

DOI:10.3969/j.issn.1003-0972.2018.03.030

上覆荷载作用下红黏土干湿循环试验研究

周 峰*,肖琪聃,高洪波

(信阳师范学院 建筑与土木工程学院,河南 信阳 464000)

摘 要:针对江西红黏土进行了施加不同上覆荷载、限制侧向膨胀、允许侧向收缩时的干湿循环试验,定性和定量地分析了干湿循环过程中红黏土裂隙发展规律.研究结果表明:对于任意一定次数的干湿循环,红黏土的裂隙分布密度、长度比、平均宽度均随着上覆荷载的增加而减小;随着上覆荷载的增加,试样经历7次干湿循环后裂隙分布密度、长度比、平均宽度减幅均很明显;上覆荷载越大,上覆荷载对裂隙的抑制作用越明显;当上覆荷载大于等于土体膨胀力时,试样不产生裂隙.

关键词:红黏土;上覆荷载;干湿循环;裂隙

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0972(2018)03-0493-06

Experimental Study on Red Clay under Drying-Wetting Cycles and Overlying Load

ZHOU Feng*,XIAO Qidan,GAO Hongbo

(College of Architecture and Civil Engineering,Xinyang Normal University,Xinyang 464000,China)

Abstract:A series of experiments were conducted on red clay from Jiangxi, including confined lateral expansion and allowed lateral contraction tests on compacted soils under drying and wetting cycles with different overlying load. The crack development law of red clay in the process of drying and wetting cycles was analyzed from quantitative and qualitative point of view. It was revealed that for any number of drying and wetting cycles, the distribution density, length ratio and average width of the red clay were decreased with the increase of the load. With the increase of overlying load, after 7 times of dry wet cycles, fracture density, length ratio, average width decreased obviously and the crack inhibition was more obvious with overlying load. When the overlying load was greater than or equal to the expansion force of the soil, the specimen did not crack.

Key words:red clay; overlying load; drying and wetting cycles; crack

0 引言

红黏土具有吸水膨胀、失水收缩的特性,是典型的胀缩性土之一.红黏土在我国分布范围较广,随着交通建设的发展,修建的许多道路会穿越红黏土地区.在雨季与旱季相互交替的过程中,红黏土经历着吸水—失水的无限次干湿循环,用作路堤填料时,在季节性的干湿循环作用下,易产生干湿循环裂缝,造成路基开裂,边坡失稳.目前国内外针对红黏土在无上覆荷载作用下干湿循环试验的研究取得了一定的成果.张永婷^[1]等研究表明干湿循环作用下红黏土以收缩为主而膨胀土以膨胀为

主,且红黏土的水稳性明显优于膨胀土.王莹莹等^[2]、黄丁俊等^[3]认为在相同的干湿循环次数下,初始含水率越大,红黏土绝对膨胀率、绝对收缩率越大.龚琰等^[4]研究表明低初始含水率的红黏土试样表面易形成网格状张拉裂隙,高初始含水率试样则易因收缩而产生环向裂隙,初始含水率越高,裂隙度越大.赵雄飞等^[5]认为红黏土试样随着干湿循环次数的增加,裂缝条数、最大宽度和最大长度在第1次循环增加较快,然后增加缓慢.周峰等^[6]研究表明在相同的干湿循环次数下,红黏土试样的胀缩变形幅度随上覆荷载的增加而基本上逐渐减小,上覆荷载的作用能够不同程度的抑制红黏土的胀

收稿日期:2017-06-09;修订日期:2017-09-04;*.通信联系人,E-mail: zfyjs6@163.com

基金项目:河南省科技发展计划项目(142300410200);河南省高等学校重点科研项目(15B560010)

作者简介:周峰(1977—),男,河南信阳人,讲师,硕士,主要从事土体力学特性等方面的研究.

缩变形.YESILLER 等^[7]研究表明红黏土表面干湿循环裂隙随着红黏土细粒含量的增加而增加,在第二次干湿循环之后裂隙强度因子趋于稳定.RAY-HANI 等^[8]研究表明在同一干湿循环次数下,红黏土表面裂隙随着塑性指数和黏粒含量的增大而增大.

