

汽车所致虎门遗址振动全过程性能化研究

葛家琪¹, 马伯涛¹, 庞玉涛², 王仕俊³, 杨维国⁴, 张楠⁴

(1. 中国航空规划建设发展有限公司, 北京 100120; 2. 聊城市规划建设设计院有限公司, 山东 聊城 252000;
3. 河南艺术中心, 郑州 450046; 4. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 以虎门炮台旧址范围内文物影响评估为工程背景, 在公路交通规划阶段对古建文物防振安全性进行全过程性能化分析、实测与防护措施研究。通过现场重载车辆行驶场地及古建筑文物振动实测, 得有限元分析关键技术参数, 对包括“车辆、道路、场地、文物”的有限元模型进行校准; 采用校准后有限元模型对车辆轴重、行车速度、多车效应、隔振沟尺寸等参数分析研究, 得文物的振动响应; 用性能化指标评价文物振动安全性, 采取合适振动防护措施。实测与分析表明, 实测与分析结合全过程性能化分析法能用于交通规划文物保护研究, 公路 50 m 辅路以隔振沟可保证古建筑文物的振动安全性。

关键词: 古建筑; 交通振动; 性能化分析

中图分类号: TU311.3; TU251

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.14.017

Whole process performance-based analysis on vibration of Humen site induced by automobile running

GE Jia-qi¹, MA Bo-tao¹, PANG Yu-tao², WANG Shi-jun³, YANG Wei-guo⁴, ZHANG Nan⁴

(1. China Aviation Planning and Construction Development Co., Ltd, Beijing 100120, China;

2. Liaocheng Planning and Architecture Design Institute Co., Ltd, Liaocheng 252000, China;

3. Henan Art Center, Zhengzhou 450046, China; 4. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Under the background of Heritage Impact Assessment project in the region of Humen Fort related areas, the whole process performance-based analysis integrated with measurements and anti-vibration measures for the vibration safety of ancient structures in road planning stage was carried out. The vibration of the related soil layers and ancient structure under heavy vehicles excitation was measured, and the key technical parameters of a finite element model (FEM) including “vehicle, road structure, related site’s soil layers and ancient structure” were calibrated according to the measurement results. And then, the influences of the vehicle axle load, vehicle speed, multi-vehicle effect and isolation trench dimensions were analysed by using the calibrated FEM, and the vibration response of ancient structure was obtained. The performance-based indexes were accepted to evaluate the vibration safety of ancient structure, and the reasonable anti-vibration measures were proposed according to the finite element analysis results. The measurement and analysis show that, the proposed whole process performance-based analysis combined with corresponding measurements can be used for transportation planning and relics conservation. The vibration safety of ancient structure can be guaranteed when it is spaced 50m apart from the road.

Key words: ancient structure; traffic induced vibration; performance-based analysis

随着我国铁路、高铁、公路及城市轨道建设的迅猛发展, 交通网络不断密集, 流量不断增加。工业、交通振动对建筑及文物危害属微振动疲劳损伤, 短期内难

易发觉, 但已逐渐被重视, 并研究各种防振技术措施^[1-2]。交通振动主要有轨道、公路交通。周裕德等^[3]结合上海音乐厅迁址工程, 采用类比调查法在衡山路附近进行测试, 距地铁线 8 m 处, 地铁经过时振级约 84 dB, 主要频段在 40 ~ 100 Hz; 某城市地铁列车在建筑首层以 15 ~ 25 km/h 速度通过时, 建筑 3 层楼面实测加速度达 85 dB, 西直门城铁附近 100 m 处 5 层居民楼, 列车通过时室内感觉到强烈振动, 门窗、家具

基金项目: 中国航空规划建设发展有限公司资助项目(技 12 技-1); 国家自然科学基金资助项目(51178041); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011JBM260)

