

干湿循环下膨胀土胀缩性能试验

吴珺华¹, 袁俊平^{2,3}, 杨松⁴, 卢廷浩^{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:采用压缩仪和收缩仪,对重塑膨胀土进行了无荷条件下的反复膨胀和收缩试验。试验结果表明:随着干湿循环次数的增加,试样的最终膨胀率和最终收缩率逐渐减小;膨胀变形明显减小,而收缩变形减小的幅度不大;试样的最终高度均呈现减小趋势;收缩系数不断减小,最终趋于稳定;采用绝对膨胀率、相对膨胀率、绝对收缩率和相对收缩率等参数可以合理描述干湿循环作用下膨胀土的胀缩变形特征。

关键词:膨胀土;胀缩变形;干湿循环;膨胀率;收缩率

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2013)01-0062-04

Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles//WU Junhua¹, YUAN Junping^{2,3}, YANG Song⁴, LU Tinghao^{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 repeated swell-shrinking tests on remolded expansive soils without loads are performed by means of compression apparatus and shrinkage apparatus. The results show that both the final expansion ratio and shrinkage ratio of specimens gradually decrease as wetting-drying cycles increase. The swelling deformation obviously decreases, while the shrinking one slightly decreases. The final height of the specimens has a tendency of decrease. The shrinkage coefficient continuously decreases and finally tends to be stable. The parameters such as absolute expansion ratio, relative expansion ratio, absolute shrinkage ratio and relative shrinkage ratio can rationally depict the swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles.

Key words: expansive soil; swell-shrinking deformation; wetting-drying cycle; expansion ratio; shrinkage ratio

膨胀土在我国分布广泛。膨胀土中含有蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物,故具有强烈的湿胀干缩特性,在干湿循环作用下反复胀缩变形,导致土体结构松散,裂隙发育,工程性能差。研究表明,干湿循环作用是导致土体产生反复胀缩变形,既而形成裂隙的主要外界因素之一^[1-2]。干湿循环表现为土体含水率的反复变化,导致膨胀土产生胀缩变形,而反复的不均匀胀缩变形即会导致裂隙的形成和发育。

膨胀土在某一上覆压力作用至变形稳定后,由于含水率的增加(或减少)而产生的附加变形称为胀缩变形,包括膨胀变形和收缩变形。许多学者对膨胀土的一次浸水膨胀和失水收缩的胀缩变形特性

进行了大量研究^[3-11];笔者也曾对膨胀土胀缩过程中变形与含水率的变化规律进行了试验研究^[12],试验过程只考虑了持续吸水或失水条件下试样的胀缩变形,不能反映试样的反复胀缩性能。实际工程中,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],而目前对膨胀土在干湿循环作用下的胀缩性能研究并不多见。基于此,本文利用常规压缩仪和收缩仪分别进行了重塑膨胀土的持续浸水膨胀和收缩试验,获得了干湿循环条件下膨胀土的胀缩性能变化规律,为后续研究提供试验基础。

1 试验方案

土样和文献[12]试验土样相同,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,试样初始高度 20 mm。采用常规压缩仪和收缩仪对土样进行反复浸水膨胀和收缩试验,试验过程主要如下:试样初始为低含水率状态,首先进行一次浸水膨胀试验,当膨胀变形稳定后,根据试样的最终高度和质量求得相应的干密度和含水率,以该结果作为接下来收缩试验初始状态的参数;然后进行收缩试验,待变形稳定后根据试样的最终高度和质量求得相应的干密度和含水率,再进行下一次的浸水膨胀变形试验。如此进行 4 次反复胀缩试验,试验操作参照 GB/T 50123—1999《土工试验标准》进行,总共进行了 3 种不同初始干密度和初始含水率方案的试验,具体参数见表 1。

