

DOI: 10.11779/CJGE201402013

列车移动荷载下高速铁路板式轨道路基动力性态的全比尺物理模型试验

蒋红光¹, 边学成^{1*}, 徐翔¹, 陈云敏¹, 蒋建群²

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学水工结构和水环境研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 列车移动荷载下高速铁路板式轨道路基的振动特性和动力荷载传递规律对高速铁路的设计和运行维护十分重要。介绍了一种全比尺的高速铁路板式轨道路基模型和可模拟真实列车荷载高速移动的分布式加载系统, 最高模拟列车速度可达 360 km/h。基于该模型试验平台, 对中国高速列车以不同速度运行下板式轨道路基的振动和动应力特性进行了试验研究。结果表明轨道结构的振动随着车速的提高近似呈线性增加的趋势; 路基结构的振动存在阶段性, 列车速度低于 180 km/h 时振动速度增长缓慢, 而后随着速度的增加迅速增大; 基床表层的碎石层对振动在路基中的传播有很好的吸收作用。试验发现, 尽管无砟轨道路基表面的动应力水平远低于有砟轨道, 但无砟轨道路基动应力沿深度的衰减速度要缓于有砟轨道。试验进一步发现, 无砟轨道路基动应力的增长模式与列车速度和土体所处深度均有关, 基于试验结果提出了用于预测高速铁路路基动应力的经验表达式。

关键词: 高速铁路; 全比尺模型试验; 分布式加载系统; 振动速度; 路基动应力

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)02-0354-09

作者简介: 蒋红光(1985-), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事土动力学、路基工程及交通岩土工程等方面的研究。E-mail: hongguang601@163.com。

Full-scale model tests on dynamic performances of ballastless high-speed railways under moving train loads

JIANG Hong-guang¹, BIAN Xue-cheng¹, XU Xiang¹, CHEN Yun-min¹, JIANG Jian-qun²

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058,

China; 2. Institute of Hydraulic Structure and Water Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The dynamic performances of ballastless high-speed railways under moving train loads, such as vibration behaviors and dynamic soil stresses, are two important issues in the design and maintenance of high-speed railways. Based on an established full-scale physical model for slab tracks, a distributed loading system consisting of eight high-performance hydraulic actuators is developed to simulate the moving train loads with the highest speed of 360 km/h. The test results such as vibration velocity and dynamic soil stress are offered for a better understanding of dynamic behaviors of slab tracks at various train speeds. The vibration velocity of track structure exhibits an approximately linear tendency with the train speed, while it begins to grow faster until the train speed reaches 180 km/h. The roadbed acts as a nice damping layer for vibration reduction. Although the dynamic soil stress at roadbed surface is much lower in ballastless tracks than that in ballasted tracks, it decreases much slowly with the soil depth in ballastless tracks. Meanwhile, the dynamic amplification coefficient of soil stress is found to be related to both the train speed and the soil depth. An improved empirical formula is then proposed to determine the dynamic soil stress of ballastless high-speed railways.

Key words: high-speed railway; full-scale model test; distributed loading system; vibration velocity; dynamic soil stress

0 引言

板式无砟轨道在全世界范围内的高速铁路快速发展中得到了广泛应用。与有砟轨道相比, 无砟轨道以整体性较好的混凝土支撑层代替了传统的石渣道床, 基底应力均匀, 线路平纵面性能更加稳定; 钢轨不易

产生翘曲, 提高了列车运行的安全性和舒适性; 轨道

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178418, 51222803); 2012 年国家留学基金项目(留金发[2012]3013); 浙江省重点科技创新团队(2009R50050)

收稿日期: 2013-07-14

*通讯作者

维修量减少了 70%~90%, 延长了轨道和路基的使用寿命^[1]。近些年来, 高速铁路在中国得到了快速发展, 研发的 CRTS (China railway track system) 系列板式轨道结构在京沪、沪宁、哈大等高速铁路建设中得到普遍采用。截至 2011 年底, 中国投入运营的新建高速铁路营业里程达到 6467 km。

列车动力荷载是引发路基累积变形和振动的直接因素, 明确路基内部各结构层的动应力水平和荷载传递规律是高速铁路路基结构设计和变形控制的前提保证。中国在已开通的京津高铁、武广高铁等^[2-3]无砟轨道线路上建立了相应的试验段, 对路基、隧道等结构物展开了动应力和振动响应的实车测试。总体而言, 高速铁路的现场测试数据较少, 外界影响因素复杂, 难以全面系统地获得路基内部应力的分布规律。对于有砟轨道已有大量的测试结果, 但因为列车运行速度的大幅提升, 低速条件下的经验能否通过外推应用于高速条件还未得到验证。而且, 有砟轨道和无砟轨道两者的轨道结构存在明显的差别, 已有的有砟轨道设计方法是否依旧适用也存在着诸多疑问。

