

DOI: 10.11779/CJGE201402012

高吸力下高庙子钙基膨润土的土水 – 力学特性

孙文静, 孙德安, 刘仕卿, 方雷

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 高庙子钙基膨润土具有明显的湿胀干缩特性, 吸力变化会引起持水状态和孔隙比的变化。用蒸汽平衡法测得高吸力段(3~287 MPa)高庙子钙基膨润土的土水特性和变形特性。分析比较了吸力路径、试样初始孔隙比、应力加载历史以及土体结构对土水特性、变形及吸力应力的影响。研究表明, 脱湿和吸湿过程中孔隙比的差异会引起体积含水率和饱和度的滞回。饱和度与吸力间关系受试样初始孔隙比和孔隙结构影响较大, 与应力加载历史无直接关系。由吸力引起的吸力应力随吸力的增大而非线性增大, 并在较高吸力时趋向于一定值。吸力应力受吸力路径、初始孔隙比以及孔隙结构的影响。

关键词: 高庙子钙基膨润土; 蒸汽平衡法; 土水特征曲线; 吸力应力; 平均骨架应力

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)02-0346-08

作者简介: 孙文静(1981-), 女, 山东青岛人, 博士, 硕士生导师, 主要从事非饱和土力学的研究工作。E-mail: wjsun@shu.edu.cn。

Hydro-mechanical behaviour of GMZ Ca-bentonite at high suctions

SUN Wen-jing, SUN De-an, LIU Shi-qing, FANG Lei

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Gaomiaozi (GMZ) Ca-bentonite has obvious swelling and shrinkage characteristics. The change in suction can induce changes in water retention state and void ratio. Soil-water characteristics of GMZ Ca-bentonite at high suctions (3~287 MPa) are measured by the vapor equilibrium technique. The influential factors such as drying-wetting process, initial void ratio, stress loading history and pore structure are analyzed respectively on the soil-water characteristics and mechanical behaviour. The main conclusions are as follows: (1) the difference in void ratio during drying and wetting process can bring about hysteresis in volumetric water content and degree of saturation; (2) the relationship between degree of saturation and suction is mainly determined by the pore structure and void ratio, which has no direct relation with the experienced stress loading history; (3) the soil-water characteristic curve (SWCC) can reflect the deformation characteristics with suction. Moreover, the existence of suction in samples can produce suction stress. The suction stress increases nonlinearly with the increasing suction and reaches a certain value at higher suction; (4) the suction stress due to suction is affected by the factors such as suction path, initial void ratio and pore structure.

Key words: GMZ Ca-bentonite; vapor equilibrium technique; SWCC; suction stress; average skeleton stress

0 引言

土体的持水状态常用重力含水率 w 、体积含水率 θ 或饱和度 S_r 表征。吸力随持水状态变化的特性通常用土水特征曲线 (soil-water characteristic curve, SWCC) 来表示。土水特征曲线可以反映土体的许多重要性质, 如强度、体变、渗透性等。

压实高庙子膨润土被选作中国高放废料深层地质处置库工程屏障系统缓冲/回填材料的基材。高庙子膨润土有钠基和钙基之分。钠基膨润土位于地下, 钙基膨润土位于表层, 储量较大^[1]。目前中国计划用作缓冲材料和回填材料的为钠基膨润土。但是, 为了节约

工程成本, 是否可以考虑用钙基膨润土作为回填材料, 这是需要研究的课题。

高庙子膨润土属于高膨胀性土, 随着吸力的变化, 湿胀干缩变形明显, 因此, 其土水特性与非膨胀性黏土或湿陷性黏土不同。另外, 深层地质处置工程所用膨润土土体初始干密度较高^[2], 初始含水率较小, 相应的初始吸力较高。同时, 由于膨润土的低渗透性及在核衰变产生的热能作用下, 膨润土土体在相当长一

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41102163)

收稿日期: 2013-06-16

段时间会处于高吸力状态。因此, 研究膨润土在高吸力下的土水特性是非常必要的。

近年来, 国外学者研究了不同膨润土的土水特性, 如FEBEX 膨润土^[2]、Boom 黏土^[3]、FoCa7 黏土^[4]、MX80 膨润土^[5]。对高庙子钠基膨润土, 国内学者对其土水特性也进行了试验和模型方面的研究。陈宝等用渗析法和水汽平衡法测得高庙子膨润土的土水特征曲线, 利用压汞试验从微观角度阐述土水特性与微观结构的关系^[6]。叶为民等研究了温度对击实高庙子膨润土土水特性的影响^[7]。张虎元等引入有效黏土密度和有效含水率的概念对实测土水特征曲线进行修正^[8]。孟德林等用滤纸法和压力板法测得高庙子膨润土与砂混合物在低吸力段的土水特性^[9]。秦冰等研究了高吸力下土水特征曲线的温度效应, 并建立了高吸力段内土水特征曲线的热力学模型^[10]。另外, 缪林昌等^[11]、白福青等^[12]、唐朝生等^[13]、吴礼舟等^[14]、李志清等^[15]、龚壁卫等^[16]、詹良通等^[17]、孔令伟等^[18]从不同角度研究了不同膨胀土的土水特性。

