

丑亚玲,刘文高,乔雄,等.基于交通振动环境下建筑结构损伤机理及减振隔振的研究现状[J].地震工程学报,2021,43(3):654-662.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.654

CHOU Yaling, LIU Wengao, QIAO Xiong, et al. Research Status of Damage Mechanism of Building Structures and Associated Vibration Reduction and Isolation in Traffic Vibration Environment[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 654-662. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.654

## 基于交通振动环境下建筑结构损伤机理及 减振隔振的研究现状

丑亚玲, 刘文高, 乔 雄, 倪伟淋

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 随着交通建设的发展,越来越多的公路要临近已有建筑物通过,而由于建设或重车通行引起的振动对周边建筑结构产生了很大的安全威胁,严重的甚至造成了建筑结构的损坏。论文通过对交通振动下建筑结构的振动控制标准和在振动中的损伤机理进行综述,系统总结了交通振动对建筑影响的方法,介绍了目前交通振动对建筑结构安全性影响的研究现状和方法,分析了减振隔振的发展现状,创新性的提出将疲劳寿命作为建筑结构振动容许值的参考依据。在总结分析现状的情况下提出目前存在的问题,给出了相关的意见和建议,可为今后的相关研究提供参考。

**关键词:** 交通振动; 建筑结构; 损伤机理; 减振隔振; 疲劳寿命

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)03-0654-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.654

## Research Status of Damage Mechanism of Building Structures and Associated Vibration Reduction and Isolation in Traffic Vibration Environment

CHOU Yaling, LIU Wengao, QIAO Xiong, NI Weilin

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** With the development of traffic construction, more and more roads have to pass near existing buildings. Therefore, the vibration caused by construction or heavy vehicle traffic poses a great security threat to surrounding building structures, and even causes serious damage. In this paper, the vibration control standards of building structures under traffic vibration and the damage mechanism caused by vibration were reviewed, and the research status and methods for the influence of traffic vibration on the safety of building structures were introduced. The development status of vibration reduction and isolation was analyzed, and the fatigue life was innovatively taken as the reference basis for the allowable value of building structure vibration. Based on the

收稿日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(51769013); 甘肃省基础研究创新群体(20JR5RA478)

第一作者简介: 丑亚玲(1976-), 女, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: chouyaling@lzb.ac.cn。

通信作者: 乔雄(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程的科研教学。E-mail: qiaoxiong7599@qq.com。

summary and analysis of current situation, the existing problems were put forward, and the relevant opinions and suggestions were given, which can provide reference for future related research.

**Keywords:** traffic vibration; building structure; damage mechanism; vibration attenuation and isolation; fatigue life

## 0 引言

自 1825 年世界上第一条铁路在英国建成通车开始,世界交通运输产生了革命性的变化,大大促进了人类社会的进步和科学技术的发展。但是随之而来的各种环境振动问题接踵而至,由于交通而产生的振动对现代建筑<sup>[1-4]</sup>、古建筑<sup>[5-8]</sup>、精密仪器<sup>[9-12]</sup>等的损害案例比比皆是。交通振动的产生与传播是一个复杂的异常过程,是一个高频率和低频率振动的复合体,高频振动衰减快,低频振动衰减慢<sup>[13]</sup>,其产生的振动问题较为复杂。数据统计表明,除了工厂作业振动和建筑工程施工振动外,人们反应最为强烈的振源即为道路交通振动<sup>[14]</sup>。交通振动对建筑结构的影响主要体现在振动的持久性和复杂性上,这种振动既可能造成脆性建筑结构的疲劳损坏,也可能造成建筑物产生不均匀沉降,严重的会导致建筑主体的开裂甚至倒塌。而目前关于交通振动影响下建筑结构的损伤机理研究不够全面,控制标准没有统一的规范可以依靠,减振隔振措施缺乏科学的评价标准。因此,开展交通振动环境下建筑结构的损伤机理及减振隔振方面的相关研究,具有重要的理论价值和实际意义。

本文对已有研究成果进行梳理分析,从交通振动对建筑结构影响的研究方法、建筑结构振动控制标准、建筑结构疲劳损伤和建筑结构减振隔振措施四个方面,总结分析交通振动环境下建筑结构损伤机理以及建筑结构减振隔振方面的研究现状。

## 1 交通振动对建筑影响的研究方法

目前,交通振动对临近建筑物影响的研究已有了长足的发展。在国外,Chikaaki<sup>[15]</sup>最早开始致力于交通振动的研究,提出了交通振动环境下高架铁路桥梁的振动形式,为后来交通振动的发展提供了先导性的理论基础。而我国关于交通振动方面的研究最早开始于茅玉泉<sup>[16]</sup>对交通运输车辆引起的地面振动特性和衰减的研究,采用数理统计复合回归的方法,探讨了振动传播的衰减规律,提出了地面垂直和水平振动衰减的经验公式,以此为开始,我国对于交通振动方面的研究有了突破性的进展。

由于目前交通行业的快速发展,对于交通所产生振动的研究得到了学术界的广泛关注,表 1 列出了目前国内外关于交通振动环境下建筑结构受损情况的部分研究案例及其主要研究方法。

