

严武建,张航,郑海忠,等.基于桥墩基础场地土体参数的高速列车振动敏感性分析[J].地震工程学报,2022,44(6):1357-1365.
DOI:10.20000/j.1000-0844.2020120103
YAN Wujian,ZHANG Hang,ZHENG Haizhong,et al.Vibration sensitivity analysis of high-speed trains based on soil parameters of pier foundation sites[J].China Earthquake Engineering Journal,2022,44(6):1357-1365.DOI:10.20000/j.1000-0844.2020120103

基于桥墩基础场地土体参数的高速列车振动敏感性分析

严武建^{1,2},张航³,郑海忠²,车爱兰⁴,王平²,田欣欣²

- (1. 中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730000;
3. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院,黑龙江 哈尔滨 150030;
4. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘要:桥墩侧堆积填土及其物理力学和几何参数对列车振动传播的有重要影响。本文以哈大高铁的铁岭—四平段某桥墩及右侧堆积填土和基础场地为研究对象,建立有限元模型,同时定义“振动变化有效值”,并结合灰色关联度理论,利用现场实测和数值模拟方法揭示桥墩侧堆积填土及其参数对振动传播的影响规律。通过研究分析主要得到以下结论:(1)桥墩顶端支撑垫石的振动特性与堆积填土和基础场地的振动特性具有不同的性质,堆积填土和基础场地对列车振动有明显的放大效应;(2)堆积填土侧的振动加速度级要大于未填土侧的,且在堆积填土的边界位置会出现反弹现象;(3)堆积填土侧的振动加速度级随着堆积填土弹性模量的增大而增大,其密度和泊松比对振动传播几乎没有影响;在距桥墩1 m之内,随着阻尼比的增加堆积填土侧的振动加速度级增大,当大于1 m时,随着阻尼比的增大而其振动加速度级减小;(4)随着堆积填土长度的增加振动加速度级增大,而堆积填土高度变化的范围内,存在一个最优值,使得堆积填土侧的振动加速度级最小,同时,桥墩侧堆积填土的各个参数对地面振动的敏感性大小为:弹性模量>长度>阻尼比>高度>密度>泊松比。

关键词:哈大高铁;堆积填土;桥墩;灰色关联度;敏感性

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)06-1357-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.2020120103

Vibration sensitivity analysis of high-speed trains based on soil parameters of pier foundation sites

YAN Wujian^{1,2}, ZHANG Hang³, ZHENG Haizhong², CHE Ailan⁴, WANG Ping², TIAN Xinxin²

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of CEA & Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150030, Heilongjiang, China;

4 School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The alluvial filling soil on the side of bridge piers and its physical, mechanical, and geometric pa-

收稿日期:2022-12-01

基金项目:国家电网有限公司科技项目“极寒地区输变电设施冻土基础韧性提升关键技术研发及应用”(5200-202230098A-1-1-ZN)

第一作者简介:严武建(1980—),男,江西鹰潭人,博士,副研究员,硕士研究生导师,主要从事岩土地震工程与有限元模拟等方面的研究。E-mail:yanwj1980@126.com。

rameters have important effects on train vibration propagation. Taking a pier and its adjacent alluvial filling soil and foundation site along the Tieling—Siping section of the Harbin—Dalian high-speed railway as the research object in this study, a finite element model was established, and the “effective value of vibration change” was defined. Combined with the theory of gray relational degree, the field measurement and numerical simulation method were used to reveal the influence of the alluvial filling soil and its parameters on vibration propagation. The following conclusions are obtained through the analysis. (1) Vibration characteristics of the supporting pad stone at the top of the pier are different from those of alluvial filling soil and the foundation site, which have amplification effects on the train vibration. (2) The vibration acceleration level of the alluvial filling side is larger than that of the unfilled side, and a rebound phenomenon will be observed at the boundary position of the alluvial filling soil. (3) The vibration acceleration level increases with the elastic modulus of alluvial filling soil, and its density and Poisson's ratio hardly affect the vibration propagation. Within 1 m from the pier, the vibration acceleration level increases with the damping ratio; when the distance is larger than 1 m, this level decreases with the increase in the damping ratio. (4) The vibration acceleration level increases with the length of the alluvial filling soil, and its height demonstrates an optimum value, which minimizes the vibration acceleration level on the side of the alluvial filling soil. Meanwhile, the sensitivity of each parameter of alluvial filling soil on the pier side to the ground vibration is in this order: elastic modulus>length>damping ratio>height>density>Poisson's ratio.

Keywords: Harbin—Dalian high-speed railway; alluvial filling soil; pier; gray correlation degree; sensitivity

0 引言

铁路是国家发展的重要基础设施,对社会的发展和国民经济的提高有着重要的意义。根据我国铁路网建设的规划,到 2020 年我国高铁运行里程将达到 30 000 km^[1]。特别是近几年来高速铁路的发展,一方面使得人们出行更加便利、安全和舒适;另一方面使得环境振动问题日益突出。而哈大高速铁路是目前我国在最北端建设的一条标准最高的铁路,该线路位于季节性冻土区,由于长期受到冻融循环作用和列车的高速运行,使得该铁路沿线沉降和病害等问题更加突出,甚至影响列车的正常和安全运行。

目前,国内外学者对列车荷载作用下路基、桥梁和隧道等结构的动力响应进行了大量的研究。翟婉明和韩海燕^[2]建立了车辆轨道-耦合动力学模型,分析了高速列车在软土地基线路上运行时引起的地面振动特性,并讨论了水泥土搅拌桩加固对地面振动的影响。孟祥连和周福军^[3]基于西宝高铁对黄土地区的路基的振动特性进行了实测,从时域和频域两方面研究了振动沿地表和地下深度的振动特性。申权等^[4]利用数值模拟并结合实验对新型路堑结构在高速列车荷载作用下的振动特性进行了分析。马骅骅等^[5]利用现场实测和数值模拟对宝兰高铁沿线某路堤段地面的振动特性进行了分析。董连成等^[6]对多年冻土区青藏铁路路基在客运和货运列车荷载作

