

DOI: 10.11779/CJGE2022S1001

双孔结构非饱和红黏土土水特征曲线模型

蔡国庆^{1,2}, 韩博文¹, 王亚南¹, 江天¹, 谢琳³, 张策¹

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 河南省交通运输厅, 河南 郑州 450003)

摘要: 为了真实反映土体内部双孔结构和变形对土持水特性的共同影响, 推导建立了考虑变形的双孔结构非饱和土土水特征曲线模型。模型提出以双孔土水特征曲线中的“相接点”作为“双孔”结构非饱和土大小孔隙尺度分界点, 并针对不同区间的土水特征曲线分别建立方程。在各分段方程中引入体变参数用来反映不同初始孔隙比下 SWCC 的变形。采用桂林红黏土压实样, 在全吸力范围内开展了土水特征曲线试验, 在各级吸力平衡后对土样进行压汞试验, 对所建立模型进行验证。结果表明, 所建立考虑双孔结构非饱和土土水特征曲线模型对红黏土干化与湿化过程均具有良好的适用性和良好的预测效果, 可以反映不同初始孔隙比和不同结构土样在相同水力路径下的水力行为。

关键词: 非饱和土; 土水特征曲线; 双孔结构; 体变; 相接点

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0001-05

作者简介: 蔡国庆(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事非饱和土力学及土体多场耦合理论方面的研究。E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn。

SWCC model for double-pore structured unsaturated clay

CAI Guo-qing^{1,2}, HAN Bo-wen¹, WANG Ya-nan¹, JIANG Tian¹, XIE Lin³, ZHANG Ce¹

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing JiaoTong University, Beijing 100044, China; 3. Henan Provincial Department of Transportation, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Some mercury intrusion test results show that the soils using the compaction sample preparation method usually present a typical double-pore micro structure, while the existing unsaturated SWCC models are mostly directed to single-pore structural soils. In order to reflect the double-pore structure inside the soils and the joint effects of deformation on water-holding performance, a unsaturated SWCC model for the double-pore structure considering deformation is proposed and verified through experiments. The "junction point" in the double-pore SWCC is regarded as the boundary point of different pore sizes of the double-pore structured unsaturated soils, and equations for the SWCC of different sections are established. The parameter is introduced in the segment equation to reflect the influences of the deformation. According to the compacted samples of Guilin lateritic clay, the SWCC tests in the full suction range are carried out based on the shaft translation technique, the filter paper method and the saturated salt solution steam balance method. The model parameters are calibrated, and the proposed model is verified.

Key words: unsaturated soil; soil-water characteristic curve; double porosity soil; deformation; junction point

0 引言

土水特征曲线位置和形状主要受土类型、颗粒级配、应力状态、孔隙比、孔隙结构、初始含水率、体变、温度以及化学成分等因素影响^[1-3]。其中, 孔隙比和孔隙结构是最为重要的影响因素, 为了进一步地研究土体持水性能, 孙德安^[4]、韦昌富等^[5]和牛庚等^[6]对土体结构、孔隙分布、孔隙比及体变的影响进行了深入探究。

目前经常使用的土水特征曲线方程主要包括

Brooks-Corey 模型^[7]、van Genuchten 模型^[8]和 Fredlund-Xing 模型^[9], 然而, 这些模型都仅适用于以颗粒间孔隙为主的“单孔”结构土体。对于含水率处于液塑限之内的重塑土, 尤其是处于最优含水率通过

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2021JBZ111); 国家自然科学基金项目(U2034204, 52078031); 北京市自然科学基金项目(8202038); 江苏省隧道与地下工程技术研究中心开放基金项目(2021-SDJJ-04)

收稿日期: 2022-09-25

击实方法的重塑土,则具有明显双孔隙结构,考虑到土体孔隙结构对持水特性的显著影响,“双孔”结构土体土水特征曲线研究成为当前研究者们关注热点,研究方向大致以孔隙分布(PSD)^[10]和粒径分布(GSD)^[11]为主。此外,Li等^[12]基于多孔介质理论,建立了满足热力学的双孔结构非饱和膨胀土本构模型。土体在荷载和外界环境共同影响下将发生变形,体变对土持水特性影响较大。体变对非饱和土持水性能的影响是目前非饱和土力学热点之一,相关学者建立了考虑变形影响的土-水特征曲线模型^[13-16]。