前述学者进行的干湿循环条件下红黏土的研究成果基本上都是在限制侧向膨胀、允许侧向收缩且垂直方向荷载为零的条件下进行的,试样的侧向变形限制条件与实际情况相符,但试样的竖向变形限制条件和应力状态与实际情况不符.这是因为红黏土在季节性的干湿循环导致胀缩变形的过程中,由于周围土体的限制,其侧向不能膨胀或不能完全膨胀,但在收缩过程中其侧向会产生收缩变形,当收缩变形足够大时会产生收缩裂缝;在垂直方向,红黏土受到上覆土体的自重应力作用,其含水率增加时红黏土内部产生膨胀力,当膨胀力大于上覆土体的自重应力时才会有膨胀变形产生,否则不会有膨胀变形产生.目前国内外还未进行针对红黏土在有荷条件下的干湿循环试验研究,仅有杨和平等^[9]利用加浴霸的轻型固结仪对原状膨胀土进行了有荷条件下的干湿循环过程的试验研究,以及张文慧^[10]利用温控气压固结仪对原状膨胀土进行的有荷条件下干湿循环过程的试验研究.因此本次针对重塑红黏土进行不同上覆荷载条件下的干湿循环试验研究,对获取符合工程实际的设计参数具有重要的意义.

1 土样选取及试验方法

1.1 红黏土的选取

本文所用红黏土为同江防护区残积红黏土,取自吉水县阜田镇坛上村东南部,取土深度 2.0 m 左右,呈黄褐—棕黄色,硬可塑状.试验用土均采用风干土样,风干土样全部过 5 mm 筛,风干后红黏土含水率为 5.9%,主要物理性质指标见表 1.根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ112-2013)判断该红黏土具有弱膨胀性.

表 1 红黏土基本物理性质指标

Tab. 1 The fundamental physical properties of red clay

液限 /%	塑限 /%	最优含 水率/%	最大干密度 /(g · cm ⁻³)	自由膨胀 率/%	膨胀力 / kPa
51	27	17.6	1.78	48	62.8

注: 表中膨胀力为试样最优含水率、最大干密度(压实度 95%)时数值,测试方法为加荷平衡法.

1.2 试验方法

试验所用试样均为室内制备的环刀试样,环刀试样的制备参照《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)中的压样法,环刀试样高度为 2.0 cm,直径为 6.18 cm.试样的初始含水率为最优含水率 17.6%,干密度为 1.69 g · cm⁻³(即最大干密度为 1.78 g · cm⁻³与压实度 95%之积);上覆荷载设定为 0 kPa、20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa 五个水平(即代表 0 m、1 m、2 m、3 m、4 m 上覆土体所产生的自重应力),共经历 7 次干湿循环.试样经历 0~7 次干湿循环的过程中,对每次干湿循环前后对试样用 1200 万像素的数码相机进行拍照,以统计试样每次干湿循环前后的裂隙发展规律.

干湿循环分为浸水膨胀和失水收缩两个过程.对于上覆荷载为 0 kPa 的干湿循环试验,浸水膨胀过程为:将试样放置在透水石上,先加水至水面和透水石顶面同高,试样吸水饱和,逐渐将水位升至淹没试样表面为止,浸水 24 h 即认为试样吸水膨胀稳定;失水收缩过程为:将浸水饱和后的试样风干至制样初始质量(此质量为根据最大干密度、最优含水率、95%压实度确定的环刀试样质量),即认为试样失水收缩稳定.对于其他上覆荷载的干湿循环试验,浸水膨胀过程为:将试样放置在根据固结仪改装的可施加上覆荷载的干湿循环试验仪器中,加载对应的上覆荷载,然后再加水至水面和透水石顶面同高,试样吸水饱和,逐渐将水位升至淹没试样表面为止,浸水至试样饱和,即认为吸水膨胀稳定(根据已有经验,由于上覆荷载的影响,吸水速率会随着上覆荷载的增大而减小,所以不同上覆荷载条件下试样吸水饱和所需要的时间不同,应该先根据试样试验确定);失水收缩过程为:将浸水饱和后的试样通过仪器下部加热片烘干至制样初始质量,即认为试样失水收缩稳定(利用加热片控制开关控制烘干温度在 35 ℃ 左右,该温度为南方地区夏季室外气温均值).

