

振源传导桩隔振系统作用机理与性能*

袁俊¹, 孟昭博², 胡卫兵³, 常玉珍³, 吴敏哲³

(1. 西北电力设计院 西安, 710075) (2. 聊城大学建筑工程学院 聊城, 252059)

(3. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安, 710055)

摘要 针对目前振动控制措施对轨道交通运营中低频振动的控制效果欠佳的问题, 提出一种新型的减振措施——振源传导桩隔振系统。通过分析振源传导桩隔振系统的作用机理和结构布置, 建立了振源传导桩隔振系统的数值模型, 并以西安地铁二号线钟楼段为例进行参数分析, 评价了该系统的减振性能。结果表明, 振源传导桩系统具有良好的减振性能。隧道上方地面的振动速度和加速度随传导桩的桩长增加而显著降低。列车运营速度在 22.22 m/s 以下时, 车速变化对系统隔振效果影响不大。车速大于 22.22 m/s 时, 地面振动响应幅值明显随车速的提高而增大, 应适当增加传导桩的桩长。

关键词 轨道; 减振; 动力响应; 低频振动; 振源传导桩系统

中图分类号 X707; TH702

引言

根据振动的产生机理、传播规律以及受振对象的响应特点, 轨道交通系统的减振降噪措施可以从降低振源强度、切断振动传播途径和建筑物隔振 3 个方面采取控制对策^[1-3]。目前, 已有的振源强度控制措施可以对轨道交通运营引起中、高频振动起到较好的减振效果, 但对低频振动的控制效果欠佳^[4-5]。建筑物隔振措施大多沿袭以往抗震设计的思想, 对交通激励引起的低频振动控制作用有限, 其减振技术也仅限于在新建的建筑物中使用, 对已有的脆弱敏感建筑和古建筑则难以通过简单加固和控制措施来满足安全使用标准和文物保护要求。此外, 建筑隔振措施仅能保护沿线点状分布的重要单体, 对分布在轨道线路两侧长距离线状影响范围的生产、生活区, 实现群体控制的技术难度和费用成本较高。

在传播途径控制措施中, 由于天然土体的辐射阻尼和材料阻尼作用, 在经过粘弹性介质中远距离的传播后, 低频和高频振动均能得到有效的衰减。因此, 研究地铁振动在介质中的衰减规律时, 众多学者将观测点与振源之间的距离作为描述振动能量衰

减的决定性因素之一^[6-8]。大量的实测表明^[9-11], 只要能避开振动能量在土体层状界面和土体基岩折射、反射形成的放大区域, 加大隧道的埋深或使轨道线路远离敏感建筑是最简单有效的方法。但由于城市交通总体规划的需求, 在历史名城内修建城市轨道交通线路很难完全避开古建筑和其他敏感建筑。同时, 振波的传播规律表明, 对于普通的隧道埋深而言, 高频振动能量从隧道壁传至地表已经得到了明显的衰减, 而中低频振动则需要经过更长的传播距离才能实现足够的衰减^[12-13]。为满足中低频振动的减振要求而过度加大埋深将会显著增加修建成本, 因此研究经济高效的中低频振动控制措施是目前工程中亟待解决的问题。

针对目前已有减振措施的局限, 笔者提出了一种新型的减振措施——振源传导桩隔振系统。在不增加隧道埋深的情况下, 根据不同的减振要求, 将振源通过减振桩从隧道壁传递至隧道下的深层土体, 经济合理地实现对低频振动的衰减。同时阐述了振源传导桩隔振系统的作用原理和结构布置, 给出了荷载-传导桩-轨道板耦合动力学方程。以西安地铁二号线钟楼段为例建立了有限元模型进行参数分析, 评价了振源传导桩系统的减振性能。

* 国家自然科学基金资助项目(51378245, 51248003); 陕西省科学技术研究发展计划资助项目(2010K11-05-01); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JQ7014); 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(09JK521); 西安市科技计划资助项目(YF07207)

