

DOI: 10.11779/CJGE202108017

考虑初始状态影响的膨胀土一维膨胀特性研究

叶云雪^{1,2}, 邹维列², 韩仲^{2*}, 谢鹏³, 张俊峰⁴, 徐永福⁵

(1. 南昌航空大学土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500; 4. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430074; 5. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 以南阳中膨胀土为研究对象, 通过室内一维膨胀特性试验和土水特性试验探究不同初始状态(包括吸力、含水率和干密度等)影响下非饱和重塑土膨胀率或膨胀力的演化规律。试验结果表明, 在不同初始含水率下, 无荷膨胀率与初始吸力呈幂函数关系, 且与初始干密度无关; 膨胀力随初始干密度的增加呈幂函数增大, 而膨胀力随初始含水率的增加却是先增大后减小; 膨胀力与初始干密度和最终吸水量均呈幂函数关系, 给出初始干密度-最终吸水量-膨胀力的三变量模型; 构建了全吸力范围内初始含水率-初始干密度-初始吸力-膨胀力的统一模型; 所提模型不仅参数少, 方程左右量纲统一, 且与试验数据具有良好的一致性, 便于工程应用。

关键词: 膨胀土; 膨胀特性; 土水特性; 初始状态; 模型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)08-1518-08

作者简介: 叶云雪(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土方面的科研和教学工作。E-mail: yeyunxue@163.com。

One-dimensional swelling characteristics of expansive soils considering influence of initial states

YE Yun-xue^{1,2}, ZOU Wei-lie², HAN Zhong², XIE Peng³, ZHANG Jun-feng⁴, XU Yong-fu⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510500, China; 4. China Construction Third Bureau Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 5. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Taking the Nanyang medium expansive soil as the research object, the evolution laws of the swelling force and swelling rate of unsaturated remolded soils under different initial conditions (including suction, water content and dry density, etc.) are explored through indoor one-dimensional swelling characteristic tests and soil-water characteristic tests. The test results show that under different initial water contents, the unloaded expansion rate has a power function relationship with the initial suction, and this function relationship has nothing to do with the initial dry density. The swelling force increases as a power function with the increase of the initial dry density, while the swelling force first increases and then decreases with the increase of the initial water content. The swelling force has a power function relationship with the initial dry density and final water absorption. A three-variable model for the initial dry density-final water absorption-swelling force is given. A unified model for the initial water content-initial dry density-initial suction-swelling force within the full suction range is established. The proposed model has few parameters and unified left and right dimensions of the equation, and it has good consistency with the experimental data, which is convenient for engineering application. The research results provide a reliable theoretical method for the analysis of the swelling characteristics and soil-water characteristics of the unsaturated Nanyang expansive soil.

Key words: expansive soil; swelling property; soil-water characteristic; initial state; model

0 引言

在边坡工程中, 地下水位上升或降雨可引起边坡隆起变形和吸力降低, 从而降低其稳定性; 在膨胀土支挡结构中, 挡土墙墙后膨胀土因吸湿膨胀受限对墙背产生较大的水平膨胀力, 对挡土墙的稳定性的作用不可忽视的作用^[1]。

膨胀土膨胀特性的相关研究主要集中在膨胀变形(如膨胀率)与膨胀力两个方面。不少学者研究了不

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509800); 国家自然科学基金项目(51779191, 51809199); 南昌航空大学博士启动基金项目(EA201911396)

收稿日期: 2020-12-25

***通信作者**(E-mail: zhong.han@whu.edu.cn)

同初始条件下（如初始含水率和初始干密度^[2]、矿物成分^[3]、盐溶液^[4]等）膨胀率或膨胀力的变化规律并提出相应的预测模型。一些学者还将吸力的变化引入到膨胀土变形及强度特性的研究中^[5-6]。初始含水率和和初始干密度是影响膨胀特性的主要外部因素之一^[2]，下文提到的主要外部因素仅涉及这两个因素。

非饱和膨胀土的吸力与膨胀特性密切相关，一方面，基质吸力由毛细力和吸附力（受库仑力、氢键力和范德华力等影响）组成，而膨胀力由晶层膨胀力、双电层膨胀力和水合力（分别受库仑力和范德华力、渗透压力和氢键力等影响）组成^[7]。另一方面，在非饱和膨胀岩吸湿过程中，随着初始含水率的减小，饱和度的增量变化率较膨胀率的变化更快^[8]，这意味着非饱和膨胀土的持水性对其膨胀变形具有一定的影响，而膨胀变形反过来又影响膨胀土的持水性。尽管吸力对膨胀特性具有重要的影响，但将其与含水率、干密度一起作为初始状态分析非饱和土膨胀土膨胀特性的系统性研究并不多见。

基于南阳中膨胀土在初始含水率和初始干密度影响下膨胀率的研究结果^[9]，本文将侧重于这两种影响因素下膨胀力的试验研究，并结合土水特性试验分析这两种因素影响下膨胀率随初始吸力的演化规律，探究膨胀力随不同影响因素的演化规律，建立初始含水率-初始干密度-初始吸力-膨胀力四者关系的统一模型、常初始含水率下初始干密度-初始吸力-膨胀力的关系模型以及常初始干密度下初始含水率-初始吸力-膨胀力的关系模型，从而为构建非饱和膨胀土的本构模型及相关工程实践提供参考。

