

DOI: 10.11779/CJGE201611001

无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动土压力分布规律 试验研究

刘汉龙^{1, 2, 3}, 孙广超^{2, 3}, 孔纲强^{2, 3}, 李 辉^{2, 3}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400450; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 基于 1:5 的轨道-路基-桩筏复合地基模型, 采用能够近似模拟列车单个轮轴荷载的正弦波荷载, 在砂土地基中通过开展不同激振频率下无砟轨道 X 形桩-筏复合地基的动力特性模型试验, 研究不同激振频率引起的轨道-路基-桩筏复合地基中的速度和动土压力, 测得了速度响应、动土压力随深度和激振频率的变化规律。研究结果表明: 在路堤横截面方向上, 振动响应主要集中在轨道-路基结构中, 基床表层中的动土压力在路堤横截面方向呈“W”形分布, 地基表面的动土压力呈“U”形分布。基床表层中的动土压力荷载放大系数随激振频率的增加而逐渐增加。相关研究成果可为无砟轨道 X 形桩-筏复合地基的理论分析与计算以及动力荷载放大系数的确定提供参考依据。

关键词: 无砟轨道; 桩-筏复合地基; X 形桩; 动土压力; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)11-1933-08

作者简介: 刘汉龙(1964-), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: hliuhhu@163.com。

Model tests on distribution law of dynamical soil pressure of ballastless track XCC pile-raft composite foundation

LIU Han-long^{1, 2, 3}, SUN Guang-chao^{2, 3}, KONG Gang-qiang^{2, 3}, LI Hui^{2, 3}

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400450, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on 1:5 scale track-subgrade-pile-raft composite foundation model, the dynamic response of ballastless track X-section cast-in-situ concrete (XCC) pile-raft composite foundation embedded in sand under sine wave loads (which can approximately simulate a train axle load) with different frequencies is investigated. This involves the measurement and analysis of response in velocity and dynamic soil pressure under different load frequencies. It is shown that, in the direction of cross-section of embankment, the velocity response mainly focuses on track-subgrade. The dynamic soil pressure of roadbed is "W"-shaped distribution and the dynamic soil pressure of subsoil surface is "U"-shaped distribution in the direction of cross-section of embankment. The dynamic load magnification factor of roadbed increases with the increasing load frequency. The research results may provide an insight into the theoretical analysis and calculation of ballastless track XCC pile-raft composite foundation, and validating its dynamic load magnification factor.

Key words: ballastless track; pile-raft composite foundation; XCC pile; dynamic soil pressure; model test

0 引 言

桩-筏复合地基具有刚度大、整体性好、承载力高、地基沉降小等特点, 是一种行之有效的加固软土地基的方法, 已被广泛应用于高速铁路建设中。高速铁路桩-筏复合地基在设计过程中, 需要考虑的一个重要因素就是列车不同运行速度情况下(即不同激振频率)对其动力响应的影响。目前, 在这方面国内外学者取得了一定的研究成果。在理论分析方面, 相关研究人

员主要基于一维固结理论和车辆-轨道耦合模型分析了列车荷载下分层地基中波的传播规律和高速列车运行引起的地面振动特性^[1-2]。Yang 等^[3]、Feng 等^[4]分别基于一维固结理论和 Mesri 蠕变模型, 介绍了一种高速铁路桥梁-桩基础长期沉降预测方法和一种考虑土

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1134207, 51278170, 51479060);
国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(51420105013)
收稿日期: 2015-10-11

体蠕变效应的高速铁路桥梁桩基础工后沉降计算方法。陈洪运等^[5]基于理论分析和高速铁路现场试验,提出了一种桩筏结构复合地基中筏板受力的计算方法。

在数值模拟方面, Hall 等^[6]、Chebli 等^[7]和薛富春等^[8]主要在列车荷载下地基内动应力与列车速度的关系、振动速度在路堤范围内的衰减情况和移动荷载作用下高速铁路轨道-路基-地基耦合系统振动加速度的空间分布特征等方面进行了研究。Thach 等^[9]和 Jiang 等^[10]主要研究了桩承式路堤在减缓高速列车引起路堤振动的效果和高速铁路桩-板复合地基中碎石垫层、板厚和桩的刚度分别起到的作用。

在现场试验方面, 相关研究人员基于高速铁路路堤和路基的动力响应试验、复合桩基现场试验、既有铁路桥墩桩基础基顶动力测试和有砟轨道现场试验, 探讨了高速铁路移动荷载下路基、路堤和桥墩桩基础基的振动特征与速度的关系, 桩-土应力比和荷载分担比顶、动位移、动加速度、振动速度随距离的衰减规律、随固结时间、行车速度的变化情况, 分析了高速铁路桩承式路堤中桩帽的作用和淤泥质黏土中 CFG 桩减小路堤横向位移的原因^[11-15]。

在模型试验方面, Shaer 等^[16]基于 1:3 有砟轨道模型试验, 研究了路堤沉降与荷载振动频率的关系。詹永祥等^[17]基于 1:2 室内模型试验, 研究了无砟轨道路基在循环加载条件下动应力随深度、加载频率的关系。Ishikawai 等^[18]基于 1:5 有砟轨道模拟试验, 分析了移动荷载下路基内部应力的分布特征与沉降发展规律。边学成等^[19]通过 1:1 高速铁路路基和轨道模型试验, 分析了轨道结构和路基的动力响应与加载频率之间的关联性。Wang 等^[20]基于离心机模型试验, 分析了运用桩-筏复合地基控制高速铁路湿陷性黄土地基沉降的效果。但是已有研究成果对桩-筏复合地基在高速铁路循环荷载作用下的动力响应、沉降变形规律方面研究较少。