用下的振动特性进行了对比分析。杨文波等^[7]采用模型试验和数值模拟相结合的方法对马蹄形断面隧道在列车荷载下的振动特性进行了研究。张良涛^[8]利用现场测试分析了高架铁路的振动特性,并结合数值模拟讨论了相应的防振方法。王子玉等^[9]为季节性冻土区路基在列车荷载作用下的振动特性,分别在冻结季、春融季和正常季进行现场测试与分析。Sheng 等^[10-11]研究了轨道临界速度、分层地基中移动荷载引起的土体动力响应特点以及与土体 Rayleigh 波速的相互关系。Connolly D 等^[12]建立了三维数值计算模型,研究了软土路堤对列车振动的特性,发现软土路堤会使得周围土体的振动放大。

由于我国地形地貌复杂多样和保护一些特殊建筑等而采用了“以桥代路”的工程,所以使得大量的高速列车高架桥建成。但目前对桥墩顶部及不同基础场地在高速列车荷载作用下的振动特性研究较少,特别是在季节性冻土区对桥墩和基础场地的研究更是鲜有。因此,本文选取哈大高速铁路铁岭—四平段某桥墩和不同基础场地进行现场测试并分析其振动特性,并建立相应的桥墩—基础场地有限元数值模型,同时将测得的桥墩顶端的加速度时程曲线作为数值模型桥墩顶端的加速度边界条件,研究桥墩旁边堆积填土的几何和物理力学参数对振动的影响。开展在高速列车荷载作用下季节性冻土区桥

墩及不同基础的振动特性,以及土体不同几何和物理力学参数对振动影响的研究,对我国寒区高速铁路的建设以及减振隔振有重要的意义。

1 现场测试

1.1 现场测试概况

哈大高速铁路全长 921 km,设计运行速度可达 350 km/h,位于我国东北季节性冻土区,该地区冬季气候非常严寒,沿线土体的最大冻结深度可达到 2 m 左右,且降雨量较大。该地区土体每年从 10 月底开始冻结,到次年 4—5 月才完全融化,且该地区地下水资源丰富,埋深较浅,该地区大部分土质属于冻胀敏感性土^[13]。由于铁路沿线经常受到冻融循环的影响,为沿线铁路路基桥墩等病害的产生提供了条件。

为了研究桥墩和不同基础场地的振动特性,选取哈大高铁的铁岭—四平段某桥墩及基础场地为研究对象,该桥墩两侧具有不同的场地条件,其中桥墩左侧为黄色粉质黏土地,右侧为堆积填土,其高度为 1.8 m。在 10 月份土体未冻结之前利用中国地震局工程力学研究所研制的 891-II 型测振仪进行了现场测试。同时,布置了 4 个测点,测点 1 布置在

桥墩左侧的黄色粉质黏土路基上,距桥墩 0.5 m,测点 2 布置在桥墩右侧的堆积填土上,距桥墩 0.1 m,测点 3 和 4 布置在桥墩顶端的支撑垫石上。并规定 X 方向为列车运行方向,垂直列车运行方向为 Y,竖直方向为 Z 方向,如图 1 所示。

