

玄武岩残积土土 - 水特征曲线试验研究*

张浪¹ 雷学文¹ 孟庆山² 李勇¹

(1. 武汉科技大学城市建设学院, 武汉 430065;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 利用非饱和土固结仪测得不同竖向应力及干密度下的玄武岩残积土土 - 水特征曲线, 采用 Van Genuchten 模型对试验所得的土 - 水特征曲线进行拟合, 比较和分析加压固结后, 土体干密度、应力状态的改变对其土 - 水特征曲线的影响。结果表明: VG 模型对所得数据的拟合度较高, 适合玄武岩残积土土 - 水特征曲线的建模; 竖向应力越大, 土体水分越不容易排出, 曲线越平缓, 进气值、残余含水率与竖向应力呈正相关, 当竖向应力超过 400 kPa 时, 竖向应力的增加对土 - 水特征曲线的影响减小; 随着干密度的增大, 残余含水率增大, 土体的持水能力增强; 竖向应力对土 - 水特征曲线的影响主要通过改变土体的干密度来实现, 而土体应力状态的改变对土 - 水特征曲线的影响较小。

关键词: 玄武岩残积土; 竖向应力; 干密度; 土 - 水特征曲线; VG 模型

DOI: 10.13204/j.gyjz201712004

RESEARCH ON THE SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE OF BASALT RESIDUAL SOIL

ZHANG Lang¹ LEI Xuewen¹ MENG Qingshan² LI Yong¹

(1. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: By using the unsaturated soil consolidation apparatus, soil-water characteristic curves of basalt residual soil were measured under different vertical stress and dry densities. The soil-water characteristic curves were fitted by Van Genuchten model; the influence of the change of soil dry density and stress state on the soil-water characteristic curve was compared and analyzed after pressure consolidation. The experimental results showed that the model of VG model had higher fitting degree of the obtained data, which was suitable for the modeling of soil-water characteristic curve of basalt residual soil; the higher the vertical stress, the less the soil moisture was discharged, the more gentle the curve, the inlet value and residual moisture content were positively correlated with vertical stress, when the vertical stress exceeded 400 kPa, the effects of vertical stress on the soil-water characteristic curve were reduced; with the increase of dry density, the residual moisture content increased and the water holding capacity of soil was enhanced. The influence of vertical stress on the soil-water characteristic curve was mainly achieved by changing the compactness of the soil, and the changes of soil stress state had less influence on the soil-water characteristic curve.

Keywords: basalt residual soil; vertical stress; dry density; soil-water characteristic curve; VG model

云贵地区广泛分布着玄武岩, 表面经过强风化作用形成低强度、高压缩性、遇水易软化的红棕色玄武岩残积土。红棕色玄武岩残积土坡土体风化程度高、强度低, 容易发生滑坡, 比一般的土质边坡和岩质边坡更加复杂。坡体表层红棕色玄武岩残积土往往处于非饱和状态, 且由于上覆荷载使土体受到一定的应力作用, 非饱和残积土坡的工程性质与土体的应力状态及土体中的基质吸力密切相关。

土 - 水特征曲线描述了非饱和土含水率或饱和度与基质吸力的关系, 可以解释非饱和土的性状, 探

究非饱和土的体应变^[1]、渗透系数^[2]、抗剪强度^[3], 如李宣等根据测得的土 - 水特征曲线, 用平均骨架应力作为有效应力对非饱和砂土和粉土的强度进行了预测, 结果表明: 预测值与实测值相一致, 因此研究土体的土 - 水特征曲线具有重要的意义^[4]。对于残积土的非饱和特性, 龚壁卫等认为应力状态对

