

中—强膨胀土地区铁路路堑基床动静态特性模型试验

王亮亮, 杨果林

(中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 为研究中—强膨胀土为地基的高速铁路路堑基床在不同服役环境下的动静态特性, 在实验室内进行 1:1 大比例尺模型试验, 分别对基床在干燥状态、降雨和地下水位上升 3 种服役环境下以 4 Hz 频率进行 100 万次激振, 监测路堑基床不同位置的动态响应和变形规律。结果表明: 轨道正下方位置基床范围内的动应力主要受服役环境影响, 与激振次数关系不大; 动应力沿深度的衰减曲线近似成二次曲线型; 膨胀土路堑基床变形受服役环境的影响大于振动次数; 干燥状态和降雨时, 基床变形随着振动次数的增加先增大后趋于稳定, 地下水位上升时, 基底膨胀土膨胀变形, 并引起基床产生回弹变形; 基底膨胀土干缩湿胀过程中的“过程性变形差”会造成轨面标高反复变化, 极大的增加线路维护工作量。

关键词: 膨胀土; 模型试验; 过程性变形差; 基床; 高速铁路

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)01-0137-07

作者简介: 王亮亮(1982-)男, 陕西延安人, 博士研究生, 从事道路与铁道路基以及岩土工程的设计研究工作。E-mail: willtm0304@163.com。

Model tests on static and dynamic performances of cut subgrade of railways in medium-strong expansive soil area

WANG Liang-liang, YANG Guo-lin

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to study the static and dynamic performances of cut subgrade of high-speed railways in medium-strong expansive soil area, model tests with a large scale of 1:1 are performed. A cyclic load with frequency of 4 Hz and excitation of 1000000 times is imposed on the subgrade model under three kinds of working conditions (dry, raining and groundwater level rise). The results show that the dynamic stress in the subgrade beneath the track is mainly affected by the working conditions and not significantly affected by the vibrating number. The dynamic stress attenuation curve is conic in the vertical direction. The dynamic deformation is affected by the working conditions and vibrating number, that is, with the increase of the vibrating number, the deformation increases under the dry and raining conditions at first and then tends to be stable, and the subgrade rises because of the swelling deformation of expansive soil when the groundwater level increases. The in-process deformation difference is induced during the asynchronous swelling or shrinkage deformation process of expansive soil and causes the rail surface elevation to change repeatedly, and the maintenance work for track lines is greatly increased.

Key words: expansive soil; model test; in-process deformation difference; subgrade; high-speed railway

0 引 言

膨胀土广泛分布于全世界干旱和半干旱地区^[1], 膨胀性物质主要是蒙脱石、绿泥石、云母^[2], 具有遇水膨胀、软化、崩解和失水收缩、开裂的特性, 使修建于膨胀土中或其上的地下建筑、公铁路及其附属结构、下水管、房屋以及其他工程建筑经常遭受破坏, 造成巨大的经济损失^[3-4]。广西、云南两省份是我国膨胀土危害最为严重的地区。

国内外关于膨胀土的物理力学性质及变形特性等进行了一系列研究工作^[5], 并根据工程建设的需要开

展了模型试验^[6]、现场监测^[7]以及现场试验^[8]。杨永平等^[9], 郑大为等^[10]对合宁客运专线膨胀土场地上不同高度、不同刚度路堤的动力特性进行了现场试验, 为膨胀土地区的铁路建设提供了宝贵的研究资料, 但合宁客专膨胀土路段主要是以弱—中膨胀土为主, 使得研究成果的适用范围受到限制。目前关于中—强膨胀

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278499); 铁道部科技研究开发计划课题(2010G016-B); 湖南省博士研究生科研创新项目(CX2012B062)

