

浸水-循环加卸载条件下压实膨胀岩的变形特征^{*}

曾志雄^① 孔令伟^① 凌贤长^② 黄珏皓^① 臧濛^①

(^①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 武汉 430071)

(^②哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨 150090)

摘要 膨胀岩的体积变形具有明显的水-力路径效应,为了研究浸水-循环加卸载条件下压实膨胀岩的变形特征,以延吉膨胀岩为研究对象,开展了不同初始含水率试样的一维膨胀-循环压缩试验。根据试样浸水膨胀后的压缩-回弹曲线,确定了压缩指数、回弹指数以及二者之差,并引入累积总变形率和累积残余变形率的概念来表征其在循环加卸载条件下的变形特征。结果表明:膨胀率与初始含水率具有显著的线性负相关关系;随着循环次数增加,加、卸载曲线越来越平缓,卸载-再加载滞回环面积逐渐减小,试样的压缩指数、回弹指数以及二者之差均呈逐渐减小的趋势,单次循环产生的总变形和残余变形逐渐减小,累积总变形和累积残余变形先增加后逐渐趋于稳定;初始含水率越小的试样,压缩指数和回弹指数越大,累积总变形和累积残余变形越大;循环加卸载过程对不同初始含水率试样的力学性质有强化和同化作用。

关键词 膨胀岩 初始含水率 浸水 循环加卸载 变形特征

中图分类号: TU443 文献标识码: A

DEFORMATION BEHAVIOR OF COMPACTED SWELLING ROCK UNDER SOAKING-CYCLING LOADING AND UNLOADING

ZENG Zhixiong^① KONG Lingwei^① LING Xianzhang^② HUANG Juehao^① ZANG Meng^①

(^①State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(^②School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090)

Abstract There is a clear effect of hydro-mechanical path on the deformation of swelling rock. For the deformation behavior of compacted swelling rock under soaking - cycling loading and unloading, 1D swelling-circulating compression tests were conducted on Yanji swelling rock with different initial water content. On the basis of compression-rebound curves after swelling, Compression index, swelling index and their difference were obtained and the accumulative total and residual deformation rates were proposed to measure the deformation characteristics under cycling loading and unloading. The study results show that there is a significant negative liner relationship between the swelling ratio and the initial water content. The slope of loading and unloading curve is smaller with the increasing cycles, and the area of hysteresis loop decreases gradually. The compression index, swelling index and their difference increase with the growing cycles. The more the number of cycles, the less the total and residual deformation, and the accumulative total and residual deformation increase firstly, then tend to be stable. The

* 收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2016-04-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430634) 岩土力学与工程国家重点实验室自主部署项目(Y11002) 资助.

第一作者简介: 曾志雄(1990-),男,硕士生,主要从事特殊岩土力学与地基基础方面的研究.Email: zzhxhp@163.com

smaller the initial water content, the larger the compression index and swelling index, and the more the accumulative total and residual deformation. The mechanical properties of specimens with different initial water content will be enhanced and normalized by the cycling loading and unloading process.

Key words Swelling rock, Initial water content, Soaking, Cycling loading and unloading, Deformation behavior

0 引言

膨胀岩是一类主要由强亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石组成的具有显著胀缩性的特殊软岩(谭罗荣等,2006),其对环境中的湿热变化极为敏感,吸水膨胀软化,失水收缩干裂,当膨胀变形受到限制时,膨胀势则会以膨胀力形式表现出来。随着我国基础设施的稳步推进,多条在建公路和铁路沿线发现有膨胀岩分布,膨胀岩土特殊的工程力学性质常常会造成建筑物开裂、边坡失稳等工程灾害(谭罗荣等,2004)。

近年来,国内外学者针对膨胀岩土的膨胀特性开展了大量的研究工作,已经逐渐掌握膨胀岩土产生膨胀变形的本质和规律。其中,矿物成分、干密度、含水率以及垂直荷载对膨胀岩土膨胀性的影响规律已形成广泛共识(Wen et al., 1992; Villar et al. 2008; Baille et al. 2010; 李国富, 2010),研究工作逐渐向干湿循环作用、不同边界约束条件以及其他的因素耦合作用下的膨胀规律不断深入(Pejon et al. 2002; 王美乾, 2012; 欧孝夺等, 2013)。然而,关于膨胀岩土发生膨胀变形后的力学特性的研究并不多见,特别是针对膨胀后的压缩特性的研究很少(方庆军等, 2011)。张俊峰等(2015)研究了压实膨胀土在两种加载路径(①浸水吸湿→加载压缩→卸载回弹; ②加载压缩→浸水吸湿→卸载回弹)下的吸湿变形特征,发现膨胀土在两种路径下的变形特征会存在较大差异。膨胀岩土体积变形具有明显的水-力路径效应,膨胀岩土吸水膨胀后压缩性会发生较大变化。周葆春等(2014)开展了不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀-压缩试验,初步研究了不同压实度的膨胀土发生膨胀变形后的压缩特