收稿日期: 2013-11-08 修改稿收到日期: 2014-01-02

第一作者 葛家琪 男, 研究员, 1964 年生, 邮箱: capdi.gssd@vip.163.com

等玻璃发出响声,甚至一段时间后家具因振动而移位^[4];欧洲某公路或轨道交通线附近古砖石建筑因车辆通过时引起的振动产生裂缝最终倒塌^[5]。

虎门炮台旧址为第二批全国重点文物保护单位。修建的威远岛环岛路在定洋炮台区段由于道路穿行山中,曲率半径不得小于200 m,评估前环岛路机动车行道距文物本体(清兵营房)仅48 m,见图1。公路交通荷载引起的振动可能对文物产生不利影响,应进行交通振动的文物性能化评估及预测,保证文物在全寿命期内的安全性。文物安全性能化研究为综合运用结构高等分析手段与工程方法达到既定文物安全性能目标的系统研究,包括安全指标确定、振动响应预测及振动响应控制,即据文物结构形式、材质、重要等级等确定不同的安全控制指标,采用适宜试验实测及分析评估预测方法及防护措施。目前我国文物防振保护研究尚处初级阶段,预测及评估方法有待结合具体工程进一步完善^[6]。

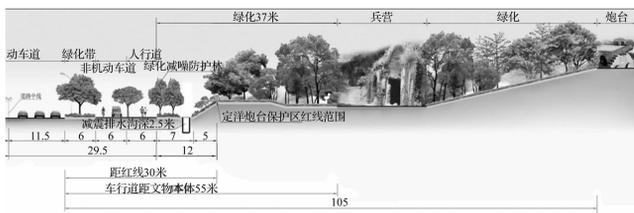


图1 环岛路与文物关系示意

Fig. 1 Positional relationship of island road and heritage

1 防振安全性能化评价标准

针对不同振源对古建筑影响,GB/T 50452 - 2008《古建筑防工业振动技术规范》规定:古建筑结构容许振动速度应据结构类型、保护级别及弹性波在古建筑结构中的传播速度选用。古建筑砖结构容许振动速度见表1。定洋炮台区兵房结构及炮台结构实测弹性波速 V_p 分别为 1078 m/s 及 2073 m/s。由于该炮台为全国重点保护文物,故由表1获得兵房、炮台结构振

动允许速度分别为 0.15 mm/s 及 0.19 mm/s。

表1 古建筑砖结构容许振动速度 v (mm/s)

Tab. 1 Allowable vibration velocity of ancient brick structure v (mm/s)

保护级别	控制点方向	砖砌体 $V_p/(m \cdot s^{-1})$		
		< 1 600	1 600 ~ 2 100	> 2 100
国家重点文物保护单位	水平	0.15	0.15 ~ 0.20	0.20
省级文物保护单位	水平	0.27	0.27 ~ 0.36	0.36
市、县级文物保护单位	水平	0.45	0.45 ~ 0.60	0.60

注:当 V_p 介于 1 600 ~ 2 100 m/s 之间时, v 采用插值法取值;控制点位置位于承重结构最高处。

2 计算机仿真模型与试验验证研究

2.1 重车激振现场实测

现场实测采用 55 t 重型卡车,以 60 km/h 车速驶过待建公路路基,同时测量兵房拱顶、基座及公路路基三方向振动。位置关系示意图见图2,测试结果见表2。

由表2可得公路路基至兵房基座的衰减系数(后者与前者速度比)在顺路向、横路向及垂向分别为 0.192、0.469、0.363;兵房拱顶相对兵房基座在顺路向、横路向及垂向分别放大 2.27、3.69、2.62。

表2 公路近地面测试记录峰值统计

Tab. 2 Peak test statistics of highway near the ground

测量位置	振动速度/ $(\mu m \cdot s^{-1})$		
	顺路向	横路向	垂向
兵房拱顶	139.4	205.5	130.8
兵房基座	61.5	55.6	49.8
公路路基	319.4	118.5	137.1