收稿日期: 2012-03-20

土地地区的高速铁路路基方面的研究资料极少。

新建云桂高速铁路是国家 I 级双线铁路, 设计速度为 200 km/h。沿线存在无法完全绕避的膨胀土地区, 膨胀土路段长约 129.7 km, 占线路总长 18.3%, 其中膨胀土路堑 144 处, 总长约 23.7 km。高速铁路技术标准高, 对线路的平顺性有严格要求。为保证工程质量, 必须对以膨胀土, 特别是中—强膨胀性膨胀土为地基的路堑基床动力响应进行研究。针对云桂高速铁路建设的需要, 以典型中—强膨胀土路堑基床设计断面为代表, 在实验室内进行了 1:1 足尺路堑基床模型试验, 分别对路基模型在干燥、降雨和地下水位上升 3 种服役环境下进行 100 万次激振, 研究路基内部不同位置的竖向动力响应和变形特性。

1 试验工点概况

试验工点地质情况为上覆第四系全新统坡残积层(Q4dl+el)膨胀土, 棕红间黄色, 硬塑—坚硬状。为确定该工点膨胀土的膨胀性, 取土样共 47 组, 进行自由膨胀率试验, 试验结果离散性较大, 其中自由膨胀率小于 60% 的有 8 组, 位于 60%~90% 之间的有 27 组, 大于 90% 的有 12 组, 最大值为 100%, 最小值为 5%, 统计分析值为 79.4%, 自由膨胀率变异系数为 0.29, 应按中—强膨胀土来考虑。

2 模型简介

根据高速铁路双线路堑基床的对称性, 取其一侧在实验室内进行 1:1 足尺路基模型试验, 并采用 MTS 伺服激振器模拟列车荷载。在路基不同部位布设动态响应监测元器件, 监测列车动荷载作用下路基各部位的动力响应、相互作用以及长期沉降。试验模型箱为钢结构长方形箱体, 高 4.6 m, 平面尺寸 9.2 m×2 m, 见图 1~3。

2.1 路基模型填料及施工

为了使足尺模型试验尽可能与工程实际相符, 基底膨胀土为取自云桂线中—强膨胀土路堑工点的扰动土, 其基本力学指标见表 1。填土在装入模型箱之前加水调匀至最佳含水率, 并闷料 24 h, 最大颗粒粒径为 60 mm, 压实系数要求不小于 0.9 控制; 基床底层为 A、B 组填料加铺 20 cm 厚的防排水材料, 防排水材料是自行研发的改性水泥基半刚性防水复合材料, 其基本力学指标见表 2; 基床表层为级配碎石, 基床表层以上铺设 0.35 m 厚的道砟。为便于控制压实度, 填筑前, 先在模型箱内壁用黄色油漆标注好刻度(图 1), 路基模型填筑采用人工分层夯填, 每层厚度为 20

cm, 每层填筑好后测试填土的含水率、密度和 K_{30} 值^[11]。

表 1 膨胀土基本物理性质

密度 /(g·cm ⁻³)	土粒 比重	液限 /%	塑限 /%	膨胀力 /kPa	自由膨 胀率/%
1.96	1.772	43.5	20.5	100~338	79.4

表 2 防水材料基本力学性质

密度 /(g·cm ⁻³)	弹性模量 /MPa	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	收缩变形率 /%
1.9	1000	2.5	0.6	7.5



图 1 模型箱内部

Fig. 1 Internal view of model box



图 2 模型箱正面图

Fig. 2 Model box

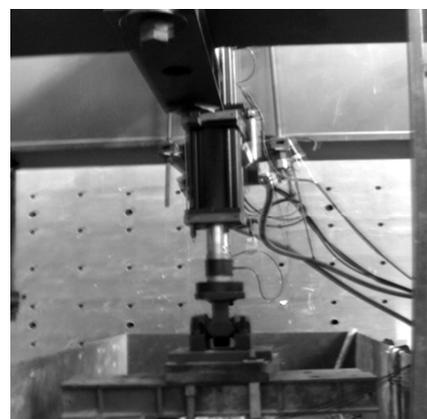


图 3 MTS 加载装置

Fig. 3 MTS loading device

2.2 监测设备布设

监测元器件如表 3 所示。图 4 为模型尺寸与元器

件布置。

表 3 监测元器件一览表

Table 3 List of monitoring instruments

名称	型号	量程	个数
动土压力盒	HC-D1011	0.1 MPa	10
垂直土应变计	JMDL-4120A	200 mm	4
土壤湿度计	FDS-100	0~100%	11