性。但是不同于一般的非饱和土,膨胀岩土的体积变形受土样本性质、初始状态、水-力路径的综合影响,体变特征较为复杂,因此,对于膨胀岩土在复杂水-力路径下的变形特征仍需要进一步探索。

基于此,为了深入了解不同初始含水率的膨胀岩在浸水-循环加卸载这种复杂水-力路径下的变形特征,本文采用黄褐色重塑强风化膨胀性泥岩(以下简称黄褐色泥岩)和紫红色重塑全风化膨胀性泥岩(以下简称紫红色泥岩),对不同初始含水率的试样开展了一维浸水膨胀-循环加卸载试验,得到不同初始含水率压实膨胀岩试样浸水膨胀后在循环加卸载条件下的变形规律,并引入累积总变形率和累积残余变形率的概念表征总变形和不可恢复的塑性变形。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验样品取自吉林至珲春铁路客运专线 K275,基本物理性质和矿物组成(表 1),黄褐色泥岩极破碎,节理裂隙发育,呈坚硬状,泥状结构,黏土矿物含量为 28.2%,自由膨胀率为 54%,经判定具有弱膨胀性;紫红色泥岩呈坚硬状,风化均匀,黏土矿物含量为 34.1%,自由膨胀率为 64%,具有弱偏中等膨胀性。

1.2 试样制备

试验采用直径 61.8mm,高 20mm 的压实试样,将试验用土翻晒捣碎后过 2mm 筛,黄褐色泥岩按照制样含水率(12.0%, 16.0%, 20.0%, 23.0%)向土样中加入适量的蒸馏水,紫红色泥岩按照制样含水

表 1 试验土样的基本物理性质和矿物组成

Table 1 Basic physical properties and mineral compositions of tested soils

样品颜色	天然含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d / g \cdot cm^{-3}$	比重 G_s	塑限 $w_p / \%$	塑性指数 $I_p / \%$	最优含水率 $w_{op} / \%$	最大干密度 $\rho_d / g \cdot cm^{-3}$	自由膨胀率 $\delta_{ef} / \%$	体缩率 $e_s / \%$	收缩系数 λ_n	缩限 $w_s / \%$	矿物相对含量 / %				
												蒙脱石	伊利石	白云石	石英	
黄褐色	20.0	1.67	2.72	25.6	15.8	20.6	1.72	54	14.0	0.49	13.9	23.0	5.2	3.1	23.5	45.2
紫红色	28.1	1.48	2.79	34.8	19.4	24.9	1.58	64	20.6	0.31	11.1	29.3	4.8	—	32.0	33.9

率(20.0%, 24.0%, 28.0%, 31.0%)向土样中加蒸馏水,共8组,拌和均匀后密封静置3d,使水分分布均匀。以控制初始干密度(黄褐色泥岩 $1.67\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,紫红色泥岩 $1.48\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)的方法,称取相应质量的土样,倒入制样模具中,利用液压千斤顶静压制成。

1.3 试验方法

将制备好的压实膨胀岩试样放入高压固结仪中进行无荷膨胀率试验,待膨胀变形稳定后按照固结试验规程进行循环压缩-回弹试验,加载等级为12.5kPa、25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa,加荷比为1,加至最大荷载后再逐级卸载至零。每一次加载或卸载,在试样的高度稳定以后进行,试验共进行4次循环加卸载。试验过程中发现,每次加载或卸载48h以后试验高度基本不再变化,因此每级荷载下的稳定标准统一采用2d,试验总共历时146d。

2 试验结果与分析

2.1 无荷膨胀率

不同初始含水率压实膨胀岩试样的膨胀率与时间的关系(图1)。膨胀率随时间的变化规律在半对数坐标下呈S型曲线,大体分为初始膨胀、加速膨胀、稳定增长3个阶段,可以用如式(1)的Logistic函数拟合(周葆春等,2014;李志清等,2008)。

$$\delta = A - \frac{A}{1 + (t/t_0)^p} \quad (1)$$

式中 δ 为试样 t 时刻的膨胀率(%); A 、 t_0 、 p 为拟合参数。拟合结果(表2)。

由图1可以看出,初始含水率小的试样,初始膨胀所需要的时间越短,加速膨胀阶段膨胀变形的增长速率越小,膨胀进入稳定增长阶段所需的时间越短,而最终的膨胀率越大。根据Delage et al. (1996)、谈云志等(2014)和张俊峰等(2015)的研究成果,即使初始干密度相同,不同初始含水率的压实试样孔隙分布特征存在显著差异,初始含水率低的试样,由于试样压制过程中土颗粒间的阻力大,孔隙主要分布在较大孔径范围,因此吸水速率快,膨胀速率更快。此外,初始含水率低的试样,土颗粒表面只吸附了一层较薄的水分子,吸水能力大,最终产生的膨胀变形更大。膨胀岩的膨胀变形受多种因素的影响,对比两种不同的土样,紫红色泥岩初始干密度小,孔隙比大,最终的膨胀率较小。

