

高速铁路高架桥周围场地振动反应谱分析

曹艳梅¹, 杨林^{2,3}, 李喆¹, 李东伟¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034;
3. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘要: 基于达朗贝尔原理、无限周期结构理论以及具有完全匹配层的薄层法-容积法建立了高速列车-周期性桥梁结构-群桩基础-地基土动力相互作用耦合模型, 提出了一种半解析-半数值方法以预测和评价高架轨道交通引起的周围场地振动, 并对该方法进行了程序实现及有效性验证。进一步提出了场地振动反应谱的概念, 并通过算例分析了不同行车速度、场地卓越周期以及地表不同接收点的场地振动反应谱特性, 进而得到高速铁路周围环境振动基于规范容许值的阈值范围。研究表明, 场地地面不同接收点的垂向位移最大值和振级响应均随场地卓越周期的增大而呈增大的趋势, 但振级响应在局部位置处出现了放大现象; 以地面位移最大值为指标的场地振动反应谱能反映振动的变化速率, 而以总体振级 VL_z 为指标的场地振动反应谱则能反映场地卓越周期、与桥墩中心线距离以及行车速度对场地振动响应的局部特性, 因此在此类反应谱中对评价指标的选取应综合考虑。本文所提出的场地反应谱和振动阈值图不仅可以为拟建构筑物提供满足不同振动限值所需的距离参考, 而且可以为既有构筑物受到的高架轨道交通环境振动影响进行评价。

关键词: 环境振动; 高架轨道交通; 周期性桥梁结构; 场地反应谱; 振动阈值

中图分类号: U211.3; U238; U448.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)01-0093-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.01.010

引言

在我国高速铁路的建设中, 桥梁平均总长约占线路总长的 50%, 部分线路如京沪线的桥梁占比高达 80%, 而其中 85% 以上的桥梁均采用 32 m 跨径为主的预应力混凝土简支箱梁桥。轨道交通线路在方便人们的出行时, 由其引发的环境振动问题也越来越受到社会的普遍关注。因此, 快速、准确、有效地对高架轨道交通引起的环境振动进行预测与评价, 对于前期铁路选线以及后期的环评工作都具有研究意义。

交通环境振动预测主要包括经验公式预测法、试验测试、理论分析和数值计算^[1]。Feng 等对京沪高速铁路引发的周围地面振动进行了现场测试, 并提出了地面动力冲击系数和地面剩余卓越频率的概念, 对场地振动的特征进行了分析和评价^[2]。Li 等建立了考虑多轮对效应的车桥耦合系统频域理论模型, 对城市轨道交通箱梁结构的振动传递特性进行了理论计算和试验研究^[3]。Fang 等将人工智能算法运用到列车引起环境振动的预测中, 为预测方法研究提供了一种新思路^[4]。Shi 等对高速铁路高架桥

周围场地振动的特征频率进行了理论分析, 得出桥梁上部结构的两个特征频率会影响地面振动位移的频率特征^[5]。Lu 等则以简支梁桥为研究对象, 提出了周期性桥梁结构模型, 对移动质量作用下桥梁的动力响应进行了一定的理论分析^[6]。Fabrizio Gara 等则基于环境振动测试和有限元数值模拟对位于意大利的 875 m 长的多跨钢筋混凝土连续梁桥及其周围的场地振动进行了分析, 明确了在场地振动中考虑土结动力相互作用的必要性^[7]。近年来, 研究人员在理论分析上不断深入, Liu 等采用有限元混合能量分析法, 对铁路上的一座钢-混组合梁桥的振动和噪声进行了计算和分析^[8]。Cao 等则考虑了土参数的不确定性, 从概率分析的角度对高速铁路引起的环境振动进行了分析^[9]。Mohammed Rachedi 等则利用人工神经网络对桥梁结构的土结动力相互作用进行建模分析, 进而对一座既有桥梁结构进行了风险评估^[10]。

通过对既有文献的研究可以发现, 关于高速铁路引起的桥梁周围场地振动, 鲜有学者提出场地振动反应谱的概念及应用。因此, 本文提出一种高架轨道交通环境振动预测的半解析-半数值方法, 通过车辆-桥梁垂向耦合相互作用子系提供真实模拟

的荷载激励,利用周期性桥梁结构子系统仅取基本跨就能快速分析高架桥任意跨墩底的动反力的特点,进而引入具有理想匹配层的薄层法,并与容积法相结合考虑群桩基础-土动力相互作用;最后提出环境振动场地反应谱的概念,利用本文提出的理论方法分析了高架轨道交通环境振动场地反应谱特性,并结合规范给出了高架轨道交通环境振动影响的阈

值范围。

1 理论预测模型的建立

高架轨道交通引起的场地振动包括振源、振动传播路径和地面接收点,基于此本文建立了如图1所示的理论预测模型。

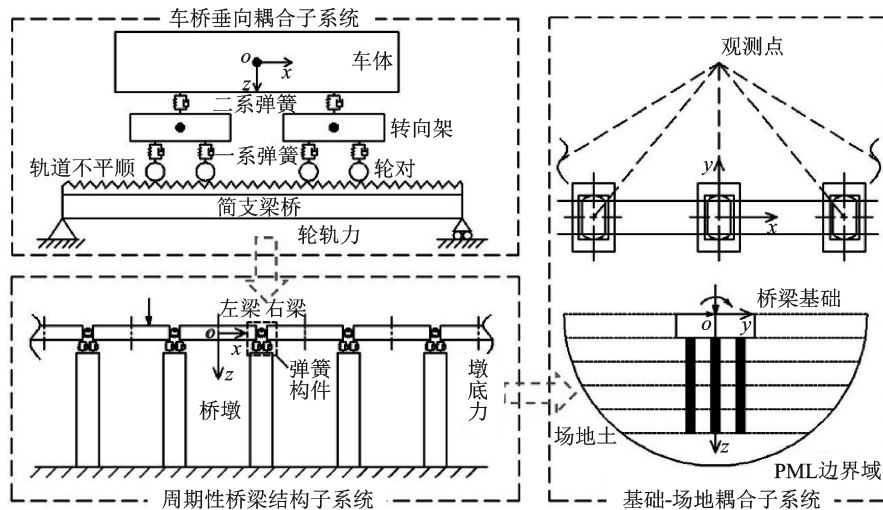


图1 高架轨道交通环境振动的理论预测模型

Fig. 1 Prediction model of environmental vibration caused by elevated rail traffic