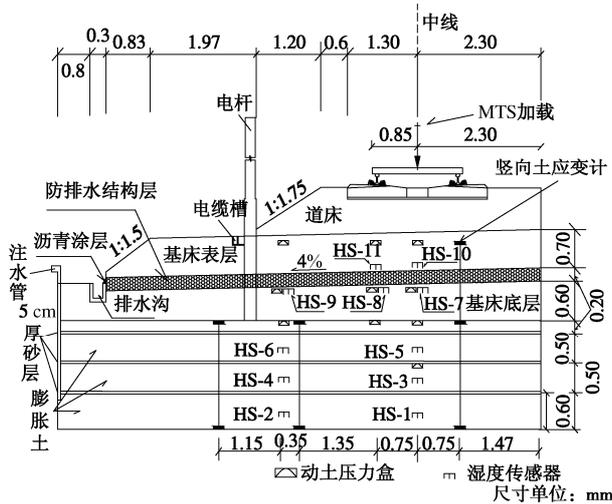


图 4 模型尺寸与元器件布置图

Fig. 4 Model dimensions and layout of measuring points

2.3 加载方案

理论研究和实测数据均表明移动列车在路基中引起的动力响应与轴重、车速^[12-13]、轨道-路基-地基系统^[14]有关。目前在模型试验中采用较多的列车荷载模型主要有正弦波、半正弦波和单向脉冲模^[15]。移动列车对路基影响最大的频率是车辆的正弦式基频^[16]

$$f = V/l_i \quad (1)$$

式中, V 为列车运行速度; l_i 为车长。本次试验中采用正弦波, 列车车辆定距按 18 m 计算, 车速 250 km/h, 计算得振动基频为 4 Hz。

动轴力^[10]按下式计算:

$$P_d = P(1 + \alpha V) \quad (2)$$

式中, P_d 为动轴力(kN); P 为列车轴重(kN); $(1 + \alpha V)$ 为冲击系数, 其中 V 为行车速度(km/h); α 为经验参数, 对高速铁路及无缝线路 $\alpha = 0.004$ 。根据新建时速 200 km/h 铁路暂行规定, 列车轴重取 200 kN, 计算得动轴力为 380 kN。云桂高铁设计运行密度为 65 对/d, 列车编组为 8 节, 则激振 100 万次对应线路运行 1.33 a。

2.4 试验过程

路基模型填筑完成后, 分别对其在干燥、降雨以及地下水位上升 3 种服役环境下各激振 100 万次, 共 300 万次。具体试验过程如下: ①在干燥状态下对路基激振 100 万次; ②激振结束后, 根据百色地区最大

月降雨量, 通过架设在轨道上方的管网模拟降雨, 降雨速度为 14.9 mm/12 h, 总降雨量 3.68 m³, 同时观察路基中应变计读数的变化; ③降雨结束后, 再次对路基模型进行 100 万次激振, 监测在防水层上方填料受水饱和后对路基动静态响应的影响; ④降雨服役环境下的激振结束后, 通过注水系统向膨胀土基底注水, 模拟极端情况下地下水位上升, 造成防水层下方填料浸水饱和时的服役环境, 注水时先从最下层开始, 逐层进行, 各土层的饱和度是通过湿度计读数来监控; ⑤注水结束后, 对路基进行 100 万次激振, 研究防水层下方土体浸水饱和后路基的动静态响应。

3 试验结果分析

3.1 不同服役环境下动应力变化规律

路基内动应力的大小和分布情况是影响高速铁路路基长期动力稳定性的主要因素^[12]。对干燥、降雨和地下水位上升 3 种服役环境下路基内动应力试验结果进行统计, 分析动应力随服役环境和振动次数的变化规律。

图 5 给出了不同服役环境下路基内各点竖向动应力随振动次数的变化曲线。从图 5 (a) 可以看到: 道床下路基面动应力主要受服役环境的影响; 在同一服役环境下, 动应力在振动初期波动性较大, 但随着振动次数的增加而逐渐趋于稳定; 3 种服役环境下钢轨正下方的动应力均为最大, 中线位置次之, 中线侧 2.55 m 位置路基面动应力基本不受服役环境影响; 中线位置路基面在干燥服役环境中的动应力平均值为 32.53 kPa, 降雨后增至 36.81 kPa, 增加 13.2%, 地下水位上升后动应力平均值达到最大值 38.03 kPa, 较干燥状态增加 16.9%。

