

文章编号:1006-1355(2015)02-0101-06

## 重载铁路振动对沿线建筑物结构影响试验

孟鑫, 刘鹏辉, 姚京川, 尹京

(中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 北京 100081)

**摘要:**选取重载铁路沿线四处有代表性的单层砖混结构建筑物为研究对象,建筑物中心距离铁路分别为6.5 m、15 m、26 m、38 m,其中15 m处的建筑物可作为铁路振动引起建筑物损伤的典型样本。对由列车引发的建筑物基础和屋顶处的振动响应进行现场测试和分析,并将峰值振动速度PPV实测结果与中外相关标准进行对比。结果表明,当峰值振动速度PPV超出GB 50868-2013中的第三类振动限值时,会对我国铁路沿线“建造质量较差的建筑”产生损害。

**关键词:**振动与波;重载铁路;建筑物;试验研究

**中图分类号:** TB123

**文献标识码:** A

**DOI编码:** 10.3969/j.issn.1006-1355.2015.02.024

## Experimental Study on Ambient Building Damage Caused by Heavy-haul Railway Operation

MENG Xin, LIU Peng-hui, YAO Jing-chuan, YIN Jing

(China Academy of Railway Science, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Four representative residential buildings of single-layer brick-concrete structure with the distances of 6.5m, 15m, 26m and 38m respectively away from the railway were selected to study their damage situations. Of them the building 15m away from the railway was used as a typical sample of damage. Vibration responses of the foundations and roofs of the buildings induced by the train operation were measured and analyzed. The measured data of PPV of the vibration velocity was compared with that of domestic and international standards. Results show that, when the PPV of the vibration velocity exceeds the vibration limits of the third kind in GB 50868-2013 standard, the poor quality buildings beside the railway will damage.

**Key words:** vibration and wave; heavy-haul railway; building; experimental study

近年来,我国高速铁路和重载铁路的建设蓬勃发展,铁路产业迅速壮大,建设规模日益扩大。目前,我国高速铁路动车组列车的最高运营速度为300 km/h,货物列车轴重达到25 t、牵引质量2万~3万吨,并将发展30 t轴重的重载铁路。随着高速列车速度的提高和重载列车轴重及牵引质量的增大,由列车引起的振动对沿线建筑物结构的影响引起了人们的普遍关注<sup>[1,2]</sup>。

铁路列车作用下引起的振动不同于地震荷载,

一般不会导致建筑物的倒塌,但是铁路引起的振动作用时间长且反复发生,这样的小幅振动的反复作用同样会对结构造成损害,导致出现裂缝甚至引起结构变形,使结构的强度降低,影响结构物的安全和正常使用。一般情况下,由振动引起的建筑物损伤主要是浅表性的。国际标准ISO 4866:2010<sup>[3]</sup>将振动引起的建筑物损伤分为三类:

(1) 浅表性损伤:在清水墙表面上产生的发丝裂缝,在粉刷层或清水墙表面上有裂缝的发展;此外,在砖或混凝土砌块结构的灰缝中出现的发丝裂缝;

(2) 较小损伤:粉刷或清水墙表面产生的较大的裂缝、松散和剥落,贯通砖或混凝土砌块的裂缝;

(3) 较大损伤:建筑物构件的损伤,承重柱的开裂,节点的酥松,砖石裂缝的扩展等。

质点振动速度和振动频率与建筑物破坏有着密

收稿日期:2014-08-01

基金项目:中日韩铁路技术合作研究项目(2011YJ93);

国家自然科学基金资助项目(51378500)

**作者简介:**孟鑫(1982—),男,山东济宁人,助理研究员,工学硕士,主要研究方向:结构动力学、环境振动预测评估。

E-mail: sdjxmx@sina.com

切的关系,能直接反映振动能量大小,在建筑物的振动评价中起着重要作用<sup>[4]</sup>。在各国标准中大多按照不同建筑物分类,采用与振动频率相关的峰值振动速度 PPV(Particle Peak Velocity)作为限值。PPV 为振动速度时域波形的绝对值的最大值,能较好的反映建筑物所产生的动应力。通过对重载铁路沿线四处有代表性的单层砖混结构建筑物进行振动测试,分析由列车引发的建筑物振动响应和衰减规律,并将 PPV 实测结果与中外相关标准进行对比,找出适用于我国铁路沿线“建造质量较差建筑”的峰值振动速度 PPV 的“安全阈值”。