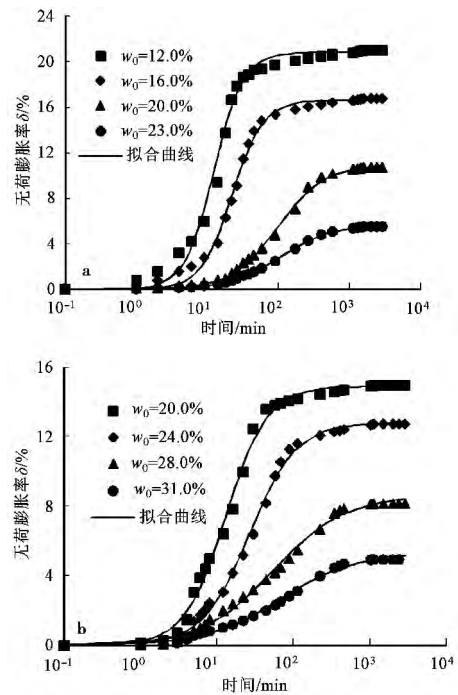


图1 膨胀率与时间关系曲线

Fig. 1 Curves of expansion ratio vs overburden pressure

a. 黄褐色泥岩; b. 紫红色泥岩

表2 膨胀率与时间关系拟合结果

Table 2 Fitting results of relationships between expansion ratio and time

样品名称	初始含水率 w_0 /%	拟合参数			拟合优度 R^2
		A	t_0	p	
黄褐色泥岩	12.0	20.868	12.391	2.101	0.989
	16.0	16.643	22.248	1.980	0.995
	20.0	11.023	97.984	1.303	0.998
	23.0	5.739	106.198	1.171	0.994
红褐色泥岩	20.0	14.902	13.104	1.607	0.996
	24.0	12.804	26.567	1.414	0.997
	28.0	8.610	54.461	0.926	0.995
	31.0	5.306	67.563	0.898	0.996

膨胀率与初始含水率具有明显的线性负相关关系(图2),初始含水率越低,膨胀率越大。直线斜率指增加单位含水率而减小的膨胀率,既反映了土样本身黏土矿物含量(Pejon et al. 2002;李志清等,2008),又与试样的干密度以及上覆荷载有关。根据谭罗荣等(2004)、李志清等(2008)和Villar et al. (2008)的研究成果,试样的干密度越大,上覆荷载越小,直线的斜率越陡峭。由表1可知,紫红色泥岩黏土矿物含量(蒙脱石)比黄褐色泥岩高,但紫红色泥岩试样干密度较小,总体来看,直线斜率较黄褐色

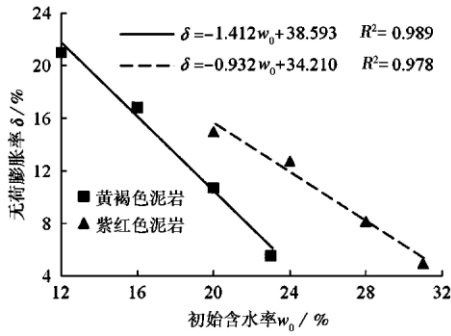


图 2 膨胀率与初始含水率的关系

Fig. 2 Relationship between expansion ratio and initial water content

泥岩平缓。

2.2 循环压缩-回弹变形性状

2.2.1 孔隙比变化特征

不同初始含水率的黄褐色和紫红色泥岩试样浸水膨胀后的循环压缩-回弹曲线(图3,图4)。压缩曲线呈上凸型,回弹曲线呈下凹型,第1次加卸载曲线的斜率最为陡峭,产生压缩和回弹变形最大,随着循环次数的增加,曲线逐渐趋于平缓,经过3~4次循环后,压缩-回弹曲线基本保持平行,压缩和回弹变形逐渐趋于稳定。从图3和图4可以看出,卸载-

再加载过程存在明显的滞回环现象,滞回环面积随循环次数的增加逐渐减小。不同初始含水率试样的循环加卸载曲线变化规律基本一致,只是在孔隙比大小上存在一定差异,初始含水率越小的试样,膨胀后孔隙比越大,第1次加载曲线的斜率越陡峭,卸载回弹产生的变形越大,卸载-再加载滞回环面积更大。

试验过程中孔隙比的变化规律(图5)。加载过程产生的变形包括可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形,从图3、图4和图5中可以看出,随着循环次数的增加,单次循环加卸载产生总变形和残余变形逐渐减小,累积总变形和残余变形先增加后逐渐趋于稳定。初始含水率低的试样浸水膨胀后,加载产生的压缩变形较大,卸荷回弹变形也较大,整个浸水膨胀-循环加卸载过程中孔隙比变化幅度大。对比不同初始含水率的试样可以发现,每一次压缩完成后不同初始含水率的试样孔隙比差别很小,黄褐色泥岩和紫红色泥岩最小孔隙比分别在0.47和0.68左右。对于同一种土样,当初始干密度一样时,不同初始含水率的试样浸水膨胀后在相同荷载作用下会趋于一个相同的密实状态。周葆春等(2014)开展不同干密度荆门膨胀土膨胀-压缩试验时还发现,压缩过程结束后不同初始干密度的试样同样会趋于一个稳定的孔隙比,因此可以认为加载

