DOI：10.16285/j.rsm.2016.0680

高铁列车荷载作用下桩网复合地基振动特性模型试验

牛婷婷[1,2]，刘汉龙[1,3]，丁选明[3]，陈育民[1]

（1. 河海大学 土木与交通学院，江苏 南京 210098；2. 安徽理工大学 土木建筑学院，安徽 淮南 232001；3. 重庆大学 土木工程学院，重庆 400044）

摘 要：桩网复合地基是高速铁路广为应用的基础形式之一，其在高速列车荷载作用下的振动响应对列车运营安全和周围环境有着至关重要的影响。基于此，以现浇 X 形桩为对象，建立了桩网复合地基大比例尺模型，开展了桩网复合地基在高铁列车荷载作用下的动力响应特性研究，揭示了加载频率、加载幅值及振次的改变对桩网复合地基振动速度影响的规律。试验结果表明：速度响应幅值沿着路堤横向衰减较快，路堤耗能作用显著，列车运行产生的振动对周边环境影响较小。速度响应幅值沿桩网复合地基深度方向的衰减规律与横向振动传播规律有所不同。速度响应幅值从轨道板与钢筋混凝土底座到基床表层，衰减最快；加筋碎石垫层次之，相当于一个隔震垫层；地基中桩的存在使振动衰减变得缓慢，使由列车运行引起的振动影响深度加大。速度响应幅值随着加载频率的增加而逐渐变大，在 25 Hz 时出现峰值；速度响应幅值随着加载幅值的增加逐渐变大；速度响应幅值随着振次增加而基本保持不变。

关 键 词：振动速度；高铁列车荷载；桩网复合地基；模型试验

中图分类号：TU 435 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 03－0872－09

Piled embankment model test on vibration characteristics under high-speed train loads

NIU Ting-ting[1,2], LIU Han-long[1,3], DING Xuan-ming[3], CHEN Yun-min[1]

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A piled embankment with reinforcement is one of embankments widely used by high-speed railways. The effect of vibration velocity response under train loads of high-speed railways on train running safety and surroundings is crucially important. A large-scale piled embankment model was set up with X-section cast-in-place concrete pile as vertical reinforcement. The vibration performance of the piled embankment under train load of high-speed railways was investigated. The influence of loading frequencies, loading amplitudes, and the number of cycles on vibration velocity of the piled embankment model was revealed in this paper. The results show that it is faster for attenuation of vibration velocity along the transverse direction of the piled embankment. The impact of the embankment on energy dissipation is remarkable, so the effect of vibration induced by train running on surroundings is weaker. The attenuation of vibration velocity along the piled embankment depth is different from the transverse direction of the piled embankment. The piled embankment system shows the greatest attenuation of vibration velocity is from track slab and reinforced concrete base to surface layer of subgrade bed. The gravel cushion with geogrids attenuates less due to shock isolation cushion. The piles in the foundation make attenuation of vibration velocity by train running slower and influence depth deeper. Vibration velocity amplitude increases gradually with the increase of loading frequency, and reaches a peak at 25 Hz. It becomes bigger step by step with the increase of loading amplitude and stays the same with the increase of the numbers of cycles.

Keywords: vibration velocity; train load of high-speed railways; piled embankment with reinforcement; model test

收稿日期：2016-04-05

基金项目：长江学者创新团队项目资助（No.IRT1125）；国家自然科学基金资助（No.51378177，No.51420105013）；安徽理工大学青年科学研究基金（No.QN201105）。

This work was supported by the Changjiang Scholar and Innovative Research Team Project (IRT1125), the National Natural Science Foundation of China (51378177, 51420105013) and the Youth Science Fund of Anhui University of Science and Technology (QN201105).

第一作者简介：牛婷婷，女，1981 年生，博士研究生，讲师，主要从事软土地基处理方面的研究工作。E-mail: ttniu2013@163.com

1　引　言

桩网复合地基由于具有竖向沉降变形小，变形稳定时间短，施工质量易于控制，工后沉降及不均匀沉降小，造价比较低等突出优点被广泛应用到铁路、公路、建筑等领域。对于这种地基处理方法国内、外学者分别采用了理论分析[1]、数值模拟[2−4]、室内模型试验[5−7]、现场测试[8−10]等方法对其进行了大量研究。但以上研究都是基于静态路堤荷载展开的。

也有一些学者对循环荷载下桩网复合地基的动力特性进行了研究。如肖宏[11]通过在室内开展桩网结构模型试验研究，测试了循环载荷情况下的路基沉降、基床动应力、桩顶与桩间土土压力以及桩的应力、应变分布等数据；韩高孝等[12]通过模型试验发现动荷载作用下土拱效应会发生退化，表现为动荷载施加过程中先前由桩所承担的部分动应力会转移至桩间土，完成动荷载施加后，最初由桩承担的部分自重荷载也会转移至桩间土。日本的 Aoki 等[13]为了获得桩网复合地基的动态响应情况，对现场两种不同高度的桩承式路堤进行了动载试验。肖宏等[14]为考察桩网结构路基在不同列车荷载作用下的响应规律，对无砟轨道桩网结构路基进行现场动车组和货物列车试验测试。