现浇 X 形桩作为横截面异形桩, 在南京长江第四大桥接线段等工程中得到了成功应用, 相关研究人员也取得了一定的研究成果, Liu 等^[21]、Kong 等^[22]分别结合 X 形扩孔理论和现浇 X 形桩现场试验分析了 X 形桩沉桩产生的挤土位移、应力以及孔隙水压和不同桩间距与荷载等级下复合地基中桩土协调相互作用和荷载分担比。但是, 已有研究主要集中在静力荷载作用下, 针对动力荷载作用下的力学响应研究较少。

因此, 本文在砂土地基中通过开展不同激振频率下 1:5 的无砟轨道 X 形桩-筏复合地基模型试验, 着重研究了 X 形桩-筏复合地基的速度响应和动土压力

随激振频率和深度的变化规律等, 为无砟轨道 X 形桩-筏复合地基的理论分析与计算及动力荷载放大系数的确定提供参考依据。

1 无砟轨道桩-筏复合地基模型试验简介

1.1 模型尺寸及模型相似率设计

本文模型试验是在河海大学大型桩基模型试验系统中进行, 该模型槽尺寸为 5 m×4 m×7 m 的钢筋混凝土结构, 其上反力架为钢结构, 并具有模拟静动荷载的加载设备。建成后的无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动力模型实物图和示意图分别如图 1, 2 所示。

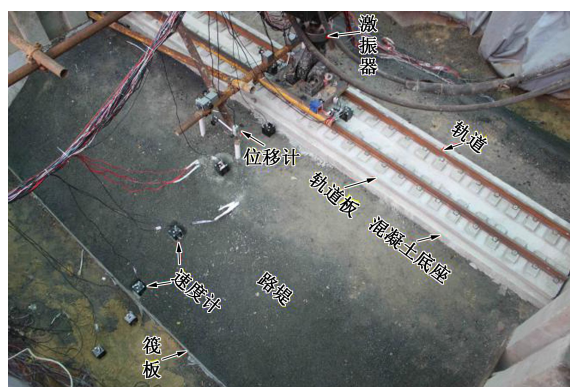


图 1 无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动力模型实物图

Fig. 1 Ballastless track XCC pile-raft composite foundation model

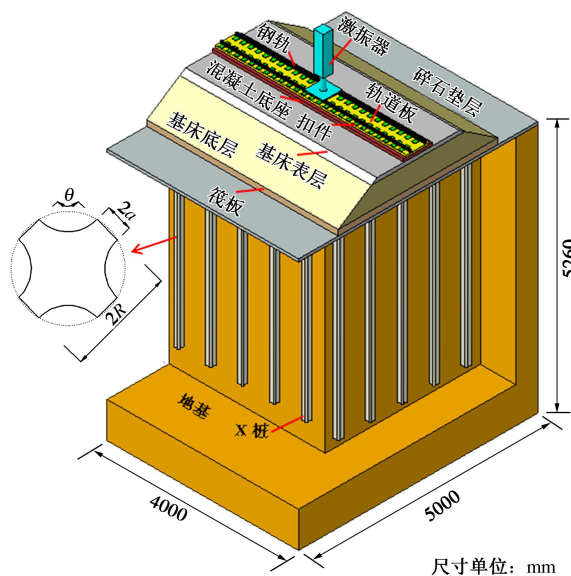


图 2 无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动力模型示意图

Fig. 2 Arrangement of ballastless track XCC pile-raft composite foundation model

根据高铁线路纵向变形小, 且在其长度方向上无限长的特点, 通常将其线路的纵向看成一个平面应变问题, 故本试验以线路长度方向 20 m (大约 4 块轨道板) 为原型开展模型试验研究是可行的。同时由于试

验场地的限制, 本试验采用缩尺模型, 模型与原型的几何相似比选为 1:5, 加速度相似比取 1:1。模型地基碎石垫层和路堤填料分别采用现场砂土、碎石和 AB 组料制作, 模型桩、筏板、混凝土底座和轨道板分别采用与原型相同标号的混凝土制作, 模型配筋率与原型相同, 因此密度相似常数为 1:1, 砂土、桩、碎石垫层、筏板、路堤填料、混凝土底座和轨道板的弹性模量相似常数为 1:1, 进而根据 Buckingham π 定律, 采用量纲分析法确定各物理量的相似常数。

1.2 轨道-路基-桩筏复合地基系统的制作

无砟轨道-路基-桩筏复合地基模型依次由地基、X 形桩碎石垫层、筏板、路堤(基床底层、基床表层)和无砟轨道组成。本次模型试验地基采用砂土, 其基本物理性参数见表 1 所示。该砂土属于级配均匀的中砂, 不均匀系数 C_u 为 2.42, 曲率系数 C_c 为 0.93, 其级配曲线见图 3。通过人工分层填筑向模型槽内均匀填砂 5.20 m, 在填筑过程为了达到密实度相近, 使每层填砂的重量相同, 每层填砂高度控制为 30 cm, 然后摊铺均匀, 用夯机均匀压实到 25 cm, 待压实完成后, 再在该层任选 5 处用灌水法测量砂土压实后的密度, 计算出该层压实后的相对密实度 D_r 。本模型试验填砂的相对密实度 $66\% < D_r < 80\%$, 砂土处于中密状态。在填筑碎石垫层时, 以桩顶处标高为参照平面, 在试验桩顶均匀填筑碎石垫层 0.1 m, 并压实至桩顶上方 0.06 m 处。该碎石的级配良好, 不均匀系数 C_u 为 6.0, 曲率系数 C_c 为 2.89, 其级配曲线如图 3 所示。

