环作用后膨胀土的微观结构和矿物组成的变化,在不同条件下裂隙的发展情况如图4所示。在此之前,卢再华等^[50]基于计算机断面成相(computerized tomography, CT)技术对重塑膨胀土在干湿循环过程中裂隙的演化开展了深入的研究,建立了干湿循环裂隙发育下的损伤演化公式,得出了膨胀土

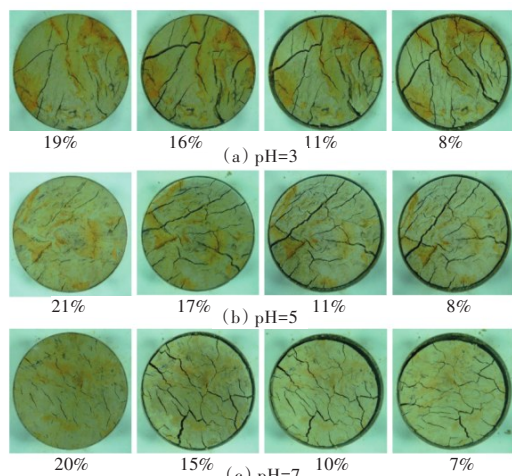


图4 一次干湿循环后不同湿度试样裂纹发展情况^[49]

Fig. 4 Crack development of sample with different humidity after one-time cyclic drying-wetting^[49]

在干湿循环作用下的胀缩变形是永久损伤的结论。为了从微观角度分析膨胀土强度与干湿循环效应之间的必然联系,吕海波等^[51]开展了不同次数干湿循环作用下南宁原状膨胀土试样的孔径分布试验,采用压汞法测得了孔隙体积与干湿循环次数之间的变化规律。试验结果表明,膨胀土抗剪强度的降低在很大程度上归因于干湿循环破坏了土颗粒间的联结作用,并对土体的微结构造成了不可逆的影响。

2.2 原生裂隙对膨胀土抗剪强度的影响

由于对裂隙的认识不够深入,人们习惯将表层可见的次生裂隙与膨胀土地层中特有的原生裂隙混为一谈,从而忽视了后者对边坡稳定产生的重大影响。

一些新开挖的边坡在未经干湿循环的情况下发生滑坡,还有部分工程在采取了一定的护坡措施后,仍然屡屡发生边坡失稳事故。对事故进行分析后发现,滑动面多由软弱夹层、膨胀土中裂隙面组成,或由膨胀土中众多裂隙面贯通而成^[52-54],因此原生裂隙所造成的问题或责任是不可推卸的。龚壁卫等^[55]在对原生裂隙的研究中发现,南水北调中线工程南阳膨胀土渠道边坡产生的原生裂隙大致可分为两种类型:一是光滑蜡状裂隙,二是充填了一定厚度黏土的裂隙。裂隙面上的含水率较两侧土体的更高,而天然密度较两侧土体的更低,且物质成分也稍有不同,强度相差甚远。当地层与边坡方向一致时,土体就不可避免地沿裂隙面发生滑动,从而造成严重的后果。基于此,胡波等^[56]借助三轴试验提出了测试原生裂隙面强度的新方法,阐述了裂隙的发育与分布规律,还将计算机X射线断层扫描技术应用到试验中,精确获取了作用在裂隙面上的应力范围,得出了裂隙面强度很小且无法与两侧土体峰值和残余强度相比的结论。不过该研究只对这种差异进行了解答,并未进行深入的定量分析。由于膨胀土中的裂隙面往往厚度较薄,除少数为平直裂隙外,大多数以曲面形式分布,采用直剪试验进行裂隙面强度测试时,剪切面往往并非完全沿裂隙面开展。针对这一问题,包承纲^[57]曾采用式(1)表示膨胀土土体强度。

$$\tau_{fm} = s\tau_{ff} + (1-s)\tau_{fb} \quad (1)$$

式中: τ_{fm} 、 τ_{ff} 、 τ_{fb} 分别为土体、裂隙面、土块的抗剪强度; s 为穿过剪切面的裂隙的面积与总剪切面的

面积之比。

该公式的提出能够帮助人们认识膨胀土土体强度、土块强度、裂隙面强度及三者之间的相互关系。然而,如果想通过上述公式来计算裂隙面强度,则需要提前获知土体强度、土块强度以及土块面积占总剪切面面积的比例,不然无法依据上述式(1)直接计算出膨胀土的裂隙面强度。

刘特洪^[58]认为原生裂隙是膨胀土在成土过程中受到温度、湿度及不均匀胀缩效应等地质应力作用下产生的,它的存在对膨胀土土体强度有着不容忽视的影响。膨胀土原生裂隙面大多具有蜡状光泽,多充填强度较低的灰白色黏土,这种灰白色黏土的占比越大,整个裂隙面强度越小,存在这种裂隙面的边坡十有八九会发生失稳事故。与此同时,该学者还立足于宏观结构将膨胀土的强度分为裂隙面强度、土块强度以及土体强度三种,细化了膨胀土强度的笼统概念,遗憾的是其并未对获取裂隙面强度的手段和过程做出详细的论述。于是,程展林等^[15]在此基础上借助CT技术,依靠X射线穿透试样断面完成3D扫描,从而获得裂隙面的大致分布位置,随后采用三轴试验方法对试样开展剪切试验,最终测得了由非干湿循环产生的裂隙的裂隙面强度。

综上所述,干湿循环主要破坏膨胀土的结构性能,从而造成土颗粒间的胶结性变弱。土体内亲水性黏土矿物经历循环胀缩后,诱发的膨胀势、基质势反复作用于土体微细观结构上,形成结构性疲劳损伤,导致土体黏聚力骤减,抗剪强度损失而出现滑塌现象^[46]。此外,非干湿循环产生的裂隙中充填黏土的物质成分和天然状态都有别于裂隙两侧的土体,且其强度极低,一旦地层走向与边坡倾向接近,边坡开挖形成后,首先在坡脚处产生塑性破坏,并随着变形持续发展,裂隙逐渐贯通,最终造成工程滑坡事故。

