

DOI: 10.11779/CJGE201606007

振动波型对 X 形桩桩-筏复合地基动力响应影响的模型试验研究

孙广超^{1, 2}, 刘汉龙^{1, 2, 3}, 孔纲强^{1, 2}, 丁选明³

(1. 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; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400450)

摘 要: 基于大比例模型试验系统, 开展砂土地基中现浇 X 形桩桩-筏复合地基的模型试验研究; 分析正弦波与“M”波荷载作用下 X 形桩桩-筏复合地基的累计沉降、动位移幅值、动刚度、振动速度等的变化规律, 初步揭示 X 形桩桩-筏复合地基动力响应机理。试验结果表明, 桩筏复合地基的沉降 s 与荷载循环次数 N 的关系曲线可近似用对数函数描述; 动位移幅值和动刚度与荷载形式和振幅有关。振动速度随深度增加而逐渐衰减, 碎石垫层在振动速度向地基土传播过程中起到了良好的减震作用。研究成果为 X 形桩-筏复合地基的应用提供了参考依据。

关键词: 桩-筏复合地基; X 形桩; 累计沉降; 动力荷载; 模型试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-1021-09

作者简介: 孙广超(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事桩-土相互作用方面研究。E-mail: sgcgeo@163.com。

Model tests on effect of vibration waves on dynamic response of XCC pile-raft composite foundation

SUN Guang-chao^{1, 2}, LIU Han-long^{1, 2, 3}, KONG Gang-qiang^{1, 2}, DING Xuan-ming³

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400450, China)

Abstract: Based on large scale model test system, cast-in-situ XCC pile-raft composite foundation embedded in sand is studied. Under the sine and "M" wave loads, the change laws of X pile-raft composite foundation are analyzed from aspects of cumulative settlement, dynamic displacement amplitude, dynamic stiffness and vibration velocity. The dynamic response of X pile-raft composite foundation is preliminarily revealed. The test results show that the settlement curve (s - N) of this composite foundation (s is the settlement and N is the load cycle) can be described by the logarithmic functions. The dynamic displacement amplitude and dynamic stiffness are related to the form of load and its amplitude. The vibration velocity gradually decreases with the increasing depth. The gravel cushion exerts a good damping effect on the soil in the process of broadcasting velocity to the soil foundation. The research results provide a reference for the use of pile-raft composite foundation.

Key words: pile-raft composite foundation; XCC pile; accumulated settlement; dynamic load; model test

0 引 言

高速铁路作为一种高效的交通运输方式, 为了满足高速行车平稳、安全和舒适的要求, 高速铁路路基轨道必须具有持久稳定的高平顺性, 因此对其路基沉降变形控制非常严格, 相关规范规定无砟轨道路基工后沉降符合扣件调整能力和线路竖曲线圆顺的要求, 工后沉降不宜超过 15 mm^[1]。对于达不到设计要求的天然地基, 就必须采取合理的地基处理方式对其进行处理形成复合地基, 以满足变形沉降控制要求。

桩-筏复合地基由桩、土体、碎石垫层和钢筋混凝

筏板组成。与传统单桩组成的复合地基相比, 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之一, 已被广泛应用于高速铁路建设中。目前, 在用桩-筏复合基处理高速铁路路基方面, 相关研究人员取得了一定的研究成果。在理论分析方面, 陈洪运等^[2]基于理论分析和高速铁路现场试验, 提出了一种桩筏结

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1134207, 51278170); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2014B33914)

收稿日期: 2015-04-26

构复合地基中筏板受力的计算方法。Feng 等^[3]、Yang 等^[4]分别基于 Mesri 蠕变模型和一维固结理论,介绍了一种考虑土体蠕变效应的高速铁路桥梁桩基础工后沉降计算方法和一种高速铁路桥梁-桩基础长期沉降预测方法。Chen 等^[5]基于高速铁路无砟轨道车辆-轨道-桥梁动力相互作用理论,研究了一种判别高速铁路桥墩是否达到极限沉降的方法。在数值模拟方面, Chebli 等^[6]、Hall^[7]分别基于数值模拟,研究了振动速度在高速铁路有砟轨道路堤范围内的衰减情况和列车荷载下地基内动应力与列车速度的关系。Thach 等^[8]基于数值模拟,研究了高速列车运行过程中桩承式路堤的表面波场特征,列车速度及临界速度与振动振幅的关系。薛富春等^[9]基于非线性真三维数值分析模型,研究了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。Jiang 等^[10]基于数值模拟,分析了京津高速铁路桩-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,相关研究人员主要对复合桩基在高速铁路路堤荷载作用下加固区与下卧层的压缩沉降及地基总沉降变形规律,探讨了双曲线沉降预测方法,分析了桩-土应力比和荷载分担比及筏板的受力随路堤填筑高度和固结时间的变化规律^[11-14],但是针对桩-筏复合地基在高铁动荷载作用下的工作性状、承载机理的研究相对较少。在模型试验方面,Shaer 等^[15]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。Ishikawai 等^[16]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。肖宏等^[17]基于客运专线无砟轨道桩网结构 1:13 大比模型试验,研究了在填筑和循环荷载试验情况下的路基沉降、基床动应力、桩顶与桩间土土压力,以及桩的应力应变分布。詹永祥等^[18]基于 1:12 桩板结构大比例动态模型试验,分析了高速铁路无砟轨道桩板结构路基的动应力沿深度变化的规律,及激振频率对动应力的影响。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^[19],在京沪高速铁路仙西联络线段等工程中得到了成功的应用;相关研究人员并取得了一定的研究成果,Liu 等^[20]创新性地结合传统的圆孔扩张理论和应变路径法提出了一种新的解析模型—X 形扩孔理论(XCEM),基于该解析模型,分析了 XCC 桩沉桩产生的挤土位移、应力以及孔隙水压。Kong 等^[21-22]结合现浇 X 形桩现场试验,分析了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;并进行了同等条件下等混凝土用量圆形桩竖向承载力特性试验和分析。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,本文基于大型桩基模型试验系统,在砂土地基中开展 X 形桩-筏复合地基动力模型试验,着重研究在常用于模拟高铁列车荷载的“M”波和正弦波循环荷载形式下,X 形桩桩-筏复合地基的累计沉降、位移幅值、动刚度、振动速度的变化规律等,初步探讨 X 形桩-筏复合地基动力响应机理。