表 1 目前针对交通振动研究的相关案例

Table 1 The related cases of traffic vibration research at present

研究对象	主要研究振动形式	振源类别	研究方法	文献来源
青藏铁路	高频振动+低频振动	国家铁路	现场实测+有限元模型	陈士军 <sup>[17]</sup>
秦—沈铁路	高频振动	国家铁路	现场实测+数值分析	高广运,等 <sup>[18]</sup>
成都地铁	高频振动	地铁	数值分析	邢梦婷 <sup>[19]</sup>
成绵乐客运专线	低频振动	国家铁路	现场实测+数值分析	罗林 <sup>[20]</sup>
深圳地铁	高频振动	地铁	现场实测+数值分析	王媛,等 <sup>[21]</sup>
成灌线	高频振动	国家铁路	现场实测+经验分析	田苗 <sup>[22]</sup>
苏州城市轨道	高频振动	地铁	现场实测+有限元模型	候晋 <sup>[23]</sup>
郑西高铁	高频振动	高铁	预测模型+现场实测	向怡 <sup>[24]</sup>
南昌轨道一号线	低频振动	地铁	现场实测+数值分析	赵狮 <sup>[25]</sup>
沪宁城际高铁	高频振动	高铁	现场实测+经验分析	马利衡 <sup>[26]</sup>
宁波轨道	高频振动	地铁	有限元模型+经验分析	程焯,等 <sup>[27]</sup>
晋中至太原城际铁路	高频振动	国家铁路	现场实测+数值分析	赵龙 <sup>[28]</sup>
成渝高铁	高频振动	高铁	现场实测+数值分析	彭也也,等 <sup>[29]</sup>
南京地铁一号线	高频振动	地铁	现场实测+经验分析	高波,等 <sup>[30]</sup>
古建筑	低频振动	城市轨道交通	现场实测+数值分析	Bate <sup>[31]</sup> 、Watts,等 <sup>[32]</sup>
古建筑	低频振动	地铁	现场实测+数值分析	Bongiovanni,等 <sup>[33]</sup>
科隆大教堂	低频振动	地铁	现场测试+经验分析	Hinzen <sup>[34]</sup>

由表 1 可以看出,目前关于交通振动环境下建筑结构受影响的研究方法主要有 4 种:(1)根据现场

实际情况进行测试和数值计算相结合的方法;(2)基于有限元模型的数据分析方法;(3)预测模型的建立

和现场实测数据对比方法;(4)根据国家标准和规定的经验分析法。

基于这4种方法,在研究交通振动问题时,可根据所研究项目选定相适应的方法,4种研究方法各有优缺点,在确定研究方法时,应充分考虑各种环境因素以及现场条件的限制,以此来选定最终的研究方法。目前选用最多的为现场实测和数值分析相结合的方法,此方法可以避免由于经验分析带来的缺乏通用性的问题,同时也可以避免由于预测模型所带来的不确定性以及数据参数的不确定性带来的误

差因素,也可以避免由于单一数据分析引起结论的不完整性问题,同时该方法可以与预测模型相结合来提高试验研究的精确性和严谨性。

## 2 建筑结构振动控制标准的研究现状

目前我国关于振动对建筑结构控制标准的划分,主要分为现代建筑和古建筑,对于比较脆弱的文物建筑,国家现行的振动标准来源于《古建筑防工业振动技术规范》<sup>[35]</sup>。对于古建筑结构控制标准见表2。

表2 古建筑容许振动速度 $[v]$ (单位:mm/s)

Table 2 Allowable vibration rate of ancient architecture $[v]$ (Unit: mm/s)

建筑类型	保护级别	控制点位置	控制点方向	$v_p/(m \cdot s^{-1})$		
				$<1\ 600$	$1\ 600 \sim 2\ 100$	$>2\ 100$
砖砌体	I类	承重结构最高处	水平	0.15	0.15~0.20	0.20
	II类			0.27	0.27~0.36	0.36
	III类			0.45	0.45~0.60	0.60
石砌体	I类	承重结构最高处	水平	$<2\ 300$	$2\ 300 \sim 2\ 900$	$>2\ 900$
	II类			0.20	0.20~0.25	0.25
	III类			0.36	0.36~0.45	0.45
木结构	I类	承重结构最高处	水平	0.60	0.60~0.75	0.75
	II类			$<4\ 600$	$4\ 600 \sim 5\ 600$	$>5\ 600$
	III类			0.18	0.18~0.22	0.22
	I类	承重结构最高处	水平	0.25	0.25~0.30	0.30
	II类			0.29	0.29~0.35	0.35
	III类					

注: I类:全国重点文物保护单位; II类:省级文物保护单位; III类:市、县级文物保护单位。

砖砌体:当 $v_p$ 介于 $1\ 600 \sim 2\ 100$  m/s之间时, $[v]$ 采用插入法取值。

石砌体:当 $v_p$ 介于 $2\ 300 \sim 2\ 900$  m/s之间时, $[v]$ 采用插入法取值。

木结构:当 $v_p$ 介于 $4\ 600 \sim 5\ 600$  m/s之间时, $[v]$ 采用插入法取值。

根据《城市区域环境振动标准》<sup>[36]</sup>中规定,在连续发生稳态振动、冲击振动和无规律振动的建筑结构区域附近内应满足表3的标准要求。

表3 城市各类区域铅垂向Z振级标准值表(单位:dB)

Table 3 Standard value of vertical vibration in various urban areas (Unit: dB)

适用地带范围	昼间	夜间
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

注:“特殊住宅区”是指特别需要安宁的住宅区。“居民、文教区”是指纯居民和文教、机关区。“混合区”是指一般商业与居民混合区;工业、商业、少量交通与居民混合区。“商业中心区”是指商业集中的繁华地区。“工业集中区”是指在一个城市或区域内规划明确确定的工业区。“交通干线道路两侧”是指车流量每小时100辆以上的道路两侧。“铁路干线两侧”是指距每日车流量不少于20列的铁道外轨30 m外两侧的住宅区。

根据我国现行标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013<sup>[37]</sup>规定,交通振动对建筑结构影响

