

不同水力路径下非饱和粉质土的破坏与变形特性

马田田, 韦昌富, 魏厚振, 田慧会

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 湖北 武汉 430071)

摘 要: 通过压力板仪、temple 仪和直剪仪对非饱和粉土经过脱湿之后和不同含水量状态分别进行抗剪强度试验研究。试验结果表明: 如果采用净应力来描述, 非饱和土的有效粘聚力随着含水量的增大而减小, 或随着基质吸力的增大而增大, 但有效内摩擦角基本保持不变。当饱和度相同时, 经过脱湿之后的土体有效粘聚力较大, 反映出滞回效应。如果采用有效应力来描述, 抗剪强度曲线则归一化为一条临界状态线, 而与含水量大小和水力路径无关, 从而证明了采用有效应力的合理性与有效性。在修正剑桥模型基础上, 将饱和度和基质吸力作为内变量, 提出屈服强度的硬化函数, 建立渗流与变形耦合模型, 从而可以考虑前期降雨历史对非饱和土边坡稳定性的影响。

关键词: 毛细滞回; 抗剪强度; 有效应力; 土水特征曲线; 渗流与变形耦合

中图分类号: P642 - 1 , TU43

文献标志码: A

降雨诱发滑坡及其触发的泥石流问题是地质灾害的常见形式。近年来, 此类自然地质现象引发的非饱和土灾害问题频发, 造成大量损失。为解决此关键问题, 需要从机理上分析非饱和土边坡破坏问题的孕育演化机理, 确定由复杂降雨过程导致的土体含水量及其抗剪强度的变化, 提出可靠的非饱和土边坡稳定性分析方法。

非饱和土抗剪强度是分析降雨诱发滑坡问题的一个关键参数。目前存在两种主要的非饱和土强度理论, 即基于双应力变量^[1]和基于有效应力^[2]变量。基于双应力变量的抗剪强度理论将非饱和土强度表示为双线性形式。在许多情况下, 双线性形式的强度公式与试验数据不一致。Gan^[3]等的研究表明 ϕ^b 是随吸力变化的非线性函数。由于 ϕ^b 难于通过试验测量, 限制了此类模型的应用。

为此, Vanapalli & Fredlund (1996)^[4] 引入土水特征关系提出了一个新的非饱和土强度模型。该模型与基于有效应力的非饱和土抗剪强度模型是等价的, 而此时的 Bishop 有效应力系数 χ 等于有效饱和

度。尽管具体表现形式不一样, 但目前最常用的非饱和土强度公式都以有效应力原理为基础^[5-6]。此类模型以有效粘聚力 c' 和有效内摩擦角 ϕ' 为强度参数, 并结合土水特征关系来确定非饱和土强度值。国内外通过大量试验, 得出 χ 与饱和度的相关性较大, 因此将有效应力参数 χ 改为饱和度, 使得 Bishop 有效应力可以推广使用。当饱和度为 1 时, 此时 Bishop 有效应力退化为经典的饱和土太沙基有效应力, 因此可以实现非饱和土到饱和土的平滑过渡。Lu & Likos (2006)^[7] 从微观力学角度解释了这类模型的合理性, 并提出吸力应力(Suction stress) 概念。

非饱和土的抗剪强度与饱和度和基质吸力有关。由于基质吸力较难测量, 国内外的许多学者采用饱和度来描述非饱和土的抗剪强度。Yoshimura^[8] 通过无侧限压缩试验研究含水量和基质吸力对粉质粘土强度的影响。徐永福^[9] 考虑了基质吸力和溶质吸力对强度的贡献, 在分维理论的基础上提出了强度公式。提出非饱和土的抗剪强度主要有三部分构成: 粘聚力, 土体正应力产生的摩擦强度, 基

收稿日期(Received date): 2012 - 01 - 08; 改回日期(Accepted): 2012 - 08 - 25。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(10872211); 中国科学院“百人计划”择优项目; 中国科学院方向性项目(kzcxz - yw - 150) 共同资助。[Jointly supported by the Project of National Natural Science Foundation of China (10872211), the ‘100 Talents Project’ of Chinese Academy of Science, and Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (kzcxz - yw - 150).]