1 大比例模型试验简介

1.1 试验场地与试验材料准备

本文 X 形桩桩-筏复合地基动力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,并具有模型静动荷载的加载设备。模型槽全景及示意图如图 1 所示。

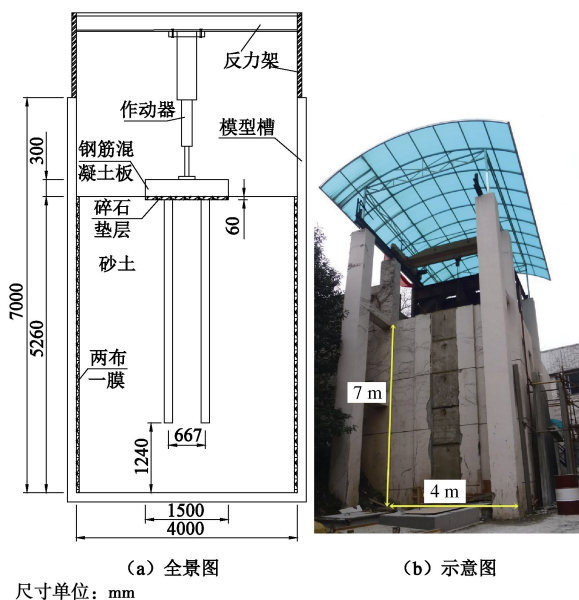


图 1 模型槽全景及示意图

Fig. 1 Photo of large scale model test system and arrangement

本次试验所用砂土与碎石均采购自南京的砂石厂,通过模型槽现场取样室内土工试验测定砂土的基本物理性参数,试验结果见表 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 2。本试验通过人工分层填筑,向模型槽内均匀填砂 5.26 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。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,填土前在墙体上先贴

上两布三膜。

表 1 砂土基本物理指标

Table 1 Physical indices of sand

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)	土粒相对 密度
1.478	4.08	1.40	1.73	2.67

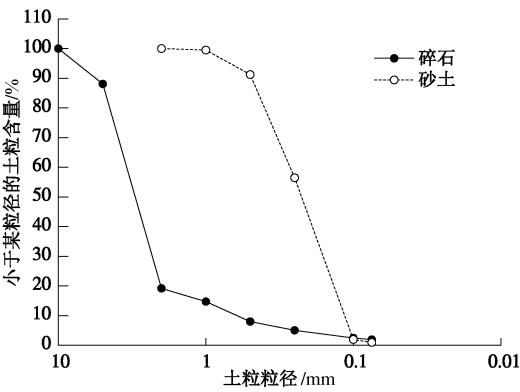


图 2 砂土和碎石颗粒分试验结果曲线

Fig. 2 Grain-size test results of sand and gravel

本试验填筑碎石垫层时，以桩顶处标高为参照平面，在 4 根试验桩顶（筏板底部）上部均匀填筑碎石垫层 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 2 所示。为了保证试验工程中筏板不与碎石垫层脱开，在碎石垫层填筑过程中，在砂土表面筏板外围四周不受力位置处均多放置了碎石，通过碎石的流动性来减少两者脱开的可能性。本文试验过程中，笔者密切关注筏板与碎石垫层的接触情况，未发现脱开现象，且待试验做完后，笔者将筏板水平吊起，未发现筏板下方碎石垫层有凸凹不平现象，故可认为在试验过程中，筏板与碎石垫层未脱开。

1.2 模型相似率设计

本试验采用缩尺模型，模型与原型几何相似比为 1：5，动应力相似比取 1：1。模型地基和碎石垫层分别采用现场砂土和碎石制作，模型桩和筏板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、桩和筏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。

1.3 模型桩及筏板

试验模型桩为 4 根混凝土桩，混凝土强度等级为 C25。为了便于介绍，这里将 4 根 X 形桩分别命名为 A、B、C、D 桩，其形状及布置示意图如图 3 所示。试验桩桩长为 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° 。地基土填筑至距槽底 1.24 m 高度时，在模型槽中心将 4 根 X

形桩按照正方形布置埋设，桩间距为 667 mm，边桩距 4 m 和 5 m 长的槽边距分别为 1666.5，2166.5 mm。布置桩同时保证桩的垂直度，然后利用脚手架将其固定，再按填土要求分层填筑并夯实。

筏板选用的尺寸为 1.5 m×1.5 m×0.3 m，混凝土强度等级为 C25，在筏板内部共布置 20 根 HRB335 级、直径均为 25 mm 的钢筋，其中单层纵向和横向分别布置 5 根，上下对称布置，选用同种等级直径均为 25 mm 的钢筋作为箍筋。