表 1 反复胀缩试验试样的基本参数

方案编号	初始干密度/ (g · cm ⁻³)	初始含水率/%
1	1.75	5.12
2	1.68	5.08
3	1.61	5.05

2 相关参数

为定量分析干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形变化规律,采用绝对胀缩率和相对胀缩率的概念来描述试样的胀缩程度和变化趋势,故分别定义如下参数:

a. 第 *i* 级膨胀试验的绝对膨胀率 δ_{ap} 。

$$\delta_{ap} = \frac{z_{pi} - z_0}{z_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: z_{pi} 为第 *i* 级膨胀后试样高度,mm; z_0 为试样初始高度,mm。

b. 第 *i* 级膨胀试验的相对膨胀率 δ_{rp} 。

$$\delta_{rp} = \frac{\Delta z_{pi}}{z_{s(i-1)}} \times 100\% \tag{2}$$

式中: Δz_{pi} 为第 *i* 级膨胀试验后的最终高度与第 *i*-1 级收缩试验的最终高度之差,mm; $z_{s(i-1)}$ 为第 *i*-1 级收缩试验后试样高度,mm。

c. 第 *i* 级收缩试验的绝对收缩率 δ_{as} 。

$$\delta_{as} = \frac{z_{p1} - z_{si}}{z_{p1}} \times 100\% \tag{3}$$

式中: z_{p1} 为第 1 级收缩后试样高度,mm; z_{si} 为第 *i* 级收缩后试样高度,mm。

d. 第 *i* 级收缩试验的相对收缩率 δ_{rs} 。

$$\delta_{rs} = - \frac{\Delta z_{si}}{z_{pi}} \times 100\% \tag{4}$$

式中: Δz_{si} 为第 *i* 级收缩试验后的最终高度与第 *i* 级膨胀试验的最终高度之差,mm。

3 试验结果与分析

图 1 为不同干湿循环次数下一次浸水膨胀试验的结果。由图 1 可见,试样的膨胀变形与浸水历时的关系曲线呈典型的非线性特征。随着干湿循环次数的增加,不同初始干密度试样的最终膨胀率变小,试样在较短时间内即达到较大的膨胀变形,达到膨胀稳定阶段的时间也变短。相同干湿循环次数条件下,试样的干密度越大,其最终膨胀率也越大。对于干密度较小的试样,当干湿循环次数增加时,膨胀试验的后期土体体积不但没有膨胀反而收缩,呈现湿陷状态。对于体积一定的试样,干密度小的孔隙比大,能够吸收更多的水分,因而能溶解更多黏土颗粒之间的胶结物质,导致土体团粒结构的松散崩坍。另外,随着干湿循环次数的增加,试样反复膨胀收缩,其内部结构逐渐松散,产生细微裂隙。这两方面的因素直接导致浸水后期的试样呈现收缩态势。