在时域范围内的容许振动值,宜按表4的规定采用。根据德国标准DIN4150-3-1999<sup>[38]</sup>中对各种振源对邻近建筑物的振动影响,其控制标准如表5所列。通过对比我国和德国交通振动对建筑结构影响的容许振动值可以看出,我国对于交通振动的控制标准较为严格,特别是我国古建筑振动标准的严格性要远远高于国外<sup>[39]</sup>。但在目前关于普通建筑物对交通振动控制标准的研究上,这些标准在制定和使用上依然存在着一些问题,由于交通振动而引起临近建筑物动力响应的评价标准没有统一的规范可寻,仍然存在有很多问题未得到解决,在振动控制的标准制定上专家学者未达成一致<sup>[40-42]</sup>。例如在《古建筑防工业振动技术规范》中,关于古建筑的振动评价指标是速度;在《城市区域环境振动标准》中,通常用Z振级为振动评价标准,同时多采用整个频段的总响应量作为结果;而在《建筑工程容许振动标准》中,又以振动速度作为古建筑和结构物两种建筑的共同评价指标。

表 4 交通振动对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值

Table 4 Allowable value of traffic-induced vibration of building structures in time domain

建筑物类型	顶层楼面处容许振动 速度峰值/(mm·s <sup>-1</sup> )		基础处容许振动速度峰值/(mm·s <sup>-1</sup> )		
			1~10 Hz	50~50 Hz	50~100 Hz
	1~100 Hz				
工业建筑、公共建筑	10.0		5.0	10.0	12.5
居住建筑	5.0		2.0	5.0	7.0
对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑	2.5		1.0	2.5	3.0

注:(1)表中容许振动值应按频率线性插值确定;(2)当无法在基础处评价时,评价位置可取最底层主要承重外墙的底部;(3)对于未达到国家现行抗震设防标准的城市旧房和镇(乡)村未经正规设计自行建造的房屋容许振动值,宜按表 4 中居住建筑的 70% 确定。

表 5 德国交通振动对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值

Table 5 Allowable value of traffic-induced vibration of German building structures in time domain

建筑物类型	顶层楼面处容许振动 速度峰值/(mm·s <sup>-1</sup> )		基础处容许振动速度峰值/(mm·s <sup>-1</sup> )		
			1~10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz
	1~100 Hz				
工业建筑、公共建筑	40.0		20.0	20.0~40.0	40.0~50.0
居住建筑	15.0		5.0	5.0~15.0	15.0~20.0
对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑	8.0		3.0	3.0~8.0	8.0~10.0

综上分析可以得出,目前相关规范和标准存在以下问题:

(1) 关于交通振动对建筑结构影响的评价没有统一的规范和标准可以进行参考。

(2) 对于不同材料的建筑结构没有给出确切的振动容许值,而且在建筑物类型划分时只给出了这一类建筑物振动标准。

(3) 同一类建筑物中建筑结构的类型仍然会有很大的差距,因此对于建筑振动控制标准的划分过于粗略,不能够精确的描述出不同建筑结构类型的振动控制标准。

结构在疲劳破坏前所经历的应力循环数称为疲劳寿命,即在给定重复荷载作用下使结构破损所必需的应力或应变循环次数。现在普遍认为应力变化范围是影响疲劳寿命的主要因素。因为振动波在传播过程中,某一点的振动位移为<sup>[43-44]</sup>

$$u = A \sin(kx - ct) \quad (1)$$

式中: $A$  为位移振动最大幅值; $c$  为波速; $k$  为常数。

振动速度为

$$v = du/dt = -cA \cos(kx - ct) \quad (2)$$

单位距离的位移变化量为

$$du/dx = kA \cos(kx - ct) \quad (3)$$

根据应变定义  $\epsilon = \Delta l / l$ , 和每单位距离位移的变化量一致,则由式(2)、(3)可得

$$\epsilon = du/dx = kA \cos(kx - ct) = -(k/c)v \quad (4)$$

由式(4)可以看出,与建筑结构疲劳极限  $\sigma(\epsilon)$  最直接相关的振动量是速度。

因此为了能够科学准确的评估不同建筑结构的抗振能力,建议将建筑结构的疲劳性能作为研究的对象,

将疲劳寿命作为建筑结构振动容许值的参考依据,考虑到建筑材料以及结构在环境作用下的累积损伤效应<sup>[45-47]</sup>,提出建筑结构在交通振动环境下振动疲劳和剩余寿命评估的方法,为建筑结构在交通振动环境下的振动控制标准提供理论参考和科学依据。

### 3 建筑结构疲劳损伤研究现状

目前关于交通振动作用下对建筑结构产生疲劳损伤影响的分析,国内外均处在一个探索研究的阶段,而关于交通振动激励下的疲劳分析,大都集中在桥梁、隧道以及建筑材料的研究上,近年来关于建筑结构的疲劳损伤主要研究工作列于表 6。

结构在循环应力或循环应变作用下,由于某点或某些点产生了局部的永久性结构变化,从而在一定的循环次数以后形成裂纹或发生断裂的过程称为疲劳。由于交通产生的振动会持续对建筑结构产生长久的影响,虽然在短时间内由交通振动产生的能量较小,但建筑长期在这种微振动的作用下,会产生疲劳损伤响应,损伤将不断增长、累积,最终造成结构的破坏加剧,严重的还会导致建筑物的开裂和倒塌。赵奎等<sup>[48]</sup>通过实验发现,加载与卸载阶段都会产生损伤,且损伤随应力的增大而增大,因此建筑物在反复受到交通荷载的情况下会产生疲劳损伤效应。

对于交通振动影响下建筑结构疲劳损伤的研究,应当充分的考虑到在自然环境的影响下,建筑物会由于不同频率的周期荷载、冻融环境和硫酸盐腐蚀环境、风荷载以及地表微振动等的影响下材料损伤不断积累,从而导致建筑物的主体产生裂缝并不断的扩展。

