

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.003

侧限下地基泥岩浸水膨胀变形大尺寸模型试验*

王炳忠¹, 王起才^{1,2}, 张戎令^{1,2,3}, 王天双¹, 张唐瑜¹, 梁柯鑫¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 兰州交通大学甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 膨胀泥岩浸水后常常导致地基等上拱变形病害, 为研究膨胀泥岩浸水膨胀变形规律, 以兰新铁路第二双线一处典型膨胀地段泥岩为研究对象, 对3种不同厚度的重塑泥岩分别进行不同吸水量下的大比例膨胀变形模型试验, 模型尺寸为100 cm×60 cm×50 cm(长×宽×高)。试验结果表明: 不同厚度膨胀时程曲线随浸水量分级增加呈“阶梯形”增长, 前期浸水膨胀变形量增长迅速, 随含水量增加逐渐变缓, 土体膨胀速率与渗透速率密切相关; 浸水初期土体含水量由浸水管向四周梯度递减, 膨胀变形量与含水量具有一致性。膨胀变形量增加随吸水量增加逐渐减小, 膨胀变形量与吸水量呈良好的双曲线关系。厚度越大, 膨胀变形量也越大, 且膨胀变形量增加随厚度增加逐渐减小, 土体厚度作为上覆荷载对膨胀量起抑制作用。

关键词: 地基; 膨胀变形量; 吸水量; 厚度; 模型试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0337-06

Large Scale Model Test of Water Swelling Deformation of Mudstone under Lateral Confinement

WANG Bingzhong¹, WANG Qicai^{1,2}, ZHANG Rongling^{1,2,3}, WANG Tianshuang¹,
ZHANG Tangyu¹, LIANG Kexin¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Road & Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Immersion of expansive mudstone into water often leads to arch deformation damage of foundation, etc. In order to understand the expansive deformation of expansive mudstone, a typical expansive mudstone of the second double tracks of Lanxin Railway was used. In this study, large-scale expansive deformation model tests were conducted under different water absorption on three kinds of reshaping mudstone with different thickness. The size of the model is 100cm × 60cm × 50 cm (length × width × height). The experimental results show that for expansion of different thickness, the time travel curve shows a “ladder-shaped” growth law along with grading increase of water immer-

* 收稿日期:2018-05-19;修回日期:2018-06-27

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT_15R29)、中国铁路总公司科技研究开发计划课题(Z2015-G001)、青年人才托举工程(2015QNRC001)、甘肃省基础研究创新群体(145RJIA332)资助

作者简介: 王炳忠(1994-),男,硕士研究生。主要从事桥梁与隧道方面的研究。Email:982881022@qq.com

通讯作者: 王起才(1962-),男,教授,博导,博士。从事混凝土结构耐久性、新型工程材料与技术研究。

Email: wangqc@mail.lzjtu.cn

sion amount. In the early stage of expansion after immersion into water, the deformation increases rapidly, and then gradually slows down with the increase of water content, and the expansion rate of soil mass is closely related to the permeation rate. In the initial stage of immersion into water, the water content in the soil mass shows gradient decrease from the immersion pipe to the surrounding, and the expansive deformation amount is consistent with the water content. The amount of swelling deformation decreases with the increase of water absorption, and there is a good hyperbolic relationship between swelling deformation and water absorption. The larger the thickness is, the greater amount of expansive deformation is, and the increase of expansion deformation gradually decreases with the increase of thickness. As overburden load, the thickness of soil mass restrains the expansion amount. The test results can be used for analogy and reference in the design and construction of an expansive mudstone area in the future.