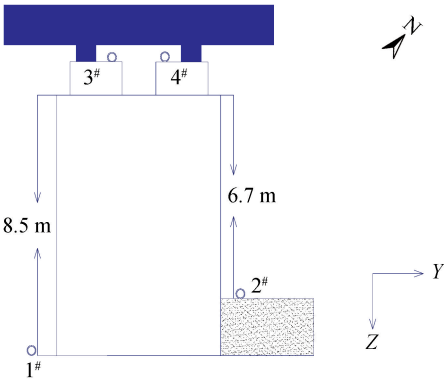


图 1 测点布置图

Fig.1 Layout of measuring points

1.2 现场测试结果

CRH2C 型列车以速度为 262 km/h,车厢编组为 8 节通过时,记录到了不同测点的 Z 方向加速度时程曲线,如图 2 所示。测试结果表明,列车通过时

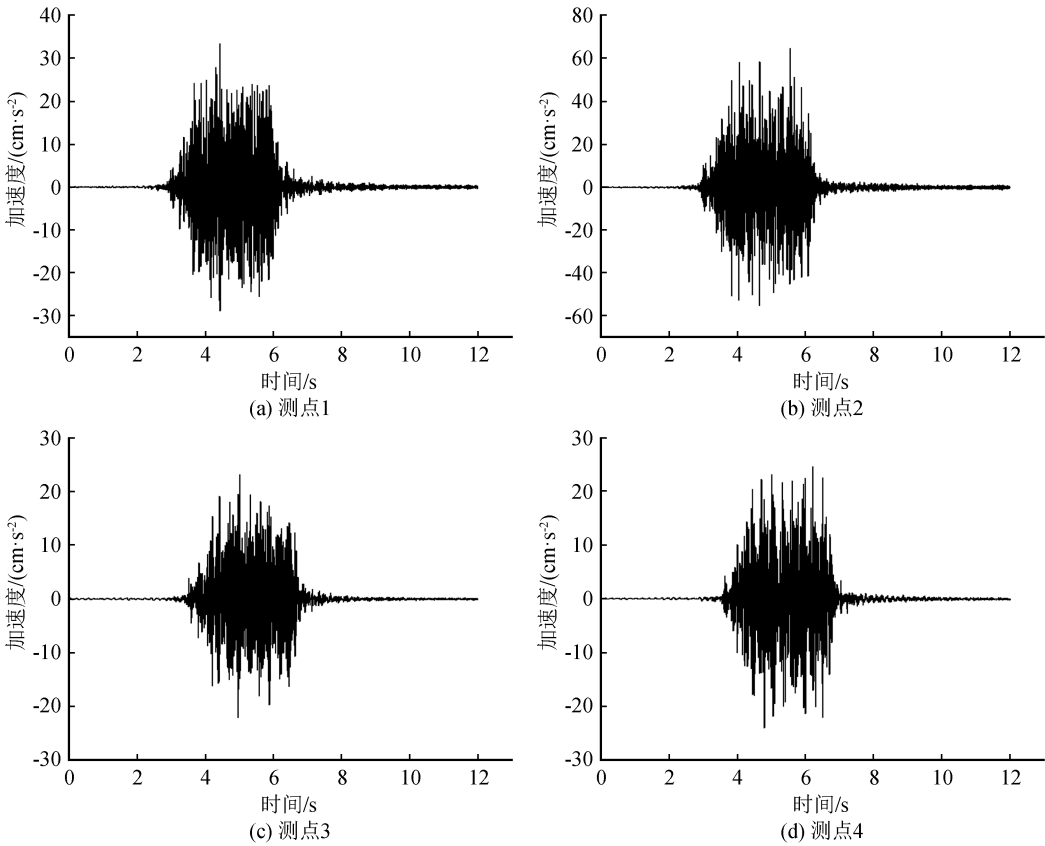


图 2 不同测点的 Z 方向加速度时程曲线

Fig.2 Z-direction acceleration time history curves of different measuring points

各测点的振动持时基本一致,随着列车通过该测试桥墩,各测点振动加速度呈现出由单个转向架引起的峰值周期性,桥墩顶端测点 3 和 4 的加速度时程具有较好的正负对称性,且正负峰值基本相等,而位于不同基础的测点 1 和 2 的明显不具有正负对称性,且正负峰值相差较大;测点 1~4 的 Z 方向峰值加速度峰值分别为 $33.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $64.6\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $23.1\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 $24.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$,显然基础场地振动峰值加速度大于桥墩顶端的,且桥墩左右两侧基础场地对振动的放大效应明显不同。

为了进一步分析桥墩及不同基础场地的振动特性,对各测点的加速度时程曲线进行傅里叶变换,得到各测点的频谱曲线,如图 3 所示。频谱分析表明,在列车经过该桥墩时,引起的振动频率主要集中在 $10\sim 80\text{ Hz}$,测点 1、3 和 4 的主频在 40 Hz 左右,测点 2 的主频在 70 Hz 左右,且在 $0\sim 20\text{ Hz}$ 基本无振动分量;四个测点 Z 方向加速度频谱曲线的峰值分别为: $13.1\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $22.4\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $10.8\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 $10.1\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$,显然基础场地的频谱峰值要大于桥墩顶端的,且堆积填土上的最大。

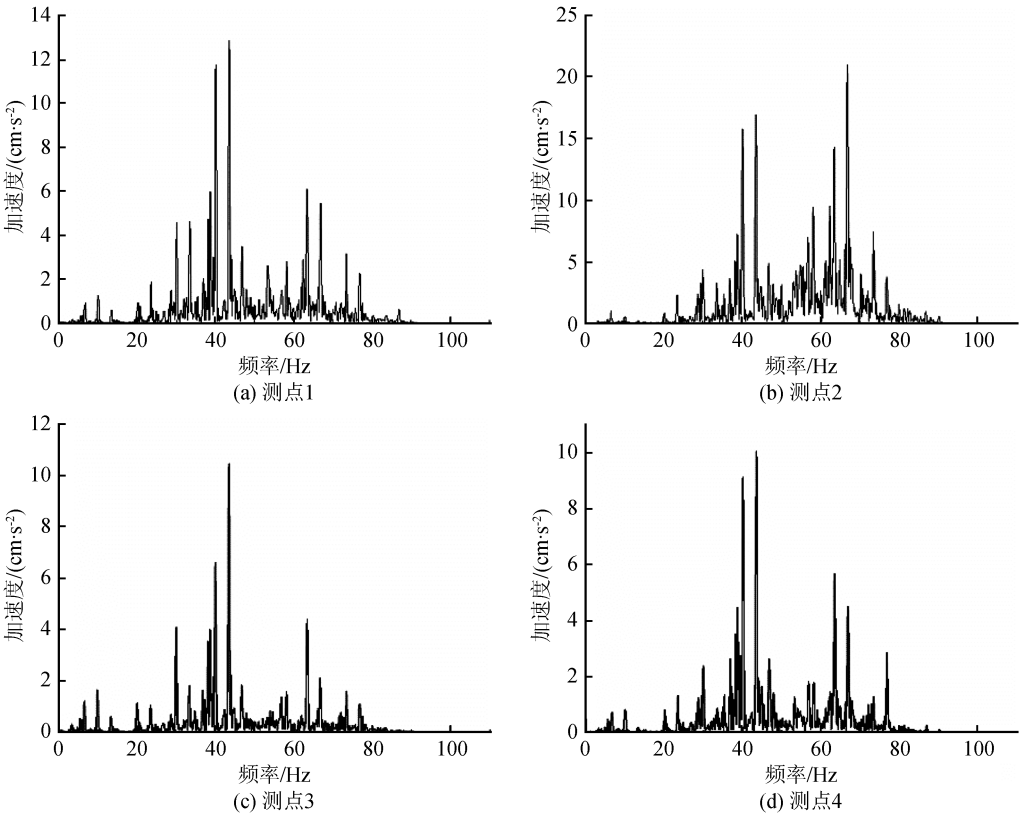


图 3 不同测点的频谱曲线

Fig.3 Spectrum curves of different measuring points

通过上述对不同测点的加速度时程曲线以及频谱曲线的分析,可得出在高速列车荷载作用下桥墩顶端和基础场地的振动特性完全不同,基础场地对振动有明显的放大的效应,且不同的基础场地对振动也有着明显的差异。

