

DOI: 10.11779/CJGE20240079

低应力和湿化路径下膨胀土的力学行为与本构模拟

周葆春¹, 江星湟¹, 马全国¹, 单丽霞¹, 王江伟¹, 李颖¹, 易先达¹, 孔令伟²

(1. 信阳师范大学河南省非饱和土与特殊土工程技术研究中心/建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 膨胀土典型变形与破坏现象通常发生在低应力和湿化路径共同作用下, 有必要深入研究从非饱和到饱和、从湿化到破坏的膨胀土力学行为及其湿载耦合效应规律。为此, 以双压力室非饱和土三轴试验系统、Fredlund 土水特征曲线仪为主要平台, 开展系统的控制吸力的湿载耦合试验, 历时近 800 d, 获得了低应力和湿化路径下荆门黄褐色中膨胀土持水、变形、破坏等力学行为规律。在此基础上, 采用 Barcelona basic model 描述其湿载共同作用下的应力-应变-强度行为, 采用 van Genuchten 模型描述其非饱和渗流行为。结合 10 a 来该土样的其它试验结果, 标定了低应力和湿化路径下荆门黄褐色中膨胀土完整的 13 个 BBM 参数以及 VG 模型参数。本构模拟结果表明上述模型与参数能够较好再现低应力和湿化路径下该膨胀土的力学行为。

关键词: 非饱和土; 湿载耦合; 非饱和应力-应变-强度行为; 非饱和渗流; Barcelona 模型; van Genuchten 模型

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)04-0695-10

作者简介: 周葆春(1978—), 男, 教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学及工程研究。E-mail: zhoubc@xynu.edu.cn。

Mechanical behavior and constitutive modelling of expansive soils under conditions of wetting and low confining stress

ZHOU Baochun¹, JIANG Xingyun¹, MA Quanguo¹, SHAN Lixia¹, WANG Jiangwei¹, LI Ying¹, YI Xianda¹, KONG Lingwei²

(1. Henan Unsaturated Soil and Special Soil Engineering Technology Research Center, College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Typical deformation and failure of expansive soils usually occur under conditions of wetting and low confining stress. However, the mechanisms of coupling between mechanical and hydrological behaviors under those conditions are still obscure. Therefore, the soil water retention, volume change and strength behavior of expansive soils are investigated through systematically designed suction-controlled hydro-mechanical coupled tests under varying saturation conditions along wetting path. The test program involves with the instruments including the double-cell unsaturated soil triaxial test system and the Fredlund soil water characteristic devices. The tests last almost 800 days, and the soil water retention, volume change, and strength behavior of Jingmen medium swelling soil under conditions of wetting and low confining stress are acquired. The Barcelona basic model is used to describe the unsaturated stress-strain-strength behavior under those conditions. The van Genuchten model is used to describe the unsaturated seepage process. Combined with the other test results of the soil over the past 10 years, the complete 13 BBM parameters and VG model parameters of Jingmen medium swelling soil under those conditions are calibrated. The constitutive modelling shows that the above models and parameters can reproduce the mechanical behavior of the soil under conditions of wetting and low confining stress effectively. The aim of this study is to improve the prediction capability of the related expansive soil problems, e.g., rainfall-induced landslides and deformations of pavement.

Key words: unsaturated soil; hydro-mechanical coupling; unsaturated stress-strain-strength behavior; unsaturated seepage; Barcelona basic model; van Genuchten model

0 引言

膨胀土工程问题多由大气降水引发, 水的入渗导致浅层地表土体含水率上升、吸力降低、体积增大、

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11772290, 51009118)

收稿日期: 2024-01-24

抗剪强度降低,最后诱发工程失稳^[1-5]。其显著特征:
①是以降水作为环境作用的湿化过程^[6];②变形与破坏大多发生在近地表的大气影响深度范围,通常在 3 m 以内,即处于低应力状态下(50 kPa 以内^[1])。

然而,①由于膨胀势的存在,湿载共同作用下膨胀土的力学行为较为复杂^[7-10];②由于试验设备条件要求高、吸力平衡历时漫长,对膨胀土工程灾害起控制作用的湿载耦合行为的试验研究^[11-14]相对匮乏,缺少完备的基础试验数据支撑;③既往研究多集中于脱湿过程^[15-16],实际上吸湿状态^[17-19]能更准确描述降水后膨胀土的力学行为。因此,从非饱和到饱和,从湿化到破坏,膨胀土的力学行为及其湿载耦合效应规律^[20-23]不够十分清楚;低应力和湿化路径下膨胀土的持水、变形、破坏等力学行为仍是非饱和土力学和膨胀土工程领域需要面对的问题之一。

本文聚焦于膨胀土典型变形与破坏现象通常发生在低应力和湿化路径共同作用下,以双压力室非饱和土三轴试验系统为主要平台,开展系统的控制吸力的湿载耦合试验,历时近 800 d,获得了低应力和湿化路径下荆门黄褐色中膨胀土持水、变形、破坏等力学行为规律。在此基础上,采用非饱和土本构模型中最通用的 Barcelona basic model (BBM)^[24-26]描述其湿载共同作用下的应力-应变-强度行为;采用土水特征曲线 SWCC 和非饱和渗透系数函数 HCF 模型中最通用的 van Genuchten (VG)模型^[27-29]描述其非饱和渗流过程;结合 10 a 来该土样的其它试验结果^[30-34],标定了完整的低应力和湿化路径下荆门黄褐色中膨胀土 BBM 与 VG 模型参数。试图为非饱和土力学与膨胀土研究的理论拓展提供基础数据,为膨胀土地区的工程设计/灾害预测数值分析中的参数取值提供参考。

1 研究方案

1.1 试验土样

试验土样为取自湖北荆门的中等膨胀性的黄褐色膨胀土,其物理性质指标、颗粒组成、矿物成分、阳离子质量摩尔浓度分别见表 1~4。重型击实试验^[30]表明其最优含水率为 15.5%,最大干密度为 1.86 g/cm³。

