

路基非饱和土抗剪强度的吸力效应

刘东燕¹, 郑志明^{1,2}, 侯龙^{1,3}, 赵宝云¹, 伍川生¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
2. 重庆市公路局, 重庆 401147; 3. 美国科罗拉多矿业大学, 戈尔登 80401)

摘要:从宏观的吸力控制型直剪试验和微观的土体颗粒结构 2 方面入手, 对路基非饱和土抗剪强度的吸力效应进行了研究。在不同吸力和不同法向应力条件下完成 4 组剪切试验, 并选取 2 种不同含水量的同类型土样进行结构扫描。研究结果表明, 与粘性土不同的是, 当粉质砂土含水量逐渐降低时, 土体基质吸力对土体抗剪强度的贡献效果并不是一直增加的, 而是存在一个峰值。这种现象主要是由于土体微观结构以及所含水分的存在形式所造成的。另外, 土体所处的应力环境也会对土体强度的吸力贡献情况造成影响。

关键词:路基非饱和土; 宏观方法; 吸力效应; 气-液交界面; 弯月形水膜

中图分类号:U416.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)04-0001-05

Matric Suction Effect on Shear Strength of Roadbed Unsaturated Soil

LIU Dongyan¹, ZHENG Zhiming^{1,2}, HOU Long^{1,3}, ZHAO Baoyun¹, WU Chuansheng¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;
2. Chongqing Highway Bureau, Chongqing 401147, P. R. China; 3. Colorado School of Mines, Golden 80401, USA)

Abstract: A study which focuses on the role of matric suction in the stress strength of roadbed unsaturated soil was presented. Two types of tests were described, namely, the suction-controlled shear test and microstructure scanned test. For the former, four sub-tests were conducted under different suction and net normal stress conditions. And two unsaturated soil samples that belong to the same type but with different water contents were scanned. In contrast with clay soil, the corresponding results show that the strength of silty sand soil does not always increase as matric suction increases or soil water content decreases; there exists a peak contributed by matric suction that acts on soil stress strength. The main reason for this kind of phenomenon is due to the typical microstructure of this type of soil and the various types of pore water retention. Additionally, the state of stress in which soil sample meets can also exerts important influence on soil strength.

Key words: roadbed unsaturated soil; macro-micro approach; matric suction effect; gas-liquid interface; meniscus water lens

道路工程是一种长线、跨区域式的土木工程建设活动, 路基质量的好坏是道路运行期间适用性与安全性的根本性保证。而路基的建设, 往往受制于交通条件、料场分布以及工程地质等条件的影响。

在经济效益总调控的前提下, 如何在最大程度上的发挥路基工程自身的持久性能, 是道路建设工作中重点关注的问题。

从一般意义上讲, 道路路基属于边坡工程的范

收稿日期: 2011-10-20

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2009318000001)

作者简介: 刘东燕(1959-), 男, 教授, 主要从事岩土工程、地质灾害研究, (E-mail) liudy@cqu.edu.cn。

畴,但与自然边坡所不同的是,它是人工活动的产物,有其特殊的工程地质性质:路基边坡土体性质较为均一,密实度高,坡面形状也相对简单,无明显的潜在滑移面存在。但处于特殊地段的路基边坡,往往会受到很多不利因素的持久性、周期性影响,如库区水位的周期性升降会对库区道路的路基土体产生渗流和冲刷作用,带走土体内的细小土颗粒,土体结构逐渐产生变化,朝砂性土转变;此外,土体含水量也会随外界水位变化情况而产生变化。相应的,对土体强度有着重要影响的基质吸力也会发生变化,这些因素均会影响路基边坡的安全性能^[1-4]。因此,着眼于基质吸力对土体强度的贡献形式,对于包括路基工程在内的初期土工设计与施工而言,是十分有必要的。