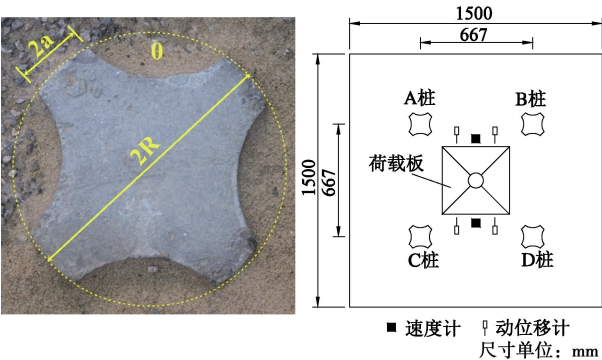


图 3 X 形桩及布置示意图

Fig. 3 Arrangement of X piles

1.4 试验仪器布置

针对 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，本文重点研究为复合地基的动力响应特性，故着重介绍速度计和动位移计试验仪器的布置方式。

本试验共布置 7 个速度计对地基内和筏板顶部的速度进行测试，其中地基土中 4 根试验桩的中心位置处，沿桩底向桩顶方向上每隔 1 m 埋设一个速度计，具体分布情况见图 3，4。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)。

在筏板顶部中心分别布置 4 个 YHD-20 型位移传感器（量程为 ± 10 mm，输出灵敏度为 400 $\mu\text{ε}/\text{mm}$ ），具体试验安装及仪器元件布置示意图如图 3，4 所示。

1.5 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 $\pm 0.5\%$ ，激振器行程 ± 150 mm，位移示值精度 $\pm 1\%$ ，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。

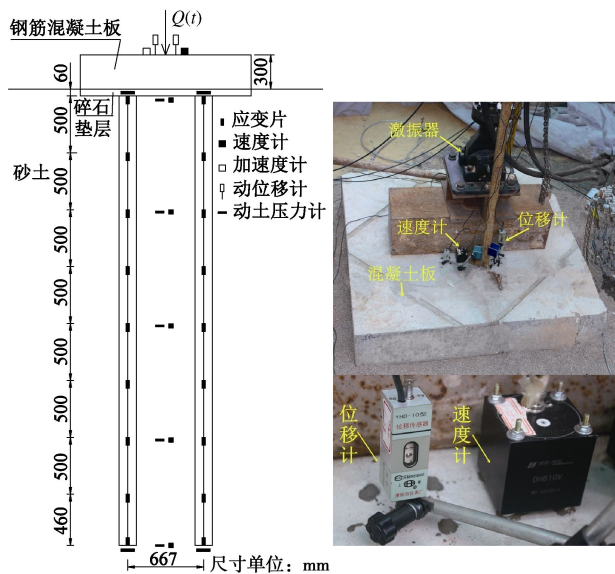


图4 试验仪器布置示意图

Fig. 4 Layout of instruments for model tests

2 荷载形式及试验工况设计

目前国内外学者对高铁荷载形式还没有统一的荷载形式。边学成等^[23]以一个轮轴荷载为例, 通过实测资料或理论计算, 经过简化可以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。肖宏等^[17]、詹永祥等^[18]采用正弦波的荷载形式, 分别开展了无砟轨道桩网结构和无砟轨道桩板结构模型试验。Shaer 等^[15]、边学成等^[23]以一个转向架为研究对象, 通过理论研究或现场实测, 经过简化可以用“M”波形式模拟列车运行时一个转向架的荷载实测曲线。

本模型试验采用正弦波 (如图 5 (a) 所示) 模拟列车一个轮轴的荷载实测曲线, 其荷载形式为

$$Q(t) = Q_0 + A \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中 $Q(t)$ 为作用在筏板顶部的荷载 (kN); Q_0 为作用在筏板顶部的恒载 (本文取 45 kN); A 为动载的幅值 (本文为 5 kN); $\omega = 2\pi f$ 为角速度 (rad/s), f 为加载频率 (Hz); t 为加载时间 (s)。为了重点研究筏板及其下部结构的动力特性, 本试验不修筑筏板上部的路堤、基床底座、轨道板和轨道等构筑物, 而是采用等效替换的方法, 将其上部构筑物荷载通过激振器以恒载的形式施加在筏板上以简化试验模型, 根据 Bockingham π 定律, 本试验模型荷载相似比取为 1:25, 则筏板上部构筑物荷载为 40 kN; 根据中国高速铁路设计规范^[1], 高速列车设计轴重为 200 kN, 本文研究在列车超载 25% 的情况下 (即列车设计轴重取为 250 kN) X 形桩桩-筏复合地基动力响应, 根据