2 结果分析

本文对红黏土裂隙的发展规律分析分为定性分析和定量分析两个方面.其中对红黏土裂隙的定性分析采用传统意义上的分析描述方法,而对裂隙发育情况的定量分析,则采用二值化像素统计技术、光栅矢量化技术.限于篇幅,图 1 仅给出了上覆荷载为 0~80 kPa 的红黏土试样干湿循环过程中 1 次、3 次、5 次、6 次、7 次失水后裂隙发育情况.

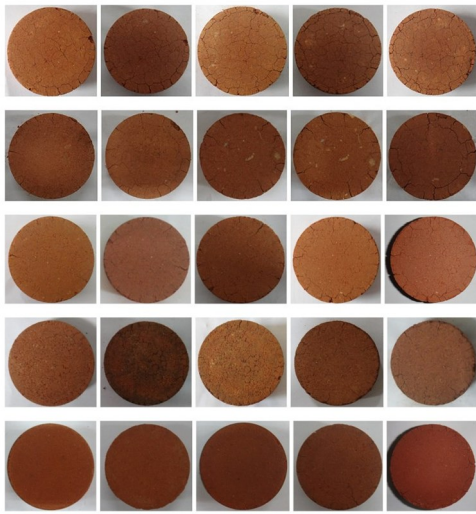


图1 上覆荷载作用下红黏土试样
干湿循环裂隙发育规律

Fig. 1 Crack development law of red clay wet-dry cycle
under the overlying load

注: 图1中从左到右依次为经历1次、3次、5次、6次、7次失水;从上到下依次为施加0 kPa、20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa上覆荷载。

2.1 上覆荷载作用下试样裂隙发展规律(定性分析)

由图1可以看出:第一次失水后,上覆荷载为0~40 kPa的试样表面产生了数条没有贯通的细微裂隙,且上覆荷载越小,裂缝数量越多、裂缝宽度越宽;上覆荷载为60~80 kPa的试样表面未有裂隙出现。第三次失水后,上覆荷载为0~20 kPa的试样表面裂隙发展呈快速增长态势,裂缝数量急剧增多,裂隙宽度明显增大,且上覆荷载为0 kPa的试样边缘出现轻微剥落,表面已经出现贯通裂隙,20 kPa的试样表面有出现贯通裂隙的势头;上覆荷载越小,试样裂隙数量越多、宽度越大的现象依然存在;上覆荷载为40 kPa的试样表面裂隙发育较为缓慢,上覆荷载为60~80 kPa的试样表面依然未有裂隙出现。第五次失水后,上覆荷载为0~20 kPa的试样表面产生了贯通裂隙条数增多,且清晰可辨;可以看出上覆荷载为40 kPa的试样表面裂隙开始加剧发育,较前几次越来越明显;上覆荷载为60~80 kPa的试样表面依然无明显裂隙。第七次失水后,上覆荷载为0 kPa的试样边缘土剥落现象较第五、六次更加明显,试样表面土体已基本完全被裂隙分割破碎,根据该土已有研究成果^[6],可以认为试样完全破坏,裂隙发展趋于稳定;上覆荷载为20~40 kPa的试样裂隙发育基本完成,土体已经破坏,且上覆荷载越大,破坏越不明显;上覆荷载为

60~80 kPa的试样表面仍无特别明显裂隙,可认为试样干湿循环已经稳定。

对于同一次数的干湿循环,失水收缩后试样与环刀间的缝隙均随着作用在试样的上覆荷载的增加而变窄。图1中试样均为脱刀拍摄,故未在图中显示。对于相同次数的干湿循环,上覆荷载越大,失水后试样表面裂隙发育越不明显,且当上覆荷载大于等于膨胀力62.8 kPa时(本文默认60 kPa上覆荷载等于试样膨胀力)试样表面不产生干湿循环裂隙。试验过程中发现上覆荷载越大,土样失水和吸水所需的时间越长。以上均说明上覆土体的自重应力对红黏土的胀缩变形和裂隙发育具有很好的抑制作用;且上覆荷载越大,抑制作用越明显。

2.2 上覆荷载作用下试样裂隙发展规律(定量分析)