表 1 试验用土的物理性质指标

Table 1 Physical property indices of test soil

相对 质量 密度 G_s	液限/ % w_L	塑限/ % w_P	塑性 指数 I_P	USCS 定名	比表 面积/ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	阳离子 交换量/ ($mmol \cdot kg^{-1}$)	标准 吸湿 含水 率/%	自由 膨胀 率/%
2.75	63	26	37	CH	236.5	309	7.3	75

表 2 试验用土的颗粒组成

Table 2 Particle component of test soil

单位: %

>0.075 mm	0.005~0.075 mm	0.002~0.005 mm	<0.002 mm
2.1	47.4	21.5	29.0

表 3 试验用土的矿物成分

Table 3 Mineral composition of test soil

单位: %

石英	钾长 石	斜长 石	铁白 云石	重晶 石	高岭 石	伊利 石	绿泥 石	伊/蒙 混层
45.6	3.2	5.6	0.5	2.5	0.5	7.0	0.4	34.6

表 4 试验用土的阳离子质量摩尔浓度

Table 4 Mass molarity of cation of test soil

单位: mmol/kg

Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
6.8	6.4	85.2	25.4

本文采用压实试样,制样控制指标及制样完成后的物理状态指标见表 5,采用 WP4C 露点水势仪测得制样完成后试样的初始吸力为 3200 kPa。为与已有文献^[7, 24]相一致,文中吸力符号用 s ^[24]或 u_a-u_w ^[7]表示(u_a 为气压力 (kPa); u_w 为水压力 (kPa)),在本文涉及的低应力和湿化路径下不考虑溶质吸力的低吸力范围内, s 与 u_a-u_w 是等效的。

表 5 制样控制指标及制样完成后的物理性质指标

Table 5 Controlling indices of specimen preparation and physical property parameters of specimens

压实度/%	重力含水率 w /%	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	饱和度 S_r /%	孔隙比 e
80	17.0	1.49	55.1	0.848

1.2 非饱和三轴试验方案

为获得低应力状态下、湿化过程中膨胀土的持水-体变-强度特性,采用信阳师范大学从美国 GCTS 公司引进的 USTX—2000 双压力室非饱和土动静三轴试验系统(图 1)开展控制吸力的非饱和排水剪切三轴压缩试验。由于该试验系统采用双压力室,试验过程中能够测得非饱和试样体积变化。

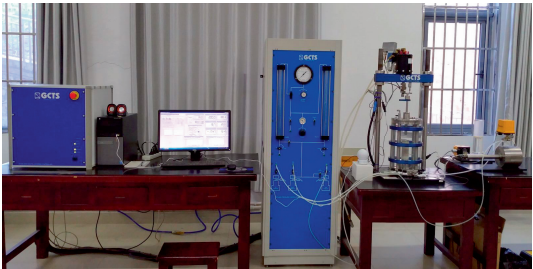


图 1 非饱和土三轴试验系统

Fig. 1 Triaxial test system for unsaturated soils

非饱和三轴试验方案如下:采用 3 个直径 39.1 mm、高度 80 mm 的三轴试样,初始状态见表 5,初始吸力为 3200 kPa。三轴试验过程中,控制 3 个试样净围压 σ_3-u_a 分别为 10, 25, 50 kPa 以模拟低应力状

态。3 个试样分别在固定净围压下逐级吸湿至目标吸力 u_a-u_w (80, 40, 10 kPa)。试验过程中, 吸力稳定标准为隔 24 h 试样体积与含水率均不发生变化。控制吸力的吸湿阶段完成后, 以 0.004%/min 的剪切速率施加轴向压力直至剪切破坏。3 个试样的非饱和和三轴试验吸力-应力路径见图 2。

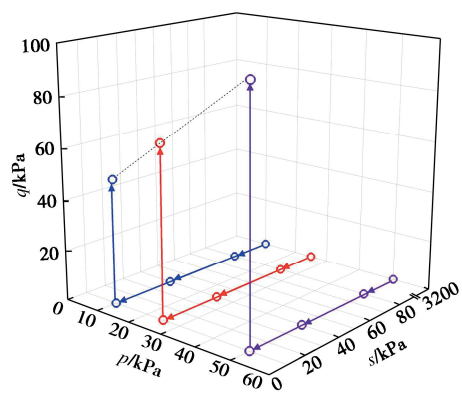


图 2 非饱和三轴试验吸力-应力路径

Fig. 2 Suction-stress path of triaxial tests on unsaturated soils

试验过程中, 测定试样体积变形、轴向变形、水量变化, 以获得 3 种净围压状态下湿化过程中的孔隙比-重力含水率-轴向变形-体积变化-吸力-净围压-主应力差关系, 分别对应湿化过程中膨胀土的持水特性 (重力含水率-吸力-净围压-主应力差关系)、变形特性 (轴向变形-体积变化-吸力-净围压-主应力差关系)、强度特性 (吸力-净围压-主应力差关系)。

1.3 吸湿过程土水特征曲线试验方案

由于膨胀土饱和与非饱和和渗透系数小, 吸力平衡历时漫长, 为验证校核 3 个试样的控制吸力的吸湿试验结果, 在 GCTS 公司生产的 SWC-150 型 Fredlund soil water characteristic device 上进行直径 61.8 mm、高度 10 mm 的该压实土样吸湿过程土水特征曲线试验。

吸湿过程中, 控制吸力 u_a-u_w 分别为 1000 , 500, 200, 100, 80, 40, 10, 0 kPa; 净围压 σ_3-u_a 为 0 kPa。试验过程中, 吸力稳定标准为隔 24 h 试样体积与含水率均不发生变化。

2 试验结果分析

2.1 控制吸力的吸湿阶段三轴试验结果

净围压 10, 25, 50 kPa 下 3 个试样控制吸力的吸湿阶段分别历时 322, 220, 187 d。控制吸力的吸湿阶段试样进水量-体积膨胀量-时间关系见图 3。

