

文章编号: 1000-7598(2011)10-3143-05

考虑饱和度的压实填土抗剪强度研究

骆以道^{1,2}

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 深圳市勘察测绘院有限公司, 广东 深圳 518028)

摘要: 压实填土一般为典型的非饱和土, 广泛存在于各类工程中, 其物理力学性质受填土含水状态的影响。因基质吸力测量困难, 非饱和土强度理论难以在压实填土工程中的应用。研究含水状态变化对压实土抗剪强度影响的大小, 寻找一种简化实用的非饱和压实土抗剪强度确定方法。从非饱和土理论出发, 对含水状态影响压实土抗剪强度的机制进行了分析, 重新整理并分析了5种压实土的非饱和三轴试验结果, 对一些压实土工程资料中的直剪试验强度指标进行了收集和整理。分析表明, 基质吸力对压实填土抗剪强度的贡献占有相当大的比例; 含水率变化对压实填土抗剪强度的影响是非常显著和不容忽视的。工程资料中压实土饱和度对数值与黏聚力指标有良好的线性相关关系, 提出了一个考虑饱和度影响的压实填土抗剪强度简易计算方法。

关键词: 压实填土; 抗剪强度; 非饱和土; 基质吸力; 含水率

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Research on shear strength of compacted soils considering saturation degree

LUO Yi-dao^{1,2}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Shenzhen Geotechnical Investigation & Surveying Institute Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518028, China)

Abstract: Compacted soil, which widely exists in many sorts of engineering projects, is commonly unsaturated soil; and its physico-mechanical characteristics are influenced by soil moisture. Because of the difficulty in matric suction measurement, it is hard to apply the unsaturated soil strength theory to compacted soil projects. This paper aims to research how much influence on shear strength of compacted soil when soil moisture varies, and tries to find an easy and useful way in determining the shear strength of unsaturated compacted soils. Research works start from the theory of unsaturated soil, and the mechanism, with which soil moisture affects shear strength of compacted soil, is analyzed. Triaxial shear test results of five sorts of unsaturated compacted soils are rearranged and analyzed; and strength parameters of direct shear test are collected and arranged from data of some filled and compacted soil projects. Analysis shows that matric suction contributes a considerable portion of shear strength in the compacted soils; and the influence of soil moisture on shear strength of compacted soil is obvious and can not be neglected. A fine linear relationship between logarithmic saturation and cohesion of compacted soil is found in project data; and a simple method for calculating shear strength of compacted soil, which can take saturation degree influence into account, is presented.

Key words: compacted soils; shear strength; unsaturated soils; matric suction; water content

1 引言

人工压实填土是经人为压实而形成的非饱和和重塑土, 广泛存在于路堤、大坝等填筑工程、场坪工程以及基坑回填等工程中。压实填土的工程性质与天然土体有很大差异, 尤其工程中的人工填土往往处于各种复杂的水文环境中, 浸水、失水以及由此导致的工程病害是经常发生的。因此, 含水率变

化对人工压实填土变形和强度特性的影响备受岩土工程界的关注。

工程中压实填土大部分是在非饱和状态下压实形成的, 是典型的非饱和土。非饱和土的理论核心是土体中存在气相并因此产生基质吸力。基质吸力变量的引入为非饱和土性状的解释提供了方便。基质吸力的影响因素很多, 对于已施工完成的非饱和和人工压实填土, 其基质吸力与初始含水状态及其

收稿日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 50979080); 交通部西部交通建设科技攻关重点项目资助 (No. 200531874010)。

第一作者简介: 骆以道, 男, 1975年生, 博士研究生, 从事非饱和土、边坡工程、地基处理等方面的研究、设计和施工。E-mail: luoyidao@126.com

