



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.016

邢国起, 肖洪天, 李大勇. 基于应力路径的吸力对非饱和土性能参数的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 90-94. XING Guo qi, XIAO Hong tian, LI Da yong. Effects of suction based on stress path on property parameters of unsaturated soils[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 90-94. (in Chinese)

基于应力路径的吸力对非饱和土性能参数的影响

邢国起^{1,2}, 肖洪天¹, 李大勇¹

(1. 山东科技大学 山东省岩土与结构工程重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 潍坊学院建筑工程学院, 山东 潍坊 261061)

摘要: 以非饱和和重塑粉土为研究对象, 应用 GDS 非饱和土三轴仪进行三种应力路径试验, 基于平均有效应力和平均净应力研究了吸力对试样性能参数的影响规律。研究表明: 三轴等向压缩试验中基于平均有效应力得到的非饱和试样的先期固结压力随吸力增大而增大, 而基于平均净应力得到的先期固结压力的变化规律则不明显。三轴不排水剪切试验中基于平均有效应力得到的临界状态线与吸力无关且唯一, 基于平均净应力得到的临界状态线与饱和试样临界状态线平行, 且随吸力增大临界状态线逐渐远离饱和试样的临界状态线。

关键词: 应力路径; 吸力; 非饱和和重塑粉土; 平均有效应力; 平均净应力

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2016) 03-0090-05

Effects of suction based on stress path on property parameters of unsaturated soils

XING Guo qi^{1,2}, XIAO Hong tian¹, LI Da yong¹

(1. Shandong Province Key Laboratory of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China 2. College of Architectural Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China)

Abstract: The effects of suction on mechanical property of unsaturated remolding silt were investigated based on mean effective pressure and mean net pressure according to three kinds of stress paths with GDS apparatus. The results showed that preconsolidation pressure increased with suction based on mean effective pressure, and it was not obvious based on mean net pressure for isotropic compression test. The critical state line of unsaturated soils was not related to suction and was unique based on mean effective pressure, and it was paralleled to the critical state line of saturated soils and far away with suction increasing based on mean net pressure in undrained shear test.

Key words: stress path; suction; unsaturated remolding silt; mean effective pressure; mean net pressure

20 世纪 30 年代以太沙基为代表基于饱和土创建了土力学理论, 从而使得土力学成为一门独立的学科。而地球表面不仅干旱和半干旱地区存在着非饱和土, 就是在江河湖海附近的区域也存在着非饱和土, 工程建设中也存在大量的压实土等非饱和土。非饱和土中存在的负孔隙水压力, 使得其力学特性

不同于饱和土, 因而不能简单地将太沙基的饱和土理论成果应用于非饱和土中。

为了探索吸力对非饱和土力学性能的影响, 文献[1-8]研究了吸力对非饱和土抗剪强度、体变、渗流、固结等的影响, 取得了一系列研究成果, 丰富了非饱和土的理论, 为其工程应用奠定了基础。目前

收稿日期: 2015-12-19 修回日期: 2016-02-15 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1144.023.html>
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379118)
Fund: National Natural Science Foundation of China(51379118)
作者简介: 邢国起(1977-), 男, 山东潍坊人, 讲师, 博士, 主要进行非饱和土本构模型与非饱和边坡稳定研究。E-mail: xgq1105@163.com

描述非饱和土的抗剪强度和应力应变关系中,主要存在两种形式的应力状态变量,一种是单应力状态变量,另一种是双应力状态变量。有效应力形式的单应力状态变量与饱和土有效应力的表达式相类似,易于在已有的有限元程序中实现和应用,但是存在着不能描述非饱和土遇湿沉陷的现象。基于上述原因,众多学者探讨了双应力变量应用于非饱和土的可行性,取得了一系列研究成果^[9-12],进一步丰富了非饱和土理论。

