

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.012

干湿循环对非饱和土特性影响研究现状与展望

刘锦程, 张艳美, 张笑峰

(中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 近十几年来国内外学者对非饱和土在干湿循环作用下的特性进行了大量的试验研究, 为了梳理国内外研究思路及成果, 对目前有关非饱和土干湿循环的试验研究成果进行了归纳, 分别从土-水特征曲线、强度、变形、渗透性以及干湿循环对改良土和边坡、路基的影响等多个方面阐述了当前的研究现状。最后分析了试验方法和标准不统一等当前研究中存在的问题, 并对今后的研究进行了展望。

关键词: 干湿循环; 非饱和土; 土-水特征曲线; 抗剪强度; 渗透性

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0069-07

Research Status and Prospect of the Impacts of Drying and Wetting Cycles on the Properties of Unsaturated Soil

LIU Jincheng, ZHANG Yanmei, ZHANG Xiaofeng

(College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: In the last decades, international scholars have made a lot of progresses on the impacts of wet-dry cycling on the properties of unsaturated soil. In order to sort through the ideas and results of these researches, the results of the international experimental study on the wet-dry cycling of unsaturated soils are summarized. The current research status is expounded from the aspects of soil-water characteristic curve (SWCC), shear strength, deformation, penetrability and the influence of wet-dry cycling on the improved soil, slope and embankment. Besides, this paper analyzes the problems existing in the current study, such as the variance of the testing methods and standards. Finally, future research directions have been proposed.

Keywords: wetting-drying cycle; unsaturated soil; soil-water characteristic curve; shear strength; permeability

土体由于气候因素及人为原因的影响会经历干湿循环的变化, 干湿循环会对非饱和土的强度、变形、渗透性等性质产生不可忽略的影响, 从而使非饱和土的工程性质在干湿循环前后产生较大差异。非饱和土在干湿循环作用下, 其土水特征曲线表现出了很明显的滞后现象, 其强度会随着干湿循环次数的增加而衰减, 变形特性、渗透性能等都会随着干湿循环而发生变化, 这些变化容易引发路基、边坡等的浅层破坏, 使得工程中不得不将干湿循环对土体性质的影响考虑进去。近十几年来, 国内外学者对这些问题做了大量的研究工作, 本文对相关的试验研究成果进行了系统的总结。

1 干湿循环对土-水特征曲线的影响

土-水特征曲线 (Soil - Water Characteristic Curve, SWCC) 是土的含水率与土中吸力的关系曲线, 表征了非饱和土持水能力的大小。通过 SWCC 可以计算土的抗剪强度、渗透系数等, 因此土-水特征曲线是研究非饱和土的重要工具。

Ng C W W 等^[1]从初始干密度、初始含水率、干湿历史、土体结构以及应力状态等方面对香港火山土的 SWCC 进行了较为详细的研究, 对比了重塑试样与原状试样在 SWCC 上的区别。Yang H 等^[2]对砂类土的 SWCC 进行了研究, 分析了 SWCC 与土的

粒径以及干密度之间的关系,发现土的 SWCC 与粒径分布曲线很相似,并对试验曲线进行了拟合,认为由土的粒径分布曲线预测得到的 SWCC 是足够准确的。李志清等^[3]通过对比试验对影响 SWCC 的因素进行了探究,试验结果表明影响 SWCC 的因素主要有土的矿物成分、孔隙结构、应力状态、初始干密度、塑性指数等。其中土的矿物成分和孔隙结构是基本因素,其他因素是通过影响这两个因素从而影响 SWCC 特性的。宋亚亚等^[4]研究了在应力作用下非饱和土的 SWCC 的特征,分析了竖向压力和固结压力对 SWCC 的影响。

