文章编号：1674－9057(2018)01－0112－05 doi:10.3969/j.issn.1674－9057.2018.01.016

南宁地区非饱和残积黏土持水性试验

张爱伟[1]，张家文[2]，于明波[2,3]，牛 庚[3]，颜荣涛[3]

(1. 化学工业岩土工程有限公司，南京 210044；2. 中国中材集团建材桂林地质工程勘察院，广西 桂林 541002；
3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院，广西 桂林 541004)

摘 要：采用压力板法(吸力范围0～1.5 MPa)、滤纸法(0～40 MPa)和盐溶液蒸汽平衡法(吸力范围3～368 MPa)3种方法，对南宁地区残积黏土进行土－水特性试验，获得全吸力范围内的土－水特征曲线。试验结果表明：压实试样初始干密度1.25 g/cm^{3}的进气值为10 kPa，当吸力大于进气值点后，土体由饱和状态进入非饱和状态；土体持水量随着吸力的增加而减小，失水后试样发生收缩变形，考虑土体体积变化后的土－水特征曲线，更能反应其真实持水性，当吸力为367 MPa时，试样含水量为0.76%，可认为当吸力增加至10^6 kPa后，土体持水量趋于0。

关键词：非饱和残积土；土－水特征曲线；压力板法；滤纸法；盐溶液蒸汽平衡法；南宁地区

中图分类号：TU411.91 **文献标志码**：A

0 引 言

南宁市城市轨道交通建设在2010年7月经国务院批准，国家发展和改革委员会正式批复，于2012年12月轨道交通1号线全线土建正式开工。由于南宁地区地质条件复杂，地貌呈现山、丘陵环绕的盆地，建设区内覆盖着大量泥岩、粉砂质泥岩残积风化而成的黏性土，局部揭露厚度可达30多米，且南宁处于北回归线南侧，地处低纬度地区。全年受海洋湿暖气流和北方冷气团的交替影响，是国内气温较高、降水较多的地区；当天气晴朗时，土体逐渐失水而收缩干裂，土体处于非饱和状态，对应的是土水特征曲线的脱湿过程；当降雨时，土体吸水膨胀，对应的是土水特征曲线的吸湿过程，脱吸湿过程中，并不是均匀的，造成了边坡失稳、地基不均匀沉降等工程事故[1]。因此，对其土水特性的研究可以为南宁市第二轮城市轨道交通建设(2015—2021年)以及其他建设工程提供理论数据。

土的持水性可以用土水特征曲线(soil water characteristic curve，SWCC)描述，它是吸力与土体含水率或饱和度之间的关系，在非饱和土力学中有重要地位。对于土体强度、变形和渗透特性有重要影响。

目前，国内外较多学者对不同土体采用了不同方法比较了土体土水特性。Fredlund[2]认为土水方程反映土体土水特征曲线准确度对非饱和土的水力－力学数值模型有决定性作用；孙德安等[3]用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液蒸汽平衡法3种方法控制吸力试验，得到了全吸力范围内南阳膨胀土土－水特征曲线。此外，文献［4－6］对不同工况下粉土、粉质黏土、黏土的土水特征曲线进行了测试，分析不同条件对土体土水特性的影响。不同的制样方法得到的土水特征曲线也会不同，如孙德安等[7]研究了不同制样方法对粉质黏土土水特性的影响。

查阅文献，对南宁地区非饱和残积黏土的土水特性研究很少，更没有考虑全吸力段的土水特性以及体积变化。因此，本文采用3种方法测得全吸力范围内南宁地区非饱和残积黏土的土水特征曲线，以探讨土体吸力与含水率、饱和度的关系。

收稿日期：2016－08－25
基金项目：国家自然科学基金项目（11562007；51309055）；广西自然科学基金创新研究团队项目（2014GXNSFBA118236）
作者简介：张爱伟（1988—），男，硕士，岩土工程专业，334274359@qq.com。
引文格式：张爱伟,张家文,于明波,等.南宁地区非饱和残积黏土持水性试验[J].桂林理工大学学报,2018,38(1):112－116.