* 西部交通建设科技项目(2009318802074)。

第一作者: 张浪, 男, 1990 年出生, 硕士研究生。

通信作者: 雷学文, leixuewen@wust.edu.cn。

收稿日期: 2017-07-17

膨胀土的土-水特征曲线的影响显著^[5]; 汤连生等对花岗岩残积土的土-水特征曲线进行分析, 认为花岗岩残积土的持水能力较强^[6]; 丁少林等测得福建省3种典型残积土的土-水特征曲线, 探究了不同水力路径作用下土-水特征参数的变化规律^[7]。实际工程中土体大多受到一定的应力作用, 因此有必要考虑应力状态对土-水特征曲线的影响, 王世梅等测得了不同固结应力下滑带土的土-水特征曲线^[8]; 冯君等得到屈服应力的土-水特征曲线, 认为屈服应力是影响非饱和土土-水特征曲线的重要因素^[9]; 罗启迅、胡孝彭等发现土体进气值随着应力的增加而增大^[10-11]。受地形地貌和环境的影响, 土体的干密度会不一样, 有研究认为矿物成分和孔隙结构是影响土-水特征曲线的主要因素, 而干密度是矿物成分和孔隙结构的综合反映^[12]; 余沛等测得不同干密度下的原状与重塑黄褐色玄武岩残积土土-水特征曲线, 发现同一干密度下的原状土与重塑土土-水特征曲线总体趋势变化不大^[13]; 庄心善等分析了不同干密度下粉质黏土的土-水特征曲线, 表明土体的持水能力和水稳性随初始干密度的增大而增大^[14]。土体在受到应力时, 会改变其干密度, 而干密度对土-水特征曲线也有着重大影响, 因此应将竖向应力与干密度结合, 共同考虑对土-水特征曲线的影响。

为探究应力作用与干密度对红棕色玄武岩残积土土-水特征曲线的影响, 采用相同初始干密度一定的红棕色玄武岩残积土, 在竖向应力为0~1600 kPa范围内, 进行由低到高6级竖向应力作用下的土-水特征试验。土体在各级应力作用下会产生一定的竖向位移, 通过土体在应力作用下的位移, 计算出对应的干密度。并对无竖向应力作用下的土样进行6个不同干密度的土-水特征试验, 采用VG模型对试验数据进行拟合。

1 试验方法

1.1 试验土样

试验用土取自毕威高速公路赫章县境内某工段的玄武岩残积土坡, 颜色为红棕色, 风化程度高, 具有大孔隙比、高压缩性, 其主要的矿物成分为高岭石、赤铁矿、石英, 土粒的相对密度 $d_s = 2.76$, 液限 $w_L = 74.2\%$, 塑限 $w_p = 41.1\%$, 塑性指数 $I_p = 33.1\%$, 属于黏性土。将取回的土样经过自然风干、去杂质、碾磨、过2 mm筛, 过筛后的土样有93.71%的土颗粒粒径小于0.075 mm。按试验所需的含水率、干密度进行配土, 配好的土体放入保湿缸中静置

24 h使水分充分均匀, 后用内径 $D = 61.8$ mm, 高度 $H = 20$ mm的环刀进行土样的制备。

1.2 试验仪器

试验仪器采用FGJ-20型非饱和土固结仪, 此固结仪由竖向加载装置、气压控制系统、排水及体积量测系统、竖向位移测量系统等部分组成。与常规固结仪相比, 该仪器在试样底座上装有一块高进气值陶土板(进气值为500 kPa), 饱和陶土板可采用轴平移技术控制试样的吸力。与传统测量基质吸力的压力板仪相比, 非饱和固结仪可以加载竖向应力, 测得竖向位移计算出加压后的干密度。土体的排水量和竖向位移的数据可通过采集系统直接由电脑导出。

1.3 试验方案

试验分为两组, 两组的初始含水率相同, 第一组施加不同的竖向应力(测限条件下的)进行排水固结, 通过施加基质吸力测得土样的土-水特征曲线, 第二组根据第一组加压固结后竖向位移的变化计算出对应的干密度制作试块, 并逐级施加基质吸力; 测量不同干密度下的土-水特征曲线, 竖向应力与干密度的设置如表1所示。表1中 ρ_{d0} 为初始干密度, σ 为竖向应力, ρ_{dg} 为加压固结后土样的干密度。测得土-水特征曲线的试验过程: 第一组经过饱和-一加压固结-一脱湿; 第二组经过饱和-一脱湿。饱和是将做好的试样放入饱和缸中抽气超过3 h, 浸泡超过24 h, 脱湿过程中按25、50、100、200、400 kPa的基质吸力逐级加载。试样在最后一级基质吸力下脱湿稳定后, 取出试样测得脱湿后的含水率, 计算出实际排水量并与测量的排水量对比。