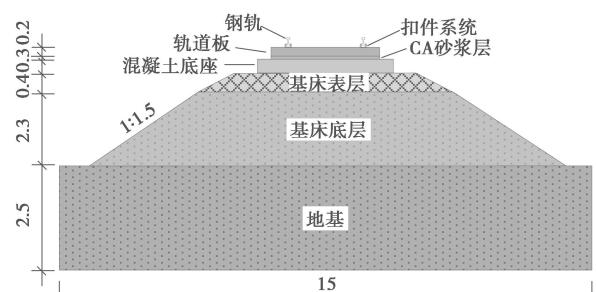
相对现场测试的局限性, 物理模型试验是研究轨道 - 路基相互作用的有效手段, 对揭示高速铁路无砟轨道路基应力水平和动力行为有重要的作用。Anderson 等^[4]建立了长 1 m, 宽 0.8 m, 高 0.6 m 的双层道砟物理模型, 研究了重复荷载长期作用下道砟结构层的材料动力性能; Cox 等^[5]对不同类型的浮置板和扣件系统进行了室内试验的对比研究, 模拟单个轮轴荷载定点加载下的浮置板振动特性; 詹永祥等^[6]通过室内 1:2 板式轨道模型, 研究了定点加载下无砟轨道 - 路基系统不同结构层的动力响应, 包括动应力、动位移以及加速度沿着路基横断面和深度的传递规律。列车移动荷载作用下, 路基内部土体存在主应力轴旋转现象, 对路基的工作性能有重要的影响^[7]。因此, 有必要在试验中引入移动荷载。Momoya 等^[8]进行了 1:5 有砟轨道室内模型试验, 研究了移动荷载下路基内部应力的分布特征与沉降发展规律, 但是模拟车速仅为 700 mm/min; Shaer 等^[9]建造了含有 3 个轨枕的 1:3 有砟轨道模型, 采用“M”型波代表一个转向架荷载, 研究了路基沉降与轨枕振动加速度的相关关系; Ishikawa 等^[10]通过 1:5 的有砟轨道室内模型试验, 比较了定点加载与移动加载两种加载方式下路基内部应力路径的不同, 揭示了移动荷载下主应力轴的旋转特性以及其对路基永久变形的影响, 结果表明移动荷载会导致路基产生更大的永久变形。

相比于其他动力荷载, 交通荷载具有明显的循环效应、移动效应和速度效应。大周次的荷载往复作用会对路基填料的弹性变形和永久变形均产生影响。列

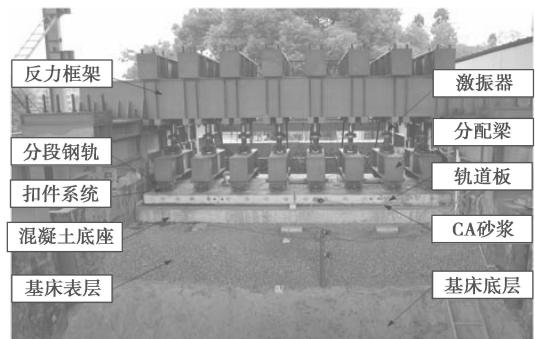
车移动引起的路基土体主应力轴旋转将导致土体产生更大的变形^[11-12]。同时, 列车运行速度的提高会引起路基振动和动应力的放大^[13], 尤其是当列车速度接近轨道系统的临界速度时, 轨道系统将会产生明显的共振现象^[14-15]。另外, 小比尺的模型试验存在比尺效应, 通过相似理论试验得到的结果来推断路基原型的真实动力响应和沉降量的可靠性还有待于验证。边学成等^[16]基于高速铁路无砟轨道的真实尺寸, 首次建立了 1:1 比尺的板式轨道路基结构, 并研究了谐波激振下板式轨道路基的动力相互作用。本文在此基础上, 通过自行研制开发的分布式加载系统, 实现了不同速度下列车移动荷载的有效模拟; 试验研究了列车移动荷载下轨道 - 路基系统的振动响应、路基内部动应力的分布特征和衰减规律; 研究了路基动应力与速度的相关性, 提出了动应力放大系数经验公式; 基于路基表面应力和内部动应力的衰减规律, 进一步提出了无砟轨道路基动应力的经验计算公式。

1 全比尺板式轨道路基模型

为保证高速列车的运行要求, 高速铁路各结构层的尺寸和填筑质量均有严格的要求。作者前期已在室内建造完成了 1:1 比尺的高速铁路板式轨道单线路基模型^[16], 依次由钢轨、扣件系统、轨道板、CA 砂浆、混凝土底座、基床表层、基床底层和地基组成, 如图 1 所示。本文在该试验平台的基础上, 开展列车



(a) 路基断面尺寸图 尺寸单位: m



(b) 建成的轨道路基模型和加载系统

图 1 全比尺板式轨道路基试验平台

Fig. 1 Full-scale test platform of slab track railway

移动荷载作用下的轨道 - 路基动力学试验研究。为了保证本文试验结果与现场实测结果的可比性, 试验模型采用了与现实高速铁路一致的设计规格, 轨道结构和路基各结构层的尺寸、类型和填筑质量与在建高速铁路保持一致。

1.1 地基

地基土体采用东南沿海广泛分布的钱塘江粉土, 最优含水率为 18%, 物理特性如表 1 所示。采用分层夯实的方法填筑, 通过控制填土的密度以达到填筑要求。填土含水率为 18%, 压实的目标密度为 1.80 g/cm^3 , 填土平均值压实系数为 94.2%。

表 1 粉土、中砂基本物理性质

Table 1 Physical parameters of silt and coarse sand

地基土体比重	最大干密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	最小干密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	
粉土	2.67	1.62	—	35	24	9	2.51	1.32
中砂	2.66	2.11	1.62	—	—	4.80	0.62	