2 数值分析

2.1 数值计算模型

为了研究在高速列车荷载作用下桥墩旁边堆积填土的几何和物理力学参数对振动特性的影响,以哈大高速铁路铁岭—四平段某桥墩及不同基础场地

为研究对象,利用 ABAQUS 建立简化的二维有限元数值模型。模型主要分为三部分,第一部分为地基土体,土体从下到上依次为 9 m 厚的黏土, 13 m 厚的粉质黏土和 2 m 厚的黄色粉质黏土;桥墩高为 10.5 m ,有 2 m 埋入土体中,截面长度为 4 m ,采用钻孔灌注桩基础,2 根桩,桩长为 8 m ,截面直径为 1 m ;第二部分为桥墩;第三部分为桥墩旁边堆积填土,如图 4 所示,其堆积填土的几何参数变化范围为:高为 $0.8\sim 3.8\text{ m}$,长为 $1\sim 6\text{ m}$,其物理力学参数变化范围如表 1 所列。桥墩和土体采用平面应变 CPE4R 单元,为了防止边界对波的反射作用,模型

左右两边边界采用无限单元,模型底部完全固定,在桥墩两侧,土体单元网格划分较密集,模型中最大网格尺寸为 1 m×1 m,依据有限元网格尺寸要求^[14]可知,满足模型计算精度的要求。同时,为了研究在高速列车荷载作用下桥墩两侧振动沿地表的衰减特性,在数值模型中桥墩两侧各布置 9 个测点,分别距桥墩为 0 m、1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、7 m、10 m 和 14 m,如图 5 所示。

2.2 数值计算参数

为了提高数值模型的科学性和准确性,将实测结果与数值分析相结合,把桥墩顶端实测的加速度时程曲线作为有限元数值模型了加速度边界。在模

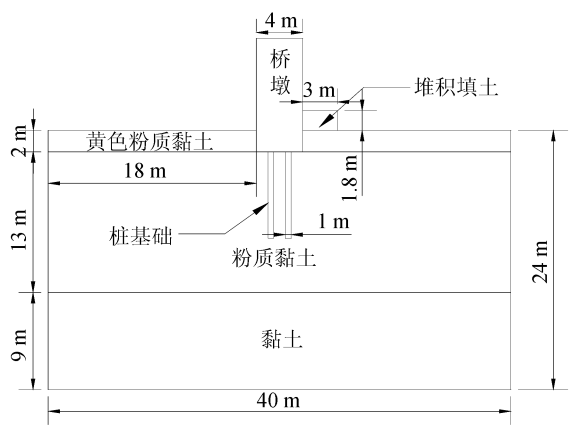


图 4 模型示意图

Fig.4 Model diagram

表 1 测试区土体的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil in the test area

名称	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	阻尼比 ξ
人工填土	1 870~2 270	30~150	0.2~0.4	28.5	17	0.01~0.05
黄色粉质黏土	1 900	33	0.3	29.2	17.1	0.02
粉质黏土	1 960	35	0.3	30.5	17.1	0.02
黏土	2 000	40	0.3	30.1	22.1	0.02

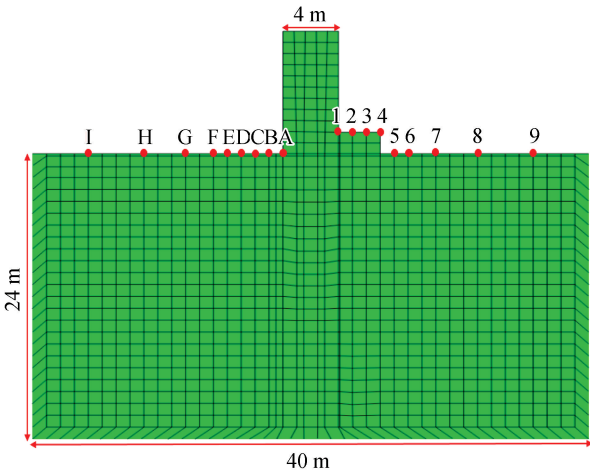


图 5 有限元网格划分及测点布置

Fig.5 Division of finite element mesh and layout of measuring points

型计算时,假设土体的材料为理想弹塑性,其破坏准则为摩尔库伦准则,根据哈大高铁地质勘查报告和哈大高铁沿线的相关研究^[15]可知,土体的力学参数如表 1 所列。桥墩和桩基础采用 C30 混凝土,假设桥墩和桩基础为理想弹性材料,考虑到钢筋的作用,将其力学参数进行适当的提高,取其弹性模量为 35 GPa,泊松比为 0.2,密度为 3 000 kg·m⁻³。