由图3可见: 每个控制吸力的吸湿阶段试样进水量均大于体积膨胀量, 这是由于试样处于非饱和状态所致。每级吸力下吸力平衡后的重力含水率-孔隙比-饱

和度-净围压-吸力关系见表6。

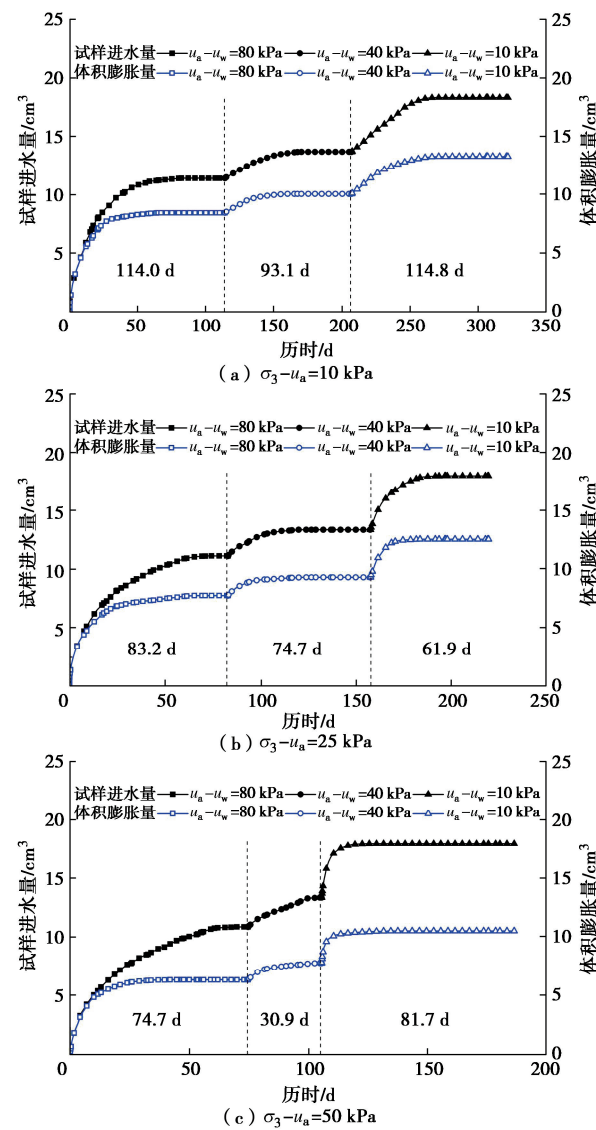


图 3 控制吸力吸湿阶段进水量-体积膨胀量-时间关系

Fig. 3 Water inflow-volumetric expansion-time relationship of specimens during stages of suction-controlled wetting

表 6 吸湿阶段三轴试样含水率-孔隙比-净围压-吸力关系

Table 6 Water content-void ratio-net confining pressure-

equilibrium suction relationship of unsaturated triaxial specimens during stages of suction-controlled wetting

吸力/ kPa	$\sigma_3-u_a=10$ kPa			$\sigma_3-u_a=25$ kPa			$\sigma_3-u_a=50$ kPa		
	w/ %	e	S_r / %	w/ %	e	S_r / %	w/ %	e	S_r / %
80	24.5	1.000	67.4	24.4	0.993	67.6	23.8	0.960	68.2
40	26.1	1.031	69.6	25.9	1.023	69.6	25.6	0.988	71.3
10	29.3	1.093	73.7	29.1	1.085	73.8	28.8	1.041	76.1

由表6可见: 吸湿过程中, 重力含水率随吸力降低、净围压减小规律性增大; 孔隙比随吸力降低、净围压减小规律性增大; 表明控制吸力的吸湿阶段三轴试验给出了规律性的湿胀结果。根据土的基本体积-质量关系 $S_{re} = G_s w$ 确定相应饱和度 S_r 列入表6, 可见: ①相同

净围压下, 随吸力降低, 饱和度增大; ②相同吸力下, 高净围压下 (如50 kPa), 虽然含水率最小, 但孔隙比亦最小, 饱和度相对最大。

2.2 控制吸力的吸湿阶段 SWCC 结果

土水特征曲线试验历时 74 d, 结果见表 7。

表 7 吸湿阶段的 SWCC
Table 7 SWCCs during wetting

吸力/ kPa	$w/\%$	e	$S_r/\%$
1000	19.7	0.897	60.4
500	21.1	0.925	62.7
200	23.3	0.972	65.9
100	25.1	1.022	67.5
80	25.8	1.049	67.6
40	27.2	1.062	70.4
10	31.0	1.111	76.7
0	39.7	1.151	94.9

将表6, 7给出的湿化过程中平衡吸力下的含水率、孔隙比绘制在图4中, 可见SWCC试验获得的含水率、孔隙比均规律性地稍大于净围压10 kPa下的相应值, 校验了3个试样控制吸力三轴吸湿试验结果的可靠性。

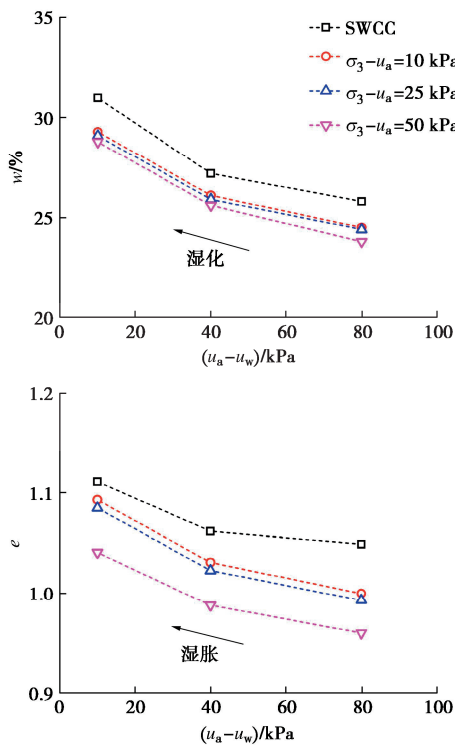


图 4 吸湿过程中含水率-孔隙比-吸力关系

Fig. 4 Water content-void ratio-equilibrium suction relationship of specimens during wetting