1 试验概况

试验场地选在重载沿线铁路养护工区附近,为高原地貌,土质从上至下依次为碎石夹土、白云岩,地下 5 m 深度为基岩,场地平坦、开阔,轨面与房屋基础平面基本处于同一高度。建筑物为单层砖混结构,可归为“建造质量较差的建筑”,其特点为:沿线居民的自建房屋,主要为砖木或砖混、单层砌体结构;房龄较长,未经正规设计、施工,建材质量较差、地基未做或仅进行简单加固处理。也可描述为“城市旧房和镇(乡)村未经正规设计自行建造的建筑物”<sup>[5]</sup>。该类建筑物在我国铁路沿线最为常见,所占比例较大。

四处房屋距离铁路外轨分别为 6.5 m、15 m、26 m、38 m,根据其使用功能,可依次命名为监控室、库房、锅炉房、小房,房屋概况见表 1,房屋现场照片见图 1。



图 1 房屋状况现场照片

所测试 4 处房屋中,距铁路外轨 15 m 处的“库房”开裂最为严重,存在多处扩展性裂缝;6.5 m 处“监控室”次之,在墙体抹灰层表面存在大量发丝状裂缝,在墙体接缝处抹灰层存在竖向开裂;其余 2 处房屋开裂状况较轻。

开裂严重的“库房”四周墙体命名为 A—D 墙,见图 2 所示。房屋存在多处“较小的”和“较大的”开裂区,平行于铁路的 A 墙和垂直于铁路的 D 墙均存在较多墙体开裂区域,裂缝分布见图 3。裂缝集中在门窗的上部、拐角处,门的上方存在开裂集中区域。裂缝大多沿砖缝呈斜向开裂,最长约 3.4 m,个别位置处裂缝贯穿墙体。房屋四周基础底部未见裂缝。

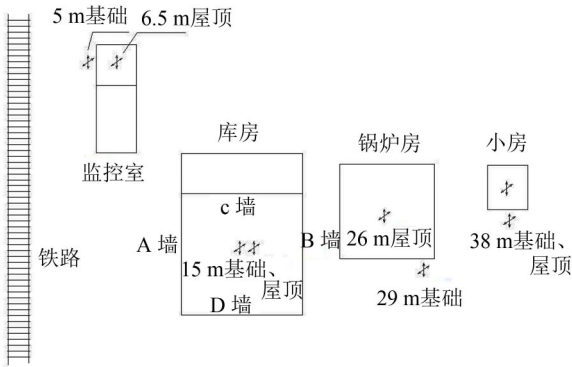


图 2 房屋位置及测点布置示意图

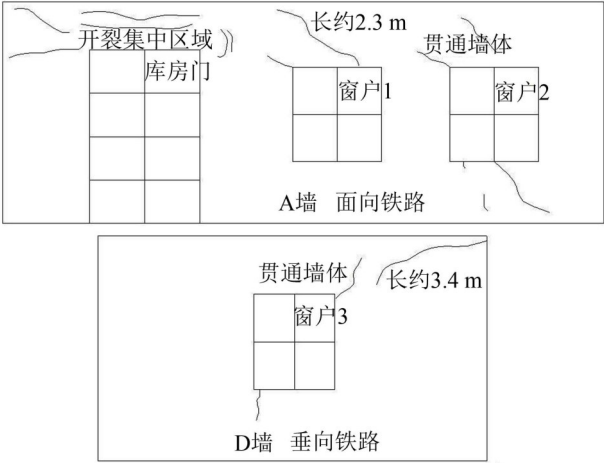


图 3 “库房”墙体裂缝分布示意图

表 1 房屋状况调查

房屋名称	距离/m	建成年份	面积/m <sup>2</sup>	损伤情况描述
监控室	6.5	1992	3×2.5	抹灰层“浅表性”、屋墙接缝处“较小”
库房	15	1994	9×11	墙体“较小”和“较大”
锅炉房	26	2007	7×6	抹灰层“浅表性”
小房	38	1994	3.3×3	仅在屋墙接缝处“较小”

B墙裂缝较少且较短。C墙上无门窗布置,未见明显开裂区域。

根据“库房”墙体裂缝分布位置和开裂扩展情况,并结合现场踏勘,可排除墙体开裂是由于地基沉降、建造质量、建材等因素引起的,分析认为“库房”墙体开裂与运营列车引起的振动有相关性,墙体开裂可作为重载列车运营引起建筑物损伤的典型样本,对其进行振动测试可为今后制定振动限值提供参考。