2.3 数值计算结果

图 6 是数值模型中距桥墩右侧堆积填土上 0.1 m 处测点的加速度时程曲线。从图中可以看出,该处的加速度峰值为 67.1 cm·s⁻²,其不具有正负

对称性,与实测点 2 的加速度时程曲线基本一致,说明所数值模型的正确性和可行性。

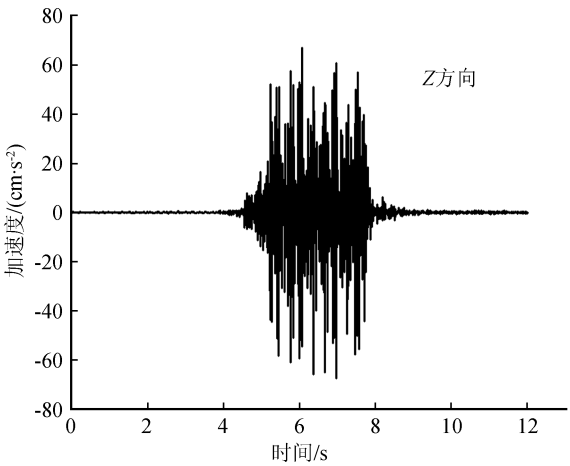


图 6 堆积填土侧距桥墩 0.1 m 处数值计算加速度时程曲线

Fig.6 Acceleration time history curve of deposited soil within 1 m from the pier

根据《城市区域环境振动测量方法》^[16],可以利用振动加速度级 VAL(dB)来描述由列车运行而引起的环境振动的类型和强度等特性,其定义如下:

$$VAL = 20 \lg \frac{a}{a_0}$$

(1)

$$a = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2}$$

(2)

式中: a 为振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 为振动基准加速度有效值, 其值是 $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; n 为采样点个数。

图 7 是桥墩旁边有无堆积填土振动特性的影响。从图中可以看出, 振动加速度级随距离的增加而衰减, 在 $0 \sim 2 \text{ m}$ 内, 加速度振级衰减较快, 而在 2 m 以后衰减变换, 但在堆积填土侧, 由于堆积填土的边界及其土体性质的影响使得在其上的振动加速度级明显大于未堆积填土侧的, 甚至在堆积填土的边界位置, 即距桥墩 3 m 处出现了反弹现象, 同时在 14 m 处也略有增大现象。

2.3.1 堆积填土的物理力学参数对振动的影响

图 8 为桥墩旁边堆积填土的物理力学性质对列车振动传播的影响。通过对比分析得出, 堆积填土的物理力学参数的变化, 对桥墩底端 $R=0 \text{ m}$ 处的振动基本没有影响; 当 $0 < R < 5 \text{ m}$ 时, 存在着较明显的影响作用。在距桥墩 5 m 之内, 堆积填土的弹性模量越大, 其振动加速度也越大, 同时随着弹性模量的增大, 在堆积填土边界上, 即 $R=3 \text{ m}$ 处的反弹

现象逐渐消失; 堆积填土的泊松比和密度的变化对振动加速度级基本没有影响; 在距桥墩 1 m 内, 随着堆积填土阻尼比的增加, 其上的振动加速度级也增加, 当距离大于 1 m 时, 随着阻尼比的增加, 振动加速度级减小, 且阻尼比越小, 振动加速度级在堆积填土边界的反弹效应越明显。

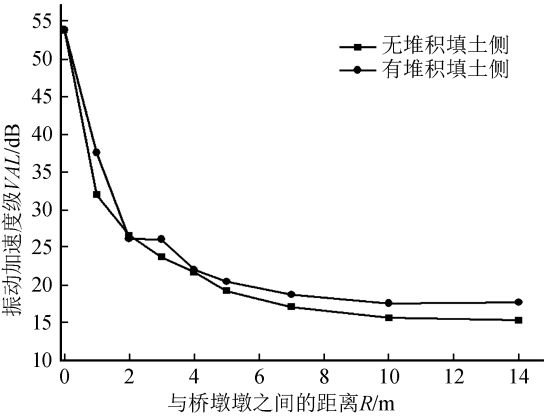
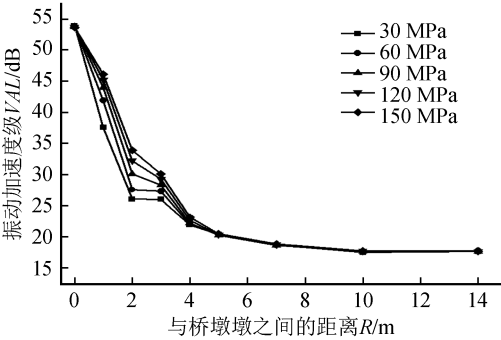
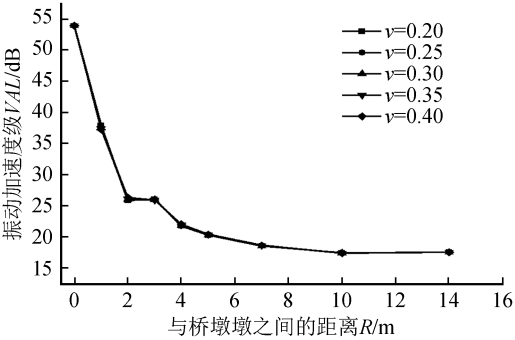


图 7 振动加速度级与距离之间的关系

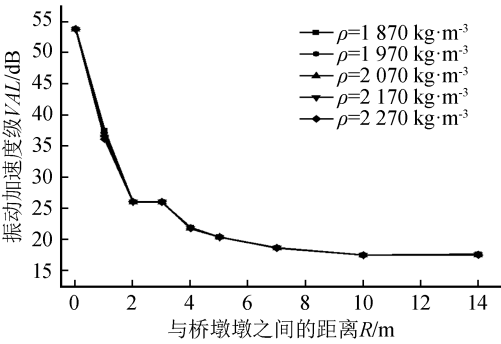
Fig.7 Relationship between vibration acceleration level and distance