图 2 为不同干湿循环次数下收缩试验的结果(图中 Δw 为初始含水率与某一时刻含水率之差)。由图 2 可见,经历不同干湿循环次数的试样,其收缩

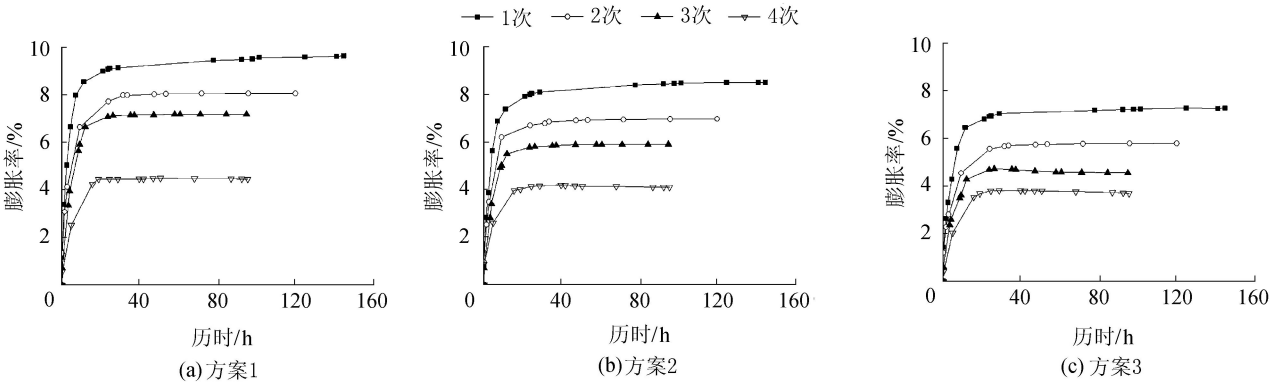


图 1 不同干湿循环次数下的膨胀时程曲线

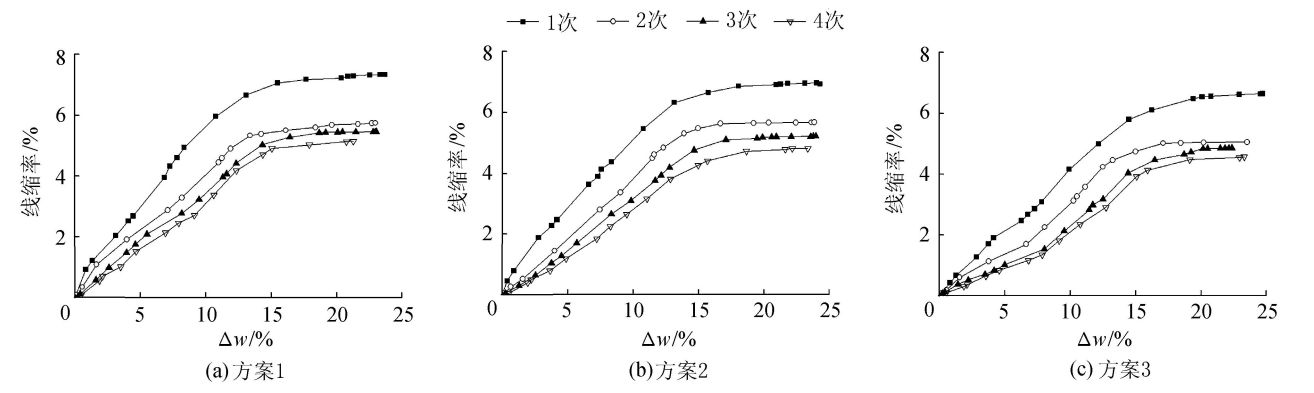


图2 不同干湿循环次数下的收缩曲线

曲线的初期阶段仍表现为线性特征。随着干湿循环次数的增加,初始斜率逐渐减小,即收缩系数不断变小,不同初始干密度试样的最终收缩率减小;相同的干湿循环次数下,干密度越小的试样,其最终收缩率越小。这与文献[12]的常规收缩试验结果有所不同,这是由于失水路径及初始状态的不同而引起的。常规收缩试验采用的试样是未经任何扰动而均匀脱湿的;而在反复胀缩试验中的收缩试验试样是从浸水膨胀变形稳定后再均匀脱湿的,即收缩试验开始前已经进行了浸水膨胀变形试验。干密度越大,试样在浸水膨胀变形阶段产生的膨胀变形越大,在收缩阶段时的收缩变形相应也越大,导致试样的最终收缩率越大,其值与常规收缩试验相比明显偏大。另外,反复胀缩试验中,第一次收缩试验的收缩率与后3次的收缩率相比要明显偏大,后3次收缩试验的收缩率相差不大,这表明土体在第一次干湿循环下的膨胀收缩变形最为明显,随着干湿循环次数的增加,膨胀变形有着明显的降低,而收缩变形减小的幅度不大。

将反复胀缩试验中试样的最终高度绘于图3。可以看出,随着干湿循环次数的增加,对于膨胀过程,试样的最终高度总体上逐渐减小,初始干密度越小,减小趋势越明显;对于收缩过程,试样的最终高度先有小幅度的增加,且干密度越大,增加的幅度越

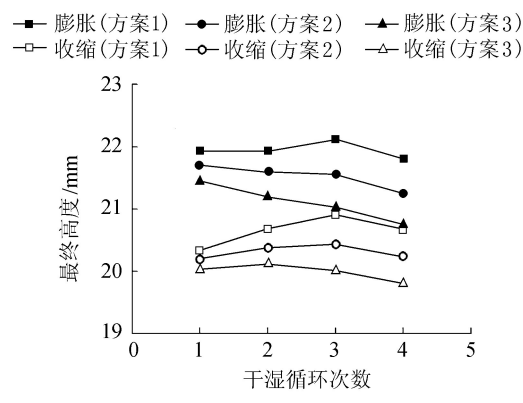


图3 不同干湿循环次数下试样的最终高度

大,随后又减小。总体而言,随着干湿循环次数的增加,不论是膨胀试验还是收缩试验,试样的最终高度都呈现减小趋势,这说明经历干湿循环作用后,土体的初始结构遭到明显破坏,土颗粒间原有的咬合和黏结作用被明显削弱,土体抵抗膨胀和收缩变形的能力减弱,呈坍塌收缩态势。