1 相关基本理论

路基土体产生破坏,往往发生在浅层土体内,这些土体通常是位于地下水位以上的,也即是非饱和土。即使受到外界水位变动作用(如位于库区内的道路),因为土体内浸润面和外界水位不能同步变化,土体在大多数时间内也是处于非饱和状态的。Fredlund 等^[5-6]针对非饱和土的抗剪强度提出了式(1)所示相互独立的双应力变量公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

式中 $\tan \phi^b$ 是一与土体含水量有关的材料变量,体现了基质吸力 $(u_a - u_w)$ 对土体抗剪强度产生贡献的实际情况。该公式对非饱和土抗剪强度的主要构成进行了本质性的表述,其所蕴涵的观点得到了业内的广泛认同。但最大的不足之处在于,对于某些处于特殊情况中的土体而言,公式中所认同的“土体强度与基质吸力成正比例关系”往往难以得到现实情况的验证。

很多学者的研究结果^[7-9]表明,土体的基质吸力会对土体的抗剪强度做出积极的贡献,即土体强度会随着基质吸力的增加而增加,这种现象常被称之为吸力效应,已经得到了广泛的认同。但常识告诉我们,这种情况并不是绝对存在于各类土体中的。如纯净的砂土,当其处于完全饱和与完全干燥的 2 种极端状态时,都呈现出抗剪强度完全丧失的现象,这说明该类土体的基质吸力并不是一味的对土体抗剪强度产生有利影响的。这种现象也得到了一些学者的试验验证,如文献[10]、[11]中所述。但同时从宏观常规试验和土体微观结构两方面来阐述这种现象的研究,却鲜见于相关文献中。笔者从这 2 个方面入手,就此问题进行定量的研究,以期所得结果能

够丰富已有的研究成果。

2 试验及结果分析

位于特殊地段,特别是位于库区内的道路路基,由于受到库区水位上升-下降的周期性变动的影响,路基土体内的细粒成分(主要是粘土颗粒)会不断被冲刷带走,颗粒尺寸较大的砂粒含量将逐渐增加。久而久之,某些地段的路基土体会呈现出砂性土体的物理力学特征。针对此种情况,取某库区消落带高速路砂性路基土体进行研究,根据土颗粒筛分试验结果,将此土体定义为粉质砂土。若将先期试验所得的吸力值与相应的含水量作为基础输入数据,通过 RETC 软件拟合出该土样的土-水特征曲线,则可进而得到土样的基本水力学参数,如图 1 所示。已知的土样基本性质参数归纳于表 1 之中。

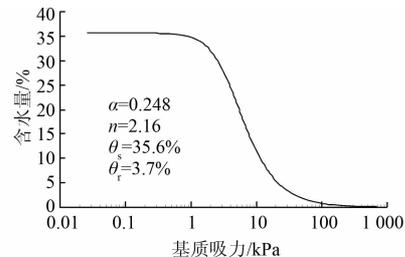


图 1 土样土-水特征曲线

表 1 土样基本性质参数

土体类型	不同土粒质量百分比/%			水力学参数			
	砂土	粉土	粘土	α/kPa	n	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$
粉质砂土	61.3	24.7	14.0	0.248	2.1	35.6	3.7

2.1 试验设备及试验方案

在自然条件作用下,土体含水量是不断变化的,在一个时间段内的基质吸力值也不会停留在某一稳定值上,同一土体在处于不同水力路径条件时,即使含水量相同,由于非饱和土体的持水滞后特性,其相应的基质吸力值也有所不同;相关试验研究所得的结果也表明,砂性土体在常规含水量变化范围内,所能达到的基质吸力会较粘性土体的小很多。由此,为了探究最一般的规律,笔者在较为理想的条件(不考虑滞后效应,选取代表性基质吸力值进行土体抗剪强度研究)下进行吸力控制型试验,试验所用土体的吸力值控制在数值较小且具有代表性的几个点上,即:0(饱和土体)、5、10、15 kPa。

试验所用设备为美国 Trautwein 土工设备制造公司生产的 DigiShearTM 型多功能直剪测试系统(如图 2 所示),该系统具有测试精度高、操作简便,试验

