

文章编号:1672-9331(2017)02-0001-06

恒定初始干密度状态下膨胀土的有荷膨胀试验

张锐^{1,2}, 王欢², 郑健龙^{1,2}

(1.长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410004;

2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了获得恒定初始状态下膨胀土膨胀量随上覆荷载的变化规律,为膨胀土湿胀数学模型的建立提供基础,针对常规有荷膨胀试验中施加上覆荷载后会导致试样压缩和初始干密度发生变化的问题,改进试验装置,分别选取强、中、弱3种膨胀土进行了改进和常规膨胀土有荷膨胀对比试验。研究表明,常规有荷膨胀试验中不同的上覆荷载作用会使试样初始干密度增加1%~3%,吸水恢复到初始干密度状态后含水率会增加20%~30%;改进的有荷膨胀试验因避免了初始干密度的增大,使测试结果小于常规试验结果,得到的膨胀土湿胀变形公式中的回归参数 n 值比常规方法中使用的 n 值小29%~66%。

关键词: 道路工程; 膨胀土; 湿胀变形; 有荷膨胀试验; 改进方法; 恒定初始干密度

中图分类号: U416

文献标识码: A

Experimental research on loaded swelling of expansive soil with constant initial dry density

ZHANG Rui^{1,2}, WANG Huan², ZHENG Jian-long^{1,2}

(1.National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Technology,Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to observe the variation of the expansive soil swelling deformation with upper load and provide the basement for the modelling of swelling deformation, an improved testing device was proposed to avoid the compression and variation of the initial dry density because of the upper load in the common loaded swelling test. The comparison tests between the common and the improved were conducted between three kinds of expansive soils. The results show that different upper loads in the common method can occur 1%~3% increase in initial dry density of soil samples, 20%~30% increase in moisture content when the dry density recover to the initial one. In the improved method, the dry density can remain the initial value during the whole testing, the loaded swelling ratio obtained by the improved method is smaller than the value obtained by the common method, the regression parameters used in the predicted swelling deformation are 29%~66% smaller than that used in the common method.

Key words: road engineering; expansive soil; swelling deformation; loaded swelling test; improved method; constant initial dry density

收稿日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108049);交通运输部公路工程行业标准制修订项目(JTG-201507)

作者简介: 张锐(1980-),男,湖南株洲人,长沙理工大学副教授,博士,主要从事特殊土及其路基方面的研究。

膨胀土富含蒙脱石等具有亲水膨胀性的粘土矿物,具有明显的吸水膨胀的特性,易导致路面的早期破坏^[1]。因此,掌握膨胀土的变形规律,准确预估和控制膨胀土路基变形,确保路基的长期稳定性,是合理有效以及直接利用膨胀土填筑路基的关键,对降低工程造价、保护生态环境、保证工程质量等具有重要的意义。

国内外曾对膨胀土的胀缩变形规律、计算方法开展过相关研究。刘清秉等^[2-5]利用常规固结仪,研究了膨胀土胀缩变形与初始含水率、初始干密度以及上覆荷载之间的关系,建立了相应的膨胀土一维膨胀回归公式或数学模型。陈正汉等^[6-8]利用可控制吸力的三轴仪,研究在基质吸力和净法向应力作用下膨胀土的湿胀变形规律,建立了膨胀土的膨胀模型。郑健龙等^[9]基于膨胀土的有荷膨胀、无荷膨胀以及膨胀力试验,得到了膨胀土有荷膨胀率和上覆压力之间的关系,并推导得出了膨胀土湿胀变形预测数学模型,该模型强调有荷膨胀率是在恒定初始干密度条件下测得的。

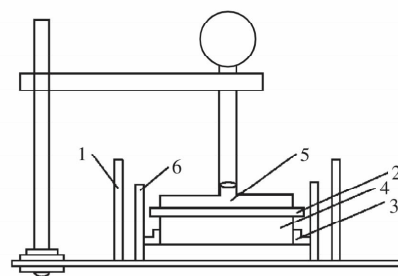
在我国现行的公路土工试验规程中,为模拟实际工况,在有荷膨胀试验中设计了试样的固结过程。由于在加载过程中使用了直径略小于环刀直径的透水石,在固结过程中,由于施加设计荷载而土样被压缩,其高度与初始制样时高度不一致。而试样为非饱和土,在压缩过程中其干密度势必会发生变化,导致计算得到的有荷膨胀率无法对应其真实的初始干密度状态。同时,国内对有荷膨胀试验方法的改进曾有过探讨,大部分科研人员^[10]均采用分次加载一分次卸载的方式(下文称为常规方法)。边加敏^[11]提出在有荷膨胀的固结过程中,根据所需的荷载级数制作试件,按照规范规定的方法对每个试样施加相同的固结压力,固结压力选择试验所需的最大上覆荷载,固结稳定后卸载到所需的荷载并立刻加水。但以上2种改进方法仍忽略了试样在固结过程中的压缩量,其初始干密度状态是无法确定的。