1 试验方案

试验所用膨胀土样取自南水北调工程中线工程南阳试验段，属于中膨胀土，其基本物理力学指标如下：土颗粒相对质量密度为 2.71，液限为 66.38%，塑限为 23.15%，自由膨胀率为 70%，最大干密度为 1.82 g/cm³，最优含水率为 16.7%。土样经过碾碎、风干并过 2 mm 筛，根据不同的设定含水率配置湿土样并密封静置至少 24 h，通过击样法完成环刀样（直径 61.8 mm，高度 20 mm）的制作。

为了研究南阳中膨胀土在不同初始含水率或干密度下的膨胀特性和土水特性，本文的试验方案制定如表 1 所示。其中， ρ_{d0} 为试样初始干密度， ρ_{d0} 分别取 1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60 g/cm³； w_0 为试样初始含水率， w_0 分别取 12%, 14%, 16%, 18%, 20%, 22%；对于无荷膨胀力试验，实测 w_0 的平均值分别为 11.11%, 13.57%, 16.16%, 17.23%, 18.99%。对于 SWCC 试验，采用真空抽气饱和试样，吸力施加的顺序依次为 50, 100, 200, 390, 678, 980, 1280 kPa，

以排水量连续 72 h 小于 0.01 g 作为吸力平衡的标准。

表 1 试验方案

Table 1 Testing programs		
类别	$\rho_{d0}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_0/\%$
无荷膨胀率	1.70	12, 14, 16, 18, 20, 22
	1.60	12, 22
	1.50	12, 18
	1.40	18, 22
无荷膨胀力	1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60	12, 14, 16, 18, 20, 22
	1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60	20

2 试验结果及讨论

2.1 初始吸力与膨胀率的关系

图 1 给出了不同初始干密度下南阳膨胀土的土水特征曲线（SWCC），其中， s 为基质吸力（kPa）， w 为质量含水率。由图 1 可见，在低吸力范围内，SWCC 随着初始干密度的增加逐渐下移，且脱湿速率不断减小；在较高吸力范围内（超过 500 kPa），SWCC 几乎不受初始干密度的影响。

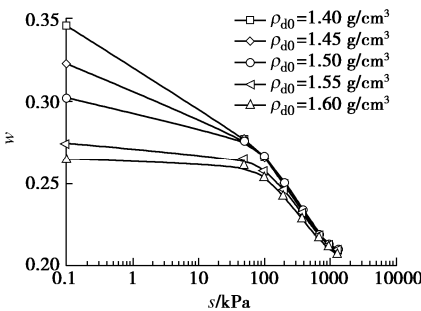


图 1 不同初始干密度下的 SWCC

Fig. 1 SWCCs under different initial dry densities

为了研究非饱和膨胀土初始吸力与膨胀率在全吸力段内（即 0~10⁶ kPa）的关系，本文基于实测 SWCC，用 VG 模型得到全吸力段的 SWCC。VG 模型的数学表达式如下：

$$w_e = \frac{w - w_r}{w_{sat} - w_r} = \left[1 + \left(\frac{s}{\alpha} \right)^n \right]^{-m} \quad (1)$$

式中 w_e 为有效含水率； w_r 为残余含水率； w_{sat} 为饱和含水率； α 为进气值（kPa）； n 为与孔隙大小分布有关的参数； m 为与 SWCC 整体几何形状有关的参数，且 $m = 1 - 1/n$ 。

鉴于 VG 模型拟合的 SWCC 在较高吸力范围与试验数据存在偏离的情况，文献[10]基于 1500 kPa 吸力范围内的 SWCC 试验数据提出了一个简单的迭代法（以下简称 Webb 迭代法），对 VG 模型进行了合理地拓展并提出

$$\lg s_{max} = \lg s^* + \frac{\lg e}{nm} \frac{w^*}{w^* - w_r} \frac{1}{1 - w_e^{*1/m}} \quad (2)$$

$$s^* = \alpha(w_e^{*-1/m} - 1)^{1/n} \quad (3)$$

式中， e 为自然对数； $s_{\max} = 10^6 \text{ kPa}$ ； w_e^* 为对应 w^* 的有效含水率。式 (2) 为 SWCC 在半对数坐标系上经过点 (s^*, w^*) 和 $(s_{\max}, 0)$ 的切线方程，且 (s^*, w^*) 为 SWCC 的毛细区和吸附区在半对数坐标系上的连接点。

通过常用的数学分析软件可求解迭代方程 (2)，从而求出 w^* ，再结合式 (3) 求得 s^* 。该迭代法简单实用，且具有较高的可靠性^[11-12]。

VG 模型参数及 Webb 迭代法的相关参数见表 2，图 2 (a) ~ (c) 是基于低吸力范围的试验数据，运用 VG 模型和 Webb 迭代法获得的南阳膨胀土在全吸力范围的 SWCC。