滞回现象是 SWCC 的一项重要特征,这一特殊现象已在大量非饱和土的干湿循环试验中被观察到。滞回现象是指土体在经历由湿到干和由干到湿的过程中,基质吸力与含水率不是一一对应的关系。总结造成滞回现象的微观原因主要有以下几个方面:毛细管原理或“墨水瓶效应”,土体的胀缩效应,接触角效应和残留空气的影响等^[5]。贺炜等^[6]从微观角度分析了造成滞回现象的原因,认为接触角的差异是主要原因。

滞回特性对于非饱和土的力学性质有着非常重要的影响,因此大量学者对非饱和土的 SWCC 和其滞回特性做了很多深入的研究。龚壁卫等^[7-8]探讨了应力和多次干湿循环对膨胀土的 SWCC 的影响,发现随着干湿循环次数的增加,滞回现象越来越不明显。张芳枝等^[9]通过对比试验研究了黏土试样的力学性质在反复干湿循环作用下的变化,试验采用经 5 次干湿循环的黏土试样与击实样进行对比,发现反复干湿循环使得黏土的持水能力下降。刘奉银等^[10]研究了干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响,试验显示随着干湿循环次数的增加,滞回圈越来越小。此结论与龚壁卫^[7]的研究结果一致。刘奉银分析其原因,认为反复干湿循环使得气泡在试样孔隙内残留,这些残留气泡阻止了水分进入孔隙,削弱了干湿循环对土体含水率的影响,从而使得滞回现象越来越不明显。文章还考察了每次循环中体积含水率的不同,发现随着干湿循环次数的增加,含水率的差别逐渐增大。刘奉银认为这是因为越来越多的大孔隙失去了吸水能力。此外文章提出了“滞回度”的概念描述土-水特征曲线的滞回特性。李军等^[11]对影响 SWCC 滞回特性的因素做了相关研究,研究了不同初始干密度,循环次数和竖向应力对 SWCC 滞回特性的影响,并使用刘奉银提出的“滞回度”的概念来描述滞回特性。

综上,干湿循环对 SWCC 的影响主要表现为滞回现象,以及滞回现象随干湿循环次数的逐渐减弱。国外较深入地研究了不同种类土的 SWCC 及其滞回现象,并从不同角度解释了造成滞回现象的原因。当前国内对各类土在干湿循环下的 SWCC 情况已有了相当数量的研究,对各类土的 SWCC 形态及其滞回特性已有了较好的把握,但对于造成不同土的 SWCC 形态不一致以及滞回现象随循环次数减弱等的微观机制方面的探索还不够深入,有待进一步研究。

2 干湿循环对强度的影响

非饱和土的强度问题一直以来都是一个复杂的课题,也是工程中最关心的问题,而干湿循环对非饱和土强度的影响非常显著,受到许多学者的关注。杨和平等^[12]采用饱和固结快剪试验对膨胀土在不同干湿循环次数下的抗剪强度进行了深入细致的研究,发现土体的抗剪强度随干湿循环次数的增加先急剧衰减而后趋于稳定,而内摩擦角受干湿循环的影响不大。一年后,杨和平等^[13]又研究了有荷载条件下干湿循环对原状膨胀土的影响。2014 年,杨和平等^[14]针对广西南宁膨胀土边坡滑塌呈浅层破坏的现象,再次研究了多次干湿循环后膨胀土的强度衰减现象。吕海波等^[15]也对广西南宁膨胀土进行了研究,得出了与杨和平相似的在前几次循环中强度衰减幅度大,随后减小,直至强度趋于稳定的结论。吕海波还利用压汞实验测定了孔隙分布,分析了抗剪强度降低的原因为干湿循环对土粒间的联结结构产生不可逆的破坏,使土体产生了更大的孔隙。

