

DOI: 10.11779/CJGE202205020

长期列车荷载下无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动力响应模型试验

孙广超^{1,2}, 李建林¹, 孔纲强^{*1,3}, 罗雅², 王乐华¹, 邓华锋¹

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 深圳市龙岗区建筑工务署, 广东 深圳 518100;
3. 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)

摘要: 基于缩尺比例为 1:5 的无砟轨道 X 形桩-筏复合地基模型试验, 在长期列车循环荷载作用下开展饱和砂土地基中该复合地基的动力响应研究, 分析 X 形桩桩身动应力、桩侧摩阻力以及累计沉降随荷载循环次数的变化规律。试验结果表明, 桩身轴力和累积沉降均随加载次数的增加而逐渐增加, 但增加的速率逐渐放缓, 桩身轴力的发挥具有明显的时间效应。加载频率越小, 桩身轴力趋于稳定所需的荷载加载次数越少。在桩顶向下 1 m 范围内为负摩阻力区, 在 1 m 范围外为正摩阻力区, 中性点位置在桩长的 1/4 处。归一化桩身轴力、桩侧摩阻力和沉降随归一化荷载循环次数的变化规律均可用对数函数描述。

关键词: 列车荷载; 无砟轨道; 桩-筏复合地基; 桩身动应力; 桩侧摩阻力; 累积沉降

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)05-0961-09

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

Model tests on dynamic response of ballastless track X-shaped pile-raft foundation under long-term train loads

SUN Guang-chao^{1,2}, LI Jian-lin¹, KONG Gang-qiang^{*1,3}, LUO Ya², WANG Le-hua¹, DENG Hua-feng¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Bureau of Public Works of Longgang District, Shenzhen 518100, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on a series of 1:5 scale model tests on ballastless track X-shaped pile-raft foundation, the dynamic response of the foundation in saturated sand is studied under long-term train cyclic loading. The dynamic stress of the X-shaped pile, the skin friction of the pile and the cumulative settlement of the foundation with the number of loading cycles are analyzed. It is found that the axial force and cumulative settlement of the pile increase with the increasing loading cycles, but the rate of increment decreases. The axial force of the pile body is time-dependent. In addition, the lower the loading frequency, the lower the number of loading cycles required for the axial force of the pile to be stabilized. The area of negative friction is within 1 m from the top of the pile, and the area of positive friction is below 1 m from the surface. The neutral point is at 1/4 of the pile length. The variation rules of normalized axial force, side friction and settlement of the pile with the number of normalized loading cycles can be described by a logarithmic function.

Key words: train load; ballastless track; pile-raft foundation; dynamic stress of pile; pile skin friction; accumulated settlement

0 引言

桩-筏复合地基是地基处理方法中有效的加固方法之一^[1], 在中国已被用于无砟轨道地基基础的加固中。列车运行引起的动力响应是铁路设计中一个非常重要的参数。近年来, 学者针对无砟轨道及其地基基础的动态响应开展了一系列研究。

针对有砟(无砟)轨道路基系统的动力特性, 学者^[2-7]测量和分析了列车荷载作用下有砟轨道的横向

和竖向加速度、速度响应、动应力以及沉降变形, 结果表明, 当列车速度接近某一明显的临界值时, 轨道-路基-地基系统的动力响应会出现较大的动力放大, 竖向位移随深度的增加而减小, 路基中的剪应变较大, 地基土中的剪应变较小。通过对比有砟轨道和无砟轨

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U2034203)

收稿日期: 2021-06-16

*通信作者(E-mail: gqkong1@163.com)

道结构的动力响应, Zhai 等^[8]发现当列车引起的地面振动频率超过 40 Hz 时, 地面的竖向振动分量大于横向和纵向振动分量。

针对桩承式路堤特性, Bhaduri 等^[9]提出了在动荷载作用下弹性介质中桩-筏复合地基的解析解, 研究了加载频率对桩-筏复合地基动态位移响应的影响, 结果表明, 当筏板的柔性增加 60% 时, 筏板的水平荷载分担比相应减少了 65%~75%。利用高铁荷载下桩承式地基有限元模型, 通过变化桩长、桩间距、桩间土模量、路堤高度以及路堤材料参数, 分析其对桩身轴力分布、桩土应力比、路堤应力和土拱效应发展规律的影响, 结果表明, 桩身轴力随桩长增加而增大, 随桩间土模量增大而减小; 动载作用下土拱效应依然存在, 但有所减弱; 桩间距和路堤高度对土拱效应的影响较为明显, 而路堤填料内摩擦角和剪胀角的影响则相对较小^[10-12]。基于试验方法, 相关学者^[13-15]分析了路堤荷载作用下复合地基沉降、土体侧向变形、桩土应力比、桩身轴力以及孔隙水压力的规律, 结果表明, 在加载初期, 路基沉降随加载次数增加明显, 之后达到稳定; 桩上部位置土体变形大于桩身变形, 桩侧呈现负摩阻力, 中性点位于距桩顶约 2/3 桩长位置; 桩身轴力随加载次数增加而增大, 当达到 4 万次加载后, 轴力随加载次数增加不再明显。

X 形桩是一种横截面异形桩, 已有研究结果及工程应用表明, 在静力荷载作用下, 与具有相同截面积的圆形截面桩相比, X 形桩基础竖向承载力提高约 20%, 现浇 X 形桩可以充分发挥单位混凝土承载力、提高桩侧摩阻力^[16-17]。近年来, 研究人员针对 X 形桩在动力荷载作用下开展了一些模型试验研究。Yin 等^[18]揭示了沥青加铺层对 X 形桩周围土体的不对称运动以及集中系数的影响。Niu 等^[19-20]发现高速铁路在列车动荷载作用下的土拱高度比静荷载作用下的土拱高度要小; 与无桩、无网的路堤相比, 桩-网复合地基减振效果显著。此外, 研究人员^[21-23]比较了风干砂土和饱和砂土地基中 X 形桩-筏复合地基的动力响应, 结果表明, 复合地基速度响应与地基的饱和程度的密切相关, 路堤表层和地基表层的动土压力分别呈“W”形和“U”形分布, 列车速度的快慢是影响 X 形桩筏复合地基动力响应的一个重要因素。然而, 针对该系统在长期动荷载作用下的动力响应还不清楚。因此, 本文通过 1:5 大比例模型试验, 研究在长期列车循环荷载下无砟轨道 X 形桩-筏复合地基的动力响应。