裂隙度的概念是用来反应混乱型裂隙分布网络的几何分布特征所采用的一系列综合性指标,来自于工程应用中的裂隙度的概念对试样裂隙进行描述是一种比较简便且可行的方法。裂隙度的表达方法基本都是针对裂隙的分布密度、宽度、长度以及走向等几何要素而建立的,裂隙分布密度(面积比)、裂隙长度比、裂隙平均宽度具体定义如下^[11]:

$$\delta_{fA} = \sum_{i=1}^n A_i / A, \quad (1)$$

$$\delta_{fl} = \sum_{i=1}^n l_i / A, \quad (2)$$

$$\bar{d} = \delta_{fA} / \delta_{fl}. \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: δ_{fA} 为裂隙分布密度(面积比),%; δ_{fl} 为裂隙长度比, mm^{-1} ; $\bar{d}$ 为裂隙平均宽度,mm; A 为统计试样面积, mm^2 ; A_i 为第*i*条裂隙所占的面积, mm^2 ; l_i 为第*i*条裂隙的长度,mm。

2.2.1 裂隙长度随干湿循环次数的变化规律

按照二值化方法,通过Matlab2014a的图形图像处理功能,对初始图片进行灰度转化(灰度值大于150时设置为255,小于150时设置为0)、边缘提取(试样与环刀内壁的间隙不计入灰度值,试样面积统计只统计试样收缩后的面积)及中值滤波等措施^[11-14],最终转化形成的二值图像如图2。统计二值化图像中的黑、白像素;按照公式(1)计算(黑像素与总像素之比)出每张图中的裂隙分布密度,得出不同上覆荷载作用下试样裂隙分布密度随干湿循环次数的变化规律如图3所示。

分析图3可以看出,对于上覆荷载为0~40 kPa三组试样,每组试样的裂隙分布密度总体上均随干

湿循环次数的增加而增加,三组试样的裂隙分布密度从第 1 次失水后的 0.006%、0.003%、0%增长到第 7 次失水后的稳定值 4.285%、3.071%、1.313%,且干湿循环初期阶段裂隙分布密度增长较快,说明试样在干湿循环初期裂隙开展比较迅速.上覆荷载为 60 kPa、80 kPa 的两组试样的裂隙分布密度始终为 0.

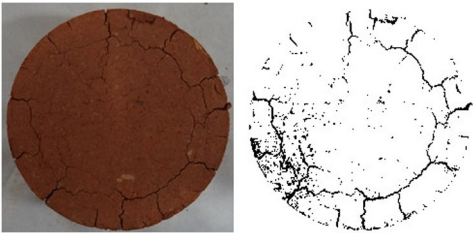


图 2 二值化图像处理示例
Fig. 2 Example of binary image processing

通过对比分析图 3 中 5 条曲线,可以看出,在上覆荷载小于试样膨胀力的情况下,对于任意一定的干湿循环次数,裂隙分布密度随着上覆荷载的增加而减小.以 0 kPa 和 40 kPa 试样 7 次干湿循环后裂隙分布密度作比较,40 kPa 上覆荷载的试样的裂隙分布密度比 0 kPa 上覆荷载的试样减幅达 69.4%.在上覆荷载大于等于试样膨胀力的情况下,试样经历 7 次干湿循环基本上不产生裂隙.以上分析可知,上覆荷载作用对红黏土干湿循环裂隙的发展有很好的抑制作用,且上覆荷载越大,抑制作用越明显.

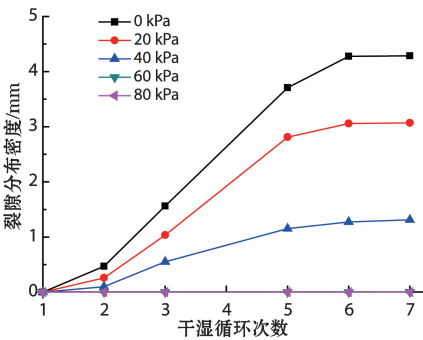


图 3 不同上覆荷载作用下试样裂隙分布密度
随干湿循环次数变化规律
Fig. 3 Crack density law of red clay wet-dry cycle
under the overlying load

2.2.2 裂隙长度随干湿循环次数的变化规律

对图 1 中的试样进行二值化处理后,再利用光栅图像矢量化技术对二值化后的图像进行裂隙长

度矢量统计(利用 AutoCAD 软件中的面积统计和矢量统计功能对二值化后的图片进行处理)^[15],按照公式(2)计算出每张图中的裂隙长度比,得出不同上覆荷载作用下试样裂隙长度比随干湿循环次数的变化规律如图 4 所示.

