

脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探

孔令伟, 李雄威, 郭爱国, 张 勇

(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)

摘 要: 通过控制恒温恒湿箱的温湿度工作参数, 实现饱和膨胀土在不同脱湿速率条件下的状态变化, 借助收缩试验和非饱和三轴试验, 研究脱湿速率对膨胀土收缩特性、强度特性与持水特性的影响规律。试验结果表明, 膨胀土的收缩系数随脱湿速率的减小而变大, 并先呈现线性脱湿过程, 后呈现非线性脱湿特征; 在相同含水率条件下, 膨胀土的吸附强度亦随脱湿速率的减小而增大, 尤在含水率和围压较低时更趋明显。结合吸附强度与吸力关系的乘幂函数表达式, 利用收缩系数和吸附强度反算出不同脱湿速率下的膨胀土“双线性”土水特征曲线, 发现不同脱湿速率时曲线下降段接近平行趋势, 脱湿速率越小, 膨胀土的进气值越大, 相同含水率时的吸力越高。

关键词: 膨胀土; 脱湿速率; 收缩系数; 强度; 土水特征曲线

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)03-0335-06

作者简介: 孔令伟(1967-), 男, 湖北通山人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn。

Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate

KONG Ling-wei, LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, ZHANG Yong

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Through adjusting the working parameters of temperature and humidity in the constant temperature and humidity equipments, the state variation of saturated expansive soil under different drying rates is achieved. The influences of the drying rates on shrinkage, strength and water retention characteristics of expansive soil are investigated, in which the shrinkage tests and the unsaturated triaxial tests are employed. The experimental results indicate that the coefficient of shrinkage increases as the drying rate decreases, and that the drying process is linear at the beginning and then becomes nonlinear. Moreover, the suction strength of unsaturated expansive soil increases as the drying rate decreases under the same water content, which is more prominent especially under the condition of low moisture content and confined pressure. Based on the expression of power function relationship between suction strength and suction, a bi-linear water retention curve is back-calculated from the coefficient of shrinkage and suction strength. It is found that the drop part of water retention characteristic curve tends to approximate parallel under various drying rates. The smaller the drying rates, the greater the air-entry value and suction.

Key words: expansive soil; drying rate; coefficient of shrinkage; strength; SWCC

0 引 言

膨胀土是一种性质特殊的非饱和土, 含水率对其强度变形特性影响十分显著, 在低含水率下往往有很高的强度, 而遇水后体积迅速膨胀, 强度明显降低。这种强度的变化主要由孔隙水气界面物理性质的变化所引起, 非饱和土力学的常用基质吸力($u_a - u_w$)来描述这一物理力学特性^[1-3], 而基质吸力的变化源于毛细现象, 与含水率密切相关。土水特征曲线(SWCC)是表达非饱和土基质吸力和含水率之间关系的曲线, 它反映基质吸力作用下土的持水性能, 国内外对干湿

循环下土水特征曲线进行了系统深入的研究^[1-5], 结果表明, 膨胀土的基质吸力与含水率间并不存在唯一的对应关系, 土水特征曲线在干湿循环过程中呈现滞回圈, 即相同含水率可以有不同的吸力, 同一个吸力可以对应不同的含水率, 且滞回圈的形状随干湿循

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872210); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-150); 交通部西部交通建设科技项目(200631878530)

收稿日期: 2008-02-15

表 1 膨胀土物理力学特性
Table 1 Physico-mechanical properties of expansive soil

土样	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/%	干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	饱和渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	<5 μm 黏粒含量/%	饱和固结排水剪强度 黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
灰白色膨胀土	1.78	40.9	1.26	2.77	94.31	35.31	58.99	6.08e-8	76	18.48	14.79

表 2 膨胀土胀缩特性
Table 2 Swelling-shrinkage properties of expansive soil

土样	自由膨胀率/%	收缩系数	缩限/%	体缩率/%	50 kPa 膨胀率/%
灰白色膨胀土	98	0.44	20.0	20.4	-0.0085

环次数的不同而变化。据此可推测，膨胀土的工程力学特性与其含水率的变化路径及过程有关。

事实上，对于膨胀土边坡，蒸发效应导致土体裂隙的开展是边坡发生灾变的一个重要前提^[6]，大量的工程实践与现场直观经验现象亦发现，膨胀土在不同气候环境与季节条件下，其含水率变化速率存在明显差异，尤其是蒸发干燥脱湿速率不同，膨胀土裂隙拓展与分布特征亦不同。毋庸置疑，裂隙赋存状态对膨胀土的性状与工程稳定性必然产生显著影响，但迄今少见脱湿速率对膨胀土工程性状影响的研究报道，深入认识膨胀土性状的脱湿速率效应十分必要。