Bockingham π 定律, 本文中正弦波循环荷载幅值为 10 kN, 即正弦波荷载在 40~50 kN 范围内循环变化。

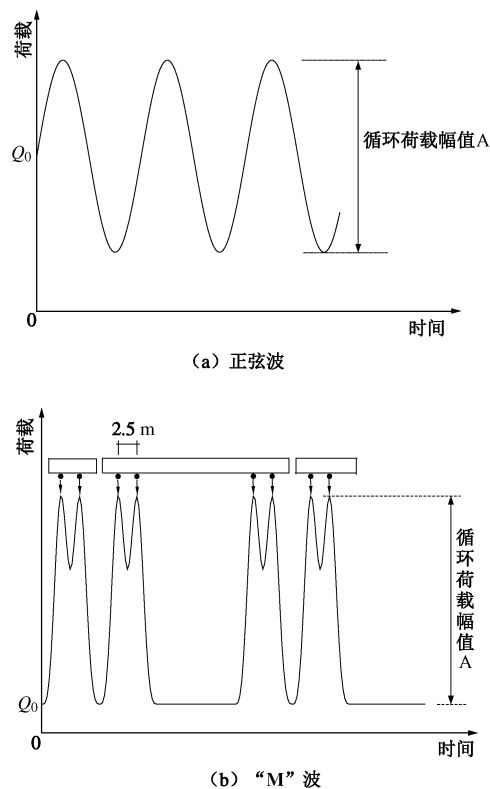


图5 正弦波与“M”波荷载示意图

Fig. 5 Sketch of sine and "M" wave loads

本试验采用“M”波 (如图 5 (b) 所示) 模拟列车一个转向架的荷载实测曲线, 以列车通过一个转向架距离 2.5 m 的时间为一个荷载周期。对于高速铁路穿过隧道等无路堤的路段, 筏板上部无路堤, 而是由基床底座、轨道板和轨道等构筑物组成, 同上述正弦波中构筑物的等效替换方法, 根据 Bockingham π 定律, 在模型试验中筏板上部构筑物荷载为 10 kN, 故本文中“M”波荷载最小值取 10 kN。考虑到高速铁路有可能运输军事装备等严重超载的情况, 这里增大循环荷载的幅值, 同时保持“M”波荷载的最大值与正弦波荷载的最大值相同, 即“M”波荷载在 10~50 kN 范围内循环变化, 其循环荷载的幅值为 40 kN。各工况激振的次数为 2 万次, 试验加载工况如表 2 所示。

试验时激振器作用在筏板中心, 对于正弦波荷载, 先在筏板上缓慢施加静载到 45 kN, 然后向控制器输入幅值为 5 kN 的正弦波荷载。对“M”波荷载, 先在筏板上缓慢施加静载到 10 kN, 然后向控制器输入幅值为 40 kN 的“M”波。笔者在正弦波荷载试验前后分别进行了静力触探试验, 两次结果相差在 5% 以内, 并且在正弦波荷载试验完成后, 静置 X 形桩桩-筏复合地基 2 周时间, 待地基稳定后再进行下一组“M”波试验, 故可认为前面的正弦波试验对后面“M”

波试验影响较小, 近似认为前后两次试验相互独立。

表 2 试验加载工况

Table 2 Loading cases of tests				
波形	力范围 /kN	循环荷载幅值 <i>A</i> / kN	激振频率 <i>f</i> / Hz	激振次数 <i>N</i> /次
正弦波	40~50	10	10	20000
“M”波	10~50	40	10	20000

3 试验结果与分析

3.1 静载沉降曲线及静刚度变化规律

桩筏复合地基的动力响应, 是建立在静荷载特性及静刚度基础上的。故在对桩筏复合地基开展动力试验之前, 根据 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》^[24] 的相关规定, 先对 X 形桩桩-筏复合地基开展了静力试验, 将后续动载试验工况中施加的恒载 45 kN, 作为静载试验所施加的最大荷载, 以避免对后续动载工况动力响应的影响。X 形桩桩-筏复合地基荷载-沉降曲线如图 6 所示。从图 6 可知, 在所施加的荷载范围内, X 形桩桩-筏复合地基的荷载-沉降曲线为缓变形曲线特征。

这里所说的静刚度是指筏板单位沉降所需的力, 也即静载试验时, 荷载-沉降曲线的切线斜率。从图 6 中可知, 在所施加的荷载范围内, X 形桩桩-筏复合地基的静刚度随着荷载的增加而减小, 但减小的趋势逐渐放缓。

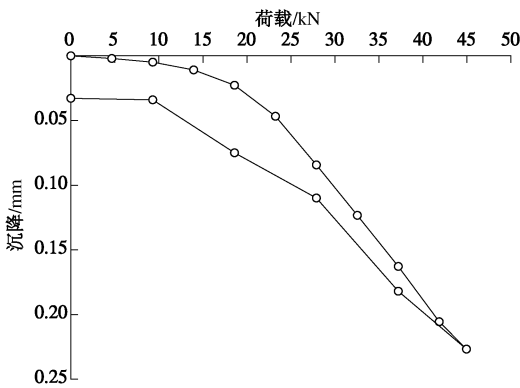


图 6 X 形桩桩-筏复合地基荷载-沉降曲线

Fig. 6 Load-settlement curves of XCC pile-raft composite foundation

3.2 累积沉降分析

本文分别在荷载频率为 10 Hz 的正弦波和“M”波荷载作用下开展试验, 其中图 7 为本试验在正弦波荷载作用下 X 形桩筏复合地基累积沉降与循环振动次数之间的关系曲线 (*s*-*N* 曲线)。从图 7 可知, 在荷载加载初期, 沉降大约 0.080 mm, 沉降增加较快, 随着荷载循环次数的增加, X 形桩筏复合地基的桩间土和下卧层逐渐被压密, 沉降增加的趋势放缓。循环振

动 20000 次时其产生的沉降为 0.170 mm, 当荷载循环周期足够大时, 其累计沉降基本趋于稳定

通过对本文试验结果进行回归分析, 得出其 *s*-*N* 曲线可用下式描述:

$$s=a+b\ln(N+c) \quad , \quad (2)$$

式中, *s* 为 X 形桩筏复合地基累积沉降 (mm), *a*, *b*, *c* 为与桩筏复合地基中桩的置换率、密实状态、地基土对的性质及荷载形式等因素有关的参数, *N* 为荷载循环振动次数。本例中 *a*=-0.12, *b*=0.03, *c*=47.43, 相关系数 *R*²=0.976。