注:顺路向指沿公路走向;横路向指垂直公路走向;垂向指垂直地面方向。

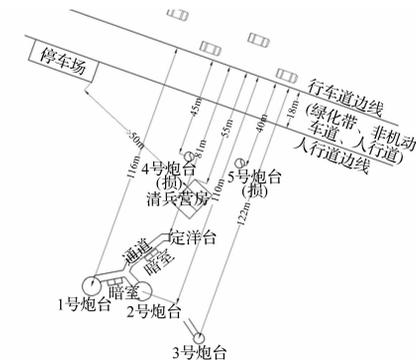


图2 公路、兵房、炮台位置关系示意图

Fig. 2 Positional relationships schematic diagram of, barrack and fort

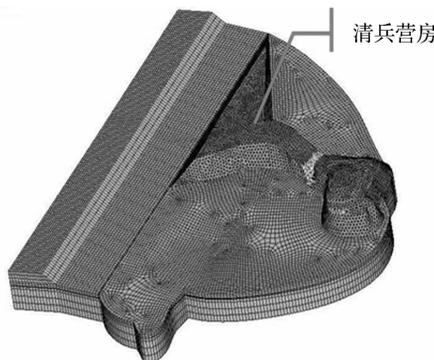


图3 影响区土体分析模型

Fig. 3 Affected zone soil analysis model

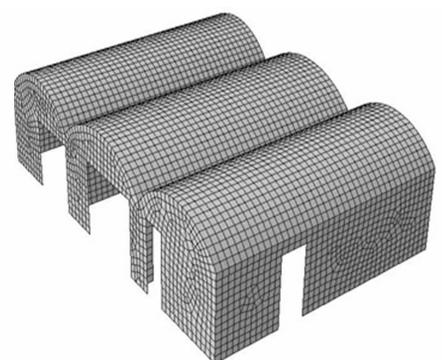


图4 清兵营房子结构模型

Fig. 4 Substructure model of the Qing Army barracks

2.2 性能化模型分析与校准

据地形图、地质勘查资料建立有限元模型。用 solid95 实体单元模拟土体,用 shell63 壳单元模拟兵房,见图 3、图 4。土体模型中最大单元格尺寸为 2 m,可满足所需结果精度,边界条件用粘弹性人工边界^[7],避免边界反射等造成的影响^[8]。

为验证有限元模型的正确性及可靠性,对模型施加车重、速度及行车位置均与实测相同,即车重 55 t,速度 60 km/h,路边测点距行车线约 7 m。本文模型车辆荷载以接地压力形式传至路面单元,按等效节点荷载

形式施加于单元节点。汽车以移动荷载列形式在有限元模型中加载^[9]。提取的有限元模型中与工程实测点相同位置处动力响应见表 3。由表 3 看出,有限元分析结果与实测结果吻合较好;个别数值差别较大。原因为公路交通振动能量较小,且处于施工阶段,路面不平易造成汽车摇摆;外界干扰(如人员的走动等)对测试结果影响较大。因此认为用有限元模型模拟工程实际振动可行。据模型对道路不同工况的车辆荷载进行分析,给出各工况振动激励对文物保护区各方向振动响应,评估文物的安全性。

表 3 有限元计算与现场实测速度对比

Tab.3 Speed comparison of finite element analysis with field measurement

测量位置	现场实测振动速度/($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			有限元计算振动速度/($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			偏差/%		
	顺路向	横路向	垂向	顺路向	横路向	垂向	顺路向	横路向	垂向
兵房拱顶	139.4	205.5	130.8	138.35	89.5	201.01	0.75	56.45	-53.68
兵房基座	61.5	55.6	49.8	60.69	28.49	59.02	1.32	48.76	-18.51
公路路基	319.4	118.5	137.1	127.29	86.74	120.8	60.15	26.80	11.89

注:偏差有限元计算振动速度与现场实测振动速度差被现场实测振动速度除。

3 性能化分析研究

3.1 分析荷载选取

该公路等级为二级,为提高安全储备,用一级公路标准计算。据 JTGB01 - 2003《公路工程技术标准》规定,一级公路为专供汽车分向、分车道行驶,并据所需控制出入多车道公路;六车道高速公路能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 25000 ~ 55000 辆。《中华人民共和国道路交通安全法》规定:高速公路行驶车速超过 100 km/h 时安全车距为 100 m;低于 100 km/h 时最小安全车距不得小于 50 m。

3.2 工况

为研究不同车速、车重及隔振沟深度对振动传递及振动响应影响,本文考虑 3 种工况。

(1)动力效应研究。计算无隔振沟时土体衰减规律及兵房拱顶动力放大系数。主要分析固定车重(55 t)时改变车速为 40 km/h,60 km/h,80 km/h;固定车速(60 km/h)时改变车重为 5 t,10 t,55 t。

(2)隔振沟尺度研究。计算有隔振沟时土体的振动衰减规律。用车重 55 t、车速 60 km/h 时重型车激励,沟宽 1 m,改变沟深为 0 m,1.5 m,3 m,6 m。