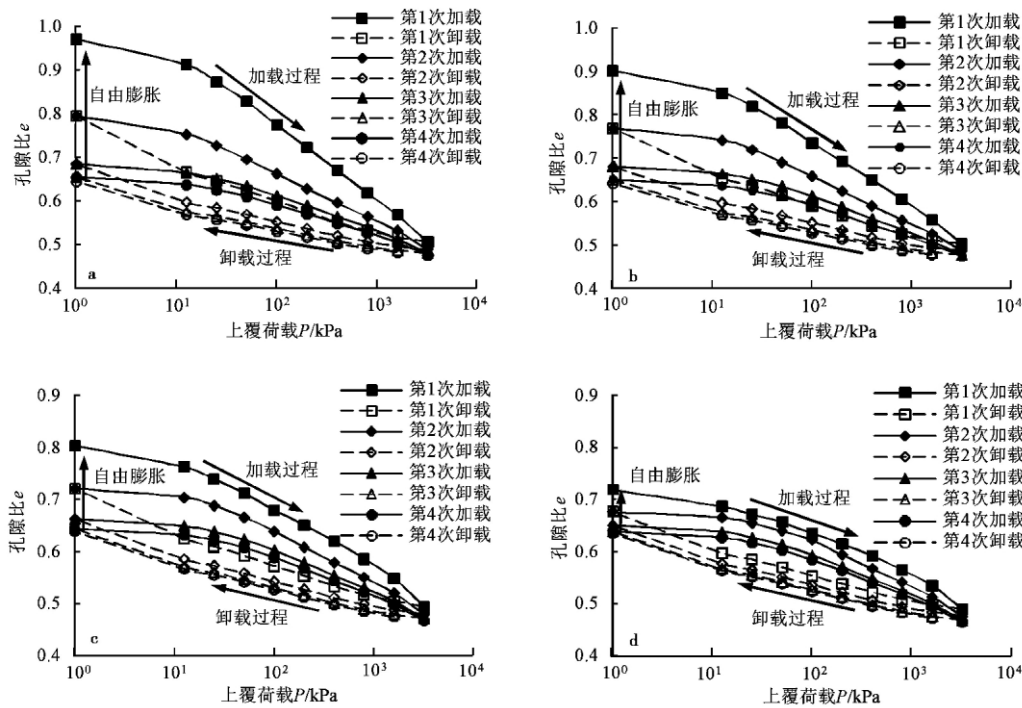


图 3 黄褐色泥岩循环压缩-回弹曲线

Fig. 3 Circulating compression-rebound curves of yellow-brown mudstone

a. 初始含水率为 12.0%; b. 初始含水率为 16.0%; c. 初始含水率为 20.0%; d. 初始含水率为 23.0%

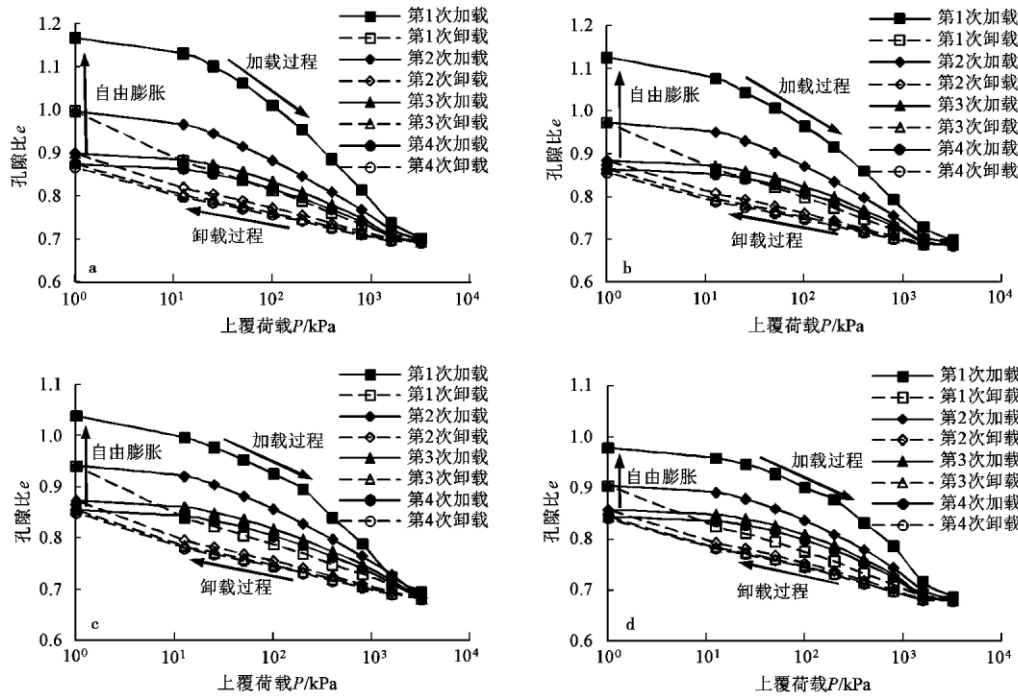


图4 紫红色泥岩循环压缩-回弹曲线

Fig. 4 Circulating compression-rebound curves of magenta mudstone

a. 初始含水率为 20.0%; b. 初始含水率为 24.0%; c. 初始含水率为 28.0%; d. 初始含水率为 31.0%

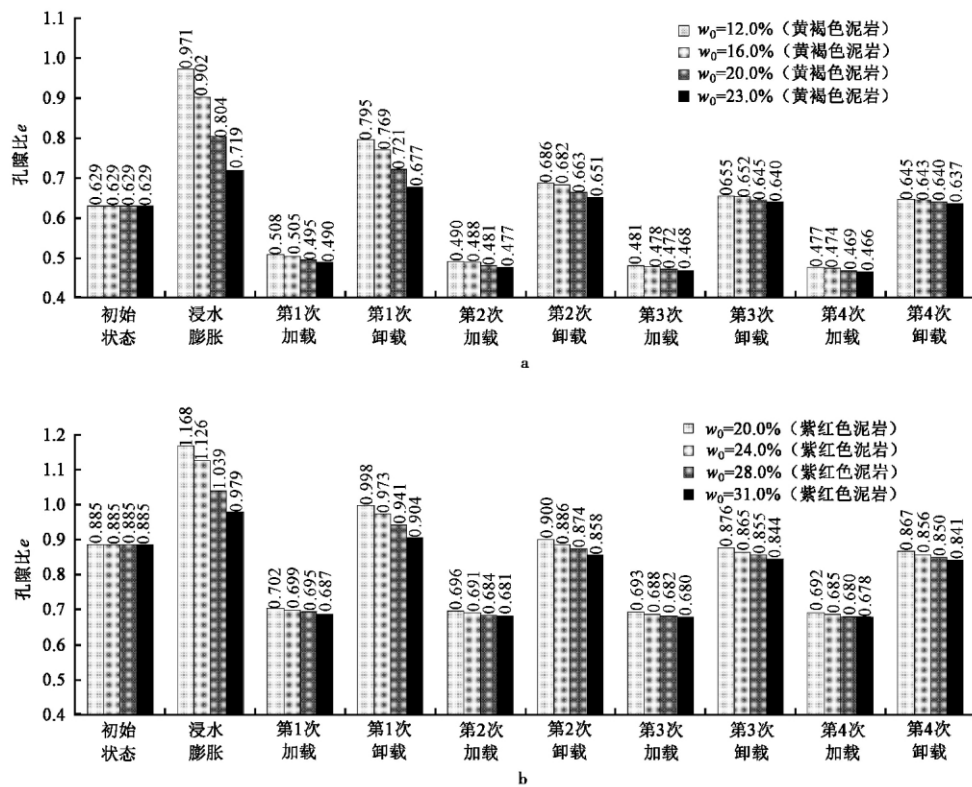


图5 试验过程中孔隙比变化

Fig. 5 Void ratio changes during the whole test process

a. 黄褐色泥岩; b. 紫红色泥岩

结束后的孔隙比与初始含水率和干密度无关,在相同的荷载条件下是反映土性的参数,与土样的黏土矿物含量、粒度组成有关(唐朝生等,2009)。第4次卸载以后,黄褐色和紫红色泥岩的孔隙比在0.64和0.86左右,与制样孔隙比0.63和0.89非常接近。