

DOI: 10.11779/CJGE2021S2011

# 不同路堤高度下 X 形桩-筏复合地基动力响应模型试验

孙广超<sup>1, 2, 3</sup>, 孔纲强<sup>\*1, 2</sup>, 李建林<sup>1</sup>, 罗 雅<sup>3</sup>

(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. 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. 深圳市龙岗区建筑工务署, 广东 深圳 518100)

**摘要:** 为了明确路堤高度对桩-筏复合地基动力响应的影响, 在砂土中展开了 X 形桩筏复合地基大比尺模型试验。在尺寸为  $5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 7\text{ m}$  的模型槽里, 通过将 4 种不同的路堤高度换算成对应的恒载然后预先施加于筏板上, 再在筏板上施加循环的轮轴荷载, 从而得出动力响应随恒载(即路堤高度)的变化规律。试验结果表明: 由于碎石垫层的存在, 速度响应从筏板顶部到地基深度 0 m 的 0.36 m 范围内速度响应锐减了 34%~40%。随着恒载的增加, 轮轴荷载引起的筏板振动情况逐渐减弱, 筏板的速度响应  $v'$  与恒载  $x$  之间的关系曲线为  $v' = 12.648 - 0.519x + 0.007x^2$ ; 地基表层动土压力与桩顶动应力随恒载的增加均呈线性减小, 其中地基表层的动土压力  $\sigma_{sd}$  与恒载  $x$  之间的关系曲线为  $\sigma_{sd} = 7.629 - 0.085x$ , 桩顶动应力  $\sigma_{pd}$  与恒载  $x$  之间的关系曲线为  $\sigma_{pd} = 284.978 - 3.660x$ 。

**关键词:** 桩-筏复合地基; 模型试验; X 形桩; 路堤高度; 动力响应

中图分类号: U416.1; TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0045-06

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

## Model tests on dynamic response of XCC pile-raft composite foundation under different embankment heights

SUN Guang-chao<sup>1, 2, 3</sup>, KONG Gang-qiang<sup>1, 2</sup>, LI Jian-lin<sup>1</sup>, LUO Ya<sup>3</sup>

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

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Bureau Public Works of Longgang District, Shenzhen 518100, China)

**Abstract:** In order to investigate the influences of embankment height on the dynamic response of pile-raft composite foundation, a large-scale model test on the cast-in-situ X-shaped concrete (referred to as XCC) pile-raft composite foundation is carried out in a model box of  $5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 7\text{ m}$ . Four different embankment heights are modeled as the dead loads, and the cyclic wheel axle load is applied to the raft so as to obtain the dynamic response with the dead loads (i.e., embankment height). The results show that the velocity response decreases by 34%~40% from the top of the raft to 0.36 m depth of foundation due to the existence of a gravel cushion. The vibration of the raft caused by the axle load decreases gradually with the increasing dead loads. The relationship between the velocity response of the raft  $v'$  and the dead load  $x$  is defined by the equation,  $v' = 12.648 - 0.519x + 0.007x^2$ . Both the dynamic soil stress on the surface of the foundation  $\sigma_{sd}$  and the dynamic stress at the top of the pile  $\sigma_{pd}$  decrease linearly with the increasing dead loads  $x$ . The former is defined by the equation  $\sigma_{sd} = 7.629 - 0.085x$ , whereas the latter is defined by  $\sigma_{pd} = 284.978 - 3.660x$ .

**Key words:** pile-raft foundation; model test; XCC pile; embankment height; dynamic response

## 0 引言

桩-筏复合地基因对不均匀沉降问题具有较好的控制效果, 在高速公路、高速铁路和地铁路基的建设中已获得应用<sup>[1]</sup>。

目前, 在刚性桩复合地基方面国内外学者取得了一定的研究成果。在理论分析方面, 相关研究人员分别基于荷载传递方法、传递函数法与单元体相结合的方法、最小势能原理与弹簧组模型、桩-土-筏非线性

共同作用模型, 分析了路堤荷载下桩筏复合地基中桩、土、垫层三者之间的彼此影响; 研究了桩-土荷载分担比与桩之间的距离、路堤土的剪切模量、路堤的高度以及桩土相对刚度之间的关系, 垫层对应力调节和沉

