

文章编号: 1000-4750(2007)Sup.II-0099-11

典型古建筑保护中的基础性问题研究

雷宏刚, *李铁英, 魏剑伟

(太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西, 太原 030024)

摘 要: 讨论了古建筑修缮原则中有关其结构方面的问题。整理 1:100 应县木塔比例模型风洞试验, 得到木塔开窗和闭窗两种状态的风压体型系数; 分析了木塔院区塔基土的工程物理性质和力学性质; 得出了木塔的基础结构状况。云冈石窟存在多种病害, 但最主要包括水害、裂隙发育和岩体崩塌、风化、环境污染, 对这些病害的防治与治理方法是此类文物建筑的长期重点研究与实施内容。平遥古城墙为土筑墙体, 年代久远, 自然、人为损伤不断, 坍塌时有发生, 计算分析了几类典型损伤导致的墙体破坏特点。

关键词: 古建筑修缮原则; 应县木塔; 风压体型系数; 云冈石窟; 石质建筑病害与防治; 平遥古城; 土坯结构损伤

中图分类号: TU36 文献标识码: A

RESEARCH ON THE BASIC PROBLEMS IN OLD BUILDING PROTECTION

LEI Hong-gang, *LI Tie-ying, WEI Jian-wei

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: The repairing principle problems of old building structures are discussed. The wind tunnel tests were carried out on 1:100 scale wooden tower model by selecting two wind speeds and two cases (window opened and closed), from which the octal wind pressure coefficient were derived. Consequently, the engineering physical property, mechanical property by specimen analyses, standard infiltrating tests and calm force touching surveying tests are obtained. The foundation composition and delamination composition of the tower courtyard foundation by resistivity tomography with surface electrode arrays are explored and attained. There are various diseases in Yungang Grottoes, including water harming, cracks and collapses of rock, the breeze causing and pollution of the environment. Thusly, a long-term research work is needed for the prevention and cure. The pingyao ancient city wall is a combination wall of the soil and brick. For the long age, there are collapsing affairs usually by nature and artificial hurting. In order to do the research, the wall-body breaking characteristics are gotten by computing several typical wall models.

Key words: the repair principle of old buildings; yingxian wooden tower; wind pressure coefficient; yungang stone caves; diseases and repair of stone buildings; pingyao old city-wall; soil structure hurting

古建筑是人类历史文明的重要组成部分, 山西现存 18000 多处古建筑, 被誉为“中国古代建筑宝库”。其中唐代建筑 4 座, 五代建筑 3 座, 宋代建

筑 55 座, 辽金建筑 88 座, 元代建筑 300 处, 明清建筑遍布全省。从北朝到民国, 代代有珍品。有现存最早的建于公元 782 年的五台南禅寺大殿, 现存

收稿日期: 2007-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50308016, 50678111); 山西省自然科学基金资助项目(20041019)

作者简介: 雷宏刚(1964), 男, 山西运城市人, 教授, 硕士, 副院长, 从事建筑物鉴定与加固研究;

*李铁英(1968), 男, 山西翼城人, 副教授, 博士, 土木系副系主任, 从事结构工程研究(E-mail: lty680412@163.com);

魏剑伟(1963), 男, 山西五台县人, 高工, 学士, 从事结构试验研究。

最早最大的殿堂式佛殿五台佛光寺东大殿(建于公元 857 年),五代十国时期唯一在北方建都的北汉仅存的平遥镇国寺万佛殿,有世界文化遗产平遥古城和云岗石窟,中国四大佛教圣地之首五台山,现存最大的悬空建筑浑源悬空寺,世界现存最高、最古老的全木结构楼阁式佛塔应县木塔等。在类别上,有宫廷府第建筑(衙署、殿堂、宅地等),防御守卫建筑(城墙、村堡、长城、关隘、烽火台等),纪念性和点缀性建筑(市楼、钟鼓楼、牌坊、影壁等),园囿建筑(花园、别墅等),陵墓建筑、宗教建筑(佛、道、儒、回教等),祭祀性建筑(文庙、武庙、祠宇等),娱乐性建筑(戏台、乐楼、舞楼等)。然而,千百年来的自然灾害、物理化学的侵蚀和人为因素,造成它们不同程度的损伤和破坏,对其安全评价、修缮保护涉及到建筑、结构、材料、化工、意识形态等诸多方面的内容。

1 古建筑修缮保护中的有关结构的几个原则问题

对于古建筑的修缮世界各国均遵从《威尼斯宪章》的规定,我国也于 1982 年颁布了《中华人民共和国文物保护法》,要求从风貌、结构、材质等方面保留历史的“可读性”,做到修旧如旧,并保持维修的可逆性。我国现行《古建筑木结构维护与加固技术规范》(GB50165—92)提出了部分检查评定或修缮设计的要求。本文仅就有关古建筑结构方面的原则进行探讨。

不改变古建筑原状的原则。古建筑的原状是它历史、艺术、科学价值的具体体现,是一定历史时期遗留下来的古建筑的规模、布局、结构、装饰、工艺手法、背景环境等所形成的建筑文化和建筑成就。历史上的茸补和恰当的变化部分,是反映古建筑的经历,即古建筑的历史记述和历史信息,是原状的丰富内容和可读史料。出于对古建筑安全可靠的考虑,有些改动比较大但是必要的,如提高古建筑抗震能力而增加斜撑(图 1)。但有些常见的修缮措施却未必有效,如铁件加固(图 2),因木材横纹受压的承载能力很弱,且其徐变性能十分突出,铁件的锈蚀速度是否考虑等,这些虽然貌似恰当的保护措施,却未必见效。因此在不改变古建筑原状的情况下其修缮保护是一项长期艰巨的科学任务。

不改变古建筑历史信息和可读性史料原则。古建筑都是经历了一定历史时期的建筑物,损伤难以

避免,因此在古建筑上常常看到几个不同时代的布局、结构、构造和附属文物,这是历史的变迁造成的,虽然不是文物建筑创建或重建时的原状,但都是经历了相当长的历史阶段保留至今的状态,其多数是有历史、艺术和科学价值的,不应随意拆除和改动。但在古建筑历史上拙劣的添建和修补,将贬低该建筑的环境风貌、造型结构和观者视觉。这二者是截然不同的两种情况,应科学辨析,区别对待。对于古建筑历史信息和可读性史料的保护涉及到认识问题和保护方法问题,如果危及到古建筑的安全存在,所说的信息和史料就要求研究适当的保护方法。



