

非饱和泥岩土水特征曲线试验及数学模型研究

张唐瑜¹, 马丽娜^{1,2}, 张戎令^{1,2,3}, 王起才^{1,2}, 王斌文¹, 姚裕春⁴

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 卡迪夫大学 工程学院, 英国 CF24 3AA; 4. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 非饱和土对水分存在吸力,严重影响土体的工程特性。以一高速铁路地基泥岩为研究对象,应用滤纸法研究含水率及压实作用对其吸力的影响。研究表明:随着含水率的增加,基质吸力及总吸力呈非线性减小,减小过程分为骤减阶段、速率减小阶段和吸力稳定阶段;在低含水率情况下,土体中水分以气态形式进行迁移,此时接触滤纸量测的吸力为总吸力;接触滤纸的平衡含水率随着土体含水率的增加呈线性增加;干密度对低饱和度下土样的总吸力影响较大,同一饱和度下土样干密度越大,则基质吸力越大;在单对数坐标中,土水特征曲线近似呈“S”形,选用典型的SWCC模型对试验数据进行了拟合,拟合效果良好。试验结果可用于该类土体相关工程特性的预测及建模。

关键词: 非饱和泥岩; 基质吸力; 土水特征曲线; 数学模型

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0225-05

Experimental and mathematical modelling study on soil water characteristic curve of unsaturated mudstone

ZHANG Tangyu¹, MA Lina^{1,2}, ZHANG Rongling^{1,2,3}, WANG Qicai^{1,2}, WANG Binwen¹, YAO Yuchun⁴

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. School of Engineering, Cardiff University, CF24 3AA, UK; 4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chendu 610031, China)

Abstract: The unsaturated soil has the suction force on soil water, which seriously affects the engineering characteristics of the soil. In this paper, the mudstone of a high-speed railway foundation is taken as the research object, and the influence of water content and compaction on its suction is studied by the filter paper method. The results are as follows: the matrix suction and total suction are nonlinearly reduced as increasing soil water content, and the reduction process is divided into a sudden reduction phase, a gradual reduction phase and a suction stabilization phase. In the case of low water content, moisture migrates in a gaseous form, and the suction force measured by the contact filter paper is the total suction force. The equilibrium moisture content of the contact filter paper increases linearly with the increase of the soil moisture content. Dry density has a great influence on the total suction of soil samples at low level of saturation, the greater the dry density of the soil sample at the same saturation, the greater the suction of the matrix. In the single logarithmic coordinates, soil water characteristic curve is approximately in a “S” shape, and it can be well fitted by a typical soil-water characteristic(SWCC) model. The test results of this study can be used to predict and model the engineering properties of this kind of soils.

Key words: unsaturated mudstone; matrix suction; soil-water characteristic curve; mathematical model

收稿日期:2019-04-20; 修回日期:2019-05-29

基金项目:青年人才托举工程项目(2015QNRC001); 飞天学者特聘计划项目; 博士后资助项目(2016M602892); 长江学者和创新团队发展计划滚动支持项目(IRT_15R29); 甘肃省高校协同创新科技团队支持计划项目

作者简介:张唐瑜(1995-),男,甘肃白银人,硕士研究生,主要从事岩土及隧道方面的研究。

通讯作者:马丽娜(1985-),女,陕西渭南人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事膨胀性泥岩及隧道工程的科研工作。

1 研究背景

经典土力学的研究对象是饱和土,而在实际工程中遇到的膨胀土地基胀缩、边坡失稳破坏、黄土地基湿陷等多数工程问题所遇到的土体均属于非饱和土^[1]。非饱和土区别于饱和土的根本之处在于非饱和土对水分存在吸力,它与土体的持水性、渗透性、强度和变形等诸多物理力学特性息息相关,水分在土体中的迁移及运动以吸力作为一种驱动势能得以实现^[2]。

非饱和土力学原理在被工程界所广泛接受的同时也使岩土体研究工作发生了巨大的变化,主要体现在理论分析和试验测试方法的改变,吸力是影响非饱和土特性的主要因素,同时也是非饱和土研究中最难量测的参数之一^[3-4]。Fredlund等^[5]曾指出吸力在非饱和土研究中的重要性与其孔隙水压力在饱和土研究中的重要性相当。由此可见,在非饱和土的研究中,量测土体的吸力具有至关重要的作用。