Keywords: foundation; expansive deformation; water absorption; thickness; model test

引言

膨胀泥岩是一类含有蒙脱石、伊利石、高岭石等强亲水性黏土矿物特殊软岩,具有吸水膨胀、失水收缩并反复变形的性质^[1],因而在路基土中控制或限制膨胀性土体使用,但随着我国交通建设进入大发展阶段,一些线路规划不可避免经过膨胀性地基土,由于施工对地基土外部环境的改变,往往在竣工运营时出现地基膨胀变形病害,给国家造成巨大经济损失^[2-8]。如兰新二线竣工后多处地段出现上拱病害,对线路正常运营带来极大考验。兰新二线出现上述问题原因主要有两点:(1)根据地基泥岩化学物理等基本性质分析显示,可判定为无膨胀性或弱膨胀性^[1],因而在设计阶段没有引起足够重视;(2)该线为无砟轨道高速铁路,上拱膨胀仅有4 mm调整范围^[9],对变形要求严格,且出现上拱病害后整治困难^[10];(3)膨胀变形量计算模式还不成熟,特别是微、弱膨胀土膨胀量预测存在一定困难。究其发生上拱变形条件,泥岩中含有膨胀性黏土矿物是膨胀变形内因,由于施工引起地基土上覆荷载或水流路径改变,致使地基土原来水平衡被打破,地基土含水量增高是膨胀变形外因。

国内外学者对膨胀土的研究始于20世纪60年代^[11-12]。文献[13-17]以我国不同地区膨胀土为研究对象,分别进行了不同初始压实状态、不同饱和度、不同含水量、不同上覆荷载等因素下膨胀土膨胀变形试验,得出膨胀量变化规律,并探索建立多因素耦合影响的膨胀变形量计算模型。上述研究主要集中在膨胀土不同影响因素下膨胀变形规律

研究,且大多为室内固结仪等小尺寸试验,而大尺寸试验能更好反映现场实际膨胀变形情况,这方面试验研究较为少见,因而进行大尺寸膨胀变形模型试验具有现实意义。

本文依托兰新二线高速铁路,以沿线一典型膨胀地段泥岩为研究对象,通过同一膨胀特性、干密度重塑泥岩,进行20、40、60 cm厚度侧限下分级浸水膨胀变形模型试验,研究厚度和过程含水量对膨胀变形量影响,可为以后高速铁路的设计、施工提供类比、参考。

1 室内试验

1.1 模型箱简介

模型箱尺寸为100 cm×60 cm×50 cm(长×宽×高),如图1所示。模型箱由4个侧面和1个底面组成;考虑到底部夯土等振动影响,底面板使用5 cm厚钢板;侧面板为由机玻璃制作,有机玻璃厚为5 mm,为防止侧向变形,在侧向焊接角钢做支撑,间距为20 cm。制作过程为先焊接角钢框架,再在底部焊接钢板,侧面安装有机玻璃板,有机玻璃之间、

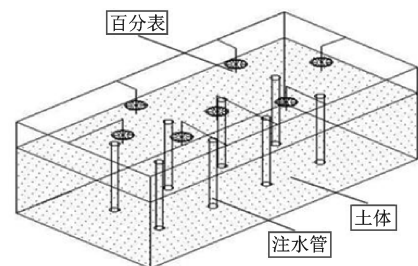


图1 模型箱示意

Fig.1 Schematic diagrams of the model tank

有机玻璃与钢板之间用玻璃胶密封,以防漏水。

1.2 试验方案及过程

试验所用土样取自兰新二线沿线一典型膨胀地段,试验前将挑选含砂石等杂物较少的原状泥岩砸碎成重塑土,过5 mm筛子,在自然状态下风干,为保证各组试验土样黏土矿物含量等自身膨胀特性相同,称取总土样后进行充分混合,测其风干含水率为2%,对其物理指标进行测定^[18],见表1。

表1 土样的基本物理性质

Table 1 Basic physical property of soil samples

蒙脱石/%	伊利石/%	高岭石/%	自由膨胀率/%	塑限/%	液限/%	塑性指数	阳离子交换/(mmol·kg ⁻¹)
2.1	2.8	1.4	28.6	22.4	45.6	23.2	287.47