3 超固结性对膨胀土抗剪强度的影响

膨胀土的超固结性是指土体在地质历史过程中曾经承受过比上覆压力更大的荷载作用,并已经达到完全或者部分固结的特征^[59-60]。从某种程度上说,膨胀土具有超固结性是由膨胀土的应力历史决定的,一旦开挖暴露,超固结应力便会释放,从而使边坡发生失稳破坏。因此,超固结性带

来的隐患不容忽视。

实际上,LO等^[61]早在20世纪70年代就对超固结性是如何影响膨胀土强度的问题进行了专门的阐述。由于曾经承受过更大的上覆荷载,超固结膨胀土比正常固结土具有更大的结构强度和水平应力,并能在无外界干扰因素的情况下基本保持其强度和稳定性。然而,开挖边坡的过程从某种意义上来说就是一个卸载过程,由于水平应力较高,膨胀土的卸荷效应明显比正常固结黏土的大,因此,膨胀土更容易产生使其强度急剧降低的裂隙,从而引起土体整体结构的破坏,对边坡的稳定性产生负面影响,进一步影响工程建设质量,诱发严重施工事故。

由于大多数土体现有的固结压力小于历史固结压力,其蓄积的膨胀潜势在遇水后得到释放,从而造成较大变形,导致强度衰减。同时,常规试验制备的试样通常不属于超固结土,因此难以反映应力历史对原状膨胀土抗剪强度的影响。对于一般性黏土,超固结土的峰值强度与残余强度的差值较大,而正常固结土的峰值强度与残余强度的区别则较小^[62](见图5)。

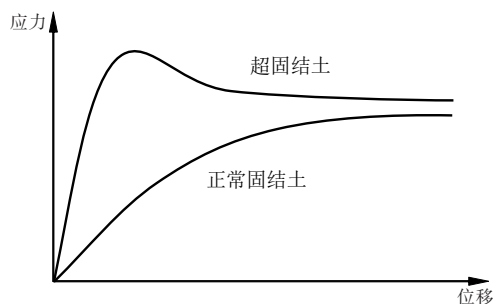


图5 黏性土的应力-位移关系曲线^[62]

Fig. 5 The stress-displacement curve of cohesive soil^[62]

SHEAHAN等^[63]对几十个黏土实体滑坡工程的共同点进行了研究分析,发现绝大多数超密实的边坡在保持一段时间稳定后都发生了滑塌破坏。通过滑塌边坡反算得到的抗剪强度比实际测得的残余强度还低。超固结性使膨胀土峰值强度与残余强度之间的差异更为显著,这也导致了通常情况下稳定的边坡也存在渐进性、持续性的滑坡,且滑动面的坡率极缓。LAN等^[64]指出,在考虑膨胀土自身膨胀特性对边坡稳定性影响时,边坡滑塌后的真实强度与残余强度接近。因此,在进行稳定性计算时,应采用所取土样的残余强度而不是峰值强度。这样做的目的并不是要反映实际

的边坡失稳机理,而是采用残余强度作为近似值来使计算得到的安全系数更低,从而为边坡提供更多的安全冗余。此外,徐彬等^[31]也通过试验证明了膨胀土残余强度在数值上接近于其经历5次干湿循环后的抗剪强度值。然而,重塑样的初始强度与经历多次干湿循环后结构完全破坏的原状样强度相差无几,这是因为重塑样失去了原状土的结构构造以及土粒间的物理化学胶结作用,所以其强度下降,这是膨胀土超固结效应的另一种表现形式^[55]。

为了获得土体的峰值抗剪强度和残余抗剪强度,吴珺华等^[65]在排水条件下对重塑超固结膨胀土样进行了三轴剪切试验,并结合有限差分软件进行了数值模拟,通过对边坡变形过程中土体软化特征的分析指出,仅用安全稳定系数一个指标来评价膨胀土的边坡稳定性是不保险的,即使安全稳定系数大于1,在边坡塑性剪应变达到某一数值的情况下,边坡仍然会出现失稳。因此,必须充分重视超固结性对膨胀土边坡的强度和变形的影响,综合采用广义塑性剪应变、安全稳定系数进行评价。

李振霞等^[60]借助考虑侧向约束作用的剪切试验,揭示了膨胀土强度随超固结特性的演变规律,并指出膨胀土抗剪强度与先期固结压力成正相关关系变化。同时,超固结程度越大,由峰值强度过渡到稳定强度状态时所发生的变形量越大,抗剪强度亦有所提高。

综上所述,超固结性是膨胀土三性的重要表现之一,超固结性会使膨胀土的峰值强度与残余强度之间的差异更为显著。抗剪强度随先期固结压力的增加而增加,在不受外界干扰的情况下是相对稳定的。然而,边坡一旦被开挖暴露,其超固结应力便会释放,从而导致坡体失稳。因此,超固结性对膨胀土边坡抗剪强度的影响应该受到相关行业的重视。与此同时,国内外在这方面的研究相对薄弱,亟需进一步加强。

4 膨胀土强度研究的思考与讨论

膨胀土的三种特殊性质实际上是相互关联且相互影响的。膨胀土的胀缩变形是导致裂隙发育和超固结的前提条件,裂隙发育程度及其几何形态结构又客观反映了胀缩特性。此外,裂隙发育

也对超固结状态的形成有一定的促进作用,而基于超固结程度可对膨胀土在不同荷载条件下的变形行为和裂隙发育状态进行评价^[13]。简单来说,胀缩性是膨胀土工程问题发生的根本因素,裂隙性是关键控制因素,超固结性是诱发促进因素^[66]。膨胀土强度变动较大的原因与膨胀土自身的三种特殊性质密不可分。

仅从强度理论上讲,膨胀土仍然是一种黏性土,应符合莫尔-库仑强度准则。然而,膨胀土的强度时而表现出一般黏土的共性,时而展现出膨胀土的特性。对于一般黏性土,含水率的增加是土中孔隙被水所充填的过程,土的固相体积在剪切前后不发生变化,土体结构也基本不发生改变。然而,膨胀土因富含蒙脱石等黏土矿物,吸水后晶层膨胀进而导致土体颗粒体积增大,固相体积随之增大。因此,膨胀土吸水前后实际上是两种不同级配与结构的土,若采用常规方法进行抗剪强度试验,其结果必然不能反映实际膨胀土边坡中土体的破坏状态,这也造成其强度指标与一般黏性土相比存在更大的波动性。