表 1 砂土基本物理指标

Table 1 Physical indices of sand				土粒 相对 密度
天然密度 /(g·cm ⁻³)	天然含 水率/%	最小干密度 /(g·cm ⁻³)	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	
1.478	4.08	1.40	1.73	2.67

试验模型桩为混凝土桩, 混凝土强度等级为 C25, 其形状如图 2 所示。试验桩长为 3960 mm, 开弧间距 $2a$ 为 39 mm, 外包圆直径 $2R$ 为 157 mm, 开弧角度 θ 为 90° 。当地基土填筑至距槽底 1.24 m 高度时, 将 X 形桩布置在预定位置(图 4)。筏板、基床底座和轨道板的混凝土强度等级分别为 C35、C40 和 C55。

路基填料为 A、B 组料, 不均匀系数 C_u 为 19.23, 曲率系数 C_c 为 1.34, 其级配曲线见图 3。路基在填筑过程中严格按照高速铁路设计规范^[23]的要求建设完成。路基填筑质量的各项指标实测值如表 2 所示, 其中括号内为规范值。另外, 为了减小模型槽四壁摩擦力和反射波对试验结果的影响, 填砂土前预先在墙体四周和底部布置“两布三膜”。

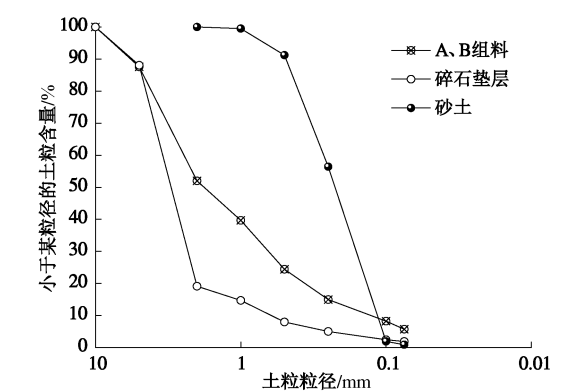


图 3 颗分曲线

Fig. 3 Gradation curves of particles

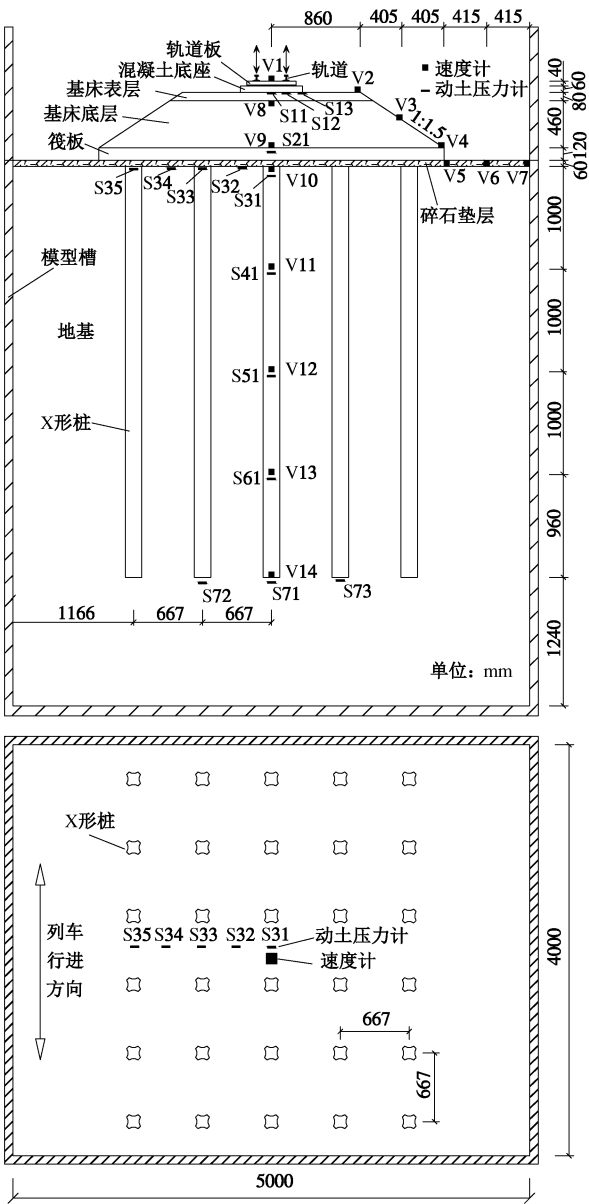


图 4 试验仪器布置示意图

Fig. 4 Layout of instruments of model test

1.3 试验仪器布置

针对无砟轨道 X 形桩桩-筏复合地基动力响应特

性和累计沉降模型试验布置了完整的动静态测试仪器，本文重点研究复合地基的速度和动土压力响应特性，故着重介绍速度计和动土压力计的布置方式。

表 2 基床填料压实效果

Table 2 Compaction indices of roadbed and subgrade			
填料	K	$K_{30}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	E_{vd}/MPa
基床表层	0.97(≥ 0.97)	243(≥ 190)	98(≥ 55)
基床底层	0.97(≥ 0.95)	236(≥ 150)	95(≥ 40)

