

文章编号:0559-9350(2011)10-1152-09

考虑体积变化的非饱和膨胀土土水特征

周葆春^{1,2}, 孔令伟¹

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 信阳师范学院 土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 为探讨吸力作用下膨胀土体变特征对土水特征的影响规律, 开展了一系列完整的脱湿阶段试验, 获得了5种不同初始孔隙比的荆门压实膨胀土各级吸力下的重力含水率与体积变化。试验结果表明: 不同初始孔隙比下的重力含水率-吸力曲线有交叉与聚拢现象; 体积含水率-吸力曲线的交叉现象更为显著; 而饱和度-吸力曲线未出现交叉, 相同吸力下初始孔隙比大的土样具有更低的饱和度, 体现出土水特征与体变特征的耦合效应。基于试验成果, 从土的基本体积-质量关系出发, 以初始孔隙比与吸力为变量, 在一个统一的框架内, 构建了吸力作用下的体变方程、分别用重力含水率与饱和度表征的土水特征曲线方程, 该方程能够描述任意初始孔隙比条件下膨胀土干缩过程中重力含水率、孔隙比与饱和度随吸力的变化规律。

关键词: 非饱和膨胀土; 土水特征; 体变特性; 水力耦合; 吸力

中图分类号: TU443

文献标识码: A

1 研究背景

土水特征指土体的持水特性, 土水特征曲线SWCC(Soil-Water-Characteristic Curve)指土体持水状态(常用重力含水率 w 、或体积含水率 θ 、或饱和度 S_r 表征)与吸力 s 间的关系曲线, 由于非饱和土的渗透、强度、体变等力学性质均与SWCC相关^[1], SWCC是描述非饱和土性状的重要工具。在SWCC的早期研究中通常假设持水状态与吸力间存在唯一性关系, 例如常用的Brooks-Corey模型、van Genuchten模型^[2]、Fredlund-Xing模型^[3]。但这一假设忽略了两个问题, 一是水力滞后效应, 同一土样在相同的基质吸力下, 脱湿过程通常比吸湿过程具有更高的饱和度; 二是体积变化的影响, 即孔隙比依赖性, 孔隙比变化会导致饱和度变化, 尤其对膨胀土而言, 失水收缩干裂、吸水膨胀软化, 其土水特征与体积变化间存在着强烈的相互作用, 吸力变化会导致持水状态与体积变化, 而体积变化也会导致持水状态(如饱和度)的变化。

针对后一问题, Huang等^[4]、Masin^[5]分别基于Brooks-Corey模型, Gallipoli等^[6]、Tarantino^[7]分别基于van Genuchten模型, Mbonimpa等^[8]基于MK模型, Salager等^[9]基于Fredlund-Xing模型提出了各自的体积变形土SWCC模型, 但其大多基于非膨胀性土的试验结果, 对膨胀土的适用性尚待探讨。刘艳华等^[10]、吴礼舟等^[11]、李志清等^[12]、龚壁卫等^[13]、Zhan等^[14]、孔令伟等^[15]、周葆春等^[16]从不同角度研究了膨胀土的土水特征, 但较少关注体积变化对非饱和和膨胀土SWCC的影响规律。

为此, 本文试图探讨吸力作用下膨胀土体变特征对土水特征的影响规律, 以不同初始孔隙比的荆门压实膨胀土为研究对象, 开展无荷载膨胀率试验、SWCC试验与收缩试验, 获得考虑体积变化的脱湿阶段的非饱和膨胀土土水特征规律; 然后以初始孔隙比与吸力作为基本变量, 构建考虑初始孔隙比影响的用重力含水率表征的SWCC方程; 并将吸力作用下的体变关系引入其中, 构建考虑体积

收稿日期: 2011-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009118); 中国博士后科学基金资助项目(20100470058); 河南省基础与前沿技术研究计划项目(082300410180); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2008083)

作者简介: 周葆春(1978-), 男, 河南信阳人, 博士, 副教授, 主要从事土体力学性质与本构模型研究。

E-mail: zhouboxynu@163.com

变化的用饱和度表征的SWCC方程,这3个方程能够很好再现任意初始孔隙比条件下膨胀土干缩过程中重力含水率、孔隙比与饱和度随吸力的变化规律。

2 试验方案

2.1 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见表1与表2。重型击实试验表明^[17],该膨胀土的最优含水率为15.5%,最大干密度为1.86g/cm³。试验采用直径61.8mm、高度20mm的环刀试样;为探讨不同初始孔隙比条件下膨胀土的土水特征,其控制压实度分别为100%、95%、90%、85%、80%。此外,为与膨胀土进行对比,采用掺灰比为3%的石灰改良膨胀土进行平行试验,该石灰土重型击实试验的最优含水率为19.0%,最大干密度为1.71g/cm³,试样制备的控制压实度为95%。膨胀土与石灰土样均采用压样法制备,制样控制指标见表3。

