

公路汽车振动对晋祠圣母殿宋代彩塑影响研究

李庆玲¹, 于振龙²

(1. 山西省晋祠博物馆, 山西太原 030025; 2. 太原市教育局, 山西太原 030082)

摘要: 为了研究公路的交通振动对彩塑损伤状况, 对山西省晋祠圣母殿内彩塑进行了脉动和汽车振动测试。脉动测试与分析得到了彩塑基频自振周期、阻尼比及传递函数; 单车公路汽车振动测试及利用传递函数进行的多车振动数值计算分析, 得到了彩塑在单车行走下的最大位移为 $3.40 \times 10^{-2} \mu\text{m}$, 五车纵列行走振动最大位移为 $1.32 \times 10^{-1} \mu\text{m}$, 及在不同汽车流下的振动位移。根据彩塑残损情况和振动最大位移角 $2.24 \times 10^{-7} \text{rad}$, 提出了瞬时振动对晋祠泥质彩塑影响的判定等级和准则; 根据疲劳损伤理论和振动测试结果, 提出了持久振动对晋祠泥质彩塑损伤的判定准则; 根据晋祠泥质彩塑的现状损伤和其在振动时的瞬时位移极限角, 提出了不同等级公路应有的避让距离分别为 3200m、2400m、1800m、1200m、800m, 并对晋祠周围的公路状况进行了判定。

关键词: 晋祠圣母殿; 宋代彩塑; 振动

中图分类号: K878.6 **文献标识码:** A

0 引言

文化遗产种类繁多, 各有特色, 共同的特点是保存年代久远, 长期处于本身与环境协调的状态下, 所以能持久保存。振动种类繁多, 对文物的影响也各不相同。文物建筑及其附属文化遗产受汽车振动的影响比较普遍。彩塑常常出现于各类文物建筑中, 因其自身特性及其与建筑的连接措施, 可能使振动放大或缩小, 其振动特征和损伤与文物建筑不同^[1], 现研究也很少。振动对彩塑的影响主要有两类, 一是振动引起的最大动应变(位移)是否超过彩塑各类材质的极限应变(位移), 二是重复性的振动疲劳损伤。泥质彩塑受到的这类影响更为突出。山西太原晋祠圣母殿内的宋代彩塑珍品侍女像(图1)为研究对象。

晋祠位于太原市西南二十五公里的悬瓮山麓, 圣母殿作为晋祠的主体建筑, 坐西面东, 背依山岩, 前临鱼沼泉。殿基就坐落在鱼沼飞梁西侧。据碑文记述, 圣母殿创建于宋太平兴国九年(公元984年), 后经景佑四年十二月(公元1038年)和建中靖国元年十二月(公元1102年)两次地震损坏, 崇宁元年(公元1102年)重修, 迄今已有891年。圣母殿面阔7间, 进深6间, 重檐歇山顶, 四周回廊, 前廊2间, 为现存宋代建筑精品。圣母殿内尚存的43尊

彩绘塑像, 除圣母像两侧的小像是后来增补的外, 其余都是宋代原塑。各尊彩塑均为精美的艺术珍品, 其表现风格蕴藏了丰富的社会信息, 包括生活状态、人间关系、审美情趣、服饰衣着以及人们的向往理念和思想感情等。其历史价值、文物价值、艺术价值在国内外均受到重视, 是世界范围内的重要文化遗产。



图1 圣母殿宋代泥塑测点布置图

Fig.1 Arrangement of measurement stations on the Song clay statue in Shengmu Dian (Goddess Hall)

收稿日期: 2009-11-06; 修回日期: 2010-07-12

作者简介: 李庆玲(1969—), 女, 1990年毕业于太原理工大学工民建专业, 工程师, E-mail: qingling_1969@163.com

通讯联系人: 于振龙(1969—), 男, 2005年毕业于北京大学考古与博物馆学专业, 博士, 副研究馆员, E-mail: zhenlongy@sohu.com

在晋祠博物馆西边有一山腰公路,距离圣母殿最近处约 70 米,车辆通过时的振动影响到建筑及彩塑的保护,为了判定此公路的交通振动对彩塑的影响,进行了现场实测,并进行了振动信号的分析,尝试性地提出了解决办法。