作者针对以上有荷膨胀试验中试样的压缩问题,对恒定初始干密度状态下的膨胀土进行有荷膨胀试验研究,以掌握有荷膨胀率随初始干密度和初始含水率的变化规律,并提出一种保证初始状态可控的有荷膨胀试验方法,以便于膨胀土路基湿胀变形预测的精确性研究。

1 改进的有荷膨胀试验装置和方法

有荷膨胀率在膨胀土湿胀变形预测中有着重要的意义,其测试的精确性直接影响到路基湿胀变形的精确性。在现有的荷膨胀试验方法中,土样的固结过程导致土样在吸水膨胀之前被压缩,其干密度以及初始含水率有所变化;同时,加载卸载方法的不同对有荷膨胀率的测试也有影响,因此,作者提出一种有荷膨胀试验的改进方法,并与常规方法进行对比分析。

将制作好的已知初始干密度和含水率的试样置于固结仪中,在试样上端面设置一块直径大于环刀直径的透水石板,然后将固结仪的盖板叠置在透水石板上,采用多个环刀样分别加荷的方式,即在相同初始干密度和初始含水率的情况,分别对试样施加不同设定载荷并加水至饱和状态,在加荷瞬间由环刀壁承担荷载的压力,避免因上覆荷载而导致的土样压缩和初始干密度变化的问题。监测土样膨胀数据直至其膨胀稳定。该方法的优点在于克服了现有规程及试验改良方法之不足,提供了一种试验方法简单、操作方便、结构合理、严格控制试样的初始状态的有荷膨胀试验方法及装置。试验装置示意图如图1所示。



1. 固结仪容器;2. 直径大于环刀直径的透水石;3. 定位环;
4. 环刀+土样(环刀直径为61.8 mm);5. 盖板;6. 套环

图1 改进的有荷膨胀试验装置示意图

Fig. 1 Improved loaded swelling test device

试验步骤为:试验前,对固结仪施加设定载荷 P 进行变形校正,记录载荷 P 作用下仪器的压缩变形量 R_p ;根据有荷膨胀试验方法规定的试样数量,取相同数量的环刀,分别称量环刀重量并记录;采用静压制样法制备与环刀高度相同的试样;将试样安装在固结仪上,在试样上端面设置一块完全覆盖试样上表面的透水石板后,将固结仪的

盖板叠置在透水石板上,保证试样在透水石板正下方,施加 1~2 kPa 的压力,使仪器各部分接触,记录千分表的初始读数 R_0 。

通过透水石板对试样施加设定载荷 P ,向固结仪中注入蒸馏水,并始终保持水面超过试样上表面 5~8 mm,使试样自下而上浸水;浸水后每隔 2 h 记录千分表读数 1 次,直至相邻 2 次千分表读数差值 ≤ 0.01 mm 时,结束试验。最后一次记录的千分表读数 R_t ,即为试样在荷载 P 作用下膨胀稳定后的膨胀量。有荷膨胀率 δ_{ep} 计算公式为:

$$\delta_{ep} = \frac{R_t + R_p - R_0}{H_0} \times 100. \quad (1)$$

式中: δ_{ep} 为荷载 P (kPa) 作用下的膨胀率,%,计算

至 0.1; H_0 为试样的初始高度,mm; R_t 为荷载 P 作用下膨胀稳定后的千分表读数,mm; R_p 为荷载 P 作用下仪器的压缩变形量,mm; R_0 为试样加荷前的千分表读数,mm。

2 试验土样和对比试验方案

本研究分别在广西百色高速公路、安徽高速公路、河南邓鄂高速公路现场采集土样。河南土样为棕黄色硬粘土,广西土样为灰白色斑纹状粘土,安徽土样为灰色硬粘土,面上有蜡状光泽。分别对 3 种土样进行基本物理性质指标和工程性质试验,结果如表 1 所示。

