

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.003

非饱和粘土路基平衡湿度空间分布特征及预估

邱欣¹, 杨青¹, 游庆龙²

(1. 浙江师范大学工学院, 浙江金华 321004; 2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064)

摘要:通过室内外试验探讨了非饱和粘土路基平衡湿度沿道路横断面的空间分布特征,并基于非饱和土力学基本理论,采用滤纸法测定了不同含水量土样的基质吸力,标定了反映含水量与基质吸力单值函数关系的土水特征曲线模型,建立了大气降水/蒸发影响区以外非饱和粘土路基平衡湿度的预估方法。研究表明,近中央分隔带和路肩处的上部路基土的平衡湿度受大气降水/蒸发的影响显著;大气降水/蒸发影响区以外的路基土平衡湿度主要受控于地下水水位的影响;Fredlund&Xing模型可较好地表征非饱和粘性路基土湿度和基质吸力的相关关系,模型参数拟合结果具有较高的可靠性;地下水水位控制区粘土路基平衡湿度预估结果与试验测试值之间具有较高的一致性,预估方法合理可靠。

关键词:平衡湿度;粘土路基;基质吸力;土水特征曲线

中图分类号:U416.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0015-06

Distribution Characteristics and Prediction of Equilibrium Moisture of Non-saturated Clay Subgrade

Qiu Xin¹, Yang Qing¹, You Qinglong³

(1. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, P. R. China;
2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,
Xi'an 710064, P. R. China)

Abstract: The space distribution characteristics of equilibrium moisture of non-saturated clay subgrade were surveyed along the road cross-section by the in-situ and laboratory tests. Based on the basic theory of unsaturated soil mechanics, matric suctions of soil samples with different kinds of moisture condition were determined and the soil-water characteristic curve model was calibrated to reflect a single-valued function relationship between water content and matric suction of clay soils. Combining the above results, an estimation method of the equilibrium moisture of the unsaturated clay subgrade outside the affected zone of atmospheric precipitation/evaporation was established. The results show that the atmospheric precipitation/evaporation has significant effect on moisture condition of the subgrade soil located in the upper part of the subgrade near the central reserve and hard shoulders. However, equilibrium moisture of subgrade soil outside the affected zone of atmospheric precipitation/evaporation is mainly controlled by the impact of the groundwater table. Fredlund & Xing model can be used to characterize the relationship between the unsaturated clay soil moisture and matric suction, and the fitting results of model parameters have high reliability. A consistency between the predictive results and the experimental data shows the presented model is accurate and credible.

Key words: equilibrium moisture; clay soil subgrade; matric suction; soil water characteristic curve

收稿日期:2012-07-15

基金项目:浙江省自然科学基金(LY12E08002)

作者简介:邱欣(1978-),男,副教授,博士,主要从事路基路面结构力学行为及材料性能研究,(E-mail)xqiu@zjnu.cn.

路基一般是属于经过开挖、重塑和再压实的土，且位于地下水位上方，大多都属非饱和土^[1]，其湿度状态常年受到地下水位升降、降水与蒸发、内部排水条件等因素的影响，路基湿度在使用期内会逐渐发生演变，通常由建成初期的最佳压实含水量状态逐渐变化为服务运行期的平衡含水量状态，进而导致路基结构支撑条件发生变化^[2]。因此，探求既有路基内部平衡湿度状态，并提出有效的预估方法是对路基进行正确设计与评价的关键^[3]。近年来，广大学者从不同角度对非饱和路基土湿度状态的演化规律及相关影响因素进行了广泛研究，取得了一些有代表性的研究成果。杨洋等^[4]分析了大气作用下含水量、渗透系数及水蒸气扩散能力等因素对膨胀土路基蒸发强度的影响规律；杨果林等^[5]通过室内模型试验研究了大气干/湿循环作用对非饱和土路基湿度的影响特点；Witczak 等^[6]研究发现路基湿化现象明显，进而影响路基结构的承载能力，并提出了路基回弹模量与湿度之间的关系方程；杨树荣等^[7]研究发现道路使用 3~5 a 后粘性路基土的含水率会由原先最佳含水率逐渐增加至平衡含水率，一般情况下平衡含水率下土的塑限至少会增加 20%~30%。由此可知：外界环境的诸多因素将对非饱和路基土的湿度状态产生影响，并最终导致路基湿度向平衡湿度状态的方向演化，但有关非饱和粘性路基土平衡湿度空间分布特征以及预估方法的研究迄今尚未见报道。基于此，本文拟通过试验路现场布点，采用室外钻心取样，室内含水量测试的方法，探求非饱和粘土路基湿度状态沿道路横断面的空间分布特征，并基于非饱和土力学基本理论，利用基质吸力及土水特征曲线的最新研究成果，提出地下水位控制区非饱和粘土路基平衡湿度的预估方法。