1.2 基床

路基基床由基床底层和基床表层组成, 分别采用 B 组填料(中砂)和级配碎石作为填料。基床同样采用分层填筑振动夯实的方法, 通过控制填土的密度来保证填土质量。对于基床底层, 所采用填料的含水率为 $4\% \pm 1\%$, 目标密度 2.1 g/cm^3 , 每一层虚铺厚度 30 cm, 夯实至 25 cm; 对于基床表层, 每一层虚铺厚度 25 cm, 夯实至 20 cm。路基压实质量检测分为两类: 密实程度检测和刚度检测。其中, 密实程度是保证路基长期稳定性的最基本的控制指标, 以压实系数 K 表示。刚度检测指标主要包括地基系数 k_{30} 和土体变形模量 E_v 。地基系数 k_{30} 是用直径为 300 mm 的刚性承载板进行静压平板荷载试验, 取第一次加载测得的应力 - 位移曲线上位移为 1.25 mm 时所对应的荷载 σ_s , 按 $k_{30} = \sigma_s / 1.25$ 计算所得, 单位是 MPa/m。土体变形模量 E_v 是指土体通过一次加载或重复加载测得的应力 - 位移曲线上的位移割线斜率。基床填筑质量的各项指标实测值如表 2 所示, 括号内表示规范值。

表 2 基床填料压实效果

Table 2 Compaction indices of roadbed and subgrade

压实效果	K	E_{v2} /MPa	E_{v1} /MPa	E_{v2}/E_{v1}
基床	0.95, 0.96,	144, 143, 151	79,	1.8, 1.7,
底层	$0.97(\geq 0.95)$	(≥ 80)	82, 67	$2.3(\leq 2.5)$
基床	0.97, 0.98,	134, 147, 160	73,	1.8, 2.1,
表层	$0.97(\geq 0.97)$	(≥ 120)	69, 76	$2.1(\leq 2.3)$

1.3 轨道结构

轨道结构主要由混凝土底座、CA 砂浆层、轨道板、扣件系统和钢轨组成。混凝土底座厚度 0.3 m,

平面尺寸 $5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$; 轨道板采用 CRTS I 型, 现场吊装就位; 钢轨通过 WJ-7 型扣件固定在轨道板上, 扣件间距 0.63 m; 在轨道板和混凝土底座之间灌注 I 型 CA 砂浆。

2 移动加载系统

列车轮轴与钢轨相互作用, 产生的轮轨作用力通过扣件系统传递至轨道结构和路基中。扣件系统(有砟轨道中为轨枕)把作用于轨道上的列车移动荷载转化成位置固定的竖向振动荷载, 从数学角度看, 是把荷载从一个对时间 - 位置变化的函数变换为只是时间的函数。Song 等^[17]建立了 10 自由度的列车模型 - 板式轨道 - 路基耦合动力分析模型, 本文在该模型基础上确定了列车在钢轨上移动时每个扣件系统上的竖向作用力, 作为本试验的输入荷载。从而将列车移动加载转化为固定位置的竖向加载, 建立分布式的加载系统以实现高速列车移动荷载的有效模拟, 如图 2 所示。

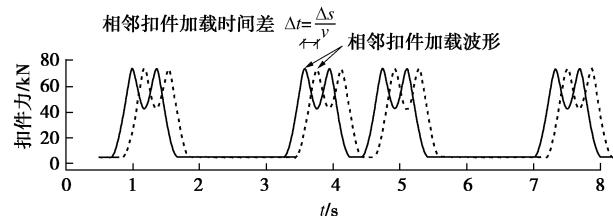


图 2 分布式加载系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of distributed loading system

列车移动荷载经由轮轨相互作用传递至扣件系统的竖向荷载时程曲线如图 2 所示, 线路平顺条件下轨道板上每个扣件传递的荷载是相同的, 唯一区别在于列车移动性导致扣件荷载时程存在相位差, 假设扣件系统沿线路方向的间距为 Δs , 列车速度 v , 则相邻作动器的加载时间间隔 Δt 可表示为

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \quad . \quad (1)$$

对于无砟轨道, 扣件系统的间距 Δs 是固定值, 相邻激振器的加载时间间隔 Δt 由列车速度 v 唯一确定。因此在分布式加载系统中, 通过控制相邻激振器的加载相位, 即可实现不同列车速度的移动加载模拟。在此基础上, 开发了相应的控制软件来实现列车移动荷载在模型试验装置中的重现。

建设而成的分布式模拟加载系统由反力框架、分配梁和 8 个按扣件间距布置的动态激振器组成, 如图 1 (b) 所示。反力框架为激振器提供反力支撑, 具有足够的刚度, 以满足激振器动态加载时对频率和变形的要求。荷载时程由动态激振器模拟输出, 相邻激振器的输出荷载存在时间差 Δt 。激振器通过安装于其下

方的分配梁, 将荷载传递至两侧的分段钢轨上面, 从而实现列车荷载的模拟。

3 试验工况与结果分析

3.1 试验内容

全比尺板式轨道-路基模型建设完成后, 开展了列车移动荷载作用下的轨道-路基动力相互作用试验。列车移动荷载由分布式加载系统模拟输出, 模拟车型CRH3型, 轴重17 t, 模拟列车车速范围5~360 km/h。试验过程中, 对列车移动加载引起的轨道-路基各结构层的振动响应和路基内部动应力进行了实时监测, 测量传感器布置于轨道纵向的中间断面, 如图3所示。其中, 振动速度传感器分别布置在轨道板、混凝土底座、基床表层、基床底层和地基的表面以及在基床底层的中部, 以获得振动强度沿轨道路基的衰减规律; 路基建造过程中, 在路基内部不同结构层埋置了5层动态土压力传感器以获得路基内部的动应力分布, 分别位于轨下、轨道中心以及混凝土底座边缘3个断面上, 距离路基表面深度依次为0, 0.4, 1.5, 2.7, 3.7 m。