注： K 为压实系数， K_{30} 为地基系数， E_{vd} 为动态变形模量。

本试验中速度计($V_1, V_2, V_3, \dots, V_{14}$)和动土压力计($S_{11}, S_{12}, \dots, S_{73}$)的布置如图 4 所示，其中速度计的型号为 DH610V 磁电式速度传感器，其工作频带为 0.17~80 Hz，长×宽×高为 63 mm×63 mm×63 mm，质量为 0.63 kg 远远小于土体质量，在试验前进行校核，其量程为±0.6 m/s，灵敏度为 0.414 V/(m/s)。

1.4 试验加载与数据采集系统

静动力试验加载控制系统由 JAW-200K 型静动力激振器、荷载输入与控制机、激振器控制器、液压油源等组成。本系统的激振器设备最大试验力 200 kN，试验力测量精度±0.5%，激振器行程±150 mm，位移示值精度±1%，激振器频率 0.1~30 Hz。激振器控制器为德国 MOOG 公司生产的控制器，可根据不同列车荷载的大小和运行速度设置不同的振动波形，模拟高铁荷载的循环加载。

数据采集分析系统采用 DHDAS 动态信号采集分析系统，该系统在试验工程中可对数据进行连续不间断采集。

2 荷载形式及试验工况设计

边学成等^[19]以一个轮轴荷载为例，通过实测资料和理论计算，经过简化用余弦波模拟列车运行时轮轴沿钢轨连续运行的荷载时程曲线。詹永祥等^[17]采用正弦波的荷载形式，开展了无砟轨道桩板结构模型试验。

本模型试验的激振荷载采用正弦波加载形式来模拟高速铁路荷载，荷载形式为

$$Q(t) = Q + A\sin(\omega t) \quad (1)$$

式中 $Q(t)$ 为作用在筏板顶部的荷载 (kN)； Q 为作用在筏板顶部的恒载 (本试验取 100 kN)； A 为动载的振幅 (本试验取 10 kN)； $\omega=2\pi f$ 为角速度 (rad/s)， f 为激振频率 (Hz)； t 为加载时间 (s)。本模型试验分 6 个试验工况进行开展，激振频率分别为 1, 5, 8, 10, 13 和 15 Hz，各工况激振的次数为 5000 次。

3 试验结果与分析

3.1 速度分析

(1) 不同激振频率下的速度响应时程曲线

由于轨道板上的速度响应距激振源最近，受其它

因素的干扰较小，这里以轨道板上的速度响应为例，分析不同频率下的速度响应时程曲线。在不同激振频率的正弦波荷载作用下，无砟轨道 X 形桩桩-筏复合地基振动稳定后的速度时程响应曲线如图 5 所示。由图 5 可知，在不同激振频率下，轨道板随着循环荷载的加、卸载过程，其速度响应时程曲线也呈现明显的周期性加、卸载过程，具有明显的正弦波形。轨道板上的速度响应能较好地反映所施加的正弦波循环荷载。

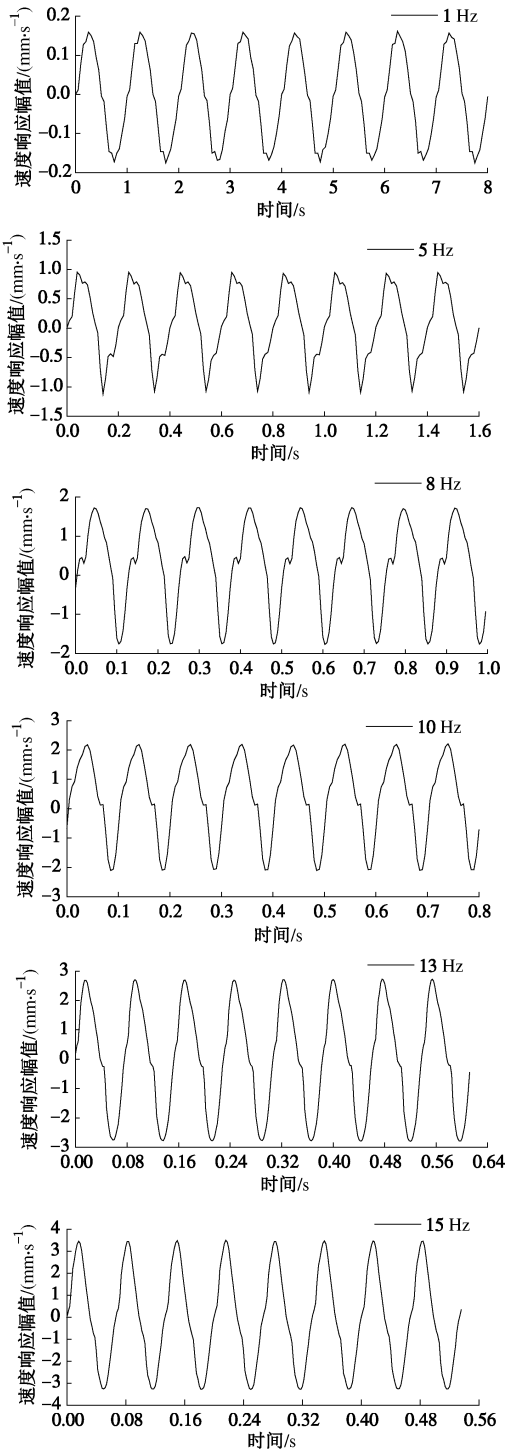


图 5 不同频率的振动速度时程响应曲线

Fig. 5 Vibration velocities recorded versus frequencies

(2) 不同深度处的速度响应时程曲线

以激振频率 13 Hz 时为例, 该系统中不同位置处的速度响应时程曲线如图 6 所示。在轨道板和路堤位置处, 由循环荷载引起的速度响应时程曲线具有明显的正弦波形。随着深度的加深, 正弦波形速度响应逐渐趋于模糊。由此可知, 在轨道板和路堤位置附近, 速度响应主要有循环荷载引起, 而在向地基土传播的过程中, 各种反射波逐渐开始占一定的分量。