张俊峰等(2015)认为膨胀土在浸水吸湿→加载压缩→卸载回弹路径下的膨胀-压缩-回弹变形是团粒结构内部弹性变形的宏观表现,因此卸载后孔隙比与制样孔隙比几乎相同。此外,从图5还可以看出,随着循环次数的增加,不同初始含水率试样的孔隙比大小差异逐渐减小,循环加卸载过程对不同初始含水率试样的力学性质具有同化作用。

2.2.2 压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s

由图3和图4可以看出,压缩曲线后半段和回弹曲线前半段(上覆荷载在12.5~3200kPa范围内)具有较好的线性,计算直线段的平均斜率分别得到压缩指数 C_c 和卸载过程的回弹指数 C_s ,计算结果(表3)。随着循环次数增加,压缩指数和回弹指数呈逐渐减小的趋势,其中前两次循环过程的压缩指数和回弹指数变化较大,随后逐渐趋于稳定,这与Stone et al.(1980)的研究成果一致。从表3可以看出,试样的压缩指数和回弹指数随初始含水率减小有递增的趋势,初始含水率越低的试样浸水膨胀后的压缩性和回弹膨胀性越高,这与Perdok et al.(2002)和唐朝生等(2009)结论吻合,试样吸水膨胀以后,初始含水率越低的试样膨胀变形大,加载前的孔隙比和含水率越大,压缩指数和回弹指数越大。

由表3可知,每次卸载的回弹指数明显小于再加载过程的压缩指数,计算第 $i+1$ 次加载过程的压缩指数与第 i 次卸载的回弹指数之差 ΔC ,试验共进行了4次循环加卸载,得到第1、2和3次循环的 ΔC (表3)。由于不同初始含水率试样每一次压缩完成