3组不同模型试验厚度分别为20、40、60 cm,干密度均为1.6 g/cm³,将混合均匀的重塑土样按各组试验需土质量进行称取,分别为197.76、395.52、593.28 kg,在土体天然含水量基础上再增加3%,以达到设计含水量5%,用塑料膜覆盖密封24 h,使土体水分分布均匀;试验时将焖好的土样分层夯实在模型中,夯土前将竖向渗水管按设计位置固定,渗水管为底部密封、周围打孔的花管,考虑到水的自重作用,渗水管周围渗水孔由上到下依次减少,以尽量实现沿深度方向均匀渗水。夯土结束后开始浸水试验,浸水时采用分级注水方式,每级注水量为干土质量的2%,注水过程中花管水位高出土体表面2 cm,每次注水完毕后探测花管内水位,当花管内水分完全进入土体且膨胀变形值稳定时进行下一级注水,每级注水下24 h内膨胀变形值≤0.01 mm视为膨胀稳定,考虑到土体表面积较大,以及夯土、注水等引起试验误差,土体表面布置7个百分表,注水管间隔为20 cm,布置位置如图2所示。

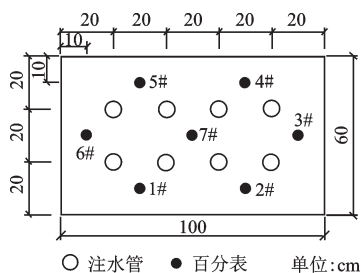


图2 器件平面布置

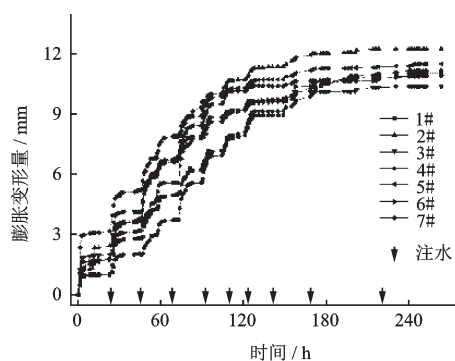
Fig.2 Layout of device

2 结果与分析

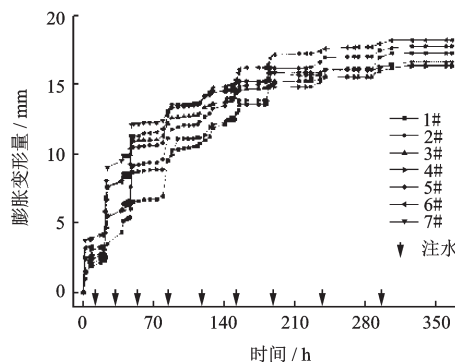
2.1 膨胀变形速度曲线特征

整理试验结果,绘制厚度 h 为20、40、60 cm大尺寸模型试验膨胀变形时程曲线,如图3所示。由图3可知:

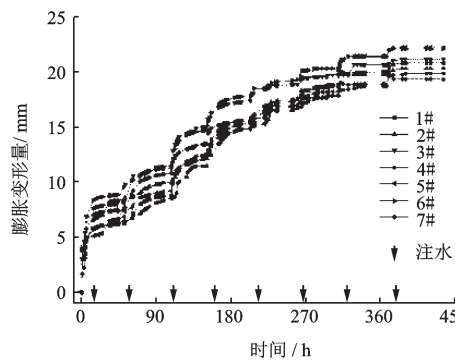
(1) 以20 cm厚度为例,分析各个百分表读数变化规律。试验按2%分级浸水,每级注水情况下,1#~7#百分表读数均呈阶梯形增长规律,且膨胀变形值各不相同。以4#、7#百分表为例:4#和7#百分



(a) $h=20$ cm



(b) $h=40$ cm



(c) $h=60$ cm

图3 不同厚度膨胀时程曲线

Fig.3 Expansion time curve with different thicknesses

表在 26、109、158、263.5 h 时膨胀变形值分别为 1.39 和 4.44 mm、7.85 和 10.15 mm、9.67 和 10.63 mm、11.15 和 10.88 mm，7# 位置处膨胀变形值分别是 4# 位置处的 319.2%、129.3%、110.0%、97.5%；随着注水量持续增加，4# 和 7# 处膨胀变形差值逐渐缩小；第一级注水量下两者差值最大，达到 319.2%，之后差值逐渐缩小。这是因为 7# 百分表位于模型箱中心位置，距离较近 (14.14 cm) 注水管有 4 个，而 4# 百分表距离较近 (14.14 cm) 注水管有 2 个，7# 位置处有更充足水分渗入该处土体，含水量增大较快，试验初期 7# 位置处膨胀变形值增加快于 4# 位置处，随着 7# 位置处含水量变化减缓，4# 位置处含水量变化加快，最终两者膨胀变形值趋于相同，总的来说土体膨胀变形量随含水量增高而增大。同时，每一级注水膨胀稳定后，1~6# 位置处膨胀变形值均存在较小差值，1~6# 百分表位置距离较近注水管均有 2 个，相距 14.14 cm，即水分渗流条件相同，膨胀变形量差异主要是由不同位置处土体夯土密实程度差异引起的。

