

DOI: 10.11779/CJGE201504008

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

周葆春¹, 孔令伟², 梁维云¹, 马全国¹, 张斌¹

(1. 信阳师范学院土木工程学院, 河南 信阳 464000; 2. 岩土力学与工程国家重点实验室(中国科学院武汉岩土力学研究所), 湖北 武汉 430071)

摘要: 土体压缩是岩土工程领域的基本问题。压缩过程中非饱和土的力学与水力学行为是同时发生且相互影响的, 有必要统一考察体变特征与持水特性的水力耦合效应。为此, 以荆门弱膨胀土为研究对象, 开展土中水密度试验、饱和与控制吸力下的非饱和一维压缩试验, 准确测量了压缩与卸荷回弹过程中孔隙比-重力含水率-吸力-竖向净应力关系, 探讨了水力耦合状况下非饱和膨胀土的体变特征与持水特性规律, 并建立相应本构描述。结论如下: ①加载段, 非饱和压缩曲线均发生明显转折, 体现出屈服行为; 随吸力增大, 压缩曲线依次发生“穿越”现象; 卸载段大体呈线性, 其斜率随吸力增大而降低。提出能够描述干缩、压缩、卸荷体胀、屈服、压缩性与卸荷回弹性随吸力变化等行为的非饱和土体变方程, 可直接用于分层总和法计算。②不同吸力下重力含水率变化存在较大差异; 压缩至 2941.8 kPa 时, 不同吸力下含水率非常接近。吸力与竖向净应力对含水率变化的耦合影响可用 3 参数 Logistic 函数描述。③压缩过程中饱和度随竖向净应力增大而增大, 卸荷过程中随竖向净应力降低亦增大。采用饱和度或重力含水率, 对压缩过程中的水力路径会出现“湿化”与“脱湿”的不同判断, 即水力耦合状况下土体表现出复杂的持水状态变化特征。

关键词: 非饱和土; 压实膨胀土; 体变特征; 持水特性; 吸力; 水力耦合; 饱和度; 土中水密度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0629-12

作者简介: 周葆春(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学性质与本构模拟方面的研究工作。

E-mail: zhoubc@xynu.edu.cn.

Hydro-mechanical coupling effects on volume change and water retention behaviour of unsaturated expansive soils during compression

ZHOU Bao-chun¹, KONG Ling-wei², LIANG Wei-yun¹, MA Quan-guo¹, ZHANG Bin¹

(1. College of Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and

Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: During compression of unsaturated soils, the volume change and water content change interact simultaneously. The hydro-mechanical coupling effects on both of them are comprehensively investigated. For this purpose, tests on water density in soils and suction-controlled (0~1000 kPa) one-dimensional compression tests on saturated and unsaturated soils are carried out for Jingmen expansive soils. The conclusions are drawn as follows: (1) For the volume change behaviour, the yielding point can be observed on the load-compression curve, and the compression ones under higher suction intersect the curves under lower suction sequentially. The unloading curves appear to be linear, and the slopes of which decrease with the increasing suction. The volume change formula is presented, which is capable of predicting the shrinkage due to suction increase, volume compression/expansion due to loading/unloading, yielding, and the variety of compressibility due to suction change. (2) For the water retention behaviour during compression, the water content changes slightly under higher suction. When compressed to the net vertical pressure of 2941.8 kPa, the water contents under the four different suctions are similar. A three-parameter Logistic function is presented for simulating the coupling effects of suction and net vertical stress on water content. (3) The degree of saturation increases during both loading and unloading, both of which mean ‘wetting’. However, the water content decreases during loading, which means ‘drying’. The reason for this discrepancy is that the change of degree of saturation can be affected by change of the water content as well as that of void ratio.

Key words: unsaturated soil; compacted expansive soil; volume change behaviour; water retention behaviour; suction;

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009118); 中国博士后科学基金项目(20100470058)

收稿日期: 2014-06-09

hydro-mechanical coupling; degree of saturation; water density in soil

0 引言

土体压缩狭义上指压力作用下土体体积缩小的行为, 广义上涵盖了卸荷导致的回弹膨胀、干缩、湿胀、湿陷行为。研究土体压缩性主要目的是用于沉降计算, 以此为主要内容的土体变形问题是岩土工程领域最基本也是最重要的问题之一^[1]。非饱和土的压缩本是土体力学行为, 但受土体水力学行为影响, 例如低持水状态下土体具有更低的压缩性; 反之, 土体水力学行为亦受土体压缩性影响, 例如压缩过程中的饱和度变化。因此, 压缩过程中非饱和土的力学与水力学行为是同时发生且相互影响的, 有必要统一考察体变特征与持水特性的水力耦合效应。

非饱和土体变特征研究领域已有众多成果^[2-11], 考虑应力状态或孔隙比影响的持水特性亦有大量研究^[12-16], 但压缩过程中体变特征与持水特性耦合效应的研究^[17-18]并不多见。Tarantino等^[17]通过不排水条件下监测吸力的一维压缩试验, 获得了非饱和高岭土压缩与卸荷回弹过程中的吸力-饱和度-孔隙比-含水率-竖向应力关系, 结果表明不排水条件下的体积变化仍会影响土体吸力。Taibi等^[18]亦通过不排水条件下的一维压缩试验, 比较压实黏土加载导致“湿化”与自由吸湿导致“湿化”的异同。然而, 从非饱和土工程实践角度而言, 排水的压缩过程更为重要。此外, 膨胀土失水收缩干裂, 吸水膨胀软化, 力学行为(变形与强度)与水力特征(饱和度/含水率)间存在着强烈的相互作用, 其水力耦合效应的研究尤显必要。

另一值得关注的问题是: 持水特性研究中常用饱和度和作为持水/流动状态变量。由于饱和度的直接量测非常困难, 很多情况下通过假定土中水密度为 1 g/cm^3 推算。已有研究^[19-22]表明膨胀土中平均水密度大于 1 g/cm^3 且随土体孔隙比减小而增大。即确定合理的土中水密度是获得相对准确饱和度的前提。

为此, 本文以荆门弱膨胀土为研究对象, 开展饱和和压实土中水密度试验、排水条件下饱和与非饱和一维压缩试验(试验过程中同时监测体积与水量变化), 获得了平均水密度-孔隙比关系、压缩与卸荷回弹过程中孔隙比-含水率-饱和度-吸力-竖向净应力关系, 探讨了水力耦合状况下非饱和膨胀土的体变特征与持水特性规律, 在Fredlund非饱和土体变方程^[2]与BBM模型^[23]基础上, 构建一个能描述干缩、加荷体缩、卸荷体胀、屈服、压缩性与卸荷回弹性随吸力变化等力学行为的, 简洁到能直接用于分层总和法计算的非饱和土体变方程。最后, 探讨了水力耦合状况下

土体饱和度变化的复杂性。

1 试验方案

1.1 试验土样

试验用土取自湖北荆门, 为弱膨胀土, 呈黄褐色、硬塑状态, 含黑色铁锰结核, 局部有白色填充物, 其物理性质指标、矿物成分与颗粒组成参见文献[24]; 重型击实试验表明, 该膨胀土的最优含水率为15.5%, 最大干密度为 1.86 g/cm^3 。