由于常规饱和强度试验没有考虑增湿膨胀导致的固相体积变化的影响,所以通过该试验得到的有效黏聚力与有效内摩擦角都可能存在偏差。这使得采用基于经典土力学理论的饱和强度公式难以准确计算膨胀土的真实抗剪强度。而现有的非饱和强度公式是以饱和强度理论为基础的,包括与饱和强度相关的有效黏聚力、摩擦力以及与吸力相关的吸附强度。非饱和强度公式如式(2)所示:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \tau_s \quad (2)$$

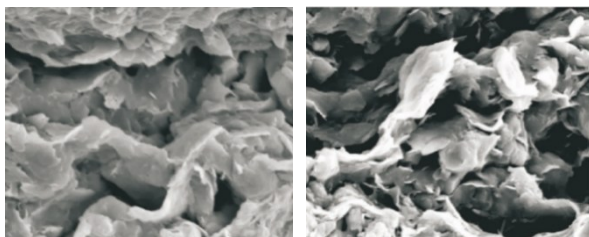
式中: τ_f 为非饱和强度; c' 为饱和土的有效黏聚力; φ' 为饱和土的有效内摩擦角; $(\sigma - u_a)$ 为净法向应力; τ_s 为基质吸力引起的强度。

为解释膨胀土抗剪强度在不同水化状态下的变动特征,许多研究者通过分析其不同含水率条件下的吸附强度的变化,以表征整体强度的变化规律。然而,这种方法忽略了膨胀对有效黏聚力及有效内摩擦角的影响。现有的试验研究主要分析了宏观影响因素造成的膨胀土强度衰减,但缺乏针对膨胀导致的强度变化的研究,尤其是从微细观角度解释膨胀导致膨胀土抗剪强度衰减的机理。因此,无法获得膨胀土的真实抗剪强度指标。

现有研究表明,膨胀土的宏观力学行为受微观结构控制,VU等^[62]借助概率密度函数表征了膨胀土土颗粒的定向排列,揭示了土体微观结构对宏观膨胀特性的影响。随着SEM分析技术的发展,SEM成为研究高空间分辨率黏土微观结构变化的有效工具。SHIN等^[67]在利用SEM对原状膨胀土的微观结构开展研究后指出,对黏土微观结构的准确表征是正确评价膨胀土膨胀行为的关键。

AL-HOMOUD等^[68]进一步描述了膨胀黏土微观结构与干湿循环之间的定性相关性。KATTI等^[69]将一种新的可控单轴溶胀(CUS)装置与SEM技术相结合对膨胀土进行研究,发现膨胀土的膨胀不仅导致膨胀力增加,同时还使颗粒尺寸明显减小,使土颗粒分解成更小的颗粒,如图6所示。

为了更好地应用现有技术研究膨胀土的微观结构特征,并使膨胀土在该方面的研究不再停留在定性描述阶段,刘正楠等^[70]采用SEM技术对百色、枝江两地不同干密度下的重塑膨胀土进行了观察,并对图像进行处理和定量计算分析。研究发现,压实后的膨胀土趋于水平层状排列,且压实度越高,膨胀各向异性越强。这合理地解释了宏观上膨胀土竖向和侧向膨胀潜势不相同的原因。



(a) 孔隙闭合 (b) 孔隙打开

图6 不同水化环境下膨胀土SEM图^[69]

Fig. 6 SEM images of expansive soil in different hydration environments^[69]

膨胀土膨胀会使黏土矿物集聚体变小并趋于分散,这可能会导致土中粉粒与粉粒之间的接触减少,而粉粒与黏粒之间的接触增多。粉粒之间的摩擦强度是膨胀土整体摩擦强度的主要贡献部分,而膨胀使接触面摩擦发生变化,可能导致有效内摩擦角减小。而一般土的抗剪强度理论并不考虑土体中土颗粒的膨胀和增湿过程中土颗粒接触面的改变。土颗粒接触面的改变使膨胀土抗剪强度具有较大的变动性,这是膨胀土与一般黏土的本质区别。同时,由于低密度下饱和膨胀土中的

颗粒之间充满了水,颗粒与颗粒之间的距离超过了范德华力的范畴,这导致饱和膨胀土的有效黏聚力接近或等于0^[63]。

已有研究表明,随着膨胀变形的增加,饱和膨胀土的有效黏聚力和有效内摩擦角会逐渐衰减。DELIKTAŞ等^[71]研究发现,即使膨胀土试样发生微小的膨胀变形,也会引起其抗剪强度的大幅下降。在无上覆荷载的情况下,膨胀土充分吸水膨胀后,其强度几乎完全丧失。韩华强等^[72]在三轴试验中考虑了膨胀土试样的剪胀与剪缩对膨胀土体积变化的影响,证明了膨胀对强度的影响不能忽略。

由于在一般的非饱和土抗剪强度理论中,并不考虑土体中土颗粒的膨胀以及增湿过程中土颗粒接触面的改变,所以有效内摩擦角和黏聚力始终不变,这与实际情况不符。实际上非饱和土的抗剪强度会降低,且主要由吸力的降低以及土颗粒间月形水膜张力的减小所致(图7)。结合经典非饱和土力学理论和膨胀土宏微观结构概念模型,笔者对非饱和膨胀土增湿直至饱和这一过程中有效抗剪强度指标的变化做出科学假说:在非饱和膨胀土吸水后,蒙脱石黏土矿物颗粒发生晶层膨胀,黏土颗粒由聚集转为高度分散(图8)。这