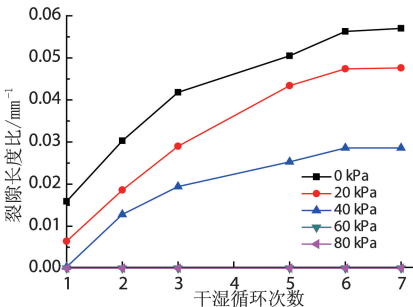


图 4 不同上覆荷载作用下试样裂隙长度比
随干湿循环次数变化规律
Fig. 4 Crack length ratio law of red clay wet-dry cycle
under the overlying load

裂隙的长度比是衡量裂隙发育速度和分布程度的一个重要参数,裂隙长度比的值越大,说明裂隙发育很快或是裂隙分布的越密集.单独分析图 4 中的每一条曲线,可以看出对于上覆荷载为 0~40 kPa 的三组试样,每组试样的裂隙长度比总体上均随干湿循环次数的增加而增加,且裂隙长度比的增速随着干湿循环次数的增加越来越小,上覆荷载为 0~40 kPa 的三组试样的裂隙长度比从第 1 次失水后的 0.0159、0.0064、0.0004 增长到了第 7 次失水后的稳定值 0.0573、0.0476、0.0284,且干湿循环初期裂隙长度比增长较快,同样说明试样在干湿循环初期裂隙开展比较迅速.上覆荷载为 60 kPa、80 kPa 的两组试样的裂隙长度比始终为 0.

综合分析图 4 中的 5 条曲线,可以看出,在上覆荷载小于试样膨胀力的情况下,对于任意一定的干湿循环次数,试样裂隙长度比随着上覆荷载的增加而减小.这个结论和 2.2.1 节得出的关于裂隙分布密度的结论相似.以 0 kPa 和 40 kPa 试样 7 次干湿循环后裂隙长度比做对比,40 kPa 上覆荷载的试样的裂隙长度比比 0 kPa 上覆荷载的试样减幅达 39.3%.在上覆荷载大于等于试样膨胀力的情况下,试样经历 7 次干湿循环基本上不产生裂隙.以上分析同样印证了 2.1 节所得出的结论,上覆荷载作用对红黏土干湿循环裂隙的发展有很好的抑制作用,且上覆荷载越大,抑制作用越明显.

2.2.3 裂隙平均宽度随干湿循环次数的变化规律

利用 2.2.1、2.2.2 得出的裂隙分布密度及裂隙长度比,按照公式(3)计算出试样的裂隙的平均宽度(裂隙分布密度及裂隙长度比均为 0 时,默认裂隙平均宽度为 0),得出不同上覆荷载作用下试样裂隙平均宽度随干湿循环次数的变化规律如图 5 所示。

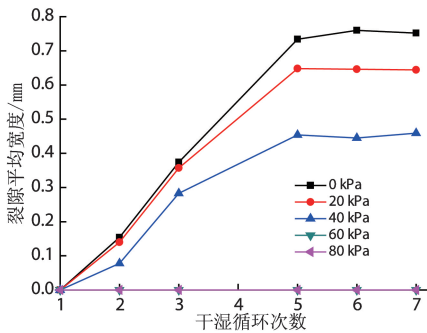


图 5 不同上覆荷载作用下试样裂隙平均宽度随干湿循环次数变化规律

Fig. 5 Crack average width law of red clay wet-dry cycle under the overlying load

从图 5 可以得出和 2.2.1、2.2.2 中裂隙分布密度以及裂隙长度比类似的结论,也同样印证了上覆荷载作用对红黏土干湿循环裂隙的抑制作用随上覆荷载的增大而增大的结论。

3 结论

通过室内试验研究了不同上覆荷载作用下红黏土在干湿循环过程中的裂隙发展规律,对裂隙的发展进行了定性分析和定量分析,主要得出了以下结论:

(1) 在相同的干湿循环次数下,失水后试样表面的裂隙及试样与环刀间的缝隙均随着作用于试样的上覆荷载的增加而变窄,说明上覆土体的自重应力对红黏土的裂隙发育具有抑制作用。

(2) 上覆荷载为 0~40 kPa 的三组试样,每组试样的裂隙分布密度、长度比、平均宽度总体上均随干湿循环次数的增加而增加,三组试样的裂隙分布密度、长度比、平均宽度在干湿循环初期增长较快,说明裂隙在试样干湿循环初期开展比较迅速。上覆荷载为 60 kPa、80 kPa 的两组试样的裂隙分布密度、长度比、平均宽度始终为 0,即试样未产生裂隙。