(3)多车效应研究。据(2)确定的沟深,考虑多车行驶时的振动影响。多车行驶分为多车道同向并行与同车道多车同向行驶两种。据一级公路及法规规定,考虑最不利的多车组合,即 55 t,10 t 两种情况,3 车道 3 车并行及同车道 2 车同向行驶时分析古建筑文物的振动响应。

3.3 各工况计算结果分析

3.3.1 工况 1 动力效应研究

(1)对车重 55 t,车速 40 km/h,60 km/h,80 km/h 时分析不同车速对地面振动影响。用有限元分析获得顺路向、横路向及垂向峰值速度随距离变化规律见图 5。由图 5 看出,随距离的增加地面振动响应减小。

表 4 改变车速时衰减系数对比

Tab.4 Attenuation coefficient contrast when changing the speed

车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	顺路向		横路向		垂向	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
40	0.598	0.258	0.597	0.945	1.146	0.724
60	0.477	0.191	0.328	0.495	0.489	0.278
80	0.386	0.122	0.191	0.162	0.309	0.156

注: δ_1 兵房基座与路基比值; δ_2 炮台与路基比值。

表 5 改变车速时兵房拱顶最大速度及动力放大系数

Tab.5 Vault maximum speed and dynamic magnification coefficient when changing the speed

速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	顺路向/横路向/垂向		
	兵房基座/ ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	兵房拱顶/ ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	放大系数
40	53.4/24.2/49.5	134.3/179.3/132.1	2.5/7.4/2.7
60	60.7/28.5/59.0	138.4/89.5/201.0	2.3/3.1/3.4
80	79.1/46.8/65.9	208.9/76.8/200.4	2.6/1.6/3.0

兵房基座(35 m)、炮台处(85 m)振动速度响应衰减见表 4。由表 4 看出,车速越快顺路向、横路向及垂向衰减越明显;距行车道越近衰减速度越快。综合考

虑兵营基底处速度衰减系数取0.35,即65%的衰减;炮台处速度衰减系数取0.25,即75%的衰减。

兵房拱顶最大速度及兵房拱顶相对兵房基座放大系数见表5。顺路向、垂向兵房拱顶动力放大系数变化分别为2.3~2.6及2.7~3.4;横路向兵房拱顶动力放大系数随速度增加而减小,且车速每增加20 km/h,动

力放大系数减小为50%。

(2)对车速60 km/h、车重5 t,10 t,55 t时分析不同车重对地面振动响应影响。计算分析获得顺路向、横路向及垂向峰值速度随距离的变化规律见图6。由图6看出,距离越远地面振动响应越小;车辆载重增加振动响应基本呈线性增加。