基于上述考虑，本文尝试采用恒温恒湿箱，通过控制其温湿度工作参数，实现膨胀土不同脱湿速率条件，借助收缩试验和非饱和三轴试验，探讨脱湿速率对膨胀土收缩特性、强度特性与持水特性的影响规律。

1 试验土样与试验方法

1.1 试验土样

土样取自广西南宁市郊外广西农业科学院水牛所草场坡地地表下 1.5~1.8 m，呈灰白色，可塑，黏性较强，天然含水率较高，裂隙面呈蜡状光滑，具有典型膨胀土的特征，其基本物理性质和胀缩特性见表 1，2，根据膨胀潜势等级判定标准^[7]，该灰白色黏土为强膨胀土。

为获取研究膨胀土的持水特性，采用美国土壤水分仪器公司陶土板进气值为 15 bar 的压力板仪，对其土水特征曲线进行了量测，试验结果如图 1 所示。可见，所用膨胀土的土水特征曲线与一般黏性土的持水特性规律相类似，且进气值约为 60 kPa。

1.2 试验方法

脱湿设备采用恒温恒湿箱，根据常见气候条件，设定 4 种恒温恒湿箱的工作参数状态（见表 3），从而实现饱和和膨胀土在不同脱湿速率条件下的变化状态。

（1）脱湿速率影响下的膨胀土收缩特性

选取天然密度与含水率相近土样 4 组，每组 2 个

平行试样，经过抽气饱和后，依据《土工试验规程》（SL237—026—1999），采用收缩仪在恒温恒湿箱中按预先设置 4 种不同脱湿环境中进行收缩试验。

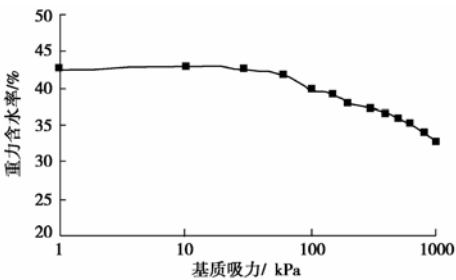


图 1 膨胀土重力含水率与基质吸力关系

Fig. 1 Relationship between gravitational water content and suction pressure of expansive soil

（2）脱湿速率影响下的膨胀土非饱和强度特性

同样选取天然密度与含水率相近土样，按尺寸 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 备样，将试样抽气饱和后，按照表 3 设置方案 1、方案 3 与方案 4 脱湿环境，脱湿到预定 3 种含水率状态（40%，35%与 30%），然后在保湿器中陈化放置 48 h。为确保在三轴剪切试验中，试样的重力含水率维持不变，在双压力室非饱和三轴仪上分别进行净围压水平为 25，50 与 100 kPa 条件下的常含水率剪切试验，剪切速率为 0.0032 mm/min。由于剪切速率较慢，围压较小，可以近似认为剪切过程中试样平均基质吸力前后保持稳定。

表 3 试样制备环境参数

脱湿速率方案	脱湿环境参数	
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/%
方案1	25	30
方案2	25	60
方案3	25	75
方案4	25	90

2 试验结果与分析

2.1 脱湿速率对膨胀土收缩特性的影响

不同温湿度环境下的膨胀土含水率随脱湿时间变化时程关系见图 2，其线缩率与含水率变化关系所图 3

所示。从图 2 的含水率变化时程曲线可以看出，饱和和膨胀土在不同脱湿环境中的脱湿过程均先经历线性脱湿变化过程，后呈现非线性变化过程，其界限点特征含水率逼近相对蒸汽压与土体总吸力的平衡点。由于脱湿过程土体干重量不变，单位时间重力含水率的变化量实际上反映了试样含水率脱湿速率的快慢。因此，在线性脱湿过程阶段，采用重力含水率与时间线性回归方程的斜率绝对值表述土体的脱湿速率，4 种脱湿环境对应的土样脱湿速率如表 4 所示。