收稿日期: 2013-01-07; 修回日期: 2013-03-12

1 振源传导桩隔振系统的作用原理与结构布置

振源传导桩隔振系统的作用机理如图1所示。将地铁道床直接支承在传导桩上,使道床和隧道衬砌脱离。传导桩的桩身采用套筒与周围土体隔离,根据地质条件和荷载大小,仅设置桩头或桩端部的有限段长与土层接触,利用桩端阻力和桩端附近部分桩身与土接触产生的摩阻力满足隔振系统的承载要求,同时将列车对轨道的动力和静力作用完全传到桩底。由于系统的隔离机制,隧道壁和桩身套筒周围的土体不产生振动,这样使所有的振动能量从桩底传至地表,让桩底成为新的振源。另外,根据减振需求的不同,利用桩的长度来控制振源的埋深。对不需要减振的地段可不设置振源传导桩;对一般减振段的区域采用短型传导桩;对减振要求较高的区域采用长型传导桩。在不同桩长的连接区域设置过渡段和协调单元满足轨道结构变形和列车行驶安全的要求,这样可避免因减振引起的隧道深埋过度增加带来的高昂费用,合理实现对低频和低频振动的有效控制。

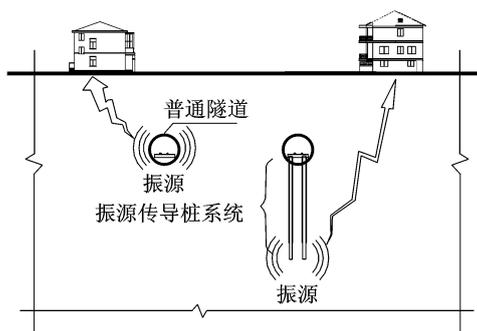


图1 振源传导桩隔振系统作用机理

Fig. 1 Vibration isolation mechanism of excitation transmission pile system

振源传导桩隔振系统的结构如图2所示,传导桩和轨道结构用混凝土材料制作并浇筑在一起,不与隧道结构连接,桩身套筒采用弹性隔振材料制作与隧道壁相连。

2 振源传导桩隔振系统的数值模型

振源传导桩系统由“列车-轨道结构-传导桩-土体”组成完整的能量传导体系,各子结构的数值模型分别建立。

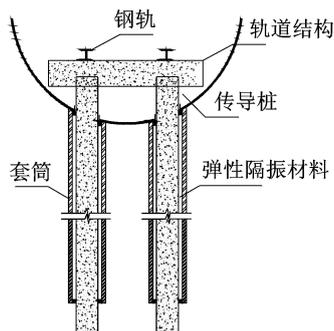


图2 振源传导桩隔振系统结构布置

Fig. 2 Arrangement of excitation transmission pile system

2.1 列车荷载模型

根据轮/轨作用及振动传播机理,振源的竖向激励可分为准静态激励、参量激励、不平顺激励、冲击激励和高速运动激励(马赫锥激励)。在过去的研究中往往采用单一机理形成的激励模拟振源,如Takemiya^[14-15], Fryba^[16]仅采用了准静态激励或采用简谐荷载模拟不平顺激励计算地面和轨道的响应。这样模拟的激励频谱成分过于集中,从频域分析来看并不能反应真实的激励情况。

除高速运动激励作用效应外,轨道结构在列车运行下的变形基本满足线弹性和小变形的假定。轨道结构在不同激励下发生的静态和动态变形以机械波的形式传递和衰减。基于机械波的线性可叠加性,笔者在已有研究的基础上,提出合成激励的方法,将不同激励作用下的轨道静态和动态变形曲线看成是不同扰动源作用下产生的弹性波,各类激励在轨道固定观测点上作用的总效应可以用变形曲线的叠加值来表示。