1.2 试样制备

试验采用压实土样, 试样制备的控制压实度为90%, 控制干密度为 1.67 g/cm^3 , 控制重力含水率为17%。为避免试样饱和过程中体积膨胀导致试样高度超过环刀高度(环刀直径61.8 mm, 高度20 mm)而引起的误差, 本文采用直径61.8 mm, 高度10 mm的压实土样, 试样照片见图1。制样方法参见文献[25]。

1.3 试样饱和

为获得充分饱和的试样, 并监测饱和过程中的体积变化, 对压制完成后的试样进行一维无荷载膨胀试验, 即将试样置于固结容器中浸水饱和至体积不变为止, 试验过程中通过百分表量测试样高度变化, 饱和过程照片见图2。试验参照行业标准中《无荷载膨胀率试验》方法执行^[26], 在单杠杆固结仪上完成, 饱和稳定标准为隔6 h百分表读数不变。



图1 试样照片

Fig. 1 Soil sample



图2 试样饱和

Fig. 2 Sample saturation

1.4 饱和和压实土中水密度试验

在单杠杆固结仪上, 对浸水饱和完成后的11个试

样分别施加 0, 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 4000 kPa 的固结压力至体积不变为止。试验过程中通过百分表监测试样高度变化, 以获得试样体积变化。试验结束后, 测定试样质量, 再将试样置于 110℃ 下烘干 72 h, 以获得干土质量。

1.5 饱和压缩试验

饱和压缩试验是非饱和压缩特性研究的基准。在单杠杆固结仪上, 对浸水饱和完成后的试样进行含卸载的一维压缩试验, 压力等级为 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 800, 400, 200, 100, 50, 25, 12.5, 0 kPa。试验过程中监测试样高度变化以获得试样体积。试验参照行业标准^[26]中《标准固结试验》方法执行, 每级荷载下稳定标准为 24 h。试验结束后, 测定试样质量, 再将试样烘干, 测定干土质量。

1.6 非饱和压缩试验

试验在 GCTS 公司生产的 SWC-150 型 Fredlund soil water characteristic device 上进行。设备(图 3)由压力容器、压力控制面板和竖向加压系统组成, 通过空压机供气。吸力控制采用轴平移技术, 陶土板进气值 15 bar。设备通过固定在加载平台上的百分表量测试样高度变化, 通过 2 个体变管量测试样水量变化。竖向加压系统包含加压框架、气动加载器、压力表与加压阀, 竖向加载能力 10 kN, 试样所受竖向压应力通过竖向压力除以试样面积换算。设备采用压力补偿系统平衡压力容器中气压力对加压杆的上浮力, 原理是压力容器与平衡活塞间通过管路连接(图 3)实现气压力相等, 且平衡活塞净面积等于加压杆横截面积^[27], 因此施加在试样上的竖向压应力为竖向净应力。



图 3 Fredlund 土水特征曲线仪

Fig. 3 Fredlund soil water characteristic device

非饱和压缩试验方案如下:

(1) 陶土板饱和 陶土板饱和方法参见文献[25]。将饱和后的陶土板置入压力容器中, 用固定环(图 4)固定在底座上。固定环按标准环刀外径定做, 功能是限制试样位于陶土板中央, 以保证试样均匀受压。

(2) 试样安装 将饱和完成后的试样置于陶土板中央(图 5), 再将刚性加载板(图 6)置于试样中央, 然后封闭压力容器。

(3) 吸力平衡 针对 4 种控制吸力(100, 200, 500, 1000 kPa), 通过压力控制面板上的调压阀对压力容器施加相应气压力。监控百分表与左右体变管读数, 直至吸力平衡, 稳定标准为隔 24 h 百分表与体变管读数均不发生变化。根据百分表读数可获试样体积变化, 根据体变管读数可获试样质量(水量)变化。

(4) 非饱和压缩 吸力平衡后, 进行含卸载的一维非饱和压缩试验。控制竖向加压系统压力等级依次为 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2 psi, 由于试样面积为 30 cm², 扣除加载活塞的摩擦力后, 换算为竖向压应力依次为 23, 46, 91.9, 183.9, 367.7, 735.4, 1470.9, 2941.8, 1470.9, 735.4, 367.7, 183.9, 91.9, 46 kPa。试验过程中监测百分表与体变管读数, 每级压力下稳定标准为 24 h, 其选用理由为: ①与饱和压缩试验稳定标准保持一致; ②非饱和压缩试样历经压制—浸水饱和(10 d 左右)—吸力平衡(10 d 左右)过程, 压缩前已处于稳定的非饱和状态, 实测结果表明: 每级压力下 24 h 体变与持水状态已达稳定。非饱和压缩试验完成后, 测定试样高度、质量; 再将试样烘干, 测定干土质量。

(5) 仪器变形量测定 用不锈钢标准块代替试样, 采用相同气压力与竖向压力加载方案, 进行仪器变形量测定。目的是: 数据处理时从总变形量中扣除仪器变形量得到试样实际竖向变形量。

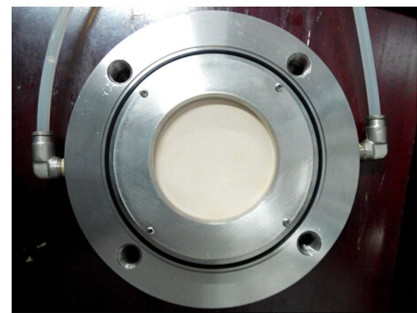


图 4 陶土板与固定环

Fig. 4 Ceramic plate and fixed ring



图 5 试样安装

Fig. 5 Sample installation

表 1 制样完成后与饱和完成后的孔隙比与重力含水率
Table 1 Void ratios and water contents of samples

试样状态	饱和压实土中的 水密度试验		饱和压缩试验		非饱和压缩试验 控制吸力 100 kPa		非饱和压缩试验 控制吸力 200 kPa		非饱和压缩试验 控制吸力 500 kPa		非饱和压缩试验 控制吸力 1000 kPa	
	e	$w/\%$	e	$w/\%$	e	$w/\%$	e	$w/\%$	e	$w/\%$	e	$w/\%$
制样完成后	0.627 (均值)	16.94 (均值)	0.629	16.73	0.616	16.29	0.621	16.52	0.617	16.39	0.618	16.38
饱和完成后	0.910	33.67	0.931	未量测	0.921	34.05	0.910	33.20	0.917	33.67	0.917	33.42



图 6 刚性加载板
Fig. 6 Rigid loading plate

2 试验结果分析

各试样制样完成后与饱和完成后的孔隙比与重力含水率见表 1, 可见各试样的初始密实状态(孔隙比)与初始持水状态(重力含水率)均相当接近, 试验结果之间具备可比性的基础。

2.1 饱和压实土中的水密度

饱和压实土中水密度 ρ_w 与相应孔隙比 e 确定方法为: 由试验结束时试样质量 m 减去干土质量 m_s 得到土中水质量 m_w 。干土体积 $V_s=m_s/G_s$ (该膨胀土土粒比重 G_s 为 2.72^[24])。由试验结束时试样体积 V 减去 V_s 得到孔隙体积 V_v 。试验结束时孔隙比 $e=V_v/V_s$ 。由于试样是饱和的, 水体积 $V_w=V_v$ 。试验结束时土中水密度 $\rho_w=m_w/V_w=m_w/V_v$ 。