(2) 以 20 cm 厚度为例，分析土体膨胀速率，26、109、158、263.5 h 时 4# 位置土体平均膨胀速率分别为 0.05、0.07、0.06、0.04 mm/h，7# 位置土体平均膨胀速率为 0.17、0.09、0.07、0.04 mm/h，4# 位置土体先加速增长，后减速增长，直至稳定；7# 位置土体一直减速膨胀。7# 位置处较近有 4 个注水管，且试验初期土体含水量较低，吸力大，土体渗透速率随含水量增高而减小，因而膨胀速率由大逐渐减小；4# 相比 7# 距离较近，渗过过程有一定距离，因而前期膨胀量增长较慢，之后随水分迁移量增多而增加，最后膨胀稳定，土体膨胀速率与渗透速率相关。

(3) 以 40 cm 厚度为例，分析土体膨胀变形随时间变化情况。土体按 2% 分级注水条件下，第 21、73、140.5、182、226、294、366 h 分别达到各级膨胀稳定，占总试验时间 6.0%、20.0%、38.4%、49.7%、61.7%、80.3%、100%；对应膨胀变形量分别为 5.11、10.03、13.61、14.85、15.76、16.69、16.95 mm，分别占总膨胀量 30.0%、59.2%、80.3%、87.6%、93.0%、98.4%、100%；可以看出，膨胀时间 6.6% 时膨胀变形为 30.0%，膨胀时间 61.7% 时膨胀变形为 93%。土体前期较短时间达到较大膨胀量，膨胀速度快；随着土体含水量增高，膨胀速度逐渐变慢，土体后期 38.3% 膨胀时间内膨胀变形量为 7%。说明前期膨胀变形快，后期逐渐减缓，直至稳定，土体膨

胀速率与渗透速率具有一致性。试验开始注水时土体含水量低，渗透系数大，水分迁移速度快，膨胀变形量增长快；随着注水量增加，土体含水量增大，渗透系数减小，水分迁移速度变慢，膨胀变形量增长变缓；同时，相邻两级膨胀稳定时间间隔分别为 22、27、31、41.5、44、68、72 h，相同注水量下，达到膨胀稳定时间逐渐变长，说明随着土体含水量增高，渗透性降低，相同水量更难渗入土体中。

(4) 试验结束时多余注水量逐渐积在土体表面，土体浸水量和膨胀变形量均不随注水量增加而变化，在土体不同深度处取样测其平均饱和含水率，饱和含水率在 23% 左右。20、40、60 cm 厚度试验结束时间分别为 263.5、366、435.67 h，随着厚度的增加，土体膨胀完成所用时间越多。由于厚度增加时，底部土体所受上覆土自重增大，土体横向、竖向渗透系数减小，水分在土体迁移时间变长。说明除土体含水量影响渗透系数外，荷载也是主要影响因素。

2.2 膨胀变形量与吸水量的关系

图 4 为 20、40、60 cm 厚度膨胀变形量与吸水量关系曲线。由图可知，吸水量为 4% 时，20、40、60 cm 厚度膨胀量分别占总膨胀量 46.8%、45.2%、49.0%；吸水量为 14% 时，20、40、60 cm 厚度膨胀量分别占总膨胀量 94.4%、93.0%、96.7%；说明试验开始阶段吸水量为 4% 时，不同厚度膨胀量约占 50%，土体吸水量再增加 10% 时，不同厚度膨胀量增加约占 45%，最后阶段吸水量增加 4% 时，不同厚度膨胀量增加约占 5%。由此可以看出，膨胀变形量增加随吸水量增加逐渐减小；通过对试验数据进一步分析发现，膨胀变形量与吸水量呈良好双曲线