表 2 南阳膨胀土 SWCC 的相关参数

ρ_{d0} /(g·cm ⁻³)	VG 模型				Webb 迭代法	
	α/kPa	n	w_r	R^2	s^*	w^*
1.40	6.29	1.095	0	0.998	58.16	0.277
1.45	14.19	1.097	0	0.998	128.83	0.259
1.50	37.33	1.103	0	0.997	319.03	0.240
1.55	101.94	1.108	0	0.997	836.04	0.217
1.60	159.78	1.119	0	0.991	1184.21	0.206

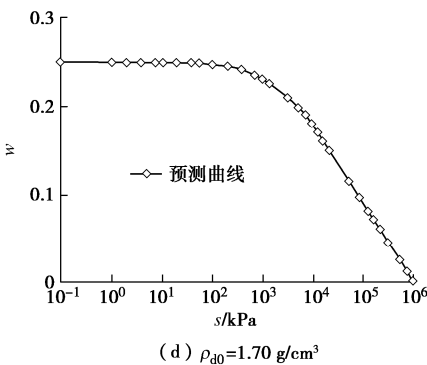
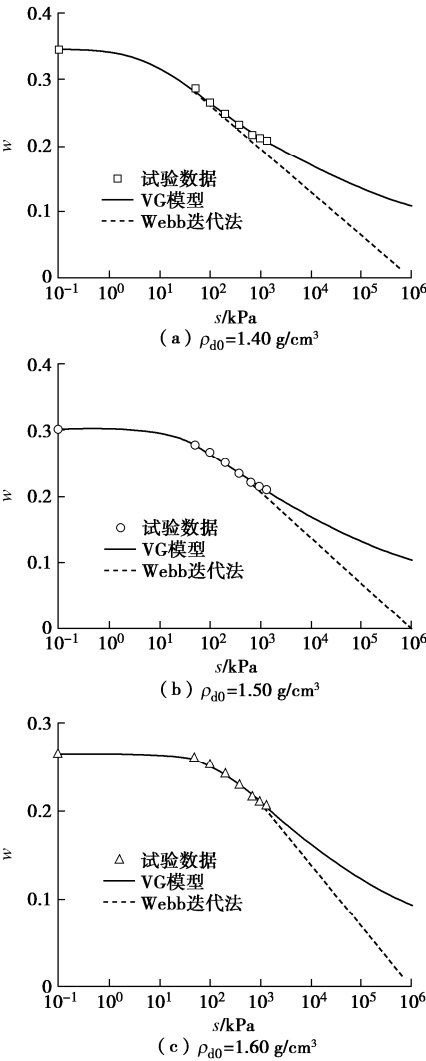


图 2 不同初始干密度下南阳膨胀土在全吸力范围的 SWCC
Fig. 2 SWCCs of Nanyang expansive soil in full suction range under different initial dry densities

当干密度越大时，试样的结构会变的越密实，导致其在低吸力范围内不易排水，且吸力平衡所花费的时间也更长，尤其是对于膨胀土，故本次试验没有进行 $\rho_{d0} = 1.70 \text{ g/cm}^3$ 的土水特性试验。基于南阳膨胀土在 3 种不同初始干密度 (1.40, 1.50, 1.60 g/cm^3) 下的 SWCC，利用文献[13]中所提的土壤转换函数 (PTFs) 预测其在 $\rho_{d0} = 1.70 \text{ g/cm}^3$ 的 SWCC。鉴于该 PTFs 是基于 VG 模型提出的，因而预测全吸力范围 SWCC 时仍需要结合 Webb 迭代法。

当 $\rho_{d0} = 1.70 \text{ g/cm}^3$ 时，通过 PTFs 反算得到 VG 模型参数 $\alpha = 905.50 \text{ kPa}$ ， $n = 1.123$ ；通过饱和试样烘干法得到饱和含水率 $w_{\text{sat}} = 0.25$ ；通过 Webb 迭代法获得毛细区与吸附区的连接点，即 $w^* = 0.19$ ， $s^* = 6499.03 \text{ kPa}$ ；最终完整的 SWCC 如图 2 (d) 所示。

同一初始干密度下的非饱和膨胀土，不同初始含水率对应的初始吸力可通过该初始干密度下的 SWCC 获得，结合该初始干密度下的无荷膨胀率试验，可获得该膨胀土在不同初始含水率下初始吸力与膨胀率的关系。图 3 给出了非饱和南阳膨胀土在不同初始含水率、初始干密度下的初始吸力 s_0 与无荷膨胀率 δ_{emax} 的关系。

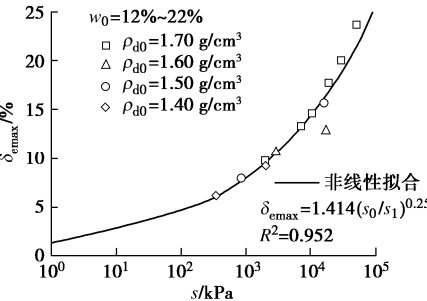


图 3 不同因素影响下初始吸力与最大膨胀率的关系
Fig. 3 Relationship between initial suction and maximum swelling rate under influence of different factors

