

轨道交通振动荷载下砌体结构的安全标准研究

戚桂峰^{1,2}, 陈士海^{1,2}, 逢焕东^{1,2}

(1. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:以 2~4 层砌体结构为研究对象, 利用 IDTS3850 测试得到铁路沿线地面振动信号。通过有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 进行实体建模, 定义了材料的失效应力, 将测得的地面振动信号输入结构底部单元进行有限元分析, 并考虑了轨道交通引起的不同频率的地面振动荷载, 求得了相应频率下砌体结构单元失效前后的地面振动临界速度峰值, 并确定了砌体结构的振动安全标准。

关键词:轨道交通荷载; 振动; 砌体结构; 安全标准

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)04-0085-05

Safety Standards of Masonry Buildings under Vibration Loads of Rail Transit

QI Guifeng^{1,2}, CHEN Shihai^{1,2}, PANG Huandong^{1,2}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The response of the 2-4 layers of masonry structures under the rail loads was studied. The vibration signals we used were tested by IDTS3850 along the railway. Then we built solid models by ANSYS/LS-DYNA, defining the failure stress of the material, setting the measured ground vibration signals to the bottom of the units of structure for finite element analysis, and we got the critical peak velocity of ground vibration of the corresponding frequency before and after the failure of the masonry structure unit and the vibration safety standards of masonry structure, considering the different frequencies of ground vibration loads caused by rails.

Key words: rail loads; vibration; masonry structure; safety standards

轨道交通运行过程中车辆引起的环境振动通过地面传到临近建筑物, 会引起建筑结构的振动, 如果结构振动的幅值超过一定的限值, 就会引起结构物的损坏, 如墙体开裂、门窗玻璃掉落、墙皮脱落等, 严重时还会引起结构承重构件的损坏。为了保障轨道交通沿线建筑结构的使用安全, 减小建筑结构的损坏和由此产生的民事纠纷, 各国都制定了相应的标准, 来控制轨道交通运行引起的环境振动。振动速度和振动频率能够直接反映振动能量的大小及其分布情况, 是衡量环境振动的常用物理量, 在轨道交通引起的临近建筑物振动评价中起着十分重要的作用^[1-2]。

国际标准组织推荐的建筑物振动标准采用峰值振动速度 (particle peak vibration, PPV) 作为建筑物安全的控制标准。实践证明, 结构的破坏范围和程度都与 PPV 有着密切的关系。德国所采用的建筑结构振动

收稿日期: 2012-06-08

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2010EM046)

作者简介: 戚桂峰 (1988—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事轨道交通振动和防灾减灾工程及防护工程的研究。

E-mail: qgf0866@163.com

陈士海 (1964—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 主要从事爆破灾害预测与控制技术研究。

E-mail: cshblast@163.com

控制标准根据建筑结构对振动的敏感性将其分为三大类,并给出了每类建筑物在不同振动频率范围内峰值振动速度(PPV)的上限值;英国采用建筑物基础的振动速度作为建筑物振动的安全标准,考虑到当频率低于 4 Hz 时,结构振动的速度峰值非常小,结构的响应主要是应变变形,所以该标准中对于低于 4 Hz 的振动限值是以结构最大半峰位移值不超过 0.6 mm 给出的;瑞士标准 SN640312a—1992 将建筑物分成不同类别,振动容许值也是峰值振动速度,并将振源分成两组:第一组振源是机械、交通和施工设备等荷载,第二组振源是冲击荷载,考虑其发生几率较小,因而振动峰值速度的容许值较高^[3]。各国在确定轨道交通振动荷载作用下建筑物的安全标准时,考虑的因素不尽相同,确定的标准值也存在较大的差异。因此,要更合理地确定轨道交通振动荷载对建筑物的影响,必须结合本地建筑物的实际条件进行分析。

砌体结构的力学性能较为复杂,给砌体结构房屋抗震性能的研究带来了许多困难。为了更好地研究轨道交通运行引起的环境振动对线路附近砌体结构的影响,本研究选取了 2~4 层砌体结构房屋,建立三维实体有限元模型进行相关的动力学分析,分别在结构底部节点施加不同频率和振动峰值速度的振动荷载,通过定义结构的失效临界状态来寻求砌体结构在轨道交通振动荷载条件下的安全标准。

1 砌体结构模型选取

1.1 参数选取

研究的砌体结构类型为 2~4 层砖混结构,墙体为砌体材料,有钢筋混凝土梁和构造柱,楼板为现浇钢筋混凝土材料。由于砌体和钢筋混凝土的抗拉强度较低,可以采用 * MAT_Add_Erosion 定义失效力值的破坏标准来判定材料是否失效,失效时模型中材料单元产生裂缝^[4-6]。模型中的材料参数如表 1 所示。