1 测试结果分析

1.1 测试与数据处理方式

由于现场条件比较复杂,而且交通振动的变化范围甚为离散,不可能在短时间内测得很多变

化的信息满足分析其各种不利影响。故本次测试采取了以下思路,用现有的条件分别按两系列进行测试:

- (1) 测得现有单车通过的地面振动信息,然后用计算机模拟来扩大振动源的变化信息量。
- (2) 用地面脉动为初始振动源,测得各处结构及物件的脉动振动反应,利用计算两者的传递函数,最后将多种振动源系列的信息输入,经传递函数的计算即可得出在估定的交通状态下的最不利振动影响值。测试计算方法见图 2 所示。

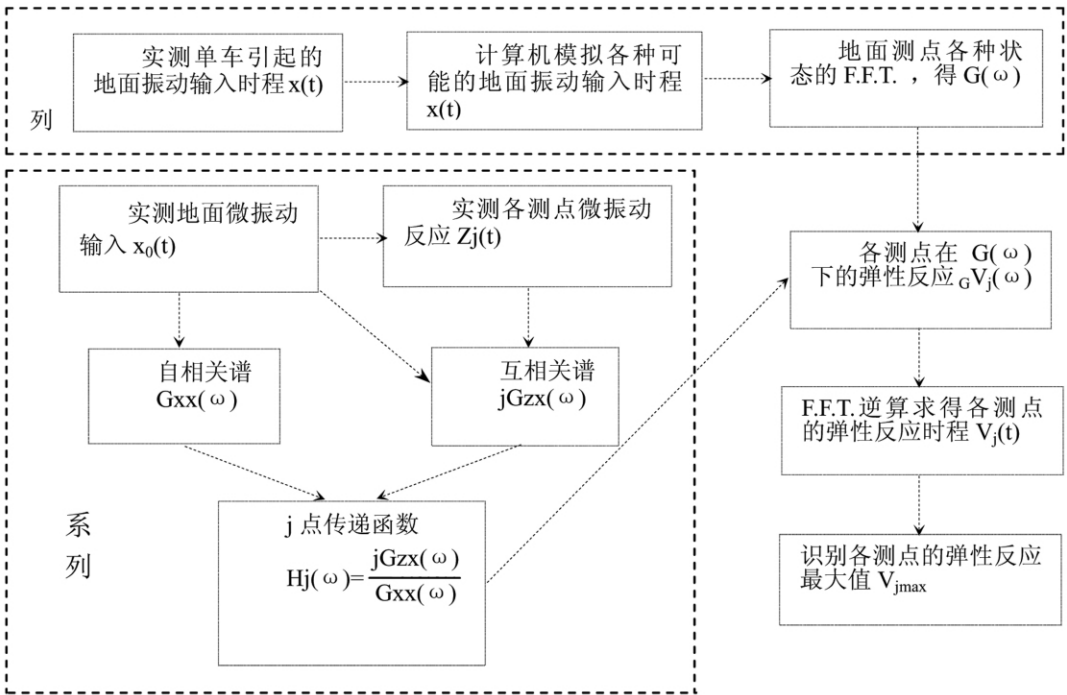


图 2 测试数据计算框图
Fig. 2 Calculation diagram of the test data

1.2 现场测试纪录

本次测试,按现在通过的较多车辆总重和车距情况,用计算机模拟,将实例的单车记录模拟出 10t 单车和 10t 五辆连续队列的地面振动影响值,以及在无车通过时彩塑的振动情况,结果见图 3。本次测试有记录曲线多条,均存在计算机内,此处仅 4 条。图 3 曲线纵坐标为传感器输出电压 MV 值,各

传感器转换标定为位移值 (mm),其标定曲线已输入计算机,可直接读出各峰值点位移^[2]。

1.3 测试数据与分析

对测试结果分析得到所测彩塑的自振频率和基频阻尼比(表 1),宋塑最大位移及最大位移角见表 2,这里位移角指所彩塑测点水平位移与彩塑测彩塑基顶的高度比值。

表 1 圣母殿及彩塑振动频率与阻尼

Table 1 Values of the vibration frequency and damping coefficient of colour-painted statues in Shengmu Dian

