

DOI: 10.11779/CJGE201408017

铁路路基下膨胀土地基浸水响应现场试验

陈伟志^{1, 2}, 蒋关鲁^{1, 2}, 赵慧爽¹, 袁泽华¹, 王智猛³, 李安洪³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031;
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 在工程建设中, 膨胀土大都属于非饱和土范畴。对高速铁路无砟轨道路基而言, 膨胀土的胀缩变形可能加剧线路的不平顺性, 影响高速铁路的正常运营。为研究铁路路基荷载下非饱和膨胀土土层在人工浸水后的变形特征, 结合云桂铁路建设, 设计并开展了铁路原型路基荷载下膨胀土地基现场浸水试验, 并监测了从路基填筑开始到人工浸水结束时膨胀土地基与路基本体变形及浅层土水分的时程变化。试验结果揭示了膨胀土地基浸水饱和后的极限相对膨胀量、膨胀变形沿路基横向与地基深度的分布规律以及地基表面膨胀变形沿路基本体的衰减特征。基于试验成果, 初步提出了以路基表面膨胀变形为0作为控制标准确定路基临界填高的设计思路。现场试验的设计原则与实施方法也可为今后研究铁路路基下膨胀土地基胀缩特性提供参考。

关键词: 铁路路基; 膨胀土地基; 现场浸水试验; 膨胀变形; 高速铁路

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)08-1507-08

作者简介: 陈伟志(1985-), 男, 福建永春人, 博士研究生, 主要从事高速铁路路基及地基处理设计等方面研究工作。
E-mail: chenweizhi55@163.com。

Field tests on soaking response of expansive soil foundation under railway subgrade

CHEN Wei-zhi^{1, 2}, JIANG Guan-lu^{1, 2}, ZHAO Hui-shuang¹, YUAN Ze-hua¹, WANG Zhi-meng³, LI An-hong³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The expansive soil is classified as the unsaturated one in engineering construction. The swelling and shrinkage deformation of the expansive soil may cause intensified line harshness for the ballastless track on high-speed railway subgrade, affecting the normal operation of high-speed railway. To study the deformation characteristics of unsaturated expansive soil layer under lining of railway subgrade after artificial soaking, considering the construction of Kunming-Nanning Railway, field soaking tests on expansive soil foundation under railway subgrade are designed and carried out. Meanwhile, the time histories of deformations of expansive soil foundation and subgrade body, and moisture migration of shallow clay are measured from the beginning of subgrade filling to the end of artificial soaking. The test results reveal the ultimate deformation of relative expansion of expansive soil foundation after being soaked and saturated, distribution of swelling deformation along the cross section of subgrade and the depth of foundation as well as decay characteristics of swelling deformation of ground surface along the subgrade body. Based on the test results, the objective of the subgrade surface without swelling deformation control, which is used to determine the critical height of subgrade, is initially derived. The design principles and implementation methods of field tests can be used as a reference method for studying the swelling and shrinkage characteristics of expansive soil foundation under railway subgrade.

Key words: railway subgrade; expansive soil foundation; field soaking test; swelling deformation; high-speed railway

0 引言

膨胀土是一种高塑性、高分散性的特殊土, 其变形与破坏具有反复性、多发性和长期潜在性等特点, 房屋、公铁路及其土工附属结构、地下管道、渠道边坡及其他工程建筑经常遭受膨胀土破坏, 造成巨额的

经济损失^[1-2]。

膨胀土除了在外加荷载作用下的压缩变形^[3], 胀

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2010G003-F)

收稿日期: 2014-01-10

缩变形也是重要的变形特性之一。非饱和膨胀土的水分入渗及体积变化是一个极其复杂的水力-力学过程^[4-5], 对此, 国内外学者结合工程建设需要开展了一系列试验研究^[6-11], 如杨果林等^[6]、王年香等^[7]、王亮亮等^[8]通过大比例尺模型试验研究了水分入渗条件下膨胀土路基的胀缩变形、桩土相互作用机理及高速铁路路堑基床的动静态特性; Ng 等^[9]、孔令伟等^[10]、李雄威等^[11]通过现场试验分析了膨胀土边坡对气候变化的响应特征。

对一般铁路工程而言, 膨胀土地基的胀缩变形对路基影响较小, 常忽略不计, 而高速铁路无砟轨道路基技术标准高, 对工后变形控制严格^[12], 因此, 在高速铁路工程设计中, 膨胀土地基的胀缩变形就必须加以考虑。目前, 国内外针对铁路路基荷载下膨胀土地基湿化变形的研究成果尚不多见。结合云桂铁路建设, 在现场进行了铁路路基下膨胀土地基现场浸水试验, 通过人工浸水方式对非饱和膨胀土地基进行湿化饱和, 研究膨胀土地基与路基本体的变形响应及土层的水分变化规律。