1 路基湿度状况空间分布特征

1.1 土样基本物性指标

根据现行《公路土工试验规程》中路基土的分类标准，试验路代表性粘性路基土（取土点位于沪宁高速公路上海段 K270 处）的筛分曲线，如图 1 所示，其基本物理性质指标，见表 1。

表 1 土样基本物理性质指标

土样	$\gamma_{dmax}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$\omega_{opt}/$ %	G_s	$\omega_L/\%$	$\omega_P/\%$	I_P
沪宁 K270	1.94	13.2	2.75	33.5	21.5	12.0

1.2 试验路测点布设方案

铣刨试验段上承路面结构后（2010 年 9 月），利用螺旋钻在试验段路基顶面进行了路基内不同深度

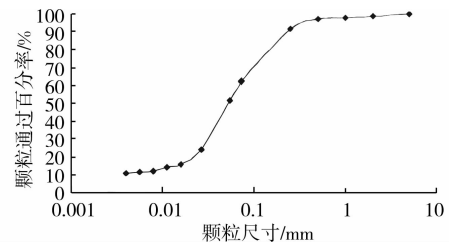


图 1 土粒径分布曲线

的取土试验，并在室内进行了含水量测试。取土位置路基填高为 3 m，横断面上取土点位总计 6 个（测点 A~测点 F）；每个点位 0~0.6 m 深度范围内取土间距为 0.1 m，0.6~3.2 m 深度范围内取土间距为 0.2 m，总计 19 个点位。具体布设方案，如图 2 所示。

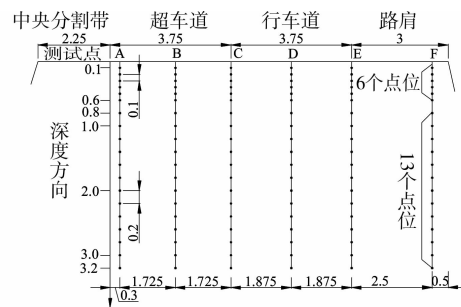


图 2 测点布置图(单位:m)

