

# 膨胀土胀缩特性试验研究

孟庆云 杨果林

(中南大学土木建筑学院, 湖南长沙 410075)

【摘要】以南(宁)友(谊关)膨胀土大量的室内试验为基础,研究了膨胀土胀缩时程曲线特征,寻找膨胀土膨胀和收缩曲线的异同点,探求了土的初始含水量、干密度与膨胀变形量的定量关系等。

【关键词】膨胀土;胀缩特性;胀缩时程曲线;初始含水量和干密度

【中图分类号】TU 443

## Testing Study on the Characteristic of Shrink-swell for Expansive Soil

Meng Qingyun Yang Guolin

(School of Civil and Architectural Engineering of Central South University, Changsha Hunan 410075, China)

【Abstract】Based on lots of laboratory tests of Nan(ning)-You(yiguan) expansive soils, the relationship between shrink-swell and time of expansive soils is researched. The similarities and differences between shrink and swell are found. The quantitative correlation between deformation magnitude with different original water content and dry densities is explored.

【Key Words】expansive soil; characteristic of shrink-swell; curve for shrink-swell and time; original water content and dry density

### 0 引言

膨胀土吸水膨胀失水收缩,这是膨胀土最本质的特性之一。从微观上讲,膨胀土吸水膨胀主要是由于水分子在膨胀土亲水矿物颗粒周围以及叠聚体周围产生具有一定排列方向的结合水膜,结合水膜加厚,使土颗粒距离增加,导致土体膨胀<sup>[1-3]</sup>。实际工程建设中,我们不可能准确地确定膨胀土体中水膜厚度的变化情况。但是我们可以从宏观方向上,从影响膨胀土工程膨胀变形的因素出发,对膨胀土的胀缩变形进行有关测试,进行定量分析,总结胀缩变形规律,指导工程实践。基于这一目的,我们对南(宁)友(谊关)膨胀土进行了大量的室内试验,寻找膨胀土胀缩变形特性,研究膨胀土初始变形速率、膨胀变形量与土的干密度、含水量、外部压力等定量关系,为今后膨胀土地区的工程建设提供合理的参数。

### 1 膨胀变形试验

#### 1.1 土样主要物理力学性质

试验土样为广西宁明膨胀土。该地区为东西构造断层盆地,沉积了厚约 1 500 m 的始新统那读组(Ny)湖相粘土岩,泥质粉砂岩及少部分砂岩,土样自然状态下的高度分散性;矿物成分中含有一定数量

的蒙脱石;土的交换性盐基离子成分以  $Mg^{2+}$  离子为主;颗粒团聚体的定向排列及存在有延续性强,发育良好的层间裂隙,经室内试验测试,其主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 南友路膨胀土主要物理力学性质

自由膨胀率 /%	体缩 /%	缩限 /%	液限 /%	塑限 /%	相对体 积质量	最佳含水量 w/%
67.0	5.4	8.42	75.2	34.0	2.762	15.2

#### 1.2 试验方案设计和试样制备

通过人为控制土样状态,测定不同起始含水量、干密度土的无荷膨胀量、收缩量,测定膨胀初始速率、膨胀变形量、膨胀力与含水量、干密度以及外部压力的定量关系。其中,试验装置为南京电力自动化设备总厂生成的 GJ-3 三联式固结仪,位移计量程 10 mm,最小刻度 0.01 mm。式样的制作过程和方法严格遵守《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)<sup>[3]</sup>。

#### 1.3 膨胀率试验

膨胀率试验包括无荷膨胀率试验和有荷膨胀率试验。试验开始后按照 5 min、5 min、5 min、10 min、10 min、15 min、15 min、20 min、20 min、30 min、

30 min、1 h、1 h、2 h、2 h、2 h 时间间隔观察位移计读数,记录膨胀变形随时间的变化关系。试验均在固结仪上完成,2 h 内百分表的差值不超过 0.01 mm 既表示膨胀已稳定。