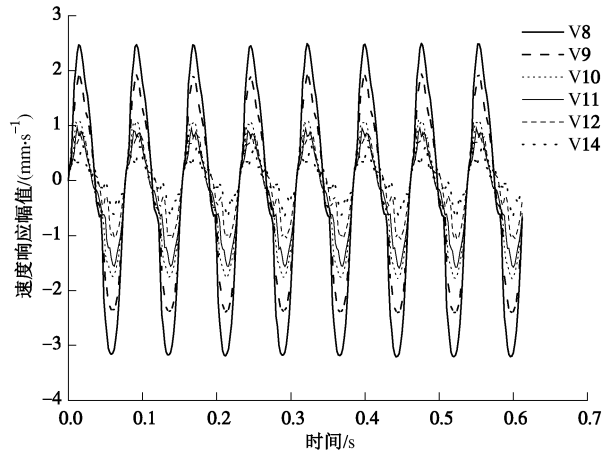


图 6 不同深度的振动速度响应时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of velocity response versus depth

(3) 速度响应幅值与深度的关系

速度响应幅值为荷载循环一周时速度响应的最大值与最小值差。以循环荷载振动到 5000 次时为例, 在 6 种不同激振频率作用下无砟轨道 X 形桩-筏复合地基内部不同位置处的速度响应幅值如图 7 所示。由图 7 可知, 速度响应在向地基深度传递的过程中, 速度响应幅值逐渐衰减。具体来讲筏板上表面、地基表面和桩端处的速度响应幅值分别衰减为基床表层的 72%~82%, 47%~55%和 18%~21%。速度响应幅值从筏板上表面到地基表面的范围内衰减速率最为迅速, 路堤范围内衰减速率次之, 地基土中的衰减速率最缓慢。同时在地基土中, 随着深度的增加, 速度响应幅值大致呈线性衰减。

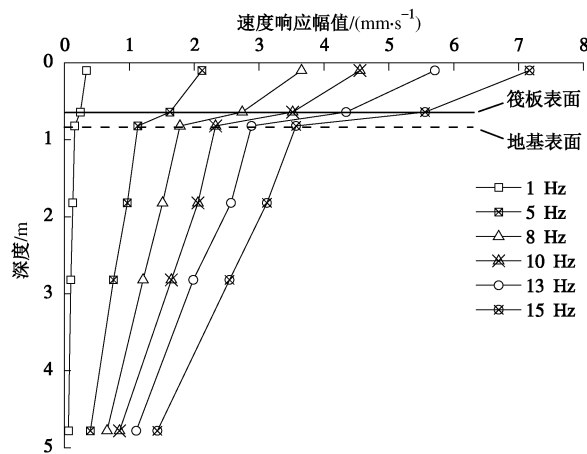


图 7 振动速度响应幅值与深度的关系曲线

Fig. 7 Curves of velocity response amplitude versus depth

注意到从筏板上表面到地基表面的范围内的结构物依次为 0.12 m 厚的钢筋混凝土板和 0.06 m 厚的碎石垫层, 由于钢筋混凝土板的刚度很大, 对速度的衰减影响很小, 可知碎石垫层对速度响应幅值的衰减影响较大, 在振动速度响应由轨道板向地基土传播的过程中其起到了良好的减震作用。

(4) 速度响应幅值与横向距离的关系

以循环荷载振动到 5000 次时为例, 无砟轨道 X 形桩筏复合地基横截面方向上不同位置处的速度响应幅值如图 8 所示。由图 8 可知, 速度响应幅值在轨道板位置处均最大, 基床表层、筏板的速度响应幅值依次衰减为轨道板的 45%~50%, 16%~29%。速度响应幅值传递到地基表层时, 基本衰减为轨道板的 2%~20%。

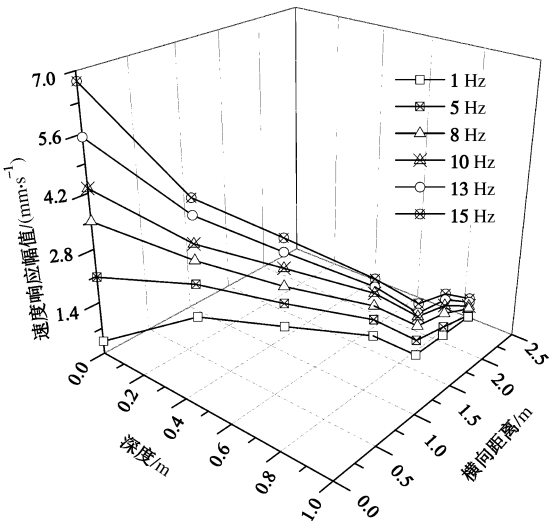


图 8 振动速度响应幅值与横向距离的关系曲线

Fig. 8 Curves of velocity response amplitude versus distance

为了重点研究速度响应幅值在路堤横截面方向上的衰减规律, 暂时不考虑图 8 中深度的影响因素, 将其投影到横向距离与速度响应幅值的坐标平面中, 如图 9 所示。从图 9 可知, 在路堤横截面方向上, 速度响应幅值随横向距离的增加而逐渐减小。