然而,考虑变形影响的土水特征曲线模型大都以描述单孔结构土为主,土体变形对双孔结构土体的持水特性影响尚未有较为深入的探究。因此对考虑体变影响的“双孔”结构土体 SWCC 进行研究十分必要。针对“双孔”结构土,在 Bueger 模型^[10]基础上,提出相接点概念,将 Fredlund-Xing 的 SWCC 模型扩展为“双孔”结构 SWCC 模型,并考虑初始孔隙比 e_0 对 SWCC 的影响,在 S_r - s 平面上提出一个考虑体积变化的双孔结构 SWCC 模型。针对桂林红黏土压实样,基于轴平移技术、滤纸法和饱和盐溶液法在全吸力范围内开展土水特征曲线试验,并在不同吸力平衡后对不同初始干密度的试验土样开展压汞试验,基于试验结果,对所建立模型进行参数标定和验证。

1 模型建立

1.1 建立双孔土水特征曲线方程

双孔结构土水特征曲线主要由集聚体内孔隙和集聚体间孔隙控制,所测得土水特征曲线过渡区段会出现两个斜率下降段和一个水平段。因此,从微观角度对双孔结构土进行简化分析,可以将土的水力行为简略地分为两个阶段:大孔隙开始吸水至完全失水,然后小孔隙开始失水至完全失水。

因此,对于双孔结构土体,为了保证模型对试验数据拟合效果,选取 Fredlund-Xing 模型作为基础模型,以分段函数方式来描述双孔结构土土水特征曲线(double-pore structural functions),由于曲线呈双台阶形状,也可以称为双台阶土水特征曲线:

$$S = \begin{cases} \left\{ \frac{1}{\ln[e + (s/a)^n]} \right\}^m & (s \leq s_j) \\ f \left\{ \frac{1}{\ln[e + (s/a')^{n'}]} \right\}^{m'} & (s > s_j) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $f(x)$ 为对应缩放函数, s_j 为相接点吸力值,其他参数为 Fredlund-Xing 模型参数。式(1)采用两组参数 $\{a, n, m\}$ 和 $\{a', n', m'\}$, 分别描述吸力大于分

界点、吸力小于分界点时的两个区域。

s_j 定义为“相接点”吸力,其物理意义为:“宏观孔隙”(压汞试验中最先出现孔径密度较高孔隙半径较大的孔隙)完全失水且“微观孔隙”(压汞试验中后出现孔径密度较高孔隙半径较小的孔隙)开始失水的临界状态,在压汞试验孔隙分布图中即为双峰之间孔隙分布密度最低对应直径时的理论吸力值。

1.2 考虑体变的双孔土水特征曲线模型

土体变形后土水特征曲线的改变需要从孔隙分布的改变来反映,然而,孔隙分布特征是土体的微观特征,直接观测变形后的孔隙分布比较困难,而变形后孔隙比 e_0 作为宏观参数,相对容易测得。本文采用 Zhou 等^[17]建立了的饱和度与孔隙比的关系考虑变形对双孔结构土体土水特征曲线的影响。其表达式如下:

$$\frac{(S_e - S_e^{\text{ref}})}{6} \left[f(S_e^{\text{ref}}) + 4f\left(\frac{S_e + S_e^{\text{ref}}}{2}\right) + f(S_e) \right] = \ln \frac{e_i^{\text{ref}}}{e_i} \quad (2)$$

式中, $f(x) = [x(1-x)^c]^{-1}$ 。因此,当已知初始孔隙比为 e_i^{ref} 的参考状态时的 SWCC,即可基于此式得到任意初始孔隙比 e_i 时的 SWCC。