表 1 模型材料参数表
Tab. 1 The model material parameters

材料类别	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/Pa	泊松比	屈服应力/Pa	硬化模量/Pa	强化系数	失效应变	失效力/Pa
砌体	1 500	3×10 ⁹	0.15	1.29×10 ⁶	6.70×10 ⁸	0	0.001 50	3×10 ⁵
钢筋混凝土	2 400	3×10 ¹⁰	0.20	8.00×10 ⁶	5.37×10 ⁹	0	0.001 25	2×10 ⁸

1.2 建立有限元模型

分析中采用的 2~4 层砌体结构具有不同的结构类型,4 层砌体结构平面布置图如图 1 所示。其中,墙体厚为 240 mm,圈梁高 250 mm,楼板厚 150 mm,构造柱的尺寸为 240 mm×240 mm。分别建立 2~4 层砌体结构房屋的有限元模型,其中 4 层砌体结构房屋的立体模型如图 2 所示,并对实体模型进行网格划分。其中:二层砌体房屋的网格尺寸为 6.25~11.6 cm,单元数量为 87 657 个;三层砌体房屋的网格尺寸为 6.25~29.85 cm,单元数量为 142 103 个;四层砌体房屋的网格尺寸为 7.5~26.1 cm,单元数量为 174 560 个。

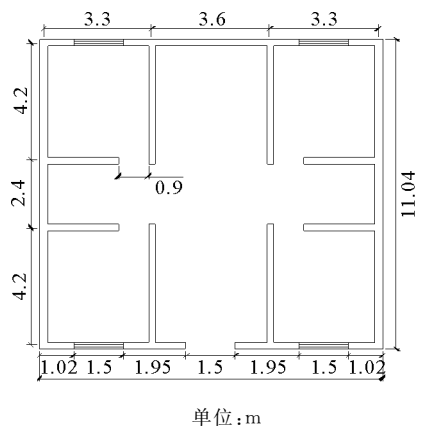


图 1 四层砌体房屋底层平面图
Fig. 1 The plan view of a four-storey masonry building

2 砌体结构有限元模拟结果分析

振动影响控制指标采用峰值振动速度,因为在低频段结构对振动的响应以振动速度较为显著,而在高频段则振动加速度显著,城市轨道交通运营属于交通设备引起的长期近似连续性振动,对结构的影响频率主要是位于低频段,所以采用峰值振动速度 PPV 作为控制指标。另外,振动速度直接反映振动能量的大小,能更好地反映结构的破坏。

分析中所采用的地面振动信号为 IDTS3850 振动记录仪所采集的青岛胶州市西北部胶济铁路沿线列车运行条件下的测试信号,列车运行速度为 175 km/h,测试点距离轨道中心线 25 m。本次分析中采用两种不同频率的工况进行分析,其中工况 1 地面振动荷载的主频为 17.089 84 Hz,工况 2 地面振动荷载的主频为 64.453 13 Hz。测点布置情况见图 3。

将测试得到的地面振动速度作为竖直方向的外部激励荷载施加到有限元模型的底部节点组,修改好 K 文件后利用 LS-DYNA 求解器进行运算,然后通过 LS-PREPOST 查看结构轨道交通荷载作用下的振动响应。通过不断分析得到结构开始出现裂缝时的振动激励荷载,确定轨道交通振动荷载下砌体结构的安全标准。

在实际的有限元分析中,如果施加的振动激励荷载的幅值偏小,没有结构单元发生失效;如果施加的振动激励荷载的幅值偏大,则导致有很多结构单元发生失效,因而失效临界状态很难确定。寻求临界状态要进行很多次非常耗费机时的循环计算,而且得到的临界状态并不一定是真正意义上的失效临界状态。因此,本研究采取如下处理方法来确定轨道交通振动的安全标准:若输入轨道交通引起的地面振动速度的幅值等于 v 时,结构中无单元失效,当幅值增加到 $1.05v$ (增加幅度为 5%) 时,结构中有单元失效,则定义前者状态为结构单元的失效临界状态,并确定 v 为轨道交通引起地面振动的安全标准值。

在工况 1 的地面振动荷载作用下,对于二层砌体结构,当地面振动速度峰值为 0.803 2 cm/s 时,结构未出现单元失效,当地面振动速度峰值为 0.843 4 cm/s 时,结构 6900# 单元失效;对于三层砌体结构,当地面振动速度峰值为 2.184 7 cm/s 时,结构未出现单元失效,当地面振动速度峰值为 2.294 cm/s 时,结构 26098# 单元失效;对于四层砌体结构,当地面振动速度峰值为 3.091 4 cm/s 时,结构未出现单元失效,当地面振动速度峰值为 3.246 cm/s 时,结构 15822# 单元失效。工况 1 作用下 4 层砌体结构单元开始失效前后的应力时程曲线分别如图 4、图 5 所示。同理,可得工况 2 地面振动荷载作用下 2~4 层砌体结构相应单元的工作状态。工况 1 和工况 2 荷载作用下各结构单元开始失效前后的荷载状况如表 2 所示。