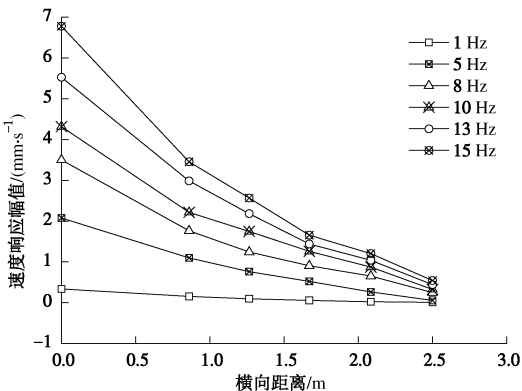


图 9 振动速度响应幅值与横向距离的关系曲线

Fig. 9 Curves of velocity response amplitude versus distance

(5) 轨道板速度响应幅值与激振频率的关系

由 3.1 (1) 节中的分析可知, 在轨道板处, 速度响应幅值主要由循环荷载引起, 基本不受其它因素的影响, 故这里着重研究轨道板顶部的速度响应幅值与激振频率的关系。图 10 为不同激振频率下轨道板速度响应幅值与激振频率之间的关系曲线。从图 10 可知, 在激振频率 1~15 Hz 范围内, 轨道板速度响应幅值随着激振频率的增加近似呈线性增加。

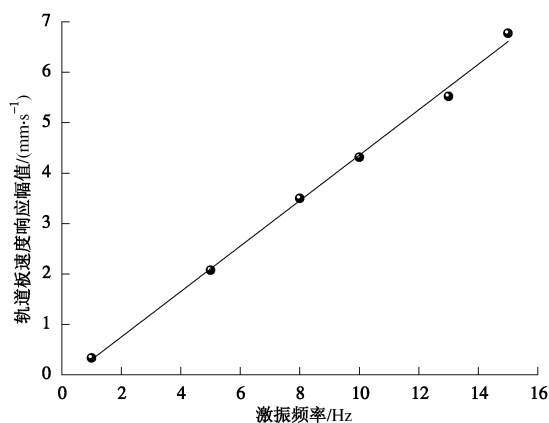


图 10 轨道板速度响应幅值与激振频率的关系曲线

Fig. 10 Relationship between velocity response amplitude of track slab and loading frequency

3.2 动土压力分析

(1) 基床表层动土压力分布

动土压力为荷载循环一周时地基表面轴向动土压力的最大值与最小值差。图 11 为不同激振频率下基床表层动土压力与横向距离的关系曲线 (其中左半部分用虚线表示的数据为右半部分实测数据的镜像)。从图 11 中可知, 在基床表层中, 钢轨正下方对应的动土压力最大, 混凝土底座边缘处次之, 混凝土底座中心正下方对应的动土压力最小, 即基床表层中的动土压力在路堤横截面方向上呈“W”形分布。

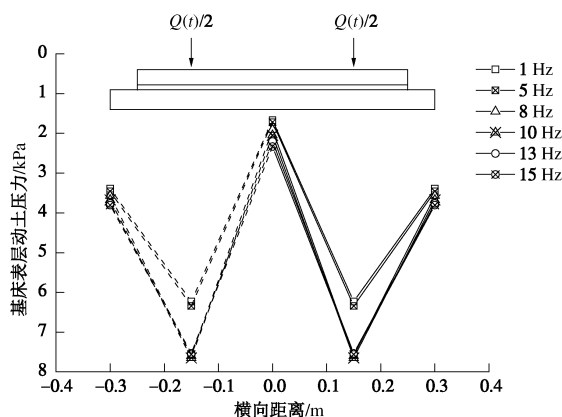


图 11 基床表层动土压力与横向距离的关系曲线

Fig. 11 Dynamic soil pressure of roadbed versus distance

(2) 基床表层动土压力与激振频率的关系

图 12 为不同激振频率下基床表层中混凝土底座

中心正下方(S₁₁)处的动土压力曲线。从图 12 中可知, 该处的动土压力随激振频率的增加而逐渐增加。

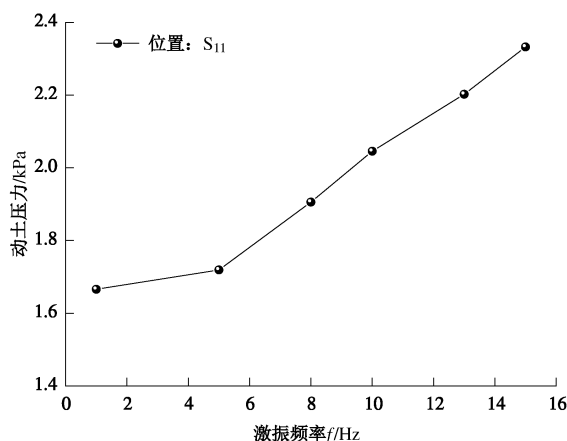


图 12 动土压力与激振频率的关系曲线

Fig. 12 Relationship between dynamic soil pressure and loading frequency

本文以激振频率 1 Hz (即准静力状态) 循环荷载作用下的动土压力为基准值, 则各激振频率下动土压力与 1 Hz 下动土压力的比值为动力荷载放大系数。这里选取位置 S₁₁ 处的动土压力为研究对象, 则其动土压力放大系数 φ_d 与激振频率 f 的关系曲线如图 13 所示。从图 13 可知, 该处的动土压力放大系数随激振频率的增而而逐渐增加。这一变化规律与陈仁朋等^[24]中的 φ_d 随列车速度 (注: 列车速度与频率成线性相关) 的变化规律相类似。在激振频率 15 Hz 时, 本试验中 S₁₁ 处的动土压力放大系数为 1.4, 小于中国高速铁路设计规范 (试行)^[23]中的动力放大系数 3.0。