目前广泛使用的双应力变量中,除采用吸力外还可采用净应力或有效应力来描述非饱和土的抗剪强度或体变。查阅相关文献资料,不同应力路径下分别采用净应力和有效应力描述非饱和土性能参数之间的关系以及随吸力变化的规律的文献鲜有报道。本文以非饱和重塑粉土试样为研究对象,采用GDS非饱和土三轴仪探索不同应力路径下,分别采用净应力和有效应力描述的非饱和土的性能参数之间的关系以及随吸力变化的规律。

1 试验概况

所用试样以潍坊中南部地区某深基坑的砂质粉土为研究对象,其级配组成和初始物理性能指标见表1、表2。试验设备为GDS UNSAT非饱和土三轴仪,试样的高度和直径分别为76 mm和38 mm。试验加载路径见图1。

表1 试验所用砂质粉土的级配组成
Tab. 1 Gradation of silt with sand used in test (%)

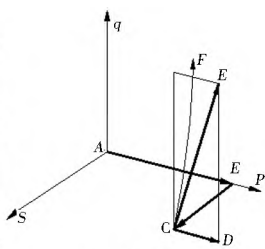
相对密度 d_s	颗粒粒径/mm				
	> 2	0.5~ 2	0.2~ 0.5	0.2~ 0.075	< 0.075
2.71	10.41	20.23	31.24	23.19	14.93

表2 试样初始物理性能指标
Tab. 2 Initial index properties of the sample

干密度	含水率 (%)	孔隙比 e	饱和度 S_r	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数
2.71	19.8	0.599	89.54	25.4	19.5	5.9



(a)非饱和三轴仪



(b)加载路径

图1 试验设备及加载路径

Fig. 1 Test apparatus and loading path

加载路径前,首先对饱和试样施加围压 p 进行

固结排水,固结排水稳定后再施加一定的吸力并保持吸力不变,分别进行以下三条加载路径。

(1)三轴等向压缩路径(G-D路径)。加载过程中保持 u_a 、 u_w 不变不断增加围压 p 。

(2)三轴排水剪切路径(C-E路径)。加载过程中保持 u_a 、 u_w 不变不断增加偏应力 q 。

(3)三轴不排水剪切路径(G-F路径)。加载过程中保持排气状态($u_a \approx$ 大气压值),通过测定孔隙水压力 u_w 得到试验过程中的吸力值。

2 试验结果分析

2.1 三轴等向压缩路径

首先对饱和试样施加平均有效应力 $p' = 300$ kPa进行固结排水,固结排水稳定后保持 $p' = 300$ kPa不变,对试样分别施加大小为0、100、200和280 kPa的吸力。实施三轴等向压缩路径中可获得试样在加载过程中的水分体积应变 ε_w ($\varepsilon_w = \Delta V_w / V_o$)。图2为试样施加不同吸力时,平均有效应力和水分体积应变之间的关系曲线。采用平均有效应力获得试样的先期固结压力时,可根据图2中直线斜率转折点处所对应的应力确定^[13],依据上述方法能得到不同吸力时试样的先期固结压力(图3)。吸力小于100 kPa时图2中的直线斜率转折点不易辨别,因此图3只给出了吸力为200 kPa和280 kPa时,分别基于平均有效应力和平均净应力确定的先期固结压力与吸力之间的关系曲线。基于平均有效应力确定的先期固结压力随着吸力的增大而增大,而基于平均净应力确定的先期固结压力随着吸力的增大变化不明显。由图3可以发现,当试样施加的吸力小于空气进气值 s_e 时,基于平均有效应力得到的先期固结压力轨迹不随吸力的增大而变化,此时试样的力学特性与饱和土类似,而饱和土的力学特性又唯一取决