表1 试验方案

Table 1 Test schemes

初始干密度 $\rho_{d0} / (g \cdot cm^{-3})$	竖向应力 σ / kPa	固结干密度 $\rho_{dg} / (g \cdot cm^{-3})$	竖向应力 σ / kPa	初始干密度 $\rho_{d0} / (g \cdot cm^{-3})$
1.25	0	1.25	0	1.25
	200	1.31		1.31
	400	1.37		1.37
	800	1.41		1.41
	1200	1.44		1.44
	1600	1.47		1.47

2 试验结果与分析

2.1 土-水特征曲线的拟合模型

土-水特征曲线中的参数有时很难或不能测出, 需要运用模型的拟合得到土-水特征曲线的参数, 目前对于土-水特征曲线还无法建立统一的理论模型, 最为常用的模型有: Van Genuchten模型、Fendlund-Xing三参数模型、Fendlund-Xing四参数模

型。余沛等用3个常用模型对不同干密度下的黄褐色玄武岩残积土土-水特征曲线进行拟合,认为VG模型更适合玄武岩残积土土-水特征曲线的拟合^[13],VG模型如式(1)所示:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ 为土体的体积含水率; θ_s 为饱和含水率; θ_r 为残余体积含水率; ψ 为土体的基质吸力; θ_r 、 α 、 n 、 m 为优化参数。其中参数 α 与空气进气值有关,约等于进气值的倒数,参数 n 与孔径的分布有关,控制土-水特征曲线的斜率,参数 m 为 $1-n^{-1}$ 。

2.2 竖向应力对玄武岩残积土土-水特征曲线影响

土体由于埋深及所受外界荷载的不同,所处的应力状态也会不一样,试验采用相同初始含水率与干密度的试样通过饱和后在0~1600 kPa范围内的竖向应力进行固结,固结完成后逐级施加基质吸力,根据排水量计算出不同基质吸力下的含水率,利用VG模型对试验数据进行拟合,VG模型拟合所得参数如表2所示,所得土-水特征曲线如图1所示。从拟合结果可以看出:VG模型适合玄武岩残积土土-水特征曲线的建模,不同竖向应力作用下的相关系数平方值 R^2 都较高。

表2 不同竖向应力下土-水特征曲线的拟合参数

Table 2 The fitted parameters of soil-water characteristic curves under different vertical stress

竖向应力/ kPa	VG模型的拟合参数			R^2
	α	n	θ_r	
0	0.106 8	1.655 5	0.328 5	0.996 7
200	0.093 2	1.597 0	0.351 1	0.998 1
400	0.086 9	1.547 8	0.370 9	0.998 9
800	0.066 3	1.451 3	0.380 1	0.998 6
1 200	0.049 6	1.415 6	0.387 3	0.996 4
1 600	0.047 1	1.366 1	0.396 7	0.993 5

