

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.013

熊峰, 杨宏伟, 吴益平, 等. 干湿循环作用下滑带土孔隙结构与基质吸力响应规律研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 95-102. (XIONG Feng, YANG Hongwei, WU Yiping, et al. Response laws of pore structure and matrix suction of slip zone soils under action of wetting-drying cycles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 95-102. (in Chinese))

干湿循环作用下滑带土孔隙结构与基质吸力 响应规律研究

熊 峰¹, 杨宏伟², 吴益平¹, 李 杰¹

(1. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中南冶金地质研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 非饱和土基质吸力与其微观孔隙结构息息相关。为探究在干湿循环作用下滑带土孔隙结构与基质吸力的响应规律,以重塑黄土坡滑带土为研究对象,采用压汞法分析干湿循环过程中孔隙大小分布规律,得到不同干湿循环次数下滑带土孔隙分布曲线。在此基础上,结合分形原理,将滑带土孔隙划分成三类(大孔隙、中孔隙和小孔隙);结合毛细管模型,间接推算出滑带土的土-水特征曲线(SWCC)。研究表明:反复干湿循环作用使小孔隙逐渐转化成大孔隙,颗粒孔隙转化成团粒孔隙;不同干湿循环次数对应的土-水特征曲线均存在一个共同的拐点,拐点上侧,含水率相同时,随着干湿循环次数增加,基质吸力逐渐增大,下侧反之。研究成果有利于深入了解滑带土的干湿循环效应,可用于库岸滑坡演化机理研究。

关 键 词: 干湿循环; 滑带土; 压汞试验; 孔隙特征; 土-水特征曲线

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)03-0095-08

库岸滑坡地下水位在水库水位的周期性涨落作用下会出现周期性波动,位于库水位变动带(消落带)的一部分滑带土将长期受浸泡饱和-疏干的反复作用,滑带土的物质组成、微观结构和力学性质等性质也会不断发生变化。滑带土性质是滑坡变形破坏的重要控制因素,滑带土微观结构是滑带土性质的重要组成部分,对揭示滑带土强度特征、认识滑坡的形成机理、判识滑体的再滑与否等都具有重要的指示意义^[1]。

反复的干湿循环会降低滑带土抗剪强度,加速滑坡的变形破坏过程^[2-4]。土壤孔隙结构实际上是指土壤中各种孔隙的百分比和分布特征,而不是空间分布特征。土壤孔隙大小的分布是土壤结构研究的重要内容。土壤的许多物理力学性质直接取决于土壤孔隙的大小和分布特征。孔隙的大小及分布特征是土壤微观结构的重要组成部分,更能直接影响土-水特征曲线(SWCC),影响非饱和土的抗剪强度。

目前,获取土壤孔隙参数方法多样、技术成熟,如压汞法(MIP)、扫描电镜法(SEM)和CT法等,都取得了很好的成果。相比其他方法,压汞法在数据获取上简单客观,受到了许多学者的青睐。通过采用压汞试验获取土体微观结构参数的方法,曾召田等^[5]研究了干湿循环作用下膨胀土的孔径分布特征与基质吸力的变化规律;张英等^[6]发现,在冻融循环作用下,土体的孔隙分布发生改变,其孔径、孔密度均增大;唐瑞华等^[7]的研究表明,孔隙分布特征与其形成过程密切相关。压汞法所获得的孔隙分布曲线是土体内部孔隙的等效圆半径与相对应孔隙体积(含量)之间关系的定量表示,反映的是超过某一孔径值的孔隙总体积与该孔径之间的关系,对土壤孔隙的描述有直观性、定量性的优点。

分形理论是评价土壤结构的有效工具,研究岩土体孔隙的分维特性具有重要的实践意义,土壤微结构能

收稿日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572278)

作者简介: 熊 峰(1993—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事水库滑坡致灾机理与稳定性评价研究。

E-mail: xiongfengcug@126.com 通信作者: 吴益平(E-mail: wyp892@126.com)