所测试的重载铁路为单线,有砟轨道,无缝线路,60 kg/m钢轨,共测试运营货列19趟,其中8趟重车、11趟空车。牵引机车均为SS 4型;重车编组均为C 80货车,轴重25 t,速度为54.1 km/h~76.3 km/h;空车速度为59.5 km/h~78.3 km/h,列车种类有C 80、C 70、C 62、C 64。

在房屋基础和屋顶中心处各放置横、竖向速度传感器进行测试,现场测点布置情况见图2。为兼顾房屋位置、关注距离、不影响房屋使用等因素,将测点位置进行调整。每个测点放置横向、竖向振动传感器各一个,横向传感器垂直于线路方向,用粘结剂使传感器与结构物紧密连接。振动传感器与抗混迭滤波放大器匹配使用,试验采用的测试系统的通频带、量程、分辨率、抗干扰、率定等方面性能满足测试要求。

对振动时域波形进行分析时,首先对测试波形预检,去掉奇异项,修正零线飘移、趋势等误差,确认非失真的波形。读取峰值振动速度PPV时,取单峰值的最大绝对值。频率分析主要采用1/3倍频程谱分析,用中心频率点的振动量值替代某一频段内的振动水平,它的纵坐标是有效值,可以反映该频段的振动能量,是一种能量谱,通常1/3倍频程曲线横坐标采用对数坐标<sup>[6]</sup>。频率分析时,对参数设置、波形截取等进行统一。

## 2 建筑物基础振动

### 2.1 峰值速度随距离的衰减

各基础测点处的横向、竖向PPV与距离的衰减关系见表2,给出了所有测得的货列重车、空车,由于运营货列的牵引机车不固定、货车种类混杂、编组各异、轴重不固定,以致在5 m、15 m测点处峰值振动速度较为离散,在29 m、38 m测点处峰值振动速度变化较小。

由实测数据可知,基础处竖向与横向峰值振动速度数值大小相当;在5 m~15 m区域内峰值振动速度无明显衰减,部分车次在15 m处振动速度出现

局部放大,这主要是与现场地质条件、基础状况相关;15 m~29 m内基础处振动峰值衰减最为显著,在29 m及更远区域,振动速度衰减趋缓,振动速度小于0.4 mm/s。

表2 所有列车经过时各基础处测点峰值振动速度表

距离	基础横向PPV/(mm/s)	基础竖向PPV/(mm/s)
5 m	0.91~1.39	0.91~1.98
15 m	0.84~1.46	0.90~2.16
29 m	0.20~0.32	0.24~0.38
38 m	0.12~0.23	0.14~0.33

### 2.2 峰值速度与列车速度的关系

选取8趟运营货列重车振动测试数据,行车速度为54.1 km/h~76.3 km/h,各测点峰值振动速度与行车速度关系如下图4图—5所示,运营货列重车以不同速度经过时,基础处各测点横向峰值振动速度与行车速度关系不明显。5 m、15 m处测点的竖向峰值振动速度随行车速度的提高有增大趋势,但测试数据较为离散,同样时由于机车和编组不同、轴重不确定等因素引起。

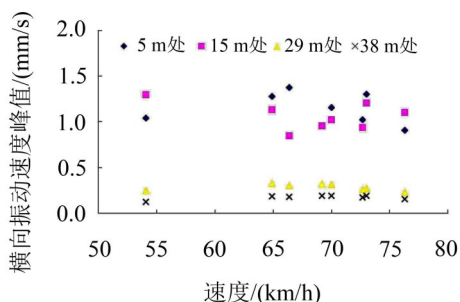


图4 横向峰值振动速度与行车速度关系图

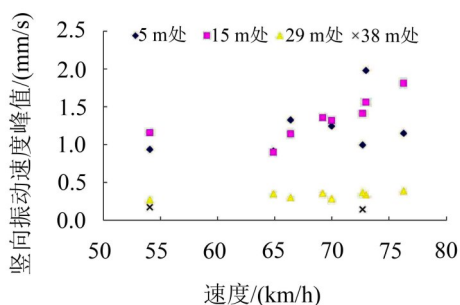


图5 基础处竖向峰值振动速度与行车速度关系图

### 2.3 频域分析

运营货列重车引起基础处横向和竖向振动速度1/3倍频程频谱见图6—图7。距离外轨5 m、15 m的基础处振动速度呈宽频特征,以20 Hz~100 Hz频率成分为主;在距离外轨29 m、38 m的基础处以低频振动为主,以20 Hz~31.5 Hz频率成分为主;各中心