以上这些学者对高铁循环荷载作用下桩网复合地基的动力特性做了细致的研究，得出了一些有益的结论，但是总体来说，对于桩网复合地基在高铁列车荷载作用下动力响应的研究仍然甚少，这也影响桩网复合地基理论和实践的进一步发展，阻碍桩网复合地基技术进一步推广应用。基于此，作者以现浇 X 形混凝土桩[15−16]作为竖向加强体的桩，对桩网复合地基开展高铁循环荷载作用下大比例尺模型试验，模拟高铁列车荷载作用下路堤−加筋碎石垫层−X 形桩−砂土之间的相互作用，研究 X 形桩桩网复合地基模型在高铁列车荷载作用下的动力响应特性，着重分析高速运行列车引起的振动以波的形式向外传播对周围环境的影响、地基内部振动速度响应规律以及加载频率、加载幅值及振次对 X 形桩桩网复合地基模型振动速度响应幅值的影响，为 X 形桩桩网复合地基用于高速铁路工程提供依据。

2　模型试验概况

本次桩网复合地基模型试验是在河海大学大型土工模型槽内进行，模型槽长为 5 m，宽为 4 m，高为 7 m。模型试验的几何相似比为 1:5，由于模型试验选用原型材料模拟，为与实际情况一致，加载频率、材料密度、摩擦角、应力、重力加速度的相似比均为 1，其他物理量的相似比根据 π 定理确定。模型试验系统由动力加载系统、桩网复合地基模型、监测系统组成。

2.1　加载系统

模型试验中采用液压伺服作动器模拟高速列车，以作动器输出的频率、荷载和振动次数分别模拟高铁列车速度、轴重和运营时间。作动器最大推力为 200 kN，行程为 300 mm，加载频率为 1～30 Hz。在不考虑轨道不平顺的情况下，列车运行产生的振动频率 f 是由列车轴距 L 和车速 V 共同决定，即 $f = V/L$，当列车车型固定时，频率与车速成正比。本次模型试验模拟 CRH−380 型列车，即 $L = 2.5$ m，车速与加载频率间的关系如表 1 所示。

表 1　加载频率与车速对照表

Table 1　Parallel of loading frequencies and train speeds

频率/ Hz	车速/ (km/h)	频率/ Hz	车速/ (km/h)
5	45	20	180
10	90	25	225
15	135	30	270

列车荷载采用 M 形波[17]来模拟。考虑到列车车厢的周期效应，M 形波的示意图如图 1 所示。T_1 为列车一个转向架两个轮对经过某一点的时间间隔，T_2 为相邻车厢相邻转向架经过某一点的时间间隔，T_3 为考虑一节车厢长度经过某一点时的时间间隔。

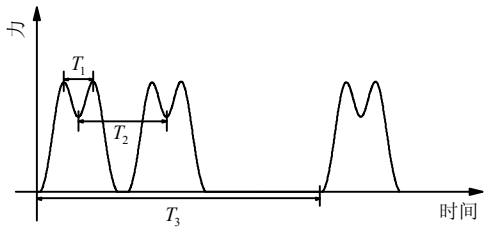


图 1　M 形波示意图

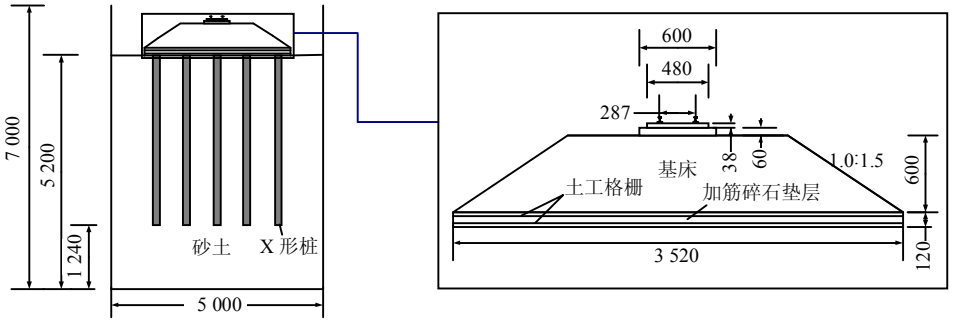
Fig.1　Schematic of M-wave

2.2　桩网复合地基模型

桩网复合地基模型试验设计断面及尺寸如图 2 所示。自下而上依次为 X 形桩加固地基、土工格栅碎石垫层、路堤、轨道系统。

2.2.1　地基土制备

地基土采用细黄砂，砂土的基本物理性质如表 2 所示。模型槽内填砂深为 5.2 m，分 22 层，除



(a) 模型横断面 (b) 路堤部分详图

图 2 桩网复合地基模型试验断面设计图（单位：mm）

Fig.2 Cross section and geometric characteristics of piled-embankment model (unit: mm)

表 2 砂土基本物理性质

Table 2 Sand properties

土粒相对密度 G_s	最大干密度 ρ_{dmax} / (g/cm^3)	最小干密度 ρ_{dmin} / (g/cm^3)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	相对密实度 D_r
2.62	1.73	1.40	6	37	0.68