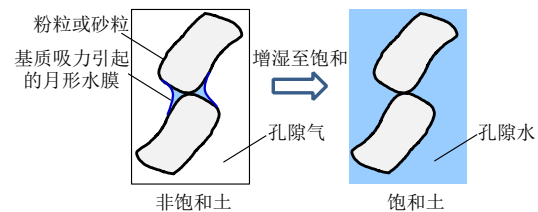


图7 一般非饱和土增湿过程

Fig. 7 General humidification process of unsaturated soils

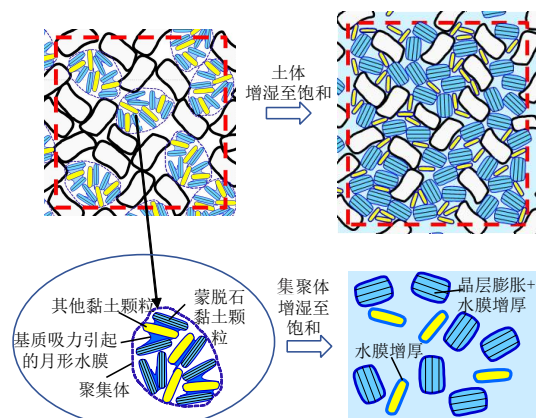


图8 膨胀土中黏土集聚体增湿过程

Fig. 8 Humidification process of clay aggregates in expansive soil

种分散导致有效黏聚力降低。原本是粉粒(或砂砾)-粉粒(或砂砾)接触的地方,因为蒙脱石黏土的膨胀和黏土颗粒的分散,变为粉粒(或砂砾)-黏粒接触。这种接触面的变化导致摩擦力发生变化,从而使有效内摩擦角减小。这些因素共同造成了强度试验中随着土体的膨胀,土体干密度衰减,内摩擦角降低,强度也随之下降的现象。

同样,对于饱和膨胀土,当在不同围压或上覆荷载作用下进行剪切试验时,膨胀土试样的干密度和微结构也会发生变化,实际上剪切的是处于不同初始状态的膨胀土试样。因此,强度包线呈现出非线性的特征,通过直线拟合得到的截距和斜率与真实的黏聚力和内摩擦角存在一定差异。

5 膨胀土强度衰减机理试验验证

考虑到直剪仪与三轴仪相比更容易实现浸水饱和和工况及控制剪切前试样的干密度,部分学者采用自制改进的饱和直剪试验装置(图9),并调整试验方法^[73],改变了常规直剪试验中加载方式,采用平衡加压法。这种方法将试样所受到的上覆荷载与试样产生的竖向膨胀力相互抵消,使试样在

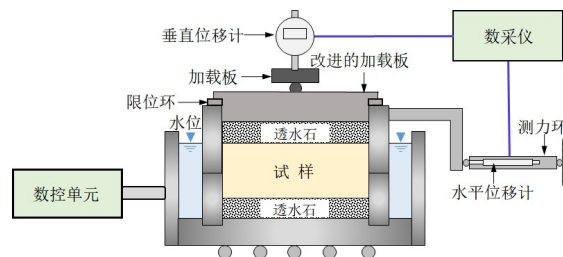


图9 考虑剪切前后土样体积恒定的直剪试验装置^[73]

Fig. 9 Direct shear test considering the constant volume of soil samples before and after shearing^[73]

剪切前的干密度不变,同时保证了试样受到不同的有效应力,该装置的可靠性及其与常规直剪试验的对比结果见文献^[73]。

本研究通过考虑膨胀对土体抗剪强度指标的影响,以验证上述假说的有效性。首先,制备5个初始饱和度相同,但干密度不同(1.60、1.55、1.50、1.45、1.40 g/cm³)的常规直剪试验试样,试样基本物化指标见表1。然后,测定不同上覆荷载对应的峰值强度和极限强度(控制剪切位移为7.0 mm),并根据抗剪强度与上覆荷载的关系曲线拟合得到了峰值和极限有效抗剪强度指标,从而获取有效抗剪强度指标随干密度减小/膨胀的变化规律。试验结果如图10所示。

表1 百色膨胀土基本物化指标

Table 1 Basic physical and chemical indexes of Baise expansive soil

土壤分类	天然含水率/%	最大干容重/(kN·m ⁻³)	自由膨胀率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
高液限黏土	17.9	17.2	82	56.3	21.4	34.9
比重	标准吸湿含水率/%	蒙脱石质量分数/%	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	砂粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	黏粒质量分数/%
2.75	5.0	18.6	215.8	0	52.1	47.9

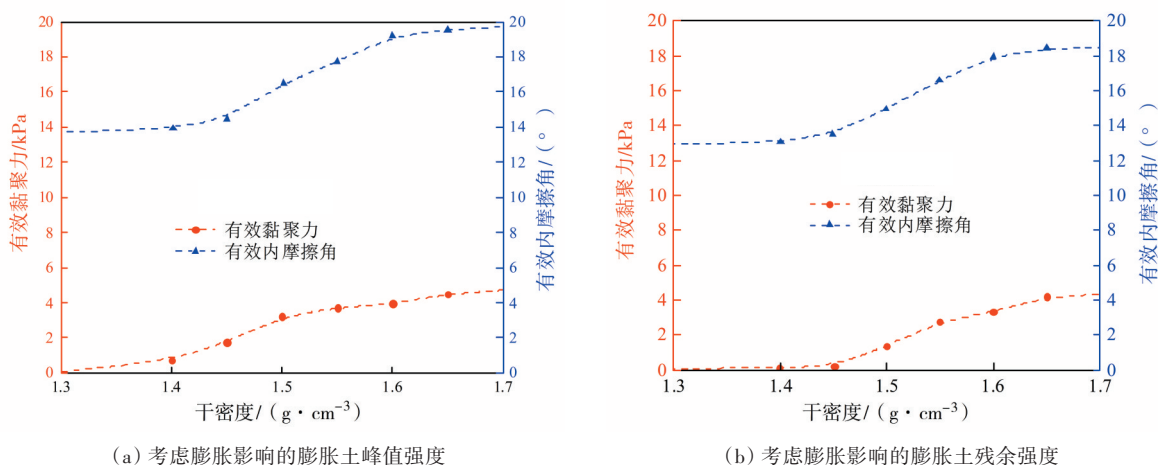


图10 不同干密度下改进直剪试验得到的峰值强度和残余强度

Fig. 10 Peak strength and residual strength obtained by improved direct shear test at different dry densities

