

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.017

# 干湿循环作用下膨胀土表观胀缩变形特性

武科, 赵闯, 张文, 吴昊天, 王亚君, 于雅琳

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

**摘要:** 为揭示不同上覆压力及含水率幅值条件下膨胀土胀缩特性及表观不可逆变形, 开展了干湿循环作用下膨胀土表观胀缩变形特性试验研究. 从微观的角度分析了膨胀土吸水膨胀、失水收缩的特性及产生裂隙的原因; 探讨了不同压力及含水率循环幅值条件下, 膨胀土试样高度、相对膨胀率、相对线缩率、随含水率及循环次数的变化关系以及试样表观相对不可逆变形量与累计不可逆变形量随循环次数的变化关系. 研究表明: 膨胀土吸水膨胀失水收缩是土颗粒间水体变化叠加的直观反应, 也是土体内部产生裂隙的主要诱因; 膨胀土失水收缩过程中, 基质吸力以最大程度限制含水率减小的方式逐渐增大; 不同压力作用下, 试样高度随含水率呈线性变化关系, 而无压力作用下的变化关系波动较大; 随着循环次数的增加, 膨胀土相对膨胀率逐渐减小, 而相对线缩率先增大后减小, 且上覆压力越大, 相对膨胀率越低; 不同含水率幅值范围内的相对膨胀率与相对线缩率随着循环次数的增加具有逐渐减小的趋势; 不同压力作用下, 含水率为 15% 时, 膨胀土的累计不可逆变形随着循环次数的增加逐渐增大, 而在含水率为 25% 时其反而逐渐减小.

**关键词:** 膨胀土; 荷载; 含水率; 干湿循环; 胀缩特性; 不可逆变形

**中图分类号:** TU375.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2016)12-0121-07

## Swelling-Shrinking characteristics and irreversible deformation of expansive soil during wetting-drying cycles

WU Ke, ZHAO Chuang, ZHANG Wen, WU Haotian, WANG Yajun, YU Yalin

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** To investigate the Swelling-Shrinking characteristics and irreversible deformation of expansive soil under different pressures and moisture contents, a series of tests under wetting-drying cycles were carried out, and the Swelling-Shrinking characteristics and reasons for fissuring were analyzed from the microcosmic point of view. Based on the above studies, the relationship among heights, relative expansion ratios, relative linear shrinking rates and cycle index under different pressures and moisture contents were explored. Meanwhile, the variation curves of the relative irreversible deformation and accumulative irreversible deformation with increasing cycle index were obtained. The results indicate that the swelling and shrinking are visualized response of the variation of water between soil particles, and also the incentive of fissuring. During the shrinking process, the matric suction increases by the way of maximum limit to prevent moisture content decreasing. There is a linear correlation between the height of test specimen and moisture content under different pressures. The relative expansion ratios will decrease if the cycle index rises, and the same happens with higher pressure. The relative linear shrinking rates will rises firstly and then decreases with the increasing of cycle index. It is shown that the relative expansion ratios and relative linear shrinking rates under different amplitudes of moisture content have a decreasing trend along with the increase of cycle index. The accumulative irreversible deformations increase gradually on the condition that the moisture content is 15% with different pressures, and there will be opposite results with the moisture content of 25%.

**Keywords:** expansive soil; pressures; moisture contents; wetting-drying cycle; Swelling-Shrinking characteristics; irreversible deformation

膨胀土作为一种典型的特殊土, 具有胀缩性、裂隙性及超固结性等特点. 同时膨胀土的这些特性会在

一定外在环境下相互影响、相互制约, 特别是在干湿循环交替作用下, 膨胀土吸水膨胀、失水收缩, 会导致土中裂隙的产生以及强度的降低, 这些特征给膨胀土地区工程建设带来严重危害及影响.

许多国内外学者对膨胀土特性做了大量试验研究及理论分析, 取得了不少有意义的成果. 如曾召田

收稿日期: 2015-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51308232)

作者简介: 武科(1978—), 男, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 武科, wk4223@163.com

等<sup>[1]</sup>采用压汞法对膨胀土干湿循环过程中孔径大小分布的演化规律进行了试验研究,得到了膨胀土总孔隙体积与孔隙率等微结构参数随循环次数的变化规律;张家俊等<sup>[2]</sup>对南阳膨胀土在反复干湿循环作用下的裂隙演化规律进行了室内试验研究;姚志华等<sup>[3-4]</sup>利用与 CT 机配套的非饱和多功能土工三轴仪,对干湿循环不同次数的膨胀土进行基质吸力为常数的各项等压试验,研究了结构损伤对膨胀土屈服特性的影响作用以及浸水过程中细观结构的变化;孔令伟等<sup>[5]</sup>通过压力板试验对荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性进行了室内试验研究;吕海波等<sup>[6]</sup>通过南宁地区原状膨胀土干湿循环试验,探讨了膨胀土抗剪强度与含水率、循环次数、循环幅值等循环控制参数的关系;唐朝生等<sup>[7]</sup>对膨胀土收缩开裂特性进行研究,并结合宏观现象与微观分析,建立土体龟裂的理论体系;杨和平等<sup>[8]</sup>对宁明原状膨胀土进行了有荷条件模拟干湿循环过程的试验研究,得到了其胀缩变形与强度的变化规律。