#### 1.4 膨胀时程曲线特征<sup>[4-6]</sup>

膨胀土在不同含水量、不同干密度下的膨胀率曲线见图 1 和图 2。通过对比分析,我们发现膨胀曲线有着明显的规律性。

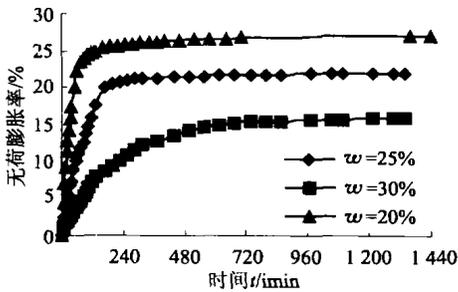


图 1  $\gamma = 1.6 \text{ g/cm}^3$  不同含水量的无荷膨胀曲线

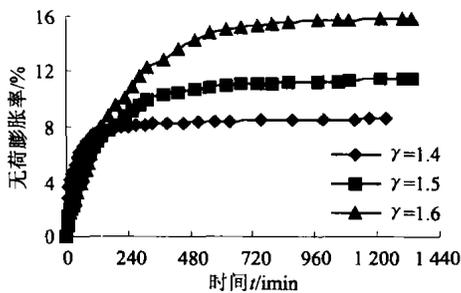


图 2  $w = 30\%$  不同干密度无荷膨胀曲线

膨胀变形曲线可以分为三个阶段:①直线剧烈等速膨胀阶段,这段时间持续时间较短,持续时间与膨胀土的干密度、含水量、外部压力都有关系,含水量越小、干密度越小、外部压力越小,直线剧烈膨胀阶段的持续时间越短,反之,持续时间越长。整个直线过程膨胀变形量巨大,占整个变形量的 65% 以上。实际工程中膨胀土吸水变形也主要发生在这个时间段内。②外凸弧线减速膨胀阶段,从变形曲线中可以看出,随着含水量和干密度增大,外凸弧线的曲率明显增大,膨胀速率变缓,但这一阶段的膨胀持续时间明显增长。相比直线剧烈膨胀阶段,这一阶段的膨胀量比较小,约占整个膨胀变形量的 30% 左右。③直线缓慢膨胀阶段,这一阶段的膨胀曲线近似水平直线,膨胀变形量非常小,占整个膨胀变形量的 5% 以内,但这一阶段的持续时间非常长,占整个膨胀时间的 50% 以上。

#### 1.5 机理分析

第一阶段膨胀发生在浸水表面,吸力较大,吸水较快,膨胀速率较高;随着水分由于毛细作用深入土体内部,土水交界面面积扩大,土体开始完全膨胀,进入第二阶段外凸弧线减速膨胀阶段;随着土体水分的增加,土体内吸力逐渐降低,吸水速度减小,土体的膨胀速率也降低,进入直线缓慢膨胀阶段,等土体完全吸水饱和,土体膨胀也达到稳定。

需要说明的是,以上三个阶段间的界限不是绝对的,而是为了方便描述膨胀土浸水条件下的膨胀变形时程特性而人为划分的。

## 2 收缩变形试验

### 2.1 试验设备

试验主要装置有收缩仪,其多孔板上的面积占整个板面积的 50% 以上。位移计量程 10 mm,最小刻度 0.01 mm。环刀直径 61.8 mm,高度 20 mm。试样制备同膨胀率试验,制作过程和操作方法严格遵守《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)。

### 2.2 试验步骤

①将试样推出环刀置于多孔板上,称试样和多孔板的质量,准确至 0.1 g,在收缩仪上装好百分表,记下初读数。②在室温不高于 30 °C 条件下进行试验。根据试样含水量及收缩速度,每隔 1~4 h 测记百分表读数,并称整套装置和土样质量,准确到 0.1 g。2 d 后每隔 6~24 h 测记百分表读数,并称质量,至两次百分表读数不变。③取出试样,在 105~110 °C 下烘干,称干土质量,准确至 0.01 g。④用蜡封法测定烘干试样体积。

### 2.3 收缩时程曲线特征

#### 2.3.1 收缩曲线特征

膨胀土收缩过程通常有三个阶段(见图 3 和图 4):①直线等速收缩阶段,土体收缩与含水量减少成正比,此段时间的长短与土样中粘粒含量多少、制备含水量大小以及蒸发散失条件有关,此段时间一般持续 12 个小时左右;②外凸弧线减速收缩阶段,随着含水量的减少,土体收缩速度减缓,土体收缩率愈变愈小;此段时间一般持续 40 个小时左右;③直线缓慢收缩阶段,含水量继续减少,土体不再收缩或收缩甚微。收缩随着含水量的增加而增加。收缩过程在各个阶段的收缩速度及收缩量不同,在直线等速收缩阶段和外凸弧线减速收缩阶段内所发生的收