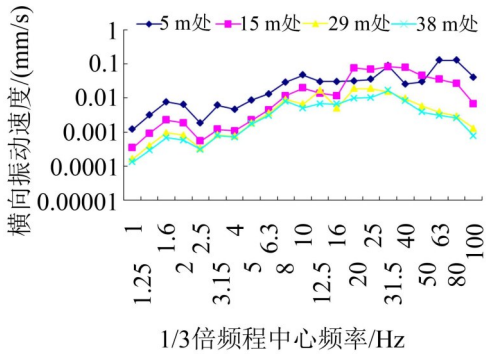


图 6 横向振动速度 1/3 倍频程频谱图

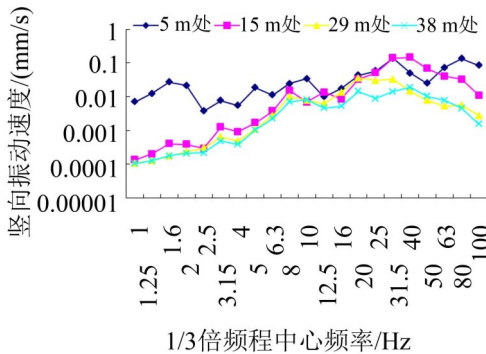


图 7 竖向振动速度 1/3 倍频程频谱图

频率振动速度随振源距离的增加整体呈衰减趋势,高频成分的振动衰减比低频更快;20 Hz~50 Hz 频率成分的振动在 15 m 处存在局部放大现象。

铁路运营引起的地面振动频率较宽,且具有一些特征频率<sup>[7]</sup>。当列车以固定速度通过时,由于其轴重荷载的规则性排列,会产生周期性的动力作用,列车的竖向加载频率主要取决于列车速度 $v(\text{km/h})$ 和轴距 $d(\text{m})$ ,加载频率为 $f=v/(3.6\cdot d)$ ,货物列车引起的竖向振动主要是由于转向架内轴距、转向架间轴距引起的。在列车速度不超过 80 km/h 时,由轴重的规则性排列产生的振动频率成分集中在 12 Hz 以内。实测 5 m 测点处竖向振动表现最为明显。

3 建筑物屋顶处振动

选取 8 趟运营货列重车振动测试数据,房屋基

础、屋顶处峰值振动速度见表 3。“监控室”、“锅炉房”、“小房”三处房屋基础处的横向、竖向峰值振动速度小于屋顶处的峰值振动速度,说明当铁路引起的振动经房屋基础传递到屋顶时,振动响应会有一定放大。“库房”屋顶处横向振动响应与其它建筑物有所区别。各处建筑物屋顶处振动以低频为主,以房屋自振频率为主,高频响应不明显。

4 铁路振动对建筑结构影响的评价

4.1 国内外相关评价标准

振动引起的建筑物损伤不仅取决于地面振动的剧烈程度,而且受到建筑本身的结构强度、建材特性以及动力特征的影响。由于建筑物种类的繁杂,针对各类建筑物分别提出振动限值较为困难。因此,各国标准中普遍对建筑物进行归类,并对应提出限值,方便实际应用。由于各国社会经济发展水平不同,其对建筑物的特征、分类、振动限值均有较大差异。目前大多数国家采用峰值振动速度 PPV 作为防止建筑物振动损伤的控制指标,振动限值大致呈现随频率升高而增大的趋势。其中,德国 DIN 4150-3:1993<sup>[8]</sup>和英国 BS 7385-2:1993<sup>[9]</sup>使用较为广泛。

我国 GB 50868-2013<sup>[5]</sup>《建筑工程容许振动标准》中,对建筑物的分类及容许值主要参考了德国标准 DIN 4150-3:1993,给出了更为严格的关于交通(公路、铁路和城市轨道交通)引起的振动对建筑结构影响的容许限值,见表 4。评价频率范围取 1 Hz~100 Hz,评价参数和位置为:

(1) 建筑物顶层楼面中心位置处水平向两个主轴方向的振动速度峰值及其对应频率。

(2) 建筑物基础处竖向和水平向两个主轴方向的振动速度峰值及其对应频率。无法在基础处时,可取最底层主要承重外墙的底部。

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“居住建筑”限值的 70 % 确定。

表 3 8 趟运营重车作用下基础、屋顶测点峰值振动速度表

房屋名称	横向 PPV/(mm/s)		竖向 PPV/(mm/s)	
	基础	屋顶	基础	屋顶
监控室	0.91~1.37	1.08~1.74	0.91~1.98	1.94~3.23
库房	0.84~1.29	0.37~0.66	0.90~1.81	1.18~1.86
锅炉房	0.22~0.32	0.38~0.57	0.26~0.38	0.71~0.86
小房	0.12~0.19	0.55~1.07	0.14~0.17	0.26~0.50