1.1 车桥垂向耦合振源模型

在车辆系统和桥梁系统组成的振源模型中,车辆的轮对、转向架和车体均看作刚体,轮对考虑沉浮运动,车体和转向架均考虑沉浮运动和点头运动,则一节车辆系统共有10个自由度(图1),通过达朗贝尔原理建立车辆的运动方程:

$$M_v \ddot{u}_v + C_v \dot{u}_v + K_v u_v = F_v \quad (1)$$

式中 M_v, K_v, C_v 分别表示车辆系统的质量、刚度和阻尼矩阵; $u_v, \dot{u}_v, \ddot{u}_v$ 分别表示车辆系统的位移、速度和加速度向量; F_v 表示车辆受到的车-桥系统动力相互作用力,可由一系弹簧的刚度、阻尼与桥面的动力响应和轨道不平顺引起的轨道响应联合表示。

在桥梁模型中,每个梁单元节点仅考虑 $x-z$ 平面内的3个自由度,基于有限元理论建立桥梁垂向模型的运动方程:

$$M_b \ddot{u}_b + C_b \dot{u}_b + K_b u_b = F_b \quad (2)$$

式中 M_b, K_b, C_b 分别表示桥梁模型的质量、刚度和阻尼矩阵; F_b 表示桥梁模型受到的车-桥系统动力相互作用力,可根据轮对位置处力的平衡条件表示。

在对轨道不平顺进行考虑时,利用三角级数法生成轨道不平顺样本,进而采用密贴的轮轨耦合关系将式(1)和式(2)进行联立,通过分离迭代法对轮

轨相互作用力进行求解。

1.2 周期性桥梁-群桩-地基土振动传播模型

由于高速铁路中常用的连续等跨径布置预应力混凝土简支箱梁桥和板式无砟轨道结构在纵向具有一定的周期性(结构沿纵向近似可认为无限延伸),因此可采用无限周期理论对其进行分析^[6,11]。根据结构的周期性,移动简谐荷载作用下周期性结构上任一点的位移在频域内可表示为:

$$\bar{u}(x+L, \omega, \omega_p) = e^{i(\omega_p - \omega)L/V} \bar{u}(x, \omega, \omega_p) \quad (3)$$

式中 L 为周期单元的长度,此处可取简支梁桥的跨度; ω 和 ω_p 分别为结构的振动圆频率和外部激励力的圆频率。根据力的平衡关系可推导出周期性结构的截面内力也具有类似的表达式。

文中将每个周期性单元称为桥梁结构的基本跨,主要由左梁、右梁和桥墩三个构件以及梁-梁-墩接头组成(如图1和图2所示),其中墩底假设为固端约束,基本跨左端截面(对应左梁的跨中截面)和右端截面(对应右梁的跨中截面)分别作用有相邻跨梁体对其的作用力,如图2所示,图中 N, Q, M 分别代表梁端轴力、剪力和弯矩。

对于桥梁承台-群桩基础-地基土系统,建立如图3所示的动力相互作用模型,其中 s 为桩间距,

L_p 为桩长。将地基土考虑为具有众多薄层的线弹性体系,土体边界采用理想匹配层(PML);另由于承台的刚度较大,可视其为刚体,而群桩基础则近似为空间欧拉-伯努利梁单元。

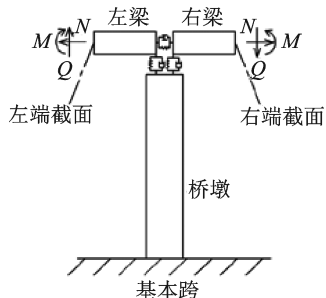


图 2 周期性桥梁结构基本跨模型

Fig. 2 Basic span model of periodic bridge structure

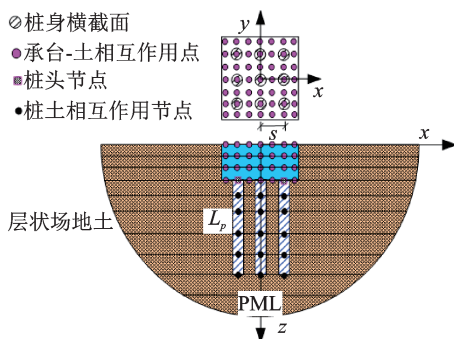


图 3 桥梁承台-群桩基础-地基土模型

Fig. 3 Bridge platform-pile group foundation-subsoil interaction model

求解时,首先根据有限元理论推导出左梁、右梁以及桥墩构件的运动方程;然后通过梁-梁-墩接头协调条件将梁和墩构件的运动方程进行联立,得到基本跨的原始运动方程;再考虑墩底边界和周期性边界条件进而推导出基本跨的总运动方程;进而构造并施加频域内移动荷载激励,即可求解出周期性桥梁结构任意跨动力响应以及墩底的动反力。利用 Matlab 编制周期性桥梁结构动力分析程序,整个流程如图 4 所示。

在考虑桥梁的群桩基础与场地土的动力相互作用时,首先根据弹性半空间场地土的基本运动方程和薄层法推导出三维场地土在空间-频率域内的振动基本解^[12](场地土采用了理想匹配层边界条件,简称 TLM-PML 法),然后引入容积法^[13]建立桥梁群桩基础-场地土动力相互作用模型,推导出桥梁基础-场地土这一系统的阻抗函数及振动频响函数;将图 4 中求解出的墩底动反力作为基础的荷载激励对场地土的动力响应进行求解分析;最后,利用 Matlab 编制桥梁基础-场地土耦合动力分析程序,整个建模思路如图 5 所示。

