

DOI: 10.11779/CJGE201501016

不同服役环境下高速铁路膨胀土路堑基床振动特性模型试验

杨果林¹, 王亮亮^{1, 2}, 杨 喆³

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 莫纳什大学土木工程系, 莫纳什, 澳大利亚)

摘要: 为研究铺设半刚性防水结构层的膨胀土路堑基床的振动特性, 在实验室进行 1:1 大比例尺模型试验, 对基床在干燥、降雨和地下水位上升 3 种服役环境下以 4 Hz 频率分别进行 100×10^4 次激振, 监测路堑基床不同位置的加速度和速度响应。结果表明: 在相同循环动力荷载作用下, 服役环境对新型基床结构的振动加速度和速度大小具有显著影响, 但对二者沿基床深度方向的衰减规律影响不大; 与干燥服役环境相比, 路基面的加速度和速度增长幅度在降雨服役环境下分别为 35% 和 20%, 地下水位上升时分别为 45% 和 23%。

关键词: 膨胀土; 模型试验; 振动特性; 基床; 高速铁路

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0133-06

作者简介: 杨果林(1963-), 男, 汉族, 湖南桃江人, 教授, 博士生导师, 从事道路与铁道工程、岩土工程和结构工程的教学和科研。E-mail: guoling@mail.csu.edu.cn。

Model tests on vibration characteristics of cutting subgrade of expansive soil of express railways under different service environments

YANG Guo-lin¹, WANG Liang-liang^{1, 2}, YANG Xiao³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (CUMT), Xuzhou 221116, China; 3. Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia)

Abstract: In order to study the vibration characteristics of cutting subgrade by using semi-rigid water-proof structural layer, 1:1 large-scale model tests are carried out. The cyclic loads with frequency of 4 Hz and excitation of 100 thousand times are imposed on the subgrade model under three kinds of service environments (dry, raining and underground water rising). The results show that under the same cyclic loads, the influence of service environments on velocity and acceleration of cutting subgrade is significant, but they have not obvious influence on their attenuation law in the vertical direction. Compared to that under the dry working condition, the increasing range of velocity and acceleration on subgrade surface is respectively 35% and 20% under the raining service environment, and 45% and 23% under the underground water rising service environment.

Key words: expansive soil; model test; vibration characteristic; subgrade bed; express railway

0 引言

南昆铁路^[1]膨胀土路段基床主要采用复合土工织物防水, 但通车运营后不断出现基床鼓胀或下沉、翻浆冒泥、排水横坡降低等病害, 严重影响着线路的正常运输和列车安全, 说明传统柔性防水措施不能满足膨胀土地区铁路建设的需要。新建云桂高速铁路与南昆线在同一走廊带上, 沿线存在大量膨胀土路堑地段, 为此, 课题组研发了新型改性水泥基防水复合材料^[2], 在基床底层表面满堂铺设, 摊铺厚度为 0.2 m, 并与侧沟无缝连接, 形成全封闭的降雨防排水系统。新型

改性水泥基防水结构层静弹模平均约 1 GPa, 动弹模 E_{vd} 平均约 80 MPa, 呈半刚性, 其不仅能够隔断地表降雨入渗, 还能协调地基膨胀土湿度重分布产生的不均匀胀缩变形, 增加路基面的平顺性。

国内外学者们通过建立各种轨道-路基系统模型, 研究列车荷载引起的路基动力响应, 如 Filippov^[3],

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278499, 51478484); 铁道部科技研究开发计划课题(2010G016-B); 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B062)

收稿日期: 2014-06-03

Labra^[4]、Krylov^[5]、Dieterman 等^[6]、Grundmann 等^[7]、Sheng 等^[8]、Kaynia 等^[9]、Andersen 等^[10]、Vostroukhov 等^[11]、马学宁等^[12]，研究表明基床振动特性会随着基床结构或刚度的变化而发生相应的改变。由于自行研发的新型防水结构层刚度和厚度较大，为保证工程质量，课题组在实验室进行了不同基床底层厚度的路基足尺模型激振试验，研究基床在干燥、降雨和地下水上升3种服役环境下的动静特性，受篇幅限制，本文仅分析基床底层厚度为0.6 m（不含防水结构层厚度）时，新型基床结构在不同服役环境下的振动特性和长期动力稳定性，其动应力变化规律和变形特性分析见文献[13]。