上述研究从不同角度分析了膨胀土吸水与失水过程中的胀缩变形与强度变化特性,并简单介绍了膨胀土在此变形过程中存在一定的不可逆变形量,但是对膨胀土在干湿循环过程中不可逆变形的量化计算研究较少;同时许多研究成果反映的是膨胀土浸水膨胀的最终状态,而鲜有对于非饱和膨胀土浸水与脱湿过程实时状态的研究,因此本文基于较低应力条件下的膨胀土干湿循环胀缩试验,对膨胀土在干湿循环过程中的膨胀变形随循环次数、含水率循环幅值、上覆压力等的变化规律进行了研究,同时从宏观变形角度定量分析了其不可逆变形量,且从微观角度探讨了致其宏观变形的原因。

### 1 膨胀土微观颗粒模型分析

膨胀土作为一种特殊土,其由土颗粒、水、气三相组成,同时微结构的构成与物质组成是膨胀土膨胀变形的基础。膨胀土干湿循环过程是一个由非饱和状态至饱和状态再至非饱和状态的往复转变过程,在这过程中,膨胀土的水分、基质吸力、应力、变形和强度之间发生着强烈的动态耦合作用<sup>[9]</sup>,同时其孔隙结构、颗粒排列与接触方式发生相应的变化,膨胀土的物理力学性质伴随着水分的蒸发与吸收不断演化。膨胀土微观理想非接触球颗粒模型如图 1 所示,由表面张力、水压  $u_w$  和气压  $u_a$  在水平方向投影三力平衡可得式(1)<sup>[10]</sup>。

$$u_a - u_w = T_s \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (1)$$

$$D = (r_1 + r_2) \tan \alpha - R. \quad (2)$$

式中: $u_a$ 、 $u_w$  分别为土中气压与水压,且  $u_a - u_w$  为基质吸力, $T_s$  为表面张力,它与自身的物质组成与温度等条件有关, $r_1$ 、 $r_2$  分别为土颗粒间理想水体的球半径,如图 1 所示; $D$  为土颗粒间距的一半, $\alpha$  为土颗粒与水体的接触角, $R$  为土颗粒球体的半径。

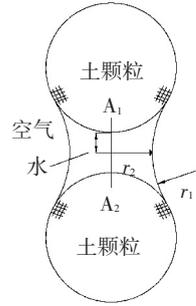


图 1 土内气-水界面的理想非接触球颗粒模型

Fig.1 Ideal non-contact spherical particle model of gas water interface in soil

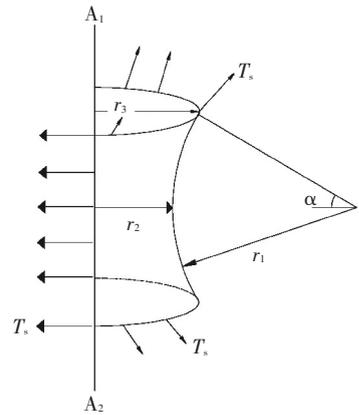


图 2 颗粒间水体受力图

Fig.2 Water force diagram between particles

干湿循环过程中,膨胀土吸水与失水的过程是土颗粒间水体变化叠加的直观反映,同时也是裂隙发展演化的最直接诱因。在高含水率的条件下,膨胀土颗粒外周包裹一层相对较厚的水膜,进而颗粒之间的距离较大,在失水的过程中,水分逐渐蒸发,膨胀土含水率与水膜的厚度逐渐减小,基质吸力却逐渐增加,进而在吸力的作用下,土颗粒结构排列方式优化,颗粒相互靠拢,膨胀土内的孔隙缓慢变小,膨胀土的宏观反映为其体积的收缩变形。

膨胀土产生裂隙的根本原因在于其自身的抗拉强度不足于抵抗外在荷载作用,而发生相邻位置处颗粒的不连续变形,进而造成颗粒集聚体出现分裂破坏。产生裂隙的原因可用式(3)、(4)表示。

$$\begin{cases} [\sigma] < \sigma_{\text{张拉应力}}, \\ [\sigma] = \sigma_{\text{张拉应力}}, \\ [\sigma] > \sigma_{\text{张拉应力}}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{张拉应力}} = K \times (u_a - u_w) = K \times T_s \times \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (4)$$