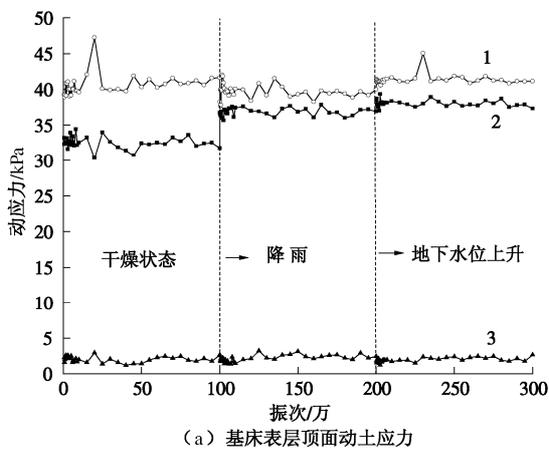
由图 5 (b) 可知: 防水层底面基床不同位置的动应力变化曲线与基床表层基本相似, 道床正下方动应力随服役环境的变化也呈跳跃式增长, 但曲线的波动性增大。图 5 (c)、(d) 给出的是基床底层底面和基底膨胀土表层的动应力变化曲线。分析可知: 随着深度的增加, 动应力受服役环境的影响逐渐减弱, 试验数据的离散性逐渐增大; 基底表层膨胀土的动应力不受服役环境和振动次数的影响; 中线侧 2.55 m 位置路基不同深度处的动应力与服役环境和振动次数无关。

动应力随服役环境变化呈现跳跃式变化的原因:

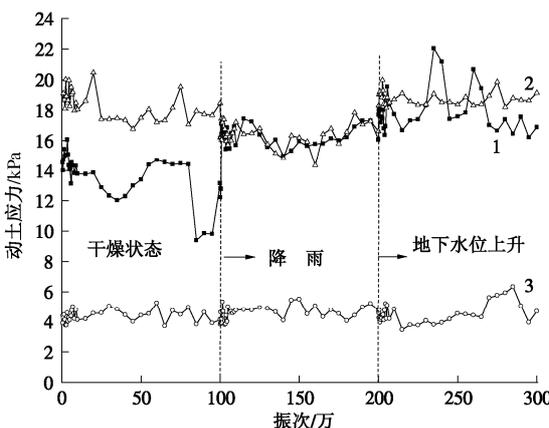
①应力扩散的基本原理是土颗粒在外力作用下沿着滑移面的最不利位置开始滑移^[17-18], 使粒间应力值都逐渐趋向一个平均值 $\bar{\sigma}$ ^[19]。降雨后, 基床表层填料受水或饱水使填料颗粒表面覆盖有水膜, 粒间孔隙存在部分孔隙水, 这相当于在颗粒表面涂上了润滑剂, 颗粒

在外力作用下运动时受到临近颗粒的“约束”作用减小，宏观表现为基床系数降低，基床变形增大，应力扩散角减小，路基内动应力增大^[9]，但随着深度的增加，降雨引起的动应力增量幅度迅速减小，由图5(d)可知，在路基面下2.1 m位置动应力不受降雨影响。②地下水位上升后，路基内各点的动应力在降雨服役环境的基础上再次跳跃式增大，其原因是试验中向防水层下方土体注水使基床底层和基底膨胀土完全浸水饱和，由于填料密实度较高，渗透系数较小，在重复激振荷载作用下，路基中防水层以下轨道位置的孔隙水压力迅速增大，导致轨道正下方路基的瞬时刚度增大，应力扩散角减小，从而引起中线位置和钢轨正下方路基中动应力增大。