1 模型试验

1.1 模型试验系统及模型相似比

试验系统由模型槽、动力加载与控制系统、数据

采集与分析系统等组成, 模型槽长 5 m、宽 4 m、高 7 m, 模型槽和无砟轨道 X 形桩-筏复合地基实物图如图 1 所示。

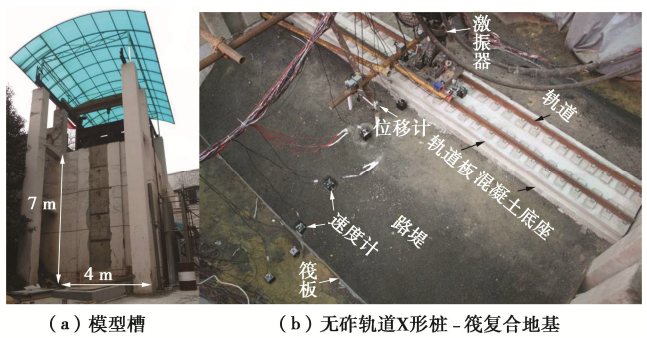


图 1 模型槽和无砟轨道 X 形桩-筏复合地基实物图

Fig. 1 Images of large-scale model test system

模型试验与原型几何相似比为 1:5, 加速度相似比取 1:1, 密度、弹性模量相似常数均为 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见表 1 所示。

表 1 模型相似比

Table 1 Similarity ratios of model

参数	相似比	参数	相似比
长度/m	1/5	体积/m ³	1/125
密度/(kg·m ⁻³)	1	弹性模量/MPa	1
加速度/(m·s ⁻²)	1	力/kN	1/5
应力/kPa	5	速度/(m·s ⁻¹)	1/ $\sqrt{5}$
时间/s	1/ $\sqrt{5}$	频率/kPa	$\sqrt{5}$

1.2 材料特性及试验仪器布置

模型试验自下而上由地基土、30 根 X 形桩、碎石垫层、筏板、路堤、混凝土底座、轨道板、扣件和钢轨组成(图 2), 其中地基土采用砂土, 碎石垫层采用级配碎石, 路堤填料为 A、B 组料, 上述 3 种材料压实后的基本物理性参数平均值见表 2 所示, 颗粒级配曲线如图 3 所示, 均满足高速铁路设计规范^[24]的要求, 与 Bian 等^[4]足尺模型试验中的颗粒级配相接近; 砂土的渗透系数为 0.008 cm/s。

X 形桩的截面形状受 3 个参数控制, 分别为外包圆直径 2R、开弧间距 2a 和开弧角 θ (图 4), 试验中 2R, 2a 和 θ 分别为 157 mm、39 mm 和 90°, 桩长为 3960 mm, 桩身混凝土强度等级为 C25。筏板、混凝土底座和轨道板的尺寸分别为 4 m×3.4 m×0.12 m、4 m×0.6 m×0.06 m 和 4 m×0.48 m×0.38 m(长×宽×厚), 三者均采用现浇混凝土, 强度等级分别为 C35、C40 和 C55。值得注意的是, 混凝土的力学性能与实际建筑材料的力学性能相当, 所有试验材料的物理参数及整个试验模型的建造过程均满足高速铁路设计规范^[24]的要求。在砂土填筑之前模型槽四壁上预先布置

“两布三膜”，以减小反射波对试验结果的影响。模型建造完成后，向砂土地基中注满水，水深保持在 5.25 m 左右，并让砂土饱和并固结大约 10 d；模型试验过程中保持不排水条件。

表 2 材料基本物理指标
Table 2 Physical indices of sand

类别	重度 (kN·m ⁻³)	干重度 (kN·m ⁻³)	天然含 水率/%	相对 密实 度/%	不均 匀 系数 C _u	曲率系 数 C _c
砂土	16.46	15.80	4.08	69.5	2.42	0.93
碎石垫 层	17.90	17.66	1.35	63.0	6.00	2.89
A、B 组料	23.51	21.58	7.07	92.0	19.23	1.34