表 1 3 种膨胀土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of three expansive soils

土样来源	天然含水率/%	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	塑性指数 I_P /%	CBR 试验		自由膨胀率 f_s /%	膨胀土分类
					最大干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	最佳含水率 w_{opt} /%		
广西	24.9	64.1	30.6	33.5	1.58	17.7	63	中膨胀土
安徽	25.2	58.2	32.6	25.6	1.58	17.9	59	弱膨胀土
河南	26.0	53.9	23.5	30.4	1.66	16.4	84	强膨胀土

测试结果表明,3 种土样的天然含水率较高,饱和度均在 95% 以上;液限高,均大于 50%,属于高液限土;塑性指数大,天然含水率与塑限相接近;自由膨胀率大。根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 中的膨胀土判别分类指标和标准,可判定河南土样为强膨胀土、广西土样为中膨胀土、安徽土样为弱膨胀土。

本次有荷膨胀对比试验共设定 6 组上覆荷载,分别为 50,75,100,125,150,200 kPa,常规方法与改进方法同时进行。由于试验设备一次最多提供 12 个固结容器,故每次只进行 1 种膨胀土的有荷膨胀对比试验。

以广西膨胀土为例,取膨胀土烘干、粉碎并过 0.5 mm 筛,通过喷壶洒水、拌和的方式进行特定含水率的膨胀土的配制,含水率设定为膨胀土的最佳含水率。配好土料后分别装入塑料袋,闷料 24 h。取 12 个环刀(尺寸为 61.8 mm×20 mm),分别编号并称重记录。闷料完毕后,采用烘干法对膨胀土进行含水率的测定。在含水率测定期间,其余土料依旧保持闷料状态。含水率测定完成后,采用静压制样法制作环刀样,控制其初始干密度为浸水 CBR 试验所得的最大干密度,根据式

(2) 计算最大干密度下各环刀试样所需土样的质量。保证试件表面光滑整齐、初始高度为 20 mm,称重,精确至 0.01 g,得到土样质量:

$$m = \rho v. \quad (2)$$

式中: $\rho = \rho_d \times (1 + w)$; ρ_d 为膨胀土的设计干密度; w 为含水率实测值; $v = \pi r^2 \cdot h$; r 和 h 分别为环刀的半径和高度。

2 组试验分别取 6 个环刀试件放入固结仪中,试验仪器安装顺序为套环、大直径透水石、定位环、环刀试件、大直径透水石、盖板。荷载杠杆调平后,安装千分表并记录其初始读数;向容器中注入蒸馏水,水面没过表面透水石以保证土样始终保持浸没状态;待膨胀土膨胀变形稳定(每 2 h 读数差值不大于 0.01),记下此时的读数。根据式(1)计算得到在荷载分别为 50,75,100,125,150,200 kPa 下其所对应的有荷膨胀率。

3 试验结果与分析

3.1 试样初始干密度的对比

在对比试验中,测试了常规方法中由于固结荷载而导致土样干密度的变化情况,结果如图 2

所示。由图2可以看出,在本研究提出的试验方法中,各膨胀土土样的干密度一直保持在初始设定值;而常规方法由于荷载作用在直径微小于环刀直径的透水石上而造成土样压缩。虽然文献[12]认为,土样压缩后的高度仍可用原初始高度代替,但经过计算可得,压缩导致土样的干密度随着上覆荷载的增加而增加。广西、安徽、河南的膨胀土在试验过程中,其干密度分别最大增加了2.96%,3.75%,1.48%。