1.3 相接点吸力的确定

本文提出确定相接点方法如下:先通过干化过程中压汞试验(MIP)测得土体孔径分布图(PSD),根据土中两个峰值之间的分布密度,初步拟合结果结果显示相接点吸力对曲线的影响很小,因此相接点吸力值任意选取某一分界点孔径 d ,使得分界点孔径介于两个峰值密度之间,且自身峰值密度低处即可。之后根据表征孔径 d 和吸力 s 关系的 Young-Laplace 方程,计算得到“相接点”对应的吸力值:

$$s = \frac{4\sigma \cos\theta_w}{d} \quad (3)$$

其中, σ 为水的表面张力(N/m), θ_w 为水与土表面接触角。在计算时,表面张力 σ 按室温 25℃ 取 0.072 N/m;在本模型中,简化 θ_w 取 0。在拟合过程中可以发现 θ_w 取 0 对模型的影响很小,可以满足拟合精度的要求。

2 参数标定及模型验证

针对桂林红黏土压实土样开展干化、湿化试验,基于上述所建立考虑体变的双孔结构土土水特征曲线模型,分别对双孔结构土样 SWCC 进行拟合、预测,并通过模型计算结果与试验结果对比,来验证模型的合理性与有效性。

2.1 双孔结构土干化试验对模型的验证

利用 $e_0 = 1.3, 1.5$ 双孔结构压实土在干化过程中土水特征数据来标定模型参数,通过已提出考虑体变的双孔土水特征曲线模型,预测 $e_0 = 1.7$ 土样的双孔结构

土水特征曲线。

(1) 确定相接点吸力值

为了简化模型令 $e_0=1.3, 1.5, 1.7$ 相接点吸力相同。在两个峰值区域之间, 存在着一小段区域孔径分布密度较小, 相接点的选取可从 3 个试验共同低密度区域内进行选择。本次拟合选取 $d=420\text{ nm}$ 为分界点, 此点具有良好的代表性, 可以作为验证本模型参数。根据式 (3) 计算得到相接点吸力 s_j 数值为 686 kPa。

(2) 土水特征曲线模型参数标定

本节在式 (2) 基础上, 基于 $e_0=1.3, 1.5$ 土样, 基于试验数据和相接点吸力值进行参数标定, 标定结果如表 1 所示, 拟合图见图 1。

表 1 压实土干化试验参数标定($e_0=1.5$)

Table 1 The parameter calibration of compacted soil in drying test ($e_0=1.5$)

大孔隙 SWCC 标定参数	a	m	n	ζ	R^2
	30.119	0.18539	6.3635	0.38	0.999
小孔隙 SWCC 标定参数	a'	m'	n'	ζ'	R^2
	17930	1.55863	2.3590	0.95	0.994

通过拟合结果可知, 两阶段拟合相关系数均大于 0.99。从图 1 可以看出, 拟合结果对边界效应区、过渡区曲线拟合较好, 非饱和和残余区由于数据较多、试验方法等客观原因拟合一般, 但可反映实际趋势, 说明本次拟合选取 s_j 合理有效。

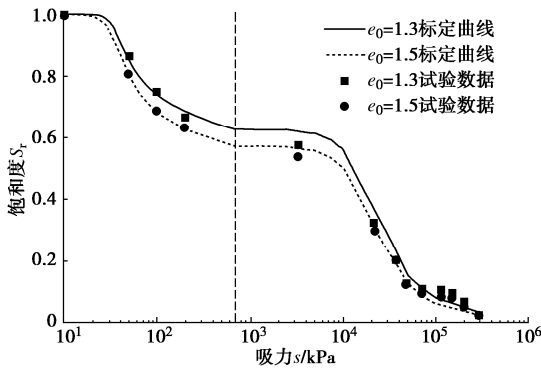


图 1 SWCC 干化试验拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of SWCCs in drying tests

(3) 模型预测

利用标定后的模型, 利用数值积分法对不同初始孔隙比条件下的非饱和土 SWCC 进行预测, 并与试验结果进行比较。在上述 $e_0=1.3, 1.5$ 土样模型参数标定基础上, 利用式 (2) 预测 $e_0=1.7$ SWCC 曲线, 预测结果如图 7 所示。预测结果表明: 模型预测结果与试验结果吻合较好, 能够反映 SWCC 走势、拐点, 在全吸力范围内均能较好地预测试验结果。