表6 建筑结构的疲劳损伤主要研究工作

Table 6 Main research work on fatigue damage of building structures

结构类型	荷载类型	研究内容	文献来源
大跨开敞式干煤棚	风荷载	风致结构疲劳损伤分析	黄铭枫,等 <sup>[49]</sup>
混凝土桥梁	交通振动	交通振动荷载状况下的疲劳损伤分析	林高原 <sup>[50]</sup>
梁结构	随机振动	疲劳刚度和固有频率的退化规律	卫军,等 <sup>[51]</sup>
重载铁路隧底结构	大轴重、围岩缺陷和水压力的耦合	重载线路疲劳损伤过程进行模拟分析	霍建勋 <sup>[52]</sup>
钢筋混凝土桥面板	交通振动	对桥梁主体结构钢筋混凝土桥面板的疲劳损伤进行了数值模拟	邓爱民,等 <sup>[53]</sup>
钢吊车梁	静压力	分析钢吊车梁的疲劳损伤演化和复合型疲劳裂纹扩展过程	郭华涇,等 <sup>[54]</sup>
预应力混凝土梁	静压力和随机振动	预应力梁结构疲劳刚度退化对模态频率的影响	卫军,等 <sup>[55]</sup>
砖混结构	矿震	对频繁矿震活动规律及其对建筑结构疲劳累积损伤进行了研究	李永靖,等 <sup>[56]</sup>
公路桥梁	重载车辆	运用疲劳累计损伤理论分析一般运营状态下桥梁的疲劳损伤情况	赵川 <sup>[57]</sup>
自锚式独塔悬索桥	交通振动	自锚式独塔悬索桥竖向弯曲振动基频的分析	郭俊,等 <sup>[58]</sup>
铁路转向架	交通荷载和硫酸盐腐蚀环境	研究铁路焊接转向架在复杂荷载下的疲劳荷载	Guo,等 <sup>[59]</sup>
砖石结构	盐侵蚀	研究古砖石结构建筑在环境变化情况下受盐侵蚀的损伤机理	Barbara <sup>[60]</sup>

综上所述:

(1) 国内外关于建筑结构损伤机理的研究没有一个系统性的理论思想,使得此方面的研究比较零散。由于没有统一的理论可以去依靠,国内外对于建筑结构在交通激励作用下的损伤机理研究以及评估甚少。

(2) 研究建筑物在交通荷载影响下的疲劳损伤时,需要将由于环境因素而造成建筑物的损伤考虑在内,在此基础上再进行交通振动影响的研究,同时也要考虑环境因素与交通振动因素耦合的情况,先对建筑物进行损伤机理因素分析,避免单一考虑某一方面的影响而造成结构安全分析的片面性和局限性。

#### 4 建筑结构减振措施研究现状

车辆产生振动的原因是轮毂与轨道或者地面之间相互作用,产生的振动通过路基或桥墩传递至建筑物地基,继而又传递到了建筑物。夏禾<sup>[61]</sup>通过对交通振动问题的研究提出了振动可以分为三个系统:振源系统、振动传递路径系统和受振体系统。结合交通振动的产生机理、传播的性质以及对建筑结构影响的因素,对交通振动的防治可以从产生振动的振源主动减振,在振动传播过程中切断传递路径和对受振体进行积极地采取隔振措施。目前关于交通振动的隔振减振研究现状如表7所列。

表7 交通振动的隔振减振研究现状

Table 7 Research status of traffic vibration isolation and reduction

减震类型	振动类型	研究内容	文献来源
振源控制	铁路	无砟轨道高等减振结构	葛承宝 <sup>[63]</sup>
振源控制	地铁	减振垫轨道结构	臧景超,等 <sup>[64]</sup>
振源控制	铁路	无缝铁路和重型钢轨的减振效果	S.LAKUŠIĆ,等 <sup>[65]</sup> 、许国平 <sup>[66]</sup>
振源控制	铁路	轨道减振的设计原理和设计方法	于春华 <sup>[67]</sup>
传播路径控制	铁路	扣件对轨道动力响应的研究分析	朱剑月 <sup>[68]</sup>
传播路径控制	铁路	利用车辆-轨道合动力学理论分析梯形轨道的振动特性	杨新文,等 <sup>[69]</sup>
传播路径控制	铁路	分析不同规格隔振沟的减振效果	Woods <sup>[70]</sup> 、叶茂,等 <sup>[71]</sup>
传播路径控制	铁路	研究了孔列和排桩减振隔振的作用	LIAO,等 <sup>[72]</sup>
受振体控制	地铁	分析了地下连续墙对于基础的减振效果	申跃奎 <sup>[73]</sup>
受振体控制	地铁	分析了自由场隔振的各种连续屏障和建筑内局部浮筑结构隔振及建筑基底整体隔振方法的减振隔振效果	王田友 <sup>[74]</sup>
受振体控制	路面交通	通过研制的新型隔振产品,利用现有的施工回填区来降低建筑物的振动	Zeng,等 <sup>[75]</sup>
受振体控制	轨道交通	研究基坑肥槽对建筑的减振效果	胡皓宇 <sup>[76]</sup>

目前关于交通振动的研究主要集中在高频振动,现在常规减振隔振材料能够有效地控制20 Hz以上频率的振动<sup>[62]</sup>,而对于低频振动的控制研究较少,因此在未来应加大对低频振动的研究,采用新的规范,减少由于低频振动带来的危害。虽然当前关于交通振动的减振材料和方法较多,但仍存在着一些