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(51420105013); 高速铁路基础研究联合基金项目(U2034203); 国家自然科学基金青年基金项目(51809151)

收稿日期: 2021-08-16

\*通信作者 (E-mail: gqkong1@163.com)

降的影响;提出了求解地基固结沉降的简化分析方法、桩和筏板的沉降计算方法<sup>[2-7]</sup>。在数值模拟方面,相关学者分析了路堤荷载下孔隙水压力、竖向变形及侧向水平变形的变化规律;计算了桩间距对降低路堤沉降和不均匀沉降的影响<sup>[8-12]</sup>。在现场试验方面,相关学者研究了群桩效应系数与桩数、桩帽、桩长、褥垫层、荷载的关系;分析了筏板应力、应变、桩顶应力及土压力与时间的关系,路堤-桩-地基的相互作用,地基土孔隙水压力、沉降、分层沉降及荷载传递的规律<sup>[13-15]</sup>。

已有的关于刚性桩复合地基的研究大多集中在静力范围内。在交通荷载作用下,关于桩-筏复合地基的研究仍较少,尤其是将 X 形桩替换其中的圆形桩方面的研究更少<sup>[16]</sup>。为此,笔者所在团队在动力荷载作用下进行了一些 X 形桩承式路堤模型试验。基于 X 形桩-网路堤模型试验,揭示了沥青加铺层对路面顶部位移的影响、X 形桩周土体的非对称运动以及加垫层后的集中系数<sup>[17-18]</sup>;交通荷载作用下的土拱高度小于静载作用下的土拱高度<sup>[19]</sup>。此外,研究人员比较了 X 形桩-筏复合地基在风干砂土和饱和砂土地基中的动力响应<sup>[21]</sup>。结果表明,地基振动速度的大小和变化与地基的饱和程度密切相关,列车速度是影响 X 形桩筏复合地基动力响应的一个重要因素。然而,在交通荷载作用下,不同路堤高度下 X 形桩-筏复合地基的动力响应变化规律尚不清楚。为此,本文基于模型试验方法,着重分析不同路堤高度下振动速度、动土压力和桩身动应力随交通荷载的变化规律。

## 1 大比例模型试验概况

### 1.1 模型试验布置及模型相似比

为研究不同路堤高度下 X 形桩-筏复合地基的动力响应,本文选取 4 种路堤高度( $h_1 \sim h_4$ )下路堤横截面方向上中间的两排桩进行研究,如图 1 所示。开展模型加载试验时,首先将不同的路堤高度换算成对应的恒载  $x$  (kN) 预先施加于筏板上,然后再在筏板上施加循环的车辆荷载,试验加载示意图见图 2。图中模型槽的长、宽和高分别为 5, 4 和 7 m。本试验的几何相似常数为 1:5, 各物理量的相似比见表 1。

### 1.2 X 形桩-筏复合地基系统的制备

本模型试验的 X 形桩-筏复合地基从下至上依次由地基土、X 形桩、碎石垫层和筏板组成。其中地基土为中砂,表 2 为其物理参数。在模型槽四周墙壁上预先布置“两布三膜”,以减小反射波对试验结果的影响<sup>[16]</sup>。在填筑砂土的过程中,用夯机将每层相同重量相同厚度(300 mm)的砂土均匀压实到 250 mm 厚,后经试验测得每层填土的相对密实度为  $0.66 < D_r < 0.8$ ,