作者简介(Biography): 马田田(1986 -), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事非饱和土方面的研究工作。[Ma Tian Tian(1986 -), female, Jinan of Shandong, Doctoral Student, major in research work of unsaturated soil.]

质吸力产生的强度。沈珠江^[10]提出双曲线函数来表征吸力有关的抗剪强度公式。缪林昌^[6]在 Bishop 公式和 Fredlund 公式基础上提出了膨胀土用含水率表示的指数函数抗剪强度公式。

由于存在毛细滞回效应,基质吸力与含水量并不是一一对应的。因此,即使含水量相同的土样,水力路径不同导致不同的力学性质。这两个参数对抗剪强度均有影响。而目前国内外大部分的工作主要是在仅考虑基质吸力或饱和度一个变量来描述非饱和土的抗剪强度理论。基于简单土水特征关系的非饱和土边坡渗流模型与稳定性分析方法难以考虑非饱和土复杂的渗流特性,也不可能有效地描述前期降雨历史对边坡稳定性的影响。

大量研究表明,前期降雨对非饱和土边坡稳定性具有重要影响,因此在分析降雨诱发滑坡问题时必须要加以考虑^[11]。由于前期降雨历史对边坡稳定性的影响可以通过确定当前降雨事件之前各个土层中的水力学和力学状态参数(包括含水量、吸力、干-湿历史、抗剪强度等)来准确地反应,因此在前期气象(降雨)资料给定的情况下,解决问题的关键就是准确地模拟导致非饱和土含水量、基质吸力、强度等参数变化的复杂渗流过程。

在分析非饱和土问题时,通常将水力学和力学性质分开考虑。但是试验现象表明,非饱和土中渗流与变形存在复杂的耦合作用^[12]。渗流过程影响土体的强度与变形,例如反复的干湿循环会使非饱和土的强度降低^[13]。同时,土体的变形又会改变非饱和土的土水特性,从而影响孔隙水的渗流过程^[14]。因此,有效地模拟任意含水量变化路径下非饱和土的渗流、变形及强度变化之间的耦合作用是亟需解决的关键问题。要解决该关键问题首先需要建立两个本构方程,即应力-应变关系和土水特征关系及其之间的相互影响。

本文基于以上存在的问题,设计了不同水力路径下非饱和粉质土的抗剪强度试验,得出其破坏特征。同时提出可以考虑毛细滞回的变形特性。

1 非饱和土抗剪强度的试验结果

1.1 土样的物性指标

试验采用黄河三角洲的粉土,物性指标如表 1

所示。采用环刀压实方法制备试样,土试样的横截面积为 30 cm²,高度为 2 cm,干密度为 1.60 g/cm³。

表 1 黄河三角洲粉土的物性指标
Table 1 Physical properties of Huanghe Delta silt

比重	液限	塑性	塑性指数	各粒组含量/(mm,%)		
G_s	$\omega_L/\%$	$\omega_p/\%$	I_p	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
2.71	33.50	29.41	9.59	7.82	86.18	6.0

1.2 脱湿路径下试样的抗剪强度

土试样初始含水量为 16.5%,压入环刀之后采用抽真空方法使其完全饱和。通过压力板仪进行脱湿,同时测定脱湿条件下非饱和土的土水特征曲线(图 1)。压力板加压的等级为 10 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa、120 kPa、200 kPa、290 kPa。土样饱和之后放入压力板中脱湿,每一级压力平衡之后放入直剪仪中进行不排水剪切试验,剪切速率为 0.688 mm/s。这种试验可以测定每级基质吸力所对应的抗剪强度,并能得出对应的试样饱和度。

图 2 为脱湿条件下正净压力与剪切强度关系的实测结果,图中 S_e 表示基质吸力,单位为 kPa。很明显地,试样抗剪强度呈现出随着基质吸力的增大而增大的趋势。

1.3 不同含水量下的试样抗剪强度

土样天然含水量为 2%,加水使土样吸湿,拌匀配制成所需含水量的土样,静置几天后土样中的水分迁移达到平衡。之后压入环刀土样中,在直剪仪中进行不排水剪切,剪切速率为 0.688 mm/s。配制的含水量分别为:23.53%、20.97%、19.25%、18.66%、16.44%、13.42%、11.36%、9.49%、7.49%、5.35%。