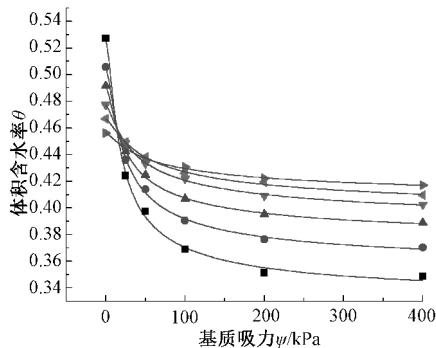


图1 不同竖向应力作用下的土-水特征曲线

Fig. 1 Soil-water characteristics curves under different vertical stress

由第一组试验情况可知(图1):随着竖向应力的增大,土-水特征曲线的起点降低。因为相同体积含水率与干密度的饱和试样,所受到的竖向应力越大,其竖向变形越大,自由水的排出量越大,使得固结后的含水率越小。由表2可见: α 随着竖向应力的增大而减小,说明竖向应力越大,进气值也越大,空气越不容易进入土体。 n 随竖向应力的增大而逐渐减小,说明土-水特征曲线的斜率随着竖向应力的增大而减小,水分的排出速率变慢,土-水特征曲线变平缓。这是由于竖向应力大的试样更加密实,土体的孔隙更小,水分不容易被排出,增加相同的基质吸力,土体的孔隙水排出量更少。残余含水率 θ_r 随着竖向应力的增大而增大,因为随着竖向应力的增加,一方面使得土体的微小孔隙增多,水分不易排出;另一方面增加了土颗粒之间的连接,对水分的排出起着一定的抑制作用。

竖向应力从0 kPa增加到400 kPa时,残余含水率的增加占总共增加量的62.17%,说明当竖向应力超过400 kPa时,竖向应力的增加对玄武岩残积土土-水特征曲线的影响减小。对于重塑土而言,土体的结构性已经被破坏,前期土体的孔隙比较大,土体比较容易压缩,孔隙比随着应力增加而减小的速率较大,当竖向应力超过400 kPa后,由于土体已经较密实,随着应力的增加,孔隙比的减小量变小,对土-水特征曲线的影响也减小。

2.3 干密度对玄武岩残积土土-水特征曲线影响

通过测得各级竖向应力下试样发生的竖向位移,计算出应力作用下固结后试样的干密度,不同干密度的试样在饱和后逐级施加基质吸力,并计算出对应的含水率。利用VG模型对试验数据进行拟合,得到不同干密度下的土-水特征曲线,从拟合结果看,VG模型的拟合效果较好。模型拟合参数如表3所示,不同干密度的土-水特征曲线如图2所示。

表3 不同干密度时土-水特征曲线的拟合参数

Table 3 The fitted parameters of soil-water characteristic curves under different dry densities

干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	VG模型的拟合参数			
	α	n	θ_r	R^2
1.25	0.106 8	1.655 5	0.328 5	0.996 7
1.31	0.093 5	1.608 8	0.344 9	0.999 4
1.37	0.088 1	1.570 4	0.361 4	0.997 9
1.41	0.079 9	1.465 9	0.369 8	0.999 2
1.44	0.051 6	1.422 9	0.375 5	0.999 6
1.47	0.047 7	1.373 8	0.389 0	0.995 2

由第二组试验情况(图2)可知:随着基质吸力的增大,体积含水率逐渐降低,干密度越小,初始含水率越大,失水速率越快。随着基质吸力的增加,

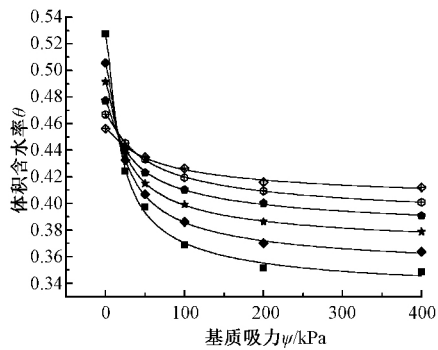


图2 不同干密度时的土-水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curves with different dry densities

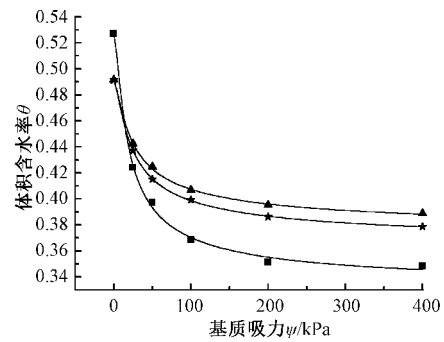


图3 两种因素的改变对土-水特征曲线的影响

Fig. 3 The effects of changing two factors on the soil-water characteristic curves