由图10可以看出,随着干密度的降低(等效膨胀变形),峰值和残余抗剪强度指标均呈双曲线下下降趋势。分析图10(b)可知,当初始干密度为 1.6 g/cm^3 时,膨胀土的有效黏聚力仅为 4.0 kPa 左右,有效内摩擦角为 18.1° 。摩擦强度主要来自颗粒间在接触面上的相互作用,特别是大颗粒间的相互作用。随着干密度的降低,黏粒之间的相互作用逐渐分散(如图8所示),吸附作用减弱,蒙脱石矿物颗粒膨胀会使粉土颗粒之间的接触减少,粉粒与黏粒之间的接触增多,从而使得有效内摩擦角降低;当干密度为 1.4 g/cm^3 时,饱和和压实膨胀土的有效内摩擦角只有 1.6 g/cm^3 干密度状态下的73%,仅为 13.0° ,而有效黏聚力接近0。

为验证膨胀土在吸湿膨胀后颗粒会破碎的结论,本文对初始干密度为 1.4 、 1.5 、 1.6 g/cm^3 的三个试样进行常规直剪试验,并采用激光粒度仪对其膨胀前后不同粒径颗粒的含量进行粒度分析,得到颗粒累积分布曲线,如图11所示。由图11可以看出,膨胀后粒径小于 0.1 mm 的颗粒含量增加,并且干密度越大,其累积含量变化越大。膨胀前三种不同初始干密度的试样粒径为 0.075 mm 以上的颗粒占比达30%~45%,而膨胀后其占比下降为15%~20%。这也从侧面证明了土体膨胀后大颗粒会破碎分散,在恒定体积条件下,膨胀受到限制,土体的粒径将不会发生很大的变化,膨胀势能主要以膨胀力的形式传递和释放,但土体的微观结构不会因此发生较大改变,因此对土体抗剪强度的影响也相对较小。

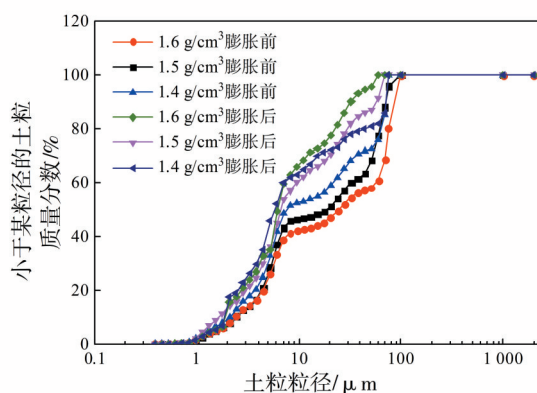


图11 不同初始干密度颗粒累积分布曲线

Fig. 11 Cumulative distribution curves of particles with different initial dry densities

保持剪切前后体积恒定的直剪试验方法既保证了不同竖向荷载作用下试件干密度的一致性,

又尽可能地保证了剪切前后试件结构的一致性。因此,通过该试验方法得到的抗剪强度指标可以反映在恒定干密度条件下膨胀土的真实黏聚力与摩擦性能。上述试验结果表明,膨胀土真实的抗剪强度极低,当膨胀土边坡土体增湿饱和且发生膨胀后,边坡容易滑塌,这也是将边坡放缓也未必能确保边坡稳定的原因。另外,粒度分析结果证明了膨胀土强度衰减的微观机制是膨胀土固相颗粒在晶格膨胀作用下产生破碎与分离,使土体的颗粒级配发生改变,这是造成强度指标出现差异的重要因素。

6 结论

1) 膨胀土抗剪强度的影响因素可归类于其特有的胀缩性、裂隙性、超固结性。含水率变化是引起膨胀土胀缩的导火索,而干密度的改变则是胀缩变形的最终结果。应力状态对膨胀土抗剪强度的影响是通过限制膨胀土的变形来实现的,进而控制干密度的改变。在这三个因素中,含水率的变化对膨胀土强度的影响最大。

2) 干湿循环导致的次生裂隙主要是通过破坏膨胀土的结构来降低其抗剪强度的。这种结构性破坏使得土颗粒间的胶结性变弱,土体黏聚力骤减。此外,原生裂隙中的充填黏土强度极低,一旦地层走向与边坡倾向接近,裂隙容易相互贯通,从而引发工程滑坡事故。

3) 超固结性的存在使得膨胀土的峰值强度与残余强度差异更为显著。土体的卸荷和应力历史都会对其抗剪强度产生一定的影响。

4) 采用改进的直剪试验可消除试样饱和过程中膨胀引起的干密度变化对抗剪强度的影响。随着干密度的降低(等效膨胀变形),峰值和极限抗剪强度指标呈双曲线下下降趋势。粒度分析结果证明,膨胀土强度衰减的微观机制是膨胀土固相颗粒在晶格膨胀作用下产生破碎与分离,使土体的颗粒级配发生改变,这是造成强度指标出现差异的重要因素。

[参考文献]

- [1] 刘正楠,张锐,刘昭京,等.膨胀各向异性对非饱和膨胀土边坡稳定性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):114-125. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.007.