由图3所示,对不同的激励可假设为 $F_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 分别对应准静态激励、参量激励、不平顺激励、冲击激励和高速运动激励。由于城市轨道交通一般限速在80 km/h以下,列车速度远低于大地中面波、体波的速度和轨道结构中弯曲波的最小相速度,因此这里不讨论高速运动激励 F_5 出现的情况。另外,在城市轨道交通系统中普遍采用了无缝焊接轨道且养护较好,轨下基础缺陷、轨头接触不良、钢轮扁疤的情况并不明显,可忽略冲击激励出现的情况。在此笔者仅考虑了准静态激励 F_1 、参量激励 F_2 、不平顺激励 F_3 的合成。

假定轨道结构在 F_i 作用下的变形为 y_i ,根据 y_i 计算出作用在隧道上的激励 F_{1i} 为

$$F_{1i} = (k + c \frac{\partial}{\partial t}) y_i \quad (1)$$

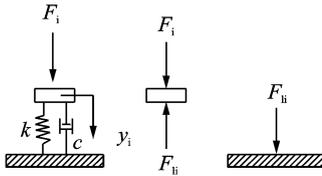


图 3 轨道结构纵向剖面图

Fig. 3 Longitudinal section of track structure

由于 y_i 被假定具有线性可叠加性,则在各类激励合成下的总变形曲线 y 为

$$y = \sum y_i = y_1 + y_2 + y_3 \quad (2)$$

作用在隧道上的激励可根据总的变形曲线写为

$$F_1 = (k + c \frac{\partial}{\partial t})y = (k + c \frac{\partial}{\partial t}) \sum y_i = (k + c \frac{\partial}{\partial t})(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (3)$$

假定钢轨采用 60 kg/m 的重型钢轨,取抗弯刚度(EI)为 $6.4155 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,支承刚度 k 为 $52.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 。取轴重为 17 t,合成激励 F_1 时程曲线如图 4 所示。

2.2 轨道结构-传导桩-土体模型

以西安地铁二号线钟楼地段为例分析振源传导桩隔振系统的性能。钟楼段场地土的剪切波速 c_s 和压缩波速 c_p ,动剪切模量和动泊松比与波速的关系^[17-18]为

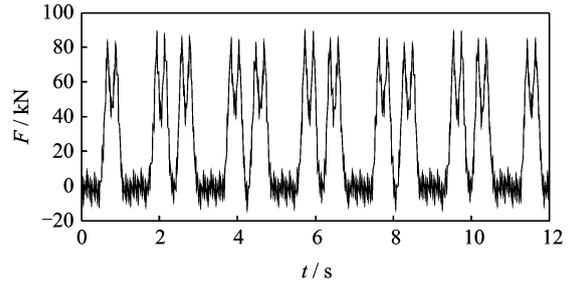
$$G_d = c_s^2 \rho \quad (4)$$

$$c_p = kc_s^\alpha \quad (5)$$

$$E_d = \frac{\alpha c_s^2 (3c_p^2 - 4c_s^2)}{c_p^2 - c_s^2} \quad (6)$$

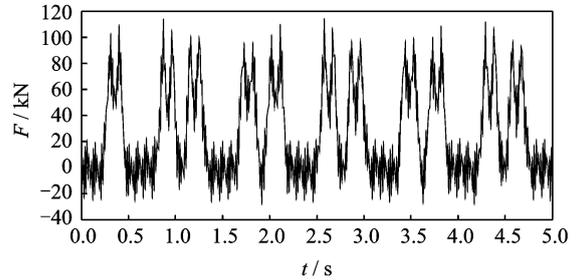
$$\nu_d = \frac{c_p^2 - 2c_s^2}{2(c_p^2 - c_s^2)} \quad (7)$$