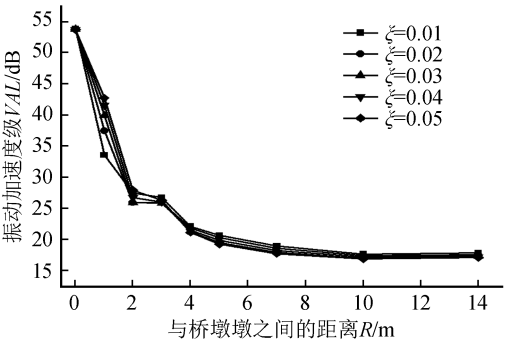
(a) 弹性模型



(b) 泊松比



(c) 密度



(d) 阻尼比

图 8 堆积填土物理力学参数对列车振动的影响

Fig.8 Influence of physical and mechanical parameters of deposited soil on train vibration

2.3.2 堆积填土几何参数对振动的影响

图 9 为桥墩旁边堆积填土的几何参数变化对列车振动传播的影响。分析表明, 堆积填土的长度对桥墩底端 $R=0 \text{ m}$ 的处振动无影响, 而当 $R > 0 \text{ m}$

时, 堆积填土的长度越短, 其振动加速度级越大, 同时, 除堆积填土长 $L=1 \text{ m}$ 处的边界未发生反弹现象外, 其余都在堆积填土的边界上会出现反弹现象; 堆积填土的高度越小, 桥墩和堆积填土的相互

作用就会越强,使得在桥墩底端 $R=0\text{ m}$ 处的振动越强烈,且堆积填土越高,在堆积填土边界上的反弹现象会越明显,同时,堆积填土的高度存在一个

使得沿线测点振动加速度级最小的最优值,即当堆积填土的高度 $h=1.8\text{ m}$ 时,各测点的振动加速度级最小。

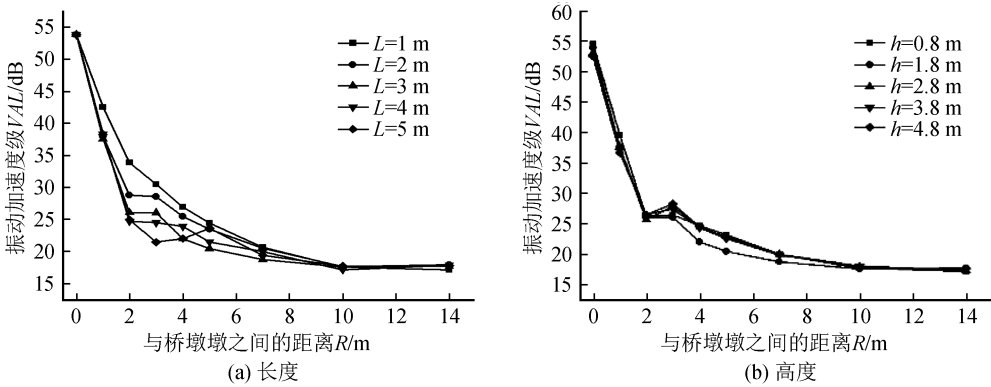


图 9 堆积填土几何参数对列车振动的影响
Fig.9 Influence of geometric parameters of deposited soil on train vibration

4 灰色关联度分析

列车运行引起的地面振动受到列车、轨道、桥墩(路基)和土体等多因素的影响,而且定量计算地面振动时所需要的控制量都具有不确定性,随机性和模糊性等特点,同时对这些控制参数无法完全了解和确定,符合灰色系统理论的特征。因此,利用灰色关联度来定性分析桥墩旁边堆积填土的物理力学参数和几何参数对地面振动的敏感性,对减振和隔振具有重要的指导意义。

由于堆积填土的某个几何和物理力学参数改变时,距桥墩不同位置地面的振动加速度级的改变量不同,因此定义有效变化值 $\overline{VAL}$ 作为“振动变化有效值”,如式(3)所示。通过分析堆积填土不同参数对振动变化标准值的影响程度来评价堆积填土物理力学和几何参数对地面振动的敏感性。

$$\overline{VAL} = \frac{1}{k} \sqrt{\sum_{j=1}^k (VAL_j^m - VAL_j)^2} \tag{3}$$

式中: $\overline{VAL}$ 为振动变化有效值; k 为堆积填土侧的测点个数, $k=9$; m 为堆积填土的几何和物理力学参数个数, $m=6$; VAL_j^m 为堆积填土第 m 个参数变化时,引起的堆积填土侧第 j 个测点的振动加速度级; VAL_j 为堆积填土的几何和物理力学参数分别为 $E=30\text{ MPa}$, $\nu=0.3$, $\xi=0.02$, $\rho=1\,870\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $L=3\text{ m}$, $h=1.8\text{ m}$ 时,堆积填土侧第 j 个测点的振动加速度。

根据式(3)可以计算得到堆积填土的各个参数取不同值所对应的振动变化有效值,如表 2 所列。

根据表 2 得到灰色关联度分析中的比较矩阵 A (堆积填土的几何和物理力学参数变化值)和参考矩阵 B (不同参数值对应的振动变化有效值),如式(4)和(5)所示。

表 2 堆积填土各参数取不同值所对应的振动变化有效值

Table 2 Effective values of vibration change corresponding to different values of parameters of deposited soil