模型试验布置了动位移计、应力计、孔压计，具体布置位置如图 2 所示。

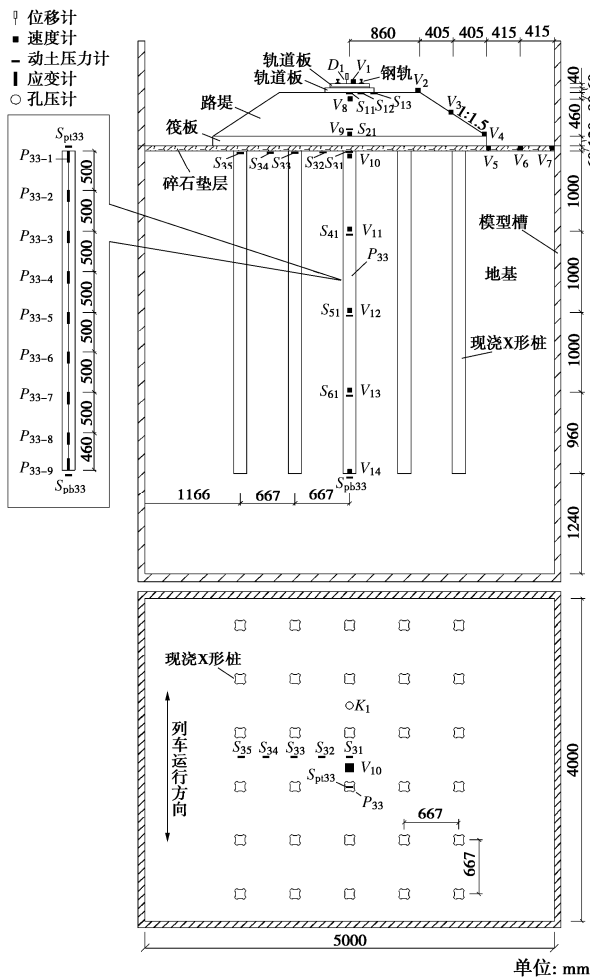


图 2 试验仪器布置示意图

Fig. 2 Layout of ballastless track XCC pile-raft foundation with sensors

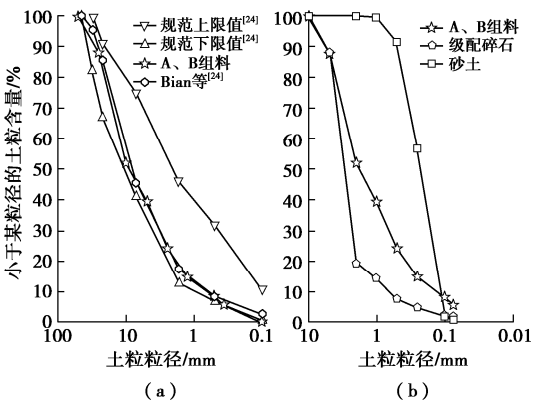


图 3 级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of geomaterials used in this study and literature

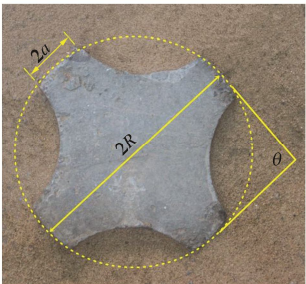


图 4 X 形桩

Fig. 4 X-shaped pile

1.3 试验荷载

以一个转向架为研究对象，通过理论研究和现场实测，经过简化用 M 形波模拟列车运行时一个转向架的荷载实测曲线^[3-4, 25]。根据徐进^[25]的计算和现场试验，并考虑到列车荷载的连续施加，本文通过优化徐进的三级傅里叶级数，把两节车厢相邻的两个转向架考虑进去，提出一个能反映列车连续运行的三级傅里叶级数荷载形式为

$$Q(t) = A_0 + \sum_{n=1}^3 [A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t] \quad \left(0 < t \leq \frac{3T}{10} \right)$$
$$Q(t) = 0 \quad \left(\frac{3T}{10} < t \leq \frac{7T}{10} \right)$$
$$Q(t) = A_0 + \sum_{n=1}^3 \left[A_n \cos n\omega \left(t + \frac{2T}{10} \right) + B_n \sin n\omega \left(t + \frac{2T}{10} \right) \right] \quad \left(\frac{7T}{10} \leq t \leq T \right)$$

(1)

式中， $Q(t)$ 为动力荷载 (kN)， t 为加载时间 (s)。3 级傅里叶 (Furier) 系数： $A_0=36.14$ ， $A_1=-28.33$ ， $A_2=-14.95$ ， $A_3=7.14$ ， $B_1=1.64$ ， $B_2=1.54$ ， $B_3=-1.59$ ， $\omega=2\pi f$ 为角速度 (rad/s)， f 为加载频率 (Hz)。v 为列车速度 (km/h)， L 为列车长度 ($L=25$ m，实际尺寸)， T 为循环周期 (s)。

图 5 为上述所示的三级傅里叶级数即“M”形波荷载,荷载的大小和运行速度通过单个作动器来控制,作动器在轨道上方的中间位置处(图 1(b))。每一次荷载循环对应一节车厢的两个转向架,因列车由若干个转向架组成,故通过增加荷载循环次数可以模拟若干节列车车厢通过的情形。需要注意的是,本文重点研究的是列车车厢荷载对路堤某一断面的持续影响,而不是研究各列车车厢移动过程中同时对路堤的整体影响,不考虑主应力旋转。因此,在上述前提下可以通过单个作动器在轨道上方某位置处施加循环的 M 荷载,来模拟列车车厢荷载对该位置的持续影响。

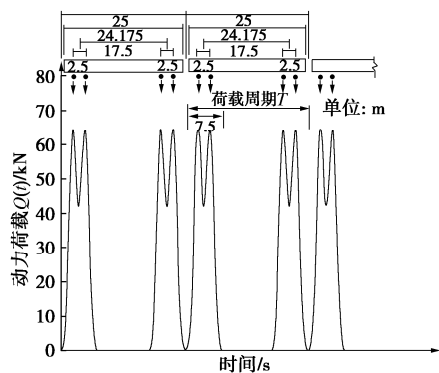


图 5 M 形波荷载

Fig. 5 Applied dynamic loads in model tests

因作动器使用说明要求,在作动器施加动荷载前须预先施加一个静载进行预压才能进一步施加动载,故模型试验先对轨道预压 20 kN 静载,然后再向作动器输入“M”形波荷载进行动力加载试验,试验加载工况见表 3 所示。

表 3 试验加载工况

Table 3 Loading cases of tests

工况	频率 f/Hz	循环次数
1	5	25000
2	10	25000
3	15	45000

2 结果和讨论

2.1 孔隙水压力分析

通过应变式动态孔隙水压力传感器测试土体孔压,孔压计布置位置如图 2 所示。在加载频率为 10, 15 Hz 的循环荷载作用下,地基表面 K_1 位置处(埋深 1 cm 左右)的孔隙水压力时程曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在不同加载频率作用下,孔隙水压力上下波动的比较剧烈,其波形呈明显的 M 形,与所施加的 M 形波荷载相同,孔隙水压力的波动形式与荷载形式密切相关。