吸力的量测包括直接测量法(张力计、轴平移技术)和间接测量法(热传导、滤纸法、湿度计)两类^[6]。滤纸法属于间接测量法,具有操作简便、量程大等诸多优点,得到了广大学者的认可。陈东霞等^[7]以厦门地区残积土为研究对象,采用滤纸法探讨了竖向应力、干密度以及干湿循环对脱湿曲线的影响;宋会娟等^[8]采用滤纸法和直剪法分析了基质吸力对网文红土抗剪强度的影响;吴珺华等^[9]采用滤纸法量测了不同含水率情况下膨胀土试样的基质吸力和总吸力,获得了不同含水率及不同干密度情况下土体的总吸力与滤纸离土样距离的关系;美国材料与试验协会为了规范该试验的具体操作,将滤纸法量测岩土体的吸力写入了标准^[10]。

上述研究均存在区域性及工程具体性,本文依托一实际高速铁路,钻取典型地基段的膨胀泥岩,采用滤纸法量测泥岩的吸力,探讨压实作用和含水率对非饱和泥岩总吸力和基质吸力的影响,采用对数函数建立了适用于该类土体的SWCC模型,为更好地研究该类土体的持水特性、渗透性、强度等物理特性提供理论支撑。

2 试验材料与方法

2.1 试验土样

试验土样取自某高速铁路客运专线一典型上拱病害段,马丽娜等^[11]、薛彦瑾等^[12]研究发现该处地基土为“弱”膨胀泥岩,含水率增加是其膨胀的原

因。相对于普通铁路工程而言,该类土的膨胀变形对铁路路基影响极小,常忽略不计,而高速铁路无砟轨道对轨面平顺性要求极高^[13],该土样的弱膨胀性已严重影响列车的平稳运行。按照规范^[14]测得其基本物理力学指标如表1所示。

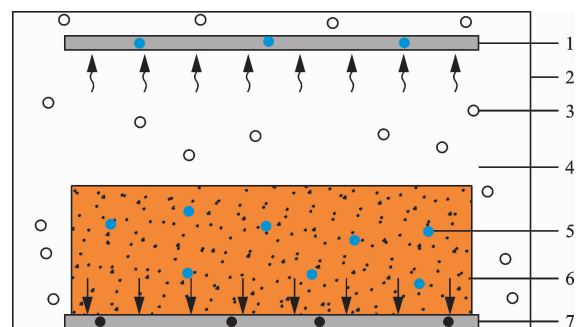
表1 试验土样基本物理力学指标

液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	自由膨 胀率/%	阳离子交换量/ (mmol·kg ⁻¹)	土粒 比重
41.47	21.12	20.27	37.21	130.19	2.74

由表1可知,该土样的塑性指数大于17,属于黏土,黏土对水的吸力往往与重力对水的作用相当^[2],因此研究该土的吸力特性尤为重要。

2.2 滤纸法基本原理

非饱和土中存在的吸力对其工程特性有着十分重要的影响,吸力由基质吸力和渗透吸力组成,基质吸力取决于土体的微结构,如:表面张力、孔径、毛细作用;渗透吸力取决于溶解于土中水的盐分^[1-2]。土和滤纸均是多孔材料,均有持水及吸水的能力,滤纸法量测土体的吸力遵循热力学平衡原理,滤纸法试验原理示意图如图1所示。将土样与滤纸置于密封容器中,由于土样中的水分及空气中的水分存在自由能差且滤纸对水分存在吸力,使得水分以液态或者气态的形式在滤纸-空气-土样之间相互迁移,水分迁移平衡时,土样的吸力与滤纸相同,通过称量滤纸的含水率来反算土样的吸力^[15]。滤纸法量测土体吸力分为接触法和非接触法,当滤纸与土样不接触时,水分只以气态形式迁移,此时非接触滤纸量测的吸力为总吸力;当滤纸与土样接触时,水分以液态形式进行迁移,同时,溶解盐会随水分的运动一起迁移至接触滤纸上,致使接触滤纸量测的吸力为基质吸力而不体现渗透吸力的作用。