1　试验概况

1.1　试验材料

室内试验所用的土样取自南宁五象新区地铁四号线某标段，取土深度 4.0 ~ 6.5 m，按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)方法对土样进行基本物理性质指标测试，并通过微谱技术有限公司对试验土样的阳离子交换量(CEC)和比表面积 S 进行测定，利用 X 射线衍射(XRD)方法对试样矿物粉末进行全岩定量分析，各项指标列于表 1 中，颗粒分析曲线见图 1。由此可确定该试验用土为高液限黏性土。

1.2　试验仪器及试验方案

为了准确获得全吸力土体土水特征曲线，根据不同试验仪器的量程和精度采用了 3 种试验方法：压力板法、滤纸法和饱和盐溶液法。

1.2.1　*压力板法*　采用美国 Soilmoisture 公司生产的压力膜仪(图 2)。测量吸力范围 0 ~ 1.5 MPa，精度为 1 kPa，陶土板的进气值为 15 bar。用蒸馏水将风干试样配成目标初始含水率为 20% 后静置 48 h，采用静压法制备成环刀土样，抽真空饱和后按照试验规程安装试样，保证试样与陶土板紧密接触。逐级施加气压，平衡需要约 7 ~ 10 d，吸力等级为 0→10→20→30→50→80→120→200→300→500→800→1 000 kPa。利用精度为 0.01 g 的天平称量试样质量，游标卡尺测量直径和高度。

1.2.2　*滤纸法*　滤纸法测量吸力范围 0 ~ 40 MPa，采用与压力板法相同的试样，目标含水量 20%，干密度 1.25 g/cm^3，饱和后自然风干至含水率 5% ~ 20%。使用 Whatman No. 42 号滤纸和密封性非常好的 Lock & Lock 保鲜盒，采用与文献［9 - 10］相同的试验方法，密封后放入恒温恒湿箱内，保持恒定的湿度与温度。半个月后待滤纸与土样中水分达到平衡后，测量试样的体积、含水率以及滤纸含水率(图 3)。其率定曲线及计算公式与文献［8 - 9］所采用的方法相同，即

基质吸力：

$$\lg \psi = 2.909 - 0.022\,9w \quad (w \geqslant 47),$$

$$\lg \psi = 4.945 - 0.067\,3w \quad (w < 47);$$

总吸力：

$$\lg \psi = 8.778 - 0.222w \quad (w \geqslant 26),$$

$$\lg \psi = 5.31 - 0.087\,9w \quad (w < 26)。$$

表 1　土的物理化学性质指标

Table 1　Physical and chemical properties of soil

土粒相对密度	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	阳离子交换量/(mmol · g^{-1})	液限/%	塑限/%	塑性指数	粘土矿物成分及含量/%			非粘土矿物成分及含量/%		
						蒙脱石	伊利石	高岭石	石英	赤铁矿	白云母
2.73	34.42	5.49	24.87	54.37	29.50	/	/	60.0	31.0	5.0	4.0

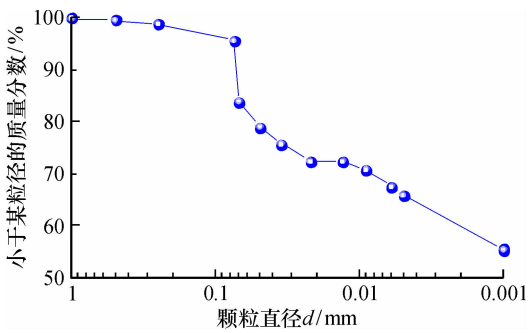


图 1　土颗粒级配曲线

Fig. 1　Soil particle size distribution curve



图 2　EXTRACTOR 土水特征压力膜仪

Fig. 2　Soil water characteristic pressure membrane instrument



图 3　滤纸法试验

Fig. 3　Filter paper method test

式中，ψ 为吸力(kPa)；w 为滤纸含水率(%)。

1.2.3 饱和盐溶液蒸汽平衡法 蒸汽平衡法测量吸力范围 3 ~ 367 MPa，通过控制环境相对湿度提供目前最常用的高吸力控制技术。根据全国物理化学计量技术委员会所给出的《饱和盐溶液标准相对湿度》(OIMLR121)，采用 Kelvin 方程可以用来计算相应的吸力值。

$$\Psi_t = -\frac{RT}{v_{w0}\omega_v}\ln(RH), \quad (1)$$

式中：Ψ_t 为总吸力(MPa)；R 为通用气体常数(R = 8.314 51 J·K^{-1}·mol^{-1})；T 为热力学温度(K)；RH 为相对湿度(无量纲)；v_{w0} 为水的比容(m^3/kg)；ω_v 为水的摩尔质量(kg/mol)。

具体试验过程，将饱和后环刀样平均切成 8 小块，每种溶液上方直接放置两小块饱和试样，进行脱湿试验；将试样风干后放置在溶液上方进行吸湿试验。图 4 为蒸汽平衡法试验照片，一块用于测量吸力平衡后的含水率，另一块用于密度的测量，其体积的测量参照文献［3］的方法。试验中所用的饱和盐溶液所对应的吸力值，如表 2 所示。