- LIU Zhengnan, ZHANG Rui, LIU Zhaojing, et al. Influence of swelling anisotropy on stability of unsaturated expansive soil slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 114-125. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.007.
- [2] ZHENG J L, ZHANG R, YANG H P. Highway subgrade construction in expansive soil areas [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(4): 154-162. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:4(154).
- [3] 郑健龙, 张锐. 公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 1-10. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.03.001.
- ZHENG Jianlong, ZHANG Rui. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 1-10. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.03.001.
- [4] 张锐, 赵旭, 郑健龙, 等. 膨胀土侧向膨胀力试验研究与应用[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 22-31. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.09.003.
- ZHANG Rui, ZHAO Xu, ZHENG Jianlong, et al. Experimental study and application of lateral swelling stress of expansive soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 22-31. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.09.003.
- [5] 张良以, 陈铁林, 张顶立. 降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 70-77. DOI: 10.11779/CJGE201901007.
- ZHANG Liangyi, CHEN Tielin, ZHANG Dingli. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 70-77. DOI: 10.11779/CJGE201901007.
- [6] 杨果林, 陈子昂, 张红日, 等. 干湿循环作用下平缓型膨胀土边坡失稳破坏机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 95-103. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.005.
- YANG Guolin, CHEN Ziang, ZHANG Hongri, et al. Collapse mechanism of gentle expansive soil slope in drying and wetting cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 95-103. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.005.
- [7] 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, 44(7): 1281-1294. DOI: 10.11779/CJGE202207008.
- XU Yongfu, CHENG Yan, XIAO Jie, et al. New prevention and control technology for expansive soil slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1281-1294. DOI: 10.11779/CJGE202207008.
- [8] ITO M, AZAM S. Engineering properties of a vertisolic expansive soil deposit [J]. Engineering Geology, 2013, 152(1): 10-16. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.10.004.
- [9] 魏耀华, 龙明旭, 肖宇, 等. 湖北安陆公路膨胀土边坡滑塌生态修复技术及其应用[J]. 中外公路, 2020, 40(增刊2): 73-78. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.S2.016.
- WEI Yaohua, LONG Mingxu, XIAO Yu, et al. Ecological restoration technology and its application of expansive soil slope collapse in Anxiao Highway, Hubei Province [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(sup 2): 73-78. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.S2.016.
- [10] 张琦, 杨忠年, 时伟, 等. 冻融循环下初始含水率对非饱和膨胀土剪切特性试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1544-1550. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200289.
- ZHANG Qi, YANG Zhongnian, SHI Wei, et al. Experiment on shear characteristics of unsaturated expansive soil with initial moisture content under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1544-1550. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200289.
- [11] 汪时机, 杨振北, 李贤, 等. 干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 113-122.
- WANG Shiji, YANG Zhenbei, LI Xian, et al. Experimental study on crack evolution and strength attenuation of expansive soil under wetting-drying cycles [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 113-122.
- [12] 冷挺, 唐朝生, 徐丹, 等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.013.
- LENG Ting, TANG Chaosheng, XU Dan, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.013.
- [13] 王睿, 康博, 李红昌, 等. 膨胀土强度特性的研究进展[J]. 城市地质, 2020, 15(2): 173-180. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2020.02.009.
- WANG Rui, KANG Bo, LI Hongchang, et al. Research progress on strength characteristics of expansive soils [J]. Urban Geology, 2020, 15(2): 173-180. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2020.02.009.
- [14] JANANI V, RAVICHANDRAN P T. Effect of industrial waste on the behaviour of expansive soil [J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 80: 3048-3052. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.135.

- [15] 程展林, 龚壁卫, 胡波. 膨胀土的强度及其测试方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 11-15.
CHENG Zhanlin, GONG Biwei, HU Bo. Shear strength of expansive soil and its test method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (sup 1): 11-15.
- [16] BAI F Q, LIU S H. Measurement of the shear strength of an expansive soil by combining a filter paper method and direct shear tests [J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35 (3): 103342. DOI: 10.1520/gtj103342.
- [17] 肖杰, 谭越峰, 童超, 等. 基于三场耦合的膨胀土边坡浅层坍滑数值分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(7): 128-136, 118. DOI: 10.13204/j.gyjzg21070206.
XIAO Jie, TAN Yuefeng, TONG Chao, et al. Numerical analysis for shallow landslides of expansive soil slopes based on three fields coupling[J]. Industrial Construction, 2022, 52 (7): 128-136, 118. DOI: 10.13204/j.gyjzg21070206.
- [18] 卢肇钧, 吴肖茗, 孙玉珍, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 20-27.
LU Zhaojun, WU Xiaoming, SUN Yuzhen, et al. The role of swelling pressure in the shear strength theory of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5): 20-27.
- [19] MIAO L C, LIU S Y, LAI Y M. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil[J]. Engineering Geology, 2002, 65(4): 261-267. DOI: 10.1016/S0013-7952(01)00136-3.
- [20] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 727-731. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.03.032.
LIU Huaqiang, YIN Zongze. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (3): 727-731. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.03.032.
- [21] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的基质吸力和张力吸力[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 863-868. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2006.07.011.
LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Matric suction and tension suction of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (7): 863-868. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548.2006.07.011.
- [22] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及细观膨胀模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
JIA Jingchao. Study on the swelling mechanism and mesomechanical swelling model of expansive soils[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [23] KIRKPATRICK W M, RENNIE I A. Directional properties of consolidated Kaolin [J]. Géotechnique, 1972, 22 (1): 166-169. DOI: 10.1680/geot.1972.22.1.166.
- [24] WHEELER S J, SHARMA R S, BUISSON M S R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils [J]. Géotechnique, 2003, 53 (1): 41-54. DOI: 10.1680/geot.2003.53.1.41.
- [25] LOCAT A, LEROUEIL S, FORTIN A, et al. The 1994 landslide at Sainte-Monique, Quebec: geotechnical investigation and application of progressive failure analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52 (4): 490-504. DOI: 10.1139/cgj-2013-0344.
- [26] YE W M, ZHANG Y W, CHEN B, et al. Shear strength of an unsaturated weakly expansive soil [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2 (2): 155-161. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2010.00155.
- [27] ZHANG J R, NIU G, LI X C, et al. Hydro-mechanical behavior of expansive soils with different dry densities over a wide suction range[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(1): 265-278. DOI: 10.1007/s11440-019-00874-y.
- [28] 詹良通, 吴宏伟. 吸力对非饱和膨胀土抗剪强度及剪胀特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 82-87. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2007.01.013.
ZHAN Liangtong, NG Charles W W. Effect of suction on shear strength and dilatancy of an unsaturated expansive clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (1): 82-87. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548.2007.01.013.
- [29] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 196-201. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548.2006.02.010.
ZHAN Liangtong, NG Charles W W. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (2): 196-201. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2006.02.010.
- [30] LIANG C, WU Z J, LIU X F, et al. Analysis of shallow landslide mechanism of expansive soil slope under rainfall: a case study [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14 (7): 584. DOI: 10.1007/s12517-021-06829-6.
- [31] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.01.028.
XU Bin, YIN Zongze, LIU Shuli. Experimental study of factors influencing expansive soil strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (1): 44-50. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.01.028.