式中: 膨胀土集聚体受到的张拉应力大于或等于抗拉强度时, 其内部才会产生裂隙; 反之, 裂隙不发展。K 为张拉应力的实效影响因子, 其大小与分子间作用键、范德华力、带同性或异性电荷离子间的静电作用有关。

随着颗粒间水体球半径的变化, 含水率减小, 基质吸力增大, 其增大的方式是按照最大限度阻止其自身变化进行的; 也就是含水率减小与基质吸力是因果关系, 含水率的减小打破了原有含水率平衡, 而基质吸力的增加是增加了含水率减小的阻力, 因此基质吸力发挥了其自身最大能力以限制含水率减小的作用。因此通过式(1)可知, 随着含水率的变化, 基质吸力随  $r_1$ 、 $r_2$  沿着自身方向导数的最大值即梯度对水分的蒸发消散起着阻碍作用, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial r_1} = -\frac{T_s}{r_1^2}, \\ \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial r_2} = \frac{T_s}{r_2^2}. \end{cases} \quad (5)$$

## 2 试验研究

### 2.1 试验材料

试验材料用土取自广西省百色市某隧道工程洞内掌子面处, 为呈黄褐色的膨胀土; 按照 JTG-E40—2007《公路土工试验规程》的相关要求进行土工物性试验研究, 得到了膨胀土的基本物理力学参数如表 1 所示<sup>[11]</sup>。制备试样的压实度控制为 0.96, 且利用液压千斤顶静压成型; 采用环刀取直径为 61.8 mm, 高 20 mm 的重塑土样进行不同低应力、不同含水率循环幅值条件下的干湿循环试验。

表 1 试样物理特性指标

Tab.1 Physical characteristic parameters of the sample

自由膨 胀率/%	液限 $W_L$ /%	塑限 $W_p$ /%	塑性指数 $I_p$ /%	比重 $G_s$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	最佳含水率 $W_{opt}$ /%	膨脹力/ kPa	颗粒组成/%		
								0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
60	47.9	21.6	26.2	2.72	1.44	25.7	85.38	2.1	70.7	27.2

### 2.2 试验方案及过程

对于膨胀土的干湿循环试验, 目前尚无统一规范, 多数学者根据干湿循环试验的目的采用固结仪、直剪仪等试验仪器进行了相关试验研究; 唐朝生等<sup>[12]</sup>利用常规的浸水饱和-蒸发干燥法在固结仪中进行干湿循环试验, 而脱湿的过程是将固结仪移入步入式人工气候箱中, 使试样在 40 °C 的温度下失水; 张家俊等<sup>[2]</sup>采用低温 70 °C 烘干法模拟膨胀土的脱湿过程, 然后经过一定时间后, 取出试样称重并拍照进行膨胀土裂隙演化规律试验研究。本试验利用改进的收缩仪进行常温无荷载条件下的干湿循环试验, 同时利用固结仪分别进行 5、10、15 kPa 作用下的干湿循环试验, 每个荷载作用下干湿循环含水率幅值控制为 15%~25%、10 kPa 作用下的干湿循环含水率幅值增加 15%~20%、20%~25% 两项。以无荷载作用下的干湿循环为例, 初始含水率为 25%, 首先进行脱湿, 在室温为 15 °C 的环境下自然风干, 达到 15% 的含水率后, 通过透水石向试件补充水分至初始含水率 25%, 且每隔 24 h 记录一次百分表的变化, 此过程为无荷载条件下的第一次干湿循环, 并且所有试验的循环次数至少为 4 次。本试验采用的方法可用以模拟降雨入渗条件下, 浅层膨胀土在干湿循环作用下的胀缩行为。

## 3 试验结果分析

### 3.1 膨胀土胀缩特性分析

膨胀土产生变形的原因与机理, 主要取决于其自身的物质组成及其空间结构特征; 对于一种膨胀土, 其内在的物质组成相同, 其膨胀变形由初始含水率、最大干密度及所受外力的大小控制; 而对于不同压力作用下膨胀土吸水与脱湿胀缩变形时效研究的主要外在变量为含水率与压力。图 3、4 给出了不同压力作用下膨胀土环刀试件高度随含水率的变化曲线, 由图可知: 1) 在低应力条件下, 膨胀土在干湿循环过程中, 试件的高度随含水率呈线性的变化关系; 2) 无荷载膨胀土试样的高度与含水率的变化关系具有一定的线性特征, 但是随着循环的进行, 仍会出现一些不可逆变形。由现有阶段如双电层理论等所分析的膨胀土吸水膨胀的主要原因是膨胀土晶层或颗粒之间水膜厚度的增加, 那么如图 1 中土颗粒的理想球模型所示, 晶层或颗粒之间的水膜分布是分区域的, 在失水的过程中, 由于阴阳离子或极性分子之间的引力以及分子之间的范德华力, 首先消散的水分由 D 所在区域提供, 造成晶层之间的水膜厚度减小, 进而宏观表现为膨胀土失水收缩, 当由 D 区域的水分消散完毕, 土颗粒理想模型变为理想接触球