图 4 保湿器

Fig. 4 Moisturizing container

表 2 20 ℃时饱和盐溶液及对应吸力值

Table 2 Saturated salt solution and corresponding suction at 20 ℃

饱和盐溶液	*RH*/%	总吸力/MPa
LiBr	6.6	367.54
LiCl·H$_2$O	12.0	286.70
CH$_3$COOK	23.1	198.14
MgCl$_2$·6H$_2$O	33.1	149.51
K$_2$CO$_3$	43.2	113.50
NaBr	59.1	71.12
KI	69.9	48.42
NaCl	75.5	38.00
KCl	85.1	21.82
Na$_2$SO$_3$·7H$_2$O	90.8	13.10
K$_2$SO$_4$	97.6	3.29

2 试验结果与分析

2.1 压力板法试验结果

图 5 为采用压力板法测得干密度为 1.25 g/cm^3 的残积黏土重塑土脱湿土水特征曲线，分别用吸力与质量含水率和饱和度关系表示。

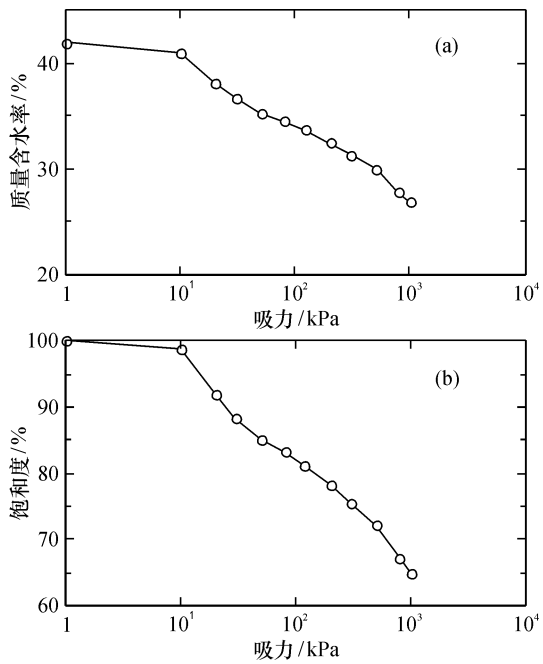


图 5 残积黏土的土水特征曲线（压力板法）

Fig. 5 Soil water characteristic curve of residual clay by pressure plate method

在图 5a 中，试验过程中每 7 ~ 10 天施加一级吸力，随着吸力不断的增大，试样会逐渐失水收缩，体积、孔隙比和含水率也随之减小，干密度会逐渐增加，由于试验条件限制，当吸力加至 1 000 kPa 后结束试验，试验结束后，试样质量含水量为 26.93%，饱和度为 64.90%。

根据土体进气值的定义，由图 5b 吸力与饱和度关系曲线通过作图法可以得出残积黏土重塑样的进气值约为 10 kPa，即当吸力大于 10 kPa 时，土体由饱和状态变为非饱和状态。

2.2 滤纸法试验结果

图 6 为用滤纸法测得的残积黏土脱湿路径的土水特征曲线。随着吸力的增加，试样失水较快，在相同的吸力梯度，失水量更大，质量含水率从开始的 28.0% 降到 5.3%，饱和度也从 69.7% 降到 12.5%；关系点呈现一定离散性，这是因为滤纸法试验使用的不是同一个试样，而压制而成的8