11 个试样 (e, ρ_w) 关系见表 2, 可见 ρ_w 变动范围为 0.984~1.337 g/cm³, 相应 e 变动范围为 0.392~0.909。

表 2 饱和压实膨胀土的 $\rho_w - e$ 关系

Table 2 $\rho_w - e$ relationship of saturated samples			
竖向压力/kPa	孔隙比	重力含水率/%	水密度/(g·cm ⁻³)
0	0.909	33.67	1.007
12.5	0.885	32.02	0.984
25	0.858	31.61	1.002
50	0.827	31.19	1.026
100	0.741	29.31	1.076
200	0.678	27.01	1.083
400	0.615	25.43	1.124
800	0.559	23.65	1.150
1600	0.478	21.42	1.218
3200	0.411	19.80	1.311
4000	0.392	19.29	1.337

将 $\rho_w - e$ 关系绘制在图 7 中, 可见 ρ_w 随 e 减小而规律性增大。其原因是: 文中测定的为平均水密度, 不区分吸附水与自由水; 因吸附水密度大于自由水密度^[1], 饱和状态下, 随孔隙比减小, 自由水部分排出, 吸附水所占比例增大, 导致平均水密度增大。

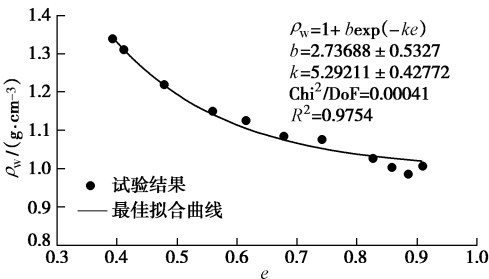


图 7 饱和压实膨胀土 $\rho_w - e$ 关系

Fig. 7 $\rho_w - e$ relationship of saturated samples

经尝试, 采用式 (1) 所示 2 参数指数函数描述图 7 中 $\rho_w - e$ 关系规律:

$$\rho_w(e) = 1 + b \exp(-ke) \quad (1)$$

式中 ρ_w 为水密度 (g/cm³); e 为孔隙比; b, k 为相应参数。图 7 中的拟合结果表明: 式 (1) 可很好描述该饱和压实膨胀土的 $\rho_w - e$ 关系。

非饱和状态下土中平均水密度的量测是困难的。原因是: 非饱和土中孔隙气的存在导致水体积并不等于孔隙体积, 水体积量测的困难导致其平均水密度难以准确测定。但无论饱和还是非饱和状态, 平均水密度取决于自由水与吸附水的相对比例和吸附水中强/弱结合水的相对比例, 这是一个值得进一步探讨的问题^[21]。但可以推测的是: 对短程吸附效应显著的膨胀土而言, 相同孔隙比条件下, 非饱和状态下自由水所占比例低于饱和状态下自由水所占比例, 非饱和状态下平均水密度理应高于饱和状态下平均水密度。

由于非饱和状态下平均水密度量测的实际困难, 饱和状态下实测平均水密度比自由水密度 (1.0 g/cm³) 更接近土体实际状况。因此本文以下处理非饱和和压缩试验结果时, 将采用式 (1) 给出的饱和状态下平均水密度 $\rho_w(e)$ 公式计算试样饱和度, 该方法能够更真实地反映压缩过程中的饱和度变化行为。

2.2 饱和压缩特性

含卸载的一维饱和压缩试验所获孔隙比 - 竖向有效应力关系见表3, 前文饱和压实土中水密度试验亦可获相应孔隙比 - 竖向有效应力关系, 将其同时绘制在图8中 (图8为单对数坐标系 $e - \lg \sigma'_v$)。

表 3 一维饱和压缩试验结果

Table 3 Results of saturated one-dimensional compression tests			
竖向有效应力/kPa	孔隙比	竖向有效应力/kPa	孔隙比
0	0.931	800	0.504
12.5	0.901	400	0.522
25	0.872	200	0.546
50	0.824	100	0.572
100	0.757	50	0.596
200	0.688	25	0.619
400	0.626	12.5	0.639
800	0.554	0	0.713
1600	0.491	—	—

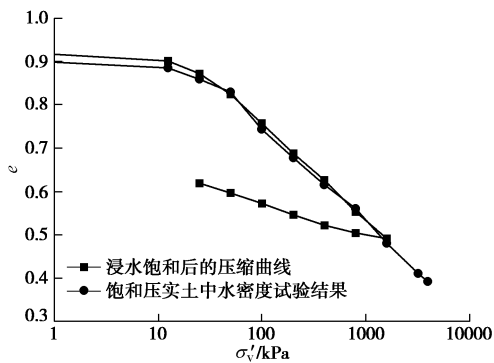


图 8 一维饱和压缩曲线

Fig. 8 Saturated one-dimensional compression curves

由图 8 可见: 试样压缩曲线发生明显转折, 体现

出固结屈服应力 σ'_{vy} 的存在; 采用双对数坐标方法^[28] 确定 σ'_{vy} , 即 $\ln v - \lg \sigma'_v$ 坐标系中 (比容 $v=1+e$) 固结屈服应力由双直线交点确定。此外, 压缩曲线后半段 (σ'_v 为 100~1600 kPa 区间内) 呈线性, 该段斜率为压缩指数 C_c , 表征压缩性大小。压缩曲线卸载段 (σ'_v 为 1600~12.5 kPa 区间内) 斜率为回弹指数 C_s , 表征回弹膨胀性大小。将试样压缩前孔隙比, σ'_{vy} , C_c , C_s 列在表 5 中, 以便与下文非饱和压缩特性参数进行对比分析。

2.3 非饱和压缩过程中的孔隙比 - 含水率 - 饱和度 - 吸力 - 竖向净应力关系

非饱和压缩过程中的孔隙比、重力含水率与饱和度均按其定义式直接确定。方法为: 孔隙比 $e=V_v/V_s$, 根据干土质量与土粒比重可获 V_s , 由总体积 V 减去 V_s 可获 V_v 。重力含水率 $w=m_w/m_s$, 根据试样质量与干土质量可获 w 。饱和度 $S_r=V_w/V_v$, V_v 一定的前提下, S_r 取决于水体积 V_w , 然而水体积很难直接量测, 只能采用 $V_w=m_w/\rho_w$ 获取, 因此受土中水密度 ρ_w 影响, 文中确定 V_w 时, 水密度采用式 (1) 确定。需要说明的是: 当土中水密度不为 1 g/cm³ 时, 土的基本体积 - 质量关系 $S_r=G_s w/e$ 应修正为 $S_r=G_s w/e \rho_w$ 。

非饱和压缩试验所获 4 种控制吸力下加卸载过程中的孔隙比、重力含水率与饱和度见表 4。为表达方便起见, 饱和状态下的竖向有效应力与非饱和状态下的竖向净应力均用 σ'_v 表示; 表中第一行数据为吸力平衡后的结果。

