

文章编号: 1000-7598(2010)03-0727-05

裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究

刘华强¹, 殷宗泽²

(1. 江苏省水利科学研究院, 扬州 225002; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 基于室内直剪试验, 测定了膨胀土经历干湿循环后的抗剪强度指标。试验基本反映了膨胀土在干湿循环过程中裂缝的开展现象, 揭示了正是由于裂缝的开展使膨胀土强度降低。结果表明, 无论是黏聚力还是内摩擦角随裂缝的开展, 都会产生一定程度的衰减, 相比之下, 裂缝对黏聚力的影响更加突出, 对其取值也应更为谨慎。膨胀土的抗剪强度随裂缝的开展而衰减的规律符合双曲线模式, 提出反映膨胀土抗剪强度随干湿循环次数增加, 实际上是随裂缝的开展, 而降低规律的经验公式。工程实际中膨胀土的抗剪强度反映的是包含各种裂隙的土体复合强度, 因此在设计中, 强度参数的取用应以考虑裂隙作用的土体强度为基本依据。所建议的方法可以使今后研究膨胀土裂隙的发生、发展对抗剪强度的影响变得相对简单, 具有可操作性。

关键词: 裂缝; 抗剪强度; 干湿循环; 膨胀土

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil

LIU Hua-qiang¹, YIN Zong-ze²

(1. Jiangsu Research Institute of Hydraulic Science, Yangzhou 225002, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The strength parameters are obtained with consideration of influence of wetting and drying cycles by an experiment based on laboratory direct shear test. The test basically reflects the phenomenon of crack evolution with wetting and drying cycles and reveals that crack evolution results in strength degradation. The results show that both cohesion and internal friction angle will attenuate along with crack evolution. Comparatively, cohesion index will be affected more obviously by crack and its determination should be more cautious. The law of attenuation accords with hyperbola; and the empirical expressions are proposed, which show that the relationship between attenuation of shear strength with increase of wetting and drying times is in fact with crack evolution. The expansive soil in engineering practice includes all kinds of cracks; therefore, in the design, the selection of strength parameters should consider the crack in the expansive soils. As the same time, the test method proposed makes the research of influence of crack evolution on the strength characteristics relatively simple and feasible.

Key words: crack; shear strength; wetting and drying cycles; expansive soil

1 引言

湿胀干缩变形较大是膨胀土的典型特征。在降雨和蒸发作用下, 膨胀土反复胀缩变形, 胀缩循环过程会导致膨胀土中裂隙的发生和发展, 形成错综复杂的裂隙网络。裂隙的产生破坏了膨胀土的原始结构和完整性, 必然会影响到膨胀土的抗剪强度。膨胀土中裂隙发育明显, 而明显发育的裂隙对膨胀

土抗剪强度的影响显然不能忽视。

目前, 随着膨胀土地区高等级公路的修建以及南水北调等大规模调水工程的实施, 膨胀土强度的试验研究已经得到了研究人员的高度重视, 其研究重点集中在膨胀土的季节性干湿循环作用对其抗剪强度的影响, 并取得了一些有意义的结果^[1-3]。通常是为了控制干密度不变, 将土样提前置于环刀或承样筒中, 然后进行干湿循环的模拟。由于环刀的限

收稿日期: 2009-03-15

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAB04A10)。

第一作者简介: 刘华强, 男, 1979年生, 博士, 主要从事边坡及堤坝稳定相关问题的研究。E-mail: lhq-hhu@163.com

制, 试样不能自由膨胀, 引起土体膨胀力增加, 这相当于给试样施加了一个与膨胀力大小相等的约束力, 而已有的研究资料表明^[4], 限制膨胀土自由膨胀的约束力对其抗剪强度具有明显的提高。实际上, 膨胀土在经历自然界的降雨和蒸发这一往复过程中, 其密度是不断变化的; 此外, 文献一般只针对干湿循环导致膨胀土反复胀缩变形这一单一因素分析, 并没有重视土中裂缝开展可能带来的影响。因此, 通过试验研究干湿循环过程中裂缝开展对膨胀土抗剪强度的影响。

2 试验设计

2.1 基本思路

试验装置为南京土壤仪器厂生产的电动应变控制式直剪仪, 环刀内径为 61.8 mm, 高为 20 mm, 位移计量程为 10 mm, 精度为 0.01 mm。

本次试验设计的基本思路是令试样在自然状态下进行干湿循环, 不控制其干密度, 从而使试样产生裂隙并能够自由开展, 分别测定试样在经历不同的干湿循环次数而导致不同裂隙开展程度下的抗剪强度, 研究其抗剪强度随干湿循环的变化规律, 即随裂隙开展的变化规律。

