

膨胀土湿胀干缩特性试验

吴□华¹,袁俊平^{2,3},杨 松⁴,丁国权^{2,3}

(1.南昌航空大学土木建筑学院,江西 南昌 330063;2.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
3.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;4.云南农业大学水利水电与建筑学院,云南 昆明 650201)

摘要 为研究膨胀土湿胀干缩变形与含水率变化的一般规律,采用压缩仪和收缩仪对重塑膨胀土进行了无荷载条件下的分级浸水膨胀试验和收缩试验。结果表明:试样的初始干密度越大,初始含水率越小,土体的膨胀系数越大,最终膨胀率也越大;初始干密度越大,初始含水率越小,土体的收缩系数越小,最终线缩率和体缩率也越小。膨胀系数和收缩系数反映了膨胀土受含水率变化而产生变形的特性,可作为评判膨胀土胀缩性能的指标。

关键词 膨胀土 胀缩变形 分级增湿 膨胀系数 收缩系数

中图分类号 :TU443 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)03-0028-04

Experimental study on swell-shrink performance of expansive soil//WU Jun-hua¹, YUAN Jun-ping^{2,3}, YANG Song⁴, DING Guo-quan^{2,3} (1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract :The swell-shrink deformation of expansive soils results from the moisture change, and it is the main internal cause of crack propagation. In this study, the swelling deformation of remolded expansive soils under inundated conditions with different stages of the compression apparatus, and the shrinking deformation of remolded expansive soils with the shrink apparatus were tested without loads. Several relationships between the swell-shrink deformation and the moisture change were determined: the expansion coefficient and final expansion ratio have a positive correlation with initial dry density and a negative correlation with initial water content; the shrink coefficient and final linear and volume shrinkage ratio have a negative correlation with initial dry density and a positive correlation with initial water content; and the expansive coefficient and shrink coefficient reflect the deformation characteristics of expansive soils due to the moisture change and can be used as an index to judge the swell-shrink performance of expansive soils.

Key words :expansive soil; swell-shrink deformation; wetting in stages; expansion coefficient; shrink coefficient

膨胀土中的矿物成分主要包含蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物,具有强烈的湿胀干缩特性,在干湿循环作用下反复的胀缩变形,导致土体结构松散,裂隙发育,工程性能差。可以看出,裂隙的生成与含水率的变化有关,含水率的变化使得膨胀土产生胀缩变形,而反复的不均匀胀缩变形即导致裂隙的不断发育^[1-3]。

不少学者对膨胀土的膨胀和收缩变形性能进行了试验研究,得出了膨胀土的膨胀和收缩变形主要与试样的初始干密度、含水率及上覆压力等有关^[4-11]。Holtz 等^[4]利用单向浸水变形试验确定了

加卸载过程中膨胀土的变形规律。袁俊平等^[5]利用常规压缩仪进行了不同初始条件下的单向浸水膨胀试验,总结了膨胀土浸水膨胀时程特性。李振等^[6]利用压缩仪对膨胀土分别进行了一次浸水膨胀和分级浸水膨胀试验,同时测定了试样在浸水前后不同压力下膨胀量的变化过程。缪林昌^[7]研究了击实性膨胀土在不同压力作用下,膨胀变形与初始含水率和干密度的关系。徐永福等^[8]通过膨胀试验得到宁夏膨胀土的膨胀变形与初始含水率、干密度及上覆压力的相关规律。姚海林^[9]通过三相收缩试验和现场静力触探试验,确定了广西膨胀土的体积收缩指

数及膨胀土活动区深度,并在试验基础上给出了膨胀土地基变形计算模式和裂隙开展深度的理论解。张华^[10]通过收缩试验结果间接估算了压力板试验中试样的真实体积,从而得到能够更符合实际膨胀土的土水特征曲线。肖宏彬^[11]通过室内单向膨胀和收缩试验,对膨胀土的线胀率和线缩率的时程性进行了研究。

许多学者对膨胀土的膨胀和收缩时程特性进行了大量细致的研究^[10-12],而对膨胀土在膨胀和收缩过程中变形与含水率的变化规律研究较少。实际工程中,膨胀土何时开始浸水膨胀和失水收缩、历时多少等均难以知晓。此外,不同干湿循环次数下膨胀土的胀缩变形也不一样,即膨胀土的胀缩变形具有不可逆性^[12]。本文利用常规压缩仪和收缩仪分别进行了膨胀土的膨胀和收缩试验,获得了影响膨胀土胀缩性能的一般规律和主要因素,为深入研究膨胀土的胀缩性能提供了试验基础。