够用分维值量化^[8-9]。运用分形理论还能得到更符合研究对象孔隙特征的分类标准,王清等^[10]通过研究将黄土分为微孔隙($<0.02\mu\text{m}$)、小孔($0.02\sim0.8\mu\text{m}$)和大孔隙($>0.8\mu\text{m}$);苑晓青等^[11]提出了适用于吹填土的微、小、中、大和超大孔隙的孔径区间分布标准。

SWCC 是反映基质吸力随土壤含水率变化的曲线,能反映土体保水的基本特性。它是计算和预测非饱和土参数(如非饱和剪切强度参数、渗透系数)的基础。现有的试验测量方法普遍繁琐,测量周期长,存在一定的局限性。孔令伟等^[12]依据毛细管模型原理,提出通过孔隙累计分布曲线间接获得 SWCC 的方法。曾召田等^[5]将这一方法应用于膨胀土的干湿循环研究中,取得了比较理想的结果。张芳芝等^[13]研究发现,干湿循环改变了 SWCC,同时也会使同等含水率所对应的基质吸力减小。基质吸力的改变源于微观孔隙结构的变化,而土体微观结构也受基质吸力的影响,因此,同时讨论微观孔隙结构和基质吸力的变化规律对揭示干湿循环作用下滑带土的响应机制具有十分重要的实践意义。

本次研究采用压汞试验的方法,结合分形理论对孔隙进行重新分类,分析干湿循环过程黄土坡滑带土孔隙结构响应规律。利用孔径分布曲线间接推算 SWCC,研究干湿循环作用对滑带土基质吸力的影响。探究库水位涨落引起的干湿循环作用对库岸滑坡滑带土的孔隙结构与基质吸力影响。

1 试验方案

试验滑带土取自黄土坡滑坡临江 I 号崩滑体 TP3 平硐滑带位置,进行筛分试验,并剔除粒径 2 mm 以上颗粒。通过室内土工试验,得到滑带土相关物理指标见表 1。

表 1 滑带土基本物理性质

Tab. 1 Basic physical property parameters of Huangtupo slip zone soils

天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/%	天然含水率/%	饱和度/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
2.03	1.79	20.95	15.97	75.5	25.95	13.86	12.09	0.17

通过 XRD 测试鉴定滑带土矿物成分(见图 1),结果显示,滑带土中有超过总质量 32%的是具有膨胀性的黏土矿物,在反复的干湿循环过程中,膨胀土的胀缩特性将是滑带土性质变化的关键。

1.1 干湿循环试验

控制试样的初始含水率为 15.97%(天然含水率),采用击实的方法制备试样。按照要求的密度 2.03 g/m^3 (天然密度)称取所需质量的土,将土料分 6 层装入饱和容器中,并分层击实。使各层土料质量相等,将每层土料击实到一定程度后,再将土样表面刨毛。然后接着添加第 2 层土,击实,刨毛,如此反复进行直到最后一层,要求制备的各组试样密度误差均低于 0.02 g/m^3 。本次试验设置的干湿循环(含水率)幅度为 10.00%~20.95%,具体步骤如下:

(1)将制备好的试样(含水率 15.97%,密度 2.03 g/m^3)留下 1 组用保鲜膜包好,作为 0 次循环试样。剩下全部先进行干燥处理,干燥过程采用自然风干,要求每隔 3 h 测量 1 次试样质量,通过测量质量来监测含水率变化,当第 1 次干湿循环的土样达到含水率 10.00%时,立即停止干燥脱水,用保鲜膜将所有试样包好,然后放在养护缸中养护至少 24 h,保证试样内外温度和含水率保持一致。

(2)增湿过程采用抽气浸泡饱和。将完成脱水的试样放入真空饱和缸中抽气浸泡 24 h,使之达到饱和(含水率 20.95%)。

(3)将步骤(2)中的饱和试样进行干燥处理,当含水率减小到 15.97%时,取出 1 组用保鲜膜包好,养护 24 h,作为 1 次循环试样。对余下的 3 组试样按上述步骤分别进行第 2,3,4 次干湿循环。将完成干湿循环的试样留作备用。