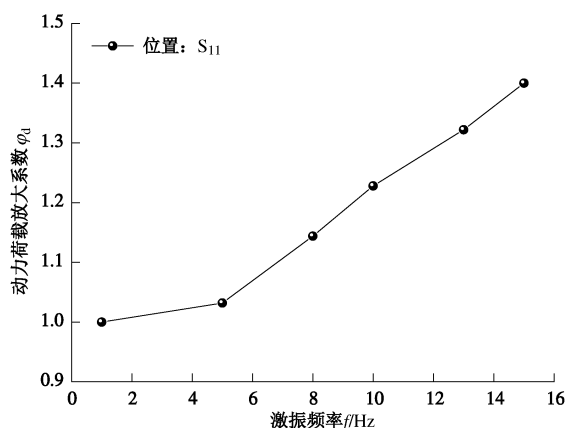


图 13 动力放大系数 φ_d 与激振频率的关系曲线

Fig. 13 Relationship between dynamic load magnification factor and loading frequency

(3) 地基表面动土压力分析

图 14 为不同激振频率下地基表面的动土压力与横向距离的关系曲线 (其中用虚线表示的右半部分数据为左半部分实测数据的镜像)。从图 14 中可知, 筏板中心正下方的动土压力最大, 从筏板中心到距筏板中心 1 m 处, 动土压力几乎衰减了 90%。在路堤横截

面方向上,地基表面的动土压力呈“U”形分布。

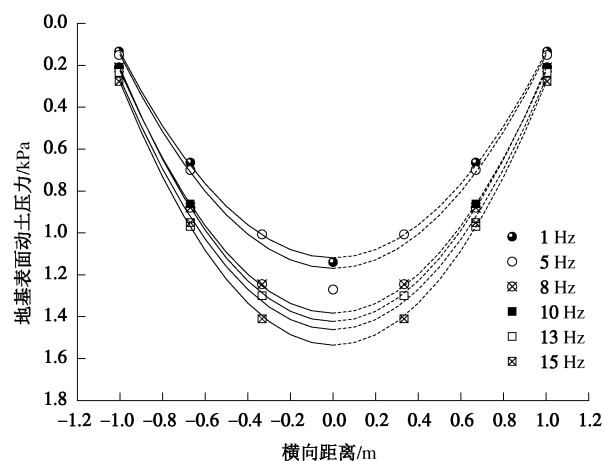


图 14 基床表层动土压力与横向距离的关系曲线

Fig. 14 Dynamic soil pressure of subsoil surface versus distance

(4) 动土压力与深度的关系

图 15 为不同激振频率下无砟轨道桩筏复合地基深度方向上不同位置处的动土压力与深度的关系曲线。

图 16 为以各个激振频率下基床表层的动土压力为基准值,归一化后的动土压力与深度的关系曲线。

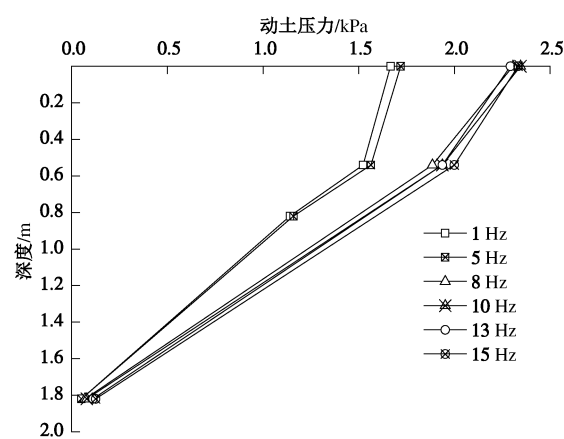


图 15 动土压力与深度的关系曲线

Fig. 15 Dynamic soil pressure versus depth

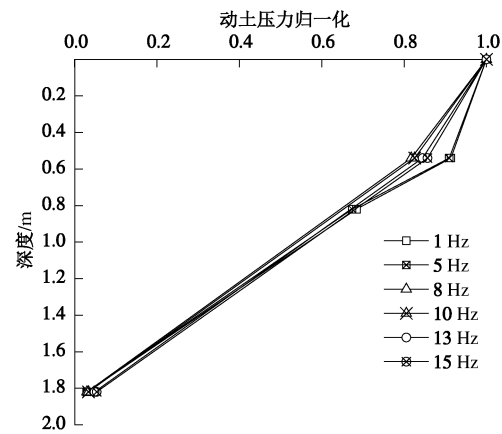


图 16 动土压力与深度的关系曲线

Fig. 16 Dynamic soil pressure versus depth

由图 15, 16 可知,在路堤范围内,动土压力衰减

了 10%~18%,在地基表面位置处动土压力衰减了大约 33%,当荷载传递到地基表面下方 1 m 处时,其动土压力衰减了大约 97%。由此可知,动土压力在路堤范围内衰减较为缓慢,在地基土中衰减非常迅速。