1 试验方案

土样取自南水北调中线一期工程总干渠膨胀岩(土)试验段工程(潞王坟段),基本参数为:液限 42.7%,塑限 19.2%,塑性指数 24,自由膨胀率 57.5%,最大干密度 1.81 g/cm³,相对密度 2.74。试验方案见表 1,分别进行了不同初始含水率、初始干密度试样的膨胀与收缩试验。收缩试验采用常规收缩仪进行,具体操作可参照 GB/T 50123—1999《土工试验标准》。分级浸水膨胀试验的目的是获得某次加水量所产生的膨胀变形,因此在试验仪器和操作上有所不同。

表 1 试验方案

分级浸水膨胀试验			收缩试验		
试样 编号	初始 含水率/%	初始干密度/ (g·cm ⁻³)	试样 编号	初始 含水率/%	初始干密度/ (g·cm ⁻³)
b1	5.61	1.80	e1	23.14	1.79
b2	5.65	1.70	e2	23.14	1.69
b3	5.56	1.63	e3	23.39	1.62
b4	5.66	1.52	e4	23.58	1.52
b5	8.05	1.80	e5	19.70	1.77
b6	8.03	1.69	e6	19.42	1.67
b7	8.01	1.60	e7	19.21	1.58
b8	13.74	1.80	e8	12.63	1.78
b9	13.77	1.70	e9	12.40	1.69
b10	13.78	1.63	e10	12.67	1.59

为了防止透水石与试样水分交换,采用与透水石规格相同的有机玻璃板来代替透水石。底板沿厚度方向开若干小圆孔,直径 1 mm,便于试验过程中试样孔隙气的排出。顶板沿厚度方向开 4 个小圆孔,呈对称十字状分布,圆孔直径 2 mm,便于试验过程

中往试样中注水(图 1)。试验中,每隔一段时间往顶板圆孔中注水,每圆孔加水 0.5 mL,待水分完全进入试样后立即用薄塑料片盖住圆孔,防止水分蒸发。待此级膨胀变形稳定后再进行下一级加水。为防止试样中的土颗粒堵塞圆孔,分别在底板、顶板与试样的接触位置放置直径相同的滤纸,并在放置前先称量滤纸的质量。试验的稳定标准为 24 h 内变形不超过 0.01 mm。试验结束后分别测量两张滤纸和试样的最终质量,以确定试样的最终含水率。

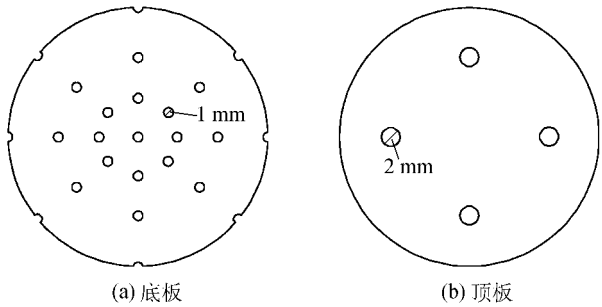


图 1 有机玻璃板底板和顶板示意图

2 试样制备

试样采用标准的环刀制样(直径 61.8 mm,厚度 20 mm),主要制备步骤如下:

- a. 将碾碎风干的土样过 2 mm 筛,充分拌匀。取 3 份土样烘干测定其天然含水率。
- b. 将试样均匀地铺在调土盆里,根据试验要求的含水率和已测得的天然含水率确定所需水量,将水均匀洒入土中并充分搅拌直至颜色均匀且无大团粒出现为止。将配好的土样用密封塑料袋装好,静置于保湿箱内 24 h 以上以保证土样中水分均匀。
- c. 根据实际试样含水率和设计的干密度计算所需土样质量并准确称量。
- d. 将两环刀内侧涂抹薄层凡士林,背靠背地放置于较大的平整金属垫块上,将称好的土样均匀地置于环刀内。在上部环刀中放入与环刀内径相同、高度相同的硬质金属垫块,用螺旋式千斤顶均匀地将金属垫块压入环刀内直至不能再压入为止。此时下部环刀所制试样的干密度即为试验所要求的干密度。