如图 2 所示, 压实土干化路径土水特征曲线可分

为两大段六小段: 第一大段, 在大孔隙失水阶段, 在很小吸力下就达到了进气值 (A 段), 饱和度下降明显 (B 段), 然后到达大孔隙残余区 (C 段); 第二大段, 大孔隙完全失水后至到达小孔隙进气值前阶段曲线比较平缓, 饱和度变化较小 (D 段)。当吸力超过小孔隙进气值后, 曲线斜率比较大, 随着吸力增加, 饱和度迅速下降 (E 段), 随后到达小孔隙残余区 (F 段)。

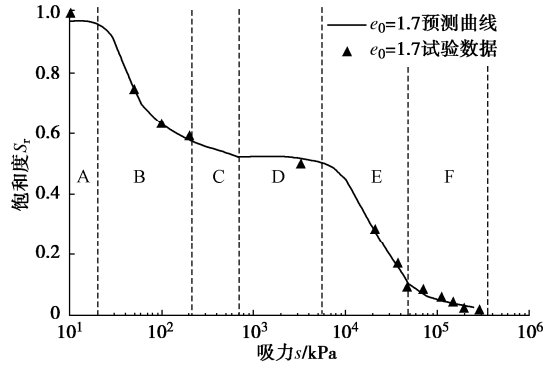


图 2 压实土干化试验结果预测 ($e_0=1.7$)

Fig. 2 Prediction of compacted soils in drying tests ($e_0=1.7$)

(4) 预测结果与试验结果对比

将不同初始孔隙比压实土在干化过程中土水特征曲线进行综合对比, 如图 3 所示, 不同曲线在低吸力范围内差别较大, 而在高吸力范围内几乎趋于重合。这主要是由于压实土孔隙比变化主要是大孔隙变化引起的, 而大孔隙主要在低吸力范围内失水, 小孔隙主要在高吸力范围内失水, 故初始孔隙比对中低吸力范围内土水特征曲线影响较大, 而对高吸力范围内土水特征曲线影响较小。

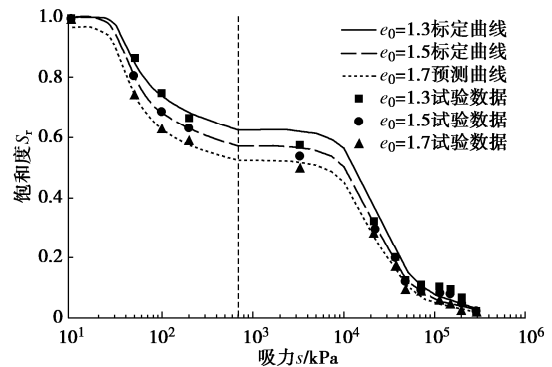


图 3 不同初始孔隙比的压实土土水特征曲线对比 (干化)

Fig. 3 SWCCs of compacted soils with different initial void ratios (drying)

2.2 双孔结构土湿化试验对模型的验证

利用 $e_0=1.5, 1.7$ 双孔结构压实土在湿化过程中土水特征数据和相接点吸力值来标定模型参数, 再次预测 $e_0=1.3$ 湿化土样的双孔土水特征曲线。

(1) 相接点吸力确定

继续选取 $d=420$ nm 作为大小孔隙分界点。根据多次预拟合结果显示,分界点值的变化并不会对拟合效果产生较大影响,只要在双峰之间孔隙分布较低区域进行选取即可。根据式(3)计算得到相接点吸力 $s_j=686$ kPa。

(2) 参数标定

基于 $e_0=1.5, 1.7$ 土样试验数据进行参数标定,标定结果如表 2 所示,拟合图见图 4。参数 a, b, c 与具体标定过程为与前一节相同。

表 2 压实土干化试验参数标定 ($e_0=1.5$)

Table 2 Parameter calibration of compacted soils in drying tests

$(e_0=1.5)$					
大孔隙 SWCC 标 定参数	a	m	n	ζ	R^2
	21.57	0.3258	2.9294	0.90	0.979
小孔隙 SWCC 标 定参数	a'	m'	n'	ζ'	R^2
	17893	1.65484	2.0601	0.90	0.996