可见，在不同的初始含水率下， s_0 与 δ_{emax} 呈幂函数关系，且与初始干密度无关，该幂函数的表达式为

$$\delta_{\text{emax}} = a_1(s_0/s_1)^{b_1} \quad (4)$$

式中, $s_1 = 1 \text{ kPa}$, 为确保该幂函数数量纲统一; a_1, b_1 为拟合参数, 分别与 $\lg s_0 - \lg \delta_{\text{emax}}$ 关系图的纵截距和斜率有关。对于大部分膨胀土而言, 初始吸力为 1 kPa 时可看作是饱和试样, 而饱和试样在一定条件下仍残留膨胀力(详见下文), 故参数 a_1 表示试样在 $s_0 = 1 \text{ kPa}$ 时的无荷膨胀率, 即 $a_1 = \delta_{\text{emax}}$, 称作残余膨胀率。

2.2 膨胀力与主要外部因素的关系

图4给出了膨胀力与初始干密度、初始含水率的关系。由图4(a)可知, 在初始含水率一定时, 膨胀力随初始干密度的增加而单调增大。这是因为当制样体积一定时, 单位体积试样中蒙脱石含量随初始干密度的增加而增大。此外, 随着初始干密度的增加, 晶层间距减小, 微观膨胀力(由晶格膨胀力、双电层膨胀力和水合力组成)不断地增大, 最终试样表现的宏观膨胀力增大。

由图4(b)可知, 当初始干密度一定时, 膨胀力随初始含水率的变化规律并非单调的: ①初始干密度较小时, 膨胀力基本不受初始含水率的影响; ②初始干密度较大时, 膨胀力随初始含水率的增加先增大到峰值, 后逐渐减小。这与文献[14]的结论是一致的。

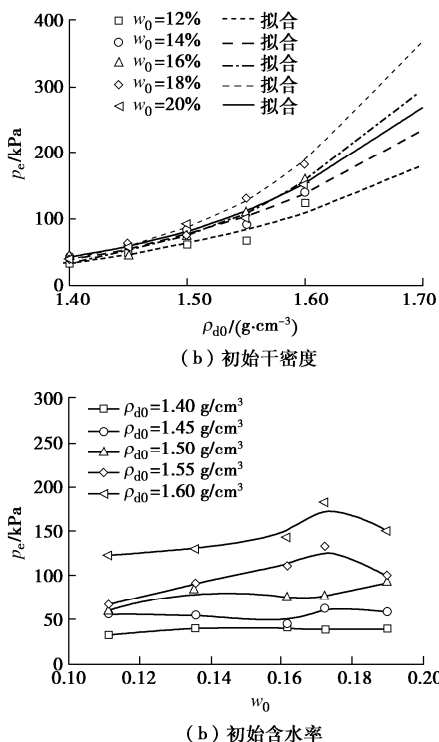


图4 不同影响因素下膨胀力的变化规律

Fig. 4 Dependences of swelling force on different influencing factors

当试样初始干密度较小时, 晶层间距较大, 在不同初始含水率下微观膨胀力均较小, 因此试样表现的宏观膨胀力较小, 且几乎与初始含水率无关。当试样初始干密度较大时, 晶层间距较小, 膨胀土表现的宏观膨胀力较大, 但明显受初始含水率的影响。随着初

始含水率的增加, 弱结合水膜的厚度变大, 当土中含有较多的弱结合水时, 土体往往表现为高塑性和易胀缩性, 因此宏观膨胀力在增大; 当初始含水率超过一定值时, 弱结合水膜的厚度不再变大, 此时宏观膨胀力最大; 随着初始含水率的继续增加, 土颗粒集聚体间在外力作用下发生相对滑动而使试样的孔隙结构发生变化^[15], 导致宏观膨胀力逐渐减少。

图4(a)中的拟合曲线可采用幂函数形式, 这与文献[16]的结论是一致的, 相应的参数值列在表3中, 其表达式为

$$p_e = k_1 (\rho_{d0} / \rho_{\text{dmax}})^{\lambda_1}, \quad (5a)$$

$$p_e = k_1 C_d^{\lambda_1}, \quad (5b)$$

式中, ρ_{dmax} 为最大干密度 (g/cm^3), 且 $\rho_{d0} / \rho_{\text{dmax}}$ 为压实度 C_d ; k_1 (kPa), λ_1 为拟合参数, 分别与 $\lg p_e - \lg C_d$ 关系图的纵截距和斜率有关。

式(5a)除了可以转换为初始状态参数 C_d 的函数外(即式(5b)), 还可转化为指数函数:

$$p_e = k_1 e^{\lambda_1 \ln \left(\frac{\rho_{d0}}{\rho_w} \right)}. \quad (5c)$$

式(5c)与文献[17]所提的指数函数类似。

需要注意的是, 当非饱和和膨胀土在使用叠式饱和器进行常体积饱和(如真空抽气饱和法)时, 饱和后的试样(即初始吸力为0)仍具有一定的膨胀力(称为残余膨胀力, 记作 p_{er})。

文献[18]基于南阳中膨胀土研究了相同初始含水率下 p_{er} 随 ρ_{d0} 的变化规律, 符合式(5a)的使用条件。利用式(5a)很好地描述了残余膨胀力与初始干密度的关系, 相应的拟合结果为: $k_1 = 151.06 \text{ kPa}$, $\lambda_1 = 8.541$, $R^2 = 0.975$ 。若令 ρ_{d0} 为 ρ_{dmax} , 则 $p_{\text{er}} = k_1$, 即参数 k_1 还可表示为饱和试样达到最大干密度时对应的残余膨胀力。