龚壁卫等^[8]在对湖北枣阳的膨胀土干湿循环过程中吸力与强度关系的研究中发现:吸湿过程对应的土样的抗剪强度普遍高于脱湿过程。龚壁卫从 Fredlund 的双变量强度公式角度给出了解释,但未进行深入探究。然而,Guan G S 等^[5]对人造混合土(35% 的渥太华砂和 65% 高岭土)在干湿循环过程中的抗剪强度特性的研究发现,在相同的基质吸力下,脱湿过程中的土样的抗剪强度高于吸湿过程。他解释其原因为:由于 SWCC 的滞后效应,在相同的基质吸力下,处于脱湿路径上的土相比处于吸湿路径上的土含水率更高,而较高的含水率使得土颗粒与水有更大的接触面积,从而基质吸力对抗剪强度的贡献也就变大。Goh S G^[16]还通过固结排水试验研究了多次干湿循环作用下非饱和土的抗剪强度。Gallage Chaminda 等^[17]通过改进的直剪试验研究了处于低吸力(0~50 kPa)状态下非饱和粉砂土的剪

切特性,研究发现内摩擦角受吸力和干湿循环的影响不显著;通过吸湿达到某一基质吸力的土和通过脱湿达到相同基质吸力的土相比,其黏聚力更高,从而导致其峰值剪应力稍高。不同研究得出的试验结论并不一致,可能是由于土类不同,在干湿循环下表现出不同的性质导致。

张芳枝等^[9]研究了反复干湿循环对非饱和黏土强度的影响,研究表明:经过反复干湿循环后,土样破坏时的强度降低,其研究未对黏聚力的变化进行分析,但发现非饱和土试样经干湿循环后,有效内摩擦角与吸力内摩擦角均有所降低,张芳枝从微观角度分析,认为土的盐溶质流失、微小裂隙的发育等导致了土体抗剪强度参数的降低。研究还发现干湿循环前,土样为应变硬化型,破坏时为鼓胀破坏,经过干湿循环后极少数试样表现为应变软化型,剪切破坏时产生了剪切面。张芳枝认为其原因是在反复的湿化和干燥过程中局部产生微小裂隙所致。

其他的研究成果还有:Melinda F等^[18]通过改进的直剪试验研究了残积土在渗透条件下的强度和变形特征;Rahardjo H等^[19]研究了残积土基质吸力未达到进气值和超过进气值后两种情况下,固结排水剪切试验与常含水率剪切试验测得的抗剪强度的区别;Thu T M等^[20]通过固结排水三轴试验和常含水率三轴试验研究了非饱和土的抗剪强度;Maleki M等^[21]研究了不饱和粉砂在常含水率条件下的力学行为,包括抗剪强度、基质吸力和孔隙水压力、体积变化等;Schnellmann R等^[22]通过一系列固结排水直剪试验研究了净正应力与基质吸力对不饱和粉砂抗剪强度的影响;周仕达^[23]探讨了干湿循环幅度和干湿循环路径对抗剪强度的影响;李新明等^[24]对干湿循环前后膨胀土的强度特性进行了研究,获得了不同干密度下重塑膨胀土及石灰改性膨胀土干湿循环前后的强度参数及变化规律;陈开圣^[25]研究了干湿循环对红黏土抗剪强度的影响,发现黏聚力衰减幅度比内摩擦角大;袁志辉等^[26]研究了干湿循环作用下黄土的强度衰减问题;徐丹等^[27]通过对脱湿路径中膨胀土试样的直剪试验分析了含水率、正压力及干湿循环次数对膨胀土剪切强度的影响。

总结以上研究成果发现,干湿循环的作用都是使土体的抗剪强度降低,土体黏聚力的降低是被广泛认同的现象。通过对比龚壁卫等^[8]与 Goh Shin Guan 等^[5]的研究结果发现,对于不同种类的土,其在干湿循环中的强度表现可能完全不同,因此,有必要对不同类型的非饱和土进行系统的研究,探寻造

成其差别的具体原因。另外,不同研究采用的试验方法也不尽相同。例如,李新明等^[24]和徐丹等^[27]均对膨胀土的强度特性进行了研究,李新明等采用干湿循环幅度为最优含水率 $\pm 5\%$ (约 $13\% \sim 23\%$),研究6次干湿循环后的强度特性,而徐丹等采用的干湿循环幅度则为 $13\% \sim 25\%$,并研究了3次干湿循环后的强度特性。对不同土类的研究方法相差更大,因此有必要建立统一的试验方法和标准,以方便不同研究结果之间的对比。