图 3 给出了正净压力与剪切强度的试验结果。可见,抗剪强度随含水量的增大而减小。

1.4 土试样的土水特征关系

吸湿段土水特征曲线通过卢宁提出的一步流动方法来得到。试验采用 temple 仪,首先将制备好的试样抽真空饱和、装样,陶土板、系统管路及气泡量测装置饱和,然后进行一步脱湿、吸湿流动试验¹⁾。操作步骤为:首先对饱和土样施加一个较小的基质吸力 1 kPa,少量水溢出,土样开始从饱和状态进入

1) 伊盼盼,韦昌富,陈盼,等. 测定非饱和土水力学参数的一步流动方法,2011.

到非饱和状态,然后增加吸力到 290 kPa,进行一步脱湿试验。土样达到平衡时,对陶土板底部进行冲刷,记录溢出气泡体积。最后将吸力降为 0,进行一步吸湿试验。根据溢出气泡体积修正溢出水量,得到吸湿段含水量随时间的变化曲线。

根据上述关系曲线、初边值条件以及陶土板材料参数,运用一维 HYDRUS-1D 一维水分运移模型进行反算,拟合出试样吸湿段溢出水量随时间的关系曲线。采用 VGM 模型,拟合参数如下所示

$$\text{VG 模型: } \Theta = S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha S_c)^n} \right]^m$$

式中 $m = 1 - \frac{1}{n}$, $\alpha = 0.01$, $\mu = 0.565$, $n = 2.3$, $S_r^{irr} = 0.089$, S_e 为有效饱和度, S_c 为基质吸力, S_r^{irr} 为残余饱和度, α , μ , n 为参数。

由此可得出吸湿段的土水特征曲线如图 2 所

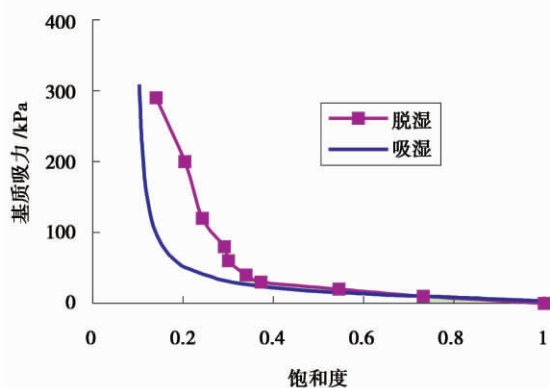


图 1 脱湿和吸湿土水特征曲线

Fig. 1 Soil-water characteristic curves through drying and wetting

示,从而可以知道对应于上述含水量的基质吸力。从图上可以看出存在显著的毛细滞回效应。

通过脱湿之后和不同含水量状态的抗剪强度曲线得出粘聚力与内摩擦角随含水量的变化关系如图 4 所示。从图 4 可以看出,如果采用净应力来表示,粘聚力随含水量的减小而增大,但内摩擦角却几乎没有变化,这与前人的研究成果是一致的。此处净应力为 $\sigma_{net} = \sigma_n - u_a$, 式中 σ_n 为总应力, u_a 为孔隙气压力。当含水量相同时,脱湿段的粘聚力明显较高。由于存在滞回现象,含水量相同时,脱湿段对应的基质吸力比吸湿段高,因此抗剪强度也高。当饱和度较高时,从土水特征曲线图上可以看出,滞回效应并不明显,因此有效粘聚力的滞回效应较小。随着饱和度的进一步减小,滞回效应显著,有效粘聚力的滞回效应则越来越明显。