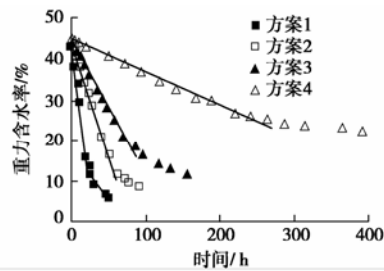


图 2 膨胀土含水率变化时程曲线

Fig. 2 Variation of water content of expansive soil with time

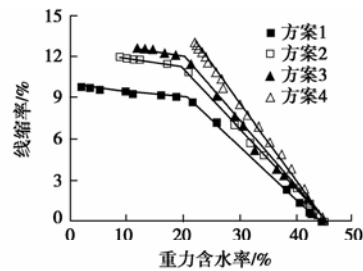


图 3 膨胀土线缩率与含水率关系曲线

Fig. 3 Relationship between linear shrinkage rate and water content of expansive soil

表 4 膨胀土在不同环境中的脱湿速率

Table 4 Drying rates in various surroundings of expansive soil		
脱湿方案	脱湿方程	脱湿速率/(%·h ⁻¹)
方案 1	$y = -1.49x + 42.89$	1.49
方案 2	$y = -0.56x + 43.96$	0.56
方案 3	$y = -0.33x + 44.28$	0.33
方案 4	$y = -0.08x + 45.01$	0.08

从线缩率与含水率变化关系（见图 3）不难发现，当膨胀土的含水率小于其缩限时，土体体积依然会发生一定的收缩变形，但在不同的脱湿环境条件下，试样的收缩性状呈现较大不同，说明脱湿速率对膨胀土的收缩特性影响较大。如分别采用 λ_{s1} 与 λ_{s2} 表示膨胀土在缩限含水率前后的收缩系数，则可方便获得收缩系数 λ_{s1} 与 λ_{s2} 随脱湿速率的演化关系（见图 4）。由此可见，膨胀土的收缩系数与脱湿速率呈现较好的相关性，且随着脱湿速率的增加，其收缩系数以幂函数形式逐渐衰减。

从上述初步结果分析可以看出，膨胀土的收缩特性与脱湿速率关系密切，脱湿速率越小，经历过程越

缓慢，收缩变形会越大，这也证实膨胀土在相对均匀失水条件下，有利于其收缩变形的充分发挥。

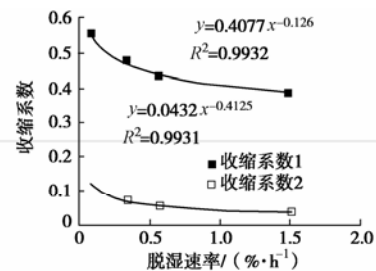


图 4 膨胀土收缩系数与脱湿速率关系

Fig. 4 Relationship between coefficient of shrinkage and drying rate of expansive soil

2.2 脱湿速率对膨胀土强度特性的影响

由于收缩试验与非饱和和三轴试验存在试样尺寸的不同，膨胀土在相同温湿度环境下，其脱湿速率可能出现尺寸效应，表 5 为三轴试样按表 3 设置的干燥脱湿环境对应脱湿速率。类比表 4 与表 5 中的数据资料，可以初步认为，三轴试样在相同温湿度环境下，其脱湿速率比收缩试验样品略有减小，但从整体上看，差异不大。

为论证脱湿速率对膨胀土强度特性的影响规律，以 3 种不同脱湿速率工况条件下，膨胀土从饱和和初始状态分别脱湿到含水率为 40%，35%与 30%的终了状态的常含水率非饱和三轴试验结果为依据，分别从非饱和和膨胀土应力应变关系与强度特征角度，分析膨胀土强度特性的脱湿速率效应。

表 5 三轴试样在不同环境中的脱湿速率

Table 5 Drying rates in various surroundings of triaxial samples	
脱湿方案	脱湿速率/(%·h ⁻¹)
方案 1	1.48
方案 3	0.27
方案 4	0.07

(1) 脱湿速率影响下的膨胀土应力应变关系

图 5~7 为 3 种脱湿速率非饱和和膨胀土，在不同净围压与不同含水率条件下的应力应变关系曲线。可以看出，非饱和膨胀土的应力应变关系基本上均呈现应变软化趋势，在相同含水率条件下，随着脱湿速率的降低，其应力应变曲线向上移动，强度峰值也逐渐升高，且随着净围压的增大，其剪应力强度峰值亦逐渐增大，符合非饱和土强度特征的一般性状。