3 参数定义

试样吸水所产生的变形量与试样初始高度之比的百分数称为膨胀率,计算公式为

$$\delta_p = \frac{z_p - z_0}{h_0} \times 100\%$$
 (1)

式中: δ_p 为试样膨胀率; h_0 为试样初始高度, mm; z_p 为某级增湿变形稳定后的百分表读数, mm; z_0 为百分表初始读数, mm。令 Δw_p 为某级增湿变形稳定

后试样的含水率与初始含水率之差,以 Δw_p 作为横轴,该时刻的膨胀率作为纵轴绘制曲线。根据膨胀系数的定义,此时曲线的斜率等于膨胀系数 α_p 的 100 倍,即有 $\alpha_p = 0.01d\delta_p/d(\Delta w_p)$ 。

试样失水收缩的竖向变形量与试样初始高度之比的百分数称为线缩率,计算公式为

$$\delta_s = \frac{z_s - z_0}{h_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中: δ_s 为试样线缩率; z_s 为某含水率下的百分表读数,mm。令 Δw_s 为收缩试验某时刻的含水率与初始含水率之差,以 Δw_s 作为横轴,该时刻的线缩率作为纵轴绘制曲线。研究表明,曲线的初始阶段可近似为线性^[10]。根据收缩系数 α_s 的定义,此时曲线较陡,曲线的斜率等于收缩系数的 100 倍,即有 $\alpha_s = 0.01d\delta_s/d(\Delta w_s)$ 。

4 试验结果与分析

4.1 分级浸水膨胀试验

图 2 为试样分级浸水膨胀试验结果。可以看出,不同初始干密度下,在低于某含水率值之前, Δw 与膨胀率均呈现出良好的线性关系。当含水率不变时,土体不产生膨胀变形,可采用式(3)对图 2 中的曲线进行拟合,具体结果见表 2。初始干密度越小,初始含水率越大,自由膨胀率越小,试样的膨胀系数和最终膨胀率越小,试样的浸水膨胀变形性能越不明显。试样的初始干密度越大,膨胀系数越大,最终膨胀率也越大,曲线出现拐点所对应的含水率值越小,即曲线越容易出现拐点。这是因为体积一定的

表 2 分级浸水膨胀曲线拟合结果

试样 编号	最终 膨胀率/%	膨胀 系数 α_p	试样 编号	最终 膨胀率/%	膨胀 系数 α_p
b1	7.595	0.005 6	b6	6.460	0.003 6
b2	7.385	0.005 0	b7	5.730	0.002 9
b3	7.065	0.004 6	b8	2.455	0.001 9
b4	6.235	0.004 2	b9	1.605	0.001 1
b5	6.770	0.004 2	b10	0.765	0.000 5