	基频 / Hz	二频 / Hz	三频 / Hz	基频阻尼比
圣母殿主体结构	1.95	4.98	8.01	0.042
圣母殿所测宋塑	7.32			0.020

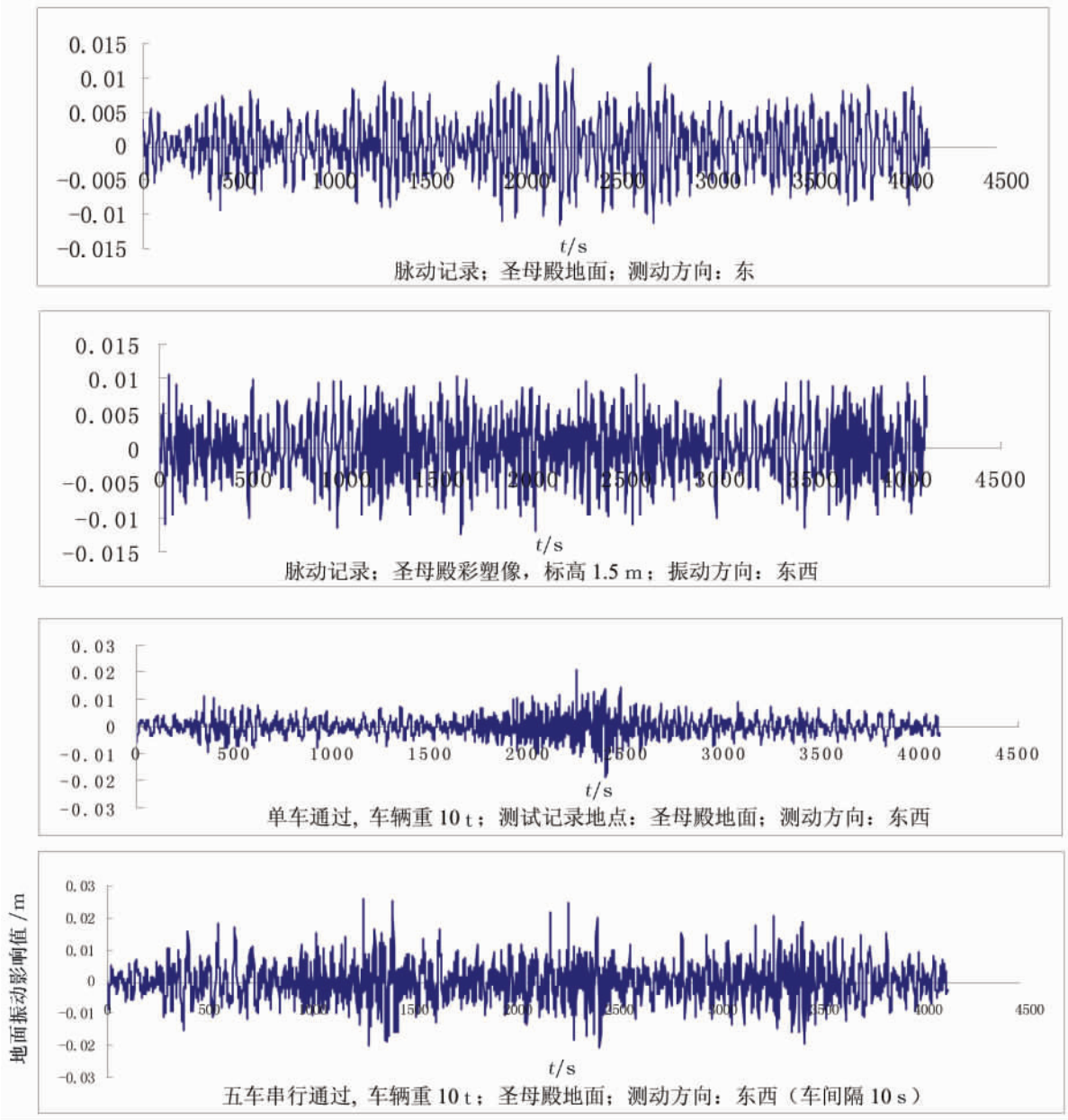


图 3 单车实测模拟多车地面振动影响值

Fig.3 The values of the ground vibration under experimental simulation of multi-cycle