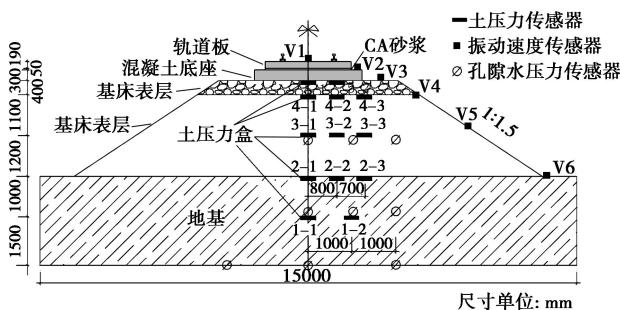


图3 传感器横断面布置图

Fig. 3 Configuration of measuring sensors

3.2 振动速度

以列车运行速度216 km/h为例, 板式轨道各结构层振动稳定后的速度响应时程曲线如图4所示。对于轨道结构, 由每个轮轴荷载引起的振动速度响应峰值清晰可见; 对于路基结构, 振动速度响应峰值对应的荷载型式逐渐由一个轮轴荷载转变为一个转向架荷载; 对于下部地基, 振动速度响应峰值基本对应于前后两车的相邻转向架荷载。在轨道附近, 振动响应主要由列车轮轴的移动引起, 而在逐渐向地基中传播的过程中, 各种反射波开始占一定的分量。

典型速度下板式轨道-路基系统的振动速度响应沿轨道横向的分布如图5所示。可以发现, 板式轨道系统中轨道结构的振动最为强烈, 达到11.6 mm/s, 而路基结构的最大振动速度为5.6 mm/s; 路基系统中距离轨道中心3 m宽度基床表层范围内的振动显著, 而

基床底层及下部地基范围内的振动速度处于较低水平, 衰减速度明显减缓, 说明基床表层对竖向振动有明显的吸收耗散作用。

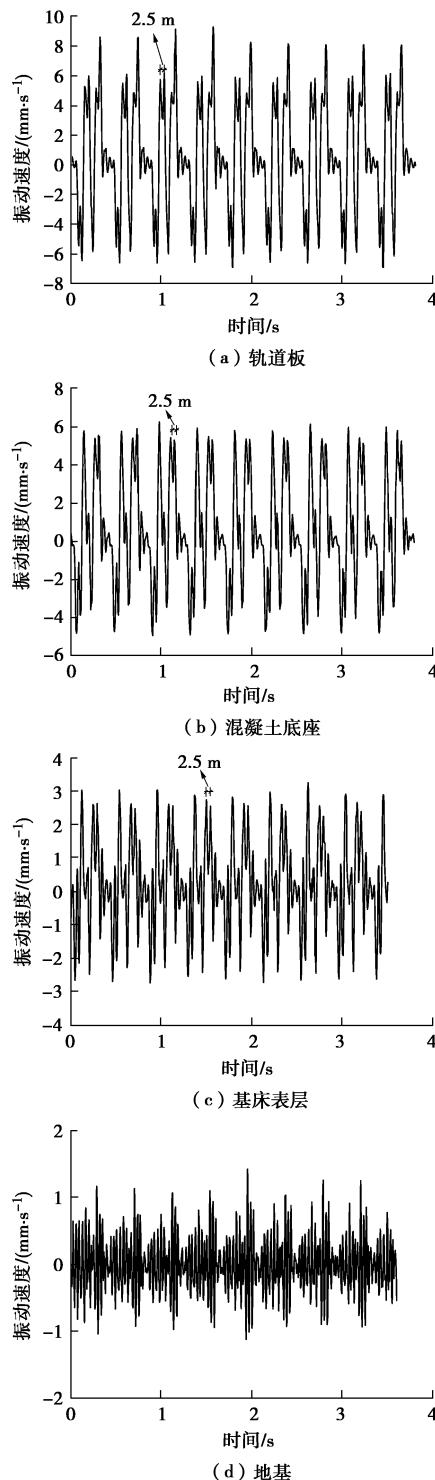


图4 振动速度时程响应曲线

Fig. 4 Vibration velocities recorded at different layers

不同列车速度下板式轨道-路基系统各结构层的振动响应如图6所示。总体而言, 列车运行速度越高, 各结构层的振动响应越强烈。对于轨道板、混凝土底座、基床表层、基床底层和地基, 在车速5~360 km/h

范围内, 车速每增加 10 km/h, 振动速度依次增加量为 0.3, 0.3, 0.2, 0.1 和 0.09 mm/s。轨道结构的振动速度随着车速的提高近似呈线性增加的趋势; 对于基床结构, 较低车速状态下(低于 180 km/h) 基床的振动响应增长缓慢; 随着速度的提高, 路基振动速度呈线性增长的趋势; 下部地基的振动速度响应与列车运行速度呈指数式增长的模式, 在车速低于 180 km/h 时, 增长速率相对缓慢, 而随着列车速度的进一步提高, 地基振动响应发展迅速, 并有超过基床底层振动响应的趋势。