注: 1—非接触滤纸; 2—密封容器; 3—空气中水分子; 4—空气; 5—土样中水分子; 6—试验土体; 7—接触滤纸。

图1 滤纸法试验原理示意图

2.3 试验操作步骤

选用杭州新华纸业有限公司生产的“双圈”NO. 203型滤纸作为试验滤纸,该滤纸率定曲线稳定性高^[16],属于定量慢速滤纸,滤纸直径7 cm。试验方法参照参考文献[10],具体操作如下:

(1)将现场取回土样碾细并过2 mm筛;

(2)将过筛土样置于80°恒温烘箱中进行烘干以消除土样中原有水对后期试样制作的影响;

(3)以2%为梯度配制含水率4%~22%的土样,为使土样含水率均匀,将土样密封保湿24 h;

(4)使用模具及YP-20TB型液压式压片机制备不同含水率情况下不同干密度的土样(1.40、1.60、1.80 g/cm³),土样直径为61.8 mm,高度为20 mm。为减小误差,每组样制备2个平行试样,共计60个土样;

(5)使用500 mL透明密封盒作为试验容器,参照图1将接触滤纸、土样、非接触滤纸依次放入密封盒中,其中非接触滤纸放置于不锈钢支架上;

(6)在密封盒顶部包裹两层保鲜膜后加盖密封容器,并使用胶带箍紧以防止盒内的水分外泄;

(7)文献[10]要求平衡时间至少7 d,为使水分充分平衡,本试验平衡时间为10 d;

(8)吸力平衡后使用精度0.001 g的分析天平量测滤纸的含水率,量测工作使用镊子进行滤纸及铝盒的夹取,操作人员全程佩戴橡胶手套进行操作,具体操作如下^[10]:①称量“冷铝盒”质量 T_c ;②将滤纸置于铝盒内,称量“冷铝盒+湿滤纸”质量 M_1 ;③将冷铝盒及湿滤纸放入烘箱内进行烘干,烘箱温度105°,烘制时间3 h;④烘干结束后,称量“热铝盒+干滤纸”质量 M_2 ;⑤将干滤纸从铝盒中取出,量测热铝盒的质量 T_h ;⑥按照公式(1)进行滤纸吸水量及含水率的计算。

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad (1)$$

式中: M_w 为滤纸吸水质量,g; M_1 为冷铝盒+湿滤纸质量,g; M_2 为热铝盒+干滤纸的质量,g; T_h 为热铝盒质量,g; T_c 为冷铝盒质量,g。

3 试验结果与分析

滤纸法通过量测水分迁移平衡时滤纸的含水率间接得到土样的吸力,该法的关键是获得滤纸的率定方程,王钊等^[17]、白福清等^[3]分别对“双圈”NO. 203型滤纸的基质吸力率定方程和总吸力率定方程进行了测定,见公式(2)~(4)。

$$\omega_{fp} = \frac{M_w}{M_2 - T_h} \times 100\% \quad (2)$$

$$\lg h_t = \begin{cases} -0.0700\omega_{fp} + 5.2570, & \omega_{fp} \leq 41\% \\ -1.1940\omega_{fp} + 51.321, & \omega_{fp} > 41\% \end{cases} \quad (3)$$

$$\lg h_m = \begin{cases} -0.0767\omega_{fp} + 5.493, & \omega_{fp} \leq 47\% \\ -0.0120\omega_{fp} + 2.470, & \omega_{fp} > 47\% \end{cases} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中: h_t 为总吸力,kPa; h_m 为基质吸力,kPa; ω_{fp} 为滤纸含水率,%。

通过公式(2)、(3)和(4)即可得到土样的总吸力和基质吸力。

3.1 滤纸法试验结果

在滤纸法试验中,土体的含水率既影响土体本身的吸力,又与滤纸平衡含水率相关。以土样的质量含水率为横坐标、土体吸力及滤纸平衡质量含水率为纵坐标进行绘图,如图2、3所示,其中图2吸力为滤纸法中非接触滤纸量测的总吸力,图3吸力为接触滤纸量测的基质吸力。以干密度1.4 g/cm³土样为例进行论述,其他土样的(土体含水率—滤纸平衡含水率—土体吸力)规律与之相同,不再进行赘述。