由《膨胀土地区建筑技术规范: GB50112—2013》可知, 路基胀缩变量与土层含水率的变化量密切相关。对于所研究的南阳膨胀土, 尽管膨胀力随初始含水率的变化是非单调的, 但其随最终吸水量(或含水率增量)的变化却是单调的, 如图5所示, 其中 Δw 是最终吸水量或最终含水率增量, 表示膨胀力试验结束后试样的含水率与试样初始含水率的差值。

由图5可知, 当初始含水率一定时, 膨胀力随最终吸水量的减少而增加, 这是因为试样的最终吸水量随初始干密度的增大逐渐减小, 而膨胀力随初始干密度的增大而增加(见图4(a)); 当初始干密度一定时, 初始含水率的增加导致试样的最终吸水量减少。

图5中的拟合曲线可采用幂函数形式, 相应的参数值列在表3中, 其表达式为

$$p_e = k_2 \Delta w^{\lambda_2}, \quad (6)$$

表 3 膨胀力与初始干密度和最终吸水量关系的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of relationship among swelling force, initial dry density and final water absorption

w_0 /%	式 (5a)			式 (6)			式 (7)		
	k_1/kPa	λ_1	R^2	k_2/kPa	λ_2	R^2	a_2/kPa	b_2	R^2
11.11	387.482	9.519	0.880	0.379	-3.040	0.947	0.395	3.022	0.989
13.57	374.323	8.302	0.968	0.535	-2.720	0.979	0.692	2.572	0.985
16.16	564.711	10.515	0.986	0.392	-2.543	0.975	0.345	2.616	0.993
17.23	851.601	11.865	0.986	0.160	-2.854	0.957	0.062	3.317	0.966
18.99	490.285	9.326	0.970	0.759	-1.945	0.985	1.923	1.552	0.979

式中, λ_2 为拟合参数, 分别与 $\lg p_e - \lg \Delta w$ 关系图的纵截距和斜率有关。

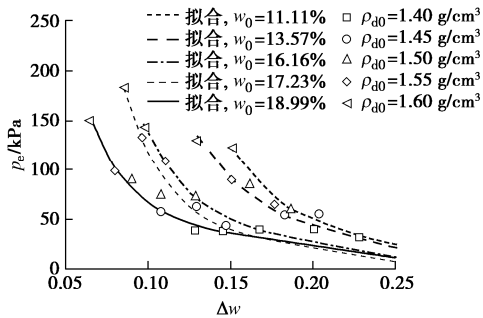


图 5 膨胀力与最终吸水量的关系

Fig. 5 Relationship between swelling force and final water absorption

为了定量地描述膨胀力随初始干密度、最终吸水量的变化关系, 基于式 (5), (6) 可考虑构造如下的函数:

$$p_e = a_2[(\rho_{d0} / \rho_{dmax})^{b_2} + \Delta w^{-b_2}] = a_2(C_d^{b_2} + \Delta w^{-b_2}) \quad (7)$$

式中, a_2, b_2 分别为拟合参数, 其值见表 3, 其余同上。

通过表 3 可以发现, 式 (7) 能够合理描述初始干密度 (或压实度) - 最终吸水量 - 膨胀力的关系。

3 主要外部因素、吸力及膨胀力的联系

3.1 初始含水率 - 初始干密度 - 初始吸力 - 膨胀力的关系

为了能够定量地描述试样不同初始状态 (w_0, ρ_{d0} 和 s_0 等) 对膨胀力的影响, 并结合残余膨胀力 (即式 (5a)), 考虑以 p_e 为因变量, w_0, ρ_{d0} 和 s_0 为自变量构建初始含水率 - 初始干密度 - 初始吸力 - 膨胀力的模型关系, 其表达式为

$$p_e = \alpha_1 \left[s_0 \left(\frac{G_s w_0 \rho_{d0}}{G_s \rho_w - \rho_{d0}} \right)^{\beta_1} + p_{e1} \left(\frac{\rho_{d0}}{\rho_{dmax}} \right)^{\gamma_1} \right] \quad (8a)$$

$$p_e = \alpha_1 s_0 S_{r0}^{\beta_1} + \alpha_1 p_{e1} C_d^{\gamma_1} \quad (8b)$$

式中 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 为拟合参数; $p_{e1} = 1 \text{ kPa}$, 以保证式中变量纲一致; S_{r0} 为初始饱和度; G_s 为土的相对质

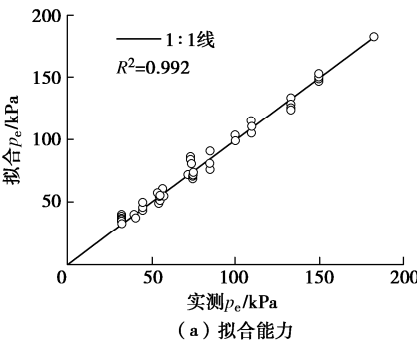
量密度; 其余同上。

式 (8) 可分别描述不同初始状态 (w_0, ρ_{d0} 和 s_0) 和 (S_{r0}, C_d 和 s_0) 影响下膨胀力的演化规律。当 $s_0 = 0$ 时, 式 (8a) 还可转化为式 (5a), 故式 (8a), (8b) 的适用条件是全吸力范围内。