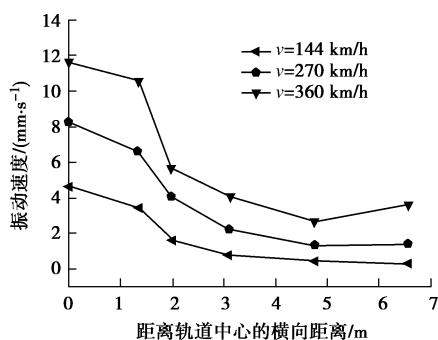


图 5 振动速度沿轨道横向的分布

Fig. 5 Attenuation of vibration velocities along cross section

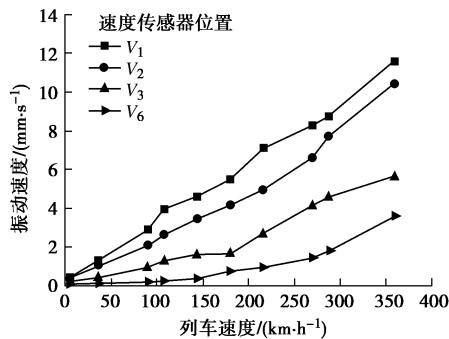


图 6 振动响应与列车速度的关系

Fig. 6 Relationship between vibration velocity and train speed

3.3 路基内部动态土压力

(1) 路基内部动态土压力分布特征

路基内部动态土压力的时程曲线如图 7 所示(以车速 216 km/h 为例)。可见, 路基内部土压力时程曲线呈“M”波的型式, 与扣件系统输入荷载时程曲线相似。但两者不同之处在于, 扣件系统输入荷载的时程曲线峰值对应着每一个列车轮轴, 而路基内部动力响应时程曲线峰值对应着每一个转向架, 表明随着列车荷载的传递, 列车轮轴荷载的影响范围随着深度逐渐叠加, 影响路基内部动力循环周期的波长近似为前后两车相邻转向架的长度。

从设计的角度, 关于路基中动应力分布有两个方面是最关键的: ①作用于路基顶面的动荷载强度, ②

动应力在路基内部的衰减规律。本文总结了列车运行时路基顶面动应力强度的现场实测值, 即包括了板式无砟轨道, 同时也有部分有砟轨道的测试结果。同时, 进行了一系列不同列车速度下的路基动应力试验, 得到的路基顶面最大动应力幅值的试验结果一并在表 3 中进行对比。其中, 所有列车轴重统一到 17 t, 相应的测试结果按照线性关系等比例调整。可见, 试验结果与大量的无砟轨道现场测试结果一致, 无砟轨道路基顶面处的动应力强度在 13~20 kPa。这个强度一般不会造成路基颗粒的破碎, 但有可能产生长期累积塑性变形。而有砟轨道道渣层底面处的路基动应力在 50~100 kPa, 是无砟轨道动应力强度的 4~5 倍, 容易导致路基颗粒破碎, 产生更大的长期沉降, 因此有砟轨道的维护更加频繁。

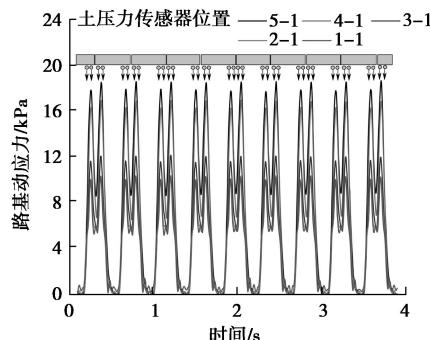


Fig. 7 Dynamic soil stress recorded at different layers

表 3 路基表面实测动应力

Table 3 Dynamic soil stress measured at roadbed surface

铁路线	车型	轨道型式	列车速度/(km·h⁻¹)	路基表面动应力/kPa
武广客专 ^[18]	CRH-2		280~350	14.6~16.9
德国科隆—莱茵新线 ^[19]	ICE-3		140~326	15.0~20.0
德国纽伦堡—因戈尔斯达特线 ^[19]	ICE-3		220~297	13.0~20.0
铁科院东郊环线双块式轨道 ^[20]	CRH-2	无砟轨道	45~160	9.5~18.0
铁科院东郊环线板式轨道 ^[20]	CRH-2		45~160	10.2~17.6
浙江大学全比尺模型试验	CRH-3		5~360	18.2~19.6
秦沈客专 ^[21]	中华之星		200~330	50.0~100.0
德国汉诺威—威尔斯堡新线 ^[19]	ICE-V	有砟轨道	10~400	70.0~100.0

以路基表面处的动应力作为基准值, 定义路基动应力衰减系数 η 为各深度处的动态土压力与基准值的比值, 对有砟轨道^[22]和无砟轨道^[23]两种轨道型式

的路基动应力衰减规律进行了统计, 如图8所示。可见, 两种轨道型式的路基动应力衰减速率存在明显的差别。有砟轨道中, 路基动应力集中在路基上部1 m范围内, 列车荷载所产生的动应力主要由上部的道砟层和底砟层承担。与有砟轨道的动应力衰减系数相比, 板式轨道路基动态土压力随深度的衰减较为缓慢, 衰减速率远低于有砟轨道, 在深度3 m的位置处, 有砟轨道路基动应力衰减了80%, 而无砟轨道仅衰减50%。可见, 在无砟轨道中, 虽然其路基顶面的动应力水平较低, 但列车荷载引起的路基动应力影响范围却更深。同时, 无砟轨道路基动应力衰减系数随着车速的增加而减小, 在列车速度为360 km/h时, 3 m深度处的路基动应力仅衰减40%, 说明速度越高, 列车荷载的影响范围越广。这反映了板式无砟轨道的受力特点, 沿线路纵向无砟轨道对动应力的扩散会更远, 因而路基基床的动应力较小, 但是较远的扩散距离(纵向较长的荷载长度)也导致了动应力沿深度方向的衰减较慢。

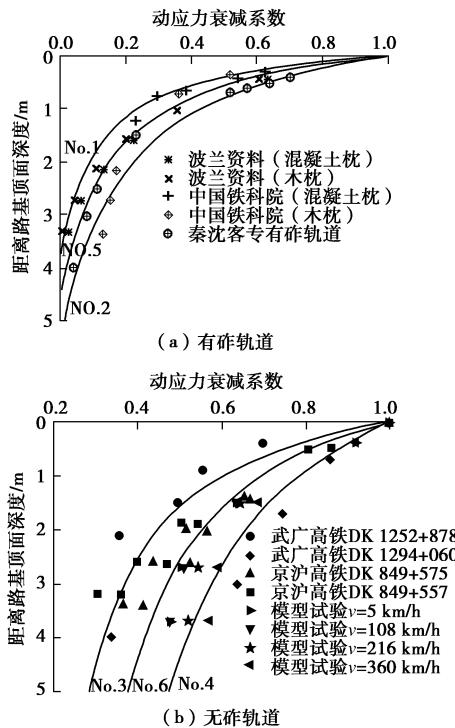


图8 不同轨道型式路基动应力衰减系数

Fig. 8 Attenuation coefficient of dynamic soil stress along soil depth for different track structures