含水状况的变化密切相关, 降雨和地下水的变化实际上改变了土的含水状况和土的基质吸力, 从而使压实填土强度发生改变。

近 20 年来国内外对非饱和土的强度问题进行了大量的研究^[1-16], 研究成果大多建立在与基质吸力有关的强度理论之上。由于基质吸力测量困难, 限制了既有研究成果在压实填土工程中的应用。本文旨在研究含水状态变化对压实填土抗剪强度影响的大小, 寻求一种能避开基质吸力量测, 通过一般工程资料确定填土抗剪强度的简易计算方法。

2 吸附强度及其影响分析

目前理论上得到大多数认同的非饱和土强度理论可概括为

$$\tau_f = c' + \tau_n + \tau_s \quad (1)$$

式中: c' 为有效黏聚力, 是材料性质指标, 假定它与土的含水状态无关; τ_n 为法向应力对土体抗剪强度的贡献, 可表示为 $\tau_n = \sigma'_n \tan \varphi'$ (σ'_n 为有效法向应力; φ' 为有效内摩擦角); τ_s 称为吸附强度, 是基质吸力 ($u_a - u_w$) 对土体抗剪强度的贡献。外部荷载不变时, 压实填土的抗剪强度则取决于吸附强度 τ_s , 土体含水状态改变是基质吸力 ($u_a - u_w$) 变化的直接诱因, 这从非饱和土理论上解释了含水状态变化对压实填土抗剪强度的影响。

Fredlund^[1]将基质吸力 ($u_a - u_w$) 作为独立的应力状态变量, 提出了双应力变量抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma'_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: c' 为饱和状态下有效黏聚力; $(\sigma'_n - u_a)$ 为有效法向应力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; φ' 为饱和状态下有效内摩擦角; φ^b 为吸力内摩擦角。

式 (2) 实际上是饱和土有效应力理论的推广, 即在 Mohr-Coulomb 准则中增加了一项与基质吸力有关的 $(u_a - u_w) \tan \varphi^b$ 项, 此项即为式 (1) 中的吸附强度 τ_s , 即

$$\tau_s = (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (3)$$

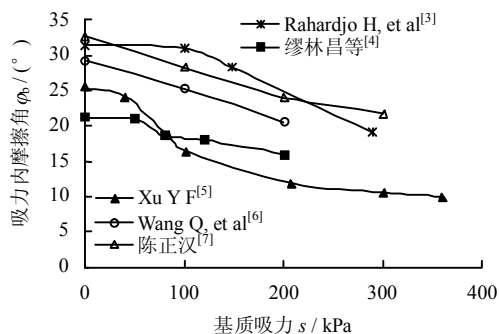
Fredlund 理论中, 假定吸力内摩擦角 φ^b 为常数, 即式 (3) 中吸附强度 τ_s 与基质吸力 ($u_a - u_w$) 是按线性关系变化。然而后续的研究表明, φ^b 仍然是基质吸力 ($u_a - u_w$) 的函数。按照 Fredlund^[1-2]的理论, 国内外学者对各种压实土的吸附强度 τ_s 及 φ^b 进行了大量的研究。表 1 列出了一些压实土的三轴试验成果 (Rahardjo H, et al^[3], 缪林昌等^[4], Xu Y F^[5], Wang Q, Pufahl D E, et al^[6], 陈正汉^[7]), 其中 “三轴 CD” 为固结排水, 剪切过程中控制吸力不变; “三轴 UU” 为剪切过程中不排水不排气, 所列的吸力值是对应于破坏点的吸力值。

将表 1 的数据绘制成 φ^b - s 曲线 (图 1), 则比较直观地反映各压实土吸力内摩擦角 φ^b 与基质吸力 s 的关系。综合图 1 及其他一些研究成果^[12-13], 关于压实填土的 φ^b 大致有下列结论: ①在非饱和状态下, $\varphi^b < \varphi'$ (φ' 为饱和土的有效内摩擦角), 当土体接近饱和 ($s \rightarrow 0$) 时, $\varphi^b \rightarrow \varphi'$; ② φ^b 随基质吸力 s 增大而减小, 且变化关系是非线性的; ③ s 很大时, φ^b 变化缓慢, 趋于某一定值。