由式 (8a) 可知, 若不考虑残余膨胀力 (即令 $p_{e1} = 0$): ①当 w_0 和 ρ_{d0} 一定时, p_e 与 s_0 呈线性关系, 当 s_0 和 ρ_{d0} 一定时, p_e 与 w_0 呈幂函数关系, 文献[19]得到同样的结果; ②式 (8b) 与文献[20]的结论一致。

为了验证式 (8a) 的可靠性, 首先, 将膨胀力试验中 5 组不同初始含水率 $w_i = (w_1, \dots, w_5)^T$, 初始干密度 $\rho_{di} = (\rho_{d1}, \dots, \rho_{d5})^T$ 按照数组 (w_i, ρ_{di}) 形式组成一个 5 行 2 列的二维数组 $A_{5 \times 2}$; 其次, 在 $A_{5 \times 2}$ 中任取子数组 $A_{4 \times 2}$, 鉴于 w_i 和 ρ_{di} 的值随着 i 的增加而增大, 若 $A_{4 \times 2}$ 中所有元素的值按行、列分别递增的方式排列, 则符合条件的 $A_{4 \times 2}$ 有 25 组。最后, 根据所选 $A_{4 \times 2}$ 中的 w_i 和 ρ_{di} 确定相应的膨胀力 $p_j = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_{13})^T$ 和初始吸力 $s_j = (s_1, \dots, s_{13})^T$, 进一步将 $A_{4 \times 2}$ 和 $A_{5 \times 2}$ 扩展为新的二维数组形式 $(w_i, \rho_{di}, s_j, p_j)$ (其中, $i = 1 \sim 5; j = 1 \sim 13$), 即 $A_{4 \times 4}$ 和 $A_{5 \times 4}$, 满足条件的数据共有 26 组。

图 6 (a) 是利用式 (8a) 对这 26 组数据进行的拟合度检验。另外, 将其中的 1 组数据 (即 5×4 的数组) 代入式 (8a) 中进行最佳拟合, 得到相应的参数值 $\alpha_2 = 0.295, \beta_2 = 4.557, \gamma_2 = 231.975, R^2 = 0.986$, 再将这些参数值代入式 (8a) 中并对余下的 25 组数据中的膨胀力进行预测 (见图 6 (b) 所示)。由此可见, 式 (8a) 在所研究的初始状态 (w_0, ρ_{d0} 和 s_0) 范围内能够很好地预测膨胀力。



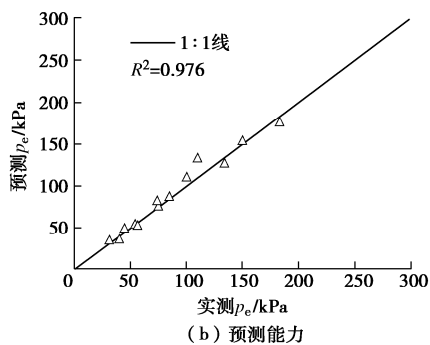


图 6 式 (8a) 的可靠性

Fig. 6 Reliability of Formula (8a)

3.2 常含水率下初始干密度 - 初始吸力 - 膨胀力的关系

为了探究不同初始含水率下初始干密度和初始吸力对膨胀力的影响, 令式 (8a) 中的 w_0 为常数, 并进行适当修正可得到

$$p_e = \alpha_2 \left[s_0 \left(\frac{\rho_{d0}}{\rho_{dmax}} \right)^{\beta_2} + p_{e1} \left(\frac{\rho_{d0}}{\rho_{dmax}} \right)^{\gamma_2} \right], \quad (9a)$$

$$p_e = \alpha_2 s_0 C_d^{\beta_2} + p_{e1} C_d^{\gamma_2}, \quad (9b)$$

式中, α_2 , β_2 , γ_2 为拟合参数, 其余同上。式 (9b) 为 $C_d - s_0 - p_e$ 的函数关系。

综上可知, 当初始含水率一定时, 膨胀力均随初始干密度的增加呈幂函数增大, 可见式 (9a) 符合这样的规律。

利用式 (9a) 对不同初始含水率下膨胀力随初始干密度和初始吸力的变化曲线进行拟合, 由表 4 可知, 式 (9a) 能够合理描述 $\rho_{d0} - s_0 - p_e$ 的关系。

表 4 初始干密度 - 初始吸力 - 膨胀力关系的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of relationship among initial dry density, initial suction and swelling force

w_0 /%	式 (9a)			
	α_2	β_2	γ_2	R^2
11.11	157.165	89.231	5.229	0.965
13.57	338.373	103.752	7.821	0.970
16.16	564.711	353.000	10.515	0.986
17.23	0.162	9.117	9.000	0.981
18.99	417.939	87.431	8.562	0.973