缩量占总收缩量的95%以上,而在直线缓慢收缩阶段收缩量很小,通常小于5%。

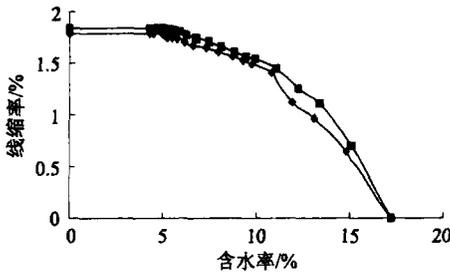


图3 膨胀土线收缩率与含水量关系曲线

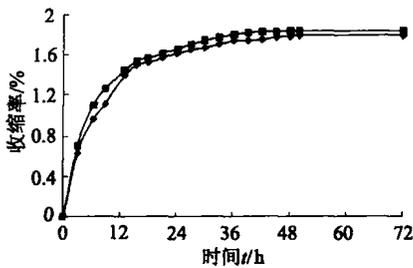


图4 膨胀土线收缩率随时间的变化关系曲线

### 2.3.2 机理分析

直线等速收缩阶段收缩较快,此时收缩增量 $\Delta e_{s1}$ 与蒸发失水量 $\Delta w_{s1}$ 成正比( $\Delta e_{s1}/\Delta w \approx 1$ ),呈直线段{ 随时间增加土中水分逐渐减少,土粒外围水膜逐渐变薄,粒间距离减小,土粒间联结因此逐渐增强,故土收缩量 $\Delta e_{s1}$ 随时间增加而减少( $\Delta e_{s1}/\Delta w < 1$ ).即呈向下凹的曲线状} 随时间增加,土中水分仍然在减少,但因土中水分很少,粒间距离很近,土粒联结较强,其减少的水量不足以使土的体积收缩,此时 $\Delta e_{s1}/\Delta w \approx 0$ ,故曲线呈近水平状。

### 2.4 收缩曲线与膨胀曲线对比分析<sup>[6-7]</sup>

膨胀土的膨胀速度特征曲线以线膨胀率与时间关系来表征;而膨胀土收缩速度则以垂直线收缩率与时间关系曲线来表征。由于试验侧限条件的差异(无荷载膨胀率试验是在有侧限条件下的膨胀率,试样在水平方向不产生膨胀;而收缩试验则是在不受侧限条件的试验,垂直方向和水平方向都产生收缩)膨胀土存在着收缩各向异性。尽管试验土样以垂直线收缩率为主,但是为了实现相同条件下的对比,文中仍然考虑了收缩各向异性,并在保持体收缩率不变的条件下,进行折算成垂直线收缩率。为便于对比,将无载膨胀率 $\hat{q}_e(\%)$ 和折算后的垂直线收缩率 $\hat{q}_c(\%)$ 统称为胀缩率 $\hat{q}(\%)$ ,膨胀和收缩是有方向的,在这里取绝对值。

#### 2.4.1 膨胀与收缩并非可逆过程<sup>[8]</sup>

有的学者认为,土的收缩与膨胀是一对作用相反、具有可逆过程的变形。但是我们在试验中发现,尽管膨胀曲线、收缩曲线在整体特征上具有相似性,但其膨胀过程、收缩过程并非是一个完全可逆的过程(见图5)。首先,膨胀土的膨胀变形量要远大于收缩变形量,试验中膨胀变形量均在8%以上,大多超过15%,而收缩变形量只有2%不到。其次,初始胀缩速度不同,试验中可见,膨胀土吸水剧烈膨胀,膨胀变形的初始速度要远大于收缩变形的初始速度。再次,胀缩持续时间不同。膨胀变形一般在24小时内就可以达到膨胀变形,而收缩变形3天或4天内才能达到稳定。另外,在膨胀变形对比曲线上,我们可以发现,收缩曲线与膨胀曲线并非是对称曲线,这也说明膨胀与收缩是一个不可逆的过程。

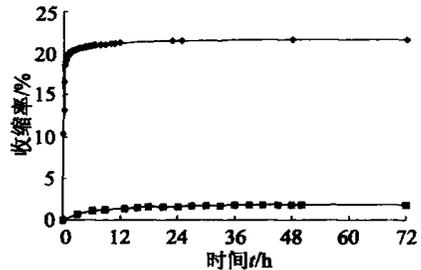


图5 同一初含水量膨胀和收缩曲线对比

#### 2.4.2 膨胀与收缩的相似性

虽然膨胀、收缩两过程不是可逆过程,但是膨胀、收缩速度曲线的整体特征具有明显的相似性。1) 膨胀曲线、收缩曲线的总体变化趋势是一致的,都随着时间的增大,膨胀率和收缩率随之增大,与之相应,膨胀量和收缩量也在增大。2) 膨胀、收缩过程具有相似的3个阶段划分,都经历了从斜直线→凸弧线→平直线的变化过程,但两个过程的各个相应阶段所持续的时间以及所发生的变形量有很大差异,其吸水膨胀速度要比其失水收缩速度快得多。