2.3 控制吸力的非饱和和排水剪切三轴压缩试验结果

吸湿阶段结束后即控制吸力与净围压的排水剪切三轴压缩试验开始时试样的体积质量参数见表8。

控制吸力与净围压的排水剪切三轴压缩试验剪切阶段历时5.2 d, 获得的试样水量变化-试样体积变化-饱和度-轴向应变关系见图5。

表 8 吸湿阶段结束后三轴试样体积质量参数

Table 8 Volume and mass parameters of triaxial specimens after wetting

净围压/ kPa	干土质量/ g	试样质量/ g	试样高度/ mm	试样体积/ cm^3
10	144.334	186.624	85.71	109.85
25	143.968	185.863	85.36	109.15
50	144.433	186.030	84.64	107.20

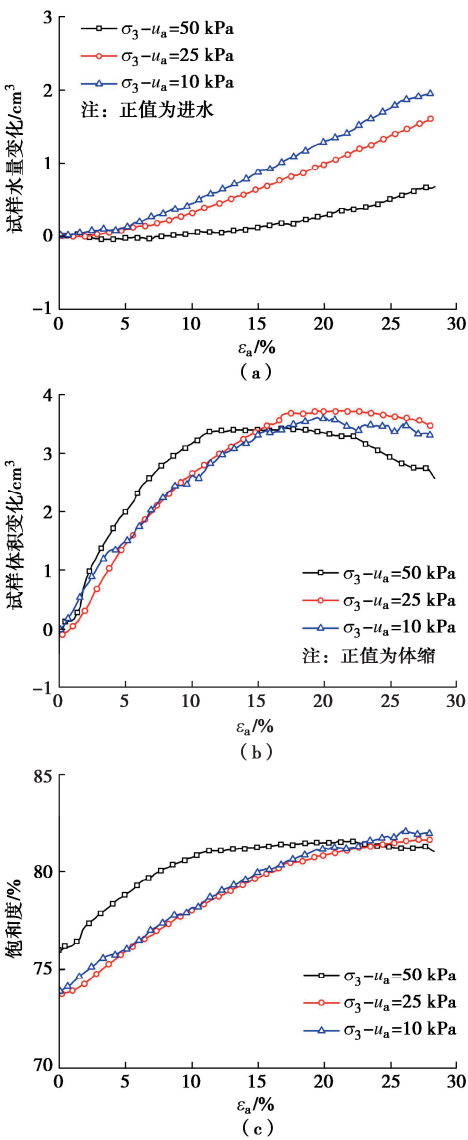


图 5 剪切过程中试样水量变化-体积变化-饱和度-轴向应变关系

Fig. 5 Water inflow/outflow-volume change-saturation-axial strain relationship of specimens during shearing

由图5可见50 kPa以内的低应力下: 剪切过程中试样是进水的, 净围压小的试样进水量大; 与此同时, 其体积是收缩的, 净围压大的试样收缩量稍大; 一方面进水一方面收缩, 导致剪切过程中试样饱和度是增大的。

剪切过程中的偏应力-体应变-轴向应变关系见图

6, 可见50 kPa以内的低应力下, 试样大体呈应变强化和剪缩现象。图7给出的试验结束后的试样照片亦可见3个试样均未出现明显剪切带, 没有出现剪切带意味着难以产生应变软化, 与3个试样剪切过程中呈现出的应变强化特征相符。

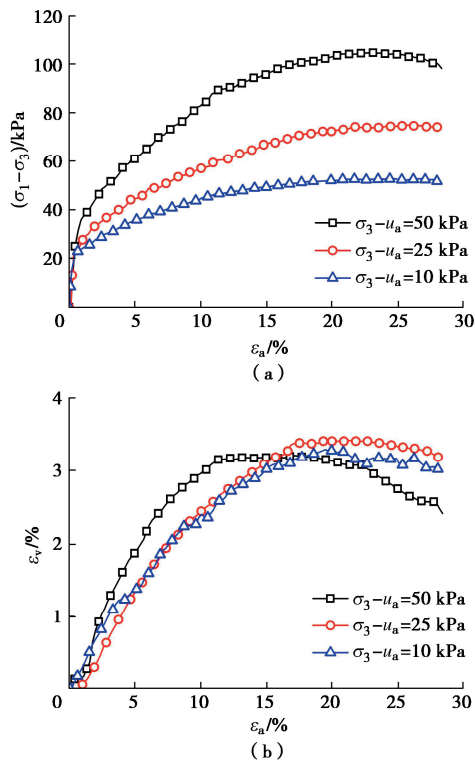


图 6 剪切过程中试样偏应力-体应变-轴向应变关系
Fig. 6 Deviatoric stress-volumetric strain-axial strain relationship of specimens during shearing



图 7 非饱和三轴压缩试验结束后的试样
Fig. 7 Soil specimens after unsaturated triaxial compression tests

鉴于剪切过程中试样应变强化, 选取轴向应变为 15 % 对应的应力状态为破坏应力点, 用吸力-净围压-破坏主应力差-含水率-孔隙比-饱和度关系表征的50 kPa 以内的低应力下荆门黄褐色中膨胀土吸湿后的抗剪强度数据见表9。

Fredlund 等^[7]建议的 2 个独立应力状态变量表达的非饱和抗剪强度公式为

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中: τ_f 为非饱和抗剪强度; σ_n 为法向应力; $\sigma_n - u_a$ 为净法向应力; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角;

φ^b 为与基质吸力相应的内摩擦角。

表 9 破坏应力点及其物性指标
Table 9 Stress values and indices to physical property of failure points

$(u_a - u_w) /$ kPa	$(\sigma_3 - u_a) /$ kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f /$ kPa	$w /$ %	e	$S_r /$ %
10	10	49.2	29.9	1.030	80.0
10	25	67.3	29.6	1.020	79.7
10	50	95.8	28.8	0.976	81.2

控制吸力的非饱和三轴试验情况下, 需采用扩展的 Mohr-Coulomb 破坏准则 (极限平衡条件) 确定抗剪强度参数 c' , φ' , φ^b :

$$(\sigma_1 - u_a) = (\sigma_3 - u_a) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) + 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (2)$$

式中: c 为总黏聚力, 包括有效黏聚力 c' 和吸力对抗剪强度的贡献 $(u_a - u_w) \tan \varphi^b$:

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (3)$$

将表 9 中破坏点应力状态代入式 (2), 获得有效内摩擦角 $\varphi' = 21.7^\circ$, 总黏聚力 $c = 12.8$ kPa。

文中排水剪切三轴压缩试验均在控制吸力 10 kPa 下完成。Vanapalli 等^[35]指出: 土水特征曲线上吸力小于进气值的边界效应区内土体接近饱和, φ^b 等于 φ' 。文献[31]获得压实度 80% 的该土样进气值约为 45.9 kPa, 表明 3 个试样剪切过程中均处于边界效应区内, 可认为 $\varphi^b = \varphi'$, 将 $\varphi^b = 21.7^\circ$ 代入式 (3), 得到有效黏聚力 $c' = 8.8$ kPa。

文献[34]给出采用直剪试验获得的该土样吸湿饱和后 $c' = 8.0$ kPa, $\varphi' = 21.5^\circ$, 本文控制吸力与净围压的排水剪切三轴压缩试验获得的 $c' = 8.8$ kPa、 $\varphi' = \varphi^b = 21.7^\circ$, 二者数值非常接近。一方面印证了本文控制吸力三轴试验结果的可靠性, 另一方面验证了 Vanapalli 等^[35]提出的边界效应区内 $\varphi' = \varphi^b$ 这一论断的适用性。

3 基于 Hydrus 的三轴试样湿化过程数值反演

由于有橡皮膜包裹, 三轴试样的湿化自下而上, 可视为一维非饱和渗流问题。图 3 给出的湿化过程中进水量-时间关系可作为反演模拟的目标函数, 在 Hydrus-1D 程序^[29]中求解一维 Richards 方程, 用于获取湿化过程土水特征曲线(SWCC)与非饱和渗透系数函数(HCF)模型参数。一维 Richards 方程为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta(h)}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

式中: z 为正方向与重力方向一致的坐标位置; t 为时间; h 为吸力水头; θ 为体积含水率, $\theta(h)$ 为 SWCC,

采用 van Genuchten 模型^[28]:

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}} \quad (5)$$

式中: θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; S_e 为有效饱和度; k 为非饱和渗透系数; k_s 为饱和渗透系数; $k(h)$ 为 HCF, 采用 VGM 模型^[27-28]:

$$k = k_s \frac{\left\{ 1 - (\alpha|h|)^{n-1} \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{n}-1} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2n}}} \quad (6)$$

式中: α , n 为 $\theta(h)$, $k(h)$ 模型参数, α 与土体进气值相关, n 与土体孔径分布相关。

以图 3 中进水量-时间关系作为 Hydrus-1D 反演模拟目标函数, 基于湿化过程初值与边值条件, 设定 SWCC/HCF 模型参数初值, 求解 Richards 方程获得湿化过程进水量-时间关系预测结果, 对比预测结果与目标函数, 采用 Levenberg-Marquardt 算法进行 SWCC/HCF 模型参数的迭代调整与优化, 直至预测结果与目标函数间的误差满足精度要求。最终, 反演获得: $k_s=0.6$ cm/d, $\alpha=0.11$ kPa⁻¹, $n=1.12$, 即获得了荆门黄褐色中膨胀土湿化路径下 SWCC/HCF 的 van Genuchten 模型参数, 可为湿化路径下膨胀土非饱和和渗流数值模拟中的参数取值提供依据和参考。

采用上述 SWCC/HCF 的 van Genuchten 模型参数在 Hydrus-1D 程序中对图 3 的进水量-时间关系进行再现, 结果见图 8, 可见取得了较好的模拟效果。Hydrus 数值模拟结果与实测结果有小幅偏差的原因在于: 数值反演与再现过程没有考虑湿化过程中的体积变化, 亦没有考虑 3 种不同净围压 (10, 25, 50 kPa) 的影响。

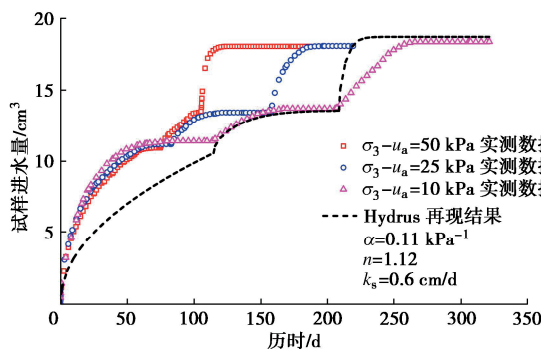


图 8 控制吸力吸湿阶段进水量-时间关系 Hydrus 数值模拟

Fig. 8 Hydrus simulation of water inflow-time relationship of specimens during stages of suction-controlled wetting

4 BBM 参数标定与本构模拟

Barcelona basic model能够描述加卸载和增减湿

下非饱和土的力学行为, 包括抗剪强度与先期固结压力随吸力而增大; 低应力下吸力降低导致的湿胀行为; 高应力下吸力降低导致的湿陷行为; 超出吸力阈值后的干缩行为^[25]。Alonso亦指出^[24]“BBM可用于弱、中膨胀性非饱和土, 例如非饱和砂、粉土、砂质黏土、低塑性黏土; 也可描述膨胀性黏土的一些特征。”此外, 由于 BBM是最通用的非饱和土本构模型, 本文采用其描述非饱和和荆门黄褐色中膨胀土低应力和湿化路径下的应力-应变-强度行为。

整理Barcelona basic model^[24]获得完整的BBM弹塑性应力应变关系显式表达式:

$$d\varepsilon_{vp}^e = \frac{\kappa}{v} \frac{dp}{p} \quad (7)$$

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{\kappa_s}{v} \frac{ds}{(s + p_{at})} \quad (8)$$

$$d\varepsilon_{vp}^p = \left\{ -M^2(2p + ks - p_0)dp + \left[-M^2(p + ks) \right] \cdot \left[-\frac{p_0(\lambda(0) - \kappa)}{(\lambda(s) - \kappa)^2} \ln \frac{p_0^*}{p^c} [-\lambda(0)\beta(1-r)e^{(-\beta s)}] \right] + \left[-M^2(p_0 - p) \right] k \right\} ds + 2qdq \Bigg/ \left\{ \left[-M^2(p + ks) \right] \cdot \left[\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa} \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \lambda(s)}{\lambda(s) - \kappa}} \right] \left[\frac{vp_0^*}{\lambda(0) - \kappa} \right] \right\} \quad (9)$$