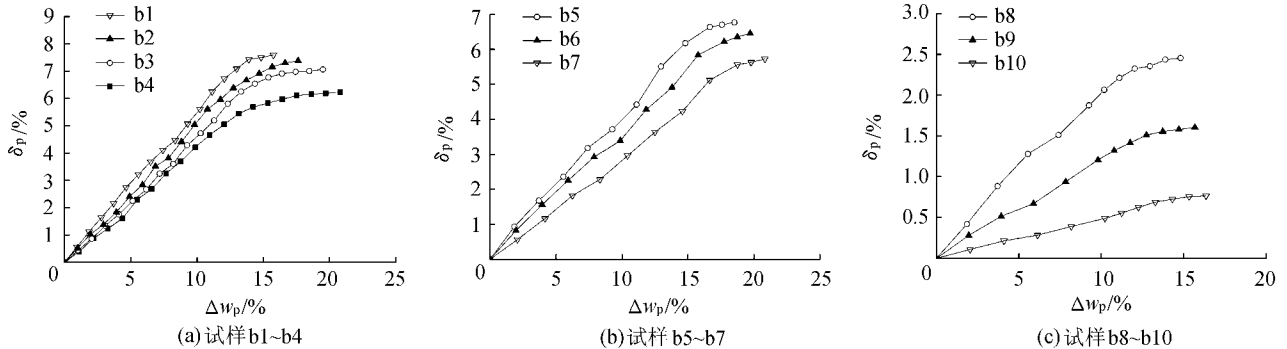


图 2 不同初始状态下的分级浸水膨胀曲线

情况下,初始干密度大的孔隙比小,试样所能吸收的水分少,故当吸水量相同时,干密度大的试样,其膨胀变形过程达到稳定所需的时间就少。

$$\delta_p = \alpha_p \Delta w_p \times 100\% \tag{3}$$

通过观察不难发现,土体的膨胀系数 α_p 与初始含水率 w_0 、初始干密度 ρ_d 呈线性关系,可采用式(4)进行拟合。

$$\alpha_p = a_1 + b_1 w_0 + c_1 \rho_d \tag{4}$$

式中: a_1 , b_1 和 c_1 为拟合参数。采用多元线性回归,可得 $a_1 = -0.216$, $b_1 = -0.048$, $c_1 = 0.574$ 。式(4)可用来定量描述膨胀系数 α_p 。

4.2 收缩试验

图 3 为不同初始状态下含水率差与线缩率的关系。含水率差与线缩率的关系曲线可以近似分为 3 个阶段:初始线性段、中期过渡段和后期线性段,其中第 1 阶段称为快速收缩阶段,第 3 阶段称为稳定收缩阶段,这与已有试验成果相一致^[10,12]。不同条件下的快速收缩阶段和稳定收缩阶段的线性拟合表达式列于表 3 中。从图 3 和表 3 可以看出,初始干密度越大,初始含水率越小,则初始曲线斜率越小,收缩系数越小,最终线缩率和体缩率也越小,曲线出现拐点所对应的含水率值越小。由土力学原理可知,试样体积一定时,初始干密度大的孔隙比小,试样本身所含的初始水分少,因此能够丧失的水分也少,试样收缩变形的能力也小,试样较早地进入稳定收缩阶段。

表 3 收缩试验线性段拟合结果

试样编号	快速收缩阶段	稳定收缩阶段
c1	$\delta_s = 0.22\Delta w_s$	$\delta_s = 0.017\Delta w_s + 2.456$
c2	$\delta_s = 0.25\Delta w_s$	$\delta_s = 0.022\Delta w_s + 3.119$
c3	$\delta_s = 0.27\Delta w_s$	$\delta_s = 0.004\Delta w_s + 3.632$
c4	$\delta_s = 0.22\Delta w_s$	$\delta_s = 0.040\Delta w_s + 3.114$
c5	$\delta_s = 0.18\Delta w_s$	$\delta_s = 0.018\Delta w_s + 2.049$
c6	$\delta_s = 0.21\Delta w_s$	$\delta_s = 0.051\Delta w_s + 2.112$
c7	$\delta_s = 0.22\Delta w_s$	$\delta_s = 0.075\Delta w_s + 1.926$
c8	$\delta_s = 0.11\Delta w_s$	$\delta_s = 0.009\Delta w_s + 0.868$
c9	$\delta_s = 0.19\Delta w_s$	$\delta_s = 0.019\Delta w_s + 0.831$
c10	$\delta_s = 0.12\Delta w_s$	$\delta_s = 0.014\Delta w_s + 0.942$