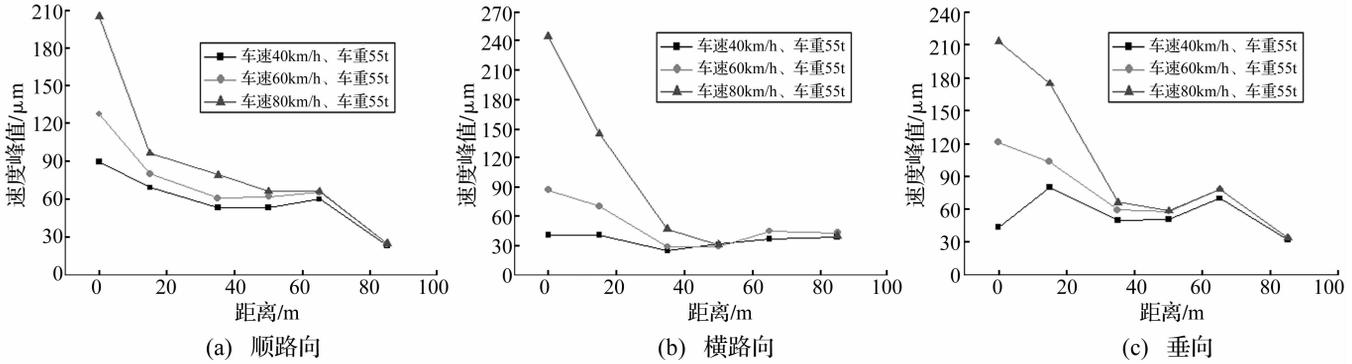


图5 改变车速时振动响应

Fig. 5 The vibration response when changing the speed

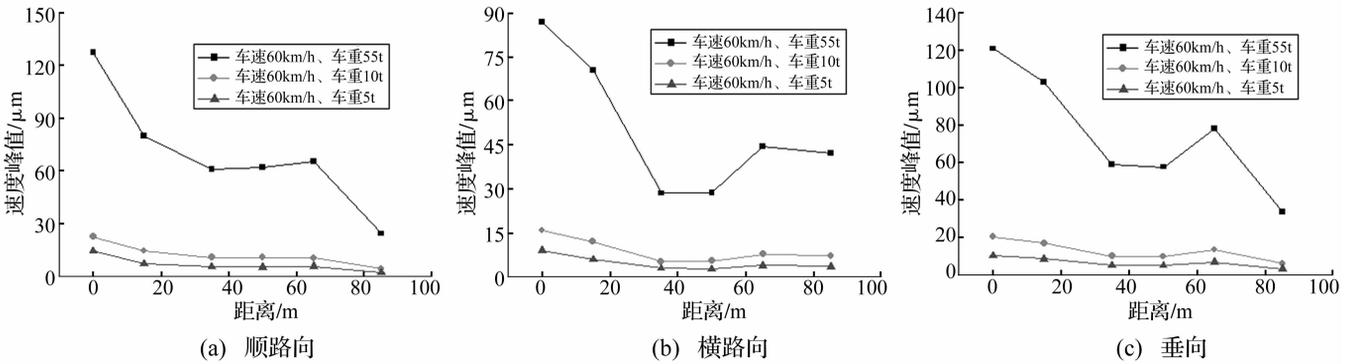


图6 变车重时振动响应

Fig. 6 Vibration response when changing vehicle weight

改变车重,兵房基座(35 m)及炮台处(85 m)振动速度衰减见表6。由表6看出,改变车重三方向衰减变化不明显,车重为5 t,10 t,55 t时兵房基座振动速度衰减51%~68%、51%~68%、51%~67%;炮台振动速度衰减50%~85%、54%~80%、60%~85%。综合考虑兵房基底处速度衰减系数取0.35,即65%的衰减;炮台处速度衰减系数取0.2,即80%的衰减。

兵房拱顶最大速度及放大系数见表7。由表7看出,车重不同,顺路向、垂向拱顶动力放大系数变化为依次为2.3~2.5,3.4~3.7;横路向拱顶动力放大系数随车重的增加而增加,车重越大动力系数增加越缓慢。

表6 改变车重时衰减系数对比

Tab. 6 Attenuation coefficient contrast when changing vehicle weight

车重/t	顺路向		横路向		垂向	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
	5	0.375	0.151	0.328	0.495	0.489
10	0.477	0.193	0.327	0.455	0.487	0.287
55	0.375	0.151	0.329	0.397	0.487	0.287

注: δ_1 兵房基座与路基振动速度比值; δ_2 炮台与路基振动速度比值。

表7 改变车重时兵房拱顶最大速度及动力放大系数

Tab. 7 Vault maximum speed and dynamic magnification coefficient when changing vehicle weight

车重/t	顺路向/横路向/垂向		
	兵房基座/ ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	兵房拱顶/ ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	放大 系数
5	5.40/3.00/4.94	13.31/7.44/18.23	2.47/2.48/3.69
10	10.73/5.19/9.87	26.60/14.86/36.39	2.48/2.86/3.68
55	60.69/28.49/59.02	138.35/89.5/201.0	2.28/3.14/3.41

由以上分析及表1知,车重为55 t时不采取任何减振措施,汽车行驶造成兵房拱顶水平速度接近或超

过限值 0.15 mm/s, 55 t 车重时对兵房可能造成损坏; 车重 5 t, 10 t 的单辆车以 40 km/h、60 km/h、80 km/h 速度行驶所致兵房拱顶水平振动速度远小于 0.15 mm/s, 不会对兵房造成破坏。

3.3.2 工况 2 隔振沟尺度研究

用车重 55 t、车速 60 km/h 重型卡车, 改变隔振沟深度, 分别取无沟(0 m), 1.5 m, 3.0 m, 6.0 m 进行计算, 研究隔振沟对振动响应衰减规律影响。获得顺路向、横路向、垂向峰值速度变化曲线见图 7。兵房基座及炮台处振动速度响应衰减见表 8。由表 8 看出, 兵房基座处横路向、顺路向振动速度随隔振沟深度增加而减小, 沟深 6 m 时振动速度较无沟时降低 12%, 垂向速度响应衰减不明显, 沟深 6 m 时降低 7%; 炮台处横路向、顺路向振动速度随隔振沟深度增加而降低, 沟深 6 m 时振动速度较无沟时降低 8%, 垂向速度响应衰减不明显, 沟深 6 m 时衰减 8%。