些不足,例如:减振方法的控制标准不统一;减振材料的研究缺乏科学的评价标准;减振材料性能的描述不够明确;减振隔振材料价格的参差不齐。故应逐步建立起关于交通振动控制方法和减振隔振材料的专项管理制度,出台相应的规定和标准,在保障安全的前提下,做到建筑结构在振动条件下安全、经

济、环保。

## 5 结论

通过以上的论述,可以得出以下结论:

(1) 目前国内外关于交通振动的研究方法主要有 4 种:根据现场实际情况进行测试和数值计算相结合的方法;有限元软件的应用和数据分析的方法;预测模型的建立和现场实测数据对比的方法;根据国家标准和规定的经验分析法。目前最有效和最常用的为现场实测和数值分析的方法,而对于不同的研究项目会有其不同的适用研究方法,因此在进行研究时应根据实际情况来选择。

(2) 通过对国内外目前交通振动控制标准的研究对比分析,我国关于交通振动控制的标准要严格高于国外。但由于目前交通振动控制标准的不统一,存在着一定的问题,因此本文建议将建筑结构的疲劳性能作为研究的对象,将疲劳寿命作为建筑结构振动容许值的参考依据,提出建筑结构在交通振动下的振动疲劳和剩余寿命评估的方法,能够为建筑结构在交通振动环境下的振动控制标准提供参考和科学依据。

(3) 在研究分析交通振动的产生形式以及建筑结构在交通振动下的受损机理中,提出建筑物在交通荷载影响下的疲劳损伤时,需要将由于环境因素而造成建筑物的损伤考虑在内,在此损伤的基础上再进行交通振动影响的研究,同时也要考虑环境因素与交通振动因素耦合的情况。

(4) 由于交通振动是一个复杂的振动形式,目前关于交通振动的研究大多集中在高频振动以及如何控制高频振动,常规的隔振减振措施能够有效的降低 20 Hz 以上频率的振动,但对于低频振动的控制却一直是一个亟待解决的问题。同时当前隔振减振材料的品种繁多,没有科学的评价标准,应逐步建立起关于交通振动控制方法和减振隔振材料的专项管理制度,在保证经济和安全的前提下实现减振隔振的目标。

## 参考文献(References)

[1] 和振兴,翟婉明,杨吉忠,等.铁路交通地面振动的列车-轨道-地基耦合数值方法研究[J].振动工程学报,2008,21(5):488-492.  
HE Zhenxing, ZHAI Wanming, YANG Jizhong, et al. Train-track-ground coupling numerical method for railway traffic induced ground vibration[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(5): 488-492.

[2] 叶茂,任珉,谭平,等.城市道路交通诱发建筑结构振动的实测

和数值模拟[J].应用力学学报,2013,30(3):463-468.

YE Mao, REN Min, TAN Ping, et al. In situ measurement and numerical simulation for building vibration induced by urban traffic[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(3): 463-468.