1 足尺模型激振试验

(1) 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。试验模型箱为钢结构长方形箱体，长×宽为9.2 m×2 m，高4.6 m。路基模型依次由膨胀土地基、基床底层、自行研发的半刚性防水层、基床表层、道砟层、轨枕、扣件系统和钢轨组成，基床填筑按照文献[14]的要求进行。为了使足尺模型试验尽可能与工程实际相符，基底膨胀土取自云桂铁路中强膨胀土路堑工点，其基本力学指标：含水率为14.2%，密度为1.9~2.1 g/cm³，土粒比重为1.8，液限为43.5%，塑限为20.5%，自由膨胀率为69.0%~77.2%。防排水结构层基本力学参数：密度为1.9 g/cm³，弹性模量为1000 MPa，抗压强度为2.5 MPa，抗折强度为0.6 MPa，收缩变形率为7.5%。路基模型尺寸及元器件布置见图1。

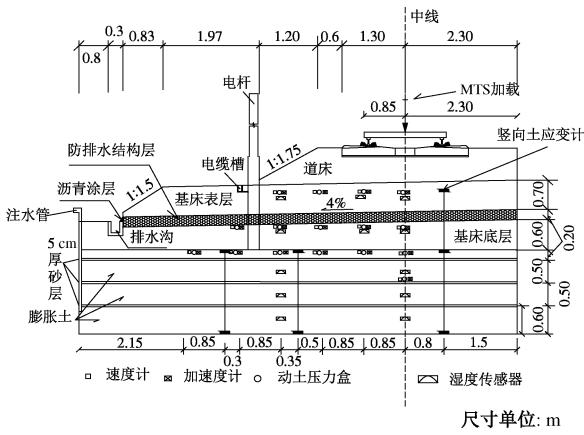


图1 模型尺寸及元器件布置图

Fig. 1 Model dimensions and layout of measuring points

(2) 加载方案：采用MTS伺服激振器模拟列车荷载，激振频率采用时速250 km时列车的基频4 Hz，动轴力为380 kN，按正弦波形加载^[13]。

(3) 试验过程：①在干燥服役环境下对路基激振

100×10^4 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，降雨管网覆盖范围为宽2 m，长3 m，降雨时间为3 d，总降雨量为3.68 m³。降雨结束后，再次对路基模型进行 100×10^4 次激振；③通过注水系统向膨胀土基底注水，模拟极端情况下的地下水位上升，使防水层下方填料浸水饱和。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控制，注水结束后，对路基再进行 100×10^4 次激振。

2 试验结果分析

2.1 不同服役环境下基床加速度变化规律

加速度是判断列车振动荷载对路基破坏作用的重要指标，路基刚度愈大，则加速度愈大。加速度随振动次数的变化规律描述了路基的动力稳定性。图2给出了路基内各点加速度随服役环境和振动次数的变化曲线。由图可知：在相同循环动力荷载作用下，服役环境对新型基床结构的振动加速度大小具有显著影响，各监测点的加速度在干燥服役环境下最小，降雨服役环境次之，地下水位上升时最大，不同服役环境下加速度随振动次数的变化规律则基本相似，即激振初期加速度峰值和波动性都较大，随着激振次数的增加，加速度略有减小并逐渐趋于稳定，具体分析如下：

(1) 干燥服役环境下($0 \sim 100 \times 10^4$ 次)：路基内各点加速度随振动次数的增加基本保持稳定，说明路基的填筑密实度较好，在100万次的激振过程中路基内部的刚度基本保持不变，路基内不同深度位置的加速度最大值均出现在轨道中线位置，其中路基面和换填底面下0.7 m位置的加速度分别约为 0.20 m/s^2 和 0.09 m/s^2 ，中线侧1.7 m以外基床各位置的加速度较小，变化区间为 $0.01 \sim 0.04 \text{ m/s}^2$ 。