1 现场浸水试验概况

1.1 路基下膨胀土地基变形定性研究

本文变形正值代表地基产生膨胀隆起, 负值代表地基产生压缩或收缩变形。膨胀土地基变形 S 可分为两个方面^[2]: ①外加荷载作用下的压缩变形 S_c ; ②外加荷载与水分入渗或浸水共同作用下的湿膨胀、湿化变形 S_e , 或外加荷载与蒸发、风干及地下水位下降而产生的收缩变形 S_s 。膨胀土地基任意时刻 t 的变形可表示为

$$S_t = S_{ct} + S_{et} + S_{st} \quad (1)$$

在路基加载、稳载(考虑降雨影响)及人工浸水条件下, 膨胀土地基变形-时间关系曲线可定性描述为如图 1 所示。若不考虑地基土水分蒸发、大气降雨(或其他水分入渗)且地下水位保持不变, 膨胀土地基在路基加载、稳载作用下呈压缩变形, 且变形逐渐趋于稳定, 如图 1 中的理想压缩曲线。然而, 在野外开展路基填筑试验, 难免受外界气候环境影响, 膨胀土地基变形也就包括了压缩变形、膨胀或收缩变形, 在路基填土期及稳载前期(如图 1 中 AB 段), 地基在外加荷载作用下主要表现为压缩变形; 随着地基压缩变形趋于稳定, 外界气候影响逐渐起主导作用, 地基呈胀缩趋势(如图 1 中 BC 段)。

1.2 试验场地地质条件

试验场地位于弥勒断陷盆地内, 由地质勘查报告可知, 大部分膨胀土为颜色交混的斑状黏土, 主要是

由第三系泥岩、泥灰岩和黏土岩经风化淋滤后, 被水流搬运而形成的冲积-湖积膨胀土, 黏土切面光滑, 黏性强, 局部可见钙质结核, 裂隙发育, 有的地方层理清晰, 下伏基岩为三叠系个旧组白云岩, 试验场地的初始地下水位为 5.0~5.8 m。弥勒膨胀土的基本物理性质^[3]: 重度为 18.49~20.98 kN/m³, 比重为 2.646~2.745, 液限为 40.84%~80.62%, 塑限为 24.20%~44.83%, 塑限指数为 21.86~35.79, 自由膨胀率为 48%~51%, 膨胀势判别中一强膨胀。其中膨胀势是根据 Williams 等^[13]黏土膨胀势判别法判定。

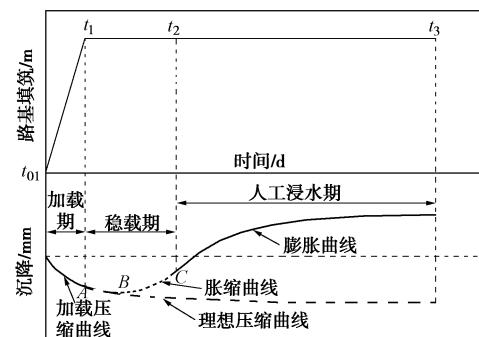


图 1 膨胀土地基变形曲线

Fig. 1 Curve of deformation of expansive soil foundation

1.3 浸水方案及测试仪器布置

试验段路基填高为 2.7 m, 仅考虑 CRTS I 型板式无砟轨道荷载不计列车荷载, 结合现场 A、B 组填料重度 (20 kN/m³) 与文献[12]换算土柱法, 可将轨道荷载换算为分布宽度 3.0 m, 高度 0.8 m 的土柱, 并通过填筑 A、B 组填料模拟轨道荷载。膨胀土地基浸水湿化主要以人工浸水方式进行, 为确保水分入渗顺利, 节约试验时间, 试验设计了砂孔、砂槽与砂垫层等多面浸水(见图 2), 即在路基中心及左右路肩下钻孔填砂(孔深 6 m、孔径 127 mm), 沿路基纵向孔间距 0.6 m, 孔口设置截面为 0.3 m×0.3 m 砂槽, 路基底部铺设 10 cm 粗砂垫层, 在路基坡脚外 0.8 m 处修筑蓄水沟渠(见图 2)以便人工浸水。此外, 在砂垫层及路基边坡上铺设复合土工膜, 避免路基本体被水浸泡软化。

为了研究土质路基荷载下浸水饱和后膨胀土地基与路基本体的变形响应特征及土壤水分变化规律。试验采用沉降板、位移观测桩、分层沉降计、剖面沉降管测试膨胀土地基变形; 在路基高度 $h=0.9$ m, $h=1.9$ m 及 $h=2.7$ m 处布置沉降板测试路基本体变形; 采用德国 IMKO 公司生产的 TRIME-PICO-IPH TDR 土壤剖面水分测量仪测试浅层地基土水分变化, TDR 传感器基本技术指标: 测量范围为 0~40 cm³/cm³ 时, 测量精度为 ±2 cm³/cm³, 测量范围为 40~70 cm³/cm³ 时,

测量精度为 $\pm 3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 测量管长度3 m。图2为铁路路基结构及测试仪器布置。