弹性模量 E/MPa	$\overline{VAL}$	泊松比 ν	$\overline{VAL}$	密度 ρ $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\overline{VAL}$	阻尼比 ξ	$\overline{VAL}$	长度 L/m	$\overline{VAL}$	高度 h/m	$\overline{VAL}$
60	0.527 6	0.2	0.059 2	1 970	0.085 8	0.01	0.649 8	1	1.362 1	0.8	0.513 1
90	0.876 7	0.25	0.024 4	2 070	0.040 7	0.03	0.284 1	2	0.689 1	2.8	0.468 3
120	1.149 9	0.35	0.025 2	2 170	0.084 4	0.04	0.482 4	4	0.377 9	3.8	0.438 6
150	1.367 1	0.4	0.033 3	2 270	0.050 1	0.05	0.481 8	5	0.845 2	4.8	0.407 5

$$A_{6\times 4} = \begin{bmatrix} 60 & 90 & 120 & 150 \\ 0.2 & 0.25 & 0.35 & 0.4 \\ 1\,970 & 2\,070 & 2\,170 & 2\,270 \\ 0.01 & 0.03 & 0.04 & 0.05 \\ 1 & 2 & 4 & 5 \\ 0.8 & 2.8 & 3.7 & 4.8 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$B_{6\times 4} = \begin{bmatrix} 0.527\,6 & 0.876\,7 & 1.149\,9 & 1.367\,1 \\ 0.059\,2 & 0.024\,4 & 0.025\,2 & 0.033\,3 \\ 0.085\,8 & 0.040\,7 & 0.084\,4 & 0.050\,1 \\ 0.649\,8 & 0.284\,1 & 0.482\,4 & 0.481\,8 \\ 1.362\,1 & 0.689\,1 & 0.377\,9 & 0.845\,2 \\ 0.513\,1 & 0.468\,3 & 0.438\,6 & 0.407\,5 \end{bmatrix} \tag{5}$$

由于堆积填土的各个参数量纲不同且数值相差较大,不具有可比性,因此对比较矩阵中各个参数进行无量纲化处理,本文利用阈值法对各个参数进行无量纲化处理,如式(6)所示。

$$A'_i(j)=\frac{\max A_i(j)-A_i(j)}{\max A_i(j)-\min A_i(j)},(i=1,2,3,4;$$

$$j=1,2,3,4,5,6)$$
 (6)

式中: $\max A_i(j)$ 为矩阵 **A** 中第行的最大值; $\min A_i(j)$ 为矩阵 **A** 中第行的最小值。

利用式(6)将矩阵 **A** 进行变换得到 **A'**,根据同样的方法,对矩阵 **B** 进行变换,得到 **B'**。

$$A'_{6\times 4}=\begin{bmatrix}1&0.666\ 7&0.333\ 3&0\\1&0.750\ 0&0.250\ 0&0\\1&0.666\ 7&0.333\ 3&0\\1&0.500\ 0&0.250\ 0&0\\1&0.750\ 0&0.250\ 0&0\\1&0.500\ 0&0.250\ 0&0\end{bmatrix}$$
 (7)

$$B'_{6\times 4}=\begin{bmatrix}1&0.584\ 2&0.258\ 7&0\\0&1&0.977\ 1&0.744\ 3\\0&1&0.031\ 1&0.791\ 6\\0&1&0.456\ 7&0.459\ 4\\0&0.683\ 8&1&0.525\ 2\\0&0.424\ 2&0.705\ 5&1\end{bmatrix}$$
 (8)

因此,按照式(9)可以得到差异矩阵

$$\Delta_i(j)=|B'_i(j)-A'_i(j)|$$
 (9)

$$r=[0.932\ 1\ 0.452\ 3\ 0.485\ 9\ 0.515\ 5\ 0.526\ 0\ 0.514\ 6]$$
 (14)

关联度表示各参数序列相似程度的测度,其取值区间为[0,1],其关联度值越接近 1,说明该控制参数对目标值的影响越敏感,越接近 0,其影响越不敏感。显然,根据式(14)可以看出,列车荷载作用下,桥墩旁堆积填土的物理力学和几何参数对地面振动强度的敏感程度排序为:弹性模量>长度>阻尼比>高度>密度>泊松比。因此,要避免在桥墩旁边堆放刚度较大、长度较长的堆积物。

5 结论

本文以哈大高速铁路铁岭—四平段某桥墩及其堆积填土和基础场地为研究对象,采用现场实测和有限元数值模拟,并利用灰色关联度法对堆积填土的几何和物理力学参数对振动的敏感性进行了分析,主要得到以下结论:

(1) 桥墩顶端支撑垫石两测点的振动特性基本一样,在距离桥墩底端一定范围内,由于土体和桥墩

$$\Delta_{6\times 4}=\begin{bmatrix}0&0.082\ 5&0.074\ 6&0\\1&0.250\ 0&0.727\ 0&0.744\ 3\\1&0.333\ 3&0.302\ 2&0.791\ 6\\1&0.500\ 0&0.206\ 7&0.459\ 4\\1&0.066\ 2&0.750\ 0&0.525\ 2\\1&0.075\ 8&0.455\ 5&1\end{bmatrix}$$
 (10)

关联系数矩阵的计算如式(11)所示:

$$\gamma_i(j)=\frac{\Delta_{\min}+\zeta\Delta_{\max}}{\Delta_i(j)+\zeta\Delta_{\max}}$$
 (11)

式中: $\Delta_{\min}$ 和 $\Delta_{\max}$ 分别是差异矩阵 $\Delta_{6\times 4}$ 中的最小值和最大值; ζ 为分辨系数,一般取值为0.5。

根据式(11)可以得到关联系数矩阵:

$$\gamma_{6\times 4}=\begin{bmatrix}1&0.858\ 4&0.870\ 2&1\\0.333\ 3&0.666\ 7&0.407\ 5&0.401\ 8\\0.333\ 3&0.600\ 1&0.623\ 2&0.387\ 1\\0.333\ 3&0.500\ 0&0.707\ 6&0.521\ 2\\0.333\ 3&0.883\ 1&0.400\ 0&0.487\ 7\\0.333\ 3&0.868\ 4&0.523\ 3&0.333\ 3\end{bmatrix}$$
 (12)