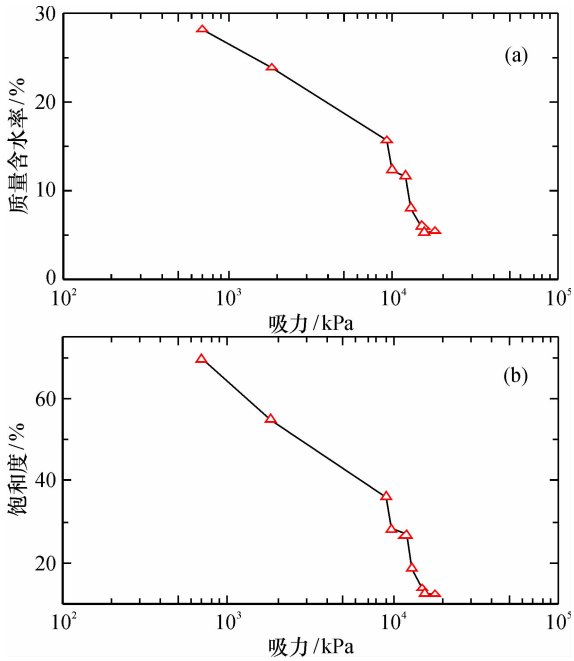


图 6　残积黏土的土水特征曲线（滤纸法）

Fig. 6　Soil water characteristic curve of residual clay by filter paper method

个试样，土体本身存在的差异性是不可避免的；图 6b 也可以看出饱和度随吸力增加一直在减小。

2.3　饱和盐溶液蒸气平衡法试验结果

图 7 为用盐溶液蒸汽平衡法测得的残积黏土脱湿路径的土水特征曲线。

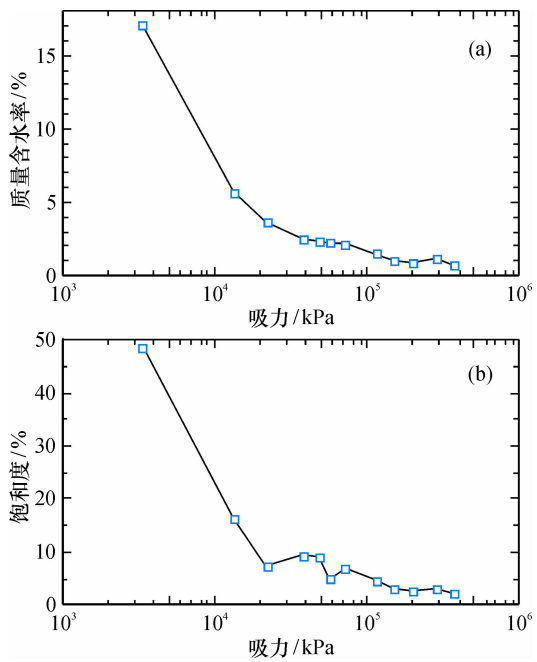


图 7　残积黏土的土水特征曲线（饱和盐溶液法）

Fig. 7　Soil water characteristic curve of residual clay by saturated salt solution method

蒸汽平衡法是测量高吸力范围内土体土水特征曲线方法。在吸力小于 21 MPa 阶段，曲线很陡，说明此阶段吸力增加使得土样排出较多，土体失水收缩；当吸力大于 21 MPa 时，曲线逐渐平缓，此阶段含水率和饱和度变化很小，说明土样孔隙水排出量很小且收缩已经完成，土体不随孔隙水流失而发生变化。由于各个试样存在一定干密度的差异，使得孔隙比与吸力关系有一定离散性，但总体上有孔隙比随吸力增大而减小的趋势。

2.4　3 种方法试验结果组合和分析

图 8 是 3 种试验方法得到全吸力范围内的土水特征曲线。3 种方法结合起来能够很好地测得全吸力范围内残积黏土重塑样的土水特征曲线。

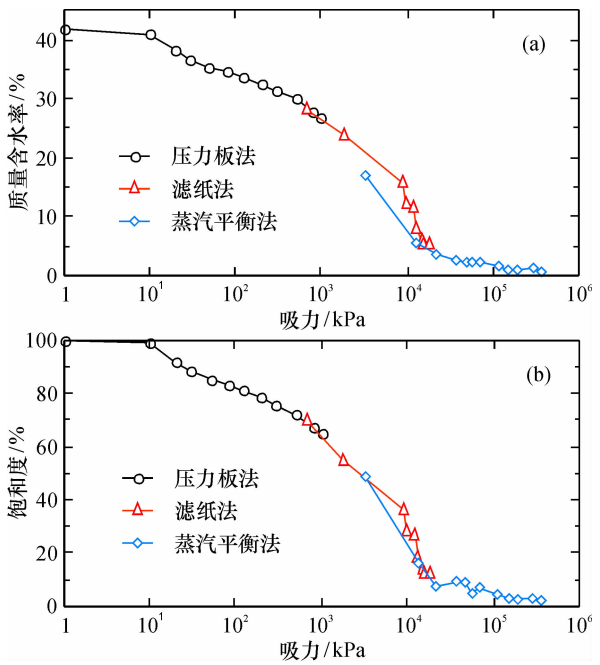


图 8　全吸力范围内残积黏土的土水特征曲线

Fig. 8　Soil water characteristic curves of residual clay in full suction range

对于干密度为 1.25 g/cm^3 的残积黏土重塑样，进气值为 10 kPa，对于压力板法吸力 0 ~ 1 000 kPa 范围内质量含水率和饱和度都随吸力的增大而减小，且幅度较大，含水量由 41.9% 降至 26.9%，失水量达 35.7%。存在两方面原因：第一，制样初始干密度较低，所以土颗粒间孔隙较大，施加吸力时孔隙中的水容易被排出；第二，黏性土在一定初始含水量压样时，容易形成集聚体间孔隙，所以其含水量下降较快。这与文献［10 - 11］结论一致。当吸力大于 21 MPa 时，试样体积、质量