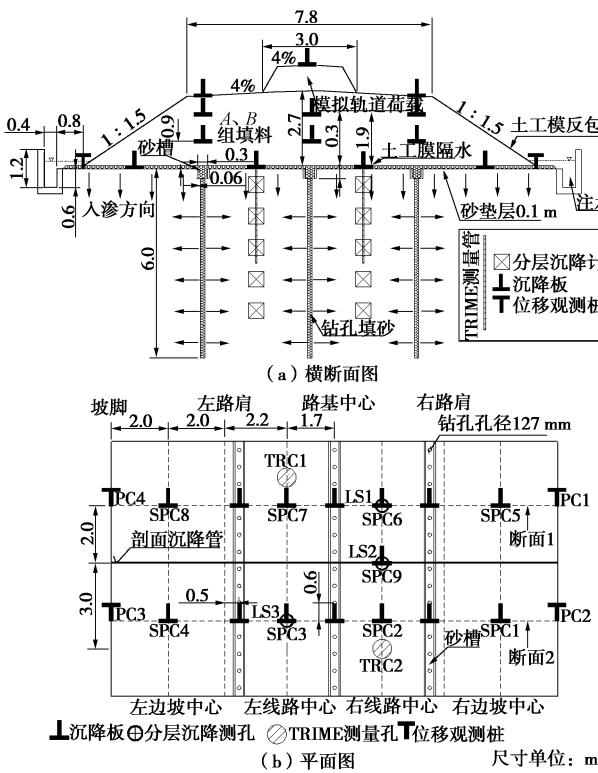


图2 铁路路基结构及测试仪器布置

Fig. 2 Structure of railway subgrade and layout of instruments

1.4 试验方法与过程

(1) 开挖试坑

按深度1.0 m, 坡度1:1.5开挖试坑, 沿试坑底部四周设置截水沟渠, 并用平地机整平试坑底部。

(2) 钻孔填砂与砌筑砂槽

通过液压钻机钻孔填砂, 钻孔时必须保证孔的垂直度, 成孔后立即用中、粗砂填满捣实。砂槽开挖尺寸按图2实施, 开挖时应确保砂孔位于砂槽中线位置, 砂槽两侧砌砖, 槽内填满中、粗砂。

(3) 安装与埋设测试仪器

按图2仪器布置要求, 安装与埋设沉降板、位移观测桩、分层沉降计、剖面沉降管及TDR剖面土壤含水率测量系统。限于TDR测量管长度, 采用IMKO土钻钻孔取土与烘干法, 测定路基填土初期、人工浸水前、后地基土含水率。

(4) 填筑路基

首先, 用压路机对试验区进行静压, 之后铺设厚10 cm的粗砂垫层与复合土工膜; 然后, 用A、B组填料配合装载机、平地机、压路机、小夯机等机械设备分层填筑路基, 压实度标准按文献[12]规定执行; 最后, 用小挖机按坡度1:1.5对路基边坡进行刷坡, 再用复合土工膜反包路基边坡。路基填高及降雨量与

时间关系见图3。

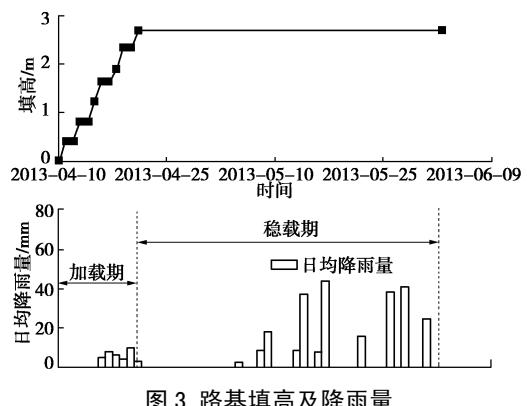


图3 路基填高及降雨量

Fig. 3 Height of subgrade and rainfall events

(5) 人工浸水

地基压缩变形稳定后即可通过浸水沟渠进行人工浸水(见图4), 变形稳定标准为变形速率小于0.05 mm/h^[14]。本次人工浸水历时为92 d, 蓄水沟渠水头保持在40 cm以上。浸水初期变形观测频率为1 d/次, 1个月之后改为2 d/次, 2个月之后膨胀变形趋于稳定则改为3 d/次。

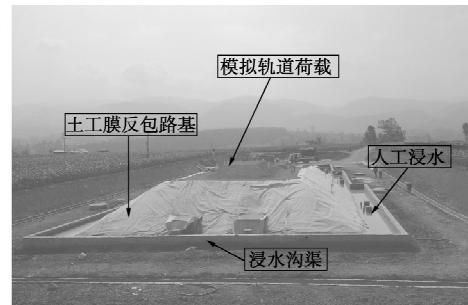


图4 路基荷载下膨胀土地基人工浸水

Fig. 4 Artificial soaking of expansive soil foundation under subgrade load

2 试验结果与分析

2.1 膨胀土地基变形分析

(1) 变形随时间变化规律

图5为地基表面典型观测点的变形测试结果, 由图5可知, 地基表面的变形曲线整体上呈“S”型变化, 包括4个阶段:

第1阶段为路基加载期(2013年4月10日—2013年4月21日), 地基表面呈压缩变形, 其中线路中心与边坡中心位置的变形发展迅速, 坡脚位置的变形发展缓慢。

第2阶段为稳载前期(2013年4月22日—2013年5月8日), 即图8中AB段, 结合图3可知, 期间几乎无外界大气降雨, 地基表面压缩(或收缩)变形继续发展并逐步趋于稳定。