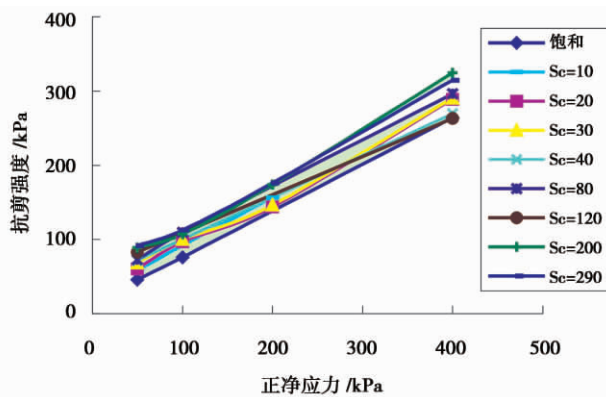


图 2 脱湿之后对应不同基质吸力的抗剪强度线

Fig. 2 Shear strength curves under different matrix suction through drying

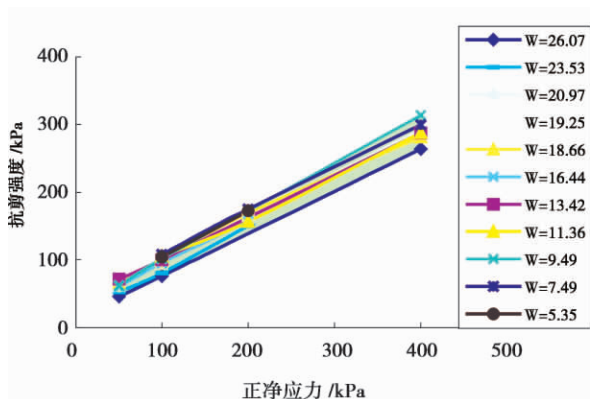


图 3 不同含水量对应的抗剪强度线

Fig. 3 Shear strength curves under different water content through wetting

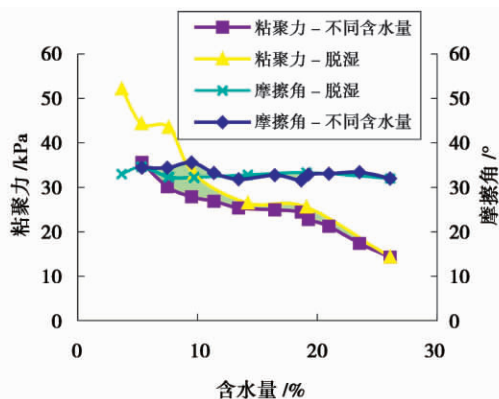


图 4 不同水力路径下粘聚力和内摩擦角与含水量之间的关系

Fig. 4 Relationship of effective cohesion and internal friction angle and water content after drying and wetting

1.5 采用有效应力表示的抗剪强度曲线

从前面的分析可知,采用双应力变量抗剪强度理论时,没有考虑到饱和度的影响,无法反应毛细滞回效应。当采用 Bishop 有效应力时,若将参数取为 χ 取为饱和度,即: $\sigma' = (\sigma_n - u_a) + S_r(u_a - u_w)$, 可以自然的将基质吸力和饱和度同时引入抗剪强度理论中,因此能够描述毛细滞回效应对抗剪强度的影响。

由 Bishop 有效应力得出的抗剪强度理论为

$$\tau_f = c' + [(\sigma_n - u_a) + S_r(u_a - u_w)] \tan \phi'$$

将上述试验数据采用有效应力来表示,对应不同的水力路径,得出的抗剪强度曲线如图 5 所示。从图中可以看出,数据点都集中在一条曲线附近,并与饱和土的破坏线重合。这表明,非饱和土强度破坏线是唯一的,而与含水量大小和水力路径无关。因此,非饱和土和饱和土的破坏机制是一致的,可用有效应力原理来解释,从而证明了采用有效应力理论来表示非饱和土强度的合理性与有效性。

