

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0392-05

# 无碴轨道路基基床动力特性的研究

詹永祥<sup>1,2</sup>, 蒋关鲁<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;  
2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘 要:** 以遂渝线无碴轨道路基为背景, 通过室内模型试验研究, 分析了在循环加载条件下路基基床的动态力学特性。试验结果表明, 动应力响应在基床表层横断面方向上呈“W”形分布, 混凝土基础板轨下位置响应最大, 中线处和端部响应较小, 但随着深度的增加, 逐渐变为盆形分布特征; 在基床表层范围内, 动态响应最为强烈, 且随深度的增加, 衰减速率较快; 加载频率对动应力影响较小, 对动位移及加速度影响较大。另外, 在遂渝线无碴轨道综合试验段现场实车试验中, 分别进行了 CRH<sub>2</sub> 型动车组和货物列车不同运行速度下路基基床的动力学响应测试研究, 验证并评价了遂渝线无碴轨道路基基床工程适用性。

**关 键 词:** 无碴轨道; 土质路基; 动力特性; 模型试验; 实车测试

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

## Study of dynamic characteristics of soil subgrade bed for ballastless track

ZHAN Yong-xiang<sup>1,2</sup>, JIANG Guan-lu<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on Suining-Chongqing high speed railway, the dynamic characteristics of ballastless track soil subgrade are analyzed through an indoor large-scale model test under dynamic loading. The result indicates that along the subgrade surface cross section, dynamic responses have the W-shaped distribution. But gradually become the basin-shaped distribution with the increase of depth. The largest dynamic response measured are under the concrete track position base, while the responses under the centre-line and the two ends of the concrete slab are smaller. The most intense dynamic responses are measured on the surface and graded gravel area; it reduces sharply with the increase of depth. Dynamic stress is slightly affected by loading frequency, while acceleration and dynamic deformation are fairly affected by it. In addition, a comprehensive field test has been conducted on the test course in Suining-Chongqing line by using CRH<sub>2</sub>-EMUs and freight train. The dynamic response of ballastless track subgrade under different speeds have been collected and the dynamic characteristics are analyzed. The results verify the suitability and adaptability of subgrade construction on Suining-Chongqing line.

**Key words:** ballastless track; soil subgrade; dynamic characteristics; model test; real train test

## 1 引 言

高速铁路路基基床的动力特性及沉降变形特性, 一直是工程界普遍关心的问题, 也是学术和科研人员长期以来的重点研究课题。无碴轨道主要由直接支承列车荷重的钢轨、道床板、混凝土基础及路基基床等构成。要使路基保持长期稳定, 不产生危及正常运行的变形, 就必须了解路基的动力特性,

尤其是在基床范围内的动力学特性<sup>[1-3]</sup>。基床的动力特性含有两方面的内容: 一方面, 指基床对列车动荷载的响应, 涉及应力场、应变场、加速度场、幅频特性和动力学分析计算等内容; 另一方面, 指基床土的疲劳特性与临界动应力概念, 它们是指路基基床设计和既有线基床病害整治的基本思想。以往铁路轨道、路基结构的动力特性分析主要集中在轮轨力、车辆与轨道的轨道板及以上结构中, 未能充

收稿日期: 2008-10-06

基金项目: 铁道部科技研究发展计划项目 (No. 2005K004-C(G)); 重庆大学高层次人才科研基金项目 (No. 0903005104831)。

第一作者简介: 詹永祥, 男, 1979 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程、路基工程方面的研究。E-mail: zhyongxiang@126.com

分考虑路基土内动应力、动位移及加速度等力学响应<sup>[4-6]</sup>。为了研究路基结构对无碴轨道的适应性,并为客运专线的后续建设标准与设计实践提供指导,本文结合遂渝线无碴轨道综合试验段,开展了室内路基基床大比例动态模型试验的研究,并进行了遂渝线无碴轨道基床动力性能的现场行车测试,对无碴轨道路基基床的动力特性进行了综合试验研究。

## 2 模型设计与制作

模型试验以遂渝线无碴轨道综合试验段单线路基断面为原型,路堤原型断面由0.4 m级配碎石+1.8 m AB组填料+3.8 m红层泥岩填料组成<sup>[7]</sup>,路基边坡坡度为1:1.5。模型所有填料均取自遂渝线无碴轨道综合试验段现场,模型几何相似比为1:2,质量密度相似比为1:1,弹性模量相似比为1:1,混凝土基础板模型的配筋率与原型相同,进而根据Bockingham的 $\pi$ 定理,采用量纲分析法导出其他物理量的相似常数<sup>[8-11]</sup>。路堤高度为3.0 m,路基面宽度为2.6 m,边坡坡度为1:1.5;混凝土基础板横向宽度为1.6 m,厚度为0.2 m。根据模型箱大小,路