由于本研究进行的膨胀试验为一次浸水膨胀试验,故不能求得膨胀系数。根据收缩系数的定义,可求得不同干湿循环次数下的收缩系数,见图4。可以看出,随着干湿循环次数的增加,不同干密度下试样的收缩系数均有不同程度的减小,这表明试样的收缩性能变弱,降低相同的含水率对其收缩变形的影响减弱。试样经过反复胀缩变形后,土体颗粒重新调整和排列,其内部孔隙被有效地充填,收缩的空间范围减小,收缩性能也随之降低。

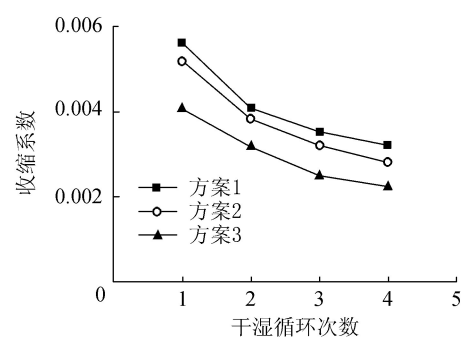


图4 不同干湿循环次数下的收缩系数

根据收缩系数 α_s 与干湿循环次数关系曲线,可采用式(5)进行拟合,拟合结果见表2。

$$\alpha_s = l e^{-n/t} + p_{res} \tag{5}$$

式中: n 为干湿循环次数; l 、 t 、 p_{res} 为待定系数。

表2 反复胀缩条件下拟合结果

干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	l	t	p_{res}
1.75	0.0063	1.112	0.0031
1.68	0.0054	1.459	0.0025
1.61	0.0040	2.012	0.0016

可以看出,不同干密度试样的收缩系数与干湿循环次数呈明显的负指数关系,随着干湿循环次数

的增加,试样的收缩系数呈衰减态势。由式(5)可知收缩系数具有极小值。令干湿循环次数 n 趋于正无穷大,可以得到 $\alpha_s|_{n \rightarrow \infty} = p_{res}$,这表明,随着干湿循环次数的增加,土体的收缩系数在不断减小,收缩能力减弱;当干湿循环达到一定程度时,土体的收缩系数基本保持稳定,收缩能力基本保持不变。因此 p_{res} 值可用来反映若干次干湿循环后土体的收缩性能,定义为残余收缩系数。未经人为扰动的天然土体长期处于自然条件下产生反复胀缩变形,故认为土体的收缩能力基本稳定,可用残余收缩系数来表征。

将反复胀缩试验中试样的绝对膨胀率 δ_{ap} 和绝对收缩率 δ_{as} 与干湿循环次数的关系列于表3,它表征了整个干湿循环过程中试样的胀缩程度及其变化规律。从表3可以看出,随着干湿循环次数的增加,试样的 δ_{ap} 总体呈减小趋势,干密度越小,减小的趋势越明显;试样的 δ_{as} 一开始减小,随后逐渐增大,且随着干密度的减小,增大的趋势更明显。绝对膨胀率变化率均呈现先增大后减小的趋势,干密度越小,减小趋势越明显;绝对收缩率变化率均逐渐增大,干密度越大,增大趋势越明显。

表3 试样绝对膨胀率 δ_{ap} 和绝对收缩率 δ_{as}

干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	$\delta_{ap}/\%$				$\delta_{as}/\%$			
	循环	循环	循环	循环	循环	循环	循环	循环
	1次	2次	3次	4次	1次	2次	3次	4次
1.75	9.7	9.7	10.6	9.0	7.3	5.7	4.6	5.7
1.68	8.5	8.0	7.8	6.3	6.9	6.2	5.9	6.8
1.61	7.3	6.0	5.2	3.8	6.7	6.2	6.7	7.7