2.2 桩身轴力分析

(1) 桩身轴力随荷载循环次数的变化规律

以第 3 排 3 列的 X 形桩(即 P_{33})为例,在加载频率为 10, 15 Hz 的作用下 P_{33} 桩不同位置的轴力随荷载循环次数的变化曲线如图 7 所示,其中, $F_0, F_{0.5}, F_1, F_{3.5}$ 分别为桩顶向下 0, 0.5, 1, 3.5m 处的桩身轴力。

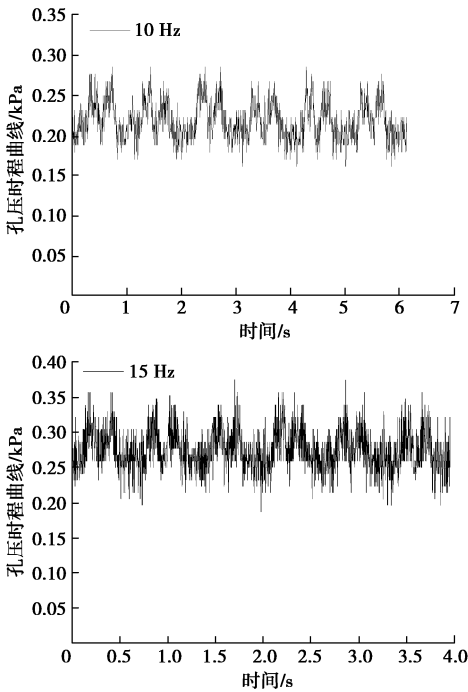


图 6 孔压时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of dynamic pore pressure

由图 7 可知, $F_0, F_{0.5}, F_1, F_{3.5}$ 位置处的桩身轴力均随荷载循环次数的增加而逐渐增加,在加载初期,增加的速率较大,随着荷载次数的增加,增加的速率逐渐放缓,有趋于稳定的趋势。具体而言,在加载频率分别为 10, 15 Hz 作用下,桩身轴力逐渐趋于稳定所需的荷载循环次数分别约为 2 万和 3 万次,加载频率越低,桩身轴力趋于稳定所需的荷载循环次数越低,越容易达到平衡状态。由上分析可知,无砟轨道 X 形桩-筏复合地基中桩与土共同承担上部传递下来的动荷载,在动力加载初期,桩承担的动荷载相对较小,地基土承担的动荷载相对较大,桩土应力比相对较小;随着加载时间的增加桩承担的荷载逐渐增大,但增加的速率逐渐放缓,并有趋于稳定的趋势。证明在此过程中,由于碎石垫层的存在,桩、土协同工作,桩承担的荷载逐渐增加,当达到一定循环次数后,桩、土分担的荷载逐渐达到平衡状态。同时,加载频率越高,达到这种平衡状态所需的荷载循环次数越多。桩、土所分担的荷载具有明显的时间效应。

(2) 桩身轴力随深度的变化规律

以图 7(b)中 P_{33} 桩身轴力趋于稳定后荷载循环 3.25 万次附近的 A—A 区间为例,研究桩身轴力随深

度的分布情况, 如图8所示。

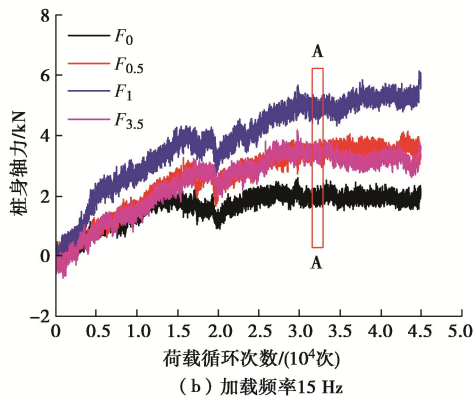
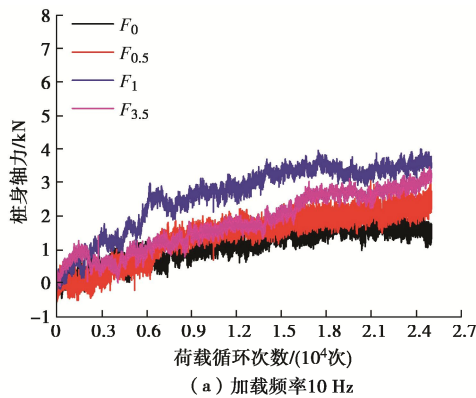


图7 桩身平均轴力随荷载循环次数的变化曲线

Fig. 7 Average axial forces of pile against loading cycles

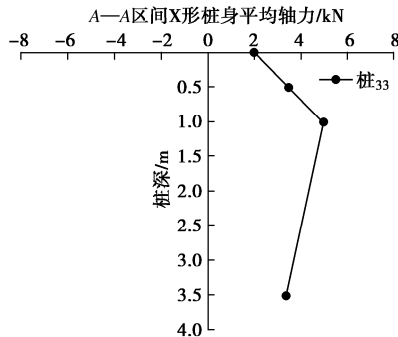


图8 桩身平均动轴力沿深度变化曲线

Fig. 8 Curve of axial force distribution of pile along pile length

由图8可知, 在桩顶向下1 m范围内, 桩身轴力随深度的增加呈线性增加, 其中桩顶向下0, 0.5, 1 m处的桩身轴力分别为2, 3.5, 5 kN, 这是由于桩周土的沉降大于桩体的沉降, 产生作用于桩侧的下拽力, 继而产生桩侧负摩阻力, 使得桩身轴力逐渐变大; 在桩顶向下1~3.5 m范围内, 桩身轴力随深度的增加而逐渐减小, 在桩身3.5 m处, 桩身轴力降至3.4 kN, 这是由于动荷载沿桩身向下传递的过程, 就是不断克服侧摩阻力并通过侧摩阻力向土中扩散的过程, 因而导致桩身轴力在此范围内沿着深度逐渐减小。综上所述, 在桩长的1/4处, 桩身轴力达到最大, 而桩侧摩阻力为0, 即为中性点位置。