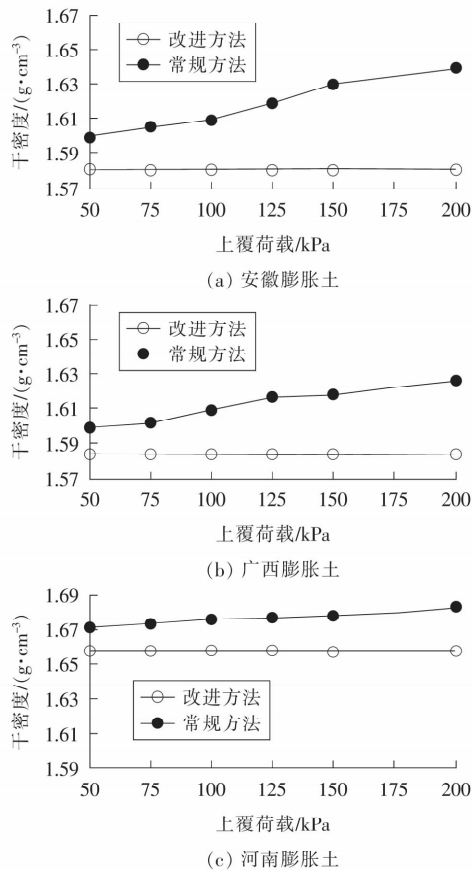


图2 土样干密度随试验方法变化的情况

Fig. 2 Variation of dry density with different test methods

3.2 试样初始含水率的对比

常规方法中,有荷膨胀试验是在土样固结变形稳定后,即每小时变形不超过 0.01 mm 时向容器中注入蒸馏水。由于试验中无法实时对土样取样进行含水率测试,故采用计算的方法计算当土样吸水膨胀恢复至初始高度时其含水率 ω 的变化。

设土样初始高度为 H_0 , 固结稳定后高度为 H'_0 , 土样初始含水率为 ω_0 , 土样初始重量为 m_0 , 则土样中初始水分质量为 $m_{w_0} = m_0 \times \omega_0$, 初始土颗粒质量为 $m_{s_0} = m_0 \times (1 - \omega_0)$, 吸水膨胀至初始

高度时增加水的质量为 $m_{w_1} = \rho_w \times (H_0 - H'_0) \times S$, 其中, S 为环刀面积。则在常规方法中,当试样初始干密度恢复至既定初始干密度时,其含水率的计算公式为:

$$\omega = (m_{w_0} + m_{w_1}) / m_{s_0} \quad (3)$$

根据式(3)计算可得3种膨胀土分别在常规方法和改进方法中不同上覆压力条件下的初始含水率(如图3所示)。

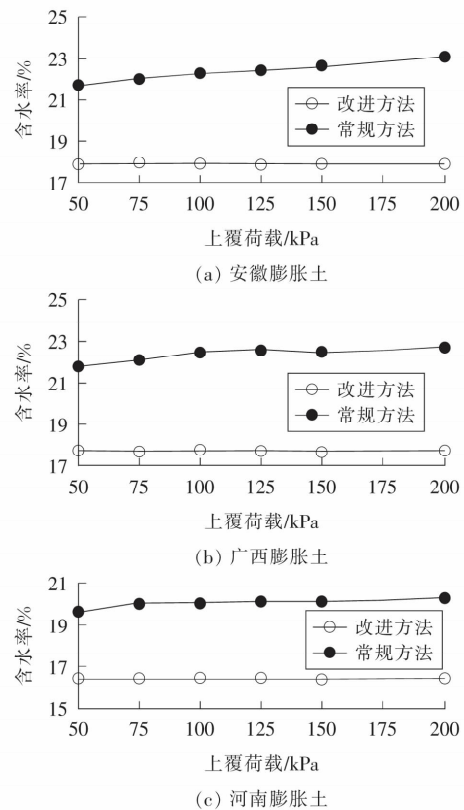


图3 土样初始含水率随试验方法变化的情况

Fig. 3 Variation of initial moisture content with different test methods

由图3可知,安徽、广西、河南膨胀土在试验过程中,试样由被压缩状态恢复至初始高度时,其含水率均增加了20%以上,其中,广西膨胀土的含水率变化最大,最大增大了30%。究其原因,是因为广西膨胀土试样的干密度较小,只有1.58 g/cm^3 ,膨胀土在前期固结过程中被压缩的程度较大;其次,其初始含水率比安徽膨胀土略低,使得膨胀土在吸湿过程中蒙脱石可吸引更多的水分子,所以其含水率增加得最为显著。相比较而言,河南膨胀土的含水率变化只有20%,这是因为其干密度较高,在常规方法中因固结而导致的压缩量较其