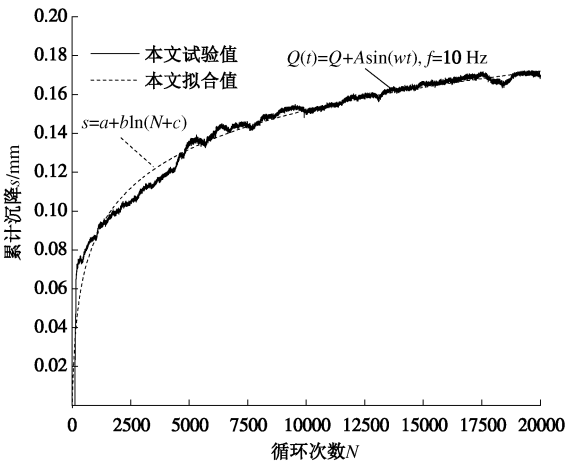


图 7 正弦波循环荷载 *s*-*N* 曲线

Fig. 7 *s*-*N* curves under cyclic loading of sine wave

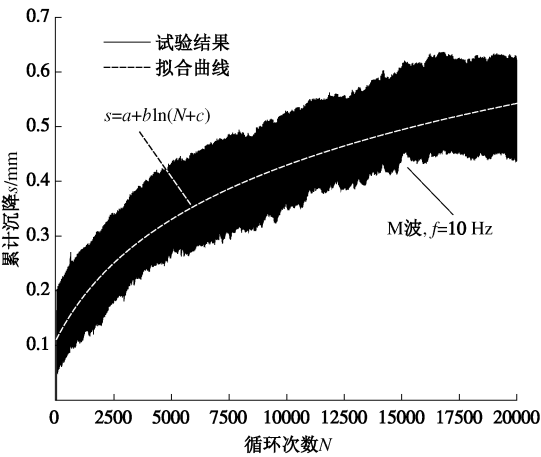


图 8 “M”波循环荷载 *s*-*N* 曲线

Fig. 8 *s*-*N* Curves under cyclic loading of “M” wave

本试验在“M”波荷载作用下 X 形桩筏复合地基的 *s*-*N* 曲线见图 8。从图 8 中可知, “M”波荷载作用下其累积沉降与循环振动次数之间的变化规律与正弦波荷载作用下的相类似, *s*-*N* 曲线的回归方程形式相同, 其中, *a*=-1.36, *b*=0.19, *c*=2298.39。由上述分析可知在上述两种波形荷载作用下桩筏复合地基的 *s*-*N* 曲线均为 *s*=*a*+*b*ln(*N*+*c*), 桩筏复合地基的 *s*-*N* 曲线形式基本不受波形的影响。

3.3 动位移幅值和动刚度随循环次数的变化

桩筏复合地基的动位移幅值为荷载循环一周时筏

板顶部轴向动位移的最大值与最小值差。在正弦波和“M”波分别作用下,桩筏复合地基的动位移幅值与荷载循环次数的关系曲线见图9。从图9中可知,在正弦波荷载作用下,筏板顶部的动位移幅值大致相等,不随循环次数的增加而变化,基本保持在0.05 mm左右。在“M”波荷载作用下,筏板顶部的动位移幅值从开始的0.198 mm到振动结束时的20000次0.247 mm,动位移幅值随循环次数的增加而增加,大致上呈正相关。

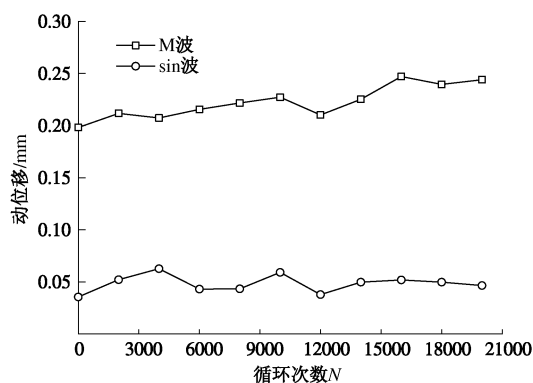


图9 动位移与循环次数的关系曲线

Fig. 9 Relationship between dynamic displacement and cyclic number

桩筏复合地基系统在竖向荷载作用下的动刚度 K_d 为该系统筏板顶部发生单位位移所需要施加的力。故图9说明在正弦波荷载作用下,桩筏复合地基系统的动刚度不随循环次数的增加而变化。上述规律与文

献[25, 26]中单桩的动位移幅值、动刚度随循环次数的变化规律相同。在“M”荷载作用下,桩筏复合地基系统的动刚度 K_d 随循环次数的增加而增加。上述规律与正弦波荷载作用下的变化规律不同。

3.4 速度分析

(1) 振动速度时程分析

在正弦波循环荷载作用下,X形桩筏复合地基振动稳定后的速度时程响应曲线如图10所示。对于筏板结构,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,荷载峰值对应的速度响应的峰值。对于地基土中的速度响应在深度0 m处,其速度响应时程曲线已经不是正弦波形式,而是在荷载峰值对应的速度响应已经出现一小一大的双波峰值。随着地基深度的加深,荷载峰值对应的速度响应前后两个双波峰值的差越来越小,在地基深度4 m处,两个双波峰值差已经基本为零,速度时程响应曲线已经完全不是正弦波形式。由此可知,在筏板结构附近,速度响应主要有循环荷载引起,而在向地基土转播的过程中,各种反射波逐渐开始占一定的分量。在“M”波循环荷载作用下,X形桩筏复合地基振动稳定后的速度时程响应曲线如图11所示。