虽然直剪试验所测定的强度参数不能准确地反映膨胀土的裂隙性对强度的影响, 但正是由于试验土样厚度较小, 这样才能在一定程度上保证土样脱湿均匀。本文试验采用的是直剪试验中的快剪试验。考虑到目前工程实践中还都是以饱和土的强度指标作为设计和校验依据, 而抗剪强度试验的目的就是要给出能够应用于工程实际的强度指标, 因此, 这里讨论的仍然是膨胀土在饱和状态下的抗剪强度。

2.2 土样物理力学性质

试验用膨胀土取自镇江南徐公路, 某段的边坡体中, 土料在该地区具有代表性, 为中至弱胀缩等级的红褐色膨胀土, 其主要特性参数见表 1。

表 1 土料的基本物理力学性质
Table 1 Basic physico-mechanical properties of soil

液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%	相对密度
50	24	26	50	2.72

2.3 试样的制备

为了得到更为符合工程实际的膨胀土饱和和抗剪强度指标, 就需要试验模拟出现场的裂缝开展情况, 在此基础上, 测定的土体强度指标才更有意义。试样具体的制备过程是将膨胀土料晒干并碾碎, 用 2 mm 的筛对土料进行过筛, 按照 22% 的初始含水

率配制土样, 并将配制好的土料在密封的塑料袋中养护 24 h, 以保证土料的含水率均匀。然后控制起始干密度为 1.60 g/cm^3 , 用击实的方法制出大样饼 (要求样饼上下两面的面积大于直剪试样, 本次试验大样使用的是直径为 101 mm, 厚为 20 mm 的制样标准)。将制好的大样饼脱模放于室外 2 d 进行自然风干, 选择连续放阳的天气, 以尽量使试验条件的一致性得到保证, 试验是在 10 月的南京进行的, 日均温度在 15°C 左右, 当地气候白天干燥, 夜间湿润, 夜间风干时将试样移至室内进行; 然后将试样置于室内浸水, 浸水方式模拟自然降雨过程, 连续喷水于土样之上, 待到试样表面的积水在 10 min 内不再继续浸入试样内部时则停止喷水, 将试样密封搁置 24 h。至此, 完成一个干湿循环。无论蒸发还是降雨的模拟, 土样含水率不能保持一致, 但由于操作过程的一致性, 湿样误差不得超过 3%, 干样误差不超过 5%。

试样的制备过程再现了膨胀土在脱湿情况下裂隙产生、扩展的过程。经历不同的干湿循环次数以后, 试样表面上发展裂隙清晰可见。所有试样在完成第一次干湿循环后, 就会出现分布均匀的微小裂隙, 呈网状。个别试样还会在首次风干后就出现一条相对较大的裂缝, 这可能是由于制样过程中受力不均导致试样中软弱结构面的出现, 在首次风干时, 由于失水收缩变形不均导致了裂隙的出现。在浸水过程中, 分布均匀的表面裂隙将会随之愈合。随着干湿循环次数的增多, 在风干状态下, 裂隙的宽度也逐渐加大, 达到毫米级大小, 同时伴有次生裂隙开展, 但到后期, 裂隙宽度增加的速度放缓, 趋于稳定。如图 1 分别是膨胀土试样在无干湿循环、经历了一次干湿循环后风干时和 3 次干湿循环以后风干时的裂隙开展情况。

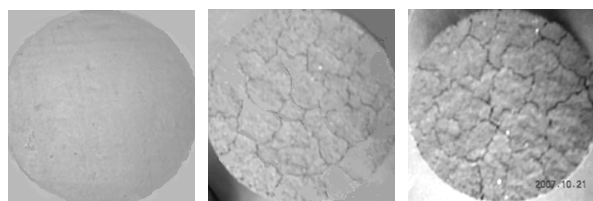


图 1 裂隙分布照片

Fig.1 Photos of distribution of fissures

以往的膨胀土干湿循环试验在试验过程中基本上都是对土样进行彻底饱和和烘干至固定含水率为一次干湿循环, 本文试验模拟的是膨胀土经历自然干湿循环作用, 无论是降雨还是风干, 土中含水率

的变化都没有饱和与烘干来的剧烈,因此,本次试验对土样每干湿循环两次进行一次剪切试验,这里的干湿循环次数体现了膨胀土经历干湿循环的外部气候作用而发生胀缩循环之后裂隙的开展过程。