4 结 论

本文在砂土地基中开展了无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动力模型试验研究,分析了不同频率的正弦波循环荷载作用下,无砟轨道 X 形桩-筏复合地基的动力响应特性,在激振频率 1~15 Hz 范围内,可以得出以下 3 点结论。

(1) 速度响应幅值在路堤横截面方向上,随横向距离的增加而逐渐减小,振动响应主要集中在轨道-路基结构中。在地基深度方向上,地基土中的速度响应幅值随深度的增加大致线性衰减。碎石垫层起到了良好的减震作用。

(2) 在路堤横截面方向上,基床表层中的动土压力呈“W”形分布,地基表面动土压力呈“U”形分布。

(3)基床表层中的动土压力荷载放大系数随激振频率的增而逐渐增加,当激振频率为 15 Hz 时,动土压力放大系数为 1.4。

参考文献:

[1] 周华飞, 蒋建群. 高速列车引起的地基振动[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2104 - 2111. (ZHOU Hua-fei, JIANG Jian-qun. Ground-borne vibration induced by high-speed trains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2104 - 2111. (in Chinese))

[2] 翟婉明, 韩海燕. 高速列车运行于软土地基线路引起的地面振动研究[J]. 中国科学, 2012, 42(10): 1148 - 1156. (ZHAI Wan-ming, HAN Hai-yan. Research on ground vibration caused by high-speed train running on soft ground[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 42(10): 1148 - 1156. (in Chinese))

[3] YANG Q, LENG W M, ZHANG S, et al. Long-term settlement prediction of high-speed railway bridge pile foundation[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(6): 2415 - 2424.

[4] FENG S Y, WEI L M, HE C Y, et al. A computational method for post-construction settlement of high-speed railway bridge pile foundation considering soil creep effect[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(7): 2921 - 2927.

[5] 陈洪运, 马建林, 陈红梅, 等. 桩筏结构复合地基中筏板受力分析的理论计算模型与试验研究[J]. 岩土工程学报,

- 2014, **36**(4): 646 – 653. (CHEN Hong-yun, MA Jian-lin, CHEN Hong-mei, et al. Theoretical and experimental studies on forces acting on raft of pile-raft composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 646 – 653. (in Chinese))
- [6] HALL L. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, **23**(5): 403 – 413.
- [7] CHEBLI H, CLOUTEAU D, SCHMITT L. Dynamic response of high-speed ballasted railway tracks: 3D periodic model and in situ measurements[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, **28**(2): 118 – 131.
- [8] 薛富春, 张建民. 移动荷载作用下高速铁路轨道-路基-地基耦合系统振动加速度的空间分布特征[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2179 – 2187. (XUE Fu-chun, ZHANG Jian-min. Spatial distribution of vibration accelerations in coupled rail-embankment-foundation system on high-speed railway under moving loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2179 – 2187. (in Chinese))
- [9] THACH P N, LIU H L, KONG G Q. Evaluation of PCC pile method in mitigating embankment vibrations from a high-speed train[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(12): 2225 – 2228.
- [10] JIANG Y, HAN J, ZHENG G. Numerical analysis of a pile-slab-supported railway embankment[J]. Acta Geotechnica, 2014, **9**(3): 499 – 511.
- [11] DEGRANDE G, SCHILLEMANS L. Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, **247**(1): 131 – 144.
- [12] JUN S H, LIAO J R, YE Y L. Behavior of ground vibrations induced by trains moving on embankments with rail roughness[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, **30**(11): 1237 – 1249.
- [13] 徐林荣, 王宏贵, 左 珅, 等. 高速铁路沉降控制复合桩基的性状试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2605 – 2612. (XU Lin-rong, WANG Hong-gui, ZUO Shen, et al. Test study of performance of composite pile foundation of high-speed railway controlling settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2605 – 2612. (in Chinese))
- [14] CHEN H, MA J, QIN X, et al. Influence of pile cap effect on piled embankment supporting high-speed railway[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, **16**(8): 1447 – 1456.
- [15] ZHANG C L, JIANG G L, LIU X F, et al. Lateral displacement of silty clay under cement-fly ash-gravel pile-supported embankments: Analytical consideration and field evidence[J]. Journal of Central South University, 2015, **22**(4): 1477 – 1489.
- [16] SHAER A A, 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.
- [17] 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 – 2102. (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 – 2102. (in Chinese))
- [18] ISHIKAWAI T, SEKINEIIA E, MIURA S. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(5): 691 – 703.
- [19] 边学成, 蒋红光, 金皖锋, 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))
- [20] WANG C D, WANG B L, GUO P J, et al. Experimental analysis on settlement controlling of geogrid-reinforced pile-raft-supported embankments in high-speed railway[J]. Acta Geotechnica, 2015, **10**(2): 231 – 242.
- [21] LIU H L, ZHOU H, KONG G Q. XCC pile installation effect in soft soil ground: A simplified analytical model[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **62**(7): 268 – 282.
- [22] KONG G Q, ZHOU H, DING X M, et al. Measuring effects of X-section pile installation in soft clay[J]. Proceedings of ICE-Geotechnical Engineering, 2015, **168**(4): 296 – 305.
- [23] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路设计规范(试行)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009. (Code for design of high speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [24] 陈仁朋, 王作洲, 蒋红光, 等. I 型轨道-路基系统动力荷载放大系数模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(4): 1045 – 1052. (CHEN Ren-peng, WANG Zuo-zhou, JIANG Hong-guang, et al. Experimental study of dynamic load magnification factor for type I track-subgrade system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(4): 1045 – 1052. (in Chinese))