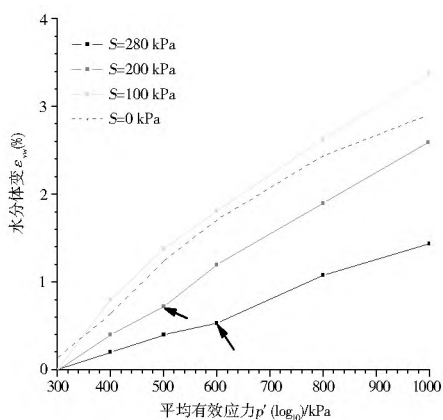


图2 平均有效应力与水分体变关系曲线

Fig. 2 Curve of relationship between mean effective stress and liquid volume change

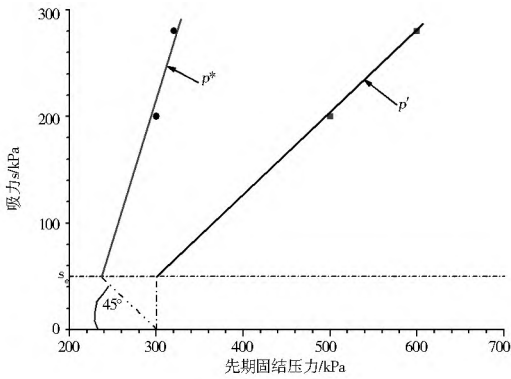


图 3 期固结压力与吸力关系曲线

Fig. 3 Curve of relationship between preconsolidation pressure and suction

于有效应力;当吸力小于空气进气值 s_e 时,基于平均净应力得到的先期固结压力随着吸力的增大呈减小趋势,其轨迹与横坐标的夹角大约为 45° ;同一吸力值时分别基于平均有效应力与平均净应力得到的先期固结压力之差等于所施加的吸力。

2.2 三轴排水剪切路径

首先对饱和试样分别施加平均有效应力 $p' = 400, 450, 500, 600$ kPa 进行固结排水,固结排水稳定后试样保持平均有效应力不变,对试样分别施加 50、100、200 及 280 kPa 的吸力。实施三轴排水剪切路径时,为使试样剪切过程中能够及时排水,非饱和土三轴仪的剪切速率设定为 0.0012 mm/min。表 3 为实施三轴排水剪切路径试验中试样施加的围压、吸力等参数。图 4(a) 为施加有效围压 $\sigma_3^* = 600$ kPa 时,试样施加不同吸力时的应力-应变关系曲线;可以看出,吸力从 0 增加到 200 kPa 时,试样的峰值剪切强度表现出随吸力增大而增大的规律,该现象与饱和土试样的试验结果一致^[14];随着吸力增大,试样的峰值剪切强度不是继续增大;由图 4(a) 可以看出,当吸力达到 280 kPa 时,试样的峰值剪切

表 3 试样试验参数

Tab. 3 Test parameters of samples

试样	σ_3^*		$\Delta q / \Delta p'$	s / σ_3^*	
	A-B 路径 / kPa	B-C 路径 / kPa			C-D / kPa
A1	400	100	400	3	0.25
A2	450	50	450	3	0.11
A3	500	100	500	3	0.2
A4	600	100	600	3	0.17
A5	600	200	600	3	0.33
A6	500	100	500	3	0.2
A7	400	100	300	3	0.33
A8	400	100	-	∞	0.25
A9	600	50	600	3	0.08
A10	600	280	600	3	0.47
A11	600	100	500	3	0.2

强度表现出了小于吸力 200 kPa 时试样的峰值剪切强度。试样加载过程中发现,当试样达到峰值剪切强度后,开始出现剪切破坏带(图 5);随着继续加载,剪切破坏面进一步发展,此时出现了偏应力反而减小的现象;当吸力大小为 280 kPa 时,加载过程中试样偏应力未达到峰值剪切强度时,剪切破坏面已经开始发展,从而出现了试样峰值剪切强度小于其他吸力时的峰值剪切强度。图 4(b) 为吸力大小对试样体变的影响曲线;可以看出随着吸力增大,试样的剪胀现象越来越明显。