表 4 非饱和压缩试验结果

Table 4 Results of unsaturated one-dimensional compression tests												
控制吸力/kPa	100			200			500			1000		
σ_v'/kPa	e	$w/\%$	$S_r/\%$	e	$w/\%$	$S_r/\%$	e	$w/\%$	$S_r/\%$	e	$w/\%$	$S_r/\%$
0	0.828	27.24	86.57	0.794	24.81	81.68	0.752	22.56	77.61	0.745	20.58	71.37
23	0.792	26.70	88.05	0.762	24.29	82.73	0.740	22.38	78.02	0.718	20.36	72.71
46	0.774	26.01	87.41	0.755	24.08	82.57	0.729	22.20	78.28	0.715	20.30	72.67
91.9	0.750	25.32	87.29	0.731	23.86	84.04	0.717	22.02	78.67	0.704	20.08	72.80
183.9	0.703	24.33	88.32	0.697	23.35	85.23	0.699	21.83	79.58	0.684	20.02	74.18
367.7	0.644	23.03	89.22	0.641	22.52	87.53	0.661	21.19	80.54	0.663	19.96	75.71
735.4	0.577	21.88	91.29	0.576	21.39	89.43	0.593	20.86	85.52	0.623	19.59	77.69
1470.9	0.510	20.27	91.28	0.513	19.95	89.61	0.526	19.76	87.36	0.542	19.07	82.83
2941.8	0.438	18.51	90.52	0.445	18.36	89.10	0.458	18.36	87.73	0.472	17.94	84.33
1470.9	0.443	19.20	93.37	0.457	18.76	89.77	0.453	18.64	89.59	0.479	18.18	84.79
735.4	0.462	19.88	94.58	0.473	19.47	91.45	0.479	19.22	89.68	0.487	18.42	85.13
367.7	0.482	20.41	94.90	0.489	20.02	92.39	0.490	19.49	89.85	0.495	18.66	85.55
183.9	0.499	21.16	96.55	0.501	20.42	92.93	0.500	19.90	90.63	0.498	18.91	86.32
91.9	0.508	21.15	95.47	0.510	20.81	93.74	0.505	19.99	90.53	0.500	19.00	86.52
46	0.517	22.13	98.90	0.518	21.21	94.73	0.510	20.21	91.00	0.502	19.09	86.71

(1) 孔隙比 - 吸力 - 竖向净应力关系 (水力耦合状况下的体变特征)

孔隙比 - 吸力 - 竖向净应力关系反映体积变化 (孔隙比) 受湿度变化 (吸力) 与压力变化 (竖向净应力) 的耦合影响, 物理表象为干缩、压缩与卸荷体胀。图9为根据表2~4绘制的孔隙比 - 吸力 - 竖向净应力关系。由图9与表4可见:

- a) 吸力平衡后的孔隙比随吸力的增大而降低 (列在表5中), 这是干缩行为。
- b) 同一吸力下, 孔隙比随竖向净应力加载而降低 (受压体缩), 随竖向净应力卸载而增大 (卸荷体胀)。
- c) 加载段, 非饱和压缩曲线均发生明显转折, 显示出固结屈服应力的存在; 随吸力增大, 非饱和压缩曲线依次发生“穿越”现象。
- d) 不同吸力下, 卸载段大体呈线性, 其斜率随吸力增大而降低。

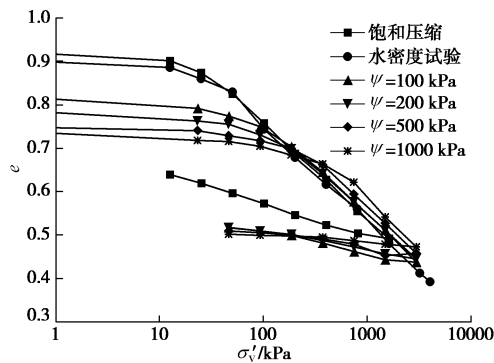


图 9 控制吸力下的一维非饱和压缩曲线

Fig.9 Suction-controlled one-dimensional compression curves

所谓“穿越”现象指: 低吸力下试样初始孔隙比较大, 刚度较小; 高吸力下试样初始孔隙比较小, 刚度较大; 非饱和压缩过程中, 竖向净应力增加到一定值时, 高吸力下试样的压缩曲线会“穿越”低吸力下试样的压缩曲线。“穿越”现象表明高吸力下试样具有更低的压缩性。

下文试图建立压缩过程中 $e - \psi - \sigma'_v$ 关系的数学描述。

针对每一吸力下的压缩 - 回弹曲线, 采用双对数坐标方法^[28]确定固结屈服应力 σ'_{vy} 。取图9中压缩曲线后半段 (σ'_v 为183.9~2941.8 kPa区间内) 斜率为压缩指数 C_c 。取压缩曲线卸载段 (σ'_v 为2941.8~46 kPa区间内) 斜率为回弹指数 C_s 。相应参数值见表5。

干缩行为

表5中吸力平衡后的孔隙比 - 吸力关系表达的是无竖向净应力状态下低吸力范围 (0~1000 kPa) 内的干缩行为, 图10中同时给出该土样无竖向净应力状态

下高吸力范围 (3300~359100 kPa) 内的干缩行为^[25]。

虽然采用文献[25]建议的3参数指数函数可较好描述该膨胀土全吸力范围内的干缩行为 (图10 (a)), 但为本构描述的简单性, 采用对数函数^[23]描述该行为

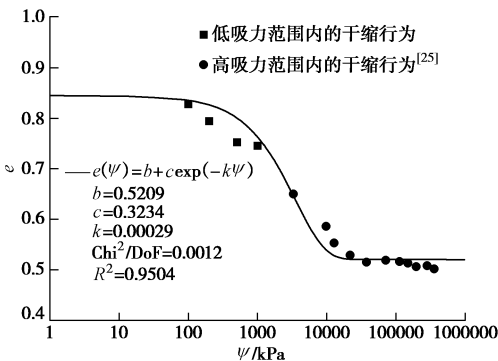
$$e(\psi) = e_0 - C_{ss} \lg \left(\frac{\psi + 10}{10} \right) \quad , \quad (2)$$

式中, e_0 为无竖向净应力下的饱和状态孔隙比, C_{ss} 为干缩模量。图 10 (b) 中的拟合结果表明: 式 (2) 可在 0~113300 kPa 吸力范围内 (相应重力含水率变化范围为 33.6%~5.98%) 较好描述吸力作用下的干缩行为。

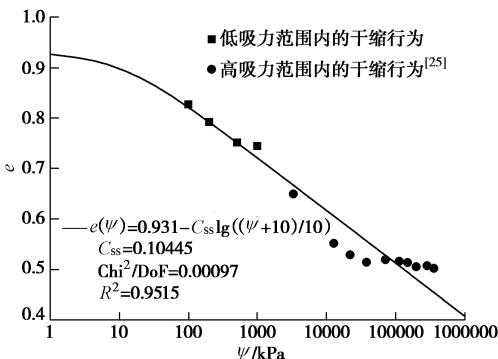
表 5 固结屈服应力、压缩指数与回弹指数

Table 5 Values of consolidation yield stress, compression index and swelling index

控制吸力 ψ /kPa	吸力平衡后的 孔隙比	固结屈服应 力 σ'_{vy} /kPa	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s
0	0.931	43.5	0.2212	0.0735
100	0.828	104.8	0.2206	0.0479
200	0.794	137.8	0.2100	0.0419
500	0.752	251.9	0.2050	0.0333
1000	0.745	357.3	0.1811	0.0170