表1 试验用土的物性参数^[17]

天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	土粒比重	天然干密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	自由膨胀率/%
21.1~22.3	2.03	2.72	1.68	42.1	20.9	42

表2 矿物成分与颗粒组成 ^[17]							
矿物组成/%				颗粒组成/%			
伊利石	蒙-伊混层	高岭石	石英	>0.075 mm	0.075~0.005 mm	2~5 μm	<2 μm
35	5	40	20	13.2	57.3	14.5	15.0

表3 制样控制指标

土样类型	控制压实度/%	控制干密度/(g·cm ⁻³)	控制含水率/%
膨胀土	100	1.86	17.0
	95	1.77	17.0
	90	1.67	17.0
	85	1.58	17.0
	80	1.49	17.0
石灰土	95	1.62	21.0

2.2 试样制备 试样制备过程为:首先测定风干含水率,根据控制含水率计算加水量,取过2mm筛的风干土2kg,平铺在不吸水的盘内,用喷雾器喷洒预计的水量,静置30min,装入密封袋中,置于保湿缸内湿润一昼夜;根据控制干密度计算各土样所需湿土质量,将相应质量的湿土倒入预先装好环刀的压样器内,拂平土样表面,以静压力将土压入环刀内。石灰土样系根据质量百分比在风干土样中掺入3%的消石灰粉末再加相应水量的方法制备;制备完成后,参照文献[18]的标准养生方法,养生28d后备用。各土样制备完成后,用游标卡尺量测土样高度(量测4次,取均值)以获得试样体积。

2.3 试样饱和 Zhan等^[14]的非饱和和膨胀土SWCC试验的试样饱和过程是恒体积过程,而本文SWCC试验的初始状态为膨胀潜势完全释放后的饱和状态。为在SWCC试验前获得充分饱和状态的膨胀土试样,并监测其湿胀变形,首先进行无荷载膨胀率试验,即将试样置于杠杆式固结仪的固结容器中浸水饱和至体积不变为止。相对于真空饱和法而言,该方法的好处是避免了重叠式饱和器对试样湿胀过程的约束,能够让试样自由膨胀至稳定状态,从而为SWCC试验提供充分饱和的试样。无荷载膨胀率试验的试验方法参照行业标准[19]执行,试样的稳定标准为隔24h百分表读数不变。

2.4 SWCC试验 SWCC试验是在陶土板进气值为15bar的压力板仪上进行的,该压力板仪由Soilm-
moisture Equipment公司生产,SWCC试验方案如下:

(1)陶土板饱和。首先将陶土板放入真空缸内抽气饱和,真空表达到1个大气负压力后,继续抽气3h,然后注水,待陶土板完全淹没于水中后关闭进水阀,再停止抽气,然后开进气阀,静置8h,借大气压力使陶土板饱和。真空饱和完成后,将陶土板置于压力板仪中,参照文献[20]建议的加压饱和法,在陶土板表面加足量的蒸馏水,然后加气压力至1000kPa,重复该过程直至排水管中气泡溢出现象消失为止,从而使陶土板充分饱和。

(2)脱湿阶段试验。将完成无荷载膨胀率试验后的试样置于陶土板表面,施加气压力等级为10、20、40、80、150、300、600、1200kPa,每级气压力下试样的稳定标准为排水量稳定,每级气压力下稳定后,采用取样称量法称量各土样质量,SWCC试验完成后,用游标卡尺量测试样的直径与高度

(各量测4次, 取均值), 获得各试样的体积。

(3)收缩试验。SWCC 试验结束后, 将试样置于收缩仪中, 进行收缩试验^[19], 其稳定标准为隔24h百分表读数不变, 此时认为土样体积不再发生变化; 收缩试验结束后, 用游标卡尺量测试样的直径与高度(各量测4次, 取均值), 获得各试样的体积, 同时量测试样质量。最后, 将试样置于105℃温度下烘干, 获得干土质量。

2.5 平行收缩试验 对体积变形土而言, 用普通压力板仪只能获得 $w-s$ 关系, 若要获得脱湿过程中用吸力表征的体积含水率或饱和度变化, 前提是清楚脱湿过程中土样的体变规律, 为此, 需要对相同制样条件下的完全饱和试样进行平行收缩试验以明确脱湿过程中膨胀土的体变规律。因此, 根据制样控制指标(表3)另制备一组土样, 开展自由膨胀率试验使其充分饱和, 再对试样进行收缩试验, 以把握脱湿过程中的体变规律。