3.3 常干密度下初始含水率 - 初始吸力 - 膨胀力的关系

同理, 当初始干密度一定时, 膨胀力随初始含水率的变化是非单调的, 而初始吸力与初始含水率是一一对应且单调变化 (如 SWCC)。鉴于吸力较膨胀力对含水率的变化值更为敏感, 故以膨胀力和初始吸力的比值为因变量, 初始含水率为自变量构建分段函数, 从而探究不同初始干密度影响下初始含水率和初始吸力对膨胀力的影响。基于式 (8a), 该分段函数的表达式为

$$\left. \begin{aligned} p_e/s_0 &= \alpha_3 w_0^{\beta_3} \quad (0 \leq w_0 < w_{sat}), \\ p_e &= p_{er} \quad (w_0 = w_{sat}), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, α_3 , β_3 为拟合参数, 其值见表 5, w_{sat} 为饱和含水率, 其余同上。

表 5 初始含水率 - 初始吸力 - 膨胀力关系的拟合参数

Table 5 Fitting parameters of relationship among initial water content, initial suction and swelling force

$\rho_{d0}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	式 (10)		
	α_3	β_3	R^2
1.40	54.478	0.873	0.992
1.45	58.683	0.719	0.999
1.50	167.698	1.114	0.985
1.55	319.560	1.226	0.994
1.60	299.223	1.090	0.986

对于某一给定的 ρ_{d0} , 由式 (10) 可知: ①当试样饱和时, $p_e = p_{er}$, 可利用式 (5a) 进行计算; ②当试样为非饱和样时, p_e/s_0 与 w_0 呈幂函数关系, 需要注意的是, 当试样为干土时 (即 $w_0 = 0$), p_e 不为 0, 而 $s_0 = 10^6 \text{ kPa}$, 故 p_e/s_0 可近似看作是 0。由表 5 可知, 式 (10) 能够正确描述 $w_0 - s_0 - p_e$ 的关系。

4 结 论

本文对非饱和南阳中膨胀土的重塑样进行不同初始条件下的室内膨胀特性试验和土水特性试验, 研究初始含水率、初始干密度和初始吸力与膨胀特性的关系, 得到以下 5 点结论。

(1) 在一定初始含水率范围内, 非饱和膨胀土的初始吸力与无荷最大膨胀率呈幂函数关系, 且与初始干密度无关。

(2) 当初始含水率一定时, 膨胀力随初始干密度的增加而单调地增大; 当初始干密度一定时, 膨胀力随初始含水率的变化规律并非是单调的, 当初始干密度较小时, 膨胀力基本不受初始含水率的影响, 随着初始干密度的增大, 膨胀力随初始含水率的增加先增大后减小。

(3) 膨胀力随试样最终吸水量 (或含水率增量) 的变化是单调的。当初始含水率一定时, 膨胀力随试样最终吸水量的减少而增加; 当初始干密度一定时, 试样最终吸水量随初始含水率的增加而减小。在不同初始含水率下, 膨胀力与初始干密度 (或压实度)、最终吸水量均呈幂函数关系, 由此建立的初始干密度 - 最终吸水量 - 膨胀力的函数关系与试验数据具有良好的 consistency。

(4) 为定量描述非饱和膨胀土样在不同初始状态 (干密度、含水率和吸力等) 下膨胀力的变化规律, 建立了初始干密度 - 初始含水率 - 初始吸力 - 膨胀力或初始饱和度 - 压实度 - 初始吸力 - 膨胀力的多元函数关系, 所提模型不仅具有良好的可靠度, 而且适用