(a) 3参数指数函数拟合结果



(b) 式 (2) 拟合结果

图 10 干缩行为

Fig. 10 Shrinkages due to suction increase

屈服行为

根据表5绘制的图11中的 $\sigma'_{vy}(\psi)$ 关系表达的是固

结屈服应力随吸力增大而增大的行为, 类似于BBM (Barcelona basic model)^[23]中著名的LC屈服线 (loading-collapse curve), 鉴于BBM中LC屈服线表达式假定不同吸力下回弹指数相同, 而表5中实测结果表明回弹指数对吸力具有相当依赖性, 因此采用式(3)的幂函数形式描述该行为

$$\sigma'_{vy}(\psi) = \sigma'_{vy}(0) + \psi^\zeta, \quad (3)$$

式中, $\sigma'_{vy}(0)$ 为饱和状态下的固结屈服应力, ζ 为相应土性参数。图11中的拟合结果表明式(3)可较好描述固结屈服应力随吸力增大而增大的行为。

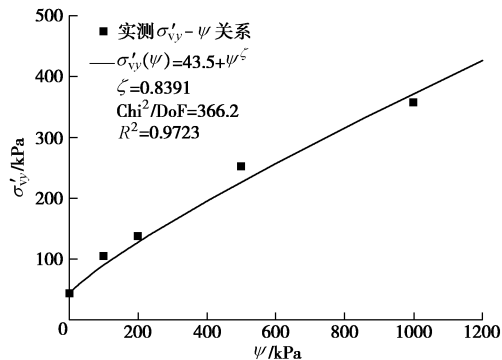


图11 固结屈服应力 - 吸力关系

Fig. 11 Relationship between consolidation yield stress and suction

压缩行为

根据表5绘制的图12中的 $C_c(\psi)$ 关系表达的是压缩指数随吸力增大而降低的行为, 即高吸力下试样具有更低压缩性, 采用BBM建议的表达式^[23]描述该行为

$$C_c(\psi) = C_c(0)[(1-r)\exp(-\beta\psi) + r], \quad (4)$$

式中, $C_c(0)$ 为饱和状态下的压缩指数, r 与 β 为相应土性参数。图12中的拟合结果表明式(4)可较好描述压缩指数随吸力增大而降低的行为。

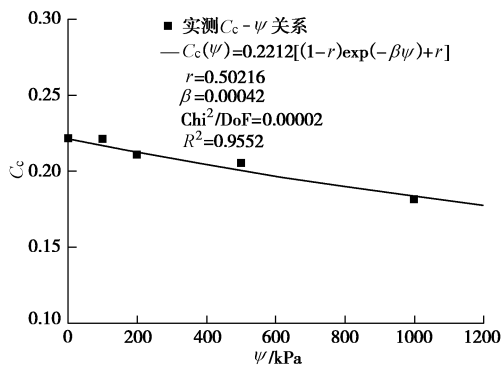


图12 压缩指数 - 吸力关系

Fig. 12 Relationship between compression index and suction

卸荷膨胀行为

根据表5绘制的图13中的 $C_s(\psi)$ 关系表达的是回弹

指数随吸力增大而降低的行为, 即高吸力下试样具有更低的卸荷回弹性, 采用式(4)相同形式描述该行为

$$C_s(\psi) = C_s(0)[(1-g)\exp(-\xi\psi) + g], \quad (5)$$

式中, $C_s(0)$ 为饱和状态下的回弹指数, g 与 ξ 为相应土性参数。

图13中的拟合结果表明式(5)可较好描述回弹指数随吸力增大而降低的行为。

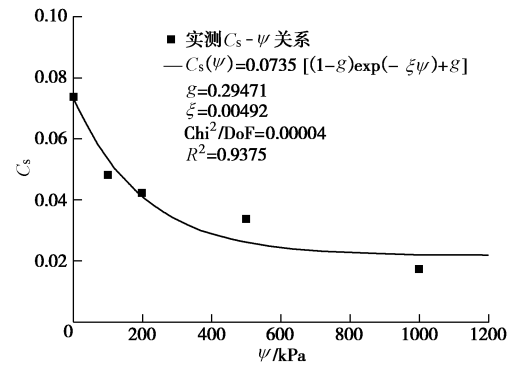


图13 回弹指数 - 吸力关系

Fig. 13 Relationship between swelling index and suction

非饱和土体变方程

由图9可见, 单对数坐标系内, 每一吸力下, 非饱和和压缩曲线均发生明显转折, 转折前的压缩曲线与卸荷回弹线均大体平行。因此采用分段函数描述吸力与竖向净应力对非饱和膨胀土体积变化的耦合影响。

非饱和压缩分3部分: ①吸力作用下的干缩, 采用式(2)描述; ②竖向净应力小于固结屈服应力 $\sigma'_{vy}(\psi)$ 的阶段, 变形指数采用 $C_s(\psi)$; ③竖向净应力大于 $\sigma'_{vy}(\psi)$ 的阶段, 变形指数采用 $C_c(\psi)$ 。该非饱和土体变方程如下:

$$\left. \begin{aligned} e(\psi, \sigma'_v) &= e_0 - C_{ss} \lg\left(\frac{\psi+10}{10}\right) - C_s(\psi) \lg\left(\frac{\sigma'_v+10}{10}\right) \\ \sigma'_v &\leq \sigma'_{vy}(\psi), \\ e(\psi, \sigma'_v) &= e_0 - C_{ss} \lg\left(\frac{\psi+10}{10}\right) - C_s(\psi) \lg\left(\frac{\sigma'_{vy}(\psi)+10}{10}\right) - \\ &\quad C_c(\psi) \lg\left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vy}(\psi)}\right) \quad \sigma'_v > \sigma'_{vy}(\psi), \\ \sigma'_{vy}(\psi) &= \sigma'_{vy}(0) + \psi^\zeta, \\ C_c(\psi) &= C_c(0)[(1-r)\exp(-\beta\psi) + r], \\ C_s(\psi) &= C_s(0)[(1-g)\exp(-\xi\psi) + g], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, ψ 与 σ'_v 为状态变量, C_{ss} 为干缩模量, $C_c(\psi)$ 为压缩模量, $C_s(\psi)$ 为回弹模量, $\sigma'_{vy}(\psi)$ 为固结屈服应力。

需要测定的模型参数有饱和状态下的 e_0 , $\sigma'_{vy}(0)$, $C_c(0)$, $C_s(0)$, 土性参数 C_{ss} , ζ , r , β , g , ξ , 共10

个, 该土样的模型参数取值列在表6中。

图14为采用式(6)与表6给出的土性参数对该膨胀土的非饱和压缩行为再现的结果。由图14可见式(6)能够有效描述非饱和压缩过程中的干缩、加荷体缩、卸荷体胀、屈服以及压缩性与卸荷回弹性随吸力变化而导致的“穿越”现象。

表 6 荆门弱膨胀土非饱和和压缩行为土性参数

Table 6 Parameters of unsaturated volume change formula				
e_0	$\sigma'_{vv}(0)$	$C_c(0)$	$C_s(0)$	C_{ss}
0.931	43.5	0.2212	0.0735	0.10445
ζ	r	β	g	ζ
0.8391	0.50216	0.00042	0.29471	0.00492