通过拟合结果可知,大孔隙部分由于数据点较少,缺少 0 kPa 附近的饱和度数据,拟合后相关系数不高,不能较好地反映边界效应区。但是本次拟合对过渡区、非饱和和残余区拟合较好,可以反映 SWCC 实际趋势,说明本次拟合选取的 s_j 合理有效。

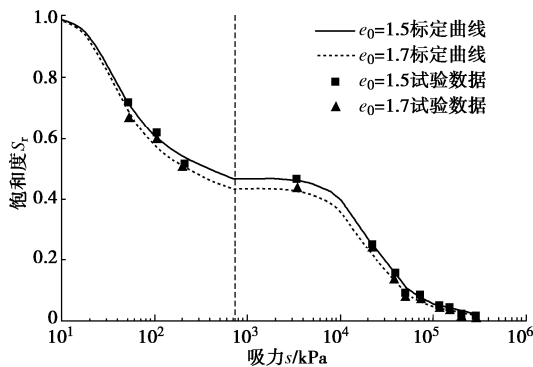


图 4 桂林红黏土-压实土干化试验参数标定曲线

Fig. 4 Data fitting of compacted soils in drying tests

(3) 模型预测

利用标定后的模型,基于数值积分法对不同初始孔隙比条件下的非饱和土湿化 SWCC 进行预测,并与试验结果进行比较。

在上述 $e_0=1.5, 1.7$ 土样模型参数标定基础上,利用式(2)预测 $e_0=1.3$ 的 SWCC 曲线,预测结果如图 5,拟合图表明,模型预测结果与试验结果吻合较好,能够反映 SWCC 走势、拐点,在全吸力范围均能较好地进行预测。

(4) 结果分析

将不同初始孔隙比压实土在湿化过程中的土水特征曲线进行综合对比,如图 6 所示。不同曲线在中间吸力范围内差别较大,而在低吸力和高吸力范围内几

乎趋于重合。这主要是因为湿化试验在低吸力段数据尤其是吸力为 0 kPa 附近时饱和度试验数据较少,拟合效果不符合理论,但是可以大致反映 SWCC 走势,对于试验点的拟合具有参考价值。

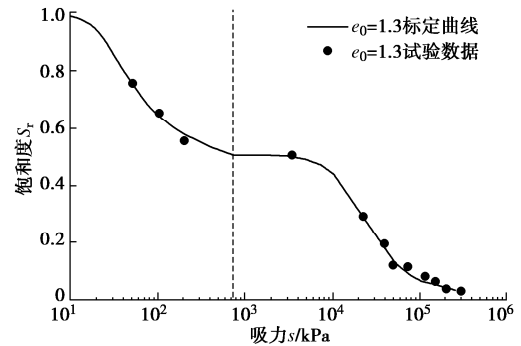


图 5 压实土湿化试验结果预测 ($e_0=1.3$)

Fig. 5 Prediction of compacted soils in wetting tests ($e_0=1.3$)

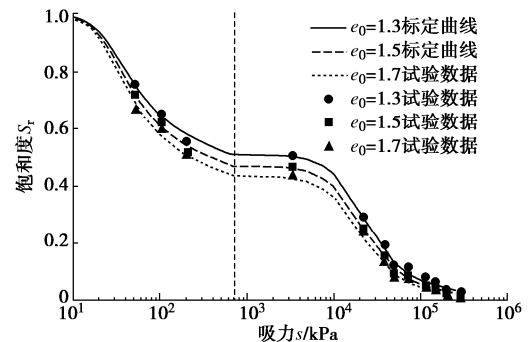


图 6 不同初始孔隙比压实土土水特征曲线对比(湿化)

Fig. 6 SWCCs of compacted soils with different initial void ratios (wetting)

3 结 语

为了反映土体内部结构和土体变形对持水特性的影响,针对“双孔”结构土体,在 Fredlund-Xing 模型基础上,采用分段形式扩展为双台阶形式土水特征曲线。用两组参数分别描述位于相接点吸力两侧的不同区域;引入了定量描述初始孔隙比对非饱和土土水特征曲线的影响方法模型,以此来考虑体变对土水特征曲线的影响,建立了一个同时考虑初始孔隙比、体积变化及孔隙结构影响的土水特征曲线模型。