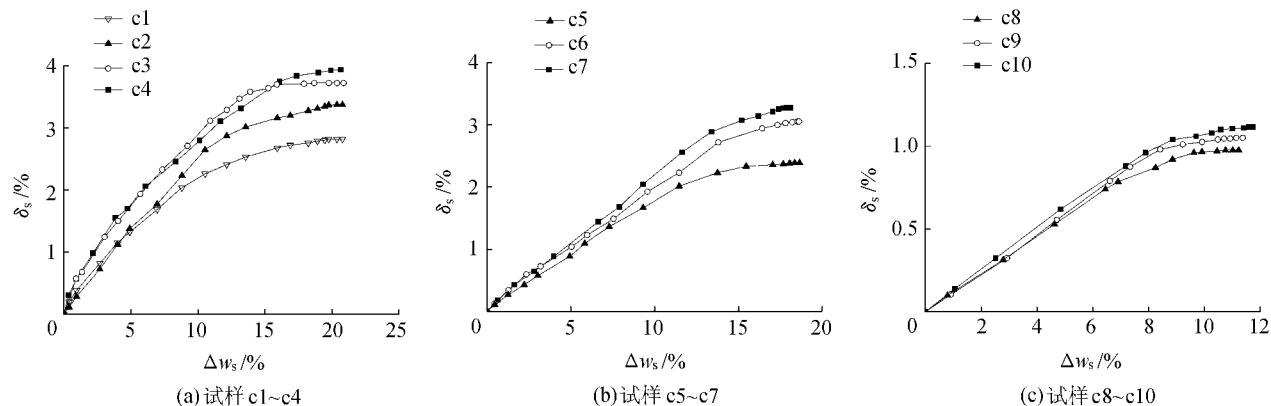


图3 不同初始状态下的收缩曲线

当含水率不变时,土体不产生收缩变形。根据收缩系数的定义,对含水率差与线缩率关系曲线中的快速收缩阶段采用式(5)进行拟合:

$$\delta_s = \alpha_s \Delta w_s \times 100\% \quad (5)$$

拟合结果见表4。可以看出,随着初始干密度的增加及含水率的降低,最终线缩率和收缩系数逐渐减小,土体收缩性能逐渐变弱。根据图3的试验结果可以看出,土体的收缩系数 α_s 与初始含水率 w_0 、初始干密度 ρ_d 亦呈线性关系,可采用式(6)进行拟合:

$$\alpha_s = a_2 + b_2 w_0 + c_2 \rho_d \quad (6)$$

式中: a_2 、 b_2 和 c_2 为拟合参数。进行多元线性回归,得 $a_2 = 0.241$, $b_2 = 0.012$, $c_2 = -0.164$ 。式(6)可用来定量描述收缩系数 α_s 。

表4 收缩曲线拟合结果

试样编号	最终线缩率/%	收缩系数 α_s
c1	2.824	0.0022
c2	3.376	0.0025
c3	3.724	0.0027
c4	3.944	0.0028
c5	2.391	0.0018
c6	3.055	0.0021
c7	3.279	0.0022
c8	0.975	0.0011
c9	1.050	0.0019
c10	1.116	0.0012

5 结 论

a. 将常规压缩仪进行改进,进行了无荷载条件下的膨胀土分级增湿膨胀试验。在低于某含水率值之前,膨胀系数与初始干密度、含水率呈现良好的线性关系。初始干密度越大,初始含水率越小,土体的膨胀系数越大,最终膨胀率也越大;当土体含水率超过某值时,含水率的继续增加不会显著地增加土体的膨胀变形,膨胀变形趋于稳定。可采用多元线性关系式描述膨胀系数与初始含水率、初始干密度之

间的关系。

b. 进行了无荷载条件下的膨胀土收缩试验。含水率差与线缩率的关系曲线可分为3个阶段:初始线性段、中期过渡段和后期线性段。初始干密度越大,初始含水率越小,土体的收缩系数越小,最终线缩率也越小,可采用多元线性关系式描述收缩系数与初始含水率、初始干密度之间的关系。

参考文献:

- [1] 龚永康,陈亮,武广繁. 膨胀土裂隙电导特性[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(3):323-326.
- [2] 缪林昌,刘松玉. 论膨胀土的工程特性及工程措施[J]. 水利水电科技进展,2001,21(2):37-40.
- [3] 袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D]. 南京:河海大学,2003.
- [4] HOLTZ W G, GIBBS J H. Engineering properties of expansive clays[J]. Transact, ASCE, 1956, 121: 641-677.
- [5] 袁俊平,陈剑. 膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):547-551.
- [6] 李振,邢义川,张爱军. 膨胀土的浸水变形特性[J]. 水利学报,2005,36(11):1385-1391.
- [7] 缪林昌. 非饱和膨胀土变形规律的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试,1999,23(3):36-39.
- [8] 徐永福,龚友平,殷宗泽. 宁夏膨胀土膨胀变形特征的试验研究[J]. 水利学报,1997, (9): 27-30.
- [9] 姚海林. 基于收缩试验的膨胀土地基变形预测方法[J]. 岩土力学,2004,25(11):1688-1692.
- [10] 张华. 用收缩试验资料间接估算压力板试验中的体积含水量[J]. 岩土力学,1999,20(2):22-26.
- [11] 肖宏彬. 南宁膨胀土变形时程性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(6):47-52.
- [12] 杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环膨胀变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):1936-1941.

(收稿日期:2011-09-22 编辑:熊水斌)