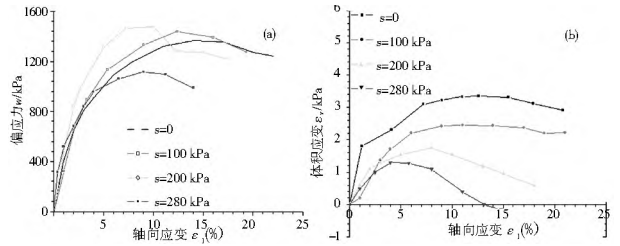


图 4 三轴排水剪切试验曲线($\sigma_3^* = 600$ kPa)

Fig. 4 Curve of triaxial drained shear test ($\sigma_3^* = 600$ kPa)

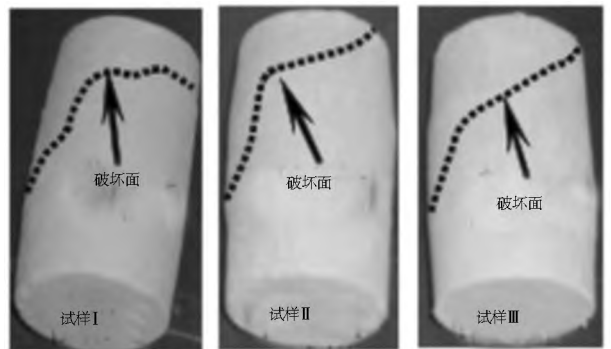


图 5 非饱和试样剪切破坏带

Fig. 5 Shear band of unsaturated soils

图 6(a) 为试样施加净围压 $\sigma_3^* = 400$ kPa 时,吸力大小分别为 0、50、100 及 200 kPa 时的应力-应变曲线;可以看出,试样峰值剪切强度随着吸力的增大而增大,与试样施加有效围压 $\sigma_3^* = 600$ kPa 时吸力小于 280 kPa 时的变化规律相似。图 6(b) 为试样施加净围压 $\sigma_3^* = 400$ kPa 时,加载过程中得到的水分体积变化曲线,可以看出三轴排水剪切路径下吸力对水分体变的影响规律不明显。

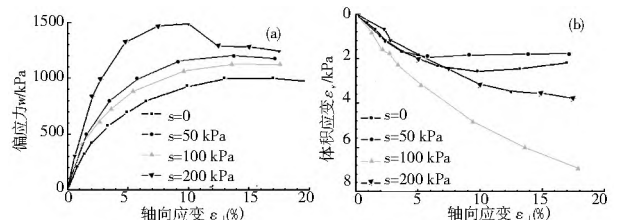


图 6 三轴排水剪切试验曲线($\sigma_3^* = 400$ kPa)

Fig. 6 Curve of triaxial drained shear test ($\sigma_3^* = 400$ kPa)

2.3 三轴不排水剪切路径

首先对饱和试样分别施加平均有效应力 $p' =$

200、300、1 000 kPa 进行固结排水, 固结排水稳定后试样分别保持 $p' = 200、300、1\ 000\text{ kPa}$ 不变, 对试样分别施加 0、30、60、100、200 及 280 kPa 的吸力。实施三轴不排水剪切试验路径时, 非饱和土三轴仪剪切速率设定为 0.06 mm/min。表 4 为实施三轴不排水剪切路径试验中试样施加的围压、吸力等参数。图 7 为施加有效围压 $\sigma'_3 = 200、300$ 及 1000 kPa 时, 试样施加不同吸力时的应力应变曲线。图 8 为依据图 7 中的应力应变曲线得到的吸力与峰值剪切强度的关系曲线。由图 8(a) 可看出, 当有效围压较低时($\sigma'_3 = 200\text{ kPa}$), 试样峰值剪切强度随着吸力的增大而增大; 当有效围压较高时($\sigma'_3 = 1\ 000\text{ kPa}$), 则随着吸力的增大而降低; 当有效围压处于两者之间时($\sigma'_3 = 300\text{ kPa}$), 峰值剪切强度随着吸力的增大则表现出先增大而后降低的现象。图 8(b) 为归一化的峰值剪切强度与吸力关系图; 当 $q_{peak}/\sigma'_3 = 3.1$ 时, 此时吸力大小近似等于空气进气值 s_e 。该