目前, 对高庙子钙基膨润土土水特性的研究较少。本文用蒸汽平衡法量测高庙子钙基膨润土在高吸力段(3~287 MPa)的土水特征曲线, 分析吸力路径、试样初始状态、应力加载历史以及土体孔隙结构对土水特性以及力学特性的影响。该试验研究为高膨胀性非饱和土的水力和力学特性研究及热-水-力耦合模型的建立提供参数和试验数据。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验采用高庙子钙基膨润土, 该膨润土的主要矿物成分为蒙脱石, 伴生矿物为伊利石、石英、正长石、方解石、白云石等。其主要物理参数: 比重为 2.725, 液限为 99%, 塑限为 41%, 塑性指数为 58, 自由膨胀率为 115%。用 X 射线荧光分析方法(XRF)测得的高庙子钙基膨润土的化学成分: SiO_2 含量为 76.6%, Al_2O_3 含量为 12.7%, MgO 含量为 4.29%, Fe_2O_3 含量为 2.56%, CaO 含量为 2.21%, K_2O 含量为 0.65%, Na_2O 含量为 0.29%, TiO_2 含量为 0.20%, MnO 含量为 0.04%, $\text{SrO}=0.03\%$, Cr_2O_3 含量为 0.03%, ZrO_2 含量为 0.02%。采用自由膨胀率试验测得高庙子钙基膨润土的自由膨胀率为 115%, 根据 50112—2013^[19]中规定, 该膨润土属于高膨胀性土。由于膨润土具有极为活泼的阳离子交换性, 试验采用去离子水。

1.2 试验方法

试验采用蒸汽平衡法控制高庙子钙基膨润土的吸力。该方法通过不同的饱和盐溶液控制环境湿度, 从而达到控制土样吸力的目的, 相关内容可参考文献[5,

13]。本次试验所选饱和盐溶液及其对应吸力值如表 1 所示^[20]。试验时控制环境温度为 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。将土样置于饱和盐溶液正上方的带孔搁板上, 并密闭在干燥器中, 定期称量土样的质量, 当土样的质量在一周期内的变化量小于 0.01 g 时, 认为土样的吸力与对应饱和盐溶液的蒸汽压力达到平衡。为避免土样中的水分蒸发, 称量土样质量的过程要迅速。吸力平衡过程大致需要 2 个月的时间。

表 1 饱和盐溶液及对应吸力值(20°C)

Table 1 Saturated salt solution and corresponding suction (20°C)

饱和盐溶液	RH/%	总吸力/MPa
$\text{LiCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$	12.0	286.70
CH_3COOK	23.1	198.14
$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33.1	149.51
K_2CO_3	43.2	113.50
NaBr	59.1	71.12
KI	69.9	48.42
NaCl	75.5	38.00
KCL	85.1	21.82
K_2SO_4	97.6	3.29

吸力平衡后, 取出土样, 将其分为 2 块, 其中一块用烘干法测量含水率, 另一块利用阿基米德浮力原理测量土块体积。在测量土块体积时, 先将土块在液体石蜡中预先浸润 15 min, 使石蜡进入土块表面的气泡, 取出后拭去土块表面多余的石蜡, 然后将其放置在如图 1 所示不规则土样体积量测装置的铝盒内, 并浸没于液体石蜡中。天平显示的变化量即为被土块排开的液体石蜡的质量, 由试验所用液体石蜡的密度可计算得到土块的体积。随后, 平衡时土样的含水率、孔隙比和饱和度即可计算得到。

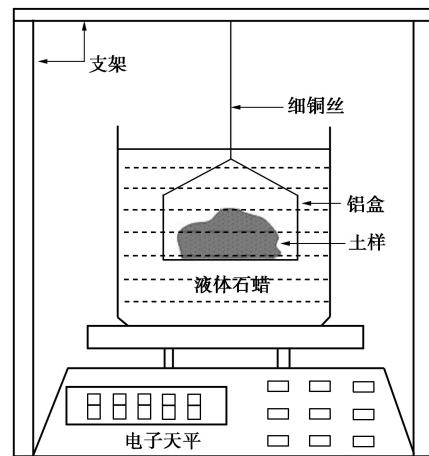


图 1 不规则土样体积测量示意图

Fig. 1 Sketch of volume measurement for soil samples with irregular shapes

2 试验结果及分析

2.1 脱湿、吸湿过程中膨润土的土水-力学特性

No.1 和 No.2 两个压实试样完全相同, 底面直径为

6.18 cm, 高度2 cm, 初始含水率为21.92%, 初始孔隙比 $e_0=1.126$ 。先将No.1和No.2两试样抽真空饱和后平均分, 然后将No.1切块小样分别放在不同的饱和盐溶液密闭玻璃容器中做脱湿试验, 将No.2切块小样置于烘箱内烘干后再放入盐溶液容器中做吸湿试验。利用1.2节的试验方法, 量测计算得到吸力平衡时试样的含水率、孔隙比和饱和度。下面比较脱湿和吸湿过程即吸力路径改变对高庙子钙基膨润土的土水特性及力学特性的影响。