在完成了相应的干湿循环次数以后,将有了裂隙的大样进行抽气饱和,并将抽气饱和后的试样在水中浸泡不少于 10 h,以保证试样饱和彻底。在此饱和大样的基础上用环刀(直径为 61.8 mm,高为 20 mm)直接切取试样进行直剪试验。

3 试验结果分析

图 2 为试验得到的抗剪强度指标随干湿循环次数的变化。

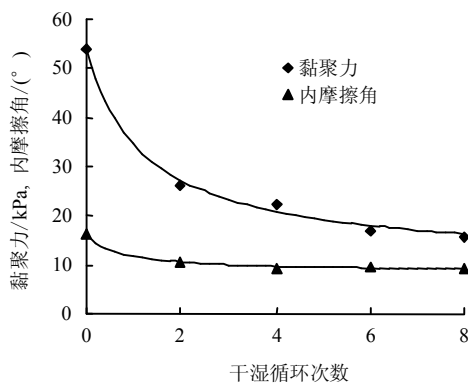


图 2 抗剪强度指标与干湿循环次数的关系

Fig.2 Effect of cycle times of drying and wetting on shear strength parameters

试验结果表明:随着干湿循环次数的增加,试样中的裂隙从无到有,从小到大,土体的完整性遭到破坏,膨胀土的强度逐步降低,这一点与膨胀土抗剪强度变化的常识认知是一致的。其中,黏聚力的变化最为明显,经 4 次干湿循环后,黏聚力的降幅已达初值的 60%。黏聚力呈现出不断减小的趋势,这是因为裂隙是不断发展的,膨胀土的整体性遭到破坏的程度不断加大,土体变得越来越松散,其强度必然越来越低。虽然泡水后裂隙可能会闭合或者是部分闭合,但其伤痕仍然存在,不影响土体强度的降低。然而裂隙的开展也遵循先快后慢这样一个基本规律,因此,黏聚力随干湿循环次数的变化呈现出开始陡后面变化趋于平缓的一种形态;膨胀土的内摩擦角亦有一定的减小,但变化较之黏聚力部分要小得多。一方面,土中裂隙的存在,使膨胀土体变得破碎,再者,胀缩变形使得土体松散,密实度减小,研究表明^[1],膨胀土的胀缩变形并不是完全可逆的,经 2、3 次循环后胀缩特性趋于稳

定,因此,内摩擦角在经历开始几个干湿循环时下降较为明显可能与膨胀导致的土体密度降低有关。裂缝使土粒间的胶结力丧失,因而,黏聚力显著降低,而影响内摩擦角大小的主要还是土粒本身的性质,裂缝开展对其进一步的影响并不明显,相比黏聚力,从第 4 次开始,内摩擦角的衰减进入平稳期,变化很小。试验表明土体内摩擦角在开始阶段减小较大,这可能是试验误差所致,但由于膨胀导致的土体密度减小,内摩擦角有所降低的规律应当是存在的。

试验揭示了随干湿循环次数的增加而出现的裂缝发生发展现象,裂缝的开展由快到慢,膨胀土强度的衰减也是由快到慢,二者基本一致,正是裂缝的开展使膨胀土强度降低。

为更直观地显示干湿循环导致的膨胀土抗剪强度降低对边坡稳定性的影响,使用试验所得强度指标对一高 20 m,坡比 1:5 的均质土坡(土的重度为 20 kN/m³)进行稳定计算,结果见图 3。

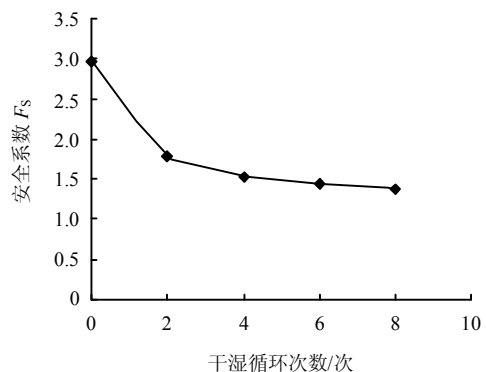


图 3 安全系数随干湿循环次数的变化规律

Fig.3 Effect of cycle times of drying and wetting on factor of safety

黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随干湿循环次数的增加呈双曲线关系(见图 2),可以使用衰减型双曲线的数学表达式进行拟合,其形式为

$$c = c_0 - \frac{n}{a_1 + b_1 n} \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{n}{a_2 + b_2 n} \quad (2)$$

式中: n 为干湿循环次数; c_0 和 φ_0 分别为黏聚力和内摩擦角的初值,即未经过干湿循环时饱和土样的抗剪强度指标值; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为拟合参数。