(2) 降雨服役环境下($0 \sim 100 \times 10^4$ 次)：路基内各监测点的加速度基本呈现“跳跃式”增大，稳定阶段轨道中线位置路基面和换填底面下0.7 m位置的加速度分别增加为 0.27 m/s^2 和 0.10 m/s^2 ，与干燥服役环境相比，降雨引起的路基面加速度增长幅度达35%，换填底面下0.7 m位置的加速度增长幅度约为11%。

(3) 地下水位上升服役环境下($200 \sim 300 \times 10^4$ 次)：路基内各监测点的加速度在降雨服役环境的基础上再次呈“跳跃式”增大，但在 100×10^4 次的激振过程中，轨道中线至轨道中线侧1.7 m横断面宽度范围内各监测的加速度数据波动性较大，加速度趋于稳定所需要的激振次数显著增加；激振后期轨道中线位置路基面和换填底面下0.7 m位置的加速度平均值分别为 0.29 m/s^2 和 0.12 m/s^2 ，与干燥服役环境相比，相

应位置加速度的增长幅度分别为45%和33%。本次模型试验中只施加了时速250 km/h列车的基频4 Hz, 但

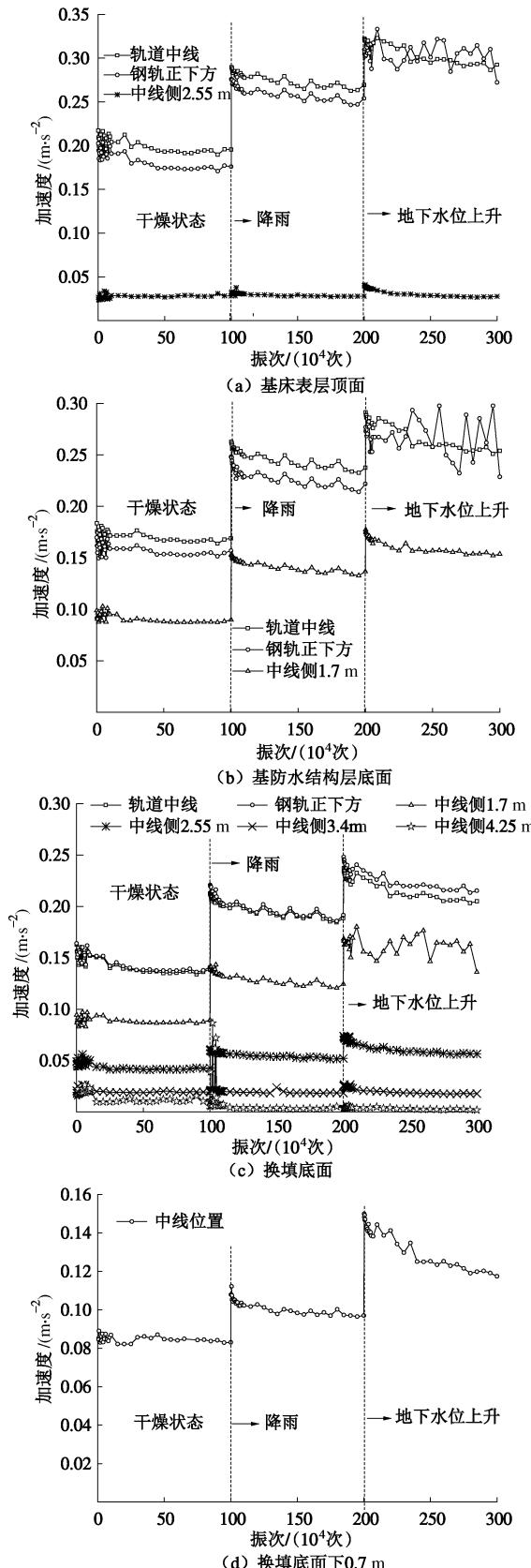


图2 不同服役环境下加速度随振次的变化曲线

Fig. 2 Changing curve of acceleration with vibration number under different service environments