表4 交通振动对建筑结构影响的容许振动值

建筑物类型	顶层处/(mm/s)	基础处/(mm/s)		
	1 Hz~100 Hz	1 Hz~10 Hz	50 Hz	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、不能划归到上述两类的建筑	2.5	1.0	2.5	3.0

#### 4.2 实测建筑物振动与国内外标准对比

实测所有列车经过时引起四处房屋基础、屋顶处实测峰值振动速度和对应频率,按各标准中限值进行评价。实测峰值振动速度、对应频率和标准限值绘制在图8—图10中。以德国标准中第三类建筑物的短期振动、长期振动限值和英国标准第二类建筑物基础处短期振动限值作为评判标准。DIN 4150-3:1993中的第三类限值小于第一、二类限值。BS 7385-2:1993中限值较大,即便按50%折减后,基础处第二类限值仍远大于德国标准中的第三类限值。

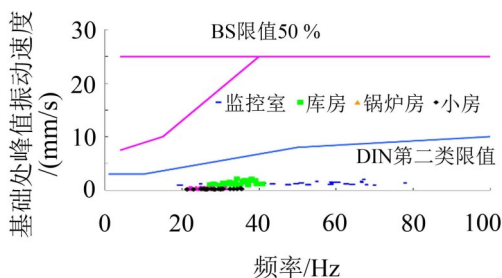


图8 基础处PPV与英国、德国标准限值对比图

选用BS 7385-2:1993和DIN 4150-3:1993标准中最严格的限值,实测数值最大的“库房”基础处峰值振动速度与限值仍存在较大的差距,但房屋本身存在大量开裂,说明英国、德国标准中的限值并不适用于我国铁路沿线建筑物结构的振动影响评价。

按GB 50868-2013标准中限值进行评价,为方便对比,基础处增加了“DIN 4150-3:1993”中第三类限值,屋顶处增加了“DIN 4150-3:1993”中短期和长期振动限值,基础和屋顶PPV与限值对比见图9—图10。

测试四处房屋中,距铁路较远处“锅炉房”(29 m)和“小房”(38 m)基础处峰值振动速度远小于GB 50868-2013中最小的第三类振动限值,其峰值振动速度对应频率集中在20 Hz~35 Hz之间。距铁路较近的“库房”(15 m)基础处峰值振动速度存在部分车

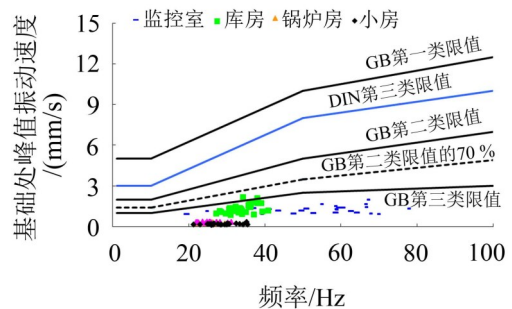


图9 基础处PPV与中国标准限值对比图

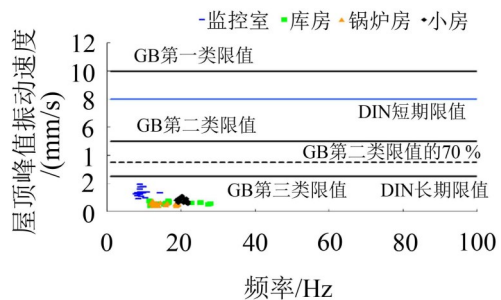


图10 屋顶处PPV与中国标准限值对比图

次超出GB 50868-2013中最小的第三类振动限值,接近标准中第二类振动限值的70%,其峰值振动速度对应频率集中在25 Hz~40 Hz之间。距离铁路最近的“监控室”(5 m)基础处峰值振动速度与“库房”(15 m)处数值大小相当,其峰值振动速度对应频率范围较宽,在20 Hz~80 Hz之间,由于标准中限值随频率提高而增大,实测数值接近但并未超出第三类限值。