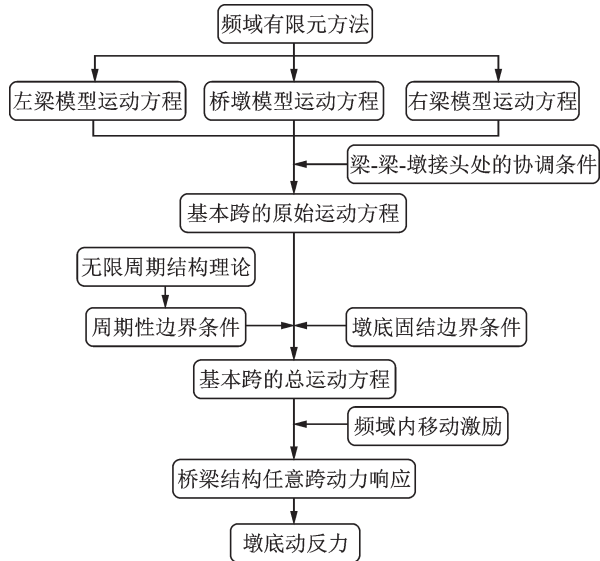


图 4 墩底动反力求解流程

Fig. 4 Procedure of solving dynamic reactions on pier bottom

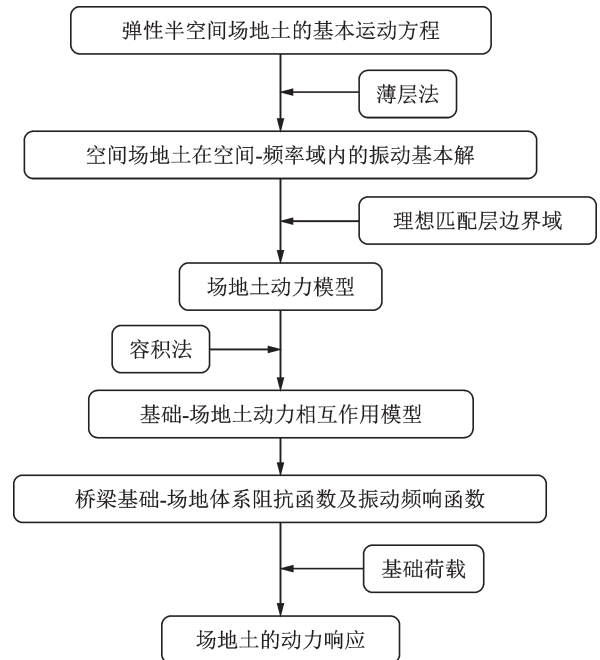


图 5 桥梁基础-场地土耦合模型建模思路

Fig. 5 Modeling idea of bridge foundation-soil coupling

2 理论分析模型的验证

2.1 车桥垂向耦合振源模型的验证

将德国 ICE3 单节动车以车速 220 km/h 通过 32 m 简支箱梁桥时的计算结果与文献[14]中的计算结果进行对比,桥梁跨中垂向位移、前转向架垂向加速度、垂向轮轨力随车辆在桥上的位置的变化曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,采用两种模型计算的结果,不仅曲线形状比较一致,而且桥梁和车辆转向架的动力响应数值几乎一致。对于垂向轮轨力响应,当列

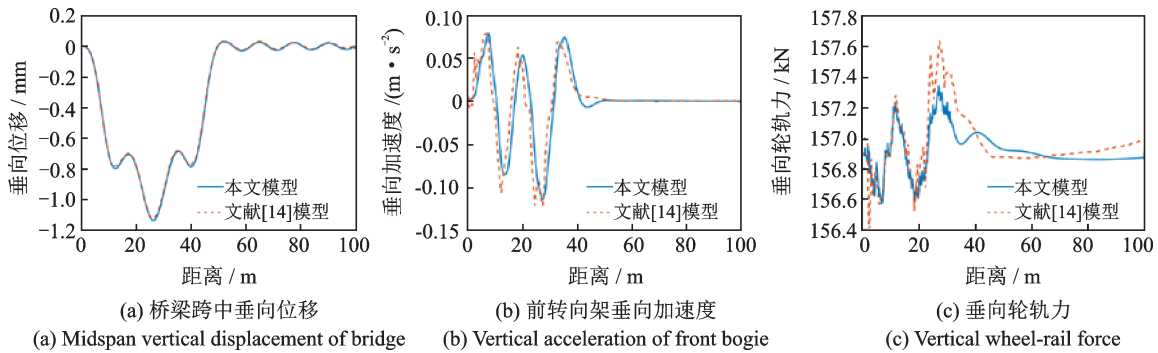


图6 两种模型计算出的桥梁和车辆动力响应对比

Fig. 6 Comparison of bridge and vehicle dynamic response by two different models

车在桥上行驶了30 m以后时,本文模型的计算结果与文献[14]中的竖向轮轨力计算结果最大值差了不到1 kN,这在工程上是完全可以接受的。这种微小误差可能是由于两种方法采用了不同的计算步长和迭代求解过程造成的。总体来说,本文提出的车辆-桥梁垂向耦合模型是有效的,能够用作高速铁路高架桥周围环境振动的振源模型。

2.2 桥梁下部结构-场地模型的验证

为验证周期性桥梁结构模型的有效性,采用与文献[15]相同的桥梁结构和荷载参数对桥梁-场地土体系的动力响应进行计算,其中桥梁部分的计算结果对比如图7所示。从图中可以看出在不同的车速下,两种模型计算出的桥梁跨中位移时程的形状

和大小基本上一致,因此本文所建立的周期性桥梁结构计算模型是有效的。

以蒋通等^[16]论文中的低承台群桩基础作为参考模型(如图3所示),其中承台尺寸为4.4 m×4.4 m×4 m,桩体半径为0.3 m,桩长为7.5 m,桩间距为2.2 m,桩体的密度为2400 kg/m³,泊松比为0.1667,弹性模量为2.4×10¹⁰ N/m²,桩体忽略材料阻尼效应。将本文模型与文献中已被试验验证过的群桩基础-动力阻抗函数结果进行对比,结果如图8所示。从图8可以看出,在20 Hz以下的频率范围内,两种计算模型获得的三种阻抗函数差别不大,在20~30 Hz频率范围内,竖向动力阻抗和回转动动力阻抗的一致性依然较好,但是水平动力阻抗之间稍有差别,这主要是由于文献[16]的计算模型中未考虑承台底面