另一方面，从图 5~7 的关系曲线也可以发现，在相同脱湿速率条件下，随含水率的降低，膨胀土的应力应变关系的应变软化程度逐渐增大，峰值强度也逐渐升高，峰值强度与残余强度的差异也有扩大趋势，充分展现出膨胀土在一定脱湿速率条件下，其裂隙扩展过程对强度特性的显著影响。

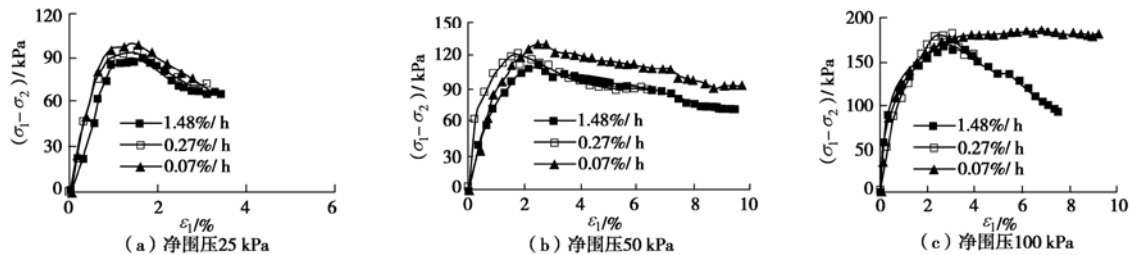


图 5 不同脱湿速率与净围压下膨胀土应力应变关系(脱湿终了含水率 40%)

Fig. 5 Stress-strain curves of expansive soil under various net confined pressure and drying rate conditions (dried water content 40%)

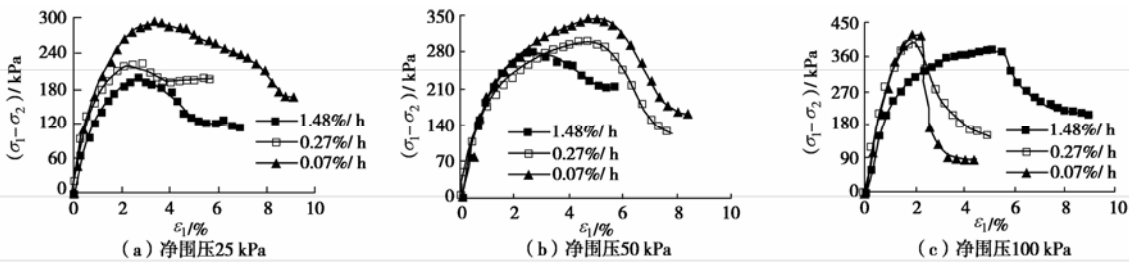


图 6 不同脱湿速率与净围压下膨胀土应力应变关系(脱湿终了含水率 35%)

Fig. 6 Stress-strain curves of expansive soil under various net confined pressure and drying rate conditions (dried water content 35%)

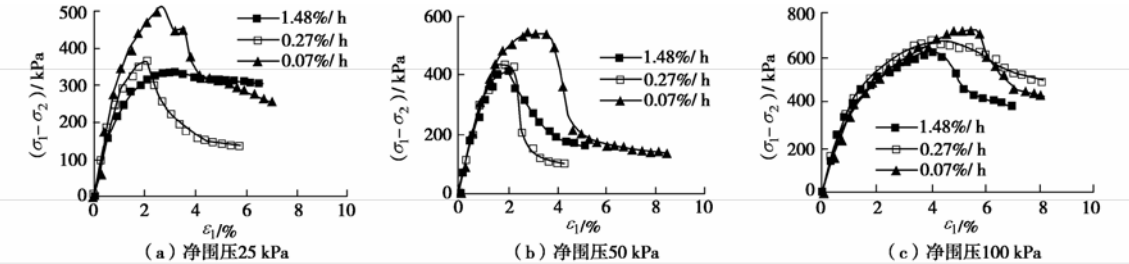


图 7 不同脱湿速率与净围压下膨胀土应力应变关系(脱湿终了含水率 30%)

Fig. 7 Stress-strain curves of expansive soil under various net confined pressure and drying rate conditions (dried water content 30%)