其中: c_s 为土的剪切波速; ρ 为土的密度;取 $k = 1.765$; $\alpha = 0.98$ 。



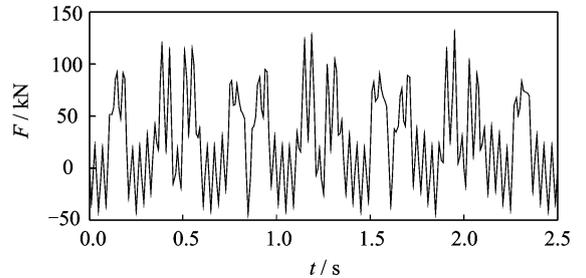
(a) 列车速度 $v = 10 \text{ m/s}$

(a) Train speed $v = 10 \text{ m/s}$



(b) 列车速度 $v = 22.22 \text{ m/s}$

(b) Train speed $v = 22.22 \text{ m/s}$



(c) 列车速度 $v = 50 \text{ m/s}$

(c) Train speed $v = 50 \text{ m/s}$

图 4 不同列车速度下的合成激励

Fig. 4 Composite excitation with different train speeds

钟楼地段场地土剪切波速^[19]和地层结构分布如图 5 所示。将计算场地土简化为 6 层,由式(4)~(7)可得计算场地土的动力参数如表 1 所示。

表 1 计算场地土的动力参数

Tab. 1 Calculating parameters of ground soil

土层编号	土层平均厚度 /m	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	剪切波速 $c_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	压缩波速 $c_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动剪切模量 G_d / MPa	动泊松比 ν_d	动弹性模量 E_d / MPa
1	4.5	1 780	162.75	259.43	47	0.175	110
2	2.5	1 790	244.56	386.68	107	0.166	249
3	4.5	2 040	291.71	459.61	174	0.163	403
4	3.5	2 030	343.46	539.39	239	0.159	555
5	6.0	2 020	325.19	511.25	214	0.160	495
6	>60	2 060	361.13	566.57	269	0.158	622

注:表中的剪切波速为各土层厚度范围内的平均剪切波速

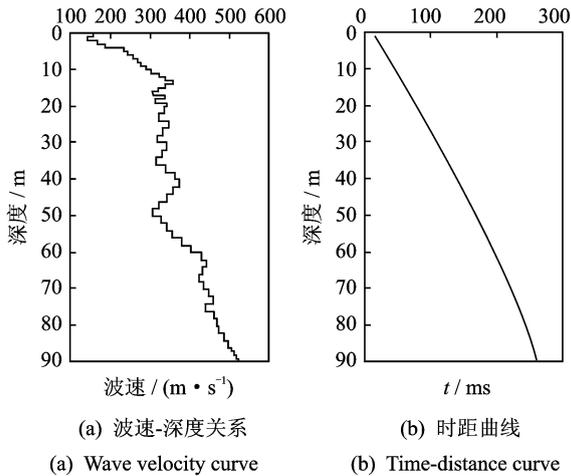


图5 钟楼地段场地土剪切波速测试结果

Fig. 5 Shear wave velocity of soil in Xian bell tower section

由于在振动荷载作用下,黄土动弹性模量随动应变的增加而减小^[19],考虑到轨道交通荷载引起土的动应变较小,计算时将表1中的动弹性模量折减5%。

根据西安地铁二号线钟楼地段的隧道工况建立振源传导桩隔振系统的 ANSYS 有限元模型,如图6和图7所示,并在左侧隧道内施加单洞荷载,用H线代表隧道上方地表各质点。