3 试验结果分析

3.1 试验结果 土样压实后与饱和后的物性指标和体积参数分别见表4与表5。表4中的压实度为制样完成后的实际压实度, 由于制样误差, 与控制压实度有较小差异; 孔隙比为压制完成后的实际孔隙比。由表5可以看出, 膨胀土均发生较大的湿胀变形, 而石灰土的湿胀变形很小。

表4 土样压制完成后的物性指标与体积参数

土样类型	高度/mm	直径/mm	含水率/%	压实度/%	孔隙比
膨胀土	20.41	61.8	16.75	98.1	0.491
	19.88	61.8	16.64	95.8	0.527
	19.60	61.8	17.36	91.5	0.599
	19.22	61.8	16.24	89.1	0.641
	19.17	61.8	17.45	83.2	0.758
石灰土	19.74	61.8	19.79	96.6	0.646

表5 土样饱和后的物性指标与体积参数

土样类型	饱和前孔隙比	膨胀高度/mm	饱和后含水率/%	饱和后孔隙比
膨胀土	0.491	3.73	28.08	0.764
	0.527	3.18	28.36	0.771
	0.599	3.54	32.65	0.888
	0.641	3.69	35.17	0.957
	0.758	2.24	35.43	0.964
石灰土	0.646	0.06	23.93	0.651

文中 e_0 均指土样饱和状态下的孔隙比, 土样饱和后的状态即为SWCC试验开始时的状态, 图1(a)中从左至右依次是 e_0 为0.764、0.771、0.888、0.957、0.964的膨胀土样与石灰土样。表6给出了由SWCC试验获得的每级气压力作用下各试样脱湿稳定后的重力含水率, 由图1(b)可见经历SWCC试验后, 膨胀土均发生较大的干缩变形, 试样均与环刀脱开, 但没有开裂。表7为收缩试验完成后的重力含水率与孔隙比, 收缩试验完成后的土样见图1(c), 可见试样均没有开裂。这里认为试样没有开裂的原因有二, 一是试样为重塑土样, 二是SWCC试验在压力板仪中进行, 脱湿过程比较缓慢均匀。

图2为整个试验过程中各试样的孔隙比变化, 可见初始孔隙比不同的各膨胀土样在吸湿与脱湿过程中均经历了较大幅度的湿胀与干缩变形, 在土水特征方面, 是典型的体积变形土(deformable soil); 而吸湿脱湿过程对石灰土的体积影响很小, 可认为是体积不变土(rigid soil)。

对相同制样条件下的完全饱和试样进行的平行收缩试验获得的竖向线缩率 δ_{si} 与 w 之间的关系见图3(虽然是竖向线缩率随 w 的变化曲线, 但仍可认为其能够表征土样的体积随 w 的变化规律)。由图3可见, 饱和膨胀土的干缩过程分3个阶段: ①体积收缩与 w 降低成正比的阶段; ②随 w 的继续减小土体收缩速率放缓的阶段; ③ w 继续降低而土体不再收缩的阶段。此外, 由图3还可看出膨胀土初始直线的倾斜程度随 e_0 的增大而降低。需要说明的是, 由于初始制样误差导致平行收缩试验开始时各试样的 e_0 与SWCC试验的 e_0 有一定差异, 但本文认为这个差异不影响对体变规律的反映。

3.2 不考虑体积变化的SWCC 不考虑体积变化时, SWCC常由重力含水率表征, 用 w 表征的SWCC见图4, 可见: 随吸力的增大, 不同 e_0 下的SWCC出现交叉与聚拢现象; e_0 大的土样 w 变化幅度大, 表明其持水能力较低、进气值较小。刘艳华等^[10]对2种初始孔隙比的南阳膨胀土、李志清等^[12]对2种

表6 SWCC试验数据

s/kPa	w/% ($e_0=0.764$)	w/% ($e_0=0.771$)	w/% ($e_0=0.888$)	w/% ($e_0=0.957$)	w/% ($e_0=0.964$)	石灰土
0	28.08	28.36	32.65	35.17	35.43	23.93
10	27.91	28.19	32.11	33.60	32.71	23.87
20	27.70	28.00	31.49	32.61	31.43	23.68
40	27.10	27.46	30.83	31.50	30.06	23.51
80	26.06	26.39	29.69	29.63	28.13	22.62
150	24.99	25.28	28.45	27.97	26.63	21.96
300	23.36	23.68	26.64	25.73	24.64	21.26
600	21.67	21.86	24.36	23.37	22.59	20.62
1200	19.33	19.61	21.39	20.82	20.26	19.85

表7 收缩试验完成后土样的含水率与孔隙比

土样类型	e_0	含水率 /%	孔隙比
膨胀土	0.764	6.69	0.364
	0.771	7.44	0.404
	0.888	7.57	0.419
	0.957	8.22	0.460
	0.964	8.99	0.542
石灰土	0.651	6.16	0.612