(2) 脱湿速率影响下的膨胀土吸附强度

非饱和土抗剪强度是在饱和土强度的基础上，增加了吸力对强度的贡献，称之为吸附强度，用 τ_{us} 表示，非饱和土强度公式可表示如下：

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \tau_{us} \quad (1)$$

由表 1 试验数据可知，研究膨胀土的饱和强度指标参数 $c' = 18.48 \text{ kPa}$ ， $\varphi' = 14.79^\circ$ ，如将不同含水率条件下的抗剪强度与饱和土抗剪强度差值都归结于吸力的贡献，则按照式 (1) 可方便获得不同净围压和脱湿速率下膨胀土的吸附强度值，结果如表 6 所示。

根据表 6 数据资料，可方便得到不同含水率与净围压下膨胀土吸附强度与脱湿速率的关系（见图 8）。可见，膨胀土的吸附强度随脱湿速率的增加而逐渐减小，在高含水率和高围压条件下，其变化幅度不大，但在较低含水率和围压条件，吸附强度随脱湿速率的变化幅度则较大，且当脱湿速率增大到一定数值后，膨胀土的吸附强度有趋向一定值趋势。

表 6 脱湿速率对膨胀土吸附强度影响三轴试验结果

Table 6 Triaxial test results of influence of drying rate on suction strength of expansive soil

脱湿速率 /(% · h ⁻¹)	含水率 /%	不同净围压下的吸附强度/kPa		
		25	50	100
1.48	40	9.54	10.62	18.93
	35	49.95	74.89	99.75
	30	103.06	128.77	195.58
0.27	40	11.85	15.62	24.71
	35	59.57	83.36	109.37
	30	125.38	135.31	215.98
0.07	40	13.39	19.08	26.24
	35	89.59	100.67	116.69
	30	171.18	176.88	236.00

2.3 脱湿速率影响下的非饱和膨胀土土水特征曲线

笔者曾在杭州湾含浅层气砂土的研究中^[8]，发现非饱和土的吸附强度与吸力并非呈现线性变化关系，无需一定追求线性化的表达式，认为含浅层气砂土的抗剪强度中，吸附强度 τ_{us} 随吸力的变化规律可用乘幂函数表述，非饱和直剪试验与三轴试验结果证实采用这种简单的经验曲线拟合是切实可行的：

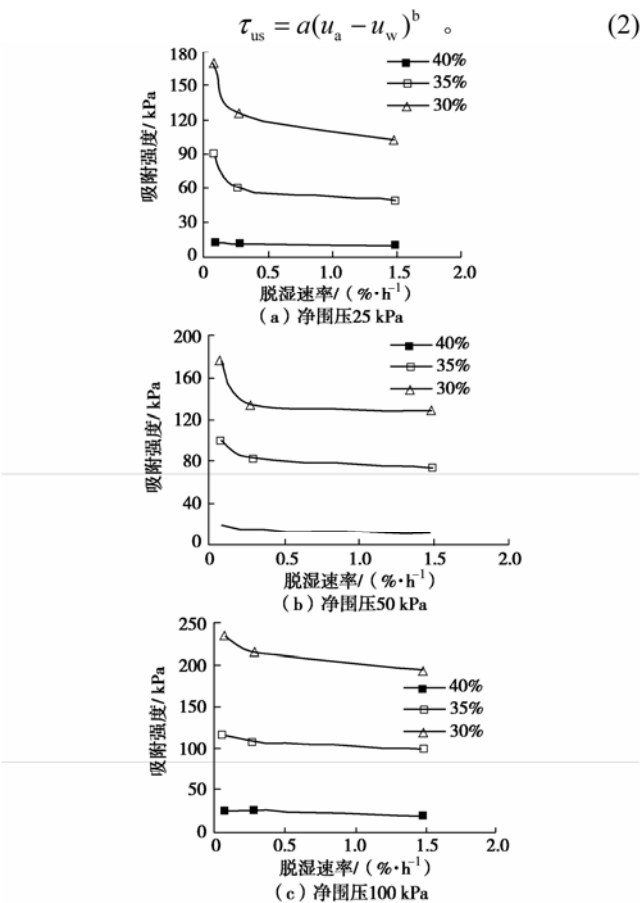


图 8 膨胀土吸附强度与脱湿速率关系

Fig. 8 Relationship between suction strength and drying rate of expansive soil

陈伟^[9]在笔者的指导下, 针对荆门原状弱膨胀土, 开展了相应的非饱和强度试验研究, 结果表明, 这种幂函数的表示方式, 也适合用于描述膨胀土的吸附强度随吸力变化的规律, 其中参数 $a=2.5825$, $b=0.5944$, 与文献[8]中的结果对比 (粉砂 $a=0.7585$, $b=0.8808$; 细砂 $a=1.0098$, $b=0.7494$), 膨胀土 a 值较大 b 较小。