由于有砟轨道和无砟轨道的路基动应力衰减规律存在显著的差异, 而且即使对于同一种轨道结构型式, 受各个结构层形状和性能的影响, 相应的路基动应力衰减特征也各不相同。因此, 有必要基于动应力衰减规律的实测资料, 绘制两种不同轨道结构型式的动应力衰减规律包络线, 从而将有砟轨道和无砟轨道的路基动应力衰减规律进行清晰的界定。测试结果具有一

定的随机性, 一般服从正态分布规律, 因此在数据统计时取95%的置信区间进行分析, 依次得到95%的置信界上下限和均值结果。其中, 4条95%置信区间的上下限依次为: 有砟轨道衰减置信下限-No.1、有砟轨道衰减置信上限-No.2、无砟轨道衰减置信下限-No.3、无砟轨道衰减置信上限-No.4, 并且路基动应力衰减系数曲线方程可近似由下式拟合表示:

$$\eta = 1 - \frac{z}{a + b \cdot z} , \quad (2)$$

其中, η 为路基动应力衰减系数, z 为路基内部土体深度, a , b 为拟合系数, 具体数值如表4所示。

表4 路基动应力衰减系数方程拟合系数

Table 4 Fitting parameters of attenuation coefficient of dynamic soil stress

轨道类型	置信曲线	a	b
有砟轨道	95%置信区间下限-No.1	0.42	0.89
	95%置信区间上限-No.2	0.92	0.83
	均值-No.5	0.64	0.86
无砟轨道	95%置信区间下限-No.3	1.39	1.12
	95%置信区间上限-No.4	3.40	1.22
	均值-No.6	2.12	1.18

(2) 动应力与车速和深度的关系

路基内部各结构层应力水平的确定, 对高速铁路路基的设计至关重要。影响高速列车路基内部动力荷载的众多因素中以列车运行速度的影响尤为显著。目前, 铁路路基设计指南^[24]中提出了路基设计动应力幅值计算公式:

$$\sigma_{dl} = 0.26P(1+\alpha v) . \quad (3)$$

式中 时速300~350 km时, $\alpha=0.003$; 时速200~250 km时, $\alpha=0.004$; P 为机车车辆的静轴重(按ZK活载); $(1+\alpha v)$ 为冲击系数; 客运专线铁路最大冲击系数为1.9。

时速300 km及以上时, 取 $v=300$ km/h计算, 若以20 t的列车设计轴重计算, 此时路基顶面的动应力约为100 kPa。该经验公式主要是参考国内外及中国在准高速条件下有砟轨道获得的实测数据, 对准确认识高速铁路路基面上的动应力大小及分布特征有一定的局限性, 而且也无法区分各因素对路基动应力的影响程度。胡一峰等^[19]基于德国高速铁路现场实测资料, 将路基动应力与车速的关系分为3个区段: 低于150 km/h和高于300 km/h时, 路基动应力与列车车速无关; 当车速介于150~300 km/h之间时, 路基动应力随车速线性增长。

本试验对不同列车速度下的路基内部土压力进行了测试, 以列车运行速度5 km/h(即准静态运行)的动土压力幅值为基准值, 则各车速下的动力放大系数

ϕ_d 即为该车速下的动土压力幅值与基准值的比值。同时, 以 $\phi_{d\max}$ 表示列车速度 360 km/h 时的动力放大系数, 即最大动力放大系数。通过试验发现, 距离路基顶面 0, 0.4, 1.5, 2.7, 3.7 m 处的最大动力放大系数 $\phi_{d\max}$ 依次为 1.08, 1.09, 1.17, 1.28 和 1.31。可见, 最大动力放大系数随着深度的增加而逐渐增大, 在基床范围内增加最为明显, 而在地基部分最大动力放大系数的增速逐渐放缓。最大动力放大系数与土层深度 z 近似可以用 logistic 函数表示, 在此基础上, 不同结构层路基土压力动力放大系数 ϕ_d 可统一为

$$\phi_d = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq v_e \leq 150 \text{ km/h}) \\ 1.0 + (v_e - 150)/150(\phi_{d\max} - 1) & (150 < v_e \leq 300 \text{ km/h}), \\ \phi_{d\max} & (v_e > 300 \text{ km/h}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\phi_{d\max} = 1.33 - \frac{0.25}{1 + 0.142^{3.4}} \quad (5)$$

路基内部土压力动力放大系数与列车速度和深度的关系如图 9 所示。可见, 路基内部土压力动力放大系数与列车运行速度有很大的关联性, 拟合结果较好地反映了不同深度处动力放大系数与车速的关系。当车速较低 (低于 150 km/h) 时, 动态土压力几乎没有增长; 随着列车速度的增加, 动态土压力近似呈线性发展; 当列车速度在 300 km/h 时, 动态土压力近似稳定, 不再继续增长。同时, 路基动力放大系数与土体所处深度相关, 距离路基表面越深, 动力放大现象越明显。试验中所测得地基部分的动力放大系数明显高于基床部分, 本试验的最大测试深度是距离路基表面 3.7 m, 即粉土地基 1 m 处, 最大动力放大系数为 1.31, 最浅测试位置即为路基表面, 即基床表层顶面, 最大动力放大系数为 1.08。地基部分土压力动力放大系数的测试结果与胡一峰等^[19]的描述较为一致, 如图 9(a) 所示, 但浅层基床的动力放大系数要相对较低, 如图 9(b) 所示。