路径试验中观察发现, 当 $s/\sigma'_3 > 0.45$ 时试样达到峰值剪切强度后才出现剪切破坏面; 比值 $s/\sigma'_3 \leq 0.3$ 时, 试验过程中观察到试样达到峰值强度后局部才开始出现剪切破坏面。

表 4 试样试验参数

Tab.4 Test parameters of samples

试验 试样	(σ'_3) 始		u_a (s/σ'_3) 始
	A-B 和 G-E 路径/ kPa	B-C 和 G-E 路径/ kPa	
B1	200		0
B2	200		30
B3	200		60
B4	300		0
B5	300		100
B6	300		200
B7	300		280
B8	1 000		0
B9	1 000		100
B10	1 000		200
B11	1 000		280

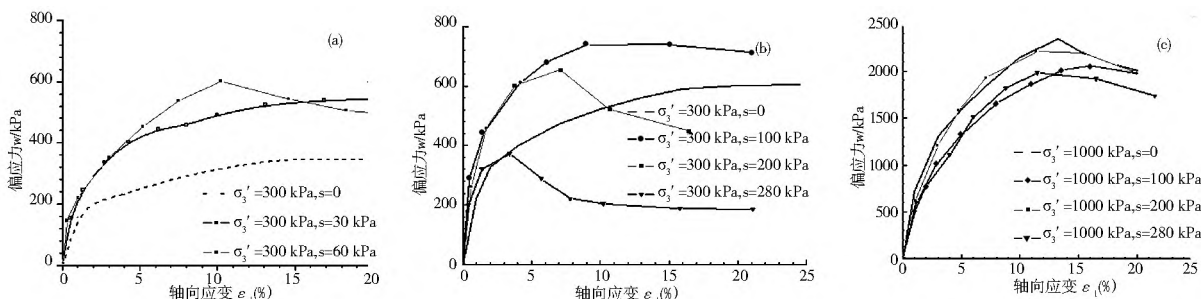


图 7 三轴不排水剪切试验应力应变曲线

Fig. 7 Curve of stress strain for constant water content shear test

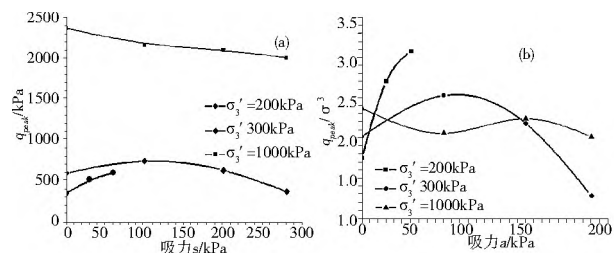


图 8 峰值强度与吸力关系

Fig. 8 Relationship between peak stress and suction

依据试样不排水剪切试验数据, 基于平均有效应力和平均净应力分别得到了吸力对峰值剪切强度的影响规律。图 9(a) 为基于平均有效应力得到的吸力对峰值强度的影响关系图; 图中直线为饱和试样的临界状态线, 可以看出非饱和土试样施加不同吸力时的峰值剪切强度基本位于饱和试样临界状态线附近。图 9(b) 为基于平均净应力得到的试样施加不同吸力时的临界状态线; 相同吸力时的峰值剪切强度连线都互相平行且都与饱和试样临界状态线平行。两种有效应力表示方法得到的临界状态线呈

现不同的趋势; 由于试样不同吸力时的临界状态线与纵轴的截距为粘聚力大小, 可以发现试样粘聚力随着吸力的增大而呈现出增大的趋势, 这与文献 [15-17] 中发现的规律是一致的。