3 干湿循环对变形的影响

干湿循环对非饱和土尤其是特殊土的胀缩性、湿陷性等变形特性也有着不可忽略的影响,研究干湿循环对变形的影响对于弄清路基、边坡等的破坏机理具有重要意义。由于膨胀土在干湿循环下表现出干缩湿胀的特殊性质,因此膨胀土的变形特性尤为研究者所关注。早在1999年,刘松玉等^[28]针对干湿循环下击实膨胀土的胀缩变形进行了细致的研究,发现击实膨胀土的胀缩变形不是完全可逆的。杨和平等^[13]通过在有荷条件下重塑膨胀土的干湿循环实验,验证了膨胀土胀缩变形具有不完全可逆性。但在试样的绝对膨胀率方面与刘松玉的结论有所不同。赵艳林等^[29]研究了胀缩变形指标与干湿循环次数的关系。唐朝生等^[30]的研究表明在膨胀土的胀缩特征受干缩路径的影响显著,也发现了胀缩变形的不可逆性,并且试样的变形在几次循环后越来越小并趋于稳定。曾召田等^[31]对南宁膨胀土进行了干湿循环试验,探讨了体积变形参数与循环次数的关系。武科等^[32]从微观角度分析了干湿循环作用下膨胀土胀缩及产生裂隙的原因。Rosenbalm D等^[33]对压实膨胀土在干湿循环下的变形行为进行了研究,发现经四次循环后,膨胀土的胀缩变形和膨胀应力都达到平衡状态。Zhan T L T等^[34]还研究了膨胀土的吸湿软化现象,可以用来解释降雨引起的边坡破坏。Zemenu G等^[35]研究了原状膨胀土在干湿循环下的膨胀现象,并进行了较为详细的微观结构分析。以上是近年来对膨胀土干湿循环的部分研究成果。

张芳枝等^[9]研究了反复干湿循环对黏土的收缩特性和固结特性的影响,发现经反复干湿循环后,非饱和土的压缩系数增大,即压缩性增高。Kholghifard M等^[36]对残积红黏土的研究结果显示干湿循环造成土的塌陷性降低,膨胀势轻微增加,提高干密度可以减小土体的塌陷性。王飞等^[37]研究了干湿循环

作用下黄土的湿陷性,发现干湿循环作用可使压实黄土重新具有湿陷性。王飞等^[38]还通过室内侧限固结试验,研究了干湿循环作用下压实黄土的变形特性,试验结果表明:干湿循环的作用也受到压实度的影响,压实度越大,干湿循环作用越明显。作者分析了其原因,认为经反复干湿循环后,易溶盐成分和含量发生变化,造成粒间联结力减弱;土中亲水性黏土矿物吸水膨胀,脱水收缩,造成孔隙增多,土骨架疏松。

根据以上研究,不同的土由于性质不同,在干湿循环作用下的变形特性也不尽相同,而从微观角度研究干湿循环对土体变形的影响机理或许能找到其中的原因。

4 干湿循环对渗透性的影响

因为非饱和土的渗透特性受到非饱和土中裂隙发育的显著影响,所以对非饱和土渗透性的研究通常是通过研究其裂隙发育来进行的。Ng C W W 等^[39]对非饱和和膨胀土边坡在人工降雨条件下的渗透性能进行了现场试验,发现地表裂缝在土体吸水过程中发挥了关键作用。卢再华等^[40]采用直径 39.1 mm、高 80 mm 的试样,通过计算机断层扫描技术获得了重塑膨胀土在干湿循环作用下的内部裂隙演化的直观图像。张家俊等^[41]采用直径 61.8 mm、高 20 mm 的试样通过对膨胀土在干湿循环作用下的裂隙矢量图进行分析,对其渗透性进行了研究。杨和平等^[42]采用 40 cm × 40 cm × 10 cm 的大体积试样对碾压膨胀土在干湿循环条件下的裂隙发展规律进行了试验研究,结果表明:首次干湿循环后,土样裂隙率显著增加,开裂宽度和深度明显加大,但经随后几次循环后裂隙增长率逐渐减小并趋于稳定。以上对膨胀土的研究均表明干湿循环对裂隙的发育有促进作用,这对于边坡的稳定也是非常不利的因素。