由表 5 中的数据可知, 膨胀土在温度 25℃ 与湿度 90% 环境的脱湿速率仅为 0.07%/h, 这与压力板仪测试土水特征曲线的试样缓慢脱湿过程类同, 脱湿速率亦应相近。为此, 可将压力板仪量测的土水特征曲线看成为温度 25℃ 与湿度 90% 环境试样脱湿的持水特性。以此为基础, 依据表达式 (2)、持水特征曲线图 1 与表 6 中脱湿速率为 0.07%/h 的吸附强度数据, 即可确定膨胀土缓慢脱湿过程吸附强度的表达式:

表 8 不同脱湿速率下膨胀土持水特征

Table 8 Water retention characteristics of expansive soil at various drying rates

脱湿速率 /(%·h)	重力含水率土水特征曲线		体积含水率土水特征曲线	
	进气值/kPa	下降段曲线公式	进气值/kPa	下降段曲线公式
1.48	6.43	$w = -2.1061 \ln(u_a - u_w) + 46.62$	7.73	$\theta = -1.58 \ln(u_a - u_w) + 56.06$
0.27	9.15	$w = -2.1681 \ln(u_a - u_w) + 47.50$	11.53	$\theta = -1.31 \ln(u_a - u_w) + 56.02$
0.07	47.23	$w = -3.044 \ln(u_a - u_w) + 54.44$	59.28	$\theta = -1.44 \ln(u_a - u_w) + 58.70$

为验证式 (3) 的可行性, 图 9 给出了脱湿速率为 0.07%/h 时, 吸附强度随吸力幂函数变化关系计算值与不同净围压下非饱和和三轴试验值对比结果, 曲线吻合性较好。

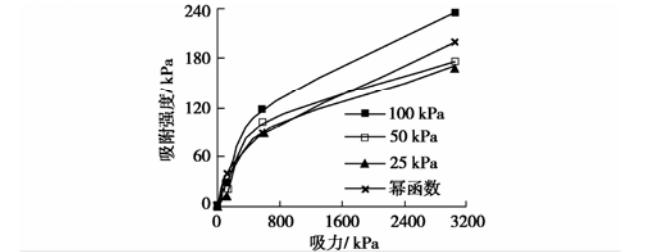


图 9 脱湿速率 0.07%/h 的吸附强度计算值与试验值对比
Fig. 9 Comparison between calculated and experimental values of suction strength at the drying rate of 0.07%/h

假设膨胀土的吸附强度与吸力的关系在不同脱湿速率下均遵循式 (3) 的演化规律, 则可得到不同脱湿速率下含水率分别为 40%, 35% 与 30% 含水率的基质吸力 (见表 7)。

表 7 膨胀土的基质吸力与脱湿速率关系

Table 7 Relationship between matric suction and drying rate of expansive soil

脱湿速率 /(%·d)	不同含水率下膨胀土的基质吸力/kPa		
	w=40%	w=35%	w=30%
1.48	19.31	472.09	1692.64
0.27	26.66	586.32	2082.80
0.07	114.75	593.09	3065.37

依据包承纲提出的土水特征曲线“双线性”表达形式^[10], 由表 7 可初略建立膨胀土在不同脱湿速率下的重力含水率和基质吸力土水特征曲线 (见图 10), 结合收缩曲线, 将重力含水率换算成体积含水率, 得到用体积含水率表述的对应土水特征曲线 (见图 11)。经曲线拟合, 膨胀土在不同脱湿速率工况下的进气值和土水特征曲线下降段公式如表 8 所示。

从上述图表可以看出, 采用体积含水率表述膨胀土的持水特征曲线, 发现不同脱湿速率下的持水特征曲线下降段有接近平行趋势, 且脱湿速率越小, 膨胀土的进气值越大, 相同含水率时的吸力越高, 这些都与膨胀土的基本持水特征形式及非饱和强度指标变化规律相一致。