上层填 25 cm，夯机压至 20 cm 外，其他层均为每层填 30 cm，夯机压实至 25 cm。每层压实后测该层的密度及含水率，计算其干密度，最终测得各层的平均干密度为 1.61 g/cm^3，相对密实度为 0.68，属于密砂。

2.2.2 现浇 X 形混凝土桩

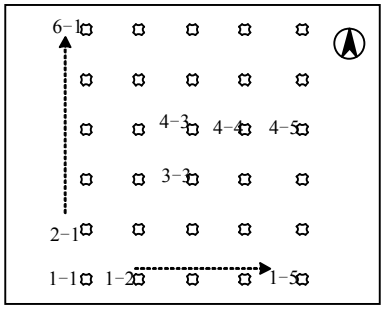
本次模型试验采用 X 形钢筋混凝土桩。桩长设计为 4.00 m，浇筑后实测平均值为 3.96 m，共浇筑 30 根。X 形桩在模型槽内布置及编号如图 3(a)所示，每排 5 跟，共计 6 排，桩间距为 0.667 m。X 形桩截面控制参数为外包圆半径 R、开弧间距 $2a$、开弧角 θ。X 形桩截面设计图如图 3(b)所示。本次模型试验，$2R$=157 mm，$2a$=39 mm，$\theta=90°$。X 形桩浇筑完成后的截面图如图 3(c)所示。

2.2.3 加筋碎石垫层

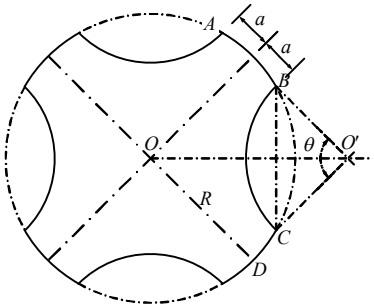
模型试验加筋碎石垫层厚 120 mm，采用碎石填筑，中间铺设 2 层双向土工格栅。碎石粒径集中在 2～10 mm 之间。土工格栅抗拉强度为 30 kN/m，网眼为 40 mm×40 mm。加筋碎石垫层的铺设顺序为先铺一层 30 mm 厚的碎石，铺第 1 层土工格栅，再铺 60 mm 的碎石垫层，铺第 2 层土工格栅，最后再铺 30 mm 厚的碎石。

2.2.4 基床

基床采用级配良好的碎石（A 组料）作为填料。本次模型试验基床厚度为 600 mm，分两层填筑，每层先铺 350 mm，用夯机压实至 300 mm。每层压实后用灌水法测其密度及含水率，并换算出干密度。



(a) X 形桩编号



(b) X 形桩截面设计

(c) 浇筑后的 X 形桩

图 3 X 形桩的平面布置及截面图

Fig.3 Arrangement and cross section of X-pile

采用重型击实试验测得 A 料的最大干密度为 2.27 g/cm^3，本次试验路堤的平均压实系数为 0.964。A 料的基本物理性质如表 3 所示。

表 3　基床用料基本物理性质

Table 3　Properties of embankment filler

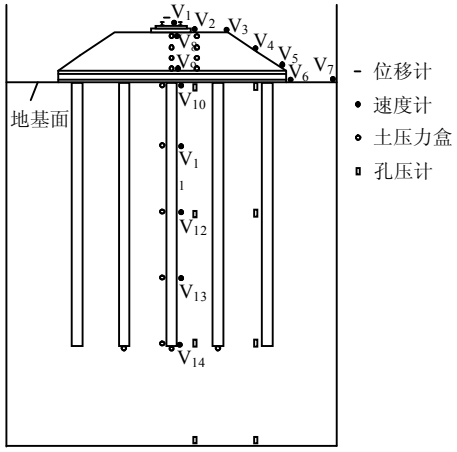
压实后密度 ρ / (g/cm^3)	含水率 / %	干密度 ρ_d / (g/cm^3)	最大干密度 ρ_{dmax} / (g/cm^3)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	压实系数 K
2.281	6.396	2.188	2.27	15	47	0.964

2.2.5 轨道系统

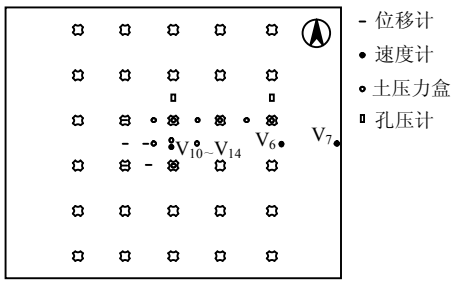
轨道系统包括钢筋混凝土底座、轨道板、轨下扣件系统和钢轨。钢筋混凝土底座厚为 6 cm、宽为 60 cm、长为 4 m；轨道板厚为 3.8 cm、宽为 48 cm、长为 4 m。轨下扣件用膨胀螺钉模拟，钢轨采用工字钢模拟。

2.3　监测系统、测试内容和测点布置

传感器主要布置在轨道纵向中间断面，即第 3、4 排桩中间，如图 4 所示。速度计共计 14 个，沿路堤断面横向布置 7 个，分别在轨道板（V_1）、混凝土底座旁（V_2）、基床表层路肩（V_3）、基床边坡中间（V_4）、边坡坡脚（V_5）、地基面坡脚（V_6）、槽壁（V_7）。沿桩网复合地基断面深度方向布置 7 个，分别在基床顶层（V_8）、基床底层（V_9）、地基面（V_{10}）、地基面向下 1 m（V_{11}）、地基面向下 2 m（V_{12}）、地基面向下 3 m（V_{13}）、地基面向下 4 m（V_{14}）。