(3) 基于全比尺模型试验的路基动应力分布

对准静态情况下路基内部动应力沿深度的衰减规律进行拟合, 结合路基动应力衰减系数方程(2)可得准静态情况下路基动应力沿深度的分布表达式, 即

表 5 路基动应力试验结果与经验公式结果

Table 5 Comparison of dynamic soil stress between experimental results and empirical formula

距离路基顶面深度 /m	车速 $v=108 \text{ km/h}$		车速 $v=216 \text{ km/h}$		车速 360 km/h	
	模型试验	经验公式	模型试验	经验公式	模型试验	经验公式
0	18.66	18.50	18.85	19.09	19.62	19.98
0.4	17.00	16.12	17.31	16.64	18.01	17.43
1.5	11.86	12.09	12.14	12.90	13.47	14.11
2.7	9.52	9.67	10.23	10.75	11.59	12.37
3.7	8.89	8.38	9.84	9.42	11.22	10.99

$$\sigma_{z|v=0} = \frac{G}{17} \cdot \sigma_{z=0,v=0} \cdot \eta = \frac{G}{17} \cdot \sigma_{z=0,v=0} \cdot \left(1 - \frac{z}{a+b \cdot z}\right) \quad (6)$$

式中 $\sigma_{z|v=0}$ 表示准静态情况下不同深度处的动应力值; $\sigma_{z=0,v=0}$ 表示准静态情况下路基顶面处的动应力值, 模型试验所得到的结果为 18.2 kPa; G 表示列车轴重; a, b 为拟合系数, 分别为 2.66, 1.11。

前文已经得到路基内部附加应力动力放大系数与列车车速、路基深度的关系, 则不同速度条件下, 路基内部动应力的经验公式可表示为

$$\sigma_{z-ZJU} = \phi_d \cdot \sigma_{z|v=0} \quad (7)$$

式中, ϕ_d 为动力放大系数, 如式(4)所示。

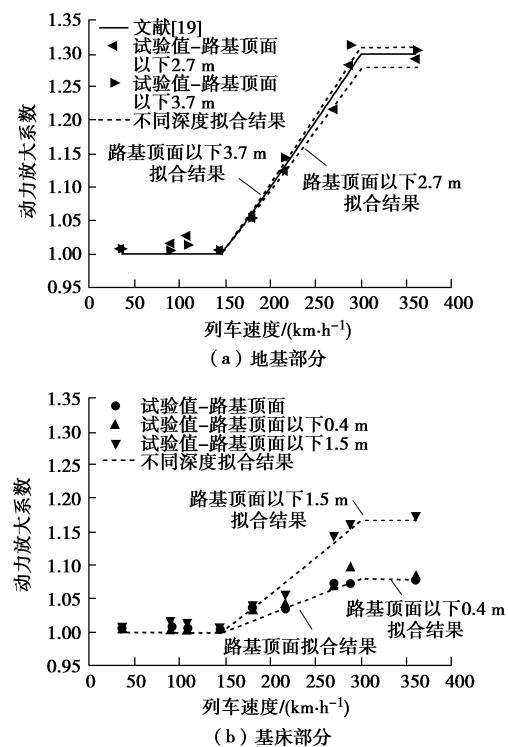


图 9 路基内部土压力动力放大系数

Fig. 9 Dynamic amplification coefficient of soil stress versus train speed

不同车速条件下路基内部附加动应力试验值与经验公式拟合结果如表 5 所示。可见, 高速铁路无砟轨道中, 基床表层整体的动应力水平均较高; 随着路基深度的增加, 动应力的衰减速率加快, 在 2.3 m 厚的

基床底层中, 路基动应力衰减了近 50%, 衰减速率达到 3.0 kPa/m; 而当动应力传递至地基内部时, 其衰减速率变得非常缓慢, 且列车速度越高, 动应力的衰减速率越低。

4 结 论

(1) 基于 1:1 比尺的高速铁路板式轨道路基模型, 自行研制开发了分布式加载系统, 在室内实现了不同速度下列车移动荷载的有效模拟, 最高模拟速度达到 360 km/h, 可以对列车荷载引起的循环效应、移动效应和速度效应展开系统研究, 克服了现有模型试验和现场测试的不足。

(2) 基床表层的碎石层对振动在路基中的传播有很好的吸收作用; 轨道结构的振动随着车速的提高近似呈线性增加的趋势; 路基结构的振动存在阶段性, 列车速度低于 180 km/h 时振动强度增长缓慢, 而后随着速度的增加迅速增大; 当速度超过 300 km/h 时, 地基的振动响应有超过基床的趋势。

(3) 无砟轨道路基表面的动应力水平远低于有砟轨道, 仅为后者的 1/4~1/5; 但无砟轨道系统中动应力沿路基深度的衰减速度要缓于有砟轨道; 在深度 3 m 的位置处, 有砟轨道路基动应力衰减了 80%, 而无砟轨道仅衰减 50%。

(4) 试验表明, 路基动应力的增长规律与列车速度和土体所处深度有关: 低于 150 km/h 和高于 300 km/h 时, 路基动应力与列车车速无关; 当车速介于 150~300 km/h 之间时, 路基动应力随车速线性增长; 同时, 距离路基表面越深, 动力放大现象越明显, 本试验的中距离路基表面 3.7 m 处的最大动力放大系数为 1.31, 而路基表面的最大动力放大系数为 1.08。该物理模型试验平台作为研究高速铁路路基和地基的一种有力的综合试验装置, 将为进一步研究高速铁路路基中的岩土工程问题提供重要的支撑作用。