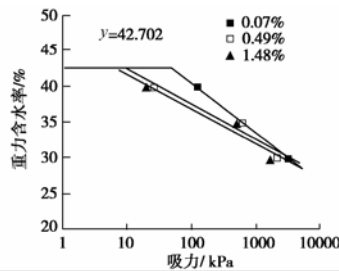


图 10 不同脱湿速率下膨胀土重力含水率和基质吸力关系

Fig. 10 Relationship between gravitational water content and matric suction of expansive soil at various drying rates

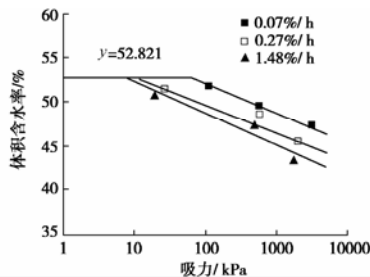


图 11 不同脱湿速率下膨胀土体积含水率和基质吸力关系

Fig. 11 Relationship between water content and matric suction of expansive soil at various drying rates

3 结 论

(1) 脱湿速率对膨胀土的收缩变形有较大影响, 脱湿速率越小, 收缩变形越大, 即使含水率小于其缩限时, 膨胀土依然会发生一定的收缩变形, 其收缩系数与脱湿速率呈现较好的相关性, 随着脱湿速率的增加而以幂函数形式逐渐衰减。

(2) 脱湿速率对膨胀土的非饱和强度特性有较大影响, 在相同含水率条件下, 膨胀土的吸附强度随脱湿速率的减小而增大, 尤在含水率和围压较低时更趋明显, 说明脱湿速率对膨胀土边坡的表土强度特性影响较大, 亦展现出裂隙扩展过程的强度效应显著。

(3) 利用非饱和膨胀土的吸附强度与基质吸力关系的幂函数表达式, 结合收缩系数和吸附强度可反算出不同脱湿速率下的膨胀土“双线性”土水特征曲线, 发现使用体积含水率和基质吸力的关系后, 不同脱湿速率时曲线下降段接近平行趋势, 脱湿速率越小, 膨胀土的进气值越大, 相同含水率时的吸力越高。

值得说明的是, 本文仅尝试借助常规试验初步探讨脱湿速率对膨胀土工程性状的影响, 并从工程实用角度出发, 论证其对膨胀土“双线性”形式下的土水特征曲线特征值影响, 是否具有普适性, 尚需在今后的延续研究工作中不断深化。

参考文献:

[1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for

unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1993.

[2] LU Ning, LIKOS William J. Unsaturated soil mechanics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2004.

[3] 陈正汉, 卢再华, 朱元青. 非饱和土的理论与实践[J]. 力学与实践, 2001(5): 8 - 15. (CHEN Zheng-han, LU Zai-hua, ZHU Yuan-qing. Theory and practice on unsaturated soils[J]. Mechanics and Engineering, 2001(5): 8 - 15. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 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(7): 87 - 92. (MIAO Lin-chang, LIU Song-yu. Soil-water characteristics and shear strength of expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(7): 87 - 92. (in Chinese))

[6] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065 - 1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065 - 1073. (in Chinese))

[7] 交通部第二公路勘察设计院. 路基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996: 243 - 268. (Second Highway Survey and Design Institute of Ministry of Communications. Roadbed[M]. Beijing: China Communications Press, 1996: 243 - 268. (in Chinese))

[8] KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Jian-bin, LIU Guan-shi. On strength property of gassy fine sand and model tests of pile foundation[C]// Proc 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, 2005: 2009 - 2012.

[9] 陈 伟. 原状膨胀土非饱和强度特征与动力学性能试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007. (CHEN Wei. Study on the unsaturated strength characteristics and dynamic behavior of intact expansive soil[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))

[10] 包承纲, 詹良通, 龚壁卫. 非饱和土的特性及其抗剪强度问题[C]// 中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议文集, 南京, 1999: 173 - 176. (BAO Cheng-gang, ZHAN Liang-tong, GONG Bi-wei. The behavior and shear strength problem of expensive soil[C]// Proc 8th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nanjing, 1999: 173 - 176. (in Chinese))