(3) 对于任意一定的干湿循环次数,裂隙分布密度、长度比、平均宽度均随着上覆荷载的增加而减小,经历 7 次干湿循环后最大减幅都很明显;当上覆荷载小于土体膨胀力时,上覆荷载越大,上覆荷载对裂隙的抑制作用越明显;当上覆荷载大于等于土体膨胀力时,土体不产生裂隙。

参考文献:

- [1] 张永婷,王保田,朱宝平.击实红黏土与膨胀土的变形特性对比研究[J].科学技术与工程,2013, 13(6):1676-1680, 1712.
ZHANG Yongting, WANG Baotian, ZHU Baoping. Comparative study on compacting red clay and expansive soil deformation characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(6): 1676-1680, 1712.
- [2] 王莹莹,张文慧,朱德志.初始含水率对红黏土胀缩变形特性的影响试验研究[J].科学技术与工程,2014, 14(6):242-246.
WANG Yingying, ZHANG Wenhui, ZHU Dezhi. Experimental research on the affect of the swell-shrinking deformation of red clay under the condition of different initial moisture content[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 242-246.
- [3] 黄丁俊,张添锋,孙德安,等.干湿循环下压实红黏土胀缩特性试验研究[J].水文地质工程地质,2015, 42(1):79-86.
HUANG Dingjun, ZHANG Tianfeng, SUN Dean, et al. Experimental study of swell-shrinking behaviour of compacted laterite after wetting-drying cycles[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(1): 79-86.
- [4] 龚琰.干湿循环作用下红黏土的变形和强度特性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2015.
GONG Yan.Study on deformation and strength properties of red clay under drying and wetting circulation [D].Xiangtan:Hunan University of Science and Technology,2015.
- [5] 赵雄飞,陈开圣.干湿循环条件下红黏土的胀缩变形特性研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2016, 33(1):132-135.
ZHAO Xiongfei, CHEN Kaisheng. Study on the swell & shrinking deformation characteristics of red clay under the condition of dry-wet circulation[J]. Journal of Guizhou University(Natural Science), 2016, 33(1): 132-135.

- [6] 周峰,肖琪聃,吴珊.上覆荷载作用下胀缩性土干湿循环过程中胀缩变形规律研究[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2017, 30(3):474-477.
ZHOU Feng, XIAO Qidan, WU Shan. Wet and dry cycles in soil swelling and shrinkage deformation regularity of expansion and contraction under the overlying load[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2017, 30(3): 474-477.
- [7] YESILLER N, MILLER C J, INCI G, et al. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils[J]. Engineering Geology, 2000, 57(1): 105-121.
- [8] GUNEY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J]. Building and Environment, 2007, 42(2): 681-688.
- [9] 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.
- [10] 张文慧.膨胀土胀缩特性试验与边坡稳定性研究[D].南京:河海大学,2014.
ZHANG Wenhui. Experimental study on swell-shrink behavior of expansive soils[D]. Nanjing: Hohai University, 2014.
- [11] 陶太江,廖济川.膨胀土地区开挖渠道滑坡的规律与特征[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),1996, 4(3):35-40.
TAO Taijiang, LIAO Jichuan. The law and characteristics of landslide in expansive soil area[J]. Journal of Anhui Construction Industry Institute (Natural Science Edition), 1996, 4(3): 35-40.
- [12] 袁俊平,殷宗泽.膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J].水利学报,2004, 6(6):108-113.
YUAN Junping, YAN Zongze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 6(6): 108-113.
- [13] 唐朝生,施斌,刘春,等.黏性土在不同温度下干缩裂隙的发展规律及形态学定量分析[J].岩土工程学报,2007, 29(5):743-749.
TANG Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 29(5): 743-749.
- [14] 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.
- [15] 李文庆,郑秋华,张坤龙.基于用户交互的光栅图像局部矢量化方法[J].杭州电子科技大学学报,2011, 31(6):91-94.
LI Wenqing, ZHENG Qiuhua, ZHANG Kunlong. A method of raster image partly vector based on user interaction[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2011, 31(6): 91-94.

责任编辑:郭红建