表 1 不同吸力下压实填土的 τ_s 及 φ_b
Table 1 τ_s and φ_b of compacted soil under different suctions

土样	试验方法	饱和试样		非饱和试样量值						数据来源
		c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$							
残积土压实	三轴 CD	0	31.5	s / kPa	100	150	290			Rahardjo H, et al ^[3]
				τ_s / kPa	60	80	100			
				$\varphi_b / (^\circ)$	31	28.1	19			
中国南阳 膨胀土压实	三轴 CD	35	21.2	s / kPa	50	80	120	200		缪林昌等 ^[4]
				τ_s / kPa	19.2	27	39	57.3		
				$\varphi_b / (^\circ)$	21	18.6	18	16		
中国宁夏 膨胀土压实	三轴 UU	36	25.5	s / kPa	40	83	102	208	300	Xu Y F ^[5]
				τ_s / kPa	18	28	30	44	56	
				$\varphi_b / (^\circ)$	24.2	18.6	16.4	11.9	10.6	
Botkin 粉土压实*	三轴 CD	11.7	29.2	s / kPa	100	200				Wang Q, et al ^[6]
				τ_s / kPa	61.4	75.1				
				$\varphi_b / (^\circ)$	25.3	20.6				
山西汾阳Q ₃ 黄土压实	三轴 CD	3.7	32.7	s / kPa	100	200	300			陈正汉 ^[7]
				τ_s / kPa	53.9	89.1	119.8			
				$\varphi_b / (^\circ)$	28.3	24.0	21.8			

注: 表中数据由文献中的 $q - \varepsilon_s$ 图整理得到。

图 1 压实土 ϕ_b - s 曲线Fig.1 ϕ_b - s curves of compacted soils

利用表 1 的数据, 考虑上覆有效压力 p 为 100 kPa, 基质吸力为 100~120 kPa, 将各压实土的吸附强度 τ_s 占总抗剪强度 τ_f 的百分比统计于表 2。可以看出, 在总抗剪强度 τ_f 中 τ_s 占有相当大的比例 (26.4%~49.5%), 因此, 工程中对压实土的吸附强度应给以足够的重视。

表 2 τ_s 与 τ_f 的关系Table 2 Relationship between τ_s and τ_f

τ_f / kPa	τ_s / kPa	τ_s / τ_f / %	说明
121.3	60	49.5	压实残积土, 基质吸力 100 kPa
112.8	39	34.6	压实中国南阳膨胀土, 基质吸力 120 kPa
113.7	30	26.4	压实中国宁夏膨胀土, 基质吸力 102 kPa
129.0	61.4	47.3	压实粉土, 基质吸力 100 kPa

注: * $\tau_f = c' + p \tan \phi' + \tau_s$, p 为上覆有效压力 ($p = 100$ kPa)。

Fredlund 双应力变量抗剪强度理论虽然得到了国际的公认, 但由于 ϕ^b 的复杂性, 使其在工程应用中难以推广。继 Fredlund 之后, 国内外学者建立了许多吸附强度的经验公式, 有些是在吸附强度计算中引入含水状态变化因子 (含水率、饱和度等), 对 Fredlund 抗剪强度公式中 $\tan \phi_b$ 进行修正 (如 Vanapalli^[14]), 而另一些则直接建立 τ_s 与 $(u_a - u_w)$ 之间的非线性关系 (如 Xu^[5]、沈珠江^[15]、Futai^[16])。这些经验公式是针对不同的非饱和土样通过试验获得的, 它们能否推广到压实土中还有待于实践的检验。

需要指出的是, $(u_a - u_w)$ 并不一定是 τ_s 的惟一决定因素, 对于压实土, 相同的基质吸力下密实状态、环境温度、矿物成分、土体细观结构和孔隙分布特征均有可能对吸附强度 τ_s 造成影响, 这些影响规律仍需要深入研究。