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \frac{ds}{(s_0 + p_{at})} \quad (10)$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{dq}{3G} \quad (11)$$

$$d\varepsilon_s^p = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + ks - p_0)} d\varepsilon_{vp}^p \quad (12)$$

$$p_0 = p^c \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{(\lambda(0) - \kappa)}{(\lambda(s) - \kappa)}} \quad (13)$$

$$\lambda(s) = \lambda(0) \left[(1-r)e^{-\beta s} + r \right] \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{M(M-9)(M-3)}{9(6-M)} \left\{ \frac{1}{1 - \frac{\kappa}{\lambda(0)}} \right\} \quad (15)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_a - \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (16)$$

$$M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \quad (17)$$

$$q = M(p + ks) \quad (18)$$

BBM中符号定义与14个参数取值见表10。其中大气压力 p_{at} 取101.3 kPa, 需要确定的模型参数共13个。文中模型参数 $\lambda(0)$, κ , r , β , p_0^* 基于文献[33]给出

的饱和与控制吸力下非饱和一维压缩试验结果标定; 模型参数 λ_s , κ_s , s_0 基于文献[32, 33]给出的脱湿过程中吸力-孔隙比试验结果标定; p^c 为参考应力, 取 4 kPa; G 基于图6给出的剪切过程中试样偏应力-体应变-轴向应变关系标定; M , k 由2.3节获得的抗剪强度参数确定。参数标定过程参考了文献[26], 13个模型参数取值见表10。

表 10 BBM 中符号定义与参数取值		
Table 10 Description of symbols in BBM and model parameters		
符号	符号定义	参数取值
ε_{vp}^e	净平均正应力相关弹性体应变	
ε_{vs}^e	吸力相关弹性体应变	
ε_{vp}^p	净平均正应力相关塑性体应变	
ε_{vs}^p	吸力相关塑性体应变	
ε_s^e	弹性偏应变	
ε_s^p	塑性偏应变	
p	净平均正应力, $(\sigma_1+2\sigma_3)/3-u_a$	
q	偏应力 (广义剪应力), $\sigma_1-\sigma_3$	
s	吸力, u_a-u_w	
v	比体积, $1+e$	
e	孔隙比	
$N(s)$	与吸力相关的 $p=p^c$ 下比体积 v	
$N(0)$	饱和状态 $p=p^c$ 下比体积 v	
$\lambda(s)$	与吸力相关的净平均正应力对数硬化模量	
p_0	与吸力相关的先期固结压力	
$\lambda(0)$	饱和净平均正应力对数硬化模量	0.0242
κ	净平均正应力等向膨胀指数	0.0186
r	净平均正应力对数硬化模量相关参数	0.42
β	净平均正应力对数硬化模量相关参数	0.009
p_0^*	饱和先期固结压力	8 kPa
λ_s	吸力对数硬化模量	0.055
κ_s	吸力等向膨胀指数	0.039
s_0	吸力硬化参数	38.3 kPa
p^c	参考应力	4 kPa
G	剪切模量	5 MPa
M	临界状态有效应力比	0.84
k	黏聚力随吸力变化的相关参数	3.2
α	流动法则相关参数	3.7
p_{at}	大气压力	101.3 kPa

将表10给出的荆门黄褐色中膨胀土BBM模型参数代入BBM弹塑性应力应变关系显式表达式 (式 (7) ~ (18)), 再现图6给出的剪切过程中试样偏应力-体应变-轴向应变关系, 见图9。

由图9可见, 在轴向应变10%的范围内, BBM能够较好描述低应力和湿化路径下非饱和荆门黄褐色中膨胀土的应力-应变-强度行为, 采用双应力状态变量描述低应力低吸力下膨胀土非饱和抗剪强度与变形行为是可行的。

对图9中BBM再现结果与试验数据间存在的小幅偏差, 原因分析如下:

(1) BBM没有考虑净平均正应力等向膨胀指数 κ 是随吸力变化的; 实际上, 对于膨胀土而言, 不同吸力下 κ 存在较大差别。这一点影响到LC屈服线, 进而影响到体应变预测精度。此外, BBM不能描述等吸力剪切时的剪胀。

(2) 根据式 (15) 和表10给出的参数值算出BBM流动法则相关参数 $\alpha=1.4$, 由图10可见 $\alpha=1.4$ 预测出的塑性剪应变偏小。如果 α 取1意味着BBM服从相关流动法则, 其预测出的塑性剪应变亦偏小。经尝试取 $\alpha=3.7$, 由图9, 10可见再现的效果相对较好。但由图10可见: 即使取 $\alpha=3.7$, 依据BBM给出的式 (12), 由塑性体应变计算塑性剪应变的再现结果与实测结果在试样破坏前的应变范围内亦存在小幅偏差。

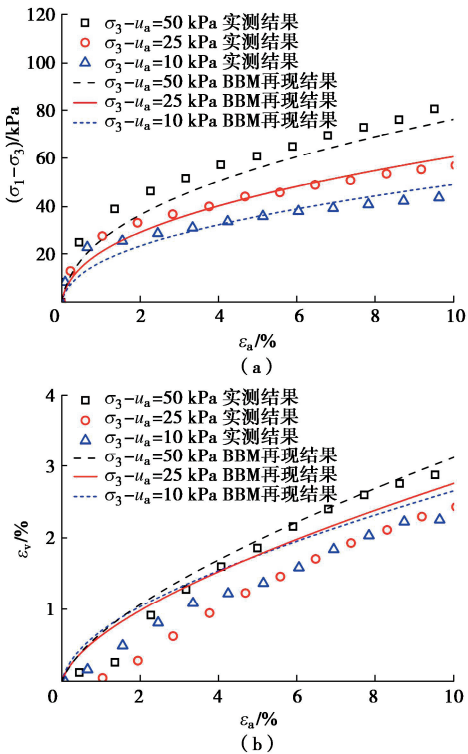
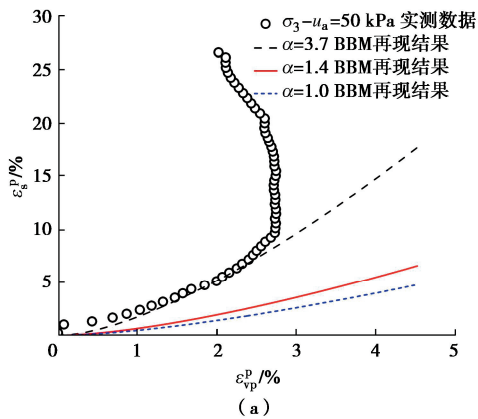