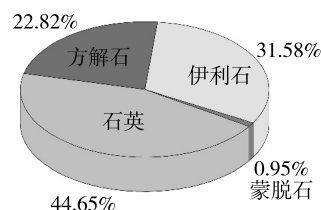


图 1 滑带土矿物组成

Fig. 1 Mineral composition of slip zone soils

1.2 压汞试验

进行压汞试验之前必须对干湿循环后的试样作如下处理:①切块,压汞试验所需的样品须放入专用的试管中进行测试,所以试样的尺寸不能太大,一般采用钢丝将试样锯切成 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 大小的土块。②冷冻干燥,为了保证土样在干燥过程中孔隙不发生变化,需要采用液氮将土块中的水分快速冷凝成非结晶态冰,接着在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 状态下使土体中的冰完全升华,这样可以获得干燥完全而又保存完好的试样。

本研究采用 AutoPore IV9500 压汞仪,仪器最大进汞压 33 kPa ,孔径测试范围 $5\times 10^{-3}\sim 360\times 10^3\text{ }\mu\text{m}$ 。其原理是通过压力作用驱使汞进入土体孔隙中,当压力大于毛细管压力时,才会有汞进入该毛细管。压力不断增大,更小半径的孔隙将逐渐被汞充填。在直径 d 毛细管中压入汞,达到平衡时,毛细管压力恰好等于此时的进汞压力,即:

$$p = \frac{4\sigma_1 \cos\alpha}{d} \quad (1)$$

式中: p 为进汞压力; σ_1 为汞的表面张力系数; α 为汞与所测材料的接触角,一般取 0 ; d 为圆柱形孔隙半径。

采用上述试验方法,得到不同循环次数滑带土的孔隙累计分布曲线见图2。

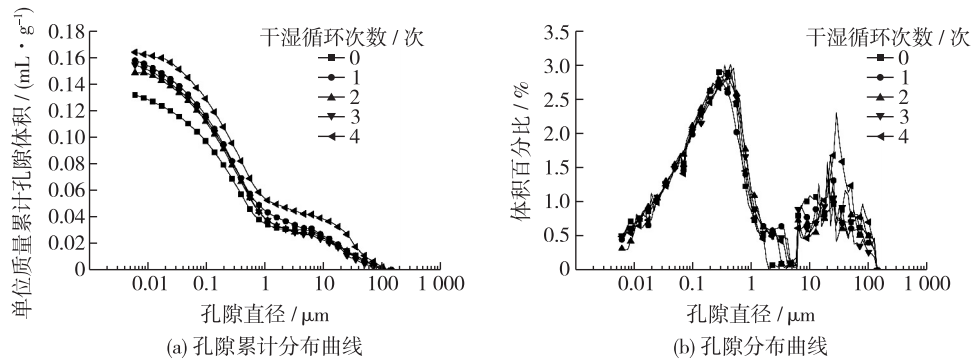


图2 不同干湿循环次数下孔隙分布曲线

Fig. 2 Pore distribution curves in different cycles

从图2(a)可以看出,随着干湿循环次数增加,累计分布曲线整体“上移”,表明干湿循环过程中孔隙体积有所增加,且孔隙整体结构变化不明显,这是滑带土中的膨胀性矿物成分引起的,膨胀性成分的吸水膨胀和脱水收缩,会使滑带土在干湿循环作用下出现裂纹扩展,孔隙增多的现象。图2(b)分布曲线显示,土体孔隙呈双峰分布,表明孔隙直径主要集中在 $0.2\sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $20\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ 两个区间,最可几孔隙直径约为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

2 孔隙特征分析

目前,对土体内部孔隙尺寸分类标准的研究多数建立在非饱和土孔隙的研究基础上。Shear^[14]等对原状和重塑的冲击性黏土进行大量的试验研究,认为可以根据孔径大小将黏土内的孔隙分为颗粒内的孔隙($\leq 0.007\text{ }\mu\text{m}$)、颗粒间的孔隙($0.007\sim 0.9\text{ }\mu\text{m}$)、团粒内隙($0.9\sim 35\text{ }\mu\text{m}$)、团粒间的孔隙($35\sim 2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$)和宏观孔隙($\geq 300\text{ }\mu\text{m}$)5种。