图1 试验土样

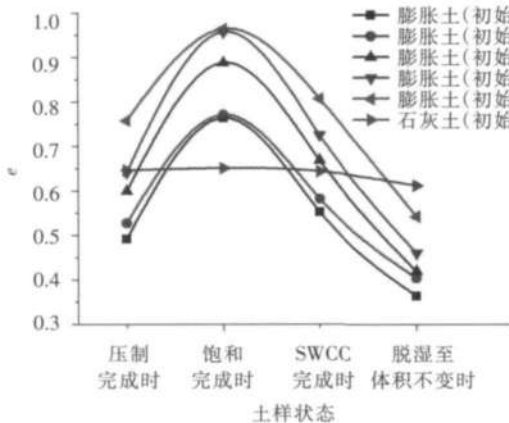


图2 整个试验过程中的孔隙比变化

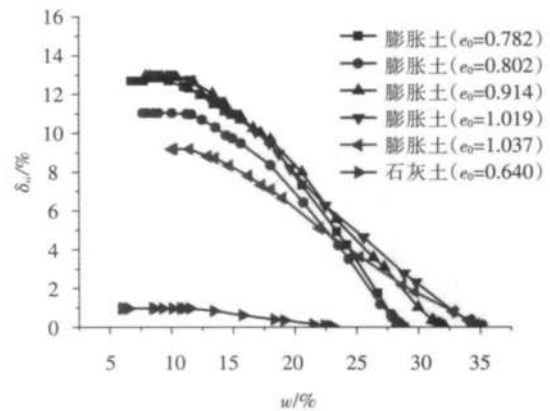


图3 δ_s-w 关系曲线

初始孔隙比的枣阳膨胀土的SWCC试验也出现类似的试验现象。

3.3 考虑体积变化的SWCC 表6显示, SWCC试验结束时, w 皆在19%以上; 而图3中 w 大于19%的部分, 无论膨胀土还是石灰土, 均处于干缩过程的第1阶段, 即体积收缩与 w 降低成正比的阶段。基于此, 即可用SWCC试验前后的体积变化 ΔV 与含水率变化 Δw 计算脱湿过程中第1阶段的体积收缩系数 λ_v , 见式(1), 式中 V_0 为SWCC试验前的试样体积; 获得每个试样的 λ_v 后, 按式(2)计算每级气压力作用下稳定后的试样体积 V_i , 式中 Δw_i 为每级气压力作用下稳定后的 w 与SWCC试验开始时的 w 的差值。

$$\lambda_v = \frac{(\Delta V / V_0) \times 100\%}{\Delta w} \quad (1)$$

$$V_i = V_0(1 - \lambda_v \Delta w_i) \quad (2)$$

得到 V_i 后, 根据相应干土质量与土粒比重, 即可获得SWCC试验过程中相应孔隙比 e_i , 吸力作用下的孔隙比变化见图5。

再根据表6, 即可获得相应体积含水率 θ_i 与饱和度 S_r 。用体积含水率表征的SWCC见图6, 与相应 $w-s$ 关系曲线相比, $\theta-s$ 关系曲线的交叉现象更为显著, 随吸力的增大, e_0 大的试样 θ 降低更快。

用饱和度表征的SWCC见图7, 可见, 随吸力的增大, 膨胀土饱和度降低, e_0 大的土样 S_r 降幅较大; 曲线未出现交叉和聚拢现象, 相同吸力下 e_0 大的土样具有更低的饱和度; 从工程角度而言, 这意味着密实度大的土样持水能力更强。

不同 e_0 下的压实膨胀土 S_r-e-s 关系见图8, 基于土的基本体积-质量关系 $S_r=G_s w/e$, 可认为在膨胀土脱湿过程中 w 与 e 为相对独立的变量, s 的增大会导致 w 与 e 的同时减小(图4与图5), 而 w 与 e 的变化速率决定了 S_r 的变化。相同吸力下 e_0 大的土样具有更低饱和度的原因是其在吸力作用下 w 的降低速率相对于体积收缩速率更快, 这是膨胀土土水特征与体变特征的耦合效应所致。