实际运营过程中, 由于列车振动波在传播过程中的叠加干涉等, 振动频率远高于4 Hz, 路基加速度将远大于此次试验中的监测值, 同时膨胀土的渗透系数小, 在高频振动作用下, 孔隙水压力会迅速升高, 严重时会导致地基土液化而失去承载能力, 所以膨胀土地基在动力影响范围内必须做好基底膨胀土的防排水措施。

图3给出了3种服役环境下基床横断面不同位置加速度随深度衰减曲线, 纵坐标零点为路基面, 从中可知, 3种服役环境下加速度随深度的衰减规律相似, 基本上呈二次曲线型衰减, 路基面至防水结构层底面(路基面下0.9 m)范围内加速度衰减率约为52%~64%。

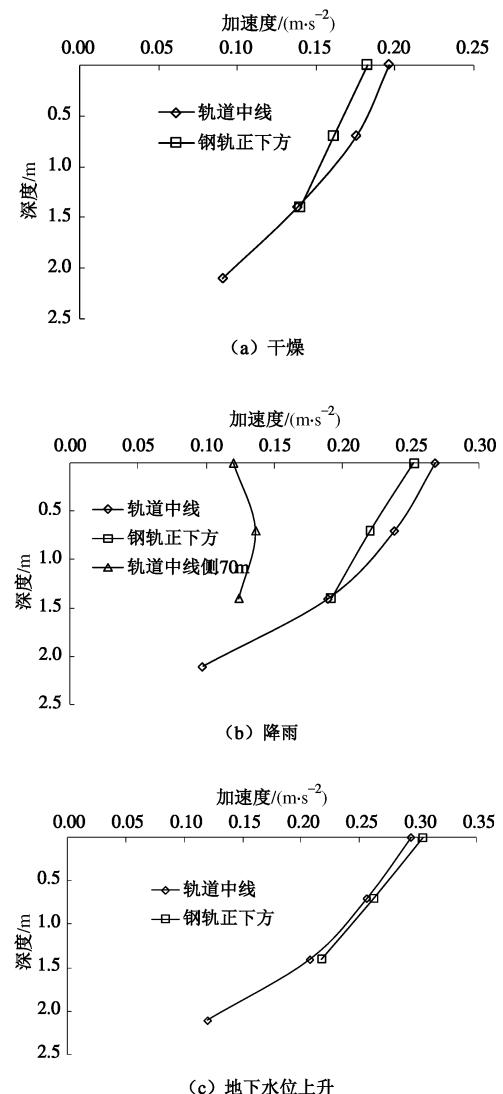


图3 不同服役环境下加速度沿基床深度衰减规律

Fig. 3 Attenuation curves of acceleration along subgrade depth under different service environments

2.2 不同服役环境下基床速度变化规律

图4给出的是3种服役环境下路基横断面上不同位

置速度与振次的关系,由图可知,服役环境对基床振动速度的影响规律与加速度相同,即在干燥服役环境下最小,降雨服役环境次之,地下水位上升时最大,各服役环境下速度随激振次数变化规律如下:

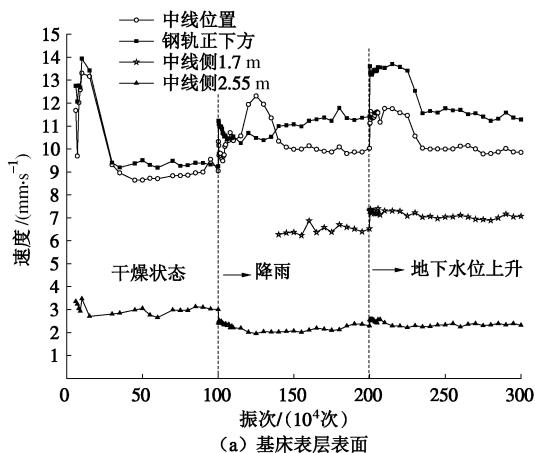
(1) 干燥服役环境下($(0 \sim 100) \times 10^4$ 次):