第 3 阶段为稳载后期 (2013 年 5 月 9 日—2013 年 5 月 31 日), 如图 8 中 BC 段, 受大气降雨影响, 变形曲线呈波动变化, 即降雨后地基膨胀, 天晴后地基收缩, 这主要是由于试验设计了砂孔、砂槽及砂垫层等, 便于水分入渗与蒸发, 路基底部的膨胀土对外界气候变化响应提高。截止人工浸水前, 地基表面累积变形为膨胀隆起。

第 4 阶段人工浸水期 (2013 年 6 月 1 日—2013 年 9 月 1 日), 地基表面表现为膨胀隆起, 变形曲线呈双曲线变化, 即浸水初期变形曲线快速增大, 地基表现出似弹性材料特征, 随着时间的推移, 膨胀变形发展减缓, 最后逐渐趋于稳定。

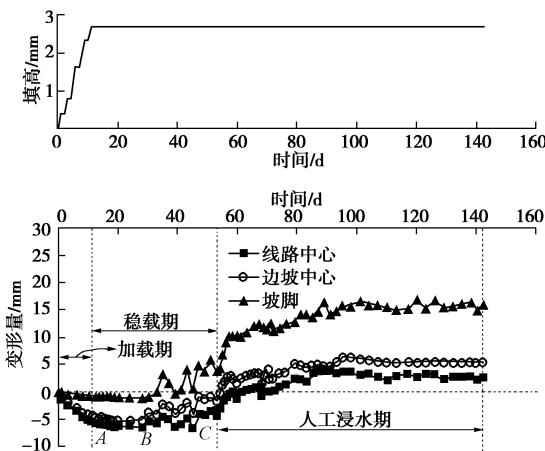


图 5 地基表面变形

Fig. 5 Deformation of ground surface

图 6 为图 5 中 3 个测点的地基表面变形速率。由图 6 可知, 在路基填土初期, 地基压缩变形速率较大, 然后减小, 在稳载前期变形速率趋于平缓, 这与土体中超孔隙水压力的消散过程有关; 在稳载后期, 受外界气候影响, 地基表面变形速率波动明显, 该段与地基土中含有膨胀性黏土矿物, 浸水膨胀, 失水收缩有关。在人工浸水期, 膨胀变形速率随时间的增加而逐渐减小, 最后趋于平缓, 这主要是由于浸水初期土层含水率较低, 尤其是浅层土, 土颗粒周边的结合水膜较薄^[15], 毛细管张力较小, 土层吸水能力较大, 加之裂隙通道较宽敞, 水分入渗比较快, 地基浸水后产生的膨胀变形量较大; 随着土层含水率增加, 土颗粒周围的结合水膜变厚, 毛细管水增多, 土体吸水能力减小, 加之土体的膨胀变形填满裂隙通道, 水分入渗困难。

图 7 为剖面沉降管的测试结果。由图 7 可知, 地基表面变形 - 时间 - 路基宽度 3 者之间的关系曲面呈“河谷”状发展, 在路基填土期、稳载前期, 地基呈压缩趋势, 沿路基横向, 路基中心压缩变形最大, 坡脚压缩变形最小, 压缩变形由路基中心向坡脚呈衰减

变化; 在稳载后期及人工浸水期, 地基以膨胀变形为主, 沿路基横向, 路基中心膨胀变形最小, 坡脚膨胀变形最大, 膨胀变形由路基中心向坡脚呈递增变化。

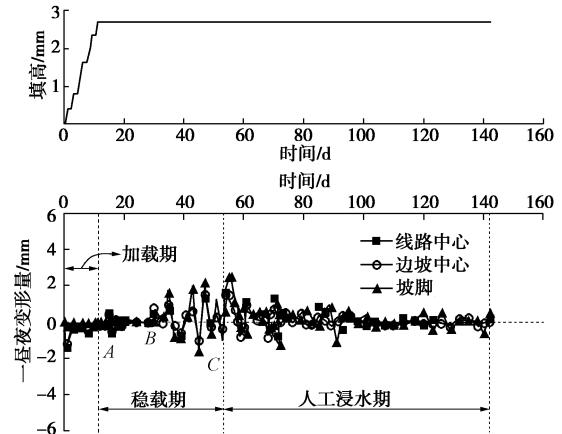


图 6 地基表面变形速率

Fig. 6 Deformation rate of ground surface

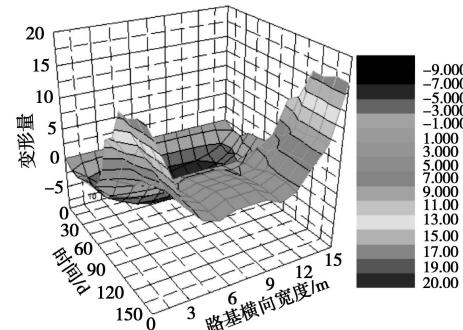


图 7 地基表面变形 - 时间 - 路基宽度关系

Fig. 7 Relationship among deformation of ground surface, time and width of subgrade