过程实时控制等优点。为进行不同基质吸力条件下的试验,将该试验设备置放土样的部件进行简单改装,用一密闭的玻璃罩扣住安放土样的试验容器,玻璃罩上下两端面连接导管,上面的导管可用于施加高压气体,下面的导管上安有阀门,并将该管与一置于电子天平上的储水容器相接,对土体施加压力气体时,可通过电子天平上的读数来判断土体含水量是否趋于稳定。若设水压为 0 kPa 的参考值,则所施加的气压大小就等于土样处于稳定状态时的基质吸力值。为方便理解,将试验设备局部结构以草图的形式绘于图 3 中。



图2 试验装置图

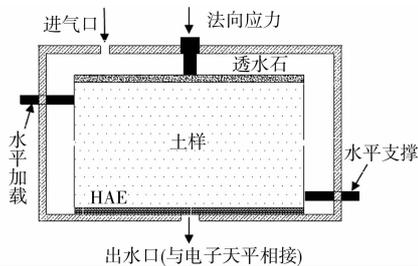


图3 试验装置草图

试验主要步骤为:1)在真空储水容器里将土样饱和,土样下面要垫上一高进气值陶瓷板(HAE),该阶段大约需要 2 h;2)对土样施加预定的垂直荷载,土样达到稳定压缩状态后,对密闭玻璃罩中的土样施加预定压力值的氮气,直至土样排水结束(一定时间段内,电子天平读数不再变化,就认为排水结束),此时土样处于非饱和状态,其基质吸力在数值上就等于气压值,该阶段大约需要 5~8 h;3)关闭排水管阀门,对土样施加水平剪切力,该阶段大约需要 4 h;4)采用新的饱和土样,在不同垂直压力和基质吸力的条件下,重复上述步骤。为最大程度上避免外界作用力作用对试验结果造成的不利影响,土样剪切试验时所采用的剪切速率为 0.03 mm/min,最大剪切位移为 6.5 mm。这样可保证土样的含水量

和基质吸力在整个试验过程中,都保持恒定。根据基质吸力不同,可将试验分为 4 大类,每大类试验又根据对土样所施加的法向应力的不同,分为 3 小类。具体试验安排见表 2。

表2 试验方案

法向 应力/kPa	基质吸力/kPa			
	0.0 (饱和)	5.0 (非饱和)	10.0 (非饱和)	15.0 (非饱和)
120	试验 I-1	试验 II-1	试验 III-1	试验 IV-1
250	试验 I-2	试验 II-2	试验 III-2	试验 IV-2
380	试验 I-3	试验 II-3	试验 III-3	试验 IV-3

2.2 结果分析

所得试验结果以不同的关系形式,分别绘制于图 4 与图 5 中,其中图 4 描述了不同基质吸力时土样的抗剪强度与法向应力的关系情况。由该图可知,基质吸力的存在,在总体上确实会使得粉质砂土土样的抗剪强度得以增加,与饱和土相比,图 4 中采用非饱和土所得的抗剪强度包线会产生较为明显的上移,但上移的幅度不一,这是由于基质吸力产生的强度贡献不同所造成的,其中相应于试验 II (基质吸力为 5 kPa) 的强度包线位于图中最上方。若把 4 条强度包线均朝法向应力为 0 的方向延长,直至与纵轴相交,则可得到不同吸力条件下,未被压缩土样的粘结强度值,此时非饱和土样的粘结强度也均大于土样饱和时的粘结强度,基质吸力为 5 kPa 时所对应的粘结强度最大,约为 57 kPa。