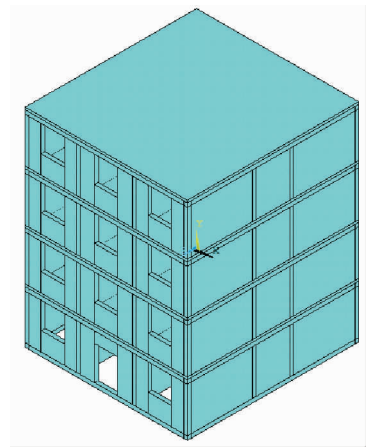


图 2 四层砌体房屋有限元模型图
Fig. 2 The finite element model of a four-storey building

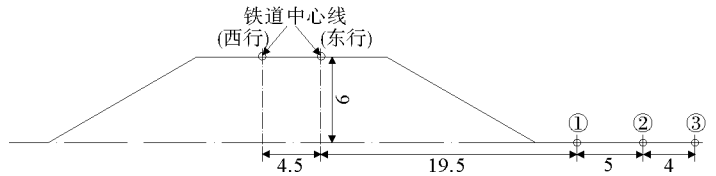


图 3 试验测点布置图

Fig. 3 The location of the testing point

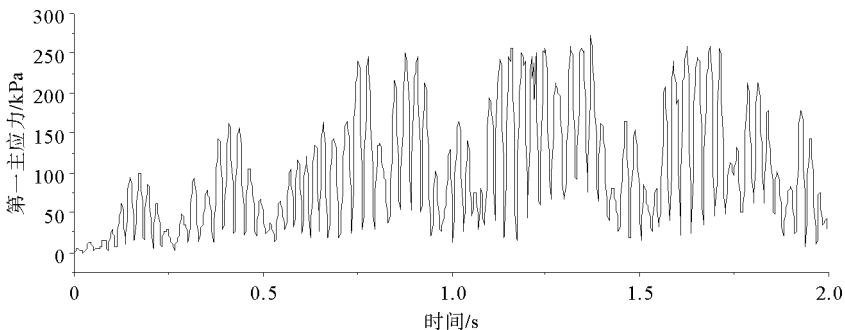


图 4 工况 1 作用下四层砌体结构 15822# 单元未失效状态下的应力时程曲线图

Fig. 4 The time history of the stress of the element 15822 of the four-storey building in non-failure state under condition 1

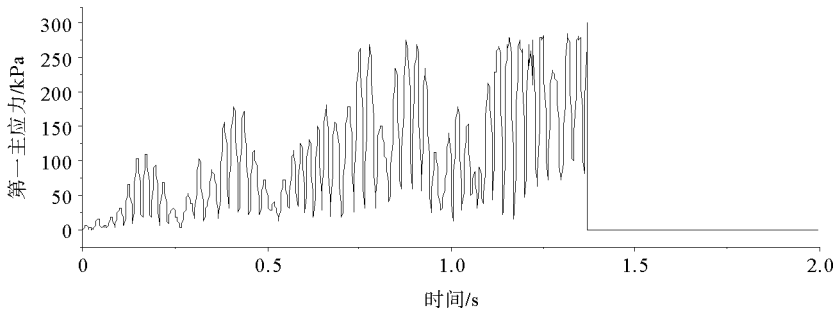


图 5 工况 1 作用下四层砌体结构 15822# 单元失效状态下的应力历程曲线图

Fig. 5 The time history of the stress of the element 15822 of the four-storey building in failure state under condition 1

表 2 工况 1 和工况 2 荷载作用下 2~4 层结构单元开始失效前后的荷载状况表

Tab. 2 The loading conditions of element of the 2-4 storey building before and after failure under condition 1 and 2

工况	结构类型	二层砌体结构		三层砌体结构		四层砌体结构	
	单元	6900#		26098#		15822#	
工况 1	状态	未失效	失效	未失效	失效	未失效	失效
	地面振动峰值速度/(cm/s)	0.803 2	0.843 4	2.184 7	2.294 0	3.091 4	3.246 0
	单元	19110#		27548#		3773#	
工况 2	状态	未失效	失效	未失效	失效	未失效	失效
	地面振动峰值速度/(cm/s)	1.495 0	1.569 0	5.561 0	5.837 0	4.171 0	4.378 0