基纵向取1.12 m。按平面应变问题考虑,线路纵向采用固定钢板挡墙模拟其边界条件。为保证模型内部的均匀性,基床表层及底层的分层填筑厚度取10 cm,通过灌砂法测得级配碎石压密后的压实系数为0.99,孔隙率为15%;AB组填料及红层泥岩压密后的压实系数为0.96,孔隙率为15%。为简化设计,在满足测试要求的前提下,将CA砂浆和轨道板一并折算到混凝土基础里。基础采用C40混凝土,整体现场浇筑,在浇筑过程中预先埋设固定钢轨的螺栓,待混凝土养护成型后在混凝土基础上铺设橡胶垫,通过螺栓用扣件把钢轨固定在混凝土基础上。

## 3 测点布置及模型加载方案

在测试断面埋设了电阻式土压力传感器DS1~DS19、动位移传感器DP1~DP5及加速度传感器A1~A5,量测在动荷载下基床动应力、动位移及加速度响应的分布规律。采集系统采用南京汽轮高新技术开发公司制造的QL-116型随机信号与振动分析系统CRAS。测点仪器布置如图1所示。

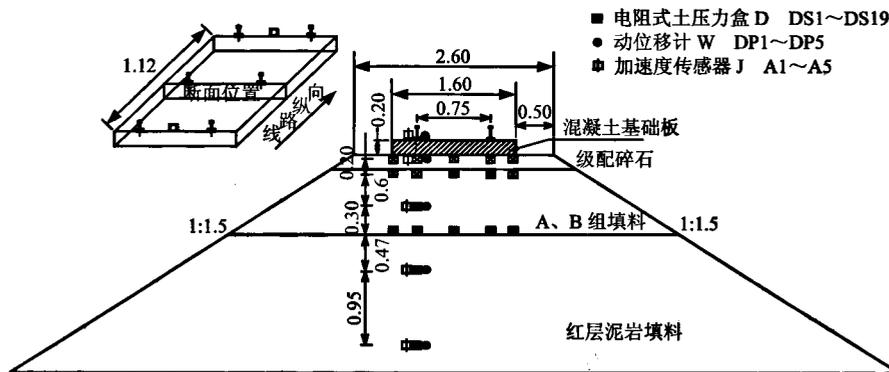


图1 试验模型及仪器布置(单位: m)

Fig.1 Test model and instrument layout(unit: m)

动荷载通过FCS0118四通道电液伺服协调加载试验系统来施加,列车荷载和运行速度通过激振器的荷载输出和频率反映。加载波形为正弦波,加载频率为3、5、6 Hz,各循环加载次数为6000次。按照铁路ZK标准活载换算的动力荷载幅值为100 kN。

## 4 路基基床动力特性结果与分析

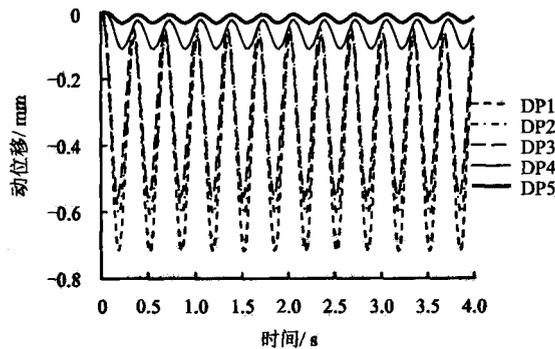
### 4.1 动力响应-时程曲线的分布规律

加载频率3 Hz时典型的动力-时程曲线如图2所示。波形很好地反映了在激振荷载下路基基床的受力响应情况,各极值点即在激振力作用该测点时

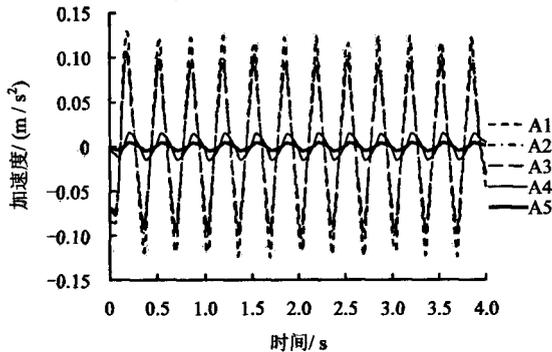
产生一个加、卸载过程所引起的动力响应,其振动具有周期性,路基基床振动峰值持续时间由加载频率决定。