(1) 脱湿、吸湿过程中的变形及土水特性

图2反映了脱湿和吸湿过程中No.1和No.2两个试样的变形及土水特性。图2 (a) 为孔隙比与吸力间关系($e-s$)。土水特征曲线分别用重力含水率(w , 图2 (b))、体积含水率(θ , 图2 (c))以及饱和度(S_r , 图2 (d))表征, 反映土水特性测试试验中试样的水分及孔隙体积的变化。由图2 (a) $e-s$ 关系可以看出: ①吸湿过程中, 孔隙比随着吸力的降低而增加, 脱湿过程中, 随吸力的增加而减小, 这反映了膨润土湿胀干缩的特性。并且, 孔隙比变化的幅度随吸力的增大而变缓。②脱湿过程的变形速率大于吸湿过程的, 这是因为脱湿过程相当于饱和压实样的吸力加载过程, 而对于烘干后吸湿的试样, 因吸力在烘干后达到最大

值, 吸湿过程类似于超固结试样的回弹过程, 即吸力卸载过程。③相同吸力下, 吸湿过程的孔隙比大于脱湿过程的。分析其原因, No.2饱和试样烘干(强干化)后, 试样产生不可回复的收缩变形, 膨润土因快速失水产生裂隙^[21], 使得土体内部的孔隙较经历脱湿的No.1饱和样要大。Lin等^[22]研究了美国Eagle Ford高膨胀性土在干湿循环过程下的土水特性, 试验结果也表明, 脱湿-再吸湿的孔隙比大于先前脱湿过程的孔隙比。本文的试验结论同时也验证了Alonso等^[23]的结论, 即强干化时膨胀土土体的宏观孔隙增多, 换句话说, 强干化时尽管土样通常会收缩, 宏观孔隙的扩张可以抵消部分的收缩变形。

由图2 (b) 显示的 $w-s$ 关系的延长线可以得到, 当试样的含水率为零时, 膨润土的吸力值约为10³ MPa。该趋势与文献[24, 25]的结论一致。

由图2 (b) $w-s$ 关系还可以看出, 在 $s<50$ MPa时, 即在虚线的左侧, 相同吸力下, 脱湿时含水率要高于吸湿时含水率; 随着吸力增大($s>50$ MPa), 吸湿和脱湿过程中含水率的滞回性不明显。分析其原因, 膨润土微观孔隙中存在集聚体间孔隙(inter-aggregate pores)和集聚体内孔隙(intra-aggregate pores)^[3]。土体

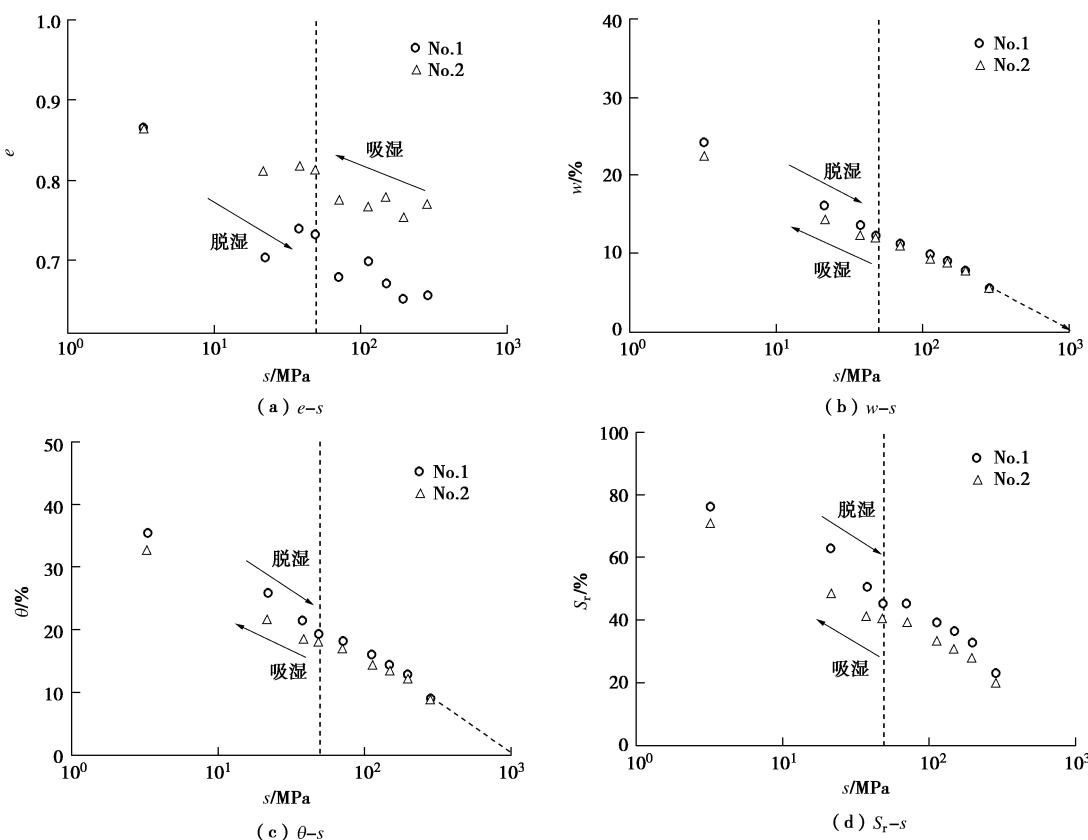


图 2 高庙子钙基膨润土脱湿和吸湿过程的变形和土水特性

Fig. 2 Deformation and SWCC of GMZ Ca-bentonite during drying and wetting process ($e_0=1.126$)