由以上分析知, 在路边设置隔振沟有利于控制土

体振动响应, 且隔振沟深度与隔振效果成正比, 即隔振沟愈深隔振效果愈明显; 水平隔振效果优于竖向; 但考虑工程实施情况, 隔振沟设置太深会限制其效率发挥。本工程建议排水沟兼做隔振沟, 深 3 m, 可使振动速度减小约 8%。结合工况 1 及表 5、表 7 结果知, 车速控制在 60 km/h 以内时, 3 种车重引起的兵房拱顶水平最大速度不超 0.15 m/s, 可满足表 1 要求。

3.3.3 工况 3 多车效应研究

用工况 2 结论, 取沟深 3 m 分析多车行驶时地面的振动响应。考虑多条车道并行及同车道多车影响。通过施加在有限元模型同向、同速两辆移动车辆荷载, 分析同车道多车振动效应叠加影响。多车道主要参考相关规范对单车道、多车道荷载组合及折减方法。车道数越多出现最不利加载几率越小。桥涵设计车道数 ≥ 2 时汽车荷载所致效应按 JTG D60 - 2004《公路桥涵设计通用规范》的多车道横向折减系数折减, 见表 9, 折减后效应不得小于两条设计车道荷载效应。

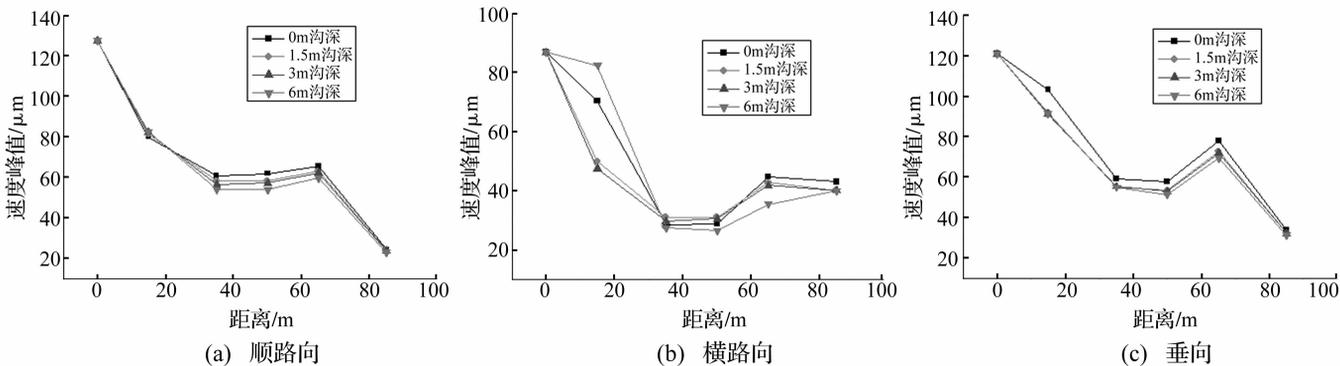


图 7 改变隔振沟深振动响应

Fig. 7 Vibration response when changing trench deep

表 8 改变沟深衰减系数对比
Tab. 8 Attenuation coefficient contrast when changing trench deep

沟深/m	衰减系数					
	顺路向		横路向		垂向	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
无沟	0.477	0.191	0.328	0.495	0.489	0.278
1.5	0.456	0.188	0.358	0.461	0.455	0.266
3	0.443	0.186	0.341	0.460	0.457	0.266
6	0.422	0.180	0.317	0.460	0.455	0.257

注: δ_1 兵房基座与路基振动速度比值; δ_2 炮台与路基振动速度比值。

3.3.3.1 多车道并行

考虑车重 55 t、10 t, 速度 60 km/h 时 3 辆汽车并行情况。用表 9 折减系数计算两种多车并行结果见图 8、图 9。由图 8、图 9 看出, 与工况 1 中(2)分析结论一致, 地面振动响应与车重近似正比关系。