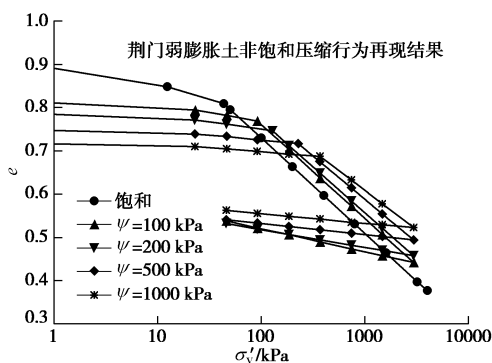


图 14 非饱和和压缩行为再现结果

Fig. 14 Reproduced results by volume change formula

方程选择净应力与吸力为应力状态变量, 其优点是: 净应力与吸力是相互独立, 且试验中可控、工程实践中可测的应力变量(通常情况下实际工程中净应力等于总应力^[11]), 二者中亦不包含任何物理状态变量, 即满足Fredlund提出的应力状态变量须与材料物理性质无关的原则^[29]。最后要说明的是, 将 $\psi=0$ kPa 带入式(6)可得到饱和土变形计算对数法公式^[1], 即式(6)可由非饱和状态平顺过渡到饱和状态, 从而能够方便地应用于沉降计算的分层总和法。

为数学描述的简单性, 式(6)中饱和状态下的竖向有效应力(竖向总应力与孔隙水压力的差值)与非饱和状态下的竖向净应力(竖向总应力与孔隙气压力的差值)均用 σ'_v 表示, 此外, 式(6)尚不能描述湿化导致的膨胀或塌陷行为。

(2) 重力含水率 - 吸力 - 竖向净应力关系(水力耦合状况下的持水特性)

重力含水率 - 吸力 - 竖向净应力关系反映不同吸力下非饱和和固结过程中的水量变化行为, 其物理表象为吸力增大导致的脱湿行为和压力作用下的非饱和和固结行为对持水状态的耦合影响。图15为根据表2与表4绘制的重力含水率 - 吸力 - 竖向净应力关系。

由图15可见:

a) 吸力平衡后的重力含水率随吸力增大(基质势的降低)而降低, 这是吸力作用下的脱湿行为。

b) 各级吸力下, 压缩过程中 $w - \lg \sigma'_v$ 关系均呈现显著的非线性, 较难用线性函数准确描述。

c) 不同吸力下压缩过程中 w 变化存在较大差别, 低吸力下 w 变化幅度大, 高吸力下 w 变化幅度小, 即固结排水量随吸力增大而降低。

d) 压缩至竖向净应力为2941.8 kPa时, 不同吸力下 w 非常接近, 在17.94%~18.51%之间, 表明文中吸力范围内(100~1000 kPa), 竖向净应力达2941.8 kPa时, 荷载势(overburden potential)^[30]相对于基质势起主导作用。

e) 各级吸力下, 卸荷回弹过程中 $w - \lg \sigma'_v$ 关系均呈良好线性关系, 其斜率随吸力增大而降低, 表明高吸力下卸荷回弹过程中的吸湿能力相对较低。

f) 对比图15中的 $w - \psi - \sigma'_v$ 关系与图9中的 $e - \psi - \sigma'_v$ 关系可见二者具有大体类似的曲线形态, 有所区别的是: 压缩过程中, $e - \psi - \sigma'_v$ 关系曲线随吸力的增大依次发生“穿越”现象, 而 $w - \psi - \sigma'_v$ 关系曲线未发生“穿越”现象, 说明压缩过程中高吸力下试样仍然维持相对较低的持水状态。“穿越”现象的产生与否体现出不同吸力下竖向净应力加/卸载对脱湿行为与压缩行为影响的差别。

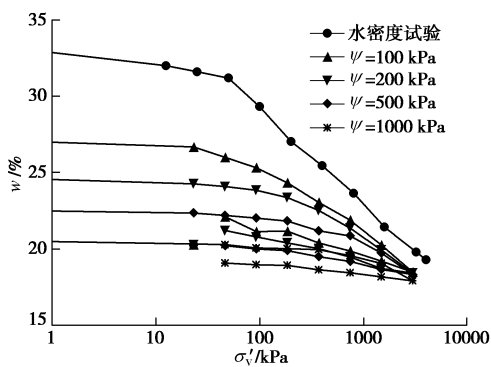


图 15 重力含水率 - 吸力 - 竖向净应力关系

Fig. 15 Water content - suction - net vertical pressure relationship

下文试图建立压缩过程中 $w - \psi - \sigma'_v$ 关系的数学描述。

首先, 分析无竖向净应力状态下的持水特性, 即随吸力增大土中孔隙水的排出过程。将表2中饱和完成后的 w 取均值(为33.6%)作为饱和重力含水率 w_s , 再将表4中无竖向净应力下的 $w - \psi$ 关系、文献[25]给出的高吸力范围内脱湿阶段的 $w - \psi$ 关系同时绘制在图16中; 图中给出的拟合结果表明: Fredlund-Xing模型^[31]能够有效描述该压实膨胀土无竖向净应力下全吸力范

围内的持水特性（见下式）。

$$w_0(\psi) = \frac{w_s}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + (\psi/a)^n \right] \right\}^m}, \quad (7)$$

式中， $w_0(\psi)$ 为无竖向净应力下的重力含水率， a ， n ， m 为相应土性参数。

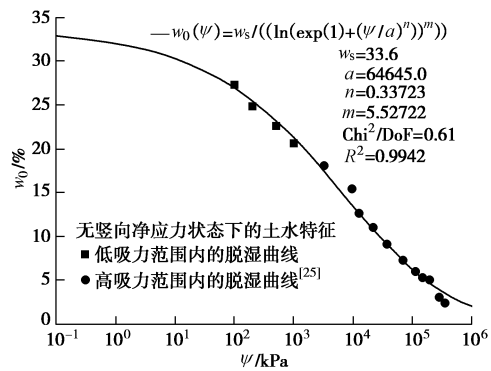


图 16 无竖向净应力状态下的持水特性

Fig. 16 Water retention behaviour under null net vertical pressure

其次，分析压力作用下的脱湿行为，即随荷载势的增大土中孔隙水的排出过程。由图15可见，压缩过程中，同一吸力下，重力含水率随竖向净应力增大而降低，这是固结排水行为；卸荷回弹过程中，重力含水率随竖向净应力降低而增大，这是由卸荷引发的吸湿行为。

由于压缩过程中 $w - \lg \sigma'_v$ 关系较难用线性函数准确描述，经尝试，采用形如下式的3参数Logistic函数描述该关系：

$$w(\psi, \sigma'_v) = \frac{w_0(\psi)}{1 + (\sigma'_v / \sigma'_{v0})^p}, \quad (8)$$

式中， $w(\psi, \sigma'_v)$ 为吸力与竖向净应力耦合作用下的重力含水率， $w_0(\psi)$ 为无竖向净应力下的重力含水率（见式（7））， σ'_{v0} 与 p 是相应土性参数。

表7与图17的拟合结果表明：式（8）可在0~4000 kPa压力范围内很好再现压缩过程中的 $w - \psi - \sigma'_v$ 关系。

由于卸荷回弹过程中 $w - \lg \sigma'_v$ 关系均呈良好线性关系，取其卸载段（ σ'_v 为2941.8~46 kPa区间内）斜率为重力含水率回弹指数 C_{ws} ，相应 C_{ws} 值见表8，可见 C_{ws} 随吸力增大而降低，表达了卸荷回弹过程中高吸力下的试样吸湿能力较低的规律。