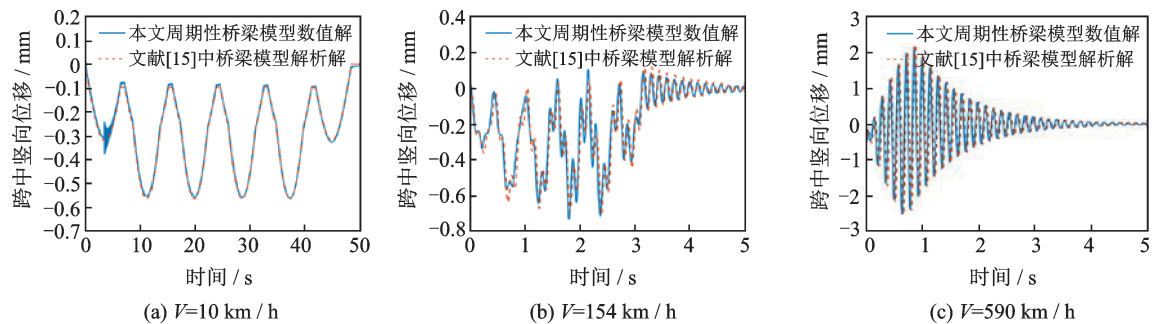


图7 桥梁跨中位移的计算结果对比

Fig. 7 Comparison of calculation results of bridge middle-span displacements

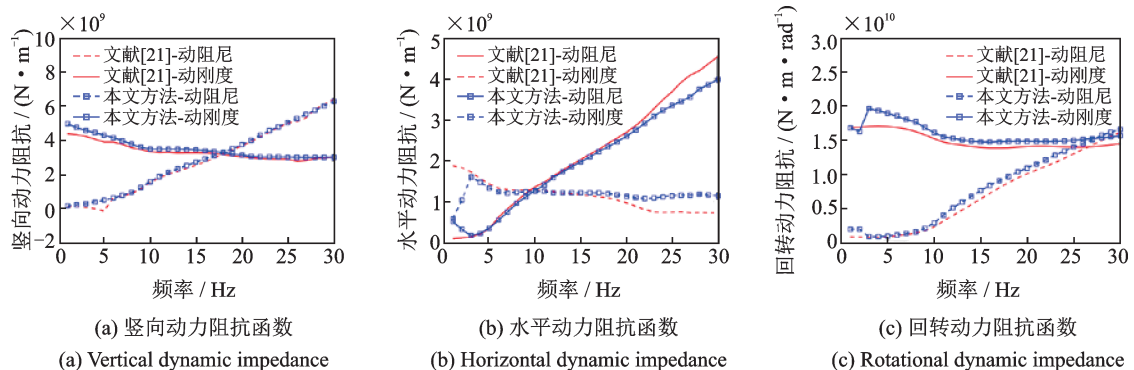


图8 承台-群桩基础动力阻抗函数的计算结果对比

Fig. 8 Comparison of dynamic impedance functions of pile cap and pile group foundation

与土的接触,而本文计算模型中考虑了二者之间的相互接触,当激振频率较大时,本文计算出的水平动力阻抗的实部会稍微偏大(图 8(b)中动刚度曲线),虚部会稍小(图 8(b)中动阻尼曲线)。二者尽管存在一定的误差,但是由误差的数量级可知该误差是在工程所容许的范围内,相对误差并不大,因此足以证明本文采用 TLM-PML 地基土模型联合容积分法所建立的群桩基础-地基土动力相互作用模型是有效的。

3 场地振动反应谱及阈值分析

3.1 场地振动反应谱的提出

在工程领域,人们常借助地震反应谱进行结构的抗震分析与设计。基于此,本文提出了场地振动反应谱的概念用来指导环境振动的预测和评估,即对于轨道交通引发的环境振动,当振源激励一定时,地面振动响应的最大值或最大振级与轨道交通周围场地土卓越周期之间的关系曲线。

场地土卓越周期的定义与抗震设计中的定义基本相同,当场地地基为多层土体时,场地卓越周期的计算公式为:

$$T_s = \sum_{i=1}^n \frac{4h_i}{C_{si}} \quad (4)$$

式中 T_s 为场地卓越周期(单位:s); C_{si} 为第 i 层土的剪切波波速($i=1, 2, \dots, n, n$ 为土层数)(单位:m/s); h_i 为第 i 层的土层厚度(单位:m)。

根据本文提出的高架轨道交通周围场地土环境振动预测模型可计算获得具有不同卓越周期的场地土及地面处的振动响应,进而可得到场地振动反应谱。对地面振动进行评价时,分别采用地面垂向振

动位移和地面振动总体 Z 计权振级 VL_z 来表示,其中振级的计算公式为^[17]:

$$VL = 20 \lg(a'_{rms}/a_0) \quad (5)$$

式中 a_0 表示基准加速度,ISO 2631^[17] 中规定取值为 10^{-6} m/s^2 ; $a'_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{msi}^2 k_i^2)}$ 表示振动计权加速度均方根值, k_i 为第 i 个频率段的计权因子, a_{msi} 代表第 i 个频率段的振动加速度有效值, n 为频段数。

3.2 计算参数的选取

高速列车采用 8 节 CRH3 动车编组,计算时选取 6 种车速: 200, 250, 300, 350, 380 和 400 km/h。桥梁上部结构选取高速铁路常用的 32 m 预应力混凝土简支箱梁(通桥(2016)2322A),桥墩为 14 m 高的现浇实体墩,简支梁球形钢支座,周期性桥梁结构模型的弹簧刚度和阻尼见文献[16]。桥梁采用承台-群桩基础,且在基础上仅作用墩底竖向支反力,承台及桩身圬工按 C30 混凝土设计,密度为 2500 kg/m^3 ; 参照《混凝土结构设计规范(2015 版)》(GB 50010—2010)中 4.1.5 节中的规定^[18],桩的弹性模量取为 $3.00 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,泊松比取 0.2。桥梁基础尺寸、场地剖面及地表观测点布置如图 9 所示。