模型之后,继续消散的水分由分子水化作用所结合的水提供,但是土颗粒之间已无间隙,并不会引起膨胀的收缩变形,这与收缩试验的实际效果相一致,即膨胀土的缩限是其失水收缩的最大限值。

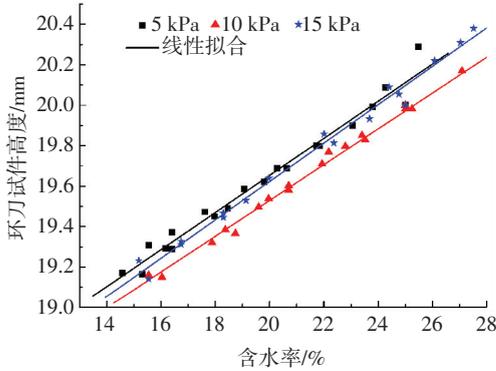


图 3 不同压力作用下试件高度随含水率变化曲线

Fig.3 The changing curve with the changing moisture content of the specimen height under different pressure

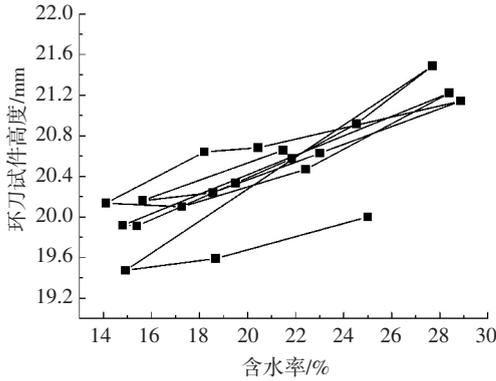


图 4 无荷载作用下试件高度随含水率变化曲线

Fig.4 The changing curve without load of the specimen height under different pressure

在膨胀土干湿循环过程中,含水率每次从 15% 增至 25% 再降至 15% 时,不同循环次数下的初始条件是不同的,因此后期循环膨胀收缩以试验开始前的试样高度为基础计算膨胀率是不严谨的.通过分别计算不同循环阶段的相对膨胀率与相对线缩率对膨胀土的胀缩特性进行分析研究,计算方法为:

$$\delta_{i,p} = \frac{H_{i,p,w_2} - H_{i,p,w_1}}{H_{i,p,w_1}}, \quad (6)$$

$$e_{i,p} = \frac{H_{i,p,w_2} - H_{i,p,w_3}}{H_{i,p,w_2}}. \quad (7)$$

式中: $\delta_{i,p}$  与  $e_{i,p}$  分别为  $p$  荷载作用下第  $i$  个循环的相对膨胀率与相对线缩率,  $H_{i,p,w_1}$  为此次循环中,初始阶段即加水前含水率为  $w_1$  时试样高度,  $H_{i,p,w_2}$  为此次循环中,试样吸水至指定含水率上限  $w_2$  时试样的高度,  $H_{i,p,w_3}$  为此次循环中,试样蒸发失水至指定含水率下限  $w_3$  时试样的高度,其中  $i \geq 1$ 。

图 5、6 分别给出了 15%~25% 含水率循环幅值及不同上覆压力作用下,膨胀土试样的相对膨胀率

与相对线缩率随循环次数的变化关系.由图可知:1) 随着循环次数的增加,在低应力作用下膨胀土相对膨胀率逐渐减小,且上覆压力越大,其相对膨胀率越低,这也说明压力抑制了膨胀土吸水膨胀作用,同时未充分吸水膨胀的膨胀土,在较小的外在作用力下会对其膨胀性产生较大的影响;2) 膨胀土的相对线缩率随着循环次数的增加先增加后减小,不同压力作用下的相对线缩率均在第二次循环出现最大值;膨胀土微观颗粒组成部分集聚体,而集聚体之间的孔隙特征又是决定膨胀土膨胀特性的主要因素,在首次吸水膨胀过程中,集聚体间的孔隙被填充,同时水膜的厚度逐渐增大,出现较大的膨胀变形,集聚体之间的结构形式发生变化,这些集聚体不仅仅会膨胀变大,甚至在吸水时由于受力的不平衡导致其自身发生旋转,最终造成膨胀土内孔隙率增大;自然蒸发失水过程中,土颗粒以及集聚体间 D 区域的自由水首先会被耗散,同时膨胀土内部会产生纵横交错的张裂隙,这些张裂隙在第一次干湿循环过程中,表现的并不明显,而在第二次的干缩过程中,已产生的干缩裂隙破坏了土体的整体结构,集聚体出现大量的微小裂隙,其强度大大减小,又由于存在上覆荷载,此次干缩变形还包括了原有集聚体“塌落”造成的变形,因此相对线缩率在第二次出现了最大值,并随着循环次数的增加逐渐减小。