激振初期数据离散性较大,特别是轨道中线和钢轨正下方0.85 m位置,这是由于路基模型填料和速度传感器在激振荷载作用下不断调整与耦合造成的。调整期结束后,随着振次的增加各监测点的振动速度逐渐趋于稳定。所以新建有砟轨道高速铁路在铺轨结束后应进行一定时间的试运营,使路基各部分的振动和变形得到充分调整,从而增加运营期间列车的安全性和平稳性。

(2) 降雨服役环境下($(100 \sim 200) \times 10^4$ 次):

降雨对路堑基床的振动特性产生显著影响,降雨后路基中各位置的振动速度均呈现“跳跃式”增长,在同一深度处,距离轨道中线越近,增加幅度越大,增加幅度最大位置为钢轨正下方,其中路基面增加2.08 mm/s,增加幅度为20%;防水结构层底面增加2.48 mm/s,换填底面增加1.47 mm/s。

(3) 地下水位上升服役环境下($(200 \sim 300) \times 10^4$ 次):在地下水位上升后的激振初期,路基各位置的振动速度在降雨服役环境的基础上再次出现“跳跃式”增大,在同一深度处,距离轨道中线越近,增加幅度越大;钢轨正下方路基面速度为11.57 mm/s,与干燥服役环境相比,增加幅度为23%。随着振动次数的增加,基床振动速度逐渐减小,但与降雨服役环境下不同,各监测的振动速度在100万次的激振过程中波动性较大,且趋于稳定所需要的激振次数较前两种服役环境明显增加,局部位置的速度甚至在试验结束时仍未趋于稳定,始终以较小的衰减幅度不断减小,特别是轨道中线位置,振动速度的衰减幅度在试验结束时仍然较大。



(a) 基床表层表面

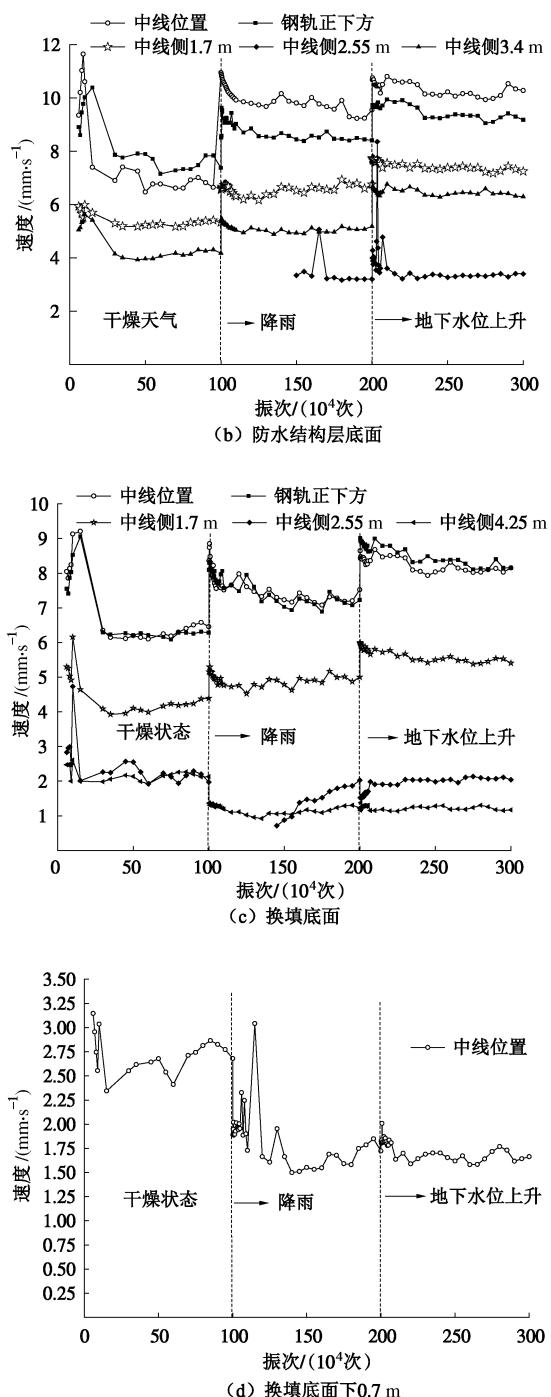


图4 不同服役环境下速度随激振次数变化关系

Fig. 4 Changing curve of velocity with vibration number under different service environments