表 2 圣母殿所测宋塑最大位移及最大位移角

Table 2 Maximum displacement and rotating angle of Song statues in Shengmu Dian

位置	车总重/t	单车			五辆纵列		
		$\Delta_{\max}/\mu\text{m}$	$(\Delta_{\max}/H)/\text{rad}$	$(\Delta_{\max}/H)/\text{rad}$ (考虑共振放大)	$\Delta_{\max}/\mu\text{m}$	$(\Delta_{\max}/H)/\text{rad}$	$(\Delta_{\max}/H)/\text{rad}$ (考虑共振放大)
地面	40	1.24×10^{-2}			2.88×10^{-2}		
34-35	40	2.60×10^{-2}	1.73×10^{-8}	2.94×10^{-8}	1.11×10^{-1}	7.40×10^{-8}	1.26×10^{-7}
32-33	40	3.40×10^{-2}	3.40×10^{-8}	5.78×10^{-8}	1.32×10^{-1}	1.32×10^{-7}	2.24×10^{-7}
12-13	40	2.28×10^{-2}	2.28×10^{-8}	3.88×10^{-8}	9.96×10^{-2}	9.96×10^{-8}	1.69×10^{-7}
14-15	40	2.40×10^{-2}	2.24×10^{-8}	4.08×10^{-8}	9.56×10^{-2}	9.56×10^{-8}	1.63×10^{-7}

2 瞬时振动对晋祠泥质彩塑影响的判定等级和准则

结合古建筑有关规范及其它建筑遭受环境振动而损坏的状况,同时参考我国一般建筑遭受瞬时振动影响的划分,现将泥质彩塑遭受瞬时振动影响分三级考虑,即基本完好、轻微破坏、中等破坏。

I 级基本完好:泥质彩塑侧移量很小,承重构架完好;装饰发生少量轻微损坏。不经修缮,可以继续使用。

II 级轻微损坏:泥质彩塑承重构架完好或轻微

倾斜,局部轻微倾斜;振动侧移量稍大,彩饰有局部损坏或脱落;彩绘表面有轻微裂缝。

III 级中等破坏:泥质彩塑承重构架明显倾斜,局部倾斜严重;振动侧移量大,彩饰有大面积损坏、裂缝、脱落。

彩塑根据不同的损坏程序,划定三个等级,各级评定的定量标准以层间位移角为准,即 Δ/H , Δ/H 的极限值列入表 3 中,当考虑长期保存,则按不同保证率,分别计算长期保证值。长期保证值分为四个不同保证率: A 为保证率 90%; B 为保证率 80%; C 为保证率 70%; D 为保证率 60%。判定等级见表 3。

表 3 瞬时振动晋祠彩塑损伤判定等级
Table 3 The damaged level of colored clay statues under transient vibration (rad)

等级	破坏情况	Δ/H	A	B	C	D
I 级	基本完好 (无起甲微缝)	1/4000	1/6600	1/5700	1/5000	1/4400
II 级	轻微损坏 (有微缝出现)	1/3000	1/5000	1/4250	1/3750	1/3300
III 级	中等破坏 (有侵入缝)	1/2000	1/3300	1/2850	1/2500	1/2200

3 关于持久振动的影响判定准则和彩塑的判定

由于持久振动系连续性的疲劳作用。随着振动次数的增加,彩塑内部组织发生变化,初始轻微的创伤或材料内部不均匀结构的薄弱部位,容易出现损伤,随着继续振动,则创伤在逐渐发展,抵抗能力在削弱,危险加大。故其变形的容许极限值,应该随振动次数的加大而减小。由于材料的组成和施工工艺的差别,属于离散性特大的范围。目前还难以用试验的方法,得出统一的标准。