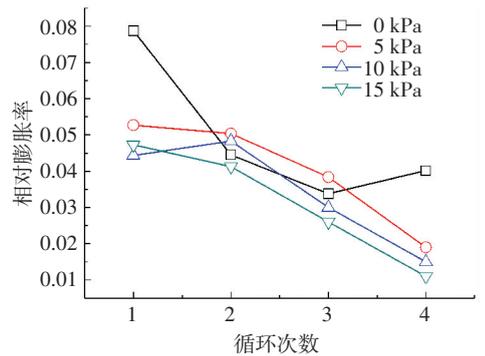


图 5 不同压力作用下相对膨胀率随循环次数的变化曲线

Fig.5 The relation curve of the relative inflation rate with the cycle number under different pressure different pressure

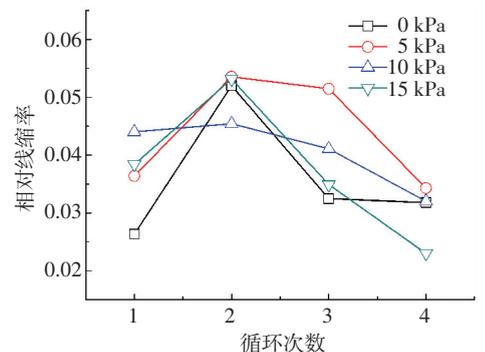


图 6 不同压力作用下相对线缩率随循环次数的变化曲线

Fig.6 The relation curve of the relative lineal shrinkage rate with the cycle number under different pressure

图 7、8 分别给出了 10 kPa 荷载作用下, 在不同含水率限值的干湿循环过程中, 相对膨胀率与相对线缩率随循环次数的关系曲线, 由图可知: 1) 在相同的含水率幅值条件下, 膨胀土在 15%~20% 范围内的相对膨胀率较 20%~25% 范围内的相对膨胀率小, 这是由于在低含水率的条件下, 膨胀土所吸收的水分首先转化成为膨胀土单粒或集聚体的结合水, 这部分水分的膨胀作用相对较小, 在此基础上再吸收的水分会在分子间, 离子间等作力下逐渐包裹单粒或集聚体形成较厚的水膜, 进而增大了其之间的间隙; 2) 不同含水率限值范围内的相对膨胀率与相对线缩率随着循环次数的增加具有逐渐减小的趋势, 含水率幅值越大此现象越明显; 3) 含水率限值为 15%~20% 与 20%~25% 的相对膨胀率之和与含水率限值为 15%~25% 的相对膨胀率基本吻合, 但是同样含水率限值下的失水收缩过程却不存在此现象。

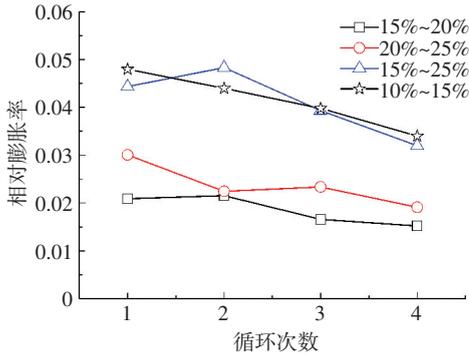


图 7 不同含水率幅值及 10 kPa 作用下相对膨胀率随循环次数的关系曲线

Fig.7 The relation curve of the relative inflation rate with the cycle number under different moisture content and the 10 kPa pressure

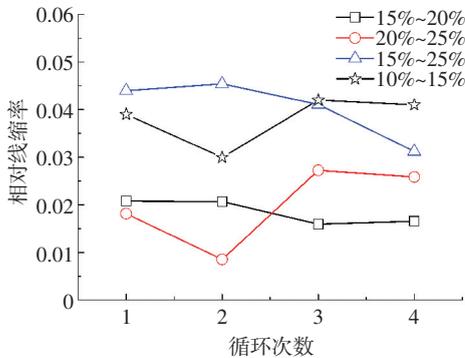


图 8 不同含水率幅值及 10 kPa 作用下相对线缩率随循环次数的关系曲线

Fig.8 The relation curve of the relative linear shrinkage rate with the cycle number under different moisture content and the 10 kPa pressure