图 1 山西朔州崇福寺弥陀殿加斜撑提高墙体抗侧移刚度

Fig.1 The adding inclined support to raise the wall body anti-side moves ability of amitabha palace of shanxi shuozhou chunfu temple

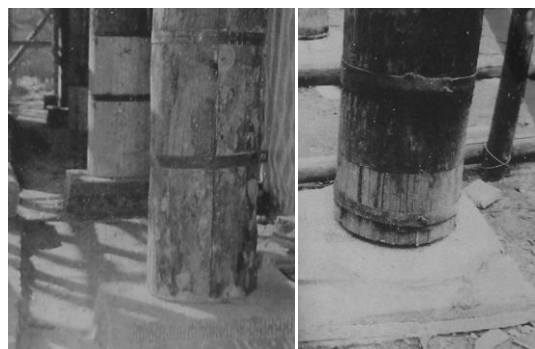


图 2 铁件加固腐朽劈裂的柱子

Fig.2 The iron piece to reinforce rotting and spliting pillar

保护和使用原构件的原则。古建筑都是由数以千计的构件组合而成,修缮中保护和使用原有构件,是保护古建筑原状和保持古建筑原真性的关键,劈裂者加固,残损者茸补。如大量更换原有构件,将使古建筑成为模型或重建的建筑了。对于单层和两层古建筑,新旧构件加固及新旧构件的搭配使用是可以的。但对于像应县木塔这样的高层古建筑,新旧构件的搭配现在存在诸多技术和科学问

题。因此保护和使用原构件的原则应区别不同的建筑而应用。

2 应县木塔

关于应县木塔的研究可见文献[1~10], 本部分内容可作为文献[10]的一个补充。

2.1 应县木塔风压体型系数测定^[4]

应县木塔已近千年历史, 其承载能力降低, 在大风作用下结构安全性受到重视。这里对应县木塔的风洞模型试验(图 3)的数据进行总结, 试验时, 考虑到木塔的对称性, 在五个面上(迎风面, 迎风斜面、侧面、背风斜面、背风面)布置了测点。每面又

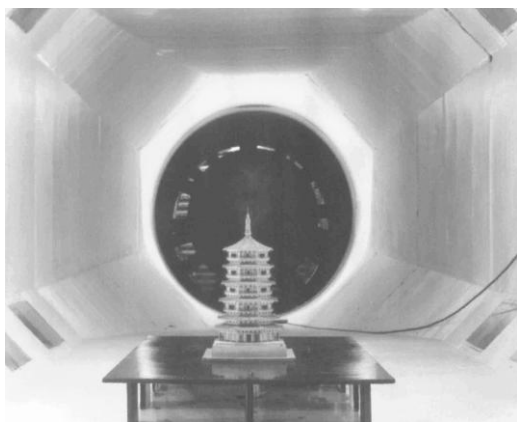


图 3 木塔风洞试验

Fig.3 View of the testy model

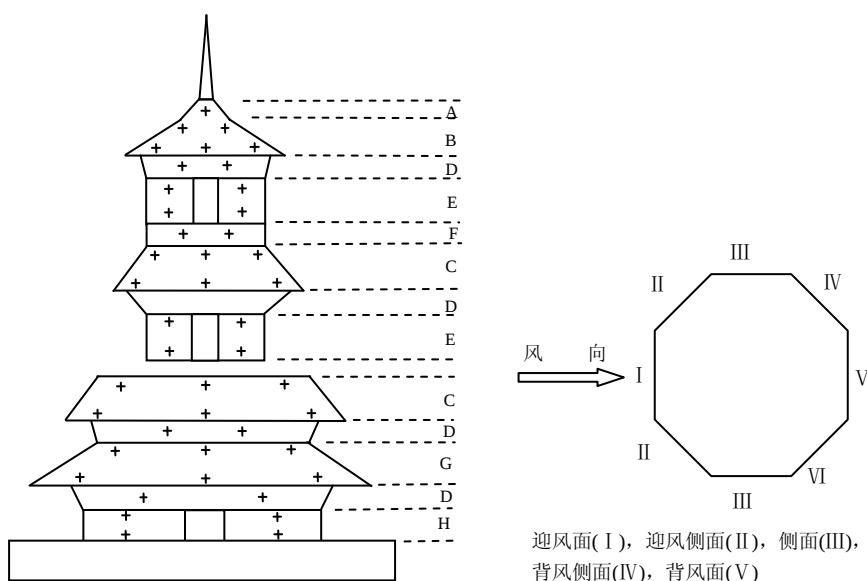


图 4 模型测压点布置及风向

Fig.4 Arrangement of pressure points on the model

划分为八种位置, 以 A、B、...、G、H 标注(图 4)。得出了各部位的风压体型系数(图 5), 考虑了不同风速和开闭窗状况对其的影响(图 6)。

2.2 应县木塔塔院地层分布及其物理力学性质

将塔院区地层分为 5 大类^[11]。第 I 层组为杂素填土。上部为杂填土, 色杂并有砖、瓦碎片, 木炭屑, 煤渣, 陶、瓷片和白灰渣等现代文化。杂填土中粉土充填, 土质松散。厚度 1.50m~3.40m。第 II 层组在塔院中分布不均, 厚度 0.40m~1.80m。第 III 层组主要是粉土、粉粘土和粉砂, 以浅黄褐色粉土为主, 夹褐黄、灰黄色粉粘土与褐黄色粉砂。厚度 21.80m~23.50m。第 IV 层组主要是粉土、粉粘土含砂, 厚度 9.80m~11.10m。第 V 层组主要包括粉粘土及粘土。综上所述, 该区地层除上部人工填土外, 下部地层随着深度的增加, 粘粒含量逐渐增多, 上部以粉土为主, 下部以粘性土为主。由于盆地外围陆源区的基岩成分关系, 地层中云母的含量一直较多。下部深色地层因沉积环境为湖相与湖沼相, 地层中的泥炭质和腐殖质增多, 且沉积物颗粒细腻, 有异味。在这些地层中夹薄层粉一中砂, 成分以长石、石英为主, 云母及暗色矿物次之, 为湖相或冲洪积物质。