图5给出了不同服役环境下速度沿基床深度方向的衰减规律,由图可知:防水结构层底面以上(路基面下0.9 m)基床范围内速度的衰减不明显,甚至出现沿深度方向增大的趋势;防水结构层底面以下,振动速度随着深度的进一步增加而迅速衰减;轨道中线位置和轨道中线测1.7 m位置速度衰减曲线总体上呈二次曲线型,但钢轨正下方位置速度衰减呈指数型。

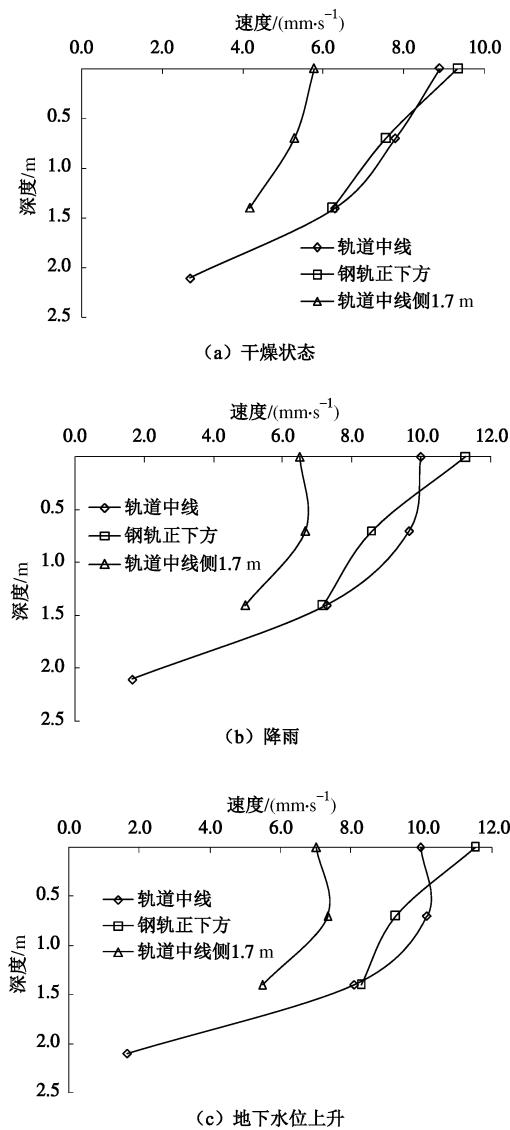


图 5 不同服役环境下速度沿基床深度衰减规律

Fig. 5 Attenuation curves of velocity along subgrade depth under different service environments

3 讨 论

由动力模型试验结果可知, 在循环动力荷载作用下, 服役环境对新型基床结构的加速度和速度响应具有显著影响, 现对其具体影响机理分析如下:

(1) 降雨引起的基床振动参数“跳跃式”增长原因: 降雨后, 激振试验初期的防水结构层上方填料处于饱和或过饱和状态, 填料颗粒之间的空隙充满水, 颗粒之间的摩擦力和嵌锁力减小, 降低了基床表层填料对上覆激振荷载的扩散能力, 使得激振动能在基床中的扩散角减小, 在基床同一位置, 振动能相对增大, 传播深度增加, 从而引起轨道中线位置附近基床的动力响应增大, 随着振动次数的增加, 轨道正下方基床填料颗粒逐渐调整至新的平衡状态, 且填料被进

一步压密, 刚度增大, 基床各监测点的振动加速度和速度也逐渐趋于稳定, 但稳定后的基床动力响应大于干燥服役环境。

(2) 地下水位上升服役环境下基床振动响应在降雨服役环境基础上再次出现“跳跃式”增大的原因是: 在降雨试验结束后, 通过预先埋设于地基土中的注水管网, 从下至上依次注水, 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, 在循环激振荷载作用下, 路基中防水结构层以下填料中的孔隙水压力迅速增大, 宏观上表现为路基刚度相对增大, 路基的消能作用减弱, 导致在相同动力荷载作用下, 基床同一位置的振动能量提高, 从而引起基床振动速度和加速度增大。