土-水特征曲线出现交叉现象,在较大基质吸力下,干密度小的含水率低。由于非饱和土孔隙内的压力要保持平衡,随着基质吸力的增加,水分会不断地被排挤出来,含水率会减小。干密度小的试样,孔隙比大,且大孔隙数量较多,饱和后的初始含水率高,容易失水,较快的失水速率导致低密度的试样在较大基质吸力下,水分被大量排出,试样的含水率较低。由表3可见:随着干密度的增大,参数 a 、 n 减小,残余含水率 θ_r 增大,这与竖向应力作用下的变化规律相同。

干密度较低时,土体的大孔隙较多,真空饱和后土体的储水量较大,表现为高含水率。根据基质吸力与孔隙的关系,大孔隙失水所需基质吸力较小,失水的速率较大。从颗粒的连接关系看,干密度小、含水率高的土体,双电荷影响下结合水膜较厚,颗粒的连接较弱。因此干密度较小的土体,进气值较小,失水速率较大。干密度大的土体,孔隙较小、连通性较差,空气不容易进入土体,只有加大基质吸力才能使小孔隙中的水分排出。所以干密度越大,进气值越高,土体的持水能力越强。在实际工程中,如回填土压实、路基填筑,应控制好压实的干密度,这对土体的水稳性有着较大的影响。

2.4 两种因素的改变对土-水特征曲线影响

施加竖向应力作用后,不仅改变了颗粒间的应力状态,也使土体更加密实,增加了土体的干密度。以竖向应力为400 kPa(初始干密度为 1.25 g/cm^3 ,固结干密度为 1.37 g/cm^3)的试样为例,探究土体在施加竖向应力后,应力状态和干密度的改变对玄武岩残积土土-水特征曲线的影响,如图3所示。

由图3可知:较大基质吸力时,受到竖向应力作用的土样土-水特征曲线在最上方,说明有竖向应力作用的土样在相同基质吸力下,含水率较高。受

到竖向应力作用后,残余含水率有明显的增加,其中通过改变干密度使残余含水率增加占77.59%,土颗粒应力状态的改变使残余含水率增加占比不到1/4。竖向应力对土-水特征曲线的影响,主要通过增加土体的密实度来实现,土颗粒应力状态的改变对土-水特征曲线也有一定的影响,但相对而言较小。

3 结束语

采用非饱和土固结仪,测得不同竖向应力下的玄武岩残积土土-水特征曲线,并根据竖向位移计算出固结后的干密度,得到无应力作用下不同干密度的玄武岩残积土土-水特征曲线,利用VG模型对试验数据进行拟合。

1) VG模型对不同竖向应力和干密度下的土-水特征曲线拟合效果均较好,VG模型适合非饱和玄武岩残积土土-水特征曲线的建模。

2) 竖向应力的施加对玄武岩残积土土-水特征曲线有一定的影响,施加的竖向应力越大,土体的进气值越大,水分的排出速率减慢,残余含水率越大。当竖向应力超过400 kPa时,增加竖向应力对土-水特征曲线的影响不大。

3) 随着干密度的变化,土-水特征曲线的变化规律与竖向应力作用时相差不大。土体的干密度越大,孔隙越小,土体水分的排出需要更大的基质吸力,土体的进气值越大,持水能力越强。增加土体的干密度,可以有效提高其水稳性。

4) 竖向应力对土-水特征曲线有较大的影响,主要是因为竖向应力的施加使土体更加密实,干密度增大,土体应力状态的改变对土-水特征曲线的

(下转第81页)