- [32] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420-425. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6915. 2004.03.011.
YANG Qing, ZHANG Huizhen, LUAN Maotian. Testing study on shear streangth of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420-425. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2004.03.011.
- [33] 肖杰, 杨和平, 李哈峰, 等. 低应力条件下不同密度的南宁膨胀土抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 15-21, 37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.06.003.
XIAO Jie, YANG Heping, LI Hanfeng, et al. Shear strength test of Nanning expansive soil with various dry densities and low stresses [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 15-21, 37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.06.003.
- [34] 肖杰, 杨和平, 王兴正, 等. 南宁外环膨胀土抗剪强度非线性特征及影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10): 1-8. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2014.10.001.
XIAO Jie, YANG Heping, WANG Xingzheng, et al. Analysis of nonlinear characteristics of shear strength of Nanning expansive soil and its influencing factors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10): 1-8. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372. 2014.10.001.
- [35] 缪林昌, 崔颖, 陈可君, 等. 非饱和和重塑膨胀土的强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 274-276. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2006.02.025.
MIAO Linchang, CUI Ying, CHEN Kejun, et al. Tests on strength of unsaturated remolded expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 274-276. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548. 2006.02.025.
- [36] 赵文建, 湛文涛, 倪啸, 等. 百色重塑膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 244-248. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.s2.069.
ZHAO Wenjian, ZHAN Wentao, NI Xiao, et al. Shear strength of Baise remolded expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(sup 2): 244-248. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.s2.069.
- [37] 舒志乐, 孙启明, 廖智伟, 等. 干湿循环下膨胀土应力-应变行为及强度分析[J]. 中国科技论文, 2021, 16(8): 825-829, 835. DOI: 10.3969/j. issn. 2095-2783.2021.08.005.
SHU Zhile, SUN Qiming, LIAO Zhiwei, et al. Stress-strain behavior and strength study of expansive soil under dry-wet cycles [J]. China Sciencepaper, 2021, 16(8): 825-829, 835. DOI: 10.3969/j. issn. 2095-2783.2021.08.005.
- [38] 邹维列, 陈轮, 谢鹏, 等. 重塑膨胀土非线性强度特性及一维固结浸水膨胀应力-应变关系[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊2): 59-64. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.s2.047.
ZOU Weilie, CHEN Lun, XIE Peng, et al. Nonlinear strength property of remolded expansive soil and its stress-strain relationship for soaking after one-dimensional consolidation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(sup 2): 59-64. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.s2.047.
- [39] 韦秉旭, 黄震, 高兵, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律及其对抗剪强度影响[J]. 公路工程, 2015, 40(4): 127-130, 140. DOI: 10.3969/j. issn.1674-0610.2015.04.028.
WEI Bingxu, HUANG Zhen, GAO Bing, et al. Crack evolution rules of expansive soil and the effect on the shear strength under the action of dry-wet circulation [J]. Highway Engineering, 2015, 40(4): 127-130, 140. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2015.04.028.
- [40] 雷军伟, 蔡树生, 王月春, 等. 安琥公路膨胀土路堑边坡浅层滑坡原因与对策[J]. 公路与汽运, 2020(2): 95-98, 102. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-2668.2020.02.022.
LEI Junwei, CAI Shusheng, WANG Yuechun, et al. Causes and countermeasures of shallow landslide on expansive soil cutting slope of Anxiao Highway [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(2): 95-98, 102. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.02.022.
- [41] AL FOUZAN F, DAFALLA M A. Study of cracks and fissures phenomenon in Central Saudi Arabia by applying geotechnical and geophysical techniques [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(3): 1157-1164. DOI: 10.1007/s12517-013-0884-7.
- [42] LI X W, WANG Y, YU J W, et al. Unsaturated expansive soil fissure characteristics combined with engineering behaviors [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(12): 3564-3571. DOI: 10.1007/s11771-012-1444-0.
- [43] LI J H, ZHANG L M, LI X. Soil-water characteristic curve and permeability function for unsaturated cracked soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(7): 1010-1031. DOI: 10.1139/t11-027.
- [44] DAI Z J, GUO J H, LUO H M, et al. Strength characteristics and slope stability analysis of expansive soil with filled fissures[J]. Applied Sciences, 2020, 10(13): 4616. DOI: 10.3390/app10134616.
- [45] 王勇. 膨胀土裂隙发育规律及与抗剪强度的关系研究[J]. 湖南交通科技, 2015, 41(3): 37-39, 56.
WANG Yong. Study on crack development law of expansive soil and its relationship with shear strength

- [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2015, 41(3): 37-39, 56.
- [46] 方瑾瑾, 杨小林, 冯以鑫, 等. 干湿循环后膨胀土力学特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1043-1055. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0902.
- FANG Jinjin, YANG Xiaolin, FENG Yixin, et al. True triaxial experimental study on mechanical properties of expansive soils after drying and wetting cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 1043-1055. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0902.
- [47] 吴珺华, 杨松. 干湿循环下膨胀土基质吸力测定及其对抗剪强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 678-684. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.009.
- WU Junhua, YANG Song. Experimental study of matric suction measurement and its impact on shear strength under drying-wetting cycles for expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 678-684. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.009.
- [48] 刘宽, 叶万军, 高海军, 等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2148-2159. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0170.
- LIU Kuan, YE Wanjun, GAO Haijun, et al. Multi-scale effects of mechanical property degradation of expansive soils under drying-wetting environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2148-2159. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0170.
- [49] CHANG J, XIAO J E, JIANG J Q, et al. Study on hygroscopic swelling and dehumidification cracking characteristics of expansive soil under acid rain and cyclic drying-wetting [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-10. DOI: 10.1155/2021/8834583.
- [50] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 417-422. DOI: 10.16285/j.rsm.2002.04.006.
- LU Zaihua, CHEN Zhenghan, PU Yibin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 417-422. DOI: 10.16285/j.rsm.2002.04.006.
- [51] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.12.046.
- LYU Haibo, ZENG Zhaotian, ZHAO Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797-3802. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.12.046.
- [52] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 102-111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2011.10.019.
- CHENG Zhanlin, LI Qingyun, GUO Xiling, et al. Study on the stability of expansive soil slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(10): 102-111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2011.10.019.
- [53] 张家俊, 龚壁卫, 胡波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2729-2734. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.09.053.
- ZHANG Jiajun, GONG Biwei, HU Bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2729-2734. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.09.053.
- [54] SHI B X, ZHENG C F, WU J K. Research progress on expansive soil cracks under changing environment [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 816759. DOI: 10.1155/2014/816759.
- [55] 龚壁卫, 程展林, 胡波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1825-1830, 1836. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.07.039.
- GONG Biwei, CHENG Zhanlin, HU Bo, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1825-1830, 1836. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.07.039.
- [56] 胡波, 龚壁卫, 程展林. 南阳膨胀土裂隙面强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2942-2946. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.10.033.
- HU Bo, GONG Biwei, CHENG Zhanlin. Test study of shear strength of fissure-plane in Nanyang expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2942-2946. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.10.033.
- [57] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2004.01.001.
- BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2004.01.001.
- [58] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- LIU Tehong. Expansive soil problem in engineering construction [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [59] 李新明, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑超固结比和应力速率影响的膨胀土卸荷力学特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 121-127. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s2.023.