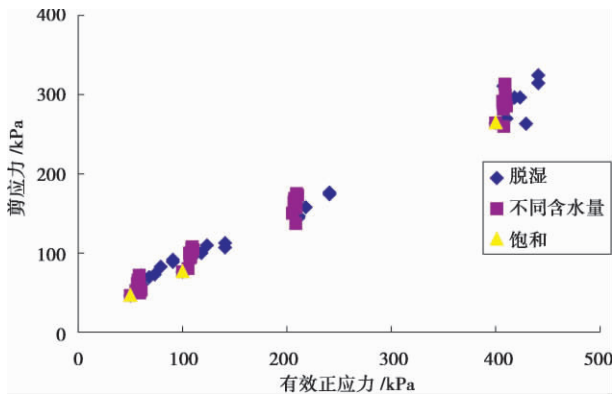


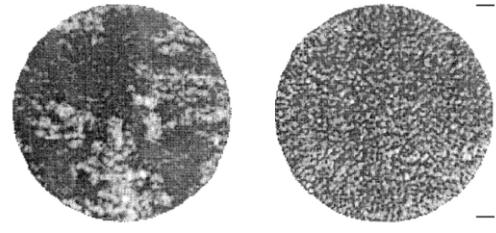
图 5 采用有效应力表示的不同水力路径抗剪强度线

Fig. 5 Drying and wetting shear strength curves expressed by effective stress

2 非饱和土的屈服硬化

2.1 基质吸力和饱和度对屈服应力的作用

基质吸力相同时,土样分别经过脱湿和吸湿之后的含水量大小、分布并不相同。非饱和土的 CT 扫描图^[15]如图 6 所示。从图 6 可以看出,相同含水量时,孔隙水的分布状态是不同的,经历吸湿过程的土样比经历脱湿过程的含水量分布更加均匀,因此非饱和土的力学性质也不同。通过测量两种状态试样的压缩波传播时发现,前者的压缩波速明显比后者小^[16]。



(a) 脱湿

(b) 吸湿

图 6 非饱和土的 CT 扫描图(饱和度均为 92% 时分别经过吸湿和脱湿而成的土样)

Fig. 6 CT image of unsaturated (degree of saturation is 92% from drying and wetting respectively)

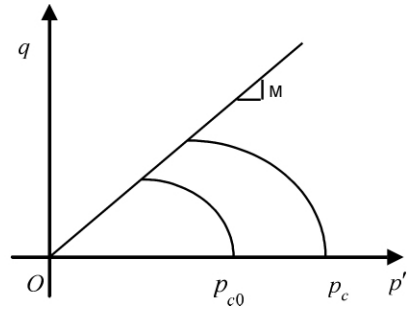


图 7 修正剑桥模型的屈服面

Fig. 7 Yield surface of modified Cam-clay model

从上面的分析可知,由于存在毛细滞回,非饱和土体的土水状态与土体所经历的水力路径密切相关,而土水状态的变化必将影响土体的强度与变形。因此,必须要同时考虑基质吸力和饱和度对前期固结压力的影响。通过试验^[16]发现,屈服应力随着吸力的增加、饱和度的减小而增大,因此假设如下表达式来考虑吸力和饱和度对屈服应力的作用

$$p_c = p_{c0}(\varepsilon_v^p) h(\varepsilon_v^p, S_r, S_c)$$

式中 p_c 为非饱和土的屈服应力, p_{c0} 为饱和土的屈服应力,是塑性体变的函数, h 为硬化参数,是塑性体变、饱和度、基质吸力的函数。

采用类似 Alonso^[17]提出的压缩曲线斜率与吸力的关系,定义函数为

$$h(\varepsilon_v^p, S_r, S_c) = r - (r - 1) \exp \left\{ -m \left(1 - \frac{\varepsilon_v^p}{\varepsilon_{vmax}^p} \right) \frac{(1 - S_r) S_c}{(1 - S_r^{irr}) S_b} \right\}$$

式中 r 为非饱和土处于残余饱和度时的强度与饱和土屈服强度的比值, m 为屈服应力随饱和度和吸力增长的速度, ε_v^p 为塑性体积应变, ε_{vmax}^p 为最大的塑性体积应变, S_r^{irr} 为残余饱和度, S_b 为非饱和土的

进气值 S_c/S_b 为吸力比。◇为 Macauley 大括号, 定义为 $\langle x \rangle = xH(x)$, 其中 $H(x)$ 为 Heaviside 公式。

上式满足以下条件: (1) 当 $S_r = 100\%$ 和 $S_c = 0$ 时 $h = 1.0$; (2) 随着 S_r 的减小, S_c 的增大而增大, 并趋于一个稳定值; (3) 随着 ε_v^p 的增大饱和度和基质吸力对强度的影响逐渐减弱, 当 ε_v^p 趋于最大值即 ε_{vmax}^p 时, 饱和度和基质吸力不再对强度有影响。