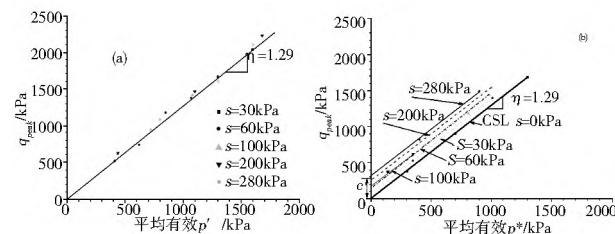


图 9 临界状态线与吸力关系

Fig. 9 Relationship between critical state line and suction

3 结论

本文采用非饱和和重塑粉土试样进行不同应力路径的三轴试验, 基于平均有效应力和平均净应力分别研究了非饱和试样的相关性能参数, 得到如下结论:

(1) 三轴等向压缩路径试验中, 基于平均有效应

力得到的先期固结压力与吸力呈正比关系,而基于平均净应力得到的先期固结压力则随吸力的变化不明显;

(2) 三轴排水剪切路径试验中,基于有效围压的峰值强度随吸力增大表现为先增大后减小,吸力增大对剪胀现象影响较明显;基于净围压的峰值强度随吸力增大而增大,剪胀现象随吸力的增大不明显;

(3) 三轴不排水剪切路径试验中,基于平均有效应力的峰值强度基本位于饱和试样($s=0$)的临界状态线上;而基于平均净应力的临界状态线与饱和试样临界状态线平行,随吸力增大临界状态线逐渐远离饱和和试样临界状态线。

参考文献(References):

- [1] Matyas E L, Radhakrishna H S. Volume change characteristics of partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1968, 18(4): 432-448.
- [2] 蒋彭年. 非饱和土工程性质简论[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 39-59. (JIANG Peng nian. On the engineering properties of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(6): 39-59. (in Chinese))
- [3] Fredlund D G, 杨宁. 非饱和土的力学性能与工程应用[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(5): 24-35. (Fredlund D G, YANG Ning. The mechanical properties and their engineering applications to unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(5): 24-35. (in Chinese))
- [4] 卢肇钧, 张惠明, 陈建华等. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 1-8. (LU Zhaojun, ZHANG Hui ming, CHEN Jianhua, et al. Shear strength and swelling pressure of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 1-8. (in Chinese))
- [5] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1-6. (MIAO Linchang, YIN Zongze. Shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 1-6. (in Chinese))
- [6] 陈正汉, 周海清, D G Fredlund. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 603-608. (CHEN Zhenghan, ZHOU Haiqing, Fredlund D G. Nonlinear model for unsaturated soils and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 603-608. (in Chinese))
- [7] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3861-3865. (LI Yongle, LIU Cuiran, LIU Haining et al. Testing study on permeability characteristics of unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3861-3865. (in Chinese))
- [8] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3217-3231. (SUN De'an. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modeling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3217-3231. (in Chinese))
- [9] COLEMAN J D. Stress-strain relations for partly saturated soils [J]. Geotechnique, 1962, 12(4): 348-350.
- [10] BISHOP A, BLIGHT G E. Some aspects of the effective stress in saturated and partially saturated soils [J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [11] BLIGHT G E. Effective stress evaluation for unsaturated soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(2): 125-148.
- [12] 周建. 非饱和土本构模型中应力变量选择研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1206-1207. (ZHOU Jian. Research on selection of stress variables of constitutive model for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1206-1207. (in Chinese))
- [13] 黄海, 陈正汉, 李刚. 非饱和土在 $p-s$ 平面上屈服轨迹及土水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 316-321. (HUANG Hai, CHEN Zhenghan, LI Gang. A study on yield locus of unsaturated soils on $p-s$ plane and soil-water characteristic curve [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 316-321. (in Chinese))
- [14] Laloui L, Nuth M. An introduction to the constitutive modeling of unsaturated soils [J]. Eur J Civil Engineering, 2005, 9(5-6): 651-670.
- [15] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [16] Bishop A W, Alpan I, Blight G E, et al. Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils [A]. ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils [C]. Boulder: University of Colorado, 1960. 503-532.
- [17] 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.