对于筏板结构,由列车的每个轮轴荷载引起速度响应峰值具有清晰的“M”形状。对于地基土中的速度响应在深度0 m处,其“M”形速度响应曲线还比较清晰,随着地基深度的加深,各种反射波逐渐开始

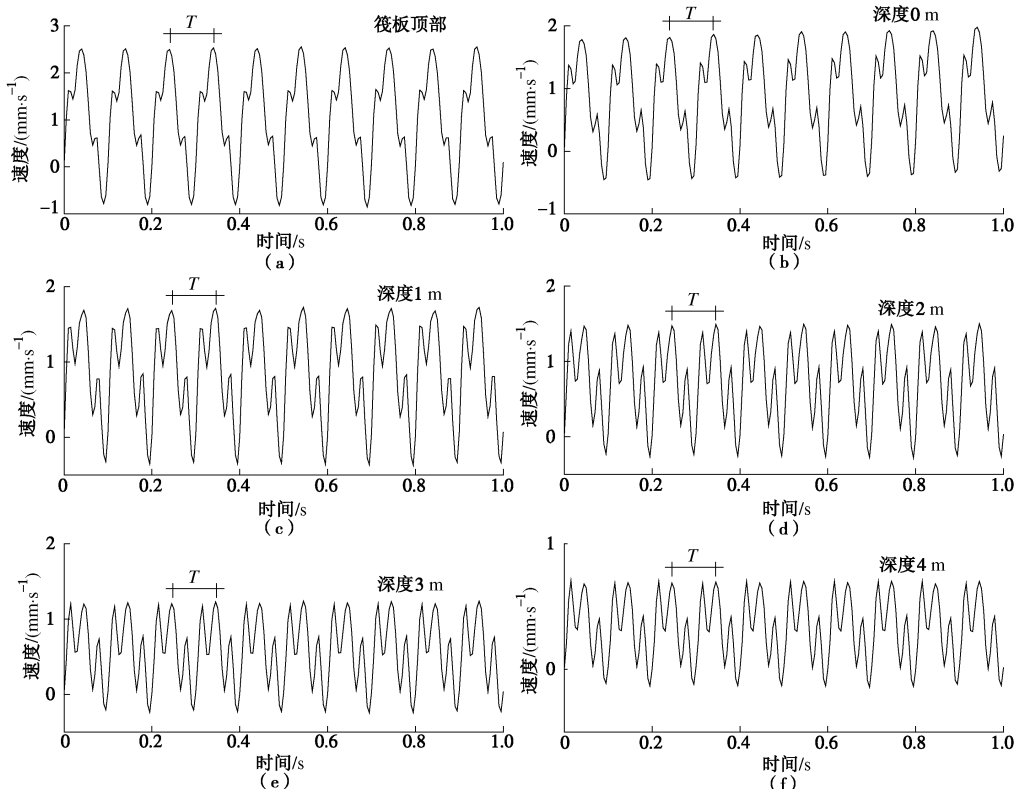


图10 振动速度时程响应曲线

Fig. 10 Vibration velocities recorded at different layers

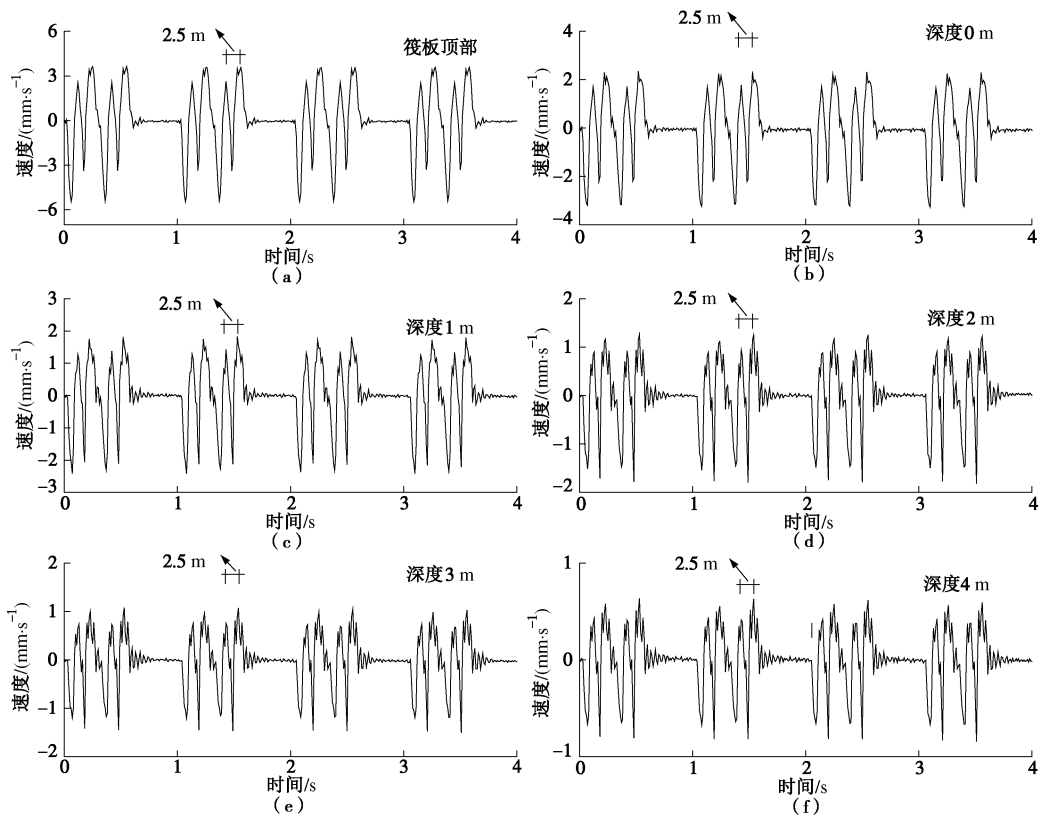


图 11 振动速度时程响应曲线

Fig. 11 Vibration velocities recorded at different layers

占一定的分量,“M”形速度时程响应曲线越来越模糊。这一规律与正弦波荷载作用下速度时程响应曲线的变化规律相类似。

(2) 振动速度随循环次数的变化

在正弦波和“M”波分别作用下,桩筏复合地基系统的振动速度与荷载循环次数的关系曲线见图 12。从图 12 可知,在正弦波和“M”波荷载分别作用下,桩筏复合地基不同位置处的振动速度,均不随循环次数的增加而变化,基本各自保持一个稳定的值,由此可知,这种变化规律与上述两种荷载形式无关。

(3) 振动速度随深度的变化

由 3.4 节 (2) 中的分析可知,桩筏复合地基系统的振动速度不随循环次数的增加而变化,故这里以正弦波和“M”波分别作用下循环荷载振动到 20000 次时为例,研究 X 形桩筏复合地基系统的振动速度随深度的变化规律,两者之间的关系曲线如图 13 所示。