将反复胀缩试验中试样的相对膨胀率 δ_{rp} 和相对收缩率 δ_{rs} 与干湿循环次数的关系列于表4(第一次干湿循环的相对膨胀率和相对收缩率无法由计算得出),它表征了某次干湿循环过程中试样的胀缩程度及其变化规律,反映了不同干湿循环次数后试样胀缩性能的差异。由表4可以看出,随着干湿循环次数的增加,试样的 δ_{rp} 和 δ_{rs} 均逐渐减小; δ_{rp} 的变化率比 δ_{rs} 的要大得多,这说明干湿循环对膨胀变形的影响程度远比对收缩变形的要大;干密度越大,膨胀率变化率越小(为负)。干湿循环次数增加到一定值时,试样的 δ_{rs} 比 δ_{rp} 要大,干密度越小,差异越明显。

表4 试样相对膨胀率 δ_{rp} 和相对收缩率 δ_{rs}

干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	$\delta_{rp}/\%$			$\delta_{rs}/\%$		
	循环	循环	循环	循环	循环	循环
	2次	3次	4次	2次	3次	4次
1.75	7.9	7.0	4.3	5.7	5.5	5.1
1.68	6.9	5.8	4.0	5.7	5.2	4.8
1.61	5.8	4.5	3.7	5.1	4.9	4.8

4 结 论

a. 随着干湿循环次数的增加,不同初始干密度

试样的最终膨胀率变小,试样越能在较短时间内即达到较大的膨胀变形,达到膨胀稳定阶段的时间也变短。相同的干湿循环次数下,试样的干密度越大,其最终膨胀率也越大。对于干密度较小的试样,当干湿循环次数较多时,膨胀试验的后期土体体积有所收缩,呈现湿陷状态。

b. 随着干湿循环次数的增加,不同初始干密度试样的最终收缩率变小。相同的干湿循环次数下,干密度越小的试样,其最终收缩率越小。由于试样干密度越大,浸水膨胀变形阶段产生的膨胀变形越大,在收缩阶段时的收缩变形相应也越大,导致试样的最终收缩率越大。

c. 试样在第一次干湿循环下的膨胀收缩变形最大,随着干湿循环次数的增加,膨胀变形明显减小,而收缩变形减小的幅度不大。对于膨胀试验,试样的最终高度总体上逐渐减小,初始干密度越小,减小趋势越明显;对于收缩试验,试样的最终高度先有小幅度的增加,且干密度越大,增加的幅度越大,随后又减小。可采用绝对膨胀率、相对膨胀率、绝对收缩率和相对收缩率等参数描述干湿循环作用下膨胀土的胀缩变形特征。

参考文献:

[1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1997.

[2] 陈建斌,孔令伟,郭爱国,等. 降雨蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征研究[J]. 土木工程学报,2007,40(11): 70-77. (CHEN Jianbin, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Deformation characteristics of expansive soil slopes under precipitation and evaporation [J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(11): 70-77. (in Chinese))

[3] HOLTZ W G, GIBBS J H. Engineering properties of expansive clays[J]. Transact,1956,121: 641-677.

[4] 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.

[5] 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. (LI Zhen, XING Yichuan, ZHANG Aijun. Inundation deformation characteristics of expansive soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(11): 1385-1391. (in Chinese))

[6] 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. (XU Yongfu, GONG Youping, YIN Zongze. Tests on swelling deformation of expansive soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1997(9): 27-30. (in Chinese))

[7] KODIKARA J K, CHOI X. A simplified analytical model for desiccation cracking of clay layers in laboratory tests [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils. New York: ASCE,2006,2558-2569.

(下转第 73 页)

好的水力性能。快速连接件产品在实际过程中还存在一些问题,如整体外观、内部结构及其与各部件间配合程度和防堵措施等还不够完善,需从模具结构、加工工艺等方面加以改进和优化,进一步提高快速连接件产品的整体性能。

参考文献:

[1] 付琳,董文楚,郑耀泉. 微灌工程技术指南[M]. 北京: 水利电力出版社,1987.