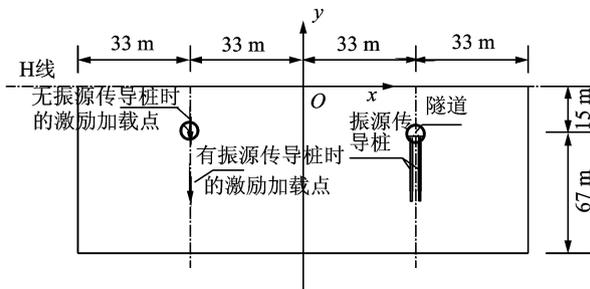


图6 振源传导桩各关键点、线示意图

Fig. 6 Key nodes and lines of excitation transmission pile system

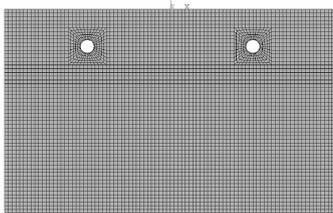


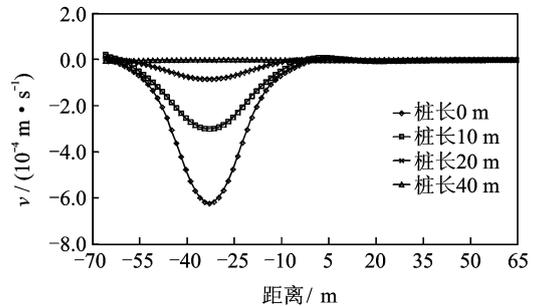
图7 土层有限元模型

Fig. 7 Finite element model of soils

3 振源传导桩隔振系统减振性能分析

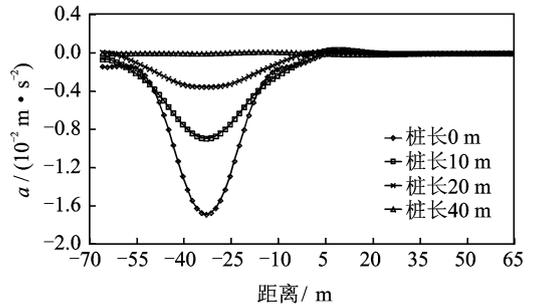
3.1 振源传导桩桩长变化对减振效果的影响

为评价列车行驶速度为 22.22 m/s 时,传导桩桩长变化对减振效果的影响,分别在左侧隧道壁以下 0,10,20,40 m 处施加图 4(b) 中的合成激励,计算桩长为 0,10,20,40 m 时 H 线上的速度和加速度幅值曲线,如图 8 所示。



(a) 竖向速度幅值

(a) Vertical velocity amplitude



(b) 竖向加速度幅值

(b) Vertical acceleration amplitude

图8 不同桩长时 H 线上各点响应

Fig. 8 Dynamic responds of nodes on H-line under different pile length

由图8可以看出,隧道中心上方($x = -33$ m 处)的地面质点在无振源传导桩(桩长为 0 m)时的竖向速度幅值是传导桩桩长为 10,20,40 m 时的 2.079 倍,7.378 倍和 2358.333 倍。无振源传导桩时,隧道上方地面竖向速度幅值为 -6.226×10^{-4} m/s,振源传导桩桩长为 40 m 时,竖向速度幅值为 -2.64×10^{-7} m/s。无振源传导桩时,隧道上方地面质点竖向加速度幅值是传导桩桩长为 10,20,40 m 的 1.887 倍,4.757 倍和 297.705 倍。无传导桩时,隧道上方地面质点加速度幅值为 -1.69×10^2 m/s²,振源传导桩桩长为 40 m 时加速度幅值为 -5.203×10^{-5} m/s²。由此可知,振源传导桩对隧

道上方地面质点的减振效果随桩长增加明显增强。另外,由图 8 可知,地面质点距隧道中心线的距离越远,在土中得到的衰减越多,当地面建筑物距隧道中心线 50 m 以上时,采用振源传导桩和无传导桩的速度和加速度幅值差别不大。

3.2 列车移动速度对减振效果的影响

列车移动速度是影响竖向激励变化规律和幅值大小的主要因素之一。实测证明^[20-21],列车激励强度及地面的振动响应随着列车的移动速度增加而增大,因此列车移动速度是影响振源传导桩系统隔振效率的主要因素之一。这里计算了无传导桩和桩长为 20 m 的工况下,列车以 10,22.22 和 50 m/s 的速度行驶在左侧隧道时,H 线上各点的竖向速度和加速度。