#### 3 初始含水量、干密度对膨胀变形量的影响<sup>[9-10]</sup>

膨胀率试验中我们发现随着初始含水量减小和干密度的增大,无荷变形量呈增大的趋势,反之,无荷变形量呈减小的趋势(见图6和图7)。我们对变形量与干密度和含水量的关系进行回归分析发现:初始含水量和干密度对膨胀变形量影响存在着明显的线性关系。其回归方程的相关系数 $|R| > 0.95$ ,回归方程可以用下式表示

$$\hat{q}_e = aw + b \text{ 或者 } \hat{q}_e = c\gamma + d$$

式中: $\hat{q}_e$ 为无荷膨胀率; $w$ 为初始含水量; $\gamma$ 为干密度, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为试验参数。

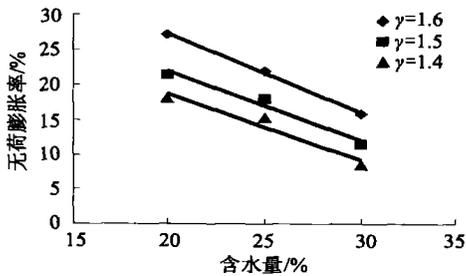


图6 初始含水量对膨胀变形量影响曲线图

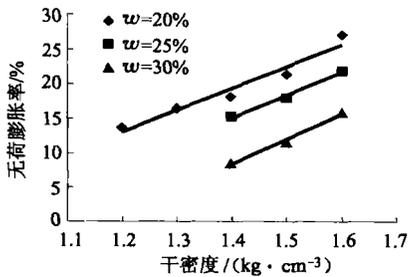


图7 干密度对膨胀变形量影响曲线图

#### 4 结论

本文利用常规土工试验仪器对膨胀土的胀缩变形特性进行了研究,通过上述试验和分析,我们可以得出以下结论:

1) 膨胀土膨胀曲线和收缩曲线都有明显的规律性,都可分为3个阶段:直线剧烈等速膨胀(收缩)阶段、外凸弧线减速膨胀(收缩)阶段、直线缓慢膨胀(收缩)阶段。

2) 通过膨胀曲线和收缩曲线的对比分析,我们发现了膨胀与收缩并非可逆过程,膨胀变形量要远大于收缩变形量;膨胀土吸水剧烈膨胀,膨胀变形的初始速度要远大于收缩变形的初始速度;膨胀变形

达到稳定的时间比收缩变形达到稳定的时间短得多。

3) 膨胀土的初始含水量、干密度与膨胀变形量存在着一维线性关系,初始含水量减小和干密度的增大,膨胀变形量和膨胀力呈增大的趋势,反之,初始含水量减小和干密度的增大,膨胀变形量和膨胀力呈减小的趋势。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘特洪. 工程建设中膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 缪林昌. 非饱和膨胀土的变形和强度特性研究[D]. 南京: 河海大学, 1999.
- [3] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
- [4] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 击实膨胀土工程变形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 10(5): 826-830.
- [5] 韩华强, 陈生水. 膨胀土的强度和变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 5(3): 422-424.
- [6] 李 振, 邢义川, 等. 膨胀土的浸水变形特性[J]. 水利学报, 2005, 11(11): 1385-1391.
- [7] 肖宏彬, 张春顺, 等. 南宁膨胀土变形时程特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 12(6): 47-52.
- [8] 何漓江. 高速公路膨胀土路基处治研究. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [9] 杨 庆, 张慧珍, 等. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 2(3): 420-425.
- [10] 谭罗荣, 孔令伟, 等. 膨胀土胀缩特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1555-1559.

收稿日期: 2006-06-19

(上接第 232 页)

- [4] DGB 50286—97 给水排水管道工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [5] James C. Thomson. Pipe jacking and Microtunnelling [M]. London: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 1995.
- [6] Stein D, Moellers K, Bielecki R. Microtunnelling [M]. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1989.
- [7] Marco Barla, Marco Camusso, Santina Aiassa. Analysis of jacking forces during microtunnelling in limestone [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 668-683.

- [8] G W E Milligan, P. Norris. Site-based research in pipe jacking objectives, procedures and a case history [J]. Tunneling & Underground Space Technology, 1996, 11(1): 3-24.
- [9] Pecora III, John M., Sheahan, Thomas C. Pipe jacking forces in soft ground construction during utility installation related to central artery/tunnel project construction [J]. Civil Engineering Practice, 2004, 19(2): 29-44.
- [10] Atalah, Alan. Design of microtunnelling and jacking pipe [C]. ASCE Specialty Conference, Proceedings, 1996. 395-402.

收稿日期: 2006-07-26