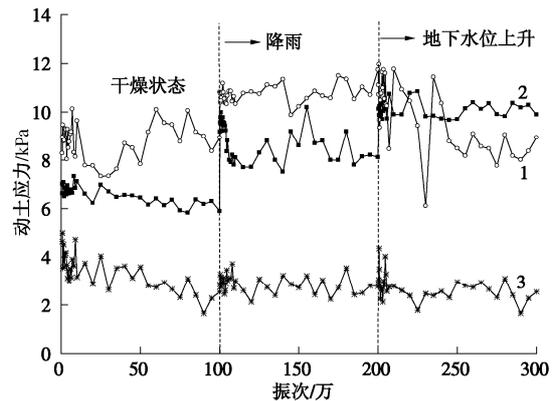
分析图5可知，3种服役环境下，路基表面不同位置的动应力与振动次数关系曲线的波动性很小，但防水层下方各监测曲线的波动性均较大。原因是基床表层底面铺设20 cm厚的半刚性防水材料，使路基表层的刚度较为均匀，而防水层下方填料在人工夯实过程中，填料密实度存在一定程度的不均匀，使基底刚度、变形存在差异，并且这些差异随服役环境不同而改变，导致监测仪器与周边土体需要不断的进行调整与耦合。由此可见，半刚性防水材料能增加线路的平顺性。



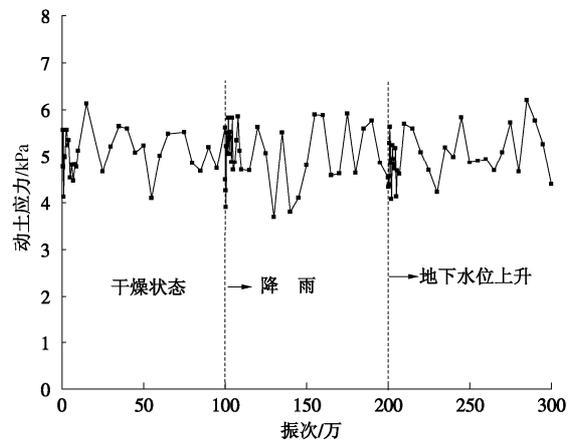
(a) 基床表层顶面动土应力



(b) 防水层底面动土应力



(c) 路基床底层底面动土应力



(d) 基底膨胀土层

图5 不同服役环境下动应力变化曲线

Fig. 5 Curves of dynamic stress under different working conditions

将中线位置各监测点稳定阶段动应力按服役环境分别取平均值，绘制动应力-深度关系曲线，分析不同服役环境下动应力沿路基深度的衰减规律，见图6。经分析知道：3种服役环境下动应力衰减近似呈二次曲线型；在路基面下1.4 m深处，动应力衰减为基床表面的18.3%~26.6%。

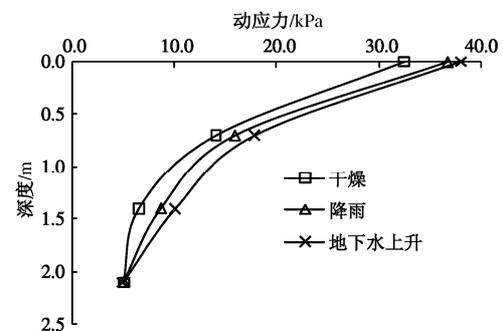


图6 不同服役环境下动应力沿深度衰减曲线

Fig. 6 Attenuation curves of dynamic stress under different conditions

3.2 不同工况下路基变形规律

图7是干燥状态、降雨和地下水位上升3种服役

环境下路基变形随振动次数的变化规律,经分析可知:

(1)干燥状态:路基各监测位置的压缩变形量随着振动次数的增加而逐渐增大;基底 1.8 m 厚膨胀土的变形量钢轨正下方大于轨道外侧;钢轨正下方路基总压缩量为 2.72 mm,其中基底 1.8 m 厚膨胀土压缩量为 2.19 mm,占总变形量的 80.5%,基床部分的压缩量为 0.53 mm,占总变形量的 19.5%,所以路基的工后沉降主要受地基土的压缩变形控制,工程中必须做好地基的加固处置,以减小轨下基础的工后沉降。