属于中密状态。用填筑砂土相类似的方法,在桩顶处均匀填筑 100 mm 厚级配良好的碎石( $C_u=6, C_c=2.89$ ),然后压实到 60 mm。

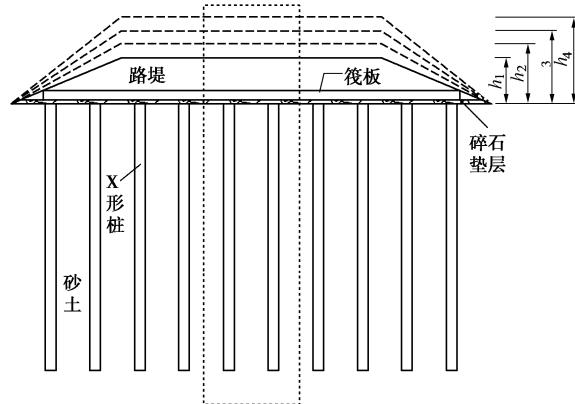


图 1 不同路堤高度下 X 形桩-筏复合地基

Fig. 1 XCC pile-raft composite foundation under different embankment heights

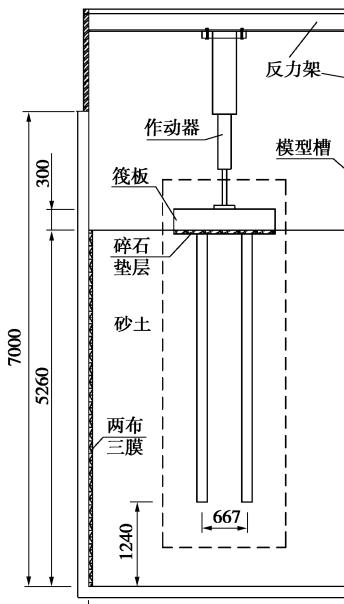


图 2 试验加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test loading

表 1 模型相似比

Table 1 Similarity ratios for model

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

X 形桩的截面形状受 3 个参数  $2a$ (开弧间距)、 $\theta$ (开弧角度) 和  $2R$ (外包圆直径) 控制,见图 3。本试验中 3 个参数依次为 39 mm、90° 和 152 mm, 桩长为 3960 mm, 4 根 X 形桩分别命名为 A、B、C 和 D 桩, 其布置方式见图 3。

表 2 砂土基本物理指标

Table 2 Physical indices of sand

天然密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	天然含水率 /%	G <sub>s</sub>	不均匀 系数 C <sub>u</sub>	曲率系 数 C <sub>c</sub>
1.478	4.08	2.67	2.42	0.93

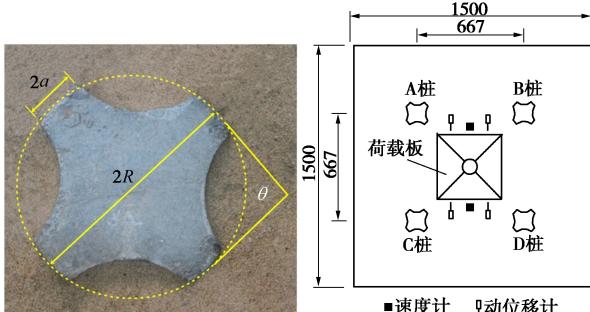


图 3 X 形桩及布置示意图

Fig. 3 Arrangement of XCC piles

### 1.3 试验仪器布置及加载与数据采集系统

试验仪器布置如图 4 所示, 在 4 根桩的正中心每隔 1 m 布置一个速度计, 在筏板面层中心点附近对称布置 2 个速度计。在速度计附近对应埋设 5 个具有温度补偿功能的动土压力盒, 同时为了保证其测量精度, 经过计算动土压力盒的量程分别选用 0.1~0.3 MPa, 其准确度误差  $\leq 0.3\% F \cdot S$ 。