1.3 测试结果与分析

道路横断面上不同点位的既有路基土湿度沿深度方向的分布规律，见图 3~8。

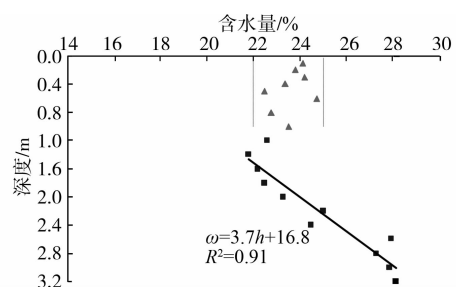


图 3 测点 A 湿度纵向分布特征

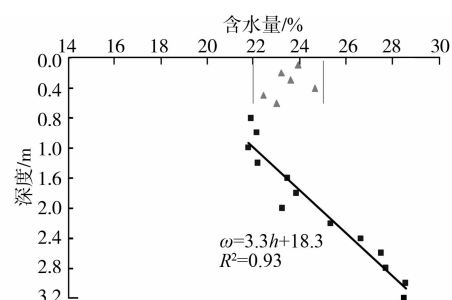


图 4 测点 B 湿度纵向分布特征

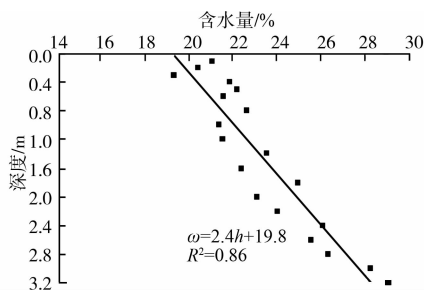


图 5 测点 C 湿度纵向分布特征

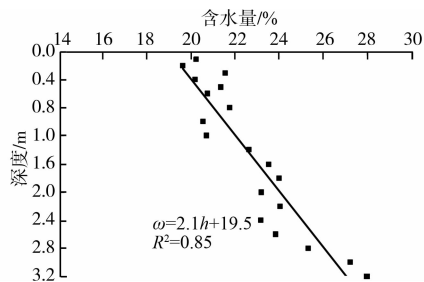


图 6 测点 D 湿度纵向分布特征

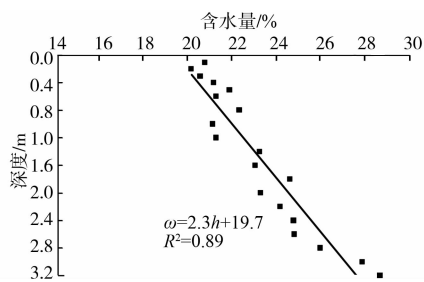


图 7 测点 E 湿度纵向分布特征

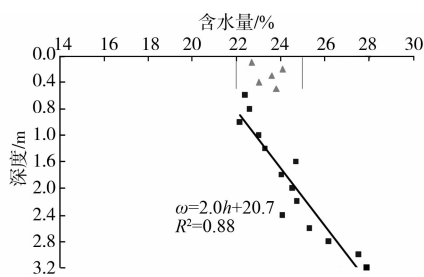


图 8 测点 F 湿度纵向分布特征

1.4 测试结果与分析

由上述测试结果可知:1)在靠近中央分隔带位置的点位处(A点和B点),路基土湿度沿深度方向的分布规律呈现了相同的变化趋势,上部路基土的湿度在一定深度范围内波动(22%~25%,平均值为23.5%),但随距中央分隔带距离的增加,其湿度波动沿深度方向有所减低,由1m左右变化为0.6左右;而下部路基土的湿度呈现了随深度的增加而逐渐增大的特点。2)行车载荷作用区下部测试点(C

点、D点和E点)路基土湿度沿深度方向的分布特征基本相同,在整个路基填高范围内,湿度随深度的增加而逐渐增大。3)在靠近路肩的边缘(F点),路基土沿深度方向的分布规律与靠近中央分隔带点位的湿度分布规律近乎相同,上部路基土湿度在0.5m深度范围内波动(22.7%~24.2%,平均值为23.4%),下部路基土的湿度呈现了随深度的增加而逐渐增大的特点。

产生上述粘性路基土湿度空间分布特征的主要原因在于:1)大气降水浸湿无硬化处理的中央分隔带内的土体,并通过渗流作用向路基中部扩散,致使近中央分隔带一定横向范围内(距超车道边缘石2.2m左右)的顶部路基土湿度增大,且在大气蒸发趋于稳定后,其湿度在一定范围处于平衡。而平衡湿度深度方向影响范围随距中央分隔带距离的增加而下降(由1m逐渐过渡到0.6m)的主要原因在于土颗粒之间水分子作用力的下降。2)大气降水/蒸发影响区以外的路基土(主要是指车辆载荷作用区路基土以及道路两侧中下部路基土),通过土内基质吸力的吸附作用,致使地下水源源不断的浸润路基土,但吸附作用力随吸附作用点与地下水位距离的增加,其值在减弱,进而使路基土湿度呈现由底至顶,先大后小的趋势,此时湿度状态主要由地下水位控制。3)一般认为路肩处相对薄弱,大气降水很容易渗透到路肩结构中,进而导致路肩处上部路基土湿度有所增加,并在大气蒸发趋于稳定后,其湿度在一定范围处于平衡。

2 地下水位控制区粘性路基土平衡湿度预估

2.1 预估实施方案

路基土呈非饱和状态,其不同于饱和土的本质原因在于基质吸力的存在,而描述基质吸力与含水量之间热力学关系的土水特性曲线(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)是联系湿度和吸力关系的纽带,反映了土中含水量与基质吸力的单值函数关系^[8],故通过基质吸力可间接地反映出路基土的湿度状况。基于此,本文提出的地下水位控制区粘土路基平衡湿度预估分析方案的实施方案如下:

1)通过滤纸法,测定土样基质吸力,并测量对应土样的体积含水量。

2)绘制SWCC曲线,拟合常见SWCC模型,并对模型参数进行标定。

3)预估地下水位控制区粘土路基内基质吸力,结合标定的SWCC模型,预估路基土平衡湿度。

4) 对比分析平衡湿度预测与实测结果, 检验该粘土路基平衡湿度预估方法的合理性。

2.2 土样含水量与基质吸力对应关系确定

采用滤纸法间接地测量土中基质吸力的基本原理是在封闭的恒温环境下, 使滤纸的含水量与土样中的基质吸力保持平衡, 再由滤纸率定曲线(基质吸力 ψ 与滤纸含水率 w_f 之间的关系曲线), 得到土样基质吸力。测试时滤纸型号为 Whatman No. 42 ($\Phi = 5.5 \text{ cm}$), 率定曲线, 如式(1)、(2)所示^[9]。具体测试步骤如下:

$$\lg \psi = 4.945 - 0.0673w_f \quad w_f < 47 \quad (1)$$

$$\lg \psi = 2.909 - 0.0229w_f \quad w_f \geq 47 \quad (2)$$

1) 按压实度 95% 成型试件, 在最佳含水量 (Optimum Moisture Content, OMC) 两侧 $\pm 4\%$ 范围内准备 7 个圆柱形的土样 ($h = 12.7 \text{ cm}$, $\Phi = 10 \text{ cm}$)。

2) 利用线锯将土样试件在中间锯开, 埋入滤纸, 并保证滤纸与试样良好接触。

3) 将 3 张干燥滤纸 (Whatman No. 42) 放置于两块土样之间, 其中中间滤纸用来量测土中的基质吸力, 而外面两张用来保护中间滤纸免于被土样污染。

4) 将待测试样放置于密封良好的储罐 14 d 后, 量测滤纸含水率, 并利用式(1)、(2)计算基质吸力。

5) 测量土样体积含水量 θ_w , 绘制土样 SWCC, 并进行模型参数标定。

基于上述测试步骤, 土样含水量与基质吸力的对应测试结果见表 2。

表 2 土样基质吸力与含水量测试结果

土样编号	$w_f/\%$	ψ/kPa	$\theta_w/\%$
1	27.25	1601.72	9.95
2	35.37	373.08	14.89
3	43.07	93.75	18.18
4	58.18	42.32	23.01
5	103.93	10.21	25.14
6	146.12	2.75	29.01
7	164.64	1.55	33.42

2.3 SWCC 拟合及模型参数标定

目前, 描述 SWCC 的数学模型大多是根据经验、土体结构特征和曲线形状而建立的, 其表达式在形式上具有幂函数、对数函数的特征^[10]。借助土样基质吸力的量测结果, 分别采用式(3)、(4)所对应的 Fredlund 等^[11]所建模型、van Genuchten 等^[12]所建模型, 对实测粘性土样在不同含水量条件下的基质吸力进行了拟合分析, 拟合曲线如图 9。

$$\theta_w = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h_s}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \cdot \frac{\theta_s}{\left\{ \ln\left[\exp(1) + \left(\frac{h_s}{a}\right)^b \right] \right\}^c} \quad (3)$$

式中: θ_w 为体积含水量; h_s 为基质吸力; θ_s 为饱和体积含水量; h_r 为与剩余体积含水量对应的基质吸力; a 、 b 、 c 为待定参数。

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

式中: θ_r 为剩余体积含水量; 其它参数同式(3)。

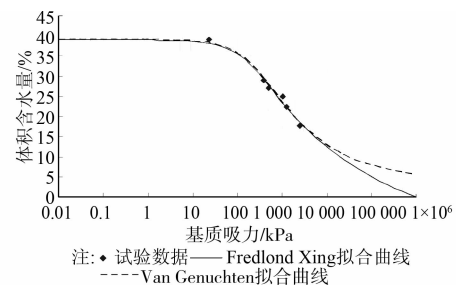


图 9 沪宁 K270 土组的 SWCC 拟合曲线

从拟合曲线可知, Fredlund 等所建模型和 van Genuchten 等所建模型, 在大部分含水量范围内与试验数据吻合较好, 但在接近于完全干燥状况时, Fredlund 等所建模型计算含水量接近于 0, 更符合理论情况, 而此时 van Genuchten 等所建模型的误差较大。鉴于 Fredlund 等所建模型能够在较大含水量范围条件下保持连续的特点, 分析中以此模型作为关联非饱和粘性路基土基质吸力与湿度的关系纽带, 其对应的模型参数标定结果, 见表 3。