由图2、3可知,随着土样含水率的增加,滤纸法量测得到的基质吸力及总吸力均呈非线性减小,均由吸力骤减阶段、吸力减小速率降低阶段和吸力稳定阶段组成;当土样含水率低于12%时,土样含水率越小,总吸力和基质吸力越大;当含水率高于12%时,总吸力和基质吸力受含水率影响较小;土样含水率为4%时,量测的土样总吸力和基质吸力约为73 000 kPa,由此可见,在土样含水率极低情况下,总吸力和基质吸力几近相同,此时接触滤纸即可以量测基质吸力,又可以量测总吸力,即在极低含水率情况下,水分是以气态形式进行迁移及运动。观察滤纸法中接触滤纸与非接触滤纸与土体含水率关系可知,随着含水率的增加,非接触滤纸平衡含水率呈非线性增加,而接触滤纸平衡含水率随着土样含水率的增加呈线性增大。将各不同干密度土样接触滤纸平衡含水率进行整理,如表2所示。由表2可知,接触滤纸平衡含水率与土样含水率线性相关,相关系数极高。

表2 接触滤纸平衡含水率与不同干密度土样含水率关系

干密度/(g·cm ⁻³)	拟合方程	相关系数
1.4	$y = 2.003x + 2.259$	0.9828
1.6	$y = 1.936x + 1.986$	0.9468
1.8	$y = 1.943x + 1.411$	0.9698

3.2 吸力与干密度关系

通常情况下,土体含水率与吸力的关系曲线被称为吸力特性曲线,曲线上的含水率可以是土样的质量含水率、体积含水率或者饱和度。其中土体饱和度为土中水的体积与土体总孔隙的比值,该参数可以很好地描述土中水的占比情况,以下分析采用体积含水率表征土体含水率的变化。以土样的饱和度为纵坐标、吸力的对数值为横坐标进行绘图,如图4、5所示,其中图4表示总吸力与土样含水率关系;图5表示基质吸力与土样含水率关系。

由图4、5可知,在饱和度较低时,土体的干密度对总吸力影响较大;随着含水率的增加,土体的饱和度也逐渐增加,当饱和度达到50%以后,不同干密度土样的总吸力趋于相同,由此可知,当饱和度较高时,干密度对土样总吸力影响较小;滤纸法量测的不同干密度土样的基质吸力曲线在单对数坐标中近似呈反“S”形分布,且干密度越大,基质吸力曲线越高,即在相同基质吸力情况下,干密度越大的土样所处的饱和度越高,换言之,在同等饱和度情况下,干密度越大,土体对水的吸力越大,究其原因,是由于干密度越大,外界对其的压实作用越大,其内部微孔隙越复杂,该状态下土体的毛细吸力比低干密度土样的大,因此,在同一饱和度下,干密度越大的土样,其基质吸力越大。

3.3 典型土水特征曲线模型拟合

含水率与基质吸力的关系被定义为土水特征曲线,该曲线反映在非饱和土中水的迁移能量与土中水分子数量之间的关系^[2]。图5所示的基质吸力曲

线为典型的土水特征曲线,该曲线还不能根据土的物理学性质而分析得出,只能由试验得出。

大部分描述土水特征曲线的数学模型均由试验曲线的形状拟合而来,典型的土水特征曲线方程有 Van Genuchten 模型(简称 V-G 模型)和 Fredlund & Xing 模型(简称 F-X 模型),模型方程如公式5、6所示^[7]。

V-G (1980年)模型:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right]^m} + \theta_r \quad (5)$$

F-X (1994年)模型:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right]\right\}^m} + \theta_r \quad (6)$$

式中: θ 为土样的体积含水率,%; s 为基质吸力, kPa; θ_s 为饱和体积含水率,可根据三相草图计算,%; θ_r 为残余体积含水率,%; a 、 m 、 n 为拟合参数。