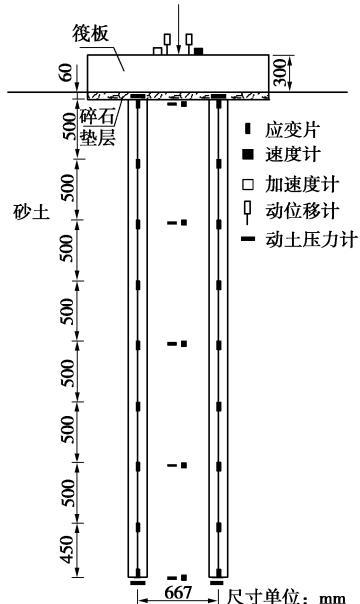


图 4 试验仪器布置示意图

Fig. 4 Layout of instruments for model tests

静动力试验加载控制系统由静动力作动器、控制器、荷载输入控制机、液压系统等组成。控制器可模拟不同的交通荷载, 数据采集分析系统可进行连续不间断的数据采集。

## 2 荷载形式及试验工况设计

本模型试验通过简化, 采用正弦波荷载模拟列车的一个轮轴荷载<sup>[16]</sup>, 其荷载形式为

$$Q(t)=x+A\sin\omega(t-T/4) \quad (1)$$

式中  $Q(t)$  为施加在筏板表面中心的荷载 (kN);  $x$  为路堤高度对应的等效恒载 (kN);  $A$  为振幅 (kN);  $\omega=2\pi f$  为角速度 (rad/s), 其中  $f$  为频率 (Hz);  $t$  为时间 (s);  $T$  为荷载循环周期 (s)。

图 5 为式 (1) 对应的轮轴荷载, 表 3 为试验加载工况。

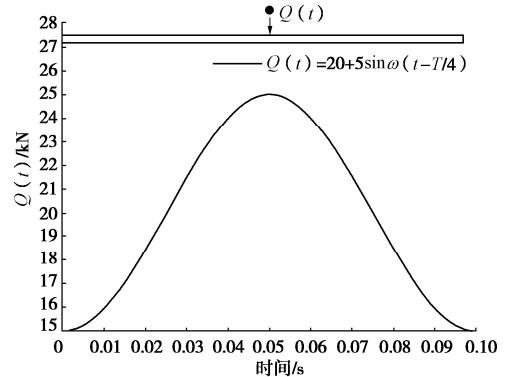


图 5 施加的正弦波荷载

Fig. 5 Sine wave loads

表 3 试验加载工况

Table 3 Load cases of tests

荷载 Q(t) /kN	恒载 x /kN	振幅 A /kN	频率 f /Hz	循环次数 /次
Q(t)	20	5	10	25000
Q(t)	25	5	10	25000
Q(t)	30	5	10	25000
Q(t)	35	5	10	25000

## 3 试验结果与分析

### 3.1 速度分析

#### (1) 速度响应时程曲线

以恒载 20 kN、振幅 5 kN 的循环荷载为例, 筏板顶部、地基深度 0, 1, 2, 3, 4 m 处的速度响应时程曲线见图 6。

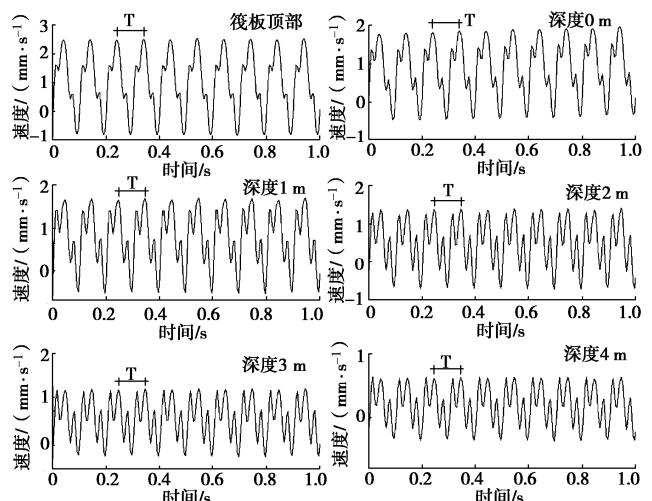


图 6 速度响应时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of velocity response

在筏板处,速度响应的波峰和波谷与所施加的正弦波荷载相同步,呈现正弦波形。在1 m处,当荷载处于峰值时,速度响应曲线出现了一小一大的双峰值。随着地基深度的增加,速度响应的两个峰值大小逐渐趋近于相等。在4 m处,这两个峰值大小基本相等,呈明显的M形。由上述分析可知,在筏板处速度响应的大小和振动形式主要受循环荷载的影响,随着振动向地基深层传播的过程中,速度响应受深度、密实度等其它因素的影响越来越重,其大小逐渐衰减、形状逐渐趋于复杂。