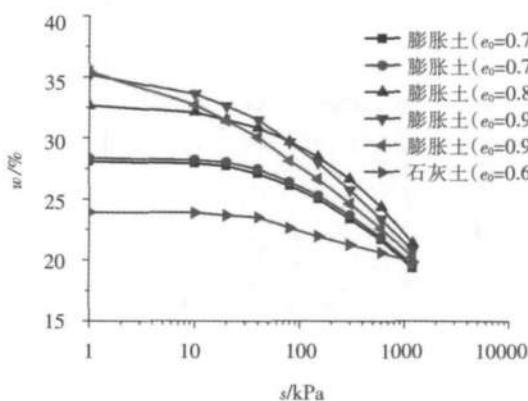


图4 $w-s$ 关系曲线

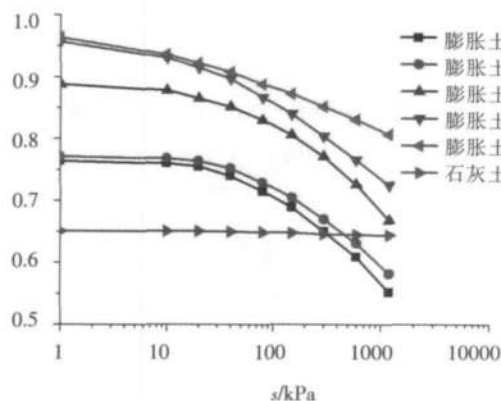


图5 $e-s$ 关系曲线

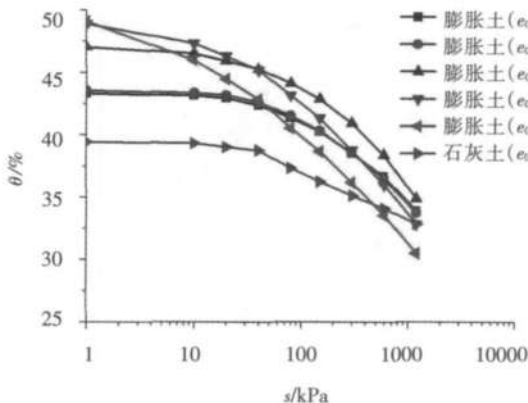


图6 $\theta-s$ 关系曲线

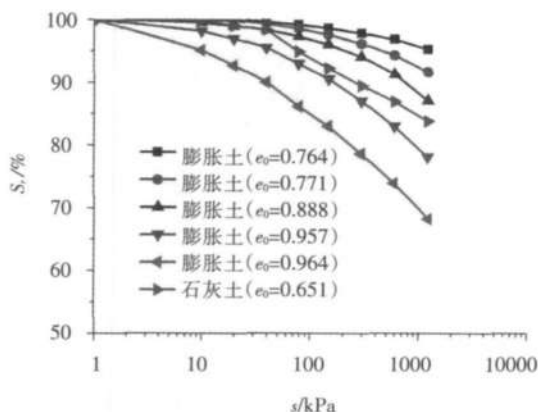


图7 S_r-s 关系曲线

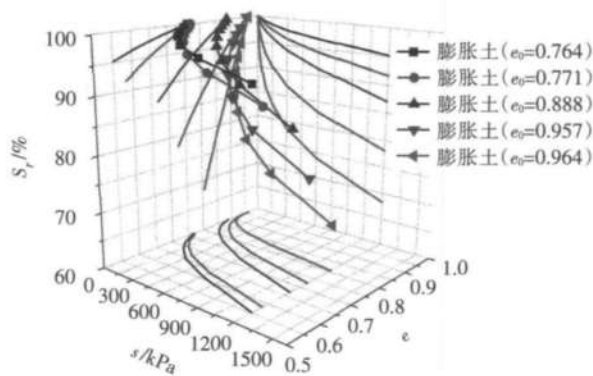


图8 S_r-e-s 关系

4 考虑体积变化的SWCC方程

在水力耦合的土体本构关系模拟中^[21-23]，饱和度是一个关键性的物理状态参数，由土的基本体积-质量关系 $S_r=G_s w/e$ 可知， S_r 依赖于 w 与 e ； w 变化依赖于 s 变化，即土的持水特性，当然这里存在水力滞后问题，此外初始状态(如初始孔隙比 e_0)对 w 变化也有影响； e 的影响因素有：①土的初始状态；② s 变化的影响，如干缩、湿胀、湿陷；③净平均应力的影响，如压密与卸荷体胀；④偏应力的影响，如剪胀或剪缩。

在零净平均应力与零偏应力状态下的SWCC脱湿阶段试验中，不考虑水力滞后、净平均应力、偏应力的影响， w 的影响因素为吸力与初始孔隙比， S_r 的影响因素为吸力、初始孔隙比与吸力对体积变化的影响。基于以上认识，本节以 e_0 与 s 作为基本变量，首先构建考虑 e_0 影响的用 w 表征的SWCC方程 $w(s, e_0)$ ，再引入吸力作用下的体变关系，构建考虑体积变化的用 S_r 表征的SWCC方程 $S_r(s, e_0)$ 。