(a) 横断面仪器布置图



(b) 地基面仪器布置图

图 4　仪器布置图

Fig.4　Layout of instruments

2.4　加载方案

如前文所述，本次模型试验用液压伺服作动器输出的荷载、频率和振动次数分别来模拟高铁列车轴重、运行速度和运行时间。以振幅为 30 kN，频率为 15 Hz，振动次数为 2×10^4 次为基准工况（可简写为 30−15−2），分别变化振幅、频率、振动次数，以此来研究这 3 个因素的变化对桩网复合地基工作性状的影响。具体加载方案如表 4 所示。

表 4　试验加载方案

Table 4　Load scheme of test

内容	变化范围
加载幅值/ kN	20、25、30、35、40
加载频率/ Hz	5、10、15、20、25、30
振次/ (10^4 次)	2

3　速度响应传播特性分析

3.1　速度响应时程分析

以基准工况 30−15−2（车速为 135 km/h）为例。高速铁路桩网复合地基模型在振动稳定后的速度响应时程曲线如图 5 所示。由图可以看出，除了槽壁（V_7）处，不管是沿路堤表面横向还是桩网复合地基内部，各测点振动速度响应 M 形均清晰可见，即由每个轮载引起的速度响应峰值均能体现，不仅如此，列车车厢的周期效应也能清晰体现。各测点振动速度均具有双向性。但在槽壁处，由于波受在传播过程中的衰减、反射等多个因素的影响，M 形已不明显。随着离开振源位置（作动器位置）距离的增加，复合地基振动速度衰减很快，如在轨道板上（V_1）速度响应幅值为 37.065 mm/s，到地基面坡脚处（V_6）为 2.118 mm/s，到槽壁处（V_7）仅为 0.002 mm/s。

3.2　速度响应幅值沿路堤横向的变化规律

振动速度响应沿路堤横向的变化规律如图 6 所示。仍以基准工况 30−15−2（车速为 135 km/h）为例，轨道板上（V_1）的速度响应幅值为 37.065 mm/s，轨道板旁（V_2）速度响应幅值为 23.377 mm/s，路肩处（V_3）速度响应幅值为 5.104 mm/s，边坡中间处（V_4）速度响应幅值为 4.406 mm/s，边坡坡脚处（V_5）速度响应幅值 2.832 mm/s，最后到紧邻边坡的地基面处（V_6）速度响应幅值为 2.118 mm/s，槽壁处（V_7）速度响应幅值为 0.002 mm/s。

由此可以看出，速度响应幅值沿路堤横向呈快速衰减趋势，且加载频率越大，振动速度衰减越快，如在加载频率为 30 Hz 时（车速为 270 km/h），轨道板上（V_1）振动速度响应幅值为 80.816 mm/s，在