土体孔隙结构具有分形特征,孔隙的大小和分布等特征反映了土体结构特点,研究干湿循环作用下滑带土的分形特征变化,能够更深层次地分析在该过程中微观孔隙结构变化规律,基于压汞试验数据,Menger海绵模型可以用来计算孔隙分维值^[15-16]。

$$\frac{dV_p}{dP} \propto P^{D_f-4} \quad (2)$$

式中: P 为进汞压力; V_p 为压力 P 时进汞的总体积; D_f 为孔隙分维数。将压汞试验数据绘制在 $\lg(\frac{dV_p}{dP}) - \lg P$ 坐标系内, 分维值 D_f 为 $(4+k)$ (k 表示拟合直线斜率, 且 $k \in [-4, -1]$)。压汞试验中, $P \propto 1/r$, 为了方便比较取 $P = 1/r$, 将数据绘制在 $\lg(\frac{dV_p}{dP}) - \lg P$ 中, 结果见图 3。

由图 3 可知, 2 个拐点所对应的孔隙直径分别是 1.59 和 $0.56 \mu\text{m}$ 。其中, 首段和末段均具有明显的线性关系, 表明直径大于 $1.59 \mu\text{m}$ 的孔隙和小于 $0.56 \mu\text{m}$ 的孔隙具有明显的自相似性, 对应孔隙分维值大小范围分别为 $2.41 \sim 2.59$ 和 $2.63 \sim 2.97$, 中间段斜率不满足要求, 认为没有明显的自相似性。为探明干湿循环过程中试样孔隙结构变化规律, 结合分形曲线和前人的分界标准, 考虑到压汞仪的测量范围 ($5 \times 10^{-3} \sim 360 \times 10^3 \mu\text{m}$), 提出了适用于本研究的黄土坡滑带土的孔隙区间分界标准: 直径大于 $1.59 \mu\text{m}$ 为大孔隙, 小于 $0.56 \mu\text{m}$ 为小孔隙, 中间过渡段 ($0.56 \sim 1.59 \mu\text{m}$) 为中孔隙。参照 Shear^[14] 的分类标准可知, 本文的小孔隙对应于颗粒内、颗粒间孔隙, 大孔隙对应于团粒内、团粒间孔隙、宏观孔隙, 不妨称小孔隙为颗粒孔隙、大孔隙为团粒孔隙, 而中孔隙则属于颗粒孔隙到团粒孔隙的过渡段。

由表 2 可知, 随着干湿循环次数增加, 滑带土孔隙中小孔隙体积含量降低, 大孔隙体积含量增加。这是由于反复干湿循环作用下, 土体发生周期性的收缩与膨胀, 湿润膨胀的幅度大于干燥收缩的幅度时, 土体颗粒就会发生不可逆的裂纹扩展, 开裂现象从小尺度不断延伸到大尺度, 颗粒孔隙扩大, 并转化成团粒孔隙, 小孔隙转化成大孔隙。

3 干湿循环作用下滑带土基质吸力演化分析

3.1 SWCC 的间接计算方法

基质吸力在一定程度上主要表现为孔隙的毛细管力, SWCC 实际上反映了毛细管力对土壤水的作用^[16]。它对于描述土的水理性质至关重要, 研究干湿循环作用下滑带土的 SWCC 变化情况有利于分析在库水作用下, 库岸滑坡滑带土微观结构及其力学响应规律, 对库岸滑坡的预测、防治、演化机理分析等具有重要意义。