根据关联系数矩阵和式(13)可以得到堆积填土各参数的灰色关联度。

$$r_i=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^N\gamma_i(j)$$
 (13)

通过计算可以得到堆积填土的弹性模量、泊松比、密度、阻尼比以及其长度和高度的灰色关联度:

的相互作用使得堆积填土和基础场地的振动出现了明显的放大效应,且堆积填土和基础场地的振动特性也存在较大差异,

(2) 堆积填土对振动传播有着较大的影响,在距离桥墩左右两侧相同位置,堆积填土侧的振动加速度级明显要大于未堆积填土的。同时,在堆积填土侧,振动加速度在堆积填土的边界上出现了反弹现象。

(3) 堆积填土的弹性模量和阻尼比变化对振动传播的影响较大,而其密度和泊松比对振动传播的影响较小,且与桥墩的距离 $R<5\text{ m}$ 时,随着弹性模量的增加,堆积填土侧的振动加速度级越大,在堆积填土边界上的反弹作用也越弱,在距离 $R<1\text{ m}$ 时,填土侧地面振动加速度级随阻尼比的增大而增加,在 $R>1\text{ m}$ 时,其振动加速度级随阻尼比的增加而减小。

(4) 堆积填土的高度和长度对填土侧振动传播

特性有很大作用,堆积填土的长度越小,地面振动加速度越大,堆积填土高度越小,土体和桥墩的相互作用越强,桥墩底端 $R=0$ m 处的振动加速度越大,堆积填的高度 $h=1.8$ m 时,填土侧各个测点的振动加速度级最小。

(5) 定义振动变化有效值作为评价堆积填土物理力学和几何参数变化对地面振动影响的指标并结合灰色关联度理论,得出桥墩侧堆积填土的各个参数对地面振动的敏感性大小为:弹性模量 > 长度 > 阻尼比 > 高度 > 密度 > 泊松比。

参考文献(References)

- [1] 翟婉明,赵春发.现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J].西南交通大学学报,2016,51(2):209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.
- [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:技术科学,2012(10):1148-1156.
ZHAI Wanming, HAN Haiyan. Research on ground vibration caused by high speed train running on soft soil foundation line [J]. Science China Press, 2012(10): 1148-1156.
- [3] 孟祥连,周福军.西宝高铁黄土地区路基振动效应空间分析研究[J].铁道工程学报,2017,34(8):28-33.
MENG Xianglian, ZHOU Fujun. Spatial analysis and study of roadbed vibration effect on loess area for Xi'an—Baoji high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 28-33.
- [4] 申权,杨果林,胡敏,等.高速铁路新型路堑基床结构动力响应分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1118-1125.
SHEN Quan, YANG Guolin, HU Min, et al. Numerical analysis of dynamic response on a new type of cutting bed in the expansive soil district on the Yun—Gui railway [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1118-1125.
- [5] 马骥骥,李斌,王东,等.宝兰客专路堤段地面振动特性试验研究与数值分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(2):294-301.
MA Kuikui, LI Bin, WANG Dong, et al. Experimental study and numerical analysis on ground vibration characteristics of subgrades section of Baoji—Lanzhou high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 294-301.
- [6] 董连成,徐祺,师黎静,等.多年冻土区青藏铁路列车荷载作用下路基振动响应研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1153-1160.
DONG Liancheng, XU Zhen, SHI Lijing, et al. Vibration response analysis of embankments in permafrost regions along the Qinghai—Tibet Railway subjected to train loads [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1153-1160.
- [7] 杨文波,邹涛,涂玖林,等.高速列车振动荷载作用下马蹄形断面隧道动力响应特性分析[J].岩土力学,2019,40(9):3635-3644.
YANG Wenbo, ZOU Tao, TU Jiulin, et al. Analysis of dynamic response of horseshoe cross-section tunnel under vibrating load induced by high-speed train [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3635-3644.
- [8] 张良涛.高架铁路振动测试分析及防振动措施[J].铁道工程学报,2012,29(6):118-125.
ZHANG Liangtao. Test and analysis of vibration induced by elevated railway and anti-vibration measure [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(6): 118-125.
- [9] 王子玉,凌贤长,惠舒清.季节冻土区铁路路基振动加速度现场监测[J].岩土工程学报,2015,37(9):1591-1598.
WANG Ziyu, LING Xianzhang, HUI Shuqing, et al. Field monitoring of vibration response of subgrade in a seasonally frozen region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1591-1598.
- [10] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J A. A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3-5): 909-936.
- [11] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J A. A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3-5): 937-965.
- [12] CONNOLLY D, GIANNPOULOS A, FORDE M C. Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 46: 13-19.
- [13] 艾强.严寒地区高速铁路路基冻深试验研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2014.
AI Qiang. Experimental study on freezing depth of high-speed railway subgrade in severe cold area [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.
- [14] 魏鹏勃.城市轨道交通引起的环境振动预测与评估[D].北京:北京交通大学,2009.
WEI Pengbo. Prediction and assessment for urban train-induced environmental vibrations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [15] 王超.季冻区哈大高铁边坡冻融滑塌机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
WANG Chao. Research on freeze-thaw slumping mechanism of Harbin—Dalian high-speed railway slope in seasonally frozen soil region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [16] 国家环境保护局.城市区域环境振动测量方法:GB 10071—88 [S].北京:中国标准出版社,1988.
National Environmental Protection Agency. Measurement method of environmental vibration in urban areas: GB 10071—88 [S]. Beijing: China Standards Press, 1988.