与降雨服役环境相比, 地下水位上升服役环境下, 路基中各监测点振动速度和加速度在激振过程中波动性明显增大, 且趋于稳定所需激振次数显著增加, 个别监测点直至试验结束仍未达到稳定, 分析其原因是: 地下水上升后, 基底 1.8 m 厚的膨胀土产生膨胀变形, 受膨胀土中的膨胀物质分布、颗粒聚合度、压实度以及水分渗流通道畅通情况等因素的影响, 基底膨胀土的膨胀变形过程具有非同步性^[13], 再加上循环动力荷载作用, 使得路基产生复杂的变形调整过程, 从而引起基床加速度和速度产生较大幅度的波动。

4 结 论

(1) 服役环境对新型基床结构的加速度和速度具有显著影响; 加速度和速度在地下水位上升服役环境下最大, 降雨服役环境中次之, 干燥服役环境下最小; 在同一服役环境下, 基床的加速度和速度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, 但地下水位上升服役环境下二者趋于稳定所需要的激振次数显著增加。

(2) 服役环境对加速度和速度沿基床深度的分布规律影响不大, 二者沿基床深度方向基本上呈二次曲线型衰减。

(3) 膨胀土路堑基床在地下水位上升后, 基底膨胀土发生复杂的膨胀变形, 严重影响基床的振动特性, 所以做好膨胀土地基面的防排水措施对提高基床的长期动力稳定性具有重要意义。

参考文献:

[1] 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, Nankun railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 463 - 467. (in Chinese))

[2] 冯俊德, 杨果林. 云桂铁路膨胀土(岩)路堑全封闭路堑基床结构试验研究报告[R]. 成都: 中铁第二勘察设计院集团有限公司, 2012. (FENG Jun-de, YANG Guo-lin. Experimental study on the fully-closed cutting subgrade in swelling soil(rock) sites along the YUN-GUI railway line[R]. Chendu: China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., 2012. (in Chinese))

[3] FILIPPOV A P. Steady-state vibrations of an infinite beam on an elastic half-space under moving load[J]. Izvestija AN SSSR OTN Mehanika and Mashinostroenie, 1961, **6**: 97 - 105. (in Russian)

[4] LABRA J J. An axially stressed railroad track on an elastic continuum subjected to a moving load[J]. Acta Mechanica, 1975, **22**: 113 - 129.

[5] KRYLOV V V. Generation of ground vibrations by superfast trains[J]. Applied Acoustics, 1995, **44**: 149 - 164.

[6] DIETERMAN H A, METRIKINE A V. Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 1997, **16**: 295 - 306.

[7] GRUNDMANN H, LIEB M, TROMMER E. The response of a layered half-space to traffic loads moving along its surface[J]. Archive of Applied Mechanics, 1999, **69**: 55 - 67.

[8] SHENG X, JONES C J C, PETYT M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, **228**(1): 129 - 156.

[9] KAYNIA A M, MADHUS C, ZACKRISSON P. Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure[J]. Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(6): 531 - 537.

[10] ANDERSEN L, NIELSEN S R K. Boundary element analysis of the steady-state response of an elastic half-space to a moving force on its surface[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2003, **27**(1): 23 - 38.

[11] 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.

[12] 马学宁, 梁波, 高峰. 高速铁路板式无砟轨道-路基结构动力特性研究[J]. 铁道学报, 2011, **33**(2): 72 - 78. (MA Xue-ning, LIANG Bo, GAO Feng. Study on the dynamic properties of slab ballastless track and subgrade structure on high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, **33**(2): 72 - 78. (in Chinese))

[13] 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 Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 137 - 143. (in Chinese))

[14] TB 10621—2009 高速铁路设计规范(试行) [S]. 2009. (TB 10621—2009 Code for design of high speed railway[S]. 2009. (in Chinese))