由图 13 可知,在正弦波和“M”形波分别作用下,从筏板顶部 0.36 m 处到地基深度 0 m 处,速度分别衰减了 1.25, 4.00 mm/s, 分别占整个桩筏复合地基速度衰减量(从筏板顶部到地基深度 4 m 处)的 45.5% 和 46.5%。由此可知在两种不同的荷载形式分别作用下,从筏板顶部到在地基深度 0 m 处速度的衰减率基本相同,速度的衰减率与上述两种荷载形式无关。在地基深度 0~4 m 范围内,在两种不同的荷载作用下,随深度的增加速度均大致呈线性衰减,速度的衰减规律相似。

综上所述 X 形桩筏复合地基系统的振动速度随深度增加而衰减,在上述两种荷载形式下其衰减规律相似。

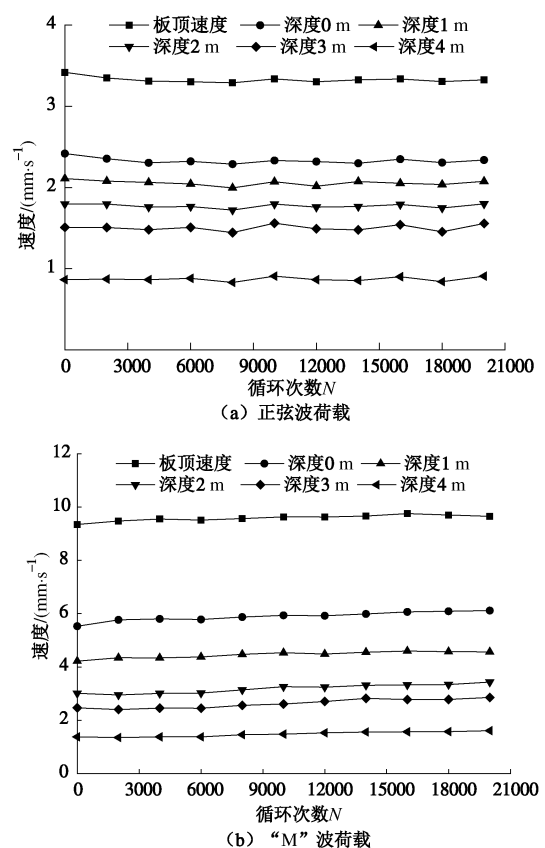


图 12 振动速度时程响应曲线

Fig. 12 Vibration velocities recorded at different layers

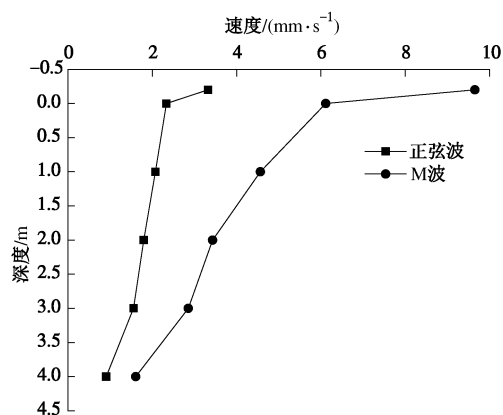


图 13 筏板顶部速度随时间的变化

Fig. 13 Variation of speed at pile-raft top with time

本模型试验中从筏板顶部到地基表层范围内速度的衰减量几乎占衰整个速度衰减量的 50%，而在此范围内的结构物为 0.3 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的衰减影响较大，在振动速度向地基土传播的过程中其起到了良好的减震作用。

4 结 论

本文基于大比例模型试验系统，开展有关砂土地基中 X 形桩-筏复合地基的动力模型试验，分析了在“M”形波与正弦波波动形两种荷载形式下，X 形桩-筏复合地基的动力响应特性，可以得出以下 5 点结论。