图 8 为膨胀土地基分层变形测试结果 (文中仅分析 LS1 孔)。由图 8 可知, 浅层土 (地基深度 0.5 m, 1.5 m 及 2.5 m) 变形与表面变形类似, 曲线在整体上也呈“S”型变化, 包括 4 个阶段; 随着深度的增加, 压缩与膨胀变形均呈衰减变化, 以致较深土层 (地基深度 3.5 m 与 4.5 m) 变形曲线趋于“直线”型变化。分层变形测试结果与表面变形有着良好的对应关系, 验证了分层变形测试的正确性。

(2) 相对膨胀量分析

在高速铁路运营中, 通常主要考虑膨胀土地基相对膨胀量对线路平顺性的影响, 定义相对膨胀量 S_a 为

$$S_a = S_e - S_c , \quad (2)$$

式中, S_e 为膨胀土地基浸水饱和后地基产生的膨胀变形值, S_c 为路基荷载下地基压缩变形的稳定值。

针对某一厚度土层 $\Delta H_{mn} = H_n - H_m$ ($H_n > H_m$) 定义相对膨胀率 δ_{amn} 为

$$\delta_{amn} = (S_{am} - S_{an}) / \Delta H_{mn} , \quad (3)$$

式中, S_{am} , S_{an} 分别为膨胀土地基浸水饱和后地基深度 H_m , H_n 处产生的相对膨胀量。

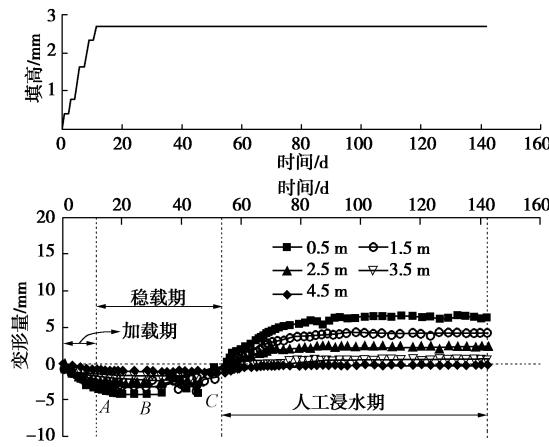


图 8 地基分层变形

Fig. 8 Deformation of foundation at different layers

表 1 总结了地基表面相对膨胀量的统计结果。由表 1 可知, 膨胀土地基浸水饱和后, 对地基表面而言, 路基线路中心、边坡中心、坡脚位置的相对膨胀量平均值分别为 8.14, 8.93, 15.53 mm。

图 9 为地基表面相对膨胀量沿路基横向分布。由图 9 可知, 相对膨胀量沿路基横向呈“锅底”形分布, 与剖面沉降测试结果类似。相对膨胀量由路基中心向坡脚呈递增趋势, 其递增梯度在路基中心与边坡中心之间较小, 在边坡中心与坡脚之间则迅速增大, 这与地基反力大小沿路基横向分布特征是相对应的^[16]。

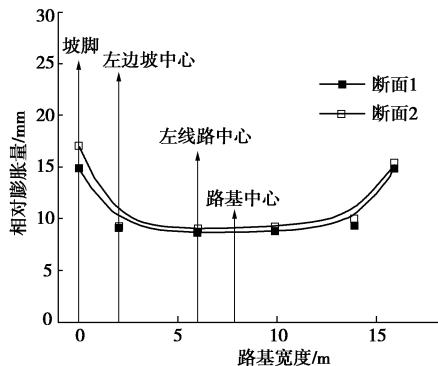


图 9 地基表面相对膨胀量横向分布

Fig. 9 Distribution of relative expansion of ground surface

图 10 为相对膨胀率沿地基深度分布。由图 10 可

知, δ_{amm} 随深度的增加而衰减, 在浅层土中 δ_{amm} 衰减较快, 在深度 0~2.0 m 范围内 δ_{amm} 的衰减幅度为 59.2%~62.8%, 在较深土层中 δ_{amm} 衰减较慢, 这主要是由于表层膨胀土上覆自重应力与附加应力总和较小、土体初始饱和度较低。

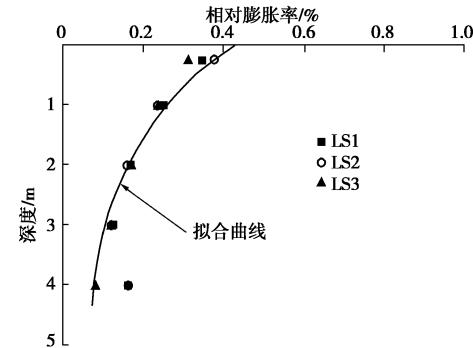


图 10 相对膨胀率沿地基深度分布

Fig. 10 Distribution of relative expansion ratio along foundation depth

2.2 路基本体变形分析

(1) 变形随时间变化规律

图 11 为路基本体高度 $h=0.9$ m, $h=1.9$ m 及 $h=2.7$ m 典型测点的变形测试结果。对比图 6 与图 11 可知, 路基本体不同高度的变形曲线与地基表面变形曲线类似, 曲线整体上均呈“S”型变化, 曲线的变化特征文中不再加以赘述。