表 7 式 (8) 的最佳拟合结果

Table 7 Best fitting results of formula (8)

控制吸力/kPa	$w_0(\psi)$	ψ	p	R^2
0	33.67	6482.6	0.4436	0.9871
100	27.24	11566.1	0.5223	0.9933
200	24.81	16128.7	0.6029	0.9985
500	22.56	27347.5	0.6665	0.9962
1000	20.58	61243.8	0.6505	0.9750

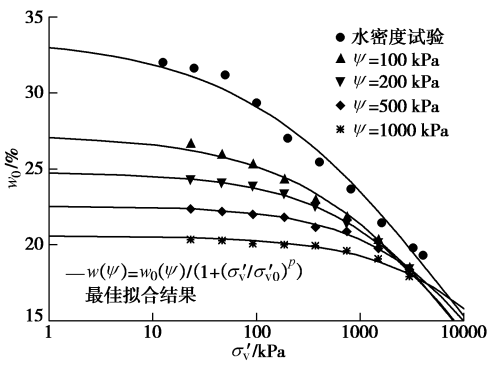


图 17 重力含水率 - 吸力 - 竖向净应力关系拟合结果

Fig. 17 Fitting results of water content - suction - net vertical pressure relationship

表 8 重力含水率回弹指数 C_{ws}

Table 8 Swelling indexes of water content

控制吸力/kPa	C_{ws}	R^2
100	1.9031	0.9778
200	1.6137	0.9895
500	1.0596	0.9642
1000	0.6621	0.9719

（3）非饱和和压缩过程中的饱和度变化（水力耦合行为的综合表现）

对2.3节述及的考虑土中水密度影响的土的基本体积 - 质量关系 $S_r(e, w)$ 求全微分式如下：

$$dS_r(e, w) = \frac{G_s}{e\rho_w} dw - \frac{G_s w}{e^2 \rho_w} de. \quad (9)$$

由式（9）可得出如下认识：饱和度变化 dS_r 取决于含水率与孔隙比的相对变化量（ dw 与 de ），孔隙比变化 de 反映体变特征，含水率变化 dw 表征持水能力，此外，土中水密度并非常量。因此，非饱和压缩过程中的饱和度变化受体积变化（体变特征）、含水率变化（持水特性）与水密度的三重影响。

图18为根据表4绘制的含卸载的饱和度 - 吸力 - 竖向净应力关系曲线。

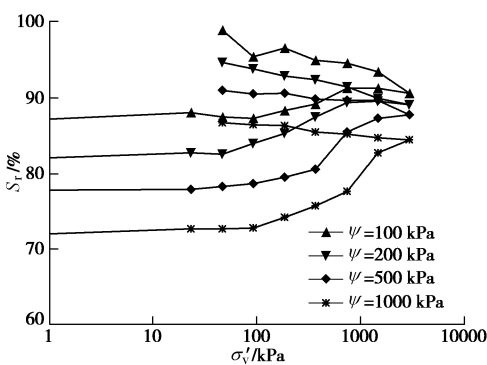


图 18 饱和度 - 吸力 - 竖向净应力关系

Fig. 18 Degree of saturation-suction-net vertical pressure relationship

由图18可见, 竖向净应力加卸载过程中, 高吸力下的饱和度均低于相应低吸力下的饱和度, 这是持水特性决定的(土体持水程度随吸力增大而降低)。更为重要的是: 同一吸力下, 非饱和压缩过程中, 饱和度随竖向净应力增大而增大(湿化路径); 卸荷回弹过程中, 随竖向净应力降低亦增大(亦为湿化路径)。然而2.3节第(2)部分述及, 非饱和压缩过程中, 同一吸力下, 重力含水率随竖向净应力增大而降低(脱湿路径), 卸荷回弹过程中随竖向净应力的降低而增大(湿化路径)。即采用不同持水状态指标, 饱和度或重力含水率, 对非饱和压缩过程中的水力路径会出现“湿化”与“脱湿”的不同判断。

在此分析其原因: Tarantino^[32]将不排水条件下压缩与卸荷回弹过程中, 孔隙比的降低导致的饱和度上升, 称为力学湿化(mechanical wetting); 孔隙比的上升导致的饱和度下降, 称为力学脱湿(mechanical drying); 零应力状态下含水率增大称为水力湿化(hydraulic wetting), 含水率降低称为水力脱湿(hydraulic drying)。文中排水条件下的非饱和压缩过程中, 孔隙比降低、含水率减少, 力学湿化与水力脱湿同时发生, 由于该土样力学湿化(式(9)中的第二项)起主导作用, 表现为饱和度的增大; 卸荷回弹过程中, 孔隙比增大、含水率增大, 力学脱湿与水力湿化同时发生, 由于水力湿化(式(9)中的第一项)起主导作用, 因此亦表现为饱和度的增大。

由此可见, 饱和度变化取决于土体非饱和体变特征与持水特性的耦合作用, 与土的组成、土的结构密切相关, 即不同土类、不同土结构具有不同的压缩与持水性能, 从而在水力耦合状况下表现出复杂的甚至相悖的持水状态指标(S_r 与 w)变化特征。从这个角度上讲, 饱和度变化是水力耦合行为的综合表现, 而非非饱和土水力耦合行为的肇因。

3 结 论

(1) 0~4000 kPa固结压力范围内, 饱和压实膨胀土中平均水密度变化范围为0.984~1.337 g/cm³, 相应孔隙比变化范围为0.392~0.909; ρ_w 随 e 减小而规律性增大。原因是: 压缩过程中随 e 减小, 自由水部分排出, 吸附水所占比例增大, 导致 ρ_w 增大。可用2参数指数函数描述土中 $\rho_w - e$ 关系规律。

(2) 压缩过程中体变特征表现为: 加载段, 非饱和和压缩曲线均发生明显转折, 表现出屈服现象; 随吸力增大, 非饱和压缩曲线依次发生“穿越”现象, 该现象是高吸力下试样具有更低压缩性所致; 不同吸力

下, 卸载段均大体为直线, 其斜率随吸力增大而降低。在此基础上, 提出一个简洁实用的非饱和土体变方程, 方程采用分段函数描述吸力与竖向净应力对非饱和膨胀土体积变化的耦合影响。该膨胀土非饱和压缩行为的再现结果表明: 方程能够有效描述干缩、加荷体缩、卸荷体胀、屈服、压缩性与卸荷回弹性随吸力变化而导致的“穿越”现象。方程形式简单, 选择相互独立且试验中可控、工程实践中可测的净应力与吸力作为应力状态变量, 且可由非饱和状态平顺过渡到饱和状态。

(3) 压缩过程中持水特性表现为: 不同吸力下压缩过程中重力含水率变化存在较大差异, 低吸力下 w 变化幅度大, 高吸力下 w 变幅小。压缩至竖向净应力为2941.8 kPa时, 不同吸力下 w 非常接近(17.94%~18.51%之间), 表明100~1000 kPa吸力范围内, 竖向净应力达2941.8 kPa时, 荷载势相对基质势在脱湿方面起主导作用。各级吸力下, 卸荷过程中 $w - \lg \sigma'_v$ 关系均呈线性, 斜率随吸力增大而降低。可用3参数Logistic函数描述压缩过程中吸力与竖向净应力对非饱和膨胀土含水率变化的耦合影响。