[2] 段巍巍. 半固定式移动灌溉技术在振安区节水灌溉工程中的应用[J]. 东北水利水电, 2009 (8): 46-48. (DUAN Weiwei. Application of semi-fixed moving irrigation technique in water-saving irrigation project for Zhen'an area [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast,2009(8): 46-48. (in Chinese))

[3] 买卫星. 首部移动式滴灌系统的研制及运行分析[J]. 农业机械,2006(5):143. (MAI Weixing. Development of head-control mobile dripping irrigation system and its operation system[J]. Farm Machinery,2006(5):143. (in Chinese))

[4] 赵亚丽,王长余. 移动式滴灌在齐齐哈尔市抗旱灌溉中的应用与推广[J]. 黑龙江水利科技,2010,38(3): 220-221. (ZHAO Yali, WANG Changyu. Application and popularization of mobile dripping irrigation in anti-drought irrigation of Qiqihar City [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy,2010,38(3):220-221. (in Chinese))

[5] 夏春华,方部玲,金永奎. 节水灌溉系统自动控制的研究应用[J]. 农业网络信息,2004(12):18-20. (XIA Chunhua, FANG Buling, JIN Yongkui. Application and research of auto-control in micro-irrigation[J]. Agriculture Network Information,2004(12):18-20. (in Chinese))

[6] 罗健恩,田润青,赵东辉. 宁夏南部窑水区移动式滴灌应用技术[J]. 人民黄河,2001,23(1):27-28. (LUO

Jianen, TIAN Runqing, ZHAO Donghui. Practical techniques of mobile dripping irrigation in water collecting cellar area [J]. Yellow River,2001,23(1):27-28. (in Chinese))

[7] 冯俊杰,翟国亮,仵峰,等. 可移动地下滴灌装置的研制开发[J]. 中国农村水利水电,2007(11):34-36. (FENG Junjie, ZHAI Guoliang, WU Feng, et al. The study and development on a device of removable subsurface drip-irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower,2007(11):34-36. (in Chinese))

[8] 林书竹,常桂峰,任广云,等. 旱地农业区膜囊水袋抗旱灌溉技术及效益[J]. 水利水电科技进展,2003,23(5):51-53. (LIN Shuzhu, CHANG Guifeng, REN Guangyun, et al. Water sack drought resisting and irrigation technique for drylands and its benefit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2003,23(5):51-53. (in Chinese))

[9] 冯俊杰,翟国亮,邓忠,等. 灌溉管路联接件: 中国, 200720187715. 8[P]. 2008-10-08.

[10] 胡铨森. 气动接头: 中国,301289473S[P]. 2010-07-21.

[11] 李良福. 国外可拆卸静联接件用接触密封[J]. 流体传动与控制,2006,16(3):41-43. (LI Liangfu. Some static seals of connecting flange in foreign country [J]. Fluid Power Transmission and Control,2006,16(3):41-43. (in Chinese))

[12] 牛文全,吴普特,范兴科. 低压滴灌系统研究[J]. 节水灌溉,2005(2):29-30. (NIU Wenquan, WU Pute, FAN Xingke. Study on lower-pressure drip irrigation system [J]. Water Saving Irrigation,2005(2):29-30. (in Chinese))

[13] 冯俊杰. 移动地下滴灌系统研究及配套产品开发[D]. 西安:西安理工大学,2008.

[14] NFEN 12734—2000 移动灌溉供水的快速联结管技术特性和试验[S].

(收稿日期:2012-03-20 编辑:骆超)

(上接第 65 页)

[8] TAY Y Y, STEWART D I, COUSENS T W. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners[J]. Engineering Geology,2001,60:263-274.

[9] 姚海林,程平,吴万平. 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. (YAO Hailin, CHENG Ping, WU Wanping. A simplified method for predicting heave in expansive soil grounds based on three dimensional shrinkage tests[J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(11):1688-1692. (in Chinese))

[10] 张华,陈守义,姚海林. 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. (ZHANG Hua, CHEN Shouyi, YAO Hailin. Estimation of volumetric water content in the pressure plate test by use of shrinkage test data[J]. Rock and Soil Mechanics,1999,20(2):22-26. (in Chinese))

[11] 肖宏彬,张春顺,何杰. 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. (XIAO

Hongbing, ZHANG Chunshun, HE Jie, et al. Study on the relationship between deformation and time of Nanning expansive soils [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2005,2(6):47-52. (in Chinese))

[12] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 膨胀土湿胀干缩特性试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):28-31. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrink performance of expansive soil due to moisture change[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3):28-31. (in Chinese))

[13] 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):1936-1941. (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):1936-1941. (in Chinese))

(收稿日期:2012-04-12 编辑:熊水斌)