图 9 剪切过程中试样偏应力-体应变-轴向应变关系的 BBM 再现结果

Fig. 9 Reproduced results by BBM for deviatoric stress-volumetric strain-axial strain relationship of specimens during shearing



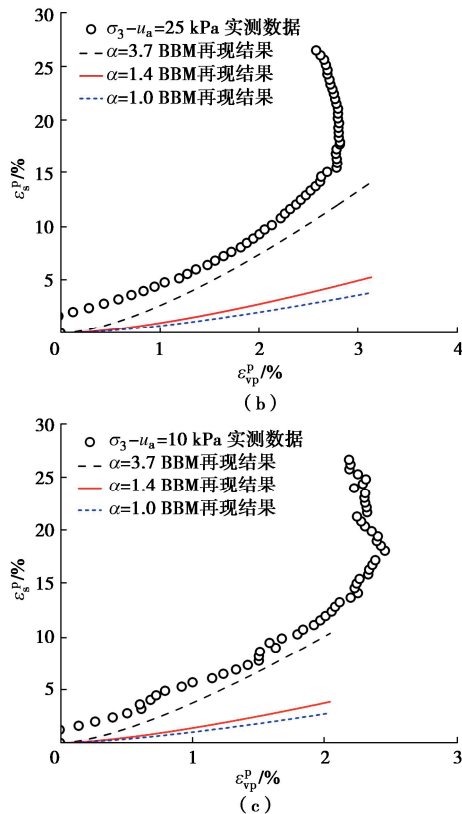


图 10 α 对 BBM 再现结果的影响

Fig. 10 Effects of α on reproduced results by BBM

(3) 采用饱和与控制吸力下非饱和一维压缩试验 (侧限应力状态) 结果标定体变参数 $\lambda(0)$, $\lambda(s)$, κ , 而图 9 再现的是三轴压缩应力状态下的应力-应变行为, 应力状态的差别亦会影响到再现精度。

5 结 论

开展了系统的控制吸力的低应力和湿化路径下荆门黄褐色中膨胀土三轴压缩试验研究, 获得了相应持水、变形、破坏等力学行为规律, 进行了湿载共同作用下的应力-应变-强度行为与非饱和渗流行为的本构模拟, 得到 5 点结论。

(1) 吸湿过程中试样体积膨胀量小于进水量。含水率、孔隙比随吸力的降低、净围压的减小规律性增大。相同净围压下, 随吸力的降低, 饱和度增大。相同吸力下, 高净围压下, 虽含水率最小, 但孔隙比亦最小, 饱和度相对最大。

(2) 剪切过程中试样是进水的, 净围压小的试样进水量大; 体积是收缩的, 净围压大的试样收缩量稍大; 进水的同时体积收缩, 剪切过程中饱和度是增大的。此外, 剪切过程中试样呈应变强化和剪缩特征。

(3) 获得了低应力和湿化路径下非饱和荆门黄褐色中膨胀土的抗剪强度参数 $c' = 8.8 \text{ kPa}$ 、 $\varphi' = \varphi_b = 21.7^\circ$, 验证了 Vanapalli 等提出的边界效应区内

$\varphi' = \varphi_b$ 这一论断的适用性。

(4) 标定了低应力和湿化路径下非饱和荆门黄褐色中膨胀土 BBM 模型完整的 13 个参数, 再现结果表明 BBM 能够较好描述低应力和湿化路径下非饱和荆门黄褐色中膨胀土的应力-应变-强度行为。

(5) 获得了荆门黄褐色中膨胀土湿化路径下 SWCC/HCF 的 van Genuchten 模型参数, 可为湿化路径下膨胀土非饱和和渗流数值模拟中的参数取值提供依据和参考。

本文不足之处是没有开展脱湿路径与湿化路径下的对比研究、亦没有对非饱和和应力-应变-强度行为与非饱和渗流行为进行统一的本构描述, 拟在今后开展相关研究。

致 谢: 感谢信阳师范大学建筑与土木工程学院已毕业的硕士研究生赵鑫鑫、郎梦婷、李政在三轴试验过程中所做的工作。感谢北京双杰科技有限公司杜基俊工程师在试验过程中给予的技术支持。

参考文献:

- [1] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15. (BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15. (in Chinese))
- [2] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141-161. (KONG Lingwei, CHEN Zhenghan. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141-161. (in Chinese))
- [3] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272. (CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272. (in Chinese))
- [4] 徐永福, 程 岩, 肖 杰, 等. 膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1281-1294. (XU Yongfu, CHENG Yan, XIAO Jie, et al. New prevention and control technology for expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1281-1294. (in Chinese))
- [5] 叶为民, 孔令伟, 胡瑞林, 等. 膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1295-1309. (YE Weimin, KONG Lingwei, HU Ruilin, et al. New prevention and treatment techniques and their