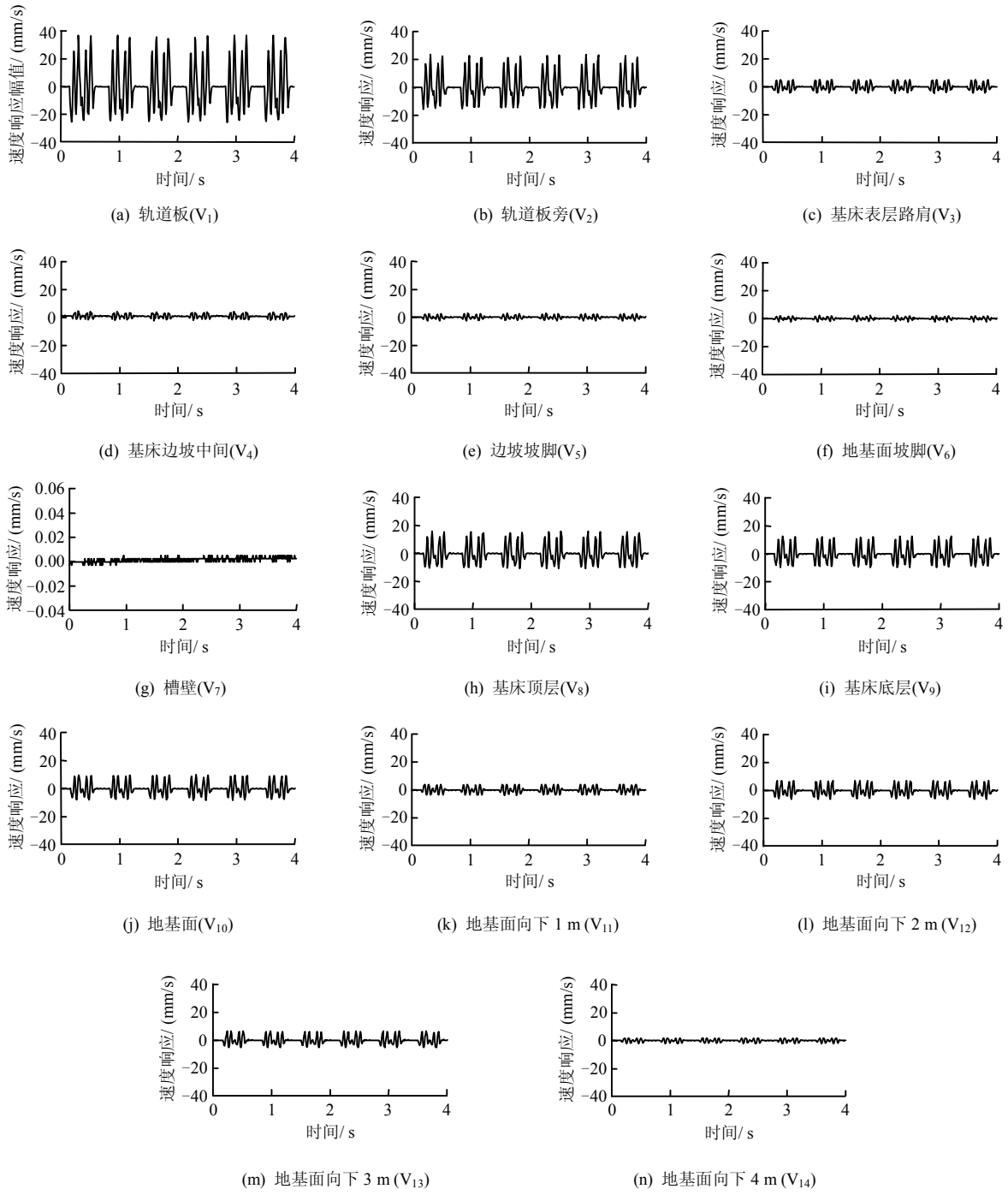


图 5 V_1～V_{14} 速度响应时程曲线

Fig.5 Time histories of vibration velocities at different locations V_1−V_{14}

槽壁处（V_7）速度响应幅值也仍然较低，只有 0.005 mm/s。这说明，铁路路堤能够消耗掉由于列车运动产生的大部分能量，这使得高速列车即使以较大速度运行，对周边环境的影响也很小。对此，文献[18]认为铁路路堤就像一个“波导管”，波动能量沿着路堤这个“波导管”传播,但不会影响“波导管”以外的区域，且这个“波导管”与通常意义上的传播光、声信号的波导管不同，它能够消耗能量。

文献[19]在京沪高铁沿线上采用CRH−3型动车组进行现场测试，在距离轨道中心 1.5 m 的钢筋混凝土底座上，当车速为 144、256、316 km/h 时，振动速度响应分为 4.0、6.0、7.5 mm/s，而本次模型试验，当加载频率为 15 Hz（车速 135 km/h），轴力为 30 kN 标准工况下，在距离轨道中心 1.31 m 的边坡中间处（V_4），速度响应幅值为 4.406 mm/s。CHR−3型列车单个轮载重为 75 kN，依据π定理将本次模型试验的加载轴力和速度响应值还原为 1:1 模型，

分别为 750 kN 和 22.03 mm/s，再把轮载按线性关系统一到 75 kN，则在距离轨道中心 1.31 m 的边坡中间处（V4）的值为 2.203 mm/s。由此也可以看出，本次模型测试结果较为合理，测试结果可以为桩网复合地基用于高速铁路路基这一工程实践提供依据。

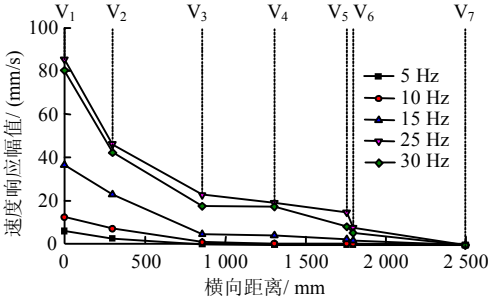


图 6　速度响应幅值沿路堤横向衰减图

Fig.6　Attenuation of vibration velocities along embankment transverse

3.3　速度响应幅值沿桩网复合地基深度方向的变化规律

速度响应沿桩网复合地基深度方向的变化规律如图 7 所示。以基准工况 30−15−2（车速为 135 km/h）为例，轨道板上（V_1）速度响应幅值为 37.065 mm/s，基床表层（V_8）速度响应幅值为 15.764 mm/s，基床底层（V_9）速度响应幅值为 12.638 mm/s，地基面处（V_{10}）速度响应幅值为 9.732 mm/s，速度响应幅值在地基面下 1 m 处（V_{11}）为 3.956 mm/s，而到地基面下 2 m 处（V_{12}）为 7.378 mm/s，地基面下 3 m 处（V_{13}）为 6.442 mm/s，到地基面下 4 m 处（V_{14}）为 1.829 mm/s。