这里整理出了木塔塔院区钻孔剖面(表 1)及塔基土的工程物理性质和力学性质、承载力(表 2)。

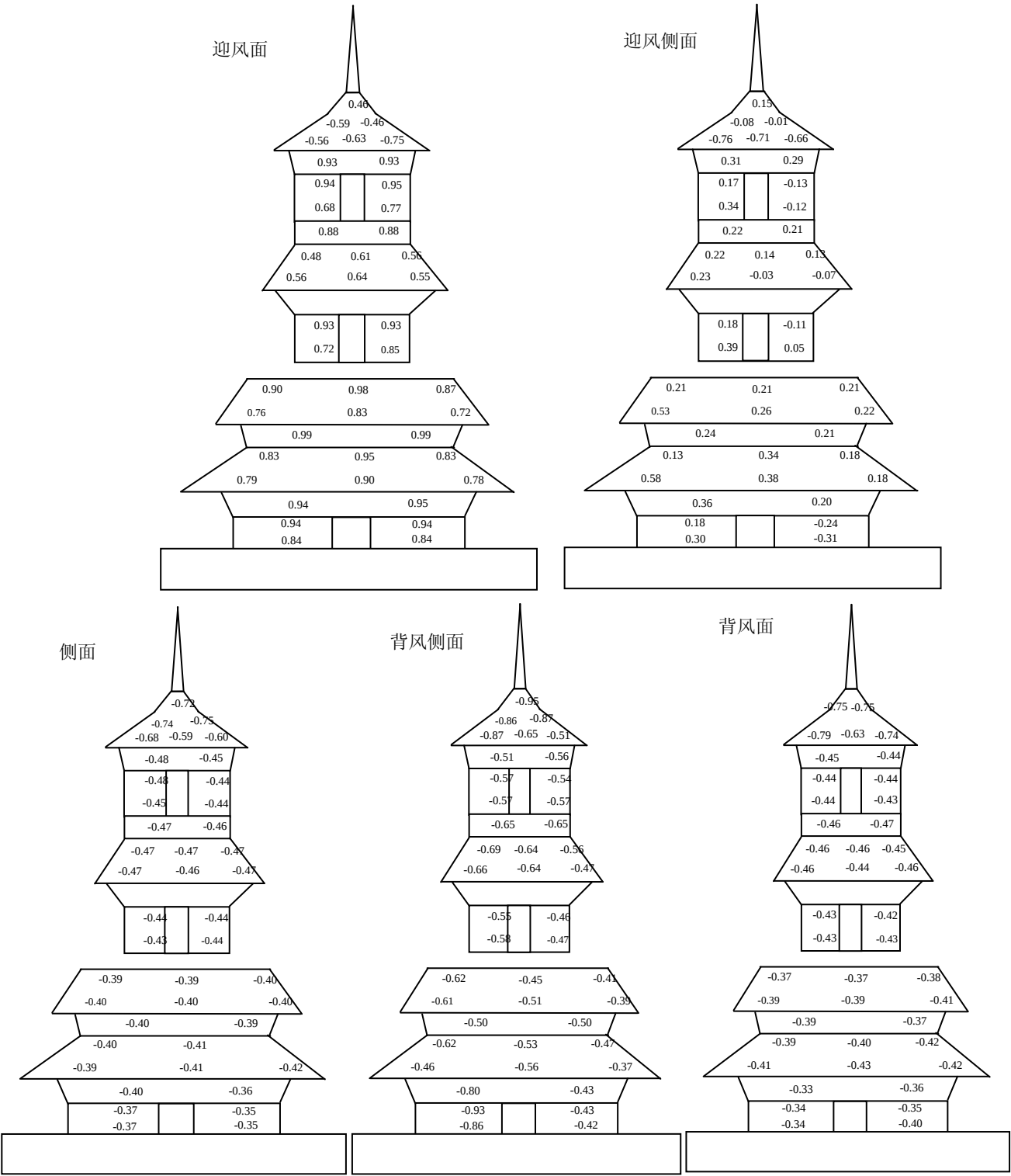


图 5 风速为 26.8m/s 时模型各测点压力系数

Fig.5 Pressure coefficient by wind tunnel on closing windows at wind speeds 26.8m/s for 5 facades