(1) 无论采取正弦波还是“M”波，桩筏复合地基的沉降 s 均随着荷载循环次数 N 的增加而增加，但沉降增加的趋势在放缓，其沉降与循环次数的关系曲线 $s-N$ 可用衰减型对数函数 $s=a+b\ln(N+c)$ 进行描述。

(2) 在本文所施加的荷载范围内，X 形桩-筏复合地基的静刚度随着荷载的增加而减小，但减小的趋势逐渐放缓。在正弦波荷载作用下，桩筏复合地基系统的动位移幅值与动刚度 K_d 不随循环次数的增加而变化，而在“M”波荷载作用下，动位移幅值与动刚度 K_d 随循环次数的增加而增加，两者大致上呈正相关。

(3) 在正弦波和“M”波循环荷载分别作用下，X 形桩筏复合地基的速度时程响应曲线的变化规律相类似，即在筏板结构附近，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。

(4) 在正弦波和“M”波分别作用下，桩筏复合地基系统的各个不同位置处振动速度不随循环次数的增加而变化，基本各自保持一个稳定的值。

(5) X 形桩筏复合地基系统的振动速度随深度增加而逐渐衰减，在正弦波和“M”波分别作用下其衰减规律相似。从筏板顶部到地基表层范围内速度几乎

衰减了整个速度的 50%，碎石垫层在由筏板顶部列车荷载引起的振动速度向地基土传播过程中起到了良好的减震作用。

参考文献:

- [1] TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S]. 2014. (TB 10621—2014 Code for design of high speed railway[S]. 2014. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] CHEN Z W, ZHAI W M, CAI C B, et al. Safety threshold of high-speed railway pier settlement based on train-track-bridge dynamic interaction[J]. Science China (Technological Sciences), 2015, 58(2): 202—210.
- [6] 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: 118—131.
- [7] HALL L. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23: 403—413.
- [8] THACH P N, LIU H L, KONG G Q. Vibration analysis of pile-supported embankments under high-speed train passage[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 55: 92—99.
- [9] 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))
- [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] 徐林荣, 王宏贵, 左王申, 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 Wang-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))
- [12] 李 波, 冷景岩. 高速铁路 CFG 桩-筏结构沉降控制现场试验[J]. *铁道工程学报*, 2014, **31**(2): 48 - 52. (LI Bo, LENG Jing-yan. Research on settlement control effect of cfg pile-raft structure based on field test of high speed railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2014, **31**(2): 48 - 52. (in Chinese))
- [13] 付 强, 刘汉龙, 庄 妍, 等. 高速铁路CFG桩筏复合地基沉降变形特性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, **11**(6): 45 - 51. (FU Qiang, LIU Hong-long, ZHUANG Yan, et al. Analysis of settlement characteristic of CFG piled raft composite foundation in high-speed railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, **11**(6): 45 - 51. (in Chinese))
- [14] 张继文, 曾俊铖, 涂永明, 等. 京沪高速铁路 CFG 桩-筏复合地基现场试验研究[J]. *铁道学报*, 2011, **33**(1): 83 - 88. (ZHANG Ji-wen, ZENG Jun-cheng, TU Yong-ming, et al. Experimental study on CFG pile-raft composite foundation of Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, **33**(1): 83 - 88. (in Chinese))
- [15] 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**: 211 - 233.
- [16] ISHIKAWAI T, SEKINEIA E, MIURA S. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(5): 691 - 703.
- [17] 肖 宏, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 客运专线无砟轨道桩网结构模型试验研究[J]. *铁道学报*, 2007, **29**(2): 126 - 131. (XIAO Hong, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing, et al. Model test of column-net structure for dedicated passenger line unballasted track[J]. *Journal of the China Railway Society* 2007, **29**(2): 126 - 131. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 形混凝土桩截面几何特性的分析[J]. *中国铁道科学*, 2009, **30**(1): 17-23. LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Analysis on section geometry character of X style vibro-pile[J]. *China Railway Science*, 2009, **30**(1): 17 - 23.
- [20] 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.
- [21] KONG G Q, ZHOU H, DING X M, CAO Z H. Measuring effects of X-section pile installation in soft clay[J]. *Proceedings of ICE - Geotechnical Engineering*, 2015, **168**(4): 296 - 305.
- [22] 孔纲强, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形桩复合地基桩土应力比及负摩阻力现场试验[J]. *中国公路学报*, 2012, **25**(1): 8 - 12, 20. (KONG Gang-qiang, LIU Han-long, DING Xuan-ming, et al. Field test of pile-soil stress ratio and negative skin friction of composite X-section cast-in-place pile foundation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, **25**(1): 8 - 12, 20. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 2012. (JGJ 79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2012. (in Chinese))
- [25] 杨龙才, 郭庆海, 周顺华, 等. 高速铁路桥桩在轴向循环荷载长期作用下的承载和变形特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(13): 2362 - 2368. (YANG Long-cai, GUO Qing-hai, ZHOU Shun-hua, et al. Dynamic behaviors of pile foundation of high-speed railway bridge under long-time cyclic loading in soft soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(13): 2362 - 2368. (in Chinese))
- [26] 陈竹昌, 徐 和. 土类对轴向循环荷载下桩性状的影响[J]. *同济大学学报*, 1988, **17**(3): 329 - 336. (CHENG Zhu-chang, XU He. Influence of soil type on behaviour of cyclic axial loaded[J]. *Journal of Tongji University*, 1988, **17**(3): 329 - 336. (in Chinese))