由以上分析可得,砌体结构房屋的轨道交通振动安全标准如表 3 所示。

表 3 砌体结构的轨道交通振动安全标准

Tab. 3 The safety standards of vibration caused by rail transport for masonry buildings

建筑类型	安全允许振动峰值速度/(cm/s)	
	17.089 84 Hz	64.453 13 Hz
二层砌体结构	0.803 2	1.495 0
三层砌体结构	2.184 7	5.561 0
四层砌体结构	3.091 4	4.171 0

3 结论

1)对 2~4 层砌体结构进行 ANSYS/LS-DYNA 有限元建模分析,并在结构底部施加轨道交通引起的不同频率下的环境振动荷载,通过分析砌体结构的振动响应,得出了安全允许的振动峰值速度,确定了砌体结构房屋的轨道交通振动安全标准。

2)当地面振动的频率较低时,随着层数的增加,砌体结构的抗震性能逐渐增强;而当地面振动的频率较高时,砌体结构振动的抗震性能不再有随层数增大的趋势。

参考文献:

[1]丁烈云,付菲菲.我国城市轨道交通安全标准体系研究[J].施工技术,2010,39(1):10-13.

DING Lieyun,FU Feifei. Research on Chinese safety standards system of urban rail transit[J]. Construction Technology, 2010,39(1):10-13.

[2]陈国兴,苏晓梅,陈斌.地铁列车运行引起的环境振动评价[J].防灾减灾工程学报,2008,28(1):16-17,27.

- CHEN Guoxing, SU Xiaomei, CHEN Bin. Evaluation of ambient vibration induced by passing trains in subway tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(1): 16-17, 27.
- [3] 夏禾. 交通环境工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 葛世平. 城市轨道交通的振动和噪声对环境的影响及其对策[J]. 城市轨道交通研究, 2003(3): 30-34.
- GE Shiping. Impact of urban mass transit on the environment and the counter measures[J]. Urban Mass Transit, 2003(3): 30-34.
- [5] 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.
- [6] 张玉娥, 白宝鸿, 潘昌实. 地铁列车振动对周围环境影响评估[J]. 噪声与振动控制, 1997, 4(2): 37-41.
-

(上接第 79 页)

- [6] 蒋树屏. 扩张卡尔曼滤波器有限元法耦合算法及其隧道工程应用[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 11-19.
- JIANG Shuping. Coupling algorithm of extended kalman filter FEM and its application in tunnel engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(4): 11-19.
- [7] 徐军, 雷用, 郑颖人. 岩土参数概率分布推断的模糊 Bayes 方法探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 394-400.
- XU Jun, LEI Yong, ZHENG Yingren. The fuzzy Bayes method to infor distribution of rock parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 394-400.
- [8] 杨坤. 模糊方法在煤矿区矸石山可靠性分析中的应用[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 88-91.
- YANG Kun. Application of fuzzy method in reliability analysis of waste rock dumps in mining areas[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 88-91.
- [9] 邓建, 李夕兵, 古德生. 岩石力学参数概率分布的信息熵推断[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2177-2181.
- DENG Jian, LI Xibing, GU Desheng. Probability distribution of rock mechanics parameters by using maximum entropy method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2177-2181.
- [10] 毕忠伟. 岩体力学参数推断的 Bayes 方法及截尾可靠度的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [11] 秦建庆, 陈建峰. 基于 Bayes 原理的复合地基承载力概率分析方法[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(5): 255-258.
- QIN Jianqing, CHEN Jianfeng. Probabilistic analysis method for bearing capacity of composite foundation based on Bayes' theorem[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(5): 255-258.
- [12] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [13] 王永和, 李玉珍, 胡萍. 地基沉降修正系数的 Bayes 概率推断[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 323-327.
- WANG Yonghe, LI Yuzhen, HU Ping. Bayesian statistics conduct on modified coefficients for foundation settlement calculation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 323-327.
- [14] 文畅平. 岩体质量分级的 Bayes 判别分析方法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 395-399.
- WEN Changping. Bayes discriminant analysis method of rock-mass quality classification[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 395-399.
- [15] 刘君, 李庆民, 张志华. Bayes 小子样分析在武器性能评估中的应用[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1114-1117.
- LIU Jun, LI Qingmin, ZHANG Zhihua. Bayesian analyses in small sample circumstance for assessment of weapon performance[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(9): 1114-1117.
- [16] 李晔, 黄肇义. 基于贝叶斯方法的出行产生率预测[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 63-66.
- LI Ye, HUANG Zhaoyi. Bayesian updating of trip generation rate[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(1): 63-66.