于全吸力范围。

(5) 当初始含水率和初始干密度一定时, 基于该多元函数, 分别构建了初始干密度(或压实度) - 初始吸力 - 膨胀力、初始含水率 - 初始吸力 - 膨胀力的函数关系, 前者是考虑残余膨胀力的连续函数, 后者是考虑饱和及非饱和状态的分段函数, 它们与相应的试验数据均具有良好的一致性, 这为研究非饱和膨胀土的强度和变形特性提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 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 Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [2] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 击实膨胀土工程变形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(5): 826 - 830. (LI Xian-min, WANG Yong-he, YANG Guo-lin, et al. Test study on engineering deformation characteristics of compacted expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(5): 826 - 830. (in Chinese))
- [3] 徐永福, 孙德安, 董平. 膨润土及其与砂混合物的膨胀试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(3): 451 - 455. (XU Yong-fu, SUN De-an, DONG Ping. Swelling tests on bentonite and sand-bentonite mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(3): 451 - 455. (in Chinese))
- [4] 于海浩, 孙德安, 韦昌富, 等. 氯化钠溶液饱和不同初始含水率膨润土的膨胀特性[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 595 - 600. (YU Hai-bo, SUN De-an, WEI Chang-fu, et al. Swelling characteristics of bentonite with different initial water contents saturated by NaCl solution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 595 - 600. (in Chinese))
- [5] 石北啸, 陈生水, 韩华强, 等. 考虑吸力变化的膨胀土边坡破坏规律分析[J]. 水利学报, 2014, **45**(12): 1499 - 1506. (SHI Bei-xiao, CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, et al. Failure law of the expansive soil slope considering the suction changes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(12): 1499 - 1506. (in Chinese))
- [6] 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 Hua-qiang, CHEN Sheng-shui, ZHENG Cheng-feng. Experimental study on strength and deformation of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1872 - 1876. (in Chinese))
- [7] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及细观膨胀模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (JIA Jing-chao. Study on the Swelling Mechanism and Mesomechanical Swelling Model of Expansive Soils[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [8] 范秋雁, 梁昕, 韩进仕. 非饱和膨胀岩饱和度及胀缩特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(1): 45 - 56. (FAN Qiu-yan, LIANG Xin, HAN Jin-shi. Experimental study on saturation and swelling-shrinkage characteristics of unsaturated expansive rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(1): 45 - 56. (in Chinese))
- [9] 邹维列, 叶云雪, 韩仲. 基于化学反应动力学方程的一维膨胀时程模型[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 737 - 744. (ZOU Wei-lie, YE Yun-xue, HAN Zhong. Chemical reaction kinetics based models for describing evolution of one-dimensional expansion with time[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 737 - 744. (in Chinese))
- [10] WEBB S W. A simple extension of two-phase characteristic curves to include the dry region[J]. Water Resources Research, 2000, **36**(6): 1425 - 1430.
- [11] LU S, REN T, GONG Y, et al. Evaluation of three models that describe soil water retention curves from saturation to oven dryness[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, **72**(6): 1542 - 1546.
- [12] SCHNEIDER M, GOSS K U. Prediction of water retention curves for dry soils from an established pedotransfer function: evaluation of the Webb model[J]. Water Resources Research, 2012, **48**(6): W06603.
- [13] 叶云雪, 邹维列, 袁斐, 等. 基于土壤转换函数(PTF)预测不同初始孔隙比土的土 - 水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(12): 2305 - 2311. (YE Yun-xue, ZOU Wei-lie, YUAN Fei, et al. Predicating soil-water characteristic curves of soils with different initial void ratios based on a pedotransfer function[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(12): 2305 - 2311. (in Chinese))
- [14] 刘岩, 吴天前, 邹维列. 强膨胀土自然膨胀特性的试验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2020, **48**(2): 29 - 35. (LIU Yan, WU Tian-qian, ZOU Wei-lie. Experimental study on humidification deformation of expansive soil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology

- (Natural Science Edition), 2020, **48**(2): 29 - 35. (in Chinese))
- [15] BURTON G J, SHENG D, CAMPBELL C. Bimodal pore size distribution of a high-plasticity compacted clay[J]. Géotechnique Letters, 2014, **4**(2): 88 - 93.
- [16] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(10): 1555 - 1559. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Study on variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(10): 1555 - 1559. (in Chinese))
- [17] MANCA D, FERRARI A, LALLOUI L. Fabric evolution and the related swelling behaviour of a sand/bentonite mixture upon hydro-chemo-mechanical loadings[J]. Géotechnique, 2016, **66**(1): 41 - 57.
- [18] ZOU W L, YE J B, HAN Z, et al. Effect of montmorillonite content and sodium chloride solution on the residual swelling pressure of an expansive clay[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(19): 1 - 12.
- [19] 卢肇钧, 吴肖茗, 孙玉珍, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(5): 20 - 27. (LU Zhao-jun, WU Xiao-ming, SUN Yu-zhen, et al. The role of swelling pressure in the shear strength theory of unsaturated soils Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(5): 20 - 27. (in Chinese)).
- [20] TU H, VANAPALLI S K. Prediction of the variation of swelling pressure and 1-D heave of expansive soils with respect to suction using the soil water retention curve as a tool[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(8): 1213 - 1234.

新书介绍:《非饱和土与特殊土力学——理论创新、科研方法及治学感悟》

陈正汉教授的专著《非饱和土与特殊土力学——理论创新、科研方法及治学感悟》由科学出版社于2021年7月出版发行。全书内容分为三篇及附录。正文分为7章:第一篇(第1章和第2章)系统介绍作者及其学术团队在非饱和土与特殊土力学的基本理论和本构模型研究方面取得的主要创新成果,对非饱和土与特殊土力学及其工程应用的新进展进行全面系统的总结,并对今后的研究工作提出若干建议;第二篇(第3章至第5章)对土力学的理论模型和科研方法进行系统论述,总结作者在加强团队创新文化建设和学风建设方面的经验,阐述知行合一理念的形成为及发展岩土力学理论体系的思考;第三篇(第6章和第7章)是作者的学术奋斗生涯和治学感悟。书末

附录共17个,主要介绍第十届全国土力学及岩土工程学术会议的盛况和办会经验、非饱和土与特殊土专业委员会的章程及开展的国内外学术交流活动、部分同行专家对作者学术成果的评价。内容丰富、自主创新、深入系统、推理严谨、数据翔实、旁征博引、表述精炼是该书的鲜明特色。

该书可供从事岩土力学与工程的教学、科研人员及研究生参考阅读。

顺便指出,陈正汉教授与秦冰博士合著的《缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用》一书已由科学出版社在2017年7月出版发行。该书共10章,是国内关于高放废物深地质处置库的缓冲/回填材料研究成果的第一本专著。

(本刊编辑部)