余 2 种土样均小,膨胀土吸湿恢复至初始干密度状态所需自由水更少,故含水率的变化最小。

3.3 试样有荷膨胀率的对比

常规方法与改进方法得到的有荷膨胀率的对比如图 4 所示。

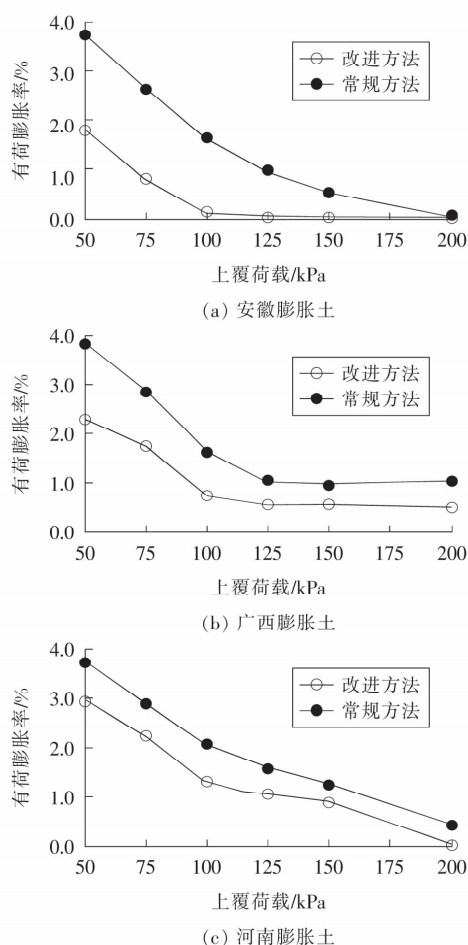


图 4 不同试验方法得到的有荷膨胀率

Fig. 4 Loaded swelling ratio with different test methods

由图 4 可以看出,由改进方法得到的有荷膨胀率均小于相应的由常规方法得到的有荷膨胀率。以图 4(a)为例,广西膨胀土在荷载分别为 50,75,100,125,150,200 kPa 下,根据常规方法求得的相应荷膨胀率分别为 3.76%,2.84%,1.66%,1.03%,0.95%,1.03%,由改进方法计算得到的有荷膨胀率分别为 2.27%,1.72%,0.72%,0.54%,0.54%,0.48%。这是因为在常规方法中,计算有荷膨胀率时是将试样压缩后的高度视为试样初始高度,即计算有荷膨胀率时,常规方法中的 H_0 小于改进方法,并且常规方法将吸湿膨胀过程中克服上覆压力所导致的压缩而产

生的有荷膨胀、以及在试样恢复到初始干密度后的有荷膨胀,均计入计算所得的有荷膨胀率中,故由常规方法计算得到的有荷膨胀率会大于改进方法得到的有荷膨胀率。

同时,在改进方法与常规方法得到的有荷膨胀率对比中可以发现,干密度是影响有荷膨胀率变化的一个重要因素。在本次对比试验中,安徽和广西膨胀土试验的干密度较河南膨胀土的要小得多,故其有荷膨胀率受试验方法变化的影响较大;其次,在相同干密度、初始含水率相近的情况下,安徽弱膨胀土的有荷膨胀率比广西中膨胀土的有荷膨胀率受试验方法的影响更大。

3.4 湿胀变形预测公式回归参数对比

作者采用文献[9]提出的膨胀土湿胀变形预测公式进行路基吸湿膨胀量的预测。该公式基于 3 种膨胀土的有荷膨胀、无荷膨胀以及膨胀力试验,由 3 种膨胀土试样在不同初始含水率状态下相对变形与相对压力的对应关系,用双曲线函数对相对变形和相对压力的对应关系进行拟合,可以将膨胀土有荷膨胀率和上覆压力之间的关系表示为:

$$\epsilon_s = \epsilon_m [1 - (P/P_m)^n] \quad (4)$$

式中: ϵ_s 为有荷膨胀率,%; ϵ_m 为无荷膨胀率,%; P 为上覆压力,kPa; P_m 为膨胀力,kPa; n 为拟合参数,与土性和初始干密度相关。

由式(4)可见,有荷膨胀率影响到路基湿胀变形量的精确性体现在回归参数 n 。在不同上覆荷载条件下,3 种膨胀土分别在常规方法与改进方法中得到的回归参数见表 2。由表 2 可知,常规方法与改进方法得到的回归参数 n 值相差较大,其中,安徽的差值高达 66.3%,这也势必造成由常规有荷膨胀率计算得到的膨胀土湿胀变形预测值与实际值有较大偏差。因此,为了提高膨胀土湿胀变形预测的精确度,建议使用改进方法进行有荷膨胀试验。