## (2) 速度响应与深度的关系

在振幅为5 kN,恒载分别为20, 25, 30, 35 kN的循环荷载作用下,X形柱筏复合地基的速度响应如图7所示。

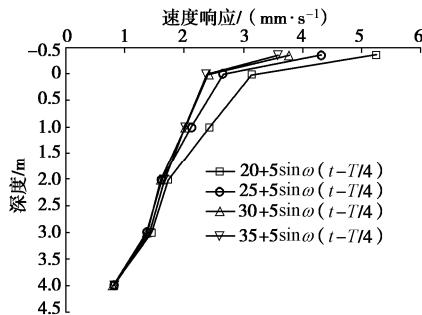


图7 速度响应与深度的关系

Fig. 7 Vibration velocities recorded at different layers

由图7可知,恒载越大(即路堤高度越大),筏板的速度响应越小,筏板振动越弱。反之,路堤高度越小,筏板的速度响应越大,筏板振动越强。在深度0 m以下,对于不同的路堤高度,速度响应随深度的增加均近似呈线性减小。需要注意的是,从筏板经碎石垫层到地基表层(深度0 m处)的0.36 m范围内,速度响应衰减尤为显著,基本衰减为筏板的34%~40%,文献[16]也得到了相似的结果。因筏板刚度大,对振动速度衰减的影响可忽略不计,由此可得出0.06 m厚的碎石垫层是振动速度骤减的主要原因,碎石垫层具有良好的阻尼效果。在实际工程中,高铁、地铁列车大部分穿过城区,为最大限度降低列车运行引起的振动对轨道沿线建筑物的影响,国内外学者及工程师提出了许多减振措施。基于上述模型试验结果可知,碎石垫层具有良好的减振效果,在考虑减振措施时可供工程师参考使用。

同时注意到,当不同大小的振动速度从筏板传递到地基深度3 m处时,各速度响应基本相同,在3~4 m范围内,速度响应的大小及变化规律也基本相同,这表明轮轴荷载引起速度响应的差异主要集中在从筏板到地基深度3 m处的范围内,而3 m以下的速度响应大小及变化规律基本相同。

## (3) 速度响应与恒载的关系

筏板顶部速度响应 $v'$ (mm/s)与恒载 $x$ (kN)之间的关系曲线如图8所示, $v'$ 与 $x$ 可用回归方程(2)进行描述:

$$v' = a + bx + cx^2 \quad (2)$$

本例中参数 $a=12.648$ , $b=-0.519$ , $c=0.007$ ,相关系数 $R^2=0.999$ 。

从图8可知,在循环荷载的振幅为5 kN,恒载分别为20, 25, 30, 35 kN的情况下,随着恒载(即路堤高度)的增加,轮轴荷载引起的筏板振动情况逐渐减弱,恒载与筏板的速度响应之间的关系曲线呈一元二次函数形式。

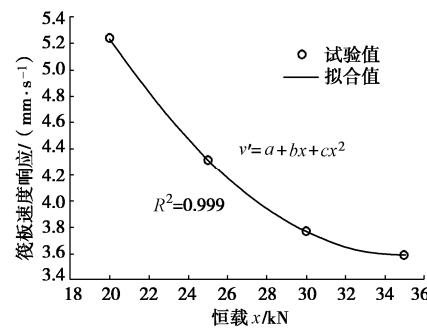


图8 筏板速度响应与恒载的关系曲线

Fig. 8 Relationship between velocity response of raft and dead load

## 3.2 动土压力分析

循环荷载加载一周时轴向土压力波峰与波谷的差值为动土压力 $\sigma_{sd}$ 。图9为不同正弦波循环荷载作用下地基表层的动土压力时程曲线。由图9可知,动土压力随荷载的加、卸载过程也呈现同样的增加、减小变化过程,且循环周期与所施加的荷载周期保持一致,时程曲线的峰值与一个轮轴荷载相对应。

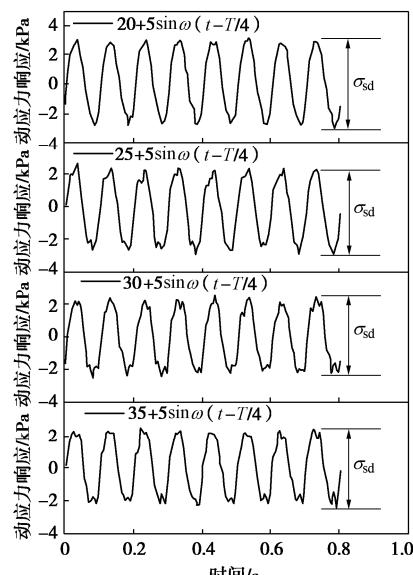


图9 动土压力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of dynamic soil pressure