- [3] 肖桂元,韦红亮,王志驹,等.地铁列车引起与地铁合建建筑结构环境振动特性现场测试分析[J].铁道学报,2015,37(5):88-93.  
XIAO Guiyuan, WEI Hongliang, WANG Zhiju, et al. In-situ experiment and analysis of train-induced vibration characteristics of jointly-built structure of subway and buildings[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(5): 88-93.
- [4] 唐俊峰,郭向荣,邓子铭,等.列车运行引起建筑结构振动分析[J].铁道科学与工程学报,2011,8(3):7-12.  
TANG Junfeng, GUO Xiangrong, DENG Ziming, et al. Vibrations of complex structure induced by running train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(3): 7-12.
- [5] 夏倩,赵瑾,马蒙,等.交通振动对砌体古建筑影响分析的研究现状[J].噪声与振动控制,2018,38(6):135-140,212.  
XIA Qian, ZHAO Jin, MA Meng, et al. Research status of the influence of traffic vibration on damage mechanism and fatigue life of masonry ancient buildings[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(6): 135-140, 212.
- [6] 张逸静.城市轨道交通振动对古建筑的影响[D].苏州:苏州大学,2016.  
ZHANG Yijing. Influence of urban rail transit vibration on ancient buildings [D]. Suzhou, China: Soochow University, 2016.
- [7] 韩广森.城市轨道交通微幅振动对古建筑的影响[D].西安:西安建筑科技大学,2011.  
HAN Guangsen. The micro vibration of urban rail transit impact on ancient building [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [8] HINZEN K G. Subway-induced vibrations in cologne cathedral [J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(3): 631-638.
- [9] 张鹏飞,雷晓燕,高亮,等.铁路环境振动对厂房内精密仪器的影响分析[J].振动与冲击,2013,32(16):187-192.  
ZHANG Pengfei, LEI Xiaoyan, GAO Liang, et al. Effect of railway environment vibration on precision instruments inside the plant [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16): 187-192.
- [10] 刘卫丰,刘维宁,聂志理,等.地铁列车运行引起的振动对精密仪器影响的预测研究[J].振动与冲击,2013,32(8):18-23.  
LIU Weifeng, LIU Weining, NIE Zhili, et al. Prediction of effects of vibration induced by running metro trains on sensitive instruments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8): 18-23.
- [11] 栗润德,张鸿儒,刘维宁.地铁引起的地面振动及其对精密仪器的影响[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):206-214.  
LI Runde, ZHANG Hongru, LIU Weining. Metro-induced ground vibrations and their impacts on precision instrument [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2008,27(1):206-214.
- [12] 马龙,辜小安.高速铁路列车运行振动对邻近精密仪器设备的影响分析综述[C]//全国环境声学学术讨论会论文集.北京:2007:98-101.
- MA Long, GU Xiaolan. Summarization of the effect analysis of the vibration produced by high-speed trains passing the ambient precision instruments [C]//Collected Papers about the National Symposium on Environmental Acoustics. Beijing, 2007:98-101.
- [13] 刘腾,雷晓燕,刘庆杰.高速铁路沿线地面环境振动特性的实测与分析[J].华东交通大学学报,2011,28(4):19-22.
- LIU Teng, LEI Xiaoyan, LIU Qingjie. Survey and analysis of the vibration characteristic of ground environment along the rapid transit railway line [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(4): 19-22.
- [14] 孙晓静.地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D].北京:北京交通大学,2008.
- SUN Xiaojing. Prediction of environment vibrations induced by metro trains and mitigation measures analysis [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University.
- [15] UEDA Chikaaki. On distribution of traffic vibration in the building under overhead railway bridges [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan Summaries of Technical Papers, 1965:40:347.
- [16] 茅玉泉.交通运输车辆引起的地面振动特性和衰减[J].建筑结构学报,1987(1):67-77.
- MAO Yuquan. Characteristics and attenuation of ground vibration caused by traffic vehicle [J]. Journal of Building Structure, 1987(1): 67-77.
- [17] 陈士军.青藏线含融化夹层和地下冰冻土路基列车行驶振动响应[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- CHEN Shijun. Train-induced vibration response of permafrost subgrade with ice layer and unfrozen interlayer along the qinghai-tibet railway [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [18] 高广运,李志毅,冯世进,等.秦-沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J].岩土力学,2007,28(9):1817-1822,1827.
- GAO Guangyun, LI Zhiyi, FENG Shijin, et al. Experimental results and numerical predictions of ground vibration induced by high-speed train running on Qin-Shen railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1817-1822, 1827.
- [19] 邢梦婷.成都地铁商业上盖物业振动与噪声分析研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- XING Mengting. Research on vibration noise of chengdu commercial over-track building on subway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [20] 罗林.成绵乐客运专线桥梁段环境振动特性分析[D].成都:西南交通大学,2016.
- LUO Lin. Characteristics Analysis of environmental vibration induced by trains on bridge section of Chen-Mian-Le passenger special railway line [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [21] 王媛,曹广忠,匡如华.深圳地铁轨道减振性能测试与分析[J].铁道标准设计,2013,57(7):29-32.
- WANG Yuan, CAO Guangzhong, KUANG Ruhua. Performance test and analysis of vibration attenuation of tracks on Shenzhen metro [J]. Railway Standard Design, 2013, 57(7): 29-32.
- [22] 田苗.成灌线振动环境影响后评价研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- TIAN Miao. Post-project environment impact assessment for train-induced vibration: a case study of the Cheng-Guan line [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [23] 侯晋.苏州城市轨道交通振动计算与测试分析[D].苏州:苏州大学,2014.
- HOU Jin. On calculation and testing analysis of Suzhou rail transit [D]. Suzhou: Soochow University, 2014.
- [24] 向怡.郑西高铁渭南北高架站环境振动特性分析[D].成都:西南交通大学,2011.
- XIANG Yi. Environmental vibration characteristics analysis of Zhengzhou-Xi'an high-speed railway Weinan north elevated station [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [25] 赵辉.南昌市轨道交通1号线运营对周围文物建筑振动影响[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(12):306-308.
- ZHAO Shi. The influence of the operation of Nanchang rail transit line 1 on the vibration of surrounding cultural relic buildings [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied technology edition), 2017, 13(12): 306-308.
- [26] 马利衡.沪宁城际高速铁路振动及其对周围环境影响研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- MA Liheng. Research on vibration of Shanghai-Nanjing intercity high-speed and its environmental impact [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [27] 程焯,刘郑琦.宁波轨道交通轨道振动预测研究及优化[J].铁道标准设计,2016,60(10):1-3,8.
- CHENG Ye, LIU Zhengqi. Research and optimization of track vibration prediction of Ningbo rail transit [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(10): 1-3, 8.
- [28] 赵龙.简析晋中至太原城际铁路的振动环境影响评价[J].建设科技,2016(15):177-178.
- ZHAO Long. A Brief analysis of vibration environmental impact assessment of Jinzhong-Taiyuan intercity railway [J]. Construction Science and Technology, 2016(15): 177-178.
- [29] 彭也也,贺玉龙,梅昌良,等.成渝高速铁路某高架桥段地面三向振动特性分析[J].噪声与振动控制,2019,39(1):146-150.
- PENG Yeye, HE Yulong, MEI Changgen, et al. Tri-directional measurements and analysis of the high-speed train induced ground-borne vibration on a viaduct of Chengdu-Chongqing high-speed railway [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(1): 146-150.
- [30] 高波,蓝天,朱利明.地铁运行振动对邻近民国建筑的影响[J].南京工业大学学报(自然科学版),2018,40(6):104-109.
- GAO Bo, LAN Tian, ZHU Liming. Effects of metro operation