可见,上式作为反映膨胀土抗剪强度随干湿循

环次数的增加而降低规律的经验公式,可用于估计在长期的日晒雨淋作用下,最终可能降到的抗剪强度指标。本次试验进行拟合的结果为

$$c = 53.9 - \frac{n}{0.029 + 0.023n} \quad (3)$$

$$\varphi = 16.15 - \frac{n}{0.095 + 0.132n} \quad (4)$$

因此,该膨胀土的抗剪强度指标随干湿循环衰减的终值分别为: $c=10.4\text{ kPa}$, $\varphi=8.6^\circ$ 。相对于未经干湿循环的气候作用时的饱和土强度指标均有所下降:黏聚力降低约为80%,笔者认为,对内摩擦角亦有一定程度的下降,但变化的幅度不大。

本文采用的试验方法,虽然存在着一些不合理的因素,如由于是模拟自然干湿循环过程,试样的含水率不能很好的控制,制样过程中的人为扰动等,导致试验结果存在一定的误差,但考虑到目前膨胀土抗剪强度研究中遇到的实际困难,文中建议的方法是值得推荐的。该试验方法,使得借助常规土力学剪切试验仪器,研究膨胀土的抗剪强度随季节性干湿循环和由此导致的膨胀土中裂缝的开展,进而影响其变化规律成为可能,也使得膨胀土抗剪强度的研究更为贴近工程实际,从而可以更好地为膨胀土的边坡稳定分析提供合理有效的依据,从一定意义上远离膨胀土的边坡设计和稳定评价中强度指标的盲目选择。

4 膨胀土抗剪强度衰减机制讨论

在实际工程中,进行膨胀土边坡的设计和稳定计算时,即使采用的是饱和土的峰值强度,计算结果表明稳定的边坡,仍有许多发生了滑动,这使得研究人员不得不重新思考其原因。因此,有观点认为,膨胀土边坡的变形破坏演变是边坡土体的抗剪强度由峰值向残余值逐渐衰减的过程,因为膨胀土表现出典型的峰值强度高而残余强度低的强度特征。事实上,残余强度理论是针对一般的黏性土边坡而提出的,尤其是超固结黏性土^[5]。

刘特洪归纳了目前工程上广泛采用的膨胀土边坡稳定计算方法,大体分两类,都涉及残余强度的使用:一是从应变软化的角度,建议了抗剪强度分区的思想,即坡脚塑性区使用残余强度,塑性区以外的滑弧采用峰值强度;二是从量的角度,认为滑面的真实发挥强度同峰值相比,更接近于残余强度,因此,在气候分带法中将强风化层土体的抗剪强度取为残余强度。刘特洪认为,采用残余强度等于给予膨胀土或层间软弱面一定的强度储备,但并不意

味着保守,而是工程实践和试验研究赋予人们对膨胀土力学属性认识的深化^[6]。

残余强度是相对峰值强度而言的,表现为强度曲线在峰值后出现应力跌落。残余强度适用于分析土坡的渐进破坏^[7-9],而工程上对一般的边坡设计和稳定计算,仍使用饱和土的峰值强度。膨胀土本质上仍是一种黏性土,残余强度对膨胀土而言并无特殊性,衰减后的膨胀土强度仍是其在特定条件下的峰值强度,而并非峰值后的跌落。试验研究已经表明,膨胀土抗剪强度具有变动特点的主要原因是其具有胀缩特性的自身性质决定的,往复的胀缩变形会使土体密实度降低,而当膨胀土干缩时,会产生裂缝,裂缝的存在和开展,破坏了土体的完整性,小裂隙的存在会削弱膨胀土的强度,而沿大裂隙(裂缝),土体完全断开,基本上无强度利用可言。虽然都是使强度降低,但从机制上讲,二者概念完全不同。膨胀土的边坡稳定计算应当采用多次干湿循环后的强度指标,笔者认为,采用残余强度仅仅是因为二者在量值上的近似。一些学者或工程人员在相关试验的基础上得出:膨胀土的反复胀缩强度处于天然土体的峰值强度和残余强度之间或接近残余强度。这一结论未必总是成立,廖济川^[10]就曾提出了膨胀软化强度的概念,认为它不同于完全软化强度,可能大于也可能低于残余强度。根据镇江南徐大道黄山治理勘察及设计文件提供的资料,本文试验所用土料的饱和直剪残余强度黏聚力 $c_r=16.5\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi_r=9.0^\circ$,基本上接近本次试验最后一次干湿循环后的强度指标,但应该看到,本文试验结果显示土体强度仍有进一步降低的可能。