中的水分包括集聚体间孔隙中的自由水和集聚体内孔隙中的吸附水。当 $s > 50 \text{ MPa}$ 时, 集聚体间孔隙中没有自由水, 吸力改变只引起集聚体内孔隙中的吸附水水量的改变, 而集聚体内孔隙中水分的改变可认为是可回复性的, 所以在 $s > 50 \text{ MPa}$ 时脱湿与吸湿过程中含水率的滞回效应不明显。而在 $s < 50 \text{ MPa}$ 时, 集聚体间孔隙存在自由水, 吸力的改变会同时引起集聚体间孔隙和集聚体内孔隙中水分的改变。而集聚体间孔隙的保水机制引起在该吸力范围时脱湿与吸湿过程中含水量的差异。Romero 等^[3]研究了 Boom 膨胀黏土的土水特性, 并与微观结构对照, 得到了膨胀土土体中的两种水分保持机制, 有关重力含水率与吸力间的滞回特性与本研究的试验结论一致。

图 2 (c) 和 2 (d) 为 $\theta - s$ 关系和 $S_r - s$ 关系。可以看出, 吸力相同时, 脱湿过程的体积含水率和饱和度大于吸湿过程的, $S_r - s$ 关系的滞回性更为明显。对照图 2 (b) $w - s$ 关系, 在 $s > 50 \text{ MPa}$ 时, $w - s$ 关系滞回性不明显, 而脱湿与吸湿过程中体积含水率和饱和度存在差异。分析其原因, 脱湿和吸湿过程中孔隙比存在差异, 如图 2 (a) 所示, 孔隙比的差异相应地也会引起脱湿和吸湿过程中体积含水率和饱和度的滞回。即, 孔隙比对 $\theta - s$ 和 $S_r - s$ 关系影响较大。该试验结果验证了文献[26]的结论, 即饱和度的变化量 ΔS_r 不仅包括由吸力变化引起的变化量 $\Delta S_r(s)$, 还包括由孔隙比变化引起的变化量 $\Delta S_r(e)$ 。

(2) 脱湿、吸湿过程中的力学特性

图 2 (a) 中脱湿与吸湿过程中 $e - s$ 关系的差异还可以从膨润土试样受力的角度分析。根据非饱和土双应力变量理论, 外加应力可分为两个独立的应力状态变量, 分别为净应力 ($p_{net} = \sigma - u_a$) 和吸力 ($s = u_a - u_w$)。但该理论不能完全反映饱和度对非饱和土应力-应变关系的影响。为阐述非饱和土的水力-力学特性, 采用应力状态变量为平均骨架应力和吸力。平均骨架应力的定义为

$$p' = p_{net} + sS_r = (\sigma - u_a) + sS_r \quad (1)$$

用蒸汽平衡法测吸力过程中, 由于没有外力的作用, 土样所受净应力 p_{net} 为 0, 因此, 平均骨架应力 $p' = sS_r$, 即平均骨架应力仅由土体内部土水相互作用引起。由图 2 (d) $S_r - s$ 关系可得, 吸力相同时, 脱湿过程的饱和度大于吸湿过程的, 即脱湿过程中土样所受平均骨架应力大于吸湿过程的, 所以表现出脱湿过程的孔隙比要小于吸湿过程的。

上面提到了 sS_r , 接下来阐述一下该值的意义。

非饱和土的强度 τ_f 由有效黏聚力 c' , 净应力产生的剪阻力以及吸力产生的剪阻力 3 部分组成。由吸力产

生的剪阻力 c'' 定义为非饱和黏聚力, 可以表达为

$$c'' = s \tan \varphi'' = \sigma_0(s) \tan \varphi' \quad (2)$$

式中, φ' 是净应力变化的内摩擦角, φ'' 是吸力变化的摩擦角, $\sigma_0(s)$ 是与吸力相关的吸力应力。Karube 等^[27]指出, 吸力应力与相对饱和度有关。这里根据上述平均骨架应力的概念, 定义吸力应力 $\sigma_0(s) = sS_r$, 当土样达到饱和时, 吸力应力为 0; 随着吸力的增大, 吸力应力非线性增大; 当土样中吸力足够大时, 吸力应力达到一定值^[28]。

图 3 为脱湿、吸湿过程中吸力应力与吸力 ($sS_r - s$) 关系图。可以看出, 吸力应力随吸力的增大而增大, 在较高吸力时该值趋向于一定值, 且脱湿过程的吸力应力大于吸湿过程的。龚壁卫等^[29]和 Karube 等^[27]指出, 由于土水特征曲线的滞回性, 脱湿与吸湿过程中相同吸力具有不同的强度贡献, 本文的试验结果验证了这一观点的正确性。同时, No.2 饱和试样烘干后膨润土土体产生裂隙, 强度降低, 吸力应力值小于 No.1 饱和样脱湿过程的。殷宗泽等^[21]指出干湿循环造成膨胀土土体裂隙的开展, 从而引起强度降低。本文的试验结论支撑了这一观点。