后的孔隙比几乎相同,因此可以用 ΔC 来表征卸载-再加载滞回环面积大小。随着循环次数增加, ΔC 不断减小,卸载-再加载过程产生的滞回环面积变小,并逐渐趋于稳定。滞回环大小反映了试样在该循环耗散能的大小,滞回环面积随循环次数的增加先减小后逐渐趋于稳定,表明循环加卸载对土样的力学性质有强化的效果。除此之外,制样时的初始含水率也是影响 ΔC 的重要因素,初始含水率越高的试样, ΔC 越小,卸载-再加载滞回环面积更小。

2.2.3 累积总变形率 ζ 和累积残余变形率 η

由图3和图4可以看出,每一次加卸载曲线的起点和终点并不重合,试样卸荷后的孔隙比总是小于加载前的孔隙比,存在不可恢复的残余变形。第 $i+1$ 次加载-回弹曲线总是在第 i 次的下方,每次加载结束后的累积总变形和卸载后的累积残余变形随循环次数增加而增大。为了进一步定量描述累积变形和累积残余变形随加卸载次数的变化规律,本文引用累积总变形率 ζ 和累积残余变形率 η 的概念(周德泉等,2011),相关表达式可以用孔隙比表述为:

$$\zeta = \frac{e_0 - e_i}{e_0 + 1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta = \frac{e_0 - e_i^u}{e_0 - e_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 ζ 为第 i 次加卸载的累积总变形率; η 为第 i 次加卸载的累积残余变形率; e_0 为试样浸水膨胀后未加载时的孔隙比; e_i 为第 i 次加载至最大荷载时试样的孔隙比; e_i^u 为第 i 次荷载退零时试样的孔隙比。

根据循环加卸载过程试样孔隙比的变化规律,按照式(1)和式(2)计算得到不同初始含水率试样在不同循环次数下的累积总变形率和累积残余变形

表3 压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 与二者之差 ΔC

Table 3 Compression index C_c , swelling index C_s and the difference ΔC

样品名称	初始含水率 $w_0/\%$	加载前孔隙比 e_0	压缩指数 C_c				回弹指数 C_s				ΔC		
			$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=1$	$n=2$	$n=3$
黄褐色泥岩	12.0	0.971	0.168	0.109	0.077	0.067	0.066	0.045	0.040	0.039	0.043	0.032	0.027
	16.0	0.902	0.144	0.105	0.078	0.068	0.063	0.046	0.041	0.040	0.043	0.032	0.027
	20.0	0.804	0.111	0.093	0.074	0.068	0.054	0.044	0.041	0.041	0.039	0.030	0.027
	23.0	0.719	0.082	0.079	0.070	0.067	0.045	0.042	0.041	0.041	0.034	0.029	0.026
紫红色泥岩	20.0	1.168	0.178	0.112	0.080	0.071	0.074	0.051	0.046	0.044	0.038	0.028	0.025
	24.0	1.126	0.157	0.108	0.077	0.069	0.069	0.049	0.045	0.043	0.039	0.028	0.025
	28.0	1.039	0.126	0.099	0.074	0.068	0.061	0.047	0.043	0.042	0.038	0.027	0.025
	31.0	0.979	0.113	0.087	0.070	0.065	0.057	0.047	0.043	0.043	0.030	0.023	0.022

率(表4)。表4表明,随着循环加卸载次数的增加,累积总变形率先迅速增加,后逐渐趋于稳定,每次加载产生总变形增量随循环次数增加逐渐减小,其中第1次加载结束后试样发生的总变形最大,占4次加载完成后累积总变形的90%以上,表明每次压缩完成后试样高度(孔隙比)基本相同,这与前文吻合。通过对比不同初始含水率的试样可知,累积总变形率随初始含水率增加而减小,相比而言,初始含水率越低的试样浸水膨胀后孔隙比大,荷载作用下更容易产生压缩变形,产生的总变形量更大,这使得不同初始含水率的试样在每次加载完成后会趋于一个相同的密实状态。

累积残余变形率反映了荷载退零后累积残余变形占总变形的大小,累积残余变形率越大表明不可恢复的塑性变形占总变形的比例越大。从表4可以看出,累积残余变形率随循环次数的增加逐渐增大,并有趋于稳定的趋势,而单次循环产生的残余变形逐渐减小。相同的循环次数下,初始含水率越小的试样,累积残余变形率越大,这是因为试样浸水膨胀后几近饱和(周葆春等,2014),初始含水率越小的试样孔隙比大,含水率更高,土颗粒之间咬合作用较弱,荷载作用下容易产生不可恢复的相对位移。

3 浸水-循环加卸载下变形机制分析

试样浸水后,自由水渗入土颗粒间,与黏土颗粒发生物理化学相互作用,在黏土矿物周围形成一层具有一定排列方向的水膜,使得土颗粒间的间距增大,试样产生膨胀变形(谭罗荣等,2006)。对于初始含水率比较小的土样,由于缺少水分的润滑作用,压实后试样的孔隙尺寸主要分布在较大范围内,自由水容易渗入孔隙。此外,黏土颗粒周围的结合水