为了能够得到充分的场地振动的反应谱曲线,本算例中考虑了取值范围为 [0.25, 2] 内的共 11 种卓越周期的场地土质,对应的地基土剪切波波速范围为 100~800 m/s,能够涵盖常见的场地土情况。不同卓越周期对应的场地土参数如表 1 所示。

为方便计算场地土的卓越周期,本算例取单一均质土层进行计算。另外,由于土的阻尼越大,对高频振动的滤波作用就越强,场地土振动的幅值通常会越小,为获得较保守的环境振动以便于与规范的容许值进行对比,本算例在土参数中选取较大的阻

表 1 不同卓越周期的场地土计算参数^[19]

Tab. 1 Parameters of subsoil with different predominant periods^[19]

编号	场地土类型	剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比	弹性模量/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	土层厚度/ m	卓越周期/ s
1		100	200	0.33	48			2
2	软土	125	250	0.33	75			1.6
3		150	300	0.33	108			1.3
4	中软土	200	400	0.33	192			1
5		250	500	0.33	300			0.8
6		300	600	0.33	432	1800	30	0.67
7	中硬土	350	700	0.33	588			0.57
8		425	850	0.33	867			0.47
9		500	1000	0.33	1200			0.4
10	坚硬土	650	1137	0.26	1912			0.31
11		800	1400	0.26	2897			0.25

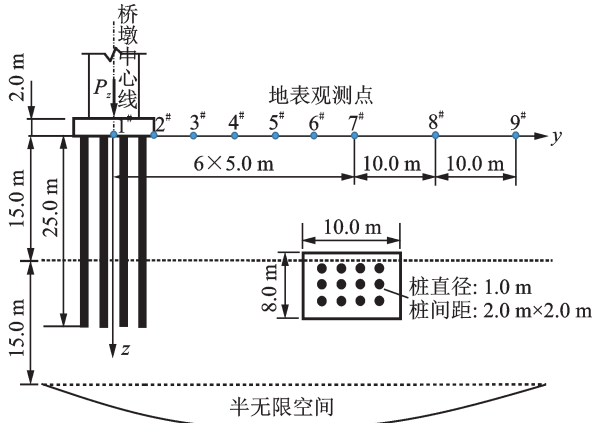


图9 桥梁基础、场地及地表观测点布置示意图

Fig.9 Sketch of bridge foundation, site and observation points' layout

尼比0.05进行计算。

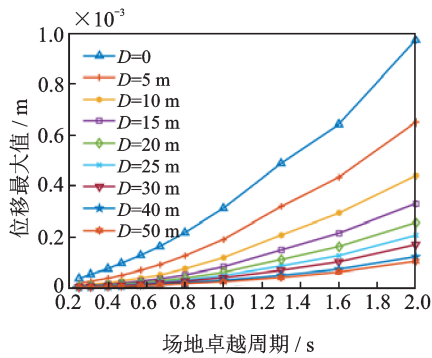
3.3 环境振动场地反应谱特性分析

图10给出了列车运行速度 $V=300\text{ km/h}$ 时引起的地面位移最大值以及地面振动总体 Z 计权振级 VL_z 随场地卓越周期的变化曲线,即特定车速下的场地反应谱曲线,其中 D 表示地面观测点距轨道中心线的距离。根据环境振动场地反应谱曲线,工程

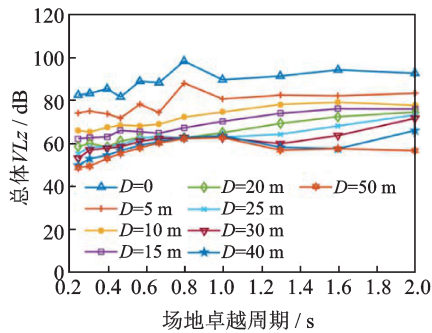
中则能比较方便地查阅出轨道交通运行时,距离轨道中心线不同距离处不同地质条件的场地所对应的环境振动大小。从图10可以看出,距轨道交通振源不同距离处,地面垂向位移最大值随场地卓越周期的增大存在不断增大的趋势。由于场地土质越硬,剪切波波速越大,对应的场地卓越周期就越小,因此场地土质越软,轨道交通引起的地面振动位移越大。然而从图10(b)中的地面振动总体 Z 计权振级来看,不同观测点处垂向振级随着场地卓越周期增大而增大的趋势变缓,尤其当距离轨道中心线越远处。

为了观察列车运行速度对环境振动场地反应谱的影响,选取6种车速(200, 250, 300, 350, 380和400 km/h)通过本文提出的理论和方法计算出距轨道中心线不同距离的场地振动反应谱,如图11和12所示。

从图11可以看出,如果取地面振动位移的最大值作为评价指标,对于不同卓越周期的场地土,行车速度越大,振动位移最大值也越大,且随着观测距离越远,速度对其响应的影响愈明显。图12是以地面垂向总振级 VL_z 作为评价指标,可以看出随着场地卓越周期的增大,场地土质越软,地面能观察到明显的振动放大现象,但是不同位置处场地反应谱的关系曲线的变化不完全一致,当距离振源较近时,卓越周期低于1 s的场地土容易出现振动放大现象。因此,在建立环境振动场地反应谱时,采用位移最大值指标,可以观察地面振动位移随场地卓越周期的变化趋势以及变化速率,而采用总体 VL_z 振级指标,由于考虑进了不同振动频率的计权,因此可更加客观地反映场地、距轨道中心距离以及行车速度对振动响应的影响,因此在场地反应谱特性分析中应对这两种评价指标综合考虑。



(a) 场地垂向位移最大值振动反应谱
(a) Response spectrum of maximum vertical displacement of ground



(b) 场地总体 VL_z 振动反应谱
(b) Response spectrum of total vibration level VL_z of ground

图10 地表垂向位移及振级的环境振动场地反应谱

Fig.10 Vibration response spectrum of ground vertical displacement and vibration level