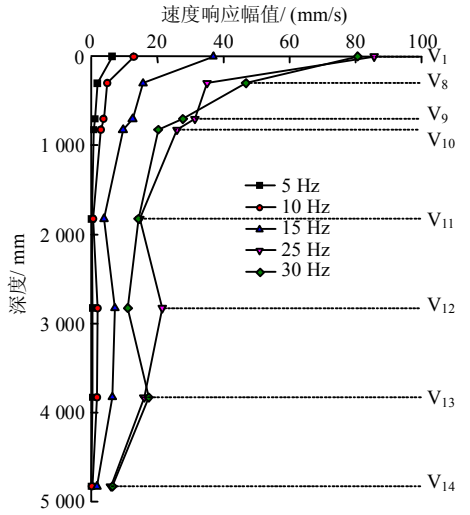


图 7　速度响应幅值沿复合地基深度方向衰减图

Fig.7　Attenuation of vibration velocities along piled-embankment depth

由此可以看出轨道板上（V_1）处的速度响应幅值经过轨道板、钢筋混凝土底座到基床表层处（V_8），减少了 57.47%，衰减较多。且由图 7 可知，不管加载频率是大还是小，每条曲线上由轨道板、钢筋混凝土底座到基床表层处速度响应幅值衰减均较大，即由 V_1 到 V_8 的斜率最大。这可能是由于轨道板及钢筋混凝土底座能量吸收系数较大的缘故。由图 7 还可看出，从 5 Hz 到 30 Hz，由 V_1 到 V_8 的斜率逐渐增大，即加载频率越大，振幅衰减越快。这说明在几何尺寸相同情况下，速度响应幅值的衰减不仅与介质的能量吸收系数有关还与加载的频率有关。这点也印证了波动理论的有关知识[20]，即在距振源 r 处的振幅 A_r 为

$$A_r = A_0\sqrt{\frac{r_0}{r}[1-\xi(1-\frac{r_0}{r})]}\,e^{-a_0 f_0(r-r_0)} \qquad (1)$$

式中：A_0 为振源处的振幅；ξ 为与振源面积有关的几何衰减系数；r 为距振源的距离；a_0 为能量吸收系数；f_0 为振源频率；r_0 为振源的当量半径。

对比从基床表层（V_8）到基床底层（V_9）再到地基面处（V_{10}）的速度响应幅值，不难发现，虽然加筋碎石垫层厚度只有基床厚度的 1/5，但对振动速度的衰减能力却与基床相当。若比较单位厚度的振动速度衰减能力，加筋垫层是基床的 5 倍，在图 7 中表现为 V_9 到 V_{10} 的斜率远大于 V_8 到 V_9 的斜率。这说明加筋碎石垫层对振动能量吸收的能力远大于基床，加筋碎石垫层相当于一个隔震垫层。从地基面沿桩间土向下 V_{10} 至 V_{14} 处速度响应幅值衰减变缓，即从 V_{10} 到 V_{14} 斜率变得非常平缓，且加载频率越小，斜率越平缓，衰减越慢。

文献[21]采用加载频率为 4 Hz、加载轴力为 380 kN 的循环加载方案在 1:1 的足尺模型上测试了有 砟轨道路基（地下无桩）的速度响应，得出基床表层处地下水位上升环境下速度响应幅值为 11.57 mm/s；基床表层向下 2 m 处在地下水位上升环境下的速度响应幅值约为 1.7 mm/s。本次模型试验在加载频率为 5 Hz，轴力为 30 kN 的情况下，基床表层的振动速度响应幅值为 2.006 mm/s，地基面处为 0.916 mm/s，地基面向下 4 m 处的速度响应幅值为 0.165 mm/s。依据 π 定理将本次模型试验的加载轴力和速度响应值还原为 1:1 模型，分别为 750 kN 和 10.030、4.580、0.852 mm/s，再把轮载按线性关系统一到 380 kN，则基床表层的振动速度响应幅值为 5.081 mm/s，地基面处为 2.321 mm/s，地

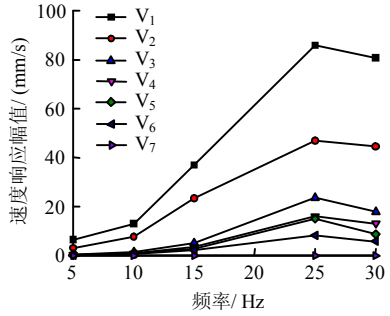
基面向下 20 m 处的速度响应幅值为 0.418 mm/s。由此可以得出文献[21]中速度响应幅值的衰减速度远大于本次模型试验，这说明桩网复合地基中桩的存在，使振动衰减变得缓慢，使由列车运行引起振动的影响深度加大。

从以上的分析可知，桩网复合地基体系中的路堤−加筋碎石垫层−X 形桩−砂土之间的相互作用，使得其与横向振动传播规律不同。轨道板与钢筋混凝土底座因其能量吸收系数较大，速度响应幅值衰减最快。加筋碎石垫层对速度响应幅值衰减能力仅次于轨道板和钢筋混凝土底座，相当于一个隔震垫层。但是桩的存在使振动衰减变得缓慢，使由列车运行引起振动影响深度加大。