表 3 土-水特征曲线参数标定

土样	模型参数				R^2	进气值 ϕ_e/kPa
	a	b	c	h_r/kPa		
沪宁 K270	7.32	0.75	0.69	617.45	0.97	1.70

2.4 路基土基质吸力及平衡湿度预估

Yoder 等^[13]通过室内试验发现粘土路基内某点的基质吸力与其高出地下水位的距离有关, 并受到毛细水上升高度的影响和地下水位的控制。曹长伟^[14]通过试验路测试发现当粘土路基处于地下水毛细区控制范围时, 路基土基质吸力主要受地下水位影响, 此时路基湿度在基质吸力、重力和积土荷载的共同作用下一般处于平衡湿度状态, 并提出了受地下水位影响的路基土基质吸力预估方程, 如式(5)所示。

$$h_s = h \cdot \gamma_w \quad (5)$$

式中: h_s 为基质吸力; h 为路基内计算点与地下水之间距离; γ_w 为水的重度。

由此可见,合理判定试验路毛细水上升的影响高度,是利用式(4)预估路基内不同深度基质吸力的关键。当前,通常采用海森公式估算不同土质类型的毛细水上升高度^[15],如式(6)所示。

$$h_0 = \frac{C}{ed_{10}} \quad (6)$$

式中: h_0 为毛细水上升高度; e 为土的空隙比; d_{10} 为土有效粒径; C 为与土粒形状系数,一般取 2.5×10^{-5} 。

通过估算,试验路取土地下水通过毛细作用在路基内上升的高度为4 m,这与曹长伟通过大量的室内外试验,推荐的粘土毛细水上升高度在3~9 m之间的研究成果相吻合^[14]。为了进一步观察地下水位的深度,采用地下水位仪对试验路地下水位随月份的波动规律进行了跟踪观测,相同观测年份不同月份条件下的观测结果,见图10。由此可知,试验路地下水位常年在距地表约0.5 m的附近波动。

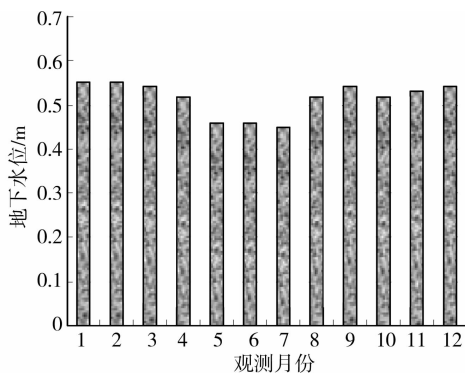


图10 地下水位随月份变化规律

上述分析结果进一步表明,试验路取土点处(路基填高为3 m)路基结构整体上处于毛细水上升高度的控制影响范围之内,因此可采用式(5)对路基不同深度处的基质吸力进行预估。结合已标定的Fredlund等所建模型对路基内不同点位的湿度进行了预估分析,结果如图11所示。

2.5 预估模型可靠性验证

为验证上述预估方法的有效性,分析中将平衡湿度平均测试结果与模型预估结果进行了对比分析,如图12所示。

两者之间具有较高的相关性,预估方法合理可靠。进而表明对于水网密集区的粘土路基而言,地下水位控制区粘土路基的平衡湿度完全由地下水位控制。在合理预估路基内某点基质吸力的基础上,结合土水特征曲线,可实现对路基土平衡湿度进