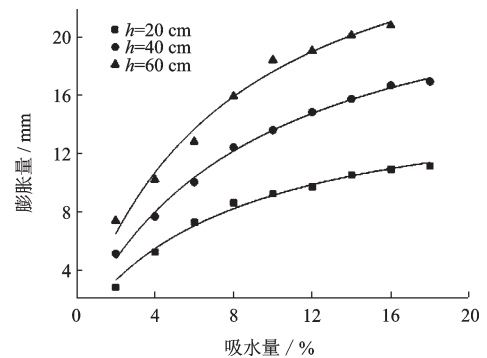


图 4 膨胀量与吸水量关系曲线

Fig.4 Relationship between expansive deformation and water absorption

规律,表达式见表2,回归方程为:

$$\delta = \frac{\Delta w}{a + b\Delta w}$$

式中, δ 为膨胀变形量,mm; Δw 为吸水量,%; a 、 b 为拟合参数。

表2 膨胀变形量与吸水量表达式

Table 2 Expression of expansion deformation and initial moisture content

厚度/cm	表达式	R^2
20	$\delta = \frac{\Delta w}{0.491 + 0.061\Delta w}$	0.96
40	$\delta = \frac{\Delta w}{0.346 + 0.039\Delta w}$	0.98
60	$\delta = \frac{\Delta w}{0.246 + 0.032\Delta w}$	0.96

上述膨胀变形量与吸水量关系规律为土体多向浸水膨胀试验结果,试验土样从浸水开始沿厚度方向整体膨胀。

2.3 膨胀变形量与厚度的关系

图5为膨胀变形量与厚度关系曲线。20、40、60 cm厚度膨胀变形量分别为11.15、16.95、20.82 mm,随厚度增加膨胀变形量增大;膨胀变形量分别为1.52倍、1.86倍,可知膨胀变形量增加随厚度的增加逐渐减小,因为厚度增加引起土体上覆自重增大,上覆土体自重对下部土体膨胀量起抑制作用。

以模型试验不同厚度下20 cm土体为基准,干密度取1.6 g/cm³,含水量取23%,计算厚度40 cm、60 cm下部20 cm所受上覆土体压力及膨胀量。上覆土体压力分别为3.86 kPa、7.72 kPa时,膨胀量分别为5.8 mm、3.87 mm,说明上覆压力为2倍时,膨

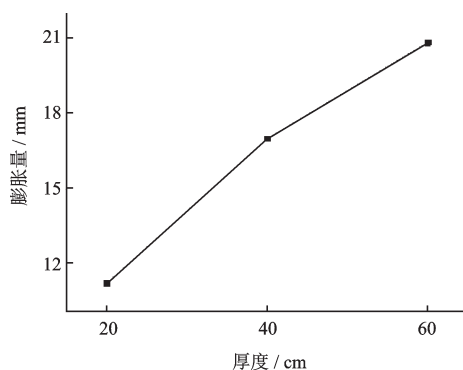


图5 膨胀变形量与厚度关系

Fig.5 Relationship between expansive deformation and thicknesses

胀量为1.5倍关系,即膨胀量与上覆压力呈非比例关系。

3 结论

(1)侧向浸水条件下,20、40、60 cm厚度的膨胀时程曲线随注水量的分级增加呈“阶梯形”增长规律;前期浸水时膨胀量增长迅速,后期逐渐变缓,且厚度越大,土体膨胀完成时间越长,土体膨胀变形速率与渗透速率密切相关。

(2)试验初期距离浸水管较近位置土体含水量迅速增高,膨胀变形速率快,较远处土体含水量增加缓慢,含水量与膨胀变形量具有一致性。

(3)随着吸水量增加,膨胀变形量的增加速率逐渐减小,通过对试验数据进一步分析,发现膨胀变形量与吸水量呈良好双曲线规律。

(4)厚度越大,膨胀变形量越大,且膨胀变形量的增加随厚度增加逐渐减小,上覆土体自重对下部土体膨胀起抑制作用。

参考文献:

- [1] 高速铁路设计规范:TB10621—2014[S].北京:中国铁道出版社,2014.
Design specification for high speed railway: TB10621—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [2] 廖世文.膨胀土与铁道工程[M].北京:中国铁道出版社,1984:166-168.
Miao Sh W. Expansive soil and railway engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984: 166-168.
- [3] 陈伟志,蒋关鲁,赵慧爽,等.铁路路基下膨胀土地基浸水响应现场试验[J].岩土工程学报,2014,36(8): 1507-1514.
Chen W Zh, Jiang G L, Zhao H Sh, et al. Field tests on soaking response of expansive soil foundation under railway subgrade [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1507-1514.(in Chinese)
- [4] Ito M, Azam S. Engineering characteristics of aglaciolacustrine clay deposit in a semi-arid climate[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(4): 551-557.
- [5] Ito M, Azam S. Determination of swelling and shrinkage properties of undisturbed expansive soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, 28(4):

- 413-422.
- [6] 杨果林,邱明明,杨 啸,等. 高铁膨胀土新型路堑基床动力特性与参数敏感性[J]. 交通运输工程学报, 2016,16(1): 63-72.
Yang G L, Qiu M M, Yang X, et al. Dynamic characteristics and parameter sensitivities of new cutting subgrade for high-speed railway in expansive soil area [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 63-72.(in Chinese)
- [7] Fredlund D G, Rahardjo H. Unsaturated soils mechanics in engineering practice [M]. New York: Wiley, 2012:16-21.
- [8] Tripathy S, Subb A, Rao K S. Cyclic swell-shrink behavior of a compacted expansive soil [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(1): 89-103.
- [9] 铁路工程特殊岩土勘察规范: TB10038—2012[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
Specification for special geotechnical investigation of railway engineering: TB10038—2012[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [10] 高建敏. 高速铁路无砟轨道不平顺谱的比较分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 715-723.
Gao J M. Comparative analysis of power spectrum density of ballastless track irregularities of Chinese high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 715-723.(in Chinese)
- [11] 秦朝辉. 云桂铁路膨胀土膨胀特性与强度特性现场试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
Qin Zh H. Field test and study on expansive characteristics and strength characteristics of expansive soil in Yunnan Guangxi Railway [D]. Changsha: Central South University, 2012.(in Chinese)
- [12] 彭东黎,胡 甜,郭云开. 基于 Fuzzy-AHP 的膨胀土边坡稳定性多级综合评判[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 622-628.
Peng D L, Hu T, Guo Y K. Evaluation of expansive soil slope stability based on Fuzzy-AHP method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(2): 622-628.(in Chinese)
- [13] 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, 38(10): 2 795-2 802, 2 809.
Liu Q B, Wu Y G, Xiang W, et al. Swelling model study of expansive soil at K_0 and triaxial stress state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 38(10): 2 795-2 802, 2 809.(in Chinese)
- [14] 李化云,张志强,胡 端,等. 三向应力下膨胀土含水量与膨胀率关系研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 35(6): 1 539-1 544.
Li H Y, Zhang Zh Q, Hu D, et al. Study on the relationship between water content and expansion ratio of expansive soil under three dimensional stress state [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 35(6): 1 539-1 544.(in Chinese)
- [15] 张福海,王保田,刘汉龙. 压实膨胀土路基的膨胀变形规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 206-210.
Zhang F H, Wang B T, Liu H L. Research on deformation disciplines of compacted expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 206-210.(in Chinese)
- [16] 赵艳林,曾召田,吕海波. 大气作用下膨胀土地基的水分迁移与胀缩变形分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(6): 659-665.
Zhao Y L, Zeng Zh T, Lyu H B. Analysis of water migration and deformation of expansive-soil foundation under atmospheric influence [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(6): 659-665.(in Chinese)
- [17] 李献民,王永和,杨果林,等. 击实膨胀土工程变形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 826-830.
Li X M, Wang Y H, Yang G L, et al. Test study on engineering deformation characteristics of compacted expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 826-830.(in Chinese)
- [18] 铁路工程土工试验规程: TB10102—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
Code for soil test of railway engineering: TB10102—2010 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.(in Chinese)

(本文责编:赵 霞)