同时, 由图 3 还可以看出当吸力足够大时膨润土的吸力应力值非常大, 很难想象土中骨架能够承受这么大的应力。赵成刚等^[30]指出基质吸力近似地分为两部分: 毛细部分和黏吸部分(adsorption); 哪一部分起主要作用依赖于含水率和土的类型。对于较高塑性指数的黏土或低饱和度的土, 黏吸部分起控制作用。当吸力很大时, 传统意义上毛细模型已不再适用, 式(1)的有效性还需进一步研究。

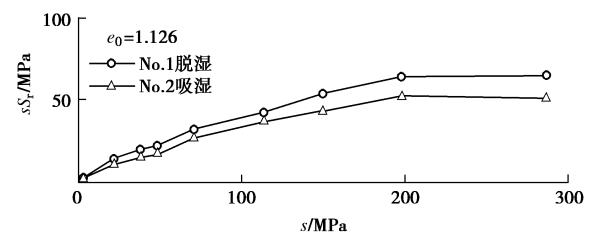


图 3 脱湿、吸湿过程中吸力应力的变化规律

Fig. 3 Change of suction stress during drying and wetting process

2.2 初始孔隙比对膨润土的土水-力学特性的影响

No.1 和 No.3 两个压实样初始含水率为 21.92%, 初始孔隙比不同, 分别为 1.126 和 1.765, 两者的制样方法完全相同, 经历的吸力路径也相同, 均是抽真空饱和后放入盐溶液中做脱湿试验。下面比较试样初始孔隙比对土水特性以及力学特性的影响。

图 4 为测得的 No.1 和 No.3 两个高庙子钙基膨润土试样在脱湿过程中的土水特征曲线。由图 4 (a) 可

以看出, 初始孔隙比对脱湿过程中的 $w-s$ 关系基本没有影响。这一现象在 FEBEX 膨润土^[2]、Boom 黏土^[3]、FoCa7 黏土^[4]以及高庙子钠基膨润土^[8-10]中均观察到类似的现象。分析其原因可能是因为, 重力含水率为土中水的质量与土粒质量之比, $w=m_w/m_s$, 即单位质量土体所吸收到的水分量, 与土体体积或干密度等无关。而单位质量的某一类土, 无论其是粉末还是压成任意形状, 在某一湿度环境或吸力下(接近饱和状态时除外)平衡稳定时所含有的水分量是一定的。而由图 4 (b) 可以看出, 初始孔隙比对 S_r-s 关系影响很大。初始孔隙比小的 S_r-s 关系曲线在孔隙比大的右侧, 也就是说, 同样吸力下, 初始孔隙比小的试样的饱和度要大于初始孔隙比大的。这是因为孔隙比较小的试样, 密实度较高, 相同吸力下, 土颗粒周围水量增多, 相应地土体饱和度提高, 持水能力增强。该试验结果与非膨胀性非饱和土试验得到的结论一致^[26]。

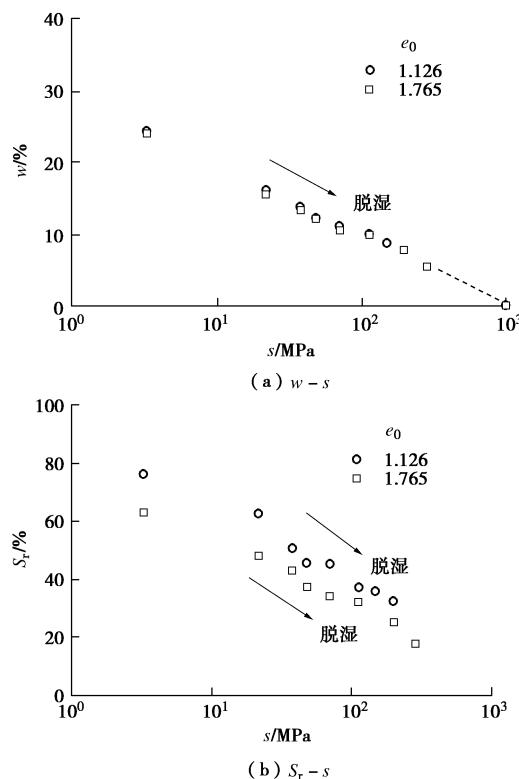


图 4 不同初始孔隙比试样在脱湿过程中的土水特征曲线

Fig. 4 SWCCs for different initial void ratios during drying

图 5 反映了初始孔隙比不同的两个试样在脱湿过程中由吸力引起的吸力应力与吸力间的关系。可以看出, 吸力相同时, 试样的 sS_r 值随孔隙比的减小而增大。这主要是因为随着孔隙比的减小, 试样的持水性提高, 饱和度增大(如图 4 (b)), 土体颗粒周围水量增多, 相应的水体吸引土颗粒的力量加大, 由吸力引起的凝聚力增强, 土体强度提高。