参考文献

- [1] Applied Technology Council. Seismic Design Guidelines for Highway Bridges [R]. ATC - 6, Berkeley, California: Applied Technology Council, 1981.
- [2] HSU T T C, MO Y L. Unified Theory of Concrete Structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [3] LEE J Y, KIM K H, KIM S W. Non-Linear Shear Analysis of Reinforced Concrete Columns by Fixed-Angle Theory [J]. Structures and Buildings, 2013, 166: 165 - 181.
- [4] 解咏平, 李振宝, 杜修力, 等. 基于桁架-拱模型的钢筋混凝土短柱抗剪承载力尺寸效应分析 [J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(5): 701 - 706.
- [5] PRIESTLEY M J N, VERMA R, XIAO Y. Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8): 2310 - 2329.
- [6] KOWALSKY M J, PRIESTLEY M J N, SEIBLE F. Shear and Flexural Behavior of Lightweight Concrete Bridge Columns in Seismic Regions [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1): 136 - 148.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. 4th Ed. Washington, D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [9] ICHINOSE T. A Shear Design Equation for Ductile RC Members [J]. Earthquake Engineering Structural Dynamic, 1992, 21(3): 197 - 214.
- [10] Architectural Institute of Japan (AIJ). AIJ Structural Design Guidelines for Reinforced Concrete Buildings [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1994.
- [11] PAN Z F, LI B. Truss-Arch Model for Shear Strength of Shear-Critical Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2013, 139(4): 548 - 560.
- [12] BENTZ E C, VECCHIO F J, COLLINS M P. Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(4): 614 - 624.
- [13] CEB-FIP. FIP Model Code for Concrete Structures 2010: MC2010 [S]. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst&Sohn, 2010.
- [14] BENTZ E C, COLLINS M P. Development of the 2004 Canadian Standards Association (CSA) A23.3 Shear Provisions for Reinforced Concrete [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33: 521 - 534.
- [15] KOWALSKY M J. Deformation Limit States and Implications on Design of Circular RC Bridge Columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 126(8): 869 - 878.
- [16] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic Design and Retrofit of Bridges [M]. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- [17] BERRY M, PARRISH M, EBERHARD M. PEER Structural Performance Database Users Manual [R]. Berkeley: PEER, 2004.
- [18] SEZEN H, MOEHLE J P. Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1692 - 1703.
- [19] ASCE/SEI. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings: ASCE/SEI 41 - 06 [S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007.
- [20] ZHANG Q, GONG J, MA Y. Seismic Shear Strength and Deformation of Reinforced Concrete Columns Failed in Flexural-Shear Modes [J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66(5): 234 - 248.

(上接第20页)

影响相对较小。

参考文献

- [1] 卢宁, 威廉·莱科斯. 非饱和土力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [2] VAN GENUCHTEN M TH. A. Close-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [3] XU Y F, SUN D A. Determination of Expansive Soil Strength Using a Fractal Model [J]. Fractals 2001 9(1): 51 - 60.
- [4] 李宣, 孙德安. 非饱和砂土和粉土的抗剪强度及其预测 [J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 102 - 106.
- [5] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915 - 1918.
- [6] 汤连生, 颜波, 李振嵩, 等. 花岗岩残积土水土特征曲线的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 62 - 65.
- [7] 丁少林, 左昌群, 刘代国, 等. 非饱和和残积土土-水特性研究及基质吸力估算 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3): 98 - 103.
- [8] 王世梅, 刘德富, 谈云志, 等. 某滑坡土体土-水特征曲线试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2651 - 2654.
- [9] 冯君, 巫锡勇, 马悦, 等. 考虑屈服应力的非饱和土土-水特征曲线研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1331 - 1335.
- [10] 罗启迅, 黄靖, 陈群. 竖向应力及干密度对砾石土土-水特征曲线的影响研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 729 - 734.
- [11] 胡孝彭, 赵仲辉, 倪晓雯. 应力状态对土-水特征曲线的影响规律 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 150 - 155.
- [12] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFARH I D E. The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till [J]. Geotechnique, 1999, 49(2): 143 - 159.
- [13] 余沛, 柴寿喜, 魏厚振, 等. 不同干密度下玄武岩残积土土-水特征曲线分析 [J]. 工程勘察, 2012, 40(7): 1 - 5.
- [14] 庄心善, 彭伟珂, 吴镜泊. 初始干密度对非饱和土变形及强度影响的试验研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 107 - 110.