模型将有效应力作为应力变量, 采用修正剑桥模型^[18] 如图 8 所示, 屈服函数为

$$f = q^2 + M^2 p' (p' - p_c)$$

式中 f 为屈服函数, q 为广义剪应力, M 为临界状态线的斜率, p' 为平均有效应力, p_c 为前期屈服应力。

图中 P_{c0} 为饱和土的屈服应力, 是塑性体变 ε_v^p 的函数。 P_c 为非饱和土的屈服应力, 是塑性体变、饱和度、基质吸力 ($\varepsilon_v^p, S_r, S_c$) 的函数。

硬化准则为: $p_c(\varepsilon_v^p, S_r, S_c) = P_{c0}(\varepsilon_v^p) h(\varepsilon_v^p, S_r, S_c)$

采用孙德安^[16] 的各向同性加压湿陷试验来验证所提出的模型。图 8 为在 $p_{net} = 98 \text{ kPa}$ 和 196 kPa 下的吸湿试验结果与模型的对比; 图 9 为对应的土水特征曲线。从图 9 可以看出, 模型模拟的结果良好。

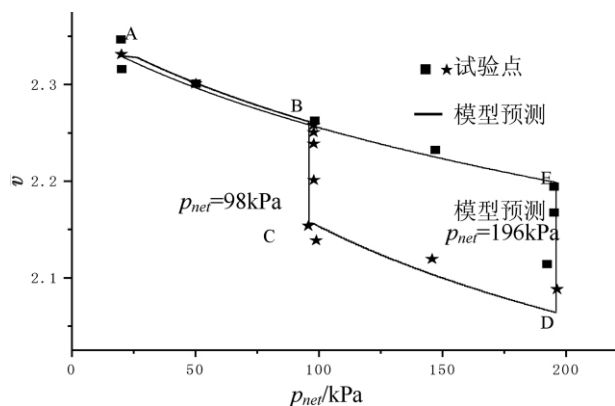


图 8 模型模拟的净应力与比容的关系和试验数据对比图

Fig. 8 Comparison of the relation between net stress and specific value calculated and test data

3 结论

本文通过对非饱和土分别经过脱湿和不同含水量状态进行直剪试验, 得出以下几点结论, 所得结论适用于轻超固结和正常固结粘土和粉土。

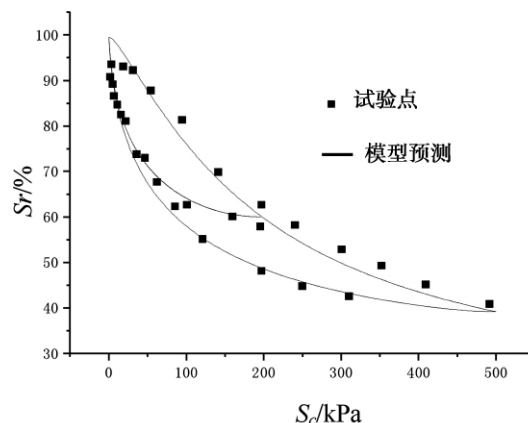


图 9 模型模拟的基质吸力与湿陷变形的关系和 SWCC 曲线与试验结果比较

Fig. 9 Comparison of the relation between matrix suction and deformation and SWCC calculated and test data

1. 如果采用净应力来表示, 非饱和土的有效粘聚力随着基质吸力的增大而增大, 但是内摩擦角却几乎没有变化, 这与前人的研究成果是一致的。非饱和土经过脱湿之后的有效粘聚力较大。

2. 如果采用有效应力来表达, 抗剪强度曲线归一化为饱和土的曲线。这表明, 非饱和土强度破坏线是唯一的, 而与含水量大小和水力路径无关。因此, 非饱和土和饱和土的破坏机制是一致的, 可用有效应力原理来解释, 从而证明了采用有效应力理论来表示非饱和土强度的合理性与有效性。