膜比较薄,基质吸力较大,初始含水率低的试样吸水能力更强,膨胀速率更快,产生的膨胀变形量也比较大。膨胀变形稳定后,试样吸水几近饱和,不同初始含水率的试样并非处于相同的状态,相同制样干密度(孔隙比)条件下,初始含水率越低的试样膨胀稳定后干密度越小,孔隙比越大,含水率越高。

土体作为一种由固、水、气三相组成的多孔介质材料,在外荷载作用下,构成土骨架的颗粒发生滑移、破碎,土颗粒重新排列,孔隙体积减小,孔隙中的水和气排出,土体产生压缩变形,卸载后除了可以恢复的弹性变形外,土颗粒之间相对位置的变化产生的塑性变形不可恢复(唐朝生等,2009)。循环加卸载条件下,第1次加卸载产生的压缩和回弹变形量最大,随着循环次数的增加,单次循环产生的压缩总变形和回弹变形逐渐减小,3次循环以后累积总变形和累积残余变形趋于稳定。究其原因,主要缘于循环加卸载过程土体微观结构特征随循环次数的变化。第1次加载中土体孔隙体积大,土体变形空间大,土颗粒之间阻力小,容易发生滑移和重组,吸附在土颗粒表面的水化膜变薄,土体中部分水排出,产生的压缩变形最大,土颗粒不可逆的相对位移引起的塑性变形也越大,卸荷后自由水又会重新进入土颗粒之间使水膜变厚,产生“楔力”使得土颗粒之间距离的增加,孔隙体积增加,土体产生回弹变形(唐朝生等,2009)。随着循环次数的增加,土体中孔隙体积和土颗粒间距逐渐减小,土颗粒之间的压缩空间越来越小,发生滑移土颗粒越来越少,加载过程塑性变形越来越小,变形以土颗粒本身的弹性变形为主。对于初始干密度相同,初始含水率越低的试样膨胀后具有更高的压缩性和回弹膨胀性,这主要是因为初始含水率小的试样浸水膨胀后孔隙体积大,含水率大,外力作用下土颗粒容易发生移动,压缩性

表4 累积总变形率 ζ 和累积残余变形率 η

Table 4 Accumulative total deformation rate ζ and accumulative residual deformation rate η

样品名称	初始含水率/%	累积总变形率 ζ /%				累积残余变形率 η /%			
		$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
黄褐色泥岩	12.0	23.52	24.40	24.88	25.09	38.01	59.35	64.48	65.87
	16.0	20.91	21.76	22.30	22.54	33.44	53.26	58.99	60.42
	20.0	17.13	17.89	18.36	18.57	26.76	43.47	47.94	48.77
	23.0	13.33	14.09	14.60	14.74	18.31	28.23	31.67	32.52
紫红色泥岩	20.0	21.46	21.74	21.87	21.95	36.55	56.80	61.49	62.30
	24.0	20.09	20.44	20.61	20.71	35.74	55.22	59.56	60.19
	28.0	16.89	17.41	17.52	17.62	28.43	46.48	51.46	52.22
	31.0	14.75	15.04	15.11	15.20	25.55	40.68	45.11	45.79

更强,而且土颗粒周围的水化膜较厚,颗粒之间的摩擦力和联结力降低,结构强度弱化,土颗粒滑移过程遇到的阻力小。

膨胀性岩土由于具有湿胀干缩的性质,其体积变形是土样本性质、初始状态、浸水和加载路径耦合作用的结果,具有强烈的水-力路径依赖性(周葆春等,2014)。初始干密度(孔隙比)相同的试样,由于初始含水率的差异,浸水-循环加卸载条件下呈现出不同的变形特征。以往的研究主要集中在黏土颗粒与水之间的物理化学作用,很少涉及复杂水-力路径下膨胀岩变形特性,开展浸水-加卸载下压实膨胀岩的变形特性试验研究,有助于加深对膨胀岩在这种复杂水-力路径下变形特征的认识,可为实际工程变形分析时根据工况选择压缩、回弹模量提供参考,同时也对认知深部软岩在水-力作用下的变形性状具有借鉴意义。

4 结 论

(1) 试样的无荷膨胀率与初始含水率呈线性负相关关系,初始含水率越高,膨胀率越小;随循环加卸载次数的增加,压缩、回弹曲线越来越平缓,卸载-再加载滞回环逐渐减小,压缩指数、回弹指数以及再加载过程的压缩指数与回弹指数之差均呈逐渐减小的趋势;初始含水率越低的试样,压缩指数、回弹指数以及再加载过程的压缩指数与回弹指数之差越大,浸水膨胀后压缩性和回弹膨胀性越高。

(2) 随循环次数增加,单次循环的总变形和残余变形逐渐减小,累积总变形和累积残余变形先增加后逐渐趋于稳定。试样初始含水率越小,累积总变形率和累积残余变形率越大。

(3) 循环加卸载对不同初始含水率的试样具有强化和同化作用;膨胀岩变形具有明显的水力路径效应,相同初始干密度(孔隙比)的试样,由于初始含水率的差异,浸水-循环加卸载条件下呈现出不同的变形特性。

参 考 文 献

Baille W, Triathy S, Schanz T. 2010. Swelling pressures and one-dimensional compressibility behavior of bentonite at large pressures[J]. *Applied Clay Science* **48**(3): 324~333.