- LI Xinming, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Effects of overconsolidation ratio and stress rate on unloading mechanical behavior of expansive clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34 (sup 2): 121–127. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s2.023.
- [60] 李振霞, 王选仓, 陈渊召, 等. 膨胀土的强度与力学特性[J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(5): 54–60. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2008.05.011.
- LI Zhenxia, WANG Xuancang, CHEN Yuanzhao, et al. Strength and mechanic property of expansive soil [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008, 8 (5): 54–60. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2008.05.011.
- [61] LO K Y, LEE C F. Stress analysis and slope stability in strain-softening materials [J]. *Géotechnique*, 1973, 23 (1): 1–11. DOI: 10.1680/geot.1973.23.1.1.
- [62] VU H Q, FREDLUND D G. The prediction of one-, two-, and three-dimensional heave in expansive soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41 (4): 713–737. DOI: 10.1139/t04-023.
- [63] SHEAHAN T C, LADD C C, GERMAINE J T. Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122 (2): 99–108. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1996)122: 2(99).
- [64] LAN T, ZHANG R, YANG B Y, et al. Influence of swelling on shear strength of expansive soil and slope stability [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 849046. DOI: 10.3389/feart.2022.849046.
- [65] 吴珺华, 杨松. 超固结膨胀土抗剪强度特性及边坡稳定研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35 (4): 70–74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2016.04.15.
- WU Junhua, YANG Song. Study on shear strength property of over-consolidated expansive soil and slope stability [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2016, 35 (4): 70–74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2016.04.15.
- [66] 孟黔灵. 膨胀土的裂隙性对边坡稳定性的影响[J]. *公路*, 2001, 46 (10): 137–140. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2001.10.040.
- MENG Qianling. Influence of fissures of expansive soil on slope stability [J]. *Highway*, 2001, 46 (10): 137–140. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2001.10.040.
- [67] SHIN H, SANTAMARINA J C. Desiccation cracks in saturated fine-grained soils: particle-level phenomena and effective-stress analysis [J]. *Géotechnique*, 2011, 61(11): 961–972. DOI: 10.1680/geot.8.p.012.
- [68] AL-HOMOUD A S, BASMA A A, HUSEIN MALKAWI A I, et al. Cyclic swelling behavior of clays [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121 (7): 562–565. DOI: 10.1061/(asce) 0733-9410 (1995)121:7(562).
- [69] KATTI D R, SHANMUGASUNDARAM V. Influence of swelling on the microstructure of expansive clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38 (1): 175–182. DOI: 10.1139/t00-079.
- [70] 刘正楠, 张锐, 唐德力, 等. 膨胀土微结构对膨胀行为的影响[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022: 1–11 [2022-06-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220128.2336.006.html>.
- LIU Zhengnan, ZHANG Rui, TANG Deli, et al. Influence of microstructure of expansive soil on swelling behavior [J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022: 1–11 [2022-06-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220128.2336.006.html>.
- [71] DELIKTAŞ C, ÇOKÇA E. Influence of swell on undrained shear strength of expansive Ankara clay [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13 (18): 1–9. DOI: 10.1007/s12517-020-05767-z.
- [72] 韩华强, 陈生水, 郑澄锋. 非饱和膨胀土强度及变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(12): 1872–1876.
- HAN Huaqiang, CHEN Shengshui, ZHENG Chengfeng. Experimental study on strength and deformation of unsaturated expansive soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1872–1876.
- [73] 张崱铭, 龙明旭, 蔡树生, 等. 改进的膨胀土直剪试验方法研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18 (2): 33–39. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbkb. 2021.02.005.
- ZHANG Yuming, LONG Mingxu, CAI Shusheng, et al. Study on improved direct shear test method of expansive soil [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18 (2): 33–39. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbkb. 2021.02.005.

Research progress and exploration on strength characteristics of expansive soil

LING Shiguang¹, ZHANG Rui^{1,2}, LAN Tian¹

(1. School of Traffic and Transport Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The study is to further study the influencing factors of shear strength of expansive soil and explore the mechanism of the most essential swelling-induced characteristics of expansive soil on shear strength. [Methods] On the basis of summarizing the main research results on the shear strength characteristics of expansive soil at home and abroad, this article categorized the influencing factors of the shear strength of expansive soil into three special properties: swelling shrinkage, cracking, and overconsolidation. Based on the theory of unsaturated soil shear strength, a scientific hypothesis was made regarding the changes in effective shear strength indicators of expansive soil before and after swelling, and experimental verification was conducted using an improved direct shear test device and a laser particle size analyzer. [Findings] The variation of shear strength of expansive soil is closely related to its three special properties; In the saturated direct shear test, the effective cohesion and effective internal friction angle both decrease hyperbolically with the decrease of dry density; After swelling, the content of particles with a particle size below 0.1 mm increases significantly, and the greater the dry density, the greater the cumulative content change. [Conclusions] The micro mechanism of strength attenuation in expansive soil is due to the fragmentation and separation of solid particles in expansive soil under the action of lattice swelling, resulting in changes in particle gradation. This is an important factor causing differences in strength indicators.

Key words: road engineering; expansive soil; shear strength; swelling and contraction; fissure; overconsolidation

Manuscript received: 2022-07-16; **revised:** 2022-08-29; **accepted:** 2022-09-26

Foundation item: Project (51978085) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: ZHANG Rui (1980—)(ORCID:0000-0003-2451-7103), male, professor, research interest: special rock subgrade. E-mail: zr@csust.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:吴高桥)