相关研究表明, 土体颗粒与水分之间的吸引力^[17]有氢键力、范德华力和毛细管力, 它们的作用范围分别是 $2.0 \times 10^{-10} \sim 3.0 \times 10^{-10} \text{ m}$, $3.0 \times 10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m}$, $10^{-9} \sim 10^{-5} \text{ m}$ 。可见, 只有毛细管力的作用范围与土壤的孔径范围相一致, 因此, 在非饱和土的研究中, 假定基质吸力主要由毛细力引起是可行的。压汞法获取 SWCC 具有周期短, 数据客观、精确的优点, 据此确定的 SWCC 可以弥补以往试验中操作过程繁琐、试验周期长、高基质吸力无法测量等缺点, 应用前景较大^[5]。基于孔隙直径累计分布曲线间接确定的 SWCC 的求解计算方程如式(3)所示, 该方法计算所得的是土体脱湿时的 SWCC^[12]。

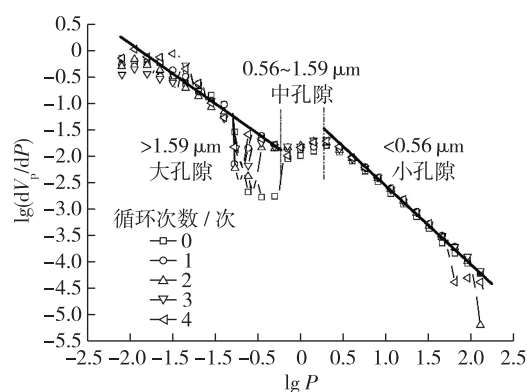


图 3 不同干湿循环次数下滑带土孔隙分维

Fig. 3 Pore fractal dimension of slip zone soils in different cycles

表 2 各区间孔隙体积百分比

Tab. 2 Percentage of pore volume in each interval

孔隙类型	干湿循环次数/次				
	0	1	2	3	4
小孔隙	67.3	65.4	65.9	63.8	60.3
中孔隙	8.7	9.2	11.4	11.3	9.3
大孔隙	24.0	25.4	22.7	24.9	30.4

$$\begin{cases} (\mu_a - \mu_w)_i = \frac{4\sigma_2}{d_i} \\ V(d_i) = \frac{w_i}{100\rho_w} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $(\mu_a - \mu_w)_i$ 为基质吸力大小; d_i 为孔径; σ_2 为水的表面张力系数, 取 $72.75 \times 10^{-3} \text{ N/m}$; $V(d_i)$ 为孔径小于 d_i 的孔隙总体积; w_i 为含水率; ρ_w 为水的密度。

3.2 干湿循环过程中的 SWCC

依据上述计算方法, 间接推算出不同干湿循环次数下, 黄土坡滑带土的 SWCC 如图 4 所示。

分析图 4 可见, 黄土坡滑带土在不同干湿循环次数下的 SWCC 具有如下特征: 在干湿循环幅度 (10% ~ 21%) 范围内, 基质吸力变化在 $0 \sim 10^3 \text{ kPa}$ 范围内; 不同于孔隙特征曲线, 在 SWCC 中部存在一个特征点, 它是所有曲线近似公共的交点, 也是各曲线近似的拐点, 对应的含水率约等于塑限含水率 (13.86%)。当含水率大于特征点含水率时, 随着循环次数增大, 同等含水率下基质吸力逐渐增大; 当小于特征点含水率时, 同等含水率下基质吸力减小。此外, 循环次数越多, SWCC 波动幅度越大。

特征点前后, 基质吸力随干湿循环次数变化的规律相反, 其原因是: 通过压汞试验间接得到的是脱湿时的土-水特征曲线, 在脱湿过程中, 具有较大势能的大孔隙水先排出^[18], 随后小孔隙开始排水, 因此, 土体中含水率降低的过程中, 基质吸力逐渐增大。含水率较高时, 基质吸力增大主要取决于失去一部分水的大孔隙, 即当大于特征点含水率 (塑限) 时, 随干湿循环次数增加, 同等含水率下基质吸力增大; 含水率较低时, 小孔隙中的水分逐渐排出, 小孔隙开始在基质吸力变化中占据主导地位, 即当小于特征点含水率 (塑限) 时, 随干湿循环次数增加, 同等含水率下基质吸力减小, 这也是存在特征点的原因。