参考文献:

- [1] STEENBERGEN M, METRIKINE A V, ESVELD C. Assessment of design parameters of a slab track railway system from a dynamic viewpoint[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, **306**(3): 361~371.
- [2] 范生波. 高速铁路无砟轨道路基动响应测试分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010. (FAN Sheng-bo. Analysis on experiment of dynamic response in ballastless track subgrade of high speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [3] 杨果林, 刘晓红. 高速铁路无砟轨道红黏土路基沉降控制与动力稳定性[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010. (YANG Guo-lin, LIU Xiao-hong. Red clay subgrade settlement control and dynamic stability analysis of ballastless track of high speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [4] ANDERSON W, KEY A. Model testing of two-layer railway track ballast[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(4): 317~323.
- [5] COX S J, WANG A, MORISON C, et al. A test rig to investigate slab track structures for controlling ground vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, **293**(3-5): 901~909.
- [6] 詹永祥, 蒋关鲁. 无砟轨道路基动力特性的研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 392~396. (ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu. Study of dynamic characteristics of soil subgrade bed for ballastless track[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 392~396. (in Chinese))
- [7] BROWN S. Soil mechanics in pavement engineering[J]. Géotechnique, 1996, **46**(3): 383~426.
- [8] MOMOYA Yoshitsugu, SEKINE Etsuo, TATSUOKA Fumio. Deformation characteristics of railway roadbed and subgrade under moving-wheel load[J]. Soils and Foundations, 2005, **45**(4): 99~118.
- [9] SHARE A Al, DUHAMEL D, SAB K, et al. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, **316**(1-5): 211~233.
- [10] TATSUOKA Ishikawa, SEKINE Etsuo, MIURA Seiichi. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**: 691~703.
- [11] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A R. State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000a, **126**(1): 66~75.
- [12] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A R. State of the art. II: Permanent strain response of unbound material[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000a, **126**(1): 76~83.
- [13] PRIEST J A, POWRIE W. Determination of dynamic track modulus from measurement of track velocity during train passage[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(11): 1732~1740.
- [14] KRYLOV V V. Generation of ground vibrations by superfast trains[J]. Applied Acoustics, 1995, **44**(2): 149~164.
- [15] TAKEMIYA H, BIAN Xue-cheng. Substructure simulation of

- inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, **131**(7): 699 - 711.
- [16] 边学成, 蒋红光, 金婉峰, 等. 板式轨道 - 路基相互作用及荷载传递规律的物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(8): 1488 - 1495. (BIAN Xue-Cheng, JIANG Hong-Guang, JIN Wan-Feng, et al. Full-scale model tests on slab track-subgrade interaction and load transfer in track system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(8): 1488 - 1495. (in Chinese))
- [17] SONG Huan-ping, BIAN Xue-cheng, JIANG Jian-qun, et al. An analytical approach for slab track vibration with train-track-ground coupling effect[C]// Proc 8th Int Conf on Structural Dynamics. Belgium, 2011.
- [18] 刘晓红, 杨果林, 王亮亮. 高铁无碴轨道红黏土路堑基床动响应测试与分析[J]. 工程勘察, 2011, **39**(8): 12 - 18. (LIU Xiao-hong, YANG Guo-lin, WANG Liang-liang. Dynamic response testing and analysis on red-clay cutting bed under ballastless track of high-speed railway[J], Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, **39**(8): 12 - 18. (in Chinese))
- [19] 胡一峰, 李怒放. 高速铁路无砟轨道路基设计原理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010. (HU Yi-feng, LI Nu-fang. Theory of ballastless track-subgrade for high speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [20] 董亮, 赵成刚, 蔡德钩, 等. 高速铁路无砟轨道路基动力特性数值模拟和试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(10): 81 - 86. (DONG Liang, ZHAO Cheng-gang, CAI De-gou, et al. Experimental validation of a numerical model for prediction of the dynamic response of ballastless subgrade of high-speed railways[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(10): 81 - 86. (in Chinese))
- [21] 聂志红, 阮波, 李亮. 秦沈客运专线路堑基床结构动态测试分析[J]. 振动与冲击, 2005, **24**(2): 30 - 32. (NIE Zhi-hong, RUAN Bo, LI Liang. Testing and analysis on dynamic performance of subgrade of Qinshen railway[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, **24**(2): 30 - 32. (in Chinese))
- [22] 韩自力, 张千里. 既有线提速路基动应力分析[J]. 中国铁道科学, 2005, **26**(5): 1 - 5. (HAN Zi-li, ZHANG Qian-li. Dynamic stress analysis on speed-increase subgrade of existing railway[J]. China Railway Science, 2005, **26**(5): 1 - 5. (in Chinese))
- [23] 叶阳升, 张千里, 蔡德钩, 等. 高速铁路桩网复合地基低矮路基动静荷载传递特性研究[J]. 高速铁路技术, 2010, **1**(1): 10 - 15. (YE Yang-sheng, ZHANG Qian-li, CAI De-gou, et al. On static and dynamic load transfer peculiarity of low embankment for high speed railway pile-net composite foundation[J]. High Speed Railway Technology, 2010, **1**(1): 10 - 15. (in Chinese))
- [24] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路设计规范(试行) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009. (Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
 封 3 苏州南智传感科技有限公司
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
 后插 1 北京理正软件股份有限公司
 后插 2 西安力创材料检测技术有限公司