初步设想:是用变形能累积理论和能量等效置换原则,利用瞬时振动的判定准则,进行推断其判定准则,其误差范围当在可接受的范围之内。设: E_1 为瞬态振动结构及物件的变形能; E_2 为持久振动

结构及物件的变形能累积,则

$$E_1 = mv_1^2 = m\omega^2 \Delta_1^2 \tag{1}$$

$$E_2 = \sum_1^n mv_2^2 = m\omega^2 \Delta_2^2 \cdot n \tag{2}$$

令: $E_1 = aE_2$, 这里 a 为相关系数和振动次数有关,通过疲劳试验来决定。

$$\text{则 } \Delta_1^2 = an\Delta_2^2 \tag{3}$$

式中 Δ_1 为瞬时振动的位移容许极限值, Δ_2 为持久振动的位移容许极限值。

$$\text{故: } \Delta_2 = \Delta_1 / \sqrt{an} \tag{4}$$

式中 n 为振次数。

按目前监测情况,每日车辆通过变化较大,初步按日通过 100 辆计算,年通过量为 3.65×10^4 辆,按此估计了耐久年限,如车辆通过数有显著变化,则耐久年限相应调整。结果见表 4~6。

表 4 圣母殿彩塑基本完好时
Table 4 When the colour-painted statues in the Shengmu Dian suffer no obvious damage

	极限值			静态长期保证值	
(Δ/H)/rad	1/4000	1/6600(A)	1/5700(B)	1/5000(C)	1/4400(D)
(Δ_{\max}/H)/rad			2.24×10^{-7}		
(Δ_{\max}/Δ)/rad	8.96×10^{-4}	14.78×10^{-4}	12.77×10^{-4}	11.20×10^{-4}	9.86×10^{-4}
耐久年数/年	126	40	56	76	101

表 5 圣母殿彩塑轻微损坏时

Table 5 When the colour-painted statues in the Shengmu Dian suffer minor damage

	极限值			静态长期保证值	
(Δ/H) /rad	1/3000	1/5000(A)	1/4250(B)	1/3750(C)	1/3300(D)
(Δ_{\max}/H) /rad	2.24×10^{-6}				
(Δ_{\max}/Δ) /rad	6.72×10^{-4}	11.20×10^{-4}	9.52×10^{-4}	8.40×10^{-4}	7.39×10^{-4}
耐久年数/年	242	76	110	146	195

表 6 圣母殿彩塑中等破坏时

Table 6 When the colour-painted statues in the Shengmu Dian suffer moderate damage

	极限值			静态长期保证值	
(Δ/H) /rad	1/2000	1/3300(A)	1/2850(B)	1/2500(C)	1/2200(D)
(Δ_{\max}) /H/rad	2.24×10^{-7}				
(Δ_{\max}/Δ) /rad	4.48×10^{-4}	7.39×10^{-4}	6.38×10^{-4}	5.60×10^{-4}	4.93×10^{-4}
耐久年数/年	609	195	272	363	484

以全车重 40t 为标准(包括车重 + 载重),每日通过量为 100 车次,圣母殿内宋代仕女像保持基本完好,保证率为 90%,对交通振动影响的耐久年限为 81 年。

4 泥质彩塑的“防汽车振动保护等级”的评定

首先根据泥质彩塑的各个主体的构造特点、材料性质、破坏机理,确定其在振动时的瞬时位移极限角。

第二步根据保护目标的重要性,期望的继续保存年代,评定出在确定的可靠度保证下的允许位移角。

第三步根据保护目标材料和构造情况,评价出在持续振动下的疲劳影响,选定不同振动次数的疲劳振动降低系数。

第四步根据保护目标的实测,找出其动力特性参数(包括固有频率、阻尼比、振型),并计算出振动放大系数。

第五步根据允许位移角、振动放大系数,计算出地面的允许振动位移。再根据选定的疲劳振动次数和相应的降低系数,选定地面的允许疲劳振动位移,这一位移值是划定“防汽车振动保护等级的依据”。