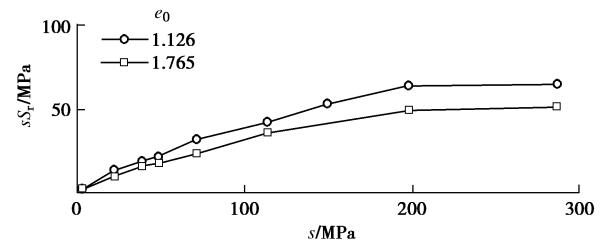


图 5 初始孔隙比对吸力应力与吸力关系的影响

Fig. 5 Influence of initial void ratio on suction stress-suction relationship

2.3 应力路径对膨润土土水 - 力学特性的影响

试样 No.4 和 No.5 分别经历了不同的应力路径, 对 No.4 压实样在固结仪中先进行一维浸水膨胀变形试验, 饱和后进行压缩试验, 最大竖向力达到 1600 kPa; 对 No.5 压实样先进行一维浸水膨胀力试验, 试验采用平衡加荷法加载, 试样达到饱和后最终膨胀力为 876 kPa。经历了不同应力路径后, 两个试样最终具有相近的孔隙比, No.4 的孔隙比为 0.97, No.5 的为 0.98。之后, 将 No.4 和 No.5 饱和样平均切分并烘干后分别放入饱和盐溶液中做吸湿试验。

下面比较吸湿过程中 No.4 和 No.5 两个试样的土水特征曲线, 如图 6 所示。可以看出, 虽然经历的应力路径不同, 但只要孔隙比一致, 其土水特征曲线接近, 即孔隙比是影响试样土水特性的直接因素, 应力

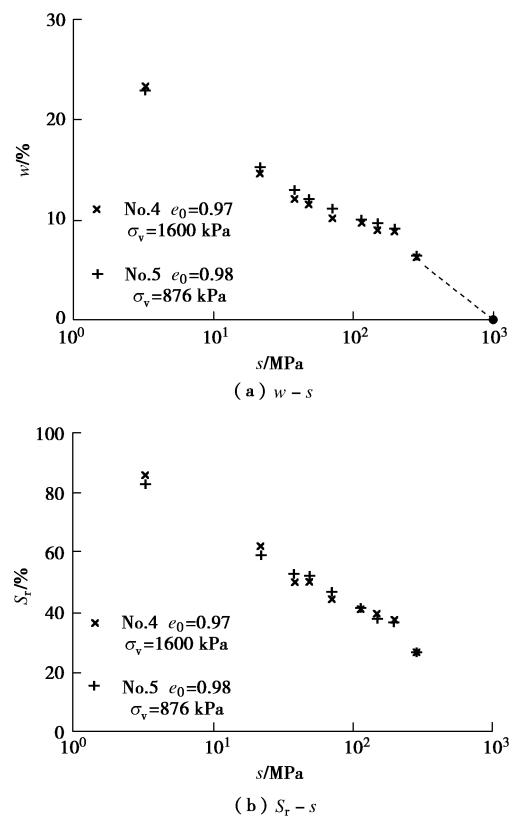


图 6 应力加载历史对土水特征曲线的影响

Fig. 6 Influence of stress history on SWCC

历史、应力状态是间接影响因素, 它们通过影响直接因素而起作用。孙德安^[31]研究了非膨胀性珍珠黏土的土水特性及其影响因素, 指出孔隙结构是影响土水特性的直接因素, 应力状态是间接因素; Vanapalli^[25]也指出在高吸力段(20~1000 MPa)时, 应力历史对非膨胀性土的SWCC影响较小。本文的试验结果验证了这一结论对膨胀性土也同样适用。

图7反映了两个试样No.4和No.5在吸湿过程中由吸力引起的吸力应力与吸力间的关系。可以看出, 在相同吸力下两个试样的吸力应力是相同的。虽然两个试样经历了不同的应力路径, 但吸湿时孔隙比相同, 试样的持水能力相同, 相应的吸力应力也相同。

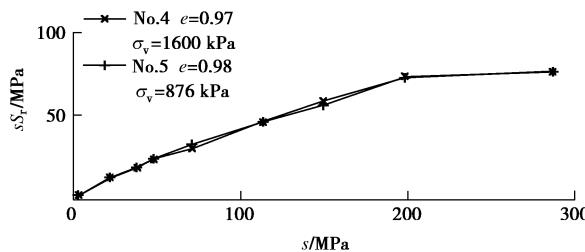


图7 应力加载历史对吸力应力的影响

Fig. 7 Influence of stress history on suction stress

2.4 土孔隙结构对膨润土土水-力学特性的影响

对于同一种土, 即使孔隙比相近, 其土水特征曲线也会因土孔隙孔径大小分布不同而不同^[31]。我们首先制得具有相近孔隙比的泥浆压缩样和压实压缩样, 制备方法如下: 先将高庙子钙基膨润土按1.5倍液限含水量配成泥浆样, 充分搅拌均匀后分层装入环刀、振动抹平, 然后放入固结仪进行压缩试验, 最大竖向荷载达到1600 kPa, 压缩试验结束后泥浆压缩样的孔隙比为1.23; 对压实样先进行抽真空饱和后进行与泥浆样相同的压缩试验, 压缩试验结束后, 压实压缩样的孔隙比为1.25。之后, 将泥浆压缩样和压实压缩样平均切分, 分别放入饱和盐溶液中做脱湿试验。