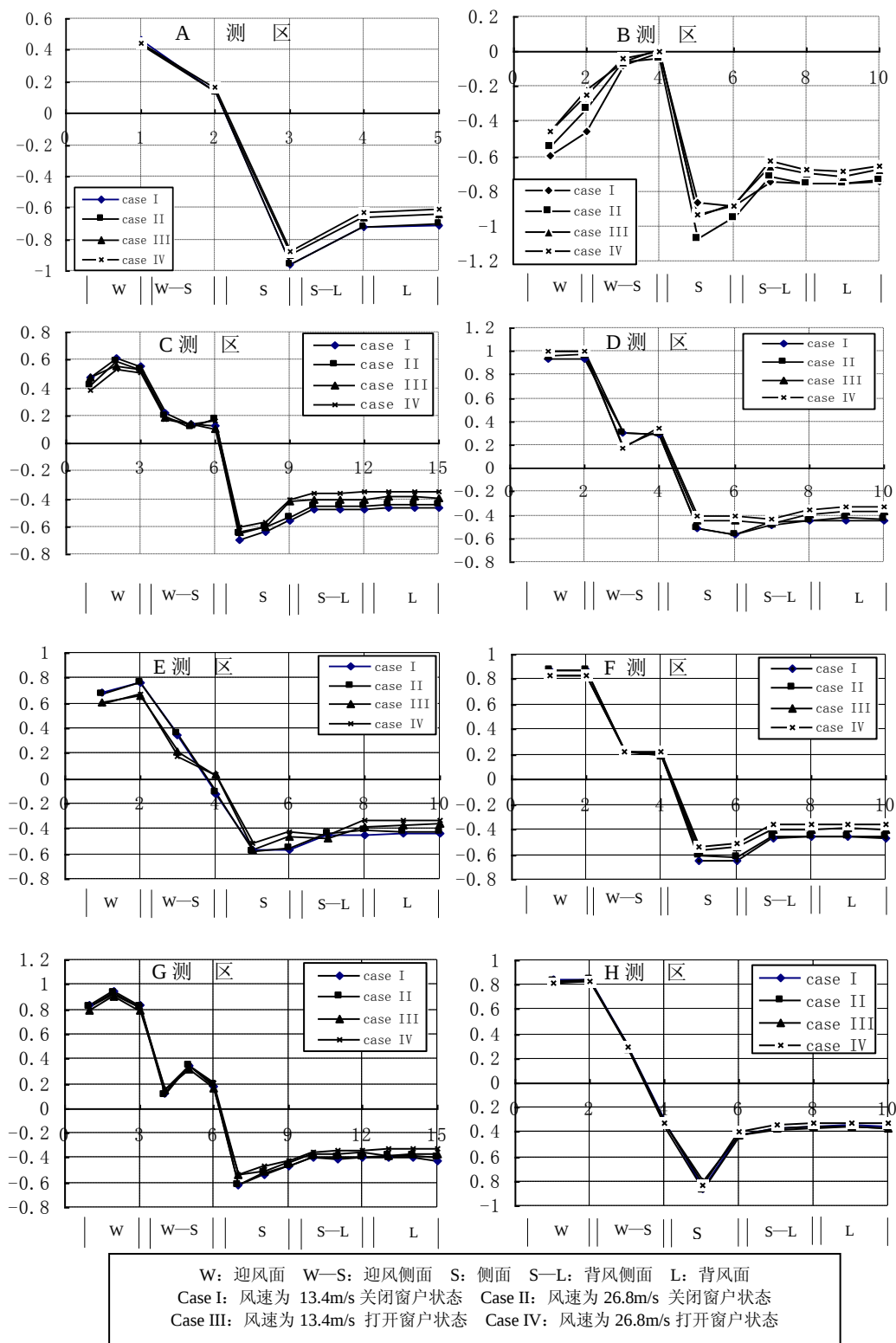


图6 四种不同状态下的风压系数

Fig.6 Profile of pressure coefficient by wind tunnel for four different cases

2.3 应县木塔阶基的内部结构^[12]

木塔上层阶基水平截面距阶基顶面 1m(距地面 2.6m), 其内部由内核区、加固层和保护层这 3 个圈层组成。近圆形的内核区坚硬均匀, 四周有明

显的放射状坍塌沟槽。中间一圈是加固层, 厚约 2m, 可能是后人对内核区进行维修所形成, 其外缘已经变成较好的圆形。最外一圈则是近代用回填土形成的保护层, 它的承载力相当弱。在基座内核

圈的中心偏南，即大佛莲花座正前缘处，发现一个直径约 2m 的圆形异常区，能使坚硬的内核区出现局部的松软，最可能是由人工活动引起的。

下层阶基水平截面距阶基顶面 2.8m(距地面 0.8m)，其层析图象显出了上层同样的内部结构。中间加固层的外直径 37m，刚好略大于上层八角形阶基直径约 36m 的范围。在坚实的内核区的中间

部位。它的水平位置刚好同上层的异常区重合，二者会有内在的沟通。据实验室对大量岩样吸收系数测定的结果，排除为花岗岩、石灰岩、砖瓦的可能性。目前只能用基座内部人工挖掘的洞室来解释。在基座内核区还有一个异常区，平面位置为大佛莲花座后边缘，可能是另一个人工洞室。

表 1 钻孔剖面
Table 1 Drilling section

I 号钻孔			II 号钻孔			III 号钻孔			IV 号钻孔		
孔深	地层厚度	主要岩性	孔深	地层厚度	主要岩性	孔深	地层厚度	主要岩性	孔深	地层厚度	主要岩性
0.00			0.00			0.00			0.00		人工填土
1.50	1.50	人工填土	3.20	3.20	人工填土	2.50	2.50	人工填土	3.40	3.40	黄褐色粉质粘土、粉砂
1.70	0.20	灰褐色淤泥质粉砂质土	6.07	2.87	灰色、土黄色粉砂质粘土	2.90	0.40	洪积粉质土	7.50	4.10	中细砂、粘砂质土、粘土
4.70	3.00	土黄色粉砂质粘土	6.39	0.32	浅灰黄色细砂	3.40	0.50	杂填土	10.30	2.80	土黄色粉砂、粉砂土及粘土
4.90	0.20	灰褐色粉细砂夹粉质土	7.16	0.77	土黄色粉质粘土	3.60	0.30	粉砂质土	11.75	1.45	褐黄色粉质土、粘土、粗砂粒
6.53	1.63	灰褐色细砂	8.21	1.05	浅暗红色粘土	4.60	1.00	土灰色粘土质砂	13.35	1.60	粉土与粘土互层
8.10	1.57	灰褐色粉细砂	8.30	0.09	土黄色粉土质砂	5.60	1.00	土黄色粉砂质土	17.73	4.38	粗砂粒、粉砂、灰褐色粘土
9.00	0.90	土黄色中细砂	9.40	1.10	土黄色粉质砂	7.00	1.40	土褐色粘土	24.20	6.47	蓝灰色粉土、黄色粉质粘土
12.00	3.00	土黄色粉砂质粘土	9.50	0.10	浅灰褐色细砂与粉细砂	10.87	3.87	浅土、红色粉质土与粉砂	30.05	5.85	
15.62	3.26	灰白、土黄相间的粉砂土	10.00	0.50	暗红色粘土	12.53	1.66	浅灰色细砂			
16.58	1.32	土灰色粉砂	10.70	0.70	灰肉红色粗砂粒	14.10	1.57	粘土、粉土、粉砂、细砂			
21.24	4.66	黄红色粘土	12.11	1.41	土黄色粉细砂	15.21	1.11	粉土、粉砂、中砂			
24.20	2.96	褐色粉土	12.24	0.13	土灰色细砂	16.24	1.03	粉土与粘土互层			
25.50	1.30	浅灰色中细砂	12.36	0.12	灰白色中砂	24.50	8.26	粉砂、粉土、粘土互层			
27.00	1.50	浅灰、褐灰色粉质土	13.92	1.56	褐色粉土质砂	29.90	5.40	粉砂、粘土、粉土			
30.40	3.40	浅灰色粉质粘土	16.54	2.62	土褐色粉质粘土	33.50	3.60	深褐色、微蓝色粉土			
35.10	4.70	浅灰色粉土	16.84	0.30	土褐色粉砂	36.50	3.00	浅褐灰色粉质粘土			
36.60	1.50	浅灰色粉土-粉粘土	20.70	3.86	暗红色粘土	40.78	4.28	蓝灰色粉质粘土			
40.00	3.40	蓝灰色粉质粘土	24.30	3.60	灰土，褐黄色粉质砂土	41.70	0.92	灰蓝色粉土、粘土			
40.60	0.60	灰白色粉土-粉粘土	24.80	0.50	浅黄绿色粘土	51.30	9.00	褐色粉土与粉粘土互层			
42.70	2.10	浅灰色、灰蓝色粉质粘土	26.30	1.50	蓝灰色粉细砂	55.75	4.45	褐灰色粉粘土			
43.60	0.90	灰色粉土	30.30	4.00	蓝灰色粉质粘土	59.40	3.65	蓝灰色粉质粘土			
50.60	7.00	褐灰色、灰色粉土-粘土				66.00	6.60	褐灰色粉土			
						78.00	12.00	褐灰色粉质粘土-粘土			