### 4.2 动应力的分布规律

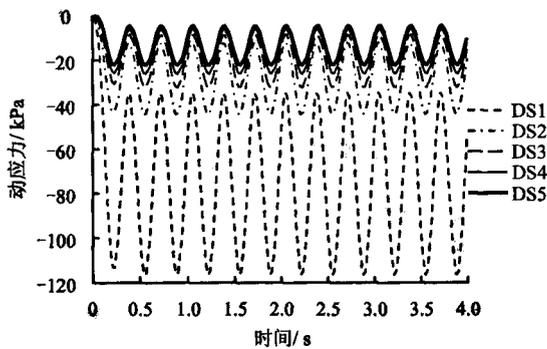
图3为动载作用下路基基床表面上动应力的横向分布曲线。从图中可以看出,动应力在路基横断面方向上的分布是不均匀的,受激振荷载影响,在基床表层轨下动应力值最大,混凝土基础板端部动应力值次之,靠近路基中线附近最小,总体上在横断面上呈“W”形分布,但随着基床深度的增大,“W”形分布的趋势逐渐减弱,最终变为中间大,两端小的盆形分布曲线。



(a) 动位移响应-时程曲线



(b) 加速度响应-时程曲线



(c) 动应力响应-时程曲线

图2 动力响应-时程曲线

Fig.2 Time-history curves of dynamic response

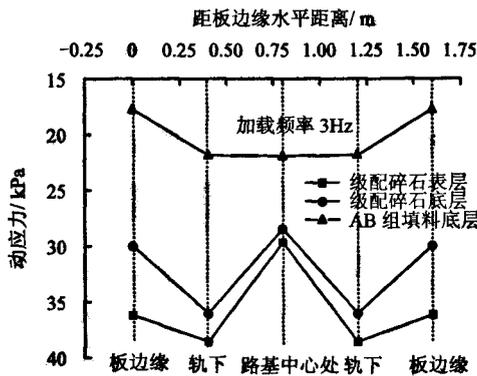


图3 路基动应力的横向分布

Fig.3 Distribution of dynamic stress of subgrade

在基床表层内衰减较快, 在基床底层内衰减较慢, 加载频率对动应力的影响较小。

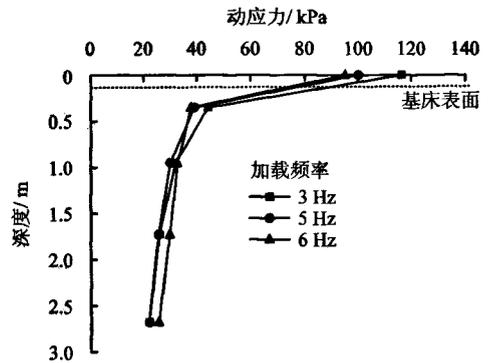


图4 动应力轨下沿基床深度分布

Fig.4 Distribution of dynamic stress under track

### 4.3 加速度、动位移沿深度的分布规律

图5、6分别为加速度、动位移沿基床深度方向的分布曲线。从图中可以看出, 加速度和动位移沿深度的分布规律是相似的, 均随深度的增加而减小, 在模型基床面下0~1.5m范围内衰减较快, 动力对基床面1.5m以下几乎无影响。加载频率对基床表层的影响较大, 对基床底层的影响较小, 动位移及加速度响应值均随加载频率的增大而增大。