下面比较脱湿过程中具有相近孔隙比的泥浆压缩样和压实压缩样的土水特征曲线, 由图8(a) $w-s$ 关系可以看出, 不同制样方法所得试样在某一吸力下含水率是一定的, 这与2.2节中所得结论是一致的, 即在某一湿度环境下单位质量的土样, 不管其制样方式如何, 在平衡稳定时所含的水分量是一定的。由图8(b) S_r-s 关系可以看出, 在孔隙比相近的条件下, 泥浆压缩样的土水特征曲线在压实压缩样的右边。说明孔隙比相近时, 泥浆压缩样比压实压缩样在相同吸力时保持水分的能力强。这主要是因为泥浆压缩样孔隙大小比较均匀, 而压实压缩样中孔隙大小分布不如前者均匀。

图9反映了土孔隙结构对吸力应力的影响, 可以

看出, 吸力相同时, 泥浆压缩样的 sS_r 值大于压实压缩样。这主要是因为相同孔隙比下泥浆固结样的持水性较高, 饱和度较大(如图8(b)), 土颗粒周围水量增多, 导致由吸力引起的黏聚力增强。

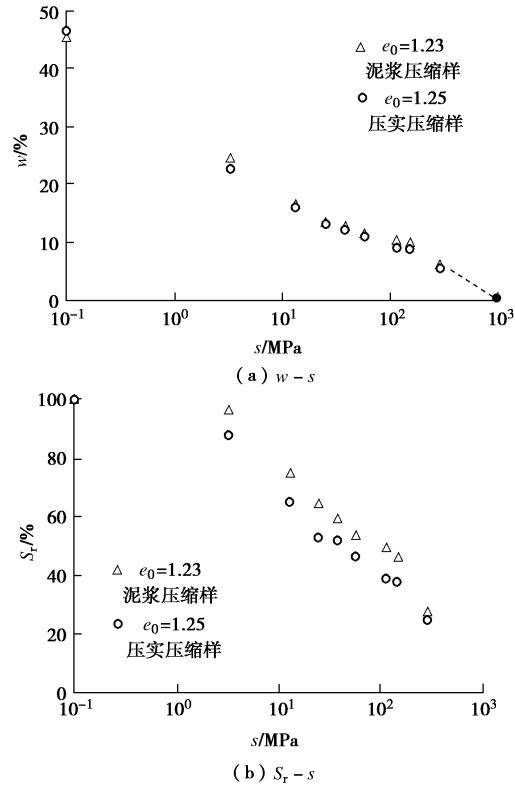


图8 土孔隙结构对土水特征曲线的影响

Fig. 8 Influence of soil pore structure on SWCC

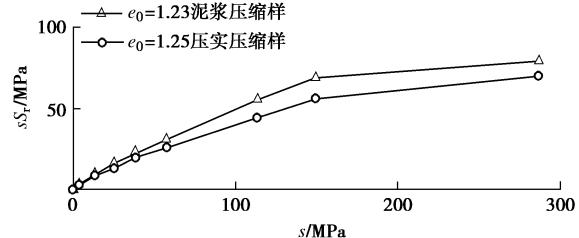


图9 土孔隙结构对吸力应力的影响

Fig. 9 Influence of soil pore structure on suction stress

3 结 论

本文用蒸汽平衡法量测高庙子钙基膨润土在高吸力段(3~287 MPa)的土水特征曲线, 分析了吸力路径、初始孔隙比、应力加载历史以及孔隙结构对膨胀性土土水特性以及水力-力学特性的影响, 得到以下结论:

(1)重力含水率与吸力间滞回特性反映出膨润土土体中的两种水分保持机制, 孔隙比的变化会引起脱湿和吸湿过程中体积含水率和饱和度的差异; 初始孔隙比对重力含水率与吸力间关系基本没有影响, 随着

初始孔隙比的减小，反映饱和度与吸力间关系的土水特征曲线右移；孔隙比是影响土水特征曲线的直接因素，应力路径和应力状态为间接因素；由泥浆压缩样和压实压缩样的土水特征曲线得出土样的孔隙结构对土水特性影响较大。

(2) 脱湿、吸湿过程中孔隙比的变化体现了膨润土的湿胀干缩特性；孔隙比变化的幅度随吸力的增大而变缓；膨润土饱和样脱湿过程的变形速率大于烘干样吸湿过程的；膨润土烘干后内部产生裂隙，孔隙比增大，造成吸力相同时吸湿过程的孔隙比大于脱湿过程的。

(3) 由吸力引起的吸力应力随吸力的增大而增大，在较高吸力时趋向于一定值；由于土水特征曲线的滞回性，脱湿过程的吸力应力要大于吸湿过程的；吸力相同时吸力应力随初始孔隙比的减小而增大，孔隙结构对吸力应力也有影响。