3.4 高架轨道交通环境振动阈值分析

根据国家振动标准^[20]和行业振动标准^[21],对于交通环境振动,周围场地区域划分为3类,第I类区域代表特殊住宅区、居民区以及文教区等振动敏感区,第II类区域代表混合区和商业中心区,第III类区域代表工业集中区和交通干线道路两侧。

对于I, II, III类区域,轨道交通引起建筑物室内夜间振动的限值分别为62, 67和70 dB。将该振动限值与高速铁路高架桥周围场地的垂向振级 VL_z 反应谱进行对比,则可以得到不同车速下3类区域环境振动的容许范围,此处可将其称为高速铁路高架桥周围环境振动阈值图,如图13所示。该图以场地表面接收点距轨道中心线的距离为横坐标,以场

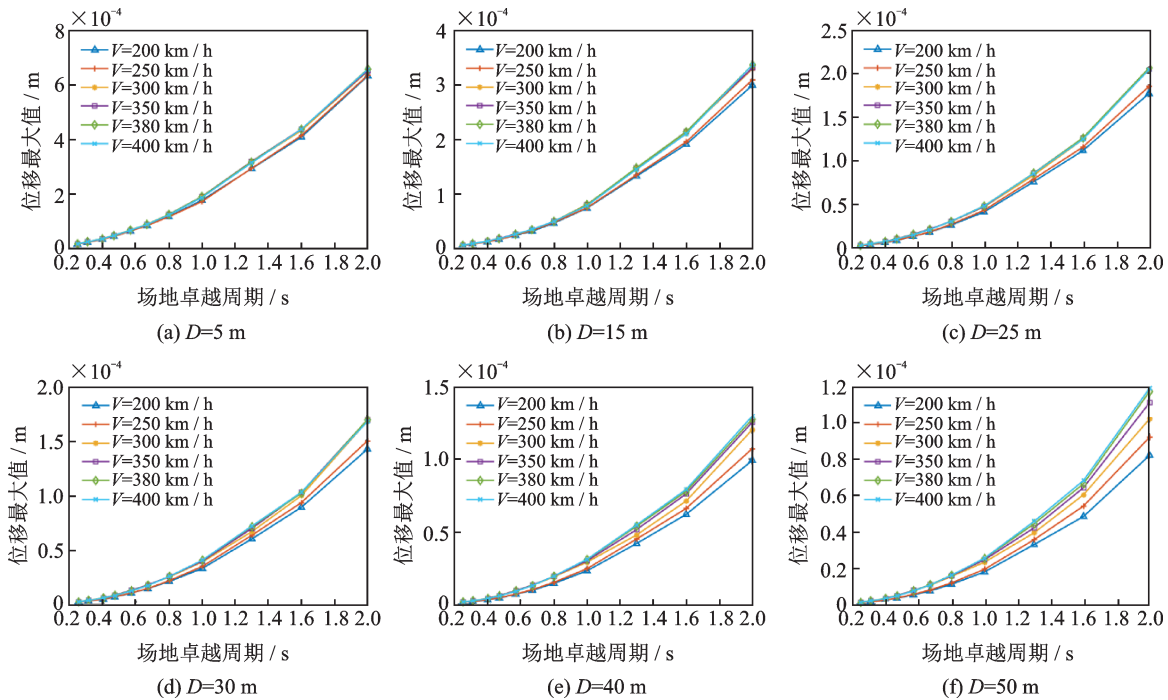


图 11 地面不同测点处的位移振动响应反应谱

Fig. 11 Response spectrum of ground displacement at different measuring points

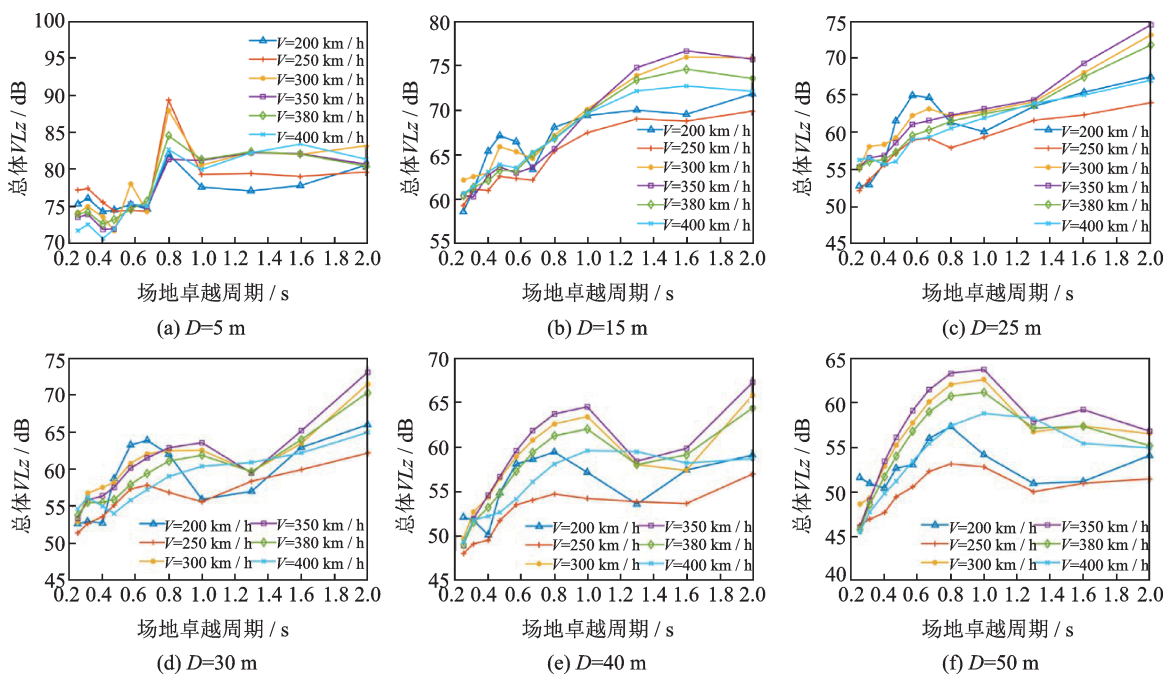


图 12 地面不同测点处的振级反应谱

Fig. 12 Ground vibration level response spectrum at different measuring points

地土的卓越周期为纵坐标,水平方向的3条虚线将场地土划分为4大类,从上到下依次为软土、中软土、中硬土和坚硬土,整个区域被62,67和70 dB三条分界线分成4个部分,每条界线的右侧区域分别表示能够满足3类不同区域环境振动容许值的范围,而振级大于70 dB的白色区域则为完全超限区。