表 2 塔院地基土物理力学性质指标

Table 2 The mechanical property index of soil in the tower yard

地层 单元	范围值	物理力学性质指标										内聚力/ kPa	内摩 擦角
		含水量/(%)	天然状态 密度/(kN/m ³)	干燥状态 密度/(kN/m ³)	孔隙比	饱和度/(%)	液限/(%)	塑性指数	液性指数	压缩 系数/MPa ⁻¹	压缩 模量/MPa		
I	最大值	21.5	19.4	16.0	0.696	88.4	23.6	8.2	0.78				
	最小值	20.6	18.8	15.6	0.657	79.9	23.3	8.0	0.63				
II	最大值	23.7	20.2	16.6	0.777	93.1	25.0	9.0	0.99	0.25	7.17		
	最小值	21.4	18.4	14.9	0.643	82.4	22.7	7.6	0.68	0.23	7.00		
III	最大值	30.8	21.3	18.2	0.845	100.0	30.9	18.9	0.99	0.36	19.05	19	33.4
	最小值	14.8	18.7	14.4	0.491	76.7	18.3	1.9	<0.00	0.09	4.80	0	7.4
	最大值	27.3	27.3	18.7	0.775	100.0	39.7	17.7	0.85	0.41	29.85	60	43.2
	最小值	11.7	11.7	15.0	0.417	46.3	19.7	4.4	0.06	0.06	4.16	0	6.3
IV	最大值	28.6	28.6	17.8	0.794	98.0	37.9	16.7	0.78	0.33	13.10		
	最小值	17.1	17.1	14.9	0.560	86.5	22.3	7.5	0.29	0.11	4.90		
V	最大值	36.5	36.5	17.6	1.036	97.5	43.7	18.5	0.76	0.45	16.30		
	最小值	18.2	18.2	13.1	0.503	84.3	22.9	7.8	0.17	0.10	4.20		

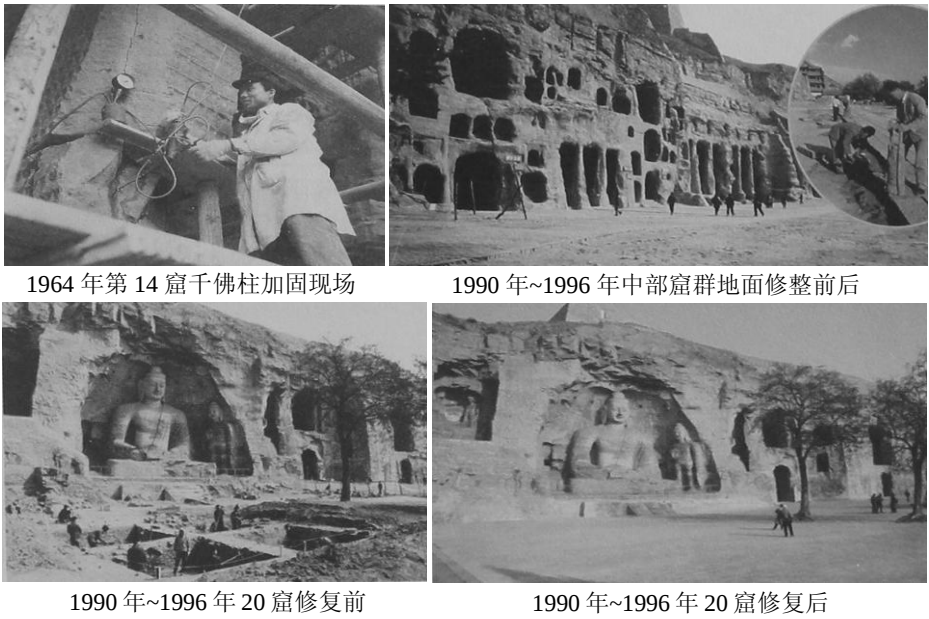
3 云冈石窟

云冈石窟始建于公元 460 年,位于山西省大同市西郊云冈镇。现存大小窟 252 个,石雕造像 51000 余尊。自然风化、人为因素造成洞窟和雕像有不同程度的损毁,多年来来进行过许多维修和保护(图 7)。

石冈石窟地理位置为东经 113°20", 北纬 40°04", 位于大同侏罗纪沉积盆地西缘。石窟位于波状起伏的低山丘陵区。保护区内出露的地层主要是中生界侏罗系云冈组 and 新生界第四系上更新统及个新统地层。其中侏罗系云冈组主要是云冈统上

部的一个砂岩透镜体,岩性为中粗粒长石砂岩夹有泥岩、砂质泥岩^[13]。石窟就雕刻在这一砂岩透镜体之上。

引起石质文物建筑破坏的原因很多,涉及范围广而且复杂,破坏的类型也很多,总的来说,可以分为两个大类:一类是由于自然界各种营力的作用引起的病害,如石雕溶蚀、风化剥蚀、渗水、崩塌等;另一类是由于人类活动引起自然环境的改变,在改变后的自然环境营力作用下,引起原有病害的加剧或诱发新的文物环境蚀变等。



1964 年第 14 窟千佛柱加固现场

1990 年~1996 年中部窟群地面修整前后

1990 年~1996 年 20 窟修复前

1990 年~1996 年 20 窟修复后

图 7 云冈石窟的残损及修复

Fig.7 The harm and repair of yungang stone caves

3.1 云冈石窟主要病害

云冈石窟石雕文物存在多种病害,但最主要包括水害、裂隙发育和岩体崩塌、风化、环境污染^[14~16]。

除降水可以直接对石窟建筑表面冲刷之外,更为严重的是石窟顶雨水通过岩体裂隙或砂岩层理渗入洞窟之中,使洞窟北壁大面积潮湿或直接渗流。这种形式的水是目前影响云冈石窟石雕保存的最严重的因素之一,是云冈石窟北壁大量精美雕刻严重风化的原因。这种形式的水不仅影响面广,而且治理起来十分复杂。