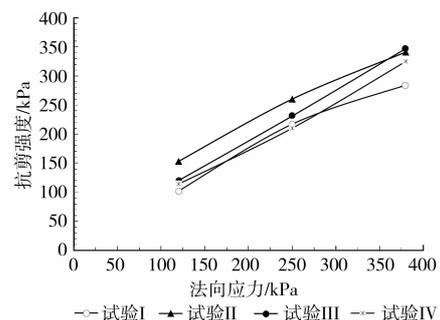


图4 吸力不同时的土样抗剪强度特性

图 5 描述了不同法向应力条件下,土样抗剪强度与基质吸力之间的关系形式。由该图可知,图中 3 条关系曲线均呈现出了土样抗剪强度会在吸力不断增加时,出现峰值的现象。对于曲线 1 和曲线 2 而言(法向应力分别为 120、250 kPa 的条件),此强度峰值出现在吸力为 5 kPa 的时候,而曲线 3 (法向应力为 380 kPa) 的强度峰值则会出现在吸力为

10 kPa的时候。此后抗剪强度会随着吸力增加而逐渐减小,这说明对于本试验所用土样而言,基质吸力的增加并不会一味的对土体强度产生线性的正比例贡献,这与文献[11]中试验所得结果是相吻合的。另外,曲线峰值点出现时所对应的吸力不同,也说明了土样所处的应力环境(对单轴直剪试验而言,指的是对土样所施加的法向应力),会对吸力的强度贡献形式造成一定的影响。

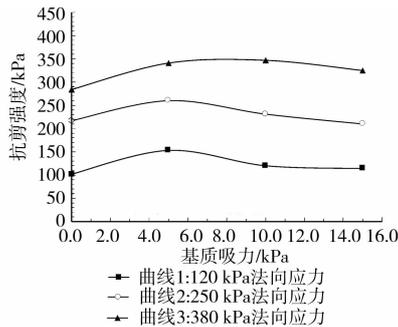


图5 法向应力不同时的土样抗剪强度特性

3 微观结构分析

从微观方面来看,基质吸力的产生,主要源于非饱和土体中固-液-气三相物质之间的相互作用。其中自由水体气-液交界面上的表面张力与土颗粒微小间距之间弯月形水膜上的范德华力,是基质吸力的最主要来源,并且土体含水量的变化以及土体内水体的赋存状态直接决定了基质吸力对土体强度的贡献效果。如2个由同一类土体制作出的土样,即使在静法向应力、吸力和比容上都是相等的,但若含水量不一致,则会表现出不同的力学特性^[12-13],这主要是因为基质吸力对土体强度的不同贡献效果所引起的。另外,同一土体在经受不同水力路径(干燥或浸湿)作用时,即使最终的含水量值不变,由于基质吸力产生的强度贡献会有所不同,土体在同一含水量但不同水力路径时的强度也会产生很大的变化,也就是常见的土体强度滞后现象^[14-15]。

具体而言,基质吸力会通过自由水体在土颗粒接触点处产生法向应力(有利影响)和切向应力(不利影响);而通过弯月形水膜在土颗粒接触点处却只产生法向应力(有利影响),于是基质吸力对土体强度所造成的总体影响,是与含水量以及土内水体赋存状态息息相关的。对于细粒土体而言(如粘性土),其土颗粒微小,单位体积土体的颗粒表面积极其巨大,颗粒间范德华力也较大,含水量的降低会使得土体内气-液交界面和弯月形水膜均同时增加,于是基质吸力会大幅度增加,其对土体强度会做出

很大的贡献,于是在相同含水量条件下,粘土的基质吸力会远大于其它类型的土体。而对于粗粒土体而言,其土体结构决定了该类土体在非饱和状态时的赋水能力较小,也即基质吸力变化不大时,含水量也会相应发生很大的变化(如图1所示),土体内气-液交界面和弯月形水膜不会同时增加,进而影响到吸力对土体强度的贡献效果。