为了进一步研究基质吸力随干湿循环次数的变化规律, 选取此次干湿循环幅度范围内的 3 个特定含水率: 含水率 (18.00%)、天然含水率 (15.97%)、塑限含水率 (13.86%) 所对应的基质吸力, 整理结果见表 3 和图 5。

随着干湿循环次数增加, 3 个特定含水率对应的基质吸力大小均呈“S”型增长。1 次循环后, 基质吸力增幅较小, 到第 2, 3 次循环之后, 出现陡增现象, 最后到第 4 次循环后, 基质吸力大小已趋于稳定。水分含量越低, 基质吸力对干湿循环的敏感性越高, 变化越明显。

3.3 土水特征曲线拟合验证

国内外许多学者对 SWCC 数学模型进行了研究, 取得了丰硕的研究成果。目前已提出的土水特征曲线模型主要有: Brooks & Corey 模型、Van Genuchten 方程以及 Fredlund & Xing 方程等^[19]。为了验证上述方法确定 SWCC 的准确性, 采用已被广泛认同的 Van Genuchten 方程对试验所得土水特征曲线进行拟合, 其表达式

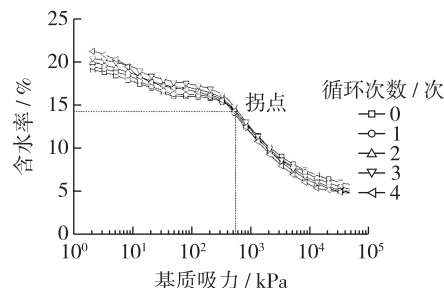


图 4 滑带土干湿循环作用下 SWCC

Fig. 4 Calculated SWCC of slip zone soils in different cycles

表 3 特定含水率下基质吸力与循环次数的关系

Tab. 3 Relationship between matric suction and cycle numbers at given water contents

含水率/%	不同干湿循环次数下的吸力/kPa				
	0	1	2	3	4
18.00	7.3	11.63	16.5	37.1	41.5
15.97	89.7	108.6	183.0	244.6	251.7
13.86	444.0	463.0	520.0	602.8	583.9

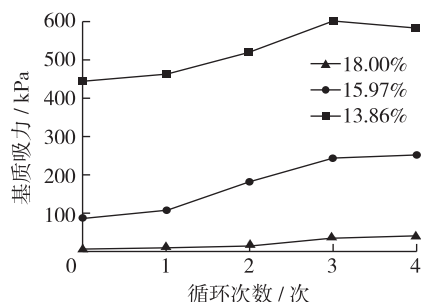


图 5 特定含水率下基质吸力与循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between matric suction and cycle numbers at three given water contents

如下:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\Psi)^b]^c} \quad (4)$$

式中: θ_w 为体积含水率; Ψ 为基质吸力; θ_s, θ_r 分别表示饱和、残余体积含水率(见表 4); a, b, c 均为拟合参数^[20]。

由于含水率是以质量含水率的形式给出的, 所以质量水含量可以代替上述方程中的体积水含量。试样各次干湿循环的 SWCC 的拟合结果如图 6 所示。从表 4 中拟合方差 R^2 值可以看出, Van Genuchten 方程对各次循环的 SWCC 均有很好的拟合效果。表明采用压汞试验数据推算出滑带土的 SWCC 是有效可行的。

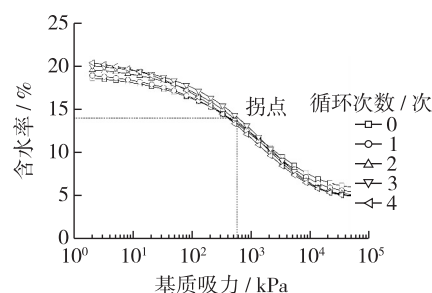


图 6 干湿循环中土水特征曲线的 Van Genuchten 方程

Fig. 6 Fitting curves of SWCC

表 4 SWCC (Van Genuchten 方程) 参数拟合值

Tab. 4 Fitting results of SWCC by Van Genuchten equation

循环次数/次	饱和含水率/%	残余含水率/%	a	b	c	R^2
0	19.03	5.62	3.7×10^{-11}	0.468	2 148.181	0.988
1	19.40	5.34	1.0×10^{-10}	0.477	1 648.450	0.990
2	19.90	4.87	1.7×10^{-10}	0.520	2 376.940	0.993
3	20.35	5.08	4.9×10^{-10}	0.535	1 712.575	0.994
4	21.20	4.26	9.2×10^{-12}	0.434	2 520.875	0.986