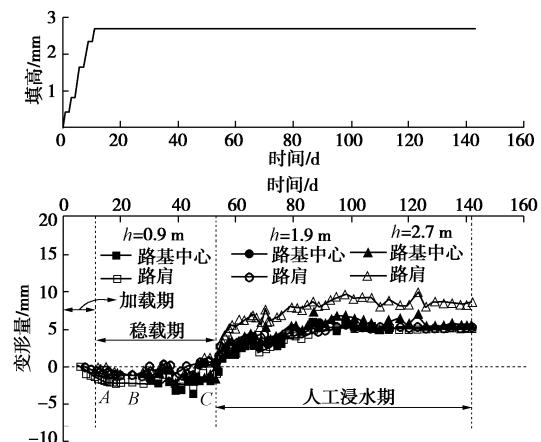


图 11 路基本体变形

Fig. 11 Deformation of subgrade

(2) 相对膨胀量分析

表 1 地基表面及路基本体相对膨胀量

Table 1 Relative expansion of ground surface and subgrade

(%)

膨胀变量	地基表面			路基本体					
	线路中心	边坡中心	坡脚	$h=0.9$ m		$h=1.9$ m		$h=2.7$ m	
最大值	10.20	10.00	17.00	7.30	7.40	6.40	6.80	5.80	6.50
最小值	6.80	8.10	14.80	7.10	6.30	5.50	5.60	5.80	6.10
平均值	8.14	8.93	15.53	7.20	7.26	6.20	6.43	5.80	5.93
标准差	1.31	0.89	1.02	0.07	0.26	0.32	0.52	0	1.70
变异系数	14.30	9.95	6.56	0.58	2.30	3.73	5.58	0	23.53

表 1 也给出了路基本体相对膨胀量的统计结果。由表 1 可知, 路基高度 0.9 m 路基中心与路肩的相对膨胀量平均值分别为 7.20, 7.26 mm; 路基高度 1.9 m 路基中心与路肩的相对膨胀量平均值分别为 6.20, 6.43 mm; 路基高度 2.7 m 路基中心与路肩的相对膨胀量平均值分别为 5.80, 5.93 mm。

图 12 为路基本体相对膨胀量沿路基横向分布。由图 12 可知, 不同路基高度的相对膨胀量沿路基横向均呈“V”形分布, 路基中心的相对膨胀量小于左右路肩的相对膨胀量, 这可能与路基中心填筑模拟轨道荷载的 A、B 组填料相关; 随着路基高度的增加, 路基中心与路肩的相对膨胀量减小, “V”形分布特征越明显。结合图 9 分析结果可知, 无论是地基表面还是路基本体, 路基两侧的相对膨胀量并不完全对称分布, 存在变形差, 其原因主要是地基的膨胀性黏土矿物分布、颗粒组成、密实度及土粒聚合等情况具有随机性。

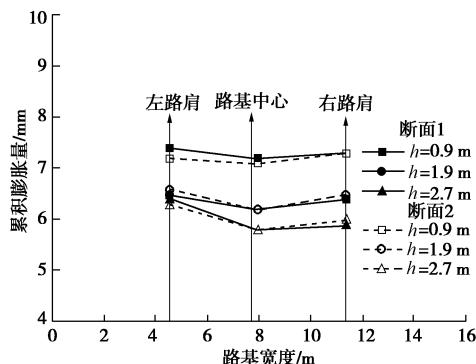


图 12 相对膨胀量横向分布

Fig. 12 Distribution of expansion along cross section of subgrade

(3) 地基膨胀变形沿路基本体的衰减分析

对比表 1 中地基表面与路基本体的相对膨胀量可知, 路基本体的相对膨胀量均小于地基表面的相对膨胀量, 且相对膨胀量随路基填高的增加而呈衰减变化。这主要是由于膨胀土地基在土质路基荷载作用下产生的压缩变形逐渐趋于稳定, 外界降雨或人工浸水将导致地基产生膨胀变形, 受上覆路基荷载约束, 膨胀土地基在路基底部形成膨胀力, 路基本体在膨胀力的作用下发生压缩变形与微小的侧向变形, 在一定的程度上抵消了地基表面反馈的膨胀变形。定义相对衰减率 λ_a 为

$$\lambda_a = (S_{ab} - S_{ah}) / S_{ab}, \quad (4)$$

式中, S_{ab} 为地基表面的相对膨胀量, S_{ah} 为路基高度 h 处的相对膨胀量。

结合试验数据与式(4)可求得路基本体不同高度的 λ_a 。 $h=0.9\text{ m}$ 时路基中心和路肩的 λ_a 分别为 11.5%, 10.8%; $h=1.9\text{ m}$ 时路基中心和路肩的 λ_a 分别为 23.8%,