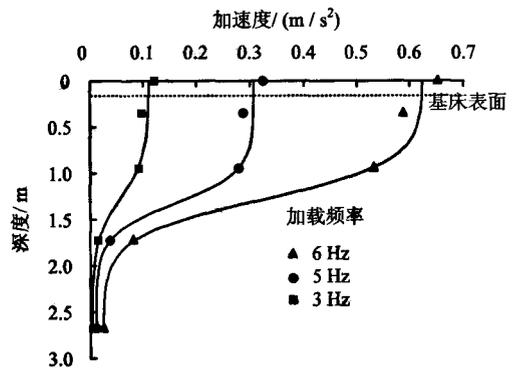


图5 加速度轨下沿基床深度分布

Fig.5 Distribution of acceleration under track

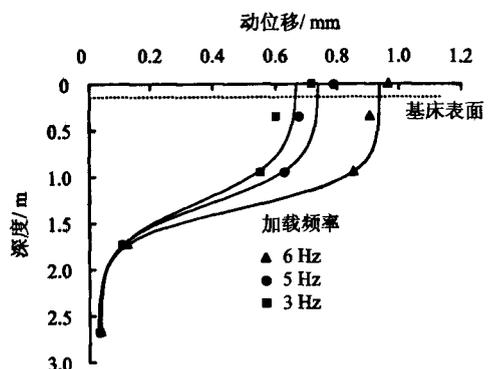


图6 动位移轨下沿基床深度分布

Fig.6 Distribution of dynamic deformation under track

图4为动应力沿轨下路基深度的分布曲线。从图中可以看出, 动应力随深度的增加而逐渐减小,

### 5 试验结果分析

为进一步验证并评价遂渝高速铁路无砟轨道路基基床工程适应性，进行了无砟轨道综合试验段现场实车试验研究。现场试验在遂渝高速铁路正式投入运营前进行，试验列车分动车组和货车实车运营。动车组为 CRH<sub>2</sub> 动力分散型电力动车组，该组由 4 辆动车和 4 辆拖车组成，即“4M(动车)+4T(拖车)”，最大轴重 14.0 t，动车组试验时速分别为 160、180、190、200、210、220 km/h；货物列车最大轴重 25.0 t，货物列车试验时速分别为 70、80、90、100、110、120、130 km/h，试验列车以 5 km/h 作为静态标定速度。

图 7 为动车组、货车通过长枕埋入式无砟轨道时基床表面动应力的横向分布。由图可知，动车组与货车通过时，路基面动应力沿横向分布均呈“W”形，动力响应受轴重影响较大，而受车速影响较小。动车组和货车通过时基床动应力随深度衰减规律如图 8 所示。随深度的增加，基床动应力逐渐减小，动车组和货车通过时基床表层底面的最大动应力约为路基面的 70%，基床底层底面的最大动应力约为路基面的 30%。在基床范围内，动态响应最为强烈。由模型试验与现场实车测试的结果对比可知，两者在基床中动态响应分布规律具有较好的一致性，动