4.1 用重力含水率表征的SWCC方程 由于Fredlund-Xing模型能够在很大的基质吸力范围内(0~10⁶kPa)较好地拟合SWCC试验成果^[3]，本文采用该模型作为基本框架，鉴于 w 是试验中容易量测的，这里采用重力含水率的表达：

$$w(s) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_r}\right)} \right] \left(\frac{e_0}{G_s} \right) \left\{ \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right]} \right\}^m \quad (3)$$

式中： a 为与进气值相关且略大于进气值的土性参数， n 为与SWCC拐点处斜率相关的土性参数， m 为与残余含水率相关的土性参数， s_r 为残余吸力；根据体积-质量关系， e_0/G_s 为饱和和重力含水率 w_s 。

首先利用GEO-SLOPE软件中SEEP/W模块对不同 e_0 膨胀土的 $w-s$ 试验数据进行非线性拟合，获得相应的Fredlund-Xing模型参数见表8。由表8可见， a 值随 e_0 的增大而降低， n 、 m 值随 e_0 变化不大。Gallipoli等^[6]、Salager等^[9]认为：初始状态主要影响进气值(由 a 表征)，对SWCC过渡区的斜率(由 n 表征)、残余含水率(由 m 表征)影响不大；因此可采用其均值 $n=0.699$ ， $m=0.684$ 作为最终模型参数。此外，根据Sillers等^[24]的建议， s_r 假定为3 000kPa可获得满意的拟合效果；将以上 n 、 m 和 s_r 值代入式(3)，对 $w-s$ 试验数据再次进行拟合，可获得不同 e_0 下的 a 值，见表8(表中第5列)和图9。由图9可见，对荆门压实膨胀土而言，采用形如式(4)的椭圆曲线函数

$$a = b \sqrt{1 - ce_0^2} \quad (4)$$

而不是幂函数^[6,9]，能更好地拟合 $a-e_0$ 关系。根据表8的数据，可拟合得到式(4)中的土性参数为： $b=442.54$ ， $c=1.058$ 。将式(4)代入式(3)得到式(5)，即本文建议的考虑 e_0 影响的用 w 表征的SWCC方程 $w(s, e_0)$ ：

$$w(s) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_r}\right)} \right] \left(\frac{e_0}{G_s} \right) \left\{ \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{s}{b\sqrt{1 - ce_0^2}}\right)^n\right]} \right\}^m \quad (5)$$

由实测值与式(5)的再现结果的对比(图10)可见，式(5)能够很好描述SWCC的交叉与聚拢现象，很好再现不同 e_0 下膨胀土干缩过程中重力含水率的变化规律。

4.2 吸力作用下的体变关系方程 吸力作用下的体变特性是非饱和土力学中的一个基本问题，Alonso等^[25]最早采用对数函数的形式来描述吸力作用下的干缩变形，本文采用类似形式，但为统一变量，采用 e 代替比容 $\nu(\nu=1+e)$ ，采用 e_0 代替土性参数 N ，建议的吸力作用下的体变关系方程 $e(s, e_0)$

表8 不同 e_0 膨胀土的Fredlund-Xing模型参数及 a 值(采用 n 、 m 均值获得)、 λ_{VS} 值

e_0	a/kPa	n	m	a/kPa (采用 n 、 m 均值获得)	λ_{VS}
0.764	373.67	0.803 92	0.660 26	287.10	0.086 73
0.771	347.72	0.794 51	0.617 11	250.70	0.079 51
0.888	407.55	0.693 35	0.803 26	185.82	0.097 58
0.957	116.61	0.633 91	0.705 90	87.25	0.099 61
0.964	45.948	0.569 08	0.632 92	49.42	0.079 86