22.22,50 m/s 时,左侧隧道上方地面点的竖向速度分别为 10 m/s 时幅值的 1.11 倍和 1.65 倍,竖向加速度分别为 10 m/s 时幅值的 1.06 倍和 1.33 倍。

因此,当列车车速低于 22.22 m/s 时,列车速度的变化对具有振源传导桩减振后的地面振动响应幅值影响不大;当列车车速高于 22.22 m/s,车速的对地面点的竖向速度和加速度的幅值影响开始增大。考虑车速变化时,列车最大运营速度小于 22.22 m/s,可不考虑车速对减振效果的影响;列车最大运营速度大于 22.22 m/s 时,应适当增加桩长以满足振动控制要求。同时也可以看出,地面质点距离隧道中心线 20 m 的范围内,由于竖向速度和加速度幅值急剧衰减,当距离隧道中心线 40 m 外,列车车速对竖向速度和加速度的幅值已无明显影响。

4 结 论

1) 振源传导桩系统具有良好的减振性能。隧道上方的地面点的振动随着传导桩的桩长增加而明显降低。当振源传导桩桩长达到 40 m,列车以 22.22 m/s 的速度运营时,地面点的竖向振动速度幅值约为 -2.64×10^{-7} m/s,加速度幅值约为 -5.20×10^{-5} m/s²,为减振前的 4.24×10^{-4} 倍和 3.35×10^{-3} 倍,对敏感建筑的振动影响已可忽略不计。

2) 当地面质点距隧道中心线的距离越远,在土中得到的衰减越多。当地面质点距隧道中心线 50 m 时,采用振源传导桩和无传导桩时的速度和加速度幅值差别不大。

3) 当列车车速低于 22.22 m/s 时,车速的变化对相同桩长的传导桩减振效果影响不大。当列车速度高于 22.22 m/s 时,车速越高,地面点的竖向速度和加速度的幅值越大,需要增大桩长才能满足减振需求。

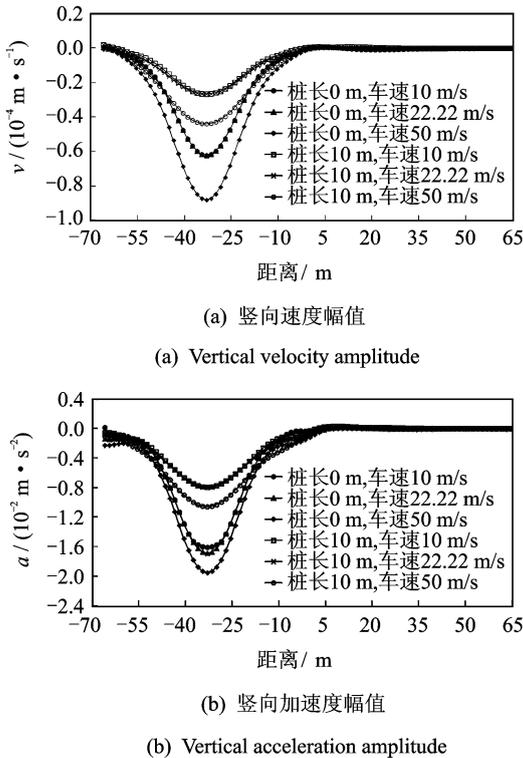


图 9 车速变化时 H 线上各点响应

Fig.9 Dynamic responds of nodes on H-line under different train speed

由图 9 所示,列车的移动速度越大,地面点的竖向速度和加速度幅值越大。在无传导桩的工况下,车速为 22.22 m/s 和 50 m/s 时,左侧隧道上方地面点的竖向速度分别为 10 m/s 时幅值的 1.09 倍和 1.42 倍,竖向加速度分别为 10 m/s 时幅值的 1.05 倍和 1.21 倍。