- vibration on neighboring buildings of republic China[J].Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 40(6): 104-109.
- [31] BATA M. Effect on buildings of vibrations caused by traffic [J]. Building Science, 1985, 99(1): 1-2.
- [32] WATTS G R. Case studies of the effects of traffic induced vibrations on heritage buildings [Technical Report]. Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1987.
- [33] BONGIOVANNI G, CLEMENTE P, RINALDIS D, et al. Traffic-induced vibrations in historical buildings [C]//Proceeding of the 8th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2011). Leuven, Belgium, 2011(4-6): 812-819.
- [34] HINZEN K G. Subway-induced vibrations in cologne cathedral [J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(3): 631-638.
- [35] 古建筑防工业振动技术规范: GB/T 50452-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration: GB/T 50452-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [36] 城市区域环境振动标准: GB 10070-1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- Standard of vibration in urban area environment: GB 10070-1988[S]. Beijing: National Environmental Protection Agency, 1988.
- [37] 建筑工程容许振动标准: GB 50868-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Standard for allowable vibration of building engineering: GB 50868-2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [38] DIN4150-3, Structural vibration part 3: effects of vibration on structures [S]. Germany: Building and Civil Engineering Standards Committee of DIN Germany Institute, 1999.
- [39] 夏倩, 赵瑾, 马蒙, 等. 交通振动对砌体古建筑影响分析的研究现状[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(6): 135-140, 212.
- XIA Qian, ZHAO Jin, MA Meng, et al. Research status of the influence of traffic vibration on damage mechanism and fatigue life of masonry ancient buildings[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(6): 135-140, 212.
- [40] 马蒙, 刘维宁, 郑胜蓝, 等. 古建筑振动标准分级探讨[J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(1): 54-60.
- MA Meng, LIU Weining, ZHENG Shenglan, et al. Discussion of vibration classification for historic buildings[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2013, 25(1): 54-60.
- [41] 汪宏. 城市轨道交通工程对文物振动影响评价标准的研究[J]. 铁道勘测与设计, 2011(1): 69-74.
- WANG Hong. Research on the evaluation standard of urban rail transit engineering on cultural relic vibration[J]. Railway survey and design, 2011(1): 69-74.
- [42] 夏文俊, 卢文波, 陈明, 等. 白鹤滩坝址柱状节理玄武岩爆破损伤质点峰值振速安全阈值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(A01): 2997-3007.
- XIA Wenjun, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Study on safety threshold of peak particle velocity about blasting damage of columnar jointed basalt rock mass in baihetan dam site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(A01): 2997-3007.
- [43] 朱利明, 王成龙, 蓝天, 等. 地铁运行引起的南京鼓楼振动测试与分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊 1): 291-296.
- ZHU Liming, WANG Chenglong, LAN Tian, et al. Vibration-test and analysis of nanjing drum tower caused by metro operation[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Suppl): 291-296.
- [44] 刘维宁, 马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 124-125.
- LIU Weining, MA Meng. Metro train induced environment vibration: prediction, evaluation and control[M]. Beijing: Science Press, 2014: 124-125.
- [45] 赵超东. 水工混凝土受压疲劳性能及累积损伤研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- ZHAO Zaodong. Studies on the fatigue property and cumulative damage of hydraulic concrete under the compressive fatigue load[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [46] DERKOWSKI W. Fatigue life of reinforced concrete beams under bending strengthened with composite materials[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2006, 6(4): 33-47.
- [47] 徐劲, 詹婧洁. 钢结构输电塔疲劳累积损伤分析方法研究[J]. 建筑监督检测与造价, 2017(4): 11-14.
- XU Jin, ZHAN Jingjie. Research on fatigue accumulative damage of steel structure transmission tower[J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2017(4): 11-14.
- [48] 赵奎, 张敏, 曾鹏, 等. 循环荷载下红砂岩损伤破坏过程次声波特征[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(11): 92-96.
- ZHAO Kui, ZHANG Min, ZENG Peng, et al. The infrasound characteristics in the damage and failure process of red sandstone under cyclic loading[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(11): 92-96.
- [49] 黄铭枫, 叶何凯, 楼文娟, 等. 考虑风速风向分布的干燥棚结构风振疲劳分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019(10): 1916-1926.
- HUANG Mingfeng, YE Hekai, LOU Wenjuan, et al. Wind-induced vibration and fatigue analysis of long span lattice structures considering distribution of wind speed and direction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019(10): 1916-1926.
- [50] 林高原. 交通荷载对混凝土梁桥疲劳损伤的影响分析[J]. 公路交通技术, 2019, 35(4): 81-86.
- LIN Gaoyuan. Influence analysis of traffic load on fatigue damage for concrete girder bridge[J]. Technology of Highway and Transport, 2019, 35(4): 81-86.
- [51] 卫军, 杜永潇. 基于固有频率的梁结构疲劳损伤演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(8): 1866-1875.
- WEI Jun, DU Yongxiao. Fatigue damage evolution of timosh-