(2)降雨:降雨期间路基各部分均产生较大幅度的沉降变形,轨道正下方路基总压缩量为 23.58 mm,基底 1.8 m 厚膨胀土产生的压缩量为 16.66 mm,基床部分压缩变形量为 6.92 mm;与路基在干燥状态下经过 100 万次激振所产生的最终变形量相比,降雨引起的路基变增量为 $23.58 - 2.72 = 20.86$ mm,其中基底膨胀土变形增量为 14.47 mm,占总变形量增量的 69.37%,基床变形增量为 6.39 mm,占总变形量增量的 30.63%;降雨后的激振期间,钢轨正下方路基总压缩量和基底膨胀土压缩量均随振动次数的增加逐渐减小,即路基出现回弹变形,根据降雨期间路基中湿度计的监测数据(见表 4)可知,降雨期间防水层底面中线位置 HS-8 号土壤湿度计读数由 20.9%变为 37.3%,而防水层底面其余两个监测点以及基底各监测点的湿度计读数基本保持不变,这说明降雨期间中线位置有少量雨水从防水层和模型箱壁之间的缝隙渗入到防水层下方,从而引起中线位置基底膨胀土产生膨胀变形,路基出现回弹变形。

(3)地下水上升:注水后基底膨胀土产生膨胀变形,各竖向土应变计监测点路基的压缩变形出现大幅度回弹,基床在膨胀力的作用下被抬高,根据变形曲

线可知基底膨胀土变形呈现以下特点:

a)各监测点膨胀最终变形总量不同,存在变形差。原因是膨胀土中的膨胀物质分布、颗粒聚合情况等存在随机性,同时,在基底膨胀土填筑过程中采用人工夯实,不同位置的土体密实度不可避免的会存在一定差异;

b)基底膨胀土的膨胀变形发展过程差异较大。如轨道正下方基底膨胀土在注水期间的膨胀变形量小,但在随后的激振过程中产生大幅度的膨胀变形,而中线侧 3.7 m 位置基底膨胀土在注水过程中产生较大的膨胀变形,基本完成了全部膨胀变形,这种非同步膨胀变形同样会形成变形差,引起路基表面凹凸不平,影响线路的平顺性,严重的会造成线路破坏。

为区别于最终膨胀变形差,这里定义由于基底各点膨胀土的膨胀变形速度不同而形成的变形差为“过程性变形差”,这种变形差会大量的增加膨胀土地区铁路的维护工作,原因是当基床表面出现影响线路运营的初期变形差时,需要减小膨胀变形较大位置的道砟厚度,从而保证轨面高程不变,但随着时间的增加,原先膨胀变形小的位置膨胀变形量逐渐增大,必须再次调整道砟厚度,才能使钢轨顶面的恢复到正常标高。另外,根据膨胀土的湿胀干缩特性,当地下水位下降,基底膨胀土失水时同样会由于不均匀收缩而产生“过程性变形差”,所以这种清砟—补砟的工作可能需要进行很多次,极大的增加了线路的维护工作量和费用。

(4)根据降雨和地下水位上升两种服役环境下路基中湿度计的监测数据(见表 4、表 5)可知,自主研发的防水材料隔水效果良好,能够满足高速铁路的建设需要。

表 4 降雨前后湿度计变化量

Table 4 Moisture variation of subgrade before and after rainfall %

状况	基床表面下 2.7 m		基床表面下 2.2 m		基床表面下 1.7 m		防水层底面		基床表层顶面		
	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4	HS-5	HS-6	HS-7	HS-8	HS-9	HS-10	HS-11
降雨前	31.4	30.6	33.8	37.6	31.2	33.6	45.3	20.9	28.6	16.1	6.0
降雨后	31.4	30.5	34.5	37.6	32.6	34.9	46.4	37.3	31.8	64.1	77

表 5 地下水上升前后各湿度计监测数据

Table 5 Moisture variation of subgrade before and after increase of groundwater level %

状况	基床表面下 2.7 m		基床表面下 2.2 m		基床表面下 1.7 m		防水层底面		基床表层顶面		
	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4	HS-5	HS-6	HS-7	HS-8	HS-9	HS-10	HS-11
地下水位上升前	31.4	30.6	33.8	37.6	31.2	33.6	—	19.5	20.4	14.7	5.4
地下水位上升后	80.6	80.7	69.1	85.2	82.5	81.5	—	70.5	70.4	14.7	5.3