基于所建立的土水特征曲线模型,采用不同初始孔隙比下桂林红黏土压实土样进行的干化、湿化试验数据,开展模型参数的标定,实现模型预测功能,通过预测结果和试验结果对比,验证了模型预测可靠性,通过对比反映不同初始孔隙比和不同结构土样在相同水力路径下的水力行为。并进一步探讨了初始孔隙比、体变及孔隙结构对土水特征曲线的影响规律和内在机理。

参考文献:

- [1] 蔡国庆, 王亚南, 周安楠, 等. 考虑微观孔隙结构的非饱和土水-力耦合本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 618 - 624. (CAI Guo-qing, WANG Ya-nan, ZHOU An-nan, et al. A microstructure-dependent hydro-mechanical coupled constitutive model for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 618 - 624. (in Chinese))
- [2] 黄启迪, 蔡国庆, 赵成刚. 非饱和土干化过程微观结构演化规律研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(1): 165 - 173. (HUANG Qi-di, CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang. Microstructure evolution of unsaturated soil during drying process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(1): 165 - 173. (in Chinese))
- [3] 蔡国庆, 尤金宝, 赵成刚, 等. 双孔结构非饱和和压实黏土的渗流-变形耦合微观机理[J]. 水利学报, 2015, **46**(增刊 1): 135 - 141. (CAI Guo-qing, YOU Jin-bao, ZHAO Cheng-gang, et al. Microcosmic mechanism for flow-deformation coupling of unsaturated compacted clay with double porosity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(S1): 135 - 141. (in Chinese))
- [4] 孙德安, 张舟, 高游, 等. 黏性土土水特征曲线基本参数的确定[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, **25**(6): 957 - 964. (SUN De-an, ZHANG Zhou, GAO You, et al. Determination of basic parameters of SWCC for clayey soils[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2019, **25**(6): 957 - 964. (in Chinese))
- [5] 韦昌富, 李幻, 王吉利. 考虑弹塑性变形和毛细循环滞回的非饱和土本构模型[C]//第一届全国岩土本构理论研讨会论文集. 北京, 2008: 265 - 272. (WEI Chang-fu, LI Huan, WANG Ji-li. A constitutive model of unsaturated soils with consideration to coupling of elastoplastic deformation and capillary hysteresis[C]// Proc 1st National Conference on Constitutive Theory for Geomaterials, 2008: 259 - 266. (in Chinese))
- [6] 牛庚, 邵龙潭, 孙德安, 等. 土-水特征曲线测量过程中孔隙分布的演化规律探讨[J]. 岩土力学, 2020, **41**(4): 1195 - 1202. (NIU Geng, SHAO Long-tan, SUN De-an, et al. Evolution law of pore-size distribution in soil-water retention test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(4): 1195 - 1202. (in Chinese))
- [7] BROOKS R H. Hydraulic properties of porous media[M]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [8] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [9] FREDLUND D G, XING A Q. Erratum: Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(6): 1026.
- [10] BURGER C A, SHACKELFORD C D. Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(1): 53 - 66.
- [11] LI X, LI J H, ZHANG L M. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **57**: 85 - 96.
- [12] LI J, ZHAO C G, CAI G Q, et al. The input work expression and the thermodynamics-based modelling framework for unsaturated expansive soils with double porosity[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(27): 3422 - 3429.
- [13] HUANG S Y, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 411 - 425.
- [14] 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1451 - 1462. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A water retention curve model for deformable soils based on pore size distribution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1451 - 1462. (in Chinese))
- [15] CAI G Q, ZHOU A N, SHENG D C. Permeability function for unsaturated soils with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(12): 1456 - 1467.
- [16] 蔡国庆, 张策, 李舰, 等. 考虑初始干密度影响的SWCC预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 27 - 31. (CAI Guo-qing, ZHANG Ce, LI Jian, et al. Prediction method for SWCC considering initial dry density[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 27 - 31. (in Chinese))
- [17] ZHOU A N, SHENG D, CARTER J P. Modelling the effect of initial density on soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2012, **62**(8): 669 - 680.

(编校: 孙振远)