- applications to landslides and engineering slopes of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(7): 1295-1309. (in Chinese))
- [6] LU N, CALDERON A R A, WAYLLACE A, et al. Suction stress-based rainfall intensity-duration method for slope instability prediction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, **150**(8): 04024069.
- [7] FREDLUND D G, RAHARDJO H, FREDLUND M D. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. New York: Wiley, 2012.
- [8] 徐永福. 膨胀土的水力作用机理及膨胀变形理论[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 1979-1987. (XU Yongfu. Hydraulic mechanism and swelling deformation theory of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 1979-1987. (in Chinese))
- [9] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022. (CHEN Zhenghan. Mechanics for Unsaturated and Special Soils[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese))
- [10] 孙德安. 非饱和土力学特性及本构模型[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(1): 1-23. (SUN Dean. Mechanical behaviors and constitutive model for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(1): 1-23. (in Chinese))
- [11] 徐永福, 陈永战, 刘松玉, 等. 非饱和膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(3): 14-18. (XU Yongfu, CHEN Yongzhan, LIU Songyu, et al. Triaxial test on unsaturated expansive Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(3): 14-18. (in Chinese))
- [12] 孙德安, 孙文静, 孟德林. 膨胀性非饱和土水力和力学性质的弹塑性模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1505-1512. (SUN Dean, SUN Wenjing, MENG Delin. Elastoplastic modelling of hydraulic and mechanical behaviour of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1505-1512. (in Chinese))
- [13] 张俊然, 孙德安, 姜彤, 等. 宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度及其预测[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(6): 1064-1070. (ZHANG Junran, SUN Dean, JIANG Tong, et al. Shear strength of weakly expansive soils and its prediction in a wide range of suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(6): 1064-1070. (in Chinese))
- [14] 牛庚, 孙德安, 陈盼, 等. 南阳重塑非饱和膨胀土的变形和含水率变化特性[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(2): 426-435. (NIU Geng, SUN Dean, CHEN Pan, et al. Variation characteristics of deformation and water content of remolded unsaturated expansive soils in Nanyang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(2): 426-435. (in Chinese))
- [15] 孔令伟, 李雄威, 郭爱国, 等. 脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 335-340. (KONG Lingwei, LI Xiongwei, GUO Aiguo, et al. Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 335-340. (in Chinese))
- [16] 邹维列, 张俊峰, 王协群. 脱湿路径下重塑膨胀土的体变修正与土水特征[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2213-2219. (ZOU Weilie, ZHANG Junfeng, WANG Xiequn. Volume change correction and soil-water characteristics of remodeling expansive soil under dehydration path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2213-2219. (in Chinese))
- [17] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 196-201. (ZHAN Liangtong, WU Hongwei. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 196-201. (in Chinese))
- [18] 姚志华, 陈正汉, 朱元青, 等. 膨胀土在湿干循环和三轴浸水过程中细观结构变化的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 68-76. (YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, ZHU Yuanqing, et al. Meso-structural change of remolded expansive soils during wetting-drying cycles and triaxial soaking tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 68-76. (in Chinese))
- [19] 辛志宇, 谭晓慧, 王雪, 等. 膨胀土增湿过程中吸力-孔隙比-含水率关系[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1195-1203. (XIN Zhiyu, TAN Xiaohui, WANG Xue, et al. Relationship among suction, void ratio and water content of expansive soils during wetting process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1195-1203. (in Chinese))
- [20] 缪林昌, 崔颖, 陈可君, 等. 非饱和重塑膨胀土的强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 274-276. (MIAO Linchang, CUI Ying, CHEN Kejun, et al. Tests on strength of unsaturated remolded expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 274-276. (in Chinese))

- [21] 韩华强, 陈生水, 郑澄锋. 非饱和膨胀土强度及变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1872-1876. (HAN Huaqiang, CHEN Shengshui, ZHENG Chengfeng. Experimental study on strength and deformation of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1872-1876. (in Chinese))
- [22] 陈正汉, 苗强强, 郭楠, 等. 关于持水特性曲线研究的几个问题[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(4): 671-679. (CHEN Zhenghan, MIAO Qiangqiang, GUO Nan, et al. On some problems of researches on soil-water retention curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(4): 671-679. (in Chinese))
- [23] 钱建固, 林志强. 双孔隙结构重塑非饱和膨胀土的抗剪强度特性[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(3): 486-494. (QIAN Jiangu, LIN Zhiqiang. Shear strength behaviors of unsaturated expansive soils with dual-porosity structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(3): 486-494. (in Chinese))
- [24] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 405-430.
- [25] ALONSO E E, VAUNAT J, GENS A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. Engineering Geology, 1999, **54**(1/2): 173-183.
- [26] D'ONZA F, WHEELER S J, GALLIPOLI D, et al. Benchmarking selection of parameter values for the Barcelona basic model[J]. Engineering Geology, 2015, **196**: 99-118.
- [27] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, **12**(3): 513-522.
- [28] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated Soils I[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892.
- [29] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, **15**(7): 1-25.
- [30] 孔令伟, 周葆春, 白颢, 等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3036-3042. (KONG Lingwei, ZHOU Baochun, BAI Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3036-3042. (in Chinese))
- [31] 周葆春, 孔令伟. 考虑体积变化的非饱和膨胀土土水特征[J]. 水利学报, 2011, **42**(10): 1152-1160. (ZHOU Baochun, KONG Lingwei. Effect of volume changes on soil-water characteristics of unsaturated expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, **42**(10): 1152-1160. (in Chinese))
- [32] 周葆春, 张彦钧, 汤致松, 等. 荆门压实弱膨胀土孔隙比-含水率-吸力特征的滞回效应[J]. 水利学报, 2013, **44**(2): 164-172. (ZHOU Baochun, ZHANG Yanjun, TANG Zhisong, et al. Hydraulic hysteresis effect on void ratio-water content-suction behavior of Jingmen compacted expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(2): 164-172. (in Chinese))
- [33] 周葆春, 孔令伟, 梁维云, 等. 压缩过程中非饱和膨胀土体变特征与持水特性的水力耦合效应[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(4): 629-640. (ZHOU Baochun, KONG Lingwei, LIANG Weiyun, et al. Hydro-mechanical coupling effects on volume change and water retention behaviour of unsaturated expansive soils during compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(4): 629-640. (in Chinese))
- [34] 马全国, 张彦钧, 汤致松, 等. 压实膨胀土饱和抗剪强度的变动性[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2016, **29**(4): 629-635. (MA Quanguo, ZHANG Yanjun, TANG Zhisong, et al. Variation of saturated shear strength of compacted expansive soil[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2016, **29**(4): 629-635. (in Chinese))
- [35] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**(3): 379-392.