(3) 归一化桩身轴力与荷载循环次数的关系

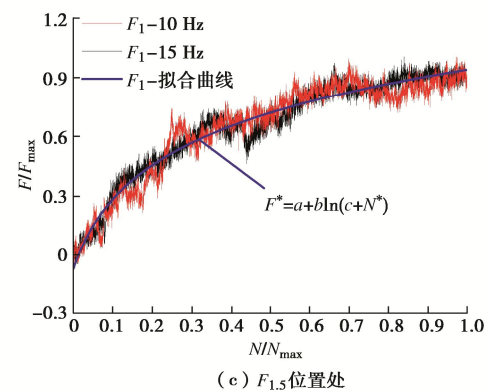
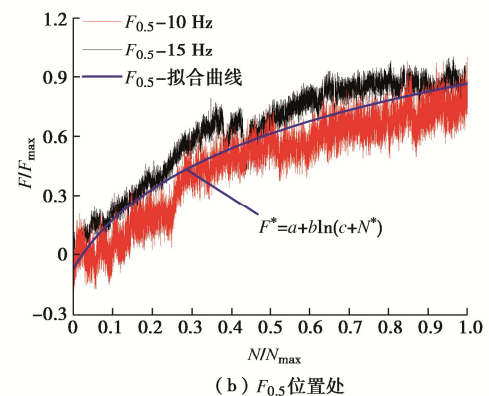
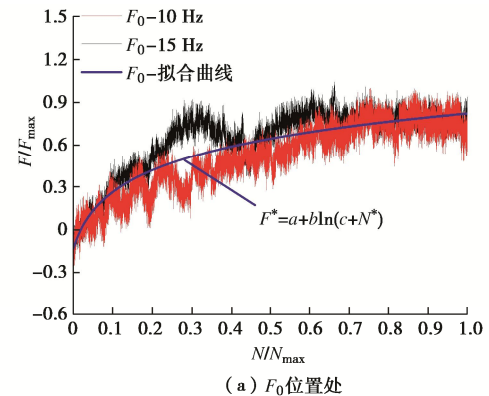
对桩身轴力与荷载循环次数进行整理分析, 分别得出P33桩 F_0 , $F_{0.5}$, F_1 , $F_{3.5}$ 位置处的归一化桩身轴力 F^* 与归一化荷载循环次数 N^* 的关系如图9(a)~(d)所示。归一化桩身轴力 F^* 定义为荷载循环 N 次时所对应的桩身轴力 F 与荷载循环 N_{\max} 次时所对应的桩身轴力 F_{\max} 之比,

$$F^* = \frac{F}{F_{\max}} \quad (2)$$

归一化荷载循环次数 N^* 定义为荷载循环次数 N 与荷载循环次数 N_{\max} 之比,

$$N^* = \frac{N}{N_{\max}} \quad (3)$$

由图9(a)~(d)可知, 在加载频率10, 15 Hz分别作用下, F_0 , $F_{0.5}$, F_1 , $F_{3.5}$ 各位置处的归一化桩身轴力均随归一化荷载循环次数的增加而逐渐增加, 但增加的速率逐渐减小, 并逐步趋向稳定状态。



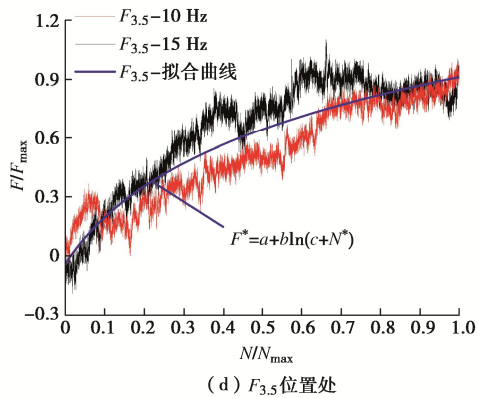


图 9 归一化桩身轴力时程曲线

Fig. 9 Nomalization of average axial force of pile versus loading cycles

分别对图 9 (a) ~ (d) 中的曲线进行拟合, 发现 F_0 , $F_{0.5}$, F_1 , $F_{3.5}$ 位置处的归一化桩身轴力随归一化荷载循环次数的变化规律均符合对数曲线:

$$F^* = a + b \ln(c + N^*) \quad (4)$$

不同位置处拟合曲线的参数 a , b , c 的值见表 4。

表 4 拟合参数取值

Table 4 Values of fitting parameter

位置	a	b	c
F_0	0.817	0.268	0.029
$F_{0.5}$	0.813	0.431	0.127
F_1	0.920	0.340	0.054
$F_{3.5}$	0.842	0.470	0.153

2.3 侧摩阻力分析

(1) 桩侧摩阻力随深度的变化规律

以图 7 (b) 中桩身轴力趋于稳定后荷载循环 3.25 万次附近的 $A-A'$ 区间轴力为例, 根据测得的桩身轴力计算出相应断面的桩侧摩阻力, 如图 10 所示。

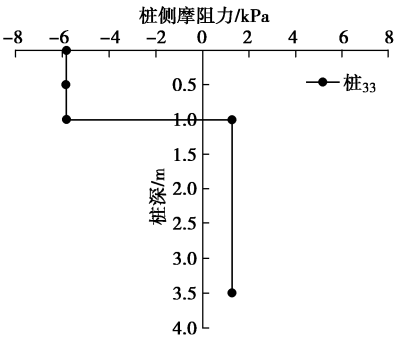


图 10 桩侧摩阻力沿桩身的分布情况

由图 10 可知, 在桩顶向下 0~1 m 范围内为负摩阻力区, 负摩阻力为 -5.85 kPa; 在 1~3.5 m 范围内为正摩阻力区, 其侧摩阻力为 1.25 kPa, 中性点位置在桩长的 1/4 处。文献[26, 27]分别基于 X 形桩单桩复合地基和多桩复合地基的现场静载试验研究, 发现其