刘宏泰等^[43]对黄土在干湿循环条件下的渗透性进行了研究,得出渗透系数随干湿循环次数的增大明显增大的结论。并分析了导致这一现象的原因。钱伟^[44]在对黄土的研究中发现经干湿作用后,原状土孔隙率减小,渗透性降低,而重塑土孔隙率增加,渗透性增大的现象。

万勇等^[45]研究了干湿循环对填埋场压实黏土盖层渗透性的影响,探讨了干湿循环次数、试样尺寸等对压实黏土渗透系数的影响。结果表明,干湿循环作用下,压实黏土渗透系数的增加主要发生在第 1 次干湿循环后,经 3 次干湿循环后渗透系数即基

本稳定。Tang C S 等^[46]通过室内试验研究了干湿循环对黏土裂纹产生和演化的影响。Bodner G 等^[47]通过现场测量分析了干湿循环与孔径分布的关系,并得到了预测模型。

根据以上对各类土的研究,无论是膨胀土、黄土还是黏土,经历干湿循环后,其渗透性都会增加,渗透性增加的主要原因是孔隙率增大和裂隙的发育。但目前对干湿循环影响渗透性的研究相对强度、变形来说还比较少,而滑坡、泥石流灾害的成因与土体的渗透性增加有着密切的关系,因此,应投入更大的精力研究干湿循环条件下土的渗透性及非饱和土的渗流问题。另外,不同研究者采用的试样尺寸有所不同,而万勇等^[45]的研究表明试样尺寸对试验结果也有显著的影响,小尺寸试样不能代表现场土的裂缝发育状况,因此应统一试样尺寸,开展大尺寸室内试验或进行更多的现场试验。

5 干湿循环的其他研究

5.1 对改良土的影响

由于天然土的性质经常不能够符合工程要求,所以在工程应用之前需对其进行改良,常见的改良方法有掺加水泥、粉煤灰和灰等传统材料以及其他无机或有机固化剂等新型材料,干湿循环对这些改良土的性质具有怎样的影响也受到研究者的重视。

王建华等^[48]分析了干湿循环作用导致水泥改良土强度衰减的机理,提出了提高干湿循环下水泥改良土强度的方法。李星等^[49]对水泥改良膨胀土在干湿循环作用下的动力特性进行了试验研究。Rao S M 等^[50]对草木灰和有机物(草、叶等)改良的土以及石灰改良土在干湿循环下的稳定性进行了对比研究。唐剑潇^[51]做了大量的室内动三轴试验,研究了干湿循环条件下石灰改良土的动强度、动变形特性。Guney Y 等^[52]对石灰改良膨胀土的研究发现,石灰改良效果在第一次干湿循环后即遭到破坏,对膨胀的抑制效果减弱。杨成斌等^[53]通过室内试验对石灰和粉煤灰改良的膨胀土在干湿循环作用下的膨胀性、界限含水率、颗粒分布以及无侧限抗压强度等方面进行了试验研究。杨俊等^[54]对掺风化石改良的膨胀土在干湿循环作用下的无荷膨胀率进行了试验研究。程佳明等^[55]用高分子材料 SH 固化剂对黄土进行了改良,对影响黄土固化强度的固化剂掺量和干湿循环次数进行了较为详细的研究,发现干湿循环对其黏聚力影响显著,固化剂掺量大于 10% 的固化黄土水稳性较好,能够抵抗多次干湿循环。