无论是从机制上或是试验结果来看,对膨胀土而言,残余强度并不等同于经历数次干湿循环后的抗剪强度,稳定分析中采用残余强度,也不一定就偏于保守,或偏于安全。残余强度对膨胀土边坡的稳定性而言,即非充分条件也非必要条件,研究确定膨胀土的抗剪强度应当充分利用其强度变化的机制。但在缺乏试验资料时,利用其所在地区膨胀土的残余强度来近似地反映多次干湿循环后膨胀土的强度值,从一定程度上也是可以的。

试验表明,沿裂隙面测得的黏聚力相比无裂隙面的土块黏聚力要小得多,几乎可以忽略这部分强度。然而,土体的强度即非土块的强度,也不能单单沿用裂隙面的剪切强度来表示,膨胀土中裂隙的方向并不是单一的,而有垂直裂隙、水平裂隙、还有倾斜裂隙,因此,工程中膨胀土的抗剪强度应当反映出包含各种裂隙的复合土体的强度。在设计中,

强度参数的取用应以包含裂隙面的土体强度为基本依据。

此外, 膨胀土的强度会随时间的延续而逐渐降低, 这个过程有的可以持续十几年以至几十年^[1]。正是由于季节性干湿循环作用导致膨胀土中裂隙的开展, 使得膨胀土抗剪强度随时间衰减, 从而让施工初期稳定的膨胀土边坡, 随气候变化逐渐发生溜坍和滑坡等病害。

膨胀土裂隙演化过程可以由干湿循环次数来表述, 从而使得研究膨胀土中裂隙的开展对其抗剪强度的影响变得相对简单, 并具有可操作性。总之, 服务于工程实践的膨胀土抗剪强度指标必须考虑裂隙的影响, 本文使用的方法为膨胀土抗剪强度指标的确定提供了一种切实可行的途径。

5 结 论

(1) 使用一种较为合理的试验方法, 测试了膨胀土的饱和抗剪强度指标随裂缝开展的变化规律, 试验反映了膨胀土在干湿循环过程中裂缝的发生、发展现象, 揭示了正是由于裂缝的出现导致土体强度的降低。试验表明, 无论是黏聚力还是内摩擦角随裂隙的发展, 都会产生一定程度的衰减, 相比之下, 裂隙对黏聚力的影响更加突出, 故对其取值也应更为谨慎。

(2) 提出了反映膨胀土抗剪强度随干湿循环次数增加(实质是随土中裂缝开展)而降低规律的经验公式, 该公式可用于估计在长期的日晒雨淋等气候作用下, 最终可能降到的强度指标。

(3) 从机制上讨论了膨胀土抗剪强度的确定, 认为残余强度对膨胀土的边坡稳定问题而言, 即非充分条件, 也非必要条件。

参 考 文 献

- [1] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 9—13.
LIU Song-yu, JI Peng, FANG Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(1): 9—13.
- [2] 杨和平, 肖夺. 干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005, 2(2): 1—6.
- YANG He-ping, XIAO Duo. The influence of alternate dry-wet effect on strength characteristic of expansive soils[J]. **Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science)**, 2005, 2(2): 1—6.
- [3] 韩华强, 陈生水. 膨胀土的强度和变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 422—424.
HAN Hua-qiang, CHEN Sheng-shui. A study on strength and deformation of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 422—424.
- [4] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 7(7): 1009—1013.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Study on strength behavior of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 7(7): 1009—1013.
- [5] SKEMPTON A W. Long-term stability of clay slopes[J]. **Geotechnique**, 1964, 14(1): 77—101.
- [6] 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, 1996.
- [7] 王文生, 谢永利, 梁军林. 膨胀土路堑边坡的破坏型式和稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1): 20—24.
WANG Wen-sheng, XIE Yong-li, LIANG Jun-lin. Classification of expansive clay slope on road cutting[J]. **Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)**, 2005, 25(1): 20—24.
- [8] 王志伟, 王庚荪. 裂隙性粘土边坡渐进性破坏的 FLAC 模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1637—1640.
WANG Zhi-wei, WANG Geng-sun. FLAC simulation for progressive failure of fissured clay slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(10): 1637—1640.
- [9] 唐芬, 郑颖人, 赵尚毅. 土坡渐进破坏的双安全系数讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1402—1407.
TANG Fen, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Discussion on two safety factors for progressive failure of soil slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1402—1407.
- [10] 廖济川. 膨胀土的工程特性对开挖边坡稳定性的影响[J]. 工程勘察, 1994, (4): 18—24.
- [11] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.