### 3.2 表观不可逆变形的量化研究

膨胀土干湿循环过程中, 其内部孔隙、裂隙结构及集聚体分布状态均发生不同的变化, 宏观上的胀缩变形是由两部分塑性变形组成, 一部分是宏观结

构塑性变形, 另一部分为微观结构层次中集聚体及单粒的微-宏观结构耦合变形<sup>[13]</sup>。又由于膨胀土在外在荷载及干湿交替环境下具有重塑性, 同时其本身具有胀缩性、裂隙性、固结性等, 这些特殊性质相互叠加会产生相应的不可逆变形, 而表观不可逆变形的量化计算可通过式(8)、(9)进行计算。

$$l_{i,p,w} = H_{i+1,p,w} - H_{i,p,w}, \quad (8)$$

$$L_{i,p,w} = \sum_1^i l_{i,p,w}. \quad (9)$$

式中:  $l_{i,p,w}$  及  $L_{i,p,w}$  分别为膨胀土在  $p$  荷载、含水率为  $w$  且第  $i$  次循环作用下, 其相对不可逆变形与累计不可逆变形;  $H_{i,p,w}$  为试件在  $p$  荷载, 含水率为  $w$  且第  $i$  次循环作用下的高度, 其中  $i \geq 1$ 。

图 9~12 给出了不同压力作用下, 含水率循环上下限值为 15%、25% 的相对与累计不可逆变形随循环次数变化的关系曲线, 由图可知: 1) 上覆压力对于干湿循环产生的不可逆变形影响较大, 其限制了膨胀土的胀缩性; 从微观角度分析, 由于一次循环需要经过高低含水率的变化, 在此过程中, 首先要满足集聚体与单粒结合水的需要, 其次为其内部结构孔隙、裂隙的填充, 试验采用的是重塑膨胀土, 其内部结构特征为层流状, 在较高含水率的条件下, 单粒与集聚体受力不平衡导致自身旋转变形, 进而产生膨胀变形, 同样在收缩的过程中, 集聚体与单粒之间的孔隙并不是均匀增大或减少, 部分已产生的变形无法恢复, 因此在无荷载作用下, 相对不可逆变形量一直为正值, 累计不可逆变形呈上升趋势; 而在外在荷载作用下, 由于土具有重塑性, 膨胀扩张后的变形模量减小, 颗粒间的较大孔隙由于承载力不足易被压缩, 进而膨胀土外在表现为不可逆变形的大幅度减小; 2) 在低含水率且有外在荷载的条件下, 相对不可逆变形在第一次循环中是负值即被压缩, 在后期的循环过程中相对不可逆变形逐渐增加, 而在高含水率时, 相对不可逆变形在第一次循环达到最大值, 此次循环过程中, 膨胀土的相对不可逆变形是最大的, 在后期的循环过程中相对不可逆变形逐渐减小并趋于稳定; 3) 在不同压力且含水率为 15% 的条件下, 膨胀土的累计不可逆变形随着循环次数的增加逐渐增大, 这也说明在每次循环过程中都会产生新的不可逆变形, 并且这种不可逆变形均是由于膨胀土吸水膨胀后再失水无法恢复导致的; 4) 在不同压力且含水率为 25% 的条件下, 膨胀土的累计不可逆变形随着循环次数的增加反而逐渐减小, 第一循环的相对不可逆变形为正值且较大, 膨胀土吸水后的膨胀能力得以释放, 在后期的循环过程中, 相对不可逆变形均是负值, 这是由于在第一次干湿循环过程中, 膨胀土的内部结构已发生巨大变化, 内部裂隙扩

展产生软弱结构面,当后期再达到此高含水率时,单粒及集聚体胶结部分会因水解作用造成内部结构崩塌,内部孔隙因此而填充,造成相对不可逆变形大幅度降低甚至出现负值,累计不可逆变形逐渐减小,这也反应了膨胀土的重塑性在外荷载及高含水率的条件下易于发生。

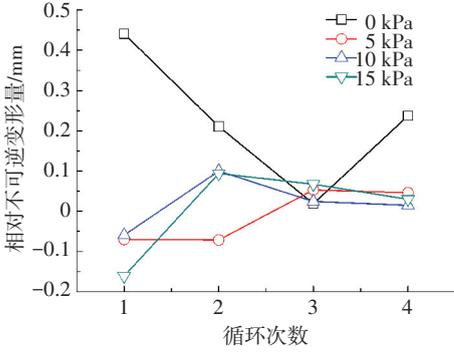


图 9 不同压力作用下,含水率为 15% 的相对不可逆变形随循环次数的变化曲线

Fig.9 The relation curve of the relative irreversible deformation with the moisture of 15% with cycle number under different pressure