本文采用这两种模型对试验土样的土水特征曲线进行拟合,图6为 V-G 模型拟合图,图7为 F-X 模型拟合图,图中曲线为拟合曲线,整理拟合参数,如表3所示。

由图6、7和表3可知,用典型的土水特征曲线模型拟合本次试验数据,相关系数均达到80%以上,得到的结果较为理想,验证了典型土水特征曲线模型的通用性和实用性,因此可以使用典型的 SWCC 模型对该类土体的土水特征曲线进行预测;此外,还可将其用于该类土样持水性、渗透性的研究。

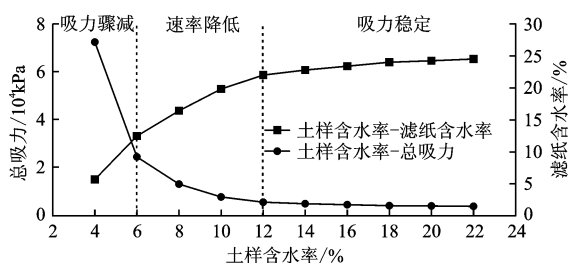


图2 土样总吸力及滤纸平衡含水率与土样含水率关系

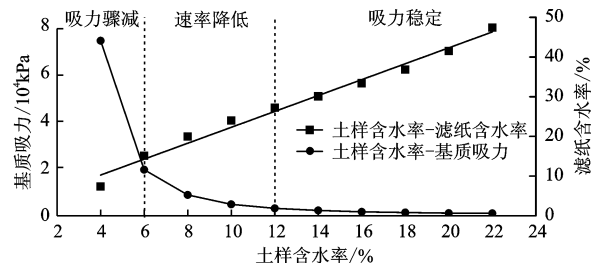


图3 土样基质吸力及滤纸平衡含水率与土样含水率关系

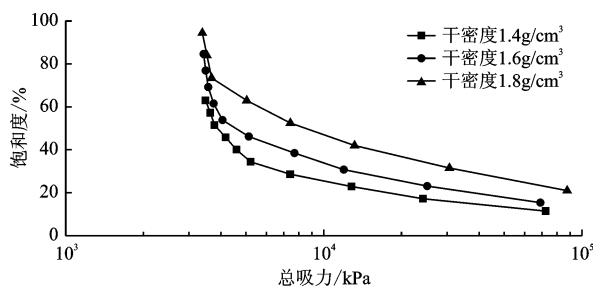


图4 不同干密度土样总吸力特性曲线

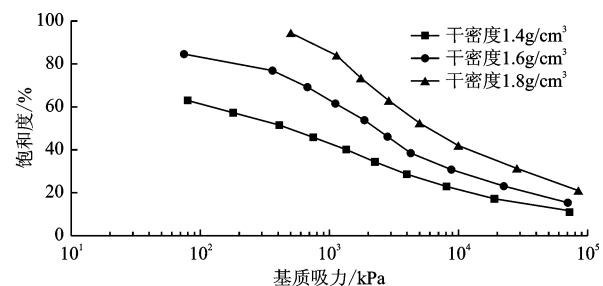


图5 不同干密度土样基质吸力曲线

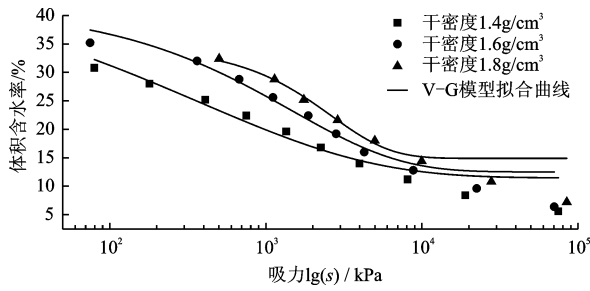


图 6 V - G 模型拟合

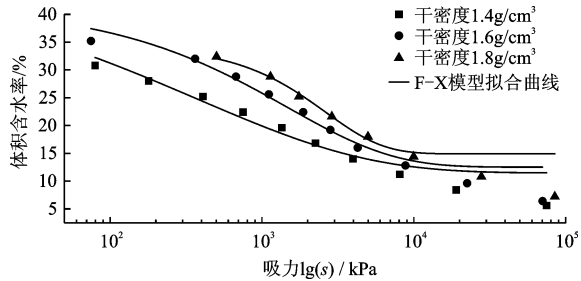


图 7 F - X 模型拟合

表 3 拟合参数表

干密度/ (g · cm ⁻³)	典型 模型	拟合参数			拟合度/ %
		a	m	n	
1.4	V - G	1.69 × 10 ⁸	150.21	0.3851	88.98
	F - X	4.65 × 10 ⁷	589.93	0.3839	88.99
1.6	V - G	3.38 × 10 ⁶	127.75	0.6268	91.71
	F - X	8.94 × 10 ⁶	619.31	0.6233	91.91
1.8	V - G	1.49 × 10 ⁴	8.95	1.2593	80.16
	F - X	1.37 × 10 ⁴	21.39	1.2498	80.15

4 结 论

以一高速铁路弱膨胀泥岩地基为研究对象,采用滤纸法分析了该类土体的基质吸力和总吸力随着干密度和含水率的变化情况,并对土样的土水特征曲线进行了拟合,得到以下结论:

(1)不同干密度状态下土样的基质吸力和总吸力随着含水率的增加呈非线性降低,降低幅度随着含水率的增加逐渐减小。

(2)滤纸法中非接触滤纸平衡含水率随着土样含水率的增加呈非线性增加,接触滤纸的平衡含水率随着土样含水率的增加呈线性增加。

(3)干密度对饱和度较低土样的总吸力影响大,随着含水率的增加,不同干密度土样的总吸力趋于稳定。

(4)在半对数坐标中,该类土体的基质吸力近似呈反“S”形,干密度越大,土水特征曲线越高。

(5)用典型的土水特征曲线模型对试验数据进行了拟合,得到了理想的拟合效果。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Wiley - VCH, 1993.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,张在明,陈愈炯,等译.北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] 白福青,刘斯宏,袁 骄. 滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验 [J]. 岩土力学,2011,32(8):2336 - 2340.