综合分析以上学者的研究成果发现,干湿循环对不同的改良土的影响程度不同,通过掺加合适的改良剂可以降低干湿循环的不利影响。

5.2 对边坡、路基的影响

有调查研究显示 2010 年的干旱加暴雨的极端干湿气候对西南山区的泥石流滑坡灾害具有促进作用^[56]。很多实际工程也显示边坡、路基等工程的稳定性与干湿循环有着密切的关系。研究表明,干湿循环常造成并加速土体裂隙的产生和发育,从而降低土体的强度,引发边坡失稳破坏。现对部分典型试验研究成果总结如下:王国利等^[57]通过离心机试验研究了干湿循环条件下膨胀土边坡的变形及稳定性,分析了裂缝的发育过程和边坡失稳的原因。曹玲等^[58]研究了干湿循环作用下三峡库区滑带土的强度特性,并由此分析了千将坪滑坡的原因。刘义虎等^[59]通过 8 组路基模型试验对干湿作用下膨胀土路基的破坏机理、破坏形式进行了研究,并对不同的干湿循环顺序进行了对比。曾召田等^[60]根据现场监测数据和当地大气影响深度进行了室内干湿循环试验,探讨了干湿循环引起的膨胀土强度指标的衰减规律。殷宗泽等^[61]深入讨论了干湿循环造成的裂隙对膨胀土边坡稳定的影响,分析了裂隙的产生、裂隙影响边坡稳定性的机理,并提出了膨胀土边坡的加固方法和稳定性分析方法。崔激等^[62]将膨胀土在干湿循环下的膨胀规律进行了试验研究,并将其规律应用到膨胀土边坡稳定分析中。曾胜等^[63]对红砂岩边坡在降雨及干湿循环下的稳定性进行了试验和理论分析。周健等^[64]进行了膨胀土边坡模型试验。赵金刚^[65]对膨胀土填方边坡进行了现场模型试验和数值模拟,研究了降雨-蒸发循环作用下膨胀土填方边坡的裂隙发育规律和边坡破坏机理。张雅慧等^[66]对黏性土在不同含水率和干湿循环次数下的抗剪强度参数进行了试验研究,并将试验结果应用于边坡稳定性计算。郭威^[67]对长沙高速路堤填料进行了干湿循环模拟试验,并分析了路堤边坡的稳定性。朱泽勇等^[68]对干湿循环作用下的模型红土边坡进行了为期一年半的监测,探讨了干湿交替导致红土边坡破坏的破坏特征和机理。对于工程问题来说,室内试验有其局限性,长期现场监测和现场试验变得十分有必要。

6 结语

干湿循环对非饱和土特性影响研究已取得了丰硕的成果,探索出了一些共有的规律。但由于干湿

循环的方法、干湿循环的幅度、制样方式、土样规格等试验标准不统一,不同研究者采用的试验方法有所差别,使得不同研究之间缺少对比性。

在试验手段方面已经有了很大的进步,目前已有各种各样的室内非饱和土仪器,为研究非饱和土的性质提供了很大帮助,但室内试验仪器也存在土样尺寸小,不能模拟现场工况等缺点。国内大多数试验仅就干湿循环造成土体强度降低、胀缩变形、裂缝开展等现象进行了研究,对其原因进行微观分析和深入探讨的不多。

另外,由于非饱和土的复杂性,试验得到的预测模型往往非常复杂,与工程应用之间还有一定差距。

针对以上当前研究中存在的问题,笔者认为今后的研究应注重以下几个方面:

(1) 建立一个较为统一的试验标准,包括干湿循环的方式、幅度、周期以及制样方法、土样规格等,以方便不同试验之间进行对比分析,总结规律。

(2) 室内试验与现场试验相结合,土样尺寸应足够大,提高室内试验的代表性,并配合开展现场监测和现场试验。

(3) 加强微观分析试验研究,分析干湿循环影响非饱和土强度、变形及渗透性的微观机制,有利于从本质上理解干湿循环的影响。

(4) 寻找不同类型的非饱和土之间的共同规律,建立简单易用的经验公式等,缩小理论研究 with 工程实际之间的差距。

参考文献:

- [1] Ng C W W, Pang Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(6): 1252-1264.
- [2] Yang H, Rahardjo H, Leong E C, et al. Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(5): 908-920.
- [3] 李志清,李涛,胡瑞林.非饱和土水分特征曲线特性 [J].中国公路学报,2007,20(3):23-28.
- [4] 宋亚亚,卢廷浩,季李通.应力作用下非饱和土土-水特征曲线研究 [J].水利与建筑工程学报,2012,10(2): 147-150.
- [5] Guan G S, Rahardjo H, Choon L E. Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(4): 594-606.
- [6] 贺炜,赵明华,陈永贵,等.土-水特征曲线滞后现象的微观机制与计算分析 [J].岩土力学,2010,31(4):

- 1078-1083.
- [7] 龚壁卫,吴宏伟,王 斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915-1918.
- [8] 龚壁卫,周小文,周武华. 干湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207-209.
- [9] 张芳枝,陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.
- [10] 刘奉银,张 昭,周 冬,等. 密度和干湿循环对黄土土一水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 132-136.
- [11] 李 军,刘奉银,王 磊,等. 关于土水特征曲线滞回特性影响因素的研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 194-199.
- [12] 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): 1-5, 12.
- [13] 杨和平,张 锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1937-1941.
- [14] 杨和平,王兴正,肖 杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949-954.
- [15] 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.
- [16] Goh S G, Rahardjo H, Leong E C. Shear strength of unsaturated soils under multiple drying-wetting cycles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(2): 1-5.
- [17] Gallage C, Uchimura T. Direct shear testing on unsaturated silty soils to investigate the effects of drying and wetting on shear strength parameters at low suction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(3): 04015081.
- [18] Melinda F, Rahardjo H, Han K K, et al. Shear strength of compacted soil under infiltration condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8): 807-817.
- [19] Rahardjo H, Heng O B, Choon L E. Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(3): 421-436.
- [20] Thu T M, Rahardjo H, Leong E C. Effects of hysteresis on shear strength envelopes from constant water content and consolidated drained triaxial tests[C]//International Conference on Unsaturated Soils 2006, 2006: 1212-1222.
- [21] Maleki M, Bayat M. Experimental evaluation of mechanical behavior of unsaturated silty sand under constant water content condition[J]. Engineering Geology, 2012, 141 - 142(5): 45-56.
- [22] Schnellmann R, Rahardjo H, Schneider H R. Unsaturated shear strength of a silty sand[J]. Engineering Geology, 2013, 162(4): 88-96.
- [23] 周仕达. 干湿循环对非饱和压实高岭土剪切特性的影响研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2011.
- [24] 李新明,孔令伟,郭爱国,等. 基于工程包边法的膨胀土抗剪强度干湿循环效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 675-682.
- [25] 陈开圣. 干湿循环作用下红黏土抗剪强度特性研究[J]. 公路, 2016, 61(2): 51-55.
- [26] 袁志辉,倪万魁,唐 春,等. 干湿循环下黄土强度衰减与结构强度[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1-10.
- [27] 徐 丹,唐朝生,冷 挺,等. 干湿循环对非饱和膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J/OL]. 地学前缘, (2017-03-02). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3370.P.20170302.1544.001.html>. 2017, 24: 1-11.
- [28] 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.
- [29] 赵艳林,曾召田,吕海波. 干湿循环对膨胀土变形指标的影响[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(4): 470-473.
- [30] 唐朝生,施 斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376-1384.
- [31] 曾召田,刘发标,吕海波,等. 干湿交替环境下膨胀土变形试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 72-76.
- [32] 武 科,赵 闯,张 文,等. 干湿循环作用下膨胀土表面胀缩变形特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 121-127.
- [33] Rosenbalm D, Zapata C E. Effect of wetting and drying cycles on the behavior of compacted expansive soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 04016191.
- [34] Zhan T L T, Chen R, Ng C W W. Wetting-induced softening behavior of an unsaturated expansive clay[J]. Landslides 2014, 11(6): 1051-1061.
- [35] Zemenu G, Martine A, Roger C. Analysis of the behaviour of a natural expansive soil under cyclic drying and wetting[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(3): 421-436.
- [36] Kholghifard M, Ahmad K, Ali N, et al. Collapse/swell potential of residual laterite soil due to wetting and drying-wetting cycles[J]. National Academy Science Letters, 2014, 37(2): 147-153.
- [37] 王 飞,李国玉,穆彦虎,等. 干湿循环作用下压实黄土湿陷特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 416-423.
- [38] 王 飞,李国玉,穆彦虎,等. 干湿循环条件下压实黄