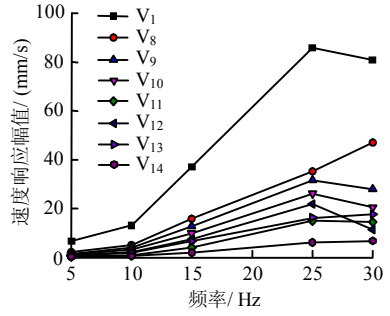
4 速度响应的影响因素分析

4.1 速度响应幅值随加载频率（车速）的变化规律

为研究加载频率对振动速度响应的影响，保持加载幅值为 30 kN、振次为 2×10^4 次不变，只改变加载频率。由图 8 可知，不管是沿桩网复合地基深度方向还是横向，随着加载频率的增大，各测点的速度响应幅值都在增大，当加载频率较低时，如从 5 Hz 到 10 Hz，各测点的振动速度响应幅值增长较慢，从 10 Hz 到 25 Hz 振动速度响应幅值以较大的幅度增长，到 30 Hz 时大部分测点又有所下降，除了基床表层和地基面向下 1 m 处外，其他测点均在 25 Hz 时出现了峰值。这可能是因为当加载频率为 25 Hz（车速为 225 km/h）左右时，对于该桩网复合地基模型系统来说达到了临界速度的缘故。当车速达到临界速度时，路基振动显著，轨道路基系统会出现类共振现象[22]。



(a) 沿路堤横向的速度响应幅值随加载频率变化图

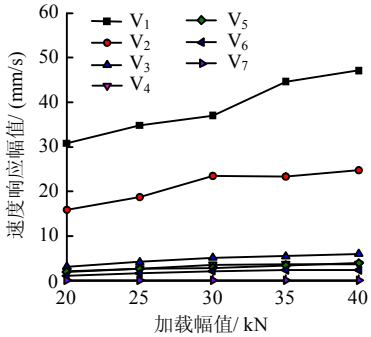


(b) 沿复合地基深度方向的速度响应幅值随加载频率变化图

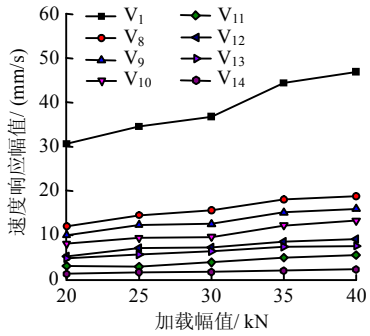
图 8 速度响应幅值随加载频率（车速）变化图
Fig.8 Vibration velocities amplitude versus loading frequencies(train speeds)

4.2 速度响应幅值随加载幅值（轴重）的变化规律

为研究加载幅值对振动速度响应的影响，保持加载频率为 15 Hz、振次为 2×10^4 次不变，只改变加载幅值。由图 9 可知，不管是沿桩网复合地基深度方向还是横向，各测点的振动响应幅值随加载幅值的增大，逐步单调增加。在距离振源较近的测点处，如轨道板和轨道板旁，速度响应幅值增幅较大，在距离振源较远处速度响应幅值增幅较小。



(a) 沿路堤横向的速度响应幅值随加载幅值变化图

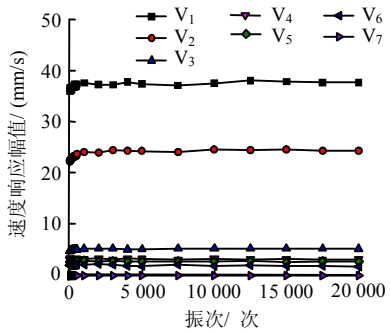


(b) 沿复合地基深度方向的速度响应幅值随加载幅值变化图

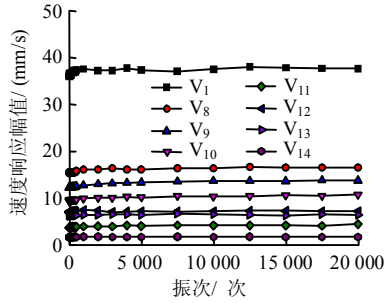
图 9 速度响应幅值随加载幅值（轴重）变化图
Fig.9 Vibration velocities amplitude versus loading amplitudes(wheel axis weight)

4.3 速度响应幅值随振次（运营时间）的变化规律

为研究振次对振动速度响应的影响，保持加载幅值为 30 kN、加载频率为 15 Hz 不变，只改变振动次数。由图 10 可以看出，不管是沿桩网复合地基深度方向还是横向，各测点的速度响应幅值随振次的增加基本保持不变。只是在振动开始时有小幅变动，随着振动的稳定，速度响应幅值几乎不变。



(a) 沿路堤横向的速度响应幅值随振次变化图



(b) 沿复合地基深度方向的速度响应幅值随振次变化图

图 10　速度响应幅值随振次（运营时间）变化图

Fig.10　Vibration velocities amplitude versus cyclic loading times (train running time)

5　结　论

（1）列车经过时路基的振动响应能够清晰反映出轮轴重力产生的峰值及列车车厢的周期效应。

（2）速度响应幅值沿着路堤横向衰减很快，路堤耗能作用显著。列车即使以较高的速度运行，由其产生的振动能量经过路堤耗散，对周边环境影响也很小。

（3）速度响应幅值沿桩网复合地基深度方向的衰减规律因轨道板–路堤–加筋碎石垫层–X 形桩–砂土之间的相互作用，使得其与路堤横向振动传播规律不同。轨道板与钢筋混凝土底座因其能量吸收系数较大，速度响应幅值衰减最快。碎石垫层中由于格栅的存在使其对速度响应幅值衰减能力仅次于轨道板和钢筋混凝土底座，相当于一个隔震垫层。但是桩的存在使振动衰减变得缓慢，使由列车运行引起振动影响深度加大。