中性点位置分别在桩长的 1/5 和 1/4~1/3 处, 桩侧摩阻力的整体分布规律与传统圆形桩特点相似, 高于同参数的圆形桩复合地基。由上述分析可知, 在列车荷载和静载分别作用下, X 形桩复合地基的桩侧摩阻力分布规律有一定的相似性。

(2) 归一化桩侧摩阻力与归一化荷载循环次数的关系

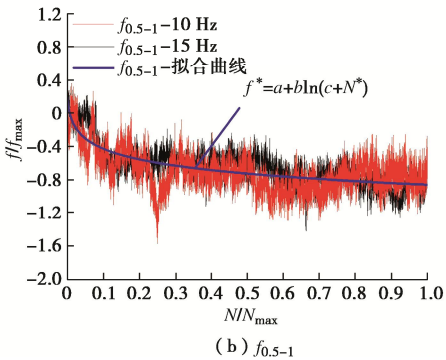
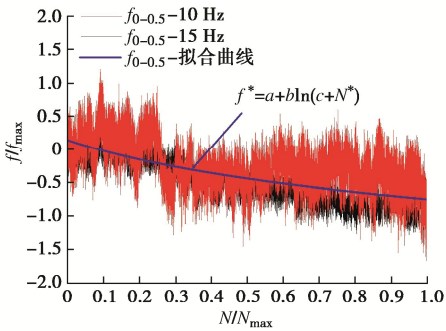
本节基于 2.2 节获得的 F_0 , $F_{0.5}$, F_1 , $F_{3.5}$ 位置处桩身轴力时程曲线, 计算出桩顶向下 0~0.5 m, 0.5~1.0 m 和 1~3.5 m 范围内的桩侧摩阻力 $f_{0-0.5}$, $f_{0.5-1}$, $f_{1-3.5}$, 并对桩侧摩阻力与荷载循环次数进行整理分析, 分别得出 X 形桩不同位置处的归一化桩侧摩阻力 f^* 与归一化荷载循环次数 N^* 的关系, 如图 11 (a) ~ (c) 所示。

归一化桩侧摩阻力 f^* 定义为荷载循环 N 次时所对应的桩侧摩阻力 f 与荷载循环 N_{\max} 次时所对应的桩侧摩阻力 f_{\max} 之比:

$$f^* = \frac{f}{f_{\max}} \quad (5)$$

归一化荷载循环次数 N^* 定义同式 (3)。

由图 11 (a) ~ (c) 可知, 在桩顶向下 0~0.5 m 和 0.5~1.0 m 范围内的归一化桩侧负摩阻力均随归一化荷载循环次数的增加而逐渐增加, 但增加的幅度逐渐减小, 并逐步趋向稳定状态; 桩顶向下 1~3.5 m 范围内的归一化桩侧正摩阻力也有类似的变化规律; 由此可见, 桩侧摩阻力与荷载循环次数密切相关, 随着荷载循环次数的增加桩侧摩阻力逐渐被调动起来, 最后趋于稳定。



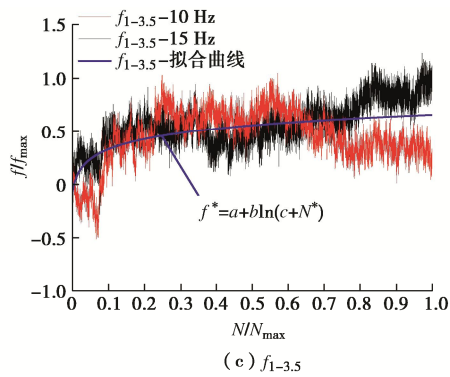


图 11 归一化桩侧动摩阻力时程曲线

Fig. 11 Normalization of average friction of pile shaft

分别对图 11 (a) ~ (c) 中的曲线进行拟合, 发现归一化桩侧摩阻力随归一化荷载循环次数的变化规律均符合对数曲线:

$$f^* = a + b \times \ln(c + N^*) \quad (6)$$

式中, 参数 a , b , c 的值见表 5。

表 5 拟合参数取值

Table 5 Values of fitting parameter

桩顶向下	a	b	c
0~0.5 m	-0.528	-0.692	0.377
0.5~1.0 m	-0.856	-0.188	0.004
1~3.5 m	0.659	0.145	0.004

2.4 长期沉降分析

(1) 累积变形曲线

本节选取加载频率为 15 Hz 情况下 (工况 3) 的动力累积变形测试结果进行分析, 图 12 为轨道板中心 D_1 处 (图 2) 的变形随荷载循环次数的变化规律。由图 12 可知, 在预压 20 kN 静载的过程中, 轨道板产生了 0.25 mm 的变形。在列车循环荷载加载过程中, 轨道板累积变形随加载次数的增加而逐渐增加, 循环加载的前期变形增加的速率较快, 随着土体的进一步压密, 变形增加的速率逐渐放缓, 且有收敛的趋势。

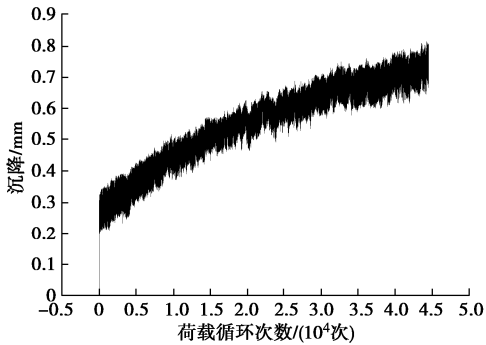


图 12 轨道板累积沉降与循环次数的关系

Fig. 12 Dynamic settlements against number of loading cycles measured at track slab

Huang 等^[28]在激振频率为 20 Hz、振动幅值为 41.25 kN 的动荷载作用下通过现场试验测量了无砟轨道桩-板低矮路堤的长期沉降, 其中筏板下每排桩由 5