4 结 语

从微观孔隙结构入手,以压汞试验为基础,研究干湿循环作用下滑带土的微观孔隙结构与宏观基质吸力的响应机制,并分析两者之间的联系。主要研究成果有:

(1) 滑带土孔隙结构呈“双峰”分布,干湿循环作用下,孔隙总体积增大,但整体结构变化不明显;结合分形理论,以 0.56 和 1.59 μm 为 2 个分界点,将孔隙分成大孔隙、中孔隙和小孔隙。研究发现,干湿循环过程中,小孔隙总体积减少,大孔隙体积增大,并将这种现象归结为基质吸力的反复加载、卸载作用。

(2) 通过压汞试验间接获取滑带土的水-土特征曲线有效可行。土-水特征曲线拐点对应的滑带土含水率值接近塑限含水率,在拐点左右两侧,干湿循环作用对基质吸力的影响相反。当含水率大于拐点含水率时,随着循环次数增大,同等含水率下基质吸力增大,而当含水率小于拐点含水率时,则结果恰好相反,这是因为在排水脱湿过程中,基质吸力在高含水率时主要受大孔隙控制,而在低含水率却受小孔隙控制。

(3) 反复干湿循环作用下,滑带土基质吸力和孔隙结构特征是相互影响的,孔隙结构特征的改变引起相同含水率下基质吸力的变化,反过来,基质吸力也对土体颗粒产生作用,引起土体颗粒发生平移、转动,进而引起微观结构改变。

参 考 文 献:

- [1] 李晓,梁收运,郑国东. 滑带土的研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(5): 484-491. (LI Xiao, LIANG Shouyun, ZHENG Guodong. Progresses in sliding zone soil of landslides[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(5): 484-491. (in Chinese))
- [2] 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(增刊1): 93-97. (CAO Ling, LUO Xianqi. Experimental study of dry-wet circulation of Qianjiangping landslide's unsaturated soil[J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2007, 28(Suppl1): 93-97. (in Chinese))
- [3] JIAO Y Y, SONG L, TANG H M, et al. Material weakening of slip zone soils induced by water level fluctuation in the ancient landslides of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 2014(2): 1-9.
- [4] 董金玉, 赵志强, 杨继红, 等. 干湿循环作用下滑带土的变形演化及强度参数弱化试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(增刊2): 1-7. (DONG Jinyu, ZHAO Zhiqiang, YANG Jihong, et al. Research on the deformation evolution and the strength weakening of slip soil under wetting-drying cycle[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(Suppl2): 1-7. (in Chinese))
- [5] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 322-328. (ZENG Zhaotian, LYU Haibo, ZHAO Yanlin, et al. Study of pore size distribution of expansive soil during wetting-drying cycle and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 322-328. (in Chinese))
- [6] 张英, 邴慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3597-3603. (ZHANG Ying, BING Hui, YANG Chengsong. Influences of freeze-thaw cycles on mechanical properties of silty clay based on SEM and MIP test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Suppl1): 3597-3603. (in Chinese))
- [7] 唐华瑞, 韩灵杰, 王杏杏, 等. 基于压汞实验的粘土微孔隙分布特征研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(1): 228-233. (TANG Huarui, HAN Lingjie, WANG Xingxing, et al. Study on distribution of clay void based on mercury penetration test[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2016, 41(1): 228-233. (in Chinese))
- [8] 江东, 王建华, 郑世书. 多孔介质孔隙结构的分形维数: 测试、解算与意义[J]. 科技通报, 1999, 15(6): 453-456. (JIANG Dong, WANG Jianhua, ZHENG Shishu. Fractal dimension of porous structure in porous media: test, solution and significance [J]. Bulletin of Science and Technology, 1999, 15(6): 453-456. (in Chinese))
- [9] XU Xiangming, HE Yurong. Fractal characteristics of stagnic anthrosols and the relationship with soil micro-structure[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2009, 8(5): 605-612.
- [10] 王清, 王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 496-498. (WANG Qing, WANG Jianping. A study on fractal of porosity in the soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 496-498. (in Chinese))
- [11] 苑晓青, 王清, 孙铁, 等. 分级真空预压法加固吹填土过程中孔隙分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 169-176. (YUAN Xiaqing, WANG Qing, SUN Tie, et al. Pore distribution characteristics of dredger fill during hierarchical vacuum preloading [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1): 169-176. (in Chinese))
- [12] KONG L W, TAN L R, RAHARDJO H, et al. A simple method of determining the soil-water characteristic curve indirectly[C] //Asian Conference on Unsaturated Soils, 2000.
- [13] 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. (ZHANG Fangzhi, CHEN Xiaoping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 41-46. (in Chinese))
- [14] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay[R]. Transportation research record, NRC, National academy press. Washington D. C., 1993: 1365-1370.
- [15] FRIESEN W I, MIKULA R J. Fractal dimensions of coal particles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 120(1): 263-271.
- [16] 李子文, 林柏泉, 郝志勇, 等. 煤体多孔介质孔隙度的分形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 437-442. (LI Ziwen, LIN Baiquan, HAO Zhiyong, et al. Fractal characteristics of porosity for porous media in coal mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 437-442. (in Chinese))
- [17] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luorong, KONG Lingwei. Soil science in special geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [18] 谭龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 土体持水特性及孔隙水分分布特性的试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 73-79. (TAN Long, WEI Changfu, TIAN Huihui, et al. Experimental study on characteristics of pore water distribution and water-holding capacity of soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 73-79. (in Chinese))
- [19] 劳 P F. 土壤物理化学[M]. 北京: 农业出版社, 1985. (LOW P F. Physical chemistry of soil[M]. Beijing: Agricultural Press, 1985. (in Chinese))
- [20] 王菁莪. 黄土坡滑带土的结构特征与水—力相互作用性质研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012. (WANG Jinge.

Study on structure and hydro-mechanical properties of sliding zone soil in Huangtupo landslide[D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2012. (in Chinese))

Response laws of pore structure and matrix suction of slip zone soils under action of wetting-drying cycles

XIONG Feng¹, YANG Hongwei², WU Yiping¹, LI Jie¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Central South Institute of Metallurgical Geology, Yichang 443003, China)

Abstract: The matrix suction in the unsaturated soil is closely related to its micro pore structure. In order to analyze the response laws of the pore structure and matrix suction of the slip zone soil under the actions of the wetting-drying cycles, the remolded slip soil of Huangtupo landslide was taken as the research case history. Further, a mercury intrusion porosimetry (MIP) tests are carried out to study the changes in pore size distribution during the wetting-drying cycles and the pore size distribution curves for different cycles have been got. On this basis, the pore of slip soil is classified into three type (large pores, medium pores, and small pores) using the fractal theory, and the soil-water characteristic curves of the slip zone soil is indirectly calculated (SWCC) using the capillary model. The research results show that under repeated wetting-drying cycles, some small pores gradually transformed into large pores, and some particle pores changed into aggregate pores. The curves had a common inflection point, and above the inflection point the matrix suction under the same water content gradually increases with the increase in cycle numbers, however, the opposite behavior was noted below the inflection point. Hence, the results obtained from this research can be helpful in comprehensively understanding the wetting-drying effects of the slip soil, which is of great significant and can be applied to research on the evolution mechanism of reservoir bank landslides.

Key words: wetting-drying cycles; slip zone soil; mercury intrusion porosimetry (MIP) test; pore structure; soil-water characteristic curve