云冈石窟开凿在十里河北岸的武周山南麓陡峻的边坡岩体之上,由于卸荷作用发育岸边卸荷裂隙。这类裂隙走向平行于崖壁走向,倾向与边坡一致,倾角等于或略大于坡角,构成了石窟寺所在岩体失稳的滑移面和崩落破坏面。岩体中普遍存在的构造裂隙、风化裂隙、层面、断裂面或软弱夹层等结构面与岸边卸荷裂隙等互相切割,使石窟岩体形成了变形、滑移、错落、坠落的分离体,导致石窟边坡岩体的破坏。此外,由于洞窟岩体内各种类型的裂隙发育和交切,为水的入渗和渗流,石雕表面盐类的运移和积聚提供了良好的通道,危及文物建筑。

云冈石窟文物的风化主要是物理、化学两种。物理风化对石雕的破坏主要有太阳紫外线的辐射、温度与湿度的变化使表层中水与气体体积的热变化;干湿交替使各种矿物质产生不同的胀缩,组成岩石的颗粒物质之间联接遭到破坏,以至成为松散破碎状态。随着破碎程度的增加,岩石的物理力学性质也相应发生变化,岩石的孔隙度,表面积相应增加,密度、比重等相应减少。同样地,由于岩石比热较小,组成岩石的各种矿物具有各不相同的膨胀系数,在太阳辐射热的影响下,岩石各部分温度升降,体积膨胀不一致,因而在岩石内部产生压应力和张应力,应力长期交变作用的结果削弱了矿物颗粒间的联结而发生破碎。石雕表面聚集的含结晶水盐类,在干燥环境中失去或减少结晶水,体积收缩,形成粉末,当处于低温或高温环境时又吸水膨胀,结晶时产生压力,加速了矿物颗粒间连接的破坏和裂隙的扩张。

化学风化主要有溶解、水化、水解、氧化和硫化等方式。水解作用主要表现在砂岩中的正长石,吸水形成高岭石及铝矾土的分解过程。

由于大同的空气污染主要是煤烟型污染,云冈地区的环境监测也表明,空气中 SO_2 的含量严重超标。而云冈砂岩中的胶结物中含有大量的 CaCO_3 ,在水的参与下,胶结物发生变化,失去了胶结作用,致使石质文物表面产生严重的风化。硫化作用的主要机理是含有 CO_2 、 SO_2 的雨水渗透或冲刷石雕表面时,在酸性环境中,砂岩的钙质胶结物发生变化,形成硫酸钙。而硫酸钙中结晶水的含量又与温度变化有着密切的关系。在常温下,硬石膏水化成石膏时,体积增大 31%,产生 0.15MPa 的膨胀压力,极易把酥松岩石胀裂,形成片状剥落或粉末状脱落。云冈地区最主要污染物除 SO_2 外还有煤尘。大量的煤尘降落至石雕表面,不仅严重地影响其美观,成为世人所说的“卖碳翁”形象,而且粉尘对 SO_2 气体和水的吸附,进一步加速了 SO_2 气体对石质文物表面的影响。

3.2 云冈石窟的主要病害治理

解决降水对石雕的影响通常采用修建保护性窟檐的方法。窟檐的修建,既可以解决雨水对文物的直接冲刷的问题,又可以防止日晒,同时可以使洞窟内保持相对恒定的温度和湿度,利于石质文物的保存。雨水通过岩体裂隙或砂岩层理渗入洞窟之中治理起来十分复杂。

20 世纪 70 年代以来,文物保护工作者针对裂隙及岩体崩塌的问题,采用环氧树脂进行裂隙灌浆及锚杆加固的方法,基本上解决了整个洞窟的稳定性,但雕刻局部的开裂等问题仍不同程度地存在,需要有针对性地进一步开展研究及保护工作。

关于风化石雕的保护问题,目前国内均采用一定的化学材料(包括憎水与加固两种作用)喷涂在风化石雕表面,从而提高其强度及抗风化能力,减缓石雕的进一步风化速度。多年来,国内外学者曾就云冈石窟风化问题进行了大量试验,其中主要有丙烯酸类和有机硅类材料。但由于云冈砂岩的特殊性和所处环境的特殊性,目前为止还没有一种可以满足云冈石窟防风化要求的材料。

为了解决环境污染问题,国家实施了 109 国道云冈段的改线工程和旅游专线的修建工作;实施云冈村的搬迁及云冈石窟周边环境的综合治理。目前,云冈石窟周边的环境质量已有极大的改观。

4 平遥古城

平遥古城,又称“龟城”,历经沧桑而古朴宛

然, 风姿依旧, 是中国境内保存最为完整的一座古代县城。整座城墙由墙身、马面、垛口、城门、瓮城等构成。城门六道, 南北各一, 东西各二, 城门都建有重门瓮城。城墙顶部的附属物包括敌楼、角楼、城楼。城内有马道, 城外有护城河。古城墙东、西、北三面俱直, 惟南墙随柳根河蜿蜒而筑, 形如龟状, 墙高约 10m, 底宽约 8m~12m, 顶宽约 3m~6m。城墙内墙以素土夯筑, 外墙青砖包砌。平遥古城墙的原有的平面简图见图 8。



图 8 平遥古城墙平面简图

Fig.8 Pingyao old city

4.1 平遥城墙结构及现状

城墙主体为夯土墙结构, 外墙为砌砖围护, 砖墙下部厚度约为 800mm~1000mm, 上部厚度约为 500mm, 城墙顶部铺有慢砖, 外侧有挡马墙, 高约 1500mm~2000mm, 内侧有女儿墙, 高约 200mm~500mm, 内墙面设有砖砌水槽, 沿城墙共有 118 个。

由于古城墙结构为夯土的自立结构, 其破坏的主要形式为夯土结构的滑移或倒塌。城墙建设年代久远, 历史上曾进行过多次维修, 部分外墙砌砖风化缺损严重, 文革时期在内部大量修筑防空洞, 内部夯土结构多处松散, 马面、瓮城等间隔分布, 各段城墙土性差异大, 历代维修情况不同, 维护结构完好程度相差甚大, 内部空洞纵横交错, 土层分层、雨水浸入, 外包砖风化等。图 9 为 1979 年时的残损及维修状况。