从微观方面对此种现象进行描述,把试验所用粉质砂土制作成质量含水量分别为30%(饱和度约为0.84)和20%(饱和度约为0.56)的薄层土样,然后用可拍照式电子显微镜进行扫描并拍照,所得图像如图6(a)、(b)所示,为便于阐述最基本的规律、现象,将两图所体现的具体信息以较为理想化草图的形式绘于图7(a)、(b)中。由图6(a)可知,相比于最初的饱和状态,非饱和状态时的土体内部会产生很多自由水体气-液交界面和弯月形水膜,基质吸力就是通过这些状态的水体来增强土体强度的。但将图6(a)与图6(b)进行对比(同样参见图7),发现含水量再次减小时(基质吸力更大),土体内的自由水体气-液交界面会有所增加,但弯月形水膜却大幅度减少,总体来看,较大基质吸力赖以增强土体强度的介质是变少了,于是对土体宏观力学强度所做的贡献,甚至还没有基质吸力较小时所做的多。产生这种现象的主要原因在于,与其它类别土体相比,砂性土体颗粒较大,颗粒之间的孔隙也较大,土体一旦进入非饱和状态,其所含水分较为顺畅的排出。

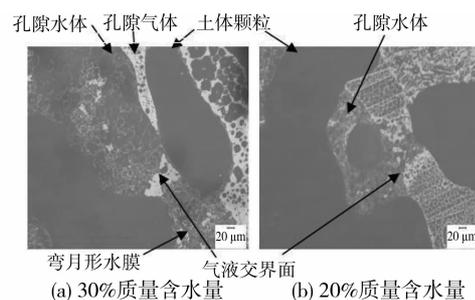


图6 土样微观结构扫描图

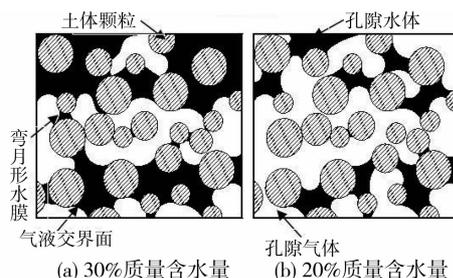


图7 土样微观结构草图

因此,在含水量逐渐降低的整个过程当中,原本被水所填充的孔隙逐渐被空气所进入,于是自由水体气-液交界面也逐渐增多,其所产生的表面张力演变为基质吸力的最主要来源,基质吸力进而又通过自由水体对砂土颗粒产生法向应力(有利影响)和切向应力(不利影响);另一方面,砂性土体颗粒分子间范德华力较为微弱,使得在水体逐渐排出过程中,非连续水体难以以弯月形水膜的形式大量存在于土颗粒间隙之中,这就使得基质吸力对土体强度的有利影响大大削弱。于是就出现总的基质吸力增加了,但土体强度较之以前变小了的现象。

4 结 语

处于自然环境中的岩土体是一种易受外界条件影响,且物理力学性质会随着时间的流逝而发生改变的地质体。笔者选取特殊地段的路基边坡土体,从室内常规试验和土体微观结构2方面来进行土体强度的吸力效应分析,得到以下结论:

1)土体类型不同时,相同的吸力值会对该土体的抗剪强度产生不同的贡献。对于砂性土体而言,在一定含水量范围内,其含水量的逐步降低会使得基质吸力持续增加,但基质吸力对该类土体的强度贡献,却并不一定是持续增加的,这种贡献效果,是存在一个“峰值”的。

2)土体微观结构决定了土体的赋水性能,而非饱和土内的水分又是吸力产生的主要源泉,这就决定了吸力对土体强度的贡献效果是与土体的微观结构以及所含水分的存在形式息息相关的。砂性土的微观结构使得其所含水分能够很容易的排出土体,土颗粒间的弯月形水膜也会较初期非饱和阶段大为减少,这就造成了基质吸力对土体强度的贡献效果会随着含水量的进一步减少而逐渐趋于弱化。另外,土体所处的应力环境也会影响着吸力对土体强度的贡献效果。

参考文献:

- [1] 邱欣,杨青,钱劲松. 水网密集区粘土路基当量回弹模量的预估分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(2): 38-44.
- QIU Xin, YANG Qing, QIAN Jinsong. Prediction analysis on equivalent resilient modulus of clay subgrade of water network intensive areas [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2): 38-44.
- [2] 吴礼舟,黄润秋. 非饱和土渗流-变形耦合的数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 63-67.