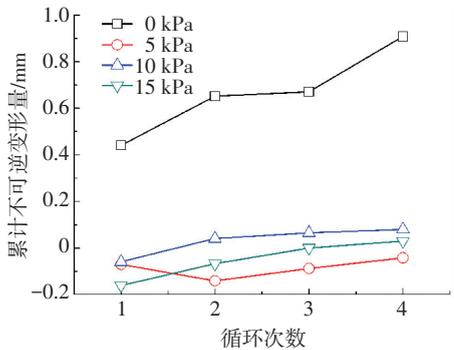


图 10 不同压力作用下,含水率为 15% 的累计不可逆变形随循环次数的变化曲线

Fig.10 The relation curve of the accumulative irreversible deformation with the moisture of 15% with cycle number under different pressure

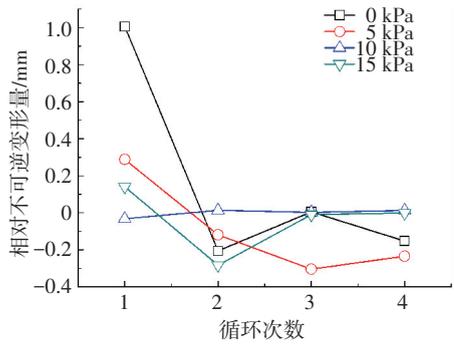


图 11 不同压力作用下,含水率为 25% 的相对不可逆变形随循环次数的变化曲线

Fig.11 The relation curve of the relative irreversible deformation with the moisture of 25% with cycle number under different pressure

图 13 给出了膨胀土在不同含水率幅值及 10 kPa 作用下,其累计不可逆变形随循环次数的变化关系,

由图可知:1) 含水率在 15%~20% 范围内变化时,累计不可逆变形随着循环次数逐渐增加,但由于含水率第一次干缩至 15% 时收缩变形较大,进而导致累计不可逆变形初始值为负值;2) 含水率在 20%~25% 范围内变化时,累计不可逆变形在初始阶段膨胀变形较大,膨胀能力得到充分发挥,在后期的循环过程中由于内部结构的崩塌,其累计不可逆变形量随着循环次数的增加逐渐减小;3) 含水率在 15%~25% 范围内循环时,累计不可逆变形相对其他两个含水率幅值内的变化相对较小,基本维持稳定,这也是膨胀土胀缩不可逆性与土重塑性相结合的结果。

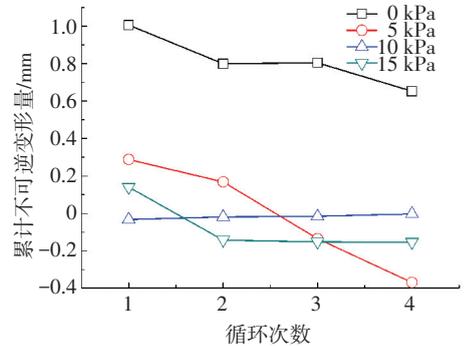


图 12 不同压力作用下,含水率为 25% 的累计不可逆变形随循环次数的变化曲线

Fig.12 The relation curve of the accumulative irreversible deformation with the moisture of 25% with cycle number under different pressure

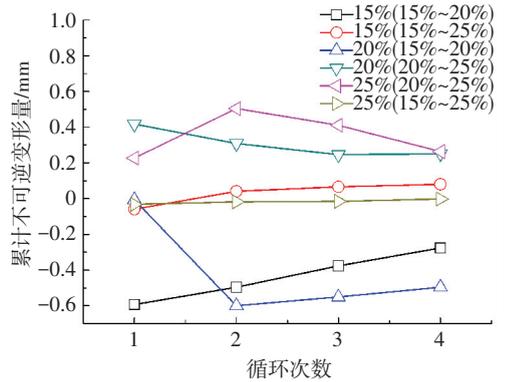


图 13 在不同的含水率幅值及 10 kPa 作用下,膨胀土累计不可逆变形随循环次数的变化关系

Fig.13 The changing relationship of the accumulative irreversible deformation of expansive soil with the cycle number under different moisture content and the 10 kPa pressure

膨胀土在干湿循环过程中,不仅存在胀缩变形及表观不可逆变形,同时会有裂隙的产生与闭合.通过对环刀试样的观察发现如图 14 所示,试样的裂隙从外表面特别是边缘处发育并向内部扩展演化;随着干湿循环的进行,膨胀土吸水与失水过程会引起内部结构特征的变化,且循环次数越多,不均匀性越强,变化后的结构特征会对胀缩变形产生一定的影响.经过几次干湿循环后,在图 14 中试样表面出现了大量的宏观裂隙,在下次干湿循环(向干湿循环测量