根直径为 0.8 m 的圆形桩组成, 而本模型试验所对应的原型筏板下每排桩由 5 根外包圆直径为 0.785 m 的 X 形桩组成, 两者外包圆直径相近, 但后者单位混凝土用量较前者节省了 35.2%。为了便于两者的比较, 笔者将荷载循环次数进行归一化处理, 将图 12 中由于预压 20 kN 静载产生的 0.25 mm 沉降减去, 并将测得的沉降除以所受到的荷载, 得到单位荷载沉降量随归一化荷载循环次数的变化规律如图 13 所示。

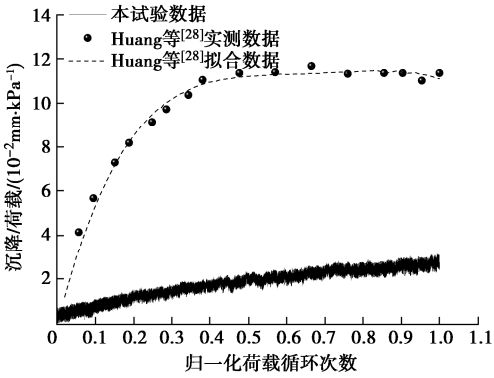


图 13 单位荷载沉降量与归一化荷载循环次数的关系

Fig. 13 Relationship between settlement / load and normalization of loading cycles

由图 13 可知, Huang 等^[28]现场试验与本模型试验所获得的单位荷载沉降量分别为 11.12 mm/kPa 和 2.41 mm/kPa, 前者是后者的 5.19 倍, 而后者所采用的 X 形桩与前者的圆形桩相比, 单位混凝土用量还节省了 35.2%。由上述分析可知, 在动力荷载作用下饱和砂土地基中的 X 形桩筏地基比天然地基中的圆形桩-板地基在控制沉降方面具有明显的优势。这种明显优势具体是由砂土地基、还是 X 形桩、还是两者耦合作用引起的, 这里还找不到准确原因, 笔者将在后续就此问题进一步开展研究工作。

(2) 归一化沉降与归一化循环次数的关系

为了进一步对轨道板的沉降性状进行研究, 这里选取加载频率 5, 10, 15 Hz 下轨道板的沉降与荷载循环次数进行整理分析, 得出轨道板的归一化沉降 S^* 与归一化荷载循环次数 N^* 的关系如图 14 所示。

归一化沉降 S^* 定义为荷载循环 N 次时所对应的沉降 S 与荷载循环 N_{\max} 次时所对应的沉降 S_{\max} 之比,

$$S^* = \frac{S}{S_{\max}} \quad (7)$$

归一化荷载循环次数 N^* 定义同式 (3)。

由图 14 可知, 3 种加载频率下轨道板的沉降曲线具有很大的相似性, 归一化沉降随着归一化荷载循环次数的增加逐渐增加, 但增加的速率逐渐减小, 最终沉降明显收敛, 并且进入安定状态; 经过拟合, 归一化沉降与归一化荷载循环次数的关系均符合对数函数:

$$S^* = a + b \times \ln(c + N^*) \quad (8)$$

式中, a 为 0.82, b 为 0.37, c 为 0.28。

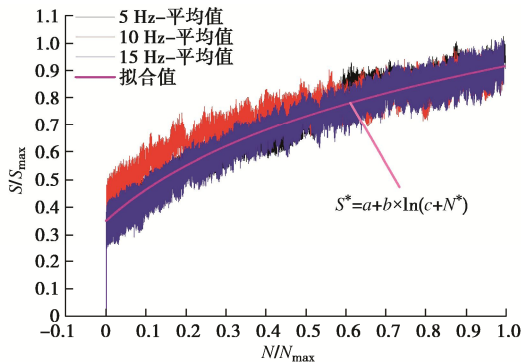


图 14 归一化沉降与荷载循环次数之比的关系

Fig. 14 Relationship between normalization of settlement ratio and loading cycle ratio

3 结 论

本文通过在长期列车循环荷载作用下分析饱和砂土地基中无砟轨道 X 形桩-筏复合地基的桩身轴力、桩侧摩阻力和累积沉降, 得出 4 点结论。

(1) 桩身轴力随荷载循环次数的增加而逐渐增加, 但增加的速率逐渐放缓, 有收敛的趋势, 桩身轴力的发挥具有明显的时间效应。加载频率越低, 桩身轴力趋于稳定所需的荷载循环次数越少。

(2) 在桩顶向下 1 m 范围内, 桩身轴力随深度的增加逐渐变大, 在 1 m 处 (即桩长 1/4 处) 桩身轴力达到最大; 在 1 m 范围外, 桩身轴力随深度的增加而逐渐减小。归一化桩身轴力随归一化荷载循环次数的变化规律可用对数曲线 $F^* = a + b \times \ln(c + N^*)$ 描述。

(3) 在桩顶向下 1 m 范围内为负摩阻力区, 在 1 m 范围外为正摩阻力区, 中性点位置在桩长的 1/4 处。在桩顶向下 1 m 范围内的归一化桩侧负摩阻力随归一化荷载循环次数的增加而逐渐增加, 但增加的幅度逐渐减小, 并逐步趋向稳定状态; 在 1 m 范围外归一化桩侧正摩阻力也有类似的变化规律。归一化桩侧摩阻力随归一化荷载循环次数的变化规律可以用对数函数 $f^* = a + b \times \ln(c + N^*)$ 描述。

(4) 在动力荷载作用下饱和砂土地基中的 X 形桩筏地基比天然地基中的圆形桩-板地基在控制沉降方面具有明显的优势。轨道板长期累积沉降随加载次数的增加而逐渐增加, 循环加载初期变形增加的速率较快, 随着土体的进一步压密变形增加的速率逐渐放缓。归一化沉降与归一化荷载循环次数的关系符合对数函数 $S^* = a + b \times \ln(c + N^*)$ 。

参考文献:

[1] 刘汉龙, 孙广超, 孔纲强, 等. 无砟轨道 X 形桩-筏复合地

基土压力分布规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1933 - 1940. (LIU Han-long, SUN Guang-chao, KONG Gang-qiang, et al. Model tests on distribution law of dynamical soil pressure of ballastless track XCC pile-raft composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 1933 - 1940. (in Chinese))

[2] PRIEST J A, POWRIE W, YANG L, et al. Measurements of transient ground movements below a ballasted railway line[J]. Géotechnique, 2010, 60(9): 667 - 677.