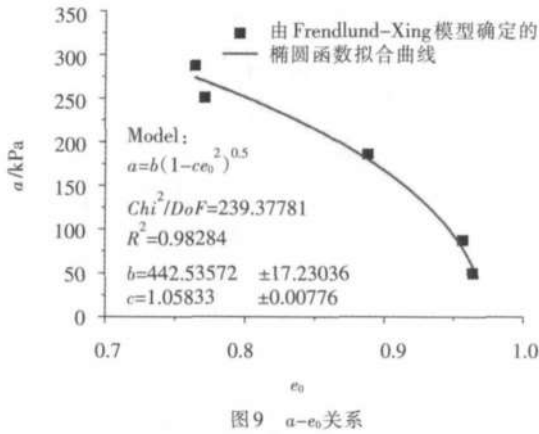


图9 $a-e_0$ 关系

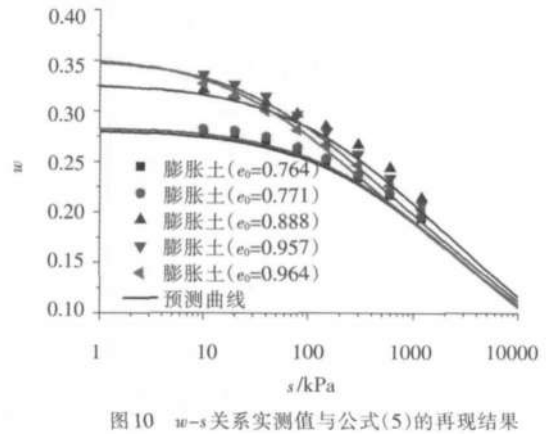


图10 $w-s$ 关系实测值与公式(5)的再现结果

见式(6), 式中 λ_{VS} 为对数干缩模量, p_a 为大气压力。

$$e = e_0 - \lambda_{VS} \ln\left(\frac{s+p_a}{p_a}\right) \quad (6)$$

将图7所示的 $e-s$ 关系代入式(6), 拟合获得的 λ_{VS} 见表8, 可见不同 e_0 下 λ_{VS} 差异较小, 可取其均值 $\lambda_{VS}=0.089$ 作为最终模型参数。图11表明, 采用式(6)能够较好再现不同 e_0 条件下膨胀土的干缩变形规律。此外要说明的是, 式(6)适用范围的下限为缩限对应的孔隙比。

4.3 考虑体积变化的SWCC方程 将式(5)、式(6)代入土的基本体积-质量关系 $S_r=G_s w/e$, 得到式(7), 即为考虑体积变化的用饱和度表征的SWCC方程 $S_r(s, e_0)$ 。

$$S_r = \frac{e_0}{e_0 - \lambda_{VS} \ln\left(\frac{s+p_a}{p_a}\right)} \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_r}\right)} \right] \left\{ \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{s}{b\sqrt{1-ce_0^2}}\right)^n\right]}\right\}^m \quad (7)$$

将此前获得的土性参数汇总到表9, 式(7)的再现结果见图12, 可见本文建议的SWCC方程可以很好描述不同初始孔隙比条件下膨胀土干缩过程中的饱和度变化规律。需要说明的是: (1)当土样含水率达到缩限后, 孔隙比将不再变化, 式(6)与式(7)中的孔隙比 e 要用缩限对应的孔隙比 e_s 代替, 即当含水率达到缩限后, 饱和度只受重力含水率变化的控制; (2)式(7)的构建基于1次湿干循环的压实膨胀土SWCC试验结果, 由于整个试验过程中5种不同初始孔隙比土样均未发生开裂, 因此方程未考虑到裂隙性的影响。本文主旨是研究体积变化(膨胀土胀缩性)对SWCC的影响规律, 而裂隙性对SWCC的影响规律尚待进一步的试验研究与机制分析, 式(7)尚不具备描述裂隙性对SWCC影响规律的功能。(3)式(7)适用于脱湿过程, 由于水力滞后现象的存在, 吸湿过程中体积变化对SWCC的影响规律尚待进一步研究。

表9 本文建议的SWCC模型参数

G_c	p_a/kPa	λ_{vs}	s_s/kPa	n	m	b	c
2.72	101.3	0.089	3 000	0.699	0.684	442.54	1.058