表 2 不同试验方法得到的回归参数 n

Table 2 Regression parameters of expansive soil by different testing methods

	安徽膨胀土	广西膨胀土	河南膨胀土
常规方法	0.154 2	0.087 1	0.161 2
改进方法	0.052 0	0.047 4	0.114 2
差值/%	66.3	45.5	29.1

4 结论

有荷膨胀率在膨胀土湿胀变形预测中有重要的意义,其精确性直接影响到路基湿胀变形的精确性。作者提出了在有荷膨胀试验中的环刀样上增大透水石直径的方法,使试样在保持恒定初始干密度的状态下进行有荷膨胀试验。

1) 在本研究提出的有荷膨胀试验改进及其与常规试验方法的对比中发现,常规方法中不同上覆荷载作用下初始干密度均大于既定值,当初始干密度恢复至既定值时,其初始含水率均有所增加,由常规方法测出的有荷膨胀率偏大;由改进方法得到的有荷膨胀率是严格对应其初始干密度状态的,满足膨胀土湿胀变形预测公式中的土样相同初始干密度状态的假设前提。

2) 根据改进的有荷膨胀试验结果得到的膨胀土湿胀变形预测公式中的回归参数 n 与常规方法中得到的相差较大,差值最大达 66.3%,建议使用改进方法进行有荷膨胀试验,并以此为基础进行膨胀土的湿胀变形预测。

〔参考文献〕

- [1] 郑健龙.公路膨胀土工程理论与技术[M].北京:人民交通出版社,2013.
ZHENG Jian-long. The theory and technology for highway expansive soil engineering [M]. Beijing: Renmin Communications Press, 2013.
- [2] 刘清秉,吴云刚,项伟,等. K_0 及三轴应力状态下压实膨胀土膨胀模型研究[J].岩土力学,2016(10): 2795-2802.
LIU Qing-bin, WU Yun-gang, XIANG Wei, et al. Swelling model study of expansive soil at K_0 and tri-axial stress state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016 (10): 2795-2802.
- [3] 章为民,王年香,顾行文,等.膨胀土的膨胀模型[J].水利水运工程学报,2010(1):69-72.
ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, GU Xing-wen, et al. An expansive model for expansive soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(1): 69-72.
- [4] 黄斌,何晓民,谭凡. K_0 应力状态膨胀土膨胀模型试验研究[J].岩土工程学报,2011(S1):449-454.
HUANG Bin, HE Xiao-ming, TAN Fan. Experimental study on expansion model of expansive soil in

state of K_0 stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(S1): 449-454.

- [5] Tu H, Vanapalli S K. Prediction of the variation of swelling pressure and one-dimensional heave of expansive soils with respect to suction using the soil-water retention curve as a tool [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015(53): 1213-1234.
- [6] 殷宗泽,周建,赵仲辉,等.非饱和土本构关系及变形计算[J].岩土工程学报,2006,28(2):137-146.
YIN Zong-ze, ZHOU Jian, ZHAO Zhong-hui, et al. Constitutive relations and deformation calculation for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 137-146.
- [7] 陈正汉.非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J].岩土工程学报,2014,36(2):201-272.
CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- [8] 魏星,王刚.干湿循环作用下击实膨胀土胀缩变形模拟[J].岩土工程学报,2014,36(8):1423-1431.
WEI Xing, WANG Gang. Modeling swell-shrink behavior of compacted expansive clays subjected to cyclic drying and wetting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1423-1431.
- [9] 郑健龙,张锐.公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J].中国公路学报,2015(3):1-10.
ZHENG Jian-long, ZHANG Rui. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015(3): 1-10.
- [10] 王保田 张福海.膨胀土的改良技术与应用[M].北京:科学出版社,2008.
WANG Bao-tian, ZHANG Fu-hai. Improved technology and application of expansive soil [M]. Beijing: Science Publisher, 2008.
- [11] 边加敏,蒋玲,王保田.试验方法对膨胀土有荷膨胀测定影响试验研究[J].公路,2013(5):156-160.
BIAN Jia-min, JIANG ling, WANG Bao-tian. Comparison and improvement to test methods of expansion capacity of expansive soil [J]. Highway, 2013 (5): 156-160.
- [12] 叶筱菊,吴久盛.膨胀土试验中有荷膨胀率取值的初探[J].地质学刊,2003,27(4):229-232.
YE Xiao-Ju, WU Jiu-Sheng. Preliminary discussions on loaded swelling rate value in expanded clay test [J]. Jiangsu Geology, 2003, 27(4): 229-232.