21.0%; $h=2.7\text{ m}$ 时路基中心和路肩的 λ_a 分别为 28.8%, 27.2%。

图 13 为相对衰减率与路基高度的关系, 由图 13 可知, 路基中心和路肩的 λ_a 随路基填高的增加呈递增变化, 对同一路基高度而言, 路基中心的 λ_a 略大于路肩的 λ_a , 路基中心 λ_a 与 h 可用线性关系式描述为

$$\lambda_a = 11.38h. \quad (5)$$

路肩 λ_a 与 h 可用线性关系式描述为

$$\lambda_a = 10.51h. \quad (6)$$

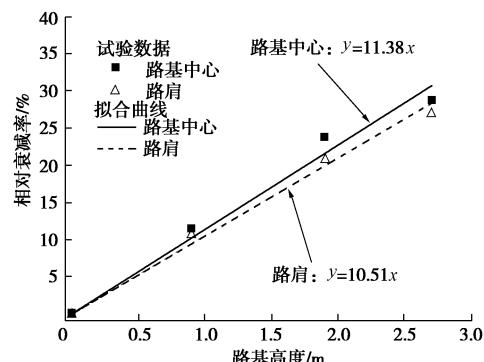


图 13 相对衰减率与路基高度的关系

Fig. 13 Relationship between relative decay rate and subgrade height

由上述分析结果可知, 地基表面的膨胀变形沿路基本体呈衰减变化, 这对以控制变形为主的高速铁路而言是有利的。一般认为以地基表面膨胀变形为 0 作为控制标准, 即可确定膨胀土浸水饱和后地基表面不发生膨胀的路基临界高度; 然而, 试验结果表明地基膨胀变形沿路基本体的衰减特征是不可忽视的, 因此, 以路基表面膨胀变形为 0 作为控制标准确定路基临界填高, 也可作为一种设计思路。

2.3 浅层地基土水分变化分析

TDR1 孔和 TDR2 孔呈斜对称布置, 测量管埋深为 2.8 m, 限于篇幅文中仅针对 TDR1 孔测试结果进行分析。图 14 为不同深度土层体积含水率变化曲线, 图 15 为填土初期、人工浸水前后含水率沿深度分布曲线。

由图 14, 15 可知, 不同深度浅层土的含水率变化基本相同, 在路基加载与稳载期, 体积含水率呈波动变化; 截止人工浸水前, 浅层土的含水率略有增大, 但增幅较小, 随着深度的增加, 含水率波动程度与增大幅度逐渐减小, 其原因主要是水分入渗与蒸发交替循环作用, 地表土的水分入渗与蒸腾相对容易。另一方面, 人工浸水后土层含水率先呈快速线性增大, 这主要是由于浸水初期土层饱和度较低, 裂隙较多, 土体内部未形成闭合系统, 气压力较小, 便于水分入渗; 随着时间的推移, 早期水的入渗促使土体内部形成闭

合系统, 气压力增大, 此外, 膨胀性黏土矿物产生膨胀变形, 堵塞孔隙通道阻止水分的进一步入渗, 含水率增幅逐渐减小; 最后含水率逐渐趋于稳定, 这与土层在渗水条件下趋于饱和有关。人工浸水后, 含水率沿深度方向呈先增大而后趋于稳定。

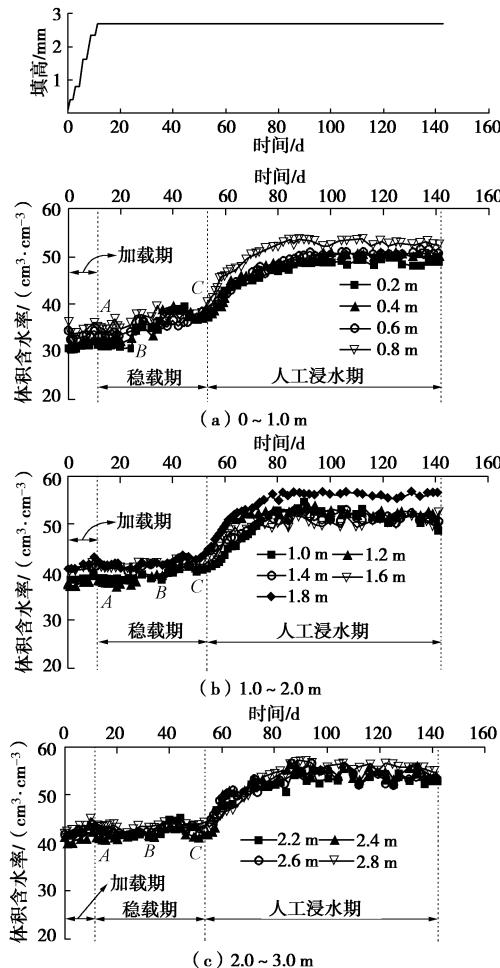


图 14 TDR1 孔不同深度体积含水率变化曲线

Fig. 14 Curves of volumetric water content of hole No. TDR1 at different depths

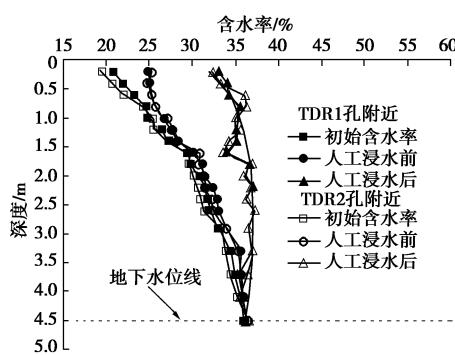


图 15 含水率沿地基深度分布

Fig. 15 Distribution of water content along foundation depth

采用 TDR 技术测试土壤体积含水率在原理上具有可行性, 可避免对膨胀土土层产生扰动, 在农学方

面也得到了广泛应用, 但测量管长度有限, 仅能用于测试浅层土的含水率。

3 结 论

(1) 从路基填土开始到人工浸水结束, 地基表面、浅层土及路基本体的变形曲线均呈“S”型变化, 较深土层的变形曲线呈似“直线”型变化。

(2) 2.7 m 铁路路基下线路中心、边坡中心、坡脚地基表面的相对膨胀量分别为 8.14, 8.93, 15.53 mm; 在路基高度 0.9, 1.9, 2.7 m 处, 路基中心的相对膨胀量分别为 7.20, 6.20, 5.80 mm, 路肩的相对膨胀量分别为 7.26, 6.43, 5.93 mm。