含水率、饱和度变化都很小，几乎趋于稳定不变。由此可以看出，孔隙收缩和孔隙水的排出主要发生在小于 21 MPa 阶段，且当吸力等于 367.54 MPa 时土体的质量含水率仅为 0.76%，趋近于 0，这与 Fredlund 等[12]认为当土体的含水率等于 0 时吸力等于 1 000 MPa 的结论一致。

3 结 论

南宁残积黏土压实制样初始干密度 1.25 g/cm^3 的进气值 10 kPa。土体含水率、饱和度、孔隙比随着吸力的增加而减小，试样失水收缩，干密度逐渐增大。当吸力在 0 ~ 21 MPa 时，试样失水量占孔隙水的 91%，且土体失水收缩基本完成，当吸力大于 21 MPa，土体失水量少，曲线趋于平缓，试样体积基本保持不变。用 3 种方法测得全吸力段南宁残积黏土土水特征曲线，结果一致性好，可以为南宁地区修建地铁及其他建设工程提供基础数据。

参考文献：

[1] 高国瑞. 近代土质学 [M]. 南京：东南大学出版社，1990.

[2] Fredlund D G. Engineering design protocols for unsaturated soils [C] //Proceedings of 3rd AsianConference on Unsaturated Soils. Nanjing：Science Press，2007.

[3] 孙德安，张俊然，吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土 - 水特征曲线 [J]. 岩土力学，2013，34 (7)：1839 - 1846.

[4] 伊盼盼，牛圣宽，韦昌富，等. 干密度和初始含水率对非饱和重塑粉土土水特征曲线的影响 [J]. 水文地质工程地质，2012，39 (1)：42 - 46.

[5] 刘文化，杨庆，唐小微，等. 制样方法和干湿循环对粉质黏土土 - 水特征曲线影响 [J]. 大连理工大学学报，2013，55 (2)：179 - 184.

[6] 王协群，邹维列，骆以道，等. 压实度与级配对路基重塑黏土土 - 水特征曲线的影响 [J]. 岩土力学，2011，32 (S1)：181 - 184.

[7] 孙德安，高游. 不同制样方法非饱和土的特性研究 [J]. 岩土工程学报，2015，37 (1)：91 - 97.

[8] ASTM Committee D 5298 - 03. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter [S].

[9] Leong E C，He L，Rahardjo H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements [J]. Geotechnical Testing Journal，2002，25 (3)：322 - 333.

[10] 谈云志，孔令伟，郭爱国，等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究 [J]. 岩土力学，2010，31 (5)：1427 - 1430.

[11] 谈云志，喻波，刘晓玲，等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律 [J]. 岩土力学，2015，36 (2)：369 - 375.

[12] Fredlund D G，Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal，1994，31 (3)：521 - 532.

Hydraulic properties of unsaturated residual clay from Nanning

ZHANG Ai-wei[1]，ZHANG Jia-wen[2]，YU Ming-bo[2,3]，NIU Geng[3]，YAN Rong-tao[3]

(1. Chemical Industry Geotechnical Engineering Co，Ltd.，Nanjing 210044，China；2. Guilin Institute of Geological Engineering Investigation，Guilin 541002，China；3. College of Civil Engineering and Architecture，Guilin University of Technology，Guilin 541004，China)

Abstract：The pressure plate method and vapor equilibrium technique are used to investigate the hydraulic properties of unsaturated residual clay from Nanning，and the SWCC in the full sucton range can be obtained. The test results show that the air entry value of compacted specimens with initial dry density of 1.25 g/cm^3 is about 10 kPa. When the suction is greater than the air entry value point，The soil changes from saturated to unsaturated state. The water content or saturation of soil decreases and strain shrinkage with the increase of suction. The soil water characteristic curve of volume changes can reflect the real water holding capacity. When the suction is 367 MPa，the water content of the sample is 0.76%. It is believed that when the suction increases to 10^6 kPa，the water holding capacity of the soil tends to be 0.

Key words：unsaturated residual clay；soil water characteristic curve；pressure plate method；vapor equilibrium technique；Nanning