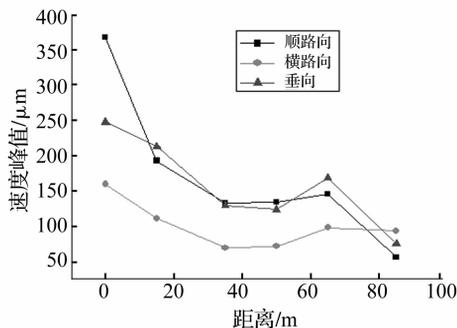


图 8 车重 55t 三车道振动响应

Fig. 8 Vibration response at vehicle weight of 55 t and three-lane

车重 55 t 据工况 1 计算所得兵房拱顶动力放大系数规律, 3 车并行时兵房拱顶最大速度峰值超过表 1 限值 0.15 mm/s, 应予以避免; 车重 10 t 以下 3 车并行时所致振动远小于 0.15 mm/s, 不会对古建筑文物产生破坏。

表9 多车道横向折减系数

Tab.9 Horizontal reduction coefficient at multi-lane

设计车道数	2	3	4	5	6	7	8
横向折减系数	1.00	0.78	0.67	0.60	0.55	0.52	0.50

3.3.3.2 同车道多车行驶与单车对比

车重 10 t, 55 t, 速度 60 km/h 时两车相距 60 m 同车道行驶, 与单车行驶对比见表 10。由表 10 看出, 10 t 时公路路基处两车产生的振动响应分别是单车时的 0.9 ~ 2.1 倍, 兵房基座处两车产生的振动响应分别是单车时的 1.6 ~ 3.2 倍, 炮台处两车产生的振动响应分别是单车时的 1.1 ~ 1.5 倍; 55t 时, 公路路基处两车产生的振动响应分别是单车时的 0.8 ~ 2.0 倍, 兵房基座处两车

表 10 单车与多车振动响应对比

Tab.10 Vibration response contrast of cycling with multi-vehicle

车重/t	方向	同行车辆数/辆					
		公路路基/ μm	兵房基座/ μm	炮台/ μm	公路路基/ μm	兵房基座/ μm	炮台/ μm
10	顺路向	22.49	10.26	4.31	47.51	24.90	4.80
	横路向	15.88	5.38	7.25	25.04	17.41	10.80
	垂向	20.25	10.04	5.84	19.25	16.37	7.71
55	顺路向	127.29	56.43	23.70	260.15	136.36	26.38
	横路向	86.75	29.60	39.89	137.73	95.76	59.41
	垂向	120.80	55.24	32.12	105.92	90.05	42.41

据分析结果, 多车振动响应与单车振动响应比值不会随车重的改变而改变; 除兵房基座附近外, 多车速度响应不会超过单车响应乘以车辆数; 兵房基座处多车响应超过单车响应乘以车辆数的原因为由于两车产生的振动波在此处叠加发生驻波所致。综合考虑三向振动, 在有限元分析中模拟单车道多车振动响应可用相同数量单车振动响应折减获得, 折减系数范围 0.44 ~ 1.05, 建议取 0.8。距行车道大于 35 m 处, 地面振动响应局局部略有增加, 其原因可能与振动传播中不同土层间反射、土体参数及地形地貌等因素有关, 与文献 [10] 实测结果吻合。

4 建议

为充分保障文物安全, 在性能化分析基础上, 对工程建设提出几点建议:

(1) 定洋炮台区段整个文物建设控制地带内, 路边应设置隔振沟, 沟宽 1 m, 沟深 3 m;

(2) 文物相关路段应合理安排施工计划, 先进行隔振沟施工。在确保工程质量前提下, 文物区段应采用振动最小的小型机械设备, 确保道路施工过程中路面三方向最大振动速度实测值不大于 0.15 mm/s、最大振动加速度实测值不大于 3.0 mm/s²;