根据实测、模拟试验分析等结果,初步对案例晋祠圣母殿殿内彩塑进行了评定,建议值如表 7。

彩塑对振动十分敏感,能承受的疲劳次数最少,有效的保护年代短。

有了各级公路的汽车振动振源分析资料和彩塑保护点周围区域土层振动传播衰减数据,同时又根

表 7 晋祠圣母殿殿内彩塑振动控制建议值

Table 7 The recommended value of vibration control on the colored clay statues in the sacred Lady Hall

保护目标物		彩塑
Δ/H 极限振动位移角/rad		1/4000
允许振动位移角 [Δ/H] /rad	1. 保证率 90%	1/6600
	2. 保证率 80%	1/5700
	3. 保证率 70%	1/5000
	4. 保证率 60%	1/4400
疲劳振动降低系数	1. 预计 10 亿次	0.08
	2. 10 亿次至 1 亿次	0.13
	3. 1 亿次至 5 千万次	0.21
	4. 5 千万次至 1 千万次	0.32
防汽车振动保护等级(建议)		甲
地面最大振动允许位移值(以保证率 90%)		0.07mm
考虑疲劳振动 (以 500 年考虑)	1. 10 亿次以上	0.0056mm
	2. 10 亿至 5 亿	0.0091mm
地面最大振动	3. 5 亿至 1 亿	0.0147mm
允许位移值	4. 1 亿次至 5 千万次	0.0224mm

据要保护的文化遗产的特点和保护要求以及期望的持久保存年代,评价出保护等级和允许的地面振动位移值。两者相比就可评价出公路应有的避让距离,为规划和设计公路选线时,提供依据^[3]。

对晋祠圣母殿内重要文化遗产的彩塑,根据现有的不完整的资料,用上述方法初步建议的各级公路避让距离如表 8。表 8 中数据是以彩塑的保护为标准,期望保存年代为 500 年。汽车的交通量是以 5 辆车为一组,连续运行引起的。

表 8 晋祠圣母殿内彩塑保护的各级公路避让距离

Table 8 Avoidance distance of various grade levels road on the colored clay statues in the Sacred Lady Hal

公路等级	高速	一级	二级	三级	四级
避让距离/m	3200	2400	1800	1200	800
公路日交通量/辆	60000	36000	18000	9000	4500

按以上建议来衡量现有的公距,可以看出有些避让距离不足,势必影响彩塑的持续保存年代。试作了一个粗略比较,作为参考值列表 9。

表 9 现状不同公路对晋祠圣母殿内彩塑的影响

Table 9 The affect of different now roads on the colored clay statues in the Sacred Lady Hal

公路名称	等级	最短距离	与建议值相比	估计可持续保存年代
古唐路	二级	1073m	不足	120 年
高速路	高速	1874m	不足	100 年
迎宾路	一级	2448m	可	-
新晋祠路	一级	2625m	可	-
黄古路	四级	80m	不足	50 年

从表 9 可以看出,如果汽车振动影响保持以上估计状况,彩塑的可持续保存年代较短。

5 结 论

1) 山西省晋祠圣母殿内尚存的 43 尊宋代彩绘塑像,是世界范围内的重要文化遗产。而其残损随着年代的增加将会逐年积累。引起彩塑损伤的原因很多,交通振动引起的直接损伤和疲劳损伤受到关注。

2) 对山西省晋祠圣母殿内彩塑进行了脉动和汽车振动测试。脉动测试与分析得到了彩塑基频(7.32HZ)、阻尼比(0.020)及传递函数,这些是减小彩塑振动、设置减震装置等的基本参数;单车公路汽车振动测试及利用传递函数进行的多车振动数值计算分析,得到了彩塑在单车行走下的最大位移为 $3.40 \times 10^{-2} \mu\text{m}$,在五辆车纵列行走下的振动最大位移为 $1.32 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ 。