- 土变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2306-2312.
- [39] Ng C W W, Zhan L T, Bao C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(2): 143-157.
- [40] 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.
- [41] 张家俊. 干湿循环下膨胀土裂隙-体变与渗透特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [42] 杨和平, 刘艳强, 李晗峰. 干湿循环条件下碾压膨胀土的裂隙发展规律[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(1): 1-5.
- [43] 刘宏泰, 张爱军, 段 涛, 等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 38-42.
- [44] 钱 伟. 黄土中水-气运移规律试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [45] 万 勇, 薛 强, 吴 彦, 等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2815-2824.
- [46] Tang C S, Cui Y J, Shi B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 111-118.
- [47] Bodner G, Scholl P, Kaul H P. Field quantification of wetting-drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 133: 1-9.
- [48] 王建华, 高玉琴. 干湿循环过程导致水泥改良土强度衰减机理的研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 23-27.
- [49] 李 星, 程谦恭, 张金存, 等. 干湿循环下高速铁路基水泥改良膨胀土动力特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2016(6): 99-103.
- [50] Rao S M, Reddy B V V, Muttharam M. The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils[J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(1): 223-233.
- [51] 唐剑潇. 干湿循环后路基石灰改良土的动力特性及应用[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [52] Guney Y, Sari D, Cetin M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(2): 681-688.
- [53] 杨成斌, 查甫生, 崔可锐. 改良膨胀土的干湿循环特性试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 98-102.
- [54] 杨 俊, 刘世宜, 张国栋, 等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土无荷膨胀率的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(9): 159-165.
- [55] 程佳明, 王银梅, 苗世超, 等. 固化黄土的干湿循环特性研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 48-54.
- [56] 陈宁生, 王凤娘. 2010 年极端干湿循环对我国西南山区大规模泥石流滑坡灾害的促进作用[J]. 工程地质学报, 2015, 23(S1): 63-69.
- [57] 王国利, 陈生水, 徐光明. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2005(4): 6-10.
- [58] 曹 玲, 罗先启. 三峡库区千将坪滑坡滑带土干-湿循环条件下强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 93-97.
- [59] 刘义虎, 杨果林, 黄向京. 干湿循环作用下水对膨胀土路基破坏机理的试验研究[J]. 中外公路, 2006, 26(3): 30-35.
- [60] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 34-39.
- [61] 殷宗泽, 袁俊平, 韦 杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161.
- [62] 崔 激, 张志耕, 闫澍旺. 膨胀土的干湿循环性状及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 24-27.
- [63] 曾 胜, 李振存, 韦 慧, 等. 降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩顺层边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1536-1540.
- [64] 周 健, 徐洪钟, 胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 152-156.
- [65] 赵金刚. 降雨-蒸发循环作用下膨胀土填方边坡稳定性及机理研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [66] 张雅慧, 胡 斌, 秦雨樵, 等. 含水率和干湿循环对人工填土边坡稳定性的影响[J]. 水电能源科学, 2014, 32(8): 65-67.
- [67] 郭 威. 干湿循环对长沙高速典型填料影响及路堤边坡稳定性分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [68] 朱泽勇, 贺桂成, 李丰雄, 等. 干湿交替条件下红土边坡破坏机理试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34: 1-6.