(3) 沿路基横向, 地基表面的相对膨胀量呈“锅底形”分布, 路基本体的相对膨胀量呈“V”形分布, 随着路基高度的增加, “V”形分布特征越明显; 沿地基深度方向, 相对膨胀率随深度的增加呈衰减变化, 在深度 0~2.0 m 范围内相对膨胀率的衰减幅度为 59.2%~62.8%。

(4) 浅层地基土水分变化规律基本相同, 水分入渗扩散速率与膨胀土变形及土体结构变化密切相关。

(5) 地基表面的相对膨胀量沿路基本体呈衰减变化, 有利于以控制变形为主的高速铁路建设; 基于试验结果, 初步提出了以路基表面膨胀变形为 0 作为控制标准确定路基临界填高的设计思路。

(6) 通过人工浸水促使非饱和膨胀土地基湿化饱和, 得到了膨胀土地基极限状态下的相对膨胀量, 而大气降雨引起土层含水率变化幅度小于试验值, 在工程设计中可依据相对膨胀量极限值加以修正应用。试验方法还可为今后铁路路基膨胀土地基浸水试验提供参考。

参 考 文 献:

- [1] XEIDAKIS George, KOUDOUMAKIS Panagiotis, TSIRAMBIDES Ananias. Road construction on swelling soils: the case of Strymi soils, Rhodope, Thrace, Northern Greece[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2004, 63: 93–101.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Unsaturated soils mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 2012.
- [3] 陈伟志, 蒋关鲁, 王智猛, 等. 分级连续加载条件下原状膨胀土固结变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 710–716.
(CHEN Wei-zhi, JIANG Guan-lu, WANG Zhi-meng, et al. Study of consolidation deformation of undisturbed expansive soil under stage continuous loading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 710–716.)

- Soil Mechanics, 2014, **35**(3): 710 – 716. (in Chinese))
- [4] FLURY M, FLUHLER W, JURY W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study[J]. Water Resources Research, 1994, **30**(7): 1945 – 1954.
- [5] HILLEL D. Environmental soil physics[M]. San Diego: Academic Press, 1998.
- [6] 杨果林, 丁加明. 膨胀土路基的胀缩变形模型试验[J]. 中国公路学报, 2006, **19**(4): 23 – 29. (YANG Guo-lin, DING Jia-ming. Model test on expansion and shrinkage deformation in expansive soil roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, **19**(4): 23 – 29. (in Chinese))
- [7] 王年香, 顾荣伟, 章为民, 等. 膨胀土中单桩性状的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 56 – 60. (WANG Nian-xiang, GU Rong-wei, ZHANG Wei-min, et al. Model tests on behaviour of single pile in expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(1): 56 – 60. (in Chinese))
- [8] 王亮亮, 杨果林. 中—强膨胀土地区铁路路堑基床动静态特性模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 137 – 143. (WANG Liang-liang, YANG Guo-lin. Model tests on static and dynamic performances of cut subgrade of railways in medium-strong expansive soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 137 – 143. (in Chinese))
- [9] NG W W C, ZHAN L T, FREDLUND D G. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. Géotechnique, 2003, **53**(2): 143 – 157.
- [10] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(7): 1065 – 1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 1065 – 1073. (in Chinese))
- [11] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土堑坡雨水入渗速率的影响因素与相关性分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1291 – 1296. (LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Effects and correlation analysis of infiltration velocity of expansive soil cut slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1291 – 1296. (in Chinese))
- [12] TB10020—2009 高速铁路设计规范(试行)[S]. 2009. (TB10020—2009 Code for design of high speed railway (try out) [S]. 2009. (in Chinese))
- [13] MYSLINSKA E. Accuracy of expansion charts—the influence of interstitial water chemistry[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, **57**(3): 263 – 265.
- [14] GB50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 2013. (GB50112-2013 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. 2013. (in Chinese))
- [15] CUI Y J, MANTHO A T, CUI K, et al. Water retention properties and volume change behaviour of natural Romainville clay[C]// Proceeding of the 3rd International Conference on Unstaturated Soils UNSAT2006. Istanbul, 2006: 873 – 882.
- [16] 蒋关鲁, 王海龙, 李安洪, 等. 土质路基荷载下地基反力试验研究[J]. 铁道学报, 2012, **34**(6): 69 – 74. (JIANG Guan-lu, WANG Hai-long, LI An-hong, et al. Experimental study on ground reaction under subgrade[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, **34**(6): 69 – 74. (in Chinese))