装置中加入一定量的水后)的过程中,首先由于水分从表面开始渗入试样,试样表面的土吸收水分后会变得松软;其次,因上覆压力的存在,这些裂隙的开裂程度会相应减小甚至会出现闭合的情况。即便如此,在失水过程中,由于大量的宏观裂隙已经存在,失水过程中试样的不可逆变形会得到叠加,裂隙的开裂程度会进一步加剧。由式(1)~(4)可知,在单粒或集聚体与水膜的交界处,张拉应力与基质吸力有关,即张拉应力由表面张力及水体与单粒、集聚体的分布特征有关,随着膨胀土中水分的耗散,基质吸力逐渐增大,而抗拉强度不变,当张拉应力大于抗拉强度,土体内裂隙扩展演化;在自然风干的作用下,膨胀土试件的表面及边缘处首先出现裂隙,这是因为膨胀土失水是一个由内至外水分不断转移的过程,而边缘处的水分得失交替最为频繁,微裂隙与软弱结构面充分发育,进而大大降低了其抗拉强度,因此是产生宏观裂隙的最主要位置。

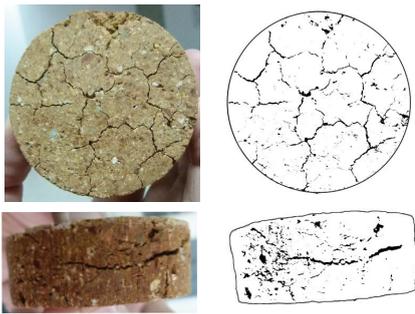


图 14 干湿循环后试样表面及侧面裂隙分布

Fig.14 The crack distribution on the surface and the side of the sample after the dry-wet circulation

## 4 结 论

1) 膨胀土上覆荷载对其自身胀缩特性具有明显的抑制作用,这种抑制作用在无荷与有荷之间的界限最为明显。

2) 膨胀土具有胀缩性、超固结性、裂隙性等,同时其也存在一定的重塑性与湿陷性,而这些性质之间相互交叉并存;表观不可逆变形是所有特性相互交叉作用后的宏观反映,同时也可验证膨胀土部分特性的存在性。

3) 当存在一定的上覆荷载时,膨胀土在较高的含水率条件下,其内部微裂隙闭合,表现较强的重塑性,试样的高度较上次循环并未增加反而降低。

4) 随着循环次数的增加,膨胀土内部微裂隙逐渐增多,且出现明显的宏观裂隙及破坏面,其孔隙率也大大增加,再此基础之上,继续吸收水分时会出现一定的湿陷现象,这是由于多次的干湿循环已经破坏了试件内部结构,其体积有所增大,干密度相应减小,因此当含水率达到一定程度且存在较大的上覆

荷载时,膨胀土同样具有湿陷性。

## 参考文献

- [1] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 322-328.  
ZENG Zhaotian, LÜ Haibo, ZHAO Yanlin, et al. Study of pore size distribution of expansive soil during wetting-drying cycle and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 322-328.
- [2] 张家俊, 龚壁卫, 胡波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2729-2734.  
ZHANG Jiajun, GONG Biwei, HU Bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2729-2734.
- [3] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 结构损伤对膨胀土屈服特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1503-1512.  
YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. Influence of structural damage on yielding characteristics of expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1503-1512.
- [4] 姚志华, 陈正汉, 朱元青, 等. 膨胀土在湿干循环和三轴浸水过程中细观结构变化的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 68-76.  
YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, ZHU Yuanzhang, et al. Meso-structural change of remolded expansive soils during wetting-drying cycles and triaxial soaking tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 68-76.
- [5] 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.  
KONG Lingwei, ZHOU Baochun, BAI Jing, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3036-3042.
- [6] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802.  
LÜ Haibo, ZENG Zhaotian, ZHAO Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797-3802.
- [7] 唐朝生, 施斌, 刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 663-643.  
TANG Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun. Study on desiccation cracking behaviour of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 663-643.
- [8] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1937-1914.  
YANG Heping, ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1937-1914.
- [9] 詹良通. 非饱和膨胀土边坡中土水相互作用机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(3): 494-500.  
ZHANG Liangtong. Study on soil-water interaction in unsaturated expansive soil slopes[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(3): 494-500.
- [10] 卢宁, WILLIAM J. Likos. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.  
LU Ning, WILLIAM J. Likos. Unsaturated soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [11] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTGE 40-2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTGE 40-2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] 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 Chaosheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-dry cycles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376-1384.
- [13] 曹雪山. 非饱和膨胀土的弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 832-837.  
CAO Xueshan. Elastoplastic constitutive model of unsaturated expansive soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 832-837.

(编辑 赵丽莹)