3) 根据彩塑残损情况和振动最大位移角 $2.24 \times 10^{-7} \text{ rad}$,提出了瞬时振动对晋祠泥质彩塑影响的判定等级,即基本完好(I级)、轻微破坏(II级)、中等破坏(III级)。相应的准则 I 级为泥质彩塑侧移量很小,承重构架完好;装饰发生少量轻微损坏,不经修缮,可以继续使用。II 级为泥质彩塑承重构架完好或轻微倾斜,局部轻微倾斜;振动侧移量稍大,彩饰有局部损坏或脱落,彩绘表面有轻微裂缝。III 级为泥质彩塑承重构架明显倾斜,局部倾斜严重,振动侧移量大,彩饰有大面积损坏、裂缝、脱落。

4) 根据疲劳损伤理论和振动测试结果,提出了持久振动对晋祠泥质彩塑损伤的判定准则:彩塑基本完好、轻微破坏、中等破坏等情况时不同保证率的彩塑极限位移角;根据晋祠泥质彩塑的现状损伤和其在振动时的瞬时位移极限角,提出了五个不同等级公路应有的避让距离 3200m、2400m、1800m、1200m、800m,并对晋祠周围的公路状况进行了判定,指出距圣母殿 80m 的四级公路黄古路,按现状车流量考虑,彩塑的可持续保存年代短,必须深入研究,采取对策。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家标准. 古建筑防工业振动技术规范[S]. GB/T 50452-2008 2008.
The Peoples republic of China Specification. Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration [S]. GB/T 50452-2008 2008.

[2] 太原理工大学古建筑结构研究室,晋祠博物馆. 晋祠博物馆重点保护文物在山腰公路交通扰动下的振动影响测试报告[R]. 2004.
Historical Building and Structure Research Branch, Taiyuan University of Technology; Jinci Museum. Effects of the vibration induced by the nearby road traffics on the relics in Jinci Museum [R]. 2004.

[3] 陈胜营,江亚于,张剑飞. 公路设计指南[M]. 北京:人民交通出版社 2000.
CHENG Sheng-yin, JIANG Ya-yu, ZHANG Jian-fei. . Guidance of road design [M]. Beijing: People's Transportation Publisher, 2000.

Influence of automobile-induced vibration on the colored Song Dynasty clay statues in the Sacred Lady Hall

LI Qing-ling¹, YU Zhen-long²

(1. Jin Ci Museum in Shanxi Province, Taiyuan 030025, China; 2. Shanxi province Education Bureau, Taiyuan 030082, China)

Abstract: Pulsation and vibration tests were carried out to assess the damage caused by automobile-induced vibrations on the colored clay statues in the Sacred Lady Hall in Shanxi province. Pulsation tests were used to obtain the fundamental frequency of vibration period, the damping ratio and the transfer function of the colored statues; single and multi automobile induced vibration tests were used to calculate the displacement of the statues under varying traffic volume. Based on the condition of the statues and their maximal displacement angles, preliminary rating scales and regulations of instant vibration's effect on the colored clay statues in the Sacred Lady Hall is proposed. Based on theory of fatigue damage and vibration test results, criteria for evaluation of effects of constant vibration on the colored clay statues are also proposed. Based on current state of damage to the statues and their maximal displacement angle under vibration, a minimum safe distance from the road is suggested. In addition, the road conditions around the Sacred Lady Hall have been surveyed.

Key words: Sacred Lady Hall; Colored Song Dynasty clay statues; Transportation vibration

(责任编辑 谢 燕)

• 通 讯 •

关于启用《期刊学术不端文献检测系统(AMLC)》的通知

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社开发的《期刊学术不端文献检测系统(AMLC)》以《中国学术文献网络出版总库》为全文比对数据库,可以对提交的论文与数据库内包含的几千万份已发表文献进行比对,对于文字完全重合的文字描红标出,最后进行总体统计并给出分析报告。

该系统能够对抄袭与剽窃、伪造、篡改等学术不端行为进行快速检测。

为进一步提高期刊办刊水平、确保稿件质量、杜绝学术不端行为、净化学术研究环境,本刊编辑部从即日起正式启用《期刊学术不端文献检测系统(AMLC)》,对所有来稿进行检测,进一步严格执行稿件初审制度。如发现有学术不端现象的稿件,将实行初审退稿,望广大作者支持本工作,特此通知。

《文物保护与考古科学》编辑部

2011年12月30日