当循环荷载振动到 25000 次时, 选取最后 20 个循环周期内动土压力响应的平均值作为此时的动土压力值, 通过对此循环次数的动土压力进行回归分析, 地基表面的动土压力  $\sigma_{sd}$  (kPa) 与恒载  $x$  (kN) 之间的关系曲线如图 10 所示,  $\sigma_{sd}-x$  曲线可用下面的回归方程(3)进行描述:

$$\sigma_{sd} = a + bx \quad , \quad (3)$$

本例中  $a=7.629$ ,  $b=-0.085$ , 相关系数  $R^2=0.954$ 。由图 10 可知, 恒载越小(即路堤高度越小), 地基表层的动土压力越大; 反之, 路堤高度越大, 动土压力越小。地基表层的动土压力与路堤高度两者之间近似呈线性关系。

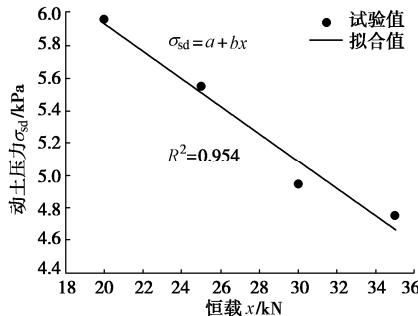


图 10 地基表层动土压力与恒载的关系曲线

Fig. 10 Relationship between dynamic soil pressure of foundation surface and dead load

### 3.3 桩身动应力

将试验测得的桩顶应变转换成桩顶动应力  $\sigma_{pd}$  归分析见图 11,  $\sigma_{pd}-x$  之间的关系曲线可用回归方程(4)进行描述:

$$\sigma_{pd} = a + bx \quad . \quad (4)$$

本例中  $a=284.978$ ,  $b=-3.660$ , 相关系数  $R^2=0.991$ 。由图 11 可知, 随着恒载(即路堤高度)的增加, 桩顶动应力呈线性逐渐减小。这表明, 路堤高度越小, 轮轴荷载传递到桩顶的动应力越大, 桩身的振动越强烈; 反之, 路堤高度越大, 轮轴荷载传递到桩顶的动应力越小, 桩身的振动越弱。因此在实际工程中, 如果要达到降低桩身振动的目的, 可以考虑通过增加路堤高度的方法来实现。

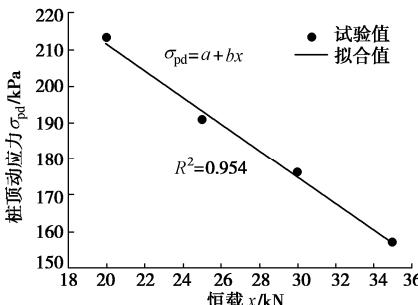


图 11 桩顶动应力与恒载关系曲线

Fig. 11 Dynamic stress of pile top versus dead load

## 4 结 论

本文通过开展循环荷载作用下 X 形桩-筏复合地基模型试验, 分析不同恒载(即路堤高度)的动力响应, 可以得出以下结论:

(1) 在不同路堤高度下, 轮轴荷载引起的速度响应的差异主要集中在从筏板到地基深度 3 m 处的范围内, 而 3 m 以下的速度响应大小及变化规律基本相同。由于碎石垫层的存在, 速度响应从筏板顶部到地基深度 0 m 的 0.36 m 范围内速度响应锐减了 34%~40%。