（4）各测点速度响应幅值随着加载频率的增加逐渐增大，大部分测点在加载频率为 25 Hz（车速为 225 km/h）时出现峰值，这可能是由于高速列车车速达到了临界速度的缘故。当车速达到临界速度时，列车、轨道、路基都会剧烈振动，出现类共振现象，这种现象对列车、轨道、路基损害巨大，在高速铁路设计时，通过改变路基刚度应尽量避免。各测点速度响应幅值随着加载幅值的增加而单调增加。各测点速度响应幅值随着振次的增加只在振动开始时有小幅变动，振动稳定后基本保持不变。

参 考 文 献

[1] 陈云敏, 贾宁, 陈仁朋. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 1－6.
CHEN Yun-min, JIA Ning, CHEN Ren-peng. Soil arch analysis of pile-supported embankments[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(4): 1－6.

[2] ZHUANG Y, ELLIS E. Finite-element analysis of a piled embankment with reinforcement compared with BS 8006 predictions[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(11): 910－917.

[3] 芮瑞, 夏元友. 桩–网复合地基与桩承式路堤的对比数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 769－772.
RUI Rui, XIA Yuan-you. Numerical simulation and comparison of pile-net composite foundation with pile-supported embankment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 769－772.

[4] 陈仁朋, 贾宁, 陈云敏. 桩承式加筋路堤受力机理及沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4358－4367.
CHEN Ren-peng, JIA Ning, CHEN Yun-min. Mechanism and settlement analysis of pile-supported and geogrid-reinforced embankments[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4358－4367.

[5] 芮瑞, 黄成, 夏元友, 等. 砂填料桩承式路堤土拱效应模型试验[J]. 岩土工程学报 2013, 35(11): 2082－2089.
RUI Rui, HUANG Cheng, XIA Yuan-you, et al. Model tests on soil arching effects of piled embankments with sand fills[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(11): 2082－2089.

[6] 费康, 陈毅, 王军军. 加筋形式对桩承式路堤工作性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2312－2317.
FEI Kang, CHEN Yi, WANG Jun-jun. Experimental study on influence of reinforcing modes on behavior of piled embankment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(12): 2312－2317.

[7] VAN EEKELEN SUZANNE J M, BEZUIJEN ADAM, LODDER H J, et al. Model experiments on piled

embankments. Part I[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2012, 32(1): 69－81.

[8] BRIANÇON L, SIMON B. Performance of pile-supported embankment over soft soil: full-scale experiment[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(4): 551－561.

[9] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M, et al. Field tests on pile-supported embankments over soft ground[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(6): 777－785.

[10] LIU H L, NG CHARLES W W, FEI K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(12): 1483－1493.

[11] 肖宏. 高速铁路无碴轨道桩网结构路基研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2007.
XIAO Hong. Study on column-net structure embankments of high speed railway ballastless track[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2007.

[12] 韩高孝, 宫全美, 周顺华. 列车动荷载下桩网结构路基土拱效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1600－1606.
HAN Gao-xiao, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Experimental study of soil arching effect in geogrid reinforced pile supported embankment under train dynamic load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(6): 1600－1606.

[13] AOKI H, NISHIOKA H, TATEYAMA M, et al. Field test of embankment constructed by column-net method[J]. **Geosynthetics**, 2006, (1-4): 1011－1014.

[14] 肖宏, 蒋关鲁, 魏永幸. 遂渝线无砟轨道桩网结构路基现场动车试验测试分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 79－84.
XIAO Hong, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing. Dynamic test analysis on ballastless-track column-net structure subgrade of the suining-chongqing railway line[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2010, 32(1): 79－84.

[15] LIU Han-long, ZHOU Hang, KONG Gang-qiang. XCC pile installation effect in soft soil ground: a simplified analytical model[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 62: 268－282.

[16] 刘汉龙, 金辉, 丁选明, 等. 现浇 X 形混凝土桩沉桩挤土效应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 219－228
LIU Han-long, JIN Hui, DING Xuan-ming, et al. Field test research on squeezing effects of X-section cast-in-place concrete pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.2): 219－228.

[17] 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.

[18] KRYLOV VICTOR V. Generation of ground vibrations by superfast trains[J]. **Applied Acoustics**, 1995, 44(2): 149－164.

[19] BIAN Xue-cheng, JIANG Hong-guang, CHANG Chao, et al. Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2015, 76: 29－43.

[20] 谢定义. 土动力学[M]. 西安交通大学出版社, 1988.
XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.

[21] 杨果林, 王亮亮, 杨啸. 不同服役环境下高速铁路膨胀土路堑基床振动特性模型试验[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 133－138.
YANG Guo-lin, WANG Liang-liang, YANG Xiao. Model tests on vibration characteristics of cutting subgrade of expansive soil of express railways under different service environments[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(1): 133－138.

[22] THACH PHAM-NGOC, LIU HANLONG, KONG GANGQIANG. Vibration analysis of pile-supported embankments under high-speed train passage[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2013, 55(6): 92－99.