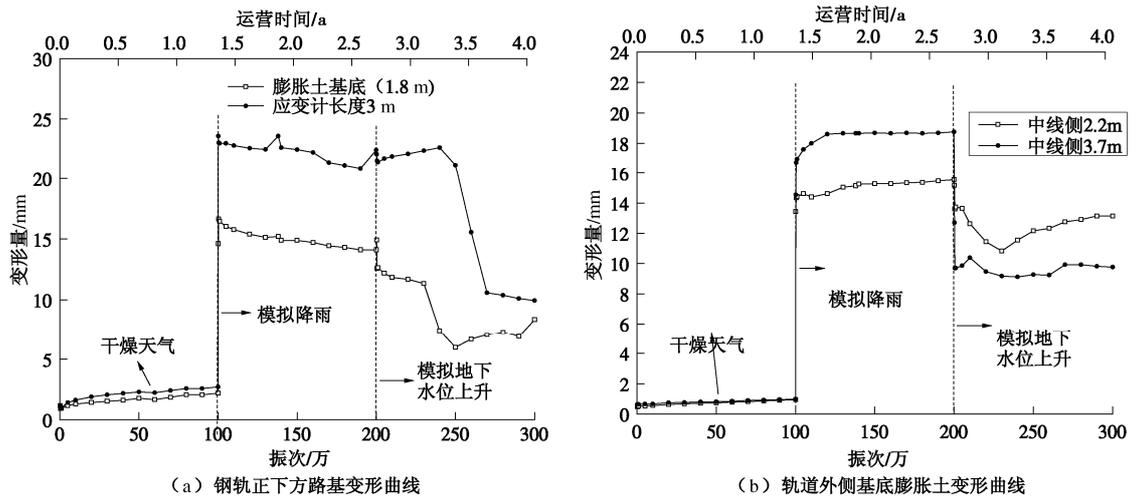


图7 不同工况下基床变形随振次变化曲线

Fig. 7 Curves of subgrade deformation with vibration number under different working conditions

4 结 论

(1) 基床范围内竖向动应力主要服役环境影响; 基床内同一位置的动应力在地下水水位上升时最大, 降雨后次之, 干燥状态最小; 基床在同一服役环境下, 动应力在振动初期波动性较大, 但随着振动次数的增加而逐渐趋于稳定; 中线侧 2.55 m 以外基床内不同位置以及基底的动应力不随服役环境和振动次数变化而变化。

(2) 干燥、降雨以及地下水水位上升 3 种服役环境下的动应力沿深度衰减曲线均近似呈二次曲线型; 路基面下 1.4 m 深处, 动应力衰减为基床表面的 18.3%~26.6%。

(3) 自主研发的半刚性防水材料不仅具有良好的隔水性能, 同时还能够提高线路的平顺性。

(4) 膨胀土路堑基床的变形受振动次数和服役环境共同影响; 干燥状态下, 路基压缩变形随振动次数的增加而增大, 其中基底变形量占总变形量的 80.5%; 降雨后路基会产生较大的沉降变形增量, 其中基底膨胀土的压缩变形增量占总变形量增量的 69.37%, 相对干燥状态有所下降; 地下水上升后基底膨胀土开始膨胀变形, 基床在膨胀力的作用下产生回弹变形。

(5) 膨胀土基底不同位置的膨胀变形总量存在差异, 容易形成变形差; 膨胀变形过程中, 基底不同位置的膨胀土在同一时间其膨胀速度不同, 在路基面也会形成过程性变形差, 对于铁路路基而言, 无论是最终变形差还是过程性变形差都会引起线路凹凸不平, 影响线路的正常运营, 特别是过程性沉降差持续时间长, 发展过程复杂, 会大幅度的增加线路维护工

作量和费用。

参考文献:

- [1] ITO Maki, AZAM Shahid. Determination of swelling and shrinkage properties of undisturbed expansive soils[J]. *Geotech Geol Eng*, 2010, **28**: 413 - 422.
- [2] ITO M, AZAM S. Engineering characteristics of a glaciolacustrine clay deposit in a semi-arid climate[J]. *Bull Eng Geol Environ*, 2009, **68**: 551 - 557.
- [3] XEIDAKIS George, KOUDOU MAKIS Panagiotis, TSIRAMBIDES Ananias. Road construction on swelling soils: the case of Strymi soils, Rhodope, Thrace, Northern Greece[J]. *Bull Eng Geol Env*, 2004, **63**: 93 - 101.
- [4] 冯玉勇, 张永双, 曲永新, 等. 南昆铁路百色盆地膨胀土路堤病害机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, **23**(4): 463 - 467. (FENG Yu-yong, ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin, et al. Mechanism of embankment defects caused by expansive soils in Baise Basin, Nanning-Kunming railway[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(4): 463 - 467. (in Chinese))
- [5] 韩华强, 陈生水. 膨胀土的强度和变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(3): 422 - 424. (HAN Hua-qiang, CHEN Sheng-shui. A study on strength and deformation of expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(3): 422 - 424. (in Chinese))
- [6] 杨果林, 黄向京. 不同气候条件下膨胀土路堤土压力的变化规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(8): 948 - 955. (YANG Guo-lin, HUANG Xiang-jing. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence[J]. *Chinese of Journal of Geotechnical Engineering*,

- 2005, **27**(8): 948 - 955. (in Chinese))
- [7] GASMO J, HRIZUK K J, RAHARDJO H, et al. Instrumentation of an unsaturated residual soil slope[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1999, **22**(2): 134 - 143.
- [8] 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))
- [9] 杨永平, 周顺华. 合一宁客运专线膨胀土不同高度路堤动力特性分析[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(5): 1403 - 1406. (YANG Yong-ping, ZHOU Shun-hua. Analysis of vibration character of expansive soil embankments with different heights of Hefei-Nanjing High-speed Railway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(5): 1403 - 1406. (in Chinese))
- [10] 郑大为, 王炳龙, 周顺华, 等. 合宁快速客运专线膨胀土不同刚度路堤振动特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(增刊 2): 4205 - 4208. (ZHENG Da-wei, WANG Bing-long, ZHOU Shun-hua, et al. Study on vibration character of expansive soil embankments with different rigidities along Hefei-Nanjing High-speed Railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(S2): 4205 - 4208. (in Chinese))
- [11] 铁建设(2005)140号. 新建时速200~250公里客运专线铁路设计暂行规定[S]. (Railway construction(2005)No.140. New construction 200~250 km/h express railway design specification[S]. (in Chinese))
- [12] 刘晓红, 杨果林, 方 薇. 武广高铁无碴轨道路堑基床长期动力稳定性评价[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, **42**(5): 1393 - 1398. (LIU Xiao-hong, YANG Guo-lin, FANG Weil. Long-term dynamic stability evaluation of cutting bed under ballastless track of Wuhan-Guangzhou high-speed railway[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, **42**(5): 1393 - 1398. (in Chinese))
- [13] VOSTROUKHOV A V, METRIKINE A V. Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, **40**(21): 5723 - 5752.
- [14] POWRIE W, YANG L A, CLAYTON C R I. Stress changes in the ground below ballasted railway track during train passage[J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2007, **221**(2): 247 - 261.
- [15] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(11): 1742 - 1747. (WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Study on effect of traffic loading induced static deviator stress on un-drained cyclic properties of saturated soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(11): 1742 - 1747. (in Chinese))
- [16] 西南交通大学. 高速铁路路基稳定性及变形控制值的研究[R]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996. (Southwest Jiaotong University. Study on durability and deformation control of express railway subgrade bed[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1996. (in Chinese))
- [17] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))
- [18] ZHU H P, YU A B. Averaging method of granular materials[J]. *Phys Rev E*, 2002, **66**(2): 1 - 10.
- [19] SILVA M D, RAJCHENBACH J. Stress transmission through a model system of cohesionless elastic grains[J]. *Letters to Nature*, 2000(8): 708 - 710.