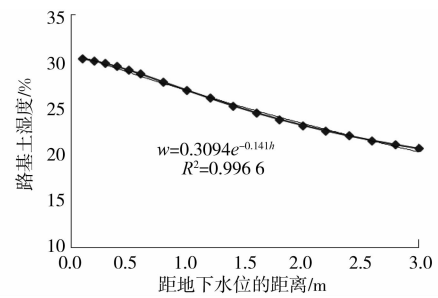


图11 路基土平衡湿度预估结果

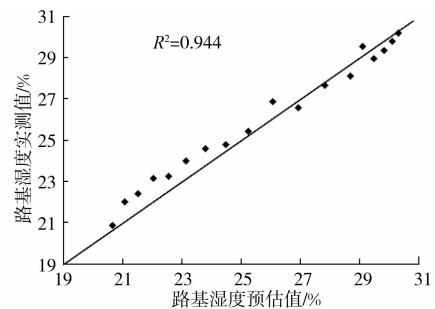


图12 路基土湿度实测值与预估结果对比

行预估。研究成果为合理评价路基土的平衡湿度状态提供了新的视角和途径,为后阶段合理评价路基土的实际工作状态提供了准确的湿度参考值。

3 结论

通过室内外试验探讨了非饱和粘土路基平衡湿度沿道路横断面的空间分布特征,同时基于非饱和土力学基本理论,采用滤纸法测定了土样基质吸力,标定了反映含水量与基质吸力单值函数关系的土水特征曲线模型,建立了大气降水/蒸发影响区以外非饱和粘土路基平衡湿度的预估方法。具体分析结论如下:

1)近中央分隔带和路肩处的上部路基土的平衡湿度受大气降水/蒸发的影响显著,其含水量相对较大,并在一定范围内波动。

2)大气降水/蒸发影响区以外的路基土处于地下水毛细区控制范围之内,路基土基质吸力主要受地下水位影响,此时路基湿度在基质吸力、重力和积土荷载的共同作用下一般处于平衡湿度状态。

3)Fredlund等所建模型可较好地表征非饱和粘性路基土湿度和基质吸力的相关关系,模型参数拟合结果具有较高的可靠性。

4)在合理预估路基某点基质吸力基础上,结合已标定的土水特征曲线模型,可实现对受地下水位控制的粘土路基平衡湿度的预估。预估值与试验测试结果具有较高的一致性。

参考文献:

- [1] Beddoe R A, Take W A, Rowe R K. Water-retention behavior of geosynthetic clay liners [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137:1028-1038.
- [2] Beddoe R A, Take W A, Rowe R K. Development of suction measurement techniques to quantify the water retention behaviour of GCLs [J]. *Geosynthetics International*, 2010, 17:301-312.
- [3] Zhang X, Lytton R L. Modified state-surface approach to the study of unsaturated soil behavior. Part III: Modeling of coupled hydromechanical effect [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49:98-120.
- [4] 杨洋,姚海林,卢正. 蒸发条件下路基对气候变化的响应模型及影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5):1209-1220.
Yang Y, Yao H L, Lu Z. Model of subgrade soil responding to change of atmosphere under evaporation and its influential factors [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5):1209-1224.
- [5] 杨果林,刘义虎. 不同气候条件膨胀土路堤土压力的变化规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(8):948-955.
Yang G L, Liu Y H. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8):948-955.
- [6] Witczak M W, Houston W N, Andrei D. Resilient modulus as function of soil moisture: a study of the expected changes in resilient modulus of the unbound layers with changes in moisture for 10 LTTP sites [R]. Tempe: Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, 2000.
- [7] 杨树荣,拱祥生,黄伟庆,等. 非饱和粘性路基土回弹模量之研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(2):225-229.
Yang S R, Gong X S, Huang W Q, et al. Resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2):225-229.
- [8] Oh S, Lu N, Kim Y K, et al. Relationship between the soil-water characteristic curve and the suction stress characteristic curve; experimental evidence from residual soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138:47-57.
- [9] Rainwater N R, McDowell L A, Drumm E C. Measurement of total soil suction using filter paper: investigation of common filter papers, alternative media and corresponding confidence [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35:295-304.
- [10] Zhai Q, Rahardjo H. Determination of soil-water characteristic curve variables [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 42:37-43.
- [11] Fredlund D G, Xing A. Equation for the soil-water characteristic curve [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31:521-532.
- [12] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E. Model for the prediction of shear strength with respect of soil suction [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33:347-392.
- [13] Yoder E J, Witczak M W. Principles of pavement design [M]. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [14] 曹长伟. 路基湿度状况及模量调整系数研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [15] Zornberg J G, McCartney J S. Centrifuge permeameter for unsaturated soils. I: Theoretical basis and experimental developments [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(8):1051-1063.

(编辑 王秀玲)