古城墙地貌单元属山前倾斜平原, 自然地形东北高西南低, 内外城墙地面局部高差较大, 由于人工取土等原因, 南墙自然地质环境受到一般性破坏, 地面呈现凹凸现象, 局部已成为附近居民排泄污水的积水坑。场区位于太原新生带断陷盆地东南部倾斜平原中部的平遥——侯城断凹, 新构造运动

较为强烈, 是太原盆地重要的全新活动性断裂之一。



北门瓮城里门洞维修现场



外墙马面残损状况



北墙内侧夯土残损状况



外墙局部坍塌状况



北墙内侧夯土维修

图 9 1979 年时的残损和随后的维修状况

Fig.9 The harm and Repair condition of 1979

根据勘探揭露,场地地基土主要由洪积成因的第四系全新统(Q4)及上更新统(Q3)松散堆积物构成,地层岩性为粉土、粉质粘土及粉细砂等。古城墙的东南部和西南部局部场地具湿陷性,天然地基按 I 级(轻微)非自重湿陷性土地考虑。湿陷的土层仅为上部不等厚度的素填土和部分粉土,一般湿陷深度 3.0m~3.5m,最大深度不大于 5.0m。地下水位埋藏较深,局部在 12m~14m 左右呈现饱和状态,尚未形成连续的稳定水位,可能系上层滞水。平遥古城属温带大陆性季风半干旱气候,四季分明,气候温和。平均气温 9.6℃左右,常年最热月为 7 月,月平均气温 24.5℃;最冷月为 1 月,月平均气温为-5℃。年均相对湿度 58%,年均降水量为 439mm。比较干燥的气候环境,为古城各种建筑物千年不塌提供了良好的自然条件。但由于构造上的原因,现在时有局部损坏,见图 10。

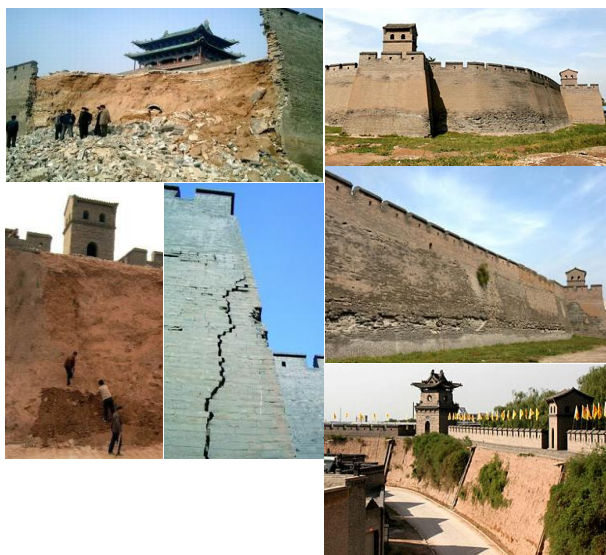


图 10 古城墙现在的残损和破坏状况

Fig.10 The harm and break of old city wall

4.2 平遥城墙计算分析

分析的重点为产生不均匀沉降和芯墙进水土质劣化两种不利因素,考虑新旧土层的差异、墙体高度及坡度、土体劣化、墙体内孔洞、砌砖与夯土间填筑情况、砌体强度等情况进行计算分析。

由计算结果看^[17],城门结构对不均匀沉降非常敏感。在各跨的拱角处和砖墩的角部区域产生了明显的局部应力集中,当沉降差超过 1.2mm 时,个别位置局部主拉应力超过材料抗拉强度允许值,可能出现裂缝,当超过 7mm 时,主拉应力超过材料抗拉强度允许值的范围较多,可能多处出现裂

缝。经对城墙的综合计算可以看出:正常情况下的城墙是安全的;新旧夯土性质差异,将使城墙稳定性降低;在分层的情况下,考虑孔洞的影响,城墙稳定系数降低;上部土体在渗水情况下强度降低,砌体严重粉化、缺损后,城墙稳定系数降低。

从计算结果可以看出^[17],空洞、土体渗水、夯土不密实等因素对墙体稳定影响非常大,外墙砌砖对城墙稳定直接影响不大,但墙砖破损造成雨水浸入会极大降低土体抗剪强度,由计算结果可知,按照现场取样结果测得的土体参数计算,城墙稳定系数为 1.15,但若考虑土体的离散性及雨季的不利影响,安全裕度则可降至 1.0 以下,非常危险。见图 11。

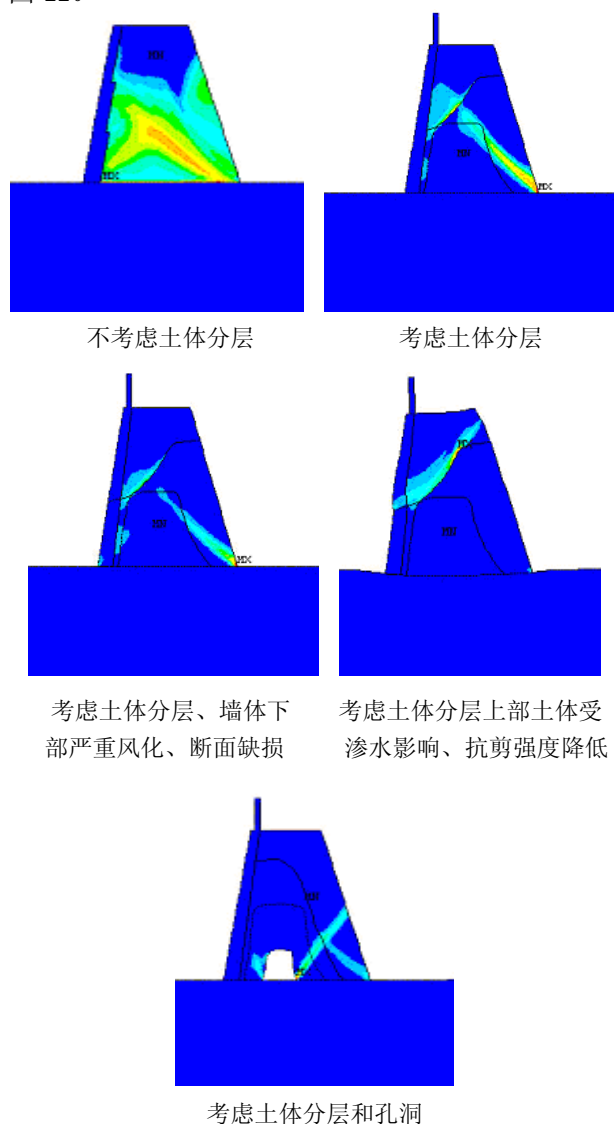


图 11 不同情况下的墙体塑性区发展及滑动面

Fig.11 The plastic and glide area of wall under different condition

5 结语

古建筑保护是一个复杂的系统工程,需要多学科联合攻关方能有效。山西的古建筑量大面广,倍受关注,更有大力开展研究的必要。古建筑保护中的基础性问题,特别是结构方面的问题直接关系到古建筑的安全和稳定性。今后,一方面要重视古建筑结构研究方法,探求真实的受力特点;另一方面应重视结构维修与加固技术的研究,尤其是新旧材料、构件等之间的协同工作机理。