由测试四处屋顶处的横向峰值振动速度分布情况可知,“库房”(15 m)、“锅炉房”(29 m)和“小房”(38 m)屋顶处峰值振动速度小于GB 50868-2013中最小的第三类振动限值,且存在一定差距,其峰值振动速度对应频率集中在10 Hz~30 Hz之间。距离铁路最近的“监控室”(6.5 m)屋顶处峰值振动速度大于其余三处,接近GB 50868-2013中最小的第三类振动限值,其峰值振动速度对应频率集中在8 Hz~12 Hz之间。

测试结果表明:离铁路较近的“监控室”、“库房”处实测峰值振动速度PPV数值较大,结合裂缝分布位置和开裂扩展情况,可认为房屋结构损伤与铁路振动有相关性。离铁路较远的“锅炉房”、“小房”处实测峰值振动速度PPV较小,可认为房屋表面裂缝与铁路振动相关性较小。

#### 4.3 铁路振动对建筑物的影响分析

我国铁路沿线的“建造质量较差的建筑”,按照GB 50868-2013中要求,容许振动限值应取第二类“居住建筑”限值的70%,但实测结果表明建筑物振动响应最大处“库房”接近但并未超过该限值,条文说明中提到“经验表明,如果不超过限值,建筑物不会发生损伤”,这与实际情况不符。从安全角度出发,结合本次试验结果,应制定更为严格的限值以保证建筑物的安全使用。“库房”可作为铁路振动引起建筑物损伤的典型样本。

虽然GB 50868-2013中最严格的第三类振动限值是针对“对振动敏感、具有保护价值”的建筑物,但实测“监控室”、“库房”基础处峰值振动速度PPV已经接近或超过该限值,说明当建筑物振动速度接近或超过此限值时应引起重视,用第三类振动限值作为“建造质量较差建筑”的“安全阈值”符合实际情况,也更安全。由于此类建筑在铁路沿线建筑物中所占比例较大,此“安全阈值”具有实际意义。

铁路振动对沿线建筑的影响较为复杂、随机性较大,影响振动产生及传播的不确定因素很多,铁路沿线建筑物种类繁多、数量庞大,在条件允许的情况下,应尽可能多的选取有代表性的建筑物结构进行现场实测。通过大量实测数据分析,并结合数值模拟方法,对建筑物容许振动限值、评价方法进行修改完善。

## 5 结 语

通过对重载铁路沿线典型的单层砌体结构的振动响应进行现场测试,结合国内外标准进行振动影响评价,主要结论如下:

(1) 在距离外轨5 m、15 m的建筑物基础处振动速度在20 Hz~100 Hz呈宽频特征;在距离外轨29

m、38 m的基础处以低频振动为主,主频在20 Hz~31.5 Hz范围内。在15 m~29 m区域内基础处振动峰值衰减最为显著,在29 m及更远区域,振动速度衰减趋缓,振动速度小于0.4 mm/s。5 m、15 m处基础处竖向峰值振动速度随车速度的提高有增大趋势。单层砌体建筑屋顶振动低频响应明显,以房屋自振频率为主;

(2) 所测试的四处单层砌体建筑物在我国铁路沿线建筑物中较为典型,应归为“建造质量较差的建筑”。振动响应实测数据分别用英国、德国、中国标准进行对比分析,实测峰值振动速度PPV与英国、德国标准限值差距较大,存在适用性问题;

(3) 实测“库房”基础处峰值振动速度PPV数值较大,并结合裂缝分布位置和开裂扩展情况,分析认为该处房屋结构损伤与铁路振动有相关性。当峰值振动速度PPV超出GB 50868-2013中的第三类振动限值时,会对我国铁路沿线“建造质量较差的建筑”产生损害。

#### 参考文献:

- [1] 田苗,熊春梅. 列车引起的环境振动问题研究[J]. **噪声与振动控制**, 2013, 33(1): 143-147.
- [2] 卢华喜,梁平英. 高速列车引起建筑物振动的研究进展[J]. **噪声与振动控制**, 2010, 30(4): 50-53.
- [3] ISO 4866: 2010, Mechanical vibration and shock-vibration of fixed structures- guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures[S], 2010.
- [4] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [5] GB50868-2013. 建筑工程容许振动标准[S]. 北京:中国计划出版社, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2013.
- [6] 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.
- [7] 徐建. 建筑工程容许振动标准理解与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- [8] DIN4150-3. Structural vibration, Part 3. Effects of vibration on structures[S]. 1999.
- [9] BS 7385. Evaluation and measurement for vibration in buildings, Part 2. Guide to damage levels from ground-borne vibration [S]. 1993.