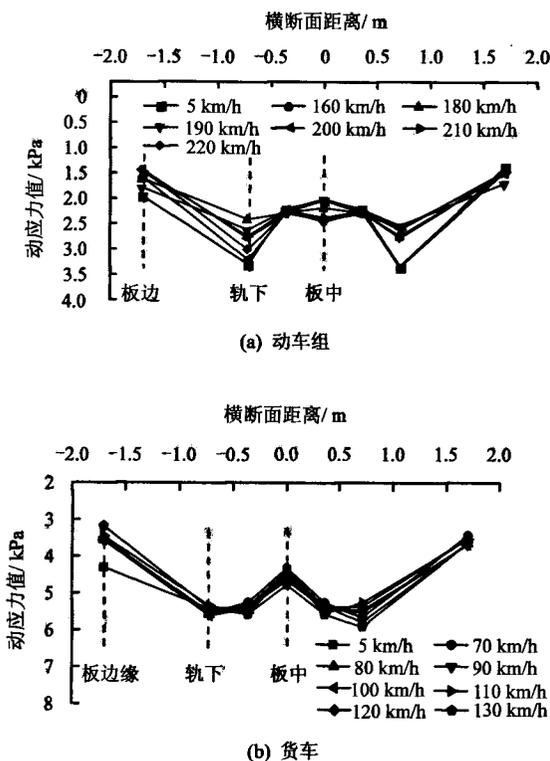


图 7 路基面动应力沿横向分布规律  
Fig.7 The distribution of dynamic stress of subgrade surface

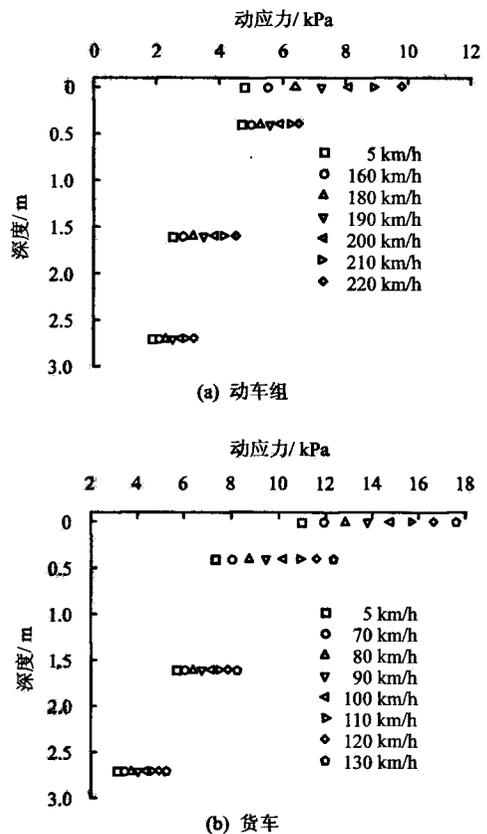


图 8 基床动应力沿深度分布规律  
Fig.8 Distribution of dynamic stress along depth of subgrade

态响应值因模型试验尺寸效应、加载大小等原因有所差异。

### 6 结论

通过遂渝线土质路基无砟轨道路基基床模型试验及现场实车试验研究，可以得到如下结论：

- (1) 动应力在路基表层横断面方向上呈“W”形分布，随深度的增加逐步变为盆形分布。动应力沿深度逐渐衰减，衰减速率在基床表层内较快，在基床底层内衰减较慢，加载频率对动应力影响较小。
- (2) 动位移和加速度沿深度方向逐渐减小，动力影响深度换算到路基原型，基本在路基面下 3 m 以内。加载频率对基床表层加速度、动位移的影响较大。
- (3) 现场实车试验表明，基床动态响应受列车轴重影响较大，车速的影响相对来讲不很明显。

### 参考文献

[1] 詹永祥, 蒋关鲁, 魏永幸. 无砟轨道桩板结构路基在地震荷载下的动力响应分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 22-26.  
ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing.

- Dynamic response analysis on the pile-plank structure roadbed of ballastless track under earthquake load[J]. *China Railway Science*, 2006, 27(6): 22—26.
- [2] 詹永祥, 蒋关鲁, 魏永幸. 无碴轨道桩板结构路基的设计及计算[C]//第二届中国交通土建工程学术交流会议论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 2006: 723—729.
- [3] 詹永祥, 蒋关鲁, 牛国辉, 等. 桩板结构路基动力模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(8): 2097—2101.  
ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu, NIU Guo-hui, et al. Model experimental research on dynamic performance of pile-plank embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2097—2101.
- [4] 卿启湘, 王永和, 赵明华. 秦沈客运专线路桥(涵)过渡段路基的动力特性分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2415—2421.  
QING Qi-xiang, WANG Yong-he, ZHAO Ming-hua. Research on dynamic performance of bridge(culvert)-subgrade transition section on Qin-Shen High-speed Railway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2415—2421.
- [5] 邱延峻, 张晓靖, 魏永幸. 列车速度对无碴轨道路基动力特性的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(2): 1—5.  
QIU Yan-jun, ZHANG Xiao-jing, WEI Yong-xing. Influenced of train speed on dynamic characteristics of ballastless track subgrade[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(2): 1—5.
- [6] 金亮星, 乔世范. 车辆-轨道-路基系统垂向动力分析模型的试验验证[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(3): 38—41.  
JIN Liang-xing, QIAO Shi-fang. Test verification of vertical dynamic analysis model of vehicle-track-subgrade system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(3): 38—41.
- [7] 中华人民共和国铁道部. TB 10001—2005 铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [8] 蒋关鲁, 刘先锋, 张建文, 等. 高速铁路液化土地基加固的振动台试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2006, 41(2): 190—196.  
JIANG Guan-lu, LIU Xian-feng, ZHANG Jian-wen, et al. Shaking table test of composite foundation reinforcement of saturated silty ground for high speed railway[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 41(2): 190—196.
- [9] 日本铁道総合技術研究所. 基礎構造物-抗土圧構造物[M]. 日本: 丸善株式会社出版, 1997.
- [10] 凌贤长, 王臣, 王成. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 450—456.  
LING Xian-zhang, WANG Chen, WANG Cheng. Scale modeling method of shaking table test of dynamic interaction of pile-soil-bridge structure in ground of soil liquefaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 450—456.
- [11] 吕西林, 陈跃庆. 结构-地基动力相互作用体系振动台模拟试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(4): 30—36.  
LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing. Study on dynamic similitude theory of soil-structure interaction system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(4): 30—36.