3. 在修正剑桥模型基础上, 采用有效应力, 将基质吸力与饱和度作为内变量, 提出了一个屈服应力的硬化函数。此函数可以同时考虑基质吸力和饱和度对屈服应力的影响。通过引入考虑变形的土水特征曲线可以实现毛细滞回和变形的耦合, 从而可以考虑前期降雨历史对水力学和力学参数的影响, 为分析有关降雨诱发滑坡等地质灾害现象提供理论基础。

参考文献 (References)

- [1] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1993: 46 - 50
- [2] Bishop A W, Bjerrum L. The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems [J]. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960, 75: 437 - 501
- [3] Gan J K M, Fredlund D G, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 25: 500 - 510
- [4] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Canadian

- Geotechnical Journal, 1996, 33: 379 – 392
- [5] Huang runqiu, Wu lizhou. Study on the shear strength of unsaturated expansive soils [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2007, 34(4): 221 – 224 [黄润秋, 吴礼舟. 非饱和土抗剪强度的研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2007, 34(4): 221 – 224]
- [6] 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: 261 – 267
- [7] Lu N, Likos W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132: 131 – 142
- [8] Yoshimura Y, Kato S. Effects of suction and soil moisture on strength and deformation of a compacted silty clay in unconfined compression test [G]// Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils. Beijing: International Academic Publishers, 1998: 186 – 191
- [9] Xu Yongfu, Gong Youping, Yin Zongze. Fractal characteristics of shear strength for unsaturated expansive soils [J]. Engineering Mechanics, 1998, 15: 14 – 18 [徐永福, 龚友平, 殷宗泽. 非饱和膨胀土强度的分形特征[J]. 工程力学, 1998, 15: 14 – 18]
- [10] Shen Zhujiang. Several issues related to the current research on unsaturated soil mechanics [G]// Proceeding of the Symposium on Engineering Problems of Regional Soils. Nanjing: Nuclear Energy Press, 1996: 1 – 9 [沈珠江. 当前非饱和土力学研究的若干问题 [G]// 区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集, 南京: 原子能出版社, 1996: 1 – 9]
- [11] R ahardjo H, Li X W, Toll D G, et al. The effect of antecedent rainfall on slope stability [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, 19: 371 – 399
- [12] Wheeler S J, Inclusion of specific water volume within an elastoplastic model for unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33: 42 – 57
- [13] Sharma R S. Mechanical behavior of an unsaturated highly expansive clays [D]. Oxford: University of Oxford, UK, 1998
- [14] Charles W W N, Pang Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126: 157 – 166
- [15] Cadoret T, Marion D, Zinszner B. Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 9789 – 9803
- [16] Sun D A, Matsuoka H, Cui H B, et al. Three-dimensional elastoplastic model for unsaturated compacted soils with different initial densities [J]. International Journal for Analytical and Numerical Methods in Geomechanics, 2003, 27: 1079 – 1098
- [17] Alonso E E, Gens A, Josa A, et al. A constitutive model for partially saturated soils [J]. Geotechnique, 1990, 40: 405 – 430
- [18] Roscoe K H, Burland J B. On the generalized stress-strain behavior of wet clay [J]. Engineering Plasticity, 1968: 535 – 609

Characteristics of Failure and Deformation of an Unsaturated Silty Soil Experiencing Various Hydraulic Histories

MA Tiantian, WEI Changfu, WEI Houzhen, TIAN Huihui

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Capillary hysteresis is an intrinsic phenomenon of the unsaturated soil. At the same matric suction, the degree of saturation of a soil with hydraulic histories is different, and the shear strength of the soil is also different. By conducting direct shear tests on the silty soil samples with different hydraulic histories, the result shows that, if the experimental data are represented by net stress, the effective cohesion decreases with degree of saturation and increases with matric suction, whereas the internal friction angle remains constant. If the experimental data are expressed using the effective stress, the shear strength curve can be normalized into a single line, independent of saturation and hydraulic history. Based on the modified Cam clay model, a hardening function of yield stress is developed, which treats the matric suction and saturated degree as internal variables. The proposed model is useful in analyzing the effect of antecedent rainfall on the stability of unsaturated soil slopes.

Key words: capillary hysteresis; shear strength; effective stress; soil-water characteristic curve; coupling of seepage and strain