Delage P, Audiguier M, Cui Y J, et al. 1996. Microstructure of a compacted silt[J]. *Canadian Geotechnical Journal* **33**(1): 150~158.

Fang Q J, Hong B N, Lin L X, et al. 2011. Study on the different compression characteristic of high liquid limit clay and high liquid limit silt on wetting-drying cycles[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)* **43**(S1): 73~77.

Li G F, Li Z, Dai T D. 2010. Mechanical test of swelling rock and prediction of roadway support parameters[J]. *Engineering Mechanics* **27**(2): 96~101.

Li Z Q, Li T, Hu R L, et al. 2008. Expansion characteristics and construction control of remolded Mengzi expansive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* **30**(12): 1855~1860.

Ou X D, Tang Y C, Zhong Z W, et al. 2013. Test research on expansive force under small deformation of remolded expansive rock and soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **32**(5): 1067~1072.

Pejon O J, Zuquette L V. 2002. Analysis of cyclic swelling of mud rocks[J]. *Engineering Geology* **67**(1-2): 97~108.

Perdok U D, Kroesbergen B, Hoogmoed W B. 2002. Possibilities for modelling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types[J]. *Soil and Tillage Research* **65**(1): 61~75.

Stone J A, Larson W E. 1980. Rebound of fire one-dimensionally compressed unsaturated granular soils[J]. *Soil Science Society of America Journal* **44**(4): 819~822.

Tang C S, Cui Y J, Tang A M, et al. 2009. Compression behaviors of crushed COX argillite used as backfilling material in HLW repository[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **28**(12): 2459~2465.

Tan L R, Kong L W. 2004. Study of variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics* **25**(10): 1555~1559.

Tan L R, Kong L W. 2006. Engineering behavior of special rock and soil[M]. Beijing: Science Press.

Tan Y Z, Hu X J, Yu B, et al. 2014. Swelling pressure and mesomechanism of compacted laterite under constant volume condition[J]. *Rock and Soil Mechanics* **35**(3): 653~658.

Villar M V, Lloret A. 2008. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite[J]. *Applied Clay Science* **39**(1-2): 38~49.

Wang M Q. 2012. Expansive rock of expansive-creep coupling test research[D]. Nanning: Guangxi University.

Wen C L, Chen X W. 1992. Effects of initial water content, dry unit weight and load on the swelling of clayey weak rock: an experimental study[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **11**(3): 304~311.

Zhou B C, Zhang Y J, Tang Z S, et al. 2014. One-dimensional swelling-compression characteristics of Jingmen weak expansive soil under different compactnesses[J]. *Rock and Soil Mechanics* **35**(5): 1275~1283.

Zhou D Q, Li C X, Yang F, et al. 2011. Experimental comparison study of vertical deformation behavior of rock mass with voids and concrete filled solution cave[J]. *Rock and Soil Mechanics* **32**(5): 1309~1314.

- Zhang J F ,Zou W L ,Li Z Y ,et al. 2015. Experimental research of wetting-induced deformation characteristics for compacted expansive soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering ,11 (3) : 596~600 ,606.
- 方庆军 洪宝宁 林丽贤,等. 2011. 干湿循环下高液限黏土与高液限粉土压缩特性比较研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),43 (增1): 73~77.
- 李国富 李珠 戴铁丁. 2010. 膨胀岩力学性质试验与巷道支护参数的预测研究[J]. 工程力学,27(2): 96~101.
- 李志清 李涛 胡瑞林,等. 2008. 蒙自重塑膨胀土膨胀变形特性与施工控制研究[J]. 岩土工程学报,30(12): 1855~1860.
- 欧孝夺 唐迎春 钟子文,等. 2013. 重塑膨胀岩土微变形条件下膨压力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,32(5): 1067~1072.
- 唐朝生 崔玉军 TANG A M,等. 2009. 高放废物处置库中 COX 黏土岩回填材料压缩特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,28(12): 2459~2465.
- 谭罗荣 孔令伟. 2004. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学,25(10): 1555~1559.
- 谭罗荣 孔令伟. 2006. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社.
- 谈云志 胡新江 喻波,等. 2014. 压实红黏土的恒体积膨胀力与细观机制研究[J]. 岩土力学,35(3): 653~658.
- 王美乾. 2012. 膨胀岩膨胀-蠕变耦合试验研究[D]. 南宁: 广西大学.
- 周葆春 张彦钧 汤致松,等. 2014. 不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀-压缩特性[J]. 岩土力学,35(5): 1275~1283.
- 周德泉 李传习 杨帆,等. 2011. 空隙岩体与溶洞充填混凝土竖向变形特性对比试验研究[J]. 岩土力学,32(5): 1309~1314.
- 张俊峰 邹维列 李志勇,等. 2015. 压实膨胀土吸湿体变特征的试验研究[J]. 地下空间与工程学报,11(3): 596~600,606.