[3] 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(1/2/3/4/5): 211 - 233.

[4] BIAN X C, JIANG H G, CHENG C, et al. Full-scale model testing on a ballastless high-speed railway under simulated train moving loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 66: 368 - 384.

[5] 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.

[6] YANG L A, POWRIE W, PRIEST J A. Dynamic stress analysis of a ballasted railway track bed during train passage[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(5): 680 - 689.

[7] GALVÍN P, ROMERO A, DOMÍNGUEZ J. Vibrations induced by HST passage on ballast and non-ballast tracks[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(9): 862 - 873.

[8] ZHAI W M, HE Z X, SONG X L. Prediction of high-speed train induced ground vibration based on train-track-ground system model[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(4): 545 - 554.

[9] BHADURI A, CHOUDHURY D. Steady-state response of flexible combined pile-raft foundation under dynamic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 145: 106664.

[10] 庄 妍, 李劲邦, 崔晓艳, 等. 高铁荷载下桩承式路基动力响应及土拱效应研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3119 - 3130. (ZHUANG Yan, LI Shao-bang, CUI Xiao-yan, et al. Investigation on dynamic response of subgrade and soil arching effect in piled embankment under high-speed railway loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 3119-3130. (in Chinese))

[11] 吕玺琳, 马 泉. 高铁复合结构路基荷载传递及沉降数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(7): 1 - 6. (LÜ Xi-lin, MA

- Quan. Numerical research on the load transfer and settlement of composite structural subgrade of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, **35**(7): 1 - 6. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] 陈宏伟, 徐林荣. 高速铁路 CFG 桩-筏复合地基现场测试研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, **36**(6): 60 - 66. (CHEN Hong-wei, XU Lin-rong. Analysis of field test high-speed railway CFG pile-raft composite foundation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, **36**(6): 60 - 66. (in Chinese))
- [14] 徐林荣, 牛建东, 吕大伟, 等. 软基路堤桩-网复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2149 - 2154, 2160. (XU Lin-rong, NIU Jian-dong, LÜ Da-wei, et al. Experimental study on pile-net composite foundation of high-speed railway on soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2149 - 2154, 2160. (in Chinese))
- [15] 吕玺琳, 马 泉, 方 航. 高铁桩网复合结构路基长期运营沉降模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 1): 140 - 144. (LÜ Xi-lin, MA Quan, FANG Hang. Model tests on the long-term settlement of pile-net composite structure subgrade for high-speed railways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 140 - 144. (in Chinese))
- [16] LV Y R, LIU H L, DING X M, et al. Field tests on bearing characteristics of X-section pile composite foundation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, **26**(2): 180 - 189.
- [17] 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**: 268 - 282.
- [18] YIN F, ZHOU H, LIU H L, et al. Effects of asphalt overlay on XCC pile-supported embankment vibration from a moving vehicle[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **112**: 18 - 23.
- [19] NIU T T, LIU H L, DING X M, et al. Model tests on XCC-piled embankment under dynamic train load of high-speed railways[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, **17**(3): 581 - 594.
- [20] 牛婷婷, 孙广超. 高速铁路 X 形桩桩网复合地基动态响应分析[J]. 岩土力学, 2021, **42**(5): 1266 - 1280. (NIU Ting-ting, SUN Guang-chao. Dynamic response analysis of X-pile-net composite embankment in high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(5): 1266 - 1280. (in Chinese))
- [21] SUN G C, KONG G Q, LIU H L, et al. Vibration velocity of X-section cast-in-place concrete (XCC) pile-raft foundation model for a ballastless track[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(9): 1340 - 1345.
- [22] 孙广超, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(6): 1021-1029. (SUN Guang-chao, LIU Han-long, KONG Gang-qiang, et al. Model tests on effect of vibration waves on dynamic response of XCC pile-raft composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(6): 1021 - 1029. (in Chinese))
- [23] 孙广超, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 荷载振幅对 X 形桩-筏复合地基动力响应特性影响的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, **51**(2): 499 - 506. (SUN Guang-chao, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Experimental study on load amplitude impact on dynamic response of XCC pile-raft composite foundation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, **51**(2): 499 - 506. (in Chinese))
- [24] 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[S]. 2015. (Code for Design of High Speed Railway: TB 10621—2014[S]. 2015. (in Chinese))
- [25] 徐 进. 高速铁路路基模型试验系统研究与动力分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012. (XU Jin. Research on Model Test System of High Speed Railway Subgrade and Dynamics Analysis[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese))
- [26] 杨 挺, 刘汉龙, 孔纲强. 现浇 X 形桩复合地基静载荷试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, **12**(3): 662 - 669. (YANG Ting, LIU Han-long, KONG Gang-qiang. Static load field test of X-section cast-in-place pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, **12**(3): 662 - 669. (in Chinese))
- [27] 丁选明, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 现浇 X 形桩桩-土荷载传递规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 489 - 493. (DING Xuan-ming, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Field test study of pile-soil load transfer characteristics of X-shaped cast-in-place pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 489 - 493. (in Chinese))
- [28] HUANG J J, SU Q, LIU T, et al. Vibration and long-term performance analysis of pile-plank-supported low subgrade of ballastless track under excitation loads[J]. Shock and Vibration, 2015, **2015**: 404627.