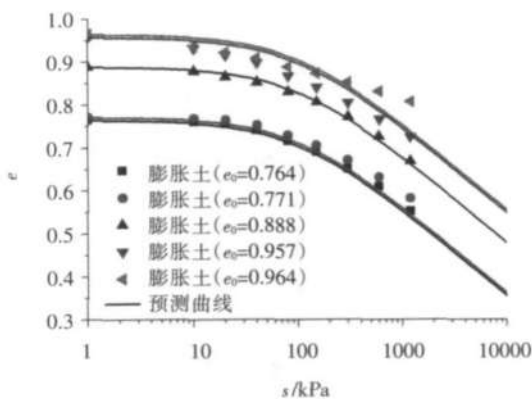


图11 $e-s$ 关系实测值与式(6)的再现结果

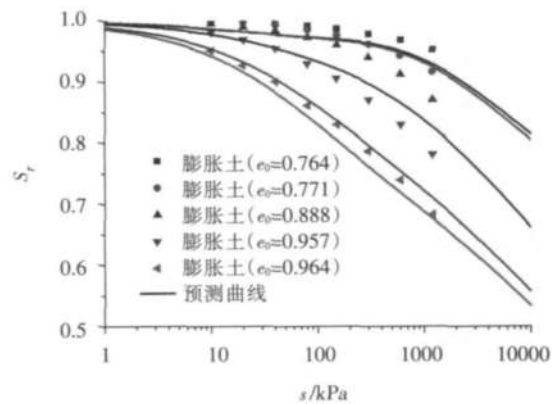


图12 S_r-s 关系实测值与式(7)的再现结果

5 结论

(1)初始孔隙比对荆门压实膨胀土的土水特征有显著影响。不同 e_0 下的 $w-s$ 关系曲线出现交叉与聚拢现象； e_0 大的土样 w 变化幅度较大，表明其持水能力较低，相应进气值较小。不同 e_0 下的 $\theta-s$ 关系曲线的交叉现象更为显著，随吸力的增大， e_0 大的试样 θ 降低更快。不同 e_0 下的 S_r-s 关系未出现交叉与聚拢现象，随 s 的增大 S_r 降低，相同 s 下 e_0 大的土样具有更低的饱和度。以上分别用 w 、 θ 、 S_r 表征的SWCC之间的差异，体现出膨胀土体变特征对土水特征的影响。(2)从土的基本体积-质量关系出发，以 e_0 与 s 为变量，在一个统一的框架内，构建了吸力作用下的体变方程、分别用重力含水率与饱和度表征的SWCC方程。对试验数据的再现结果表明，这3个方程能够定量描述任意初始孔隙比条件下膨胀土在干缩过程中重力含水率、孔隙比与饱和度随吸力的变化规律。

参 考 文 献:

- [1] Fredlund D G . Unsaturated soil mechanics in engineering practice [J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(3): 286-321 .
- [2] 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: 892-898 .
- [3] Fredlund D G, Xing A Q . Equations for the soil-water characteristic curve [J] . Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532 .
- [4] 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 .
- [5] Masin D . Predicting the dependency of a degree of saturation on void ratio and suction using effective stress principle for unsaturated soils [J] . International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(1): 73-90 .
- [6] Gallipoli D, Wheeler S J, Karstunen M . Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil [J] . Geotechnique, 2003, 53(1): 105-112 .
- [7] Tarantino A . A water retention model for deformable soils [J] . Geotechnique, 2009, 59(9): 751-762 .
- [8] Mbonimpa M, Aubertin M, Maqsood A, et al . Predictive model for the water retention curve of deformable clayey soils [J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(9): 1121-1132 .
- [9] Salager S, El Youssefi M S, Saix C . Definition and experimental determination of a soil-water retention surface [J] . Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(6): 609-622 .

- [10] 刘艳华, 龚壁卫, 苏鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002, (3): 8-11.
- [11] 吴礼舟, 黄润秋. 膨胀土开挖边坡吸力和饱和度的研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 970-973.
- [12] 李志清, 胡瑞林, 王立朝, 等. 非饱和膨胀土SWCC研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 730-734.
- [13] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207-209.
- [14] Zhan L T, Chen P, Ng C W W. Effect of suction change on water content and total volume of an expansive clay [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2007, 8(5): 699-706.
- [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.
- [16] 周葆春, 孔令伟, 陈伟, 等. 荆门膨胀土土-水特征曲线特征参数分析与非饱和抗剪强度预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1052-1059.
- [17] 孔令伟, 周葆春, 白颖, 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.
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG E51-2009公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237-1999土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [20] 孙树国, 陈正汉, 朱元青, 等. 压力板仪配套及SWCC试验的若干问题探讨[J]. 后勤工程学院学报, 2006, (4): 1-5.
- [21] Wheeler S J, Sharma R S, Buisson M S R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils[J]. Geotechnique, 2003, 53(1): 41-54.
- [22] Sheng D, Fredlund D G, Gens A. A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(4): 511-534.
- [23] 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.
- [24] Sillers W S, Fredlund D G, Zakerzaheh N. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, 19(3-4): 243-283.
- [25] Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 405-430.

Effect of volume changes on soil-water characteristics of unsaturated expansive soil

ZHOU Bao-chun^{1, 2}, KONG Ling-wei¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, China;

2. Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The effects of deformation on soil-water characteristics of expansive soils were investigated. A series of Soil-Water-Characteristic Curve tests were carried out for the Jingmen compacted expansive soil along the main drying paths. Values of gravimetric water content and volume changes of soil samples at different levels of suction were measured for five different initial void ratio samples. The test results show that the gravimetric water content-suction curves intersect and merge, while the volumetric water content-suction curves display intersections more remarkably. However, the degree of saturation-suction curves do not intersect, indicating that the soil sample of the larger initial void ratio remains the lower degree of saturation under the same suction. These phenomena reflect coupling effects between the soil-water characteristics and the volume change behavior for expansive soils. Based on the test results, three formulas are presented for predicting the gravimetric water content, void ratio and degree of saturation along the main drying paths of the expansive soil, respectively. These formulas rely on the volume-mass relationship and are defined in a unified framework as functions of suction and initial void ratio. Finally, the comparison between the measured and reproduced results validates the presented formulas.

Key words: unsaturated expansive soils; soil-water characteristics; volume change behavior; hydromechanical coupling; suction

(责任编辑: 李琳)