3 压实土直剪试验资料分析

基质吸力的测量非常复杂, 鉴于我国目前的土工测试技术水平, 建立基质吸力和压实填土抗剪强

度的经验公式的方法难以在工程中推广和普及, 如果能采用简单的测试手段, 建立压实填土抗剪强度与含水状态指标之间的关系, 则具有重要的现实意义。本文通过收集的常规直剪试验资料, 尝试建立压实填土抗剪强度指标与饱和度的经验关系。

表 3 的数据取自“运~三高速公路”(运城至三门峡)第 11 标段高填方夯填土土地质检资料, 填土料为山西平陆县, 属 Q_2 黄土, $d_s = 2.72$, $w_L = 30.1$, $I_p = 12.1$, 为粉质黏土。表 4 的数据由党进谦^[17]的试验结果整理得到, 试验土料为陕西省杨凌渭河北台源坡地 Q_2 、 Q_3 黄土, 其中 Q_2 黄土 $d_s = 2.72$, $w_L = 33.2$, $I_p = 12.0$; Q_3 黄土 $d_s = 2.71$, $w_L = 31.1$, $I_p = 11.0$, 均为粉质黏土。表 3、4 的抗剪强度指标都是非饱和状态下由直接剪切仪以固结快剪方法获得, 且各组试验中试样干密度相近。

表 3 山西省平陆夯填黄土直剪试验资料

Table 3 Direct shear testing data of dynamic-consolidated loess in Pinglu County, Shaanxi province

试验编号	干密度 /(g/cm ³)	饱和度 S_r	c_{eq} / kPa	ϕ_{eq} /(°)
T4-2	1.817	0.84	136.0	23.2
T4-3	1.814	0.87	96.7	24.9
T4-4	1.809	0.71	184.0	31.8
T6-3	1.814	0.90	109.9	22.1
T7-2	1.791	0.93	60.0	25.5
T7-5	1.795	0.94	102.0	22.5
T8-1	1.798	0.99	58.0	27.0
T8-6	1.806	0.97	98.0	21.0
T10-3	1.812	0.87	96.0	32.0
T11-5	1.810	0.94	84.0	26.5

表 4 陕西省杨凌压实黄土直剪试验资料

Table 4 Direct shear testing data of compacted loess in Yanglin county, Shaanxi province

试验用土	干密度 /(g/cm ³)	饱和度 S_r	c_{eq} / kPa	ϕ_{eq} /(°)
陕西杨凌 黄土 Q_2	1.51	0.38	108	21.5
	1.50	0.44	78	21.3
	1.53	0.53	63	21.0
	1.52	0.60	51	21.2
	1.50	0.65	40	20.8
	1.53	0.75	33	20.5
	1.51	0.80	28	20.0
	1.51	0.86	25	20.3
	1.50	0.91	22	20.0
	1.44	0.34	80	19.4
陕西杨凌 黄土 Q_3	1.43	0.40	67	19.2
	1.43	0.47	51	19.2
	1.44	0.53	40	18.8
	1.42	0.58	31	19.0
	1.43	0.65	25	18.8
	1.42	0.70	21	19.0
	1.45	0.80	18	19.0
	1.43	0.83	16	18.8

对表 3、4 的数据分析发现, 固结快剪指标 c_{cq} 与饱和度的对数 $\lg S_r$ 有近似的线性关系。图 2 为 $c_{cq} - \lg S_r$ 数据点和拟合线, 表 5 为 3 种土的拟合公式及相关系数。从图 2 可以看出, 山西平陆压实黄土因采用夯填土原状试样, 限于工地试验条件, 数据点较离散, 但仍有 $R^2 = 0.8069$, 而陕西杨凌黄土采用室内击实试样, 得到 $c_{cq} - \lg S_r$ 数据点具有很好的线性相关性。由表 3、4 可以看出, 山西平陆压实黄土 (夯填土) 数据点较离散, φ_{cq} 没有明显的变化规律; 陕西杨凌压实黄土 φ_{cq} 随 S_r 的变化幅度不大。