参考文献：

- [1] 刘月妙, 温志坚. 用于高放射性废物深地质处置的粘土材料研究[J]. 矿物岩石, 2003, 23(4): 42 - 45. (LIU Yue-miao, WEN Zhi-jian. Study on clay-based materials for the repository of high level radioactive waste[J]. J Mineral Petrol, 2003, 23(4): 42 - 45. (in Chinese))
- [2] LLORET A, VILLAR M V. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted “FEBEX” bentonite[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(8/9/10/11/12/13/14): 701 - 715.
- [3] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1/2): 117 - 127.
- [4] IMBERT C, OLCHITIZKY E, LASSABATERE T, et al. Evaluation of a thermal criterion for an engineered barrier system[J]. Engineering Geology, 2005, 81(3): 269 - 283.
- [5] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 287 - 296.
- [6] CHEN Bao, QIAN Li-xin, YE Wei-min, et al. Soil-water characteristic curves of Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 788 - 793.
- [7] YE Wei-min, WAN Min, CHEN Bao, et al. Effect of temperature on soil-water characteristics and hysteresis of compacted Gaomiaozi bentonite[J]. J Cent South Univ Technol, 2009, 16(5): 821 - 826.
- [8] 张虎元, 张明, 崔秀丽, 等. 混合型缓冲回填材料土水特征曲线测试与修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 382 - 390. (ZHANG Hu-yuan, ZHANG Ming, CUI Su-li, et al. Determination and modification of soil-water characteristic curves of bentonite-sand mixtures as high-level waste backfill/buffer material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2011, 30(2): 382 - 390. (in Chinese))
- [9] 孟德林, 孙德安, 刘月妙. 高庙子膨润土与砂混合物的土水特征曲线[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 509 - 514. (MENG De-lin, SUN De-an, LIU Yue-miao. Soil-water characteristic curves of Gaomiaozi bentonite-sand mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 509 - 514. (in Chinese))
- [10] 秦冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. 岩土工程学报, 2012, 32(10): 1877 - 1886. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, SUN Fa-xin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 32(10): 1877 - 1886. (in Chinese))
- [11] 缪林昌, 刘松玉. 南阳膨胀土的水分特征和强度特性研究[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 87 - 92. (MIAO Lin-chang, LIU Song-yu. Soil-water characteristics and shear strength of expansive soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(7): 87 - 92. (in Chinese))
- [12] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928 - 933. (BAI Fu-qing, LIU Si-hong, YUAN Jiao. Measurement of SWCC of Nanyang expansive soil using the filter paper method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 928 - 933. (in Chinese))
- [13] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376 - 1384. (TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376 - 1384. (in Chinese))
- [14] 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. (WU Li-zhou, HUANG Run-qiu. Study on suction and saturation of excavated expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 970 - 973. (in Chinese))

- Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 970 – 973. (in Chinese))
- [15] 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. (LI Zhi-qing, HU Rui-lin, WANG Li-chao, et al. Study on SWCC of unsaturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(5): 730 – 734. (in Chinese))
- [16] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, **25** (12): 1915 – 1918. (GONG Bi-wei, CHARLES W W Ng, WANG Bin. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25** (12): 1915 – 1918. (in Chinese))
- [17] ZHAN Liang-tong, CHEN Ping, 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.
- [18] 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 Ling-wei, LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, 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))
- [19] GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (GB 50112—2013 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [20] The International Organization of Legal Metrology (OIML). The scale of relative humidity (RH) of air certified against saturated salt solutions[S]. OIMLR 121, 1996.
- [21] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2155 – 2161. (YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2155 – 2161.
- [22] LIN B, CERATO A B. Hysteretic soil water characteristics and cyclic swell–shrink paths of compacted expansive soils[J]. Bull Eng Geol Environ, 2013, **72**(1): 61 – 70.
- [23] ALONSO E E, VAUNAT J, GENN A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. Engineering Geology, 1999, **54**(1/2): 173 – 183.
- [24] FRELUND D G, XING A Q. Equations for Soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 – 532.
- [25] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of compacted till[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, **19**(3): 259 – 268.
- [26] SUN D A, SHENG D C, SLOAN S W. Elastoplastic modeling of hydraulic and stress-strain behavior of unsaturated soils[J]. Mechanics of Materials, 2007, **39**(3): 212 – 221.
- [27] KARUBE D, KAWAI K. The role of pore water in the mechanical behaviour of unsaturated soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, **19**(3/4): 211 – 41.
- [28] SUN D A, MATSUOKA H, YAO Y P, et al. An elastoplastic model for unsaturated soil in three-dimensional stresses[J]. Soils and Foundations, 2000, **40**(3): 17 – 28.
- [29] 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. (GONG Bi-wei, ZHOU Xiao-wen, ZHOU Wu-hua. Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 207 – 209. (in Chinese))
- [30] 赵成刚, 李舰, 刘艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1825 – 1831. (ZHAO Cheng-gang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1825 – 1831. (in Chinese))
- [31] 孙德安. 土水特征影响因素的试验研究[C]// 土工测试新技术——第 25 届全国土工测试学术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2008: 211 – 215. (SUN De-an. Experimental study on influential factors of soil-water characteristics[C]// Proceedings of the 25th National Symposium on Geotechnical Testing. Hangzhou, 2008: 211 – 215. (in Chinese))