(2) 随着路堤高度(恒载)的增加, 轮轴荷载引起的筏板振动情况呈一元二次函数形式逐渐减弱。

(3) 路堤高度(恒载)越大, 轮轴荷载传递到地基表层的动土压力和桩顶的动应力就越小, 随着恒载的增加, 动土压力与桩顶动应力均呈线性减小。

## 参考文献:

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96~115. (LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96~115. (in Chinese))
- [2] HUANG M S, LIANG F Y, JIANG J. A simplified nonlinear analysis method for piled raft foundation in layered soils under vertical loading[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(7): 875~882.
- [3] 吕文志, 俞建霖, 龚晓南. 柔性基础下桩体复合地基的解析法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 401~408. (LÜ Wen-zhi, YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Analytical method for pile composite ground under flexible foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 401~408. (in Chinese))
- [4] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式加筋路堤桩体荷载分担比计算[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 1~6. (CAO Wei-ping, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Calculation for pile efficacy of pile-supported reinforced embankments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 1~6. (in Chinese))
- [5] 刘俊飞, 赵国堂, 马建林. 桩筏复合地基负摩阻段分析及桩土应力比计算[J]. 铁道学报, 2011, 33(7): 98~103. (LIU Jun-fei, ZHAO Guo-tang, MA Jian-lin. Analysis on negative friction segment of pile-raft composite foundation and calculation of its pile-soil stress ratio[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(7): 98~103. (in Chinese))
- [6] 俞建霖, 张甲林, 李坚卿, 等. 地表硬壳层对柔性基础下复

- 合地基受力特性的影响分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015(46): 1504 - 1510. (YU Jian-lin, ZHANG Jia-lin, LI Jian-qing, et al. Impacting analysis of dry crust on composite ground under flexible foundation[J]. Journal of Central South University, 2015(46): 1504 - 1510. (in Chinese))
- [7] 张栋樑. 深厚层软土路基桩网复合结构地基沉降机理及计算方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (ZHANG Dong-liang. Study on Settlement Mechanism and Calculation Method of Pile Net Composite Structure in Deep Soft Soil Subgrade[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [8] SMALL J C, LIU H L S. Time-settlement behaviour of piled raft foundations using infinite elements[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(2): 187 - 195.
- [9] 闫澍旺, 程栋栋, 侯晋芳, 等. 桩与土工加筋层对公路路堤地基承载力的影响[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 30 - 36. (YAN Shu-wang, CHENG Dong-dong, HOU Jin-tang, et al. Influence of pile and geogrid on bearing capacity of highway embankment foundation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 30 - 36. (in Chinese))
- [10] 费 康, 刘汉龙. 桩承式加筋路堤的现场试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1004 - 1012. (FEI Kang, LIU Han-long. Field test study and numerical analysis of a geogrid reinforced and pile-supported embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1004 - 1012. (in Chinese))
- [11] LEE J H, KIM Y, JEONG S. Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1/2): 103 - 114.
- [12] 张尤其. 行车荷载作用下桩承式加筋路堤的动力响应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (ZHANG You-qi. Dynamic Response Analysis of Pile Supported Reinforced Embankment Under Traffic Load[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [13] 陈泽松, 夏元友, 芮 瑞, 等. 管桩加固软土路基的工作性状研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5822 - 5827. (CHENG Ze-song, XIA Yuan-you, RUI Rui, et al. Study on the working performance of tubular pile composite foundation of freeway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 5822 - 5827. (in Chinese))
- [14] 吕伟华, 缪林昌. 刚性桩复合地基桩土应力比计算方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(3): 624 - 628. (LÜ Wei-hua, MIAO Lin-chang. Calculation method of pile-soft stress ratio of rigid pile composite foundation[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(3): 624 - 628. (in Chinese))
- [15] 付贵海, 魏丽敏, 邓宗伟, 等. 桩筏复合结构加固高速铁路深厚软基长期性状的现场试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(8): 2195 - 2202. (FU Gui-hai, WEI Li-min, DENG Zong-wei, et al. Field test on long-term behaviors of pile-raft composite structure strengthening high-speed railway deep ground[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(8): 2195 - 2202. (in Chinese))
- [16] 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, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, 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))
- [17] YIN F, ZHOU H, LIU H L, et al. Experimental and numerical analysis of XCC pile-geogrid foundation for existing expressway under traffic load[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1371 - 1388.
- [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] 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, 54(9): 1340 - 1345.
- [21] 刘汉龙, 孙广超, 孔纲强, 等. 无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动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))

(编校: 黄贤沙)