- [4] PINCUS H J, HOUSTON S L, HOUSTON W N, et al. Laboratory filter paper suction measurements [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(2):185 - 194.
- [5] FREDLUND D G, HUANG S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using soil - water characteristic [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4):533 - 546.
- [6] BULUT R, LEONG E C. Indirect measurement of suction [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(6):633 - 644.
- [7] 陈东霞,龚晓南. 非饱和和残积土的土 - 水特征曲线试验及模拟 [J]. 岩土力学,2014,35(7):1885 - 1891.
- [8] 宋会娟,李建中,葛延明. 基质吸力对非饱和和网纹红土抗剪强度影响研究 [J]. 工业建筑,2017,47(12):7 - 10 + 16.
- [9] 吴珺华,彭东豹,袁俊平,等. 滤纸法测定膨胀土总吸力试验及基质吸力预测研究 [J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(3):570 - 574.
- [10] ASTM Standard. Standard test method for the measurement of soil potential (suction) using filter paper: D5298 - 10 [S]. 2010.
- [11] 马丽娜,严松宏,王起才,等. 客运专线无砟轨道泥岩地基原位浸水膨胀变形试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8):1684 - 1691.
- [12] 薛彦瑾,王起才,张戎令,等. 高速铁路地基膨胀土膨胀变形试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(4):690 - 696.
- [13] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路设计规范: TB 10621 - 2014 [S]. 北京:中国铁道出版社,2014.
- [14] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程特殊岩土勘察规范:TB 10038 - 2012 [S]. 北京:中国铁道出版社,2012.
- [15] BULUT R, LYTTON R, WRAY W. Soil suction measurements by filter paper [C]// Asce Civil Engineering Conference. 2001.
- [16] 白福青,刘斯宏,袁 骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究 [J]. 岩土工程学报,2011,33(6):928 - 933.
- [17] 王 钊,杨金鑫,况娟娟,等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用 [J]. 岩土工程学报,2003,25(4):405 - 408.