就本文算例的振动条件,从图13的计算结果可以看出:(1)车速在200~350 km/h区间时,随着车

速的增大,环境振动阈值图中完全超限区的面积随之增大,这间接说明了车速增大引起的场地振动响应可能会越大,超过规范容许值的环境振动也越多;(2)当车速为250 km/h时,对于非常软弱的场地土,如果要求满足夜间环境振动62 dB的限值,则建议将敏感建筑物规划在距高架轨道交通中心线30 m以外,当车速高于350 km/h,该距离建议在40 m以外;(3)当列车时速为300 km和350 km时,对于卓越周期在0.8~1.0 s范围内的中软土场地,第II类振

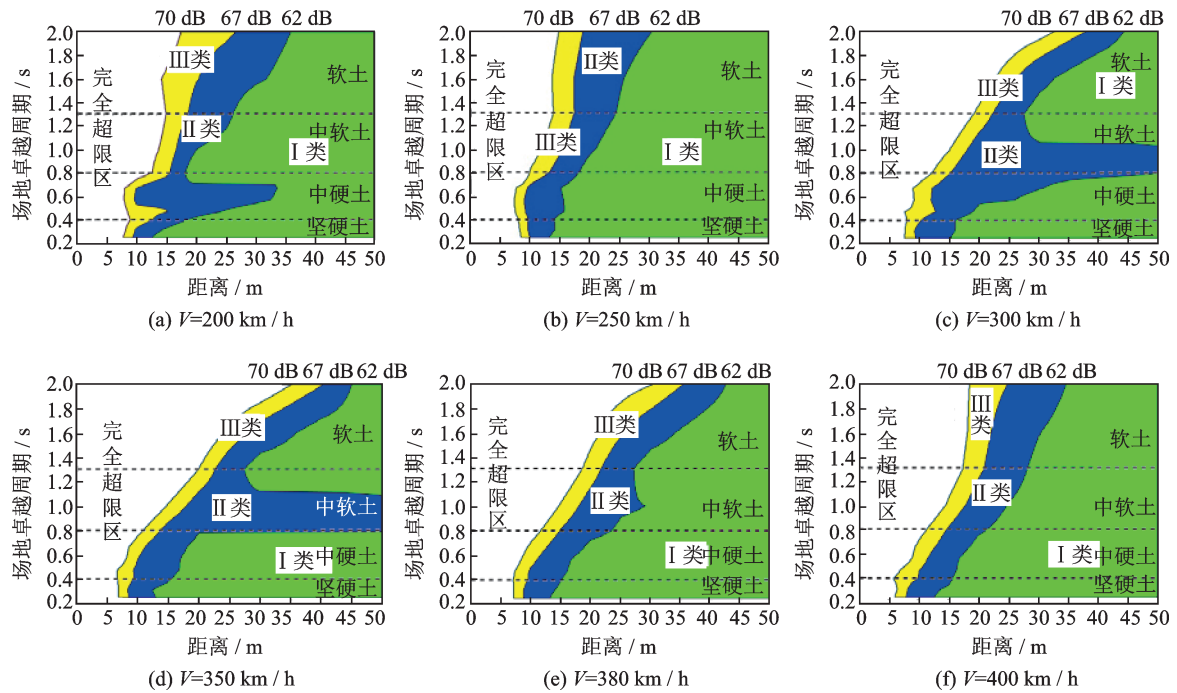


图13 不同车速对应的环境振动阈值图

Fig. 13 Threshold curves of environmental vibration under different train speeds

动区面积增大,即在对应车速和场地土类型下振动响应出现了放大现象,此时建议满足振动限值的容许距离大于50 m;(4)当I类区域内的既有建筑物距高架轨道交通线的距离小于20 m时,只有地质条件较好的场地土才能完全满足夜间环境振动的限值要求。

为了比较明确地确定场地土的卓越周期,本文采用了单一土层,其实对于分层地基土,也可采用本文提出的方法进行计算,只不过在获取振动反应谱时,需要根据层状土的分层厚度和波速折算出其对应的场地卓越周期以便于基于环境振动反应谱的阈值能应用于工程实践。

4 结论

本文提出了一种计算高架轨道交通环境振动的理论分析方法,并对其有效性进行了验证。提出环境振动场地反应谱的概念,进一步分析了高速列车以不同车速运行时,不同卓越周期的场地所具有的振动反应谱特性,给出了规范中三类区域环境振动标准限值所对应的阈值图。主要研究结论如下:

(1)本文提出的半解析-半数值理论分析模型能够用来预测评价高架轨道交通引起的环境振动。

(2)场地土的卓越周期对地面振动具有较大影响,场地土质越软,卓越周期越大,轨道交通引起的地面振动位移越大。

(3)对于软土地,在250 km/h的车速下,如果要求满足夜间环境振动62 dB的限值,则敏感建筑物必须在距高架轨道交通中心线30 m以外;当车速高于350 km/h,则满足振动限值的距离应该在40 m以外。

(4)环境振动场地反应谱的概念对环境振动的预测和评价非常有价值。如果反应谱中采用位移最大值作为指标,可以观察地面振动位移随场地卓越周期的变化趋势以及变化速率;如果采用振级指标,可客观地反映场地卓越周期、距轨道中心距离以及行车速度对环境振动的影响,因此场地反应谱特性分析中应对这两种评价指标进行综合考虑。

(5)高速铁路高架轨道交通环境振动阈值图不仅可以提供拟建构筑物满足不同振动标准限值所需距离要求,而且还可以对既有构筑物进行环境振动的评估分析。

参考文献:

- [1] Krylov Victor V. Ground Vibrations from High-speed Railways: Prediction and Mitigation[M]. London: ICE Publishing, 2019.
- [2] Feng Shi-jin, Zhang Xiao-lei, Wang Lei, et al. In situ experimental study on high speed train induced ground vibrations with the ballast-less track[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 102: 195-214.
- [3] Li Xiaozhen, Liang Lin, Wang Danxiong. Vibration and noise characteristics of an elevated box girder paved

- with different track structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 425(7): 21-40.
- [4] Fang Lei, Yao Jinbao, Xia He. Prediction on soil-ground vibration induced by high-speed moving train based on artificial neural network model[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(5): 1-10.
- [5] Shi Li, Sun Hong-lei, Pan Xiao-dong, et al. A theoretical investigation on characteristic frequencies of ground vibrations induced by elevated high speed train[J]. Engineering Geology, 2019, 252: 14-26.
- [6] Lu Jian-fei, Feng Qing-song, Jin Dan-dan. A dynamic model for the response of a periodic viaduct under a moving mass[J]. European Journal of Mechanics A Solids, 2019, 73: 394-406.
- [7] Fabrizio Gara, Regni Marco, Roia Davide, et al. Evidence of coupled soil-structure interaction and site response in continuous viaducts from ambient vibration tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 120: 408-422.
- [8] Liu Quanmin, Thompson David J, Xu Peipei, et al. Investigation of train-induced vibration and noise from a steel-concrete composite railway bridge using a hybrid finite element-statistical energy analysis method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 471: 115-197.
- [9] Cao Zhigang, Xu Yifei, Gong Wenping, et al. Probabilistic analysis of environmental vibrations induced by high-speed trains[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 139: 106343.
- [10] Rachedi Mohammed, Matallah Mohammed, Kotronis Panagiotis. Seismic behavior & risk assessment of an existing bridge considering soil-structure interaction using artificial neural networks [J]. Engineering Structures, 2021, 232: 111800.
- [11] Ma Longxiang, Ouyang Huajiang, Sun Chang, et al. A curved 2.5D model for simulating dynamic responses of coupled track-tunnel-soil system in curved section due to moving loads [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 451(7): 1-31.
- [12] 吴攀. 基于 TLM-PML-VM 方法的群桩-地基土动力相互作用理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
Wu Pan. Theoretical study on the dynamic interaction of group piles and foundation soil based on TLM-PML-VM method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [13] 蒋通, 田治见宏. 地基-结构动力相互作用分析方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- [14] 朱艳. 车桥系统随机振动理论与应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
Zhu Yan. Theory and application of random vibration of vehicle-bridge system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [15] 李小珍, 张志俊, 刘全民. 任意移动荷载列作用下简支梁桥竖向振动响应解析分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 137-142.
Li Xiao-Zhen, Zhang Zhi-Jun, Liu Quan-Min. Analytical analysis of vertical vibration response of simply supported beam bridges under arbitrary moving load train [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 137-142.
- [16] 蒋通, 程昌熟. 用薄层法分析层状地基中各种基础的阻抗系数[J]. 力学季刊, 2007, 28(2): 180-186.
Jiang Tong, Cheng Chang-Shu. Using thin layer method to analyze the impedance coefficient of various foundations in layered foundation [J]. Quarterly Journal of Mechanics, 2007, 28(2): 180-186.
- [17] International Organization for Standardization. Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole body vibration part 1: general requirements; ISO 2631-1[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [19] 李子惠. 高速列车-轨道-地基土非平稳随机振动分析及场地反应谱研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Li Zi-Hui. Analysis of non-stationary random vibration of high-speed train-track-foundation soil and site response spectrum[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [20] 《城市区域环境振动标准》编制组. 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
Drafting Group of Standard. Standard of environmental vibration in urban area: GB 10070—1988[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988.
- [21] 建设部科技发展促进中心、深圳市地铁有限公司. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准: JGJ/T 170—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Science and Technology Development Promotion Center, Ministry of Construction, Shenzhen Metro Co., Ltd. Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit: JGJ/T 170—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

Response spectrum analysis of field vibrations surrounding high-speed railway bridge

CAO Yan-mei¹, YANG Lin^{2,3}, LI Zhe¹, LI Dong-wei¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory for Health and Safety of Bridge Structures, Wuhan 430034, China; 3. China Railway Bridge Science Research Institute, Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: In order to predict and evaluate the environmental vibration caused by the viaduct rail traffic, this paper proposes a semi-analytical and semi-numerical method, in which the high-speed train-periodic bridge-pile group foundation-soil coupling model is established on the basis of the d'Alembert principle, the infinite periodic structure theory and the thin layer method with perfectly matched layer-volume method. Furthermore, the prediction method is accomplished by Matlab programming and validated by existed results. The concept of field vibration response spectrum (FVRS) is proposed, whose characteristics are analyzed by a numerical example, respectively from the influence of train speed, predominant period of site soil, and the location of the ground measurement points. At the same time, the environmental vibration threshold induced by the high-speed train running on the bridge is obtained in conjunction with the relevant specification allowances. The research results show that the vertical displacement maximum and vibration level of ground vibration have the tendency of increasing with the predominant period of site soil, while there exists the amplifying phenomena in vibration level for certain ground receivers. When the maximum vertical displacement is taken as the evaluation index of ground vibration, the FVRS can reflect the variety velocity of ground vibration. When the vibration level VLz is taken as the evaluation index, the FVRS can reflect the local properties and effects of site predominant period, distance away from the center of bridge pier and train speed. So the choose of vibration evaluation index should be comprehensive. The FVRS and the vibration threshold graph cannot only provide the referenced rational location surrounding the rail traffic for the proposed building under the requirement of meeting different vibration allowances, but also evaluate the influence of environmental vibrations induced by viaduct rail traffic on existed buildings.

Key words: environmental vibration; elevated rail traffic; periodic bridge structure; field vibration response spectrum; vibration threshold

作者简介: 曹艳梅(1979—),女,副教授。电话:13691304561; E-mail: ymcao@bjtu.edu.cn。