参考文献:

- [1] 陈明达. 应县木塔[M]. 北京: 文物出版社, 1966.
Chen Mingda. Yingxian wooden tower [M]. Beijing: Cultural Relic Press, 1966. (in Chinese)
- [2] 太原工学院, 山西省文物局. 应县木塔木材取样试验报告[R]. 山西: 太原工学院, 1979.
Taiyuan engineering college, Shanxi department of cultural relic. Timber sampling test report of yingxian wooden tower [R]. Shanxi: Taiyuan Engineering College, 1979. (in Chinese)
- [3] 李世温, 王晋生. 应县木塔抗震性能研究[R]. 山西: 太原工业大学, 1996.
Li Shiwen, Wang Jinsheng. Anti-seismic research on yingxian wooden tower [R]. Shanxi: Taiyuan Engineering University, 1996. (in Chinese)
- [4] 李世温, 陈正廷. 应县木塔荷载研究[R]. 山西: 太原理工大学, 2000.
Li Shiwen, Chen Zhengting. Load research on yingxian wooden tower [R]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2000.
- [5] 李世温, 李庆玲. 中国建筑——应县木塔[M]. 台北: 锦绣出版事业股份有限公司, 2002.
Li Shiwen, Li Qingling. Chinese architecture——Yingxian woodentower [M]. Taipei: Jingxiu Press. 2002. (in Chinese)
- [6] 李铁英, 魏剑伟, 李世温, 张善元. 古木塔场地抗震性能评价及地震参数选择[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 660~662.
Li Tieying, Wei Jianwei, Li Shiwen, Zhang Shanyuan. Estimating of aseismatic property and selection of seismic parameter of old wooden tower ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 660~662. (in Chinese)
- [7] 李铁英, 魏剑伟, 李世温, 张善元. 木结构双参数地震损坏准则及应县木塔地震反应评价[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 91~98.
Li Tieying, Wei Jianwei, Li Shiwen, Zhang Shanyuan. Double-parameters seismic damage criterion on wooden structure and seismic reaction appraisalment on Yingxian wooden tower [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 91~98. (in Chinese)
- [8] 李铁英, 魏剑伟, 李世温, 张善元. 应县木塔实体结构的动态特性试验与分析[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 141~146.
Li Tieying, Wei Jianwei, Li Shiwen, Zhang Shanyuan. Experiment and analysis of vibration characteristics of yingxian wooden tower [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 141~146. (in Chinese)
- [9] 李铁英, 魏剑伟, 李世温, 张善元. 高层古建筑木结构——应县木塔现状结构评价[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 51~58.
Li Tieying, Wei Jianwei, Li Shiwen, Zhang Shanyuan. Appraisal on the structure of the Yingxian wooden tower [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2): 51~58. (in Chinese)
- [10] 李铁英, 秦慧敏. 应县木塔现状结构残损分析及修缮探讨[J]. 工程力学, 2005, 22(增): 199~212.
Li Tieying, Qin Huimin. Structural analysis and repair of Yingxian wooden tower [J]. Engineering Mechanics, 2005, S22: 199~212. (in Chinese)
- [11] 陈国顺, 贾蕾, 郭文生, 王宏力. 山西应县木塔环境地质及活动断层的研究[J]. 山西地震, 1998, 15(3/4): 60~71.
Chen Guoshun, Jia Lei, Guo Wensheng, Wang Hongli. The research of Shanxi Yingxian wooden tower environment geology and the layer activity [J]. Earthquake Research in Shanxi, 1998, 15(3/4): 60~71. (in Chinese)
- [12] 冯锐, 阎维彰, 冯国政, 陶裕录. 层析技术用于考古——山西应县木塔的基础结构[J]. 地震学报, 1998, 20(2): 201~209.
Feng Rui, Yan Weizhang, Feng Guozheng, Tao Yulu. Archaeological investigation by geotomography: structure of the foundation of Yingxian timber pagoda [J]. Acta Seismol Sin, 1998, 20(2): 201~209. (in Chinese)
- [13] 黄继中. 云冈石窟地质特征研究[J]. 文物保护, 2003, 12(5): 91~93.
Huang Jizhong. The geology characters of Yungang Grottoes [J]. Conservation of Cultural Object, 2003, 12(5): 91~93. (in Chinese)
- [14] 张红梅, 马国栋, 速宝玉. 大同云岗石窟文物渗水病害防治方案探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004, 11(5): 64~67.
Zhang Hongmei, Ma Guodong, Su Baoyu. A discussion of the treatment of water disease of the stone carvings in the Yungang grotto near Datong [J]. Hydrology Geology and Engineering Geology, 2004, 11(5): 64~67. (in Chinese)
- [15] 黄继中, 张俊芳. 粉尘对云冈石窟石雕影响的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2004, 16(1): 1~7.
Huang Jizhong, Zhang Junfang. Influence of airborne particles on the stone sculptures of Yungang Grottoes [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2004, 16(1): 1~7. (in Chinese)
- [16] 黄继中. 云冈石窟主要病害及治理[J]. 雁北师范学院学报, 2003, 19(5): 57~59.
Huang Jizhong. Main damages and preservation of the Yungang Crottoes [J]. Journal of Yanbei Normal University, 2003, 19(5): 57~59. (in Chinese)
- [17] 雷宏刚, 魏旺栓. 平遥古城墙安全性分析与加固技术研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2006.
Lei Honggang, Wei Wangshuan. The safety analysis and reinforcing technique research on pingyao old city-wall [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2006. (in Chinese)