(4) 压缩过程中饱和度变化规律为: 饱和度随竖向净应力增大而增大(湿化)、随竖向净应力降低亦增大(亦为湿化)。与此同时, w 随竖向净应力增大而降低(脱湿)、随竖向净应力的降低而增大(湿化)。即采用 S_r 或 w , 对压缩过程中的水力路径会出现“湿化”与“脱湿”的不同判断。原因是 S_r 变化取决于 e 与 w 的相对变化量, e 变化反映体变特征, w 变化表征持水能力, 因此 S_r 变化取决于体变特征与持水特性的耦合作用, 不同土类、不同土结构具有不同的压缩与持水性能, 从而在水力耦合状况下表现出复杂的甚至相悖的持水状态指标(S_r 与 w)变化特征。

以上结论基于压实度为90%的荆门弱膨胀土试验结果, 对其他土类的适用性尚待进一步研究。

致 谢: 感谢信阳师范学院土木工程学院陈翔宇、卢承东同学在试验过程中所做的工作。感谢北京双杰特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] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. Principle of soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [2] FREDLUND D G. Second Canadian geotechnical colloquium: appropriate concepts and technology for unsaturated soils[J].

- Canadian Geotechnical Journal, 1979, **16**(1): 121 - 139.
- [3] SIVAKUMAR V. A critical state framework for unsaturated soil[D]. Sheffield: University of Sheffield, 1993.
- [4] SHARMA R S. Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays[D]. Oxford: University of Oxford, 1998.
- [5] CUI Y J, YAHIA-AISSA M, DELAGE P. A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays[J]. Engineering Geology, 2002, **64**(2/3): 233 - 250.
- [6] 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 Liang-tong, NG C W W. Experimental study on mechanical behavior of recomacted unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 196 - 201. (in Chinese))
- [7] 汪东林, 栾茂田, 杨 庆. 非饱和和重塑低液限黏土体积变化特性试验研究[J]. 水利学报, 2008, **39**(3): 367 - 372. (WANG Dong-lin, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Experimental research on volume change of unsaturated remolded clay with low liquid-limit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(3): 367 - 372. (in Chinese))
- [8] SIVAKUMAR V, SIVAKUMAR R, MURRAY E J, et al. Mechanical behaviour of unsaturated kaolin (with isotropic and anisotropic stress history). Part 1: wetting and compression behaviour[J]. Géotechnique, 2010, **60**(8): 581 - 594.
- [9] 叶为民, 朱悦铭, 陈 宝, 等. 上海软土非饱和和压缩特征[J]. 同济大学学报, 2011, **39**(10): 1458 - 1462. (YE Wei-min, ZHU Yue-ming, CHEN Bao, et al. Compressibility of Shanghai unsaturated soft soil[J]. Journal of Tongji University, 2011, **39**(10): 1458 - 1462. (in Chinese))
- [10] YE W M, ZHANG Y W, CHEN B, et al. Investigation on compression behaviour of highly compacted GMZ01 bentonite with suction and temperature control[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, **252**: 11 - 18.
- [11] 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))
- [12] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 82 - 90. (CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 82 - 90. (in Chinese))
- [13] Ng C W W, PANG Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(2): 157 - 166.
- [14] SUN D A, SHENG D C, XU Y F. Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(6): 673 - 686.
- [15] 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 Bao-chun, KONG Ling-wei. Effect of volume changes on soil-water characteristics of unsaturated expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, **42**(10): 1152 - 1160. (in Chinese))
- [16] 张 昭, 刘奉银, 赵旭光, 等. 考虑应力引起孔隙比变化的土水特征曲线模型[J]. 水利学报, 2013, **44**(5): 578 - 585. (ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, ZHAO Xu-guang, et al. A soil water characteristic curve model considering void ratio variation with stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(5): 578 - 585. (in Chinese))
- [17] TARANTINO A, DE COL E. Compaction behaviour of clay[J]. Géotechnique, 2008, **58**(3): 199 - 213.
- [18] TAIBI S, FLEUREAU J M, ABOU-BEKR N, et al. Some aspects of the behaviour of compacted soils along wetting paths[J]. Géotechnique, 2011, **61**(5): 431 - 437.
- [19] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2004, **26**(1/2/3/4): 337 - 350.
- [20] BAG R. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical behaviour of MX80 bentonite in geotechnical applications[D]. Cardiff: Cardiff University, 2011.
- [21] JACINTO A C, VILLAR M V, LEDESMA A. Influence of water density on the water-retention curve of expansive clays[J]. Géotechnique, 2012, **62**(8): 657 - 667.
- [22] WANG Qiong, CUI Yu-jun, TANG Anh Minh, et al. Time- and density-dependent microstructure features of compacted bentonite[J]. Soils and Foundations, 2014, **54**(4): 657 - 666.
- [23] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 405 - 430.
- [24] 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 Ling-wei, ZHOU Bao-chun, 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))
- [25] 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 Bao-chun, ZHANG Yan-jun, TANG Zhi-song, 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))
- [26] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Test guide of soil[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [27] PEREZ-GARCIA N, HOUSTON S L, HOUSTON W N, et al. An oedometer-type pressure plate SWCC apparatus[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, **31**(2): 115 - 123.
- [28] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils (an advance on $e - \lg p'$)[J]. Géotechnique, 1979, **29**(4): 469 - 480.
- [29] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [30] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. Géotechnique, 2010, **60**(1): 3 - 74.
- [31] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [32] TARANTINO A. A water retention model for deformable soils[J]. Géotechnique, 2009, **59**(9): 751 - 762.

中东部岩土力学与工程中的热点问题研讨会

Hot topic seminar of Rock and Soil Mechanics and Engineering in Middle and East of China

安徽 宣城

第一号通知 (2015年3月)

主办单位: 中国力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 合肥工业大学; 安徽省土木结构与材料重点实验室; 安徽省岩石力学与工程学会。

主要学术议题: 边坡工程与预报预警技术; 城市轨道交通工程与安全监测监控技术; 地基处理和复合地基新方法; 特殊土(膨胀土、软土等)的力学性能; 重大工程建设实例。

大会秘书处: 卢坤林, 电话15555127260; 黄镜淳, 电话14705606396; 联系邮箱zdbtyth@163.com; 通信地址安徽合肥屯溪路193号合肥工业大学土木与水利工程学院; 邮政编码230009。

论文征集: 本次会议不公开征集论文, 拟交流的论文以内

部资料形式印刷, 供会议研讨, 请于2015年6月30日前发送至邮箱zdbtyth@163.com。

学术会议安排: 大会特邀和主题报告由大会学术委员会提名并邀请, 每人报告30分钟。分组学术报告及讨论(自由申请): 每人报告15分钟。

会议费用: 正式代表: 1000元, 学生(陪同)代表600元。

会议、住宿地点地址: 安徽省宣城市宣州区薰化路301号; 合肥工业大学宣城校区轩苑宾馆; 联系人程萌萌, 电话0563-3831088, 手机18856308123。为确保顺利住宿, “会议回执”请于2015年6月30日前通过E-mail或快递形式返回大会秘书处 E-mail: zdbtyth@163.com。住宿由大会统一安排, 费用自理。

(大会组委会 供稿)