- enko beams based on natural frequency[J].Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8): 1866-1875.
- [52] 霍建勋.重载铁路隧底结构病害特点及疲劳损伤机理分析[J].铁道建筑, 2019, 49(7): 61-64.  
HUO Jianxun. Disease characteristics and fatigue damage mechanism analysis of heavy haul railway tunnel bottom structure[J].Railway Engineering, 2019, 49(7): 61-64.
- [53] 邓爱民,沈潇.基于连续损伤理论的桥面板疲劳损伤分析[J].河南科学, 2019, 37(6): 981-987.  
DENG Aimin, SHEN Xiao. Fatigue damage analysis of bridge deck based on continuum damage theory[J].Henan Science, 2019, 37(6): 981-987.
- [54] 郭华泾,崔鹏飞,吴佰建,等.既有工业厂房吊车梁疲劳性能预后分析[J].哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 109-115.  
GUO Huajing, CUI Pengfei, WU Baijian, et al. Fatigue prognosis analysis on existing steel industrial crane runway girders [J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 109-115.
- [55] 卫军,杜永潇,梁曼舒.梁结构疲劳刚度退化对模态频率的影响[J].浙江大学学报(工学版), 2019, 53(5): 899-909.  
WEU Jnu, DU Yongxiao, LIANG Manshu. Influence of fatigue stiffness degradation for beam structure on modal frequency[J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(5): 899-909.
- [56] 李永靖.矿震对建筑结构疲劳累积损伤研究[D].阜新:辽宁工程技术大学, 2007.  
LI Yongjing. Study on cumulative damage in fatigue of building structures caused by mine-quakes[D]. Fuxin, China: Liaoning Technical University, 2007.
- [57] 赵川.重载交通对高速公路桥梁的疲劳影响研究[D].天津:河北工业大学, 2015.  
ZHAO Chuan. Study on the effect of heavy traffic on fatigue of expressway bridge[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [58] 郭俊,刘胜红,高嵩,等.自锚式独塔悬索桥竖向弯曲振动基频估算公式[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 27-32.  
GUO Jun, LIU Shenghong, GAO Song, et al. Estimation formula of vertical bending vibration fundamental frequency of self-anchored single tower suspension bridge[J].Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2019, 38(5): 27-32.
- [59] GUO F, WU S C, LIU J X, et al. Fatigue life assessment of bogie frames in high-speed railway vehicles considering gear meshing [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132 (Mar.): 105353.1-105353.12.
- [60] BARBARA Lubelli, ROB P J. VAN Hees. Effectiveness of crystallization inhibitors in preventing salt damage in building materials [J].Journal of Cultural Heritage, 2007, 8(3): 223-234.
- [61] 夏禾.交通环境振动工程[M].北京:科学出版社, 2010.  
XIA He. Traffic induced environmental vibrations and con-
- trols[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [62] 黄微波,杨阳,冯艳珠,等.轨道交通振动传播规律与减振措施研究进展[J].噪声与振动控制, 2016, 36(6): 101-105, 110.  
HUANG Weibo, YANG Yang, FENG Yanzhu, et al. Research advances of vibration propagation law and vibration reduction measures of railtransit[J].Noise and Vibration Control, 2016, 36(6): 101-105, 110.
- [63] 葛承宝. 120km/h 市域铁路桥上高等减振方案及减振预测[J].工程建设与设计, 2019(12): 81-83.  
GE Chengbao. Higher vibration reduction scheme on bridge and prediction of vibration reduction for 120 km/h suburban railway [J].Construction & Design for Project, 2019(12): 81-83.
- [64] 臧景超,杨新文,祁正海,等.地铁减振垫轨道结构对车致环境振动的影响分析[J].城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 90-93, 165. ZANG Jingchao, YANG Xinwen, QI Zhenghai, et al. Effect analysis of damping track structure on environmental vibration induced by vehicle[J].Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 90-93, 165.
- [65] LAKUŠI Stjepan, AHAC Maja. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas [J]. Technical Gazette, 2012, 19(2): 427-435.
- [66] 许国平.高速铁路轨道减振降噪技术对策[J].铁道工程学报, 2004, 21(2): 26-30.  
XU Guoping. Technical way for reducing vibration and noise on high-speed railway line [J].Journal of Rail Way Engineering Society, 2004, 21(2): 26-30.
- [67] 于春华.城市轨道交通轨道减振设计与研究[J].铁道工程学报, 2007, 24(4): 77-79.  
YU Chunhua. Design and research on track damping of urban rail transit [J].Journal of Railway Engineering Society, 2007, 24(4): 77-79.
- [68] 朱剑月.轨下扣件支承失效对轨道结构动力性能的影响[J].振动工程学报, 2011, 24(2): 158-163.  
ZHU Jianyue. On the effect of rail fastener support failure on the dynamic behavior of railway track [J].Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(2): 158-163.
- [69] 杨新文,和振兴.梯形轨枕轨道振动特性研究[J].振动工程学报, 2012, 25(4): 388-393.  
YANG Xinwen, HE Zhenxing. Vibration characteristics of ladder sleeper track [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(4): 388-393.
- [70] WOODS R D. Screening of surface waves in soils [J]. Am Soc Civil Engr J Soil Mech, 1968 (SM4): 951-979.
- [71] 叶茂,曹保兴,郑志华,等.列车动荷载下某古遗址隔振沟的减振效果研究[J].应用力学学报, 2015, 32(4): 682-688.  
YE Mao, CAO Baoxing, ZHENG Zhihua, et al. Effect of vibration isolation trench on an ancient ruin subjected to train dynamic loads [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 682-688.
- [72] LIAO S, SANGREY D A. Use of piles as isolation barriers [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(9): 1139-1152.

(1):40-45.

LI Weixin, YIN Xunqiang, WANG Guixuan. Seismic response analysis of nuclear power plant on soil foundation considering pile-soil-structure dynamic interaction[J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(1):40-45.

- [14] 李浩然, 尹训强, 王桂萱. 基于 UPFs 的粘弹性人工边界单元及地震动输入方法研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(2):24-32.

LI Haoran, YIN Xunqiang, WANG Guixuan. Research on UPFs-Based viscoelastic artificial boundary element and ground motion input method [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(2):24-32.

- [15] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933, 98(2):418-433.

\*\*\*\*\*

(上接第 497 页)

- [73] 申跃奎. 地铁激励下振动的传播规律及建筑物隔振减振研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

SHEN Yuekui. Study on the propagation laws of subway-induced vibration and isolation or reduction methods of building vibration[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

- [74] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔振方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.

WANG Tianyou. Study on subway-induced environmental vibration and isolation method of building from it[D]. Shang-

hai: Tongji University, 2008.

- [75] ZENG Yi, PAN Peng, ZHANG Gongbin, et al. Experimental study of isolation in the backfill zone of the foundation pit (IBF) method to reduce ground-borne vibration in buildings [J]. Engineering Structures, 2020(202):109740.1-109740.13.

- [76] 胡皓宇. 城市地面轨道交通致建筑振动的分析评价及肥槽减振研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.

HU Haoyu. Analysis and evaluation of building vibration induced by ground urban rail transit and study on vibration reduction measures in pit extension[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.