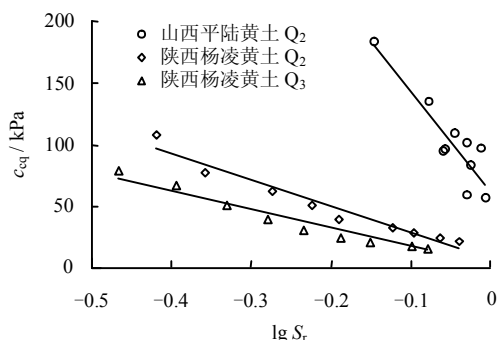


图 2 直剪试验 $c_{cq} - \lg S_r$ 关系

Fig.2 Relationships between c_{cq} and $\lg S_r$ in direct shear test

表 5 直剪试验 $c_{cq} - \lg S_r$ 线性拟合

Table 5 Fitting lines of $c_{cq} - \lg S_r$ in direct shear test

压实土料	拟合公式	相关系数
山西平陆黄土 Q ₂	$c_{cq} = -805.2 \lg S_r + 68.07$	$R^2 = 0.8069$
陕西杨凌黄土 Q ₂	$c_{cq} = -211.8 \lg S_r + 7.61$	$R^2 = 0.9546$
陕西杨凌黄土 Q ₃	$c_{cq} = -148.8 \lg S_r + 3.20$	$R^2 = 0.9473$

4 工程中抗剪强度指标的选取

压实填土抗剪强度指标是岩土工程设计的重要参数, 其取值合理与否直接关系填土边坡、堤坝、人工地基等工程的安全性。常规试验方法所得到的非饱和和压实土抗剪强度指标是综合的指标, 其中包含了试验时不饱和状态对抗剪强度指标的贡献。前文的分析表明, 含水状态变化对压实土抗剪强度指标具有显著的影响, 设计时必须充分考虑压实土含水状态变化来选取合理的抗剪强度指标。

从本文的压实填土直剪试验资料分析结果看, 考虑含水状态变化, 压实填土设计黏聚力可取为

$$c_d = c' - \kappa \lg S_{rd} \quad (4)$$

式中: c_d 为设计取用的黏聚力指标; c' 、 κ 为不变参数, 根据非饱和状态常规土工试验 (直剪、三

轴试验) 确定; S_{rd} 为设计取用的压实填土饱和度, 根据设计工况、工程所在地气候条件, 通过工程类比或现场监测确定。式 (4) 中不变参数具有一定的物理意义, 当 $S_{rd} = 1$ 时, $c_d = c'$, 即 c' 为相应与饱和状态压实填土的黏聚力; κ 为 $c_d - \lg S_{rd}$ 直线的斜率, 反映 c_d 对 S_{rd} 变化的敏感程度。

需要指出, 式 (4) 中 S_{rd} 对 c_d 的贡献是有限的。当 S_{rd} 达到土-水特征曲线中残余含水率对应的饱和度 $S_{r-residual}$ 时, 饱和度的继续降低已不能提高 c_d , 此时设计黏聚力指标应取最大值 c_{d-max} , 式 (4) 可改写为

$$\left. \begin{aligned} c_d &= c' - \kappa \lg S_{rd}, & (1 \geq S_{rd} \geq S_{r-residual}) \\ c_d &= c_{d-max}, & (S_{rd} < S_{r-residual}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

含水状态对压实填土内摩擦角的影响机理非常复杂。卢肇钧^[18]通过对我国各省份的不同种类黏性土内摩擦角指标进行了统计分析发现, 一般黏性土的内摩擦角 φ 有两组成部分:

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi \quad (6)$$

式中: φ_0 为土的基本内摩擦角, 取决于土的矿物成分, 与塑性指数 I_p 有良好的统计关系; $\Delta\varphi$ 为实际内摩擦角与 φ_0 的差值, 取决于土的含水率、密度和形成历史等许多因素, 对于 $I_p \leq 18$ 的黏性土, $\Delta\varphi$ 般不超过 $\pm 2^\circ$, 这一结论在陕西杨凌压实黄土的试验资料 (表 4) 中得到了证实。因此, 对于黏性较小的压实填土 ($I_p \leq 18$), 设计内摩擦角 φ_d 取常规试验的平均值可满足设计要求; 对于离散性大试验值, 建议采用《建筑地基基础设计规范》^[19] 推荐的统计方法按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_d &= \psi_\varphi \varphi_m \\ \psi_\varphi &= 1 - \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: φ_d 设计取用的内摩擦角; φ_m 试验内摩擦角样本平均值; ψ_φ 为内摩擦角统计修正系数; n 为统计样本数; δ_φ 内摩擦角的变异系数。

对于黏性较大的压实填土 ($I_p \geq 18$), φ_d 可通过常规试验资料分析得到的压实土内摩擦角与含水状态参数的经验关系 (杨庆^[20]通过对辽宁黑山和南京梅山两种压实膨胀土直剪试验资料分析得出 φ 与含水率具有线性关系) 取值。

5 结 论

(1) 含水状态对人工压实填土抗剪强度具有显著的影响, 其机理可用非饱和土理论解释; 基质吸

力对吸附强度的影响是非线性的。

(2) 采用常规土工试验方法对非饱和状态的压实填土进行测试, 所得到的抗剪强度指标在设计取用时应根据含水状态变化情况进行修正。

(3) 本文提出的压实填土抗剪强度指标取用方法是依据几种粉质黏土的试验结果提出的, 它的适用性还有待于工程实践的检验。

参 考 文 献

- [1] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R S. The shear strength of unsaturated soils[J]. **Can. Geotech. J.**, 1978, 15(3): 313—321.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1993.
- [3] 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]. **Can. Geotech. J.**, 2004, 41: 421—436.
- [4] 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 Lin-chang, YIN Zong-ze. Shear strength of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(3): 1—6.
- [5] XU Y F. Fractal approach to unsaturated shear strength[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(3): 264—273.
- [6] WANG Q, PUFAHL D E, FREDLUND D G. A study of critical state on an unsaturated silty soil[J]. **Can. Geotech. J.**, 2002, 39: 213—218.
- [7] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82—90.
CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(1): 82—90.
- [8] 王钊, 骆以道, 肖衡林, 等. 运城黄土吸力特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 51—54.
WANG Zhao, LUO Yi-dao, XIAO Heng-lin, et al. Experimental study on suction characteristics of loess in Yuncheng region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 51—54.
- [9] 凌华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水率的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1499—1503.
LING Hua, YIN Zong-ze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1499—1503.
- [10] GALLAGE C P K, UCHIMURA T. Effects of wetting and drying on the unsaturated shear strength of a silty sand[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Unsaturated Soils. Arizona, USA: [s. n.], 2006: 1247—1258.
- [11] 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]//Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils. Arizona, USA: [s. n.], 2006: 1212—1222.
- [12] ZHAN L T, CHARLES W W N. Shear strength characteristics of an unsaturated expansive clay[J]. **Can. Geotech. J.**, 2006, 43: 751—763.
- [13] 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—427.
MENG Qian-ling, YAO Hai-lin, QIU Lun-feng. The contribution of matric suction to shear strength of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 423—427.
- [14] VANAPALLI S K, Fredlund D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. **Can. Geotech. J.**, 1996, 33: 379—392.
- [15] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1—9.
SHEN Zhu-jiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(2): 1—9.
- [16] FUTAI M M, ALMEIDA M S S, LACERDA W A. The shear strength of unsaturated tropical soil in Ouro Preto, Brazil[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils. Arizona, USA: [s. n.], 2006: 1200—1211.
- [17] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001, 32(7): 79—83.
DANG Jin-qian, Li Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001, 32(7): 79—83.
- [18] 卢肇钧. 黏性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 1—9.
LU Zhao-jun. Problems on the research of shear strength of clayey soils[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(4): 1—9.
- [19] 中国建筑科学研究院. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [20] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420—425.
YANG Qing, ZHANG Hui-zhen, LUAN Mao-tian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 420—425.