WU Lizhou, HUANG Runqiu. Numerical analysis of seepage and deformation in unsaturated soils [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3): 63-67.

- [3] 赵明华,刘小平,陈安. 非饱和土路基毛细作用分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 26-30.
- ZHAO Minghua, LIU Xiaoping, CHEN An. Analysis of capillary effect in unsaturated roadbed [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 26-30.
- [4] 赵明华,刘小平,何伟,等. 非饱和土路基降雨渗流分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(3): 49-53.
- ZHAO Minghua, LIU Xiaoping, HE Wei, et al. Analysis of unsaturated roadbed seepage due to rainfall [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(3): 49-53.
- [5] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils [J]. Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(5): 447-466.
- [6] Fredlund D G, Xing A Q, Fredlund M D. The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 40-448.
- [7] 王瑞钢,闫澍旺,邓卫东. 降雨作用下高填土质路堤边坡的渗流稳定分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 25-30.
- WANG Ruigang, YAN Shuwang, DENG Weidong. Analysis of seepage stability of high-filled embankment slope due to rainfall infiltration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 25-30.
- [8] 肖元清,胡波,王钊. 基质吸力对非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版, 2005, 27(4): 326-328.
- XIAO Yuanqing, HU Bo, WANG Zhao. Experimental study on effect of matric suction on shear strength of unsaturated soil [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2005, 27(4): 326-328.
- [9] 申春妮,方祥位,王和文,等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351.
- SHEN Chunni, FANG Xiangwei, WANG Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1347-1351.
- [10] 林鸿州,李广信,于玉贞,等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1932-1936.

- progressive development of granular pile with spherical and non-spherical particle [J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41: 707-714.
- [12] Pradip R, Alexander S. Simulation study on micro and macro mechanical behaviour of sand piles [J]. *Powder Technology*, 2010, 204:113-123.
- [13] 李凡. 岩土材料破损特性的颗粒流研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(9):78-81.
LI Fan. A study on the breakage properties of geological materials using particle flow simulation [J]. *China Journal of Civil Engineering*, 2007, 40(9):78-81.
- [14] Manual of Particle Flow Code in 2 Dimensions; Theory and background [M]. Itasca Consulting Group, Inc, 2008.
- [15] 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [16] 常在,杨军,程晓辉. 砂土强度和剪胀性的颗粒力学分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(4): 95-104.
CHANG Zai, YANG Jun, CHENG Xiaohui. Granular mechanical analysis of the strength and dilatancy of sand [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(4): 95-104.
- [17] 许江,杨秀. 周期性载荷作用下岩石滞回曲线的演化规律[J]. *西南交通大学学报*, 2005, 40(6): 754-758.
XU Jiang, YANG Xiu. Evolution law of hysteresis curve of rock under cyclic loading [J]. *Journal of Southwest Transport University*, 2005, 40(6): 754-758.
- [18] 席道瑛,陈运平. 岩石的非线性弹性滞后特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1086-1093.
Xi Daoying, Chen Yunping. Nonlinear elastic hysteresis characteristics of rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1086-1093.

(编辑 胡玲)

(上接第5页)

- LIN Hongzhou, LI Guangxin, YU Yuzhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1932-1936.
- [11] 孟黔灵,姚海林,邱伦锋. 吸力对非饱和土抗剪强度的贡献 [J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 423-426.
MENG Qianling, YAO Hailin, QIU Lunfeng. The contribution of matric suction to shear strength of unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 423-426.
- [12] Wheeler S J, Sharma R S, Buisson M S R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils [J]. *Geotechnique*, 2003, 53(1):41-54.
- [13] 李兆平,张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(5):57-61.
LI Zhaoping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(5):57-61.
- [14] Mualem Y, Miller E E. A hysteresis model based on an explicit domain-dependence function [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43:1067-1073.
- [15] Parlange J Y. Capillary hysteresis and the relationship between drying and wetting curves [J]. *Water Resources Research*, 1976, 12:224-228.

(编辑 王秀玲)