在传导桩桩长为 10 m 的工况下,车速为

参 考 文 献

[1] Ludvigh E. Mitigation of railway noise and vibration concentrating on the “reducing at source” methods [J]. Railways, 2004, 1(2):3-11.
 [2] Hussein M F M, Hunt H E M. A numerical model for calculating vibration from a railway tunnel embedded in a full-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305(3):401-431.
 [3] 袁俊,胡卫兵,孟昭博,等. 浮置板轨道结构类型比

- 较及隔振性能分析[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(2):223-228.
- Yuan Jun, Hu Weibing, Meng Zhaobo, et al. Comparison of different models for assessing vibration isolation performances of loading slab track system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2):223-228. (in Chinese)
- [4] Thompson D. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control[M]. UK: Oxford, Elsevier Science, 2009.
- [5] Nelson J T. Recent developments in ground-borne noise and vibration control[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1):367-376.
- [6] Kurzweil G. Ground borne noise and vibration from underground rail systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3):363-370.
- [7] Lang J. Result of measurements on the control of structure-borne noise from subways[C]// Seventh International Congress on Acoustics. Budapest:[s. n.], 1971:421-424.
- [8] Urgar E E, Bender E K. Vibrations produced in buildings by passage of subway trains: parameter estimation for preliminary design[C]// Proceedings of Inter-noise 1975. Sendi:[s. n.], 1975:491-498.
- [9] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社, 2010:385-402.
- [10] Crocker M J. Handbook of noise and vibration control [M]. New York:John Wiley and Sons, 2007.
- [11] 闫维明, 聂晗, 任珉, 等. 地铁交通引起的环境振动的实测与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 187-191.
- Yan Weiming, Nie Han, Ren Min, et al. Insitu experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 187-191. (in Chinese)
- [12] Gupta S, Hussein M F M, Degrande G, et al. A comparison of two numerical models for the prediction of vibrations from underground railway traffic[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(7): 608-624.
- [13] Sheng X, Jones C J C, Thompson D J. Ground vibration generated by a harmonic load moving in a circular tunnel in a layered ground[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2003, 22(3):83-96.
- [14] Takemiya H. Simulation of track-ground vibrations due to a high-speed train: the case of X-2000 at Leds-gard[J]. Journal of Sound and Vibration, 261(3): 503-526.
- [15] Takemiya H. Analyses of wave field from high-speed train on viaduct at shallow/deep soft grounds [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(3): 631-649.
- [16] Fryba L. Vibration of solids and structures under moving loads[M]. Noordhoff: Groningen, 1972.
- [17] 王兰民. 黄土地力学[M]. 北京:地震出版社, 2003: 189-205.
- [18] 谷天峰. 郑西客运专线黄土地基振(震)陷研究[D]. 西安:西北大学, 2007.
- [19] 西北有色勘测工程公司. 西安市城市快速轨道交通二号线(铁路北客站-韦曲段)工程(钟楼)工点岩土工程勘察报告[R]. 西安:西北有色勘测工程公司, 2006.
- [20] 孟昭博, 袁俊, 吴敏哲. 行驶车辆对西安钟楼木结构微振动影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2009, 41(4):512-517.
- Meng Zhaobo, Yuan Jun, Wu Minzhe. Experiment investigation of micro-vibration in wooden structure of Xi'an Bell Tower caused by traffic vehicles[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(4):512-517. (in Chinese)
- [21] Hanson C E, Towers D A, Meister L D. Transit noise and vibration impact assessment[R]. Washington: Office of Planning and Environment, Federal Transit Administration, 2006.



第一作者简介:袁俊,男,1983年2月生,博士。主要研究方向为结构与环境振动分析及控制。曾发表《基于双层 Euler-Bernoulli 梁理论的浮置板轨道隔振研究》(《西安建筑科技大学学报:自然科学版》2009年第41卷第5期)等论文。E-mail:j. yuan@hotmail.com