(3) 文物相关路段路面设计时宜选减振效果良好的路面及路基结构, 确保道路设计运营期(15年)内车

产生的振动响应分别是单车时的 1.6 ~ 3.2 倍, 炮台处两车产生的振动响应分别是单车时的 1.1 ~ 1.5 倍。

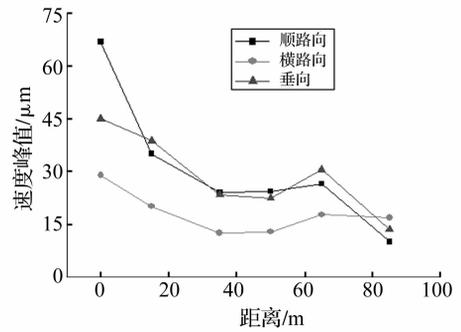


图9 车重 10 t 三车道振动响应

Fig.9 Vibration response at vehicle weight of 10t and three-lane

流量及 60 km/h 车速时路面三方向最大振动速度实测值不大于 0.15 mm/s, 最大振动加速度实测值不大于 3.0 mm/s²;

(4) 文物区段车速应控制在 60 km/h 以内, 运营车流量不应超出二级公路限值;

(5) 道路与文物本体间在不影响景观效果前提下尽可能多种植高大植被;

(6) 建议尽早对危险古建筑文物修缮、加固。

5 结论

本文以环岛路建设与运营对虎门炮台旧址影响评估为工程背景, 提出全过程性能化分析方法, 通过有限元分析与现场实测等手段对古建文物进行振动安全性评估, 结论如下:

(1) 现场实测确定关键技术参数及有限元分析进行参数化研究、预测的性能化分析方法可用于预测公路交通所致古建文物振动安全性及公路交通规划, 方法可靠、可行;

(2) 通过实测、计算、研究给出的古建文物振动速度与车辆运行车重、车速、同行车辆数变化规律及与隔振沟尺度变化规律;

(3) 城市内公路设计车辆(非超载、超速)运行时按本文建议可实现古建筑文物振动控制指标。

(下转第 131 页)

- [17] 王雄江, 顾明, 瞿伟廉. 桥梁气动导纳识别的阶跃函数拟合法[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 66-73.
WANG Xiong-jiang, GU Ming, QU Wei-lian. Determination of

aerodynamic admittance functions of bridge deck[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 66-73.

(上接第 100 页)

参 考 文 献

- [1] 王晓, 严中保, 杜涵文. 上海自由电子激光工程隔振沟减振数值分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 190-194.
WANG Xiao, YAN Zhong-bao, DU Han-wen. Numerical analysis of vibration-attenuation effect of trenches in the engineering project of Shanghai free electron laser [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 190-194.
- [2] 时刚, 高广运. 饱和地基中二维空沟远场被动隔振研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 157-162.
SHI Gang, GAO Guang-yun. Two-dimensional analysis of open trench used as passive barriers in saturated soil [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 157-162.
- [3] 周裕德, 祝文英, 应乐惇, 等. 地铁振动对上海音乐厅迁址影响分析及对策措施[A]. 上海市环境科学学会第 11 届学术年会论文集[C]. 上海: 上海市环境科学学会, 2004.
- [4] 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: 1-8.
- [5] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-10.
- [6] 贾颖绚, 郭猛, 刘维宁, 等. 列车振动荷载对古建筑的动力影响[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 118-122.
JIA Ying-xuan, GUO Meng, LIU Wei-ning, et al. Dynamic effect of train induced vibration on historic buildings [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 118-122.
- [7] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹

性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 45-51.

LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 45-51.

- [8] 黄菊花, 何成宏, 杨国泰, 等. 地基中振动波的有限元分析[J]. 振动与冲击, 1999, 18(1): 38-43.
HUANG Ju-hua, HE Cheng-hong, YANG Guo-tai, et al. Finite element analysis of vibration propagation in foundation soil [J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(1): 38-43.
- [9] 马伯涛, 杨国莉, 庞玉涛, 等. 大跨度及长悬挑楼层钢结构运动场人员舒适度分析研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 95-103.
MA Bo-tao, YANG Guo-li, PANG Yu-tao, et al. Study on comfort analysis of sport field structure with large-span and cantilevered steel floor [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4): 95-103.
- [10] 张玉红, 陈茂庆, 汤卓文, 等. 地铁列车运行的环境振动影响分析(I)-场地时域振动分析[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2009, 27(3): 41-44.
ZHANG Yu-hong, CHEN Mao-qing, TANG Zhuo-wen, et al. Influence analysis of vibration induced by moving subway train(I)-the vibration analysis of soil in the domain time [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2009, 27(3): 41-44.